

Charakterystyki odkształceniowe lessów południowo-wschodniej Polski

Zbigniew Frankowski¹, Paweł Pietrzykowski¹



Z. Frankowski



P. Pietrzykowski

Displacement parameters of loesslike soils from southeastern Poland. *Prz. Geol.*, 65: 832–839.

Abstract. Basing on the experience of numerous years of research in southeastern Poland at two test areas, the paper presents results of chosen stress-strain parameters taken on loess and loesslike soils. The effects of laboratory investigations and field tests were collected into several correlations for future assessment of definitely important displacement parameters scrutinizing for civil engineering purposes on these problematic soils. Geotechnical investigations reporting and research experience shows that fine-grained loesslike sediments are taken as tricky soils because of geotechnical parameters located often between non-cohesive soils with dominating sand fraction and cohesive soils where clays dictate the soils' behavior.

Keywords: loess, displacement parameters, oedometer modulus

Właściwości zapadowe to główna, ale nie jedyna, cecha odkształceniowa popularnie kojarzona z lessami i gruntami lessopodobnymi. Osady te ze względu na swoją granulometrię charakteryzują się przejściowymi cechami na pograniczu gruntów spoistych i niespoistych. Na „przejściowość” lessów zwracali już uwagę Kézdi i in. (1971). Problematyczność tych gruntów dotyczy również oznaczeń wartości odkształceń, gdyż procedury badawcze opracowane dla gruntów pylastych, wśród których występują lessy, są często nieokreślone, a literatura branżowa i/lub normy albo nie precyzują metodyki, albo jest ona niejasna i/lub jednocześnie nie jest w praktyce przestrzegana. Nawet w tabeli normowej do wyznaczania współczynnika stożka (N_k) do celów oceny wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu wg sondowań CPT/CPTU (PN-B-004452:2002) jest napisane „brak danych”.

Powszechnym „błędem” dokumentacyjnym było i wciąż jest przypisywanie lessom, które sklasyfikowano jako pyły, stopnia plastyczności (I_L) na podstawie wycofanych norm (PN-B-03020:1981; PN-B-02480:1986; PN-B-04481:1988). Konsekwentnie niezgodne z polskimi normami jest dalsze wyprowadzanie pozostałych parametrów, w tym mechanicznych, na podstawie korelacji metodą B wg normy PN-B-03020:1981. Nieścisłością wynikającą z braku spójności norm jest w tym przypadku już sama ocena stopnia plastyczności (I_L) na gruntach sklasyfikowanych jako pyły, ponieważ w punkcie 5.8.5 PN-B-04481:1988 wyraźnie wskazano, że „pojęcia I_L (...) nie należy stosować w przypadku gruntów mało spoistych wg PN-B-02480:1986”.

Lipiński i in. (2016) zwracają uwagę, że dotychczasowa metodyka oznaczania parametrów odkształceń (w tym przede wszystkim metoda B z normy PN-B-03020:1981) nie uwzględniała nieliniowej zmienności sztywności, czyli zakresu odkształcenia, do którego należy odnieść wartość modułu. Szczególne znaczenie ma to przy stosowaniu różnych metod oznaczania tego parametru, na co zwrócono uwagę przy analizie modułów ściśliwości uzyskanych z dylatometru, sondowań statycznych CPT/CPTU, presjometru oraz oznaczeń laboratoryjnych.

Sprawdzoną i udokumentowaną na poligonach badawczych południowo-wschodniej Polski metodykę badań lessów zaprezentowano na wybranych przykładach badań terenowych i laboratoryjnych. Jednocześnie wyprowadzone korelacje lub udokumentowane obserwacje warunków geologiczno-inżynierskich na obszarach lessów pozwalają rzetelnie podejść do oznaczeń ich parametrów odkształceniowych. Wyniki pomiarów terenowych odniesiono do wartości uzyskanych w warunkach laboratoryjnych dla przedziału naprężeń 100–200 kPa, który uznaje się za bezpieczne dla bezpośredniego posadowienia budowli na tych problematycznych gruntach.

Należy zaznaczyć, że wszystkie badania lessów typowych (Malinowski, 1971), tworzących rozległe pokrywy na wysoczyznach, odnoszą się do próbek rozumianych jako próbki nienasycone, stąd bezkrytyczne stosowanie metod z gruntów nasyconych jest błędne.

Publikacja ma na celu usystematyzowanie interpretacji pomiarów odkształceń metodami polowymi i laboratoryjnymi. W artykule przedstawiono analizę parametrów odkształceniowych lessów i gruntów lessopodobnych na podstawie wieloletnich badań prowadzonych na wybranych poligonach badawczych.

BADANIA POŁOWE LESSÓW

O ile parametry wytrzymałościowe dla polskich lessów i gruntów lessopodobnych były już w literaturze omawiane (np. Frankowski, 1994; Frankowski i in., 2010) to parametrom odkształceniowym w tych problematycznych gruntach rzadko poświęcano więcej uwagi (np. Grabowska-Olszewska, 2003; Młynarek i in., 2015). Wyprowadzone w publikacjach współczynniki stożka (N_k) niezbędne do oznaczania wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu, zgodne ze wzorem:

$$c_u = q_c - \frac{\sigma_{v0}}{N_k}$$

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; zbigniew.frankowski@pgi.gov.pl, pawel.pietrzykowski@pgi.gov.pl.

gdzie:

c_u – wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odplywu [MPa],

q_c – opór na stożku [MPa],

σ_{v0} – naprężenie pierwotne pionowe całkowite [MPa],

N_k – współczynnik stożka,

na poziomie N_k 30–45, wyraźnie wyróżniają te grunty na tle innych gruntów spoistych (Frankowski i in., 2010). Są to wartości znacznie przekraczające granice tego współczynnika podawane w normach czy literaturze.

W badaniach poligonowych oraz aplikacyjnych metody terenowe dostosowywano do zadań geologicznych w zależności od celowości pomiarów. Poza wierceniami, z których pobierano próbki do badań odkształceń w warunkach laboratoryjnych, podstawowym narzędziem pomiarowym były sondowania statyczne CPT/CPTU. Od wielu lat stanowią one popularną metodę w oznaczaniu parametrów geotechnicznych i interpretacji warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby posadawiania obiektów budowlanych. Dodatkowo

w węzłach badawczych rejonu Lubelszczyzny oraz Szczepieszyna wykonano liczne badania dylatometryczne DMT, które to pomiary w praktyce dokumentacyjnej są uznawane za wyjątkowo referencyjne w celu oznaczania parametrów odkształceń, w tym modułów.

O ile w przypadku badań dylatometrycznych interpretacja parametrów odkształcenia odbywa się poprzez zastosowanie oryginalnych wzorów i korelacji zestawionych przez Komitet 16 ICSMGE (tab. 1), to interpretacja sondowań CPT/CPTU wymaga zastosowania właściwego współczynnika α do interpretacji modułu zgodnie ze wzorem (PN-EN 1997-2:2009):

$$E_{oed} = \alpha \cdot q_c$$

gdzie:

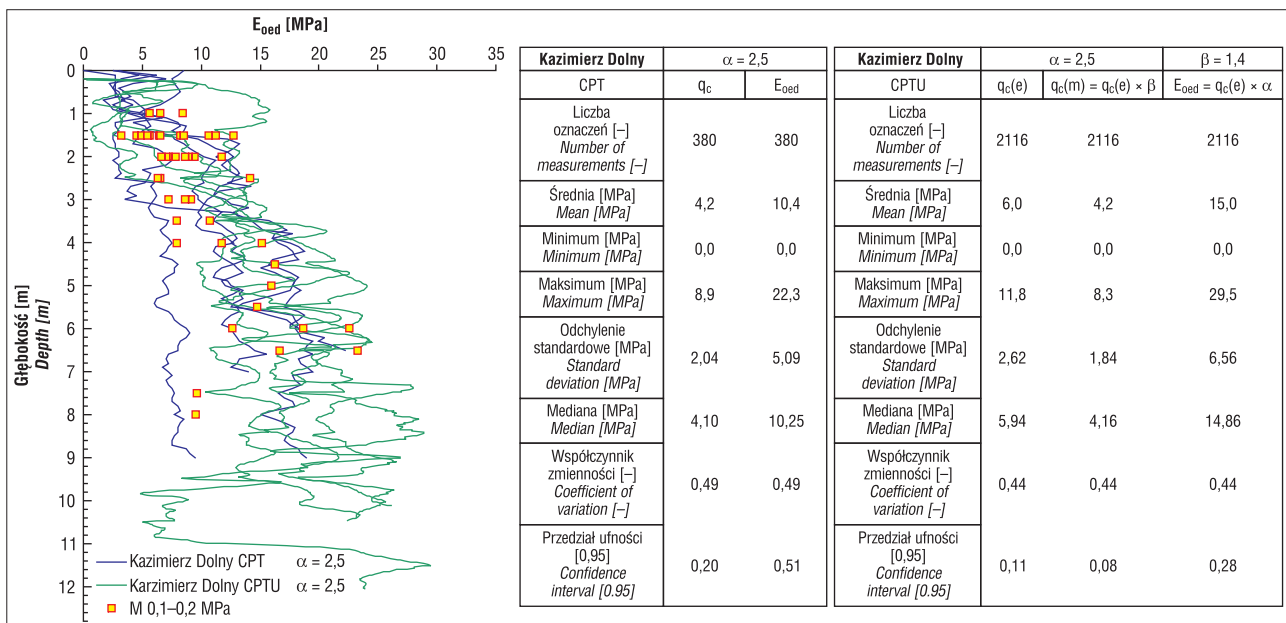
E_{oed} – moduł edometryczny [MPa],

α – współczynnik zależny od rodzaju gruntu i wartości oporu na stożku q_c [-].

Tab. 1. Zasady obliczeń parametrów odkształceniowych na podstawie badań dylatometrem płaskim (DMT) wg Marchettiego i in. (2001), zmienione. Objasnienia wg oryginalnej pisowni

Table 1. Basic DMT reduction formulae for displacement parameters after Marchetti et al. (2001), modified. Explanations after original description

Symbol <i>Symbol</i>	Parametr <i>Description</i>	Wzór obliczeniowy <i>Basic DMT reduction formula</i>
p_0	Skorygowany pierwszy odczyt <i>Corrected First Reading</i>	$p_0 = 1,05 (A - Z_M + \Delta A) - 0,05 (B - Z_M - \Delta B)$
p_1	Skorygowany drugi odczyt <i>Corrected Second Reading</i>	$p_1 = B - Z_M - \Delta B$
I_D	Współczynnik materiałowy <i>Material Index</i>	$I_D = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_0 - u_0)}$
K_D	Wskaźnik naprężenia bocznego <i>Horizontal Stress Index</i>	$K_D = (p_0 - u_0) \sigma'_{v0}$
E_D	Moduł dylatometryczny <i>Dilatometer Modulus</i>	$E_D = 34,7(p_1 - p_0)$
M (E_{oed} – PN EN 1997-2:2009)	Pionowy moduł odkształcenia (Moduł edometryczny) <i>Vertical Drained Constrained Modulus</i>	$M_{DMT} = R_M E_D$ $R_M = f(I_D, K_D)$



Ryc. 1. Interpretacja edometrycznych modułów ściśliwości oparta na wynikach sondowań statycznych CPT/CPTU na poligonie badawczym Kazimierz Dolny

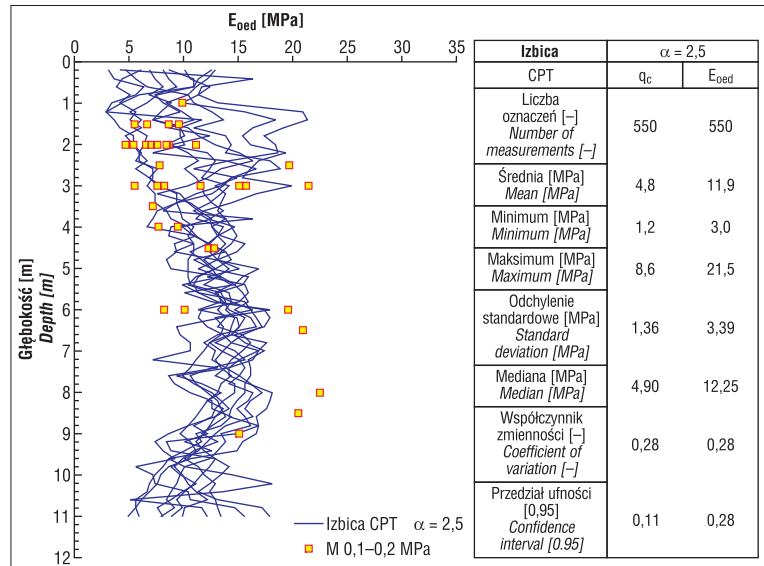
Fig. 1. Oedometer modulus by CPT/CPTU from Kazimierz Dolny test field

Tab. 2. Różne wartości współczynnika α do oceny odkształcalności lessów i gruntów lessopodobnych wg sondowań CPT/CPTU w literaturze i normie PN-EN 1997-2:2009
 Table 2. Examples of values of α for loess and loesslike soils due to CPT/CPTU tests from different citations and norm PN-EN 1997-2:2009

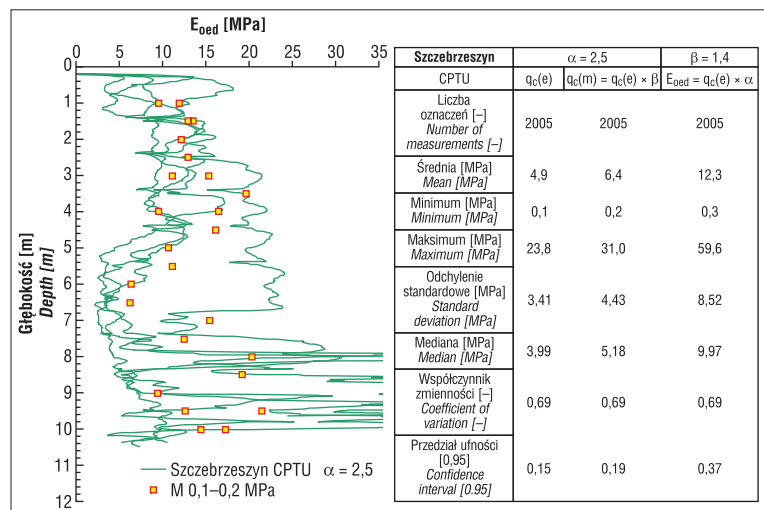
	Sanglerat, 1972		Lunne i in., 1997 (adaptowane z/adapted from Sanglerat, 1972; wg/after Mitchell, Gardner, 1975)		Sikora, 2006		prEN 1997-2:2006 (E)		PN-EN 1997-2:2009		
Rodzaj gruntu	q_c	α	rodzaj gruntu	q_c	α_m	rodzaj gruntu	q_c	α	rodzaj gruntu	q_c	α
ML – low -plasticity loam	< 2 MPa > 2 MPa	$3 < \alpha < 6$ $1 < \alpha < 2$	silt of low-plasticity (ML)	> 2 MPa < 2 MPa	$3 < \alpha_m < 6$ $1 < \alpha_m < 3$	grunty pylaste o niskiej plastyczności (ML)	> 2,0 MPa < 2,0 MPa	$3 < \alpha < 6$ $1 < \alpha < 2$ $1 < \alpha < 1,5$ $\alpha < 0,4$	pył niskoplastyczny	$q_c < 2$ MPa $q_c \geq 2$ MPa $100 < w \leq 200$ $w > 300$	$3 < \alpha < 6$ $1 < \alpha < 2$ $1 < \alpha < 1,5$ $\alpha < 0,4$

$$M = \alpha_m \cdot q_c$$

Przeprowadzono analizy z zastosowaniem różnych wartości współczynnika α przy próbie zastosowania współczynników dla pyłów o małej plastyczności, jakimi niewątpliwie są lessy. Zaklasyfikowanie lessów do pyłów potwierdziły jednoznacznie analizy makroskopowe i laboratoryjne oraz wizualizacja badań dylatometrycznych na nomogramie Marchettiego i Crappa (1981 w: Marchetti i in., 2001). Zauważono przy okazji niezgodności i wykluczanie się pomiędzy wartościami współczynnika α w zależności od zastosowanej literatury branżowej (low plasticity wg Lunne i in., 1997; Sikora, 2006) i norm (tab. 2). Dla pyłów o małej plastyczności, przy oporze na stożku $q_c > 2$ MPa, przyjmowano w pierw sugerowaną wartość współczynnika α z przedziału 3–6 (za Mitchell, Gardner, 1975 w: Lunne i in., 1997; Sikora, 2006). Autorzy przeprowadzili kolejne obliczenia dla $q_c \geq 2$ MPa, przyjmując współczynnik α w granicach 1–2 wg Sanglerata (1972) oraz normy PN-EN 1997-2:2009. Obliczenia zostały zestawione z wynikami badań laboratoryjnych modułu ścisłego (ryc. 1–3) i interpretacją z badań DMT.



Ryc. 2. Interpretacja edometrycznych modułów ścisłości oparta na wynikach sondowań statycznych CPT na poligonie badawczym Izbica
 Fig. 2. Oedometer modulus by CPT from Izbica test field



Ryc. 3. Interpretacja edometrycznych modułów ścisłości oparta na wynikach sondowań statycznych CPTU na poligonie badawczym Szczepieszyn
 Fig. 3. Oedometer modulus by CPTU from Szczepieszyn test field

BADANIA CPT / CPTU

Na przykładzie 5 węzłów badawczych w trzech lokalizacjach (Kazimierz Dolny, Izbica i Szczebrzeszyn) zestawiono potwierdzenie jednorodności lessów typowych pod względem analizy parametrów odkształceniowych. Wykorzystane do interpretacji (wyprowadzone na podstawie korelacji z badaniami laboratoryjnymi) jednostkowe współczynniki α oscylują od 2 do 3, co zestawiono na wykresach i w tabelach podstawowych statystyk.

Zmienność oporu na stożku q_c w lessach typowych charakteryzujących się wilgotnością 8–16% wynosi od ok. 1 do 8 MPa (ryc. 2). Taki rozrzut implikuje zastosowanie współczynnika α zgodnie z różnymi kryteriami dla $q_c > 2$ MPa i $q_c < 2$ MPa. Przytoczone niezgodności literaturowe wykluczają bezkrytyczne stosowanie jakichkolwiek z nich. Wyprowadzony przez autorów współczynnik stanowi udokumentowaną propozycję do dalszego stosowania w pracach badawczych.

Istotnym elementem interpretacji parametrów na podstawie sondowań statycznych, który wciąż pozostaje w użyciu przy dokumentowaniu warunków gruntowo-wodnych, jest nomogram pozwalający szacować stopień plastyczności (I_L) na podstawie oporu na stożku (q_c) z normy PN-B-04452:2002 (ryc. 4).

Wykorzystywanie w trakcie sondowań statycznych CPT końcówki elektrycznej i nieuwzględnianie normowego zapisu o poprawce β (Bustamante, Gianceselli, 1993 za PN-B-04452:2002):

$$q_c(m) = \beta \cdot q_c(e)$$

gdzie:

$q_c(m)$ – wartość oporu na stożku otrzymana za pomocą końcówki mechanicznej [MPa],

$q_c(e)$ – wartość oporu na stożku otrzymana za pomocą końcówki elektrycznej [MPa],

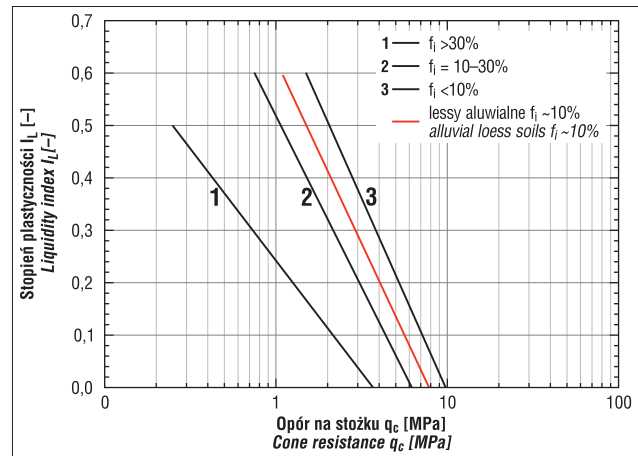
β – współczynnik,

proceedzi często do zawyżania wartości stopnia plastyczności (I_L), a w konsekwencji obniżania parametrów nośności gruntu. Na podstawie badań w 2 rejonach (Kazimierz Dolny, Szczebrzeszyn) autorzy zaobserwowali prawidłowość, w której opory na stożku (q_c) mierzone urządzeniem elektrycznym należy przemnożyć przez minimalny normowy współczynnik dla gruntów spoistych $\beta = 1,4$. Wyniki doświadczenia dokumentacyjnego, uwzględnione na rycinie 4, związanego z parametrami lessów aluwialnych, ponownie wskazują na istotność wykorzystywania parametrów i/lub współczynników charakterystycznych dla wybranej lokalizacji. Udokumentowane wyniki pomiarów na lessach aluwialnych zestawiono z badaniami laboratoryjnymi ich stopnia plastyczności (I_L). Przedmiotowe grunty charakteryzowały się w dominującej grupie uziarnieniem na granicy glin pylastych i pyłów, gdzie żaden z normowych wzorów nie dostarczył jednoznacznej interpretacji wyników. Dopiero zastosowanie dla nich uśrednionego wzoru, pomiędzy gruntami o zawartości frakcji ilowej $f_i = 10\text{--}30\%$ i $f_i < 10\%$:

$$I_L = 0,624 - 0,695 \log q_c$$

gdzie:

I_L – stopień plastyczności gruntu,



Ryc. 4. Normowe zależności stopnia plastyczności I_L od oporu stożka q_c w gruntach spoistych dla sondowań statycznych CPT z końcówką mechaniczną Begemanna (PN-B-04452:2002) wraz z korelacją dla lessów aluwialnych (Majer, Pietrzykowski, niepublikowane, 2012 r.) o zawartości frakcji ilowej $f_i \sim 10\%$

Fig. 4. Standardized liquidity index I_L due to cone resistance q_c from CPT with mechanical Begemann's cone (PN-B-04452:2002) with supplement for alluvial loess soils (Majer, Pietrzykowski, unpublished, 2012) with clay fraction percentage $f_i \sim 10\%$

pozwoiliło na korelacje z wynikami licznych pomiarów laboratoryjnych i uzasadniao jego wykorzystanie na kolejnych etapach badań.

BADANIA DYLATOMETRYCZNE

W badaniach dylatometrycznych wykonanych na wybranych poligonach badawczych (Kazimierz Dolny i Szczebrzeszyn), podobnie do badań CPT/CPTU zaobserwowano wyraźną jednorodność odkształceniową w lessach typowych. Moduł odkształcenia (*vertical drained constrained modulus* – M) oscyluje w granicach od $M = 12,3\text{--}94,3$ MPa przy średniej wartości $M = 41,7$ MPa dla poligonu badawczego Kazimierz Dolny i od $M = 14,4\text{--}71,0$ MPa przy średniej wartości $M = 24,2$ MPa dla poligonu badawczego Szczebrzeszyn. Choć rozrzut wyników wydaje się być znaczący, to współczynniki zmienności, odpowiednio 0,38 i 0,36 dla blisko 400 pomiarów, potwierdzają umowną jednorodność lessów, którą scharakteryzowano także na przykładowych wykresach z obu poligonów badawczych (ryc. 5).

Regionalne zależności w lessach dla pomiarów dylatometrycznych w zestawieniu z wybranymi pomiarami CPT (R_f) publikowano wcześniej, m.in. Wysokiński i in. (2009). Wyprowadzone zależności:

$$E_D = 5,8 \cdot q_n$$

oraz

$$I_D = 2,5 + 7,8 \cdot R_f$$

gdzie:

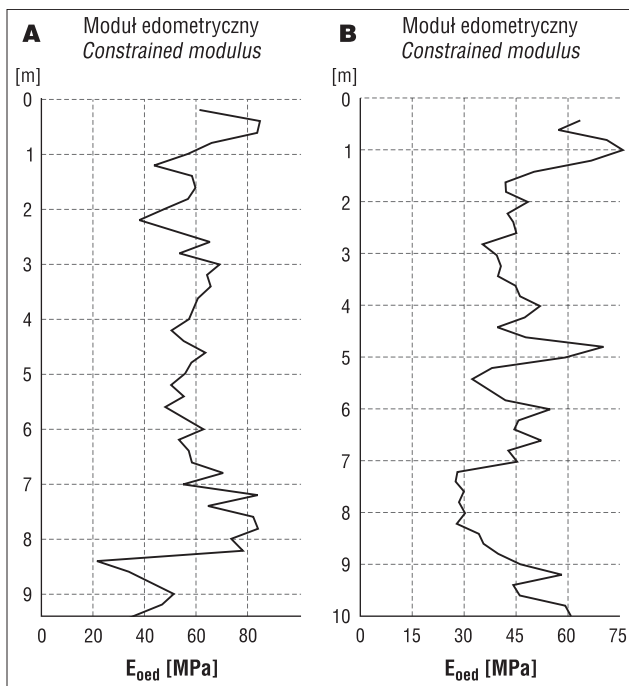
E_D – dylatometryczny moduł odkształcenia,

q_n – opór na stożku netto ($q_n = q_c - \sigma_{v0}$),

I_D – wskaźnik materiałowy w pomiarach DMT,

R_f – współczynnik tarcia w pomiarach CPT/CPTU,

wykazują jednak powiązania tylko pomiędzy parametrami mierzonymi dwoma różnymi urządzeniami pomiarowymi (DMT i CPT/CPTU) i uzyskiwanymi wartościami (opór na



Ryc. 5. Przykład interpretacji modułu edometrycznego z badań DMT na poligonie badawczym w Szczepieszynie (z lewej) i Kazimierzu Dolnym (z prawej)

Fig. 5. Interpretation example of oedometer modulus from DMT tests at Szczepieszyn and Kazimierz Dolny test fields

stożku q_c i/lub q_n albo indeks I_D wynikający z bezpośrednich pomiarów ciśnień), lecz nie odnoszą się wprost do parametrów zależnych od innych współczynników.

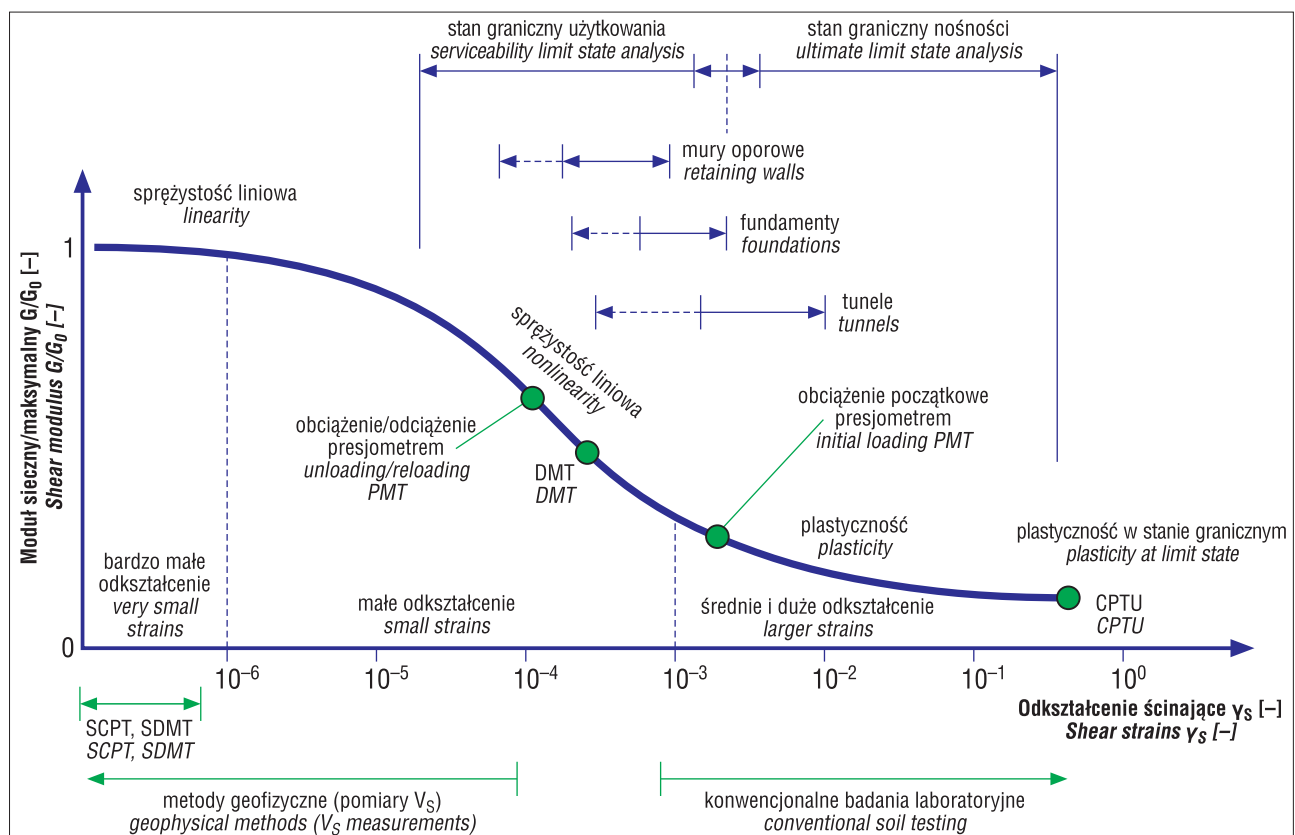
Wyniki uzyskane z poligonowych badań dylatometrycznych wyraźnie różnią się od interpretowanych i określonych w laboratorium wartości modułów. Należy jednak pamiętać, że w nawiązaniu do schematu zależności modułów sztywności od wartości odkształceń (ryc. 6) moduły z badań dylatometrycznych są wyprowadzane dla odkształceń oscylujących w granicach ok. 0,01%. Praktyka dokumentacyjna wskazuje na wykorzystywanie tych wartości do projektowania posadowienia, gdyż zakres odkształceń odpowiada, wg założeń z ryciny 6, stanowi granicznemu użytkowania. Uzyskane z dylatometru duże wartości modułu ściśliwości wskazują jednak, że opracowane dla gruntów spoiwystych formuły przeliczeniowe nie mają zastosowania dla lessów typowych i przeszacowują wartości tego parametru.

BADANIA LABORATORYJNE LESSÓW

Badania klasyfikacyjne

Lessy, które granulometrycznie określano głównie jako pyły i rzadziej jako gliny pylaste (tab. 3), poza podstawowymi pomiarami klasyfikacyjnymi uziarnienia, poddano badaniom granic plastyczności i płynności.

Oznaczenia parametrów granic konsystencji wykonywane na lessach (choć w przypadku gruntów sklasyfikowanych jako pyły, niezgodnie z polskimi zaleceniami



Ryc. 6. Krzywa degradacji sztywności (krzywa S) w zestawieniu z zakresem operacyjnym różnych testów polowych i laboratoryjnych oraz jej umiejscowieniem w obliczeniach stanów użyteczności oraz nośności (Truty, Obrzud, 2013)

Fig. 6. Stiffness variation (S-line) as a function of the shear strain amplitudes with the range of displacement values from different geotechnical tests and with the range of ultimate and serviceability limit states (Truty, Obrzud, 2013)

Tab. 3. Przeciętne zawartości frakcji piaskowej, pyłowej i ilowej w lessach (Frankowski i in., 2010)**Table 3.** Mean values of sand, silt and clay fraction percentage in loess soils (Frankowski et al., 2010)

Frakcja Fraction	Piaskowa Sand [%]	Pyłowa Silt [%]	Ilowa Clays [%]
Średnia zawartość Mean	15,8	77,1	7,2
Zakres Range	1,8–29,7	61,6–91,5	3,9–9,9
Liczba pomiarów Number of measurements	443		

normatywnymi) poza wartościami w_p oraz w_L pozwoliły na oszacowanie średnich wartości stopnia plastyczności I_L lessów typowych.

Podział lessów typowych na grunty, gdzie frakcja ilowa stanowi do 10% (klasyfikowane jako pyły – 53 oznaczenia) oraz grunty, w których frakcji ilowej jest ponad 10% (klasyfikowane sporadycznie jako gliny pylaste – 35 oznaczeń) został przedstawiony na nomogramie Casagrande'a (ryc. 7).

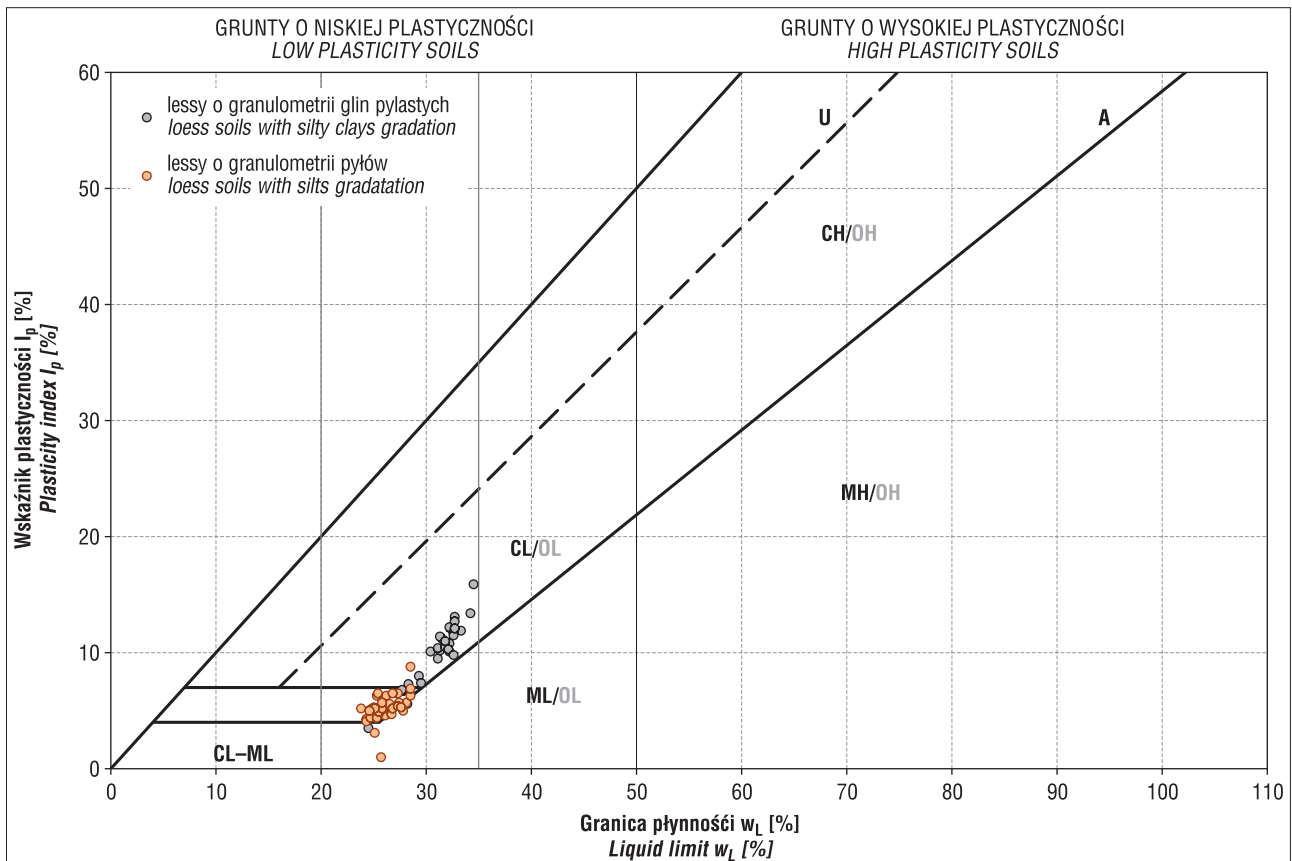
Interpretacja wyników oparta na przywołanym nomogramie ma istotne znaczenie dla doboru przedziału właściwego współczynnika α do interpretacji odkształcalności na podstawie sondowań statycznych, które zarówno przy wykorzystaniu angielskiej literatury branżowej (Sanglerat, 1972; Lunne i in., 1997; Sikora, 2006), jak i tłumaczeń normatywów (np. PN-EN 1997-2:2009) odnoszą się do plastyczności gruntów (np. CL – *low plasticity clay*, MH-OH – *very plastic loam, low plasticity silt, very orga-*

nic silt, czy tłumaczone dosłownie pył nisko- lub bardzo plastyczny). Warto przypomnieć jest to, że ocena plastyczności w wymienionych oznaczeniach nie jest związana ze stanem gruntu, do którego odwołują się tzw. stare normy (PN-B-03020:1981, PN-B-02480:1986, PN-B-04481:1988) lecz z pojęciem odkształcalności (elastyczności), która odnosi się do występującego w nomogramie Casagrande'a wskaźnika plastyczności (I_p) charakterystycznego dla wybranych typów gruntów.

Wyniki oznaczeń jednoznacznie wskazują, że badane lessy o granulometrii gliny pylastej na podstawie granic konsystencji są klasyfikowane jako ropy o niskiej plastyczności (CL). Lessy o granulometrii pyłów wyraźnie koncentrują się w obszarze CL–ML, z ukierunkowaniem w stronę pyłów (M). Przy uwzględnieniu rozbudowanej wersji nomogramu Casagrande'a (Head, 1992) w żadnym z pomiarów nie została przekroczona nawet wartość granicy płynności $w_L = 35\%$, która jeszcze bardziej restrykcyjnie niż pierwotny wzór nomogramu ($w_L = 50\%$) stawia granicę pomiędzy gruntami o niskiej i średniej plastyczności.

W nawiązaniu do przywoływanej już tabeli, wartości współczynnika α oparte na plastyczności i litologii (tab. 2), dla przykładowych lessów z wartościami oporu na stożku $q_c > 2$ MPa, rozrzut współczynnika od 1 do 6 w zależności od litologii (z dodatkowym uwzględnieniem różnic w branżowej literaturze) może skutkować 600% błędem w interpretacji parametrów odkształcenia.

Analizując w zestawieniu wartości pochodzące z interpretacji sondowań statycznych w odniesieniu do badań laboratoryjnych oraz klasyfikację na podstawie nomogramu Casagrande'a, wyprowadzona w trakcie badań wartość

**Ryc. 7.** Lessy typowe na nomogramie Casagrande'a
Fig. 7. Typical loess soils on plasticity (Casagrande) chart

$\alpha = 2,5$ wydaje się odpowiadać gruntom sklasyfikowanym na granicy CL–ML, a jednocześnie pozwala maksymalnie zredukować potencjalny błąd, wynikający z zakresu przedstawianego w normach i publikacjach.

Badania edometryczne

Określanie parametrów odkształceniowych dla lessów wiąże się z wyjątkowo łatwym naruszeniem struktury gruntu zarówno w czasie pobrania, jak i preparatyki w laboratorium. Tylko odpowiednie doświadczenie we właściwym przygotowaniu materiału do badań umożliwia uzyskanie dobrych jakościowo wyników. Bezpośredni pomiar modułów na lessach przeprowadzono zgodnie z metodyką wskazaną w normie PN-B-04481:1988. Jest to moduł sieczny określany w konkretnym przedziale naprężeń. Na potrzeby wyznaczenia parametru przyjęto referencyjny przedział naprężeń 100–200 kPa, który w dalszej procedurze pomiarowej można wiązać z określaniem wskaźnika osiadania zapadowego (i_{mp}) przy naprężeniu 200 kPa.

Należy wspomnieć, że wieloletnia praktyka badawcza na lessach stosowana na podstawie polskich norm i praktyki laboratoryjnej ulegała zmianom. Początkowo wskaźnik i_{mp} oznaczano przy 300 kPa (PN-B-04495:1958), co zweryfikowano przy kolejnych pracach nad standaryzacją badań. Wybrane publikacje również dokumentują, że ten problematyczny parametr osiąga maksymalne wartości przy próbkach nasyconych wodą i obciążonych 200 kPa (np. Grabowska, 2003). W normie PN-B-04481:1975 zaniechano badań wskaźnika osiadania zapadowego. Badanie to ponownie ustandaryzowała norma PN-B-04481:1988, gdzie zalecenia dotyczące naprężeń do pomiaru zapadowości, które obiekt będzie przekazywał na grunt, zredukowano do 200 kPa.

Wartości procentowe odkształceń zarejestrowane przy końcowych naprężeniach 300 kPa oscylujące od 2,9 do 8,2% wyraźnie wskazują, że moduły określane przy urządzeniach polowych (np. DMT) w zakresie odkształceń ok. 0,01% nie odpowiadają rzeczywistym wartościom tych parametrów. Uzyskane wartości na próbkach lessów z wybranych węzłów badawczych zgodnie z tabelą 4, zestawiono także z wartościami otrzymanymi z interpretacji stopnia plastyczności (I_L) zgodnie z normą PN-B-03020:1981, zakładającej symbol litologiczno-genetyczny C, i wybranymi wynikami z interpretacji pomiarów presjometrem

Menarda PMT. Ze względu na oznaczany półzwały i zwarty stan badanych gruntów, interpretację wg normy PN-B-03020:1981 ograniczono do wartości stopnia plastyczności $I_L = 0$.

Porównane w tabeli 4 różnice w interpretacji parametrów ściśliwości wskazują, że wykorzystanie ich do ostatecznej oceny modułów nie jest jednoznaczne. Cechy gruntów uzyskane na podstawie parametru wiodącego I_L (metoda B) zgodnie z normą PN-B-03020:1981 znacząco odbiegają od pozostałych metod. W przypadku lessów metoda ta nie powinna być stosowana, gdyż ocena ilościowa wymagana na potrzeby projektowe dla gruntów w stanie półzwartym i zwartym, odpowiadających większości lessów typowych w Polsce, jest tą metodą niewykonalna. Same metody polowe powinny być stosowane w odniesieniu do regionalnych pomiarów rzeczywistych odkształceń i każdorazowo wiązane z wartością naprężeń przekazywanych na grunt i zakresem odkształceń, w jakim on będzie pracował obciążony budowlą.

WNIOSKI

1. Na podstawie przedstawionych pomiarów i korelacji do interpretacji sondowań statycznych CPT/CPTU autorzy, na potrzeby oceny parametrów odkształceń lessów typowych, proponują wykorzystywanie współczynnika $\alpha = 2,5$.

2. Podawanie parametrów ściśliwości w lessach, zwłaszcza typowych, na podstawie pojedynczych pomiarów lub badań wykonanych jedną metodą prowadzi do błędów interpretacyjnych i implikuje błędy projektowe. Różnice w oznaczanych wartościach sięgają od pół do jednego rzędu wielkości.

3. Dowiadując się do pomiarów laboratoryjnych na nienasyconych lessach typowych, można oszacować z dużą wiarygodnością wartości osiadań. Grunty te wykazują umowną jednorodność w profilach głębokościowych, które przedstawiono w postaci modułów na podstawie pomiarów oporu na stożku (q_c) z sondowań statycznych CPT/CPTU.

4. Niezależnie od rozpoznanej granulometrii zarówno dominujące pyły, jak i pyły z iłem (gliny pylaste) są klasyfikowane na podstawie nomogramu Casagrande'a jako grunty o niskiej plastyczności i na potrzeby interpretacji wg sondowań statycznych jest to jednoznaczna informacja do prawidłowego wyznaczenia współczynnika α .

Tab. 4. Porównanie wartości edometrycznych modułów ściśliwości w lessach na poligonach badawczych
Table 4. Comparison of oedometer modulus in loess soils in different test fields

Poligon badawczy Test field	Średnie wartości modułu ściśliwości wg badań laboratoryjnych Mean values of oedometer modulus by laboratory tests [MPa]			Moduł ściśliwości wg DMT Oedometer modulus by DMT [MPa]	Moduł ściśliwości wg (metody B) PN-B-03020:1981 Oedometer modulus by PN-B-03020:1981 [MPa]	Moduł ściśliwości wg PMT Oedometer modulus by PMT [MPa]
	50–100 kPa	100–200 kPa	200–300 kPa			
Kraśnik	3,5	5,5	brak danych no data	brak danych no data	48	7,3
Izbica	6,7	11,0	10,3	brak danych no data	48	7,9
Szczebrzeszyn/Zamość	7,4	13,7	19,6	24,2	48	8,9
Kazimierz Dolny	5,4	9,9	10,1	41,7	48	10,0
Kraków	8,2	10,4	brak danych no data	brak danych no data	48	16,7

5. Problematyczność klasyfikacyjna lessów, wykazana na przykładzie wybranych poligonów badawczych, prowadzi do sugestii każdorazowego dobierania odpowiednich współczynników przeliczeniowych α i β na podstawie udokumentowanych korelacji w warunkach lokalnych przy interpretacji sondowań CPT/CPTU.

6. Dla lessów typowych występujących głównie w stanie półzwałym i zwartym bezwzględnie należy wykluczyć stosowanie normy PN-B-03020:1981 do oceny parametrów odkształceń na podstawie parametru wodącego I_L . Sama ocena stopnia plastyczności (I_L) na podstawie sondowań statycznych powinna, zgodnie z normowymi standardami interpretacyjnymi, być stosowana wyłącznie do pomiarów wykonywanych stożkiem mechanicznym lub z zastosowaniem odpowiednio udokumentowanych przeliczników.

Autorzy składają podziękowania prof. UAM Jędrzejowi Wierzbickiemu oraz prof. Stanisławowi Rybickiemu, którzy swoimi cennymi uwagami i uzupełnieniami przyczynili się do poprawienia jakości i czytelności tej publikacji.

LITERATURA

- FRANKOWSKI Z. 1994 – Physico-mechanical properties of loess in Poland (studied *in situ*). *Quatern. Inter.*, 24: 17–23.
- FRANKOWSKI Z., MAJER E., PIETRZYKOWSKI P. 2010 – Geological and geotechnical problems of loess deposits from south-eastern Poland. *Proc. Inter. Conf. "Geotechnical Challenges in Megacities"*. Moscow, 07–10 June 2010.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 2003 – Badania i przewidywanie właściwości zapadowych lessów. Materiały konferencyjne 45 lat geotechniki w Łodzi. Geotechnika w polskim budownictwie. Wyd. Papier-service. Łódź: 51–62.
- KÉZDI A., LADÁNYI J., KABAI J. 1971 – Compaction of transition soils. *Proc. 4th Inter. Conf. on Soil Mechanics*, Budapest: 177–185.
- HEAD K.H. 1992 – *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 1: Soil classification and compaction tests. Second Ed.. Pentech Press. London.
- LIPIŃSKI M., WDOWSKA M., MICHALCZUK K. 2016 – Parametry geotechniczne według normy PN-B-03020:1981 – perspektywa dnia dzisiejszego. *Inżynieria i budownictwo*, 4/2016.
- LUNNE T., ROBERTSON P.K., POWELL J.J.M. 1997 – *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic and Professional, London, UK.
- MARCHETTI S., MONACO P., TOTANI G., CALABRESE M. 2001 – The Flat Dilatometer Test (DMT) in soil investigations. A Report by ISSMGE Committee TC 16. *Proc. IN SITU 2001, Inter. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties*, Bali, Indonesia, May 2001, s. 41.
- MALINOWSKI J. 1971 – *Badania geologiczno-inżynierskie lessów*. Wyd. Geol., Warszawa.
- MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J., MAŃKA M. 2015 – Geotechnical parameters of loess soils from CPTU and SDMT. [W:] *Inter. Conf. on the Flat Dilatometer DMT'15*, Marchetti S., Monaco P., Viana da Fonseca A. (red.), Rzym: 481–489.
- PN-B-04495:1958 – Grunty budowlane – Oznaczanie edometrycznych modułów ściśliwości i edometrycznych modułów odprężenia.
- PN-B-04481:1975 – Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
- PN-B-03020:1981 – Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-B-02480: 1986 – Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-04481:1988 – Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-B-04452:2002 – Geotechnika. Badania polowe.
- PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- SANGLERAT G. 1972 – *The penetrometer and soil exploration*. Elsevier, Amsterdam.
- SIKORA Z. 2006 – *Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii*. Wyd. nauk.-tech., Warszawa.
- TRUTY A., OBRZUD R. 2013 – Komputerowa analiza współdziałania konstrukcji budowlanych z podłożem przy zastosowaniu zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntów kalibrowanych na podstawie wyników badań laboratoryjnych i polowych. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła 5–8 marca 2013 r. T. II. Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, Oddz. Małopolski w Krakowie, Kraków: 241–278.
- WYSOKIŃSKI L., GODLEWSKI T., WSZĘDYRÓWNY-NAST M. 2009 – Zależności regionalne parametrów geotechnicznych na podstawie sondowań CPTU i DMT. *XV Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej*. Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz: 235–242.