ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Wojciech GOSK*
Politechnika Białostocka

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW SPRĘŻYSTEGO MODELU PODŁOŻA GRUNTOWEGO OBCIĄŻONEGO UDAROWO

Streszczenie. W pracy podjęto próbę identyfikacji parametrów odkształceniowych podłoża piaszczystego. Jako podstawę do analiz przyjęto badanie wykonane w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem lekkiej płyty dynamicznej. Zarejestrowane wyniki poddano analizie w celu określenia wartości modułu odkształcenia i współczynnika Poissona. Prezentuje się wyniki z identyfikacji dokonanej z zastosowaniem modelu numerycznego podłoża w ujęciu falowym dla ośrodka liniowo sprężystego oraz modelu oscylatora.

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE ELASTIC SUBSOIL MODEL UNDER IMPACT LOAD

Summary. An attempt at identifying the deformation parameters of sandy ground it was made in the paper. The analysis basis was an experiment which was made in laboratory by the means of light drop tester. The recorded results were analysed to determinate values of deformation modulus and Poisson's ratio. For identification the numerical ground model and oscillator model were used. The numerical ground model was based on wave problem depiction for linear-elastic medium.

1. Wstęp

Teoretyczny opis zachowania ośrodka gruntowego pod wpływem obciążeń dynamicznych wymaga przeprowadzenia modelowania problemu w sensie geometrycznym i fizycznym oraz dokonania wyboru metody rozwiązania problemu. W modelowaniu geometrycznym dążymy zazwyczaj do uwzględnienia możliwie największej objętości gruntu, starając odzwierciedlić jego wewnętrzną makrostrukturę, w szczególności jego uwarstwienie. Geometrycznym modelem jest wówczas bryła, dla której jest wymagane przypisanie odpowiednich warunków

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Grzegorz Bąk

brzegowych, np. [1]. W opisie ukierunkowanym na zastosowania inżynierskie dążymy do eliminacji trudności obliczeniowych. Wykorzystujemy nawet takie postępowania, w których abstrahujemy od pełnej geometrii problemu. Koncentrujemy się na modelowaniu samego podłoża gruntowego, jeżeli zainteresowani jesteśmy efektami deformacji powierzchniowych [2]. W przypadku poszukiwania przemieszczeń lokalnych abstrahujemy nawet całkowicie od geometrii problemu. Przyjmujemy modele syntetycznie ujmujące jedynie aspekt deformacyjny w określonym punkcie ośrodka gruntowego. Modelami takimi są oscylatory. Elementy podatne tych oscylatorów powinny odzwierciedlać jakościowo i ilościowo odkształcalność ośrodka gruntowego.

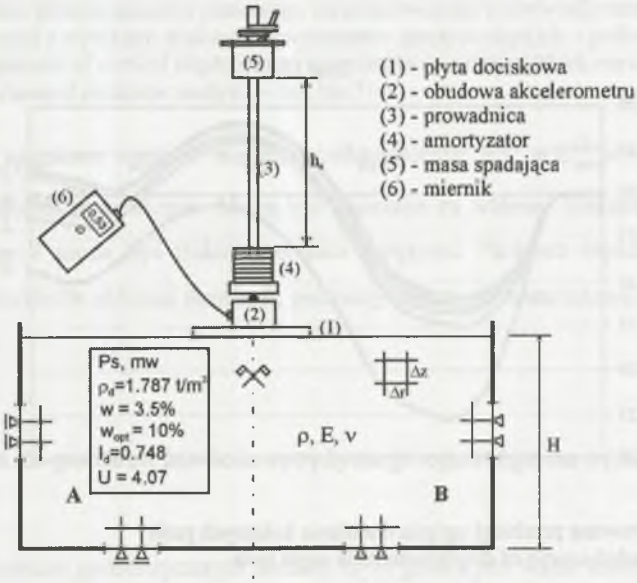
W modelowaniu fizycznym rozstrzygamy o rozkładzie masy i przyjęciu stosownego prawa fizykalnego. Wreszcie wybór metody rozwiązania to rozstrzygnięcie, dokonujące się w zbiorze metod dynamiki albo w katalogu systemów komputerowych. Z metodą rozwiązania wiąże się etap modelowania matematycznego lub numerycznego.

Wiarygodne analizy teoretyczne wymagają ustalenia stałych czy parametrów fizykalnych właściwych przyjętemu modelowi odkształcania gruntu. Zauważymy, że nie zawsze jest możliwe ustalenie tych parametrów jako stałych fizykalnych. W interpretacji wyników doświadczenia wykorzystujemy bowiem sformułowanie teoretyczne obarczone sposobem modelowania geometrii problemu oraz modelowania matematycznego lub numerycznego.

W niniejszej pracy poszukujemy modułu odkształcenia gruntu i współczynnika Poissona na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych dla wymuszeń dynamicznych metodami identyfikacji. W literaturze tematu znajdujemy informacje o zróżnicowaniu modułów odkształcenia gruntu obciążonego statycznie i dynamicznie [3], [4]. W niektórych pracach wskazuje się, że wzrost tego modułu może być bardzo duży, nawet ośmiokrotny. Przytoczone uwagi są formułowane bez precyzowania, czy odnoszą się one do wartości modułu pierwotnego czy wtórnego i jakiego zakresu naprężeń dotyczą. Moduły takie, jako pojęcia mechaniki gruntów i akceptowane przez normę, są ściśle związane z teoretycznym, jednowymiarowym modelem gruntu jako materiału niesprężystego, biliniowego. Model ten jest wykorzystywany w analizach inżynierskich osiadania budowli, przy czym jest on definiowany w tych analizach poprzez moduły ściśliwości gruntu, a nie moduły odkształcenia. Ponadto, komentując samo pojęcie modułu odkształcenia, należy zauważyć, że jest ono związane z konkretnym modelem fizykalnym gruntu. W przypadku modeli liniowych powinno być uznawane za wielkość uśredniającą, właściwą danemu zakresowi naprężeń.

2. Podstawa doświadczalna pracy

Podstawą analiz są wyniki laboratoryjnych badań eksperymentalnych prezentowane w pracy [5]. Badania przeprowadzono na ograniczonej bryle gruntu z piasku średnioziarnistego umieszczonej w sztywnej skrzyni drewnianej o wymiarach wewnętrznych 1.30 m x 1.30 m x 1.05 m. Do wywołania reakcji gruntu wykorzystano przyrząd – lekką płytę dynamiczną, znaną także jako ugięciomierz udarowy. Przyrząd generuje obciążenia udarowe masą spadającą. Są one przekazywane na stalową płytę naciskową za pośrednictwem amortyzatora. Uzyskane w ten sposób obciążenie jest „górką" typu sinusoidalnego. Dane o gruncie i widok stanowiska badawczego przedstawia rysunek 1.

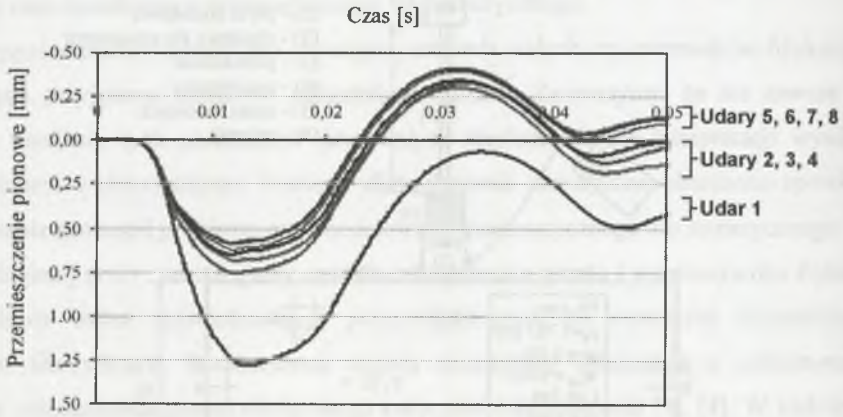


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego z elementami dyskretyzacji do analizy numerycznej
Fig. 1. The scheme of experiment with discretization elements to the numerical analysis

W badaniu eliminuje się wielokrotne odbicia spadającej masy, w wyniku czego otrzymuje się tylko pojedyncze oddziaływanie udarowe. Rejestrowane są przyspieszenia płyty, co umożliwia wyznaczenie amplitudy przemieszczenia sposobem numerycznym. Wynikami amplitud przemieszczenia w kolejnych ośmiu próbach za cytowaną pracą [5] są: w_{max}: {1.279, 0.757, 0.685, **0.650**, **0.622**, **0.594**, 0.583, 0.587} mm. Wnioskowania o sztywności gruntu dokonuje się na podstawie wartości średniej z amplitud wyznaczonych w kolejnych próbach: czwartej, piątej i szóstej, [6]. Podstawą tej procedury są analizy

teoretyczne dla oscylatora sprężysto-lepkiego zamieszczone w [7]. Dla omawianego badania otrzymuje się wartość $E_{vd} = 36.17$ MPa. W badaniu porównawczym analizowanego gruntu z użyciem płyty VSS, w zakresie nacisków odpowiadających wywołanemu obciążeniu udarowemu, stwierdzono wartość modułu pierwotnego – $E_0 = 32.20$ MPa.

Zarejestrowane przebiegi ugięcia w czasie przedstawiono na rysunku 2. Krzywe pogrupowano. Udar nr 1 uwidacznia wyraźną reakcję sprężysto-plastyczną bryły gruntu. Udarom nr 2, 3 i 4 towarzyszą znacznie mniejsze efekty trwałe. O udarach nr 5, 6, 7 można wnioskować, że grunt nie doznaje już dalszych istotnych deformacji plastycznych. Ujemne amplitudy – znaczne co do wartości – wynikają z odrywania się płyty naciskowej od gruntu. Skutkują one kolejnymi, słabymi udarami i płytkim, powierzchniowym niszczeniem szkieletu gruntowego.



Rys. 2. Zarejestrowane przebiegi ugięcia dla ośmiu kolejnych prób
Fig. 2. The recorded course of displacements in eight tests

3. Identyfikacja za pomocą modelu oscylatora sprężysto-lepkiego

Analizujemy tylko początkowe fazy ruchu płyty naciskowej, tj. fazę obciążania w sensie przemieszczeniowym, trwającą do osiągnięcia maksimum przemieszczenia, oraz kolejną obejmującą okres do chwili oderwania płyty od gruntu.

Rys. 3. Porównanie przemieszczenia pionowego zarejestrowanego w doświadczeniu (krzywa pogrubiona) z wynikami analizy dla oscylatorów sprężysto-lepkich – próba 7

Fig. 3. The comparison of vertical displacement recorded in experiment (thick curve) to results of viscous damped oscillator analysis – test No 7

Dla kolejnych faz uzyskano wartości modułów odkształcenia: $E_{osc}^{(1)} = E_{osc}^{(2)} = 38.49$ MPa. Są to uśrednione wielkości dynamiczne. Mogą być uważane za wtórne. Wskazują, że reakcja gruntu w próbie nr 7 może być traktowana jako sprężysta. Parametr lepkości oscylatora $\Phi = 0.0005$ odzwierciedla głównie tłumienie geometryczne, a nie materiałowe.

4. Identyfikacja za pomocą modelu sprężystego opartego na opisie falowym

Przyjęto, że modelem geometrycznym badanej bryły gruntu jest walec kołowy o pionowej osi symetrii i średnicy $\phi = 1.3\,\mathrm{m}$. Jego wysokość jest równa łącznej grubości warstw piasku umieszczonego w skrzyni, $H = 0.7\,\mathrm{m}$. Z uwagi na nieznaczne różnice w stopniach zagęszczenia bryłę gruntu traktowano jako jednorodną i odpowiadającą modelowi ośrodka liniowo sprężystego. Obudowę skrzyni traktowano jako nieodkształcalną. Rozważono dwa typy warunków brzegowych przypisanych podstawie dolnej i pobocznicy walca (rys. 1). Warunki **A** ograniczają przemieszczenia brzegów jedynie na kierunkach normalnych. Warunki **B** eliminują ruch brzegów na kierunkach normalnych i stycznych. Takie podejście pozwoliło oszacować z niedomiarem i nadmiarem wpływ warunków brzegowych na zachowanie bryły gruntu. W programie ujęto idealne współdziałanie płyty naciskowej z

gruntem, zaniedbując opis zjawiska utraty kontaktu. Opracowano program obliczeniowy na podstawie różnicowego ujęcia problemu falowego ośrodka trójwymiarowego zaproponowanego w [8]. Bryłę gruntu zdyskretyzowano siatką, uznając, że właściwym podziałem przestrzennym jest $\Delta r = \Delta z = 0.015\,\mathrm{m}$, co ustalono podczas badania zbieżności procedury numerycznej. Wyniki doświadczeń i analiz numerycznych są zamieszczone w tablicy 1. W kolumnie trzeciej podano wartość modułu E_{vd} określoną na podstawie u_{max} według instrukcji [6]. W kolumnie czwartej zamieszczono wyniki analizy odwrotnej, w której dla ustalonego współczynnika Poissona $\nu = 0.3$ poszukiwano wartości modułów odkształcenia E_{nd}, warunkujących zgodność z amplitudami przemieszczeń u_{max} w kolejnych próbach. Ogólnie, wartość E_{nd} nie jest zgodna z wartością E_{vd}. Jest oczywiste, że zakładając poprawność wyznaczonego modułu dynamicznego E_{nd}, zgodność z amplitudą przemieszczeń można uzyskać również poszukując odpowiednich wartości ν. Są one zamieszczone w tablicy 1 i mogą być ocenione jako właściwe dla rozważanego gruntu.

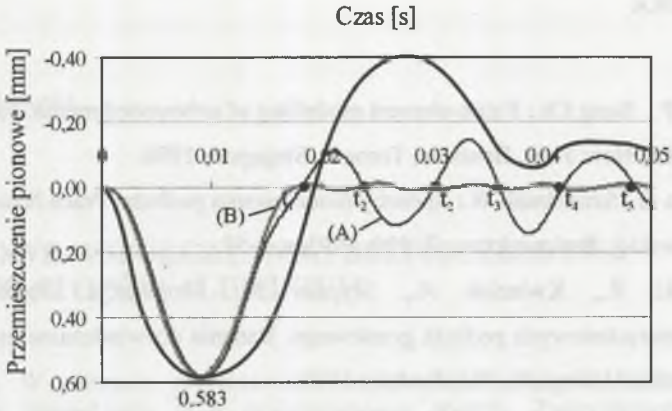
Tablica 1

Porównanie wyników doświadczalnych i analiz numerycznych

Nr udaru	u_{max} [mm]	E_{vd} [MPa]	E_{nd} [MPa]	$\frac{E_{nd}-E_{vd}}{E_{vd}} \cdot 100$, [%]	ν_{nd} ($E_{nd} = E_{vd}$)
1	1,279	17,59	18,90	7,45	0,375
2	0,759	29,64	31,30	5,60	0,363
3	0,685	32,85	34,50	5,02	0,356
4	0,650	34,62	36,20	4,56	0,353
5	0,622	36,17	37,80	4,51	0,350
6	0,594	37,88	39,40	4,01	0,347
7	0,583	38,59	40,20	4,17	0,345
8	0,587	38,33	39,90	4,10	0,346

Wartości modułów dla próby nr 1 i prób ostatnich wskazują na ewolucję zmiany stanu zagęszczenia gruntu na skutek przeprowadzonych prób udarowych.

Ilustracją przebiegów zmienności przemieszczeń doświadczalnych i wyznaczonych numerycznie jest rysunek 4. Dotyczy on próby doświadczalnej nr 7 – pogrubiona linia ciągła. Liniami oznaczonymi jako (A) i (B) przedstawiono numeryczne przebiegi zmienności przemieszczeń płyty dla różnych warunków brzegowych. Przebiegi te w okresie trwania obciążenia udarowego różnią się nieznacznie między sobą. Ich zróżnicowanie występuje po ustaniu obciążenia. Stwierdza się jednakże jakościową rozbieżność prognoz numerycznych z przebiegiem doświadczalnym pomimo zgodności amplitudy maksymalnej.



Rys. 4. Porównanie przemieszczenia pionowego zarejestrowanego w doświadczeniu (krzywa pogrubiona) z wynikami analizy numerycznej (krzywe A i B) – próba 7

Fig. 4. The comparison of vertical displacement recorded in experiment (thick curve) to results of numerical analysis (curves A and B) – test No 7

5. Podsumowanie

Stwierdzono, że w przypadku doświadczenia nr 7 modelowanie fizyczne gruntu związkami liniowej sprężystości przy zastosowaniu analizy falowej jest poprawne w analizowanym zadaniu dynamiki. Możliwe jest uzyskanie dobrej zgodności pierwszej amplitudy przemieszczenia i czasu jej występowania z wynikami doświadczenia dla dynamicznego modułu odkształcania i odpowiednio dobranego współczynnika Poissona. Zwraca jednak uwagę brak dobrego przylegania krzywych teoretycznych do krzywej doświadczalnej jako funkcji czasu. Wymaga to więc poszukiwania bardziej złożonego modelu fizycznego gruntu i potrzebę pełniejszego formułowania problemu w kategoriach teorii identyfikacji [9], [10]. Identyfikacja przeprowadzona procedurą „punkt po punkcie", a nie tylko z uwagi na wartości pierwszej maksymalnej amplitudy umożliwi lepsze dopasowanie krzywych teoretycznych do doświadczalnych, i tym samym pozwoli uściślić nieliniowość fizyczną gruntu.

LITERATURA

1. Wolf J. P., Song Ch.: Finite-element modelling of unbounded media. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore 1996.
2. Jemielita G., Szcześniak W.: Sposoby modelowania podłoża. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, Z. 120, 1993, s. 5-50.
3. Ciesielski R., Kwiecień A., Stypuła K.: Propagacja drgań w warstwach przypowierzchniowych podłoża gruntowego. Badania doświadczalne in situ. Politechnika Krakowska, Monografia 263, Kraków 1999.
4. Derski W., Izbicki R., Kisiel I., Mróz Z.: Mechanika skał i gruntów. PWN, Warszawa 1982.
5. Sulewska M. J.: Moduły odkształcenia gruntu niespoistego wyznaczone metodą dynamiczną. Rozprawa doktorska. Białystok 1993.
6. Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau TP BF-StB Teil B 8.3. Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgerätes. 1992.
7. Weingart W.: Probleme der dynamischen Tragfähigkeitsprüfung mit Fallgeräten. Die Strasse 11/1981, s. 369-373.
8. Szcześniak Z.: Modelowanie zachowania dynamicznego konstrukcji podziemnych w warunkach działania powietrznej fali uderzeniowej. Wyd. WAT, Warszawa 1999.
9. Giergiel J., Uhl T.: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN, Warszawa 1990.10.
10. Eykhoff P.: Identyfikacja w układach dynamicznych. PWN, Warszawa 1980.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Szcześniak