

## **PRZECIĄŻENIE GRUNTU ORGANICZNEGO NASYPEM POD SKŁADOWISKO PRZEZNACZONE DO MAGAZYNOWANIA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH**

Ryszard Coufal, Magdalena Olszewska

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

**Streszczenie.** W artykule podjęto próbę określenia zmiany wartości modułu ściśliwości konsolidowanego gruntu organicznego na podstawie znanego osiadania końcowego oraz naprężeń wywieranych na grunt przez rzeczywisty nasyp. Prezentowany model bazuje na zasadzie superpozycji w odniesieniu do oddziaływania wszystkich pól obliczeniowych, na jakie został podzielony nasyp. Na podstawie teorii Boussinesq'a określono naprężenia w powierzchni kontaktowej nasyp – podłoże gruntowe oraz wynikające z nich osiadanie. Na podstawie modelu określono moduły ściśliwości gruntu organicznego poniżej nasypu przeciążającego.

**Słowa kluczowe:** moduł ściśliwości gruntów organicznych, nasyp przeciążający, metoda superpozycji, fundament wiotki

### **WSTĘP**

Grunty organiczne są bardzo ściśliwe, a przebieg odkształceń pod wpływem obciążenia jest skomplikowany i długotrwały. Parametrem określającym ściśliwość gruntu jest moduł ściśliwości, który dla gruntów organicznych jest bardzo mały. Aby określić moduł ściśliwości, wykonuje się badanie próbki gruntu w edometrze. Jest to najbardziej popularna metoda. W edometrze próbka znajduje się w metalowym pierścieniu i jest poddawana osiowo ściskaniu, bez możliwości odkształcenia bocznego. Ze względu na odmienne właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów organicznych w porównaniu z gruntami mineralnymi określenie modułu ściśliwości tym sposobem może być obciążone błędem. Błąd może wynikać również z efektu skali, co jest wyraźnie zaznaczone w specyfikacji europejskiej na temat tego badania: „Małe wymiary próbki nie pozwalają na pełną reprezentację właściwości występujących w gruncie naturalnym” [PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2006]. ~~Z tych przyczyn wartości modułu ściśliwości określane w edometrze mogą się~~ Adres do korespondencji – Corresponding author: Ryszard Coufal, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Geotechniki, Zakład Geologii Inżynierskiej i Hydrogeologii, al. Piastów 50, 70-310 Szczecin, e-mail: coufal@zut.edu.pl

różnić od wartości rzeczywistych, co dla podłoża organicznego może przynieść katastrofalne skutki. Z tego powodu podjęto próbę opracowania modelu określającego moduł ściśliwości gruntu organicznego w terenie poprzez obciążenie go nasypem przeciążającym [Szymański 1991, Lechowicz i Szymański 2002].

## METODYKA

Opracowano model matematyczny określający moduł ściśliwości konsolidowanego gruntu organicznego nasypem przeciążającym, który opiera się na analizie naprężeń w powierzchni kontaktowej nasyp – podłoża na podstawie teorii Boussinesqa. Ze względu na charakter gruntów organicznych naprężenia od obciążenia zewnętrznego są stałe na całej jego powierzchni i w pionie. Obliczenia osiadań uwzględniają tylko pionową składową naprężeń w gruncie, a warstwa nośna gruntu mineralnego pod gruntami organicznymi nie odkształca się.

Moduł ściśliwości konsolidowanego podłoża można określić, wykorzystując zagadnienie odwrotne. Na podstawie wartości naprężeń, jakie oddziałują na podłoża gruntowe, oraz wartości osiadania nasypu można wyznaczyć szukany parametr [Dobak i Białobrzeski 2013, Bednarek 2014, Olszewska 2015]. Naprężenia te można wyznaczyć na podstawie teorii Boussinesqa, która określa rozkład naprężeń od siły skupionej, oraz z zasady superpozycji [Meyer i Chruściewicz 2001, Chruściewicz 2003, Bednarek 2014]:

$$\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi(l^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (1)$$

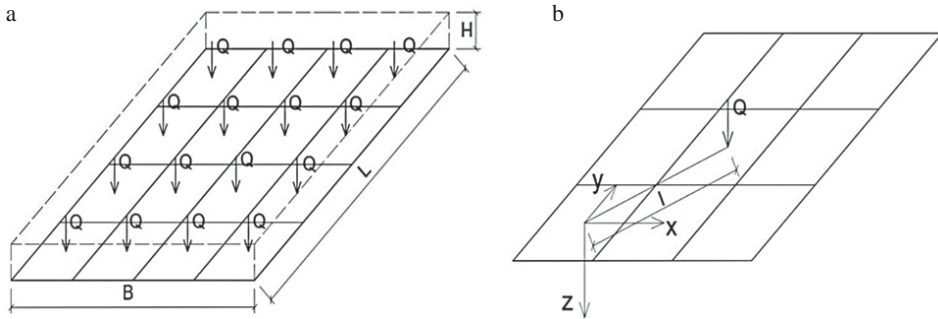
gdzie:  $Q$  – siła działająca na podłoża gruntowe w analizowanym poletku [kN],  
 $z$  – głębokość rozpatrywanego miejsca [m],  
 $l$  – odległość siły od analizowanego miejsca w płaszczyźnie nasypu [m]

$$l = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2)$$

gdzie:  $x, y$  – współrzędne przyłożenia siły w płaszczyźnie nasypu [m].

Dla modelu badany nasyp należy podzielić na prostokątne poletka obliczeniowe. Dla każdego wydzielonego poletka można wyznaczyć siłę działającą w analizowanym miejscu. Na podstawie zasady superpozycji na jedno analizowane poletko będą oddziaływać wszystkie pozostałe [Meyer i Chruściewicz 2001, Chruściewicz 2003, Bednarek 2014]. Podział nasypu na poletka został przedstawiony na rysunku 1.

Osiadanie analizowanego poletka jest sumą jego osiadań własnych i osiadań wynikających z wpływu pozostałych poetek [Meyer i Chruściewicz 2001, Chruściewicz 2003]. Ze względu na brak zaniku naprężeń od obciążenia zewnętrznego w gruntach organicznych osiadanie własne analizowanego poletka można wyznaczyć według zależności:



Rys. 1. Podział nasypu na poletka obliczeniowe: a – obciążenie nasypu rozłożone na siły skupione działające w poletkach obliczeniowych, b – schemat przyjęty do oznaczenia oddziaływania jednego poletka na drugie

Fig. 1. Division of the embankment into calculation plots: a – load distribution of continuous embankment into concentrated forces operating in the plots centres, b – scheme for the determination of the impact of one field on another

$$s_{wl} = \int_0^{H_T} \frac{\sigma_z}{M} dz = \frac{H_{T,wl}}{M_{wl}} \sigma_{z,wl} \quad (3)$$

gdzie:  $H_{T,wl}$  – miąższość torfu w miejscu analizowanego poletka [m],

$M_{wl}$  – szukany moduł ścisłości w miejscu analizowanego poletka [kPa],

$\sigma_{zwl}$  – naprężenia od obciążenia działające bezpośrednio na analizowane poletko [kPa].

Zgodnie z zasadą superpozycji [Meyer i Chruściewicz 2001, Chruściewicz 2003, Bednarek 2014] osiadanie wynikające z osiadania pozostałych poletek można wyznaczyć według wzoru:

$$s_{poza} = \sum_{i,j=1}^n s_{i,j} \quad (4)$$

gdzie:  $s_{i,j}$  – osiadanie jednego (innego) wydzielonego poletka nasypu poza rozpatrywanym obszarem [m]

$$s_{i,j} = \int_0^{H_{T,i,j}} \frac{\sigma_{z,i,j}}{M_{i,j}} dz = \int_0^{H_{T,i,j}} \frac{3Q_{i,j} \cdot z^3}{M_{i,j} 2\pi (l_{i,j}^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} dz =$$

$$= \frac{3Q_{i,j}}{2\pi M_{i,j}} \left\{ \frac{2}{3l_{i,j}} - \frac{2l_{i,j}^2 + 3H_{T,i,j}^2}{3(l_{i,j}^2 + H_{T,i,j}^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (5)$$

$$s_{i,j} = \frac{3Q_{i,j}}{2\pi M_{i,j}} \left\{ \frac{2}{3l_{i,j}} - \frac{2l_{i,j}^2 + 3H_{T,i,j}^2}{3(l_{i,j}^2 + H_{T,i,j}^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (6)$$

Osiadanie wynikające z wpływu pozostałych poetek można zapisać następująco:

$$s_{\text{poza}} = \sum_{i,j}^n \frac{3Q_{i,j}}{2\pi M_{i,j}} \left\{ \frac{2}{3l_{i,j}} - \frac{2l_{i,j}^2 + 3H_{T,i,j}^2}{3(l_{i,j}^2 + H_{T,i,j}^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (7)$$

gdzie:  $Q_{ij}$  – siła działająca na podłoże gruntowe w analizowanym poletku [kN],  
 $M_{ij}$  – szukany moduł ściśliwości w miejscu poza analizowanym poletkiem obliczeniowym [kPa],  
 $l$  – odległość do analizowanego poletka obliczeniowego [m],  
 $H_{T,i,j}$  – miąższość torfu w pionie obliczeniowym w odległości  $l$  od analizowanego miejsca [m].

Osiadanie całkowite analizowanego poletka to suma osiadania własnego oraz osiadania wynikającego z wpływu pozostałych poetek. Można je wyznaczyć według wzoru:

$$s_c = s_{wl} + s_{\text{poza}} \quad (8)$$

$$s_c = \frac{H_{T,wl}}{M_{wl}} \sigma_{z,wl} + \sum_{i,j}^n \frac{3Q_{i,j}}{2\pi M_{i,j}} \left\{ \frac{2}{3l_{i,j}} - \frac{2l_{i,j}^2 + 3H_{T,i,j}^2}{3(l_{i,j}^2 + H_{T,i,j}^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (9)$$

gdzie:  $s_c$  – osiadanie całkowite w analizowanym poletku obliczeniowym [m],  
 $s_{wl}$  – osiadanie własne poletka obliczeniowego [m],  
 $\sum s_{ij}$  – osiadanie od działania pozostałych poetek obliczeniowych [m].

Nasyp zaliczany jest do fundamentów wiotkich. Ze względu na jego dużą powierzchnię oraz dowolność podziału na poletka obliczeniowe moduły ściśliwości obliczyć można z układu równań, rozwiązując go macierzowo.

Dla uproszczenia obliczeń wzór (9) można zapisać w postaci:

$$s_c = AX + \sum_{i,j}^n B_{i,j} X_{i,j} \quad (10)$$

gdzie:  $A = H_{T,wl} \sigma_{z,wl}$  (11)

$$B_{i,j} = \frac{3Q_{i,j}}{2\pi} \left\{ \frac{2}{3l_{i,j}} - \frac{2l_{i,j}^2 + 3H_{T,i,j}^2}{3(l_{i,j}^2 + H_{T,i,j}^2)^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (12)$$

$$X_{i,j} = \frac{1}{M_{i,j}} \quad (13)$$

Zapisując wzór (10) macierzowo, uzyskano:

$$\begin{Bmatrix} s_{1,1} \\ s_{1,2} \\ \vdots \\ s_{i,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{1,1} & B_{1,2} & \dots & B_{1,j} \\ B_{1,1} & A_{1,2} & \dots & B_{1,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{1,1} & B_{1,2} & \dots & A_{i,j} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{1,1} \\ X_{1,2} \\ \vdots \\ X_{i,j} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} X_{1,1} \\ X_{1,2} \\ \vdots \\ X_{i,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{1,1} & B_{1,2} & \dots & B_{1,j} \\ B_{1,1} & A_{1,2} & \dots & B_{1,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{1,1} & B_{1,2} & \dots & A_{i,j} \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} s_{1,1} \\ s_{1,2} \\ \vdots \\ s_{i,j} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

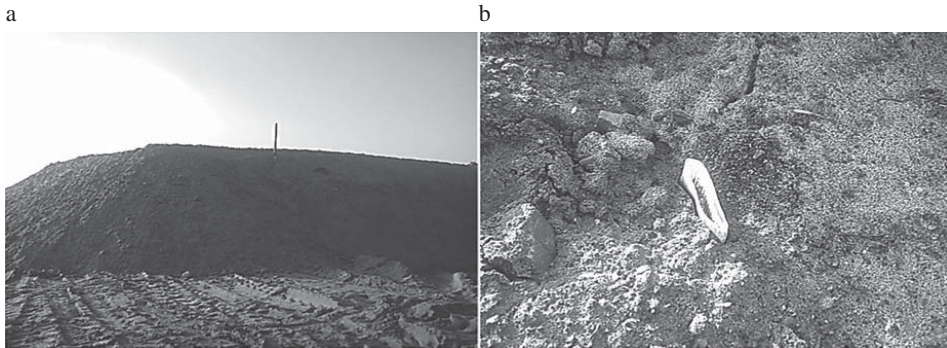
Obliczony parametr  $X$  to odwrotność szukanego modułu ściśliwości:

$$\begin{Bmatrix} \frac{1}{M_{1,1}} \\ \frac{1}{M_{1,2}} \\ \vdots \\ \frac{1}{M_{i,j}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{1,1} \\ X_{1,2} \\ \vdots \\ X_{i,j} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} M_{1,1} \\ M_{1,2} \\ \vdots \\ M_{i,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{X_{1,1}} \\ \frac{1}{X_{1,2}} \\ \vdots \\ \frac{1}{X_{i,j}} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{1,1} \\ M_{1,2} \\ \vdots \\ M_{i,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{X_{1,1}} \\ \frac{1}{X_{1,2}} \\ \vdots \\ \frac{1}{X_{i,j}} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

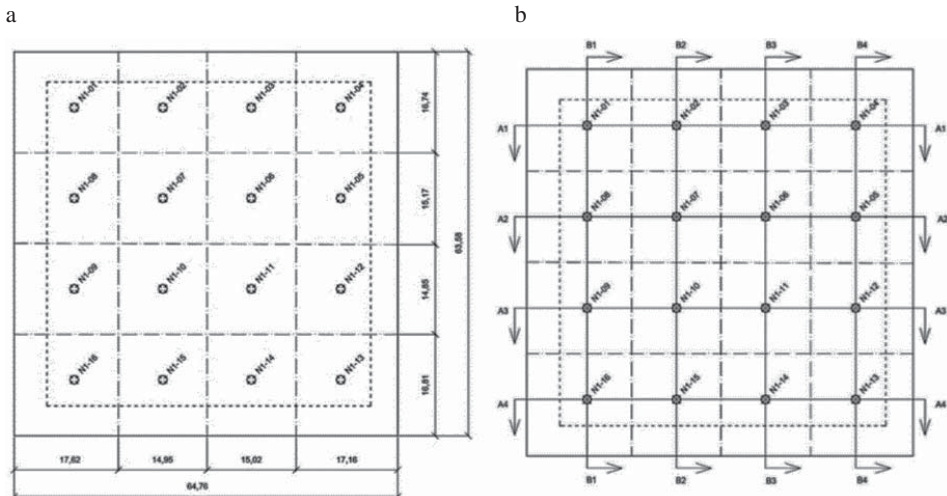
## WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przedstawionego modelu określono moduł ściśliwości gruntu organicznego obciążonego rzeczywistym nasypem znajdującym się na terenie Szczecina (rys. 2a). Nasyp wykonano w celu wzmocnienia podłoża przed przyszłą budową placu składowego dla elementów konstrukcyjnych. Dla przyspieszenia konsolidacji gruntu organicznego wykorzystano system drenów pionowych – jutowych (rys. 2b). Zastosowanie drenów powoduje skrócenie drogi przepływu wody w gruncie, co zwiększa prędkość przyrostu naprężeń efektywnych, a co za tym idzie – zwiększa prędkość odkształcenia podłoża [Szymański 1991].



Rys. 2. Nasyp przeciążający: a – widok z boku, b – „knot” drenu jutowego wykonanego w celu przyspieszenia konsolidacji (fot. M. Olszewska)

Fig. 2. Overload embankment: a – side view, b – „wick” jute drain made to speed up the consolidation (photo M. Olszewska)

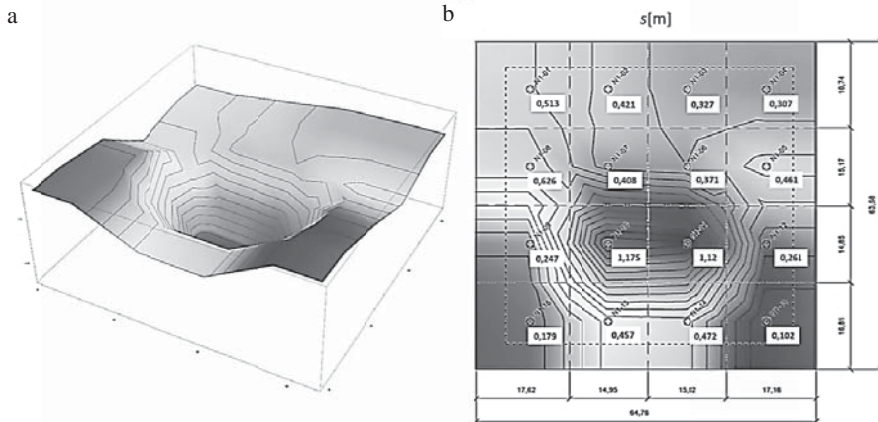


Rys. 3. Schemat nasypu przeciążającego: a – widok z góry z numeracją reperów i wymiarami, b – widok z góry z zaznaczonymi przekrojami

Fig. 3. Scheme of the overloading embankment: a – top view of the numbering of benchmarks and dimensions, b – top view, marked cross sections

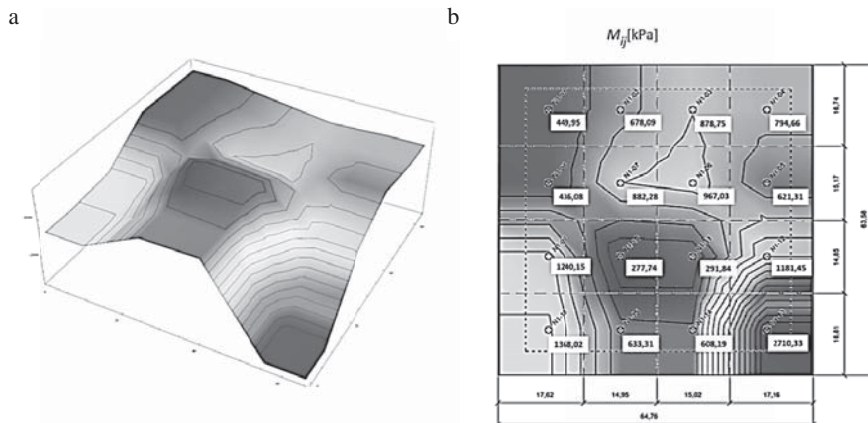
Nasyp wykonany został z piasku średniego średnio zagęszczonego, o ciężarze objętościowym  $17,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ , wysokości 2 m. Obciążenie, jakie wywierał na grunt organiczny, to 35 kPa. Pod nasypem zalega torf o miąższości 9 m. Na rysunku 3 przedstawiono wymiary nasypu wraz z lokalizacją i numeracją reperów oraz przyjętym podziałem na poletki obliczeniowe.

Przez okres 4 miesięcy regularnie odczytywano osiadania i na ich podstawie określono osiadanie końcowe nasypu według Meyera [1994, 2014]. Rozkład i wartości końcowych osiadań przedstawiono na rysunku 4.

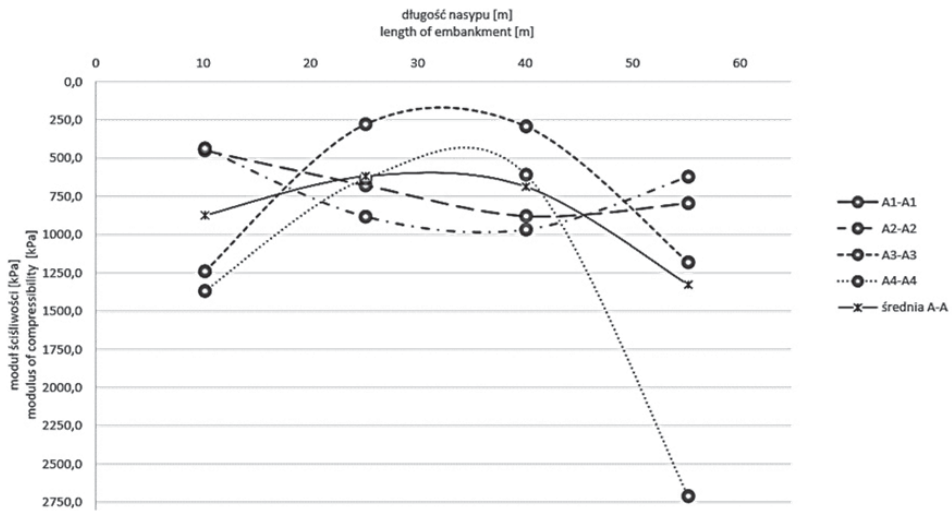


Rys. 4. Osiadanie nasypu: a – widok w aksonometrii, b – widok z góry wraz z wartościami [m]  
Fig. 4. Settlement of the embankment: a – axonometric view, b – top view with values

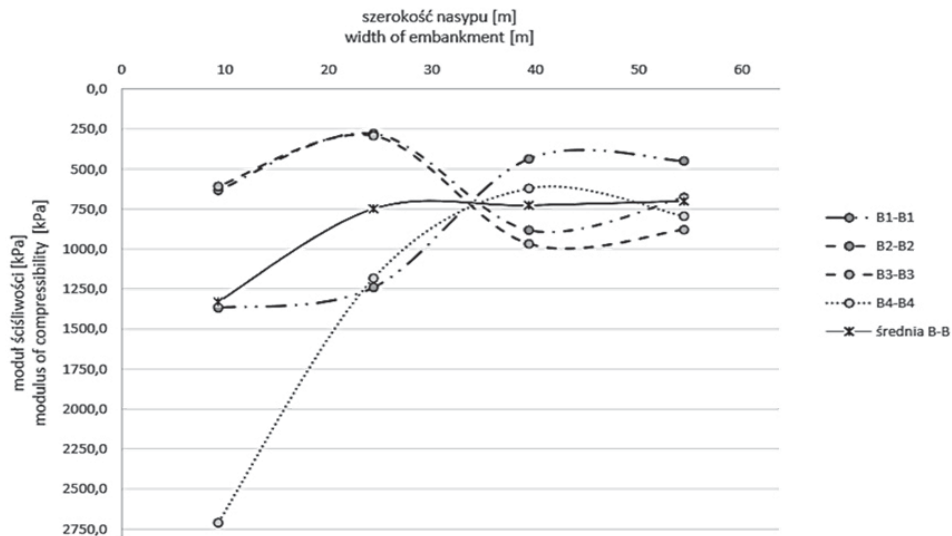
Dla przedstawionego nasypu obliczono moduły ścisłości w miejscach reperów według zaprezentowanego modelu. Rozkład i wartości modułów przedstawiono na rysunku 5. Wartości na przekrojach podłużnych przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 5. Wyznaczone moduły ścisłości: a – widok w aksonometrii, b – widok z góry wraz z wartościami [kPa]  
Fig. 5. Determined values of modulus of compressibility: a – axonometric view, b – top view with values



Rys. 6. Wykres wartości modułu ściśliwości na przekrojach A-A  
 Fig. 6. Diagram of modulus of compressibility values in sections A-A



Rys.7. Wykres wartości modułu ściśliwości na przekrojach B-B  
 Fig. 7. Diagram of modulus of compressibility values in sections B-B

Z przeprowadzonych badań wynika, że moduł ściśliwości nie rozkłada się równomiernie pod nasypem. Zależy to ściśle od przebiegu osiadania nasypu. Analizując zmiany wartości modułu na długości, należy stwierdzić, że najmniejsze średnie wartości znajdują się bliżej środka nasypu. Na długości nasypu można zauważyć, że dla nieznaczących różnic w osiadaniach wartości dla średnich wartości modułu ściśliwości są prawie równe.



## WNIOSKI

W artykule przedstawiono model matematyczny określający zmiany wartości modułu ścisłości gruntów organicznych konsolidowanych nasypem.

1. Prezentowany model matematyczny jest próbą stworzenia alternatywnej metody określenia modułu ścisłości gruntów organicznych w terenie.

2. Bazując na wartościach osiadania końcowego nasypu przeciążającego, naprężeń, jakie wywiera on na podłoże gruntowe, oraz miąższości gruntu organicznego, można określić rzeczywisty moduł ścisłości konsolidowanego podłoża.

3. Wartość modułu ścisłości gruntu organicznego pod nasypem nie rozkłada się równomiernie, w dużym stopniu zależy od obciążenia i osiadania nasypu.

4. Przeprowadzone analizy i wnioski są słuszne w sytuacji, gdy w całym obszarze podłoża zachowane zostały warunki teorii sprężystości.

## PIŚMIENNICTWO

Bednarek, R. (2014). Osiadanie powierzchni ograniczonej na podłożu sprężystym. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 221–224.

Chruściewicz, S. (2003). Wpływ stanu naprężeń w ośrodku gruntowym na nośność sztywnego ustroju płytowo-palowego. Praca doktorska. Politechnika Szczecińska, Wydział Budownictwa i Architektury, Szczecin.

Dobak, P., Białobrzeski, T. (2013). Ocena charakterystyk konsolidacji na podstawie modelowania osiadań nasypów drogowych Południowej Obwodnicy Gdańska. *Przegląd Geologiczny*, 61 (1), 83–90.

Lechowicz, Z., Szymański, L. (2002). Odształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych. Cz. I. *Metodyka badań*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

Meyer, Z. (1994). Empirical model of peat consolidation. *Advances in Understanding and Modeling the Mechanical Behaviour of Peat*. Delft, A.A. Balkema – Rotterdam – Brookfield, 77–82.

Meyer, Z. (2014). Czy możemy posadzić obiekty bezpośrednio na torfach? XXI Seminarium Naukowe z cyklu „Regionalne problemy inżynierii środowiska”, Szczecin, 131–143.

Meyer, Z., Chruściewicz, S. (2001). Osiadanie dużych fundamentów sztywnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 5, 256–259.

Olszewska, M. (2015). Koncepcja określania modułu ścisłości gruntów organicznych na podstawie badania osiadań nasypu przeciążającego na poletku doświadczalnym. XXII Seminarium Naukowe z cyklu „Regionalne problemy inżynierii środowiska”: *Badania naukowe w zakresie geotechnicznego wspomaganie projektowania*, Szczecin, 93–99.

PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2006. *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 5: Badania edometryczne gruntów*.

Szymański, A. (1991). Czynniki warunkujące odształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.

Wiłun, Z. (2010). *Zarys geotechniki*. WKŁ, Warszawa.

## OVERLOADING OF ORGANIC SOIL WITH AN EMBANKMENT, UNDER THE LANDFILL DESIGNED FOR THE STORAGE OF STRUCTURAL ELEMENTS

**Abstract.** The article attempts to determine the changes in the modulus of compressibility of consolidated organic soil on the bases of the known final settlement of the overloaded embankment and the stresses that it exerts to subsoil. The presented model is based on the principle of superposition in relation to the impact of all calculation plots, into which the embankment was divided. Basing on the theory of Boussinesq, the stresses at the embankment-subsoil contact area, and the resulting settlement were determined. On the basis of the model, the modul of compressibility for the real overloading embankment were determined.

**Key words:** modulus of compressibility for organic soils, overloading embankment, superposition method, flexible foundation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 26.07.2016

Cytowanie: Coufal, R., Olszewska, M. (2016). Przeciążenie gruntu organicznego nasypem pod składowisko przeznaczone do magazynowania elementów konstrukcyjnych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (3), 93–102.