

Tomasz Białobrzęski, Menard Polska Sp. z o.o.

Obwodnica Południowa Gdańska

Budowa geologiczna, technologia wzmocnienia podłoża, monitoring nasypów

W artykule autor opisał Południową Obwodnicę Gdańska pod kątem budowy geologicznej, technologii wzmocnienia podłoża oraz monitoringu nasypów. Ta realizacja jest niezwykle istotna, ponieważ Południowa Obwodnica Gdańska, łączy Obwodnicę Trójmiasta oraz Południową Obwodnicę Miasta z drogą krajową nr 7 i Trasą Sucharskiego.

Południowa Obwodnica Gdańska stanowi łącznik pomiędzy Obwodnicą Trójmiasta oraz Południową Obwodnicą Miasta z drogą krajową nr 7 i Trasą Sucharskiego (rys. 1). Inwestycję, którą zrealizowano w latach 2009-2012, charakteryzuje specyfika nie tylko pod względem budowy geologicznej, niekorzystnych warunków posadowienia, ale również zastosowanej po raz pierwszy na tak dużą skalę w Polsce technologii drenażu pionowego VD (*Vertical Drain*) wraz z nasypami przeciążającymi jako metody wzmocnienia podłoża. Dodatkowo ze względu na ryzyko utraty stateczności wznoszonych nasypów, jak również kontrolę procesu konsolidacji gruntów organicznych konieczny był ciągły pomiar deformacji obiektów ziemnych poprzez wykonanie monitoringu przemieszczeń wertykalnych i horyzontalnych.

Budowa geologiczna

Omawiana inwestycja Południowej Obwodnicy Gdańska obejmuje blisko 18-kilometrowy odcinek drogi. Tylko ok. 11% trasy jest w obrębie wysoczyzny morenowej Pojezierza Kaszubskiego, natomiast blisko 81% to obszar równiny deltowej Żuław Wiślanych (rys. 2).

Żuławy Wiślane to jednostka fizyczno-geograficzna, w której występują grunty o wyjątkowo niekorzystnych parametrach geo-

Summary

The article describes the geological structure, reinforcement technology of subsoil and embankment monitoring of the Southern Ringroad of Gdańsk. The investment is of particular importance since it connects the Trójmiasto Ringroad and the city's southern ringroad with the national road no 7 and the Sucharski tract.

technicznych, czego przyczyną jest działalność rzeczna w strefie ujściowej delty Wisły. W czasie plejstocenu sieć rzeczna była kształtowana w postaci systemu pradolin, którymi wody płynęły ku zachodowi w kierunku zastoiska szczecińskiego. Część wód Wisły zmieniła częściowo koryta, aż do całkowitego przerzucenia do ówczesnego zastoiska gdańskiego, gdy lądolód wycofał się za linię moren gardzieńskich (5). Od czasu transgresji morza litorynowego baza erozyjna Wisły podnosi się i rozpoczyna się akumulacja delty Wisły do Zatoki Gdańskiej. Na skutek procesów akumulacji powstała równina, która wypełniona jest przez ▶



Rys. 1. Lokalizacja Południowej Obwodnicy Gdańska (3)

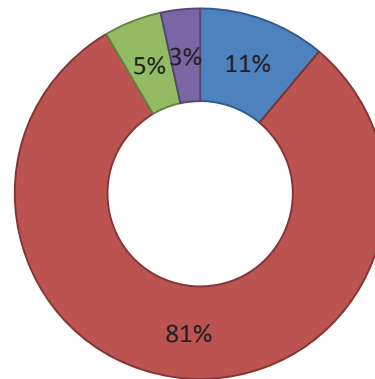
► holocénskie osady współczesne, utwory organiczne, zastoiskowe i utwory rzeczne delty (2). Najbardziej problematyczne przy posadowieniu obiektów inżynierskich grunty organiczne reprezentowane są przez namuły, torfy oraz gytie. Występujące na Żuławach torfy i namuły cechuje bardzo duża zmienność pod względem zawartości części organicznych oraz wilgotności, co przekłada się na bardzo zróżnicowane parametry fizyczno-mechaniczne tych gruntów (2). Zgodnie z wykonaną dokumentacją średnie wartości wilgotności naturalnej dla namułów piaszczystych wynoszą $w_n \approx 47\%$, dla namułów gliniastych $w_n \approx 63\%$, dla gytii $w_n \approx 80\%$, natomiast dla torfów kształtują się na poziomie $w_n \approx 168\%$. Miąższość słabonośnych utworów sięga na rozpatrywanym terenie średnio 13 m, zaś miejscami przekracza 22 m.

Nie tylko charakterystyka wytrzymałościowa osadów holocénskich odznacza się dużą zmiennością, ale również układ warstw wydzielen geologicznych i ich miąższość. Zasadniczo można wyróżnić trzy profile budowy geologicznej (rys. 3). Pierwszy z nich, najprostszy, odznacza się tym, że pod cienką warstwą humusu zalegają grunty organiczne o grubości od ok. 6 m do ok. 18 m. Drugi profil różni się od pierwszego tym, że pod warstwą humusu występują osady niespoiste w postaci piasków drobnoziarnistych o miąższościach od 0,5 m do maksymalnie 5,3 m, pod którymi dopiero znajdują się grunty słabonośne o długościach przelotu zbliżonych jak w pierwszym profilu. Z kolei ostatni trzeci rodzaj budowy jest najbardziej skomplikowany, bowiem charakteryzuje go naprzemienne występowanie warstwy niespoistej i spoistej o miąższościach od ok. 0,5 m do ok. 5 m tak jak to zostało zobrazowane na rys. 3.

Technologia wzmocnienia podłoża gruntowego

Przedstawione charakterystyczne profile gruntowe terenu Żuław Wiślanych pokazują, że jakiegokolwiek roboty budowlane tu prowadzone wymuszają zastosowanie wzmocnienia podłoża. Dobór technologii polepszania parametrów gruntowych, zależy nie tylko od technicznej poprawności rozwiązania, ale również istotnych czynników ekonomicznych, środowiskowych i technologicznej możliwości zastosowania danej metody. Wszystkie te czynniki wpływają na to, że obecnie projektanci stoją przed trudnym wyborem właściwej technologii wzmocnienia podłoża gruntowego. Zgodnie z systematyką zaproponowaną przez Stilger-Szydło (6) wyróżniamy osiem sposobów wzmocnienia podłoża:

Geneza utworów

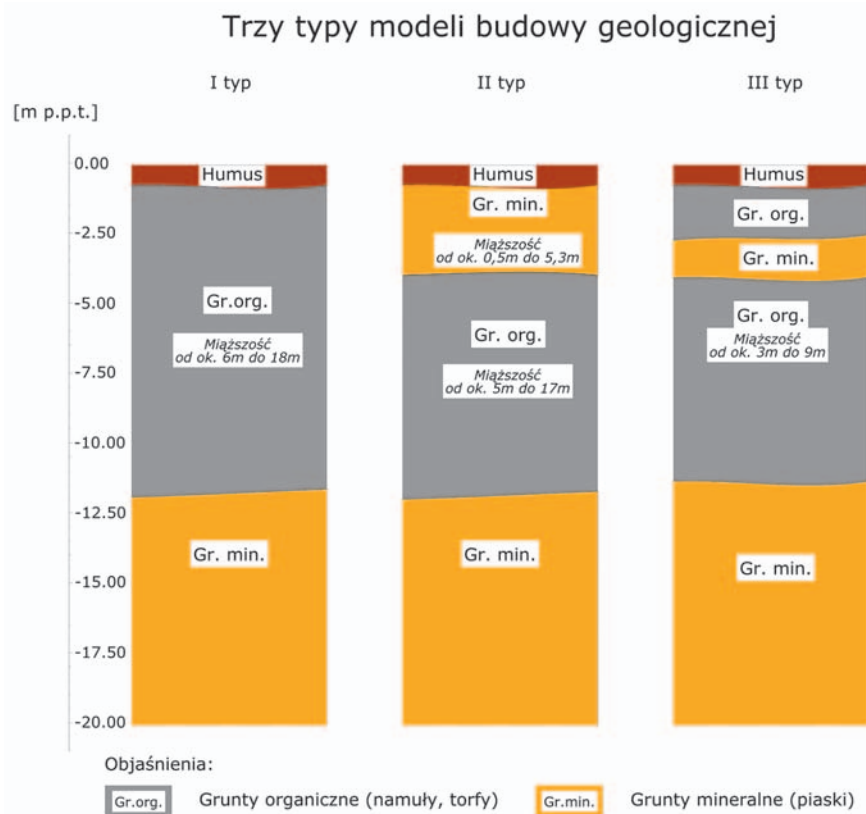


Rys. 2. Procentowy udział poszczególnych osadów w odniesieniu do genezy geologicznej utworów podścielających POG

- Wysoczyzna morenowa płaska
- Dna dolin rzecznych i równiny deltowe
- Stożki napływowe
- Antropogeniczne osady - wały przeciwpowodziowe, groble i tamy

1. Wzmocnienie powierzchniowe
2. Wymiana gruntu
3. Metody wibracyjne
4. Metody dynamiczne
5. Zbrojenie wgłębne
6. Metody iniekcyjne
7. Metody statyczne
8. Metody termiczne

W ramach procesu opracowania projektowego rozważano zastosowanie wyżej wymienionych metod, dlatego w niniejszym akapicie przedstawione zostały rezultaty analizy optymalizacji wyboru sposobu poprawy warunków gruntowych. Średnia miąższość gruntów słabonośnych wynosi ok. 13 m, możliwość zastosowania tylko powierzchniowego wzmocnienia lub wymiany gruntu była niemożliwa. Grunty organiczne o znacznych miąższościach ze względu na ryzyko „rozmycia” kolumn wykluczają również metody zagęszczania i formowania kolumn dynamicznie przy wykorzystaniu kruszywa (wymiana dynamiczna, DR, *Dynamic Replacement*) i wibracyjnie (wibroflotacja, wibrowymiana) ze względu na ryzyko „rozmycia” kolumn. Idąc za systematyką Stilger-Szydło do metod zbrojenia wgłębego odpowiadającemu „palom zagęszczającym”, zalicza się np. kolumny żwirowe SC (*Stone Columns*) czy betonowe kolumny CMC (*Controlled Modulus Columns*) (technologia omówiona została w kolejnych akapitach). Pierwsza z metod mogłaby być zastosowana jako skuteczne wzmocnienie podłoża na tej inwestycji, lecz z uwagi na stosunkowo wysokie koszty wykonania rozwiązanie to nie było realizowane. Do tej samej kategorii zbrojeń wgłębnych zalicza się metody mieszania wgłębego tzw. kolumny cementowo-gruntowe DSM (*Deep Soil Mixing*), których wykonanie w gruntach nienośnych o zawartości powyżej 5% części organicznych jest rozwiązaniem wątpliwym technicznie. Sposoby iniekcyjne, np. jet-grouting, polegają na wprowadzeniu iniektu pod odpowiednim ciśnieniem, co prowadzi do zniszczenia istniejącej struktury gruntu i utworzeniu brył gruncementu. Duża powierzchnia



Rys. 3. Schematyczne profile budowy geologicznej – charakterystyczne profile obrazujące układ i miąższości występujących gruntów organicznych i mineralnych

wzmocnienia oraz wysokie koszty uniemożliwiły wykorzystanie tej technologii. Metody statyczne należą do jednych z najstarszych sposobów polepszenia parametrów geotechnicznych gruntu. Polegają one na wstępnym lub etapowym obciążaniu podłoża (np. nasypem gruntowym, elementami prefabrykowanymi) o nacisku zbliżonym lub odpowiednio większym w stosunku do projektowanej wartości eksploatacyjnej. Po zadaniu ciężaru statycznego, rozpoczyna się proces konsolidacji. W przypadku gruntów niespoistych czas konsolidacji jest teoretycznie prawie natychmiastowy, w przeciwieństwie do osadów organicznych takich jak torfy czy namuły, dla których okres stabilizowania się osiadań może trwać nawet kilka lat. Ostatnim sposobem wzmocnienia podłoża są metody termiczne, które nie były na etapie projektowania brane pod uwagę ze względu na specyficzne rodzaje ich zastosowania.

Ostatecznie na podstawie analiz warunków geologiczno-inżynierskich i wymogów budowlanych zdecydowano się na zastosowanie technologii kolumn CMC (rys. 4), w szczególności na obszarach dojazdów na przyczółki obiektów inżynierskich oraz technologii drenażu VD w połączeniu z metodą statyczną. Wzmocnienie podłoża kolumnami CMC polega na stworzeniu kompozytu gruntu i kolumn betonowych. Do wykonywania kolumn CMC stosowana jest wiertnica z przymocowanym, specjalnie zaprojektowanym świdrem przemieszczeniowym. Świder, rozpychając istniejący grunt, tworzy przestrzeń, w której zostaje wykonana kolumna betonowa, dzięki temu następuje zwiększenie spójności ośrodka wzdłuż pobocznic kolumny. Metodę kolumn betonowych przyjęto przy posadowieniu nasypów o wysokości powyżej 5,0 m, czyli w miejscach, gdzie zastosowanie technologii drenażu było niemożliwe. Dodatkowo wymogiem, jaki był stawiany

przy projektowaniu wzmocnienia podłoża w bezpośrednim styku z mostami czy wiaduktami, był taki, że osiadania muszą zostać dopasowane do dopuszczalnych wartości dla tych budowli. Zakres wzmocnienia kolumnami wyniósł ok. 400 tys. m².

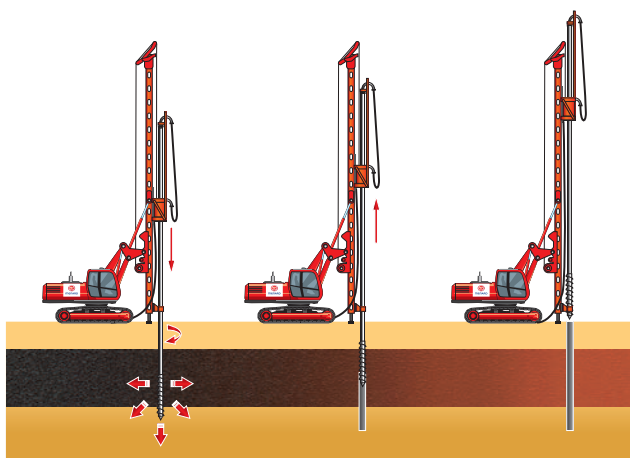
Technologia wykonania drenażu VD polega na wprowadzeniu w grunt prefabrykowanych drenów, które mają za zadanie przyspieszyć proces konsolidacji gruntów (rys. 5). Dodatkowo czynnikiem wspomagającym rozpraszanie się (dysypację) ciśnienia porowego jest wbudowywany nasyp przeciążający. Jedynym istotnym ograniczeniem tej metody jest czas, ponieważ w zależności od przepuszczalności i miąższości gruntów słabonośnych okres konsolidacji może przebiegać kilka czy nawet kilkanaście miesięcy.

Na uwagę zasługuje fakt, że w ramach inwestycji OPG wykonanych zostało ok. 3 500 000 mb drenów, co równoważne jest np. dystansowi pomiędzy Warszawą a Lizboną. Jest to niewątpliwie jedna z pierwszych budowli w Polsce, gdzie na tak dużą skalę wykorzystano VD. Z kolei łączna długość nasypów przeciążających wynosiła ponad 8 km.

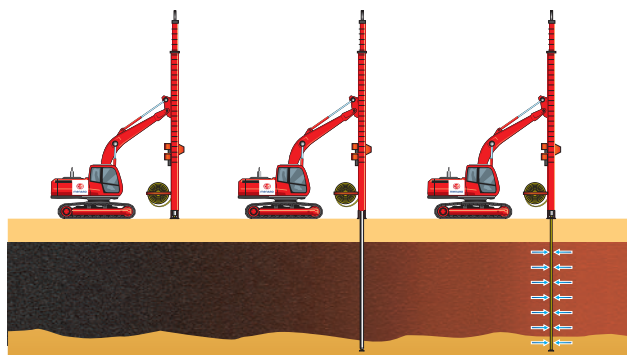
Monitoring nasypów drogowych

Budowa nasypów drogowych na gruntach bardzo ściśliwych wymaga prowadzenia ciągłych obserwacji budowli ziemnych. Po wykonaniu drenażu VD oraz dociążeniu nasypem następuje proces konsolidacji gruntu. Zebrane dane z monitoringu przemieszczeń posłużyły do określenia stopnia konsolidacji. Do podstawowych elementów monitoringu deformacji należą:

- repery talerzowe – odczytuje się z nich osiadania pionowe w każdym przekroju pomiarowym, rozmieszczonym co np. 50 m licząc wzdłuż osi drogi. Instalowane są 3 repery: jeden w centrum ▶



Rys. 4. Szcik obrazujący wykonanie kolumn CMC (10)



Rys. 5. Szcik obrazujący wykonanie drenażu pionowego VD (10)

- ▶ i po jednym pod skrajem korony nasypu, łącznie zainstalowano repery w 217 przekrojach poprzecznych do osi obwodnicy;
- inklinometry i profilometry - wbudowywane są na wysokości podstawy nasypu, inklinometry pionowe służą do mierzenia odkształceń bocznych, natomiast profilometry do pomiaru odkształceń pionowych, łącznie zainstalowano je w 20 przekrojach.

Odczyty z inklinometrów, profilometrów i z reperów wykonywać powinno się w stałych cyklach czasowych, np. cotygodniowych.

Na podstawie zebranych danych, dla każdej sekcji wyznaczono krzywą konsolidacji (rys. 6) oraz oceniono stopień konsolidacji wykorzystując metodę Asaoka (1) lub hiperboliczną (9).

Na rys. 7 przedstawione zostały różnymi kolorami pomiary z reperów w dwóch przekrojach pomiarowych. Na czerwono zaznaczono wyniki odpowiadające budowie geologicznej profilu I, która w tym dokładnie przypadku charakteryzuje się występowaniem jednej warstwy gruntów ściśliwych (głównie namulów gliniastych i piaszczystych) o łącznej miąższości ok. 11,5 m. Z kolei druga sekcja wrysowana na zielono odzwierciedla przebieg osiadań reperów zlokalizowanych na obszarze profilu III budowy geologicznej. Od powierzchni terenu występuje warstwa namulów piaszczystych ok. 1 m, pod nią znajdują się piaski drobne o miąższości ok. 1 m, które podścielone są 6-metrową warstwą namulów piaszczystych i gliniastych. W obydwu przypadkach rozstaw drenów był zbliżony i wynosił ok. 1,2 m, natomiast wysokość nasypów wraz z przeciążeniem dla pierwszego przypadku wynosi 7 m, a drugiego 6,5 m. Na podstawie krzywych konsolidacji widać, że prędkość przyrastania deformacji pionowych w pierwszym okresie była zdecydowanie większa niż w okresach późniejszych (etap po wykonaniu nasypu przeciążającego). W związku z powyższym wyróżnić można etapowy przebieg konsolidacji. Pierwszy etap charakteryzuje się gwałtowną zmianą przemieszczeń pionowych w trakcie wykonania nasypu docelowego z przeciążeniem. Drugi etap odpowiada wolniejszym osiadaniom gruntów organicznych: konsolidacyjnym i wtórnym. Osiadania konsolidacyjne przy stałym obciążeniu zależą od właściwości filtracyjnych warstw słabonośnych, natomiast wtórne są wynikiem pełzania oraz bocznych przemieszczeń podłoża (6). Na rys. 6, gdzie zobrazowane zostały krzywe konsolidacji z dwóch różnych sekcji, zauważyć można, że tempo osiadania było

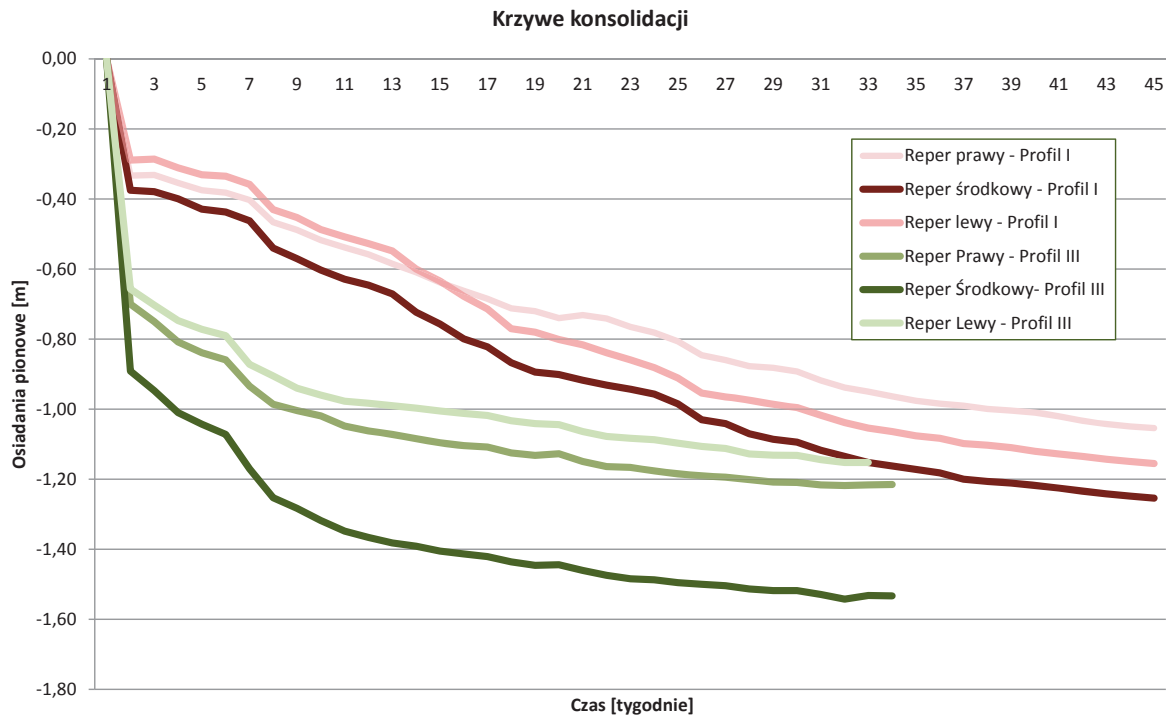
zdecydowanie szybsze dla profilu III. Maksymalne osiadanie równe około $s_{\max III} = 1,53$ m dla III profilu zostało osiągnięte zdecydowanie wcześniej w porównaniu do I profilu ($s_{\max I} = 1,25$ m). Równoznaczne jest to z tym, że stopień konsolidacji na poziomie 90% został także szybciej osiągnięty, co potwierdzają obliczenia wykonane za pomocą metody (1) (rys. 7). W przypadku I po 34 tygodniach wyznaczono stopień konsolidacji na poziomie 97%, natomiast dla III już po 28 tygodniach stopień konsolidacji kształtował się na poziomie 98%, co odpowiada wartościom zakładanym w projekcie.

Na uwagę zasługuje również wytłumaczenie, że w obydwu sekcjach pomiarowych przemieszczenia pod środkiem korony nasypu są największe w stosunku do skrajnych reperów. Interesującym zagadnieniem jest obserwowana rozbieżność pomiędzy wielkościami osiadań reperów skrajnych dla tego samego przekroju, czasami dochodząca do ponad 20 cm, pomimo że nasyp jest symetryczny. Znaczny wpływ na to może mieć zmienność budowy geologicznej w płaszczyźnie prostopadłej do osi nasypu.

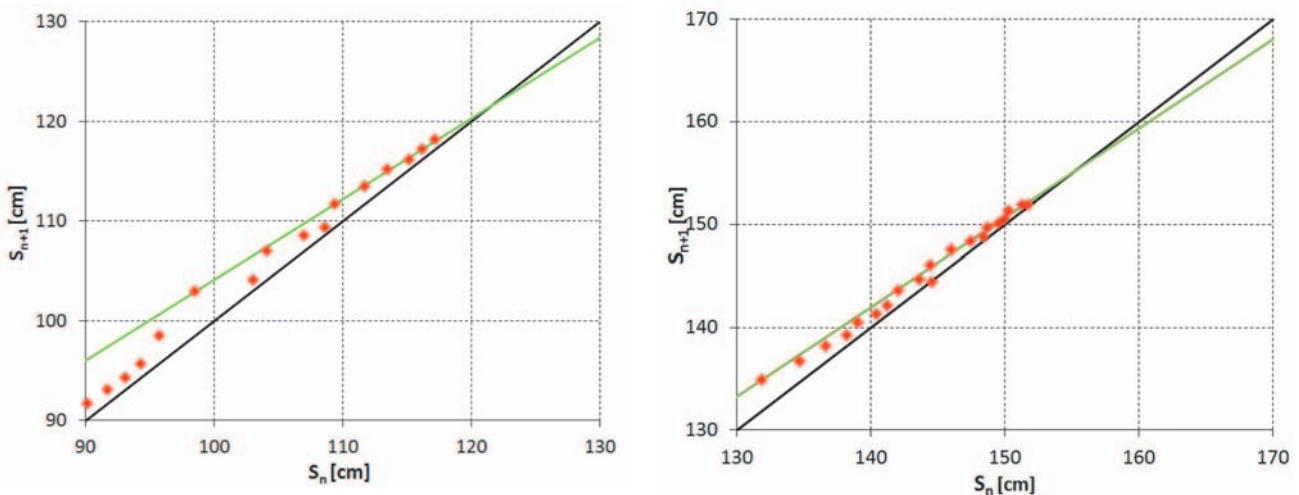
Podsumowanie

Reasumując powyższe rozważania, należy stwierdzić, że budowa nasypów przeciążających na ponad 8-kilometrowym odcinku obwodnicy Gdańska przechodzącym przez Żuławy Wiślane pozwoliła na zebranie unikalnego i bogatego materiału obserwacyjnego dotyczącego procesów konsolidacyjnych gruntów organicznych. Wyniki dokumentowania geologicznego pozwalają wydzielić zróżnicowane modele wykształcenia sedymentacyjnego, które mogą znacząco rzutować na procesy konsolidacyjne. Dotyczy to w szczególności istnienia zwartych oraz różnorodnie przewarstwionych kompleksów akumulacji organiczno-mineralnej. Obecność wkładek mineralnych istotnie zmienia warunki drenażu i powodować powinna odrębne modele zachowań konsolidacyjnych.

Na podstawie krzywych osiadań w czasie można zauważyć pewną etapowość przebiegu odkształceń podłoża. Widoczny jest podział na co najmniej dwie fazy, pierwsza z nich zachodzi szybciej i odznacza się większym przyrostem deformacji pionowych. Natomiast druga faza bardziej przedstawia zmianę osiadań zgodną z modelem konsolidacji, których czas trwania przy niezmiennym obciążeniu zależy od przepuszczalności gruntów ściśliwych. □



Rys. 6. Krzywa konsolidacji w dwóch wybranych przekrojach drogi – kolor czerwony odpowiada I profilowi budowy geologicznej, kolor zielony odpowiada III profilowi budowy geologicznej



Rys. 7. Wyznaczenie stopnia konsolidacji metodą Asaoka – z lewej sekcja odpowiadająca I profilowi budowy geologicznej, z prawej III profilowi budowy geologicznej (S_n – osiedlenia w czasie t_n)

Piśmiennictwo

- Asaoka A.: *Observational procedure of settlement prediction. Soils and Foundations*. 1978.
- Ciesielski Z., Bachusz J., Hoffmann A., Kawczyński K., Michałek T., Okoń K., Wilczyński T.: *Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla budowy Południowej Obwodnicy Gdańska*. Geotech Sp. z o.o., Bydgoszcz 2009.
- Dobak P., Białobrzeski T.: *Ocena charakterystyk konsolidacji na podstawie modelowania osiadań nasypów drogowych Południowej Obwodnicy Gdańska*. „Przegląd geologiczny”, nr/2013.
- Jermołowicz P.: *Projektowanie i wzmocnianie nasypów na gruntach słabonośnych*. Kraków 2012.
- Leśniak T.: *Materiały pomocnicze do terenowych zajęć geologicznych w rejonie nadmorskim. Wydanie trzecie*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2002.
- Moliz R., Baran L., Werno M.: *Posadzanie nasypów na gruntach organicznych metodą wstępnej konsolidacji*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981.
- Stilger-Szydło E.: *Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego. Teoria - Projektowanie - Realizacja*. Wrocław 2005.
- Saloni J., Binder K., Trybocka K.: *Projekt i realizacja wzmocnienia słabego podłoża nasypów na obwodnicy południowej Gdańska sztywnymi kolumnami betonowymi oraz metodą konsolidacji*. Seminarium „Wzmocnianie podłoża i fundamentów”, Warszawa 2011.
- Tan S.B.: *An empirical method for estimating secondary and total settlement. Proceedings. 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok 1971.
- Materiały marketingowe firmy Menard Polska.
- Pomiary inklinometryczne i profilometryczne*. Firma Geopartner, Lech Saloni 2011.