

OCENA PARAMETRÓW GRUNTÓW ORGANICZNYCH DO PROJEKTOWANIA WZMOCNIENIA PODŁOŻA DROGI EKSPRESOWEJ NA PODSTAWIE BADAŃ *IN SITU*

Marek Bajda[✉], Zdzisław Skutnik, Mariusz Lech, Simon Rabarijoely

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodykę i wyniki terenowych badań geotechnicznych, sondowań połową sonda obrotową FVT i badań dylatometrycznych DMT wykonanych w podłożu zbudowanym z gruntów organicznych. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań określono rozkłady z głębokością wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (τ_{fu}) i moduł ściśliwości (M) torfu i gytii w profilach punktów badawczych. Uzyskano w ten sposób miarodajne wartości parametrów geotechnicznych do prognozowania reakcji podłoża organicznego na obciążenia.

Słowa kluczowe: podłoże organiczne, badanie DMT, sondowanie FVT

WSTĘP

Konieczność poprawy infrastruktury komunikacyjnej w kraju wymaga budowania nowej sieci dróg niejednokrotnie w trudnych warunkach geotechnicznych. Podłoże nowo budowanych dróg i nasypów drogowych stanowią coraz częściej słabonośne grunty mineralne lub grunty organiczne (torfy, gytie oraz namuły). Grunty te charakteryzują się małą wytrzymałością na ścinanie oraz dużą ściśliwością. Wartości i charakter odkształceń podłoża pojawiające się w trakcie budowy oraz po jej zakończeniu zależą od wartości naprężenia wynikającego z obciążenia, sposobu budowy obiektu oraz właściwości inżynierskich podłoża. Odkształcenia te prognozowane mogą być na podstawie zależności empirycznych opracowanych w odniesieniu do danego rodzaju gruntu i projektowanej wartości obciążenia lub z wykorzystaniem modeli gruntowych opisujących zależność naprężenie – odkształcenie – czas z wykorzystaniem teorii konsolidacji. Poprawna identyfikacja

parametrów modeli gruntowych jest zadaniem trudnym i odpowiedzialnym, gdyż błędne oszacowanie wartości parametrów gruntów organicznych wykorzystywanych w obliczeniach numerycznych skutkować może poważnymi konsekwencjami w postaci niedoszacowania odkształcenia podłoża poddanego znacznemu obciążeniu (np. nasypem drogowym). W konsekwencji może to doprowadzić do znacznych odkształceń podłoża, które uniemożliwią prawidłowe wykonanie nasypu lub eksploatację wybudowanej drogi.

W celu uzyskania parametrów modeli gruntowych istotne jest pozyskanie wiarygodnych wartości parametrów mechanicznych analizowanych gruntów organicznych podłoża często na podstawie empirycznych zależności o charakterze regionalnym (Bajda i Skutnik, 2010; Młynarek, Wierzbicki i Stefaniak, 2013). Dobór odpowiedniego sondowania lub innego badania terenowego, zastosowanie właściwej metodyki badania oraz poprawna interpretacja wyników badań są gwarancją uzyskania wiarygodnych parametrów mechanicznych

[✉]marek_bajda@sggw.pl

gruntów, w tym zwłaszcza gruntów organicznych. W artykule przedstawiono zakres rozpoznania geotechnicznego, metodykę oraz interpretację uzyskanych z badań *in situ* (badania DMT i sondowania FVT) wyników badań wytrzymałości na ścinanie oraz modułu ściśliwości analizowanych gruntów organicznych.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU I ZAKRES BADAŃ

Analizowane podłoże, na którym zaprojektowano nasyp drogi ekspresowej, charakteryzują ekstremalnie trudne warunki geotechniczne. W podłożu projektowanego nasypu występują grunty organiczne: torfy i gytie. Miąższość gruntów organicznych jest zmienna i wynosi maksymalnie 4,5 m. Od powierzchni terenu do głębokości około 1,5 m występują torfy pseudowłókniste i włókniste zawierające od 58 do 76% części organicznych o różnym stopniu rozkładu. Poniżej występują gytie mineralno-organiczne lub organiczne nisko- lub wysokowęglanowe o miąższości około 3,0 m. Właściwości fizyczne gruntów organicznych podano w tabeli 1. Wykonane w podłożu wiercenia wykazały poziom wód gruntowych na głębokości od 0,2 do 1,5 m.

W ramach przeprowadzonych badań terenowych w podłożu wykonano w trzech profilach badania połową sondą obrotową (FVT) oraz cztery badania dylatometrem Marchettiego (DMT) (Katedra Geoinżynierii SGGW, 2016).

METODYKA I INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ

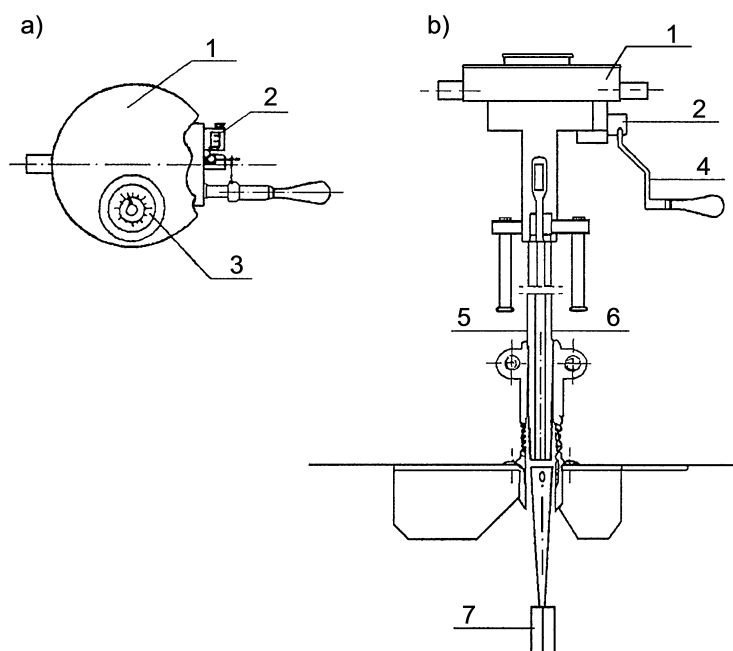
W celu określenia w podłożu organicznym rozkładu wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (τ_{fi}) przeprowadzono w warunkach *in situ* badania połową sondą krzyżakową. Badania wytrzymałości na ścinanie sondą FVT wykonano w trzech profilach pomiarowych na różnych głębokościach w przedziale od 0,6 do 2,9 m. Konstrukcja sondy zapewnia zachowanie warunków badania określonych zarówno w polskiej normie PN-B-04452:2002, jak i PN-EN 1997-2:2009. Do głównych elementów sondy FVT należą: głowica pomiarowa, końcówka ścinająca – krzyżak i komplet żerdzi z rurami osłonowymi (rys. 1).

W badaniach zastosowano krzyżak o symbolu VT 12/6, tj. krzyżak o wysokości $H = 0,12$ m, szerokości (średnicy) $D = 0,06$ m i grubości skrzydełek 2,4 mm. Rury osłonowe sondy eliminują tarcie żerdzi o grunt

Tabela 1. Właściwości fizyczne torfu i gytii

Table 1. Index properties of peat and gytija

Rodzaj gruntu Soil type	Wilgotność naturalna Water content w_n [%]	Granica płynności Stożek Liquid limit Cone w_L [%]	Granica plastyczności Plastic limit w_p [%]	Zawartość części organicznych Organic matter content I_{OM} [%]	Zawartość $CaCO_3$ $CaCO_3$ content [%]
Torf Peat	430–465	460–570	340–360	58–76	< 1
mineralno-organiczna wysokowęglanowa mineral-organic highly calcareous	170–185	175–235	85–115	12–14	44–76
Gytia Gyttja					
organiczna niskowęglanowa organic low calcareous	280–300	325–350	200–210	42–48	21–25
organiczna wysokowęglanowa organic highly calcareous	245–260	270–295	155–160	32–35	45–52



Rys. 1. Polowa sonda krzyżakowa PSO2: a – głowica; b – schemat sondy: 1 – głowica pomiarowa, 2 – licznik obrotów, 3 – wskaźnik dynamometru, 4 – korba, 5 – rura osłonowa, 6 – żerdź, 7 – końcówka krzyżakowa

Fig. 1. Field vane test equipment: a – torque head; b – vane test apparatus: 1 – torque head, 2 – gauge, 3 – spring balanced torque recorder, 4 – handle, 5 – tube, 6 – rod, 7 – vane blade

wywołane obrotem krzyżaka. Badania przeprowadzono zgodnie z polską normą, stosując prędkość kątową obrotu krzyżaka $5 \pm 0,5^\circ \cdot \text{min}^{-1}$.

W czasie badania rejestrowano wartości momentu obrotowego co 4° obrotu krzyżaka. W celu określenia wytrzymałości na ścinanie gruntów (maksymalnej, τ_{fv} , i rezydualnej, τ_R) wartości oporu ścinania (τ) przedstawiano w funkcji kąta obrotu krzyżaka (rys. 2).

Wytrzymałość na ścinanie (τ_{fv}) i wytrzymałość rezydualną (τ_R) obliczano ze wzorów:

$$\tau_{fv} = M_{\text{fmaks.}} / K_{VT} \quad (1)$$

$$\tau_R = M_{\text{fconst.}} / K_{VT} \quad (2)$$

gdzie: $M_{\text{fmaks.}}$ – największa wartość momentu w czasie wykonywania obrotu krzyżaka;

$M_{\text{fconst.}}$ – ustalona wartość momentu po naruszeniu struktury gruntu;

K_{VT} – współczynnik charakteryzujący końcówkę według wymiarów (stała krzyżaka):

$$K_{VT} = 1/2[(\pi D^2 H(1 + D/3H))] \quad (3)$$

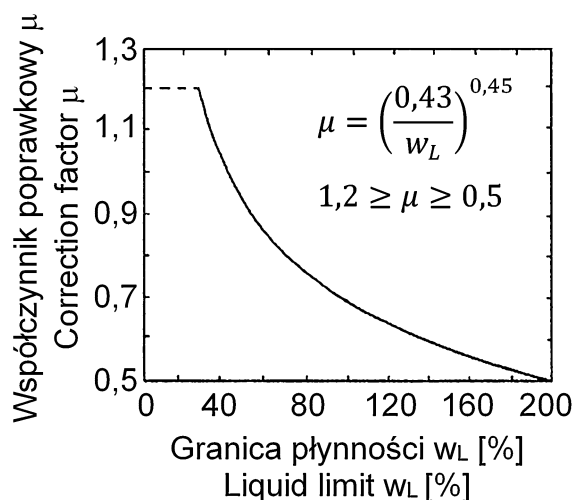
gdzie: H – wysokość krzyżaka;

D – średnica krzyżaka.

Wartość wytrzymałości na ścinanie pomierzona połową sondą krzyżakową jest, zwłaszcza w gruntach organicznych, większa niż wartość rzeczywista wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu, przyjmowana do analizy stateczności nasypów na podłożu słabonośnym. Wytrzymałość na ścinanie (τ_{fu}) określa się, korygując pomierzoną wytrzymałość na ścinanie (τ_{fv}) poprzez współczynnik poprawkowy (μ), według wzoru:

$$\tau_{fu} = \mu \cdot \tau_{fv} \quad (4)$$

Wartości współczynników poprawkowych proponowane były dla słabych gruntów mineralnych i gruntów organicznych przez wielu badaczy (Lechowicz i Szymański, 2002). Badania gruntów organicznych przeprowadzone przez Szwedzki Instytut Geotechniki



Rys. 2. Współczynnik poprawkowy (μ) do obliczania wytrzymałości na ścinanie pomierzonej sondą krzyżakową (Larsson, Bergdahl i Eriksson, 1984)

Fig. 2. Correction factor (μ) for the undrained shear strength determination by the field vane test (Larsson, Bergdahl & Eriksson, 1984)

wykazały, że wartości współczynników poprawkowych μ w zakresie 0,5–1,2 można określić na podstawie monogramu przedstawionego na rysunku 2.

Z badań gruntów organicznych (torfy i gytie) prowadzonych w Katedrze Geoinżynierii SGGW wynika, że współczynniki poprawkowe dla gruntów organicznych zależnie od ich stanu i stopnia rozłożenia należy przyjmować w zakresie 0,5–0,8.

W ramach badań terenowych na analizowanym terenie wykonano również cztery badania dylatometrem Marchettiego. Badania przeprowadzono w zakresie głębokości od 3,2 do 6,6 m i obejmowały one swoim zasięgiem miąższość gruntów organicznych podłoża. Metodyka badań dylatometrem DMT była zgodna z zaleceniami podanymi przez Marchettiego (1980). W czasie sondowań co 0,2 m określano dwa charakterystyczne ciśnienia: p_0 – ciśnienie potrzebne do przemieszczenia membrany zapewniającej kontakt z otaczającym ją gruntem, p_1 – ciśnienie potrzebne do przemieszczenia membrany o 1,1 mm. Pomierzone wartości ciśnień wykorzystano do identyfikacji gruntów w podłożu projektowanego odcinka drogi i określenia ich właściwości odkształceniowych i wytrzymałościowych.

Pomierzone wartości ciśnienia p_0 i p_1 oraz obliczone wartości składowej pionowej efektywnego naprężenia pierwotnego (σ'_{vo}) i hydrostatycznego ciśnienia

wody w porach (u_o) wykorzystano do wyznaczenia następujących wskaźników dylatometrycznych:

– wskaźnik materiałowy (I_D):

$$I_D = (p_1 - p_0)/(p_0 - u_o) \quad (5)$$

– wskaźnik naprężenia poziomego (K_D):

$$K_D = (p_0 - u_o)/\sigma'_{vo} \quad (6)$$

– moduł dylatometryczny (E_D):

$$E_D = 34,7 (p_1 - p_0) \quad (7)$$

Moduły ścisłości (M) gruntów organicznych występujących w podłożu projektowanego odcinka drogi określono na podstawie następującej zależności (Marchetti, 1980):

$$M = R_M \cdot E_D \quad (8)$$

gdzie (Lechowicz i Rabarijoely, 1997):

$$R_M = 0,90 + 0,6 \log I_D \quad \text{– dla torfów} \quad (9)$$

$$R_M = 0,95 + 0,55 \log I_D \quad \text{– dla gytii} \quad (10)$$

Wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu (τ_{fu}) określono na podstawie następującej zależności (dla gruntów o $I_D < 1,2$) (Marchetti, 1980):

$$\tau_{fu} = 0,22 \sigma'_{vo} (0,5 K_D)^{1,25} \quad (11)$$

Wytrzymałości na ścinanie (τ_{fu}) określono również, wykorzystując dotychczasowe doświadczenia Katedry Geoinżynierii SGGW uzyskane z badań obiektów doświadczalnych, w których podłożu występowały grunty organiczne (torfy, namuły, gytie). Do określenia wartości τ_{fu} zastosowano następujące wzory:

– dla torfów i gytii

$$\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_v} = S(0,45 \cdot K_D)^{1,20} \quad (12)$$

gdzie: $S = (\tau_{fu}/\sigma'_v)_{nc}$ – znormalizowana wytrzymałość na ścinanie dla gruntu normalnie skonsolidowanego;

σ'_v – pionowa składowa naprężenia efektywnego.

Dotychczasowe badania gruntów organicznych (Lechowicz i Rabarijoely, 1997) wskazują, że parametr S niezbędny do zastosowania powyższego wzoru w przypadku torfu wynosi 0,50, a dla gytii wapiennej 0,40–0,45 (przyjęto $S = 0,40$).

– dla torfów, gytii i namułów (Lechowicz, Rabarijoely, 1997):

$$\tau_{fu} = \alpha_0 \cdot \sigma'^{\alpha_1}_{vo} \cdot (p_0 - u_o)^{\alpha_2} \cdot (p_1 - u_o)^{\alpha_3} \quad (13)$$

gdzie: p_0, p_1 – ciśnienia odpowiadające pierwszemu i drugiemu pomiarowi dylatometrycznemu.

Współczynniki empiryczne $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ obliczono, korzystając z zależności (Rabarijoely, 2000):

$$\alpha_i = C_i \cdot e + D_i \quad (14)$$

gdzie: C_i, D_i – stałe współczynniki podane w tabeli 2; e – wskaźnik porowatości.

Do obliczeń wytrzymałości na ścinanie bez odplywu przyjęto wartość wskaźnika porowatości (e_o) dla torfu i gytii odpowiednio: $e_{o_torf} = 5,0$ ($\rho_s = 1,45 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$); $e_{o_gytia} = 2,8$ ($\rho_s = 2,2 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$).

WYNIKI

Na podstawie przeprowadzonych badań połową sondą obrotową FVT uzyskano zależność pomierzonego oporu ścinania od kąta obrotu krzyżaka. Przykładowe wykresy uzyskanych z badań zależności przedstawiono na rysunku 3.

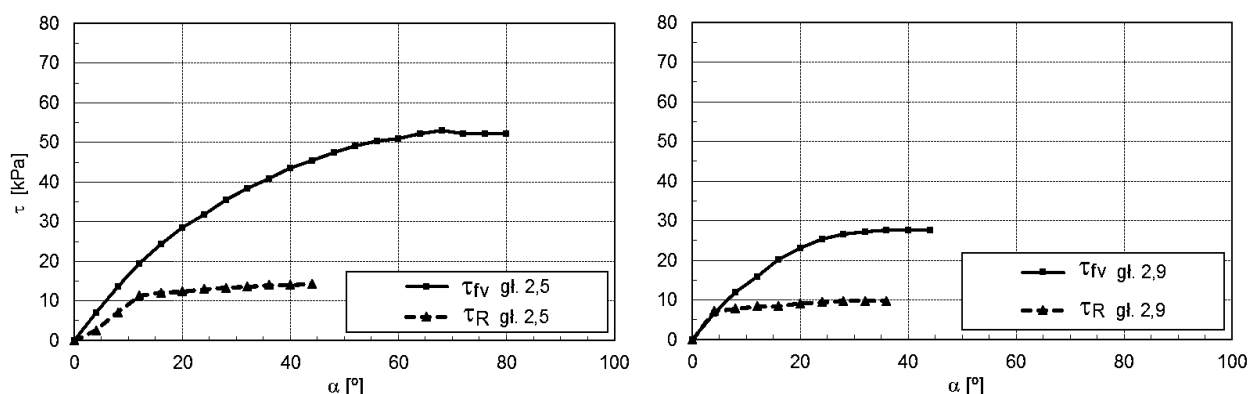
Przykładowe wyniki badań DMT przedstawiono na rysunku 4 w formie wykresów wskaźnika materiałowego (I_D), wskaźnika naprężenia poziomego (K_D) oraz modułu dylatometrycznego (E_D) w profilu głębokości. Profile wytrzymałości na ścinanie bez odplywu (τ_{fu}) i modułów ściśliwości (M) przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5 i 6. Na rysunku 5 zestawiono wykresy wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odplywu po uwzględnieniu poprawki wynikającej ze stopnia rozkładu gruntu organicznego. Uwzględniając doświadczenia Katedry Geoinżynierii SGGW, dla tego typu gruntów organicznych przyjęto wartość współczynnika poprawkowego $\mu = 0,5$.

Wyniki uzyskane z badań terenowych podłoża połową sondą krzyżakową (FVT) i dylatometrem Marchetti (DMT) pozwalają stwierdzić, że w podłożu

Tabela 2. Zestawienie wartości współczynników do zależności $\alpha_i = f(e)$

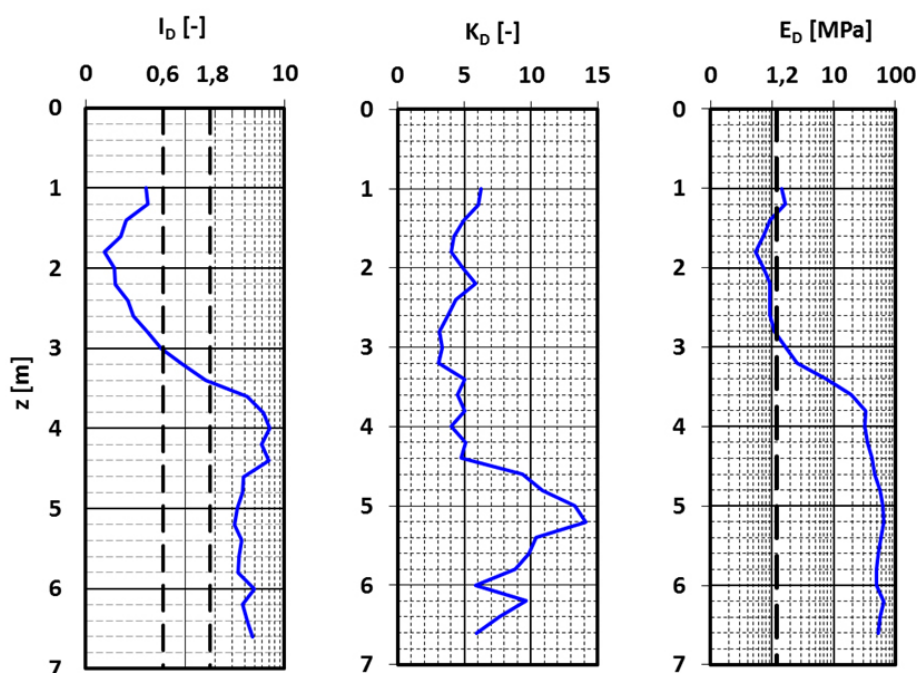
Table 2. Values of the empirical coefficients for relationship $\alpha_i = f(e)$

Współczynniki Coefficients	$\alpha_i = C_i \cdot e + D_i$			
	$i = 0$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
C_i	0,149	-0,0233	0,0065	0,0114
D_i	1,003	0,3406	0,1104	0,1847



Rys. 3. Pomierzone wartości oporu ścinania (τ) w funkcji kąta obrotu krzyżaka (α) $\tau = f(\alpha)$; badanie PSO2, głębokości: 2,5 i 2,9 m

Fig. 3. Measured values of shear resistance (τ) as a function of the angle of rotation of the vane blade (α) $\tau = f(\alpha)$; PSO2 test, depth: 2.5 and 2.9 m

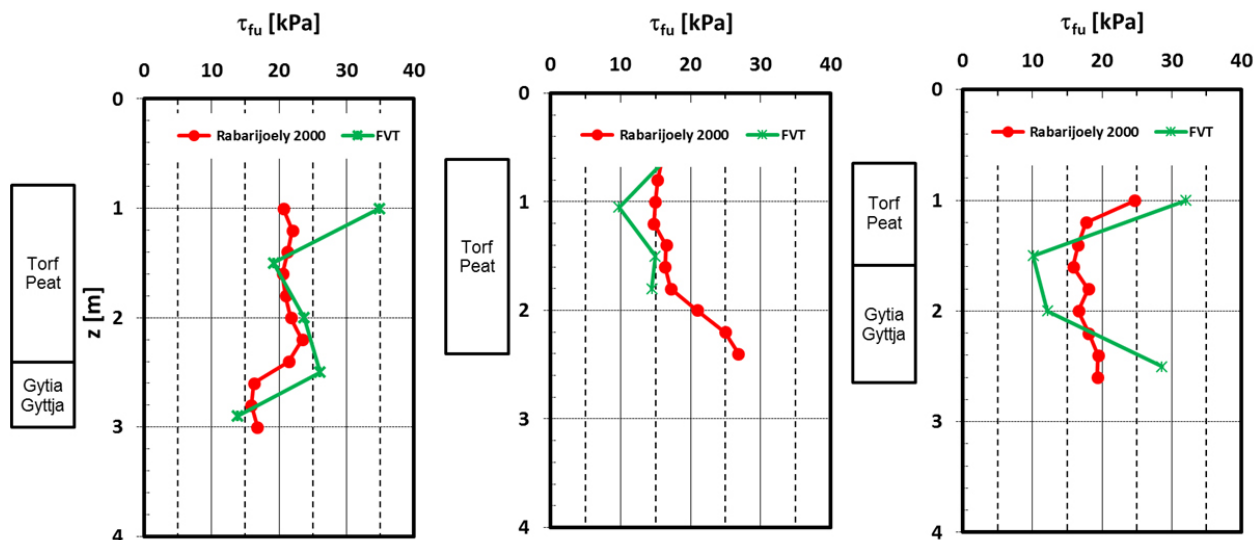


Rys. 4. Profile wskaźników I_D , K_D i E_D uzyskane z badań dylatometrycznych DMT2 podłoża słabonośnego drogi ekspresowej

Fig. 4. Profiles of I_D , K_D , and E_D indexes from DMT2 dilatometer test carried out for the organic subsoil expressway

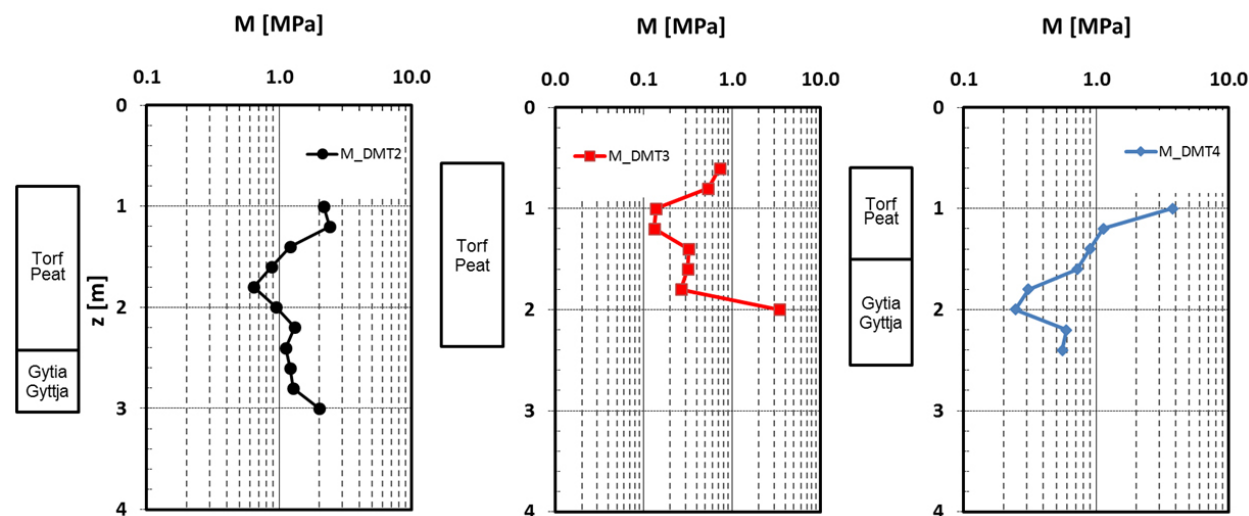
projektowanej drogi występują słabe torfy i gytie, charakteryzujące się wartością wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (τ_{fi}) w zakresie 10–20 kPa (rys. 5). Analizując rozkłady wytrzymałości na ścinanie, należy zauważyć, że obydwie warstwy, zarówno torfów, jak i gytii, różnią się w niewielkim stopniu, jednakże war-

stwę gytii można uznać za niewiele słabszą, dla której $\tau_{fi} = 10$ kPa. Warstwa gytii o miąższości od 0,5 do 1,5 m zalega pod warstwą torfów o miąższości od 0,4 do 1,9 m, których występowanie udokumentowano od powierzchni terenu do głębokości 3,1 m. Wytrzymałość na ścinanie (τ_{fi}) torfów jest zmienna i średnio



Rys. 5. Profile wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (τ_{fu}) uzyskane z sondowań połową sondą obrotową i badań dylatometrycznych

Fig. 5. Profiles of undrained shear strength (τ_{fu}) from the FVT and DMT tests



Rys. 6. Profile modułu ściśliwości (M) uzyskane z badań dylatometrycznych

Fig. 6. Profiles of constrained modulus (M) from the DMT tests

wynosi 15kPa. Rozkład wartości wytrzymałości na ścinanie (τ_{fu}) uzyskany z badań połową sondą krzyżawkową przy założeniu współczynnika poprawkowego $\mu = 0,5$ jest podobny do rozkładu tego parametru uzyskanego z sondowań dylatometrycznych z procedurą interpretacyjną zaproponowaną przez Rabarijoely'ego (2000).

Z badań dylatometrem DMT wynika, że moduły ściśliwości torfów w profilu DMT-3 w zakresie od 0,15 do 0,8 MPa są wyraźnie mniejsze od modułów w profilu DMT-2 ($M = 0,6-1,05$ MPa) i w profilu DMT-4 ($M = 0,7-1,1$ MPa). W przypadku gytii możemy stwierdzić, że wartości modułów ściśliwości zmieniają się w zakresie 0,25–1,2 MPa (rys. 6).

PODSUMOWANIE

W zależności od stopnia skomplikowania i ważności rozpatrywanego zadania geotechnicznego, rozpoznanie warunków geotechnicznych zazwyczaj opiera się na analizie wyników wierceń badawczych uzupełnionych wynikami badań laboratoryjnych parametrów fizyko-mechanicznych i badań geotechnicznych *in situ*. Trudności związane z pobraniem reprezentatywnych próbek o nienaruszonej strukturze do badań laboratoryjnych w połączeniu z dynamicznym rozwojem technik badawczych i urządzeń pomiarowych do badań terenowych, powodują zwrócenie większej uwagi na możliwość wykorzystania tych badań (np. FVT i DMT) do oceny parametrów słabonośnego podłoża. Zaletami badań *in situ* jest to, że są prowadzone w rzeczywistych warunkach gruntowych (stanu i naprężenia) oraz to, że stosunkowo szybko uzyskuje się w nich poszukiwane parametry.

Wyniki badań *in situ* w połączeniu z ich właściwą interpretacją pozwoliły uzyskać wiarygodne wartości parametrów wytrzymałościowych analizowanych gruntów organicznych. Równoległe przeprowadzenie badań dylatometrycznych i sondowań połową sondą obrotową pozwoliło na uwiarygodnienie wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (τ_{fu}). Weryfikacja parametrów odkształceniowych będzie możliwa na podstawie wyników monitorowania przemieszczeń budowanego nasypu drogi.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że występująca w podłożu projektowanego odcinka drogi warstwa gruntów organicznych, składająca się z torfów i gytii jest wyjątkowo słaba i bardzo ściśliwa, co wyklucza możliwość budowy projektowanego nasypu drogi bez wzmocnienia podłoża. Uzyskane

z badań terenowych parametry wykorzystano do analizy stateczności oraz obliczeń konsolidacji dla potrzeb zaprojektowania etapowej realizacji projektowanego nasypu z przeciążeniem.

PIŚMIENNICTWO

- Bajda, M. i Skutnik, Z. (2010). Ocena modułu ścinania gytii na podstawie geotechnicznych badań terenowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4, 507–511.
- Katedra Geoinżynierii SGGW (2016). *Badania terenowe i laboratoryjne podłoża słabonośnego drogi ekspresowej S5 na odcinku km 21+600 do km 23+500*. Warszawa.
- Larsson, R., Bergdahl, U. i Eriksson L. (1984). *Evaluation of shear strength in cohesive soils with special reference to Swedish practice and experience*. Information 3. Linköping: Swedish Geotechnical Institute.
- Lechowicz, Z. i Rabarajoely, S. (1997). Use of dilatometer test in evaluation of organic subsoil strengthening. *Proceedings of Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering*. Tom I (strony 185–196). Kuching, Sarawak.
- Lechowicz, Z. i Szymański, A. (2002). *Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych*. Część I. Metodyka badań. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Marchetti, S. (1980). In Situ Tests by Flat Dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106 (GT3), *Proceeding Paper 15290*, 299–321.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Stefaniak, K. (2013). Evaluation of deformation parameters of organic subsoil by means of CPTU, DMT, SDMT. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 4, 51–60.
- PN-B-04452:2002. Geotechnika. Badania polowe.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- Rabarajoely, S. (2000). *Wykorzystanie badań dylatometrycznych do wyznaczenia parametrów gruntów organicznych obciążonych nasypem* (rozprawa doktorska). Warszawa: Wydawnictwo SGGW.

DEFORMATION PARAMETERS OF ORGANIC SOILS FOR DESIGN IMPROVEMENT OF SUBSOIL UNDER EXPRESSWAY ON THE BASIS OF *IN SITU* TESTS

ABSTRACT

In the paper the methodology of *in situ* tests, FVT soundings and DMT carried out in the organic subsoil. Based on the test results the undrained shear strength (τ_{fu}) and the constrained modulus M for peat and gytia were estimated within depth profile. The results obtained from the *in situ* tests allowed obtaining reliable values of geotechnical parameters to predict the behavior of the organic subsoil under load.

Key words: organic subsoil, DMT test, FVT sounding