

WYKORZYSTANIE ETAPOWEJ BUDOWY Z PRZECIĄŻENIEM DO WZMOCNIENIA PODŁOŻA ORGANICZNEGO NASYPU DROGI EKSPRESOWEJ

Zbigniew Lechowicz¹✉, Kazimierz Garbulewski¹, Jacek Bąkowski¹,
Małgorzata Wdowska¹, Grzegorz Wrzesiński¹, Ivan Ramos Fernandes²

¹ Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa

² POLAQUA-DRAGADOS Oddział Warszawa

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono przykład projektowania wzmocnienia podłoża organicznego drogi ekspresowej metodą etapowej realizacji nasypu z przeciążeniem z zastosowaniem drenażu pionowego i geowłókniny. W podłożu nasypu drogowego występują grunty organiczne (torf, gytia) o miąższości 4,5 m. W analizie stateczności i prognozie konsolidacji wykorzystano parametry geotechniczne określone na podstawie badań *in situ* i badań laboratoryjnych. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programów GeoSlope i Plaxis, określając bezpieczne wysokości poszczególnych etapów budowy nasypu i czas potrzebny do konsolidacji podłoża. Wyniki analizy numerycznej wykazały strefy nierównomiernych osiadań wymagających dodatkowego wzmocnienia korpusu i skarp nasypu. Zróżnicowanie właściwości podłoża organicznego oraz różna lokalizacja projektowanego nasypu w stosunku do nasypu istniejącego wskazują na konieczność zainstalowania aparatury kontrolno-pomiarowej do pomiarów pionowych i poziomych przemieszczeń oraz ciśnień wody w porach.

Słowa kluczowe: droga ekspresowa, podłoże organiczne, etapowa budowa z przeciążeniem, wzmocnianie podłoża

WSTĘP

Jednym ze sposobów wzmocnienia podłoża organicznego nasypów, w tym również drogowych, jest kontrolowana konsolidacja podłoża podczas etapowej ich budowy (CUR 1996; Hartlen i Wolski, 1996; Han, 2015). Przyspieszenie procesu konsolidacji poprzez zastosowanie w podłożu drenażu pionowego umożliwia skrócenie czasu wznoszenia nasypów. Ograniczenie odkształceń nawierzchni drogowej w okresie eksploatacji można uzyskać, stosując przeciążenie podłoża organicznego w okresie budowy. Zaprojektowanie technologii etapowej budowy nasypu drogowego na podłożu organicznym wymaga rozpoznania

właściwości występujących w podłożu gruntów organicznych, określenia parametrów geotechnicznych i przeprowadzenia obliczeń służących ocenie stateczności, przebiegu odkształceń i rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach oraz wzmocnienia podłoża organicznego (Lechowicz i Szymański, 2002).

W projektowaniu etapowej budowy nasypu na podłożu organicznym należy przeprowadzić analizę stateczności w każdym etapie realizacji, tak aby wysokość nasypu w poszczególnych etapach oraz tempo ich realizacji dostosować do uzyskanego wzrostu wytrzymałości na ścinanie podłoża (Duncan i Wright, 2005). W pierwszym etapie wytrzymałość na ścinanie określa się dla podłoża w stanie naturalnym, w kolejnych eta-

✉ zbigniew_lechowicz@sggw.pl

pach należy natomiast uwzględnić wzrost wytrzymałości spowodowany przyrostem naprężenia efektywnego podczas procesu konsolidacji (Lechowicz, 1992; Wrzeński i Lechowicz, 2012; Lechowicz i Wrzeński, 2013). Charakterystyczne dla podłoża słabonośnych duże zróżnicowanie warunków gruntowych często zmusza do przeprowadzenia w okresie budowy i eksploatacji badań kontrolnych umożliwiających ocenę rzeczywistego efektu wzmocnienia. Dodatkowym utrudnieniem projektowania dróg ekspresowych jest ich lokalizacja na trasie użytkowanych dróg.

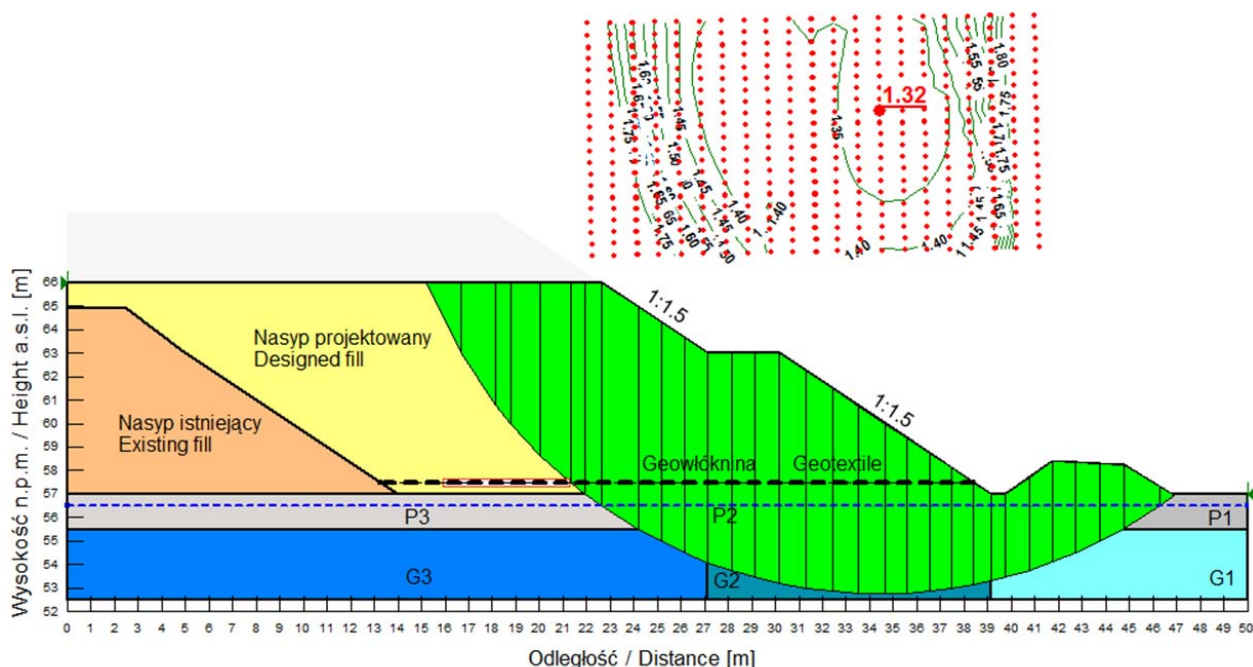
W artykule przedstawiono przykład projektowania wzmocnienia podłoża organicznego drogi ekspresowej metodą etapowej realizacji nasypu z przeciążeniem z zastosowaniem drenażu pionowego i geosyntetyków. W analizie stateczności i prognozie konsolidacji wykorzystano parametry geotechniczne określone na podstawie badań *in situ* i badań laboratoryjnych. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programów GeoSlope i Plaxis, określając bezpieczne wysokości poszczególnych etapów budowy nasypu i czas potrzebny do konsolidacji podłoża. Wyniki analizy numerycznej

wykazały strefy nierównomiernych osiadań wymagających dodatkowych wzmocnień korpusu i skarp nasypu.

CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO OBIEKTU

Analizowany w artykule projektowany nasyp drogi ekspresowej S5 (rys. 1) zlokalizowany jest częściowo na trasie istniejącej drogi krajowej, w której podłożu występują ekstremalnie trudne warunki geotechniczne. Na analizowanym odcinku projektowany nasyp ma zmienną wysokość wynoszącą maksymalnie 12 m. Na koronie nasypu o szerokości 33 m projektowane są dwie dwupasmowe jezdnie z pasem awaryjnym o szerokości 9,5 m, każda z pasem rozdzielającym o szerokości 12 m. Pas ten planuje się wykorzystać do budowy dodatkowego pasa ruchu w obu kierunkach. Projektowane obciążenie nawierzchni wynosi 115 kN na oś przy natężeniu ruchu KR6.

W podłożu projektowanego nasypu występują grunty organiczne: torfy i gytie. Miąższość gruntów organicznych jest zmienna i wynosi maksymalnie 4,5 m.



Rys. 1. Analiza stateczności nasypu z ławką i zbrojeniem w podstawie geowłókniną w trzecim etapie budowy

Fig. 1. Stability analysis of the embankment with the bench and geotextile reinforcement at the base in the third construction stage

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 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 Gytija					
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

Od powierzchni terenu do głębokości 1,5 m występują torfy włókniste i pseudowłókniste zawierające od 58 do 76% części organicznych o różnym stopniu rozkładu. Występujące pod torfami gytie o miąższości 3,0 m są mineralno-organiczne lub organiczne nisko- lub wysokowęglanowe. Właściwości fizyczne gruntów organicznych podano w tabeli 1. Badania terenowe wykazały poziom wód gruntowych na głębokości od 0,2 do 1,5 m (Katedra Geoinżynierii SGGW, 2016a, b).

ANALIZA STATECZNOŚCI NASYPU

W projektowaniu nasypu drogowego na podłożu organicznym jednym z głównych zadań jest analiza stateczności. Schematy obliczeniowe przyjęte w analizie stateczności powinny uwzględniać zmiany obciążenia wywołane wieloetapowym wznoszeniem nasypu. Zastosowanie techniki czasowego przeciążenia w celu ograniczenia osiadań występujących po zakończeniu budowy wymaga oceny stateczności w warunkach dodatkowego obciążenia przekraczającego obciążenie końcowe. W celu skrócenia czasu konsolidacyjnego wzmocnienia gruntów organicznych można zastosować drenaż pionowy, który pozwala uzyskać istotne

wzmocnienie nawet w podłożach o dużej miąższości. Jednakże przyjęcie jednakowego przebiegu procesu wzmocnienia podłoża wzdłuż całego nasypu jest zbyt dużym uproszczeniem. W obliczeniach należy wydzielić w podłożu strefy o różnej wytrzymałości na ścinanie. Obciążenie podłoża organicznego nasypem powoduje powstanie w podłożu stref o różnym zakresie i przebiegu zmian naprężenia oraz ciśnienia wody w porach.

Podłoże organiczne w poszczególnych etapach budowy projektowanego nasypu podzielono na warstwy i strefy obliczeniowe o jednakowej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, które wyznaczono na podstawie prognozy wzrostu wytrzymałości na ścinanie przed kolejnym etapem obciążenia. Wartości wytrzymałości na ścinanie (τ_{fu}) dla poszczególnych stref obliczeniowych wyznaczono na podstawie zależności (Lechowicz, 1992):

$$\tau_{fu} = K_s \cdot \sigma'_v \quad (1)$$

gdzie: K_s – współczynnik wzrostu wytrzymałości na ścinanie;

σ'_v – składowa pionowa naprężenia efektywnego.

Współczynnik wzrostu wytrzymałości na ścinanie (K_s) określono z zależności:

$$K_s = S \cdot (VSL)^{m_{oc}} \quad \text{dla } VSL > 1 \quad (2)$$

$$K_s = S \cdot (VSL)^{m_{nc}} \quad \text{dla } VSL \leq 1 \quad (3)$$

gdzie: $VSL = (\sigma'_p)_o / \sigma'_v$ – wskaźnik stanu składowej pionowej naprężenia efektywnego;

S – znormalizowana wytrzymałość na ścinanie gruntu normalnie konsolidowanego przy $VSL = 1$;

m_{oc} – współczynnik liczbowy, wyrażający nachylenie zależności $\log\left(\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_v}\right)$ od $\log(VSL)$ w zakresie prekonsolidowanym ($VSL > 1$);

m_{nc} – współczynnik liczbowy, wyrażający nachylenie zależności $\log\left(\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_v}\right)$ od $\log(VSL)$ w zakresie normalnie konsolidowanym ($VSL \leq 1$).

W prognozie wzrostu wytrzymałości na ścinanie podłoża projektowanego nasypu przyjęto następują-

ce wartości współczynników empirycznych: dla torfu $S = 0,50$, $m_{oc} = 0,80$, $m_{nc} = 0,15$; dla gytii $S = 0,45$, $m_{oc} = 0,80$, $m_{nc} = 0,10$.

W analizie stateczności nasypu przyjęto cztery etapy jego budowy (każdy o wysokości 3 m) i etap przeciążenia (o wysokości 2 m). Wysokość nasypu z przeciążeniem wynosiła 14 m. Czas realizacji każdego etapu wynosił 60 dni, przy czym założono, że wznoszenie nasypu trwało 18 dni, a przerwa technologiczna 42 dni. W obliczeniach przyjęto wzmocnienie konsolidacyjne podłoża organicznego przyspieszone drenażem pionowym o rozstawie 1,5 m i zbrojenie podstawy nasypu geowłókniną. Parametry geotechniczne podłoża organicznego i nasypu przyjęte w analizie stateczności uproszczoną metodą Bishopa przedstawiono w tabeli 2. Analiza stateczności wykazała, że na naturalnym podłożu można wykonać stateczny nasyp o wysokości nie większej niż 3 m. Uwzględniając konsolidacyjne wzmocnienie podłoża i zbrojenie podstawy nasypu, wyniki analizy stateczności wskazują na stateczny stan poszczególnych etapów przy przyjętym harmonogramie budowy nasypu. Wyniki analizy stateczności dla trzeciego etapu nasypu z ławką i zbrojeniem w podstawie geowłókniną przedstawiono na rysunku 1. Współczynnik stateczności dla trzeciego etapu budowy nasy-

Tabela 2. Parametry geotechniczne przyjęte w analizie stateczności uproszczoną metodą Bishopa nasypu z ławką zbrojonego w podstawie geowłókniną

Table 2. Geotechnical parameters used in stability analysis by simplified Bishop method of the fill with bench and reinforced by geotextile at the base

Warstwa Layer	Strefa Zone	Ciężar objętościowy Total unit weight γ [kN·m ⁻³]	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego Effective angle of internal friction φ' [°]	Wytrzymałość na ścinanie bez odplywu Undrained shear strength τ_{fu} [kPa]
Nasyp Fill	×	17,5	35	–
Torf Peat	P1	11,0	×	15
	P2	11,5		27
	P3	12,0		39
	P4	12,5		51
Gytia Gyttja	G1	13,0	×	10
	G2	13,5		22
	G3	14,0		34
	G4	14,5		46

pu bez uwzględnienia konsolidacyjnego wzmocnienia podłoża wywołanego trzecim etapem wynosi 1,32. Dla pozostałych etapów współczynniki stateczności dla nasypu zbrojonego w podstawie geowłókniną są większe od wartości wymaganej podczas budowy. Analiza stateczności dla nasypu po zakończeniu budowy wykazała, że wartości współczynników stateczności z uproszczonej metody Bishopa $F > 1,5$ (Katedra Geoinżynierii SGGW, 2016a, b).

ANALIZA PRZEBIEGU ODKSZTAŁCENÍ I ROZPRASZANIA NADWYŻKI CIŚNIENIA WODY W PORACH

Duża odkształcalność i mała przepuszczalność gruntów organicznych powoduje, że projektowanie nasypów drogowych musi być poprzedzone analizą wartości i przebiegu w czasie odkształceń podłoża. Analizę przebiegu odkształceń w czasie oraz zmian naprężenia efektywnego w podłożu projektowanego nasypu przeprowadzono z wykorzystaniem analizy numerycznej za pomocą programu Plaxis. Parametry torfu i gytii do modelu sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra podano w tabeli 3.

W obliczeniach przyjęto dla torfu współczynnik filtracji $k = 3 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a dla gytii $k = 6 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

co odpowiada początkowej wartości współczynnika konsolidacji torfu $c_v = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz gytii $c_v = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Badania laboratoryjne torfu i gytii wykazały, że w procesie konsolidacji wraz ze zmniejszeniem wskaźnika porowatości maleje współczynnik konsolidacji. Poprawne uwzględnienie tego w analizie numerycznej wykorzystującej model sprężysto-idealnie plastyczny wymaga zatem odpowiedniego zwiększenia modułu odkształcenia oraz zmniejszania współczynnika filtracji w poszczególnych etapach.

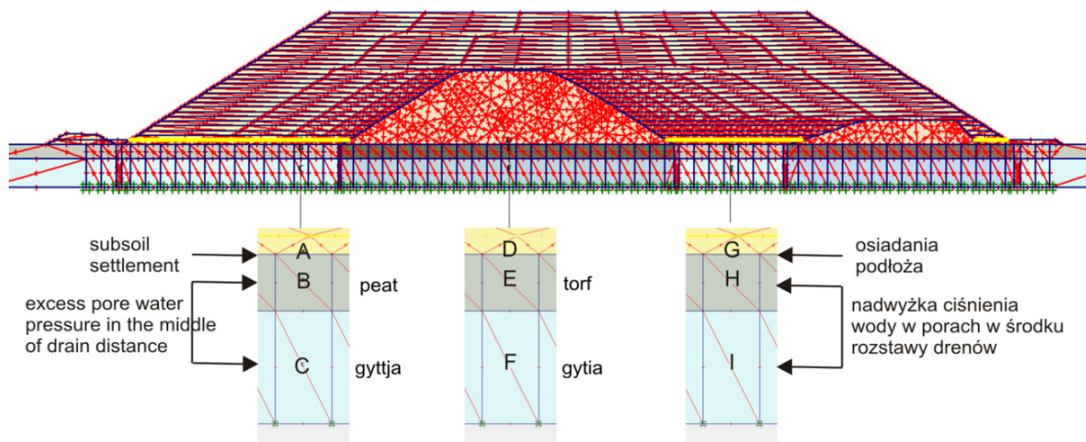
Schemat nasypu wykorzystany w analizie numerycznej z zaznaczonymi profilami, w których przedstawiono osiadanie podłoża i nadwyżki ciśnienia wody w porach pokazano na rysunku 2. Wyniki analizy numerycznej wskazują na zróżnicowane osiadania w poszczególnych strefach podłoża organicznego. Ponadto z analizy wynika, że nadwyżki ciśnienia wody w porach występują również poza podstawą nasypu, co uzasadnia konieczność zainstalowania drenażu pionowego poza nasypem w strefie o szerokości 4,5 m.

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach w środku warstwy torfu i gytii i w środku między drenami oraz przebieg osiadań podłoża organicznego w profilu poza istniejącym nasypem (rys. 2, profil A). Analiza wyników wskazuje, że przy przyjętym tempie wznoszenia

Tabela 3. Parametry torfu i gytii do modelu sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra

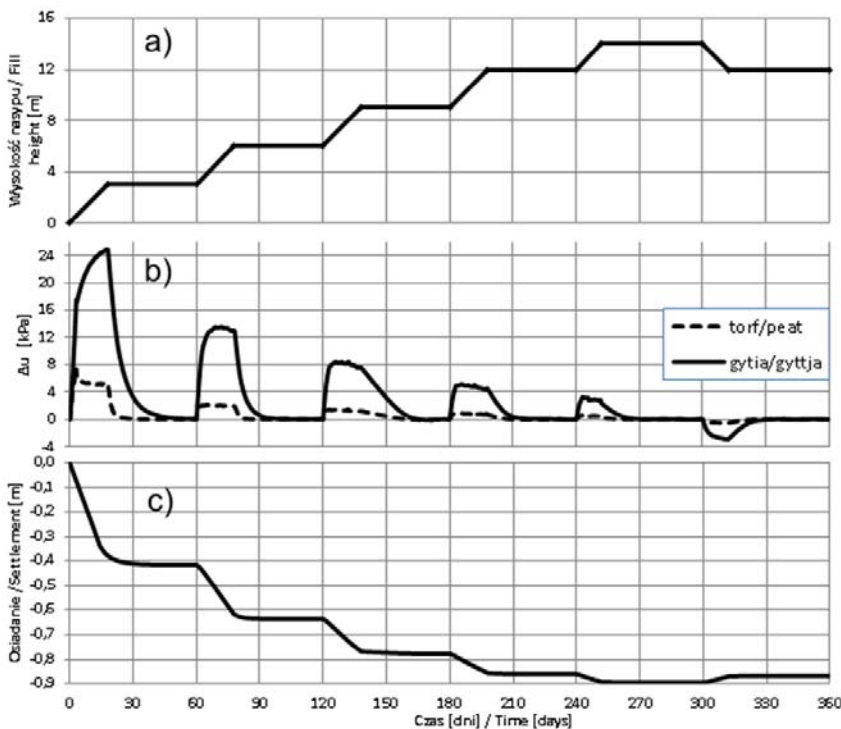
Table 3. Geotechnical parameters of peat and gytija for elasto-perfectly plastic model with Coulomb-Mohr criteria

Warstwa Layer	Etap Stage	Ciężar objętościowy Total unit weight γ [kN·m ⁻³]	Moduł odkształcenia Deformation modulus E [kPa]	Współczynnik Poissona Poisson ratio ν [-]	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego Effective angle of internal friction ϕ' [°]	Spójność Cohesion c' [kPa]	Współczynnik filtracji Permeability coefficient k [m·s ⁻¹]
Torf Peat	1	11,0	300	0,35	29	2	$3 \cdot 10^{-8}$
	2	11,5	900				
	3	12,0	1200				
	4	12,5	1500				
	5	13,0	1700				
Gytia Gyttja	1	13,0	300	0,35	28	2	$6 \cdot 10^{-9}$
	2	13,5	600				
	3	14,0	900				
	4	14,5	1200				
	5	15,0	1400				



Rys. 2. Schemat nasypu wykorzystany w analizie numerycznej: A, D, G – osiadanie podłoża organicznego, B, E, H – nadwyżka ciśnienia wody w porach w środku warstwy torfu, C, F, I – nadwyżka ciśnienia wody w porach w środku warstwy gytii

Fig. 2. Scheme of the embankment used in numerical analysis: A, D, G – settlement of organic subsoil, B, E, H – excess pore water pressure in the middle of the peat layer, C, F, I – excess pore water pressure in the middle of the gytja layer

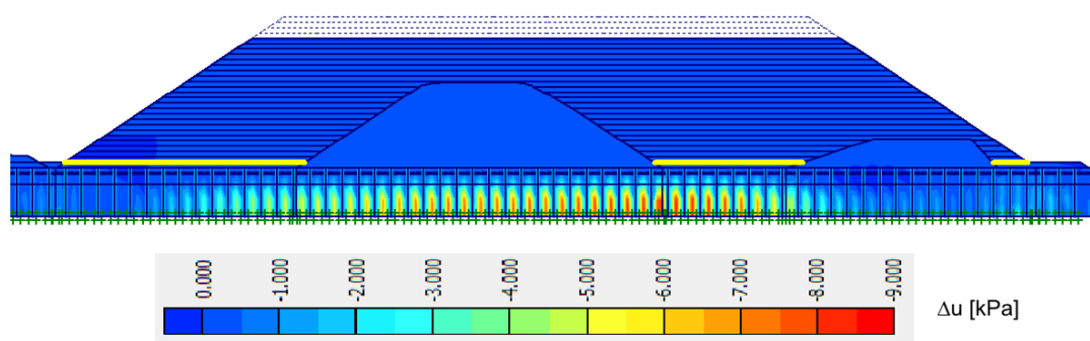


Rys. 3. Przebieg procesu konsolidacji podczas etapowej budowy z przeciążeniem w profilu A: a – harmonogram budowy, b – przebieg rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach w torfie (punkt B) i gytii (punkt C), c – osiadanie podłoża organicznego (punkt A)

Fig. 3. The consolidation process during the staged construction with preloading in profile A: a – construction schedule, b – dissipation of excess pore water pressure in the peat (point B) and gytja (point C), c – settlement of the organic subsoil (point A)

nasypu i zastosowanym drenażu pionowym częściowe rozproszenie nadwyżki ciśnienia wody w porach występuje już w etapie wznoszenia nasypu. Największe wartości nadwyżki ciśnienia wody w porach, na zakończenie budowy pierwszego etapu, wynoszą w

środku warstwy torfu 5,3 kPa, a w gytii 23,9 kPa. Największe przyrosty osiadania podłoża organicznego uzyskano w pierwszym etapie – 0,42 m, w tym torfu 0,15 m, a gytii 0,27 m. Łącznie po czterech etapach osiadania podłoża organicznego wynoszą 0,85 m, w



Rys. 4. Nadwyżki ciśnienia wody w porach na zakończenie wznoszenia czwartego etapu

Fig. 4. Excess pore water pressure at the end of the filling of fourth stage

tym torfu 0,26 m, a gytii 0,59 m. Na koniec etapu przeciążenia łączne osiadania podłoża organicznego wynosi 0,89 m, w tym torfu 0,27 m i gytii 0,62 m, a odprężenie podłoża organicznego wynosi 0,03 m.

Na analizowanym odcinku wysokość projektowanego nasypu jest wyższa od wysokości nasypu istniejącego. Z analizy rozkładu nadwyżek ciśnienia wody w porach wynika, że w podłożu organicznym pod istniejącym nasypem w trakcie realizacji trzeciego i czwartego etapu powstają nadwyżki ciśnienia wody w porach wymagające rozproszenia z wykorzystaniem drenów pionowych zainstalowanych pod istniejącym nasypem (rys. 4).

ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ WYWOŁANYCH PRZECIĄŻENIEM

Do obliczenia wtórnej ścisłości występującej po usunięciu przeciążenia zastosowano zależność podaną przez Mesriego, Starka, Ajlouniego i Chena (1997):

$$S_s = C'_{\alpha\epsilon} \cdot h \cdot \log \frac{t}{t_s} \quad (4)$$

gdzie: $C'_{\alpha\epsilon}$ – współczynnik ścisłości wtórnej po usunięciu przeciążenia [-];

t – końcowy czas wykorzystany do oszacowania wtórnego osiadania [dni];

t_s – czas ponownego rozpoczęcia wtórnego osiadania (moment usunięcia przeciążenia) [dni].

Wyniki badań edometrycznych wskazują, że największa wartość współczynnika ścisłości wtórnej ($C'_{\alpha\epsilon}$) wyznaczona na podstawie zależności odkształce-

nia (ϵ) od czasu w skali logarytmicznej dla torfu wynosi 0,02, a dla gytii 0,01. W obliczeniach przyjęto, że stosunek $C'_{\alpha\epsilon}/C_{\alpha\epsilon}$ wynosi 0,5. Osiedlenia wywołane pełzaniem gruntów organicznych w okresie dziesięcioletniej eksploatacji nie powinny przekroczyć zatem 0,05 m.

PODSUMOWANIE

Ograniczenie osiadań nasypów drogowych na podłożu organicznym do wymaganych wartości można uzyskać, wzmacniając podłoże etapową konsolidacją z przeciążeniem, którą można przyspieszyć, stosując w podłożu drenaż pionowy. W projektowaniu wzmocnienia należy wyznaczyć bezpieczne wysokości nasypów, w planowanych etapach uwzględniając wzrost wytrzymałości wynikający z konsolidacji podłoża etapem poprzednim. Współczynnik wzrostu wytrzymałości na ścinanie dla torfów i gytii można określić podanymi w artykule zależnościami z uwzględnieniem stanu naprężenia efektywnego w podłożu. W analizie stateczności należy wydzielić w podłożu organicznym strefy obliczeniowe wynikające z warstw geotechnicznych i prognozowanego wzrostu wytrzymałości na ścinanie. W analizowanym nasypie drogowym wydzielono w podłożu cztery strefy obliczeniowe; wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w strefie nieobciążonej torfu i gytii (strefy P1 i G1) wynoszą odpowiednio 15 i 10 kPa, w strefie największego wzmocnienia po czwartym etapie budowy (strefy P4 i G4) 51 i 46 kPa.

Przyjęty w analizie harmonogram etapowej budowy nasypu o docelowej wysokości 12 m, w którym wznoszenie każdego z czterech etapów o wysokości 3 m i przeciążenie o wysokości 2 m będą zrealizowane

przez 18 dni, a konsolidacja między etapami będzie wynosiła 42 dni, zapewnia rozproszenie nadwyżki ciśnienia wody w porach do bezpiecznych wartości. Nadwyżki ciśnienia wody w porach w środku warstw torfu i gytii wynoszą na zakończenie pierwszego etapu odpowiednio 5,3 i 23,9 kPa, co wskazuje na szybsze rozpraszanie nadwyżek ciśnienia wody w czasie budowy w torfie niż w gytii.

Po czterech etapach budowy nasypu osiadania podłoża organicznego wynoszą 0,85 m, w tym torfu 0,26 m i gytii 0,59 m. Na koniec etapu przeciążenia łączne osiadanie podłoża organicznego wynosi 0,89 m, w tym torfu 0,27 m i gytii 0,62 m, a odprężenie podłoża organicznego jest równe 0,03 m. Osiedlenia wywołane pełzaniem gruntów organicznych w okresie dziesięcioletniej eksploatacji nie powinny przekroczyć 0,05 m.

Zróznicowanie właściwości podłoża organicznego oraz różna lokalizacja projektowanego nasypu w stosunku do nasypu istniejącego powodują konieczność zainstalowania aparatury kontrolno-pomiarowej. Wyniki pomiarów aparatury kontrolno-pomiarowej pozwolą na ocenę rzeczywistego przebiegu procesu wzmocnienia i podjęcie odpowiednich decyzji.

PIŚMIENNICTWO

CUR (1996): *Building on soft soils*. CUR Report 162. Rotterdam A. A. Balkema.

Duncan, J.M. i Wright, S.G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Han, J. (2015). *Principles and practices of ground improvement*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Hartlen, J. i Wolski, W. (1996). *Embankments on organic soils*. Elsevier, Amsterdam.

Katedra Geoinżynierii SGGW (2016a). *Badania terenowe i laboratoryjne podłoża słabonośnego drogi ekspresowej S5 na odcinku km 21+600 do km 23+500*. Warszawa.

Katedra Geoinżynierii SGGW (2016b). *Obliczenia konsolidacji podłoża słabonośnego i stateczności nasypu drogi ekspresowej S5 na odcinku km 21+600 do km 23+500*. Warszawa.

Lechowicz, Z. (1992). *Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.

Lechowicz, Z. i Szymański, A. (2002). *Odkształcenia i stateczność nasypów na gruntach organicznych*. Cz. I. *Metodyka badań*. Cz. II. *Metodyka obliczeń*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.

Lechowicz, Z. i Wrzesiński, G. (2013). *Posadowienie budowli ziemnych na podłożu słabonośnym*. Międzynarodowe seminarium *Budowle ziemne jako obiekty na terenach zalewowych* (strony 33–54). Poznań.

Mesri, G., Stark, T.D., Ajlouni, M.A. i Chen, C.S. (1997). Secondary compression of peat with or without surcharging. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 411–421.

Wrzesiński, G. i Lechowicz, Z. (2012). Ocena stateczności etapowo budowanego nasypu na podłożu organicznym. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 21(4), 273–283.

USE OF STAGED CONSTRUCTION WITH PRELOADING FOR IMPROVEMENT OF ORGANIC SUBSOIL UNDER EXPRESSWAY EMBANKMENT

ABSTRACT

The paper presents an example of designing the consolidation improvement of the organic subsoil under expressway by staged construction with preloading using vertical drains and geotextile. In the subsoil of road embankment there are organic soils (peat, gytja) with a thickness of 4.5 m. The geotechnical parameters determined on the basis of *in situ* tests and laboratory tests were used in the stability analysis and the consolidation prediction. The calculations were carried out using the GeoSlope and Plaxis numerical programs, determining the safe heights of the individual stages of the embankment construction and the time needed to consolidate the organic subsoil. The results of the numerical analysis indicated zones of settlement nonuniformity that require additional strengthening of the embankment. The significant variation of the organic soil properties and the different location of the designed embankment in relation to the existing one indicates the necessity of control measurements of vertical and horizontal displacements as well as pore water pressures in organic subsoil.

Key words: expressway, organic subsoil, staged construction with preloading, subsoil improvement