

dr inż. Krzysztof Nepelski^{1*)}

ORCID: 0000-0001-9495-6457

dr hab. inż. Tomasz Godlewski, prof. ITB²⁾

ORCID: 0000-0001-7986-5995

mgr inż. Małgorzata Rudko³⁾

dr Marcin Witowski²⁾

ORCID: 0000-0001-6178-3852

Parametryzacja sztywności podłoża lessowego z wykorzystaniem testów in situ

Loess subsoil parameterization using in situ tests

DOI: 10.15199/33.2023.03.06

Streszczenie. Pomimo względnej jednorodności makroskopowej, lessy charakteryzują się zróżnicowaną sztywnością. Budowa modelu geotechnicznego podłoża powinna bazować na testach in situ. Właściwy opis zachowania gruntu możliwy jest jedynie z wykorzystaniem danych z wielu metod badawczych, pozwalających na ocenę statystyczną, jak np. CPTU i DMT. Testy te zapewniają duży zbiór danych, umożliwiając wyodrębnianie stref o zbliżonej sztywności oraz wyprowadzanie parametrów odkształceniowych. W artykule przedstawiono metodę interpretacji parametrów odkształceniowych z testów in situ.

Słowa kluczowe: CPTU; SDMT; lessy; sztywność; krzywa degradacji sztywności.

Abstract. Despite the relative macroscopic homogeneity, loess has diversified stiffness. The construction of the geotechnical model of the subsoil should be based on in situ tests. Proper description of soil behaviour is possible only with the use of data from many investigation methods, in particular allowing for statistical evaluation, such as CPTU and DMT. These tests provide a large set of data, enabling the identification of zones of similar stiffness and the derivation of deformation parameters. The paper presents the methodology of interpreting deformation parameters from in situ tests.

Keywords: CPTU; SDMT; loess; stiffness; stiffness degradation curve.

Badania polowe o quasi-ciągłym zapisie danych, jak np. CPTU lub DMT, są bardzo pomocnym narzędziem w analizach geotechnicznych. Testy wykonywane in situ mogą być podstawą zarówno do określenia profilu gruntowego i budowy modelu geotechnicznego, co opisano w artykule [1], jak również do wyprowadzenia parametrów geotechnicznych niezbędnych do szacowania osiadania projektowanych budowli. Ze względu na nieliniowy charakter pracy gruntu, istotne jest stosowanie właściwych formuł transformujących dane z sondowania na konkretne parametry geotechniczne. W artykule przedstawiono metodę wyprowadzania parametrów odkształceniowych z badań połowych gruntów lessowych.

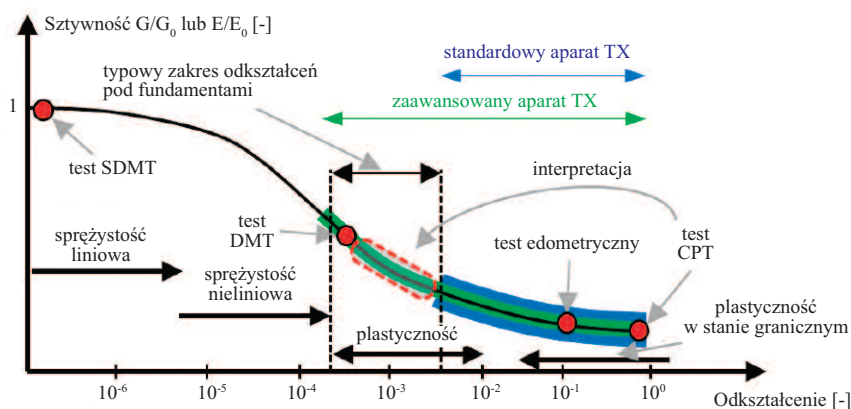
łej wartości. Błąd wynikający z takiego uproszczenia jest akceptowalny, o ile parametr ten będzie dotyczył odkształceń i naprężeń odpowiadających rzeczywistemu stanowi. W mechanice gruntów bardzo dużym krokiem naprzód było odkrycie silnej nieliniowości modułu odkształcenia w strefie małych odkształceń ($\gamma_s = 10^{-6} \div 10^{-3}$). Zmienność sztywności gruntu wraz z zaznaczeniem wybranych metod badawczych do jej identyfikacji przedstawia rysunek 1.

Nieliniowość modułu w strefie małych odkształceń stała się jednym z trzech podstawowych pojęć we współczesnej mechanice gruntów, podobnie jak **naprężenia efektywne** czy **stan krytyczny**. Są to zagadnienia, które zo-

stały wprowadzone do zaawansowanych modeli konstytutywnych w celu opisu zachowania gruntu (najczęściej modele sprężysto-plastyczne ze wzmocnieniem kinematycznym). Tym samym konieczność pozyskiwania odpowiednich parametrów do opisu takich modeli stała się podstawą rozwoju nowoczesnej aparatury pomiarowej i nowych metod badawczych. Stosowane w tym celu badania penetracyjne bardzo dobrej jakości, takie jak sondowanie SCPTU [3] czy SDMT [4 – 5] mają przewagę nad badaniami laboratoryjnymi (warunki in situ), a dzięki swojej efektywności (duża częstotliwość pomiarów dzięki zautomatyzowanym systemom rejestracji) umożliwiają uzyskanie nie tylko cią-

Sztywność podłoża

Podłoże gruntowe jest ośrodkiem o silnie nieliniowym zachowaniu, dlatego też najważniejszy jest opis zależności naprężenie-odkształcenie za pomocą złożonej funkcji. W praktyce inżynierskiej najczęściej stosuje się jednak opis ściśłości za pomocą parametru o sta-



Rys. 1. Sztywność gruntu – krzywa degradacji na podstawie [2]

Fig. 1. Subsoil stiffness – degradation curve based on [2]

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu

³⁾ Geonep Geotechnika

^{*} Adres do korespondencji: k.nepelski@pollub.pl

głej charakterystyki zmienności warunków gruntowych, w tym wartości parametrów mechanicznych w profilu pionowym (opisujących wytrzymałość i odkształcalność gruntów, niekiedy też filtrację), ale również możliwość poszukiwania ich rozkładów przestrzennych. Dodatkowo testy in situ mogą być pomocne w ustalaniu stanu naprężeń początkowych w podłożu przez szacowanie stopnia prekonsolidacji gruntu (OCR), czy też współczynnika parcia spoczynkowego (K_0) [6].

Parametry odkształceniowe lessów z badań in situ

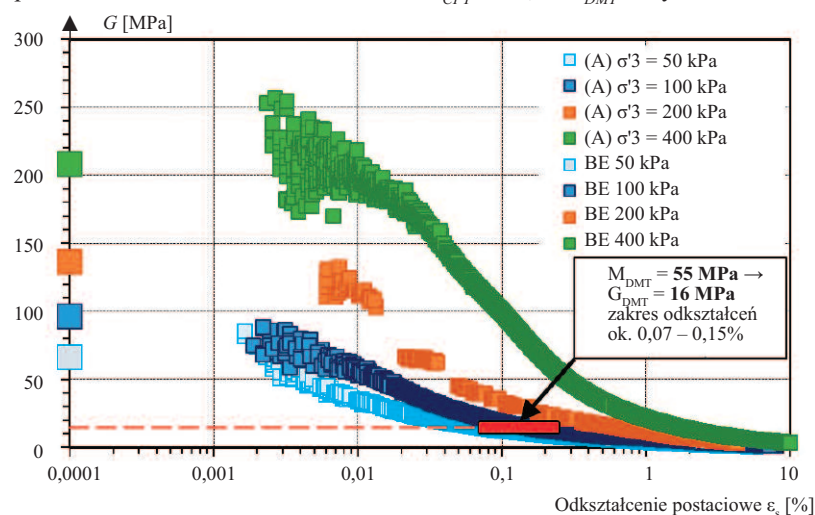
Wymiernym odzwierciedleniem sztywności podłoża jest rejestrowane przemieszczenie konstrukcji, która jest na nim posadowiona. W celu oszacowania osiadania można stosować parametry odkształceniowe charakteryzujące zachowanie gruntu w zróżnicowanym zakresie odkształceń. Testy in situ, pomimo wielu zalet, mają jednak pewne ograniczenia i niepewności, dlatego powinny być korelowane z badaniami laboratoryjnymi, w których można m.in. kontrolować warunki brzegowe.

Uzyskanie pełnego opisu gruntu w zakresie opisywanych charakterystyk odkształceniowych wymaga wykonywania czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych z wykorzystaniem kilku metod, np. testu trójosiowego ściskania (TRX) połączonego z pomiarami sejsmicznymi z wykorzystaniem elementów typu „bender” (BET – *bender element test*). Dodatkowym ograniczeniem jest często mała liczba próbek oraz wymagana jakość ich pobrania. Te uwarunkowania przekładają się na jakość i wiarygodność otrzymywanych parametrów, które następnie są implementowane do analiz numerycznych. W tej sytuacji wykorzystanie doświadczeń o charakterze regionalnym (zebrane bazy wyników) oraz badań polowych staje się jedynym skutecznym sposobem pozyskiwania parametrów gruntów niezbędnych w poprawnym projektowaniu [7]. Po ustaleniu wiarygodnych korelacji można z dużym prawdopodobieństwem interpretować wiele parametrów gruntu bezpośrednio z wyników testów polowych. Wymagane są jednak odpowiednie referencyjne badania laboratoryjne.

Kompleksową analizę wykonano na poletku Jemiołuszki w Lublinie, gdzie oprócz testów in situ (SDMT, CPT) przeprowadzono badania trójosiowe. Cztery próbki skonsolidowano przy naprężeniach efektywnych 50, 100, 200 i 400 kPa, a następnie wykonano testy BET oraz ścinania z zamontowanymi czujnikami naprębkowymi [8]. Ponadto jedna dodatkowa próbka została skonsolidowana wielostopniowo do naprężeń efektywnych 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 i 1100 kPa, gdzie na każdym stopniu wykonano badanie propagacji prędkości fali sejsmicznej. Z zarejestrowanych wyników opracowano krzywe $G-\varepsilon_s$ (moduł odkształcenia postaciowego – odkształcenie postaciowe) odzwierciedlające zmienną sztywność w pełnym zakresie odkształceń przy różnym poziomie naprężeń (rysunek 2). Na rysunku 2 zaznaczono również wartość G_{DMT} uzyskaną z pomiaru DMT na poziomie pobrania próbki.

geotechnicznych. Niestety ze względu na charakter badania, wyznaczenie modułu ściśliwości z wyników CPT wymaga kalibracji w przypadku różnych gruntów. W praktyce do wyprowadzania modułów ściśliwości M_{CPT} stosowane są dwie zależności – Senneseta [11] lub Sanglerata [12]. Obie bazują na oporze stożka – pomierzonym q_c lub skorygowanym q_t pomniejszonym o naprężenia pierwotne σ_{v0} , zgodnie z wzorami: wg Sanglerata: $M_{CPT} = \alpha_m \cdot q_c$ lub wg Senneseta: $M_{CPT} = \alpha \cdot q_n = \alpha \cdot (q_t - \sigma_{v0})$.

Kluczowe jest zastosowanie odpowiedniego współczynnika empirycznego α_m , który może przyjmować wartości w zakresie 1 – 15 [12 – 13]. W przypadku lessów zaproponowaliśmy własne współczynniki. Godlewski [7] na podstawie wytycznych [12] wskazał $\alpha_m = 6,9$, a Nepelski po analizie osiadania rzeczywistego obiektów [10] wyznaczył uogólniony $\alpha_m = 6,0$, jednocześnie wskazując, że przy takim podejściu $M_{CPT} = 0,9 \cdot M_{DMT}$. Wynika to m.in.



Rys. 2. Degradacja modułów sztywności lessów – poletko Jemiołuszki w Lublinie
Fig. 2. Stiffness moduli degradation for loesses – Jemiołuszki site in Lublin

Korelacja $M_{DMT}-M_{CPT}$

Dużą zgodność obliczeniową z rzeczywistym osiadczeniem obiektów budowlanych uzyskuje się z wykorzystaniem modułów ściśliwości M_{DMT} [7, 9 – 10]. Testy DMT są zazwyczaj wykonywane w wybranych punktach badawczych jako badania uzupełniające, natomiast dużo częściej badaniem odniesienia są testy CPT/CPTU, przy których częstotliwość pomiarów jest znacznie większa. Wyniki sondowań statycznych są podstawą do wyprowadzania parametrów

z ostrożnego podejścia do szacowania modułów ściśliwości z badań CPT, gdyż w tym teście nie mierzy się bezpośrednio odkształceń. W późniejszych badaniach, po analizie 27 węzłów badawczych CPT/CPTU-DMT/SDMT, Nepelski i Rudko [14] wyprowadzili zależność pomiędzy oporem stożka q_c a modułem ściśliwości M_{DMT} w formie współczynników α_m (tabela 1). Uogólniony $\alpha_m = 6,8$ bardzo dobrze wpisuje się we wcześniej przytoczone wytyczne oraz wskazuje na interpretację M_{CPT} do poziomu M_{DMT}

Głębsza analiza wskazuje natomiast potrzebę rozróżniania α_m w zależności od facji lessów oraz wskaźnika parcia bocznego K_D , ponieważ zauważalne jest zróżnicowanie w różnych grupach facyjalnych i na różnej głębokości, co pośrednio jest powiązane z wartością K_D .

Tabela 1. Współczynniki α_m dla lessów
Table 1. α_m coefficients for loesses

Grupa facyjalna	$K_D < 4$	$K_D > 4$
Eoliczno-deluwialne	4,9	14,6
Eoliczne	5,5	9,4
Eoliczno-aluwialne	3,8	6,3
Lessy eoliczne (ogólnie)	7,5	
Lessy (ogólnie)	6,8	

Korelacja $M_{DMT}/G_{DMT}-G_0$

Szywność podłoża zmienia się wraz ze wzrostem naprężeń in situ. Pomiar DMT, w zależności od rodzaju gruntu, odwzorowuje zachowaniu w zakresie odkształceń 0,01 – 10% [5, 15 – 16]. Parametry wskaźnikowe z badań CPT i DMT pyłów lessowych wskazują na zachowanie z pogranicza gruntów piaszczystych. Zgodnie z [15] w uogólnieniu można zatem przyjmować, że wartości M_{DMT} odpowiadają zakresowi odkształceń 0,07 – 0,15%. Natomiast G_0 z pomiarów sejsmicznych opisuje początkową sztywność, która zwiększa się wraz ze wzrostem naprężeń in situ.

W celu określenia wskaźników G_0/M_{DMT} lub G_{DMT}/G_0 przeanalizowano 16 testów SDMT. Wartości M_{DMT} przeliczono na G_{DMT} z założeniem ujednoczonego współczynnika Poissona $\nu = 0,3$, wykorzystując zależność:

$$G_{DMT} = M_{DMT} (1 - 2\nu/2(1 - \nu)) \quad (3)$$

Prędkość fali poprzecznej V_s zarejestrowana w pomiarach sejsmicznych w połączeniu z gęstością objętościową gruntu ρ były podstawą do wyznaczenia G_0 , obliczonych z zależności:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4)$$

Wskaźniki G_0/M_{DMT} lub G_{DMT}/G_0 łączy się zazwyczaj z K_D [5, 7, 9], co wykonano w przypadku analizowanych lessów (rysunek 3), przedstawiając wyniki na tle innych polskich gruntów [7] oraz referencyjnych zależności Marchettiego [17]. Wyniki lessów są podobne do gruntów z pogranicza piaszczystych i pylistych. Wartość G_0 w dużym stopniu zależy od naprężeń in situ, dlatego dużo większe wskaźniki G_0/M_{DMT} uzyskiwano w przypadku grupy eoliczno-aluwialnej. Grunty te występują od kilku do kilkunastu metrów poniżej terenu, dlatego też ich G_0 jest większy niż facji występujących płycej. Na rysunku 4 przedstawiono dane pokazujące trend wzrostowy początkowej sztywności podłoża lessowego w zależności od naprężeń in situ. Wykres uzupełniono o dane z laboratoryjnych pomiarów BET z poletka Jemiołuszki. Uzyskano zależności:

$$G_0 = 17,72 * \sigma_v^{0,40} \text{ z dopasowaniem } R^2 = 0,62 \text{ w przypadku wyników SDMT (5);}$$

$$G_0 = 8,31 * \sigma_3^{0,54} \text{ z dopasowaniem } R^2 = 1,00 \text{ w przypadku wyników laboratoryjnych BET (6);}$$

$$G_0 = 14,29 * \sigma_3^{0,44} \text{ z dopasowaniem } R^2 = 0,76 \text{ w przypadku wyników łącznych SDMT i BET (7)}$$

oraz:

$$G_0 = G_{DMT} * (7,03 * \sigma_v^{-0,86}) \text{ – dotyczy wyników SDMT (8)}$$

$$G_0 = G_{DMT} * (1,86 * \sigma_3^{-0,54}) \text{ – dotyczy wyników laboratoryjnych BET (9)}$$

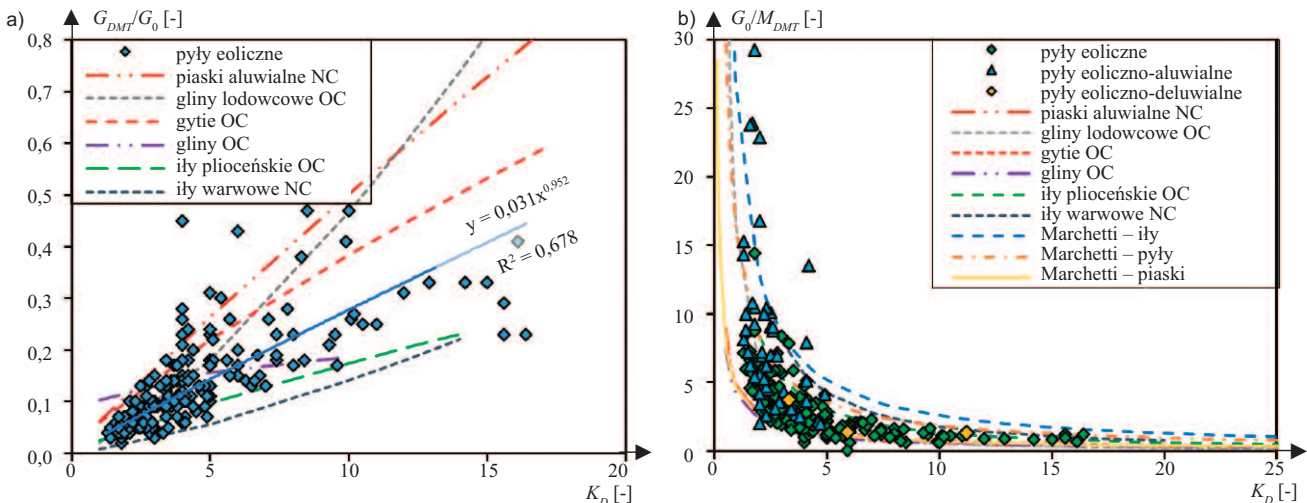
$$G_0 = G_{DMT} * (3,61 * \sigma_3^{-0,72}) \text{ – dotyczy wyników łącznych SDMT i BET (10).}$$

Niepełne dopasowanie wyników laboratoryjnych i terenowych może wg nas wynikać z mniejszej liczby danych BET, braku pomiarów SDMT w przypadku większej wartości naprężeń oraz z faktu, że pomiary w terenie (SDMT) wykonuje się na gruntach nienasyconych, natomiast pomiary w laboratorium (BET) wykonano na próbkach nasyconych. Uzyskane zależności i zbieżność pomiarów polowych z laboratoryjnymi należy jednak uznać za zadowalającą.

Ocena sztywności lessów

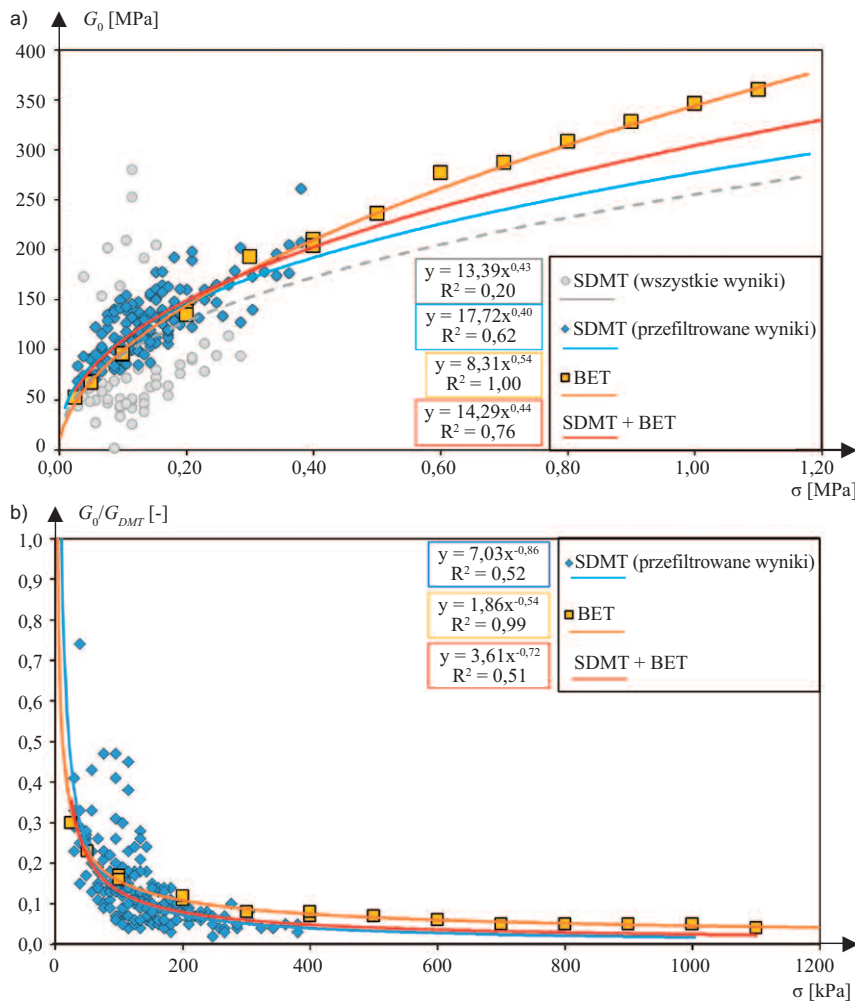
W ramach podsumowania analiz zebrano wartości parametrów odkształceniowych lessów eolicznych (tabela 2) ze wszystkich dostępnych pomiarów: SDMT; DMT; CPT; PMT oraz edometrycznych. W celu bezpośredniego porównania wartości z różnych metod badawczych, wykonanych w różnym zakresie odkształceń, wszystkie parametry sprowadzono do równoważnego jednoosiowego modułu ściśliwości M .

Znając szacunkowe odkształcenia, przy których wykonuje się dane badanie, wykreślono uogólnioną krzywą degradacji sztywności podłoża lessowego w rejonie Lublina (rysunek 5). Linia ciągła ukazuje przebieg wartości średnich,



Rys. 3. Wykresy wskaźników: a) G_{DMT}/G_0 oraz b) G_0/M_{DMT} ver. K_D w przypadku lessów (na tle innych gruntów polskich oraz pierwotnych zależności Marchettiego)

Fig. 3. Indicator charts: a) G_{DMT}/G_0 and b) G_0/M_{DMT} ver. K_D for loesses (compared to other-Polish soils and Marchetti's original formulas)



Rys. 4. Zmiana sztywności lessów wraz ze wzrostem naprężeń geostatycznych: a) modułu ścinania G_0 ; b) wskaźnika G_0/G_{DMT}
 Fig. 4. Loess stiffness change depending on geostatic stress: a) shear modulus G_0 ; b) indicator G_0/G_{DMT}

Tabela 2. Zestawienie modułów ścisłości lessów lubelskich wyznaczonych różnymi metodami

Table 2. Constrained moduli for loesses in the Lublin area determined with different methods

Metoda badawcza	SDMT	DMT	CPT	PMT	EDO
Parametr	M_{max} (przeliczone z G_0)	M_{DMT}	M_{CPT} ($\alpha_m = 7,5$)	M_M (przeliczone z E_M)	E_{oed} ($\sigma = 100 - 200$ kPa)
Minimum	240	10	16,9	1,3	2,6
Maksimum	710	100	80,6	35	15,3
Średnia	444	52,2	48,8	17,9	7,8
Mediana	442	48,3	46,9	18,8	7,8
Liczba wyników	142	894 (179 m)	61822 (6182 m)	37	70

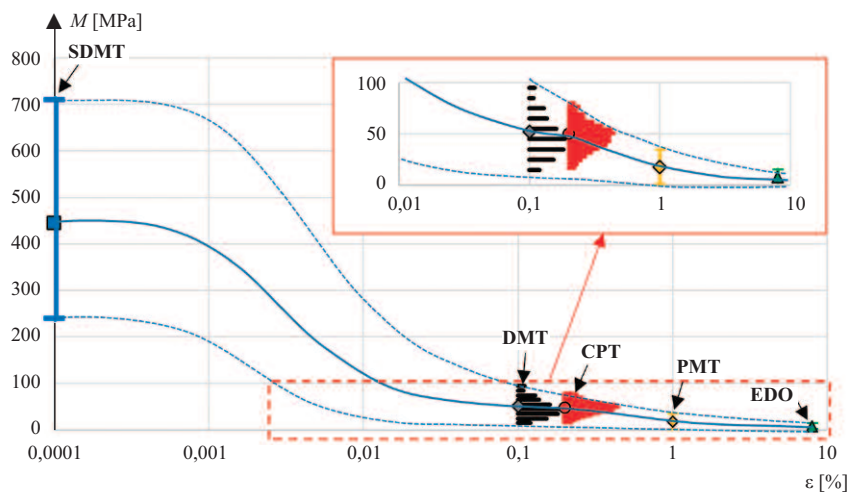
natomiast linie przerywane stanowią obwiednię zarejestrowanych wartości odzwierciedlających ponad 90% wszystkich danych. Skrajnie różniące się wartości zostały odrzucone, aby nie zniekształcały obrazu obwiedni. Dodatkowo w przypadku pomiarów DMT i CPT, w których zbiór danych jest największy, wstawiono histogram procentowego

rozkładu wszystkich wyników, co szczegółowo widać na powiększeniu wykresu w zakresie odkształceń 0,01 – 10%. Wartości maksymalnych modułów ścisłości M_{max} z badań sejsmicznych należy traktować jedynie pogłównie, ponieważ w dużej mierze zależą one od naprężeń in situ, a więc głębokości wykonanego pomiaru.

Istotne jest właściwe wykorzystywanie wyników badań. Sztywność gruntu opisaną za pomocą takich funkcji wykorzystuje się w praktyce projektowej jedynie w zaawansowanych modelach MES, natomiast w przypadku większości zagadnień inżynierskich stosuje się moduły sieciowe. Należy mieć świadomość, że moduły ścisłości wyznaczone w klasycznym badaniu edometrycznym są znacznym uproszczeniem i opisują grunt w zakresie dużych odkształceń, więc nie dla wszystkich gruntów i przypadków projektowych są one odpowiednie. Z reguły lepiej odwzorowują pracę gruntów słabych, natomiast w przypadku stosunkowo mocnego podłoża lessowego parametry te nie są rekomendowane do szacowania osiadania, gdyż zazwyczaj uzyskuje się znaczne przeszacowanie [10]. Duże odkształcenia powstają jedynie w strefie bezpośrednio pod fundamentem, a wraz z głębokością zanikają, więc stosowanie modułów edometrycznych w obrębie całej strefy współpracującej z fundamentem jest błędne. Na dużej głębokości odkształcenia są znikome i bardziej adekwatne są parametry uzyskiwane w testach sejsmicznych. Swego rodzaju kompromisem są dane z badań DMT, które de facto również są modułami siecznymi, ale wyznaczonymi przy odkształceniach zbliżonych do występujących pod fundamentami. Jednocześnie z uwagi na prowadzenie badań w warunkach naprężeń in situ metoda ta poprawnie odzwierciedla również wzrost sztywności podłoża wraz z głębokością. Wartości uzyskane z tych testów zaleca się stosować w analizie osiadania i w związku z tym niezwykle ważne są właściwe korelacje z innymi metodami badawczymi, w szczególności z testami CPTU i walidującymi badaniami w zaawansowanych komorach trójosiowych z możliwością rejestracji przebiegu pełnego spectrum odkształceń gruntu.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule wyniki odnoszą się do gruntów z Płaskowyżu Nałęczowskiego w rejonie Lublina. Zachowanie lessów z innych rejonów Polski i świata może być tożsame, lecz niewykluczona jest regionalna specyfika, gdyż zachowanie lessów powstających w róż-



Rys. 5. Uogólniona krzywa degradacji sztywności w przypadku podłoża lessowego w Lublinie
Fig. 5. Generalized stiffness degradation curve for loess subsoil in Lublin

nych okresach, rejonach i przy współudziale innych zjawisk może się różnić.

Lessy typowe (eoliczne) występują zazwyczaj w stanie zwartym, ale w ich obrębie występuje silne zróżnicowanie sztywności, na co wskazują testy in situ CPTU i DMT [1, 10]. Powinno to być uwzględniane przy opracowywaniu modelu podłoża gruntowego. Dzięki quasi-ciągłym pomiarom w testach in situ, a przez to dużej liczbie danych, możliwe jest wydzielanie warstw o zbliżonej sztywności wraz z ich statystycznym opisem. Ponadto dzięki wykonaniu kompleksowego zestawu polowych badań kalibracyjnych z laboratoryjnymi możliwe jest wyznaczanie wiarygodnych charakterystyk gruntu z wykorzystaniem jednej metody badawczej. Do prawidłowej budowy modelu sztywności podłoża preferowane są testy in situ: CPTU jako podstawowe oraz uzupełniająco SDMT i PMT. Tylko sondowania dostarczają informacji w zakresie ilościowej oceny właściwości podłoża, natomiast rozpoznanie z odwiertów pozwala na jakościową ocenę profilu z możliwością pozyskania próbek odpowiedniej klasy jakości do walidujących testów mechanicznych w laboratorium. W związku z tym, testy in situ powinny stanowić podstawę w procesie rozpoznania i projektowania geotechnicznego. Weryfikacją przyjętych formuł interpretacyjnych powinny być badania laboratoryjne wykonywane na reprezentatywnych próbkach. Przy wyrowadzaniu modułów ścisłości z testów CPT w przypadku lessów zaleca

się stosowanie współczynników α_m adekwatnych dla danej facji (tabela 2). Wymaga to jednak szczegółowego rozpoznania podłoża i rozróżniania genetycznego poszczególnych stref lessów. Natomiast przy braku takiego rozpoznania można stosować współczynniki uogólnione, mając jednak na uwadze większy błąd wyznaczonego M_{CPT} .

Pokazane zależności i opisane modele referencyjne zachowania lessów mogą stanowić podstawę do wyznaczania parametrów w pełnym zakresie odkształcenia na podstawie wyłącznie wyników z badań polowych. Jest to możliwe, gdyż jak wskazują doświadczenia innych badaczy [17], wyznaczona z badań in situ wartość wskaźnika G_{DMT}/G_0 służy jako rzędna znormalizowanego wykresu $G-\gamma$. Na tej podstawie można, przez proponowaną krzywą pomocniczą, w sposób przybliżony określać rozkład zmienności parametru sprężystości w całym zakresie analizowanych odkształceń na podstawie jednej metody badawczej (w tym przypadku DMT). W sytuacjach, gdy pomiary sejsmiczne są niedostępne lub warunki ich wykonania niesprzyjające (np. obszar miejski, wpływ zakłóceń itp.), korzystając z podanych zależności na podstawie jedynie badań penetracyjnych (DMT, CPTU), możliwe jest wyznaczenie wartości G_{DMT} i na tej podstawie przy wykorzystaniu podanych modeli (lub innych krzywych referencyjnych z badań własnych lub bazy danych) oszacowanie pełnej charakterystyki zmienności sztywności. W celu

przybliżonego określenia G_0 analizowanych gruntów zaleca się korzystanie z formuły 10.

Literatura

[1] Nepelski K, Godlewski T, Rudko M, Witowski M. Budowa modelu geotechnicznego podłoża lessowego. *Materiały Budowlane*. 2023; DOI: 10.15199/33.2023.02.11.

[2] Atkinson J, Sallfors G. Experimental determination of soil properties. *Proc. 10th ECSMFE*. 1991; t. 3, Florence.

[3] Lunne T, Robertson PK, Powell J. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London: E&FN Spon; 1997.

[4] Marchetti S. In situ tests by flat dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1980; t. 105, nr III, s. 299 – 321.

[5] Marchetti S, Monaco P, Totani G, Marchetti D. In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT). *Proceedings From Research to Practice in Geot. Engng.* 2008; t. 180, s. 292 – 311.

[6] Wierzbicki J. Evaluation of subsoil overconsolidation by means of in situ tests at aspect of its origin. *Rozprawy Naukowe nr 410*. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu; 2010.

[7] Godlewski T. Evaluation of stiffness degradation curves from in situ tests in various soil types. *Archives of Civil Engineering*. 2018; <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0075>.

[8] Witowski M. Local displacement transducer with miniature position encoder. *Geotechnical Testing Journal*. 2018; 41 (6), 1147–1154.

[9] Marchetti S. Some 2015 Updates to the TC16 DMT Report 2001. *The 3rd International Conference on the Flat Dilatometer*. 2015; s. 43–65.

[10] Nepelski K. Numeryczne modelowanie pracy konstrukcji posadowionej na lessowym podłożu gruntowym. *Rozprawa doktorska*. Politechnika Lubelska; 2019.

[11] Senneset K, Janbu N, Svano G. Strength and deformation parameters from cone penetration tests. *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*; 1982.

[12] Sanglerat G. *The penetrometer and soil exploration*. Amsterdam: Elsevier; 1972.

[13] Ciloglu F, Cetin KO, Erol AO. CPT-based compressibility assessment of soils. *International Symposium on Cone Penetration Testing*. 2014; 2009: 629 – 636.

[14] Nepelski K, Rudko M. CPT-DMT correlation for loess subsoil from Lublin area in Poland. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney, 2022.

[15] Amoroso S, Monaco P, Marchetti D. Use of the Seismic Dilatometer (SDMT) to estimate in situ $G-\gamma$ decay curves in various soil types. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4 – Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization 4, ISC-4*. 2013; t. 1, nr October 2014, s. 489–497.

[16] Mayne PW. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in situ tests. *International conference on in situ measurement of soil properties & case histories*. 2001.

[17] Monaco P, Totani G, Marchetti S, Marchetti D. Interrelationship between small strain modulus G_0 and operative modulus. *Proc. International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*. 2009; s. 1315–1323.

Przyjęto do druku: 13.02.2023 r.