

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (2), 186–198
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (2)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (2), 186–198
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (2)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.2.18

Krzysztof NEPELSKI¹, Małgorzata RUDKO²

¹Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology

²GeoNep Geotechnika Nepelski Chymosz sp.j.

Identyfikacja parametrów geotechnicznych lessów lubelskich na podstawie sondowań statycznych CPT

Identification of geotechnical parameters of Lublin loess subsoil based on CPT tests

Słowa kluczowe: lessy, sondowania statyczne CPT, nośność podłoża, projektowanie
Key words: loess, cone penetration tests CPT, bearing capacity, designing

Wprowadzenie

Podłoże lessowe charakteryzuje się dużą wytrzymałością strukturalną w stanie naturalnym i znacznym spadkiem swych właściwości pod wpływem działania wody. Lessy pokrywają niewielką część Polski, ale ich występowanie na Wyżynie Lubelskiej ocenia się na 40% jej powierzchni. Grubość pokrywy lessowej na terenie Lubelszczyzny sięga najczęściej kilkunastu metrów, a w samym Lublinie waha się zazwyczaj w granicach 10–15 m. Lokalnie miąższość lessów może wynosić nawet kilkadziesiąt metrów. W stanie naturalnym lessy występują zazwyczaj w konsy-

stencji zwartej lub twar doplastycznej na pograniczu zwartej. W strefie przypowierzchniowej lub w spągu pokrywy lessowej ich konsystencja najczęściej przechodzi w plastyczną. Zmiany w strefie przypowierzchniowej wynikają przede wszystkim z infiltracji wód opadowych, w dolnych partiach jest to spowodowane zaleganiem pod lessami uplastycznionych glin lub nawodnionych piasków. Opisane w niniejszej pracy badania najczęściej sięgały zalegających pod lessami piasków lub glin, skupiono się jednak jedynie na analizie lessów.

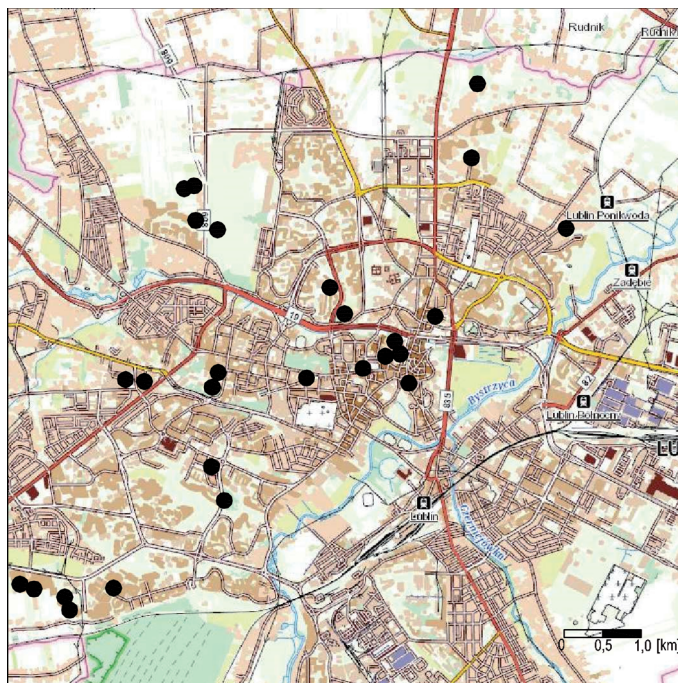
Tradycyjną i najszerzej stosowaną w Polsce metodą jest podział podłoża na warstwy geotechniczne ze względu na stan gruntu, tj. I_D dla gruntów niespoistych oraz I_L dla gruntów spoistych. Jak powszechnie wiadomo, praca podłoża spoistego zależy nie tylko od jego stanu (wilgotności), ale także od procesu po-

wstawania, historii obciążeń, rozkładu frakcji czy kształtu ziaren. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań oraz zaproponowano metodykę wyznaczania i doboru parametrów do projektowania obiektów posadowionych na lessach Lubelszczyzny.

Opis prowadzonych badań

Analizę właściwości geotechnicznych lessów wykonano na podstawie wyników badań naukowych realizowanych w ramach prac statutowych Katedry Geotechniki Politechniki Lubelskiej oraz badań komercyjnych wykonanych na terenie Lublina w ramach rozpozna-

nia geotechnicznego pod projektowane budynki. W 30 lokalizacjach Lublina, przedstawionych na rysunku 1, wykonywano rozpoznanie podłoża za pomocą sondowań statycznych CPT, odwiertów badawczych oraz badań laboratoryjnych. W każdej z lokalizacji przeprowadzono sondowania statyczne, które wykonywano w każdym z planowanych punktów, a dodatkowo w wybranych punktach wykonywano odwierty badawcze w celu rozpoznania rodzaju gruntu oraz pobrania próbek do badań laboratoryjnych. Odwierty wykonywano zawsze po sondowaniu, dzięki czemu można było je realizować praktycznie w tym samym miejscu. Taki program badań jest zgodny z nieobowiązującymi



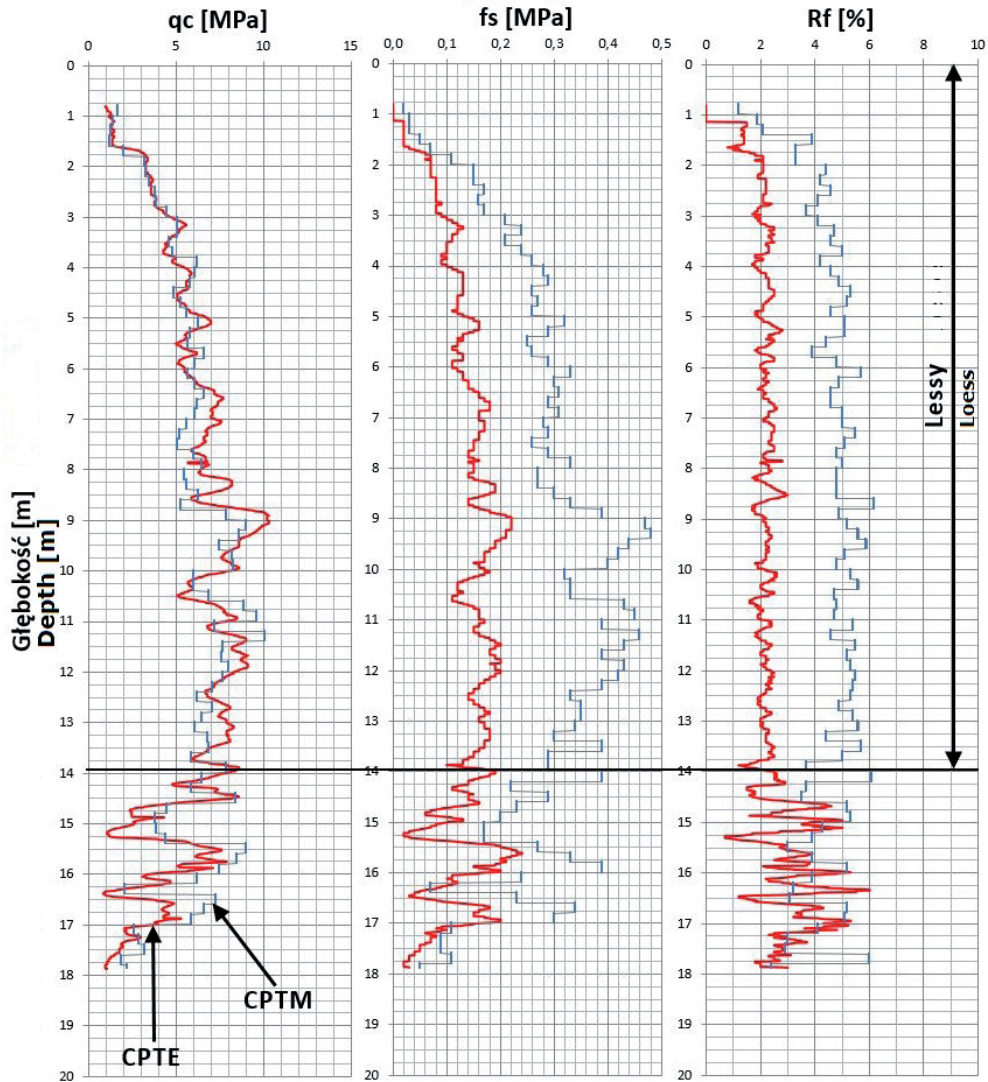
RYSUNEK 1. Lokalizacja wykonanych badań na terenie Lublina (opracowanie własne na podstawie: <http://mapy.geoportal.gov.pl/imap/>)

FIGURE 1. Location of the tests carried out in Lublin (own studies based on: <http://mapy.geoportal.gov.pl/imap/>)

już normami (PN-B-02479:1998; PN-81/B-03020:1981), a także z obowiązującymi aktualnie Eurokodami (PN-EN 1997-1:2009; PN-EN 1997-2:2009). Do analizy właściwości geotechnicznych wykorzystano wyniki z 310 sondowań

stycznych wykonanych w podłożu lessowym, których łączna długość wynosiła 2704 mb.

Sondowania statyczne CPT wykonywano zgodnie z normami PN-EN ISO 22476-1:2012 i PN-EN ISO 22476-



RYSunEK 2. Porównanie sondowań CPT wykonanych mechanicznym oraz elektrycznym stożkiem. Lokalizacja: Lublin – GórkI Czechowskie (badania własne)

FIGURE 2. Comparison of CPT tests made with a mechanical and electrical cones. Location: Lublin – Czechowskie Hills (own studies)

-12:2009 z wykorzystaniem zarówno stożka elektrycznego, jak i mechanicznego. Wyniki sondowania interpretowano, wykorzystując zależności empiryczne podane w normach PN-B-04452:2002 i PN-EN 1997-2:2009 oraz literaturze (Briaund i Miran, 1992; Sikora, 2005; Młynarek, Wierzbicki i Mańka, 2015; Pisarczyk, 2015), a także na podstawie własnych korelacji. W kilkunastu przypadkach wykonano sondowania porównawcze z użyciem obu stożków. W tych sytuacjach jako pierwsze wykonywano sondowanie z zastosowaniem stożka mechanicznego, a następnie w odległości nie mniejszej niż 1 m i nie większej niż 2 m z użyciem stożka elektrycznego. Szczegółowe porównanie obydwu technik jest przedmiotem odrębnej analizy. Zdaniem autorów obydwie techniki mogą być stosowane do badania lessów.

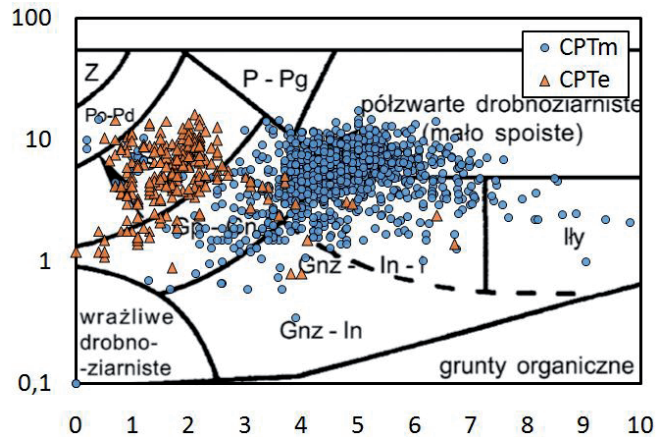
Na rysunku 2 przedstawiono jeden z wykresów porównawczych obydwu sondowań. Jako bardzo zbliżone należy uznać opory sondowania pod podstawą stożka (q_c). Opór poboczniczy (f_s), a tym samym wskaźnik R_f , pomierzony stożkiem mechanicznym, jest większy niż przy pomiarze stożkiem elektrycznym. W związku z tym należy liczyć się z różnicami w klasyfikowaniu gruntu z wykorzystaniem nomogramów (Tümay, Karasulu, Młynarek i Wierzbicki, 2011). Nie wyklucza to możliwości interpretowania rodzaju gruntu z takiego sondowania, niezbędne jest jednak doświadczenie związane z prowadzeniem badań w przedmiotowym rejonie. Należy podkreślić, że diagramy klasyfikacyjne przypisują sposób reakcji gruntu (ang. *soil behavior type*), a nie służą bezpośrednio do klasyfikowania gruntu ze względu na uziarnienie, jak przyjmu-

je się w normach PN-86/B-02480:1986 oraz PN-EN ISO 14688-1:2006. Z tego powodu w niektórych sytuacjach mogą występować rozbieżności między gruntem zidentyfikowanym w odwiercie a wyinterpretowanym z parametrów sondowania. Na podstawie sondowania CPT nie ma możliwości jednoznacznego rozpoznania rodzaju gruntu. Otrzymuje się natomiast parametry oporu podłoża, które odzwierciedlają jego nośność i są wykorzystywane do projektowania posadowień. Jako że interpretowane parametry gruntu wyprowadza się przede wszystkim z oporu pod podstawą stożka, parametry te przyjmują zbliżoną wartość zarówno z sondowań stożkiem elektrycznym, jak i mechanicznym.

W kilkunastu przypadkach wykonywano również badanie CPTU z pomiarem ciśnienia wody w porach. W przypadku lessów nadwyżka ciśnienia wody w porach jest niewielka, często pomijalna, co wynika z dużej porowatości oraz małej wilgotności. W związku z tym można przyjąć, że $q_c = q_t$.

Wyniki i analiza badań

Lessy Lubelszczyzny w ujęciu geotechnicznym norm (PN-86/B-02480:1986; PN-EN ISO 14688-1:2006) to przede wszystkim pyły przechodzące lokalnie w pyły piaszczyste oraz piaski pylaste. Rzadziej, głównie w stropie i spągu, mogą przyjmować formę glin i glin pylastych. Wykorzystując nomogram Robertsona (rys. 3) – zmodyfikowany i dostosowany do warunków polskich przez Młynarka, Tschuschke i Wierzbickiego (1997) – grunty te są zidentyfikowane w rejonie obszarów pół-



RYSUNEK 3. Identyfikacja rodzaju gruntu lessowego z sondowania CPT z wykorzystaniem zmodyfikowanego nomogramu Robertsona (Młynarek i in., 1997)

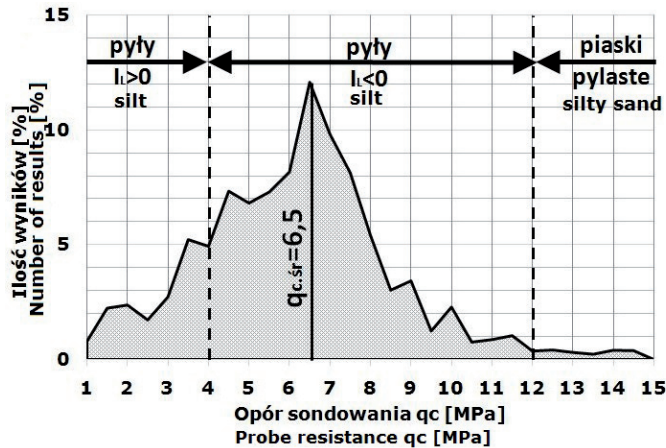
FIGURE 3. Identification of the loess subsoil type from CPT probing using the modified Robertson nomogram (Młynarek et al., 1997)

zwartych drobnoziarnistych i gliniastych na podstawie wyników ze stożka mechanicznego oraz w rejonach piasków pylastych i glin na podstawie wyników ze stożka elektrycznego. Należy jednak zaznaczyć, że wykorzystany nomogram został opracowany dla wyników CPTU, a więc przytoczona tu identyfikacja sondowań stożkiem mechanicznym jest jedynie porównawcza i pogładowa. Zdarza się, że rozkład frakcji uzyskany w laboratorium wskazuje na grunt spoisty, jednak duże wartości q_c i bardzo niski R_f wskazują na reakcje swoiste dla gruntu niespoistego. Jest to typowe dla gruntów „przejściowych” i szerzej zostało omówione przez Radaszewskiego i Stefaniaka (2017).

Jak wspomniano we wstępie, konsystencja lessów jest najczęściej zwarta lub twaroplastyczna, a jej zmiana jest wynikiem infiltracji wód powierzchniowych lub podsiąkania wody z głębszych warstw. Wykonywane sondowania wskazują, że mimo konsystencji zwartej

podłoże nie jest jednorodne. Ogólnie zauważono, że opory sondowania lessów wahają się w szerokim zakresie 1–15 MPa, a średnia wartość wynosi 6,5 MPa (rys. 4). Dla oporów $q_c > 12$ MPa grunt w odwiertach rozpoznawano zazwyczaj jako piasek pylasty o znacznej zawartości frakcji pylastej i niewielkiej ilości piasku drobnego.

Badania laboratoryjne wykonywane na próbkach NW pobranych z odwiertów oraz badania makroskopowe w terenie potwierdzają dominację konsystencji zwartej w budowie podłoża. Wyznaczenie konsystencji lessów bezpośrednio z wyników badań CPT było przedmiotem odrębnej analizy, na podstawie której ustalono, że dla lessów stopień plastyczności przyjmuje wartości dodatnie przy $q_c = 4,1\text{--}4,5$ MPa (Nepelski, Lal i Franus, 2016). Reasumując, spoiste grunty lessowe w stanie zwartym charakteryzują się oporami sondowania w zakresie 4,1–12 MPa. Nie można więc mówić o podłożu jednorodnym, gdy



RYSUNEK 4. Rozkład wartości oporów sondowania (q_c) lessów (badania własne)
 FIGURE 4. Distribution of the probe resistance values (q_c) of the loess subsoils (own studies)

w zakresie jednej warstwy geotechnicznej wartości q_c bywają trzykrotnie większe. Zauważony rozrzut wartości q_c w zakresie konsystencji zwartej nie jest niczym niespodziewanym i potwierdza tezę, że traktowanie stopnia plastyczności jako parametru wiodącego często jest nieprawidłowe. W polskiej praktyce inżynierskiej ta teza jest powszechnie stosowana, ale jest błędna nie tylko w przypadku lessów, ale także innych gruntów (Wierzbicki i Młynarek, 2015).

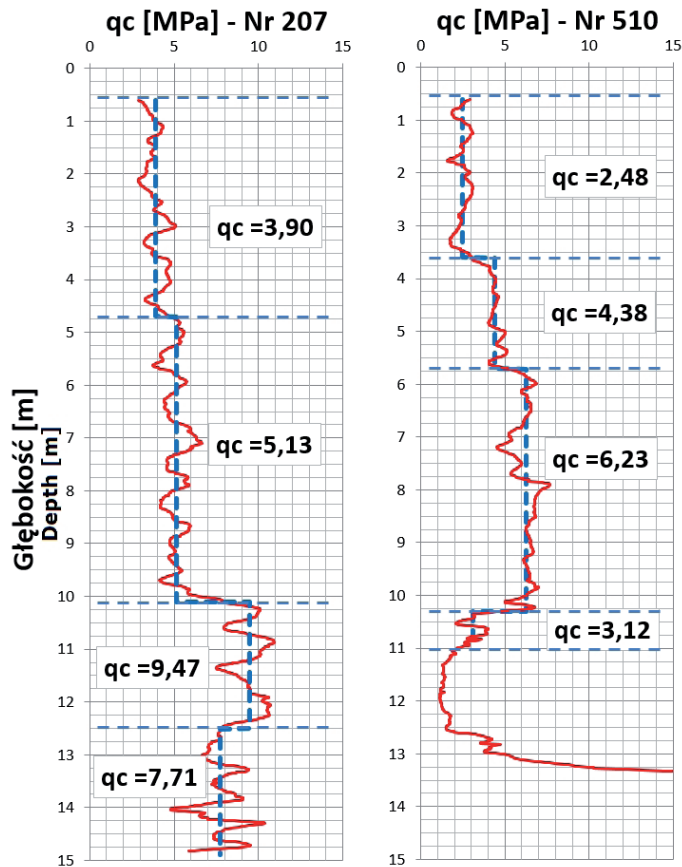
Rozkład wartości q_c uzyskanych z analizowanych sondowań przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 5 przedstawiono dwa przykładowe wykresy sondowania wykonane w Lublinie na Górkach Czechowskich. Zakres sondowania obejmował lessy o $I_L < 0$. Wartości oporu tych gruntów znacznie się różniły, przyjmując wartości 2,48–9,47 MPa. Sugeruje się więc, że chcąc wydzielić geotechnicznie warstwy lessów należy jako parametr wiodący zawsze stosować opór sondowania, a nie stopień plastyczności.

Na rysunku 6 przedstawiono rzeczywisty przekrój z wydzieleniami uwzględ-

nającymi parametry sondowania. Lessy są zawarte w warstwie I, która została podzielona na podwarstwy: Ia ($I_L = 0,20$) oraz Ib ($I_L = 0,00$; $q_c = 3,7$ MPa), Ic ($I_L = 0,00$; $q_c = 6,6$ MPa) i Id ($I_L = 0,00$; $q_c = 11,6$ MPa). Przy tradycyjnym podziale podwarstwy Ib, Ic oraz Id stanowiłyby jedną warstwę, bez rozdzielania ze względu na odmienne parametry.

Kolejną istotną kwestią jest ustalanie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych. W praktyce inżynierskiej często funkcjonuje jeszcze wyznaczanie poszczególnych parametrów na podstawie korelacji ze stanem gruntu z wykorzystaniem nomogramów z normy PN-81/B-03020:1981. Wyniki badań z różnych źródeł (Malinowski, 1959, 1971; Grabowska-Olszewska, 1963; Borowczyk i Frankowski, 1979; Kolano i Cała, 2011) sugerują, że w przypadku lessów może prowadzić to do znacznych błędów. Dla stanu zwartego odczytane z normy dla $I_L = 0,00$ parametry wynoszą $\varphi = 18^\circ$, $c = 30$ kPa oraz $M_o = 48$ MPa.

Wyniki badań prowadzonych przez lata na lessach Lubelszczyzny przez



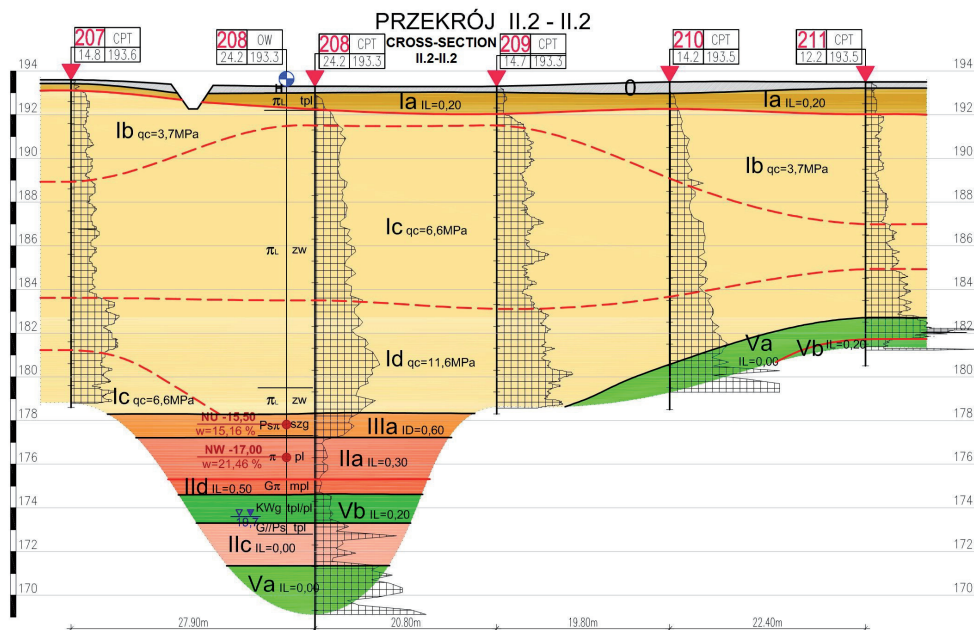
RYSUNEK 5. Opory sondowania (q_c) w lessach o $I_L < 0$. Lokalizacja: Lublin – Górkki Czechowskie (badania własne)

FIGURE 5. Probing resistance (q_c) in the loess subsoils of $I_L < 0$. Location: Lublin – Czechowskie Hills (own studies)

Malinowskiego wskazują na inne niż normowe parametry, przede wszystkim w przypadku kąta tarcia wewnętrznego. Według Malinowskiego (1971) kąt tarcia w pyłach lessowych waha się w przedziale $26\text{--}36^\circ$, a spójność $22\text{--}39$ kPa, z kolei w lessowych glinach pylistych kąt tarcia wynosi $6,5\text{--}34,5^\circ$, a spójność $20\text{--}120$ kPa. Podczas badań lessów okolic Kazimierza Dolnego i Nałęczowa Malinowski (1959) określił ich kąt tarcia wewnętrznego na $20\text{--}40^\circ$, z czego

najwięcej wyników oscylowało wokół 30° . Spójność według tych badań należy przyjmować w zakresie $10\text{--}50$ kPa.

Autorzy przeprowadzili własne badania wytrzymałościowe na próbkach NNS pobranych z poziomego fundamentów w wykopie szerokoprzestrzennym, na budowie budynków mieszkalnych wielorodzinnych przy ul. Cyprysowej w Lublinie. Z badań trójosiowych w warunkach z konsolidacją i odpływem (CD) otrzymano parametry $\varphi = 34\text{--}36^\circ$,



RYSunEK 6. Przekrój geotechniczny z podziałem warstwy lessowej ze względu na q_c (badania własne)
 FIGURE 6. Geotechnical cross-section with the division of the loess layer due to q_c value (own studies)

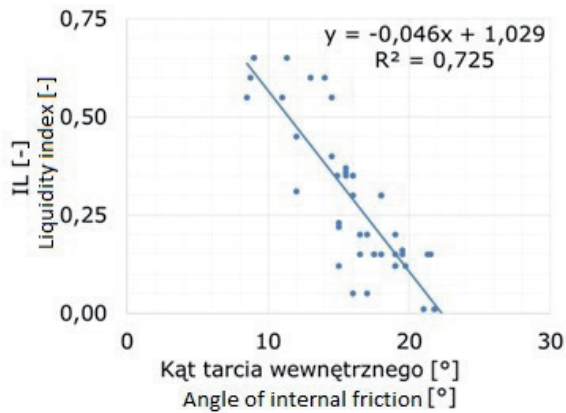
$c = 0-15$ kPa, a z badań bezpośredniego ścinania $\varphi = 36,8^\circ$, $c = 24,5$ kPa. Wykonywane w niedalekiej odległości od miejsca pobranych próbek sondowanie CPT osiągało wartości $q_c \sim 6,0$ MPa.

Z badań autora wykonywanych w ramach dokumentacji budowy budynku usługowo-mieszkalnego przy ul. Pana Balcera w Lublinie otrzymano parametry $\varphi = 25,5^\circ$, $c = 27,6$ kPa przy oporach $q_c \sim 8,0$ MPa oraz $\varphi = 22,1^\circ$, $c = 33,7$ kPa przy oporach $q_c \sim 4,0$ MPa. Należy zaznaczyć, że parametry te zostały wyznaczone przy kryterium zniszczenia przyjętym jako 5% odkształcenie próbki, a więc bardzo „bezpiecznym”.

Badania przeprowadzone na cele budowy wysokiego budynku mieszkalno-usługowego przy ul. Pana Balcera w Lublinie dały rezultaty $\varphi = 33-35^\circ$, $c \sim 0$ kPa (GEOTEKO, 2010).

Z wyników badań zebranych z ostatnich 25 lat i udostępnionych przez firmę geotechniczną GEKON z Lublina wynika, że badania laboratoryjne wskazują na $\varphi = 17-29^\circ$ dla stanu półzwarłego i $\varphi = 8,5-22,0^\circ$ dla stanów od twardo- do miękkoplastycznego oraz $c = 13-32$ kPa. Z danych tych można wyprowadzić zależność kąta tarcia wewnętrznego dla gruntów o $I_L > 0$ (rys. 7), opisaną zależnością $\varphi = 22,4-21,7 \cdot I_L [^\circ]$ z dopasowaniem $R^2 = 0,73$.

Biorąc pod uwagę brak wyprowadzonych wiarygodnych korelacji między oporami sondowania a kątem tarcia wewnętrznego i spójnością dla tego typu gruntów, najlepszym rozwiązaniem byłoby szacowanie nośności podłoża i określanie maksymalnych naprężeń pod fundamentem bezpośrednio z wyników sondowania statycznego CPT. Metody te



RYSUNEK 7. Zależność kąta tarcia wewnętrznego od stopnia plastyczności dla lessów Lubelszczyzny $I_L > 0,00$, na podstawie badań komercyjnych prowadzonych w latach 1992–2017 (opracowanie własne)
 FIGURE 7. Relationship between the angle of internal friction and liquidity index for loess subsoils of the Lublin region of $I_L > 0,00$, based on commercial research conducted in 1992–2017 (own elaboration)

są szeroko rozwijane dla posadowień palowych. Dla posadowienia bezpośredniego również istnieją takie metody, lecz głównie są przeznaczone dla podłoża zbudowanego z gruntów piaszczystych. Dla gruntów spoistych nośność można szacować metodą Skemptona lub Tanda (Briaund i Miran, 1992; Duan i Chen, 1999).

Kolejnym bardzo ważnym parametrem jest moduł ścisłości wykorzystywany do szacowania osiadania budynku. Zgodnie z normą PN-81/B-03020:1981 dla gruntów nieskonsolidowanych o $I_L < 0,00$ moduł ścisłości pierwotnej wynosi $M_o \sim 48$ MPa. Badania laboratoryjne prowadzone przez wiele niezależnych uczonych (Malinowski, 1959, 1971; Stróżyk, 2009) dają wartości znacznie mniejsze. Otrzymywane przez autorów z badań edometrycznych moduły wahają się w zakresie 4,5–10,0 MPa i są to wyniki bezpośrednie, bez stosowanych niekiedy współczynników zwiększających (κ) opisanych szerzej przez Wiłuna (2013). Otrzymywane rezultaty są zgodne z parametrami podawanymi przez in-

nych badaczy. W pracy z 1959 roku Malinowski przedstawił wyniki badań lessów, głównie pyłów o konsystencji zwartej i półzwartej z okolic Kazimierza Dolnego i Nałęczowa. Wynika z nich, że lessy charakteryzują się edometrycznymi modułami ścisłości pierwotnej 6–10 MPa dla przedziału naprężeń 50–100 kPa, 8–14 MPa dla przedziału naprężeń 100–200 kPa oraz 14–20 MPa dla przedziału naprężeń 250–300 kPa. W tej publikacji nie podano informacji o zastosowanych współczynnikach korygujących.

Badania przeprowadzone w ramach dokumentacji geotechnicznej wykonanej na cele budowy wysokiego budynku mieszkalno-usługowego przy ul. Pana Balcera (GEOTEKO, 2010) w Lublinie dały rezultaty $M_o \sim 10$ –20 MPa w zależności od przedziału naprężeń. Z danych udostępnionych przez firmę geotechniczną GEKON z Lublina badania edometryczne wskazują na M_o w zakresie 4–18 MPa.

Pomiary osiadań budynków najczęściej dają wyniki o mniejszych warto-

ściach od szacowanych na podstawie badań edometrycznych, co potwierdza, że moduły te nie powinny być wykorzystywane bezpośrednio do obliczeń, a badanie edometryczne zawiera w sobie wiele błędów (Wiłun, 2013). W przypadku badań laboratoryjnych należy również uwzględniać jakość pobranych próbek oraz stopień ich naruszenia. Niska jakość pobranej próbki powoduje, że wartości modułów uzyskanych w badaniach edometrycznych są znacznie zaniżone. Na podstawie własnych obserwacji autorzy stwierdzają, że wyznaczane na podstawie analizy wstecznej z rzeczywistego osiadania moduły ściśliwości zazwyczaj są między wartościami uzyskanymi z badań laboratoryjnych a normowymi. Potwierdzają to również badania Borowczyka i Frankowskiego (1977), Szulborskiego i Wysokińskiego (2004), Wysokińskiego, Godlewskiego i Kotlickiego (2011) oraz Wiłuna (2013).

Moduł ściśliwości z sondowania statycznego jest parametrem wyinterpretowanym. W zależności od przyjętej formuły interpretacyjnej otrzymuje się różne wartości. Według Eurokodu 7 (PN-EN 1997-2:2009) moduł można wyznaczyć z korelacji Sanglerata (1972) ze wzoru $M = \alpha_m \cdot q_c$, gdzie α_m jest współczynnikiem empirycznym, przyjmowanym w zakresie 1–8 w zależności od rodzaju gruntu i oporów sondowania. Dla gruntów „mocniejszych” przyjmuje się mniejsze wartości. Inną korelację: $M = 8,25(q_t - \sigma_0)$ podają Kulhawy i Mayne (1990). Senneset, Janbu i Svanö (1982) proponują zależność podobną, ale uzależnioną od historii gruntu i opisaną wzorem $M = \alpha_m (q_t - \sigma_0)$, gdzie α_m przyjmuje się w zakresie 5–15 dla prekonsolidowanych gruntów oraz 4–8

dla normalnie skonsolidowanych. Inną propozycję ustalania współczynnika α_m do wzoru $M = \alpha_m \cdot q_c$ podają Ciloglu, Cetin i Erol (2014): uzależniają oni wartość α_m od wskaźnika plastyczności (PI) oraz zawartości frakcji drobnziarnistych (FC), w ostateczności podając wartości z zakresu 3,1–13,5. Jeszcze inna jest propozycja Młynarka, Wierzbickiego i Lunne'a (2016), w której wartość współczynnika α_m jest także uzależniona od historii obciążenia (np. gliny lodowcowe NC $\alpha_m = 13,1$, a OC $\alpha_m = 8,2$).

Wyznaczanie parametrów odkształceniowych z sondowań statycznych (Briaund i Miran 1992; Bajda i Markowska, 2003; Sikora, 2005), mimo że nie jest metodą bezpośrednią, często jest stosowane i szeroko rozwijane. Biorąc pod uwagę rzeczywiste osiadania obiektów na lessach, przyjmowanie skrajnie małych wartości α_m daje zbyt „bezpieczne” parametry, chociaż zbliżone do wyników badań edometrycznych. Według autorów dla lessów współczynnik α_m powinien przyjmować wartości w zakresie 6–8.

Podsumowanie i wnioski

Głównym wnioskiem płynącym z przeprowadzonych badań i analiz jest potrzeba wyznaczania parametrów podłoża lessowego przede wszystkim z sondowań statycznych CPT. Podczas wykonywania badań zauważono znaczny rozrzut oporów sondowania statycznego, q_c nie zawsze jest związany ze stopniem plastyczności. Ma to uzasadnienie ze względu na proces powstawania lessów. Opory sondowania odwzorowują sztywności podłoża, a co za tym idzie jego podatność na osiadanie pod wpływem

obciążeń przekazywanych przez budowlę. W lessach, mimo że $I_L < 0,00$, należy wydzielać podwarstwy ze względu na różnorodną sztywność (wynikającą m.in. z porowatości, ze składu ziarnowego, z kształtu i ułożenia cząsteczek) oraz na opory sondowania. Projektowanie fundamentów na podstawie warstw wydzielonych jedynie ze względu na stopień plastyczności może prowadzić do nierównomiernego osiadania obiektu. Ponadto na potrzeby inżynierskie bardzo istotne jest opracowanie procedury projektowania bezpośrednio z wyników sondowania, tak jak w przypadku projektowania fundamentów palowych. Najlepszą metodą badawczą lessów jest łączenie sondowania CPT i odwiertów badawczych. W każdym punkcie badawczym należy wykonać sondowania, a następnie w wybranych odwiert badawczych. Proponuje się wykonywanie jednego odwiertu na 3–4 sondowania.

Literatura

- Bajda, M. i Markowska, K. (2003). Wykorzystanie sondowań SCPTU do wyznaczania modułu ściśliwości M w gruntach spoistych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 98(1574), 9–14.
- Borowczyk, M. i Frankowski, Z. (1979). Zmienność właściwości geotechnicznych lessów w świetle współczesnych metod badań. *Kwartalnik Geologiczny*, 23(2), 447–562.
- Briaund, J-L. i Miran, J. (1992). *The Cone Penetrometer Test*. Report No. FHWA-SA-91-043. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- Duan, L. i Chen, W.F. (1999). *Bridge Engineering Handbook. Superstructure Design*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Ciloglu, F., Cetin, K.O. i Erol, A.O. (2014). CPT-based compressibility assessment of soils. *W International Symposium on Cone Penetration Testing*, Las Vegas. (strony 629-636).
- GEOTEKO (2010). *Dokumentacja geologiczno-inżynierska ustalająca geotechniczne warunki posadowienia dla potrzeb projektu inwestycji w rejonie ulic Zana, Balcera i Filaretów w Lublinie*. Warszawa: GEOTEKO.
- Grabowska-Olszewska, B. (1963). Własności fizyczno-mechaniczne utworów lessowych północnej i północno-wschodniej części świętokrzyskiej strefy lessowej na tle ich litologii i stratygrafii oraz warunków występowania. *Biuletyn Geologiczny*, 3, 68-183.
- Kolano, M. i Cała, M. (2011). Lessy okolic Sandomierza w świetle badań geologiczno-inżynierskich. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2, 349-358.
- Kulhawy, F.H. i Mayne, P.W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design* (No. EPRI-EL-6800). Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group.
- Malinowski, J. (1959). Wyniki badań geotechnicznych lessu między Kazimierzem Dolnym a Nałęczowem. *Kwartalnik Geologiczny*, 3(2), 425-456.
- Malinowski, J. (1971). *Badania geologiczno-inżynierskie lessów*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.
- Młynarek, Z., Tschuschke, W. i Wierzbicki, J. (1997). Klasyfikacja gruntów podłoża budowlanego metodą statycznego sondowania. W „*Geotechnika w Budownictwie i Transporcie*” XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gdańsk, tom 2 (strony 119-126). Gdańsk: Politechnika Gdańska.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Lunne, T. (2016). On the influence of overconsolidation effect on the compressibility assessment of subsoil by means of CPTU and DMT. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation* 48(3), 189-200.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Mańka, M. (2015). Geotechnical Parameters of Loess Soils from CPTU and SDMT. W S. Marchetti, P. Monaco, A. Viana da Fonseca (red.), *International Conference on the Flat Dilatometer DMT'15*, Rome, (strony 481–489). Retrieved from:

- http://www.marchetti-dmt.it/conference/dmt15/_service%20files/html/index.htm.
- Nepelski, K., Lal, A. i Franus, M. (2016). Analiza wyznaczania konsystencji lessów lubelskich na podstawie wyników sondowań statycznych CPT. *Budownictwo i Architektura*, 15(4), 183-194.
- Pisarczyk, S. (2015). *Gruntoznawstwo inżynierskie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- PN-81/B-03020:1981. Grunty budowlane. Posa-dowanie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-86/B-02480:1986. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-B-02479:1998. Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
- PN-B-04452:2002. Geotechnika. Badania polowe.
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- PN-EN ISO 22476-1:2012. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe. Część 1: Badanie sondą statyczną ze stożkiem elektrycznym lub stożkiem piezo-elektrycznym.
- PN-EN ISO 22476-12:2009. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe. Część 12: Badanie sondą stożkową (CPTM) o końcówce mechanicznej.
- Radaszewski, R. i Stefaniak, K. (2017). Problem wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie gruntów przejściowych. *Przegląd Geologiczny*, 65(10), 864-872.
- Sanglerat, G. (1972). *The penetrometer and soil exploration*. Amsterdam: Elsevier.
- Senneset, K., Janbu, N. i Svano, G. (1982). Strength and deformation parameters from cone penetration tests. W *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, tom 2, Amsterdam (strony 863-870). Boca Raton: CRC Press.
- Sikora, Z. (2005). *Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii*. Warszawa: WNT.
- Stróżyk, J. (2009). Charakterystyka ściśliwości gruntu pylastego, na przykładzie lessu z rejonu Wrocławia. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 1, 575-582.
- Szulborski, K. i Wysokiński, L. (2004). Ocena współpracy konstrukcji z podłożem. *Referat przedstawiony na VIII Konferencji „Problemy rzeczoznawstwa budowlanego”*, Cedzyna.
- Tümay, M.T., Karasulu, Y.H., Młynarek, Z. i Wierzbicki, J. (2011). Effectiveness of CPT-based classification charts for identification of subsoil stratigraphy. W A. Anagnostopoulos, M. Pachakis, C. Tsatsanifos (red.), *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Amsterdam (strony 91-98). Amsterdam: IOS Press.
- Wierzbicki, J. i Młynarek Z. (2015). Reprezentatywna wartość parametru geotechnicznego z badań in situ i jej wykorzystanie do konstrukcji modeli geotechnicznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 166-176.
- Wiłun, Z. (2013). *Zarys geotechniki*. Warszawa: WKŁ.
- Wysokiński L., Godlewski T., i Kotlicki W. (2011). *Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej.

Streszczenie

Identyfikacja parametrów geotechnicznych lessów lubelskich na podstawie sondowań statycznych CPT. W pracy przedstawiono analizę wyników badań wykonanych na gruntach lessowych Lubelszczyzny, klasyfikowanych geotechnicznie według norm PN-86/B-02480:1986 oraz PN-EN ISO 14688-1:2006 jako pyły i pyły piaszczyste oraz piaski pylaste. W terenie wykonano ponad 300 sondowań CPT/CPTU z elektrycznym i mechanicznym stożkiem, badając łącznie około 2700 mb profilu lessowego. W kilkunastu miejscach przeprowadzono testy porównawcze oporów sondowania uzyskanych różnymi stożkami. W wybranych miejscach bezpośrednio przy

sondowaniach wykonywano odwierty i pobierano próbki do badań laboratoryjnych. W laboratorium określano wilgotność naturalną i granice konsystencji. Dodatkowo przeanalizowano parametry wytrzymałościowe (kąta tarcia wewnętrznego i spójność) oraz odkształceniowe (moduły ścisłości) oraz otrzymane wyniki porównano z danymi literaturowymi oraz rezultatami badań wykonywanych dla celów projektowych.

Summary

Identification of geotechnical parameters of Lublin loess subsoil based on CPT tests. The paper presents an analysis of the results of tests carried out on loess subsoil in the Lublin region, classified geotechnically according to PN-86/B-02480:1986 and PN-EN ISO 14688-1:2006 as silt, sandy silt and silty sands. In the field, over 300 CPT/CPTU with electric and mechanical cones tests were performed, testing a total of about 2,700 lm of the loess profile. In several places, com-

parative tests of the probing resistances obtained with different cones were carried out. In selected places, holes were drilled directly at the penetrometer tests and samples were taken for the laboratory tests. Moisture, consistency limits were determined in the laboratory. In addition, the strength parameters (angle of internal friction and cohesion) and deformation parameters (oedometer modules) were analyzed. The obtained results were also compared with the literature data and the results of tests carried out commercially for design purposes.

Authors' addresses:

Krzysztof Nepelski
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38D
Poland

e-mail: k.nepelski@pollub.pl

Małgorzata Rudko
GeoNep Geotechnika Nepelski Chymosz sp.j.
20-502 Lublin, ul. Wigilijna 4/1
Poland

e-mail: malgoska.r22@gmail.com