

## Walidacja modelu *Hardening Soil small* w badaniach trójosiowych gruntu z zastosowaniem czujników napróbkowych

Mgr inż. Witold Bogusz, mgr Marcin Witowski

Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Geotechniki i Fundamentowania

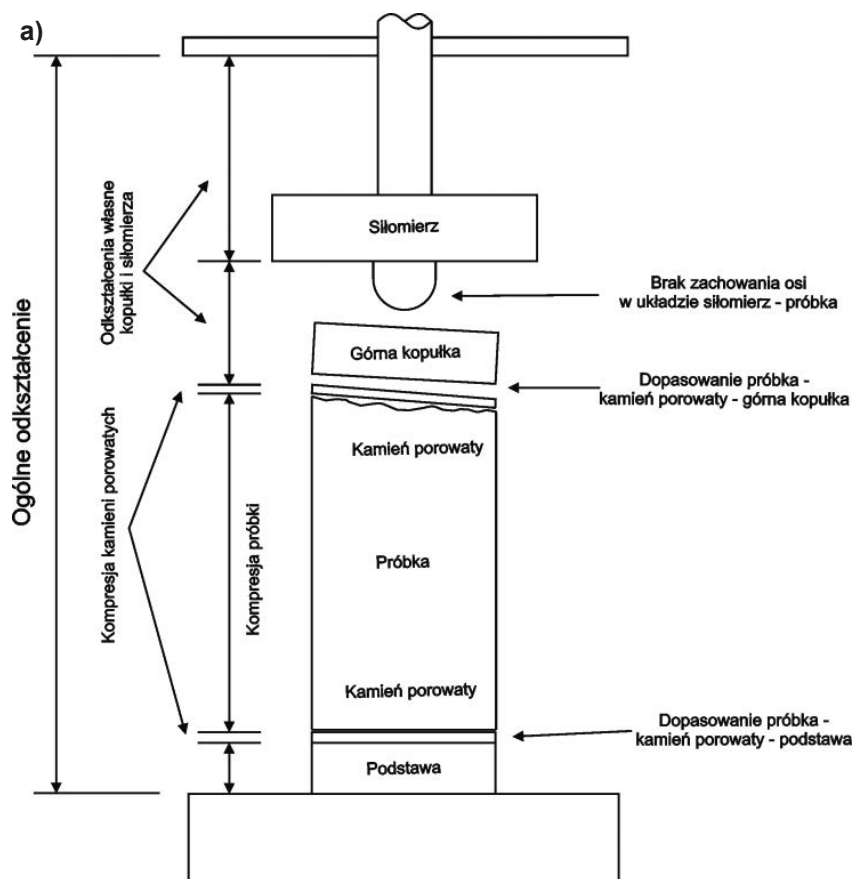
Laboratoryjne badanie gruntu w zakresie małych odkształceń w standardowym aparacie trójosiowego ściskania (TRX) nie zapewnia odpowiedniej dokładności pomiarowej. Pomiar charakterystyki naprężenie – odkształcenie z zastosowaniem czujnika przemieszczenia znajdującego się na zewnątrz komory powoduje powstanie błędnych odczytów wynikających z nakładania się dodatkowych odkształceń. Można do nich zaliczyć odkształcenia własne urządzenia obciążającego, górnej kopułki, kamieni porowatych, przesuwanie się względem siebie próbki oraz dysków porowatych, podstawy dolnej oraz nierówności powierzchni dolnej i górnej próbki (rys. 1). Zsumowanie tych czynników powoduje, że nie można wystarczająco dokładnie określić przebiegu charakterystyki naprężenie – odkształcenie gruntu w czasie badania. Szczególnie uwidacznia się to w zakresie małych odkształceń. Rozwiązaniem tego problemu są napróbkowe czujniki przemieszczeń rejestrujące odkształcenia bezpośrednio na próbce [1].

Do pomiaru odkształceń osiowych w zakresie od 0,001% do 1% zmodernizowano aparat trójosiowego ściskania. W ramach modernizacji wykonano czujniki przemieszczeń, system mocujący czujniki na próbce, urządzenie przetwarzające dane z czujników Halla oraz opracowano program komputerowy zbierający dane z dotychczas używanego rejestratora i rejestratora czujników napróbkowych. Poza tym w badaniach wyko-

rzystano standardowy zestaw pomiarowy (rejestrator czujników siły, przemieszczenia, ciśnienia oraz objętości).

### OPIS BUDOWY CZUJNIKÓW

Czujniki przemieszczenia wykorzystujące efekt Halla zaprojektowano pierwotnie na Uniwersytecie Surrey przez zespół Claytona [3]. Zjawisko Halla, na którym opiera się pomiar przemieszczenia, polega na wystąpieniu różnicy potencjałów w przewodniku, w którym płynie prąd elektryczny, gdy przewodnik znajduje się w poprzecznym do płynącego prądu polu magnetycznym. Dzieje się tak w wyniku odchyłania się elektronów w polu magnetycznym w wyniku powstania siły Lorentza. Napięcie Halla pojawia się między płaszczyznami ograniczającymi przewodnik, prostopadle do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunek prądu i wektor indukcji pola magnetycznego. W czujnikach tego rodzaju są wykorzystywane półprzewodniki mierzące strumień pola magnetycznego. Najczęściej źródłem takiego strumienia jest magnes trwały. Przemieszczenie się magnesu powoduje zmianę napięcia wyjściowego na półprzewodniku. Wartość tego napięcia zależy od natężenia pola magnetycznego czyli zasadniczo od odległości czujnika od magnesu.



Rys. 1. Źródła błędów pomiarowych podczas pomiaru charakterystyki naprężenie – odkształcenie próbki (a) (według [2] zmienione) oraz czujniki naprębkowe (b)

W konstrukcji czujników użyto układu scalonego wykorzystującego efekt Halla. Obudowę czujników oraz elementy mocujące czujniki na próbce wykonano w technice druku 3D (rys. 1b). Technika ta umożliwia precyzyjne i szybkie tworzenie dowolnych elementów o skomplikowanej geometrii. Użyty materiał jest trwały i stosunkowo lekki – masa całego zestawu to około 30 g. Ze względu na to, że wykorzystywane dotychczas urządzenie rejestrujące nie zapewniało odpowiedniej rozdzielczości sygnału, postanowiono zbudować niezależny układ zbierający dane wraz z aplikacją do jego obsługi. Pozwoliło to na osiągnięcie założonego zakresu pomiaru odkształceń (od 0,0001% do 1%). Konieczność jednoczesnego, ciągłego zapisywania danych z dwóch rejestratorów wymusiła opracowanie własnej autorskiej aplikacji.

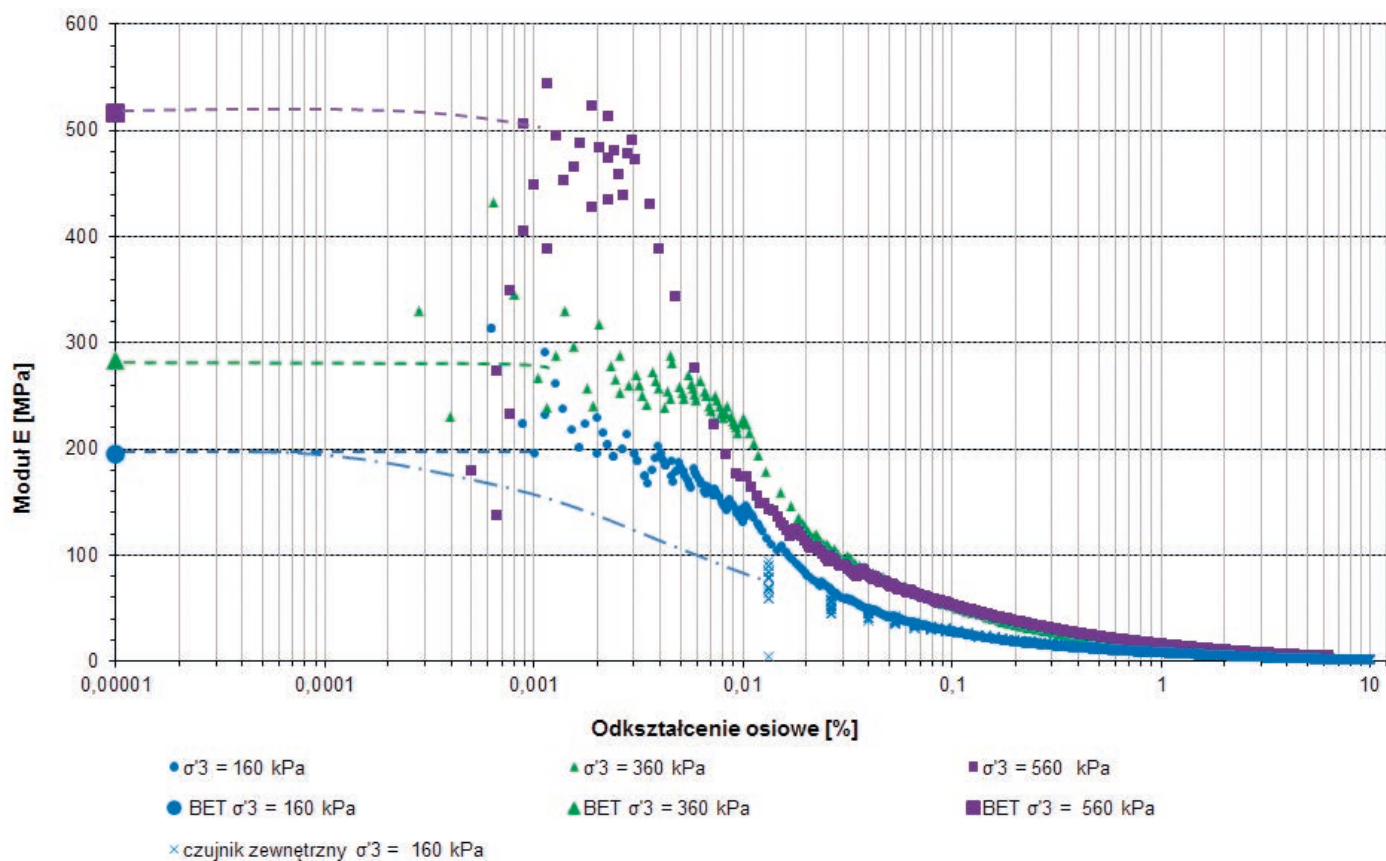
## METODYKA BADAŃ

Do badań wybrano próbki ilu w stanie półzwałym, o wilgotności około 23%, wskaźnik plastyczności  $I_p \sim 48\%$ , pochodzące z Warszawy. Próbki po zamontowaniu w komorze oraz po założeniu czujników naprębkowych były poddawane procedurze nasycania metodą ciśnienia wstecznego [4]. Ciśnienie w komorze oraz wsteczne zwiększano równocześnie. Umożliwiło to utrzymanie naprężenia efektywnego w próbce na stałym poziomie. Każdy stopień nasycania utrzymywano do chwili ustania przepływu wody do próbki i ustabilizowaniu się ciśnienia wody w porach, co wymagało około 6 ÷ 8 godzin. Po każdym etapie wtłaczania wody sprawdzano stopień nasycenia próbki poprzez

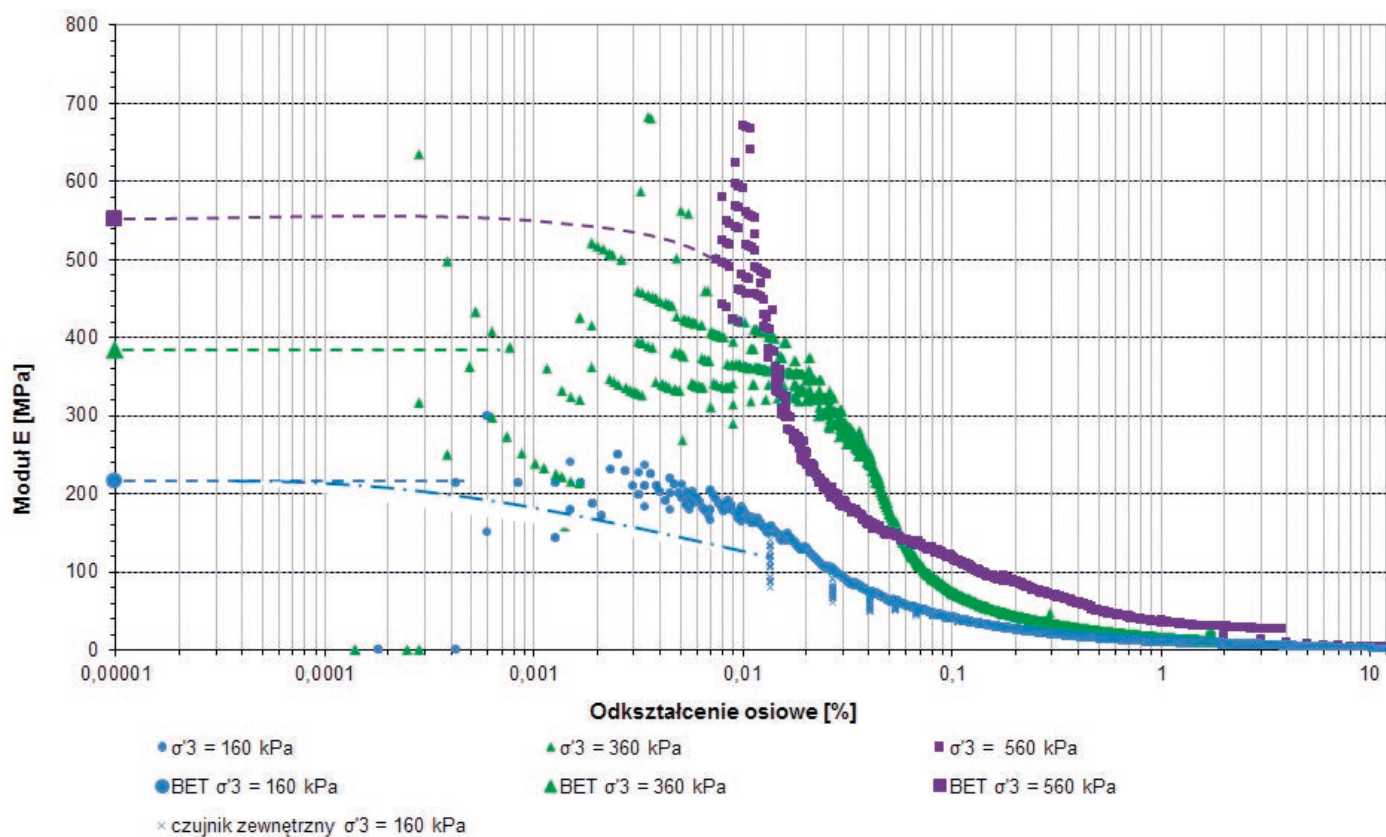
oznaczenie parametru Skempton  $B$ . Ostateczna wartość parametru  $B$  wynosiła nie mniej niż 0,95. W dalszej kolejności próbki były konsolidowane izotropowo przy trzech różnych wartościach naprężenia efektywnego  $\sigma'_{3c}$  równemu 160, 360 i 560 kPa. Proces konsolidacji uznawano za zakończony w momencie zaniku wypływu wody z próbki oraz po wyrównaniu się ciśnienia wody w porach oraz wstecznego. Po zakończeniu etapu konsolidacji izotropowej rozpoczynano ścinanie próbki metodą bez odpływu (CIU) i z odpływem (CID). Prędkość ścinania próbki wyznaczono na podstawie danych uzyskanych na etapie konsolidacji oraz na podstawie wiedzy i doświadczenia autora [5].

## WYNIKI BADAŃ

Zbadano dwie serie próbek z zamontowanymi czujnikami naprębkowymi. W celu uzupełnienia przebiegu krzywej  $E - \epsilon$  i weryfikacji uzyskanych wartości modułu przeprowadzono badanie z użyciem elementów piezoelektrycznych (Bender Element Test [6]). Na podstawie przebiegu badań trójosiowych stworzono wykres zależności modułu – odkształcenie osiowe dla odkształceń w zakresie od 0,0001% do 10%. Na wykresach zaznaczono również wartości modułu odkształcenia wyznaczonego na podstawie pomiaru przemieszczenia z czujnika znajdującego się na zewnątrz oraz jedną z możliwych interpretacji przebiegu wartości modułu (linia kreskowana z kropką). Na obu wykresach pokazano tylko jedną taką linię dla najmniejszej wartości naprężenia efektywnego.



Rys. 2. Wykres zależności modułu w stosunku do odkształcenia próbki iłu badanej w warunkach bez odpływu (CIU)



Rys. 3. Wykres zależności modułu w stosunku do odkształcenia próbki iłu badanej w warunkach z odpływem (CID)



## MODEL HARDENING SOIL SMALL

Model *Hardening Soil* (HS) charakteryzuje się nieliniową zależnością naprężenie – odkształcenie, pozwala na zmiany sztywności w zależności od stanu naprężenia, a w wersji rozszerzonej (*HS small*) dodatkowo uwzględnia zmianę sztywności w zakresie małych odkształceń. Szczegółowy opis modelu oraz sposób bezpośredniego i pośredniego wyznaczania parametrów materiałowych na podstawie badań lub na podstawie dostępnych w literaturze korelacji można odnaleźć w pracach [7] i [8].

W tabl. 1 przedstawiono zestaw wymaganych parametrów w modelu HSs na podstawie wyników przeprowadzonych badań

Tabl. 1. Wybrane parametry modelu HSs wyprowadzone z badań

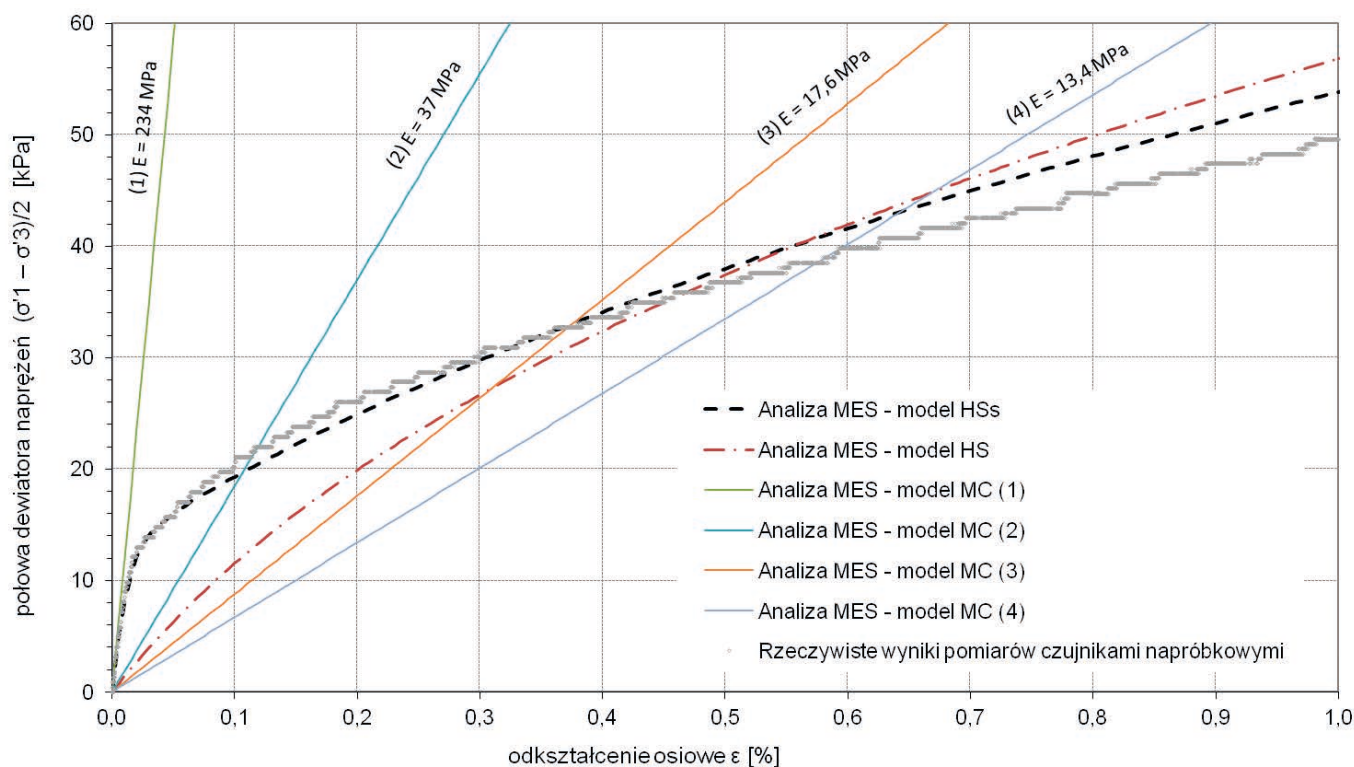
| CIU |                |       |          |      |       |         |       |       |
|-----|----------------|-------|----------|------|-------|---------|-------|-------|
|     | $\sigma'_{3c}$ | $G_0$ | $E_{50}$ | $m$  | $c'$  | $\phi'$ | $q_f$ | $R_f$ |
|     | [kPa]          | [MPa] | [MPa]    | [-]  | [kPa] | [°]     | [kPa] | [-]   |
| A   | 160            | 81    | 9,2      | 0,64 | 30,0  | 16,0    | 126   | 0,81  |
| B   | 360            | 118   | 16,7     |      |       |         | 237   | 0,77  |
| C   | 560            | 215   | 15,7     |      |       |         | 334   | 0,81  |
| CID |                |       |          |      |       |         |       |       |
|     | $\sigma'_{3c}$ | $G_0$ | $E_{50}$ | $m$  | $c'$  | $\phi'$ | $q_f$ | $R_f$ |
|     | [kPa]          | [MPa] | [kPa]    | [-]  | [kPa] | [°]     | [kPa] | [-]   |
| A   | 160            | 90    | 10,3     | 0,67 | 35,0  | 19,0    | 228   | 0,50  |
| B   | 360            | 160   | 14,5     |      |       |         | 550   | 0,78  |
| C   | 560            | 230   | 19,3     |      |       |         | 610   | 0,80  |

TRX w wersji z czujnikami naprędkowymi oraz pomiarami sejsmicznymi czujnikami rodzaju Bender Element. Na potrzeby niniejszego artykułu przedstawione parametry wyprowadzono na podstawie pojedynczych serii badań. Należy jednak pamiętać, że na potrzeby modelowania numerycznego, szczególnie projektowania obiektów współpracujących ze znacznymi obszarami podłoża, parametry przyjęte jako charakterystyczne powinny stanowić bezpieczne oszacowanie wyników zarówno badań laboratoryjnych, jak i polowych. Z tego względu w zagadnieniach praktycznych zaleca się kompleksowe rozpatrywanie wyników uzyskanych metodami bezpośrednimi oraz ich weryfikację przy zastosowaniu korelacji dostępnych w literaturze.

## ANALIZA NUMERYCZNA BADANIA TRÓJOSIOWEGO

W celu podkreślenia istotnego wpływu doboru modelu numerycznego gruntu na potrzeby modelowania przeprowadzono symulację badania trójosiowego w warunkach pełnego odpływu przy zastosowaniu nieliniowego modelu gruntu HS z i bez rozszerzenia o zakres małych odkształceń oraz modelu liniowo-sprężystego idealnie plastycznego z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra (C-M) przy przyjętych wartościach modułów z różnych zakresów odkształceń, typowych w problemach geoinżynierii. Otrzymane wyniki porównano z początkowym odcinkiem krzywej otrzymanej z badania trójosiowego w warunkach swobodnego odpływu z zastosowaniem czujników naprędkowych.

Otrzymane rezultaty symulacji badania TRX CID wykazują dużą zbieżność wyników otrzymanych z symulacji modelem HSs, szczególnie w początkowym odcinku krzywej, w zakresie odkształceń do 1% (zakres pracy typowej konstrukcji). Za-



Rys. 4. Modele numeryczne gruntu: z warunkiem C-M (linia ciągła), HSs (linia przerywana), HS (linia przerywana z kropką) na tle rzeczywistych wyników pomiarów czujnikami naprędkowymi w zakresie do 1% odkształcenia

stosowanie tego modelu z pominięciem sztywności w zakresie małych odkształceń ma wpływ głównie na początkowy odcinek krzywej. Jak widać na wykresie modele liniowo-sprężyste idealnie plastyczne (np. C-M) nie odzwierciedlają rzeczywistego zachowania gruntu, gdyż pomijają zmianę sztywności wraz z przyrostem odkształcenia. Z praktycznego punktu widzenia mogą być one stosowane jedynie w przypadkach, gdy jest znany zakres odkształcenia, w jakim ma pracować rozpatrywana konstrukcja i modelowany grunt. Opis sposobu określania sztywności gruntu w zależności od wartości odkształceń na podstawie polowych i laboratoryjnych metod badań można znaleźć w publikacji [9]. W przypadku modelowania współpracy z podłożem konstrukcji i ośrodka gruntowego pracujących w zmiennych zakresach odkształceń lub gdy zakres ten nie jest znany, jest uzasadnione stosowanie nieliniowego modelu HSs.

## WNIOSKI

Zastosowanie dodatkowych czujników napróbkowych znacznie poprawia jakość otrzymywanych rezultatów w odniesieniu do parametrów odkształceniowych badanej próbki gruntu. Różnica w sposobie prowadzenia pomiaru ma istotne znaczenie w przypadku realizacji badania na potrzeby modelowania komputerowego z zastosowaniem zaawansowanych modeli numerycznych.

W przypadku zastosowania modelu *Hardening Soil small* standardowe czujniki zlokalizowane poza komorą nie dają możliwości wiarygodnej oceny zmiany sztywności na skutek przyrostu odkształceń poniżej 0,1%. Zastosowanie czujników napróbkowych zwiększa zakres otrzymywanych pomiarów odkształceń nawet do 0,0001%. Skorelowanie otrzymanych rezultatów z wynikami modułów początkowych ( $E_0$ ) uzyskanymi na podstawie badania z użyciem Bender Elements pozwala na uzyskanie pełnego przebiegu krzywej  $E - \varepsilon$ . Uzyskanie zwiększonej dokładności pomiaru pozwala również na określenie pełnego przebiegu krzywej  $G/G_{\max} - \gamma$ , co z kolei umożliwi bezpośrednie odczytywanie wartości  $\gamma_{0,7}$  (wartość odkształcenia postaciowego przy wartości modułu ścinania  $G$  równej  $0,722G_{\max}$ ) na podsta-

wie przebiegu badań trójosiowych. Jest to jeden z podstawowych parametrów wejściowych wymaganych w modelu HSs.. Będzie to stanowiło tematykę kolejnych publikacji.

Przedstawiony przykład analizy potwierdza, że nieliniowo sprężysto-plastyczne modele gruntów, takie jak *Hardening Soil small* wierniej odwzorowują zachowanie ośrodka gruntowego w stosunku do nadal powszechnie stosowanych modeli liniowo-sprężystych idealnie plastycznych.

## LITERATURA

1. Atkinson J. H.: Non-Linear soil stiffness in routine design, *Geotechnique*, 50, No. 5, 2000.
2. Baldi, G. Hight, D. W., Thomas G. E.: A revolution of conventional triaxial tests methods. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, 1988.
3. Clayton, C. I. R. Khattrush, S. A. Bica, A. V. D., Siddique A.: The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, 1989.
4. K.H. HEAD: Manual of soil testing. Volume 3 Effective stress test. 1998.
5. Godlewski T., Kacprzak G., Witowski M.: Praktyczna ocena parametrów geotechnicznych podłoża do projektowania ścian szczelinowych posadowionych w ilach „plioceńskich” Warszawy. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Politechnika Białostocka, Vol. 4 No.1, Białystok, 2013.
6. Brignoli, E. G. M., Gotti, M., Stokoe, K. H.: Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, 1996.
7. Obrzud R., Truty A.: The Hardening Soil model – a practical guidebook, Zace services Ltd., 2012.
8. Truty A., Obrzud R.: Komputerowa analiza współdziałania konstrukcji budowlanych z podłożem przy zastosowaniu zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntów kalibrowanych na podstawie wyników badań laboratoryjnych i polowych. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Projektowania Konstrukcji, 2013.
9. Godlewski T., Szczepański T.: Nieliniowa charakterystyka sztywności gruntu ( $G_0$ ) – metody oznaczania i przykłady zastosowań. XXXIV ZSMGIG, Kudowa Zdrój, 14-18 marca 2011 r. kwartalnik AGH, 2011, rok 35, zeszyt 2, Kraków 2011.