

Raport serii PRE²²..... / 2003

Radosław Tatko

**Wpływ drgań podłoża gruntowego
na poziome parcia materiału
sypkiego na ściany silosu**

Praca doktorska pisana pod kierunkiem:
dr hab. inż. Sylwestra Kobiela, prof. P.Wr.

SPIS TREŚCI:

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	4
1. WSTĘP	5
2. ZAKRES, CEL I TEZY PRACY	7
2.1 ZAKRES I CEL PRACY	7
2.2 TEZY PRACY	8
3. STAN WIEDZY	9
3.1 TRZĘSIENIA ZIEMI I WSTRZĄSY PARASEJSMICZNE	9
3.1.1 Trzęsienia ziemi	9
3.1.2 Wstrząsy parasejsmiczne	10
3.1.3 Trzęsienia ziemi a wstrząsy parasejsmiczne	11
3.2 METODY OBLICZEŃ KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH OBCIĄŻONYCH WSTRZĄSAMI ...	12
3.3 NORMY PROJEKTOWE SIŁOSÓW NA TERENACH SEJSMICZNYCH	14
3.4 PRZEGLĄD PRAC TEORETYCZNYCH	16
3.4.1 Związki konstytutywne materiału sypkiego	17
3.4.1.1 Modele sprężyste	18
3.4.1.2 Modele niesprężyste	19
3.4.1.3 Modele sprężysto-plastyczne	20
3.4.1.4 Modele typu przyrostowego	24
3.4.1.5 Modele polarne	24
3.4.2 Silosy poddane wstrząsom podłoża	25
3.4.2.1 Silos poddany trzęsieniu ziemi – numeryczny model trójwymiarowy Brauna i Eibla	25
3.4.2.2 Silos poddany trzęsieniu ziemi – numeryczny dwuwymiarowy model belki ścinanej Hardina, Bucklina i Rossa	27
3.4.2.3 Silos poddany harmonicznym wstrząsom podłoża – przestrzenny model analityczny Younana i Veletsosa	33
3.4.2.4 Silos poddany wstrząsom podłoża – modele analityczne belki ścinanej Van Wijka	37
3.4.2.5 Silosy poddane wstrząsom parasejsmicznym – przestrzenne modele numeryczne Ciesielskiego i Dulińskiej	41
3.5 PRZEGLĄD PRAC DOŚWIADCZALNYCH	44
3.5.1 Badania laboratoryjne cech fizyko-mechanicznych materiałów sypkich	44
3.5.2 Badania laboratoryjne silosów obciążonych dynamicznie	51
3.5.2.1 Badania modelowe żelbetowego silosu klepkowego poddanego wstrząsom sejsmicznym	51
3.5.2.2 Badania modelowe silosu na węgiel poddanego wstrząsom sejsmicznym	53
3.6 WNIOSKI Z LITERATURY	54
4. PARCIE MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SIŁOSU, SPOWODOWANE WSTRZĄSAM PODŁOŻA – BADANIA LABORATORYJNE	58
4.1 CEL BADAŃ	58
4.2 STANOWISKO BADAWCZE I PROGRAM BADAŃ	58
4.3 ANALIZA WYMIAROWA BADAŃ MODELOWYCH	64
4.4 WYNIKI BADAŃ	68
4.4.1 Parcia statyczne	68
4.4.2 Przebieg w czasie parć materiału sypkiego na ściany silosu	69
4.4.2.1 Parcia materiału sypkiego na ściany silosu – seria P	69
4.4.2.2 Parcia materiału sypkiego na ściany silosu – seria S	84
4.5 DYNAMICZNE WŁAŚCIWOŚCI UKŁADU: SIŁOS – MATERIAŁ SYPKI	99
4.6 ANALIZA ZMIAN W CZASIE PARĆ MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SIŁOSU	102

4.6.1 Podział parć dynamicznych na parcia końcowe i krótkotrwałe parcia cykliczne – teza 1	102
4.6.2 Charakter zmian krótkotrwałych parć cyklicznych – teza 2	106
4.7 ROZKŁAD POZIOMYCH PARĆ MATERIAŁU SYPKIEGO NA WYSOKOŚCI SILOSU – TEZA 3	108
4.8 ZALEŻNOŚĆ: ŚREDNIE POZIOME PARCIA DYNAMICZNE – AMPLITUDA PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ PODŁOŻA – TEZA 4	113
4.9 WPŁYW SZTYWNOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO NA DYNAMICZNE PARCIA MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU – TEZA 5	114
4.10 WNIOSKI Z BADAŃ	115
5. PARCIE MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU, SPOWODOWANE WSTRZĄSAMI PODŁOŻA – WŁASNE ROZWIĄZANIE ANALITYCZNE	117
5.1 MODEL WARSTWOWEJ BELKI ŚCINANEJ O LINIOWYM ROZKŁADZIE MAS	117
5.2 PRZYKŁAD LICZBOWY	122
5.3 PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ WŁASNYCH Z ANALIZAMI INNYCH AUTORÓW ...	124
5.4 WNIOSKI	126
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	128
LITERATURA	130

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a	– przyspieszenie
d_w	– bezwymiarowa miera odkształcalności ścian silosu
g	– przyspieszenie ziemskie
h	– grubość ściany komory silosu
k	– współczynnik sejsmiczny
m	– masa
p_h	– poziome parcie materiału sypkiego na ściany silosu
Δp_h	– poziome dynamiczne parcie materiału sypkiego na ściany silosu
$p_{h,dyn}$	– poziome dynamiczne parcie materiału sypkiego na ściany silosu
s_M	– stosunek mas konstrukcji silosu i materiału sypkiego
t	– czas
u	– przemieszczenie
$\ddot{u}_a$	– przyspieszenie układu wywołane wstrząsem gruntu
$\ddot{u}_g$	– przyspieszenie powierzchni gruntu
A	– przyspieszenie
C_x	– dynamiczny współczynnik podłoża
D	– średnica komory silosu
G	– moduł odkształcalności postaciowej
H	– wysokość silosu
R	– promień komory silosu
S_d	– przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi
β_n	– n -ty pierwiastek funkcji Bessela $J_{0.5}$ pierwszego rodzaju
ω	– częstość kątowna drgań własnych
ω_g	– częstość kątowna drgań gruntu
ν	– współczynnik Poissona
τ	– naprężenia ścinające
γ	– odkształcenie postaciowe, współczynnik tłumienia krytycznego
ρ_k	– gęstość objętościowa materiału konstrukcyjnego ściany silosu
ρ_m	– gęstość objętościowa materiału sypkiego
φ_s	– kąt tarcia materiału sypkiego o ścianę silosu
φ_w	– kąt tarcia wewnętrznego materiału sypkiego
ϕ_n	– n -ta funkcja postaci drgań własnych
ξ	– bezwymiarowa współrzędna wysokościowa
ψ	– współczynnik rozproszenia energii drgań

1. WSTĘP

Problem zmian rozkładu parć poziomych materiału sypkiego na ściany silosu wywołanych wstrząsami podłoża dotyczy przede wszystkim silosów wznoszonych na terenach o podwyższonej aktywności sejsmicznej oraz w strefach wpływów parasejsmicznych, czyli terenów zagrożonych występowaniem drgań podłoża wywołanych działalnością człowieka.

Pomimo stałego zainteresowania inżynierią antysejsmiczną na świecie opublikowano do dziś niewiele prac, dotyczących wpływu trzęsień ziemi na zachowanie się silosów i materiałów sypkich w nich składowanych, np.: [6, 21, 50, 51, 62, 65, 66]. Rezultaty prezentowanych w tych pracach analiz nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytania dotyczące rozkładów poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu spowodowanych wstrząsami podłoża. Rozbieżności dotychczasowych wyników badań zilustrowano na rysunku 3.47 w postaci znormalizowanych rozkładów parć dynamicznych uzyskanych z badań analitycznych [65], numerycznych [6] i doświadczalnych [51] oraz wytycznych Eurokodu [17].

W ostatnich latach w Polsce coraz większy nacisk kładzie się na projektowanie obiektów budowlanych odpornych na działanie wstrząsów parasejsmicznych. Wstrząsy te w odróżnieniu od trzęsień ziemi nie stanowią bezpośredniego zagrożenia życia ludzi, często jednak wpływają niekorzystnie na ich samopoczucie oraz na właściwą pracę urządzeń znajdujących się w strefie wpływu czy na niezawodność konstrukcji budowlanej. Jednak prac, które bezpo-

średnio dotyczą oceny wpływu wstrząsów parasejsmicznych na układ: konstrukcja silosu – materiał sypki, jest stosunkowo niewiele, np.: [7, 8, 9], a prezentowane w nich analizy pomijają zagadnienia związane ze zmianami parć materiału na ściany silosu, traktując ośrodek wypełniający jako źródło obciążenia masowego, niezależnego od zewnętrznych obciążeń dynamicznych działających na analizowany układ.

Praca niniejsza stanowi próbę wypełnienia luki w stanie wiedzy z zakresu zachowania się układu: konstrukcja silosu – materiał sypki poddanego działaniu obciążeń dynamicznych pochodzenia sejsmicznego czy parasejsmicznego. Szczególny nacisk położono na temat zależności między wstrząsami podłoża, a ich skutkami w postaci dynamicznych parć materiału na ściany silosu.

2. ZAKRES, CEL I TEZY PRACY

2.1. ZAKRES I CEL PRACY

Praca niniejsza podzielona została na dwie zasadnicze części:

- Doświadczalną, zawartą w rozdziale 4, w której przedstawiono wyniki badań modelowych płaskodennego silosu cylindrycznego, poddanego poziomym obciążeniom dynamicznym, przeprowadzonych w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Głównym celem tej części pracy jest rejestracja i opis zmian poziomych dynamicznych parć materiału sypkiego na ściany silosu, zachodzących w czasie poziomych wstrząsów podłoża gruntowego. Wyniki badań laboratoryjnych posłużyły do określenia zależności między poziomą amplitudą przyspieszeń drgań podłoża, a średnimi parciami dynamicznymi.
- Analityczną, zawartą w rozdziale 5, w której przedstawiono metodę obliczeń rozkładu maksymalnych dynamicznych parć poziomych materiału sypkiego na ściany silosu opartej na modelu belki ścinanej z zastosowaniem metody spektrum odpowiedzi, mającym częste zastosowanie w obliczeniach konstrukcji budowlanych poddanych wpływom sejsmicznym [20, 31, 62, 65, 66]. Celem, jaki postawiono w części teoretycznej pracy, jest opracowanie prostego, uwzględniającego wpływ niewielkiej liczby kluczowych danych wejściowych i przydatnego, z punktu widzenia praktyki inżynierskiej, sposobu wyznaczania rozkładu maksymalnych poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu powstających pod wpływem wstrząsów podłoża.

Ponadto, w rozdziale 3, przedstawiono omówienie stanu wiedzy dotyczącego zagadnień związanych z tematem niniejszej pracy, zaczynając od porównania wstrząsów sejsmicznych i parasejsmicznych, przedstawienia metod obliczeniowych konstrukcji budowlanych poddanych obciążeniom dynamicznym, omówienia przepisów normowych dotyczących projektowania silosów wznoszonych na terenach sejsmicznych, kończąc zaś na przedstawieniu kluczowych prac teoretycznych oraz wyników badań doświadczalnych innych autorów. Rozdział ten zakończono wnioskami, będącymi podstawą do podjęcia własnych prac badawczych i postawienia tezy pracy.

2.2. TEZY PRACY

- TEZA 1: Wstrząsy podłoża gruntowego są przyczyną dwojakiego rodzaju zmian poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu: zmian trwałych, zwanych parciami końcowymi (lub resztkowymi) oraz zmian cyklicznych o charakterze krótkotrwałym.
- TEZA 2: Zmiany cykliczne poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu zależą od kierunku przemieszczeń ścian silosu i są funkcją wartości tych przemieszczeń.
- TEZA 3: Rozkład maksymalnych poziomych parć dynamicznych materiału sypkiego na ściany silosu na wysokości komory jest nieliniowy.
- TEZA 4: Zależność: średnie poziome parcia dynamiczne materiału sypkiego na ściany silosu – maksymalna amplituda poziomych przyspieszeń podłoża gruntowego, jest zależnością nieliniową.
- TEZA 5: Poziome parcia dynamiczne materiału sypkiego na ściany silosu, wywołane wstrząsami podłoża, zależą od sztywności dynamicznej gruntu, na którym posadowiony jest silos.

3. STAN WIEDZY

3.1. TRZĘSIENIA ZIEMI I WSTRZĄSY PARASEJSMICZNE

3.1.1. TRZĘSIENIA ZIEMI

Trzęsienie ziemi jest fenomenem natury, będącym efektem nieustannego przemieszczania się płyt tektonicznych. Na skutek ruchów tych kruchych warstw płaszcza ziemi płyty znajdujące się w kolizji rozdzielają się, skręcają i trą jedna o drugą wyzwalaając energię w formie fal przemieszczeń gruntu, czyli fal sejsmicznych [42]. Obserwuje się cztery rodzaje fal sejsmicznych [44]:

- podłużne (P) zwane gęstościowymi;
- poprzeczne – ścinające (S);
- Rayleigha (R);
- Love’a (L).

Pierwsze dwa rodzaje fal stanowią fale rozchodzące się pod powierzchnią terenu, penetrując w głąb ziemi, dwa ostatnie zaś to fale powierzchniowe, których amplituda szybko zanika wraz z głębokością pod powierzchnią gruntu. Wszystkie fale wychodzą z hipocentrum jednocześnie, jednakże rozchodzą się one z różną prędkością. Trzęsienie ziemi inicjują fale podłużne, mające małe amplitudy i stosunkowo krótki okres (wstrząsy pierwotne), następnie występuje gwałtowna zmiana, spowodowana dotarciem fal poprzecznych o dużych amplitudach i

dłuższym okresie (trzęsienie zasadnicze lub główne). Rejestruje się także fale przypowierzchniowe o długim okresie drgań, lecz nie są one wyraźnie obserwowane blisko epicentrum.

W ocenie zjawiska trzęsienia ziemi zasadniczo stosowane są dwie miary. Pierwszą jest intensywność trzęsienia ziemi, określana najczęściej za pomocą dwunastostopniowej, zmodyfikowanej skali Mercalli'ego. Intensywność zjawiska ocenia się na podstawie zarówno ludzkich odczuć, jak i stopnia zniszczenia budowli i przedmiotów ruchomych oraz deformacji i stopnia zniszczenia rzeźby terenu. Drugą miarą jest tzw. rozmiar (czyli magnituda) trzęsienia ziemi, określany ośmiostopniową skalą Richtera, zależną od energii wyzwanej w hipocentrum. Intensywność jest liczbowym wyrażeniem intensywności trzęsienia ziemi w pewnym dowolnym miejscu na powierzchni ziemi, podczas gdy magnituda wyraża całą energię emitowaną z hipocentrum.

Innymi, równie istotnymi, z punktu widzenia mechaniki budowli, parametrami opisującymi trzęsienia ziemi są: częstotliwość ruchu podłoża (określana z reguły jako średnia pierwsza harmoniczna częstotliwość procesu akceleracji, wahająca się w przedziale od 10 do 100Hz), amplitudy ruchów podłoża, a także sejsmiczna intensywność ruchu podłoża, opisywana współczynnikiem sejsmicznym:

$$k = \frac{a}{g} \quad (3.1)$$

gdzie: a – maksymalne przyspieszenie ruchu podłoża,

g – przyspieszenie ziemskie.

3.1.2. WSTRZĄSY PARASEJSMICZNE

Innym zjawiskiem o charakterze dynamicznym, będącym źródłem możliwych, dodatkowych obciążeń obiektów budowlanych, są drgania parasejsmiczne. Drgania te definiowane są jako oddziaływania dynamiczne pochodzenia zewnętrznego, przekazywane na konstrukcję poprzez podłoże gruntowe, których pośrednią lub bezpośrednią przyczyną jest działalność człowieka. Do głównych źródeł zaburzeń parasejsmicznych zaliczyć można drgania komunikacyjne, wbijanie pali i ścianek w grunt, ruchy fundamentów pod maszyny, zrzucanie ciężarów na powierzchnię gruntu, wybuchy gazów i pocisków, odstrzały w kamieniołomach, przy robotach budowlanych i geodezyjnych czy wstrząsy górnicze.

Te ostatnie zaliczyć można do jednych z ważniejszych i najbardziej niebezpiecznych źródeł wstrząsów parasejsmicznych. Wstrząsy górnicze można podzielić na dwie zasadnicze

grupy według ich przyczyn powstawania: losowe (tąpnięcia) i odstrzały (bezpośrednio wywoływane i kontrolowane przez człowieka). Tąpnięcia wywoływane są zaburzeniami równowagi naprężeń w górotworze, spowodowanymi ich koncentracją w sąsiedztwie wyrobisk, a w konsekwencji pękaniem i nagłymi przemieszczeniami górotworu. Pękaniu towarzyszy emisja fal sprężystych. Obecnie występuje w Polsce średnio rocznie w kopalniach ok. 2500 wstrząsów o energii 10^5 J (1,2 stopnia Richtera) i większej.

3.1.3. TRZĘSIENIA ZIEMI A WSTRZĄSY PARASEJSMICZNE

Wstrząsy parasejsmiczne zasadniczo różnią się od wstrząsów sejsmicznych. Do podstawowych różnic należy wielkość wyzwalonej energii (magnituda), mechanizm powstawania i propagacji fal, czas trwania wstrząsu, zasięg wpływu, powtarzalność czy charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa. Obserwacje wykazują, iż częstotliwości oraz amplitudy przyspieszeń tąpnięć górniczych są dziesięciokrotnie mniejsze od częstotliwości i amplitud wstrząsów sejsmicznych. W przypadku trzęsień ziemi ognisko wstrząsu ulokowane jest z reguły w dużej odległości od miejsca posadowienia konstrukcji. W prostym modelu odbioru drgań sejsmicznych główną rolę odgrywa składowa pozioma drgań. Pomija się inne składowe, przede wszystkim pionową, co jest uznawane za wystarczająco dokładne. W przypadku oddziaływań parasejsmicznych źródło wstrząsu usytuowane jest z reguły w mniejszej odległości od obiektu i stosunkowo płytko. Powoduje to konieczność uwzględnienia składowej pionowej wstrząsu.

Wiele krajów położonych na obszarach wpływów sejsmicznych opracowało własne normy i przepisy projektowania obiektów budowlanych odpornych na trzęsienia ziemi. Polska leży w zasadzie na obszarze asejsmicznym, co nie oznacza jednak całkowitego braku wpływów sejsmicznych, tylko wskazuje na niską intensywność wstrząsów znajdujących się poniżej granicy spodziewanych szkód. Jedynie w południowych rejonach kraju mogą występować nieco większe wstrząsy sejsmiczne, co wynika, między innymi, z map sejsmicznych krajów sąsiednich. W ostatnich latach w Polsce coraz większy nacisk kładzie się na projektowanie obiektów budowlanych odpornych na działanie wstrząsów parasejsmicznych, które, w odróżnieniu od trzęsień ziemi, nie stanowią bezpośredniego zagrożenia życia ludzi, często jednak wpływają niekorzystnie na ich samopoczucie oraz na właściwą pracę urządzeń znajdujących się w strefie wpływu, a także mają znaczenie z punktu widzenia niezawodności konstrukcji budowlanej, czego przykładem może być katastrofa budynku na osiedlu Gwarków w

Polkowicach, jaka wydarzyła się na początku lat osiemdziesiątych [13].

W celu orientacyjnej oceny stopnia zagrożenia budynków wpływami wstrząsów pochodzenia górniczego Instytut Techniki Budowlanej w Instrukcji nr 286 [24] zaleca stosowanie skali MSK (Miedwiediew-Sponheuer-Karnik). Skala ta jest jedną ze skal wykorzystywanych do oceny intensywności trzęsień ziemi i jest bardzo podobna do wspomnianej wyżej XII-stopniowej, zmodyfikowanej skali Mercalli'ego. Obu wspomnianych skal oraz szeregu innych obowiązujących w normach narodowych skal intensywności, mimo stałego ich ulepszania drogą weryfikacji praktycznej, nie można uznać za przydatne do oceny skutków wstrząsów innych niż sejsmiczne. Dlatego też w normie PN-85/B-02170 [43] wprowadzono nowe, odnoszące się do oceny skutków wstrząsów parasejsmicznych, skale wpływów dynamicznych SWD-I i SWD-II. Należy tu jednak podkreślić, iż skale te dotyczą tylko i wyłącznie niektórych typów budynków [11].

3.2. METODY OBLICZEŃ KONSTRUKCJI BUDOWLANÝCH OBCIĄŻONYCH WSTRZĄSAMÍ

Wśród sposobów określenia obciążeń budowli wywołanych wstrząsami podłoża można wyróżnić dwa podejścia: statyczne i dynamiczne. W podejściu statycznym obciążenie wstrząsem podłoża jest zwykle przyjmowane jako statyczne poziome obciążenie zastępcze, odpowiadające dynamicznemu działaniu wstrząsu na budowlę, przykładane do konstrukcji na ogół w miejscach skupienia mas i rozmieszczone na wysokości ustroju. Obliczenia uwzględniają szereg czynników takich jak: rejonizacja sejsmiczna, rodzaj konstrukcji, warunki gruntowo-wodne, przeznaczenie budynku itp. Obliczone odkształcenia od statycznych obciążeń zastępczych mają na ogół mniejsze wartości od tych, które powstają podczas silnych trzęsień ziemi. Głównym niedostatkim tego podejścia jest pominięcie dynamicznych cech samego ustroju.

W podejściu dynamicznym uwzględniane są charakterystyki dynamiczne budowli wyrażone przez zbiór kolejnych częstości drgań własnych, odpowiadających im form własnych oraz tłumienie. Spośród różnych koncepcji dynamicznych najczęściej stosowanymi metodami są: metoda spektrum odpowiedzi (spektrum odpowiedzi jest to wykres szczytowej odpowiedzi oscylatora o jednym stopniu swobody, o okresie T i tłumieniu Δ , który jest poddany działaniu przyspieszenia gruntu) oraz metoda całkowania równania różniczkowego ruchu w czasie. Ta ostatnia zalecana jest w analizach bardzo skomplikowanych układów konstrukcyjnych

i wymaga największej liczby danych wyjściowych.

Jednym z ważniejszych problemów charakterystyki dynamicznej budowli jest przyjęcie właściwego modelu obliczeniowego. Rzeczywiste konstrukcje o masach rozłożonych w sposób ciągły są najczęściej zastępowane obliczeniowymi schematami zastępczymi. Małe budowle o zwartym i symetrycznym układzie, masywnych fundamentach i sztywnej konstrukcji można w przybliżeniu traktować jako sztywną bryłę na sprężystym podłożu. Drgania budowli wyższych obliczane są na ogół w oparciu o modele dyskretne z masami skupionymi, umiejscowionymi najczęściej na wysokości stropów. Innym modelem dynamicznym, jaki stosuje się do analizy dynamicznej budynków wysokich, jest model warstwowej belki ścinanej o masach rozłożonych w sposób ciągły [31].

Po przyjęciu schematu dynamicznego wyznacza się częstości i postaci drgań własnych ustroju. Liczba częstości drgań własnych układu zależy od przyjętego schematu dynamicznego, a więc przede wszystkim od liczb stopni swobody, tzn. liczby niezależnych parametrów geometrycznych określających jednoznacznie położenie tego ustroju w każdej chwili czasowej, w odniesieniu do pozycji w stanie równowagi. W przypadku zastosowania modelu dyskretnego liczba możliwych do wyznaczenia częstości i postaci drgań własnych jest taka sama jak liczba stopni swobody danego modelu. Właściwe przyjęcie schematu dynamicznego ma zasadnicze znaczenie dla dokładności otrzymywanych wyników. Dla przykładu praca [10] przedstawia wyniki obliczeń numerycznych częstości i form własnych kominów modelowanych w dwojaki sposób: jako pręt przyrzmatyczny i jako cienka powłoka. Stwierdzono, iż wartości częstości drgań własnych otrzymane w wyniku zastosowania modelu powłokowego są zbliżone do odpowiadających im częstości otrzymanych z obliczeń modelu prętowego. Jednak rozwiązanie problemu drgań własnych komina jako ustroju prętowego eliminuje możliwość otrzymania częstości charakterystycznych dla powłok, a zajmujących początkowe miejsce w spektrum częstości, co może prowadzić do błędów w dalszych analizach dynamicznych.

Inną, niezależną od rodzaju wymuszenia dynamicznego, cechą ustroju budowlanego jest tłumienie drgań. Jest ono zjawiskiem obiektywnym, charakteryzującym ruch obiektów rzeczywistych, których drgania własne zanikają po upływie pewnego określonego czasu. Może ono być spowodowane różnorodnymi przyczynami: zewnętrznymi siłami tarcia, oporem ośrodka, wewnętrznymi siłami tarcia w materiale, pochłanianiem energii itp. Tłumienie drgań konstrukcji budowlanej zależy przede wszystkim od materiałów, z jakich zbudowany jest analizowany ustrój. Do opisu tłumienia stosuje się różne współczynniki wynikające z badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych. Podstawową, doświadczalną miarą tłumienia jest

logarytmiczny dekrement (ubytek) tłumienia – Δ , zdefiniowany jako logarytm ilorazu dwóch sąsiednich amplitud pomierzonych w odstępie czasu równym okresowi drgań własnych układu. Ponadto najczęściej stosowanymi wielkościami opisującymi tłumienie są: współczynnik tłumienia krytycznego – γ , liczba tłumienia – D i współczynnik rozproszenia energii drgań – ψ [12]. Wszystkie te wielkości są ze sobą powiązane następującymi zależnościami:

$$\Delta = \pi\gamma \quad (3.2.1)$$

$$\gamma = 2D \quad (3.2.2)$$

$$\psi = 2\Delta \quad (3.2.3)$$

3.3. NORMY PROJEKTOWE SILOSÓW NA TERENACH SEJSMICZNYCH

Bardzo mało norm krajowych i międzynarodowych dotyczących silosów zawiera jednoznaczne i wyczerpujące wytyczne do projektowania konstrukcji silosów odpornych na trzęsienia ziemi. Większość wyżej wymienionych norm w ogóle nie uwzględnia tego tematu lub odsyła do norm projektowych, opracowanych dla ustrojów innego typu. (np.: dla zbiorników na ciecze czy budynków i ich wyposażenia). Listę szczegółowych zaleceń normowych stosowanych w różnych krajach znaleźć można w przepisach International Association for Earthquake Engineering (IAEE) [15].

W USA, według zaleceń Uniform Building Code [61], sugeruje się, aby zbiorniki płaskodenne oraz zbiorniki, w których poziom dna znajduje się na lub poniżej poziomu terenu, projektować według procedur opracowanych dla konstrukcji sztywnych (tj. takich, których okres drgań własnych jest mniejszy niż 0.06s) metodą równoważnej bocznej siły sejsmicznej V , którą wyznacza się ze wzoru:

$$V = 0.5 \cdot Z \cdot I \cdot W \quad (3.3)$$

gdzie: Z – współczynnik strefy sejsmicznej;

I – współczynnik ważności obiektu;

W – całkowity ciężar zbiornika i jego zawartości.

W przypadku innych typów zbiorników niespełniających założeń powyższej procedury (np.: zbiorników o wiotkiej konstrukcji) siłę tą wyznacza się według wzoru:

$$V = \frac{Z \cdot I \cdot C}{R_w} W \quad (3.4.1)$$

gdzie: C – współczynnik zależny od podstawowego okresu drgań konstrukcji T :

$$C = \frac{1.25 \cdot S}{T^{2/3}} \leq 2.75 \quad (3.4.2)$$

S – współczynnik terenowy zależny od warunków gruntowych ($S = 1.0, 1.2, 1.5, 2.0$ odpowiednio dla gruntów S1 do S4); w przypadku nieznanych warunków gruntowych $S = 1.2$;

R_w – współczynnik liczbowy: $R_w = 4$ dla silosów z lejami wyladowczymi na słupach stężonych i niestężonych, a $R_w = 5$ dla zasobników.

Zgodnie z ANSI ASCE 7-95 [2], zbiorniki płaskodenne należy projektować również metodą równoważnej siły bocznej (analogicznie do UBC). Różnice występują w sposobie wyznaczenia obliczeniowej siły sejsmicznej F_p opisanej równaniem:

$$F_p = 4.0 \cdot C_a \cdot I_p \cdot W_p \quad (3.5)$$

gdzie: W_p – ciężar;

C_a – współczynnik sejsmiczny (będący funkcją warunków gruntowych (profile gruntowe A do E) i intensywności wstrząsów A_v : $0.05g < A_v < 0.5g$);

I_p – czynnik ważności obiektu (zmienny od 1.0 do 1.5). Dla zbiorników o średnicy większej niż 6.2m i o smukłości (H/D) większej od 1 należy przyjmować $I_p = 1.5$;

Zbiorniki nie spełniające założeń powyższej procedury należy projektować przy użyciu metody równoważnej bocznej siły sejsmicznej V , która powinna być równa przynajmniej:

$$V = C_s \cdot W \quad (3.6.1)$$

gdzie: C_s – współczynnik odpowiedzi sejsmicznej zależny od podstawowego okresu drgań konstrukcji T :

$$C_s = \frac{1.2 \cdot C_v}{R \cdot T^{2/3}} \quad (3.6.2)$$

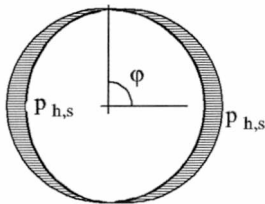
C_v – współczynnik sejsmiczny oparty na typie profilu gruntowego (od A do E) i intensywności wstrząsów A_v : $0.05g < A_v < 0.5g$;

R – współczynnik zmiany odpowiedzi sejsmicznej równy 3 dla silosów z lejami wyladowczymi na słupach stężonych i niestężonych.

Według normy ACI dotyczącej projektowania żelbetowych silosów na materiały sypkie – ACI-313R-91 [1] silosy należy projektować i konstruować tak, aby były zdolne przemieścić siły sejsmiczne obliczone według zaleceń UBC. Ponieważ część energii sejsmicznej jest pochłaniana przez płynący materiał sypki oraz przez tarcie, dlatego dynamiczny wpływ ciężaru składowanego materiału musi być zredukowany. Zgodnie z powyższym ACI-313R-91 przyjmuje całkowity ciężar układu równy sumie ciężaru konstrukcji i 80% ciężaru składowa-

nego materiału.

Ogólne przybliżone podejście i generalne sugestie dotyczące projektowania silosów wznoszonych na terenach sejsmicznych odnaleźć można również w Eurokodzie 1 [16]. Wytyczne dotyczące wyznaczania przyspieszeń gruntu zawarto w Eurokodzie 8 [17]. Według [16] trzęsienia ziemi są przyczyną powstawania dodatkowych poziomych parć materiału sypkiego na ściany komory silosu. Kierunek działania tych parć jest zgodny z kierunkiem wymuszenia kinematycznego, natomiast ich rozkład na obwodzie komory silosu przedstawia rysunek 3.1.



Rys. 3.1 Rozkład parć na obwodzie komory silosu

Dodatkowe parcia spowodowane trzęsieniem ziemi opisane są zależnością:

$$p_{h,s} = \frac{D}{2} \gamma \frac{a}{g} \cos(\varphi) \quad \text{dla} \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (3.7)$$

gdzie: a – poziome przyspieszenie gruntu podczas trzęsienia ziemi;

g – przyspieszenie ziemskie;

D – średnica silosu;

γ – ciężar objętościowy materiału sypkiego.

3.4. PRZEGLĄD PRAC TEORETYCZNYCH

Teoretyczne metody badawcze można podzielić na dwie grupy:

- analityczne, w których modelowane zjawisko można zapisać w postaci równań i rozwiązać je na drodze przekształceń i obliczeń matematycznych. Otrzymane w ten sposób rozwiązanie jest rozwiązaniem ogólnym, opisującym badany proces. Możliwe jest jego wykorzystanie do opisu modelowanego zjawiska dla różnych danych wejściowych, bez konieczności powtórznego rozwiązywania równań.
- numeryczne, w których równania opisujące badany proces nie są rozwiązywane, lecz, na drodze iteracyjnej, wyznaczane są wielkości stanowiące rozwiązanie szczególne, ważne

tylko dla konkretnych danych wejściowych. Zmiana tych danych pociąga za sobą konieczność powtórzenia procesu iteracji.

W przypadku analiz dotyczących zachowania się układu: silos – materiał wypełniający stosowane są z różnym powodzeniem metody z obu powyższych grup. Ze względu na fakt, iż materiał sypki jest ośrodkiem o wysoce nieliniowych cechach, zastosowanie metod analitycznych pociąga za sobą konieczność przyjęcia szeregu uproszczeń i założeń, które często przyczyniają się do tego, że wynik końcowy tych analiz może być obciążony znacznym błędem. Przykładowo duże trudności sprawia uwzględnienie w modelach analitycznych lokalnych osłabłości, polegających np.: na niecentrycznym umiejscowieniu otworu wysypowego, skokowej zmianie grubości ścian czy występowaniu urządzeń wewnętrznych.

Rozwój metod numerycznych pozwolił na ominięcie wyżej wspomnianych trudności, uniemożliwiających rozwiązanie badanego zjawiska tradycyjnymi sposobami analitycznymi. Użycie ich staje się łatwiejsze dzięki rosnącym mocom obliczeniowym komputerów i zaawansowanemu oprogramowaniu, co pozwala na stosowanie bardziej precyzyjnych modeli. Posługiwanie się metodami numerycznymi wymaga jednak dużego doświadczenia w dziedzinie mechaniki materiałowej oraz dobrej znajomości technik numerycznych. Konstytutywne modele materiałów sypkich (których krótki przegląd zawiera następny rozdział) zależą od szeregu parametrów wejściowych, których fizyczne znaczenie nie zawsze jest oczywiste. Ponadto wyniki analiz numerycznych zależą od całkowicie numerycznych parametrów, takich jak: dyskretyzacja przestrzenna i czasowa czy wielkość przyrostu obciążenia.

3.4.1. ZWIĄZKI KONSTYTUTYWNE MATERIAŁU SYPKIEGO

Każdy związek konstytutywny jest matematycznym zapisem reakcji modelowanego materiału (m.in. w postaci jego deformacji) na czynniki zewnętrzne (np.: obciążenie) wywołujące te reakcje. Opracowano do dziś szereg różnorodnych praw konstytutywnych, a na ich podstawie zbudowano szereg modeli materiałowych, które, z mniejszym bądź większym powodzeniem, stosowane są w mechanice ośrodków sypkich. Jednym z kryteriów w ocenie przydatności tych modeli w analizach dynamicznych materiałów sypkich składowanych w silosach jest zapis charakterystycznych dla tych materiałów właściwości, takich jak:

- plastyczność – zdolność materiału do występowania trwałych deformacji;
- dyatacja – zdolność do zmian gęstości materiału podczas jego ścinania przy stałych naprężeniach hydrostatycznych;
- stan krytyczny – zdolność do wystąpienia nieskończonych odkształceń postaciowych po przekroczeniu pewnego granicznego poziomu naprężeń ścinających;
- barotropia – zdolność do zmian gęstości materiału w zależności od poziomu naprężeń;
- pyknotropia – zdolność do zmian objętości materiału przy stałej gęstości właściwej szkieletu gruntowego;
- argotropia – zdolność do zmian stopnia deformacji materiału w czasie (pojęcie to obejmuje wszystkie zjawiska wiskotyczne);
- kohezja – zdolność materiału sypkiego do przenoszenia naprężeń rozciągających.

3.4.1.1. Modele sprężyste

Najbardziej uproszczony model zachowania się materiału sypkiego można określić mianem modelu sprężystego. W pracach [14, 40, 41] zastosowano model liniowo sprężysty, analogiczny do modelu Hooke'a opisany zależnością:

$$T = \lambda \text{tr} E I + 2\mu E \quad (3.8)$$

gdzie: T – tensor naprężeń,

E – tensor odkształceń,

I – tensor jednostkowy,

λ, μ – stałe Lamego.

Model ten ma jednak ograniczone zastosowanie w analizach zachowania materiałów sypkich, ponieważ nie opisuje on żadnej z wyżej opisanych właściwości (przyjętych jako kryterium oceny). Użyto go ze względu na jego dużą prostotę i możliwość ograniczenia do minimum czasu obliczeń numerycznych.

Praca [4] zawiera przykład zastosowania nieliniowego modelu sprężystego. Stałe sprężyste związku konstytutywnego uzależniono od zmiennej gęstości materiału, kąta tarcia wewnętrznego i poziomu naprężeń, co jest próbą przystosowania niniejszego modelu do opisu barotropii i pyknotropii materiału sypkiego.

Praca [63] jest przykładem zastosowania modelu hyposprężystego do analiz numerycznych zachowania się materiałów sypkich. Model ten jest pierwszym modelem jaki można w pełni wykorzystać do opisu zachowania się materiałów sypkich. Dzięki niemu możliwy stał

się opis stanu krytycznego. Ten model materiału jest izotropowy i przyrostowo niezależny.

3.4.1.2. Modele niesprężyste

Wszystkie modele, dzięki którym możliwe jest opisanie deformacji trwałych, uważa się za plastyczne. Z grupy należy wykluczyć modele, w których deformacje trwałe powstają zasadniczo w skutek upływu czasu (np.: modele pełzania). Większość modeli konstytutywnych, zgodnych z powyższą definicją, wywodzi się z modeli plastycznych opisujących metale (modele von Misesa czy Tresci). Prędkość odkształceń występujących w materiale dzieli się, w modelach tego typu, na część odwracalną – sprężystą i trwałą – plastyczną:

$$D = D^e + D^p \quad (3.9)$$

gdzie: D – prędkość odkształcenia,

D^e – prędkość odkształcenia odwracalnego (sprężystego),

D^p – prędkość odkształcenia trwałego (plastycznego).

W celu oddzielenia deformacji sprężystych od plastycznych wprowadza się pojęcie powierzchni uplastycznienia – powierzchni granicznej w przestrzeni naprężeń, która rozdziela dopuszczalne stany naprężeń. Modele idealnie plastyczne posiadają stałą powierzchnię uplastycznienia, a modele ze wzmocnieniem przekształcają ją zależnie od parametru wzmocnienia. Ogólna zależność opisana jest wzorem:

$$f(T) - \psi = 0 \quad (3.10)$$

gdzie: $f(T)$ – funkcja powierzchni uplastycznienia,

ψ – parametr wzmocnienia (dla modelu idealnie plastycznego $\psi = const.$).

Na drugą grupę konstytutywnych modeli niesprężystych składają się modele typu przyrostowego, oparte na uogólnieniu modeli hyposprężystych, które definiowane są z pominięciem pojęcia powierzchni uplastycznienia. Zmiana naprężeń w czasie opisywana jest funkcją naprężeń rzeczywistych, prędkości odkształceń i zmiennych wewnętrznych (np.: gęstości materiału). Modele tej grupy można opisać ogólną zależnością:

$$\dot{T} = h(T, D, \rho_b) \quad (3.11)$$

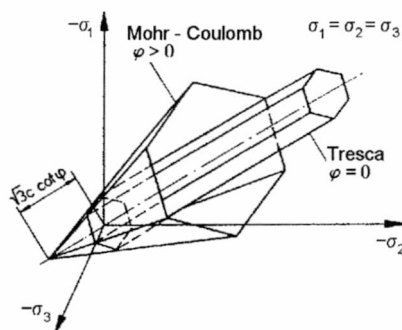
3.4.1.3. Modele sprężysto-plastyczne

Pierwszym modelem użytym do opisu niesprężystego zachowania się materiałów sypkich był model Coulomba-Mohra, który został wykorzystany w wielu teoriach i analizach metodą elementów skończonych [39, 40, 56], którego podstawą jest założenie, że materiał obciążony pewnym naprężeniem normalnym może przenieść tylko pewne maksymalne naprężenia ścinające, po przekroczeniu których materiał zaczyna płynąć. Graniczne naprężenia ścinające zależą od kąta tarcia wewnętrznego, φ i kohezji c . Zależność 3.12 jest ogólnym zapisem niniejszego modelu.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = m(\sigma_1 + \sigma_3) + n \quad (3.12)$$

gdzie: σ_1, σ_3 – maksymalne i minimalne naprężenie główne,

$m = m(\varphi), n = n(c, \varphi)$ – parametry materiałowe.



Rys. 3.2 Powierzchnie uplastycznienia wg Coulomba-Mohra i Tresci

Model ten może być postrzegany jako uogólnienie modelu Tresci. Na rysunku 3.2 przedstawiono w przestrzeni naprężeń głównych powierzchnie uplastycznienia obu modeli. Model Coulomba-Mohra jest modelem izotropowym i przyrostowo niezależnym, uwzględniającym plastyczność, dylatację, barotropię i pyknotropię.

Kolejny model – Druckera-Pragera – uważany jest za rozwinięcie modelu von Misesa. Uogólnia on powierzchnię uplastycznienia Coulomba-Mohra w następujący sposób:

$$q_{max} - a - p - b = 0 \quad (3.13)$$

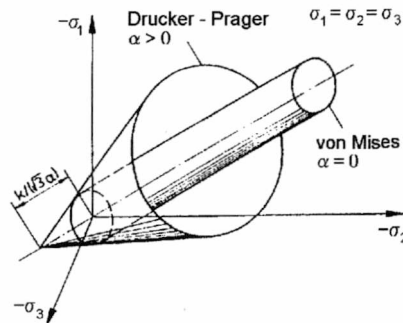
gdzie: p – naprężenie hydrostatyczne ($1/3 \text{ tr}(T)$),

q_{max} – graniczny dewiator naprężeń (uogólnione naprężenie ścinające),

$a = a(\varphi), b = b(c, \varphi)$ – parametry materiałowe.

Powierzchnia uplastycznienia Druckera-Pragera (rys. 3.3) nie posiada wierzchołków takich jak powierzchnia Coulomba-Mohra (por. rys. 3.2). W związku z tym model ten jest

numerycznie łatwiejszy i częściej stosowany w analizach [35, 45, 49]. Podobnie jak model Coulomba-Mohra, uwzględnia plastyczność, dylatację, barotropię i pyknotropię, jednakże pozostaje wciąż modelem izotropowym i przyrostowo niezależnym.



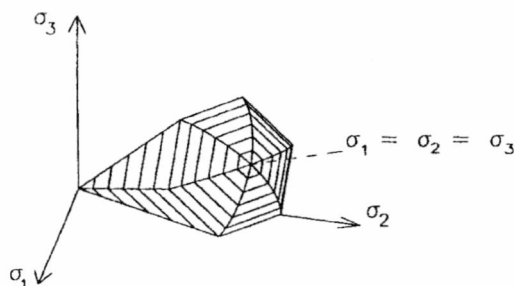
Rys. 3.3 Powierzchnie uplastycznienia wg Druckera-Pragera i von Misesa

Często wykorzystywanym modelem sprężysto-plastycznym w analizach zachowania materiałów sypkich jest zmodyfikowany model gliny („Cam-clay”) [39, 60], gdzie naprężenia powstające podczas obciążania materiału wywołują zmiany objętościowe aż do osiągnięcia objętości krytycznej lub krytycznego wskaźnika porowatości. Po przekroczeniu tego stanu dalszy wzrost obciążenia nie powoduje zmian objętościowych. Wykorzystuje on kilka parametrów materiałowych, wyznaczanych drogą eksperymentalną.

Wszystkie sprężysto-plastyczne modele konstytutywne, poza definicją powierzchni uplastycznienia, muszą także określać związki między naprężeniami i odkształceniami modelowanego materiału w zakresach sprężystym (wewnątrz powierzchni uplastycznienia) i plastycznym (po uplastycznieniu materiału). Do opisu sprężystej pracy materiału stosuje się wszelkie liniowe i nieliniowe modele sprężyste [22, 45, 56]. Odkształcenia plastyczne materiału określane są w dwojaki sposób: przez zasadę płynięcia sprzężonego, w myśl której kształt powierzchni uplastycznienia określa kierunek płynięcia oraz przez zasadę płynięcia niesprężonego. W tym przypadku definiuje się dodatkową powierzchnię, zwaną powierzchnią potencjalnych odkształceń plastycznych.

Oba klasyczne modele sprężysto-plastyczne: Coulomba-Mohra i Druckera-Pragera mają poważną wadę, ujawniającą się podczas obciążania materiału w sposób hydrostatyczny [52]. Jak wynika z rysunków 3.2 i 3.3 obszar naprężeń hydrostatycznych zawsze leży wewnątrz powierzchni uplastycznienia, toteż w takim przypadku nie jest możliwe osiągnięcie odkształceń plastycznych. Jest to niezgodne z badaniami eksperymentalnymi materiałów sypkich. Mankament ten można usunąć przez zastosowanie modeli konstytutywnych, opartych na

zamkniętej powierzchni uplastycznienia [52]. Modele te składają się najczęściej z co najmniej dwóch powierzchni (rys. 3.4): pierwszej – „stożkowej”, o kształcie zbliżonym np.: do powierzchni uplastycznienia Druckera-Pragera (rys. 3.3) i drugiej – „zamykającej” – ograniczającej obszar sprężysty w kierunku obciążeń hydrostatycznych.



Rys. 3.4 Zamknięta powierzchnia uplastycznienia

W pracy [45] zastosowano model „zamknięty” tylko z jedną powierzchnią „zamykającą”. Model częściej wykorzystywany do analiz zachowania się materiałów sypkich w silosach, zwany modelem Lade’a, zastosowano m. in. w pracach [22, 23, 64]. Składa się on z dwóch powierzchni uplastycznienia. Powierzchnia pierwsza jest zakrzywiona i nosi miano powierzchni uplastycznienia ekspansywnego, druga – sferyczna – to powierzchnia uplastycznienia defensywnego. Całkowita prędkość odkształcenia materiału (tj. przyrost odkształcenia w jednostkowym przedziale czasowym) dzieli się na trzy części:

$$D = D^e + D^c + D^p \quad (3.14)$$

gdzie: D^e – prędkość odkształcenia sprężystego,

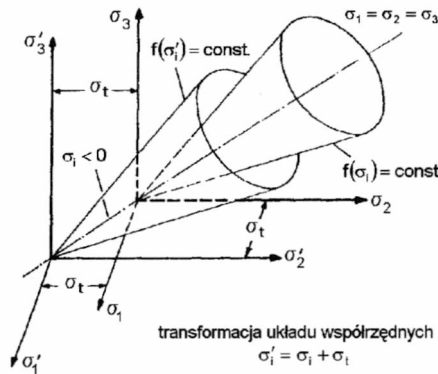
D^p i D^c – prędkość odkształceń plastycznych: ekspansywnego i defensywnego.

Model ten uwzględnia plastyczność, dylatację, stan krytyczny i barotropię, lecz nie opisuje kohezji.

W pracy [23] do modelu konstytutywnego Arslana wprowadzono kohezję. Model Arslana jest zbliżony od modelu Lade’a z tą różnicą, że powierzchnia uplastycznienia ekspansywnego jest prosta, a nie zakrzywiona. W uogólnionym modelu Arslana [23] przesunięto początek powierzchni uplastycznienia ekspansywnego i środek powierzchni uplastycznienia defensywnego wzdłuż osi naprężeń hydrostatycznych, w kierunku naprężeń rozciągających (rys. 3.5).

Wszystkie modele sprężysto-plastyczne przedstawione do tej pory nie obejmują zjawisk zależnych od czasu (argotropia). Jakkolwiek w kilku pracach (np.: [22, 34, 36, 63, 64]) uznano za konieczne wprowadzenie tego typu zależności z przyczyn całkowicie numerycz-

nych, tzn. do formułowania wyników rozwiązania równania różniczkowego. Zależności wiskotyczne celowo zostały włączone do modelowania właściwości materiałów sypkich w pracach [19, 49].



Rys. 3.5 Przesunięta powierzchnia uplastycznienia ekspansywnego [23]

Najbardziej popularnym modelem wiskotycznym jest model cieczy Newtonowskiej:

$$T_v = 2\nu \left(D - \frac{1}{3}(trD)I \right) \quad (3.15)$$

gdzie: T_v – wiskotyczny tensor naprężeń,

ν – liczba lepkościowa.

W pracy [49] zmodyfikowano powyższy model wprowadzając równanie wiskotyczne dla szybkiego przepływu materiału sypkiego:

$$T_v = 2\nu \sqrt{tr(D')^2} D \quad (3.16.1)$$

$$D' = D - \frac{1}{3}(trD)I \quad (3.16.2)$$

gdzie: D' – dewiator prędkości odkształceń.

Równanie to definiuje nieliniową zależność naprężeń od prędkości odkształcenia oraz lepkość objętościową.

W pracy [19], w celu określenia tempa zmian naprężeń materiału sypkiego, zaproponowano zastosowanie innego modelu wiskotycznego, będącego nieliniową funkcją prędkości odkształceń, opisaną następującą zależnością:

$$\dot{T}_v = \frac{A \cdot D_2}{\sqrt{B^2 + tr(D^2)}} \quad (3.17)$$

gdzie: A i B – parametry materiału,

D_2 – drugi tensor rozciągania.

3.4.1.4. Modele typu przyrostowego

Innymi niż modele sprężysto-plastyczne związkami konstytutywnymi mającymi szerokie zastosowanie w mechanice gruntów, a także stosowanymi w mechanice ośrodków sypkich, są modele typu przyrostowego. Jednym z modeli należących do tej grupy jest model Kolymbasa [19], z powodzeniem rozbudowywany i stosowany przez innych naukowców [18, 53]. Jego postać ogólną przedstawia równanie:

$$\dot{T} = h(T, D) = L(T, D) + N(T) \cdot \sqrt{\text{tr}(D^2)} \quad (3.18)$$

gdzie: $\dot{T}$ – tensor prędkości naprężeń,

L – biliniowa funkcja tensorowa: tensorów naprężeń T i prędkości deformacji D ,

N – funkcja tensorowa tensora naprężeń T ,

$\sqrt{\text{tr}(D^2)}$ – norma euklidesowa tensora prędkości deformacji D .

Różne definicje funkcji L i N przedstawiane zostały w pracach [53, 54]. Model ten uważany jest za hypoplastyczny, ponieważ opisuje deformacje nieodwracalne (w przeciwieństwie do modeli hyposprężystych). W zależności od formy niniejszego modelu można użyć go do opisu plastyczności, dylatacji, stanu krytycznego, barotropii i pyknotropii [48]. Model nie rozróżnia pomiędzy odkształceniami odwracalnymi i nieodwracalnymi i nie wymaga definiowania powierzchni uplastycznienia, mimo że istnieje pewien zbiór takich powierzchni, kształtem podobnych do powierzchni modeli sprężysto-plastycznych.

3.4.1.5. Modele polarne

Wszystkie teorie przedstawione powyżej traktują materiał sypki jako homogeniczne, niepolarne kontinuum (co oznacza, że tensor naprężeń jest symetryczny). Materiały sypkie nie są jednak ani homogeniczne, ani ciągłe, lecz składają się z rozmaitych cząstek posiadających poza translacyjnymi stopniami swobody (jak w przypadku kontinuum niepolarnego) dodatkowe lokalne rotacyjne stopnie swobody. Założenie to jest podstawą teorii Cosserat, która wykorzystywana jest również do opisu zachowania się materiałów sypkich. W pracach [57, 58] zastosowano modele sprężysto-plastyczne, a w pracach [53, 57, 59] modele hypoplastyczne. Oba modele rozszerzono o wielkości charakterystyczne dla mechaniki ośrodka Cosserat: średnią średnicę ziaren d_{50} (jako wewnętrzną skalę długości), obroty, zakrzywienia czy momenty naprężeniowe.

Większość przedstawionych w niniejszym rozdziale związków konstytutywnych, z wyjątkiem modeli sprężystych, opisana jest skomplikowanymi zależnościami, co pociąga za sobą wiele ograniczeń w ich stosowaniu. Prace, z których zaczerpnięto opisy powyższych modeli dotyczą zastosowania ich w analizach numerycznych zjawisk zachodzących w materiałach sypkich podczas procesów napełniania [45, 64], składowania [4, 39, 40, 60] i opróżniania [18, 22, 35, 57, 59]. Analizy te uwzględniają, m.in., efekty interakcji układu silos – materiał sypki [18]. Mogą także opisywać zachowanie się silosów, wraz z wypełnieniem, podczas działania obciążeń zewnętrznych, takich jak obciążenia środowiskowe czy obciążenia wstrząsami podłoża [6].

3.4.2. SILOSY PODDANE WSTRZĄSOM PODŁOŻA

3.4.2.1. Silos poddany trzęsieniu ziemi – numeryczny model trójwymiarowy Brauna i Eibla

Praca [6] przedstawia wyniki analiz numerycznych silosu poddanego trzęsieniu ziemi. Analizowano model trójwymiarowy, uwzględniający nieliniowości geometryczne i materiałowe. Obliczenia metodą analizy konstrukcji w czasie oparto na następującym równaniu:

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} (\vec{u}) + [R(\vec{u})] \vec{u} = -[M] \vec{g} \ddot{u}_E \quad (3.19)$$

gdzie: $R(\vec{u})$ – nieliniowe zachowanie się materiału sypkiego (rys. 3.6),

$[M]$ – macierz mas,

$\vec{u}$ – wektor przemieszczeń,

$\ddot{u}_E$ – wektor przyspieszeń podłoża.

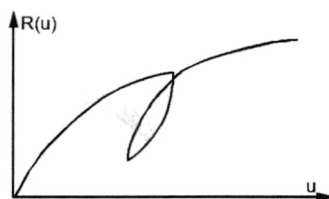
Do opisu zachowania się materiału sypkiego zastosowano nieliniowy, hypoplastyczny związek konstytutywny, którego ogólną postać przedstawia równanie (3.18), a formę rozwiniętą i zastosowaną w niniejszej analizie równanie (3.20):

$$\dot{T} = f_b f_e \left[L(\hat{T}, D) + f_d N(\hat{T}) \cdot \sqrt{\text{tr}(D^2)} \right] \cdot (1 + f_m) \quad (3.20)$$

gdzie: f_b – funkcja określająca barotropię,

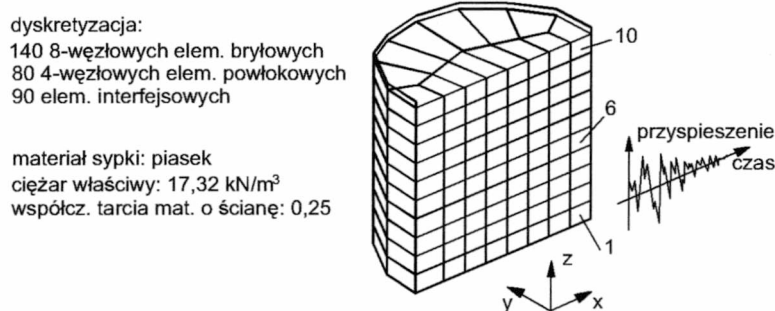
f_e, f_d – funkcje określająca pyknotropię,

f_m – funkcja historii.



Rys. 3.6 Nieliniowe zachowanie się materiału sypkiego [6]

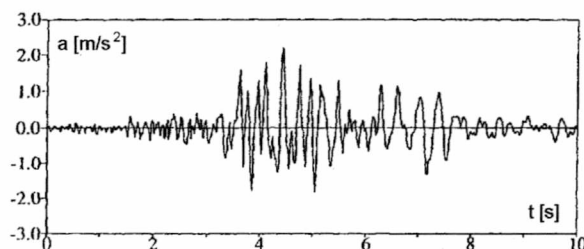
Materiał sypki zdyskretyzowano standardowymi trójwymiarowymi, izoparametrycznymi elementami, a ściany silosu i jego dno zamodelowano, używając elementów powłokowych. Oba typy elementów połączono liniowymi elementami poślizgowymi, które umożliwiają interakcję materiału sypkiego i ścian silosu.



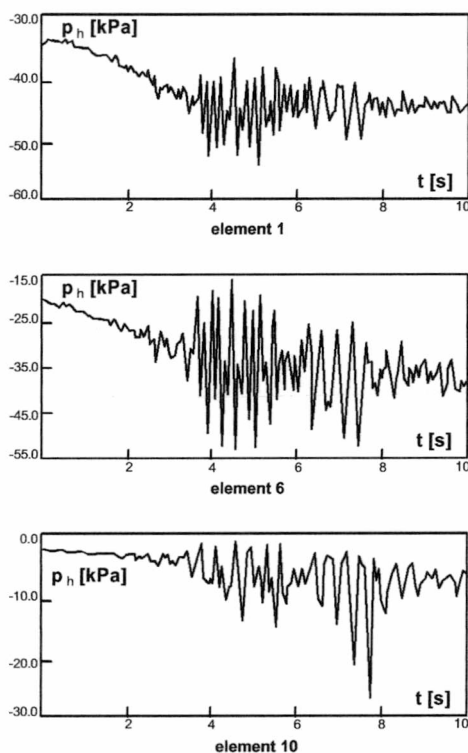
Rys. 3.7 Geometria i dyskretyzacja modelu [6]

Modelowano silos o wysokości 10.5m i średnicy 10.0m wypełniony piaskiem do wysokości 10.0m. Topologię układu przedstawia rysunek 3.7. W analizie wykorzystano akceleroqram trzęsienia ziemi w Friaul (15.09.1976r), podczas którego maksymalne przyspieszenie gruntu wynosiło 2.18m/s² (rys. 3.8).

Rysunek 3.9 przedstawia wyznaczone na podstawie niniejszego modelu przebiegi czasowe parć poziomych materiału na ścianę silosu w elementach 1, 6 i 10.



Rys. 3.8 Akceleroqram trzęsienia ziemi stanowiący wymuszenie kinematyczne [6]



Rys. 3.9 Przebiegi parć poziomych na ścianę silosu [6]

3.4.2.2. Silos poddany trzęsieniu ziemi – numeryczny dwuwymiarowy model belki ścinanej Hardina, Bucklina i Rossa

W pracy [20] przedstawiono wyniki analizy stalowego silosu na pszenicę poddanego wstrząsom sejsmicznym. Przyjęto, iż odpowiedź sejsmiczną analizowanego układu można obliczyć przy pomocy modelu belki ścinanej. Model ten zakłada, że poziome ruchy gruntu wywołane trzęsieniem ziemi powodują powstawanie deformacji ścinających w materiale sypkim oraz ścianach silosu (rys. 3.10).

Obciążenie sejsmiczne poddano rozkładowi na drgania harmoniczne, za pomocą transformacji Fouriera, a przemieszczeniową odpowiedź układu otrzymano przez superpozycję przemieszczeń spowodowanych poszczególnymi drganiami składowymi. Odpowiedź ta zdefiniowana została następującą zależnością:

$$u(z, t) = (Ae^{ikz} + Be^{-ikz})e^{i\omega t} \quad (3.21.1)$$

$$k = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G\left(1 + i\frac{\eta\omega}{G}\right)}} \quad (3.21.2)$$

gdzie: $i = \sqrt{-1}$

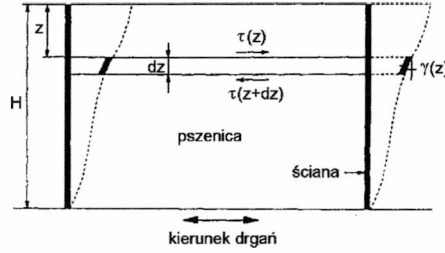
η – współczynnik lepkości przy ścinaniu,

ρ – gęstość ośrodka,

G – moduł sprężystości poprzecznej,

ω – częstość,

A i B – stałe określone przez obciążenie.



Rys. 3.10 Model belki ścinanej – przekrój pionowy wraz z deformacjami spowodowanymi przemieszczeniami podłoża [20]

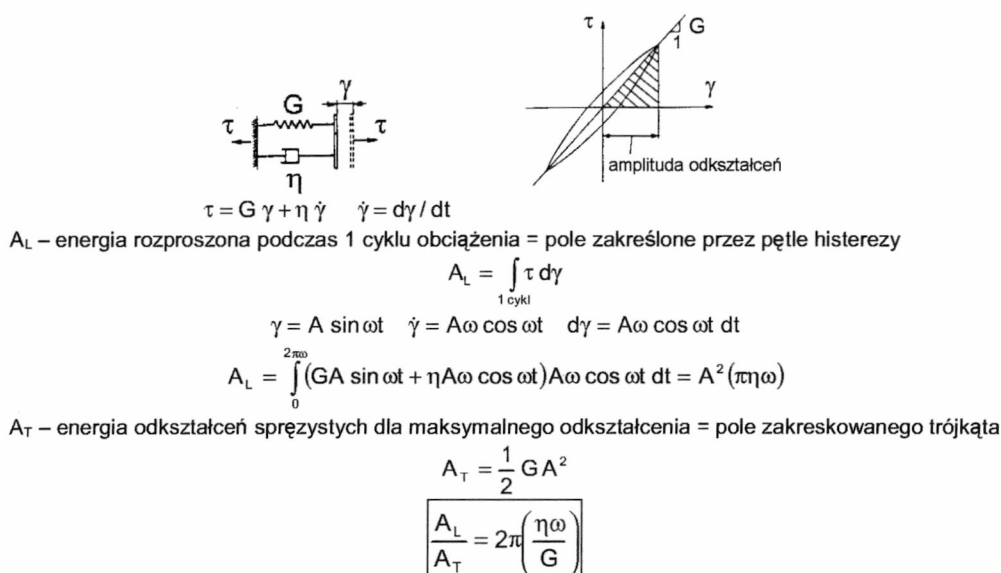
W pracy tej zwrócono uwagę na nieliniowy, niesprężysty i zmienny w cyklicznym procesie obciążenia charakter związku pomiędzy naprężeniami ścinającymi a odkształceniami postaciowymi. Wykorzystując badania doświadczalne na pszenicy, stworzono bazę danych niezbędnych do opisanie zależności konstytutywnych przyjętego modelu lepkosprężystego, z zależnością γ - τ w formie pętli histerezy (rys. 3.11).

Podstawą do opisu zachowania się materiału sypkiego jest krzywa łącząca wierzchołki kolejnych pętli, zwana krzywą bazową (rys. 3.12). Styczna do krzywej bazowej w początku układu współrzędnych ma maksymalne nachylenie, które nazywane jest maksymalnym modułem ścinania G_{max} . Odkształcenia odniesienia opisane wzorem (3.22) wykorzystano do znormalizowania krzywej bazowej i zdefiniowania funkcji redukcji modułu ścinania (równanie 3.23), przedstawionej na rysunku 3.13.

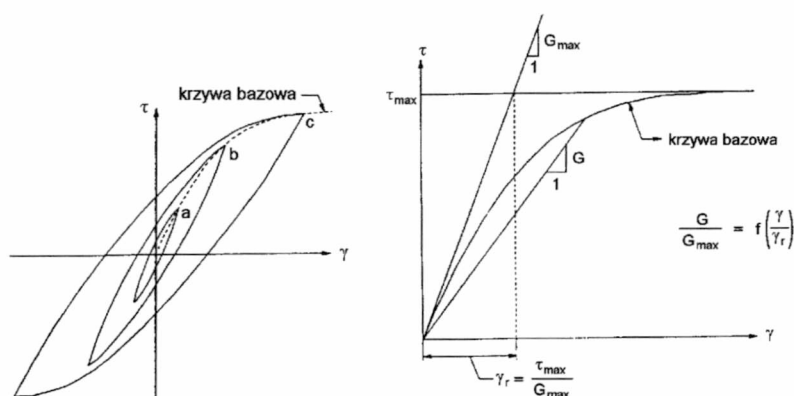
$$\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}} \quad (3.22)$$

$$\frac{G}{G_{max}} = f\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \quad (3.23)$$

Współczynnik rozpraszania energii – opisujący tłumienie układu (będący drugim parametrem definiującym pętlę histerezy), zdefiniowany jest jako stosunek energii rozproszonej podczas cyklu obciążenia do maksymalnej energii odkształcenia sprężystego. Stosunek ten można wyrazić zależnością pól powierzchni A_I/A_T (rys. 3.11).



Rys. 3.11 Pętla histerezy zależności naprężenia – odkształcenia [20]



Rys. 3.12 Krzywa bazowa [20]

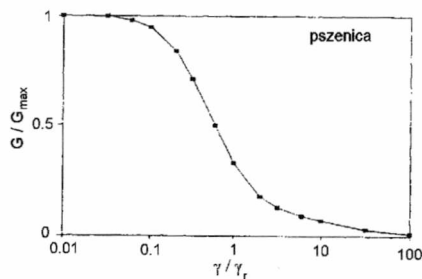
Tłumienie i moduł ścinania związane są ze sobą następującą zależnością [21]:

$$\frac{D}{D_{\max}} = 1 - \frac{G}{G_{\max}} \quad (3.24)$$

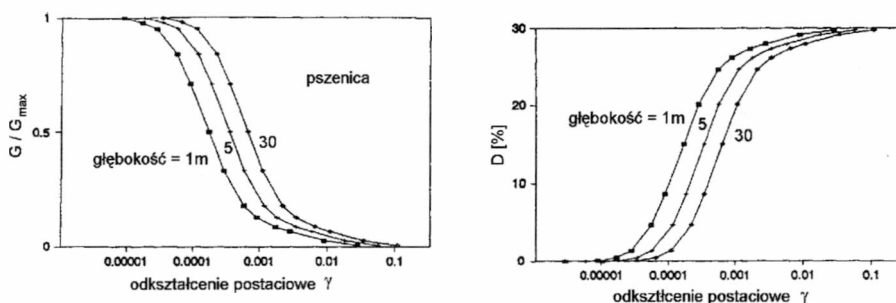
gdzie: D – częstotliwościowo niezależny współczynnik tłumienia,

$D_{\max}$ – współczynnik tłumienia dla maksymalnej amplitudy odkształceń.

W pracy niniejszej uwzględniono również, wyznaczone doświadczalnie, zmiany wartości tłumienia, maksymalnego modułu ścinania i odkształceń odniesienia w funkcji głębokości (niektóre z nich przedstawia rys. 3.14).



Rys. 3.13 Funkcja redukcji modułu ścinania [21]



Rys. 3.14 Funkcje redukcji modułu ścinania i funkcje tłumienia dla różnych głębokości [21]

Wszystkie opisane do tego miejsca parametry wykorzystane zostały do opisu materiału sypkiego. Aby w analizie uwzględnić występowanie konstrukcji silosu, konieczne było wprowadzenie następujących wielkości zastępczych:

$$G_{comp} = \frac{G_m A_m + G_w A_w}{A_m + A_w} \quad (3.25.1)$$

$$D_{comp} = \frac{D_m G_m A_m + D_w G_w A_w}{G_m A_m + G_w A_w} \quad (3.25.2)$$

$$\rho_{comp} = \frac{\rho_m A_m + \rho_w A_w}{A_m + A_w} \quad (3.25.3)$$

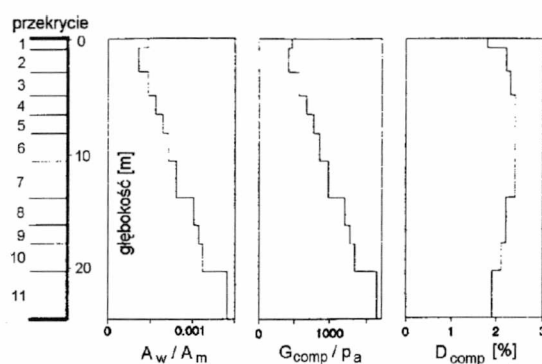
gdzie: indeksy m i w dotyczą wielkości opisujących materiał sypki i ściany silosu,

A – pole przekroju poprzecznego.

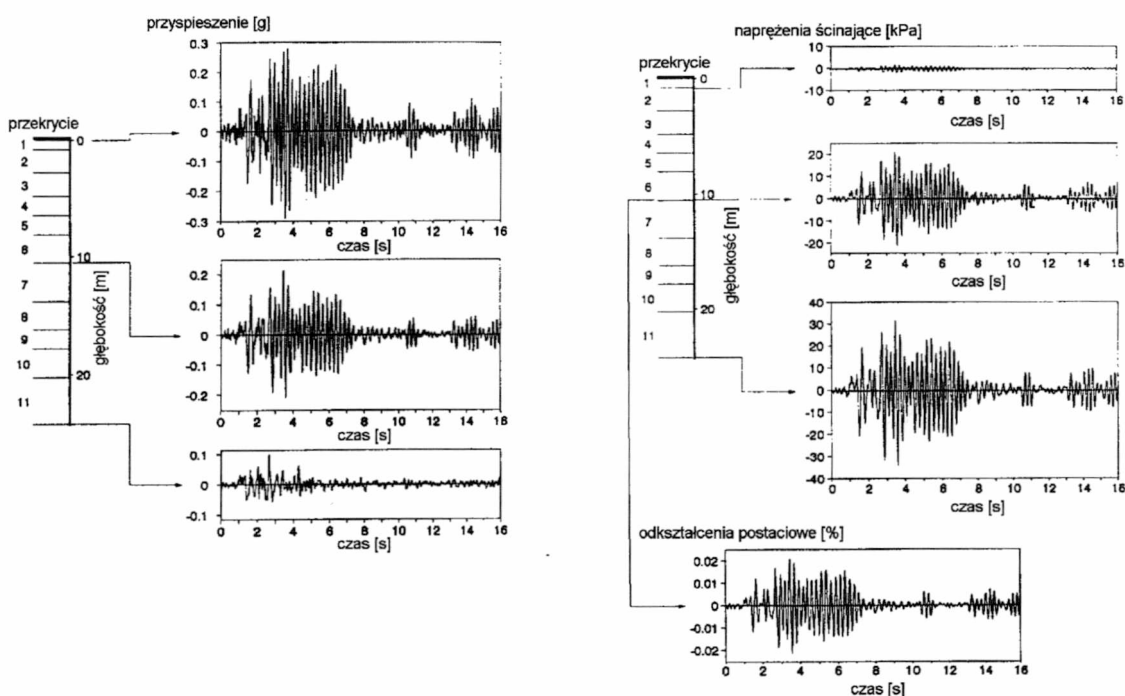
Odpowiedź sejsmiczną analizowanego silosu obliczano iteracyjnie metodą zastępczej liniowej analizy modalnej. Analizie poddano silos stalowy o wysokości 24.4m i średnicy 27.3m, wypełniony pszenicą. Model podzielono na 11 warstw (rys. 3.15).

Układ poddano poziomym wstrząsom podłoża zgodnymi z zarejestrowanymi podczas trzęsienia ziemi w Castaice z maksymalnym przyspieszeniem równym 0.1g. Rysunek 3.16 przedstawia przebiegi czasowe przyspieszenia podłoża stanowiącego wymuszenie oraz odpowiedź przyspieszeniową na górnej krawędzi modelu i warstwy 7 a także odpowiedź modelu w postaci przebiegów czasowych naprężeń ścinających i odkształceń postaciowych wybra-

nych warstw.

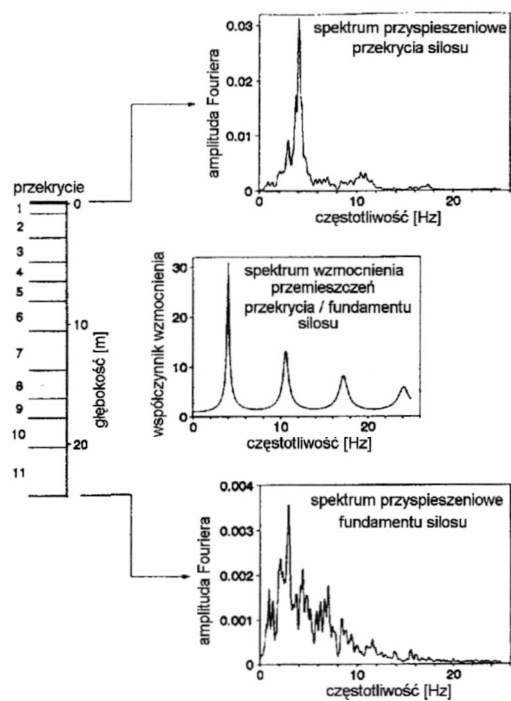


Rys. 3.15 Właściwości warstw modelu [21]

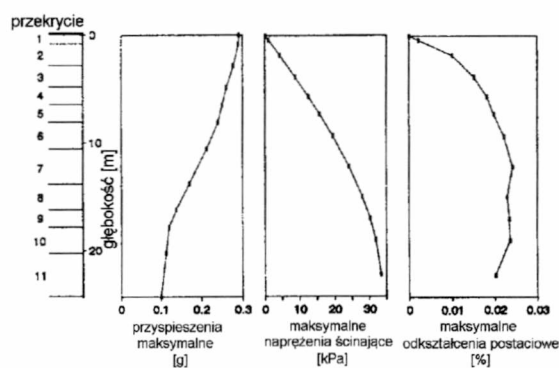


Rys. 3.16 Odpowiedź przyspieszeniowa oraz przebiegi czasowe naprężeń ścinających i odkształceń postaciowych modelu [21]

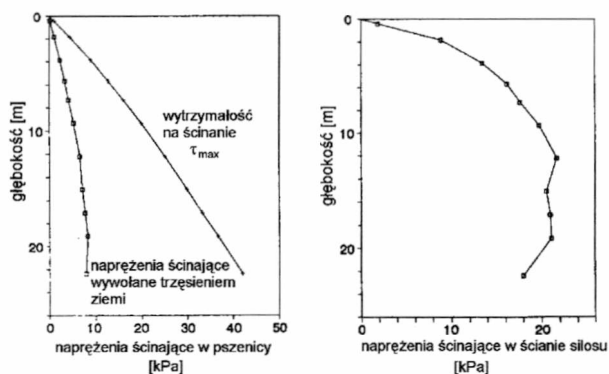
Rysunek 3.17 przedstawia spektra przemieszczeniowe fundamentu i przekrycia analizowanego modelu oraz spektrum wzmocnienia przemieszczenia. Zmiany maksymalnych odpowiedzi na różnych wysokościach silosu przedstawia rysunek 3.18, a rysunek 3.19 rozkład naprężeń ścinających w ścianie i materiale sypkim.



Rys. 3.17 Spektra odpowiedzi [21]



Rys. 3.18 Zestawienie rozkładów na wysokości maksymalnych odpowiedzi analizowanego silosu [21]

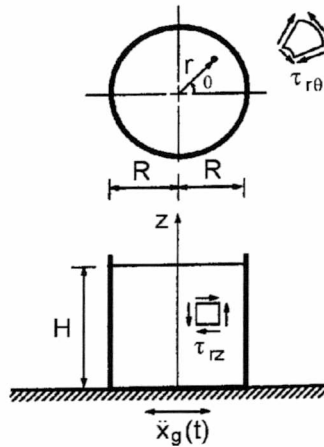


Rys. 3.19 Maksymalne naprężenia ścinające w materiale sypkim i w ścianie silosu [21]

3.4.2.3. Silos poddany harmonicznym wstrząsům podłoża – przestrzenny model analityczny Younana i Veletsosa

W pracach [65, 66] przedstawiono uproszczoną metodę obliczeń odpowiedzi płaskodennego silosu poddanego poziomym, harmonicznym wstrząsům podłoża, wypełnionego materiałem sypkim. Metoda ta pozwala na wyznaczenie rozkładów dynamicznych parć materiału sypkiego na ściany silosu, naprężeń w ścianach komory oraz sił działających na fundament silosu.

Geometrię i przyjęty cylindryczny układ współrzędnych (r, θ, z) , o początku w środku podstawy zbiornika, przedstawia rys. 3.20. Przyjęto, iż zbiornik jest zamocowany do sztywnej podstawy poddanej niezmiennym w przestrzeni, jednolitym ruchom poziomym.



Rys. 3.20 Geometria układu [65]

Do zamodelowania zawartości silosu posłużono się liniowym modelem jednorodnego materiału lepkosprężystego opisanego gęstością ρ , modułem sprężystości poprzecznej G , współczynnikiem Poissona ν i współczynnikiem tłumienia δ , który jest niezależny od częstotliwości oraz od odkształceń postaciowych i osiowych. Założono ponadto, iż poziome wstrząsy układu nie powodują powstawania pionowych naprężeń normalnych w materiale sypkim oraz, że poziome wahania pionowych przemieszczeń materiału sypkiego są nieistotnie małe. Wprowadzono zespolony moduł odkształcalności postaciowej – G^* , związany z rzeczywistym modułem sprężystości poprzecznej G zależnością:

$$G^* = G(1 + i\delta) \quad (3.26)$$

Równania ruchu zawartości silosu w kierunkach promieniowym i obwodowym przedstawiają zależności:

$$\psi_0^2 \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u) + \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] - \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi v) - \frac{1}{\xi} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] + \frac{R^2}{H^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} = \frac{\rho R^2}{G^*} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \ddot{x}_g \cos \theta \right) \quad (3.27)$$

$$\psi_0^2 \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u) + \frac{1}{\xi} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi v) - \frac{1}{\xi} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] + \frac{R^2}{H^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} = \frac{\rho R^2}{G^*} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \ddot{x}_g \sin \theta \right) \quad (3.28)$$

Równania powyższe rozwiązano przy założeniu następujących warunków brzegowych: powierzchnia górna materiału jest swobodna:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} = \left. \frac{\partial v}{\partial \eta} \right|_{\eta=1} = 0 \quad (3.29.1)$$

powierzchnia dolna zamocowana do podstawy silosu:

$$u|_{\eta=0} = v|_{\eta=0} = 0 \quad (3.29.2)$$

Połączenie między materiałem a ścianą zbiornika określono w dwojaki sposób: interfejsem szorstkim (3.29.3) oraz interfejsem gładkim (3.29.4).

$$v|_{\xi=1} = 0 \quad (3.29.3)$$

$$\tau_{r\theta}|_{\xi=1} = 0 \quad (3.29.4)$$

Otrzymano odpowiedź analizowanego silosu na poziome harmoniczne wstrząsy podłoża w postaci zależności opisujących m.in. parcia poziome materiału na ścianę silosu czy naprężenia ścinające:

$$\sigma_r(\eta, \theta, t) = -\frac{\delta \cdot \psi_0}{\pi^2} \rho \ddot{X}_g H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n}{(2n-1)^2} \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \sin\left[\frac{(2n-1)\pi}{2} \eta\right] \cdot \cos(\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.30.1)$$

$$\tau_{r\theta}(\eta, \theta, t) = \frac{\delta}{\pi^2} \rho \ddot{X}_g H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h_n}{(2n-1)^2} \sqrt{\frac{1+i\delta}{1-\phi_n^2+i\delta}} \sin\left[\frac{(2n-1)\pi}{2} \eta\right] \cdot \sin(\theta) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.30.2)$$

$$\phi_n = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (3.30.3)$$

$$\omega_n = \frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.30.4)$$

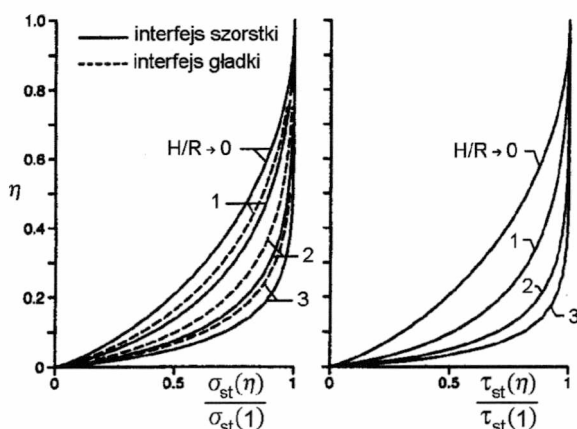
gdzie: ω_n – n-ta własna częstość kątowna drgań materiału sypkiego modelowanego jako ścinana belka wspornikowa,

ω – częstość drgań podłoża gruntowego,

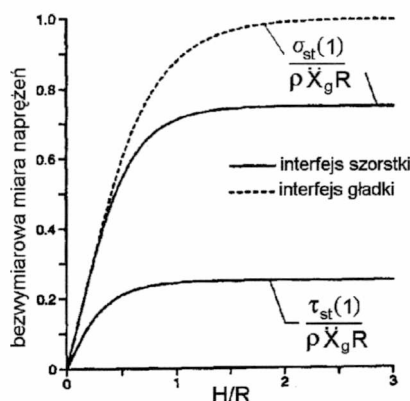
g_n i h_n – bezwymiarowe współczynniki zależne m.in. od przyjętego typu interfejsu między materiałem a ścianą silosu [65].

Rys. 3.21 przedstawia wyznaczone na podstawie niniejszego modelu zmiany rozkładów parć poziomych materiału na ściany silosu (dla $\theta=0^\circ$) oraz obwodowych naprężeń ścina-

jących (dla $\theta=90^\circ$) w zależności od smukłości silosu (wyrażonej stosunkiem H/R) dla obu typów interfejsów. Wielkości te wyznaczono dla wstrząsów podłoża o częstości drgań znacznie mniejszej od częstości drgań własnych materiału wypełniającego silos ($\phi_l \rightarrow 0$). Oba typy naprężeń – normalne i ścinające – oznaczono indeksem st = „statyczny”. Termin ten jest jedynie terminem umownym i nie należy go mylić z ogólnie stosowanym jego znaczeniem.

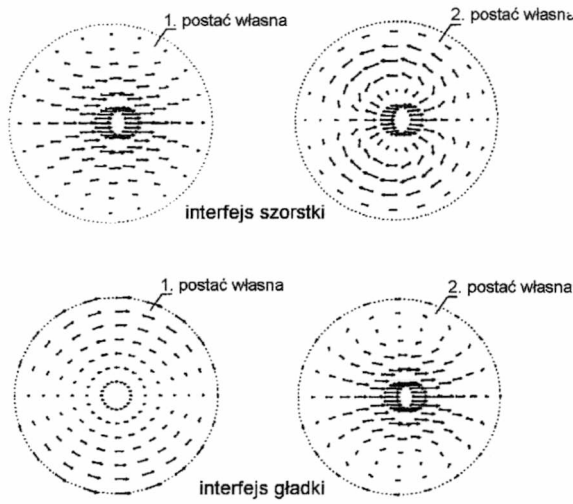


Rys. 3.21 Parcia poziome materiału i obwodowe naprężenia ścinające [65]



Rys. 3.22 Wpływ smukłości silosu na maksymalne naprężenia w materiale [65]

Rys. 3.22 przedstawia znormalizowane wartości naprężeń w materiale na szczycie silosu w zależności od smukłości silosu H/R dla obu typów interfejsów między materiałem a ścianą komory. Rys. 3.23 przedstawia rozkład naprężeń w materiale dla dwóch pierwszych poziomych form własnych drgań w silosie o smukłości równej 1, zarówno z szorstkim jak i gładkim interfejsem.



Rys. 3.23 Rozkład naprężeń w materiale [65]

Model przedstawiony powyżej jest modelem silosu o sztywnych ścianach. W drugiej części niniejszej analizy [66] zmodyfikowano warunki brzegowe równań ruchu zawartości silosu tak, aby uwzględniły one podatność ścian komory silosu. Warunki te przedstawiają równania:

$$u|_{\xi=1} = u_w(\eta, t) \cos \theta \quad (3.31.1)$$

$$v|_{\xi=1} = -u_w(\eta, t) \sin \theta \quad (3.31.2)$$

gdzie: u_w – przemieszczenie dowolnego punktu ściany silosu w kierunku wstrząsu względem podstawy silosu.

Doprowadziło to do wprowadzenia współczynnika wyrażającego podatność ścian:

$$R_n = \frac{\frac{1+i\delta_w}{1+i\delta} - d_w \frac{m_w}{m}}{\frac{1+i\delta_w}{1+i\delta} - d_w \frac{m_w}{m} \frac{\phi_n^2}{1+i\delta} - d_w C_n} \quad (3.32.1)$$

$$C_n = \frac{2}{\pi} \frac{\psi_0 g_n + h_n}{2n-1} \frac{H}{R} \sqrt{\frac{1-\phi_n^2 + i\delta}{1+i\delta}} \quad (3.32.2)$$

gdzie: δ_w – współczynnik tłumienia ścian,

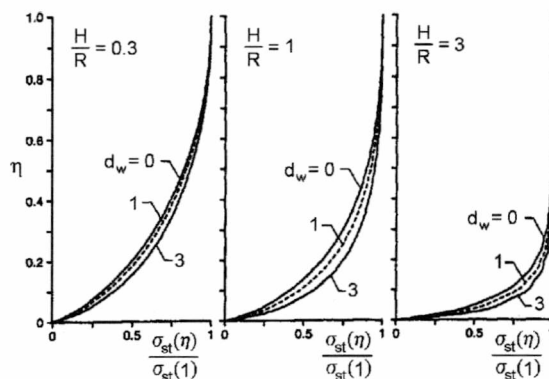
d_w – bezwymiarowa miara sprężystości ścian, zdefiniowana jako:

$$d_w = \frac{1}{2} \frac{GR}{G_w t_w} \quad (3.32.3)$$

t_w – grubość ściany silosu,

G_w – moduł sprężystości poprzecznej ścian silosu.

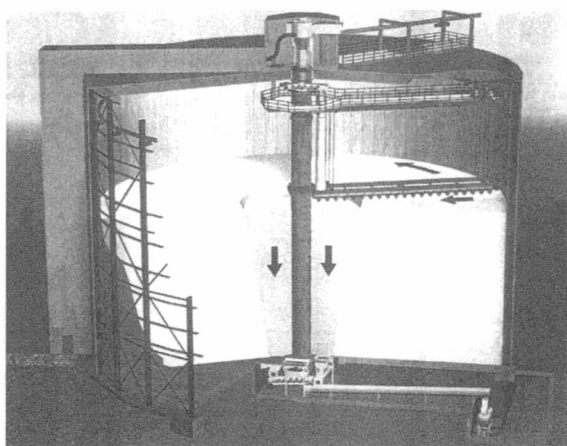
Rys. 3.24 przedstawia rozkład parć materiału na ściany silosów o różnych podatnościach.



Rys. 3.24 Rozkład parć materiału na ściany silosu o różnej podatności [66]

3.4.2.4. Silos poddany wstrząsom podłoża – modele analityczne belki ścinanej Van Wijka

Praca [62] przedstawia kilka uproszczonych metod obliczeń odpowiedzi silosu na trzęsienie ziemi. Modele te opracowano do analiz silosów dużej pojemności, tzw. mamutów, w których ściany zbudowane są z dwóch warstw (rys. 3.25): wewnętrznej – przenoszącej obciążenia materiałem sypkim i zewnętrznej – przenoszącej ciężar własny konstrukcji i obciążenia zewnętrzne.

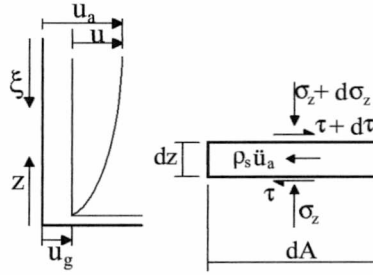


Rys. 3.25 Mamut silos typu Eurosilos [62]

Modelując materiał sypki przyjęto następujące założenia: tłumienie materiału ma charakter wiskotyczny i jest zależne od poziomu odkształceń objętościowych, zależność naprężeń ścinających od odkształceń postaciowych materiału sypkiego jest nieliniowa i dla cyklicznego procesu obciążania ma postać pętli histerezy. Materiał wykazuje właściwości plastyczne już przy wystąpieniu małych odkształceń. Z uwagi na wysoką nieliniowość materiału sypkiego

obliczenia dynamicznej odpowiedzi materiału sypkiego oparto na procedurze iteracyjnej służącej wyznaczeniu postaci i częstości drgań własnych układu.

Pierwszy model opisujący zachowanie się materiału sypkiego poddanego trzęsieniu ziemi jest modelem ścinanej warstwy jednowymiarowej. W celu wyznaczenia właściwości dynamicznych wypełnienia silosu (tj. częstości i postaci drgań własnych) wyprowadzono różniczkowe równanie ruchu warstwy materiału. Siły działające na taką warstwę oraz przyjęty układ współrzędnych przedstawia rys. 3.26.



Rys. 3.26 Układ współrzędnych i równowaga sił w warstwie materiału [62]

Przyjęto, iż relacja między odkształceniami postaciowymi γ , a naprężeniami ścinającymi τ jest zależna od poziomego zalegania warstwy:

$$\tau = G_b \xi^p \gamma \quad (3.33)$$

gdzie: G_b – rzeczywisty moduł sprężystości poprzecznej na spodzie warstwy,

ξ – bezwymiarowa współrzędna,

p – wykładnik z przedziału $0,5 \div 1,0$.

Równanie ruchu ma postać:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G_b}{\rho_s H^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi^p \frac{\partial u}{\partial \xi} \right] = - \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \quad (3.34)$$

Na podstawie niniejszego równania wyznaczono zależności opisujące częstości i postaci drgań własnych:

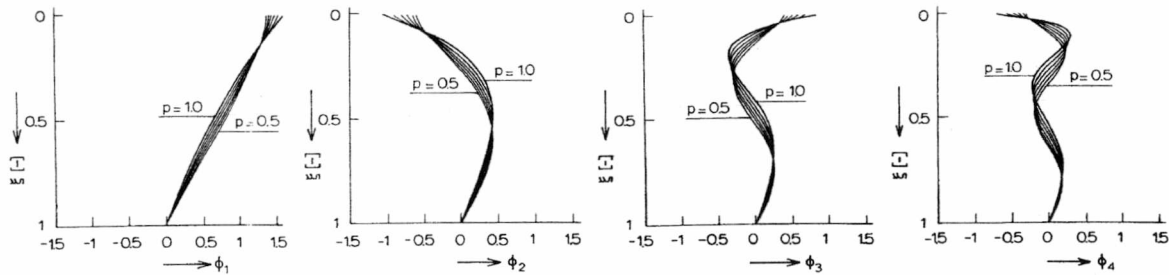
$$\omega_n = \frac{2-p}{2} \frac{\beta_n}{H} \sqrt{\frac{G_b}{\rho_s}} \quad (3.35.1)$$

$$\phi_n(\xi) = \frac{2}{\beta_n} \xi^{\frac{1-p}{2}} \frac{J_{-v} \left(\beta_n \xi^{\frac{2-p}{2}} \right)}{J_{1-v}(\beta_n)} \quad (3.35.2)$$

$$v = \frac{1-p}{2-p} \quad (3.35.3)$$

gdzie: β_n – bezwymiarowe stałe będące n-tymi pierwiastkami funkcji Bessela J_{-v} pierwszego rodzaju.

Pierwsze cztery formy własne wyznaczone wg wzoru (3.35.2) dla różnych wartości wykładnika p przedstawia rysunek 3.27.



Rys. 3.27 Postaci własne modelu [62]

Uzyskane na podstawie powyższych wzorów wartości własne wykorzystano do dalszych obliczeń dynamicznych przemieszczeń poziomych modelu:

$$u(\xi, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(\xi) X(\omega_n, \kappa_n, t) \quad (3.36)$$

w którym X oznacza przemieszczenie układu o jednym stopniu swobody, o nietłumionej częstości kątowej drgań własnych ω_n i współczynniku tłumienia krytycznego κ_n , wzbudzonego przyspieszeniem podłoża $\ddot{u}_g$. Równanie (3.36) jest rozwiązaniem równania ruchu (3.34), uwzględniającym dodatkowo tłumienie wiskotyczne materiału sypkiego. Wprowadzając do dalszej analizy metodę spektrum odpowiedzi do równania (3.36) w miejsce funkcji przemieszczeń X zależnej od czasu wprowadzono jej maksimum zwane przemieszczeniem spektralnym S_d . Otrzymano przybliżone rozkłady maksymalnych przemieszczeń dla poszczególnych form własnych:

$$u_{n,max}(\xi) = \phi_n(\xi) S_d(\omega_n, D) \quad (3.37)$$

Po zsumowaniu ich metodą pierwiastka sumy kwadratów otrzymano:

$$u_{max}(\xi) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (u_{n,max}(\xi))^2} \quad (3.38)$$

gdzie: N – liczba form własnych znacząco wpływających na dokładność rozwiązania.

Wyprowadzono poza tym zależności opisujące modalne odkształcenia postaciowe:

$$\gamma_{n,max}(\xi) = \frac{2-p}{H} \xi^{\frac{1-2p}{2}} \frac{J_{1-v}\left(\beta_n \xi^{\frac{2-p}{2}}\right)}{J_{1-v}(\beta_n)} S_d(\omega_n, D) \quad (3.39.1)$$

$$\gamma_{max}(\xi) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\gamma_{n,max}(\xi))^2} \quad (3.39.2)$$

oraz naprężenia ścinające:

$$\tau_{n,max}(\xi) = (2-p) \frac{G_b}{H} \xi^{\frac{1}{2}} \frac{J_{1-\nu} \left(\beta_n \xi^{\frac{2-p}{2}} \right)}{J_{1-\nu}(\beta_n)} S_d(\omega_n, D) \quad (3.40.1)$$

$$\tau_{max}(\xi) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\tau_{n,max}(\xi))^2} \quad (3.40.2)$$

W pracy [62] zaprezentowano również inną, bardziej uproszczoną, metodę wyznaczania odpowiedzi materiału sypkiego na trzęsienie ziemi. Opiera się ona na następującej przesłankach:

- ponieważ pierwsza częstość własna jest najczęściej zdecydowanie większa od pozostałych, to w obliczeniach wyższe częstości można pominąć;
- funkcja pierwszej postaci własnej dla wartości wykładnika p z praktycznego przedziału od 0.5 do 1.0 (rys. 3.27) może być zastąpiona linią prostą.

W związku z powyższym za wystarczająco dokładne uznano przyjęcie następującej zależności opisującej przemieszczenia modelu:

$$u(\xi) = (1 - \xi) u_t \quad (3.41)$$

gdzie: u_t – nieznana zmienna opisująca przemieszczenie powierzchni warstwy materiału względem jej podstawy.

Tablica 3.1 Porównanie metod wyznaczenia pierwszej częstości własnej i formy własnej [62]

p	0,5	0,8	1,0	ξ
$\omega^{1el} / \omega_I^{bessel}$	1,011	1,005	1,018	
$\phi^{1el} / \phi_I^{bessel}$	1,090	1,010	0,935	0,00
	0,955	1,004	1,047	0,25
	0,941	1,057	1,175	0,50
	0,884	1,139	1,325	0,75

Wykorzystując powyższe założenia wyznaczono funkcje opisujące pierwszą częstość i postać drgań własnych modelu uproszczonego:

$$\omega_l^{lel} = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{3}{1+p} \frac{G_b}{\rho_s}} \quad (3.42.1)$$

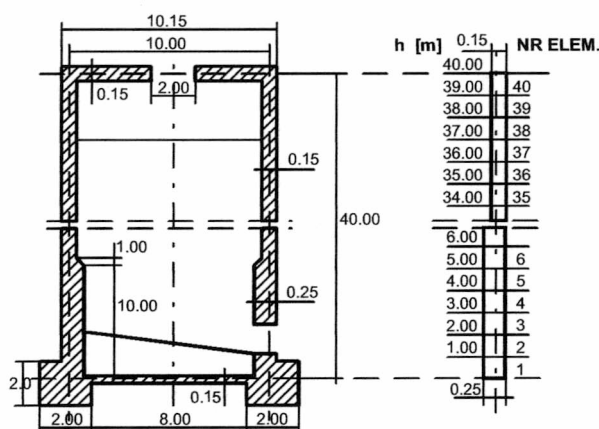
$$\phi_l^{lel} = \frac{3}{2}(1-\xi) \quad (3.42.2)$$

Tablica 3.1 przedstawia rozbieżności między poszczególnymi metodami. Błąd obliczenia częstości drgań własnych sięga 2%, podczas gdy formy własne różnią się od 10% w części górnej modelowanej warstwy do 30% w części dolnej (dla $p = 1$).

3.4.2.5. Silosy poddane wstrząsom parasejsmicznym – przestrzenne modele numeryczne Ciesielskiego i Dulińskiej

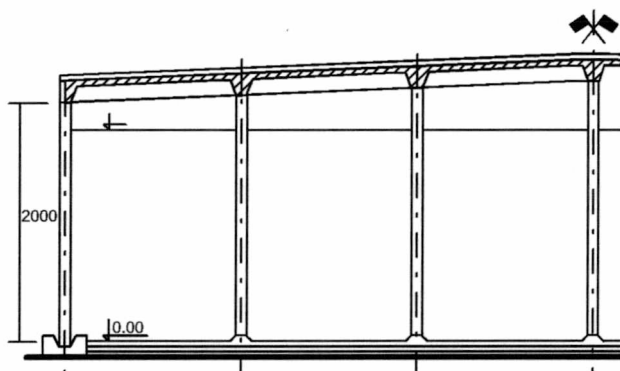
Prace [7, 8, 9] przedstawiają obliczenia numeryczne zachowania się konstrukcji cylindrycznych silosów na materiały sypkie podczas wstrząsów parasejsmicznych. We wszystkich analizach zastosowano metodę elementów skończonych opartą na klasycznej liniowej teorii powłok cienkościennych Sandersa. Materiał konstrukcyjny silosu zamodelowano liniowo sprężystym, izotropowym jednorodnym materiałem. Ściany oraz płyty denne i przekrycie silosów zamodelowano powłokowymi elementami obrotowo-symetrycznymi. Geometrię i podział na elementy skończone silosu z pracy [7] przedstawia rysunek 3.28.

Ponieważ materiał sypki, (zboże), w istotny sposób wpływa na odpowiedź na wymuszenie kinematyczne, analizie poddano silos pusty oraz wypełniony. W przypadku silosu pełnego materiał sypki stanowił jedynie równomiernie rozłożoną masę obciążającą konstrukcję silosu. Pominęto tu dynamiczne właściwości wypełnienia.



Rys. 3.28 Geometria analizowanego silosu [7]

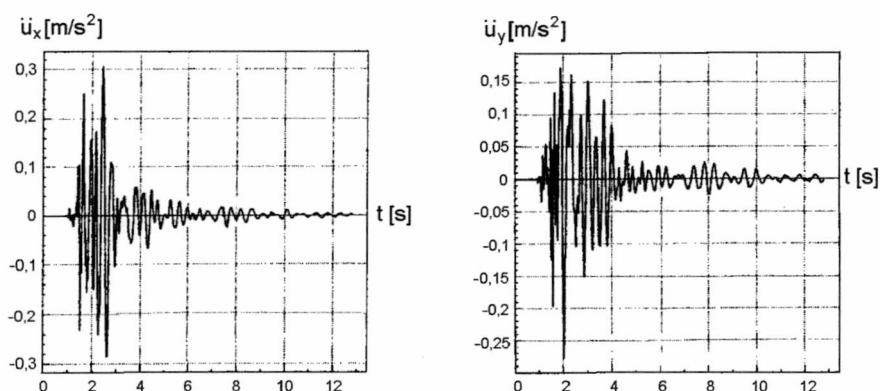
W poszczególnych analizach silosów zakładano, że wymuszenie kinematyczne jest jednakowe dla wszystkich punktów fundamentu [7], bądź, ze względu na duże w stosunku do długości fali gabaryty fundamentu (rys. 3.29) oraz dużą jego sztywność, uwzględniano różnice fazowe wymuszenia w poszczególnych punktach fundamentu [9]. W pracy [8] uwzględniano ponadto efekty interakcji silosu z podłożem gruntowym z zastosowaniem metody obliczeń konstrukcji posadowionej na sprężystym podłożu.



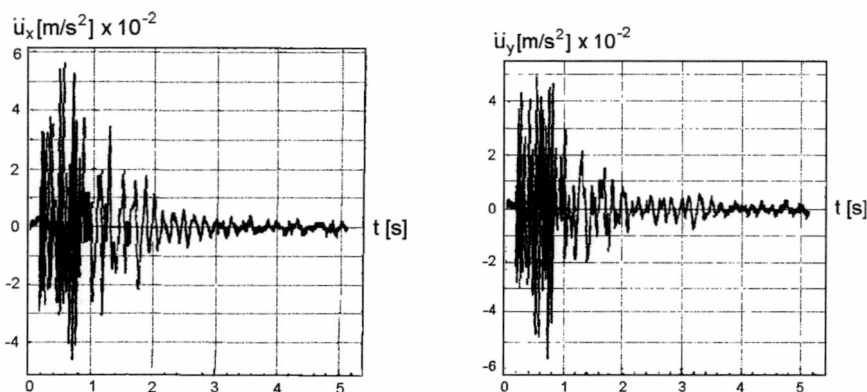
Rys. 3.29 Geometria zbiornika [9]

Stosowano również różne modele wymuszenia kinematycznego, uwzględniające przestrzenny charakter zaburzeń parasejsmicznych. Przykładowe akcelerogramy poziomej składowej wstrząsu górniczego w kierunku propagacji fali oraz prostopadle do kierunku propagacji, pochodzące z zapisu tąpnięcia w Szombierkach [9] jak również akcelerogramy zapisane podczas odstrzałów w kamieniołomie „Małogoszcz” [8] przedstawiają rysunki 3.30 i 3.31.

Wyznaczenie odpowiedzi silosu na wstrząsy parasejsmiczne przeprowadzono metodą analizy modalnej, uwzględniając najczęściej pierwsze 10 form własnych. Celem wszystkich analiz było wyznaczenie rozkładów sił wewnętrznych w ścianach silosów.

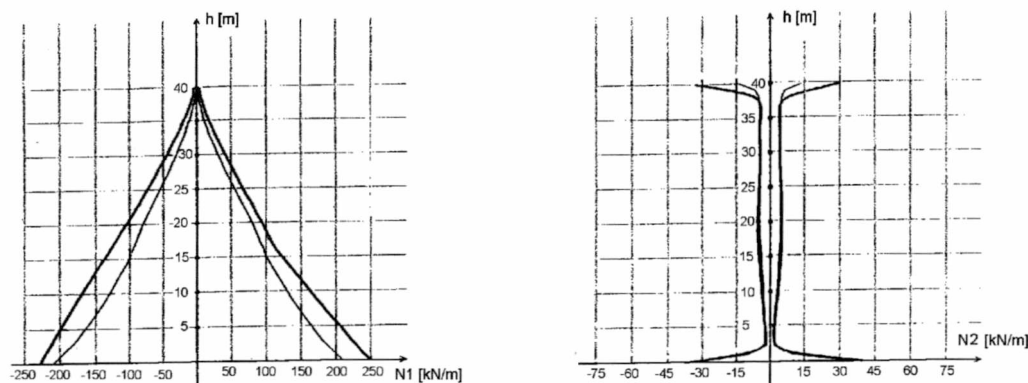


Rys. 3.30 Wstrząs górniczy – Szombierki [9]



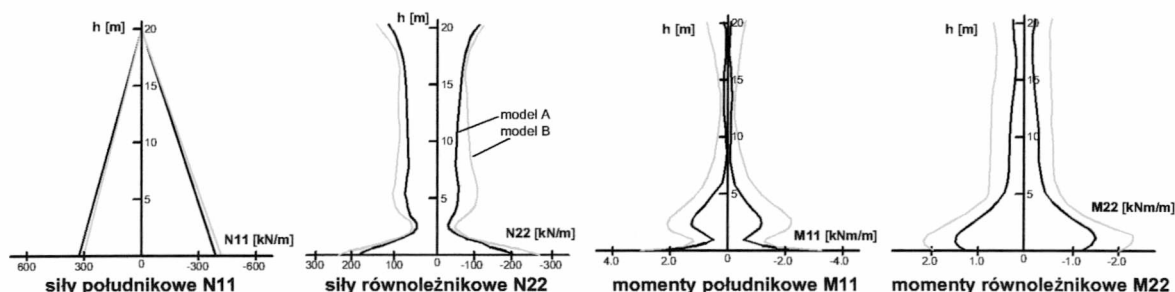
Rys. 3.31 Wstrząs w kamieniołomie „Małogoszcz” [8]

Rysunek 3.32 przedstawia obwiednie sił osiowych dla modelu silosu z wypełnieniem. Różnymi grubościami linii przedstawiono wyniki uzyskane dla przypadków wymuszenia uwzględniające drgania poziome (linia cienka) i drgania przestrzenne (linia gruba).



Rys. 3.32 Obwiednie sił osiowych dla silosu wypełnionego materiałem sypkim [7]

Rys. 3.33 przedstawia natomiast obwiednie sił wewnętrznych dla modeli wymuszenia: równomiernego – nieuwzględniającego przesunięć fazowych dla poszczególnych punktów fundamentu (model A) oraz wymuszenia zmieniającego się na długości fundamentu (model B) [9].



Rys. 3.33 Obwiednie sił wewnętrznych dla obu modeli wymuszenia [9]

3.5. PRZEGLĄD PRAC DOŚWIADCZALNYCH

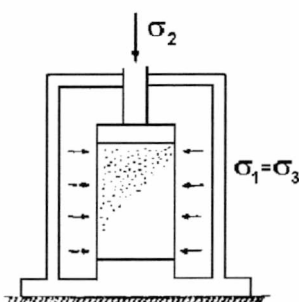
Pomimo stałego rozwoju i coraz większych możliwości metod numerycznych, nadal niezastąpionym narzędziem badawczym zjawisk zachodzących w materiałach sypkich, składowanych w silosach, pozostają metody doświadczalne. Wyniki bezpośrednich obserwacji i pomiarów procesów rzeczywistych wpływają na powstawanie i rozwój metod teoretycznych. Poprawne zamodelowanie mechanicznego zachowania się materiału sypkiego wymaga dokładnego określenia parametrów opisujących związki konstytutywne. Może prowadzić to do konieczności przeprowadzenia szeregu skomplikowanych badań, takich jak badania trójosiowego ściskania czy rozciągania, lepiej odwzorowujących stan naprężeń występujący w materiale w czasie procesu napełniania i opróżniania, niż zwyczajowych, w tym przypadku, badań bezpośredniego ścinania. Doświadczenia prowadzone na obiektach rzeczywistych nie tylko dają pogląd na całościowe lub lokalne zachowanie się konstrukcji silosów czy na rozkład parć materiału na ściany silosu, ale również pozwalają oceniać i weryfikować modele używane w symulacjach numerycznych czy analizach teoretycznych. Niestety, precyzyjne pomiary parć materiału na ściany silosu czy prędkości przyływu materiału na obiektach rzeczywistych wymagają dosyć trudnych i czasochłonnych eksperymentów, drogiego sprzętu i zaawansowanych technik pomiarowych. Ponadto podczas badań, prowadzonych na obiektach będących w ciągłej eksploatacji nie możliwe jest uniknięcie efektu nakładania się rozmaitych trudnych do oddzielenia czynników (np.: wilgotności czy temperatury) oraz uzyskanie powtarzalnego procesu technologicznego (ze względu na różnice w przebiegu napełniania i opróżniania) mającego zasadniczy wpływ na dokładność i wymaganą statystycznie powtarzalność wyników. Pomocne w takim przypadku okazują się modelowe badania laboratoryjne. Pozwalają one wyeliminować lub znacznie ograniczyć wpływ powyższych wad badań w skali naturalnej, jednakże pociągają za sobą wystąpienie innych, równie istotnych problemów. Do podstawowych należy efekt skali, często uniemożliwiający przeniesienie wyników badań modelowych na obiekty rzeczywiste.

3.5.1. BADANIA LABORATORYJNE CECH FIZYKO-MECHANICZNYCH MATERIAŁÓW SYPKICH

O wartościach i rozkładach parć materiałów sypkich na ściany silosów decyduje wiele parametrów, które podzielić można na trzy zasadnicze grupy [26]:

- 1) geometryczne właściwości konstrukcji (kształt komory i leja, smukłość komory, szorstkość

- powierzchni ścian i sztywność konstrukcji komory);
- 2) czynniki eksploatacyjne (napełnianie, składowanie, opróżnianie i temperatura);
 - 3) parametry opisujące cechy fizyczne i mechaniczne materiału sypkiego (wielkość i kształt cząstek, ciężar objętościowy – ρ , kąt tarcia wewnętrznego – ϕ , współczynnik tarcia materiału o ścianę – μ , kohezja – c , granica plastyczności – σ_2^0 , moduł sprężystości podłużnej – E i poprzecznej – G , wilgotność, porowatość, itp.).



Rys. 3.34 Idea badania w aparacie trójosiowego ściskania

Najpowszechniej stosowanym badaniem, przy pomocy którego można określić własności mechaniczne materiałów sypkich jest badanie w aparacie trójosiowego ściskania (rys. 3.34). W badaniu tym walcową próbkę materiału, otoczoną cienką gumową powłoką poddaje się ciśnieniu zewnętrznemu cieczy lub gazu oraz pionowemu naciskowi. W próbce powstaje trójosiowy, symetryczny stan naprężenia i odkształcenia:

$$\sigma_2 \neq \sigma_1 = \sigma_3 \quad , \quad \varepsilon_2 \neq \varepsilon_1 = \varepsilon_3 \quad (3.43)$$

Realizując różne kombinacje naprężeń σ_2 i $\sigma_1 = \sigma_3$, można określić odpowiadające im stany odkształceń, a stąd także aktualną gęstość materiału. Znając powyższe parametry materiału można z kolei określić kształt warunku plastyczności i wyznaczyć wielkości takie jak kąty tarcia wewnętrznego, kohezję i granicę plastyczności.

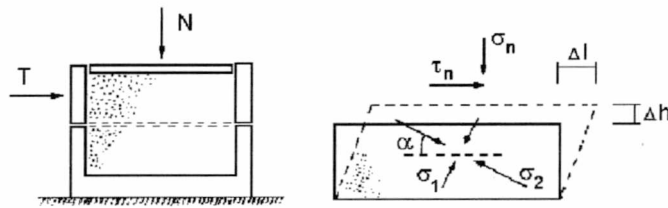
Badanie w aparacie trójosiowego ściskania znalazło zastosowanie przy określaniu własności mechanicznych gruntów. Wykonanie tego badania na pewnych rodzajach materiałów sypkich (np.: o bardzo małych ziarnach), a także przy stosunkowo małych wartościach naprężeń, jakie na ogół panują w silosach, napotyka jednak na znaczne trudności i wymaga specjalistycznej aparatury. Inną metodą określenia parametrów mechanicznych materiałów sypkich jest badanie w aparacie bezpośredniego ścinania. Metoda ta, mimo posiadania szeregu wad, pozwala na wyznaczenie danych dla najróżniejszych materiałów sypkich z wystarczającą do praktycznego zastosowania dokładnością.

Idea badania bezpośredniego ścinania, za pomocą aparatu o te samej nazwie, wywodzi

się wprost z możliwości przedstawienia warunku plastyczności dla materiałów sypkich w postaci związku między naprężeniem stycznym τ_n i normalnym σ_n na płaszczyźnie odchylonej od kierunku naprężenia σ_2 o kąt α określony związkiem 3.44.

$$\alpha = \pm \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.44)$$

Ponieważ pomiar składowych τ_n i σ_n wewnątrz deformującej się jednorodnie próbki nie jest możliwy, w badaniu bezpośredniego ścinania wykorzystuje się pomysł wywołania takiej plastycznej deformacji próbki by zachodziła ona tylko wzdłuż wymaganej płaszczyzny. W tym celu materiał sypki umieszcza się w dwuczęściowej najczęściej cylindrycznej celce i obciąża pewnym pionowym naciskiem N (rys. 3.35).



Rys. 3.35 Idea badania bezpośredniego ścinania

Następnie wymusza się poziomy poślizg jednej części celki względem drugiej, mierząc równocześnie wartość siły T potrzebnej do jego wywołania. Wymuszenie poślizgu obu części celki powoduje, że deformacja materiału ogranicza się do wąskiej strefy sąsiadującej z płaszczyzną podziału celki. Strefę tę można traktować jako ciekłą warstwę materiału doznającą, oprócz prostego ścięcia, także zagęszczenia lub rozluźnienia. Przyjmując, że zarówno siła pionowa N i siła ścinająca T rozkładają się równomiernie na całą powierzchnię poziomą warstwy, można określić wartości naprężeń τ_n i σ_n wg zależności 3.45.

$$\tau_n = \frac{T}{F}, \quad \sigma_n = \frac{N}{F} \quad (3.45)$$

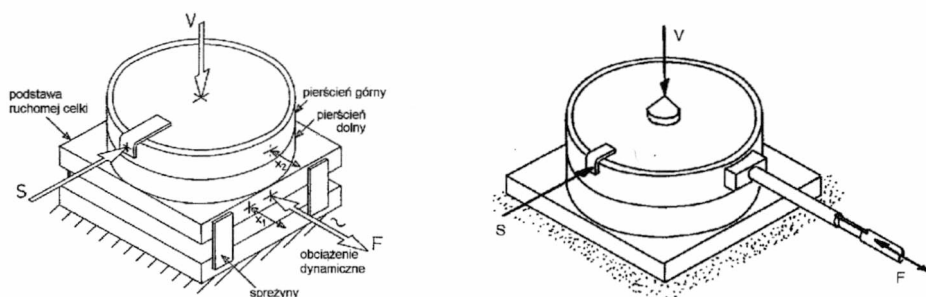
gdzie: F – pole poziomego przekroju warstwy (celki).

Najistotniejszym z założeń przyjmowanych jako podstawa badania tą metodą jest założenie, iż kierunki główne stanu naprężenia w warstwie są do niej nachylone pod kątem α określonym równaniem (3.44). Z analiz deformacji, jakim ulega ścinana warstwa, wynika, iż założenie to jest prawdziwe w przypadku ścinania materiału początkowo zagęszczonego, kiedy deformacja próbki jest rzeczywiście ograniczona do cienkiej warstwy.

Badanie bezpośredniego ścinania zostało wprowadzone dla gruntów i jest ono znacznie mniej dokładne niż badanie trójosiowego ściskania. Na jego szerokie zastosowanie i wystarczającą dokładność w badaniu parametrów płynięcia materiałów ziarnistych magazynowanych w zbiornikach zwrócił uwagę Jenike [25], opracowując procedury pozwalające wyznaczyć parametry φ , c , σ_2^0 . Procedury te są bardzo czasochłonne i wymagają wysokiej precyzji ze względu na konieczność przeprowadzania szeregu pojedynczych prób ścinania na próbkach, doprowadzanych do jednakowych warunków wstępnych, tzn. takich, w których gęstość objętościowa próbki materiału i wstępne naprężenia ścinające będą jednakowe we wszystkich próbach. W pracy [37] przedstawiono udoskonaloną metodę badań parametrów materiałów sypkich nazwaną metodą wielokrotnego ścinania. Metoda ta pozwala na istotnie zmniejszenie liczby badań przy dobrej zbieżności wyników z wynikami metody Jenikego.

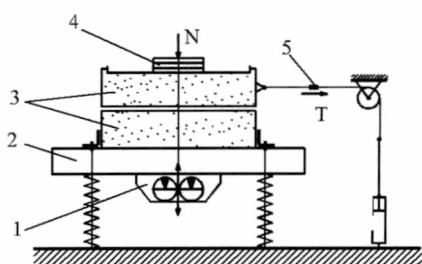
Badania materiałów sypkich w aparatach bezpośredniego ścinania czy trójosiowego ściskania służą głównie określaniu parametrów mechanicznych tych materiałów wykorzystywanych w wyznaczaniu rozkładów parć na ściany silosów podczas podstawowych procesów technologicznych (napelnianie, składowanie czy opróżnianie silosów). Podczas wstrząsów podłoża materiały sypkie przechowywane w silosach poddawane są dodatkowym obciążeniom dynamicznym. Drgania, jakich doznaje w tym czasie materiał sypki, powodują zmiany jego parametrów mechanicznych.

W pracach [46, 47] przedstawiono rezultaty badań laboratoryjnych wpływu drgań mechanicznych na wytrzymałość i tarcie graniczne materiałów sypkich. Badania prowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania Jenikego zmodyfikowanego w sposób umożliwiający wzbudzanie drgań celki zawierającej materiał masowy, którym w tym przypadku był pirofilit (gлина ogniotrwała) oraz ruda żelaza (rys. 3.36). Doświadczenia wykazały, iż drgania mogą powodować znaczne zmniejszenie wytrzymałości badanych materiałów. Redukcja ta jest funkcją stopnia konsolidacji materiału, przyłożonego podczas ścinania naprężenia normalnego i częstotliwości drgań. Eksperymenty wykazały, że wytrzymałość materiału maleje wraz ze wzrostem wymiarów cząstek i zmniejszeniem wilgotności badanego materiału. Drgania materiałów powodują również zmniejszenie sił tarcia pomiędzy materiałem a ścianą. Zmniejszenie tych sił jest funkcją intensywności lub poziomu energii zastosowanych drgań. Na wielkość tarcia ma wpływ rozmiar cząstek materiału sypkiego oraz szorstkość powierzchni. Wykazano, iż drgania powodują zmniejszenie oporów tarcia materiału o ścianę, co zostało wytłumaczone zmniejszeniem pozornej szorstkości powierzchni.



Rys. 3.36 Schemat stanowiska badawczego wg [47]

W pracach [32, 33] przedstawiono zależności analityczne opisujące zachowanie się bezkohezyjnych materiałów sypkich poddanych wibracjom. Wyprowadzenie tych zależności oparto na badaniach eksperymentalnych, przeprowadzonych na piasku kwarcowym w aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 3.37). Badano wpływ drgań na kąt tarcia wewnętrznego i kąt tarcia kontaktowego oraz kąt stoku naturalnego.



- 1 - wibrator z regulowaną amplitudą przyspieszeń
- 2 - stół wibracyjny
- 3 - aparat bezpośredniego ścinania
- 4 - obciążenie do wywierania siły osiowej N
- 5 - układ tensometrów do pomiaru siły tnącej T

Rys. 3.37 Schemat stanowiska badawczego wg [32, 33]

Rysunek 3.38 przedstawia wykresy zależności uzyskanych eksperymentalnie oraz na drodze analitycznej opisujące zmiany kąta tarcia wewnętrznego i kontaktowego w zależności od przyspieszenia drgań. Zależności analityczne przedstawiające wpływ drgań poziomych na kąt tarcia wewnętrznego i kontaktowego oraz na ciężar objętościowy przedstawiają równania 3.46:

$$\mu_d = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{A_h}{g}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{A_h}{g}\right)^2}}} \cdot \mu^2 - \frac{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{A_h}{g}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{A_h}{g}\right)^2}} \quad (3.46.1)$$

$$f_d = f \sqrt{1 - 0.25 \left(\frac{A_h}{g}\right)^2 \frac{[1 + 2\mu_d^2]^2}{\mu_d^2 [1 + \mu_d^2]}} \quad (3.46.2)$$

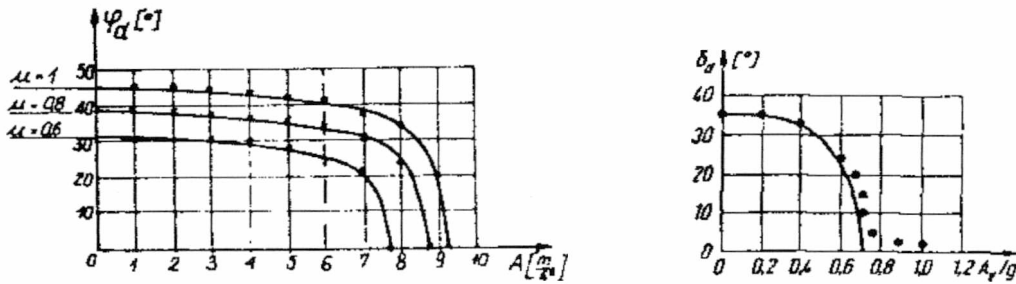
$$\rho_d = \rho_m \sqrt{1 + \left(\frac{A_h}{g} \right)^2} \quad (3.46.3)$$

gdzie: φ – kąt tarcia wewnętrznego w stanie statycznym ($\mu = \tan(\varphi)$);

φ_d – dynamiczny kąt tarcia wewnętrznego ($\mu_d = \tan(\varphi_d)$);

f – współczynnik tarcia materiału o ścianę ($f = \tan(\delta)$);

A_h – poziome przyspieszenie drgań;



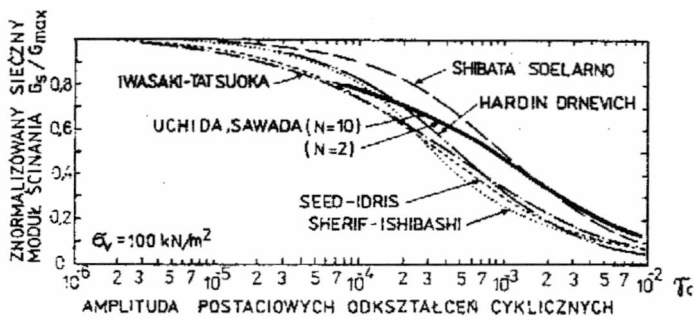
Rys. 3.38 Wykresy zależności: (a) kąt tarcia wewnętrznego – przyspieszenie drgań [32];
(b) kąt tarcia kontaktowego – przyspieszenie drgań [33]

Zachowanie się materiałów sypkich, poddanych drganiom, ma charakter nieliniowy i wykazuje istnienie zjawiska histerezy. W celu doświadczalnego wyznaczenia parametrów pętli histerezy konieczne jest określenie krzywej bazowej dla danego cyklu obciążenia oraz rejestracja pętli w tym cyklu, przy różnych poziomach cyklicznych naprężeń ścinających. Wśród stosowanych metod określania krzywej bazowej badanego materiału można wyróżnić dwie, najpowszechniej stosowane metody [44]:

- Metodę niezależnych badań – polegającą na przeprowadzaniu kilku niezależnych testów przy różnych poziomach cyklicznych naprężeń ścinających lub odkształceń postaciowych. Jest ona metodą najbardziej prawidłową spośród omawianych, jednakże jej podstawową niedogodnością jest konieczność wykonania wielu badań, co stwarza dodatkowe kłopoty związane z trudnościami pozyskania próbek o identycznych parametrach wyjściowych (struktura, zagęszczenie itd.);
- Metodę szybkiego ścinania – opierającą się na założeniu, że krzywa bazowa jest identyczna z krzywą zależności naprężenia ścinającego od odkształcenia postaciowego dla klasycznego szybkiego ścinania bez odpływu z szybkością odkształceń pionowych 8%/s.

Zestawienie wyznaczonych eksperymentalnie przez różnych autorów zależności znormalizowanego siecznego modułu ścinania od amplitudy naprężenia ścinającego dla piasku przedstawia rysunek 3.39. Jak widać otrzymane wyniki badań różnymi metodami zacho-

wują dobrą zgodność. Tą samą krzywą uzyskaną w czasie badań doświadczalnych pszenicy [20] przedstawia rysunek 3.13(a). Została one wykorzystana w analizach silosu poddanego wstrząsom sejsmicznym przedstawionych w rozdziale 3.4.2.2.



Rys. 3.39 Zestawienie wyników badań doświadczalnych różnych autorów [44]

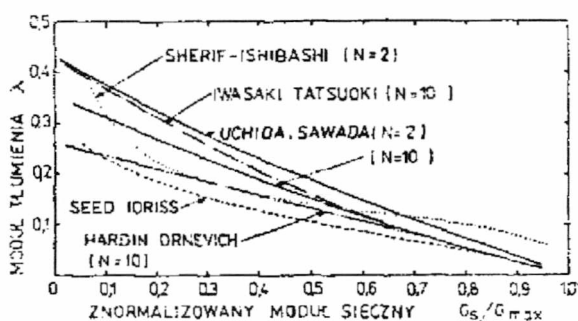
Niesprężystość materiału sypkiego jest powodem powstawania strat energii podczas każdego cyklu obciążania. Miarą całkowitej energii rozpraszanej w czasie jednego cyklu jest równoważny moduł tłumienia, nazywany również zdolnością tłumienia. Doświadczalne wyznaczenie modułu tłumienia wymaga rejestracji kilku pętli histerezy w czasie trwania obciążenia cyklicznego o danym poziomie cyklicznych naprężeń ścinających lub odkształceń postaciowych. Można wyznaczyć go z tych samych wyników badań, na podstawie których określa się krzywą bazową.

Badania laboratoryjne wykazują, że moduł ścinania i tłumienie zależą nie tylko od liczby cykli, ale także od amplitudy cyklicznych odkształceń postaciowych, stopnia zagęszczenia, początkowego obciążenia pionowego, ciśnienia hydrostatycznego oraz czasu konsolidacji czy wilgotności materiału [44]. Zestawienie jakościowych zależności modułów ścinania i tłumienia dla piasku od wymienionych czynników przedstawia tablica 3.2.

Tablica 3.2 Zestawienie zmienności modułów ścinania i tłumienia piasku [44]

CZYNNIKI:	wzrost liczby cykli	wzrost amplitudy odkształceń postaciowych	wzrost stopnia zagęszczenia	wzrost pionowego naprężenia w aparacie bezpośredniego ściania	wzrost ciśnienia wszechstronne go w aparacie trójosiowym	wzrost czasu konsolidacji
PARAMETRY						
MODUŁ ŚCINANIA	nieznacznie wzrasta	znacznie maleje	nieznacznie wzrasta	znacznie wzrasta	znacznie wzrasta	nieznacznie wzrasta
TŁUMIENIE	nieznacznie maleje	znacznie wzrasta	nieznacznie maleje	nieznacznie maleje	nieznacznie maleje	znacznie maleje

Rysunek 3.40 przedstawia zestawienie zależności modułu tłumienia od znormalizowanego modułu siecznego, uzyskanych z badań piasku w aparacie trójosiowego ściskania oraz prostego ścinania.

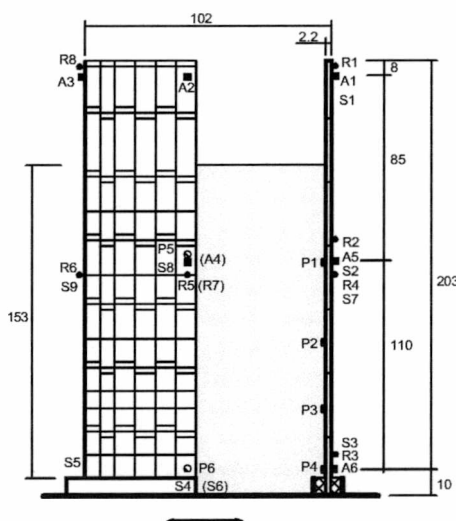


Rys. 3.40 Porównanie zależności tłumienia od modułu siecznego wg różnych autorów [44]

3.5.2. BADANIA LABORATORYJNE SIŁOSÓW OBCIĄŻONYCH DYNAMICZNIE

3.5.2.1. Badania modelowe żelbetowego silosu klepkowego poddanego wstrząsom sejsmicznym

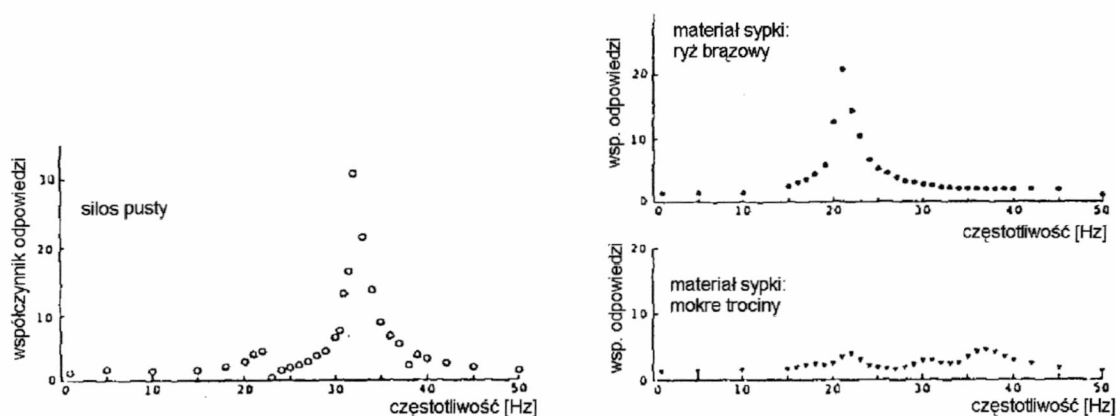
W pracy [51] przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych żelbetowego silosu klepkowego poddanego wstrząsom sejsmicznym. Silosy tego typu – wznoszone głównie w USA, Kanadzie i Japonii – zbudowane są z małych żelbetowych prefabrykatów opasanych od zewnątrz stalowymi obręczami.



Rys. 3.41 Schemat stanowiska badawczego [51]

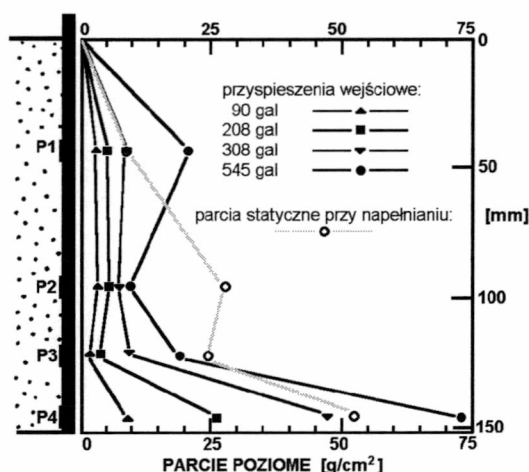
Doświadczenia przeprowadzono na modelu w skali 1:6 ustawionym na stole wstrząsowym. Materiałem wypełniającym silos był brązowy ryż i wilgotne trociny (będące modelem kiszonki). Testom poddano również silos bez wypełnienia. Wymiary i rozmieszczenie czujników pomiarowych przedstawia rysunek 3.41.

Rysunek 3.42 przedstawia krzywe rezonansowe przyspieszeń na wierzchołku modelu dla silosu pustego i wypełnionego oboma materiałami sypkimi. Zaobserwowano znaczący wpływ rodzaju materiału na charakterystyki dynamiczne oraz tłumienie układu.



Rys. 3.42 Przyspieszeniowe krzywe rezonansowe [51]

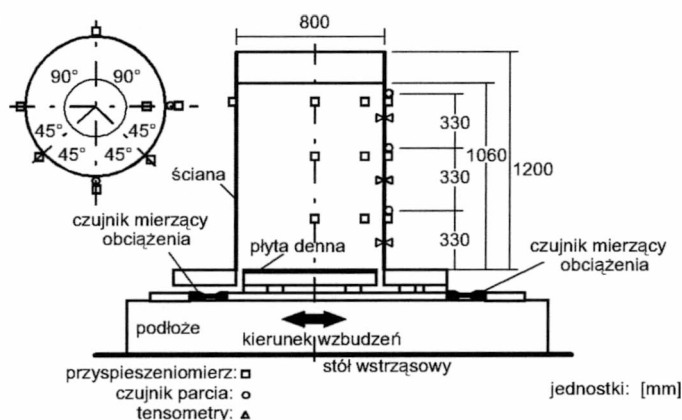
Rysunek 3.43 przedstawia parcia materiału sypkiego (ryżu) na ściany silosu wywołane wstrząsem sejsmicznym Nemurohanto-oki. Dla porównania, na tym samym wykresie, przedstawiono również rozkład poziomych parć statycznych.



Rys. 3.43 Rozkład parć poziomych[51]

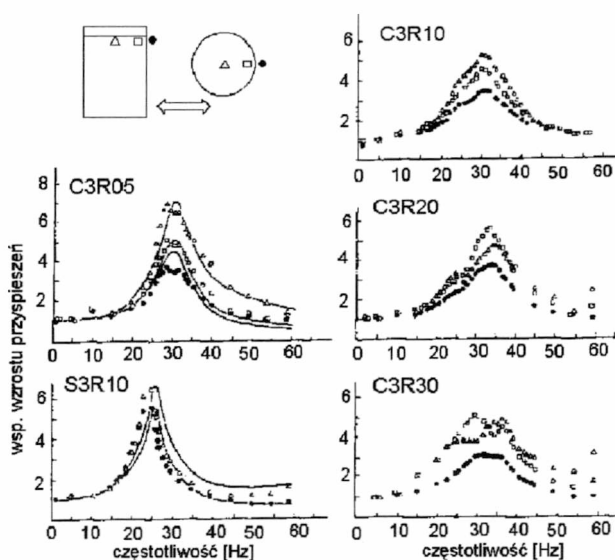
3.5.2.2. Badania modelowe silosu na węgiel poddanego wstrząsom sejsmicznym

W pracy [50] przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych silosu na węgiel poddanego obciążeniu sejsmicznemu. Doświadczenia przeprowadzono na modelu w skali 1:30. Zakres badań obejmował m.in. zagadnienia interakcji materiału sypkiego (miału węglowego i żużla) ze ścianami silosu i wpływu nieliniowych właściwości mechanicznych węgla na dynamiczne zachowanie się silosu. Model zbudowany z plastiku akrylowego postawiono na stole wibracyjnym. Schemat stanowiska i rozmieszczenie punktów pomiarowych przedstawia rysunek 3.44.



Rys. 3.44 Schemat stanowiska badawczego [50]

Rysunek 3.45 przedstawia krzywe rezonansowe przyspieszeń materiału sypkiego oraz ścian silosu, którego komora wypełniona była materiałem sypkim i przekryta od góry.

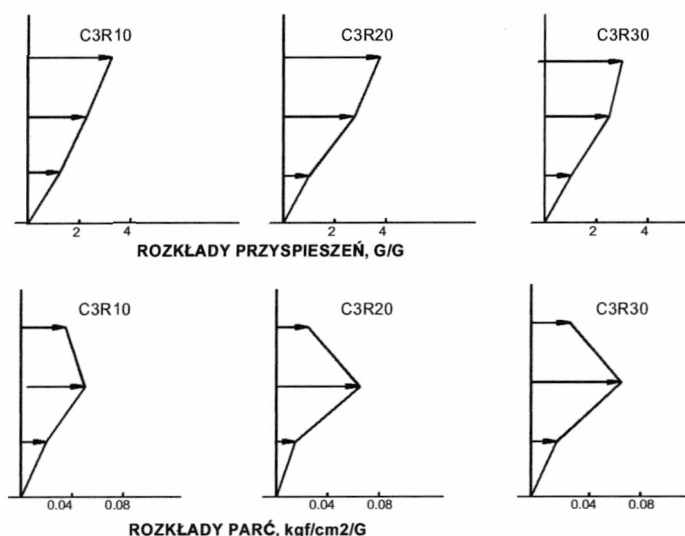


Rys. 3.45 Przyspieszeniowe krzywe rezonansowe [50]

Na podstawie analizy krzywych rezonansowych i rozkładów dynamicznych parć materiału sypkiego stwierdzono, że:

- materiał sypki w komorze silosu ma bardzo duży wpływ na tłumienie układu (3% – tłumienie silosu bez wypełnienia oraz około 20% tłumienie dla silosu wypełnionego miałem węglowym);
- zastosowanie przekrycia lub jego brak nie ma wpływu na zachowanie się silosu wypełnionego materiałem sypkim (np.: nie stwierdzono wystąpienia efektu owalizacji ścian komory silosu);

maksima dynamicznych parć materiału sypkiego zarejestrowano na około 2/3 wysokości silosu, podczas gdy maksima przyspieszeń miały miejsce na szczycie silosu (rys. 3.46).



Rys. 3.46 Rozkłady przyspieszeń i parć materiału na ściany silosu [50]

3.6. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY

Wiedza na temat zachowania się silosów oraz materiałów w nich składowanych poddanych wstrząsom podłoża jest z pewnością niepełna. Przyczyny takiego stanu rzeczy pogrupować można następująco:

- *Przyczyny tkwiące w metodyce i dokładności badań laboratoryjnych cech mechanicznych materiałów sypkich.*

Dokładne wyznaczenie cech mechanicznych materiałów sypkich metodami laboratoryjnymi przysparza wielu trudności, jest czasochłonne i obarczone znaczną możliwością błędu, a uzy-

skane wyniki nie zawsze nadają się do zastosowania w mechanice ośrodka sypkiego. M.in. badania trójosiowego ściskania przy małym poziomie naprężeń, jaki panuje na ogół w silosach, czy dla materiałów o bardzo małych ziarnach, wymagają perfekcyjnej aparatury pomiarowej. Porównywalną niedokładnością obarczone są wyniki badań przeprowadzanych w aparatach bezpośredniego ścinania, m.in. w związku z koniecznością przeprowadzania wielu prób na próbkach, które powinny być doprowadzone do jednakowych warunków wstępnych.

- *Przyczyny związane z modelem konstytutywnym ośrodka sypkiego.*

Rozwiązania teoretyczne (zarówno numeryczne i analityczne) wymagają sformułowania związków konstytutywnych, opisujących materiał sypki uwzględniających takie jego cechy, jak: barotropia, plastyczność, pyknotropia, argotropia itd. Cechy te są wzajemnie ze sobą powiązane i zastosowanie w analizach związków konstytutywnych pomijających którąkolwiek z tych cech przyczynia się do błędnego zamodelowania rzeczywistego zachowania się ośrodka. Duży stopień złożoności tych związków uniemożliwia dziś zbudowanie modelu analitycznego i zastosowanie go w praktyce, a pozwala jedynie na prowadzenie symulacji numerycznych, wymagających jednak zaawansowanego oprogramowania. W obliczeniach takich konieczne jest wprowadzenie szeregu parametrów wejściowych, których fizyczne znaczenie nie zawsze jest oczywiste, a które mają często zasadniczy wpływ na przebieg i wyniki analiz wymagających następnie weryfikacji na drodze doświadczalnej.

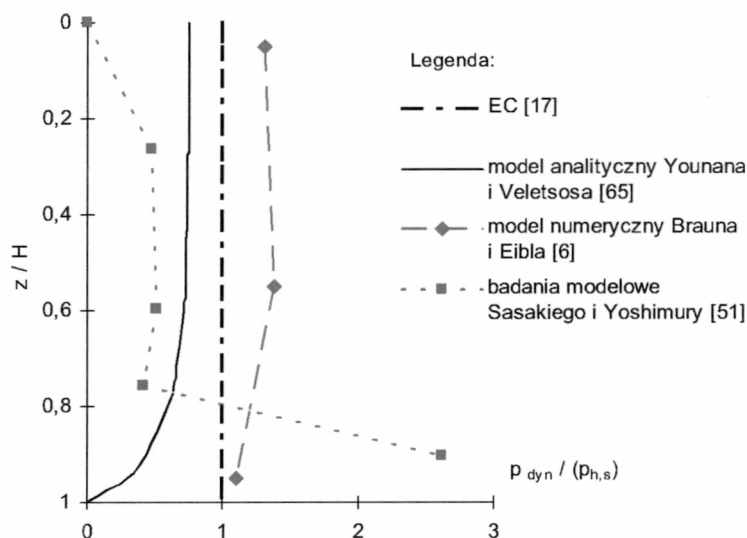
- *Przyczyny związane z badaniami doświadczalnymi silosów.*

Obserwacje obiektów rzeczywistych wznoszonych na terenach sejsmicznych czy parasejsmicznych, będące najlepszym źródłem wiedzy o zachowaniu się tych obiektów, nie zawsze pozwalają na wyciągnięcie wniosków natury ogólnej (np.: z powodu nakładania się różnych, trudnych do oddzielenia czynników, czy z powodu niemożliwej do osiągnięcia powtarzalności wyników, niezbędnej ze względów statystycznych). Badania laboratoryjne pozwalają wyeliminować lub znacznie ograniczyć wpływ powyższych wad badań w skali naturalnej. Zasadniczym problemem występującym w doświadczeniach laboratoryjnych jest efekt skali. W związku z czym, przy przenoszeniu wyników badań modelowych na obiekty rzeczywiste, należy oszacować błąd spowodowany tym efektem.

Z powyżej przedstawionych przyczyn opublikowano niewiele prac, których tematyka dotyczy bezpośrednio wpływu wstrząsów podłoża na silos i jego zawartość, a szczególnie na rozkład parć materiału sypkiego na ściany silosu. Niemniej jednak badania laboratoryjne, których wyniki przedstawiono w niniejszym przeglądzie literatury [50, 51] pozwalają stwierdzić, iż wypełnienie silosu ma duży wpływ na dynamiczną charakterystykę układu: silos – materiał

sypki, w szczególności zaś zauważono, że:

- Obecność materiału sypkiego w silosie jest przyczyną wzrostu tłumienia całego układu do 20%, podczas gdy dla silosu bez wypełnienia tłumienie wynosi 3% [50].
- Wzrost przyspieszeń poziomych drgań podłoża powoduje skrajnie różne odpowiedzi badanego modelu, zależnie od rodzaju materiału wypełniającego silos, np.: przyspieszenie silosu w przypadku wilgotnych trocin maleje o ok. 20% , zaś w przypadku wypełnienia silosu ryżem – rośnie o ok. 40%, w porównaniu do odpowiedzi silosu bez wypełnienia [51].
- Szczególną uwagę zwraca występowanie dużych jakościowych rozbieżności pomiędzy rezultatami pomiarów rozkładów dynamicznych poziomych parć materiałów sypkich na ściany silosów. Jedne badania wykazują maksymalny wzrost parć w dolnej części komory silosu (rys. 3.43), drugie zaś na poziomie ok. 2/3 wysokości silosu (rys. 3.46).



Rys. 3.47 Porównanie rozkładów parć poziomych wg różnych autorów

Tablica 3.3 przedstawia zestawienie prezentowanych w niniejszym rozdziale rozwiązań teoretycznych związanych z parciem materiału sypkiego na ściany silosu wywołanym wstrząsami podłoża. Szczególną uwagę zwrócono na model numeryczny Brauna i Eibla [6] oraz model analityczny Younana i Veletsosa [65, 66], które jako jedyne pozwalają na wyznaczenie rozkładów tych dodatkowych parć dynamicznych. Rozkłady te oraz rozkłady pochodzące z pracy doświadczalnej [51], a także rozkład proponowany przez Eurokod [17] przedstawiono na rysunku 3.47.

Tablica 3.3 Porównanie modeli

autorzy	model układu	model materiału sypkiego	rodzaj i forma rezultatów
Ciesielski i Dulińska [7, 8, 9]	- numeryczny; 3D; - analiza modalna	brak modelu materiału sypkiego, zastąpienie go rozkładem mas	- wyniki w postaci przebiegów czasowych sił wewnętrznych w powłoce silosu; - brak możliwości wyznaczenia dynamicznych parć materiału sypkiego na ściany silosu
Hardin, Bucklin i Ross [20]	- numeryczny; 2D, belka ścinana; - analiza modalna	- nieliniowy model lepko-sprężysty; $G(\gamma)$ i $D(\gamma)$ w postaci pętli histerezy; G i D zależne od poziomu zalegania	- wyniki w postaci rozkładów naprężeń ścinających, odkształceń postaciowych; - brak możliwości wyznaczenia dynamicznych parć materiału sypkiego na ściany silosu
Braun i Eibl [6]	- numeryczny; 3D; - analiza konstrukcji w czasie	nieliniowy model hypoplastyczny	- model najbardziej zaawansowany numerycznie; - wszystkie wyniki w postaci przebiegów czasowych;
Van Wijk [62]	- analityczny; 2D, belka ścinana; - spektrum odpowiedzi	- nieliniowy model lepko-sprężysty; $G(\gamma)$ i $D(\gamma)$ w postaci pętli histerezy	- wyniki w postaci rozkładów maksymalnych przemieszczeń, odkształceń postaciowych i naprężeń ścinających; - brak możliwości wyznaczenia dynamicznych parć materiału sypkiego na ściany silosu
Younan i Veletsos [65, 66]	- analityczny; 3D; - wstrząs w postaci harmonicznej	- liniowy model lepko-sprężysty; $G = const.$, $D = const.$	- wyniki w postaci rozkładów przestrzennych i czasowych naprężeń, przemieszczeń; - model uwzględniający podatność ścian.

Jak wynika z wykresów (rys. 3.47), na podstawie aktualnego stanu wiedzy nie można udzielić jednoznacznej odpowiedzi na pytanie dotyczące faktycznego przyrostu (bądź spadku) poziomu parć materiału sypkiego na ściany silosu spowodowanego wstrząsami podłoża. Istnieje zatem uzasadniona potrzeba przeprowadzenia badań w tym zakresie.

Prezentowane w tablicy 3.3 modele analityczne opierają się z jednej strony na daleko idących uproszczeniach (związanych np.: z geometrią silosu), a z drugiej strony wymagają zastosowania rozbudowanego aparatu matematycznego. Modele numeryczne natomiast poza oczywistymi wymogami dotyczącymi zaawansowanego oprogramowania, zależą od szeregu parametrów, całkowicie numerycznych (np.: od wielkości przyrostu obciążenia czy dyskretyzacji czasoprzestrzennej) oraz od innych danych, których fizyczne znaczenie nie zawsze jest oczywiste i których właściwy dobór wymaga dużego doświadczenia w dziedzinie mechaniki materiałowej. W związku z powyższym zastosowanie któregośkolwiek modelu w praktyce inżynierskiej uważam za bardzo utrudnione.

4. PARCIE MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU, SPOWODOWANE WSTRZĄSAMI PODŁOŻA – BADANIA LABORATORYJNE

4.1. CELE BADAŃ

W rozdziale niniejszym przedstawiono wyniki badań wpływu zewnętrznych obciążeń dynamicznych, przekazywanych na konstrukcję silosu poprzez podłoże gruntowe na zachowanie się układu: silos – materiał wypełniający.

Główne cele badań to:

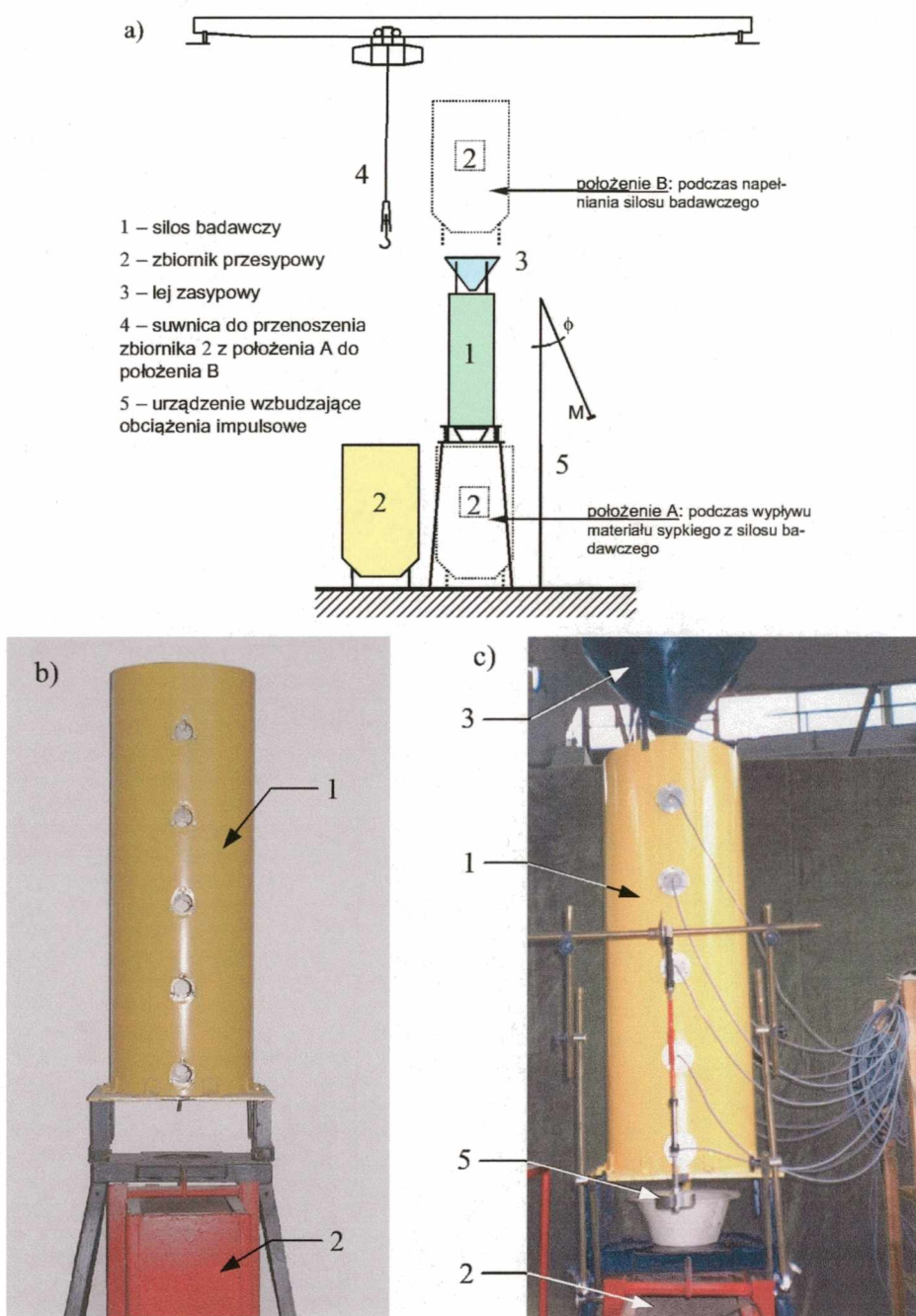
- 1) rejestracja i opis zmian poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu zachodzących w czasie działania zewnętrznego obciążenia dynamicznego;
- 2) określenie zależności parcia poziomego materiału sypkiego na ściany silosu od poziomu zewnętrznego obciążenia dynamicznego;
- 3) wyjaśnienie wpływu sztywności podłoża gruntowego na rozkład parć materiału sypkiego na ściany silosu.

4.2. STANOWISKO BADAWCZE I PROGRAM BADAŃ

Badania modelowe przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Do doświadczeń posłużono się stalowym modelem płaskodenego

silosu walcowego. Wysokość komory silosu wynosi 1200mm, średnica – 400mm, a grubość ściany – 4mm. Dno modelu stanowi płyta o grubości 10mm oparta na układzie sprężyn odzwierciedlających podłoże gruntowe.

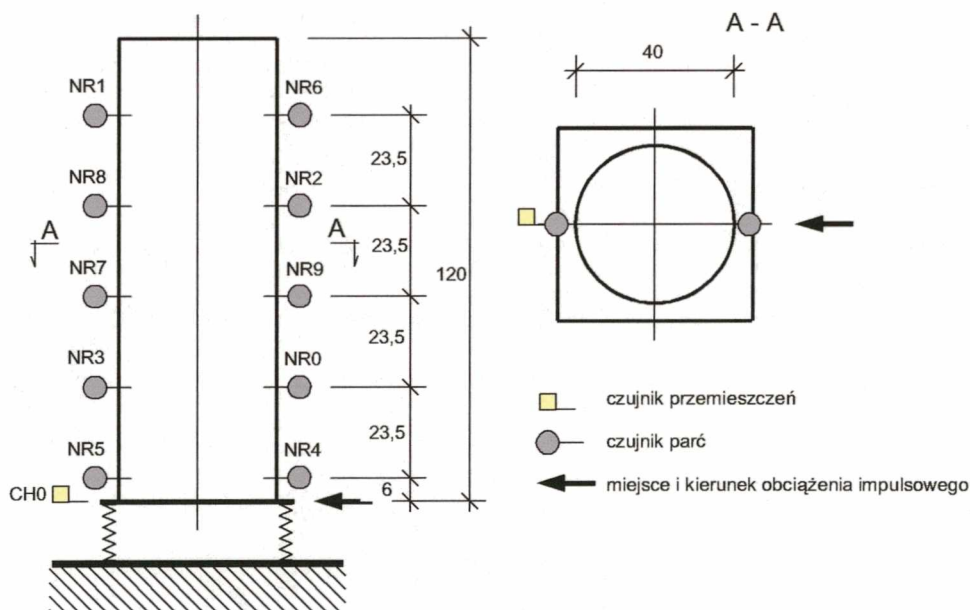
Ponieważ celem niniejszych badań jest analiza wpływu drgań podłoża na parcia materiału sypkiego na ściany silosu, za celowe uznano wykonanie modelu o dużej sztywności, eliminując w ten sposób wpływ podatności ścian silosu na rozkład parć.



Rys. 4.1 Stanowisko badawcze: a) schemat; b) model nieuzbrojony; c) model podczas badań

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 4.1. Do podstawowych elementów stanowiska należą: silos badawczy, zbiornik przesypowy, lej zasypowy zakładany na czas zasypu materiału sypkiego do silosu badawczego w celu zachowania jednakowych warunków napełniania, stałej prędkości i wysokości zasypu, dla wszystkich cykli pomiarowych, suwnica służącej do przenoszenia zbiornika przesypowego, urządzenie wzbudzające obciążenia impulsowe oraz układ rejestrujący w postaci przetwornika Spider8, komputera z oprogramowaniem „Catman” firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.

Do realizacji obciążenia dynamicznego posłużono się urządzeniem w postaci wahadła o zmiennej masie, długości i kącie wychylenia początkowego. Wahadło uderzając poziomo w podstawę silosu badawczego generowało impulsy, wprowadzając model w drgania o różnych amplitudach. W celu doboru parametrów wahadła w taki sposób, aby uzyskać możliwie szerokie spektrum obciążeń impulsowych bez przekraczania zakresów pomiarowych czujników parcia, przeprowadzono wzorcowanie urządzenia wzbudzającego. Wielkościami odniesienia opisującymi obciążenia dynamiczne były maksymalne poziome przyspieszenia podstawy modelu, wyznaczone w trakcie każdego cyklu pomiarowego na podstawie przemieszczeń mierzonych czujnikiem indukcyjnym CH0 (rys. 4.2). Ostatecznie przyjęto cztery wartości dynamicznego obciążenia impulsowego (tablica 4.2).



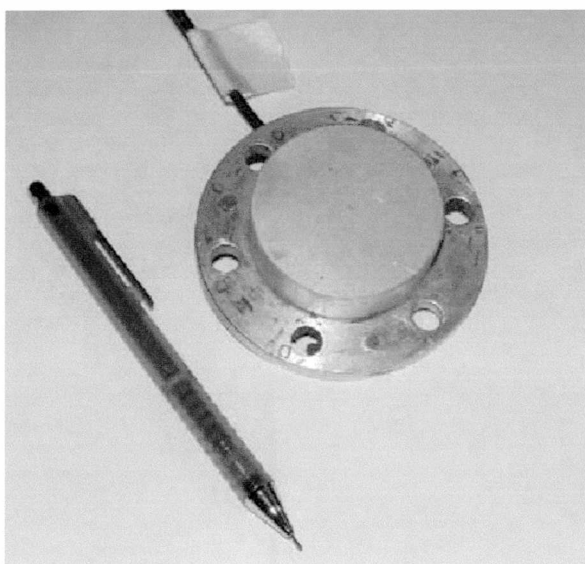
Rys. 4.2 Schemat rozmieszczenia przyrządów pomiarowych

Wzdłuż dwóch przeciwległych pionowych tworzących komory silosu badawczego rozmieszczono gniazda do osadzenia czujników parcia poziomych (po 5 w każdej tworzącej).

Ponadto na poziomie podstawy silosu zamocowano czujnik indukcyjny do pomiaru przemieszczeń poziomych modelu. Schemat rozmieszczenia przyrządów przedstawia rys. 4.2.

W celu zamodelowania różnych dynamicznych właściwości podłoża gruntowego posłużono się dwoma układami sprężyn o różnych sztywnościach, odzwierciedlających podłoże o współczynnikach dynamicznych $C_x = 5,4 \text{ MN/m}^3$ i $C_x = 6,6 \text{ MN/m}^3$, dla których przeprowadzono dwie grupy badań oznaczonych odpowiednio jako *P* i *S*.

Do pomiaru parć poziomych materiału sypkiego zastosowano czujniki membranowe o średnicy i grubości membrany równej odpowiednio 40mm i 0,45mm (rys. 4.3). Korpusy i membrany czujników wykonano z aluminium. Elementami pomiarowymi czujników są tensometry elektrooporowe.



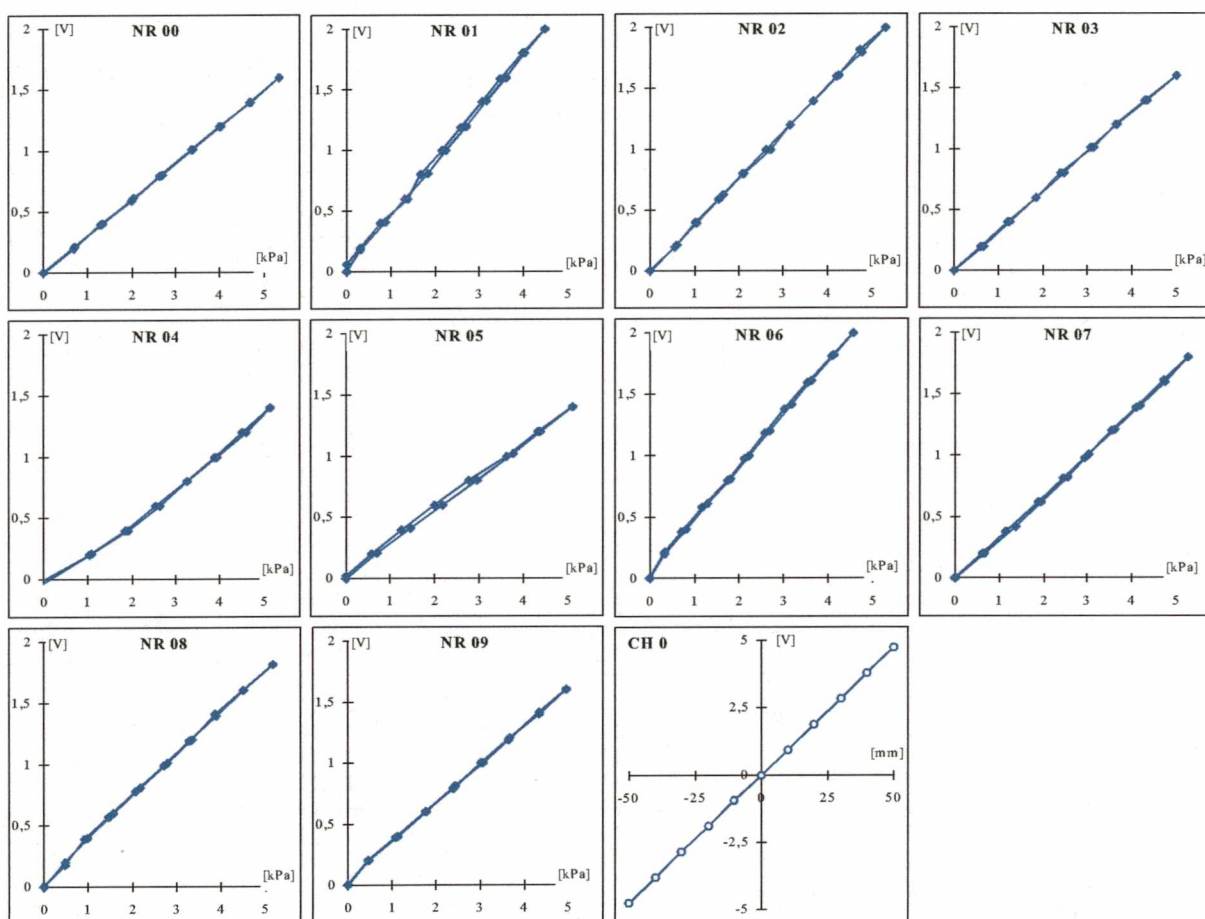
Rys. 4.3 Czujnik do pomiaru parć

Jednymi z najważniejszych wymogów, jakie stawia się czujnikom stosowanym do pomiarów dynamicznych zmian parcia jest to, aby charakteryzowały się one krótkim czasem reakcji na te zmiany oraz, aby częstotliwość drgań własnych czujnika była zdecydowanie różna od częstotliwości zmian parcia materiału sypkiego. Jak przedstawiono w pracy [30] zastosowanie czujników membranowych z przetwornikami w postaci tensometrów elektrooporowych spełnia wymagania związane z krótkim czasem reakcji czujnika na dynamiczne zmiany poziomu obciążenia. Częstotliwość drgań własnych czujników zastosowanych w niniejszych badaniach wyznaczona analitycznie wynosi 3,2kHz i jest ona znacznie większa od częstotliwości zmian parć materiału sypkiego (10÷12Hz), co pozwoliło wyeliminować błędy pomiarowe związane ze zjawiskiem rezonansu między materiałem sypkim a czujnikiem.

Do pomiaru przemieszczeń poziomych modelu zastosowano czujnik indukcyjny (rys. 4.4). Charakterystyki czujników do pomiaru parć (Nr 00 ÷ Nr 09) uzyskane na drodze wzorcowania pneumatycznego oraz czujnika indukcyjnego (CH0) przedstawia rysunek 4.5.



Rys. 4.4 Czujnik indukcyjny do pomiaru przemieszczeń



Rys. 4.5 Statyczne charakterystyki czujników

Zmiany w czasie poziomych parć materiału i przemieszczeń modelu mierzono i rejestrowano z częstością próbkowania wynoszącą 200Hz dla wstrząsów o największej amplitudzie przyspieszeń i 150Hz dla pozostałych obciążeń. Przyjęcie takich gęstości zapisu wielkości mierzonych wynikało z przeprowadzonej optymalizacji procesu rejestracji, której celem

było znalezienie minimalnej częstotliwości próbkowania, nie mającej wpływu na rejestrację wielkości mierzonych.

Materiałem sypkim zastosowanym do badań był frakcjonowany piasek gruboziarnisty o wymiarach ziaren $0,4\div 1,2\text{mm}$. Cechy mechaniczne piasku, wyznaczone metodą bezpośredniego ścinania w aparacie Jenikego, zestawiono w tablicy 4.1.

Tablica 4.1 Cechy mechaniczne piasku

gęstość objętościowa	1640 kg/m^3
kąt tarcia wewnętrznego	$42,0^\circ$
kąt tarcia kontaktowego o stal	$19,3^\circ$

Na każdy cykl pomiarowy niniejszych badań składały się następujące czynności:

- zerowanie czujników;
- wypełnienie modelu silosu materiałem sypkim;
- rejestracja wartości parć statycznych;
- uruchomienie rejestracji parcia i przemieszczeń mierzonych z częstościami próbkowania 150Hz i 200Hz;
- przyłożenie do dna modelu silosu dynamicznego obciążenia impulsowego;

Po zakończeniu rejestracji przebiegów wielkości mierzonych i po otwarciu zasuwę otworu wylotowego w dnie modelu silosu następował wypływ materiału sypkiego do zbiornika prze-sypowego, po czym przystępowano do kolejnego cyklu pomiarowego.

Tablica 4.2 Program badań

grupa P			grupa S		
współczynnik dynamiczny podłoża $Cx = 5,4\text{ MN/m}^3$			współczynnik dynamiczny podłoża $Cx = 6,6\text{ MN/m}^3$		
symbol serii pomiarowej	maksymalne przyspieszenie podstawy modelu [m/s^2]	liczba cykli pomiarowych	symbol serii pomiarowej	maksymalne przyspieszenie podstawy modelu [m/s^2]	liczba cykli pomiarowych
40P	0,67	20	40S	0,57	20
60P	1,20	20	60S	1,05	20
80P	1,69	20	80S	1,47	20
100P	2,24	20	100S	2,11	20
łącznie:		80	łącznie:		80

Przeprowadzono dwie grupy badań: P ($C_x = 5,4 \text{ MN/m}^3$) i S ($C_x = 6,6 \text{ MN/m}^3$), a w każdej z nich po 4 serie pomiarowe, różniące się wartościami dynamicznego obciążenia impulsowego. Dla stałych parametrów wejściowych, stanowiących jedną serię pomiarową, dokonano 20 cykli pomiarowych. Program badań oraz przyjęte oznaczenia poszczególnych serii pomiarowych przedstawia tablica 4.2.

4.3. ANALIZA WYMIAROWA BADAŃ MODELOWYCH WPŁYWU DRGAŃ PODŁOŻA NA PARCIE MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU

Zasadnicze pytanie powstające podczas realizacji badań modelowych jest następujące: Po spełnieniu jakich warunków (zwanymi prawami bądź kryteriami podobieństwa) nie będzie występował błąd skali?

Na podstawie licznych badań parć materiałów sypkich na ściany silosów prowadzonych w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, zarówno na obiektach rzeczywistych [5, 28, 55] jak i na modelach [3, 27, 28], określono ich praktyczną przydatność oraz ograniczenia, jakim powinny podlegać badania modelowe. Na ich podstawie stwierdzono, że wyniki tych ostatnich z materiałami bezkohezyjnymi są reprezentatywne dla obiektu, pod warunkiem, że zastosowany model nie jest zbyt mały [30].

Podstawą do wyznaczenia kryteriów podobieństwa w metodzie analizy wymiarowej, zgodnie z twierdzeniem Buckinghama [38] jest określenie funkcji $\Phi(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) = 0$, w której $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ są wielkościami fizycznymi wpływającymi na wartość parcia w silosie. Funkcja ta w niniejszych badaniach na postać ogólną:

$$p_h = \Phi(D, H, u, \rho_m, \rho_k, g, A, m, t, \omega, v_m, v_k, \varphi_w, \varphi_s, C_x) \quad (4.1)$$

gdzie: D – średnica komory silosu,

H – wysokość silosu,

u – pozioma amplituda przemieszczeń,

ρ_m, ρ_k – gęstość objętościowa materiału sypkiego i materiału konstrukcyjnego ścian silosu,

g – przyspieszenie ziemskie,

A – poziome przyspieszenie powierzchniowe gruntu spowodowane wstrząsem,

m – masa silosu wraz z zawartością,

t – czas trwania zaburzenia,

ω – częstość kątowna drgań,

ν_m, ν_k – współczynnik Poissona odpowiednio dla materiału sypkiego i ściany silosu,

φ_w – kąt tarcia wewnętrznego materiału sypkiego,

φ_s – kąt tarcia materiału sypkiego o ścianę silosu,

C_x – dynamiczny współczynnik podłoża.

Spośród powyższych parametrów wybrano trzy $D[m]$, $\rho_m \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ i $g \left[\frac{m}{s^2} \right]$ jako wielko-

ści wymiarowo niezależne. Funkcję 4.1 przekształcono do postaci:

$$p_h = D \cdot g \cdot \rho_m \cdot \psi \left(\frac{H}{D}, \frac{u}{D}, \frac{\rho_k}{\rho_m}, \frac{A}{g}, \frac{M}{\rho_m D^3}, \frac{t}{\sqrt{\frac{D}{g}}}, \frac{\omega}{\sqrt{\frac{g}{D}}}, \nu_k, \nu_m, \varphi_w, \varphi_s, \frac{C_x}{g \rho_m} \right) \quad (4.2)$$

Macierz wymiarową przedstawia tablica 4.3.

Tablica 4.3 Macierz wymiarowa

	H	u	ρ_k	A	M	t	ω_g	ν_k	ν_m	φ_w	φ_s	C_x
D	1	1	0	0	3	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0	0
ρ_m	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
g	0	0	0	1	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0	1

W celu ustalenia kryteriów podobieństwa modelowego przyjęto, iż badany model jest odwzorowaniem obiektu rzeczywistego: jednokomorowego, płaskodennego silosu walcowego o konstrukcji stalowej i o następujących wymiarach: $H = 24m$, $D = 8m$ – skala geometryczna $D_v = 1:20$. Materiałem sypkim składowanym w silosie jest piasek (skala gęstości $\rho_v = 1:1$). W związku z faktem prowadzenia badań w naturalnym polu grawitacyjnym, skala przyspieszeń g_v wynosi $1:1$.

Przyjmując indeksy: m - dla modelu i o - dla obiektu (prototypu), otrzymano następujące warunki podobieństwa modelowego:

$$\frac{H_m}{D_m} = \frac{H_o}{D_o} \quad (4.3.1)$$

Jest to warunek podobieństwa geometrycznego komór silosów i jest on całkowicie spełniony dla komór cylindrycznych o $H/D=3,0$.

$$\frac{u_m}{D_m} = \frac{u_o}{D_o} \quad (4.3.2)$$

Jest to warunek określający amplitudy wstrząsów modelu, których skala musi być taka sama jak skala geometryczna. Warunek ten podczas badań został całkowicie spełniony.

$$\frac{\rho_{km}}{\rho_{mm}} = \frac{\rho_{ko}}{\rho_{mo}} \quad (4.3.4)$$

Model zbudowany z materiału o gęstości identycznej z gęstością materiału konstrukcyjnego prototypu jest modelem spełniającym powyższy warunek podobieństwa modelowego. Również zastosowanie w badaniach rzeczywistego materiału sypkiego pozwala w zasadzie spełnić powyższy warunek. Nie sposób jednak ustrzec się od błędów wynikających ze zmian ciężaru objętościowego materiału sypkiego mających ścisły związek z wielkością komory silosu. Zmiany te mogą wahać się w granicach 10%. Błąd tym spowodowany nie przekracza kilku procent mierzonej wielkości [28].

$$\frac{A_m}{g_m} = \frac{A_o}{g_o} \quad (4.3.5)$$

Warunek ten został zupełnie spełniony, ponieważ badania prowadzone były w naturalnym polu grawitacyjnym Ziemi, przy czym wytwarzano takie oddziaływania dynamiczne, aby amplitudy przyspieszeń przekazywane na model mieściły się w zakresie przyspieszeń rzeczywistych.

$$\frac{m_m}{\rho_{mm} D_m^3} = \frac{m_o}{\rho_{mo} D_o^3} \quad (4.3.6)$$

Dla modelu i obiektu wartości bezwymiarowe parametrów są następujące:

$$\frac{m_m}{\rho_{mm} D_m^3} = 3,258 \neq \frac{m_o}{\rho_{mo} D_o^3} = 2,446$$

Niestety, nie spełniono warunku podobieństwa mas modelu i obiektu rzeczywistego. Warunek ten zostałby dotrzymany jedynie dla modelu o grubości ścianki równej 0.4mm. Jednakże zbudowanie modelu o tak cienkich, a tym samym bardzo podatnych ściankach, przyczyniłoby się do nakładania trudnych do rozdzielenia i niepożądanych w niniejszych badaniach zjawisk, takich jak efekt owalizacji przekroju poprzecznego komory silosu, oraz interakcji materiału sypkiego z podatną ścianą silosu.

$$\frac{t_m}{\sqrt{\frac{D_m}{g_m}}} = \frac{t_o}{\sqrt{\frac{D_o}{g_o}}} \quad (4.3.7)$$

Czas trwania rzeczywistych sejsmicznych jak i para wstrząsów zawiera się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu sekund (średnio 10÷25s). Obciążenie dynamiczne działające na mo-

del silosu wprawiało go w drgania trwające maksymalnie 5s. W związku z powyższym warunek ten został spełniony.

$$V_{km} = V_{ko} \quad (4.3.8)$$

$$V_{mm} = V_{mo} \quad (4.3.9)$$

Spełnienie tych warunków w całości stało się możliwe ze względu na przyjęcie do badań rzeczywistego materiału konstrukcyjnego, jakim jest stal oraz rzeczywistego materiału sypkiego (piasku).

$$\varphi_{wm} = \varphi_{wo} \quad (4.3.10)$$

$$\varphi_{sm} = \varphi_{so} \quad (4.3.11)$$

Warunki, wskutek przyjęcia rzeczywistego materiału sypkiego, także zostały w zasadzie spełnione. Kąt tarcia wewnętrznego zależy jednak od poziomu naprężeń normalnych, działających na element próbny i zmienia się wraz z porowatością ośrodka. Według [28] zmiany $\tan(\varphi_w)$ dla różnych silosów wynoszą 19%.

$$\frac{C_{xm}}{g_m \rho_{mm}} \neq \frac{C_{xo}}{g_o \rho_{mo}} \quad (4.3.12)$$

Powyższy warunek nie został spełniony dla obu układów sprężyn modelujących podłoże gruntowe. Dla silosu prototypowego minimalna wartość dynamicznego współczynnika podłoża C_x , dla gruntów o bardzo małej sztywności, takich jak: piaski gliniaste, pyły, gliny i ily w stanie plastycznym wynosi 18 MN/m^3 , a dla wszystkich rodzajów piasków, niezależnie od ich zagęszczenia, wynosi aż 56 MN/m^3 . Są to wielkości kilkukrotnie większe od przyjętych w niniejszych badaniach. Zastosowanie układów sprężyn o charakterystykach spełniających niniejszy warunek oraz konieczność spełnienia warunku dotyczącego amplitud przemieszczeń modelu (4.3.2), przy przyjętym schemacie stanowiska badawczego, było bardzo utrudnione. Niespełnienie warunku podobieństwa modelowego (4.3.12) wpływa na ograniczenie znaczenia niniejszych badań w zakresie tego kryterium do możliwości stwierdzenia występowania związku między sztywnością podłoża gruntowego, a rozkładem parć poziomych materiału sypkiego na ściany silosu.

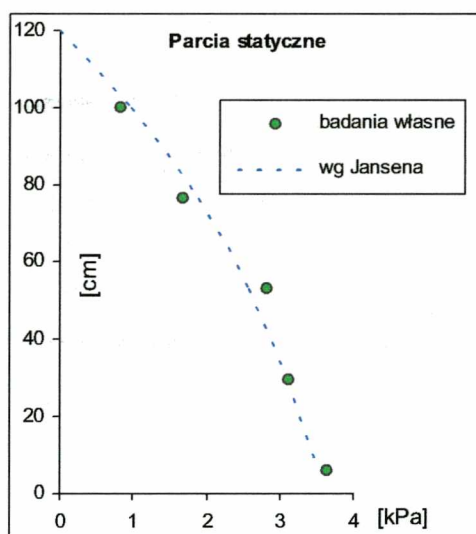
4.4. WYNIKI BADAŃ

4.4.1. PARCIA STATYCZNE

Punktem wyjścia analizy wyników pomiarów dynamicznych jest ustalenie rozkładu statycznych parć poziomych materiału sypkiego na ścianę silosu. Parcia te mierzono w każdym cyklu pomiarowym, po zakończeniu procesu napełniania silosu i bezpośrednio przed wywołaniem wstrząsu modelu. Tablica 4.4 przedstawia średnie wartości parć statycznych na poszczególnych wysokościach oraz odchylenia standardowe populacji, wskaźniki zmienności i przedziały ufności dla założonego poziomu istotności równego 5%. Rysunek 4.6 przedstawia rozkład średnich poziomych parć statycznych na wysokości silosu, a także dodatkowo ten sam rozkład wyznaczony wg teorii Jansena.

Tablica 4.4 Wartości parć statycznych

<i>Nr czujnika</i>	<i>parcie statyczne [kPa]</i>	<i>odchyl. standard. [kPa]</i>	<i>wskaźnik zmienności [%]</i>	<i>przedział ufności</i>	
				<i>[kPa]</i>	<i>[%]</i>
1 i 6	0,826	0,0767	9,3	0,0142	1,7
8 i 2	1,680	0,1607	9,6	0,0292	1,7
7 i 9	2,813	0,2863	10,2	0,0576	2,0
3 i 0	3,136	0,4114	13,1	0,0684	2,2
5 i 4	3,639	0,2980	8,2	0,0590	1,6



Rys. 4.6 Rozkład parć statycznych

Wyznaczone w niniejszych badaniach poziome parcia statyczne materiału sypkiego na ściany silosu oscylują wokół wartości średnich z małymi odchyleniami. Dla założonego poziomu istotności wahania te mieszczą się w przedziale od 1,6% do 2,2%.

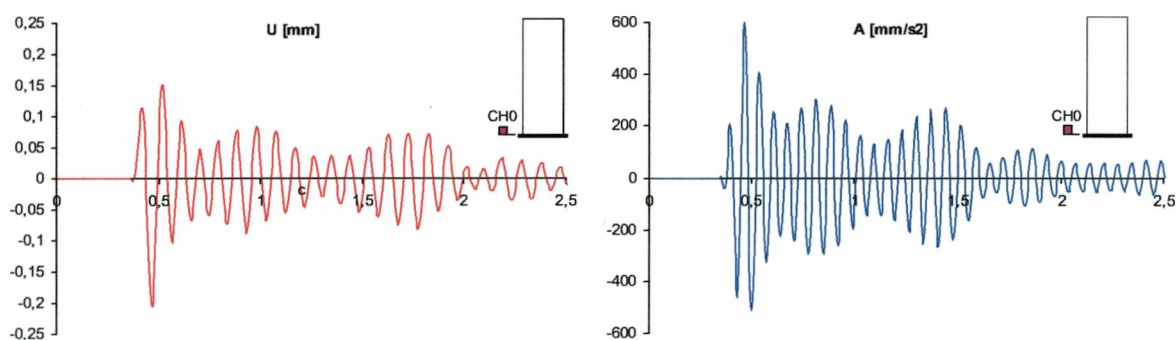
Ze względu na dużą dokładność przedstawionych powyżej pomiarów przyjęto, iż, w dalszej części niniejszej pracy, wszystkie dynamiczne zmiany parć materiału sypkiego na ściany silosu odnoszone są do wartości średnich parć statycznych (tablica 4.4). Pozwoliło to na ograniczenie wpływu błędów pomiaru parcia statycznego poszczególnych zasypów silosu na parcia dynamiczne powstające podczas drgań.

4.4.2. PRZEBIEG W CZASIE PARĆ MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU

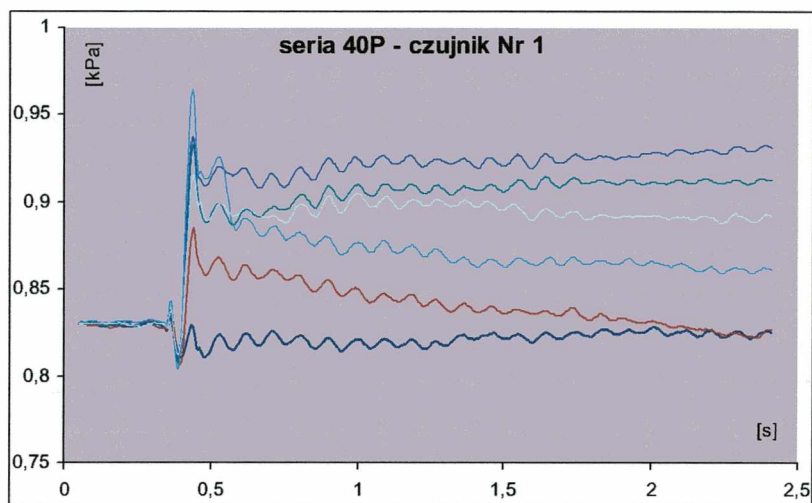
4.4.2.1. Parcia materiału sypkiego na ściany silosu – badania grupy P

Rysunki 4.7, 4.18, 4.29 i 4.40 przedstawiają początkowe, mające decydujący wpływ na parcia, fragmenty wibrogramów i akcelerogramów poziomych drgań podstawy modelu (czujnik CH0). Rysunki 4.8 do 4.17, 4.19 do 4.28, 4.30 do 4.39 oraz 4.41 do 4.50 przedstawiają przebiegi czasowe parć materiału na ściany silosu. Na jednym wykresie zestawiono wibrogramy parć mierzone jednym czujnikiem podczas jednej serii pomiarowej.

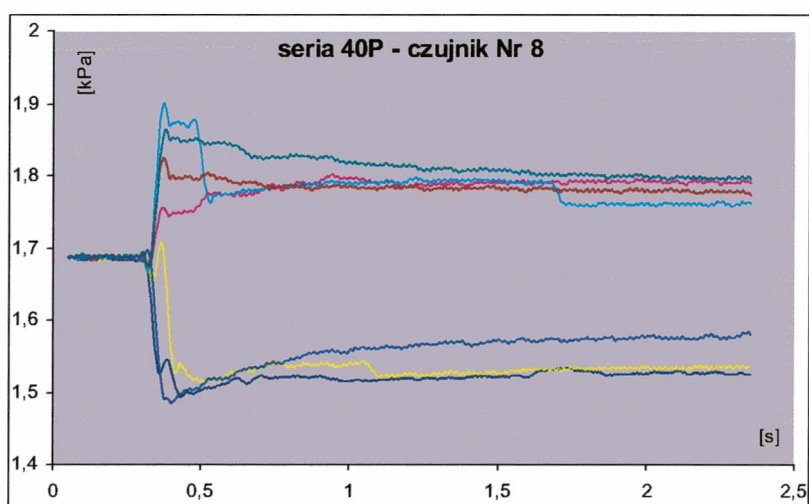
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $0,606\text{m/s}^2$ – seria 40P



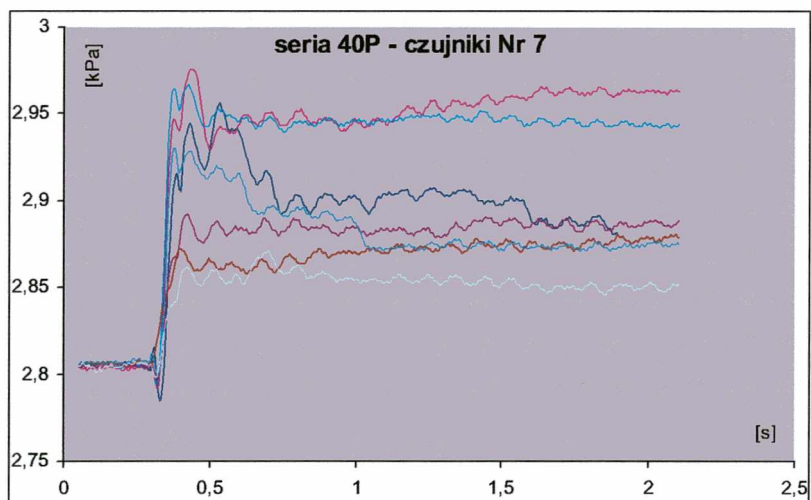
Rys. 4.7 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 40P



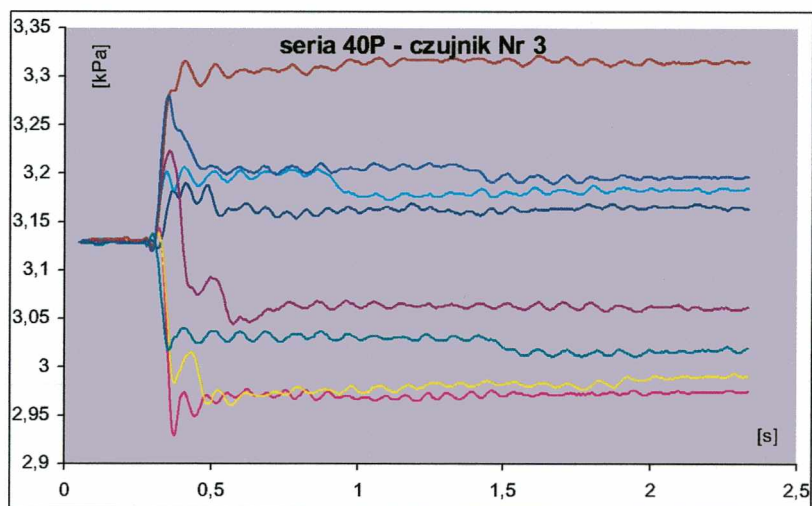
Rys. 4.8 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 1



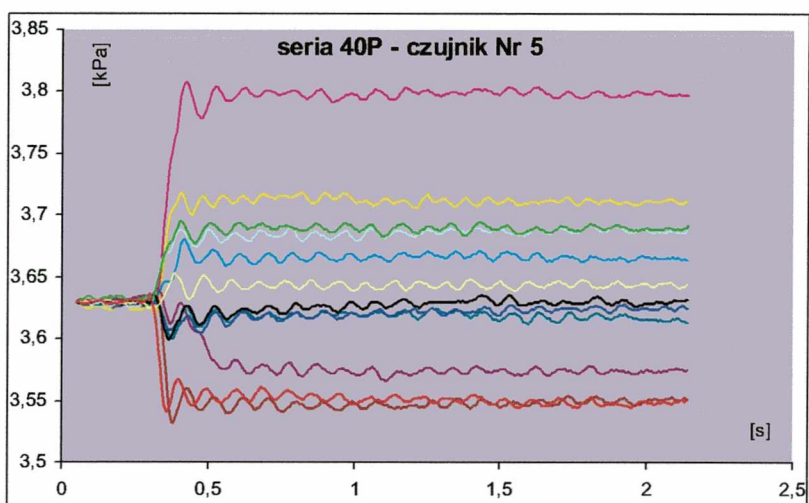
Rys. 4.9 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 8



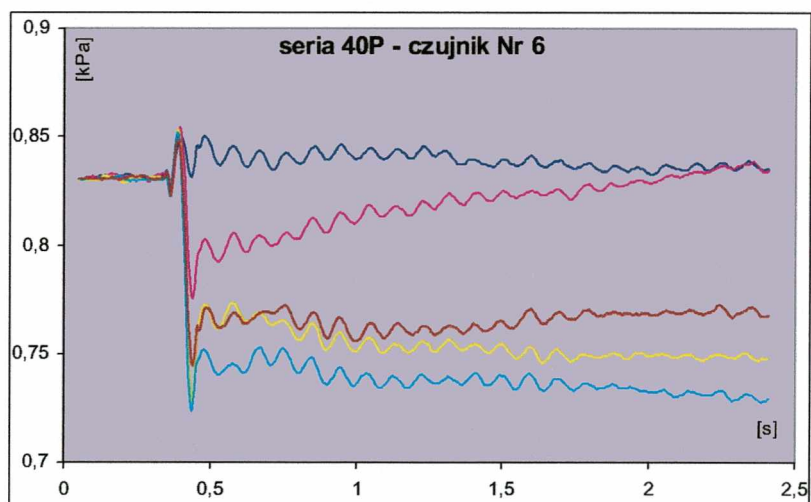
Rys. 4.10 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 7



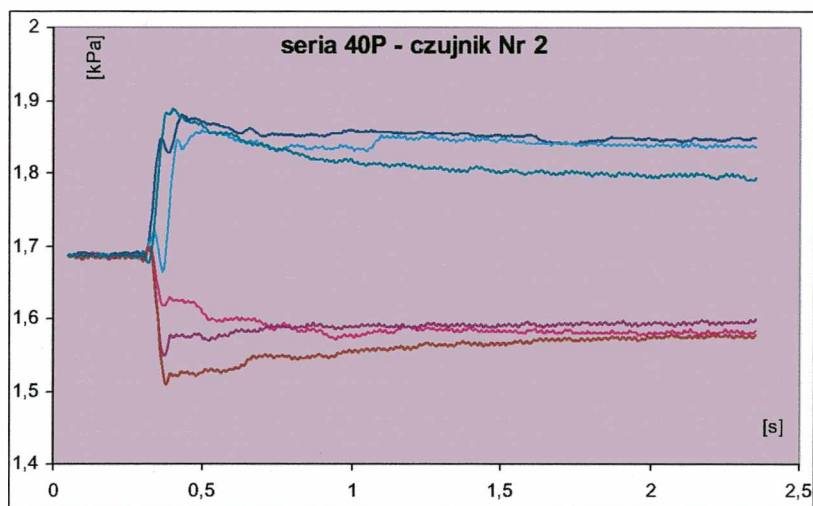
Rys. 4.11 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 3



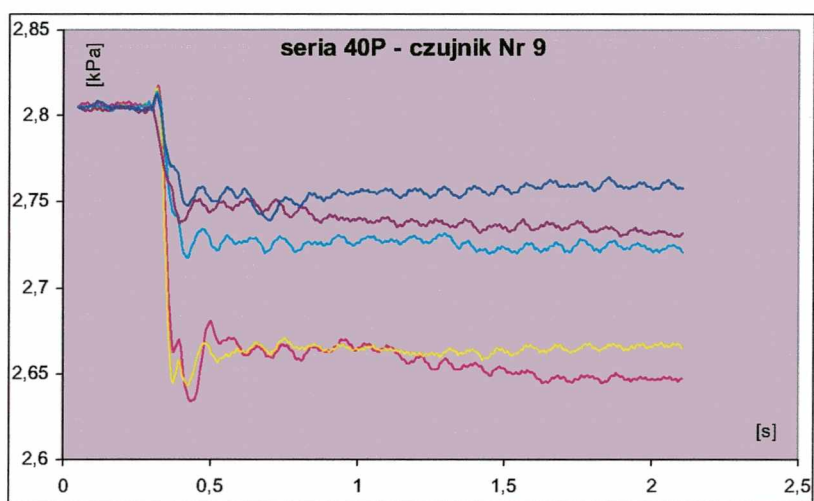
Rys. 4.12 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 5



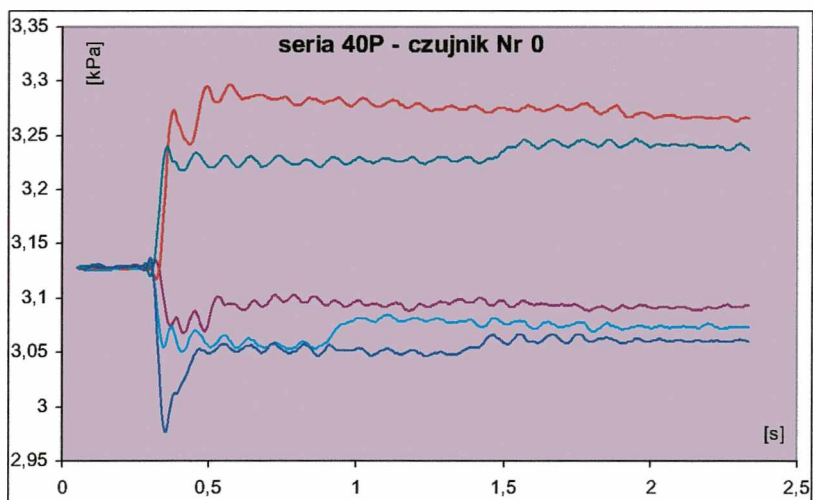
Rys. 4.13 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 6



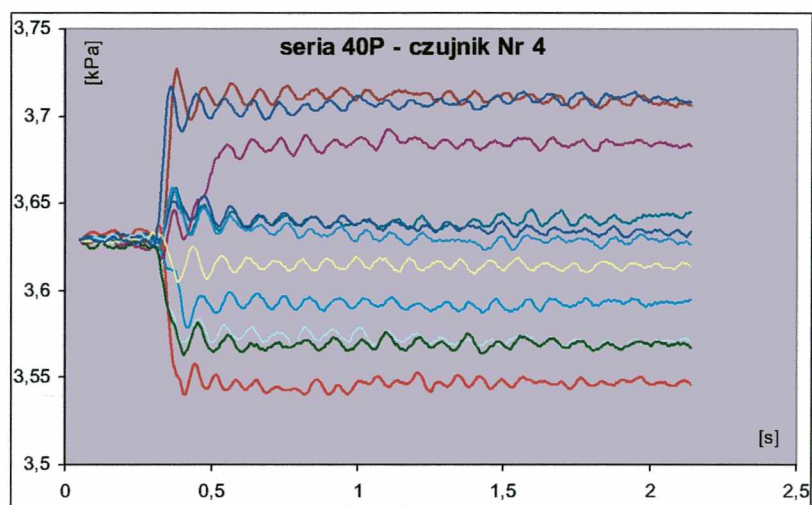
Rys. 4.14 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 2



Rys. 4.15 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 9

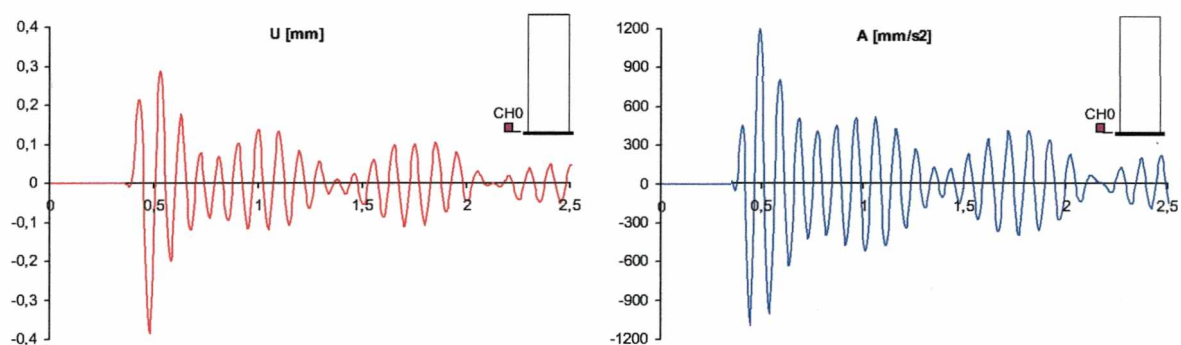


Rys. 4.16 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 0

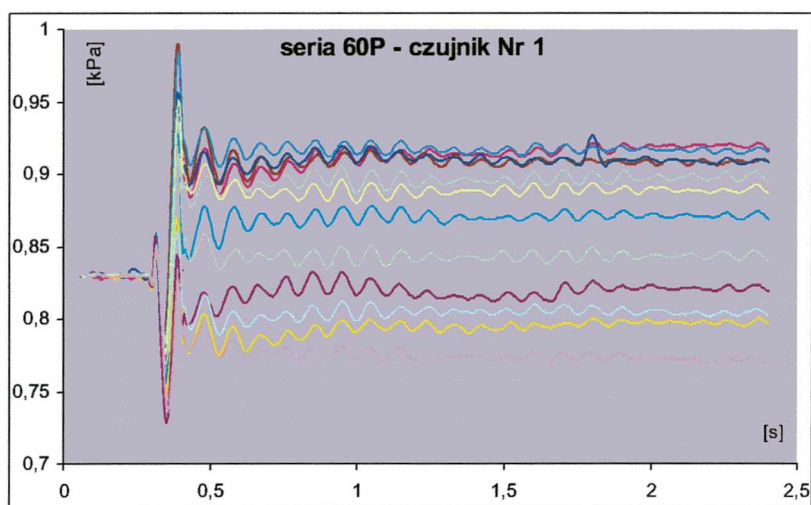


Rys. 4.17 Przebiegi czasowe parć: seria 40P – czujnik 4

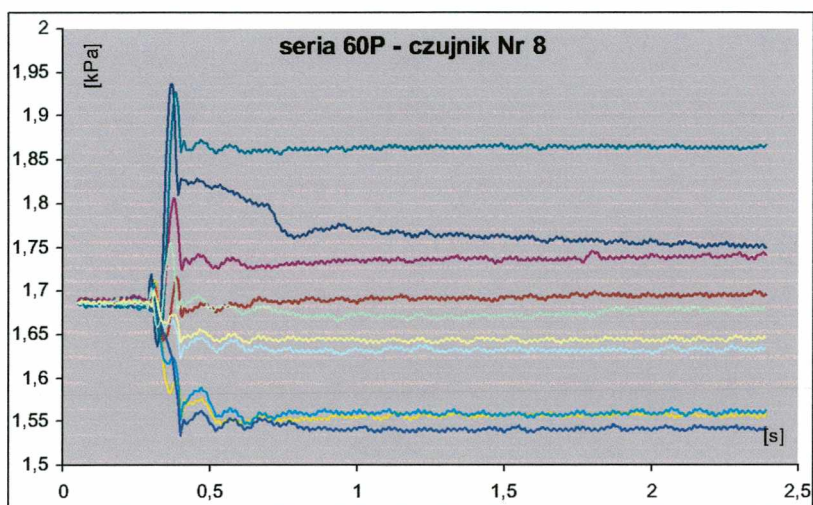
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $1,129\text{m/s}^2$ – seria 60P



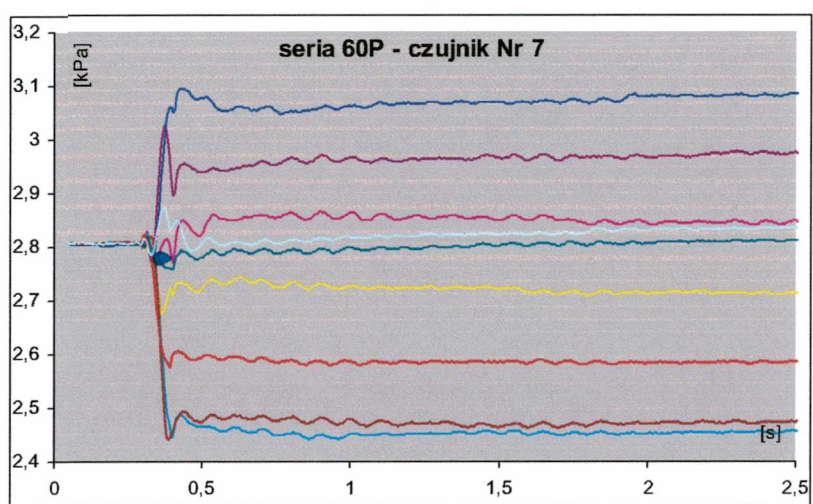
Rys. 4.18 Wibrogram i akceleroqram dla pomiarów serii 60P



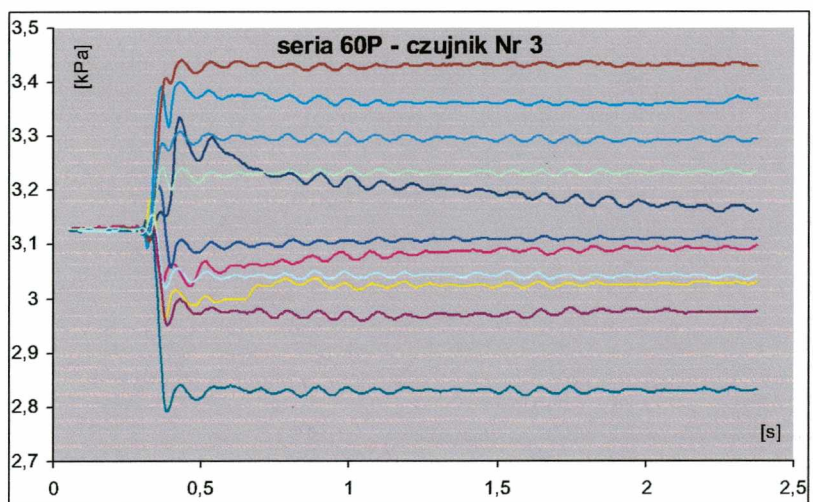
Rys. 4.19 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 1



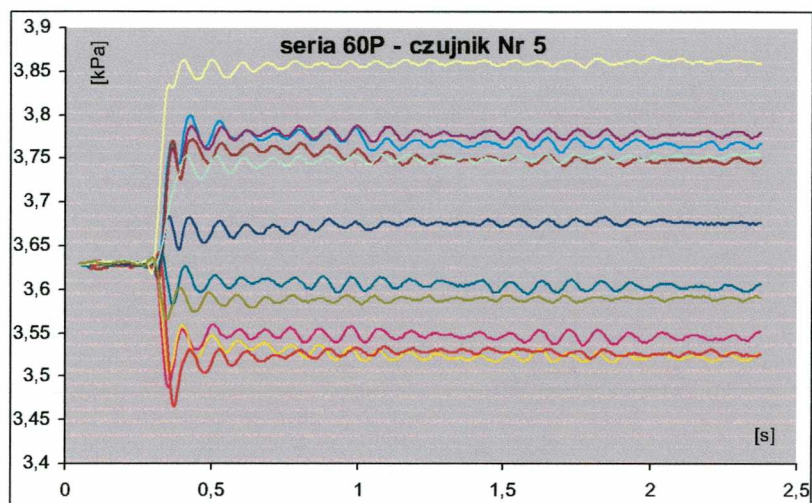
Rys. 4.20 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 8



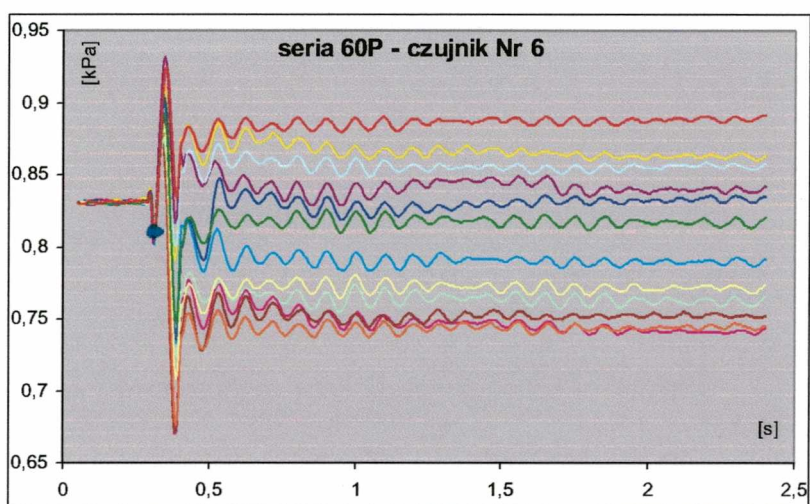
Rys. 4.21 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 7



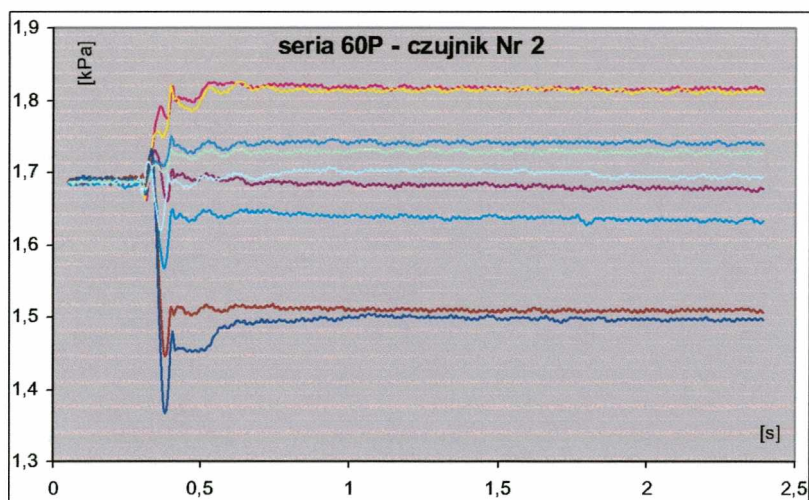
Rys. 4.22 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 3



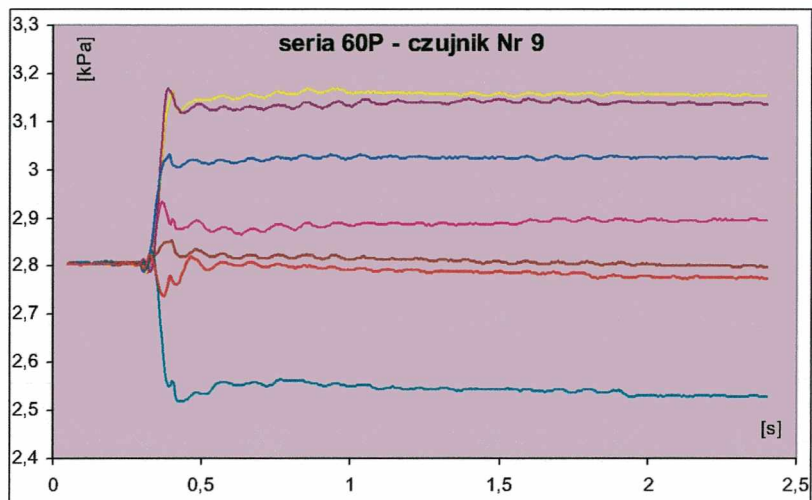
Rys. 4.23 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 5



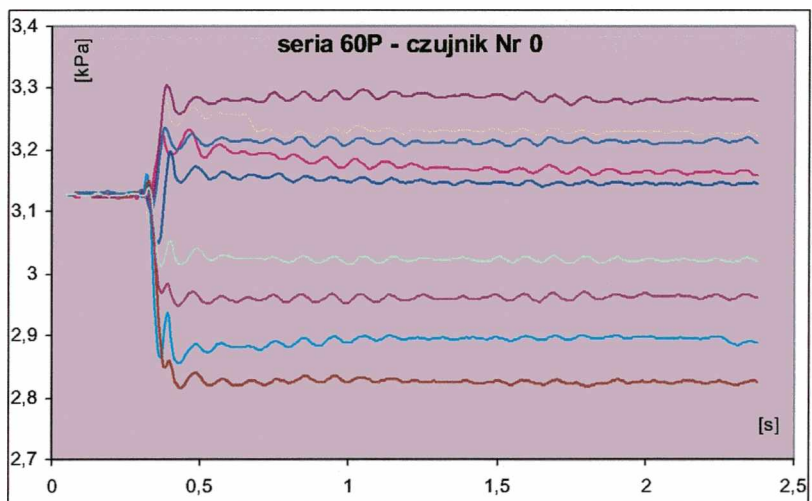
Rys. 4.24 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 6



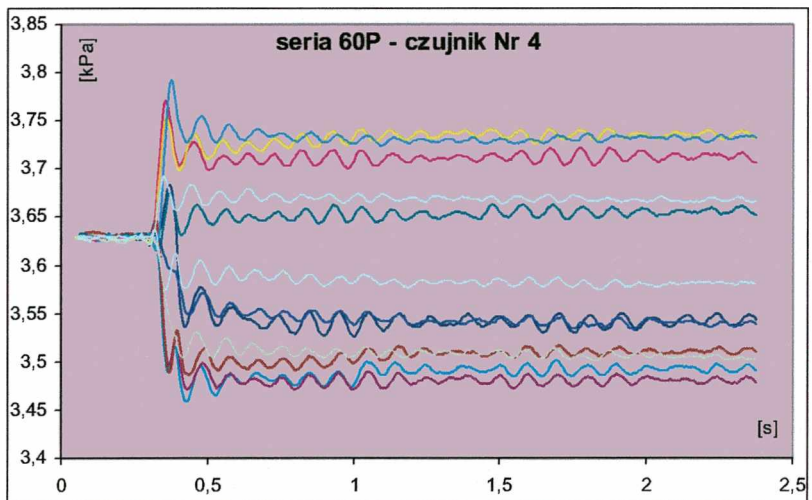
Rys. 4.25 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 2



Rys. 4.26 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 9

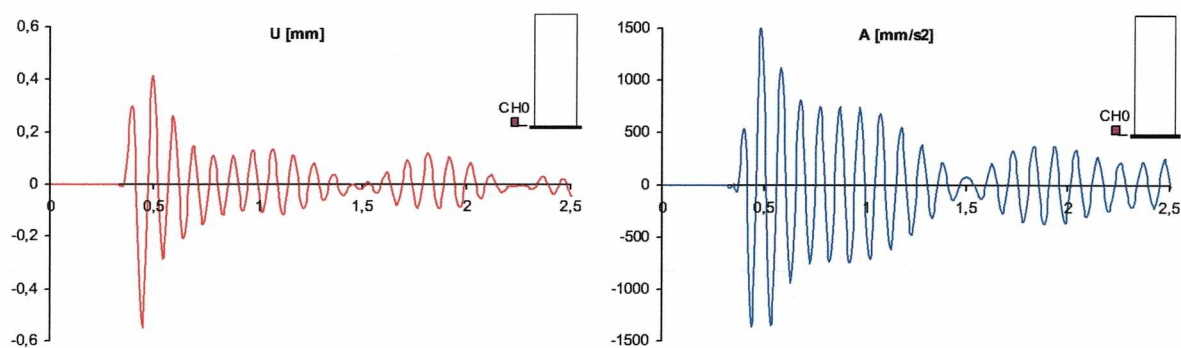


Rys. 4.27 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 0

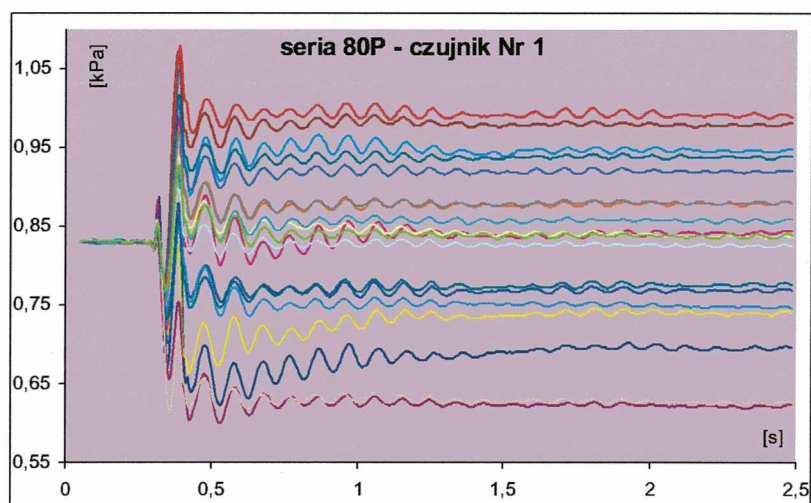


Rys. 4.28 Przebiegi czasowe parć: seria 60P – czujnik 4

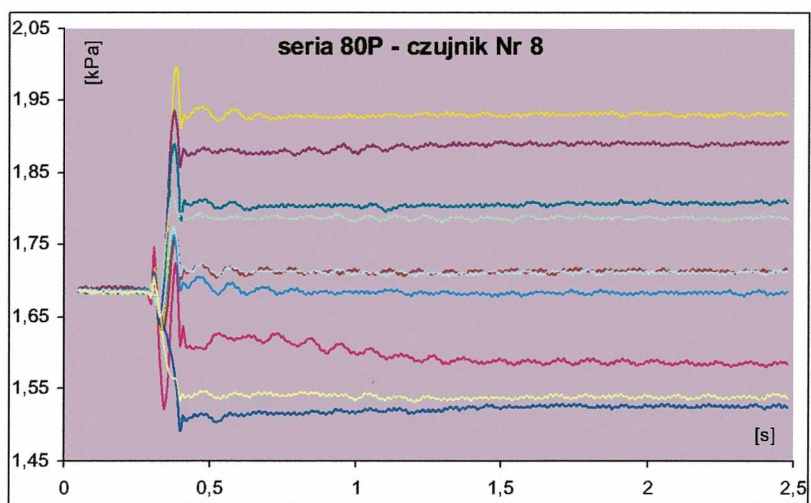
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $1,513\text{m/s}^2$ – seria 80P



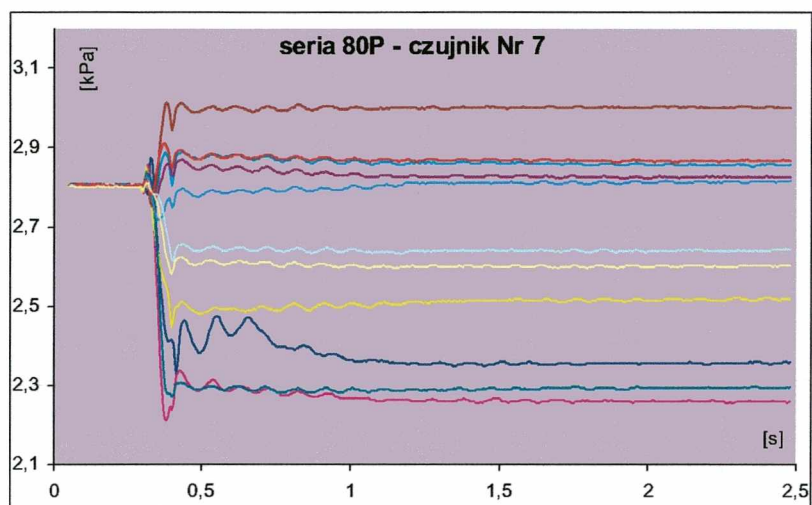
Rys. 4.29 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 80P



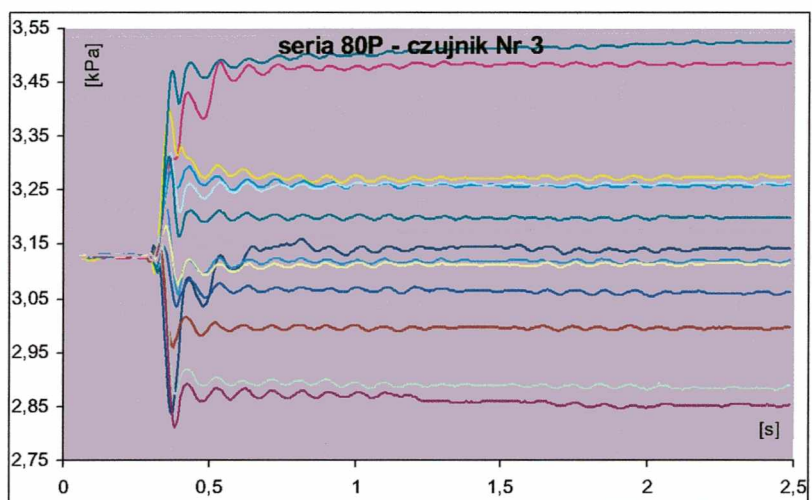
Rys. 4.30 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 1



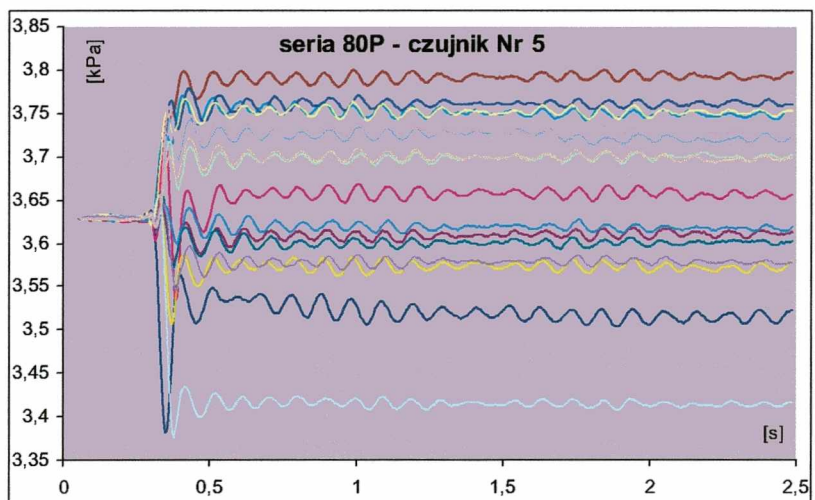
Rys. 4.31 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 8



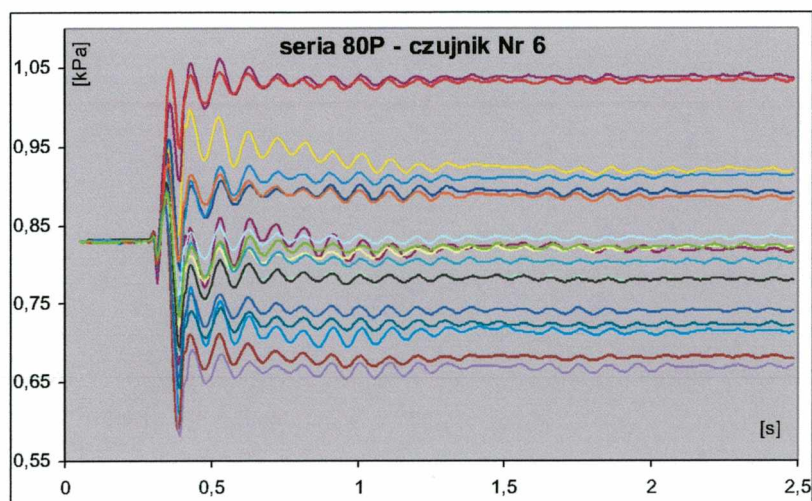
Rys. 4.32 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 7



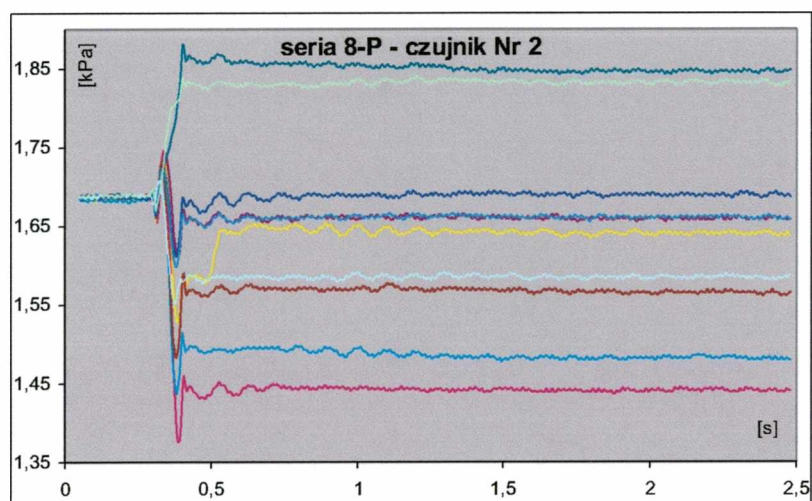
Rys. 4.33 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 3



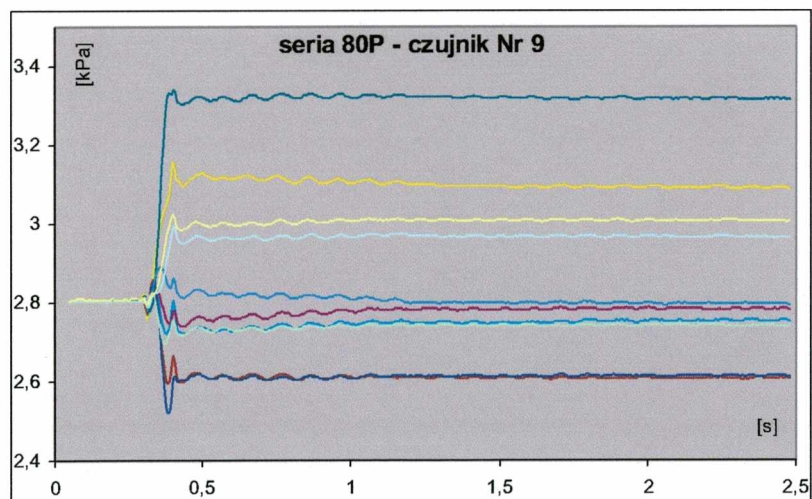
Rys. 4.34 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 5



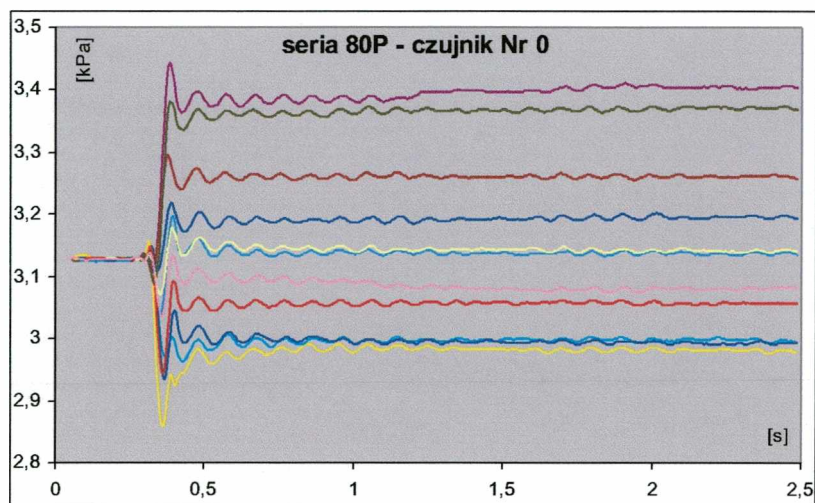
Rys. 4.35 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 6



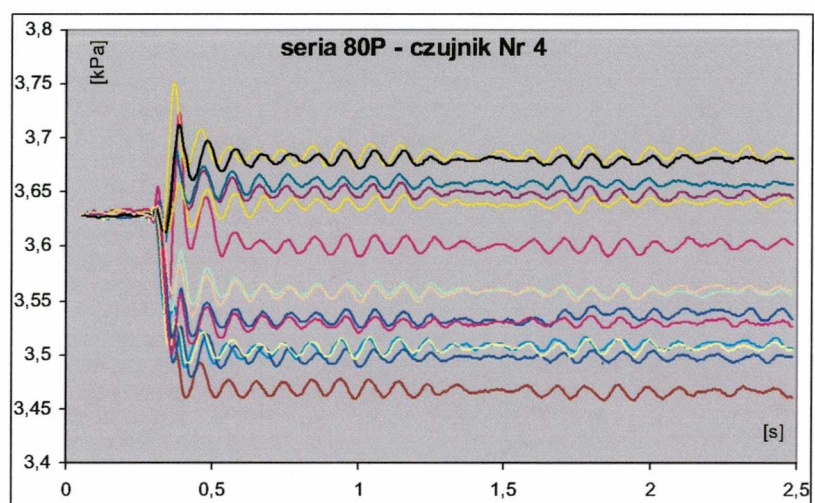
Rys. 4.36 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 2



Rys. 4.37 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 9

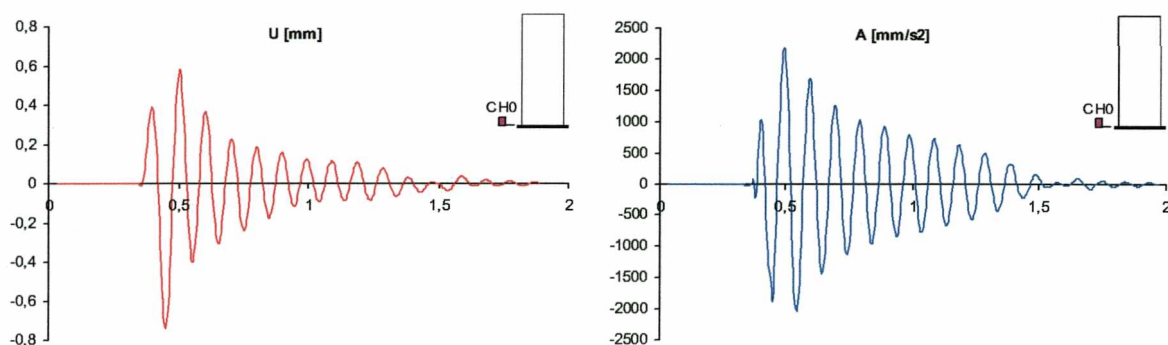


Rys. 4.38 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 0

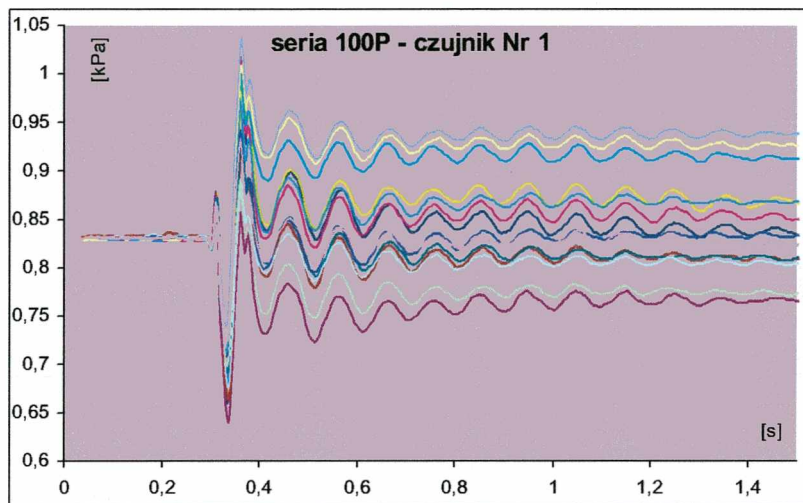


Rys. 4.39 Przebiegi czasowe parć: seria 80P – czujnik 4

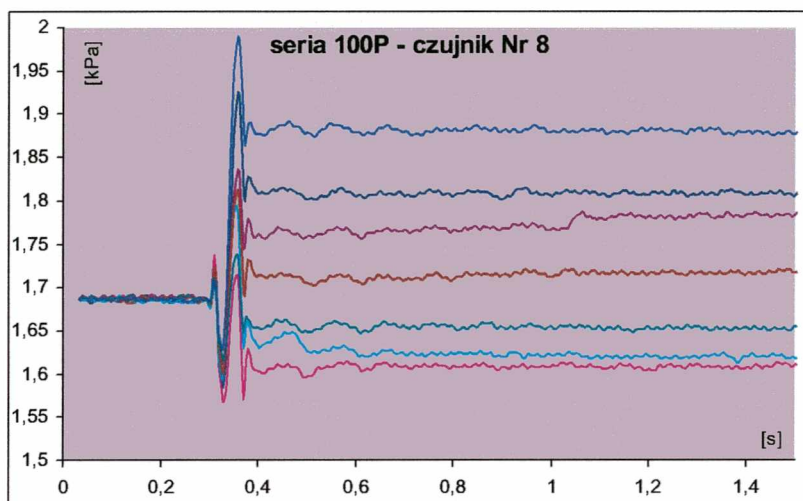
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $2,178\text{m/s}^2$ – seria 100P



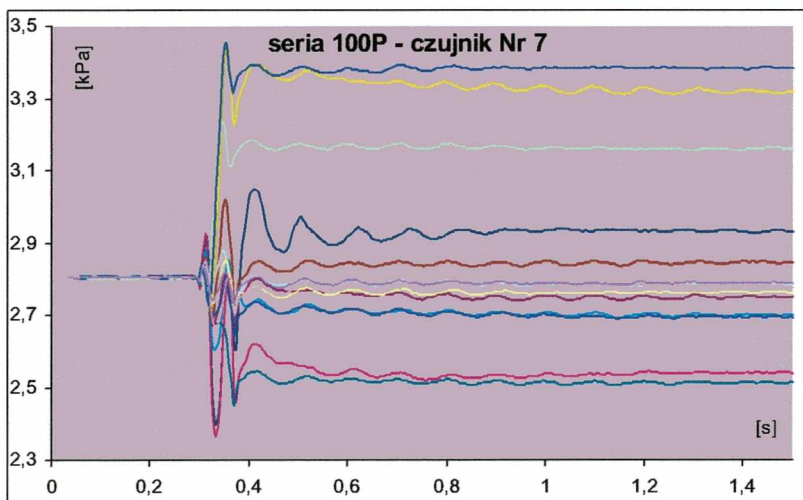
Rys. 4.40 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 100P



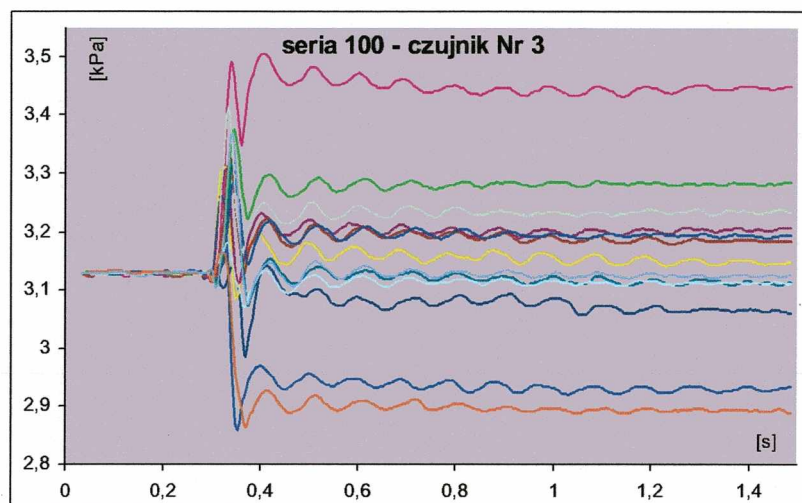
Rys. 4.41 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 1



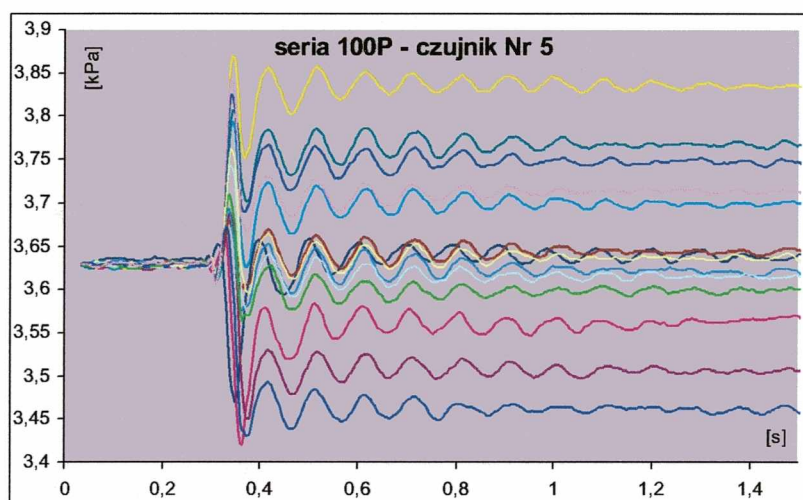
Rys. 4.42 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 8



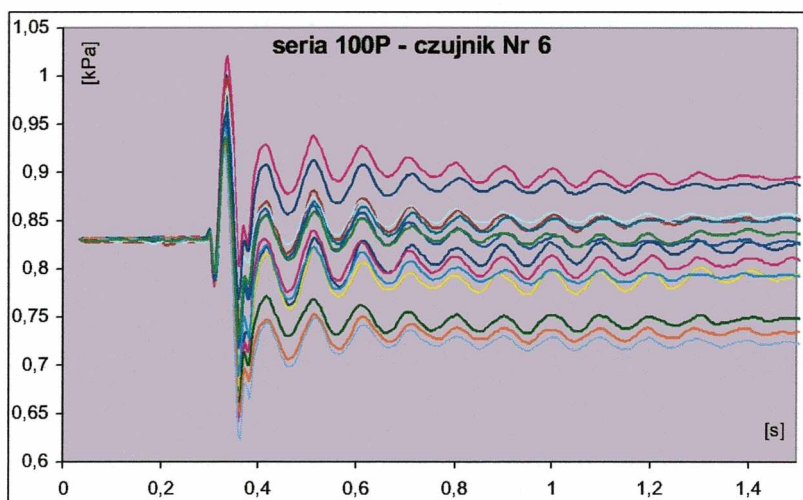
Rys. 4.43 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 7



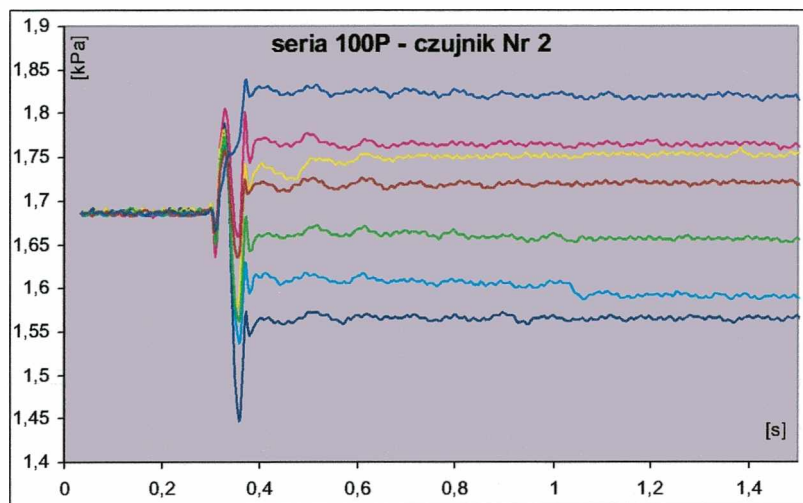
Rys. 4.44 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 3



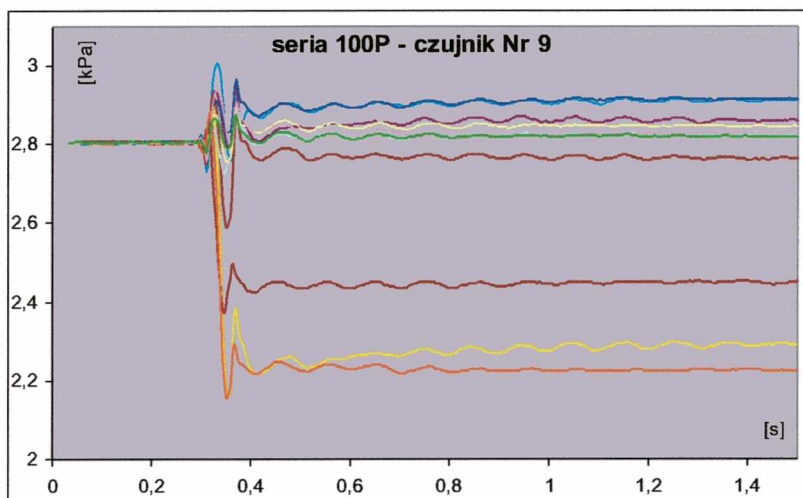
Rys. 4.45 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 5



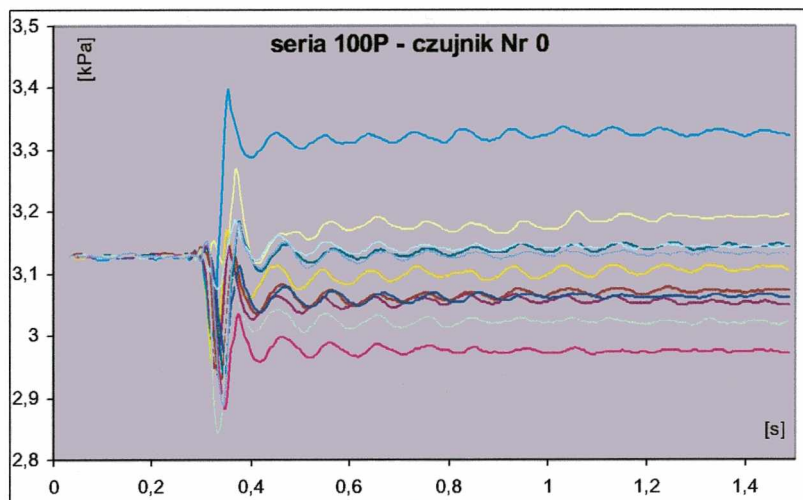
Rys. 4.46 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 6



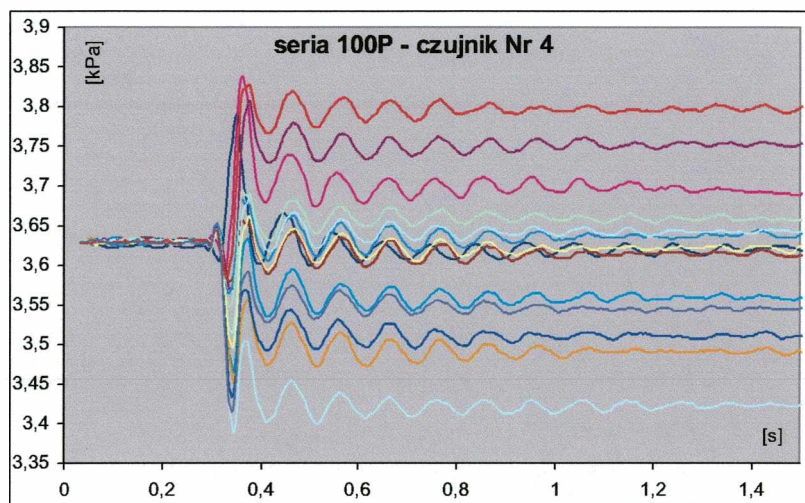
Rys. 4.47 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 2



Rys. 4.48 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 9



Rys. 4.49 Przebiegi czasowe parć: seria 100P – czujnik 0

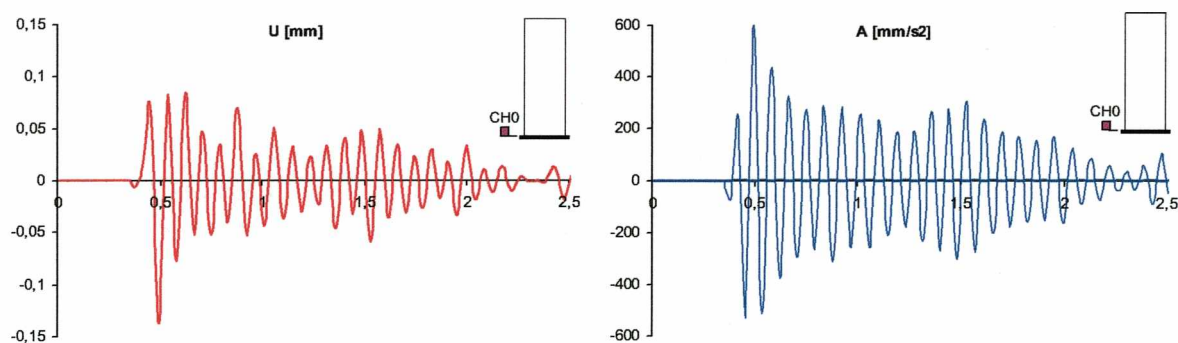


Rys. 4.50 Przebiegi czasowe par: seria 100P – czujnik 4

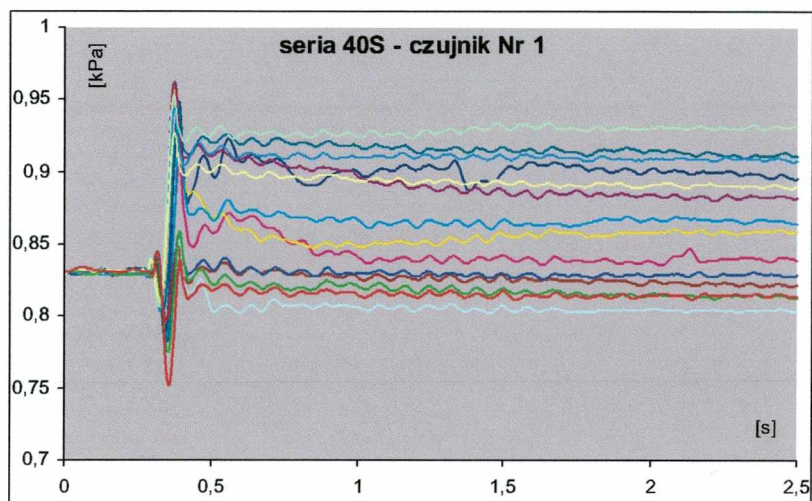
4.4.2.2. Parcia materiału sypanego na ściany silosu – grupa badań S

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów drugiej grupy badań – posadowienie modelu na podłożu o większej sztywności – w takim samym układzie graficznym jak w rozdziale poprzednim: rysunki 4.51, 4.62, 4.73 i 4.84 przedstawiają wibrogramy i akcelerogramy poziomych drgań podstawy modelu, a rysunki 4.52 do 4.61, 4.63 do 4.72, 4.74 do 4.83 oraz 4.85 do 4.94 wykresy parć materiału na ścianę silosu.

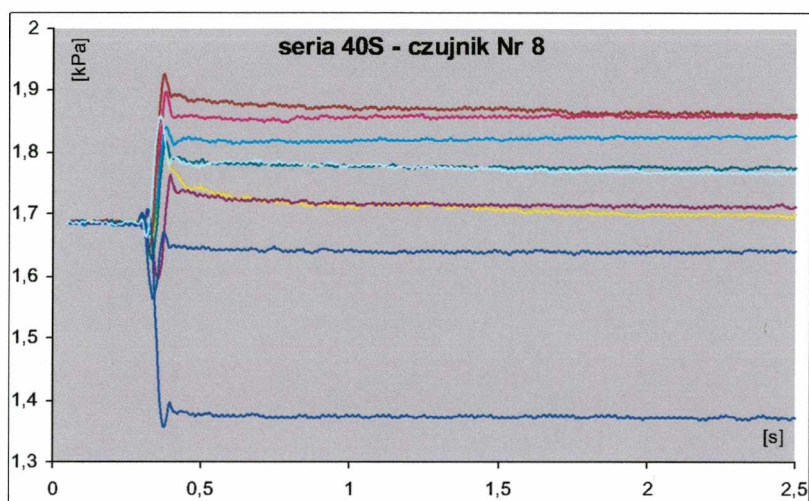
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $0,606\text{m/s}^2$ – seria 40S



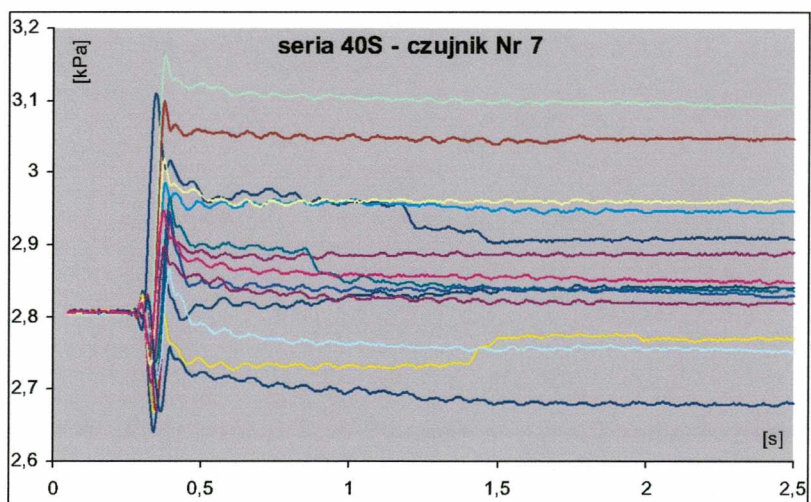
Rys. 4.51 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 40S



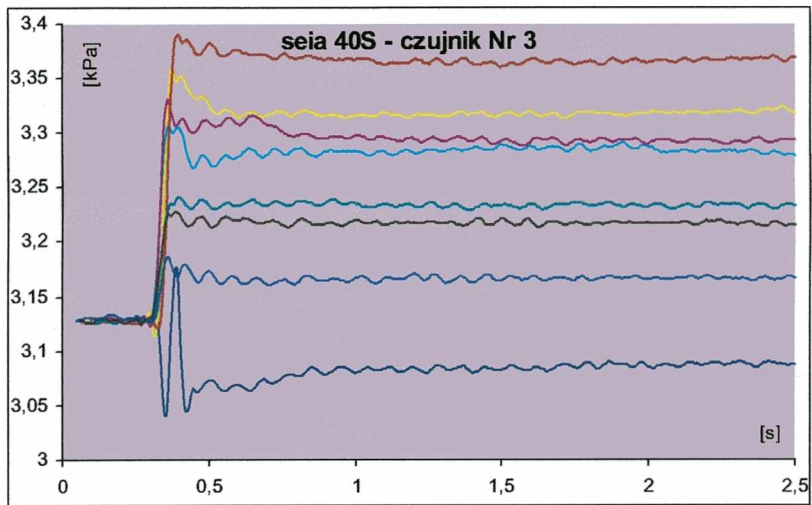
Rys. 4.52 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 1



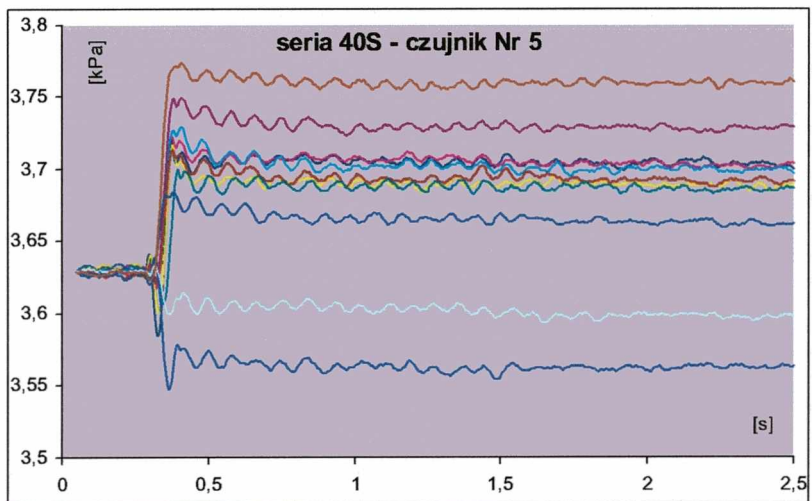
Rys. 4.53 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 8



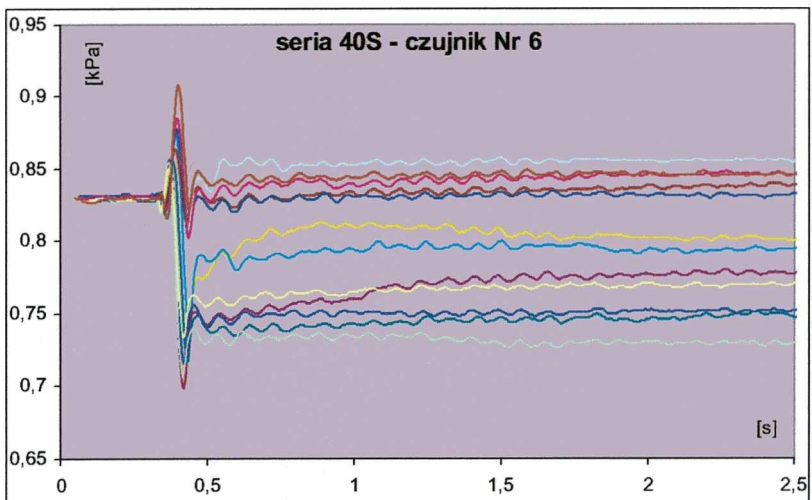
Rys. 4.54 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 7



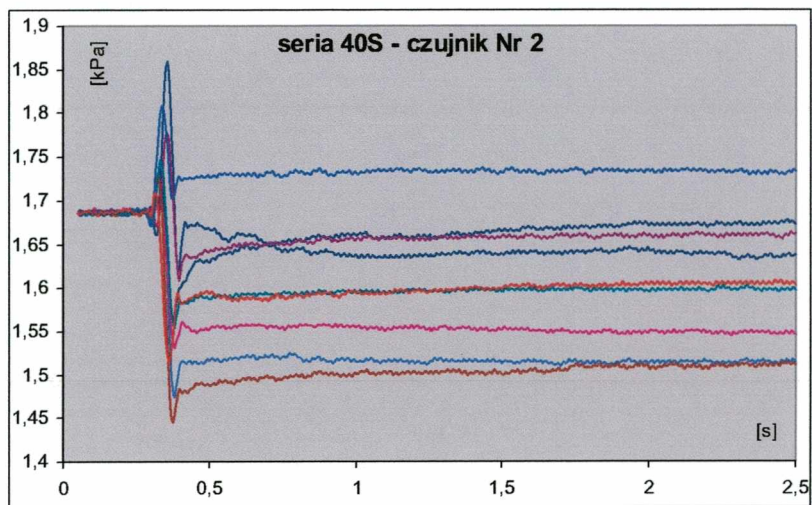
Rys. 4.55 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 3



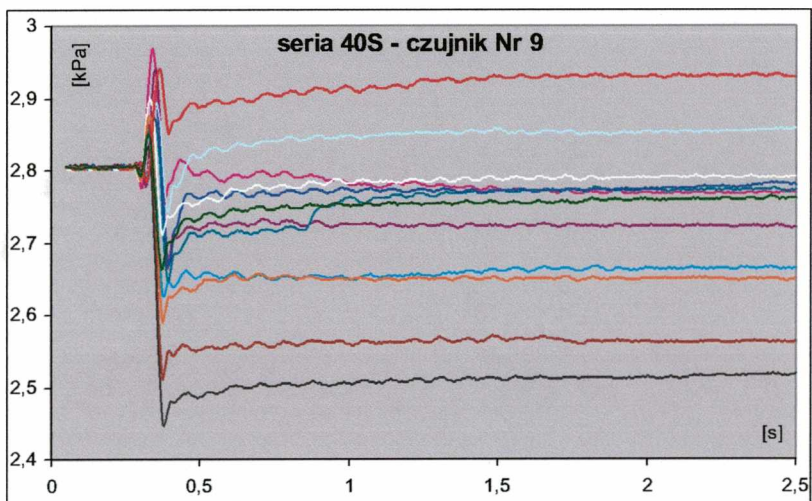
Rys. 4.56 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 5



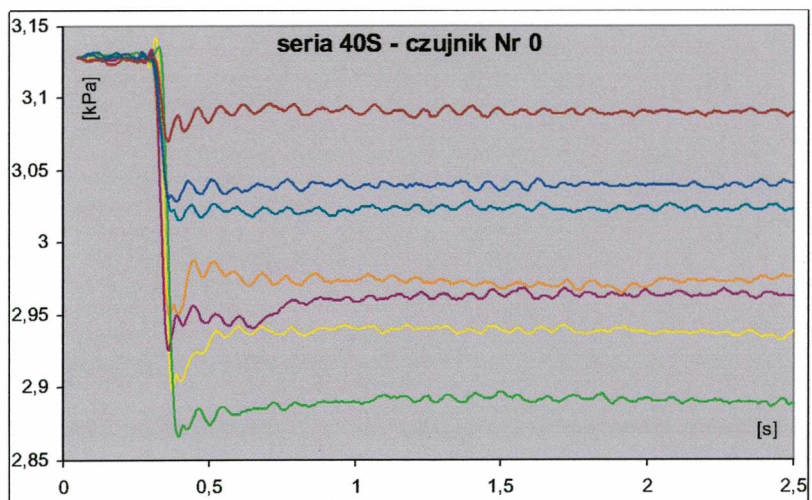
Rys. 4.57 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 6



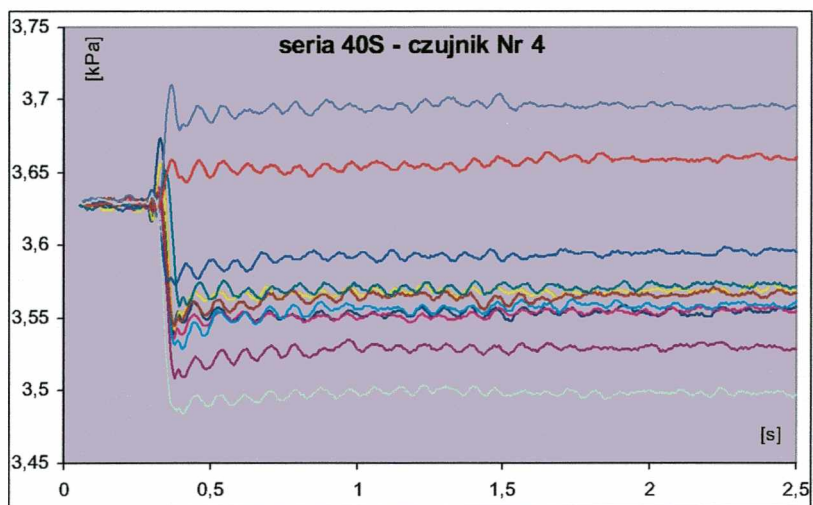
Rys. 4.58 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 2



Rys. 4.59 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 9

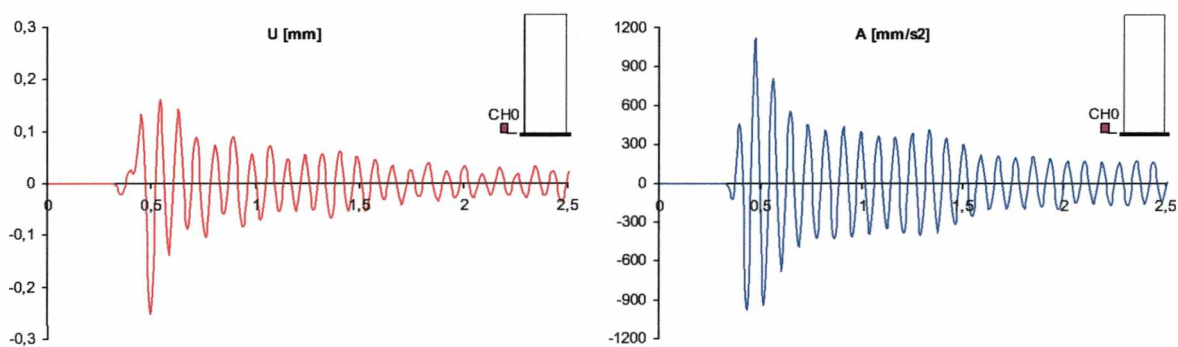


Rys. 4.60 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 0

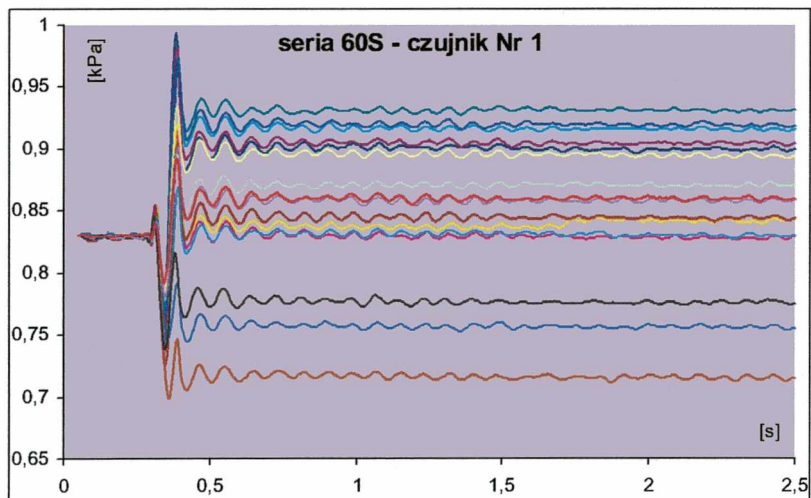


Rys. 4.61 Przebiegi czasowe parć: seria 40S – czujnik 4

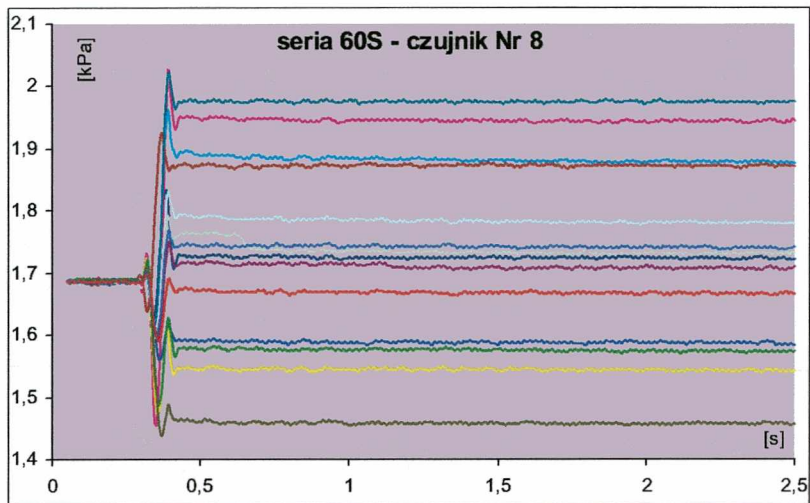
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $1,129\text{m/s}^2$ – seria 60S



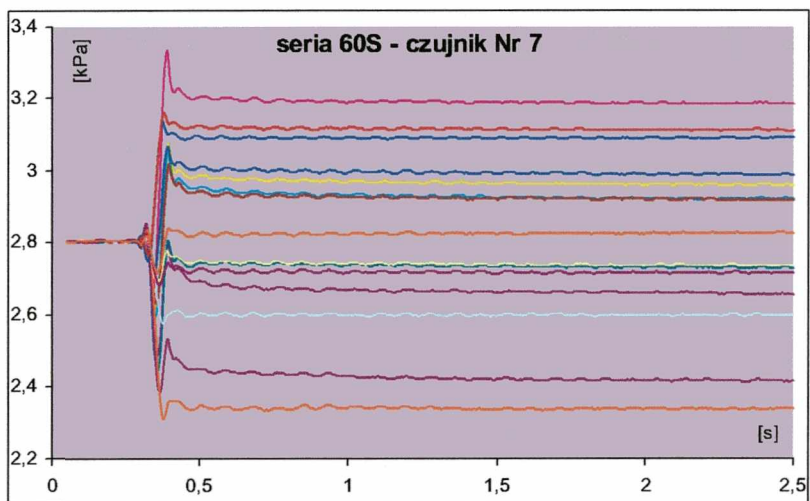
Rys. 4.62 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 60S



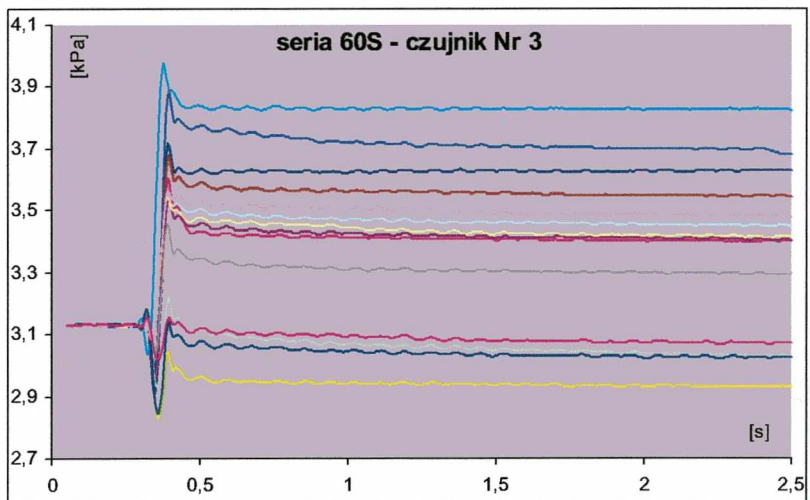
Rys. 4.63 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 1



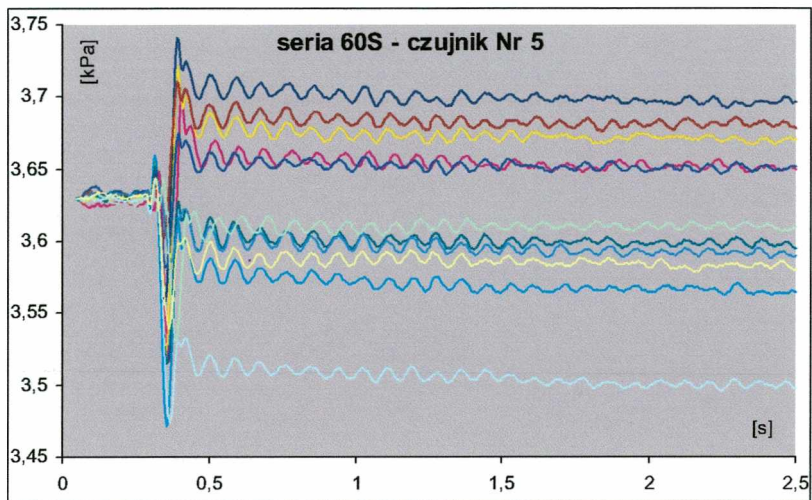
Rys. 4.64 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 8



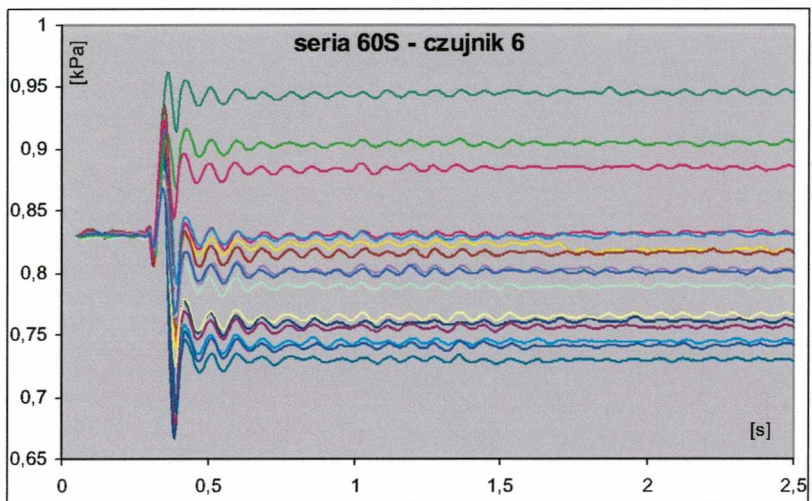
Rys. 4.65 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 7



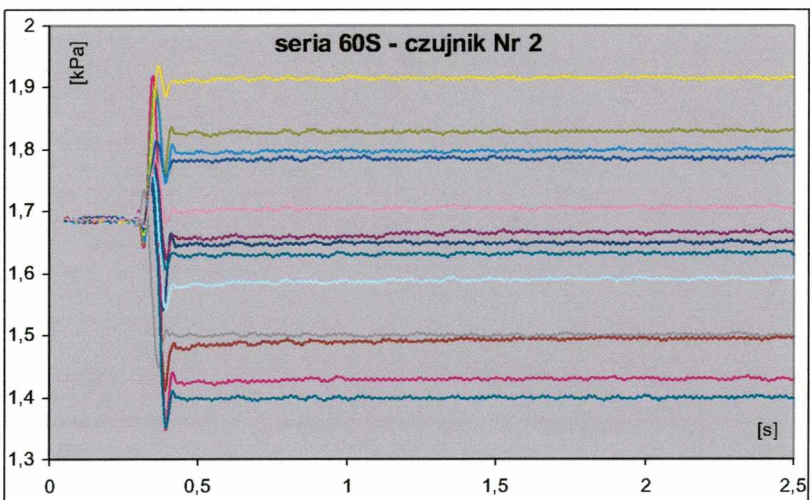
Rys. 4.66 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 3



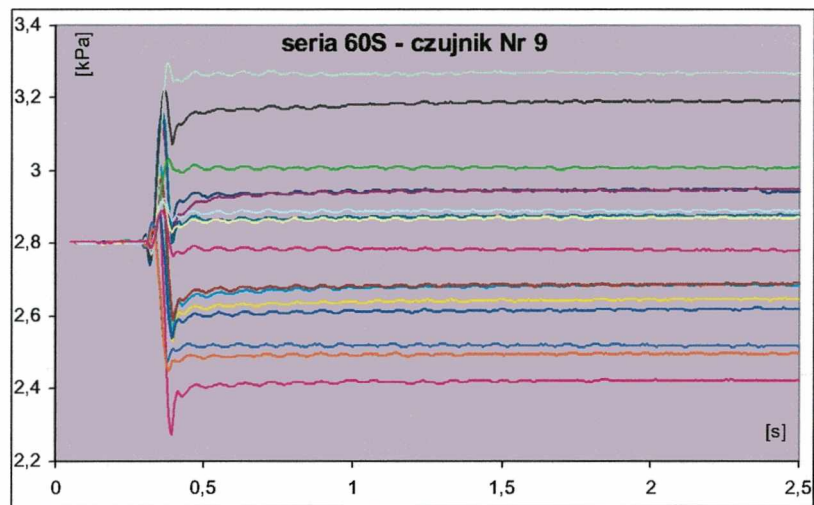
Rys. 4.67 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 5



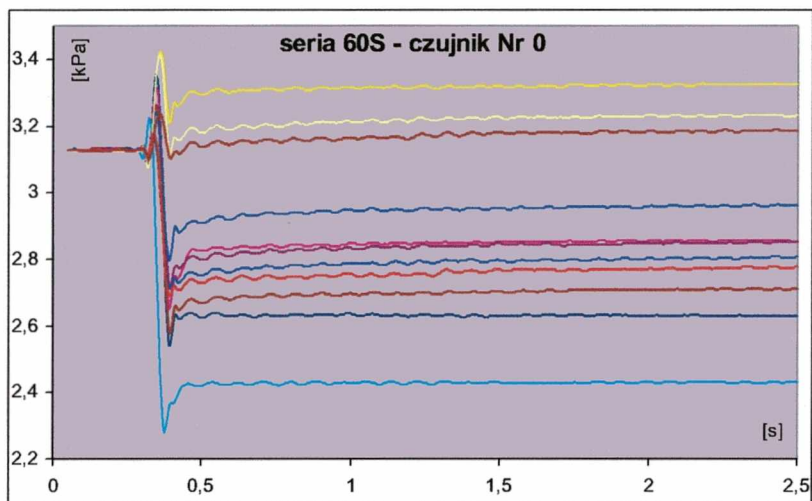
Rys. 4.68 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 6



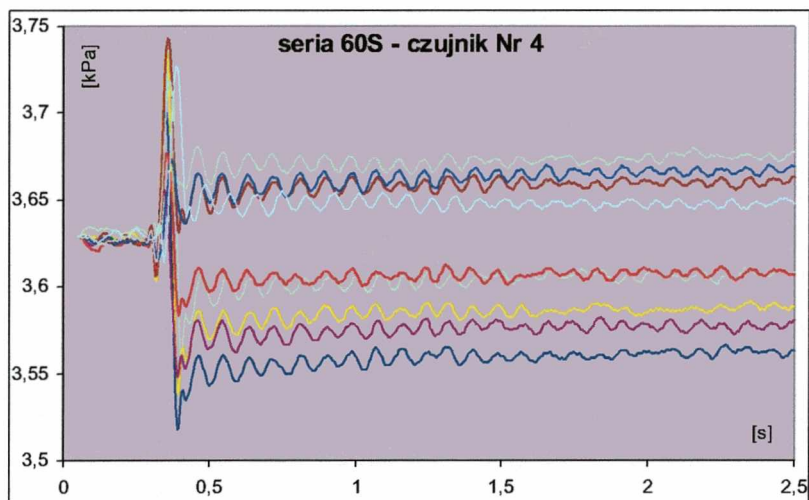
Rys. 4.69 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 2



Rys. 4.70 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 9

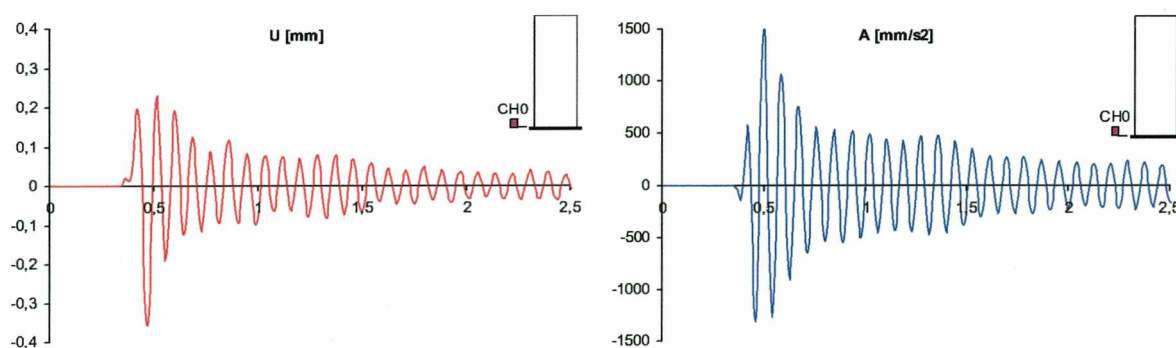


Rys. 4.71 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 0

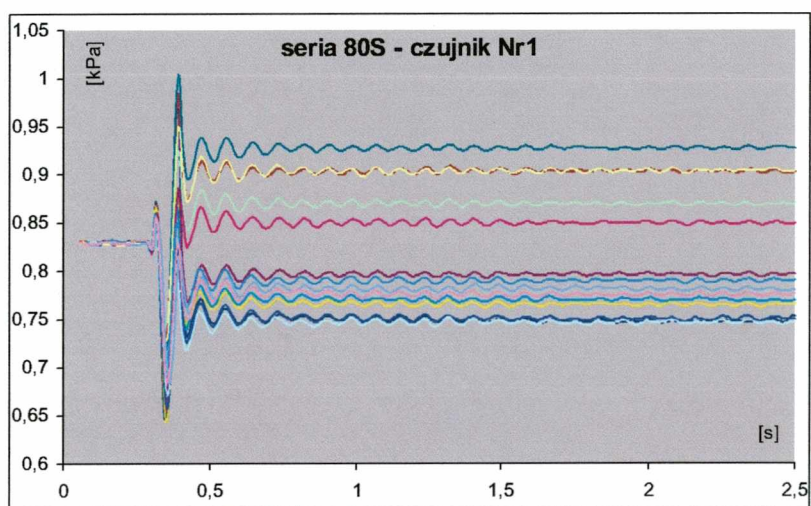


Rys. 4.72 Przebiegi czasowe parć: seria 60S – czujnik 4

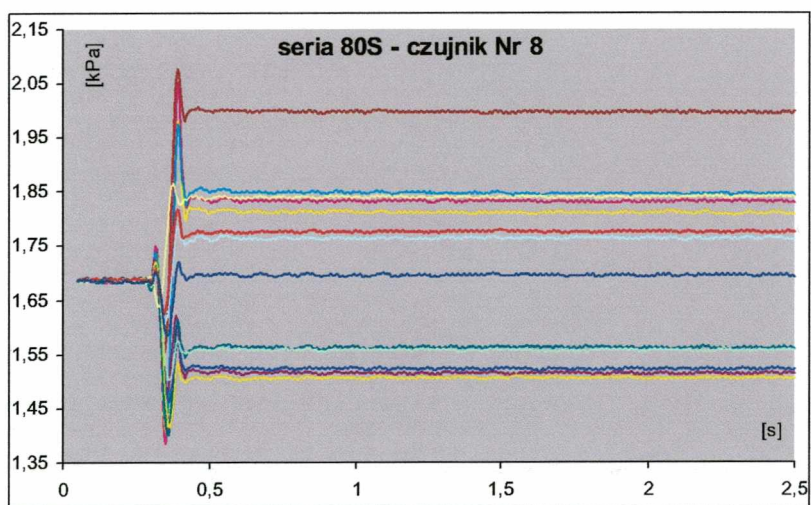
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $1,513\text{m/s}^2$ – seria 80S



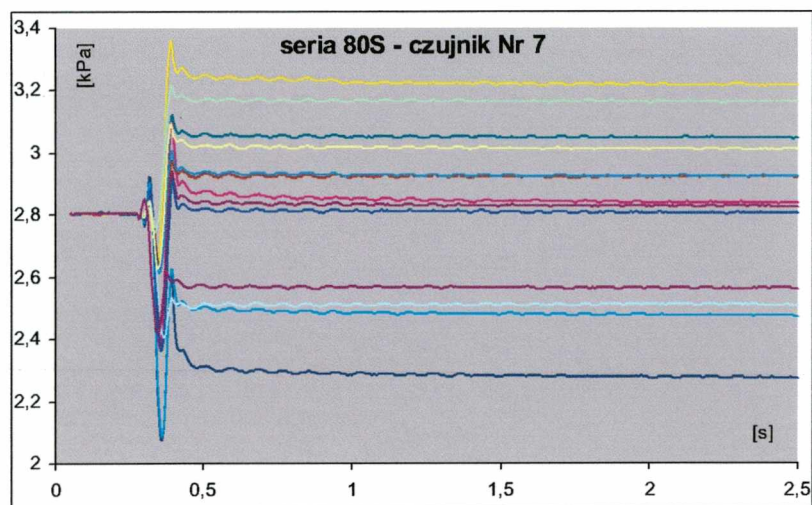
Rys. 4.73 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 80S



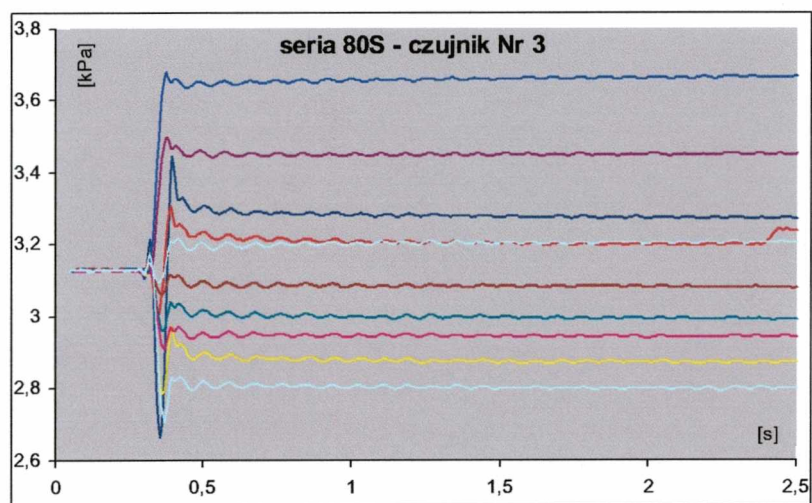
Rys. 4.74 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 1



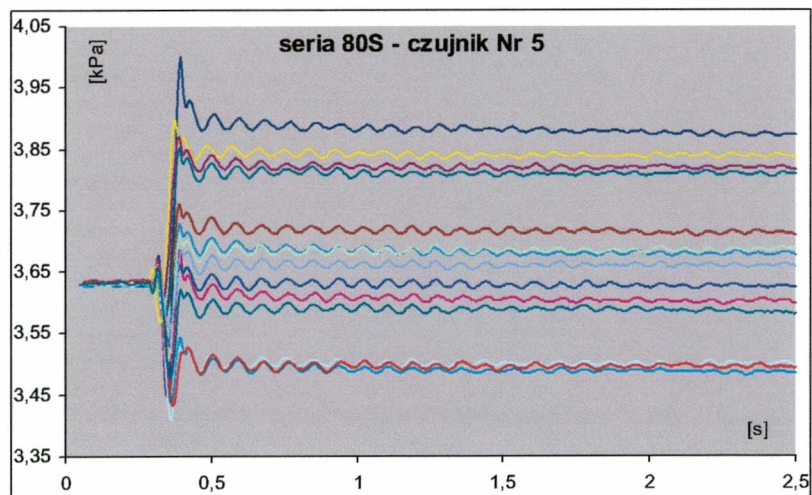
Rys. 4.75 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 8



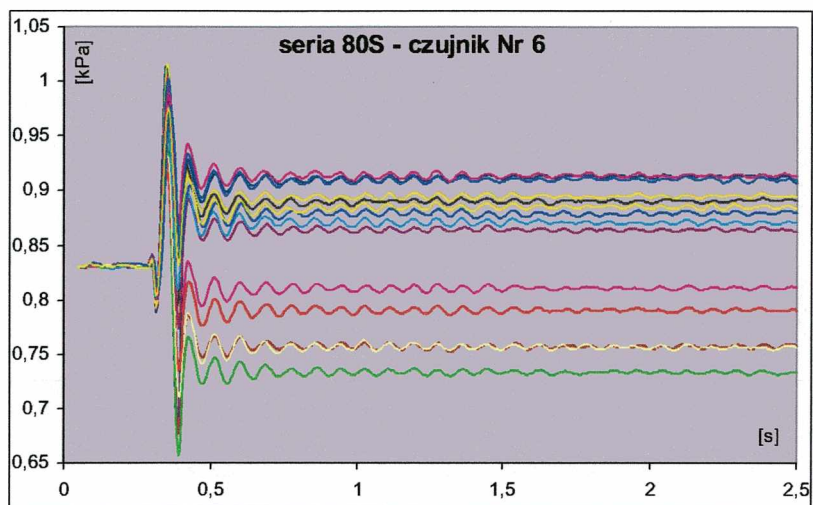
Rys. 4.76 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 7



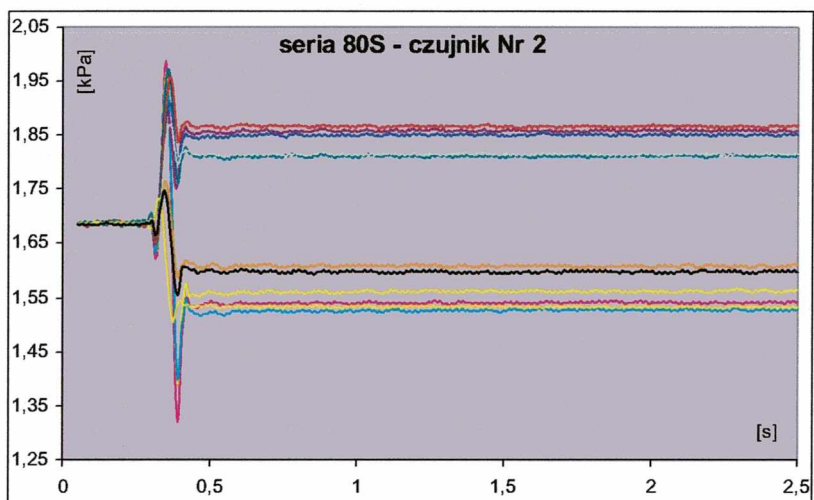
Rys. 4.77 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 3



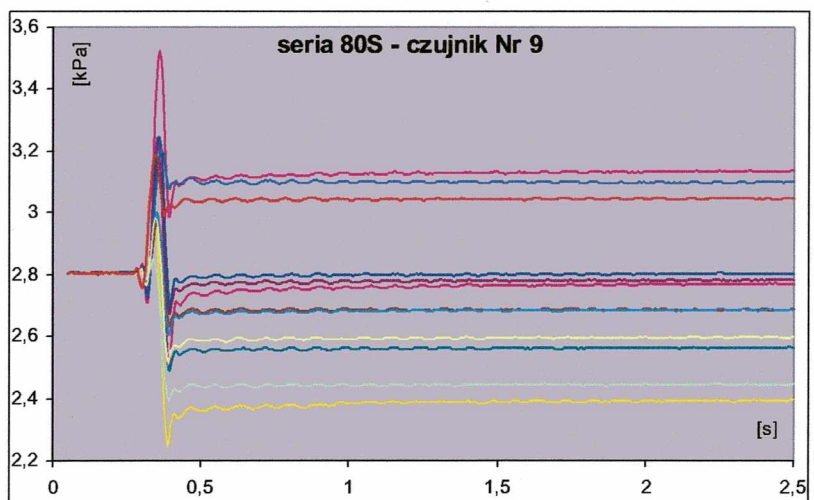
Rys. 4.78 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 5



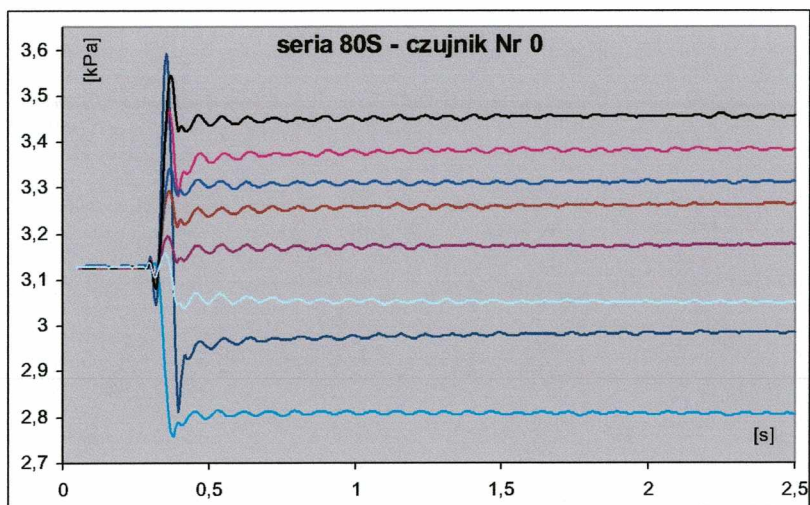
Rys. 4.79 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 6



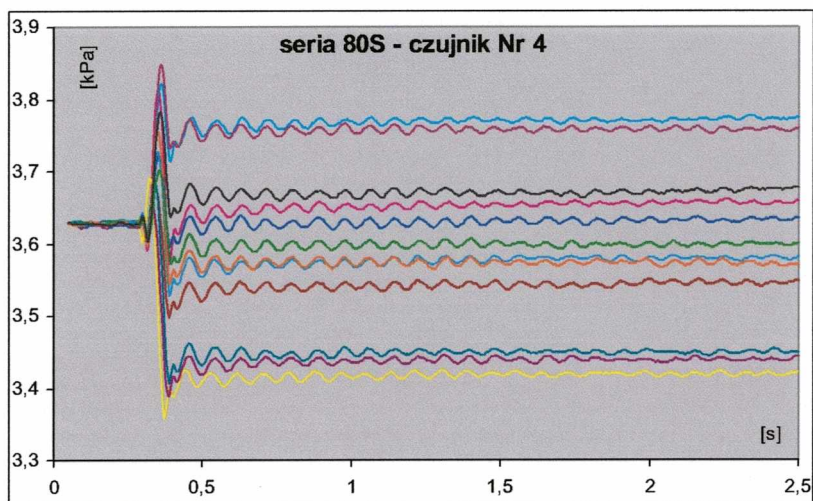
Rys. 4.80 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 2



Rys. 4.81 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 9

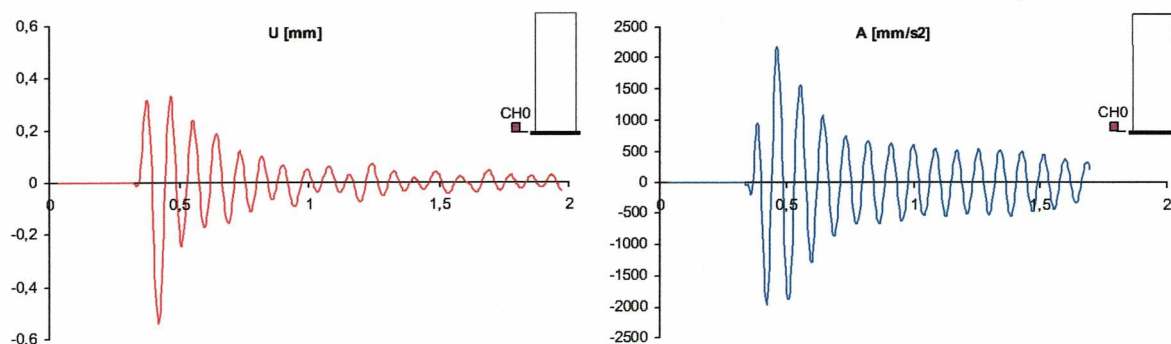


Rys. 4.82 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 0

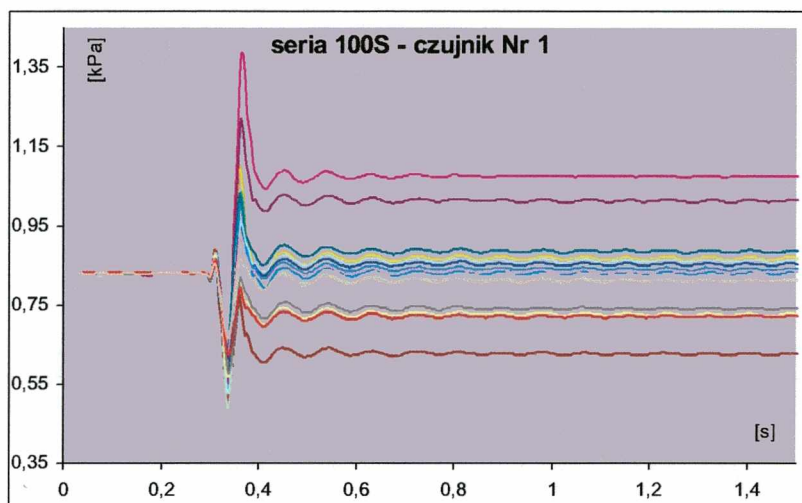


Rys. 4.83 Przebiegi czasowe parć: seria 80S – czujnik 4

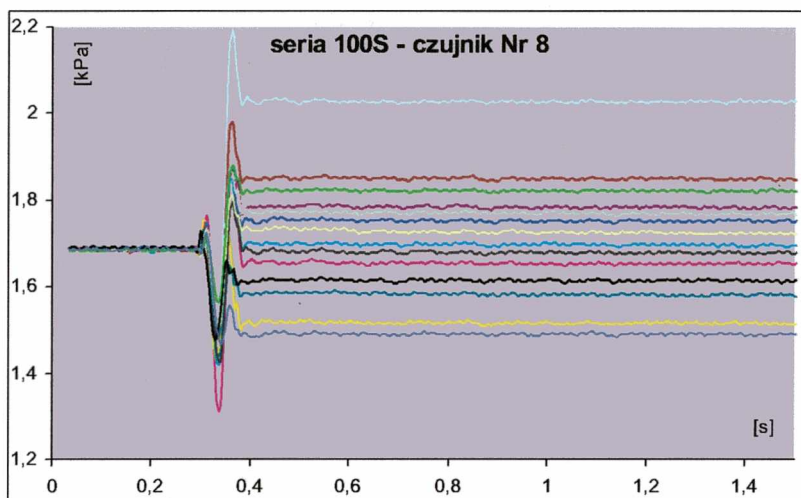
Wstrząs o amplitudzie przyspieszeń $2,178\text{m/s}^2$ – seria 100S



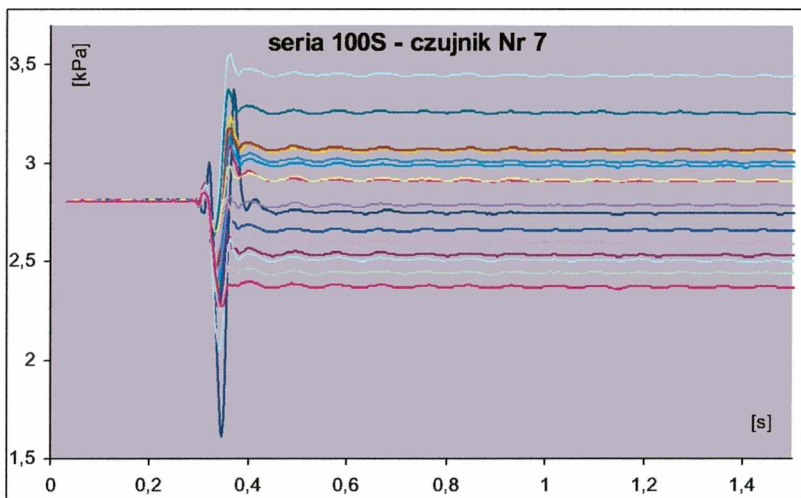
Rys. 4.84 Wibrogram i akcelerogram dla pomiarów serii 100S



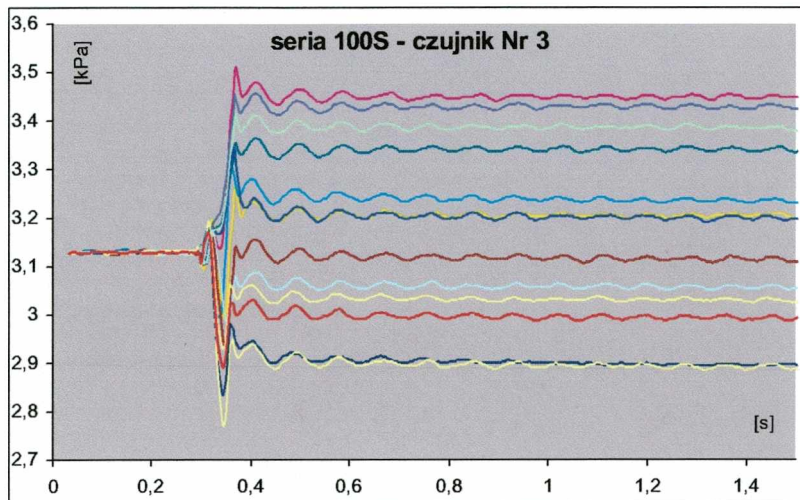
Rys. 4.85 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 1



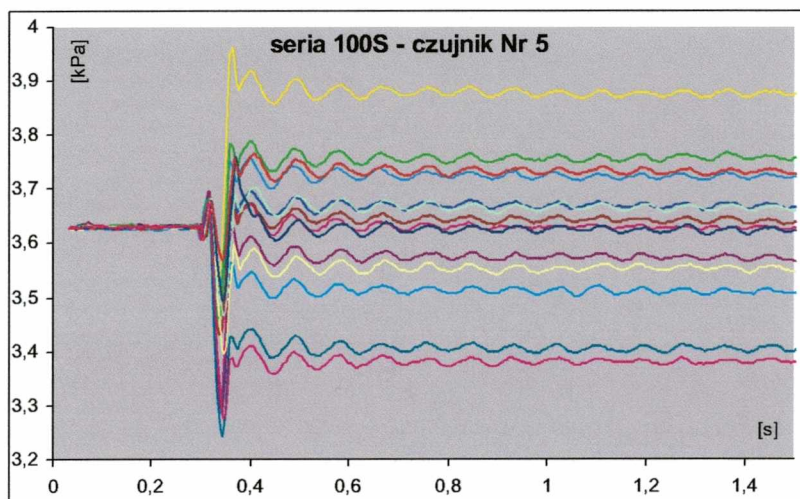
Rys. 4.86 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 8



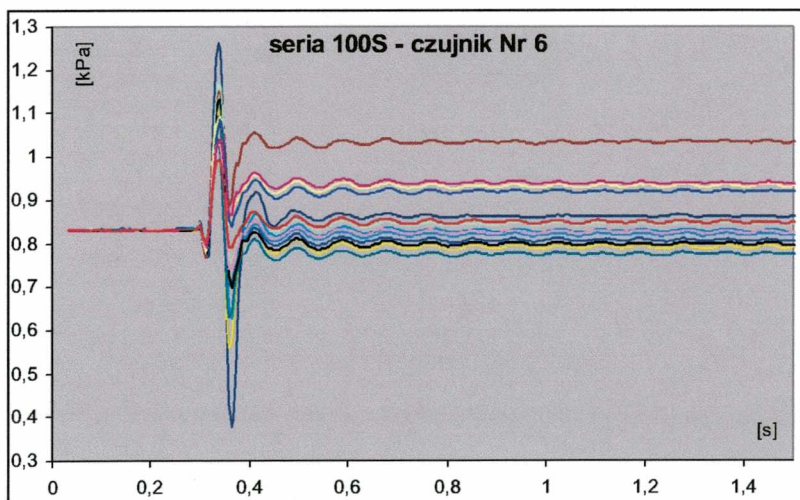
Rys. 4.87 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 7



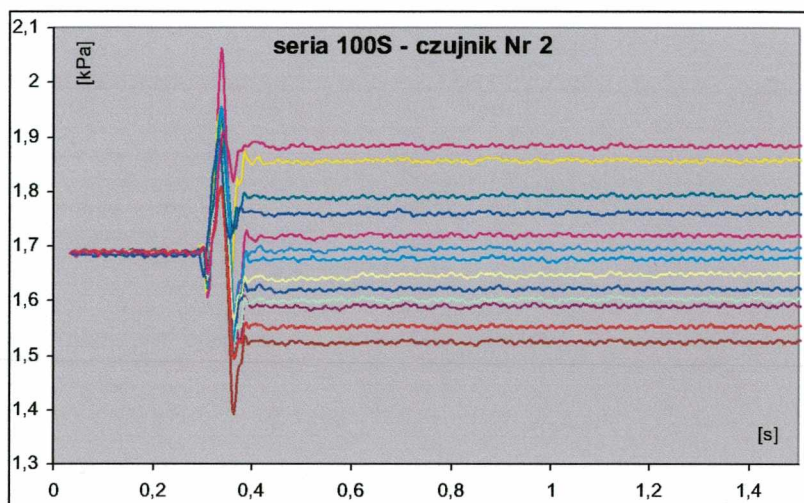
Rys. 4.88 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 3



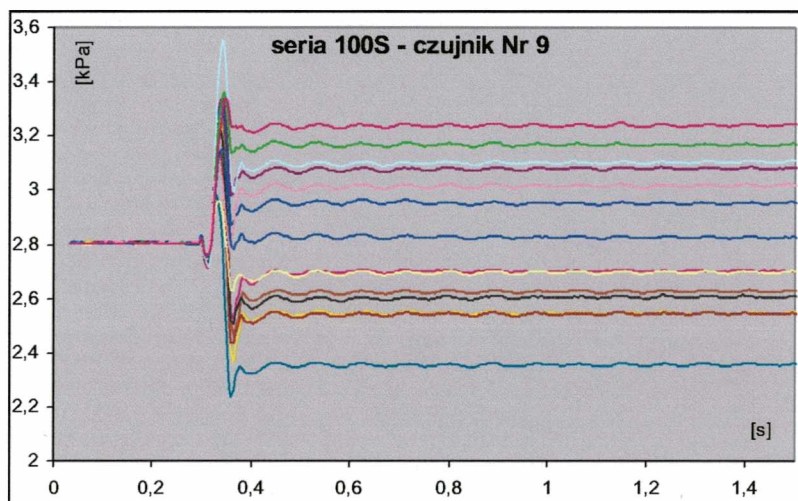
Rys. 4.89 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 5



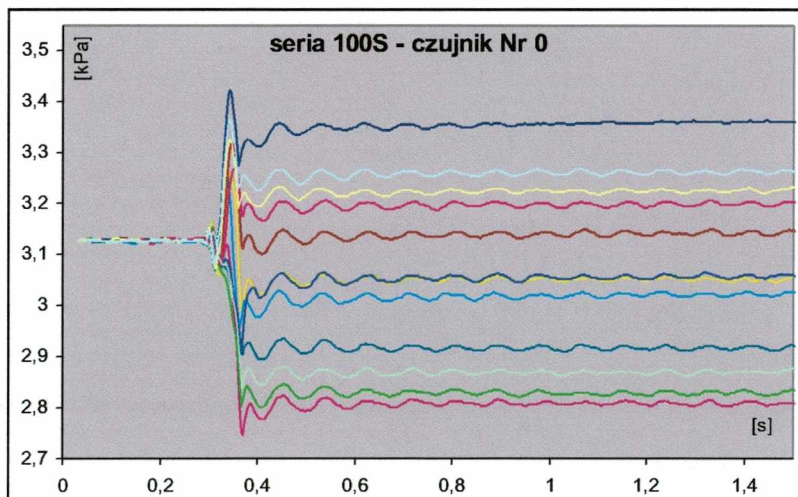
Rys. 4.90 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 6



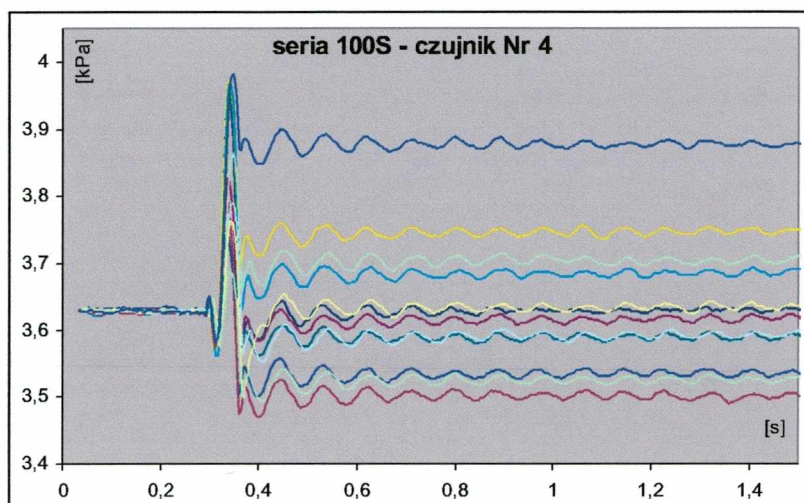
Rys. 4.91 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 2



Rys. 4.92 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 9



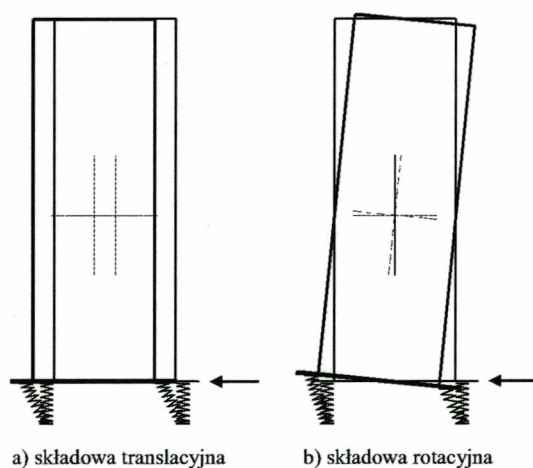
Rys. 4.93 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 0



Rys. 4.94 Przebiegi czasowe parć: seria 100S – czujnik 4

4.5. DYNAMICZNE WŁAŚCIWOŚCI UKŁADU: SILOS – MATERIAŁ SYPKI

Silos będący konstrukcją powłokową posiada duży zbiór kolejnych częstości i odpowiadających im form drgań własnych. Jego skomplikowana charakterystyka dynamiczna może być przyczyną pewnych trudności w przeprowadzeniu analizy wpływu drgań silosu na rozkład poziomych parć materiału sypkiego. Zastosowanie w badaniach modelu silosu o sztywnych ścianach pozwoliło na znaczne uproszczenie jego charakterystyki dynamicznej poprzez sprowadzenie wyższych częstości drgań własnych do wielkości pomijalnie małych.



Rys. 4.95 Postaci drgań własnych modelu silosu

Z tego względu i z powodu przyjętego sposobu przykładania obciążenia dynamicznego oraz sposobu podparcia modelu, można z dobrym przybliżeniem traktować badany układ jak kon-

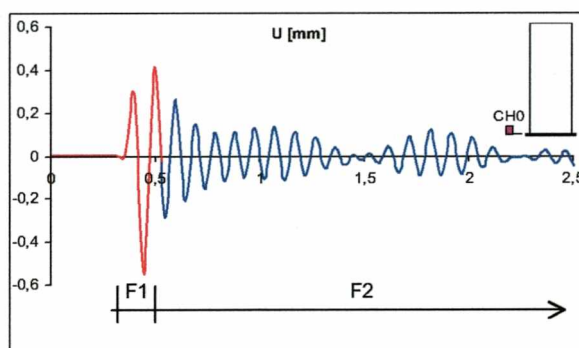
strukcję sztywną, posadowioną na sprężystym podłożu. W związku z tym charakterystyka dynamiczna silosu (niezależnie od zawartego w nim materiału sypkiego) została ograniczona do dwóch składowych drgań (rys. 4.95):

- translacyjnej – powodującej poziome drgania środka ciężkości układu w płaszczyźnie działania impulsu,
- rotacyjnej – powodującej obrót całego układu wokół jego środka ciężkości, również w płaszczyźnie działania impulsu.

Wyznaczone na podstawie pomiarów poziomych przemieszczeń podstawy modelu wibrogramy i akcelerogramy stały się podstawą analizy dynamicznej badanego modelu silosu wraz z materiałem sypkim. Wibrogramy te dla wszystkich poziomów obciążeń dynamicznych i obu modeli posadowienia można podzielić na dwie fazy:

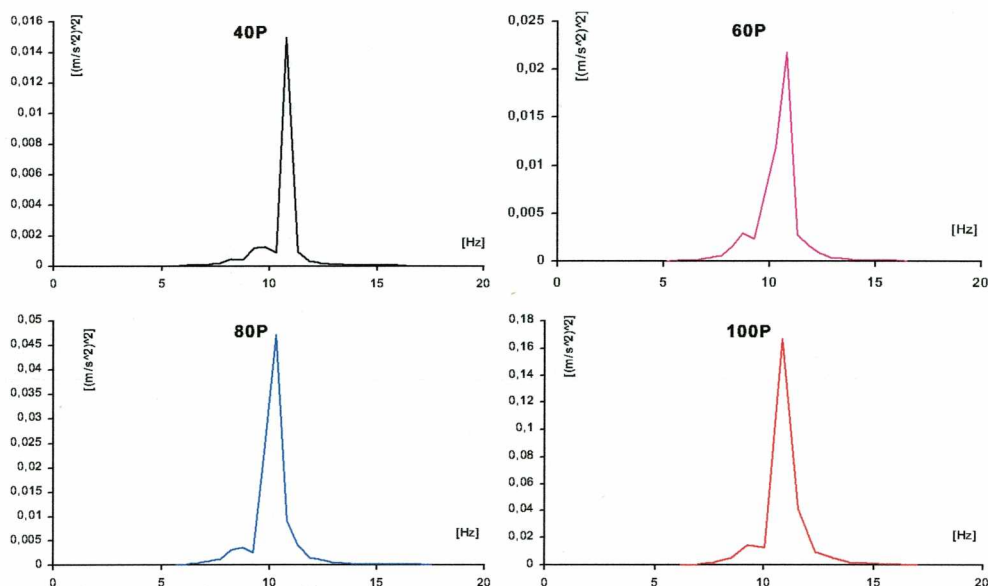
- fazę F1 – charakteryzującą się wzrostem amplitud przemieszczeń, trwającą od dwóch do trzech cykli;
- fazę F2 – fazę drgań gasnących.

Przykładowy wibrogram z podziałem na obie fazy przedstawia rysunek 4.96. Wibrogramy te poddano analizie harmonicznej, wynikiem której są spektra mocy.

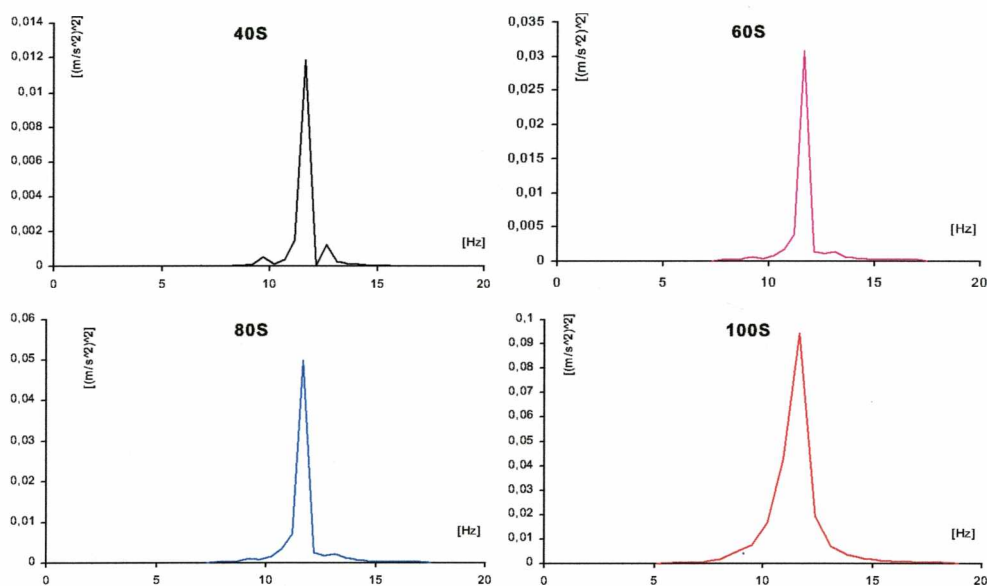


Rys. 4.96 Wibrogram z podziałem na dwie fazy wstrząsu

Przykładowe wykresy, wybrane spośród wszystkich serii pomiarowych, przedstawiono na rysunkach 4.97 i 4.98. Odczytane na ich podstawie dominujące częstotliwości drgań własnych wynoszą 10,4Hz i 11,5Hz, odpowiednio dla obu modeli posadowienia. Odpowiadającym tym częstotliwościom formom drgań własnych są drgania rotacyjne (rys.4.96 b). Drgania te odgrywają decydującą rolę w charakterystyce dynamicznej badanego układu, a ich udział jest ponad dziesięciokrotnie wyższy od pozostałych form (i częstotliwości) drgań własnych.

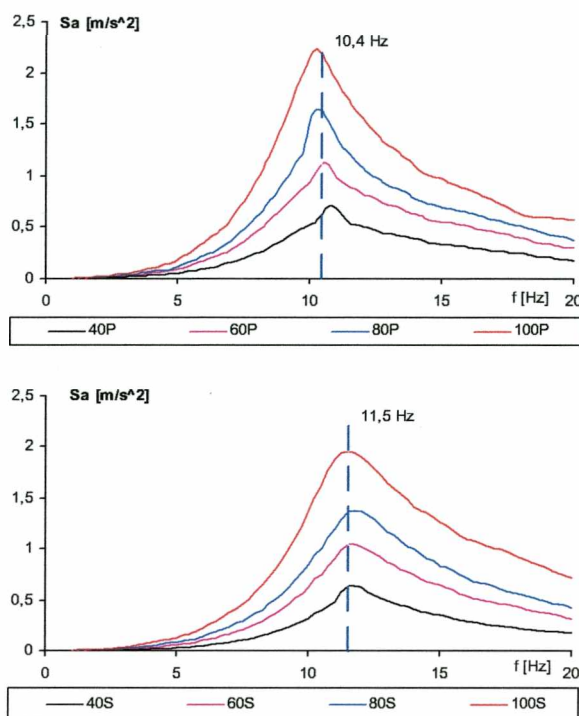


Rys. 4.97 Przyspieszeniowe spektra mocy dla modelu silosu posadowionego na podłożu podatnym



Rys. 4.98 Przyspieszeniowe spektra mocy dla modelu silosu posadowionego na podłożu sztywnym

Uzupełnieniem analizy harmonicznej drgań modelu są przyspieszeniowe spektra odpowiedzi. Rysunek 4.99 przedstawia wybrane spektra, wyznaczone na podstawie zamieszczonych w poprzednim rozdziale akceleroграмów (rys. 4.7, 4.18, 4.29 i 4.40 oraz 4.51, 4.62, 4.73 i 4.84).



Rys. 4.99 Przyspieszeniowe spektra odpowiedzi

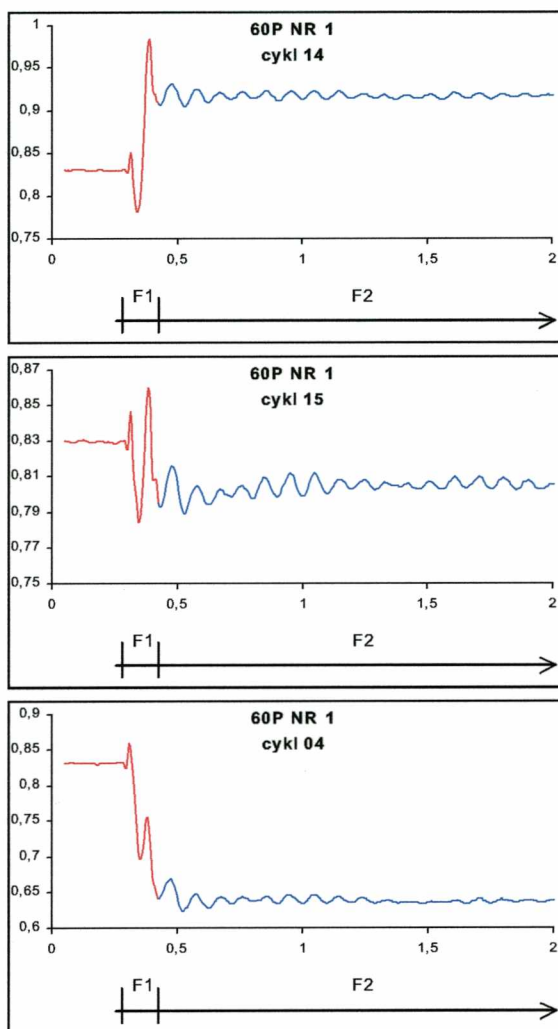
4.6. ANALIZA ZMIAN W CZASIE PARĆ MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SIŁOSU

4.6.1. PODZIAŁ PARĆ DYNAMICZNYCH NA PARCIA KOŃCOWE I KRÓTKOTRWAŁE PARCIA CYKLICZNE – TEZA 1

Analizując przebiegi zmian w czasie parć poziomych materiału sypkiego na ścianę silosu wywołanych wstrząsami podłoża, zaobserwowano, iż każdy z wibrogramów jest wypadkową działania dwóch procesów inicjowanych obciążeniem impulsowym, które różnią się między sobą charakterem odpowiedzi ośrodka sypkiego:

- 1) proces oscylacyjny, polegający na cyklicznych zmianach wartości parć o charakterze krótkotrwałym. Zmiany te są zmianami okresowymi, których amplitudy w początkowej fazie drgań (F1) rosną, a w fazie drgań gasnących (F2) maleją do zera. W czasie trwania fazy F1, tj. około 0,2s, w silosie zachodzą największe zmiany parć poziomych materiału sypkiego, podczas gdy faza druga, trwająca maksymalnie 4,5s, jest źródłem jedynie niewielkich wahań parć materiału.

- 2) proces aperiodyczny, powodujący trwałe zmiany parć materiału sypanego – zwanych dalej parcami końcowymi (lub resztkowymi), których zasadnicza część zachodzi w fazie początkowej drgań modelu, natomiast w fazie drgań gasnących zmiany te praktycznie ustają.

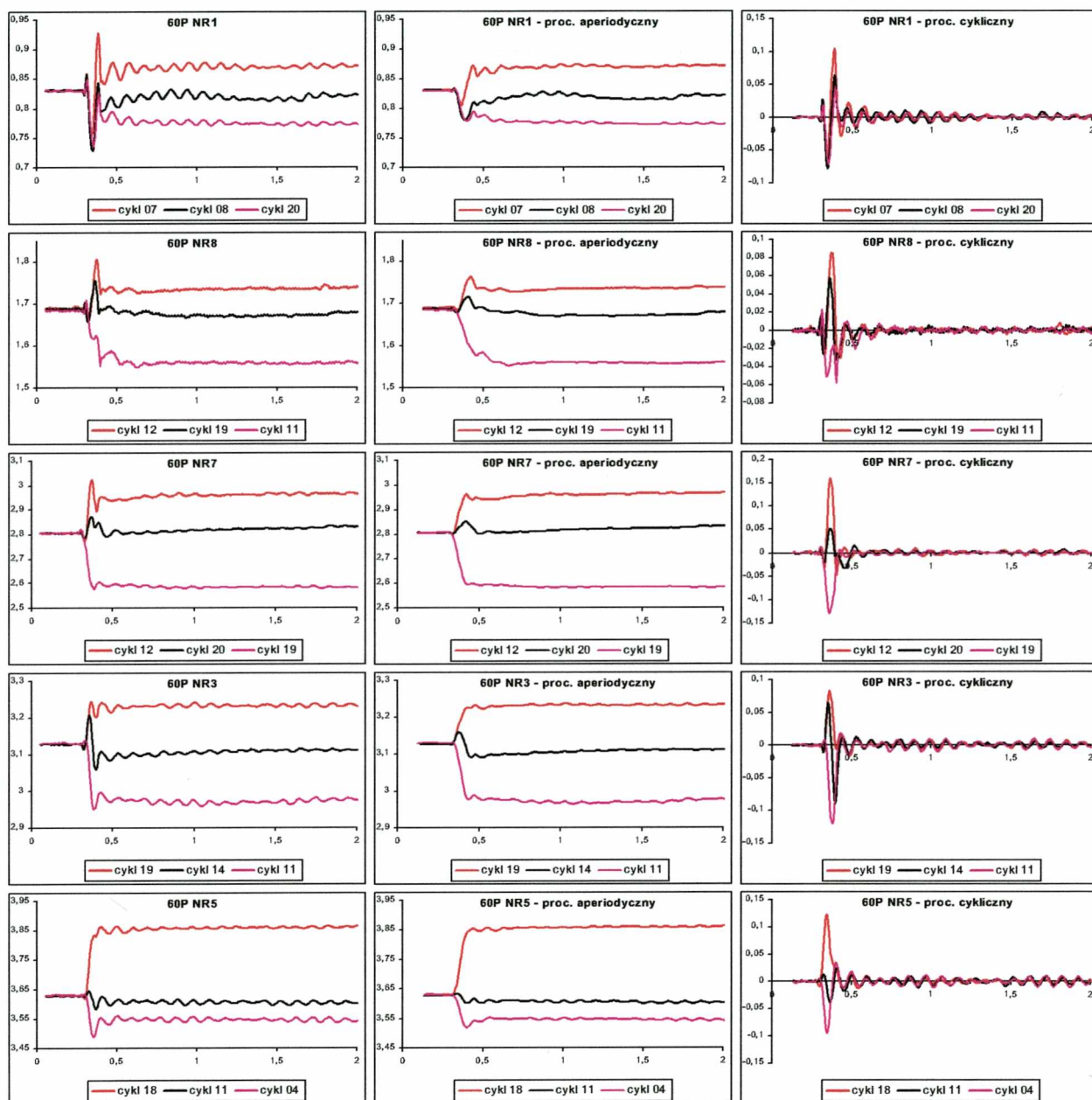


Rys. 4.100 Przebiegi parć w czasie – podział na fazy wstrząsu

Rysunek 4.100 przedstawia wybrane wibrogramy parć zarejestrowane tym samym czujnikiem, pochodzące z różnych cykli pomiarowych jednej serii (60P), wybrane tak aby zilustrować różnice w skutkach działania wstrząsów podłoża o identycznych parametrach wejściowych. Na rysunku tym przedstawiono również podział wibrogramów na fazy wstrząsu.

Rysunek 4.101 przedstawia rozkład na procesy aperiodyczny i cykliczny przykładowych wibrogramów parć serii 60P, zarejestrowanych czujnikami umiejscowionymi na jednej z tworzących komory silosu. Analiza wibrogramów parć pod kątem charakteru zmian parć resztkowych wykazała, iż drgania silosu mogą wywoływać trwały wzrost (rys. 4.101 – linia czerwona) bądź trwały spadek (linia różowa) wartości parć poziomych materiału w stosunku

do ich wartości sprzed wstrząsu, lub mogą również nie wywoływać żadnych zasadniczych zmian parć o charakterze trwałym (linia czarna). Nie stwierdzono istnienia jednoznacznych zależności między usytuowaniem punktów pomiarowych na wysokości modelu, a poziomem oraz charakterem zmian parć resztkowych, a także wzajemnych zależności między tymi parcami.



Rys. 4.101 Procesy aperiodyczny i cykliczny zmian parć w czasie

W związku z tym dalszą analizę parć resztkowych oparto na wartościach bezwzględnych z maksymalnych zmian tychże parć mierzonych w poszczególnych punktach pomiarowych. Łącznej analizie poddano wibrogramy parć zarejestrowanych czujnikami usytuowanymi na

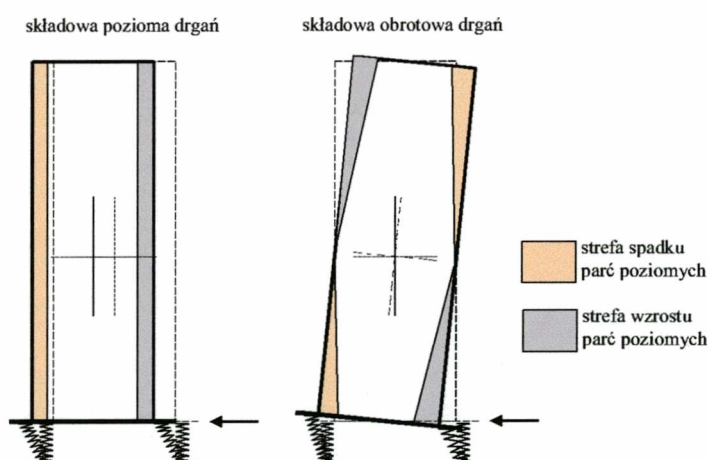
jednej wysokości komory silosu. Zestawienie średnich wartości parć resztkowych dla poszczególnych serii pomiarowych przedstawia tablica 4.5. Przedstawiono w niej ponadto wartości odchyłeń standardowych i przedziały ufności dla założonego poziomu istotności równego 5%. Zaobserwowane w niniejszych badaniach trwałe zmiany parć materiału sypkiego na ściany silosu wahają się w przedziale od 1,3% do 10,3% wartości parć statycznych sprzed wstrząsu, stanowiących poziom odniesienia (tablica 4.4). Jak wynika z tablicy 4.5 trwałe zmiany parć uzyskane w niniejszych badaniach oscylują wokół wartości średnich z dużymi rozrzutami. Ich miarą są wskaźniki zmienności wynoszące od 27% do 97%, a także przedziały ufności wynoszące od $\pm 19\%$ do $\pm 67\%$ wartości średnich parć resztkowych.

Tablica 4.5 Zestawienie parć resztkowych

czujniki Nr	średnie parcia resztkowe		odchyl. standard.	przedział ufności	wskaźnik zmienności	średnie parcia resztkowe		odchyl. standard.	przedział ufności	wskaźnik zmienności
	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]	[%]	[kPa]	[%]	[kPa]	[kPa]	[%]
	seria 40P					seria 40S				
1 i 6	0,0478	5,8	0,0398	0,0318	83	0,0415	5,0	0,0315	0,0165	76
8 i 2	0,1144	6,8	0,0306	0,0227	27	0,1106	6,6	0,0921	0,0571	83
7 i 9	0,0936	3,3	0,0400	0,0296	43	0,0980	3,5	0,0846	0,0443	86
3 i 0	0,1020	3,3	0,0534	0,0396	52	0,1192	3,8	0,0721	0,0471	60
5 i 4	0,0631	1,7	0,0549	0,0299	87	0,0687	1,9	0,0279	0,0165	41
	seria 60P					seria 60S				
1 i 6	0,0597	7,2	0,0483	0,0253	81	0,0532	6,4	0,0362	0,0177	68
8 i 2	0,0907	5,4	0,0652	0,0385	72	0,1270	7,6	0,0903	0,0473	71
7 i 9	0,1680	6,0	0,1336	0,0873	80	0,1966	7,0	0,1311	0,0642	67
3 i 0	0,1400	4,5	0,1022	0,0604	73	0,3081	9,8	0,1865	0,0977	61
5 i 4	0,1033	2,8	0,0536	0,0291	52	0,0483	1,3	0,0314	0,0185	65
	seria 80P					seria 80S				
1 i 6	0,0850	10,3	0,0642	0,0289	76	0,0612	7,4	0,0224	0,0117	37
8 i 2	0,1076	6,4	0,0781	0,0461	73	0,1415	8,4	0,0663	0,0347	47
7 i 9	0,2241	8,0	0,1881	0,1064	84	0,2235	7,9	0,1614	0,0877	72
3 i 0	0,1457	4,6	0,1264	0,0662	87	0,2125	6,8	0,1493	0,0925	70
5 i 4	0,0867	2,4	0,0563	0,0276	65	0,1091	3,0	0,0767	0,0402	70
	seria 100P					seria 100S				
1 i 6	0,0420	5,1	0,0342	0,0179	82	0,0729	8,8	0,0571	0,0378	78
8 i 2	0,0938	5,6	0,0538	0,0373	57	0,1071	6,4	0,0863	0,0437	81
7 i 9	0,1927	6,9	0,1871	0,0947	97	0,2506	8,9	0,1614	0,0791	64
3 i 0	0,1022	3,3	0,0975	0,0530	95	0,1639	5,2	0,0998	0,0543	61
5 i 4	0,0750	2,1	0,0661	0,0346	88	0,0995	2,7	0,0862	0,0452	87

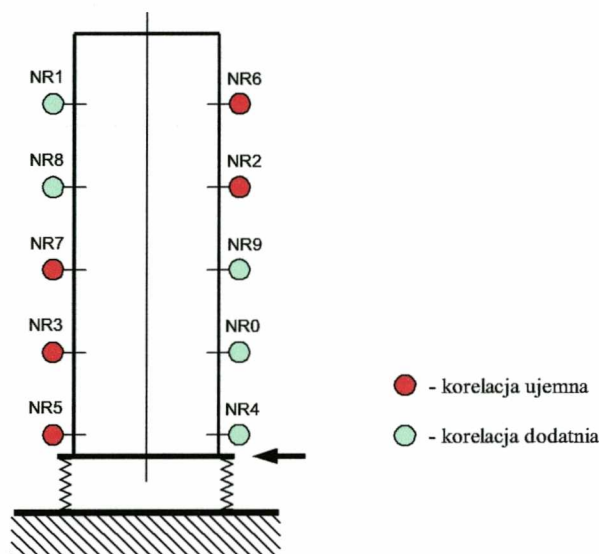
4.6.2. CHARAKTER ZMIAN KRÓTKOTRWAŁYCH PARĆ CYKLICZNYCH – TEZA 2

Zmiany parć materiału sypkiego zachodzące podczas procesu cyklicznego, zarówno w fazie wzrostu amplitud przemieszczeń poziomych modelu, jak i w fazie drgań gasnących, powodowane są ciągłymi zmianami stanu naprężenia materiału sypkiego i zależą one od kierunku przemieszczania się ściany silosu. Jeżeli ściana przesuwana się w kierunku działania impulsu, parcie na nią zmniejsza się proporcjonalnie do wartości przemieszczeń. Ten spadek wartości parć trwa dopóty, dopóki nie nastąpi zmiana kierunku przemieszczania się ściany. Jeżeli ściana komory przesuwana się w kierunku materiału sypkiego, następuje kompresja materiału oraz wzrost wartości naprężeń ścinających, co przyczynia się z kolei do zwiększenia wartości parć poziomych. Teoretyczne strefy przyrostów i spadków parć poziomych dla poszczególnych składowych drgań silosu przedstawia rysunek 4.102. Wyżej opisany proces zmian w czasie parć materiału na ściany silosu, zależnych od kierunku przemieszczeń ścian modelu, obserwowany był w obu fazach drgań modelu, we wszystkich punktach pomiarowych dla całego zakresu parametrów wejściowych drgań. Potwierdzeniem istnienia tej zależności są współczynniki korelacyjne wibrogramów przemieszczeń podstawy modelu i parć materiału. Wartości bezwzględne tych współczynników zawierają się w przedziale $0,70 \div 0,94$. Stwierdzono, iż korelacja dodatnia występuje wtedy, gdy wzrost przemieszczeń podstawy silosu, a tym samym przemieszczeń całego modelu (z powodu jego dużej sztywności), powoduje wzrost parć poziomych. Natomiast korelacja jest ujemna, gdy wzrost przemieszczeń powoduje zmniejszanie się parć.



Rys. 4.102 Strefy zmian parć poziomych

Na uwagę zasługuje rozkład znaków współczynników korelacji przedstawiony na rysunku 4.103, potwierdzający zasadniczy wpływ rotacyjnych drgań własnych układu na dynamiczne zachowanie się badanego modelu, a tym samym, na przebieg w czasie parć materiału sypkiego na ściany silosu.



Rys. 4.103 Rozkład znaków współczynników korelacji

Jak już wspomniano zjawisko zmian w czasie parć materiału sypkiego zależnych od kierunku przemieszczeń ścian modelu, zaobserwowane zostało zarówno w fazie wzrostu amplitud przemieszczeń modelu (F1) jak i w fazie drgań gasnących (F2). Zmiany parć zachodzące w obu fazach różnią się od siebie w sposób znaczący. Amplitudy parć fazy F1 przewyższają kilkakrotnie wartości amplitud fazy drgań gasnących. Przyczyny powyższych różnic oraz różnic dotyczących trwałych zmian parć (por. tablica 4.5) należy doszukiwać się przede wszystkim we właściwościach materiału sypkiego, omówionych szeroko w części teoretycznej pracy, takich jak: plastyczność, barotropia, pynkotropia czy argotropia. Kolejnymi przyczynami obserwowanych nieregularności w reakcji materiału sypkiego na wstrząsy silosu są różnice w sztywnościach oraz tłumieniu drgań materiału sypkiego i konstrukcji silosu. Nie bez znaczenia jest również nieliniowy związek naprężeń ścinających z odkształceniami postaciovymi materiału sypkiego, który, podobnie jak zależność: tłumienie oraz moduł sprężystości poprzecznej – odkształcenia postaciowe, dla cyklicznego procesu obciążania, ma postać pętli histerezy. Wszystkie powyższe cechy materiału sypkiego są ze sobą wzajemnie powiązane, a przeprowadzone badania modelowe nie pozwoliły na określenie udziału poszczególnych cech w całości obserwowanych zjawisk.

Wyznaczenie wpływu nieliniowych cech materiału sypkiego na przebiegi czasowe parć jest dodatkowo utrudnione z powodu nieuniknionych niedokładności pomiarów związanych m.in. z niskim poziomem naprężeń panujących w materiale wypełniającym silos, który wiąże się z niedokładnością rozkładu mas i gęstości ośrodka sypkiego. Przyczyną tych niedokładności może być chociażby niezachowanie centryczności napełniania silosu spowodowane niedokładnym wykonaniem i umiejscawianiem leja zasypowego na komorze silosu podczas kolejnych zasypów. W czasie napełniania silosu strugą obserwowano zjawisko pulsacyjnego obsuwania się kolejnych warstw materiału sypkiego ze stożka nasypowego. Niesymetryczne tworzenie się tego stożka między innymi na skutek wyżej wspomnianych błędów potęguje nierównomierny rozkład mas w komorze silosu.

Tablica 4.6 Analiza przyspieszeń wymuszenia dynamicznego

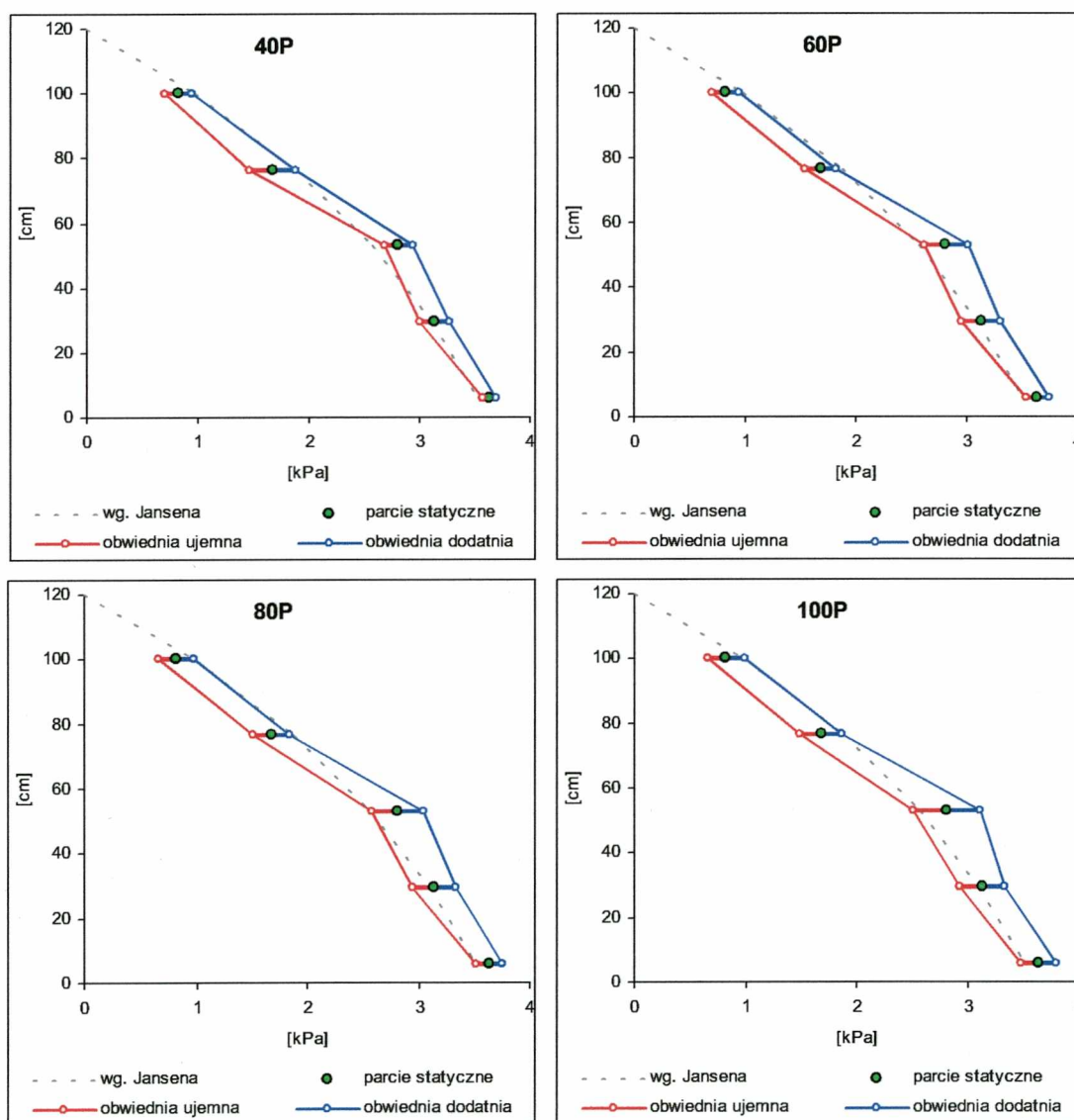
seria pomiarów	średnia przyspieszeń [mm/s ²]	odchylenie standardowe [mm/s ²]	wskaźnik zmienności [%]
40P	672,00	27,71	4,1
60P	1204,62	16,97	1,4
80P	1693,34	65,51	3,9
100P	2243,15	76,30	3,4
40S	565,67	19,88	3,5
60S	1049,60	39,86	3,8
80S	1475,10	53,81	3,6
100S	2105,94	35,08	1,7

Inną przyczyną różnic w reakcji materiału sypkiego na wstrząsy są niedokładności przyłożenia obciążenia impulsowego, które teoretycznie przykładane powinno być poziomo do płyty dennej modelu oraz, w płaszczyźnie pionowej, przechodzącej przez środek ciężkości układu. Niedokładności wymuszenia dynamicznego ilustruje tablica 4.6, przedstawiająca średnie arytmetyczne maksymalnych amplitud poziomych przyspieszeń podstawy modelu oraz odchylenia standardowe i wskaźniki zmienności tych amplitud.

4.7. ROZKŁAD POZIOMYCH PARĆ DYNAMICZNYCH NA WYSOKOŚCI SILOSU – TEZA 3

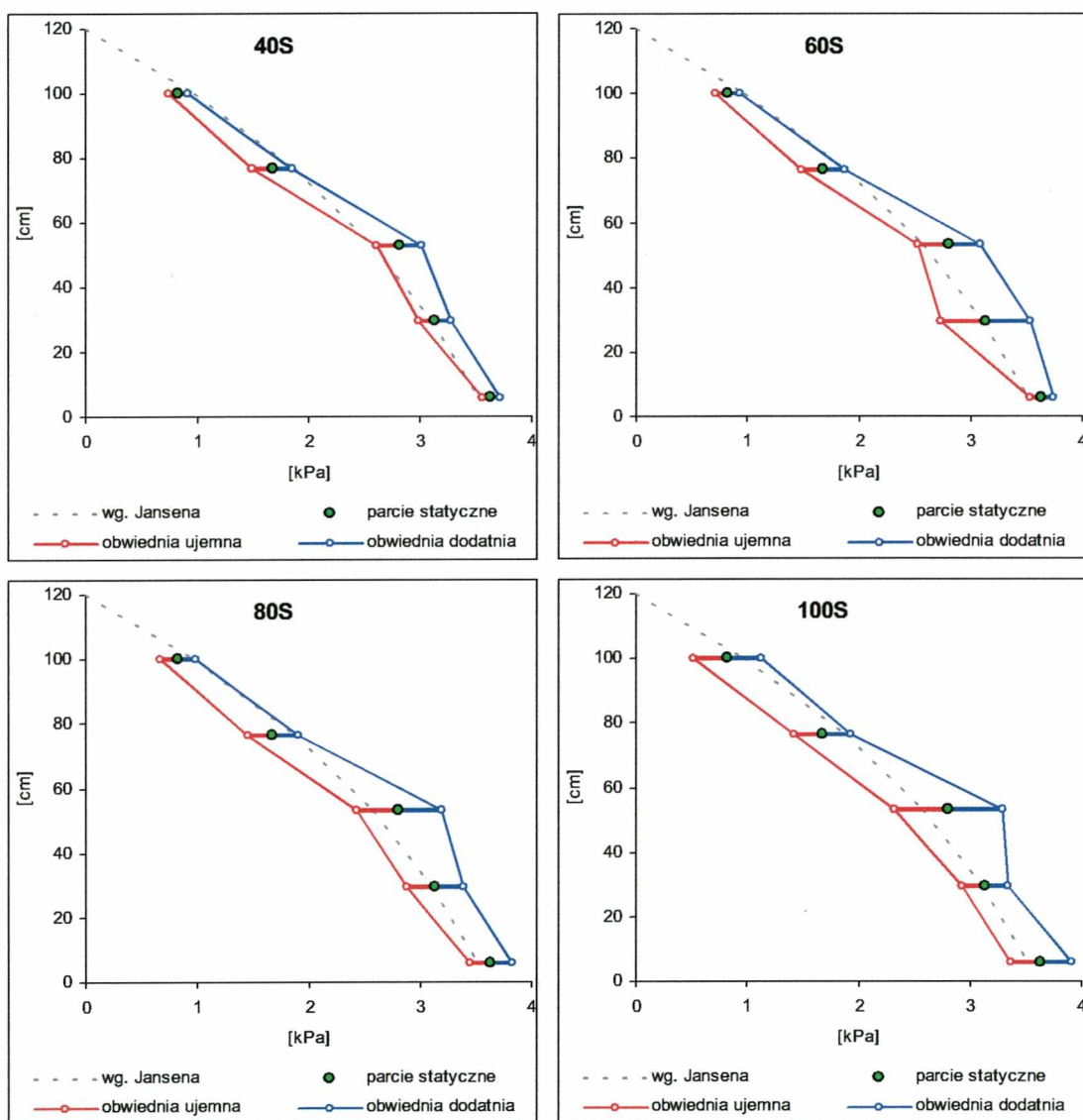
Kolejnym etapem analizy poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu spowodowanych drganiami układu wywołanymi wstrząsami podłoża jest określenie rozkładu tych

parć na wysokości silosu. Ponieważ, jak wynika z wibrogramów parć prezentowanych w poprzednim rozdziale, wstrząsy podłoża są przyczyną zarówno wzrostu jak i spadku parć mierzonych w poszczególnych punktach pomiarowych oraz ze względu na brak jakichkolwiek zależności między usytuowaniem tych punktów na wysokości modelu, a poziomem parć jak i wzajemnych zależności między nimi, analizę niniejszą oparto na wartościach bezwzględnych z maksymalnych i minimalnych amplitud parć poszczególnych cykli pomiarowych. Wyznaczone w ten sposób wielkości posłużyły do wykreślenia obwiedni parć dynamicznych, obrazujących przedziały zmienności parć na poszczególnych wysokościach komory zbiornika. Rezultatem tej analizy są wykresy obwiedni parć dynamicznych przedstawione na rysunkach 4.104 i 4.105. Dodatkowo linią przerywaną przedstawiono parcia statyczne wyznaczone zgodnie z teorią Jansena.



Rys. 4.104 Obwiednie dynamicznych zmian parć poziomych dla grupy P

Największym zagrożeniem bezawaryjnego funkcjonowania silosów na materiały sypkie jest nadmierny wzrost parć składowanego materiału na jego ściany. Dlatego też w dalszej części niniejszego rozdziału skoncentrowano uwagę na takich właśnie zmianach parć, spowodowanych wstrząsami podłoża. Tablice 4.7 i 4.8 przedstawiają wartości maksymalnych przyrostów parć materiału sypkiego na ścianę silosu (punkty obwiedni dodatniej z rys. 4.104 i 4.105) w stosunku do średnich parć statycznych dla wszystkich serii pomiarowych. Tablice te przedstawiają ponadto odchylenia standardowe oraz wskaźniki zmienności parć maksymalnych a także przedziały ufności dla założonego poziomu istotności wynoszącego 5%.



Rys. 4.105 Obwiednie dynamicznych zmian parć poziomych dla grupy S

Jak wynika z tablic 4.7 oraz 4.8 dynamiczne maksymalne zmiany parć uzyskane w niniejszych badaniach zawierają się w przedziale od 2% do 37% wartości parć statycznych sprzed wstrząsu. Oscylują one wokół wartości średnich, wyznaczonych w poszczególnych punktach pomiarowych jednej wysokości z dużymi rozrzutami. Ich miarą są wskaźniki zmienności wynoszące od 14% do 80% dla grupy P oraz od 16% do 51% dla grupy S, a także przedziały ufności wynoszące od $\pm 8\%$ do $\pm 43\%$ dla grupy P i od $\pm 8\%$ do $\pm 30\%$ dla grupy S, wartości średnich parć maksymalnych. Przyczyny rozrzutów otrzymanych wyników omówione zostały w poprzednim rozdziale.

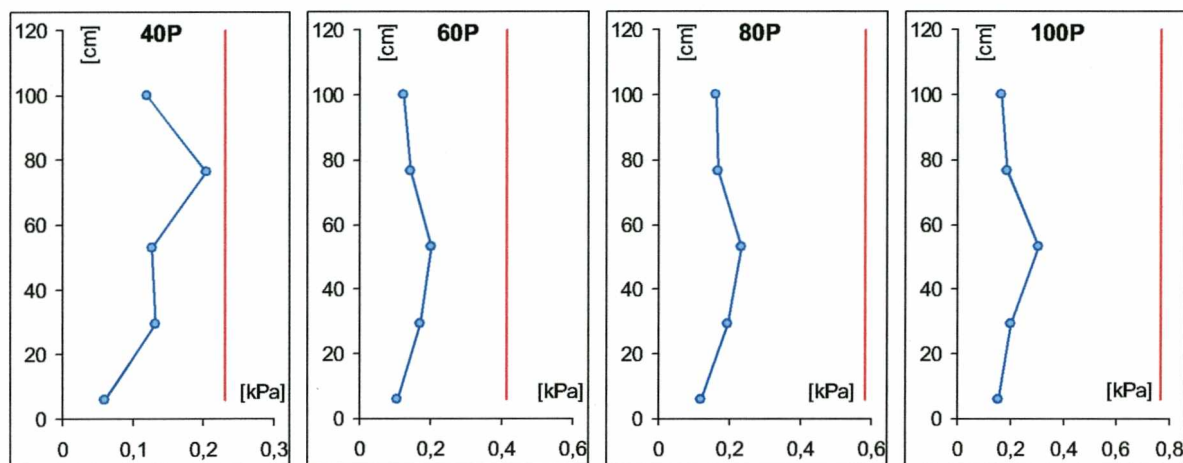
Tablica 4.7 Zestawienie parć maksymalnych dla grupy P

czujniki Nr	maksymalne parcia dynamiczne [kPa] [%]		odchyl. standard. [kPa]	przedział ufności [kPa]	wskaźnik zmienności [%]	maksymalne parcia dynamiczne [kPa] [%]		odchyl. standard. [kPa]	przedział ufności [kPa]	wskaźnik zmienności [%]
	seria 40P					seria 60P				
1 i 6	0,120	14,5	0,053	0,035	44	0,123	14,9	0,045	0,023	36
8 i 2	0,205	12,2	0,051	0,029	25	0,144	8,6	0,088	0,052	61
7 i 9	0,127	4,5	0,047	0,028	37	0,201	7,1	0,115	0,071	57
3 i 0	0,134	4,3	0,047	0,029	35	0,173	5,5	0,071	0,044	41
5 i 4	0,061	1,7	0,028	0,015	47	0,105	2,9	0,047	0,024	44
	seria 80P					seria 100P				
1 i 6	0,160	19,3	0,055	0,025	35	0,163	19,7	0,023	0,013	14
8 i 2	0,167	9,9	0,073	0,037	44	0,186	11,1	0,112	0,070	60
7 i 9	0,233	8,3	0,187	0,102	80	0,305	10,8	0,185	0,091	61
3 i 0	0,195	6,2	0,094	0,051	48	0,202	6,4	0,060	0,033	30
5 i 4	0,120	3,3	0,061	0,031	51	0,157	4,3	0,055	0,028	35

Tablica 4.8 Zestawienie parć maksymalnych dla grupy S

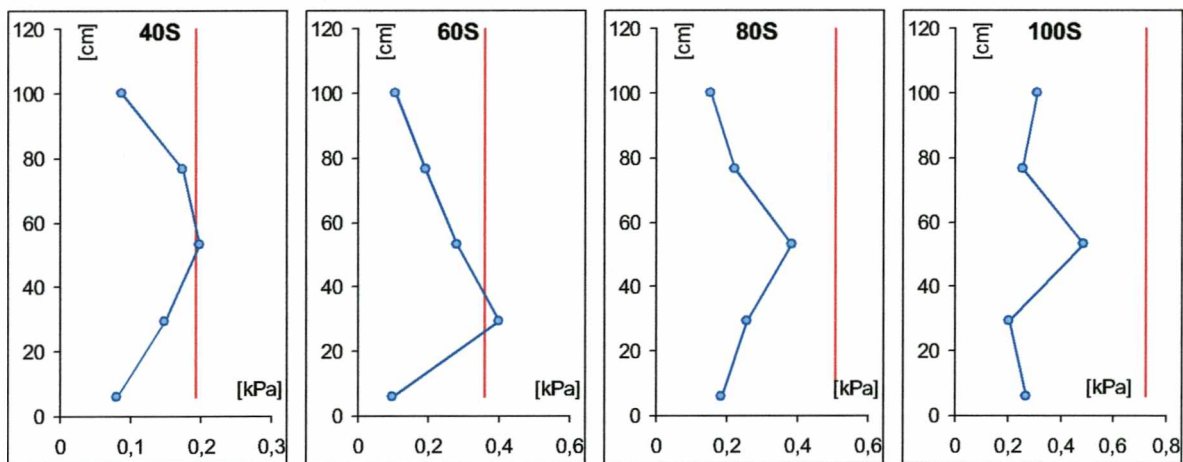
czujniki Nr	maksymalne parcia dynamiczne [kPa] [%]		odchyl. standard. [kPa]	przedział ufności [kPa]	wskaźnik zmienności [%]	maksymalne parcia dynamiczne [kPa] [%]		odchyl. standard. [kPa]	przedział ufności [kPa]	wskaźnik zmienności [%]
	seria 40S					seria 60S				
1 i 6	0,088	10,7	0,036	0,019	41	0,107	13,0	0,034	0,017	31
8 i 2	0,174	10,4	0,067	0,041	38	0,191	11,4	0,085	0,045	45
7 i 9	0,199	7,1	0,080	0,041	40	0,281	10,0	0,111	0,056	39
3 i 0	0,150	4,8	0,068	0,044	45	0,401	12,8	0,160	0,084	40
5 i 4	0,081	2,2	0,023	0,014	28	0,101	2,8	0,037	0,020	37
	seria 80S					seria 100S				
1 i 6	0,153	18,5	0,024	0,013	16	0,310	37,5	0,092	0,047	30
8 i 2	0,223	13,3	0,093	0,049	42	0,257	15,3	0,086	0,045	34
7 i 9	0,385	13,7	0,137	0,077	35	0,487	17,3	0,152	0,077	31
3 i 0	0,256	8,2	0,130	0,077	51	0,204	6,5	0,071	0,039	35
5 i 4	0,185	5,1	0,057	0,031	31	0,271	7,5	0,130	0,064	48

Rysunki 4.106 i 4.107 przedstawiają rozkłady na wysokości silosu maksymalnych parć dynamicznych, zawartych w tablicach 4.7 i 4.8. Rozkłady te porównano z partiami dynamicznymi wyznaczonymi według zaleceń norm EC1 [16] i EC8 [17].



Rys. 4.106 Rozkłady parć dynamicznych dla grupy P

Rozkłady parć dynamicznych na wysokości silosu, będące wynikami niniejszych badań, różnią się w sposób znaczący od rozkładów przyjętych w normach europejskich. Różnice dotyczą zarówno wartości parć jak i formy wykresu. W przeważającej części wartości parć, pomierzone na poszczególnych wysokościach (z wyjątkiem dwóch przypadków), są zdecydowanie mniejsze od wartości normowych, a zależność: parcie dynamiczne – wysokość silosu jest nieliniowa.



Rys. 4.107 Rozkłady parć dynamicznych dla grupy S

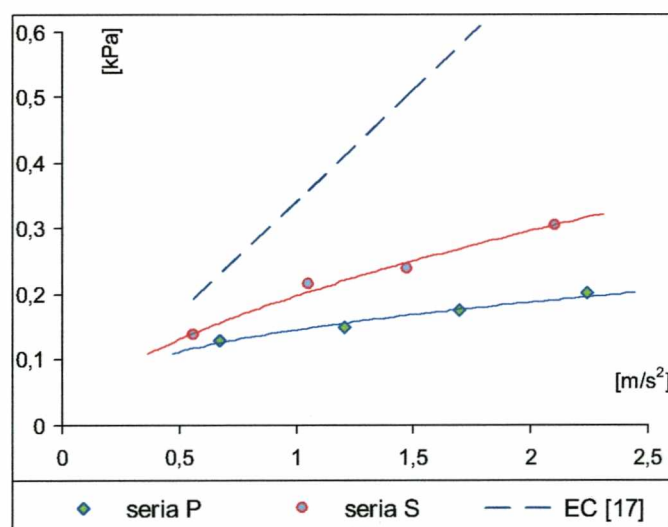
4.8. ZALEŻNOŚĆ: ŚREDNIE POZIOME PARCIA DYNAMICZNE – AMPLITUDA PRZYSPIESZEŃ DRGAŃ PODŁOŻA – TEZA 4

W celu określenia średniego wpływu wstrząsów podłoża (opisanych wartościami amplitud poziomych przyspieszeń podstawy modelu) na wartości parć poziomych materiału sypkiego wyznaczono średnie z maksymalnych parć dynamicznych dla wszystkich serii pomiarowych. Wartości te zestawiono w tablicy 4.9 wraz z wartościami parć normowych.

Tablica 4.9 Średnie wpływ wstrząsów podłoża na parcia dynamiczne

seria pomiarów	maksymalne przyspieszenia [m/s ²]	parcia normowe [kPa]	średnie parcia dynamiczne [kPa]
40P	0,672	0,229	0,129
60P	1,204	0,411	0,149
80P	1,693	0,578	0,175
100P	2,243	0,765	0,203
40S	0,566	0,193	0,138
60S	1,050	0,358	0,216
80S	1,475	0,503	0,240
100S	2,106	0,718	0,306

Porównując średnie parcia dynamiczne, uzyskane w niniejszych badaniach, z wartościami parć normowych, stwierdzono, iż parcia doświadczalne zawierają się w przedziale od 26% do 56% parć normowych dla grupy P i od 43% do 72% dla serii S.



Rys. 4.108 Porównanie zależności maksymalna amplituda przyspieszeń – średnie parcia dynamiczne wg badań własnych i Eurokodu

Rys 4.108 przedstawia wykresy zależności średnich parć dynamicznych od maksymalnych amplitud przyspieszeń wstrząsów podłoża dla obu modeli posadowienia (seria P i S). Na wykresie tym dodatkowo wrysowano analogiczną zależność wyznaczoną na podstawie równania (3.7) [17].

Dla obu modeli posadowienia wykreślone zostały krzywe korelacji między przyspieszeniami a parciami dynamicznymi. Obie krzywe korelacji (równania 4.4.1 i 4.4.2), odwzorowujące uzyskane w niniejszych badaniach zależności: amplituda przyspieszeń wstrząsu – parcie dynamiczne, są funkcjami potęgowymi:

$$p_{h,dyn}^P(A) = 0,15 A^{0,37} \quad (4.4.1)$$

$$p_{h,dyn}^S(A) = 0,20 A^{0,59} \quad (4.4.2)$$

Istnieje duża korelacja między amplitudami przyspieszeń a parciami średnimi, wyrażona wartościami współczynników korelacji, wynoszącymi 0,997 i 0,985, odpowiednio dla grupy P i S.

4.9. WPŁYW SZTYWNOŚCI PODŁOŻA GRUNTOWEGO NA DYNAMICZNE PARCIA MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU – TEZA 5

Badania niniejsze wykazały istnienie wpływu sztywności podłoża, na jakim posadowiony jest silos, na rozkład parć poziomych, spowodowany drganiami układu. Przedstawione na rysunku 4.108 krzywe korelacyjne wyznaczono dla dwóch modeli podłoża gruntowego. Różnica dynamicznych współczynników podłoża (C_x) wynosi 22%. Tymczasem różnice w wartościach parć dynamicznych dla poszczególnych modeli podłoża wynoszą od 17% do 66%, w zależności od wartości amplitud przyspieszeń. Wielkości te zestawiono w tablicy 4.10.

Tablica 4.10 Wpływ sztywności podłoża na parcia dynamiczne

	seria P	seria S	różnica
współczynnik C_x [MN/m ³]	5,4	6,6	22%
przyspieszenie [m/s ²]	parcie dynamiczne [kPa]	parcie dynamiczne [kPa]	różnica [%]
0,5	0,1130	0,1317	17%
1,0	0,1458	0,1980	36%
1,5	0,1693	0,2513	48%
2,0	0,1882	0,2976	58%
2,5	0,2043	0,3393	66%

Ponieważ zastosowane w badaniach sprzężyny nie odzwierciedlały rzeczywistych warunków gruntowych, dlatego analiza otrzymanych wyników nie pozwoliła na wyciągnięcie wniosków ilościowych, dotyczących wpływu sztywności podłoża gruntowego, na wartości parć dynamicznych. Badania niniejsze udowodniły jednak, iż wpływ taki istnieje.

4.10. WNIOSKI Z BADAŃ

Przeprowadzone w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej badania modelowe zmian poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu, wywołanych wstrząsami podłoża gruntowego, pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Wstrząsy podłoża gruntowego są przyczyną dwojakiego rodzaju zmian czasowych parć materiału sypkiego na ściany silosu. Pierwszy rodzaj zmian to proces aperiodyczny, polegający na powstawaniu trwałych zmian parć, zwanych parciami resztkowymi (końcowymi). Drugi, to proces oscylacyjny, polegający na cyklicznych zmianach wartości parć o charakterze krótkotrwałym (por. rys. 4.101).
- 2) Zjawiskiem o charakterze ogólnym, obserwowanym w każdym cyklu pomiarowym i we wszystkich punktach pomiarowych parć materiału sypkiego niniejszych badań, było zjawisko cyklicznych zmian parć materiału sypkiego, zależnych od kierunku przemieszczeń ściany silosu. Jeżeli ściana odsuwa się od materiału sypkiego, parcie na ścianę zmniejsza się, natomiast gdy ściana komory przemieszcza się w kierunku materiału sypkiego, następuje wzrost wartości parć poziomych. Stwierdzono istnienie wysokiej korelacji wibrogramów parć oraz wibrogramów przemieszczeń podstawy modelu. Wartości bezwzględne współczynników korelacji zawierają się w przedziale od 0,70 do 0,94.
- 3) Drgania silosu wywołują trwały wzrost lub trwały spadek wartości parć poziomych materiału w stosunku do ich wartości sprzed wstrząsu, mogą jednak nie wywoływać żadnych zasadniczych zmian parć o charakterze trwałym. (por. rys. 4.100) Nie stwierdzono istnienia jednoznacznych zależności między usytuowaniem punktów pomiarowych na wysokości modelu, a poziomem parć końcowych oraz wzajemnych zależności między tymi parciami. Trwałe zmiany parć materiału sypkiego na ściany silosu wahają się w przedziale od 1% do 10% wartości parć statycznych sprzed wstrząsu (por. tab. 4.4).

- 4) Największe zmiany parć poziomych materiału sypkiego na ścianę silosu zachodzą w początkowej fazie drgań modelu (w czasie ok. 0,2s), bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia dynamicznego. W fazie drgań gasnących zmiany cykliczne maleją do zera a zmiany aperiodyczne praktycznie nie występują.
- 5) Największe zmiany parć poziomych materiału sypkiego wywołane wstrząsami podłoża zawierają się w przedziale od 2% do 37% wartości parć statycznych sprzed wstrząsu. Rozkłady parć dynamicznych na wysokości silosu są rozkładami nieliniowymi. W przeważającej części wartości parć, pomierzone na poszczególnych wysokościach, są zdecydowanie mniejsze od wartości normowych [17] (por. rys. 4.106 i 4.107).
- 6) Badania niniejsze wykazały, że zależność: maksymalna amplituda przyspieszeń poziomych wstrząsu – parcie dynamiczne, jest zależnością nieliniową. Krzywe korelacji odwzorowujące te zależności dla obu modeli posadowienia są funkcjami potęgowymi (por. rys. 4.108). Współczynniki korelacji między amplitudami przyspieszeń a średnimi parcami dynamicznymi wynoszą 0,997 i 0,985 dla obu modeli posadowienia.
- 7) Przeprowadzone doświadczenia wykazały ponadto istnienie związku między sztywnością podłoża gruntowego, na jakim posadowiony jest silos, a wartościami parć poziomych, spowodowanymi drganiami układu (por. tab. 4.10). Stwierdzono, że parcia dynamiczne, powstające na skutek wstrząsów podłoża gruntowego, rosną wraz ze wzrostem sztywności gruntu. Zastosowane w badaniach modele posadowienia nie pozwoliły niestety na wyciągnięcie wniosków ilościowych, dotyczących wpływu sztywności podłoża gruntowego na wartości parć dynamicznych.

5. PARCIE MATERIAŁU SYPKIEGO NA ŚCIANY SILOSU, SPOWODOWANE WSTRZĄSAMI PODŁOŻA – WŁASNE ROZWIĄZANIE ANALITYCZNE

5.1. MODEL WARSTWOWEJ BELKI ŚCINANEJ O LINIOWYM ROZKŁADZIE MAS

Podstawowym celem, jaki postawiono podczas sformułowania i rozwiązania zadania teoretycznego, przedstawionego w niniejszym rozdziale, było opracowanie prostego i przydatnego, z punktu widzenia praktyki inżynierskiej, sposobu wyznaczania rozkładu maksymalnych dynamicznych parć materiału sypkiego na ściany silosu, powstających pod wpływem drgań, wywołanych poziomymi wstrząsami podłoża. Metodę obliczeń oparto na modelu, mającym częste zastosowanie [20, 31, 62, 65, 66] w obliczeniach sejsmicznych konstrukcji budowlanych – modelu belki ścinanej. Na jego podstawie wyznaczono częstości i postaci drgań własnych układu, które posłużyły dalej do wyznaczenia rozkładu parć dynamicznych materiału sypkiego, metodą spektrum odpowiedzi.

Podstawowe założenia niniejszego rozwiązania to:

- 1) Ograniczenie charakterystyki dynamicznej silosu wraz z wypełnieniem do zbioru postaci i częstości drgań własnych wspornikowego pręta pryzmatycznego o przekroju kołowym.
- 2) Zależność: odkształcenia postaciowe – naprężenia ścinające dla konstrukcji silosu i materiału sypkiego jest liniowa i nie zależy od poziomu naprężeń:

$$\tau_k = G_k \cdot \gamma_k \quad (5.1.1)$$

$$\tau_m = G_m \cdot \gamma_m \quad (5.1.2)$$

- 3) Materiał konstrukcyjny silosu i materiał sypki opisane są stałymi wartościami gęstości objętościowej (ρ_k i ρ_m) i współczynnikami tłumienia krytycznego (γ_k i γ_m):

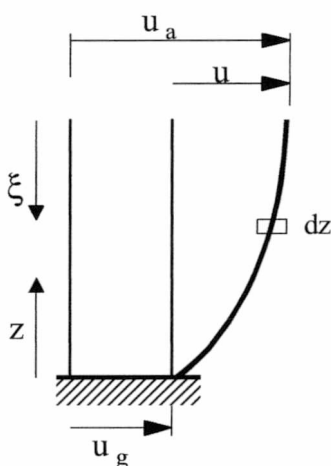
$$\rho_k = \text{const.} \quad \gamma_k = \text{const.} \quad (5.2.1)$$

$$\rho_m = \text{const.} \quad \gamma_m = \text{const.} \quad (5.2.2)$$

- 4) Przeszaczenia poziome konstrukcji silosu i materiału sypkiego, wywołane drganiami podłoża na styku obu ośrodków, są sobie równe:

$$u_k = u_m = u \quad (5.3)$$

Rysunek 5.1 przedstawia przyjęty w zadaniu układ współrzędnych oraz przeszaczenia modelu wywołane wstrząsem podłoża.



Rys. 5.1 Układ współrzędnych

Zależność między współrzędnymi wysokościowymi z i ξ jest następująca:

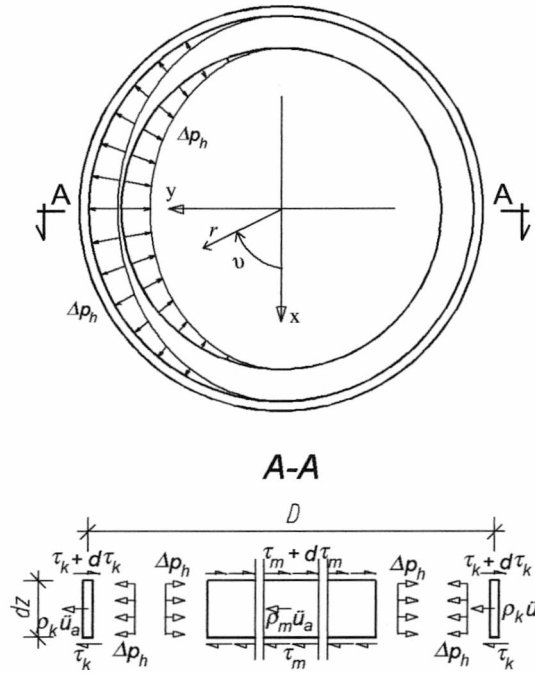
$$\xi = 1 - \frac{z}{H} \quad (5.4)$$

Związek między całkowitymi przeszaczeniami belki ścinanej - u_a a przeszaczeniami gruntu u_g , określa równanie:

$$u_a(z, t) = u(z, t) + u_g(t) \quad (5.5)$$

Rysunek 5.2 przedstawia siły działające na wydzielony myślowo wycinek silosu o wysokości dz wypełnionego materiałem sypkim. W celu przedstawienia kierunków sił działających na płaszczyznę zbiornika oraz materiał sypki, odseparowano tu ściany silosu od jego zawartości. Założono, że parcia materiału na ściany silosu wywołane poziomym przeszaczeniem układu mają rozkład analogiczny do rozkładu proponowanego przez normy europejskie [17]:

$$\Delta p_h(v) = \Delta p_h \cdot \sin(v) \quad (5.6)$$



Rys. 5.2 Rozkład sił poziomych podczas wstrząsu podłoża

Sformułowano różniczkowe równania równowagi sił poziomych:

a) dla plastra materiału:

$$2 \cdot \Delta p_h \cdot \sin v + \frac{\partial \tau_m}{\partial z} \cdot \sin v \cdot R - \ddot{u}_a \cdot \rho_m \cdot R = 0 \quad (5.7.1)$$

b) dla pierścienia konstrukcji silosu:

$$2 \cdot \Delta p_h \cdot \sin v - 2 \cdot \frac{\partial \tau_k}{\partial z} \cdot \sin v \cdot h + 2 \cdot \ddot{u}_a \cdot \rho_k \cdot h = 0 \quad (5.7.2)$$

gdzie: m i k – indeksy wielkości związanych odpowiednio z materiałem sypkim i konstrukcją silosu,

R i h – odpowiednio promień i grubość ścian silosu;

$\ddot{u}_a$ – przyspieszenie poziome układu wywołane wstrząsem;

Po zsumowaniu stronami równań otrzymano:

$$\frac{\partial \tau_k}{\partial z} \cdot \sin v \cdot 2h + \frac{\partial \tau_m}{\partial z} \cdot \sin v \cdot R - \ddot{u}_a (\rho_k \cdot 2h + \rho_m \cdot R) = 0 \quad (5.8)$$

Wykorzystując zależności (5.1), (5.4), (5.5) równanie (5.8) przekształcono do postaci:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} \cdot \left(\frac{G_k \cdot 2h + G_m R}{H^2 \cdot (\rho_k \cdot 2h + \rho_m \cdot R)} \right) = - \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \quad (5.9)$$

W celu wyznaczenia częstości i postaci drgań własnych modelu, z równania (5.9) wydzielono część homogeniczną postaci:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} \cdot \left(\frac{G_k \cdot 2h + G_m R}{H^2 \cdot (\rho_k \cdot 2h + \rho_m \cdot R)} \right) = 0 \quad (5.10)$$

Po kolejnych przekształceniach matematycznych otrzymano ostateczne zależności na częstości drgań własnych układu:

$$\omega = \omega_m \sqrt{\frac{1 + \frac{I}{d_w}}{1 + s_M}} \quad (5.11.1)$$

gdzie:

$$\omega_m = \frac{\beta_n}{H} \sqrt{\frac{G_m}{\rho_m}} \quad (5.11.2)$$

$$d_w = \frac{I}{2} \frac{G_m R}{G_k h} \quad (5.11.3)$$

$$s_M = 2 \frac{\rho_k}{\rho_m} \frac{h}{R} \quad (5.11.4)$$

ω_m – częstości drgań własnych materiału sypkiego,

d_w – bezwymiarowa miara odkształcalności ścian,

s_M – stosunek mas konstrukcji i materiału sypkiego,

β_n - n-ty pierwiastek funkcji Bessela $J_{-0.5}$ pierwszego rodzaju,

Funkcje postaci drgań własnych modelu opisane są zależnością:

$$\phi_n = \frac{2}{\beta_n} \xi^{\frac{1}{2}} \frac{J_{-0.5}(\beta_n \xi)}{J_{0.5}(\beta_n)} \quad (5.12)$$

Parametrem opisującym silos i materiał sypki, który nie został do tej pory uwzględniony w niniejszym modelu, jest współczynnik tłumienia. Dla potrzeb niniejszego rozwiązania wyprowadzono współczynnik tłumienia krytycznego opisany równaniem:

$$\gamma = \frac{\gamma_k + d_w \gamma_m}{1 + d_w} \quad (5.13)$$

Rozwiązanie zagadnienia drgań modelu w postaci funkcji przemieszczeń ma następującą postać ogólną:

$$u(\xi, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(\xi) \cdot X(\omega_n, \gamma, t) \quad (5.14)$$

W równaniu tym X jest funkcją przemieszczeń układu o jednym stopniu swobody, opisanego częstością nietłumionych drgań własnych ω_n i współczynnikiem tłumienia krytycznego γ wy-

wołanych przyspieszeniem podłoża $\ddot{u}_g$. Funkcja ta jest rozwiązaniem równania drgań nietłumionych – (5.9) poszerzonym o człon uwzględniający tłumienie układu.

Funkcja X jest funkcją niewiadomą, zależną od czasu. Stosując metodę spektrum odpowiedzi zastąpiono ją spektralnymi wartościami przemieszczeń. Są to wielkości niezależne od czasu, będące maksymalnymi odpowiedziami oscylatora o jednym stopniu swobody poddanego działaniu przyspieszenia gruntu, zależnymi jedynie od częstości nietłumionych drgań własnych i współczynnika tłumienia krytycznego. Zgodnie z tym maksymalne przemieszczenia układu dla poszczególnych form własnych opisane zostały równaniem:

$$u_{n,max}(\xi) = \phi_n(\xi) \cdot S_d(\omega_n, \gamma) \quad (5.15)$$

Przemieszczenie całkowite wyznaczono metodą pierwiastka kwadratowego z sumy kwadratów (SRSS) poszczególnych form własnych:

$$u_{max}(\xi) = \sqrt{\sum_{n=1}^N (u_{n,max}(\xi))^2} \quad (5.16)$$

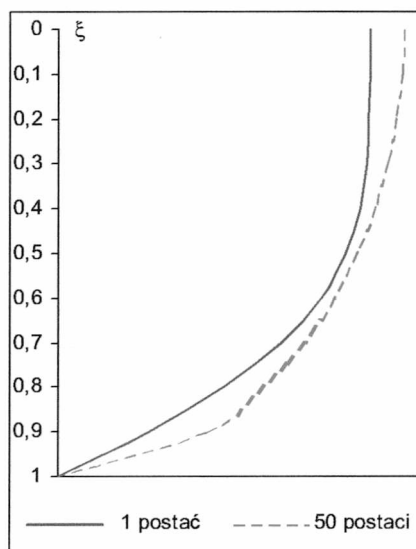
gdzie: N – liczba znaczących form własnych.

Formy i częstości drgań własnych silosów należących do grupy konstrukcji powłokowych, wyznaczone z zastosowaniem modeli prętowych – włączając prezentowany model – stanowią jedynie fragment charakterystyki dynamicznej tego typu konstrukcji, ograniczony do częstości i stowarzyszonych z nimi form, którym nie towarzyszy deformacja przekroju poprzecznego powłoki. W pracy [7] przedstawiono porównanie charakterystyk dynamicznych silosów modelowanych na dwa wyżej wspomniane sposoby. Wykazano tam, że wyznaczona z zastosowaniem modelu prętowego podstawowa częstość i postać poziomych drgań własnych silosu nie różni się znacząco od częstości i formy uzyskanej dla modelu powłokowego. Natomiast dla wyższych częstości drgań różnice w wartościach stają się coraz większe.

Aby uniknąć błędów spowodowanych tymi rozbieżnościami w prezentowanym modelu ograniczono charakterystykę dynamiczną do jednej – podstawowej częstości i stowarzyszonej z nią formy drgań. Rysunek 5.3 przedstawia pierwszą postać drgań własnych modelu oraz, dla porównania, sumę 50 kolejnych postaci wyznaczoną metodą SRSS. Udział podstawowej postaci drgań własnych modelu, w sumie pięćdziesięciu kolejnych form, wynosi średnio 90%. W związku z tym wykorzystanie w prezentowanym modelu prętowym tylko podstawowej częstości i postaci drgań własnych, z pominięciem pozostałych form, uznano za dopuszczalne.

Równanie (5.16) zapisano w postaci:

$$u_{max}(\xi) = S_d(\omega_1, \gamma) \sqrt{\phi_1^2(\xi)} \quad (5.17)$$



Rys. 5.3 Porównanie pierwszej i sumy pierwszych pięćdziesięciu form własnych modelu

Po przekształceniu równania (5.8) z zastosowaniem zależności (5.1) i (5.4) otrzymano zależność opisującą na przyspieszenia całkowite modelu:

$$\ddot{u}_a(\xi, t) = \frac{\partial^2 u(\xi, t)}{\partial \xi^2} \cdot \frac{1}{H^2} \cdot \frac{G_m}{\rho_m} \cdot \frac{1 + \frac{1}{d_w}}{1 + s_M} \quad (5.18)$$

Wykorzystując równanie (5.17) otrzymano:

$$\ddot{u}_{a,max}(\xi) = \frac{d^2 u_{max}(\xi)}{d\xi^2} \cdot \frac{1}{H^2} \cdot \frac{G_m}{\rho_m} \cdot \frac{1 + \frac{1}{d_w}}{1 + s_M} \quad (5.19)$$

Ostatecznie wyznaczono funkcję rozkładu maksymalnych parć poziomych materiału sypkiego na ścianę silosu, powstających podczas wstrząsów podłoża gruntowego w postaci:

$$\Delta p_{h,max}(\xi) = \frac{1}{2} \frac{d^2 u_{max}(\xi)}{d\xi^2} \cdot \frac{R \cdot G_m}{H^2} \left[\frac{\frac{1}{d_w} - s_M}{1 + s_M} \right] \quad (5.20)$$

5.2. PRZYKŁAD LICZBOWY

W rozdziale niniejszym przedstawione zostały wyniki obliczeń maksymalnych poziomych parć dynamicznych materiału sypkiego na ściany płaskodennego silosu cylindrycznego, pod-

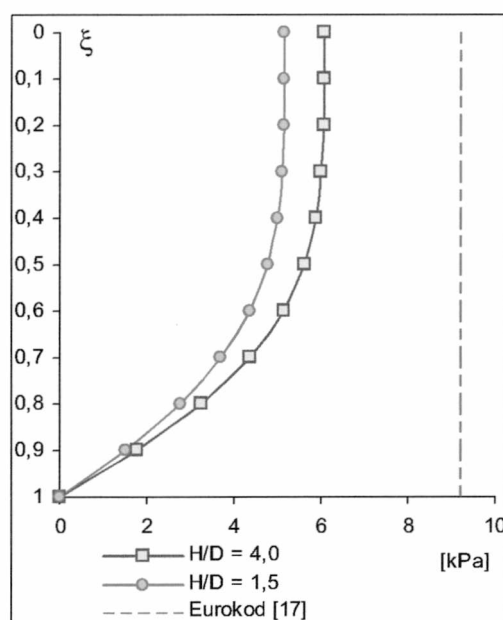
danego poziomym wstrząsów podłoża gruntowego, wyznaczonych z wykorzystaniem modelu opisanego w poprzednim rozdziale. Analizie poddano dwa silosy stalowe o różnych smukłościach.

Tablica 5.1 Gabaryty silosów

		silos 1	silos 2
współczynnik smukłości	H/D	4,0	1,5
wysokość	$H [m]$	24,0	9,0
średnica	$D [m]$	6,0	6,0
grubość ściany	$h [mm]$	6,0	4,0

Tablica 5.2 Parametry materiału sypkiego

gęstość objętościowa	ρ_m	1700 kg/m ³
kąt tarcia wewnętrznego	ϕ_w	30,0°
współczynnik tarcia o stal	f	0,40
moduł odkształcalności poprzecznej	G_m	50 MPa
współczynnik tłumienia krytycznego	γ	0,25



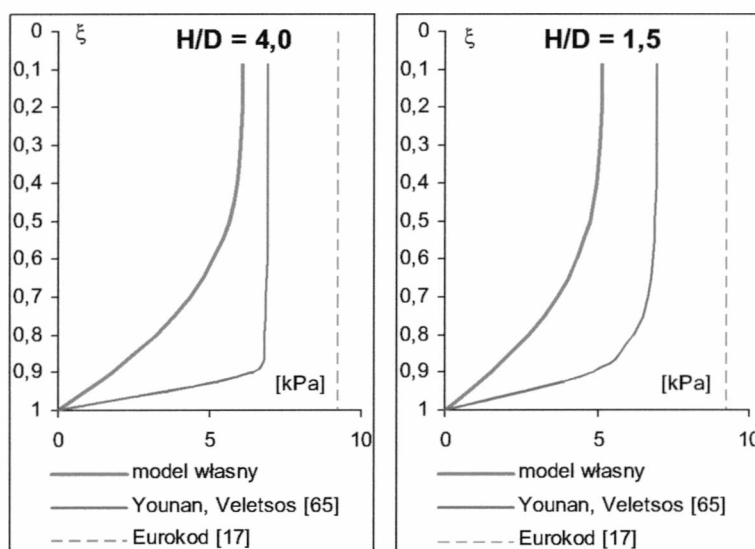
Rys. 5.4 Rozkład maksymalnych par dynamicznych na wysokości silosu

Podstawowe gabaryty obu silosów zestawiono w tablicy 5.1. Materiał sypki stanowi piasek o parametrach przedstawionych w tablicy 5.2. Silosy poddano poziomym drganiom harmonicznym o amplitudzie przyspieszeń $\ddot{u}_g = 1,8 \text{ m/s}^2$ i częstotliwości drgań wynoszącej

$\omega_g = 2\text{Hz}$. Rysunek 5.4 przedstawia wyniki obliczeń rozkładów maksymalnych parć poziomych materiału sypkiego na ściany obu silosów. Dodatkowo na wykresie przedstawiono parcia wyznaczone na podstawie zaleceń normy Eurokod [17].

5.3. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ WŁASNYCH Z ANALIZAMI INNYCH AUTORÓW

Wyniki obliczeń rozkładu parć materiału sypkiego na ściany silosu poddanego wstrząsom podłoża, przeprowadzonych z zastosowaniem modelu belki ścinanej o przekroju złożonym porównano z wynikami obliczeń, przeprowadzonych na podstawie procedur opracowanych przez Younana i Veletsosa w pracy [65], będących przestrzennym modelem silosu płaskodennego z wypełnieniem, opisanym liniowym jednorodnym materiałem lepkosprężystym. W obu przypadkach analizie poddano silosy, których parametry przedstawiono w tablicach 5.1 i 5.2.

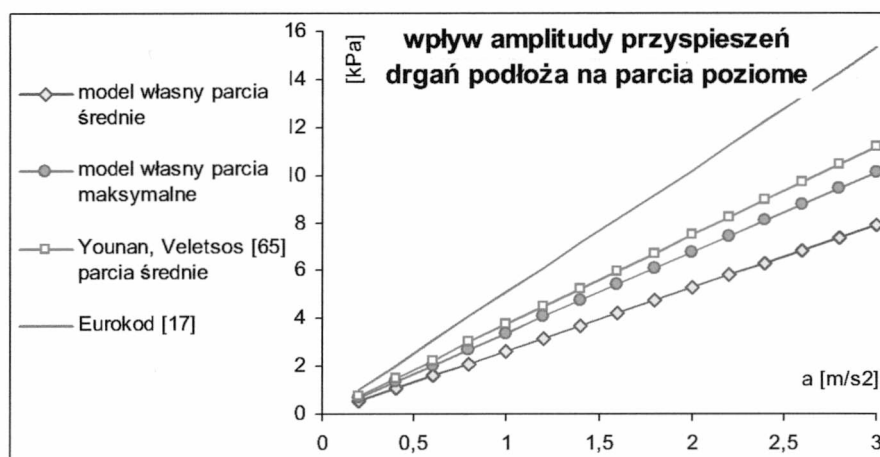


Rys. 5.5 Porównanie rozkładów dynamicznych parć poziomych wywołanych wstrząsem podłoża

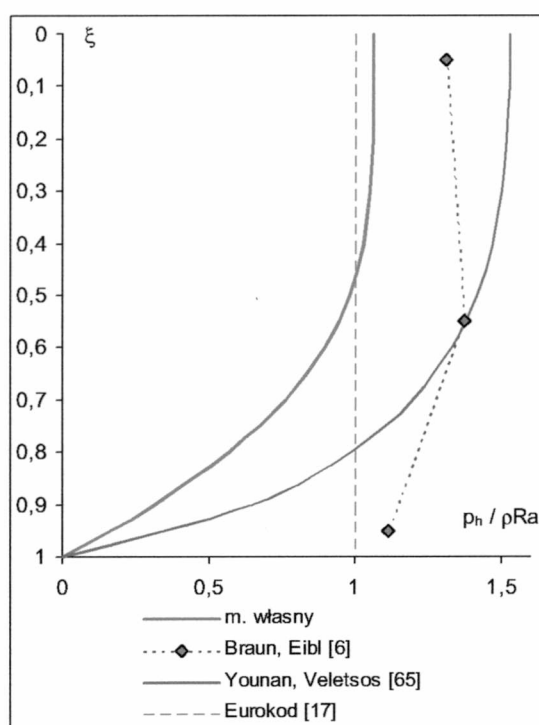
Poza porównaniem rozkładów poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu (rys. 5.5) będących bezpośrednim rezultatem obliczeń obu modeli analitycznych, przeanalizowano również zależności średnich parć materiału sypkiego od amplitud poziomych przyspieszeń gruntu. Parcia średnie, opisane równaniem (5.21), wyznaczono dla modelu własnego oraz dla modelu analitycznego Younana, Veletsosa [65].

$$|\Delta p_{h,max}(\xi)|_{\text{średnie}} = \int_0^l \Delta p_{h,max}(\xi) d\xi \quad (5.21)$$

Rysunek 5.6 przedstawia wykresy tych zależności, a także zależność parć maksymalnych wg modelu własnego w funkcji amplitud przyspieszeń poziomych drgań podłoża i tą samą zależność wynikającą z zaleceń normy Eurokod [17].



Rys. 5.6 Zależność amplituda przyspieszeń gruntu –parcie poziome



Rys. 5.7 Porównanie rozkładów parć dynamicznych dla siłosu analizowanego w pracy [6]

W celu porównania rozkładów parć poziomych materiału sypkiego na ściany siłosu, wywołanych wstrząsami podłoża, wyznaczonych na podstawie prezentowanego modelu

prętowego z wynikami analiz innych autorów, przeprowadzono kolejną serię obliczeń, opartą na danych wejściowych pochodzących z pracy Brauna i Eibla [6], w której przedstawiono rezultaty najbardziej zaawansowanych analiz numerycznych układu: silos – materiał wypełniający. Rysunek 5.7 przedstawia wyniki niniejszego porównania. Na rysunku tym poza rozkładami parć pochodzącymi z obliczeń modelu prętowego oraz modelu numerycznego Brauna i Eibla [6], pokazano również rozkład parć wyznaczony na podstawie wykorzystywanego w poprzednich przykładach analitycznego modelu przestrzennego Younana i Veletsosa [65].

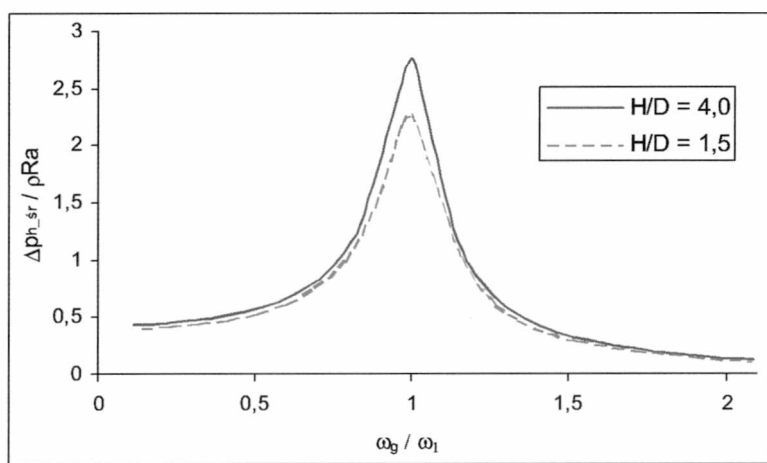
5.4. WNIOSKI

Wyznaczone na podstawie prezentowanego w niniejszym rozdziale modelu silosu, rozkłady maksymalnych poziomych parć dynamicznych materiału sypkiego na ściany zbiornika swoim kształtem zbliżone są do rozkładów wyznaczonych z zastosowaniem przestrzennego modelu Younana i Veletsosa, prezentowanego w pracach [65, 66]. Stwierdzono występowanie dużych różnic w wartościach parć, sięgających średnio 30% dla silosu smukłego i aż 40% dla silosu krępego, w stosunku do wartości uzyskanych na podstawie modelu przestrzennego wg [65]. Różnice te tłumaczy charakter modelu, który, z założenia, jest modelem nieskomplikowanym, o liczbie danych wejściowych ograniczonej do minimum, tj. do podstawowych gabarytów komory silosu, danych dotyczących materiału konstrukcyjnego silosu oraz modułu odkształcalności postaciowej, ułamka tłumienia krytycznego i gęstości objętościowej materiału sypkiego, niezależnych od poziomu naprężeń w nim panujących oraz nie wykazujących właściwości pętli histerezy. Charakterystyka dynamiczna modelu sprowadzona do podstawowej częstości i postaci własnej jest kolejną, jednak nie tak istotną, przyczyną zaniżonych w stosunku do modelu przestrzennego [65], wartości parć, a błąd spowodowany tym ograniczeniem oszacowano na 10%-15%.

Pomimo tych i innych mankamentów, dotyczących między innymi założenia jednokowych przemieszczeń konstrukcji silosu i materiału wypełniającego, prezentowany model można uznać za przydatny, podczas pierwszej oceny rozkładu parć dynamicznych, wywołanych drganiami podłoża.

Jego istotną zaletą jest powiązanie poziomu parć materiału sypkiego z podstawową częstością (i formą) drgań własnych silosu. Zależność ta, nieprzewidziana w przepisach nor-

mowych [17], ma istotne znaczenie w przypadku wystąpienia niebezpiecznego zjawiska rezonansu między drganiami podłoża gruntowego, a drganiami silosu, powodującego niekontrolowany wzrost parć materiału sypkiego na ściany zbiornika do poziomu kilkukrotnie wyższego niż parcia normowe. Rysunek 5.8 przedstawia krzywe rezonansowe obrazujące to zjawisko, wyznaczone dla silosów analizowanych w przykładzie liczbowym. Na osi pionowej przedstawiono stosunek średnich parć maksymalnych, opisanych równaniem (5.21), do parć normowych wg [17], a na osi poziomej stosunek częstości kątowej drgań poziomych gruntu, do podstawowej częstości kątowej układu silos – materiał wypełniający.



Rys. 5.8 Krzywe rezonansowe średnich parć poziomych wg modelu własnego

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku niniejszej pracy dowiedziono, że:

- TEZA 1: Wstrząsy podłoża gruntowego są przyczyną dwojakiego rodzaju zmian poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu: zmian trwałych, zwanych parciem reszkowymi oraz zmian cyklicznych o charakterze krótkotrwałym.
- TEZA 2: Zmiany cykliczne poziomych parć materiału sypkiego na ściany silosu zależą od kierunku przemieszczeń ścian silosu i są funkcją wartości tych przemieszczeń.
- TEZA 3: Rozkład maksymalnych poziomych parć dynamicznych materiału sypkiego na ściany silosu na wysokości komory jest nieliniowy.
- TEZA 4: Zależność: średnie poziome parcia dynamiczne materiału sypkiego na ściany silosu – maksymalna amplituda poziomych przyspieszeń podłoża gruntowego, jest zależnością nieliniową.
- TEZA 5: Poziome parcia dynamiczne materiału sypkiego na ściany silosu, wywołane wstrząsami podłoża, zależą od sztywności dynamicznej gruntu, na którym posadowiony jest silos.

Ponadto prezentowana w niniejszej pracy metoda obliczeń rozkładu maksymalnych poziomych parć dynamicznych materiału sypkiego na ściany silosu, oparta na modelu warstwowej belki ścinanej oraz na metodzie spektrum odpowiedzi, będąca z założenia metodą nieskomplikowaną, mogącą znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej, może zostać uznana za metodę przydatną podczas pierwszej szacunkowej oceny rozkładu parć, wywoła-

nych drganiami podłoża. Istotną zaletą niniejszej metody jest powiązanie poziomu parć materiału sypkiego z podstawową częstością (i formą) drgań własnych silosu. Zależność ta, nieprzewidziana w normie Eurokod [17], ma istotne znaczenie w przypadku wystąpienia niebezpiecznego zjawiska rezonansu między drganiami podłoża gruntowego, a drganiami silosu, powodującego niekontrolowany wzrost parć materiału sypkiego na ściany zbiornika do poziomu kilkukrotnie wyższego niż parcia normowe.

LITERATURA

- [1] ACI-313R-91, ACI Committee 313R Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for String Granular Materials, and Commentary: ACI 313R-91, American Concrete Institute, Detroit, 1991
- [2] ANSI ASCE 7-95, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures., American National Standards Institute, Inc., New York, 1996
- [3] Badania naporu materiałów sypkich, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 33, Seria: Studia i Materiały Nr 14, Wrocław, 1982
- [4] Bishara A. G., Ayoub S. F., Mahdy A. S., Static pressures in concrete circular silos storing granular materials, ACI Journal, 1983
- [5] Borcz A., Maj M., Trochanowski A., Wytyczne projektowania, budowy i użytkowania silosów żelbetowych, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 61, Seria: Studia i Materiały Nr 16, Wrocław, 1991
- [6] Braun A., Eibl J., Silopressures under earthquake loading, X Międzynarodowa Konferencja Żelbetowe i Sprężone Zbiorniki na Materiały Sypkie i Ciecze, Kraków, 1995
- [7] Ciesielski R., Dulińska J., Analiza odpowiedzi cylindrycznego silosu żelbetowego na działanie wymuszenia parasejsmicznego, Konferencja Naukowo-Techniczna Żelbetowe i Sprężone Zbiorniki, Wrocław – Szklarska Poręba, 1992
- [8] Ciesielski R., Dulińska J., Analiza wpływów parasejsmicznych na wybrane typy budowli obrotowo-symetrycznych, VII Sympozjum Wpływy sejsmiczne i parasejsmiczne na budowlę, Kraków, 1994
- [9] Ciesielski R., Dulińska J., Porównanie odpowiedzi zbiorników obrotowo-symetrycznych na wpływy parasejsmiczne dla różnych modeli wymuszenia, X Międzynarodowa Konferencja Żelbetowe i Sprężone Zbiorniki na Materiały Sypkie i Ciecze, Kraków, 1995
- [10] Ciesielski R., Gumiński A., Dulińska J., Drgania swobodne kominów traktowanych jako ustroje prętowe i powłokowe., Krynica, 1988
- [11] Ciesielski R., Kawecki J., Ujęcie normowe oceny szkodliwości drgań parasejsmicznych przekazywanych na budynki (wg PN-85/B-02170)., Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8, 1985
- [12] Ciesielski R., Ocena szkodliwości wpływów drgań i wstrząsów w budynkach wg PN/B-02170. Części 1-5, Inżynieria i Budownictwo, nr 8-12, 1969
- [13] Ciesielski R., Podsumowanie wyników badań związanych z oceną wpływów wstrząsów wywołanych podziemnymi odstrzałami zawałowymi w Z. G. Rudna na nowo wznoszone budynki na terenie osiedla Gwarków w Polkowicach oraz wnioski i stanowisko odniesienia do dalszych działań w tej sprawie., Materiały Instytutu Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1980
- [14] Dickinson R. R., Jofried J. C., The functional design of silos storing highly cohesive bulk solids., Bulk Solids Handling, 7(2), 1987
- [15] Earthquake Resistant Regulations, A World List, International Association for Earthquake Engineering, 1995
- [16] Eurocode 1, Basis of Design and Actions on Structures

- [17] Eurocode 8, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures
- [18] Feise H., Schwedes J., Calculation of silo stresses and feeder loads by the hypoplastic material model, *Bulk Solids Handling*, 16(4), 1996
- [19] Gudehus G., Kolymbas D., Tejchman J., Behaviour of granular materials in cylindrical silos, *Powder Technology*, 48, 1986
- [20] Hardin B. O., Bucklin R. A., Ross I. J., Shear beam analysis for seismic response of metal wheat bins, *Transactions of the ASAE*, 39(2), 1996
- [21] Hardin B. O., Drenvich V. P., Shear modulus and damping in silos. Design equations and curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE* 98(7), 1972
- [22] Häussler U., Eibl J., Numerical investigation of discharging silos, *Journal of Engineering Mechanics*, 110(6), 1984
- [23] Höhl H. W., Schwedes J., Extension of elastoplastic constitutive models with respect to cohesive bulk solids, *Powder Technology*, 70, 1992
- [24] Instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej nr 286, Wytoczne projektowania budynków o układzie nośnym podlegającym wpływowi eksploatacji górniczej., Warszawa, 1989
- [25] Jenike A. W., Storage and silo flow of solids, *Utah Eng. Exp. Stat. Bull.* 123, 1964
- [26] Kamiński M., Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, seria: Monografie, Wrocław, 1986
- [27] Kamiński M., Badania naporu bezkohezyjnych materiałów sypkich w silosach, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej* Nr 50, seria: Monografie Nr 20, Wrocław, 1986
- [28] Kamiński M., Zubrzycki M., Odpowiedniość badań modelowych naporu zboża w silosach na tle przeprowadzonych eksperymentów, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, Seria: Studia i Materiały, Wrocław, 1982
- [29] Kobiela S., Krauthammer T., Walczak A. Dynamic soil pressure acting on buried reinforced concrete cylindrical structures caused by underground explosion, *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures*, Singapore, 2001
- [30] Kobiela S., Przyrządy i metodyka pomiaru parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej* Nr 58, seria: Monografie Nr 24, Wrocław, 1990
- [31] Köpercsiri A., Kollár L. P., Approximate analysis of tall building structures for earthquake using the Timoshenko-beam., *Periodica Polytechnica*, ser. civil engineering, vol. 42, no. 2, Budapeszt, 1998
- [32] Korzeń Z., Einfluß der Schwingungen auf die Schüttgutbrückenbildung an Silo- und Bunkerauslauföffnungen, *Aufbereitungs-Technik*, 8, 1981
- [33] Korzeń Z., Veränderung der Fließeigenschaften unkohezyiver Schüttgüter durch Vibration, *Bautechnik*, 6, 1984
- [34] Lehmann L., Antes H., On the effect of inserts on the silo discharge process, *Proc. Int. Symp. Reliable Flow in Particulate Solids II*, EFCHE Pub. Series, No. 96, Oslo, 1993

- [35] Link R. A., Elwi A. E., Incipient flow in silo-hopper configurations, *Journal of Engineering Mechanics*, 116(1), 1990
- [36] Lyle C., Spannungsfelder in Silos mit starren, koaxialen Einbauten, TU Braunschweig, praca doktorska, 1991
- [37] Mróz Z., Drescher A., Hueckel T., Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych, *Prace IPPT*, 54/1973
- [38] Müller L., Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli, PWN, Warszawa, 1983
- [39] Ooi J. Y., Chen J. F., Lohnes R. A., Rotter J. M., Prediction of static wall pressures in coal silos, *Construction and Building Materials*, 10(2), 1996
- [40] Ooi J. Y., Rotter J. M., Elastic and plastic predictions of the storing pressures in conical hoppers., *Transactions of Mechanical Engineering*, 14(3), 1989
- [41] Ooi J. Y., Rotter J. M., Wall pressures in squat steel silos from simple finite element analysis., *Computers + Structures*, 37(4), 1990
- [42] Pierzchlewicz J., Projektowanie i realizacja obiektów budowlanych na terenach sejsmicznych, Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa, 1983
- [43] PN-85/B-02170, Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [44] Praca zbiorowa pod red. M. Werno, Podłoże gruntowe obciążone cyklicznie., Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1985
- [45] Regneau E., Aribert J. M., Predictions of load in silos during filling and emptying stages by finite element method, *International Conference FEM-CAD 93*, Paryż, 1993
- [46] Roberts A. W., Ooms M., Scott O. J., Influence of vibrations on the strength and boundary friction characteristics of bulk solids and the effect on bin design and performance, *Bulk Solids Handling*, 6(1), 1986
- [47] Roberts A. W., Scott O. J., Li Kin Wah, Influence of mechanical vibrations on the strength and flow properties of bulk solids
- [48] Ruckebrod C., Eibl J., Numerical results to discharge process in silos, *Proc. Int. Symp. Reliable Flow in Particulate Solids II*, EFChE Pub. Series, No. 96, Oslo, 1993
- [49] Runesson K., Nilsson L., Finite element modelling of gravitational flow of a granular material, *Bulk Solids Handling*, 6(5), 1986
- [50] Sakai M., Matsumura H., Sasaki M., Nakamura N., Kobayashi M., Kitagawa Y., Study on the dynamic behaviour of coal silos against earthquakes, *Bulk Solids Handling*, 5(5), 1985
- [51] Sasaki Y., Yoshimura J., Dynamic Behaviour of concrete stave silos, *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, 1984
- [52] Schwedes J., Scherverhalten leicht verdichteter kohäsiver Schüttgüter, Praca doktorska, Uniwersytet w Karlsruhe, 1971
- [53] Sikora Z., Hypoplastic flow of granular materials – a numerical approach, *Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik*, Uniwersytet w Karlsruhe, 1992
- [54] Sikora Z., Wirska E., Hypoplastyczne modele konstytutywne dla materiałów sproszkowanych, *X Międzynarodowa Konferencja Żelbetowe i Sprężone Zbiorniki na Materiały Sypkie i Ciecze*, Kraków, 1995

- [55] Silosy – badania, projektowanie, budowa, użytkowanie, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 41, Seria: Konferencje Nr 11, Wrocław, 1985
- [56] Smith D. L., Lohnes R. A., Frictional properties and stress-strain relationships for use in the finite element analysis of grain silos, *Journal of Powder + Bulk Solids Technology*, 6, 1982
- [57] Tejchman J., Gudechus G., Dynamic effects in silos – experiments, polar constitutive model and a way for their suppression, *Silos – Forschung und Praxis Tagung*, Karlsruhe, 1996
- [58] Tejchman J., Gudehus G., Silo-music and silo-quake experiments and a numerical Cosserat approach, *Powder Technology*, 76, 1993
- [59] Tejchman J., Simulation of flow behaviour of granular materials in silos using a polar hypoplastic approach, *X Międzynarodowa Konferencja Żelbetowe i Sprężone Zbiorniki na Materiały Sypkie i Ciecze*, Kraków, 1995
- [60] Tripodi M. A., Puri V. M., Manbeck H. B., Messing G. L., Elastoplastic finite element model development and validation for low pressure uniaxial compaction of cohesive powders, *Powder Technology*, 85, 1995
- [61] UBC Uniform Building Code, International Conference of Building Officials., Whittier, California, 1994
- [62] Van Wijk L. A., Earthquake resistance of mammoth silos of the eurosilo type, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, 1993
- [63] Weidner J., Vergleich von Stoffgesetzen granularer Schüttgüter zur Silodrucker-mittlung, *Praca doktorska, Uniwersytet w Karlsruhe*, 1990
- [64] Wu Y. H., Schmidt L. C., Comparison of calculated and observed filling and flow pressures in silos and hoppers, *International Conference on Bulk Materials Handling and Transportation*, Wollongong, vol. 2, 1992
- [65] Younan A. H., Veletsos A. S., Dynamics of solid – containing tanks, I: rigid tanks, *Journal of Structural Engineering*, January 1998
- [66] Younan A. H., Veletsos A. S., Dynamics of solid – containing tanks, II: flexible tanks, *Journal of Structural Engineering*, January 1998

