

Budowa modelu geotechnicznego podłoża lessowego

Creating of a geotechnical model of the loess subsoil

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

DOI: 10.15199/33.2023.02.11

Streszczenie. Lessy charakteryzują się zróżnicowaną sztywnością pomimo względnej jednorodności makroskopowej. Budowa modelu geotechnicznego podłoża powinna bazować na testach in situ. Właściwy opis zachowania gruntu możliwy jest jedynie z wykorzystaniem danych z wielu metod badawczych, a przede wszystkim pozwalających na ocenę statystyczną, jak np. CPT/CPTU (test statycznego sondowania/test CPT z pomiarem ciśnienia wody w porach) i DMT (test dylatometrem płaskim). Testy te zapewniają duży zbiór danych, umożliwiając wyodrębnienie stref o zbliżonej sztywności oraz wyprowadzanie parametrów odkształceniowych. W artykule przedstawiono metodę budowy modelu geotechnicznego z testów in situ.

Słowa kluczowe: CPT/CPTU; SDMT (test DMT z pomiarem prędkości poprzecznej fali sejsmicznej); lessy; sztywność.

Abstract. Despite the relative macroscopic homogeneity, loess has varied 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 CPT/CPTU (Cone Penetration Test/CPT test with pore pressure measurement) and DMT (Flat Dilatometer Test). 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 creating a geotechnical model from in-situ tests.

Keywords: CPT/CPTU; SDMT (DMT test with seismic shear wave velocity measurements); loess; stiffness.

Projekt fundamentu, uwzględniający współdziałanie obiektu z podłożem wykonuje się, przyjmując model obliczeniowy podłoża na podstawie teorii mechaniki gruntów. Podstawą założeń do modelu geotechnicznego jest budowa geologiczna oraz charakterystyka warstw (parametry). W przypadku prostych konstrukcji modele te mogą być tożsame, ale przy bardziej zaawansowanych powinny być odmienne. W tych samych warunkach gruntowych, model geotechniczny może się różnić w zależności m.in. od rodzaju projektowanej konstrukcji, jej wymiarów, sposobu i głębokości posadowienia oraz przenoszonych obciążeń (wielkość i charakter).

Wraz z wprowadzeniem postanowień Eurokodu 7 oraz ogólnych trendów światowych do praktyki geotechnicznej w Polsce rozpowszechniło się stosowanie badań polowych (in situ), z naciskiem na sondowanie statyczne,

w przypadku którego opracowano liczne formuły interpretacyjne parametrów geotechnicznych [1]. Od ponad dekady coraz szerzej propagowane są też badania terenowe i laboratoryjne w powiązaniu z metodami geofizycznymi [2]. Ich zastosowanie pozwala na dużo lepszy opis właściwości podłoża, niż z wykorzystaniem dotychczasowych praktyk, ale narzędzia te wymagają dużego doświadczenia przy interpretacji wyników. Istotne są doświadczenia regionalne, pozwalające na interpretację wiarygodnych parametrów geotechnicznych z wyników badań polowych [2 ÷ 4]. W ramach projektowania geotechnicznego wymagane jest określenie niezbędnych parametrów podłoża opisywanego na poziomie behawioralnym (a nie tylko granulometrycznym), zgodnie z zasadą wprowadzoną przez Robertsona [5] – Soil Behaviour Type (SBT). Dodatkowo w przypadku np. określania wartości modułów odkształcenia w gruntach, bardzo ważne jest uwzględnienie rzeczywistej pracy konstrukcji, tzn. m.in., że wartości modułów powinny być wyznaczane w zakresie naprężeń i odkształceń, w którym mieści się współdziałanie danej konstrukcji.

W artykule przedstawiono ocenę sztywności podłoża lessowego na podstawie wyników badań in situ, w tym m.in. metodę budowy modelu geotechnicznego.

Charakterystyka podłoża lessowego

Lessy zajmują ok. 7% powierzchni Polski [6], a w procesie ich powstawania znaczną rolę odgrywał wiatr. Pojęcie lessy jest bardzo ogólne i zalicza się do nich zarówno utwory o genezie „czysto” eolicznej, jak również utwory lessopodobne, które powstały przy współdziałaniu innych czynników lub zostały częściowo przeobrażone w późniejszych stadiach. Biorąc pod uwagę wszystkie procesy protogenetyczne, syngenetyczne oraz epigenetyczne w zakresie lessów wydziela się facje, które charakteryzują się zróżnicowanymi cechami. W obrębie Lublina należy wyodrębnić trzy główne grupy facjalne: eoliczną (lessy typowe), eoliczno-deluwialną oraz eoliczno-aluwialną [7 ÷ 9].

Budowa pokrywy lessowej w obrębie Lublina jest powtarzalna. Górna, przypowierzchniową strefę, przeciętnie 1 – 2 m, stanowią lessy eoliczno-deluwialne. Są to grunty, które pierwotnie zostały akumulowane przez wiatr w formie lessów

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

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

³⁾ Geonep Geotechnika Nepelski Chyמוש Sp.j.

*) Adres do korespondencji: k.nepelski@pollub.pl

typowych, a następnie redeponowane lub przeobrażone przez florę i faunę, dlatego najczęściej są barwy brązowej lub ciemnobrązowej. Zauważalne są także liczne smugi oraz cienkie warstwy, mniej i bardziej gliniaste. Pod względem granulometrycznym utwory te zazwyczaj są klasyfikowane jako gliny pylaste z pogranicza pyłów. Mają dużą wilgotność i konsystencję twaroplastyczną bądź plastyczną.

Główne podłoże tworzą lessy typowe, facji eolicznej. Ich miąższość osiąga kilkanaście metrów, dlatego też mają kluczowe znaczenie w posadowieniu budynków. W ujęciu granulometrycznym są to pyły, makroskopowo jednorodne, sporadycznie z cienkimi przewarstwieniami piaszczystymi, zazwyczaj barwy jasnobrązowej lub żółtej, o małej wilgotności i zwartej lub twaroplastycznej konsystencji. W niektórych częściach Lublina, w głębszych partiach podłoża, można wydzielić także lessy eoliczne starsze, w których występuje zwiększona zawartość frakcji piaszczystej, powodując zazwyczaj duże opory stożka q_c .

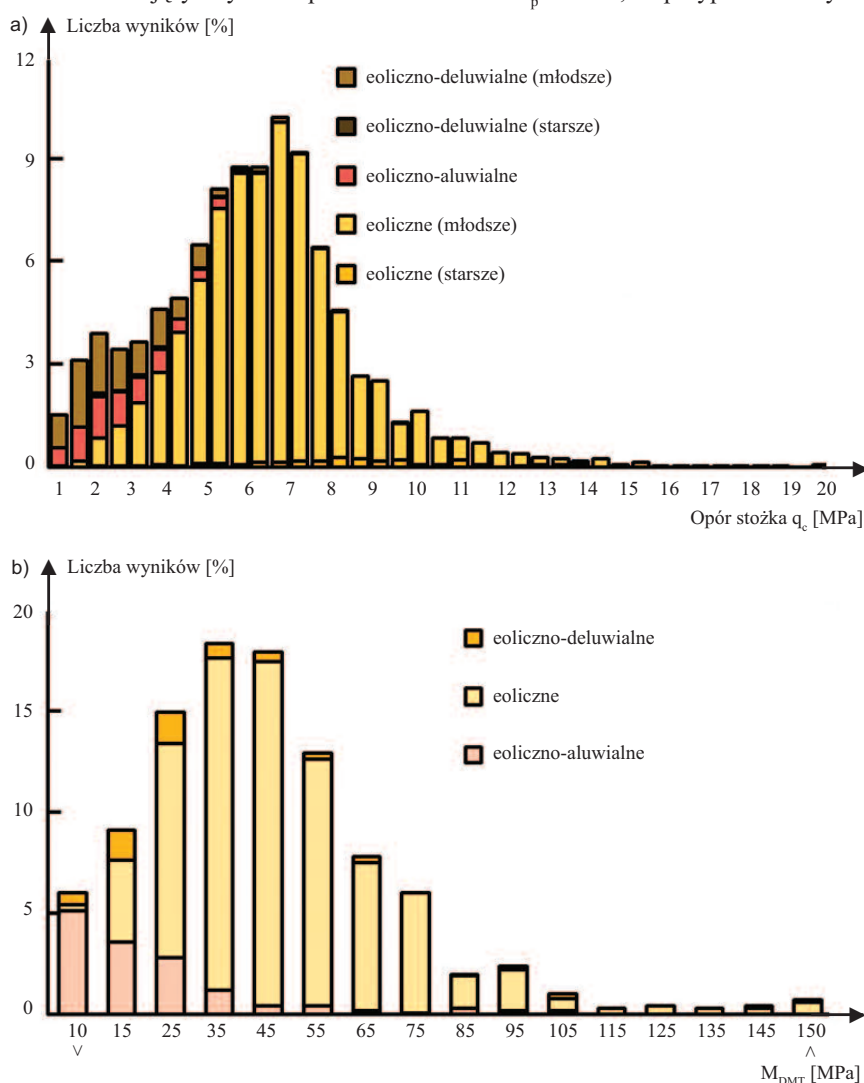
Najgłębiej, poniżej lessów typowych, występują lessy zaliczane do grupy eoliczno-aluwialnej, które ułożone są bezpośrednio na podłożu zwietrzelinowo-skalistym lub wodnolodowcowych piaskach. Facja ta jest dużo bardziej niejednorodna, ponieważ występuje w postaci glin i glin pylastych lub pyłów z przewarstwieniami piasków i piasków pylastych. Opisana duża zmienność uwidacznia się w parametrach mierzonych w testach in situ.

Lessy uznawane są za grunty specyficzne i kojarzone głównie ze zjawiskiem osiadania zapadowego, gdyż część tych utworów jest makroporowata. Istotne jest także to, że większość podłoża lessowego, przede wszystkim pylastych „lessów typowych”, występuje w stanie nienasyconym. Ważną kwestią jest duże zróżnicowanie sztywności podłoża lessowego, przy względnej jednorodności makroskopowej. Bardzo dobrą metodą pozwalającą na identyfikację sztywności są testy in situ, przede wszystkim sondowanie statyczne CPT dostarczające quasi-ciągłych danych oraz testy dylatometryczne DMT pozwalające na wyznaczenie odkształcal-

ności w warunkach naturalnych naprężeń. Uzupełnieniem tych badań są pomiary sejsmiczne, w których na podstawie pomiaru prędkości rozchodzenia się fali w gruncie wyznacza się początkowy moduł odkształcenia postaciowego G_0 . Badania CPT wskazują, że w przypadku lessów typowych o konsystencji zwartej lub półzwartej ($I_L < 0$), których jest najwięcej w rejonie Lublina, opory stożka q_c wynoszą 4 – 12 MPa, a moduły ściśliwości z badań dylatometrycznych M_{DMT} 20 – 90 MPa, co obrazuje rysunek 1 [7]. Tak duży zakres wartości świadczy o silnym zróżnicowaniu podłoża lessowego i słuszności wydzielenia warstw geotechnicznych nie tylko ze względu na I_L , ale również opór stożka q_c odzwierciedlający sztywność podłoża.

Budowa modelu geotechnicznego na podstawie badań in situ

Zgodnie z tradycyjnym (obecnie dyskusyjnym) podejściem, w Polsce głównym parametrem przy wydzieleniu warstw geotechnicznych w przypadku gruntów spoistych (drobnoziarnistych) jest stopień plastyczności I_L . Przywiązanie do tego parametru jest u nas dużo większe niż na świecie [10] i bez wątplenia wynika z wieloletniego stosowania normy [11]. Podejście takie, mimo iż jest rutynowo stosowane, nie jest właściwe, szczególnie w odniesieniu do lessów i gruntów lessopodobnych. Lessy to głównie grunty mało spoiste, pylaste o wskaźniku plastyczności $I_p < 10\%$, w przypadku których



Rys. 1. Rozkład statystyczny parametrów z badań in situ w lessach w obrębie Lublina: a) opór stożka q_c ; b) moduł ściśliwości M_{DMT}

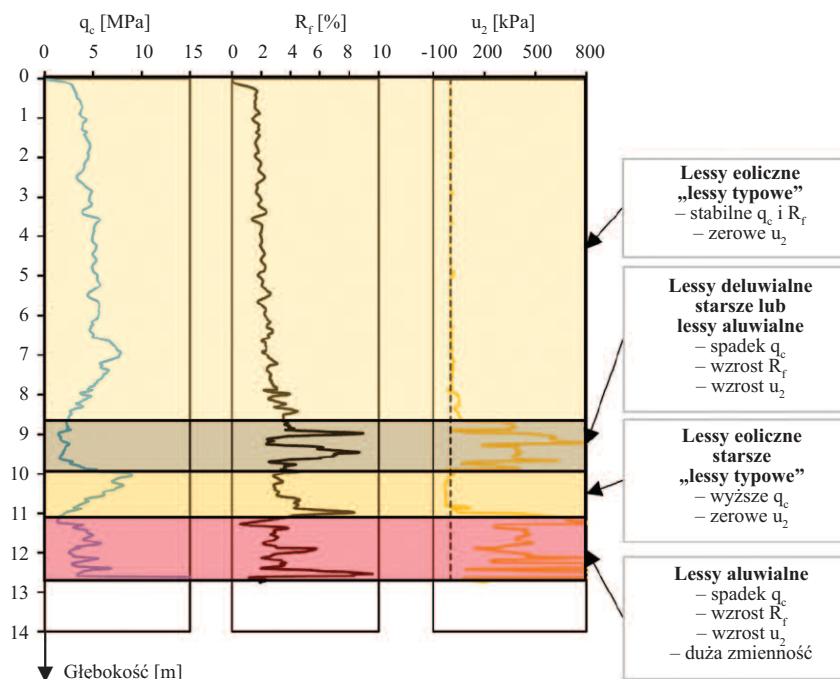
Fig. 1. Statistical distribution of in situ tests parameters for loess soils within Lublin: a) cone resistance q_c ; b) constrained modulus M_{DMT}

nawet niewielka zmiana wilgotności może powodować zmianę ich stanu, ponieważ zmiana wilgotności o 1% powoduje zmianę I_L o 0,10 – 0,15. Dodatkowo wstępna ocena stanu i wydzielenie granic w terenie odbywa się na podstawie analizy makroskopowej. Zgodnie z normą [12] różnica jednego wałeczka w przypadku pyłów powodowała zmianę stanu lessów. Niejednokrotnie trudno makroskopowo wychwytać granice, ponieważ często przebiegają one w sposób płynny. Samo wałeczkowanie wg dotychczasowej normy miało służyć jedynie określeniu stanu, nie zaś konkretnej wartości I_L jak to często ma miejsce w praktyce. W normie tej istniał także zapis o niemożliwości stosowania parametru I_L w przypadku gruntów mało spoistych, co regularnie było i jest ignorowane w praktyce. **I_L można traktować jedynie jako parametr pomocniczy.** Przy odwiertach, nawet gdy wykonywane są badania laboratoryjne, to ich liczba jest nieporównywalnie mniejsza niż danych z testów in situ. Efektem jest duża subiektywność oceny, uzależniona od osoby badającej i od fragmentu badanego gruntu, co można wyeliminować przy badaniach in situ, gdyż pomiary wykonywane są z wykorzystaniem wykalibrowanych urządzeń. Ponadto duża liczba uzyskiwanych wyników daje możliwość obróbki statystycznej.

Utworki pylaste są gruntami przejściowymi z pogranicza drobnoziarnistych (spoistych) i gruboziarnistych (niespoistych). Ma to swoje odzwierciedlenie w parametrach uzyskiwanych z najpopularniejszych testów in situ (CPT, DMT). Pomimo zawartości frakcji ilowej na poziomie 5 – 10% najczęściej zachowanie tych gruntów jest zbliżone do gruntów piaszczystych (niespoistych). Wskazują na to m.in. nomogramy SBT w przypadku badań CPT (mała wartość R_f i wysoka q_c) oraz wskaźnik materiałowy $I_p > 1,8$ z badania DMT. Cechą charakterystyczną lessów typowych jest także to, że w ich obrębie odczyty ciśnienia wody w porach u_2 w testach CPTU są najczęściej zerowe lub występuje nieznaczne podciśnienie, co wynika z nienasyconego charakteru pracy tych gruntów w podłożu. Wzrost u_2 pojawia się w warstwach lessów deluwialnych lub aluwialnych i połączony jest ze spad-

kiem q_c . W obrębie tych facji wzrasta wskaźnik R_f , a jego przebieg ma najczęściej dużą zmienność. Na rysunku 2 przedstawiono reprezentatywne wykresy parametrów testu CPTU wykonanego w podłożu lessowym oraz scharakteryzowano jakość poszczególnych facji.

gotności. Warto zwrócić uwagę, że w wydzielonych podwarstwach występuje bardzo duże zróżnicowanie reprezentatywnej wartości q_c wahające się od 2,9 do 12,8 MPa. Konkretnie wartości q_c nie są jednak powiązane z lokalizacją geograficzną ani z głębokością



Rys. 2. Parametry sondowania CPTU w podłożu lessowym wraz z charakterystyką parametrów rejestrowanych w poszczególnych facjach

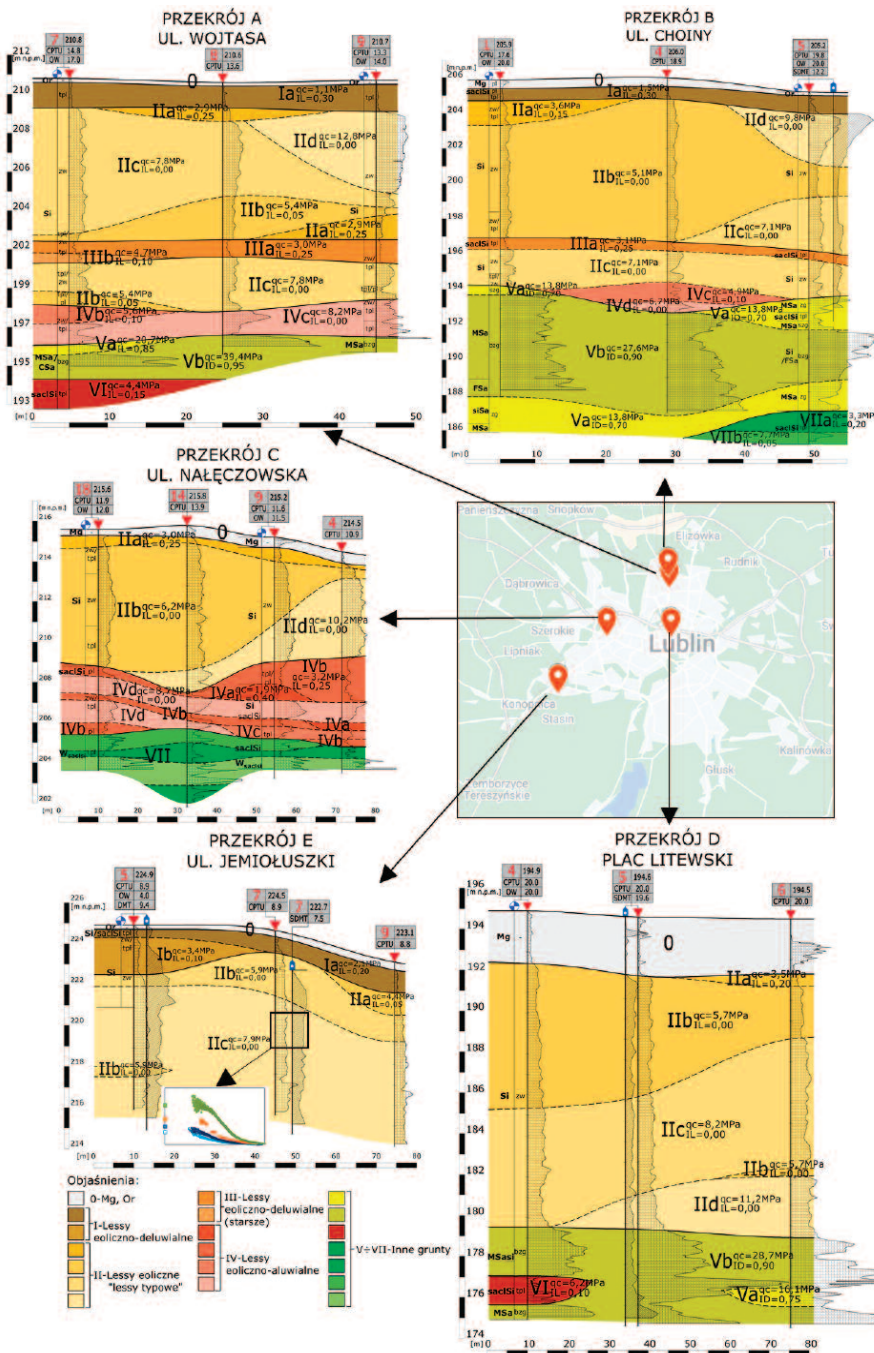
Fig. 2. CPTU test parameters in loess subsoil with characteristic of parameters in each facies

Przebieg wartości na wykresach testów in situ, przede wszystkim q_c , R_f (CPT), M_{DMT} , I_D (DMT) stanowi bardzo dobrą podstawę do wydzielenia warstw geotechnicznych. Na rysunku 3 zaprezentowano kilka przykładowych przekrojów geotechnicznych z Lublina opracowanych na podstawie testów in situ. W każdym przyjęto, że warstwa I obejmuje grupę eoliczno-deluwialną, warstwa II eoliczną (lessy typowe), warstwa III eoliczno-deluwialną starszą, a warstwa IV eoliczno-aluwialną. W warstwach V-VII zawarto pozostałe grunty.

Dzięki danym z testów CPT i DMT można wydzielić podwarstwy opisane np. wartością oporu stożka q_c . Makroskopowo taka zmienność jest nie do wychycenia, a pojedyncze próbki wyznaczanego laboratoryjnie stanu najczęściej nie są reprezentatywne. Badanie dużej liczby próbek jest czasochłonne. Dodatkowo, obniżone wartości q_c nie zawsze są powiązane ze zmianą wil-

goci. Występują zarówno tendencje wzrostowe wartości q_c wraz z głębokością (np. przekrój D i E), jak i spadkowe ze skrajnie wysokimi wartościami q_c w górnej części pokrywy lessowej, np. przekrój A, punkt 9.

Opory stożka q_c bardzo często dobrze korelują z wartościami M_{DMT} , jak np. w przekroju B w punkcie 5, gdzie w strefie stropowej eolicznej występują „bardzo mocne” lessy. Wraz z głębokością trend zmienności q_c pokrywa się z M_{DMT} . Starsze lessy eoliczne wykazują się na ogół większą nośnością od młodszych, co ma odzwierciedlenie w wartościach q_c oraz M_{DMT} . Przejście lessów młodszych w starsze może występować bez wyraźnej granicy, lecz w niektórych przypadkach występuje ich rozdzielenie warstwą pylasto-gliniastą, którą charakteryzuje zwiększone R_f oraz znacznie niższe q_c (np. przekrój A i B). Często bardzo małymi wartościami q_c charakteryzują się przypowierzchniowe deluwia, nawet przy sta-



Rys. 3. Geotechniczne modele podłoża opracowane na podstawie testów in situ
 Fig. 3. Geotechnical subsoil models created based on in situ test

nie zwartym lub twaroplastycznym (np. w przekrojach A, B, E). Przy parametryzacji za pomocą I_L przypisuje się znaczne przeszacowanie sztywności tej strefy, traktując ją na równi z gruntami zwartymi z większej głębokości. W obrębie utworów eoliczno-aluwialnych występuje duża zmienność rejestrowanych wartości, dlatego też trudno wydzielić warstwy o małym wskaźniku zmienności parametrów.

Podsumowanie

Pokrywa lessowa pomimo swej względnej makroskopowej jednorodności charakteryzuje się zróżnicowaną sztywnością, dlatego też wydzielenie warstw na podstawie I_L skutkuje najczęściej przyjęciem jednej warstwy i takich samych parametrów do głębokości nawet kilkunastometrowej!!! Zróżnicowanie podłoża ze względu na q_c w połączeniu z analizą M_{DMT} pozwala na po-

prawne odwzorowanie sztywności podłoża, odpowiadające rzeczywistej zmienności.

Właściwe wydzielenie warstw geotechnicznych stanowi ważny element budowy modelu geotechnicznego podłoża. Testy in situ należy uznać za podstawowe narzędzie w tym procesie, ponieważ dostarczają wielu danych pozwalających na ocenę statystyczną. Kolejnym etapem po wydzieleniu warstw jest ich parametryzacja. Charakterystyka odkształceniowa podłoża lessowego zostanie przedstawiona w kolejnym artykule stanowiącym kontynuację niniejszej publikacji.

Literatura

[1] Robertson PK, Cabal K. Guide to cone penetration testing. Gregg Drilling LLC, California; 2022.
 [2] Amoroso S, Monaco P, Marchetti D. Use of the Seismic Dilatometer (SDMT) to estimate in situ G-γ 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.
 [3] 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>.
 [4] Godlewski T, Wszędyrówny-Nast M. Correlations of regional geotechnical parameters on the basis of CPTU and DMT tests. Proceedings of The 13th Baltic Sea Geotechnical Conference. 2016; s. 22 – 27.
 [5] Robertson PK. Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Canadian Geotechnical Journal. 2009; <https://doi.org/10.1139/T09-065>.
 [6] Kaczyński R. Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. Warszawa: PIG; 2017.
 [7] Nepelski K. Charakterystyka lessów lubelskich jako podłoża budowlanego. Przegląd Geologiczny. 2021; <https://doi.org/10.7306/2021.45>.
 [8] Maruszczak H. Definicja i klasyfikacja lessów oraz utworów lessopodobnych. Przegląd Geologiczny. 2000; 48 (7): 580 – 586.
 [9] Malinowski J. Badania geologiczno-inżynierskie lessów. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne; 1971.
 [10] Tschuschke W. Identyfikacja konsystencji gruntów mało spoistych na podstawie charakterystyk penetracji z badania sztywności sondowania. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2013; 4: 247 – 252.
 [11] PN-81 B-03020:1981. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
 [12] PN-88 B-04481:1988. Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.

Przyjęto do druku: 16.01.2023 r.