

Technologia drenów pionowych – walidacja modeli obliczeniowych za pomocą wyników monitoringu na gruntach organicznych Żuław Wiślanych

Mgr inż. Anita Meger, mgr inż. Marta Zachara-Breza, mgr inż. Krystian Binder
Menard Sp. z o.o.

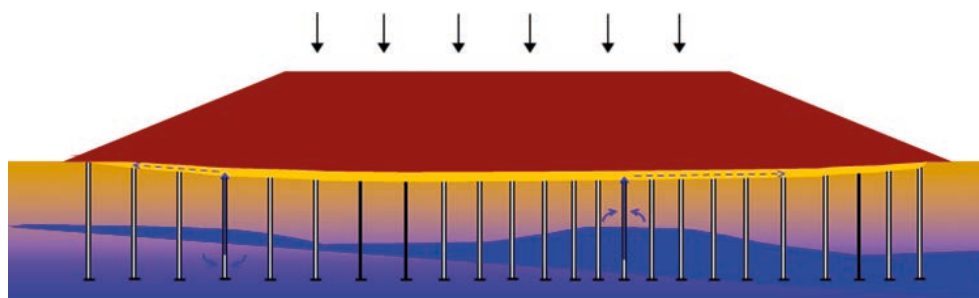
W artykule przedstawiono wykorzystanie obserwacji (monitorowania) obiektów *in situ* w celu weryfikacji obliczeń projektowych w technologii drenów pionowych. Technologia ta wykorzystuje zjawisko konsolidacji. Konsolidacja to proces zmniejszenia objętości gruntu pod stałym obciążeniem. W przypadku konsolidacji pierwotnej odbywa się to na skutek wycisnięcia lub odpompowania wody gruntowej, co wpływa na zmianę ciśnienia porowego. W przypadku konsolidacji wtórnej osiadania generowane są na skutek kilku czynników, takich jak: właściwości lepkie układu cząstki gruntu – woda, ruchy cząstek gruntu, pełzanie, ściśliwości cząstek organicznych. Proces konsolidacji pierwotnej i wtórnej możliwy jest w gruntach organicznych (między innymi w: torfach, gytiach, namulach, kredach jeziornych) oraz gruntach mineralnych (szczególnie w gruntach spoistych).

Projektowanie technik konsolidacyjnych odbywa się na podstawie wyników badań laboratoryjnych próbek o wymiarze maksymalnie kilkunastu centymetrów. Rzeczywiste nasypy dro-

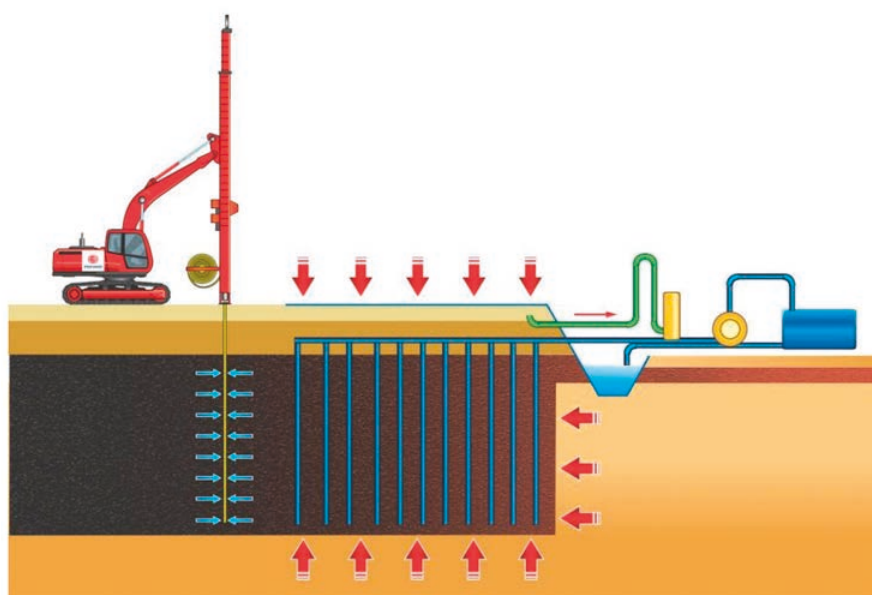
gowe mają od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów i posadawia się je na podłożu słabym o podobnej miąższości. Z tego powodu konieczne jest prowadzenie obserwacji zachowania się podłoża w czasie i jego analiza w kontekście obliczeń projektowych. Jedną z prostszych metod interpretacji danych konsolidacyjnych jest metoda Asaoka [1], której zastosowanie opisano w niniejszym artykule.

TECHNOLOGIE KONSOLIDACYJNE

Technologia wzmocnienia podłoża przy użyciu drenów prefabrykowanych polega na wprowadzaniu w grunt płaskich, plastikowych, elastycznych przewodów, których zadaniem jest zwiększenie przepuszczalności podłoża. Dreny stosuje się w siatce trójkąta lub kwadratu w rozstawie uzależnionym od warunków geologicznych, przeważnie 1,0 do 1,2 m. Osiadania wynikające z konsolidacji gruntów można przyspieszyć dzięki



Rys. 1. Schemat działania drenów pionowych z nasypem przeciążającym



Rys. 2. Schemat wykonania konsolidacji próżniowej MV

zastosowaniu nasypu przeciążającego lub przy użyciu specjalnego systemu pomp. Metody konsolidacyjne pozwalają zminimalizować osiadania wtórne będące efektem pełzania gruntu. Zaletą technologii drenów pionowych jest możliwość stosowania jej przy głębokościach gruntów słabonośnych nawet do 50 m. Przy dużych miąższościach (na przykład 25 m) gruntów mało przepuszczalnych, szczególnie gdy w podłożu występują grunty organiczne o dużych wilgotnościach, stosuje się konsolidację próżniową (technologię MV).

Metody konsolidacyjne wymagają czasu, dlatego często znajdują zastosowanie podczas realizacji obiektów liniowych. Jednym z takich zadań jest droga ekspresowa S7 na odcinku Nowy Dwór – Kazimierzowo, gdzie zastosowano dreny pionowe z nasypem przeciążającym. Wysokość przeciążenia na poszczególnych obszarach była uzależniona od warunków grunto-wo-wodnych oraz projektowanej niwelety drogi. Zastosowanie przeciążenia pozwala na wygenerowanie osiadań, które wystąpiłyby podczas eksploatacji, gdyby układ nie został przeciążony. Poniżej przedstawiono schematy działania technologii drenów prefabrykowanych z nasypem przeciążającym (rys. 1) oraz konsolidacji próżniowej MV (rys. 2).

Grunt skonsolidowany charakteryzuje się kilkukrotnie zwiększonymi parametrami wytrzymałościowymi. W rezultacie możliwe jest spełnienie wymagań związanych ze statecznością globalną. Efekt konsolidacji wykorzystują też inne technologie wzmocnienia gruntu, między innymi kolumny żwirowe [3], kolumny kamienne [8] czy kombinacje kilku elementów [15].

PRZEGLĄD LITERATURY

Literatura dotycząca wykorzystania obserwacji *in situ* procesu konsolidacji jest relatywnie bogata. Obejmuje ona zarówno prace teoretyczne [1, 14, 16], jak i prace pokazujące skuteczność tych metod w odniesieniu do zachowania się nasypów drogowych czy kolejowych [2, 4, 5, 6, 9, 10 i 12]. Dodatkowo istnieje jeszcze literatura z dziedzin pokrewnych, między innymi na temat techniki pomiarów *in situ* czy zachowania się drenów pionowych. Ten drugi aspekt byłby ważny, gdyby polegać tylko na modelu bazowym, bez danych z pomiarów *in situ*. Wówczas w analizach należałoby uwzględniać takie efekty jak: smear zone / smear effect (strefa zaburzonej filtracji – zwroty używane zamiennie), well resistance effect (efekt ograniczonej możliwości filtracji) czy przepływ poziomy wody w gruncie. W [12] podkreślono jednak, że efekty te są pomijalne, jeżeli wykorzystuje się wyniki pomiarów *in situ*.

W większości pozycji literaturowych wykazano skuteczność metody Asaoka [2, 4, 5, 6, 9, 10, 12], popularnej metody hiperbolicznej Tana [2, 4, 6, 16] oraz metod takich jak metoda Terzagiego [10], MES [10], Chunlin [2], Korhonen [9]. W wyniku analiz przedstawiono kilka obostrzeń, uwag i modyfikacji, jak na przykład:

- W [4] autor proponuje własną modyfikację metody Asaoka, aby poprawić zgodność pomiarów *in situ* i oszacowania;
- W [10] autorzy wskazują wpływ właściwego doboru parametrów w kierunku pionowym i poziomym na przydatność metody;

- W [6] autor wskazuje na zaletę metody hiperbolicznej Tana polegającej na możliwości uwzględnienia procesu budowy nasypu w interpretacji danych. Przedstawione wyniki pokazują, że interpretacja ma sens, gdy jako punkt wyjścia przyjmiemy czas, kiedy zrealizowane jest powyżej 50% budowy nasypu. Podobny wniosek przedstawiono w [12] w przypadku metody Asaoka. Stwierdzono, że można uwzględniać w tej metodzie etap budowy nasypu, jeżeli spełniony jest warunek współczynnika czasu budowy $T_c > 1$;
- Jednocześnie w [12] podkreśla się fakt, że metoda Asaoka nie może być stosowana w przypadkach, w których zachodzi konsolidacja wtórna. Podobny wniosek można wyciągnąć analizując [9], gdzie metoda Asaoka daje dobrą zgodność z pomiarami *in situ*, ale tylko w krótkich okresach czasu. W dłuższym okresie czasu (na przykład 5 lat), kiedy konsolidacja wtórna zapewne wystąpiła, wyniki nie są zgodne;
- Ostatnie ciekawe spostrzeżenia uwypuklono w [3], gdzie interpretacja metody Asaoka została skonfrontowana z obliczeniami projektowymi wykonanymi przed rozpoczęciem budowy. Osiedlenia określone metodą Asaoka były większe niż przewidywano na etapie projektu. We wnioskach stwierdzono, że realne zjawiska zachodzą w 3D, a teoria uwzględnia w tym przypadku tylko 2D. Zauważono, że *in situ* możemy mieć do czynienia ze zniszczeniem struktury gruntu oraz możemy obserwować osiadania wynikające z przemieszczeń poziomych.

STUDIUM PRZYPADKU – DROGA EKSPRESOWA S7 KOSZWAŁY – KAZIMIERZOWO

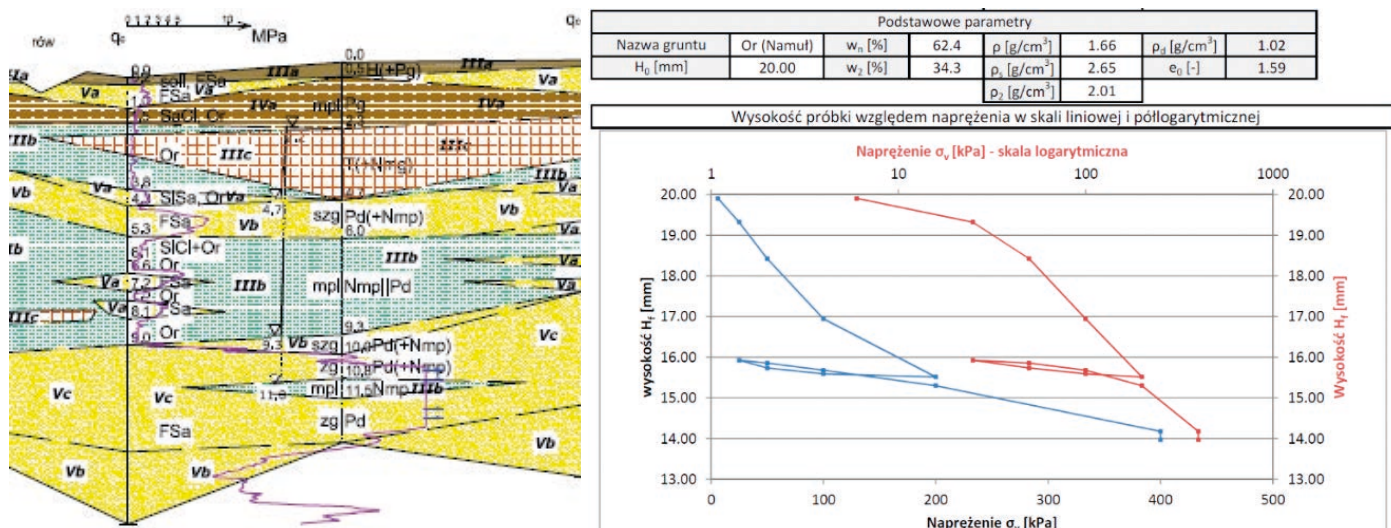
Budowa drogi ekspresowej S7 na odcinku Koszwały – Kazimierzowo była jednym z największych projektów geotechnicznych w Polsce. Kontrakt podzielono na dwa zadania, realizowane przez dwie firmy budowlane: Metrostav (zadanie 1: Koszwały – Nowy Dwór Gdański) oraz Budimex S.A. (zadanie 2: Nowy Dwór Gdański – Kazimierzowo). Za wzmocnienie podłoża dla zadania 2: od km 37+979,25 do km 57+116,45 odpowiedzialne było konsorcjum firm Menard oraz Keller Polska.

W przypadku tej inwestycji określono w projekcie wymagania dotyczące osiadań podczas eksploatacji:

- maksymalne dopuszczalne osiadania drogi podczas eksploatacji po 5 latach – 5 cm,
- maksymalne dopuszczalne osiadania drogi podczas eksploatacji po 50 latach – 10 cm.

Warunki grunto-wo-wodne

Droga ekspresowa S7 na odcinku Koszwały – Kazimierzowo zlokalizowana jest na obszarach o niekorzystnych i skomplikowanych warunkach gruntowych. Wzdłuż całej trasy w warstwach przypowierzchniowych występują grunty słabonośne o znacznej miąższości i płytko zalegające wody gruntowe. W zakresie inwestycji miąższość gruntów słabonośnych, reprezentowanych przez namuły piaszczyste, namuły gliniaste oraz lokalnie gytie



Rys. 3. Przekrój geologiczny na obszarze drogi S7 [7] oraz wyniki badań edometrycznych [13]

i torfy, sięga nawet do 16 ÷ 18,0 m. Obszar Żuław Wiślanych charakteryzuje się występowaniem tak zwanego torciku żuławskiego, gdzie grunty organiczne przewarstwione są wkładkami piasków drobnych oraz średnich. Torfy występujące na terenie Żuław zawierają wkładki ilów, mułów i piasków. W całości należą do torfów niskich. Namuły litologicznie wykształcone są jako piaski różnoziarniste, mulki lub ły z domieszką substancji humusowych, a niekiedy z większymi wkładkami osadów organicznych. Na rys. 3 przedstawiono typowy przekrój geologiczny na obszarze projektowanej drogi ekspresowej S7 [7] oraz wyciąg z typowych badań edometrycznych [13].

Występujące w obrębie drogi ekspresowej S7 grunty organiczne charakteryzują się zmienną zawartością części organicznych, właściwościami filtracyjnymi oraz wilgotnością. Przepuszczalność podłoża organicznego uzależniona jest od rodzaju i frakcji części mineralnych oraz stopnia rozłożenia części organicznych.

W ramach budowy drogi ekspresowej S7 wykonano szereg badań geotechnicznych. Zakres badań obejmował sondowania CPT-u, badania wytrzymałości gruntu na ścinanie, otwory wiertnicze, badania edometryczne na próbkach o nienaruszonej strukturze (NNS). Badania te pozwoliły określić właściwości fizyko-mechaniczne gruntów dla poszczególnych odcinków

wzmocnień. Na potrzeby techniki konsolidacji za pomocą drenów pionowych konieczne są odpowiednie badania edometryczne, to jest z wydłużonym czasem pomiarowym (do minimum 7 dni) dla ostatniego obciążenia, tak aby określić współczynnik ścisłości wtórnej.

Badania edometryczne

W przypadku metod konsolidacyjnych szczególne znaczenie mają badania parametrów konsolidacyjnych, które odgrywają kluczową rolę podczas obliczania czasu konsolidacji oraz wysokości nasypu przeciążającego. W celu zaprojektowania wzmocnienia podłoża trasy S7 dla każdego obszaru wykonano pakiet badań w edometrze. Pozwoliły one wyznaczyć podstawowe parametry konsolidacyjne, to jest: C_c – wskaźnik ścisłości wtórnej, C_s – wskaźnik odprężenia, C_α – współczynnik ścisłości wtórnej, C_v – współczynnik konsolidacji pionowej, C_r – współczynnik konsolidacji poziomej, e_0 – wskaźnik porowatości, E_{oed} – moduł edometryczny. Przeprowadzone badania potwierdziły zmienność litologiczną gruntów organicznych zarówno w zależności od obszarów, jak i głębokości zalegania warstw gruntów słabonośnych [13].

Tabl. 1. Założenia projektowe analizowanych obszarów

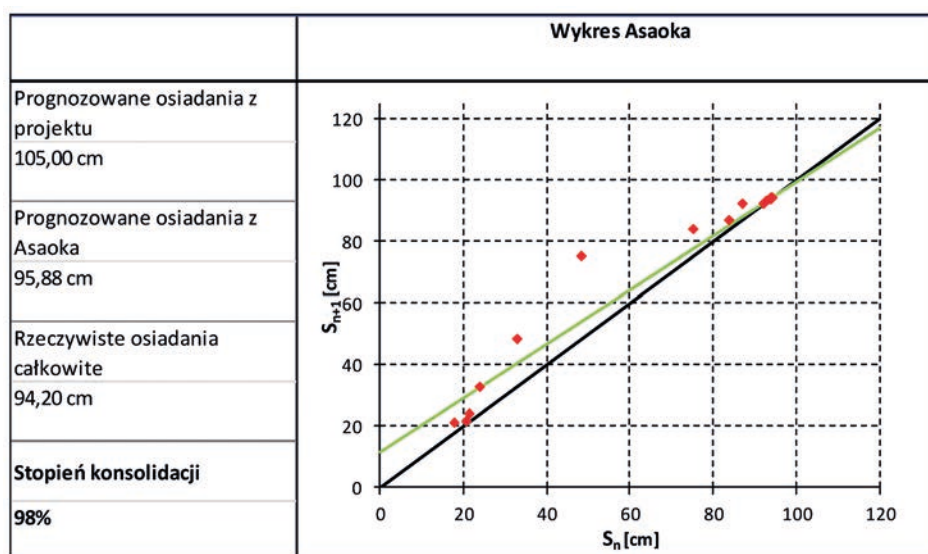
Obszar	Powierzchnia obszaru	Szerokość korony nasypu	Wysokość nasypu	Występowanie gruntów organicznych	Rozstaw drenów	Wysokość nasypu przeciążającego	Czas konsolidacji
4.6	2202 m ²	36,5 m	4,5 m	od 1,5 do 3,4 m p.p.t. - torfy od 4,0 do 7,1 m p.p.t. - namuły piaszczyste	1,2 m	4,2 m	7 miesięcy
24.2	8795 m ²	31,0 m	5,6 m	od 1,5 do 8,7 m p.p.t. - namuł gliniaste od 8,7 do 9,3 m p.p.t. - torfy od 9,3 do 10,5 m p.p.t. - namuły gliniaste od 11,5 do 12,8 m p.p.t. - torfy	1,0 m	4,6 m	8 miesięcy
32.4	4527 m ²	32,5 m	2,2 m	od 2,5 do 8,7 m p.p.t. - namuł gliniasty	1,2 m	3,4 m	5 miesięcy

Obliczenia wymaganego czasu i wysokości przeciążenia oraz przewidywanych osiadań całkowitych i reszkowych przeprowadzono w programie Plaxis 9 2D, wykorzystując metodę elementów skończonych. Do zamodelowania gruntów organicznych przyjęto model Soft Soil Creep, który uwzględnia czynnik czasowy. Parametry gruntów organicznych przyjęto na podstawie wyników badań edometrycznych. W przypadku pozostałych gruntów parametry geotechniczne określono w oparciu o podstawową oraz uzupełniającą dokumentację badań podłoża gruntowego. W programie obliczeniowym Plaxis 9 2D przyjęto model osiowosymetryczny 2D oraz obliczenia konsolidacji, które uwzględniają czynnik czasowy. Dla gruntów organicznych przyjęto model Soft Soil Creep. Dreny prefabrykowane zaprojektowano w rozstawie 1,0 oraz 1,2 m w siatce trójkąta.

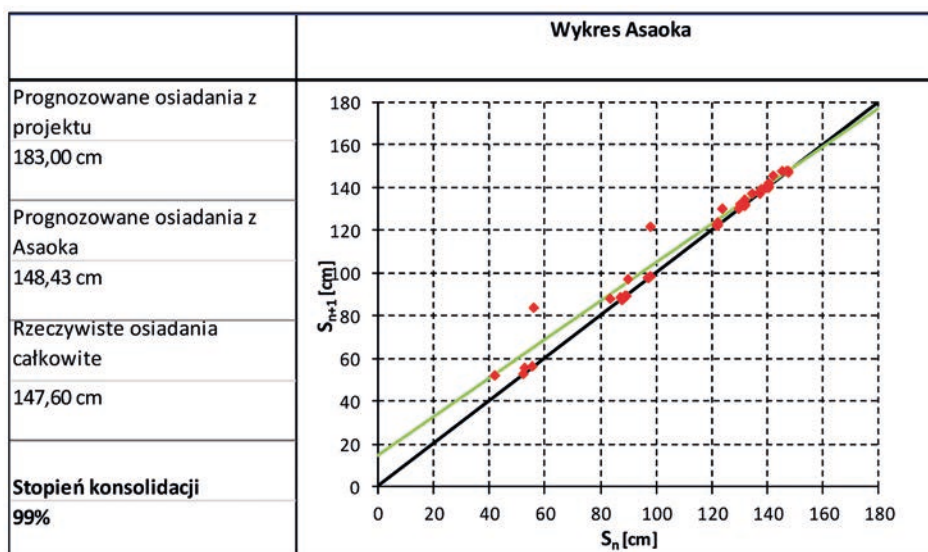
Założenia projektowe analizowanych obszarów przedstawiono w tabl. 1.

Interpretacja monitoringu osiadań

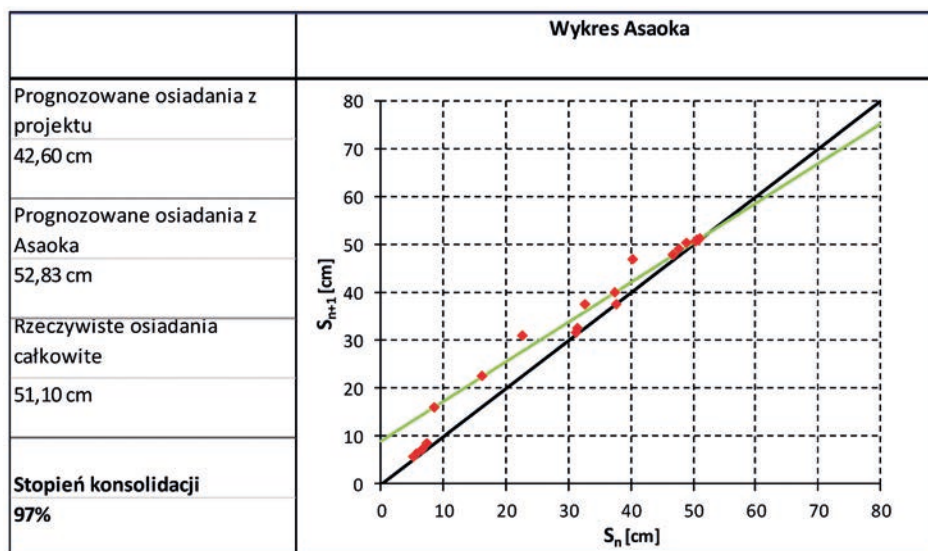
W ramach monitoringu osiadań założono repery talerzowe w przekrojach w rozstawie co około 50 m, po trzy sztuki w każdym przekroju (po dwie sztuki w przypadku dróg dojazdowych). Takie rozmieszczenie reperów pozwala uzyskać trzy lub dwa punkty pomiaru osiadań, z których środkowy jest kluczowy. Dodatkowo w ramach kontroli pomiarów z reperów talerzowych w przekrojach co około 150 m założono profilometry poziome. Z pomiarowego punktu widzenia pomiary powinny być wykonywane stale, przy pomocy profilometrów czy inklinometrów



Rys. 4. Wykres Asaoka dla obszaru 4.6 (km 39+770 do 39+805)



Rys. 5. Wykres Asaoka dla obszaru 24.2 (km 49+160 do 49+300)



Rys. 6. Wykres Asaoka dla obszaru 32.4 (km 54+560 do 54+650)

Tabl. 2. Porównanie projektowanych osiadań całkowitych oraz resztkowych po pierwszym roku użytkowania z wartościami rzeczywistymi pomierzonymi podczas monitoringu

Obszar	Maksymalne projektowane osiadania całkowite podczas przeciążenia	Projektowane osiadania resztkowe po pierwszym roku użytkowania	Maksymalne rzeczywiste osiadania całkowite podczas przeciążenia	Średnie rzeczywiste osiadania resztkowe po pierwszym roku użytkowania	Procent zrealizowanych osiadań całkowitych podczas przeciążenia w stosunku do projektowanych	Procent zrealizowanych osiadań resztkowych po pierwszym roku użytkowania w stosunku do projektowanych
[–]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]
4.6	1,05	0,010	0,94	0,009	89	90
24.2	1,83	0,009	1,48	0,011	81	122
32.4	0,43	0,017	0,51	0,013	119	76

poziomych. Niestety w warunkach polskich nie są one jeszcze powszechnie praktykowane.

Analizę konsolidacji przeprowadzono metodą Asaoka [1, 11]. Pomiary wykonywano w stałym przedziale czasowym, co tydzień, od momentu usypania platformy roboczej do osiągnięcia wymaganego współczynnika konsolidacji, z pominięciem okresów budowy nasypu przeciążającego. Na podstawie wyników graficznie wyznaczono przebieg osiadań całkowitych oraz stopień konsolidacji. Za czas zakończenia konsolidacji uznano moment uzyskania współczynnika konsolidacji minimum 95%. Na rys. 7, 8 i 9 przedstawiono wykresy Asaoka dla wybranych obszarów trasy S7.

Trasę główną drogi ekspresowej S7 zadanie 2: Nowy Dwór Gdański – Kazimierzowo oddano do użytkowania w październiku 2019 roku. Od tego czasu prowadzony jest monitoring punktów kontrolnych na nawierzchni, po cztery punkty w przekrojach co 50 m. W pierwszym roku pomiary kontrolne wykonywano co pół roku. W tabl. 2 zestawiono porównanie projektowanych osiadań całkowitych oraz resztkowych po pierwszym roku użytkowania z wartościami rzeczywistymi pomierzonymi podczas monitoringu.

WNIOSKI

W artykule porównano wyniki projektowanych osiadań całkowitych oraz osiadań wywołanych ruchem pojazdów po pierwszym roku eksploatacji z wartościami pomierzonymi w monitoringu. Z przeprowadzonej analizy wynika, że prognozowane wartości osiadań całkowitych oraz resztkowych zostały zrealizowane w około 80-120%. Zakres wykonania wzmocnienia podłoża w technologii drenów prefabrykowanych z nasypem przeciążającym dla trasy S7 wynosił około 14 km drogi, w tym trasa zasadnicza oraz drogi dojazdowe i łącznice. W opracowaniu przedstawiono wyniki z wybranych odcinków, jednak podobne wyniki uzyskano w pozostałym zakresie wykonanych robót. W kilku przypadkach zaobserwowano większe odchyłki od wartości przewidywanych. Takie obszary podlegały ponownej analizie Projektanta Wzmocnienia Podłoża pod względem przyjętych parametrów gruntu oraz wysokości i czasu przeciążenia. Analizując wyniki osiadań resztkowych w czasie eksploatacji, można stwierdzić, że metoda Asaoka pozwoliła na poprawne określenie końca procesu konsolidacji. Obecnie wtórne osiadania podczas użytkowania drogi S7 przebiegają zgodnie

z przeprowadzonymi obliczeniami. Technologia drenów prefabrykowanych jest obserwacyjną metodą wzmocnienia podłoża. Odpowiednio prowadzony monitoring nasypów pozwala na szczegółową ocenę postępu konsolidacji i weryfikację przyjętych założeń projektowych, a metoda Asaoka pozwala na uzyskanie racjonalnych wyników w przypadku gruntów organicznych Żuław Wiślanych.

LITERATURA

1. Asaoka A.: Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, grudzień 1978, Vol.18, No. 4, 87-101.
2. Benamghar A., Boudjellal M.: Comparative study of four consolidation settlement estimation methods of a railway embankment. *ASCMCES-17 MATEC Web of Conferences* 120, 06002 (2017). DOI: 10.1051/mateconf/201712006002.
3. Castro J i inni: Consolidation and deformation around stone columns: Comparison of theoretical and laboratory results. *Computers and Geotechnics*, Volume 49, April 2013, Pages 326-337. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.09.004>.
4. Chunlin L.: A simplified method for prediction of embankment settlement in clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6, 2014, 61-66
5. Hiep L. V., Pham B. T., Si Ho L., Nguyen M. D.: Analysis of consolidation degree using settlement observation results and Asaoka method: A case study of route km 94+340 – km 94 + 440 of Hanoi – haiphong highway construction project, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* Volume 8, Issue 11, November 2017, 91-100, <http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=11>.
6. HUAT B.B.K., HOE N. Ch., MUNZIR H. A.: Observational Methods for Predicting Embankment Settlement, *Pertanika J. Sci. & Technol.* 12(1): 115 – 128 (2004).
7. INGEO Sp. z o.o.: Dokumentacja badań podłoża gruntowego dla inwestycji projektu drogi ekspresowej S7 na odcinku Koszwały Kazimierzowo woj. pomorskie. Zadanie 2: Nowy Dwór Gdański – Kazimierzowo. Gdynia, maj 2014.
8. Kanty P., Sternik K., Kwiecień S.: Numerical analysis of consolidation of embankment subsoil reinforced with dynamic replacement stone columns. *Środowisko* 2-Ś/2015. DOI:10.4467/2353737XCT.15.229.4615.
9. Lansivaara T.: Observational method to predict future settlements Méthode d'observation pour prévoir de futurs tassements, *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, <https://www.issmge.org/publications/online-library>.
10. Lastiasih Y., Mochtar N. E., Nasya F.: Consolidation Coefficient in Horizontal Direction (C_h) Determined from Field Settlement Data By Using Terzaghi, Asaoka, and Finite Element Methods, *Regional Conference in Civil Engineering (RCCE). The Third International Conference on Civil Engineering Research (ICCR)*, Indonezja, August 2017.
11. Meger A., Kanty P.: Technologia drenów pionowych z nasypem przeciążającym – wybrane aspekty projektowe oraz wykonawcze. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2018, 243-250.
12. Mesri G., Huvaj-Sarihan N.: The Asaoka method revisited. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*. <https://www.issmge.org/publications/online-library>.
13. Samodzielne Laboratorium Geotechniki Instytutu Morskiego w Gdańsku. Raport z badań laboratoryjnych SLG/12/2016”. Gdańsk, marzec 2016.
14. Shi B., Kong X.: Study on Methods for Predicting the Settlements of Soft Clay Roadbed. *The First Highway Survey and Design Institute of China Communications Construction Company Ltd.*, Xi'an, China, {117021654,103121153}@qq.com.
15. Sternik K., Kanty P.: Posadowienie nasypu drogi ekspresowej na gruntach organicznych, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 4/2013, 309-319.
16. Tan T., Inoue T., Lee S.: Hyperbolic method for consolidation analysis. *Journal of Geotechnical Engineering* 1991;117(11):1723-37.