

GRZEGORZ BĄK, WOJCIECH GOSK*

SZTYWNOŚĆ PODŁOŻA PIASZCZYSTEGO W PROCESACH OBCIĄŻENIA I ODCIĄŻENIA WYWOŁANYCH UDAREM

STIFFNESS OF THE SANDY SUBSOIL IN LOADING AND UNLOADING PROCESSES UNDER IMPACT LOAD

Streszczenie

W niniejszym artykule wykazano wrażliwość piaszczystego podłoża gruntowego na procesy dynamicznego obciążenia i odciążenia w serii obciążeń uderowych. Za podstawę badania przyjęto wyniki doświadczeń laboratoryjnych wyrażone czasowym profilem przemieszczenia płyty naciskowej. Założono model liniowy odkształcenia podłoża z odciążeniem. Identyfikację wartości modułów obciążenia i odciążenia przeprowadzono na podstawie opracowanego programu obliczeniowego umożliwiającego opis falowej reakcji walcowej bryły gruntu.

Słowa kluczowe: piaszczyste podłoże gruntowe, moduły sztywności podłoża gruntowego, fizyczny model liniowy z odciążeniem

Abstract

In the paper the sensibility of the sandy subsoil on dynamic loading and unloading processes in series of the impact load was proved in the paper. The experiment results, expressed by the plate recorded displacements, were the basis of the analysis. The linear model of subsoil deformation with unloading was assumed for the analysis. Identification of the stiffness modulus of loading and unloading was carried out on the basis of the numerical program. The numerical ground model was based on the wave reaction description of the cylindrical bulk of the ground.

Keywords: sandy subsoil, subsoil stiffness modulus, the physical linear model with unloading

* Prof. dr hab. inż. Grzegorz Bąk, dr inż. Wojciech Gosk, Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka.

1. Wstęp

Zasadniczymi elementami modelowania problemu dynamicznego ośrodka gruntowego jest model geometryczny, ujmujący jednocześnie przestrzenny rozkład mas oraz właściwe prawo fizyczne. Modelem geometrycznym jest zwykle wałka półprzestrzeni albo wydzielona z niej bryła ośrodka w postaci stożka, walca czy prostopadłościanu. Dąży się, aby wymiary bryły obejmowały wystarczająco dużą część ośrodka podlegającą deformacjom. Bryłowe problemy są zwykle rozwiązywane metodami elementów skończonych albo różnic skończonych. Przykład modelowania wielowarstwowej półprzestrzeni bryłą stożkową znajdujemy w [1].

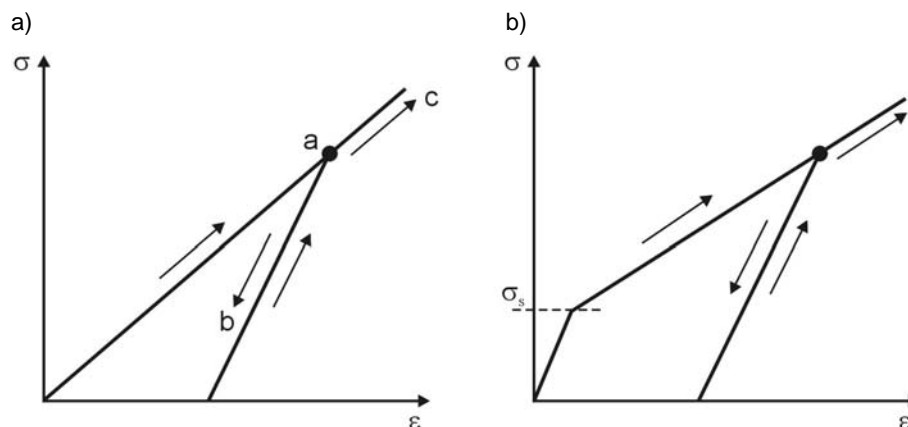
Grunt jest ośrodkiem fizycznie nieliniowym. Jego sztywność jest ogólnie zmienna, a ponadto silnie zróżnicowana w procesach obciążenia i odciążenia. W wielu przypadkach jest możliwe zastosowanie związków zlinearyzowanych, w tym prawa liniowej sprężystości. Może ono poprawnie opisywać zachowanie gruntu, jeżeli tylko pod wpływem obciążeń dynamicznych stan naprężeń pierwotnych nie podlega istotnym zmianom w dostatecznie dużym obszarze. W innych przypadkach należy uwzględnić nieliniowość fizyczną, w tym typu plastycznego. Charakter deformacji plastycznych silnie zależy od rodzaju gruntu i parametrów geotechnicznych jego stanu.

W artykule rozważany jest problem fizycznego modelowania piaszczystego podłoża gruntowego pod wpływem obciążenia dynamicznego. W pojęciu „podłoże”, które określa wierzchnią warstwę półprzestrzeni gruntowej zawiera się rzadko dostrzegana osobliwość. Jej istotą jest występowanie w podłożu nieznaczących naprężeń pierwotnych, przez co szkielet gruntowy jest słabo „sprężony”. Reakcja podłoża na zmienne w czasie, niemonotoniczne obciążenie dynamiczne jest wówczas bardzo wrażliwa na procesy obciążenia i odciążenia. Możliwe jest zastosowanie modelu fizycznego, nie ujmującego warunku plastyczności, tzn. przyjęcie założenia o kontynualnym występowaniu odkształceń plastycznych podczas obciążenia, niezależnie od intensywności stanu naprężenia. Całkowite odkształcenie ma charakter sprężysto-plastyczny, a wartość składowej plastycznej odkształcenia definiuje przyjęte prawo odciążenia. Model fizyczny podłoża jest wówczas dwugałęziowy. W mechanice gruntów początkowa gałąź obciążenia jest określana gałęzią naprężania pierwotnego, a gałąź odciążenia i powtórnego obciążenia – gałęzią wtórną. Uproszczeniem może być linearyzacja każdej z tych gałęzi, co prowadzi do modelu odkształcenia podłoża, który można określić jako liniowy z odciążeniem (rycina 1a).

Gałęziom tego modelu są przypisywane moduły odkształcenia pierwotnego i wtórnego, ściślej moduły sztywności. Gałąź obciążenia traktuje się jako gałąź odkształceń sprężysto-plastycznych. Gałąź odciążenia i powtórnego obciążenia określa sprężyste zmiany odkształcenia. Taki model znajduje zastosowanie w inżynierskiej procedurze obliczania osiadań fundamentów wznoszonej budowli, choć nie jest to akcentowane. Uwzględniane są skutki odciążenia wykopem, prowadzące do zmiany pierwotnej sztywności podłoża pod budowlą. Osiadanie obliczamy jako łączny efekt deformacji występujących na ścieżce obciążenia $b-a-c$.

Model liniowy z odciążeniem może być też uważany za szczególny przypadek bardziej ogólnego modelu biliniowego (ryc. 1b), w którym przyjmuje się dwuodcinkową gałąź obciążenia, [2, 3]. Początkowy zakres odkształcenia wyznacza granica sprężystości przyjmowana jako $\sigma_s \approx (1,5-2,0)\sigma_{st}$, gdzie σ_{st} jest pionowym naprężeniem pierwotnym. W przybliżonych rozwiązaniach problemów mechaniki falowej ośrodka gruntowego o dużej skali

przestrzennej przytoczona relacja na σ_s odnosi się do głębokości większej niż 10–20 m. Uogólnienie modelu biliniowego na zagadnienia przestrzenne znajdujemy w [4]. W przypadku analiz ukierunkowanych na prognozę zachowań dynamicznych samego podłoża gruntowego jest zasadne przyjęcie $\sigma_s \approx 0$.



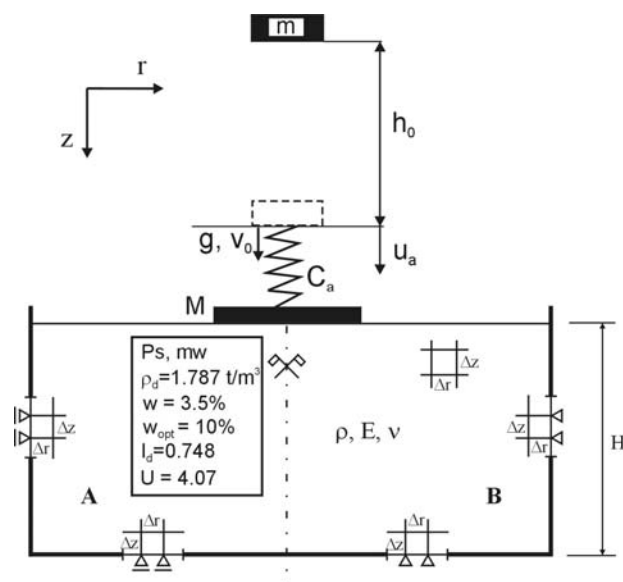
Ryc. 1. Schematyzacje prawa fizycznego: a) liniowe z odciążeniem, b) biliniowe

Fig. 1. Schemes of the physical law: a) linear with unloading, b) bilinear

Celem pracy jest przedstawienie wyników identyfikacji modułu sztywności piaszczystego podłoża gruntowego poddanego serii kolejnych uderzeń spadającą masą za pośrednictwem płyty stalowej. Płyta ta może być uważana za szczególny model fundamentu ($D_{\min} = 0$), służący do przekazania obciążeń dynamicznych na podłoże gruntowe. Nie analizowano omawianego zagadnienia uderzeniowego w kategoriach dynamicznego zagęszczania gruntu. Każdą próbę traktowano jako realizowaną na innym podłożu. Identyfikację sztywności podłoża przeprowadzono na podstawie znanych w literaturze wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych z zastosowaniem lekkiej płyty dynamicznej ZFG-01 – patrz instrukcja [5]. Teoretyczne podstawy takiego badania zawarto w pracy [6], w której do modelowania problemu uderzenia i odpowiedzi podłoża zastosowano modele oscylatorów. Przyrząd jest przeznaczony do oceny zagęszczenia gruntu naturalnego albo nasypowego. Podstawą wnioskowania jest średnia wartość amplitudy przemieszczenia z ustabilizowanych pomiarów. Przemieszczenia płyty są wyznaczone numerycznie z zarejestrowanych przyspieszeń.

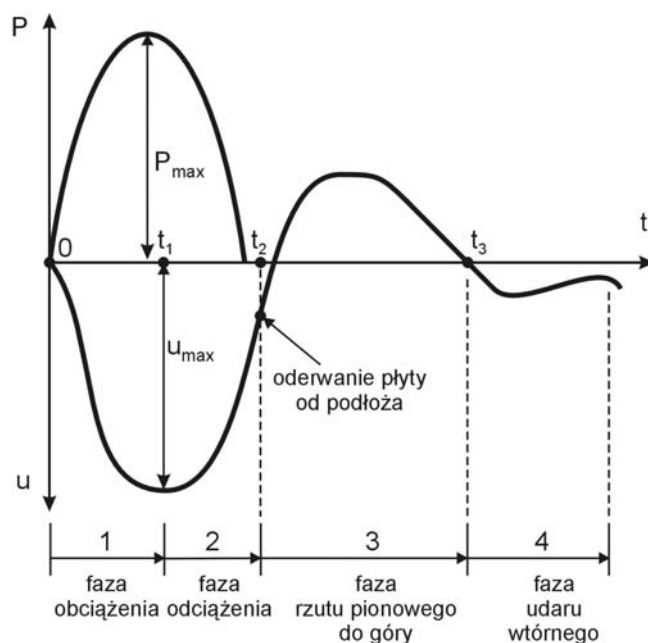
2. Podstawa doświadczalna analizy

Wykorzystujemy wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na ograniczonej bryle gruntu o wymiarach 1,30×1,30×0,70 m, umieszczonej w sztywnej skrzyni drewnianej [7]. Grubość bryły kwalifikuje ją jako podłoże gruntowe. Model stanowiska badawczego z danymi o gruncie oraz elementy modelowania numerycznego przedstawiono na ryc. 2. Inne dane o badanym gruncie to uśrednione moduły sztywności uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych:



Ryc. 2. Schemat stanowiska badawczego. Warunki brzegowe do analizy numerycznej

Fig. 2. The scheme of experiment. The boundary conditions in numerical analysis



Ryc. 3. Charakter zmienności w czasie przemieszczenia płyty i siły uderu

Fig. 3. The character of time changeability of the displacement and the force of impact

- płytą VSS: pierwotny $E_0 = 32,2$ MPa, wtórny $E = 94,3$ MPa,
- przyrządem ZFG-01: pierwotny $E_0 = 36,2$ MPa, wtórny $E \approx 72,4$ MPa.

W doświadczeniu płyta naciskowa o masie M doznaje uderzenia masy m za pośrednictwem amortyzatora sprężystego o sztywności C_a . Krok próbkowania wynosił $\Delta t^{\text{eksp}} = 56 \mu\text{s}$. Amplituda średnich naprężeń przekazywanych na podłoże gruntowe za pośrednictwem płyty naciskowej wynosiła $\sigma_{\text{max}} \approx 100$ kPa. W ośmiu kolejnych próbach dynamicznych, następujących po sobie co 1–2 minuty, uzyskano wyniki amplitudy przemieszczenia w_{max} : $\{1,279, 0,757, 0,685, 0,650, 0,622, 0,594, 0,583, 0,587\} \cdot 10^{-3}$ m. Wyniki te wskazują na zagęszczanie się gruntu i stabilizację amplitudy począwszy od uderzenia nr 6.

Charakter zmienności w czasie przemieszczenia płyty naciskowej i siły amortyzowanego uderzenia ilustruje ryc. 3.

3. Charakterystyka metody identyfikacji

Do przytoczonych wyników oceny sztywności przedmiotowego gruntu piaszczystego odniesiemy się, przeprowadzając analizę identyfikacyjną. Reakcję dynamiczną walcowej bryły gruntu poddanej uderzeniu spadającą masą wyznaczono programem obliczeniowym zbudowanym według algorytmu MRS, zaproponowanym w [8]. Algorytm MRS poszerzono o segment umożliwiający opis interakcji sztywnej płyty naciskowej zarówno z górną powierzchnią gruntu, jak i ze spadającą masą. Masa spadająca oddziałuje za pośrednictwem amortyzatora sprężystego. Rezultatem tej obustronnej interakcji jest zmienne w czasie obciążenie, które inicjuje dynamiczne osiadanie płyty. Wyznaczając to obciążenie, zaniedbano poślizgi poziome w obszarze kontaktu płyty z podłożem. Na kierunku normalnym założono więzy jednostronne. W programie nie uwzględniono naprężeń pierwotnych w analizowanej bryle gruntu ze względu na małą jej wysokość.

Zbadano stateczność i zbieżność procedury różnicowej. Ustalono, że właściwy będzie krok podziału przestrzennego $\Delta z = \Delta r = 0,015$ m i krok czasowy $\Delta t^{\text{num}} = 0,01 \Delta t^{\text{eksp}}$. Dokonano porównania wyników szczegółowych programu autorskiego z wynikami, które uzyskuje się programem Plaxis Dynamics v.8 (MES) w zakresie liniowo sprężystym. Stwierdzono, że wydzielona bryła gruntu była dostatecznie duża dla analizowanego problemu i tłumienie typu geometrycznego było modelowane poprawnie. Efekty odbicia od wprowadzonych brzegów bryły były nieistotne. Maksymalna amplituda naprężenia w otoczeniu brzegu dolnego osiągnęła 17% maksymalnej amplitudy pod płytą naciskową. Różne warunki brzegowe na pobocznicach walca i na powierzchni podstawy miały bardzo mały wpływ na dynamiczne zachowanie płyty (ryc. 2).

W algorytmie MRS zachowanie gruntu w przestrzennym stanie odkształcenia i naprężenia opisano związkami fizykalnymi właściwymi dla modelu liniowego z odciążeniem. W prawie tym uwzględniono stany naprężenia σ^* i odkształcenia ε^* odpowiadające chwili t_1 . Stany te są funkcjami współrzędnych przestrzennych. Formę tych związków przyjęto w postaci:

faza obciążenia

$$\dot{\varepsilon}_i \geq 0 \Rightarrow \sigma_{ij} = 2\mu_0 \varepsilon_{ij} + \lambda_0 \theta \delta_{ij}$$

faza odciążenia

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i < 0 \Rightarrow \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}^* + 2\mu(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^*) + \lambda(\theta - \theta^*)\delta_{ij} \\ \theta &= \varepsilon_{kk}, \quad \theta^* = \varepsilon_{kk}^* \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

λ_0 i μ_0 oraz λ i μ – stałe Lamégo dla właściwych faz.

Zwróćmy uwagę, że arbitralny podział w czasie na procesy obciążenia i odciążenia ma cechę uproszczonego rozstrzygnięcia globalnego. Ścisłe ujęcie tego podziału w sensie lokalnym, tzn. ustalenie chwili t_1 jako funkcji zmiennych przestrzennych nie wnosi istotnych zmian ilościowych w przeprowadzonych analizach.

Pierwsza część programu obejmowała analizę fazy obciążenia i umożliwiała iteracyjne wyznaczenie wartości modułu sztywności E_{0d}^{num} z założonego przedziału. Za kryterium identyfikacji przyjęto warunek najlepszej zgodności prognozy numerycznej maksymalnej amplitudy przemieszczenia z wartością eksperymentalną i jednocześnie czasu t_1 jej osiągnięcia

$$\Re\left(\frac{u_{d\max}^{num} - u_{d\max}^{eksp}}{u_{d\max}^{eksp}}\right) + \Re\left(\frac{t_1^{num} - t_1^{eksp}}{t_1^{eksp}}\right) = \inf \quad (2)$$

gdzie:

\Re – wartość bezwzględna albo potęgowanie do kwadratu.

Iteracyjną procedurę wyznaczania modułu E_{0d}^{num} na podstawie (2) kończono w programie obliczeniowym po stwierdzeniu, że wartość ta jest wyznaczona z dokładnością do 0,1 MPa. Takie postępowanie identyfikacyjne jest często określane jako metoda analizy wstecznej albo odwrotnej ze względu na określony stan. W tym przypadku był to stan odpowiadający pierwszej maksymalnej amplitudzie przemieszczenia płyty naciskowej, a więc stan kończący fazę obciążenia w sensie globalnym. Wielkości kinematyczne i dynamiczne w węzłach zdyskredytowanej bryły gruntu stowarzyszone z tym stanem stanowiły warunek początkowy do dalszej analizy identyfikacyjnej, która obejmowała fazę odciążenia. Stwierdzono, że podczas tej fazy, w pewnej chwili t_2 , zanika siła uderu i płyta naciskowa traci kontakt z powierzchnią gruntu. Zarejestrowane po tej chwili informacje pomiarowe stają się bezużyteczne do analizy zachowania gruntu.

Stan końcowy fazy odciążenia (t_2 , $u(t_2)$) nie był znany z doświadczenia. Podlegał wyznaczeniu na podstawie analizy numerycznej. Identyfikację przeprowadzono więc nie ze względu na stan, jak poprzednio, ale ze względu na proces – najlepszą zgodność czasowych profili przemieszczeń: doświadczonego i numerycznego. Przyjęto kryterium w postaci

$$\sum_{n=1}^N (u^{eksp}(t_n) - u^{num}(t_n))^2 = \inf \quad (3)$$

gdzie:

- t_n – kolejne chwile próbkowania,
- t_1 – chwila początkująca fazę odciążenia,
- $t_N \equiv t_2$ – chwila oderwania płyty od podłoża.

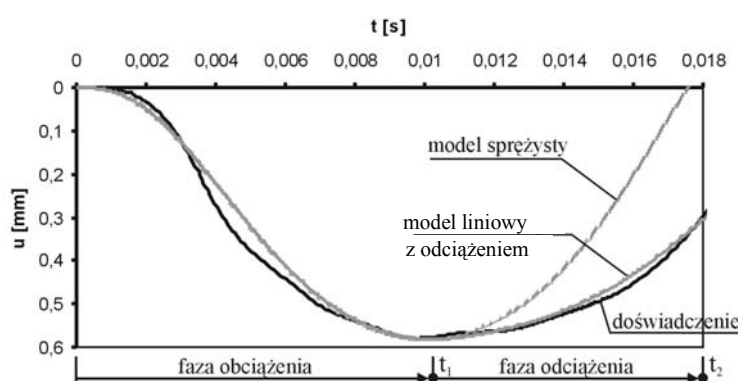
Wskaźnik N podlegał wyznaczeniu z warunku znikania nacisku płyty na podłoże gruntowe w każdej próbnej iteracji prowadzonej dla wartości z przeszukiwanego przedziału modułu odciążenia.

4. Wyniki identyfikacji

Wartości modułów sztywności w fazie obciążenia E_{od}^{num} i odciążenia E_d^{num} , wyznaczone zastosowaną procedurą identyfikacyjną, wynoszą odpowiednio:

- próba udarowa nr 4: $E_{od}^{num} = 36,2 \text{ MPa}$, $E_d^{num} = 80,0 \text{ MPa}$,
- próba udarowa nr 7: $E_{od}^{num} = 40,2 \text{ MPa}$, $E_d^{num} = 78,0 \text{ MPa}$.

Podane wartości można uznać za właściwe wartościom z badań laboratoryjnych (p. 2).



Ryc. 4. Zmienność w czasie przemieszczenia płyty naciskowej

Fig. 4. The displacement changeability of the plate

Wyniki teoretyczne wskazują na pewną zmianę zagęszczenia gruntu kolejnymi uderzeniami. Zauważono, że jeżeli traktować kolejne próby jako quasi-ciągły, złożony proces obciążania – odciążania gruntu, to grunt nie wykazuje pamięci historii odkształcania. Kolejna próba wywołuje reakcję gruntu według gałęzi pierwotnej ukonstytuowanej w poprzednim udarze, a nie według jego gałęzi wtórnej.

Doświadczalne i numeryczne krzywe zmienności przemieszczeń płyty naciskowej w czasie dla próby udarowej nr 7 przedstawiono na ryc. 4. Zwraca uwagę duża niezgodność w fazie odciążenia prognozy według modelu sprężystego z krzywą doświadczalną.

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule wskazano na użyteczność fizykalnego modelu liniowego z odciążeniem w analizie dynamicznych osiadań podłoża gruntowego wywołanych udarem, który umożliwia przybliżony opis deformacji plastycznych. Stwierdzono, że w kolejnych uderzeniach, następujących co kilka minut, grunt zachowuje się jak ośrodek bez pamięci historii obciążania, tzn. aktywny proces obciążenia nie realizuje się według gałęzi odciążenia właściwej poprzedniemu udarowi. Obserwacja ta wskazuje, że gałąź odciążenia nie może być traktowana jako trwale ukonstytuowana gałąź liniowo sprężysta. Należy przyjąć, że jest to spowodowane efektami dynamicznymi w szkieletie gruntowym – oderwanie płyty naciskowej i jej powtórne zetknięcie z gruntem. Pewien wpływ na takie zachowanie bada-

nego piasku miała jego równoziarnistość i mała wilgotność. Zastosowane podejście umożliwiło uzyskanie bardzo dobrej zgodności teoretycznej krzywej przemieszczenia z doświadczalną. Zasygnalizujemy, że znacznie większe odchylenia dotyczą zmienności w czasie przyspieszeń. Błąd względny maksymalnej amplitudy przyspieszenia wynosi -50% . Takiej różnicy nie należy jednak oceniać nadmiernie krytycznie. Poprawniejszych wyników można oczekiwać, rezygnując z linearyzowania gałęzi obciążenia i odciążenia.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych nr S/IIB/1/06 realizowanych w Politechnice Białostockiej jako projekt badawczy.

Literatura

- [1] Wolf J.P., Deeks A., *Cones to model foundation vibrations: incompressible soil and axi-symmetric embedment of arbitrary shape*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 2004.
- [2] Włodarczyk E., *Modele gruntów i skał w zagadnieniach falowych*, Archiwum Inżynierii Lądowej, t. XXXVII, z. 3–4, 1991.
- [3] Nowacki W.K., *Zagadnienia falowe w teorii plastyczności*, PWN, Warszawa 1974.
- [4] Aggarwal H.R., Soldate A.M., Hook J.F., Miklovitz J., *Bilinear theory in plasticity and application to two-dimensional wave propagation*, Journal of Applied Mechanics, 1964.
- [5] Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau TB BF-St B Teil B8.3. Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes, 1992.
- [6] Weingard W., *Probleme der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung mit Fallgeräten*, Die Strasse, Heft 11, 1981.
- [7] Sulewska M., *Moduły odkształcenia gruntu niespoistego wyznaczone metodą dynamiczną*, rozprawa doktorska, Białystok 1993.
- [8] Szcześniak Z., *Modelowanie zachowania dynamicznego konstrukcji podziemnych w warunkach działania powietrznej fali uderzeniowej*, Wyd. WAT, Warszawa 1999.