

Wzmocnienie podłoża gruntowego w ramach budowy terminalu kontenerowego na Ostrowie Grabowskim w Porcie Szczecin

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer^{1,3}, mgr inż. Daniel Saar², dr inż. Mariusz Kowalow³, mgr inż. Marta Chryścina³

¹Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

²DB Port Szczecin Sp. z o.o.

³Geotechnical Consulting Office Sp. z o.o. Sp. k.

W celu usprawnienia prac rozładunkowo-przeładunkowych oraz zwiększenia obrotu tranzytowego operator terminalu DB Port Szczecin podjął decyzję o budowie nowego placu manewrowego oraz kontenerowego przylegającego do istniejącego już i eksploatowanego Nabrzeża Fińskiego. W wyniku tej decyzji podpisano stosowną umowę z Zarządem Morskich Portów Szczecin i Świnoujście S.A. Nowa inwestycja pozwoli na zwiększenie obrotu rocznego kontenerów w DB Port Szczecin do 120 000 TEU rocznie.

Ostrów Grabowski jest dawną wyspą rzeczną o łącznej powierzchni 175 ha leżącą pomiędzy Kanałem Dębickim (od zachodu), rzeką Duńczycą od południa i Przekopem Mieleńskim od wschodu. Zagospodarowany w niewielkim stopniu, stanowił do niedawna rezerwę portu w Szczecinie dla rozwoju funkcji przeładunkowych i przemysłu przyportowego. W środkowej części wyspy zlokalizowano pola refulacyjne w celu uzyskania poprawy nośności podłoża oraz podniesienia rzędnych terenu, umożliwiając inwestycyjne wykorzystanie terenu. Miąższości

warstw nasypowych (głównie refulatu) kształtują się w zakresie od około 0,3 do 5,5 m. Obszar inwestycji to teren o złożonych i trudnych warunkach gruntowo-wodnych ze względu na:

- znaczną miąższość słabonośnych gruntów organicznych, luźnych nasypów niekontrolowanych zbudowanych głównie z trudno zagęszczalnych piasków równouziarnionych,
- wysoki poziom wody gruntowej oraz znaczne wahania wód gruntowych związane ze stanami wody w Odrze,
- lokalne zagrożenie powodziowe,
- agresywność środowiska gruntowo-wodnego.

Złożoność warunków gruntowo-wodnych zwiększa zasadniczo koszt budowy tego rodzaju inwestycji. Optymalizacja kosztów z równoczesnym sprawdzeniem technicznym w warunkach eksploatacyjnych jest szczególnie ważne w takich przypadkach.

ANALIZA MOŻLIWOŚCI POSADOWIENIA PLACU MANEROWEGO I KONTENEROWEGO TERMINALU

Pośród wielu dostępnych metod wzmocnienia podłoża w rejonie Ostrowa Grabowskiego rozważano następujące metody:

- nasyp przeciążeniowy,
- posadowienie na palach,
- posadowienie na kolumnach piaskowych,
- posadowienie na kolumnach betonowych,
- posadowienie na kolumnach iniekcyjnych w technologii jet-grouting,
- posadowienie na kolumnach betonowych z głowicą żwirową.

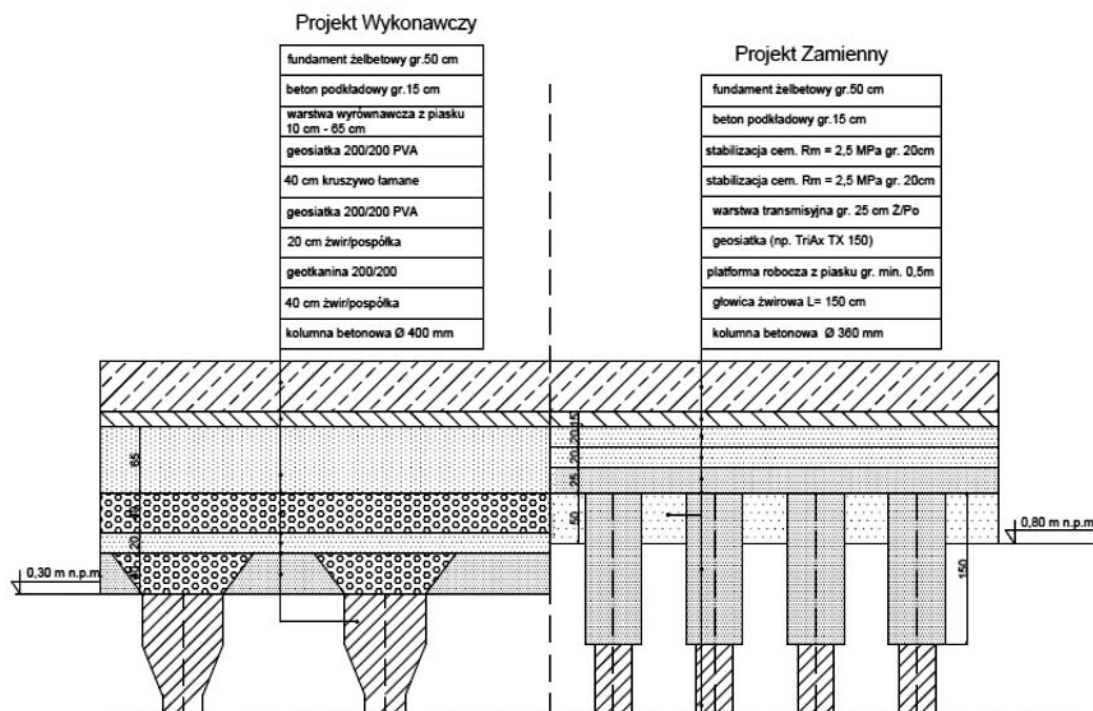
Pierwotny projekt budowlany [8] zakładał wykonanie posadowienia na kolumnach betonowych średnicy 0,4 m, zbrojonych profilem stalowym. Przewidywano rozszerzenie głowicy na długości 0,6 m do średnicy 0,8 m. Pale planowano wykonać w siatce trójkątnej o wymiarach $2,3 \div 2,5$ m w obszarze placu manewrowego oraz $1,9 \div 2,5$ m na obszarze placu składowego kontenerów.

Zwieńczenie kolumn zaprojektowano w postaci warstwy przejściowej wykonanej z materaca geosyntetycznego z dodatkową warstwą geotkaniny poniżej materaca zastosowanej w celu wyrównania osiadań i wewnętrznego powiązania konstrukcji. Szczegóły rozwiązania przedstawiono na rys. 1.

Uwzględniając doświadczenia firmy Keller zdobyte podczas wzmocniania podłoża pod konstrukcje drogowe obciążane dynamicznie, wykonano projekt zamienny, w którym zaprojektowano posadowienie obiektu na podłożu wzmocnionym za pomocą kolumn betonowych z głowicą żwirową w technologii opracowanej przez tę firmę. Kolumny te potraktowano jako przestrzenne wzmocnienie podłoża, w którym występuje redukcja osiadań przy zachowaniu podatnego charakteru wzmocnienia bez lokalnych przesztynień w rejonie głowic kolumn. Przy zastosowaniu takiej technologii obciążenia dynamiczne są przekazywane przez warstwę transmisyjną na głowice kolumn, a następnie głębiej, przez kolumnę betonową na podłoże nośne.

W projekcie zamiennym wzmocnienia podłoża gruntowego [4] przyjęto, że kolumna betonowa musi być zagłębiona minimum od 1 do 1,5 m w podłożu nośnym oraz że kolumna nie może stykać się głowicą z płytą betonową ze względu na dynamiczny charakter obciążeń generowanych na placu manewrowym i kontenerowym.

Płytę zaprojektowano z betonu zbrojonego przestrzennie, odpornego na trudne warunki meteorologiczne oraz obciążenia dynamiczne.



Rys. 1. Schemat posadowienia na obszarze placu składowania kontenerów według projektu budowlanego oraz projektu zamiennego [4, 8, 9]

Plac składowy kontenerów pełnych do Etapu I budowy zaprojektowano na powierzchni o wymiarach około 90×360 m. Obciążenie na obszarze placu składowego przyjęto w zakresie $100 \div 200$ kPa. Ze względu na znaczne obciążenia, składowanie kontenerów pełnych przewidziano na ławach żelbetowych (legarach) posadowionych na kolumnach betonowych z głowicą żwirową. Z belek obciążenie jest przekazywane przez kolumny na podłoże nośne, które stanowią aluwialne piaski drobne i średnie.

Nawierzchnię placu manewrowego podzielono w zależności od pojazdów poruszających się po poszczególnych częściach placu, to jest: suwnic RTG obciążonych oraz nieobciążonych, wózków do transportu kontenerów, pojazdów trasowych. Obciążenie pojazdami w zakresie od 147 do 306 kN/koło zastąpiono obciążeniem rozłożonym na powierzchni płyty betonowej wynoszącym 50 kPa. Podobne obciążenia przyjęto dla obszaru drogi dojazdowej do terminalu.

Schemat rozwiązania projektowego i zamiennego przeznaczonego do realizacji przedstawiono na rys. 1.

WARUNKI GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE

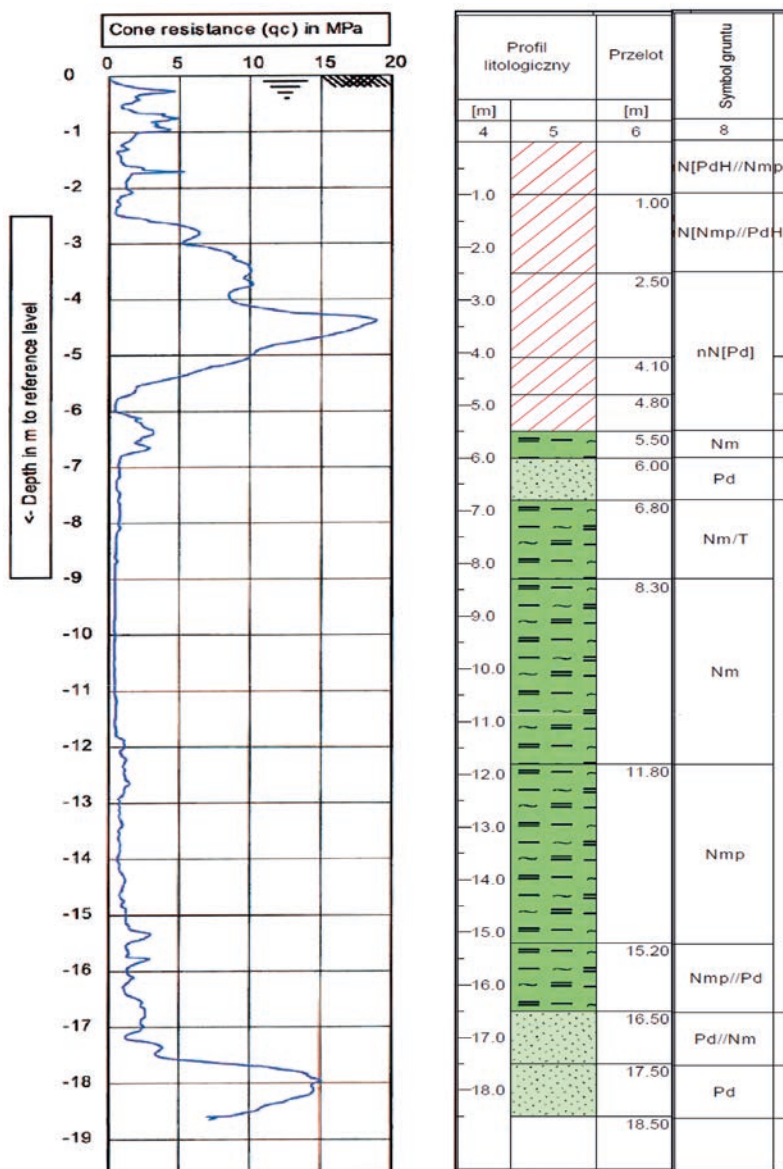
Na obszarze planowanej inwestycji stwierdzono występowanie złożonych warunków gruntowo-wodnych [9].

Warstwę pierwszą – nasypową – stanowią pochodzące głównie z pogłębiania toru wodnego refulaty zalegające na rzędnych od około 0,8 do 3 m n.p.m. Nasypy sięgały do głębokości około 3,5 m p.p.t. Grunty nasypowe występowały w stanie luźnym i średnio zagęszczonym.

Poniżej warstwy nasypowej zalegają utwory organiczne zbudowane z nawodnionych torfów oraz miękkoplastycznych i plastycznych namulów. Miąższość gruntów organicznych dochodzi do około 13 m, które zalegają do głębokości $15 \div 16$ m p.p.t., to jest do rzędnych około [-] 13 m n.p.m.

Poniżej warstwy gruntów organicznych stwierdzono występowanie gruntów sypkich w postaci piasków drobnych w stanie luźnym i bardzo zagęszczonym. Stopień zagęszczenia warstwy nośnej wzrastał wraz z głębokością zalegania.

Profil gruntowy przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Profil gruntowy na terenie inwestycji [4]

Warunki wodne są niekorzystne ze względu na ukształtowanie terenu oraz wpływ wahań stanów wody w Odrze, gdzie maksymalny poziom lustra wody przyjmuje się na rzędnej +1,8 m n.p.m.

Woda gruntowa na obszarze inwestycji występuje w dwóch poziomach wodonośnych. Woda pierwszego poziomu stabilizuje się w warstwie utworów nasypowych na rzędnych od 0,5 do 1,5 m n.p.m. Drugi poziom wody gruntowej zalegający w podścielających grunty organiczne rzecznych piaskach nawiercono na głębokości około 6 ÷ 15 m p.p.t. Zwierciadło wody gruntowej jest napięte i stabilizuje się średnio na rzędnej 0,0 m n.p.m. Wody gruntowe wykazują słabą i średnią agresywność w stosunku do betonu (klasa ekspozycji XA1 do XA2) [4].

ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE

Zaprojektowano kolumny betonowe średnicy 0,36 m z betonu klasy C30/37 podwyższonej ze względu na agresywny charakter kwasów humusowych w podłożu gruntowym. Projektowane długości kolumn przyjęto na podstawie przeprowadzonego rozpoznania zalegania warstw gruntów nośnych, zakładając zagłębienie kolumn w podłoże nośne wynoszące minimum 1 m. Zagłębienie kolumn monitorowano na podstawie oporów wiercenia w podstawie mierzonych podczas formowania podstawy kolumn. Osiągnięte długości kolumn wynosiły od 11 do 16 m.

Długość kolumny żwirowej liczonej od poziomu roboczego głowicy wynosiła 1,5 m. Kolumny betonowe na obszarze placu manewrowego rozmieszczono w siatce kwadratowej o wymiarach 2,4 × 2,4 m, natomiast na obszarze placu składowego kontenerów w siatce prostokątnej o wymiarach 1,6 × 2,25 m. Plan rozmieszczenia kolumn pokazano na rys. 3 i 4.

Nośność projektowanej kolumny na obszarze drogi dojazdowej oraz placu manewrowego wynosiła 350 kN, natomiast na obszarze placu składowego kontenerów 453 kN.

W rejonie placu manewrowego oraz drogi dojazdowej warstwę transmisyjną wykonano z geotkaniny TriAx TX150, na której wykonano warstwę wyrównawczą z pospółki o grubości około 0,25 m. Na warstwie wyrównawczej ułożono kruszywo stabilizowane cementem w dwóch warstwach o grubości 0,2 oraz 0,3 m i wytrzymałości na ściskanie $R_m = 2,5$ MPa oraz $R_m = 6 ÷ 9$ MPa. Na tak przygotowanym podłożu wykonano płytę betonową grubości 0,25 m z betonu klasy C35/45 ze zbrojeniem rozproszonym. Szczegóły rozwiązania przedstawiono na rys. 1.

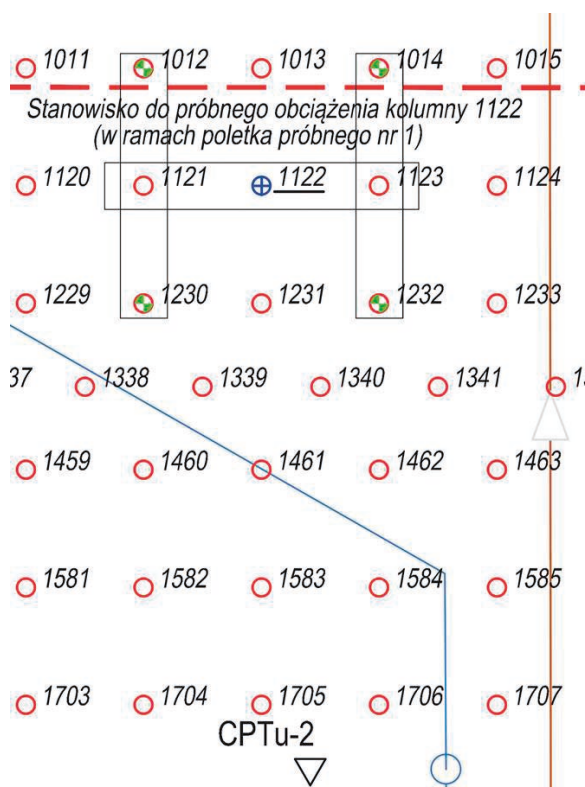
Warstwę transmisyjną na obszarze składowania kontenerów wykonano z:

- geotkaniny TriAx TX 150,
- warstwy wyrównawczej z pospółki grubości około 0,25 m,
- warstwy kruszywa stabilizowanego cementem, w dwóch warstwach grubości 0,2 m i wytrzymałości na ściskanie $R_m = 2,5$ MPa,
- podbudowy z betonu podkładowego grubości 0,15 m oraz $R_m = 6 ÷ 9$ MPa.

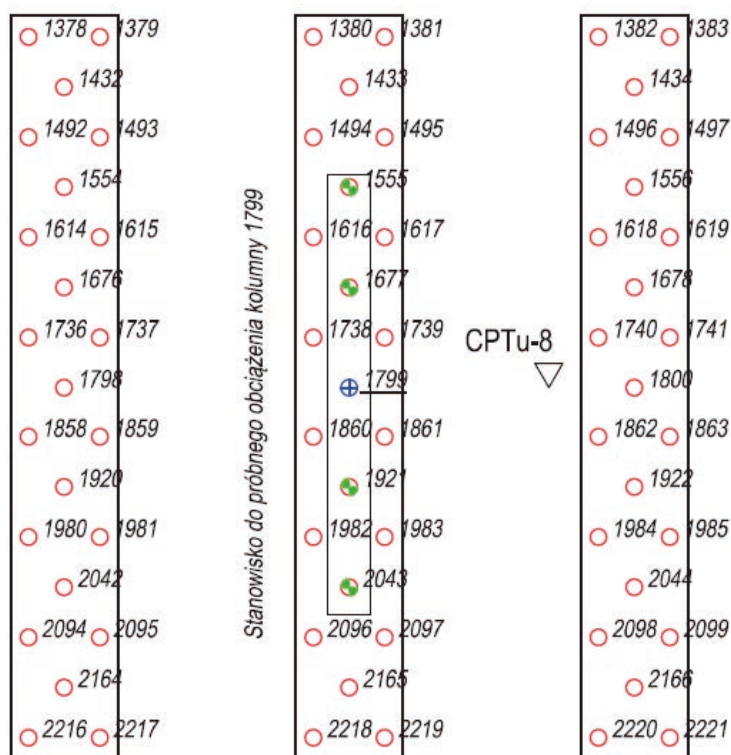
Następnie na tak przygotowanym podłożu wykonano belkę żelbetonową grubości 0,5 m.

Przyjęte rozwiązanie projektowe wzmocnienia podłoża gruntowego zapewniło spełnienie wymagań dopuszczalnych osiadań wynoszące 8 cm przy różnicy osiadań 0,5 cm/1 m.

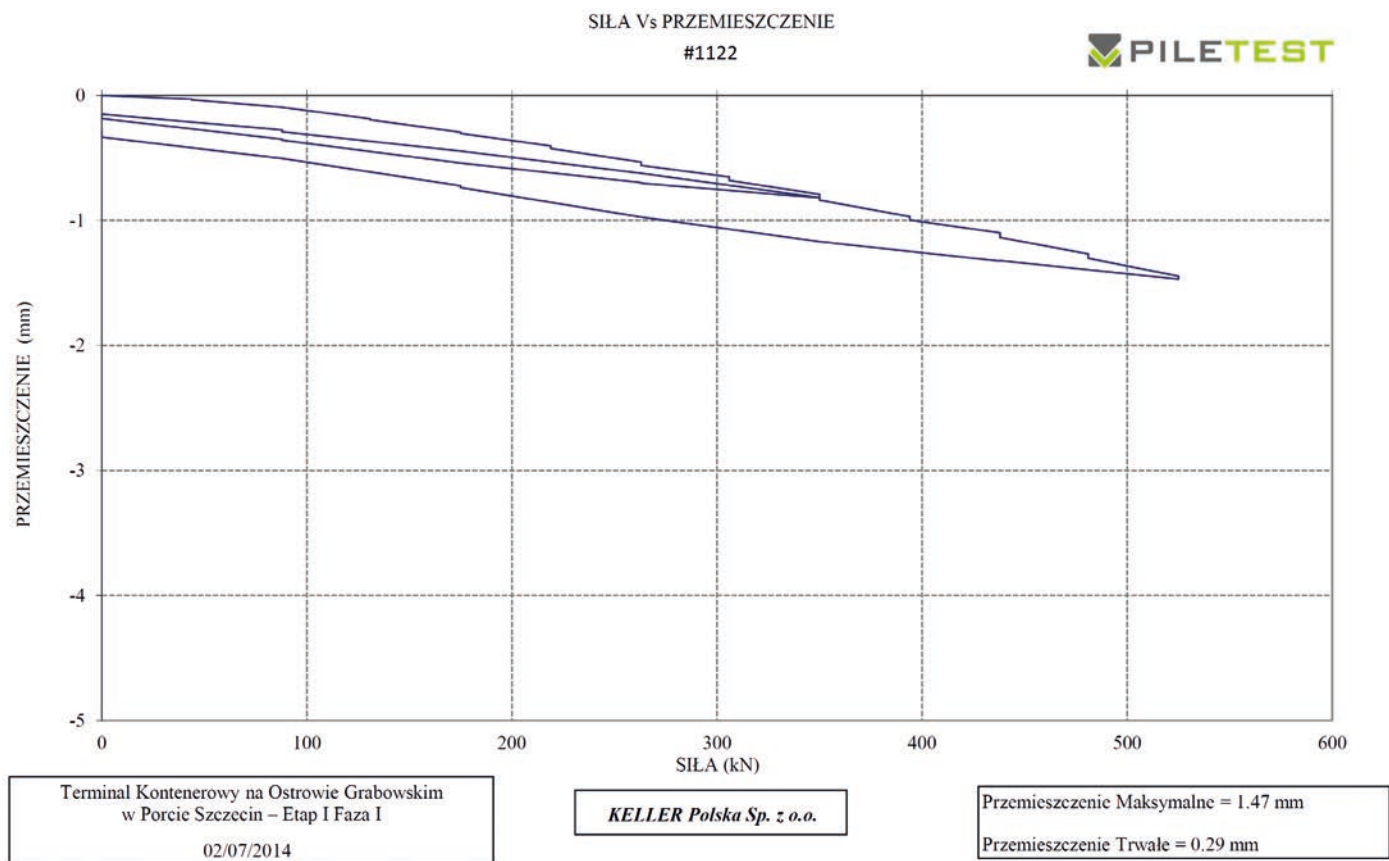
Inwestor – DB Port Szczecin, ze względu na przyjęte rozwiązanie, postanowił wprowadzić szczegółowy nadzór geotechniczny poszczególnych etapów wykonania prac. Przyjęte rozwiąza-



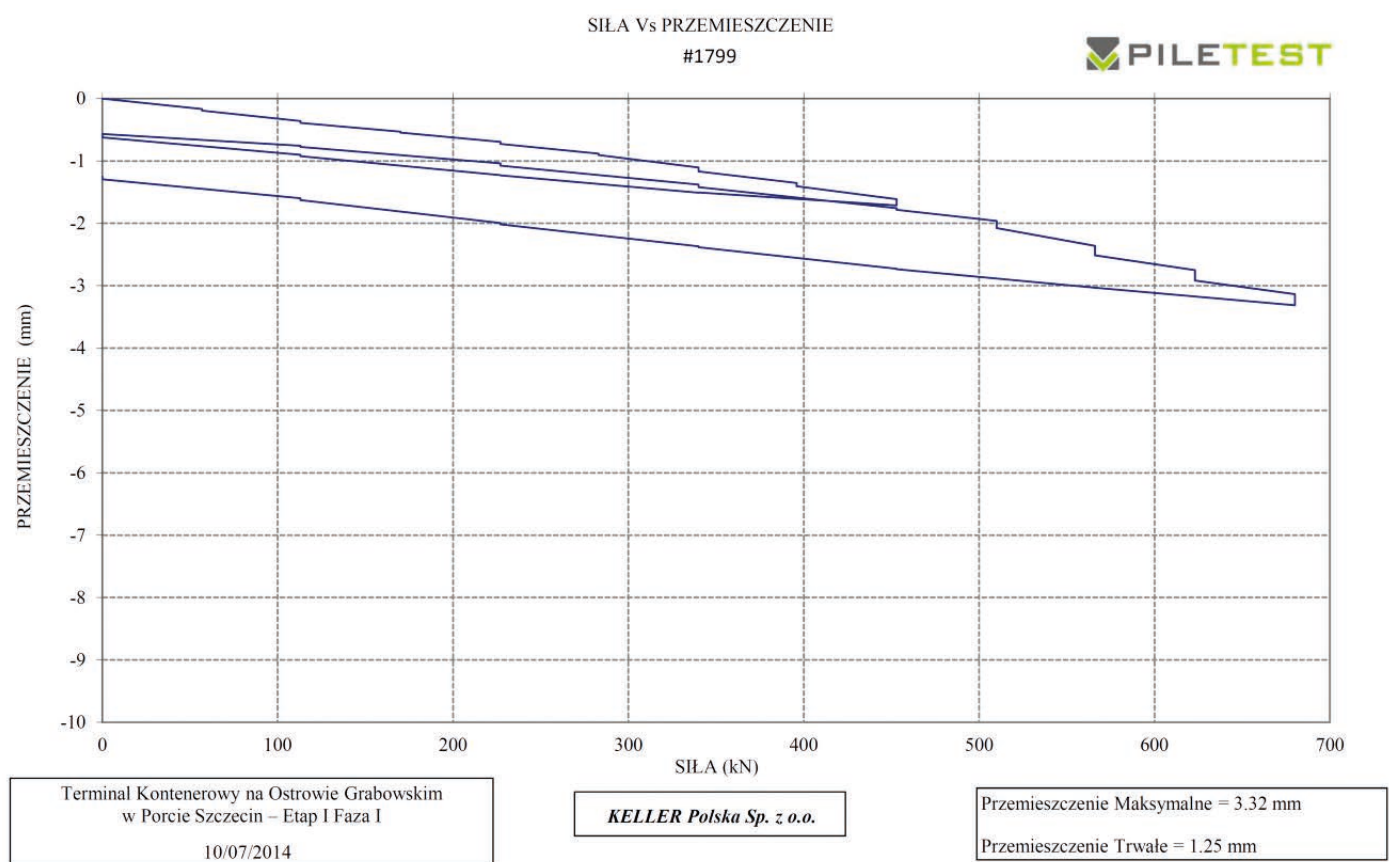
Rys. 3. Rozstaw kolumn na placu manewrowym [4]



Rys. 4. Rozstaw kolumn na placu składowym kontenerów [4]



Rys. 5. Wykres charakterystyki siła – przemieszczenie kolumny nr 1122 usytuowanej na placu manewrowym [7]



Rys. 6. Wykres charakterystyki siła – przemieszczenie kolumny nr 1799 usytuowanej na placu składowania kontenerów [7]



Rys. 7. Obciążenie próbne w warunkach eksploatacji

nie wymagało również szczególnej pielęgnacji wykonywanej warstwy konstrukcyjnej. Ze względu na występujące warunki pogodowe zadaniem firmy wykonawczej było zwrócić szczególną uwagę na pielęgnację wykonywanych warstw konstrukcyjnych.

OBCIĄŻENIA PRÓBNE

W ramach projektu zamiennego przewidziano wykonanie obciążeń próbnych kolumn na obszarze drogi dojazdowej, placu manewrowego, a także placu składowania kontenerów. W ramach badań obciążano pojedyncze kolumny oraz grupę kolumn.

Maksymalna siła przyłożona na kolumnę w trakcie badania wynosiła 150% obliczeniowej nośności kolumny, to znaczy 525 kN na obszarze placu manewrowego i drogi dojazdowej oraz 680 kN na obszarze składowania kontenerów.

Przykładowe wyniki próbnych obciążeń przedstawiono na rys. 5 i 6.

W wyniku przeprowadzonych próbnych obciążeń uzyskano osiadania trwałe kolumn pojedynczych, po drugim cyklu obciążenia, rzędu $s = 0,3 \div 6$ mm.

Na podstawie przeprowadzonych próbnych obciążeń można stwierdzić, że przy tak niewielkich osiadaniach uzyskanych w trakcie badań dla zakładanych obciążeń 50 kPa oraz 200 kPa zaprojektowana konstrukcja spełnia wymagania nośności z nadmiarem.

Dodatkowo wykonano próbne obciążenie w rzeczywistych warunkach eksploatacji (rys. 7). Na przygotowanych belkach składowania kontenerów ustawiono wypełnione piaskiem kontenery, które przekazywały maksymalne obciążenie projektowe w przypadku najniekorzystniejszego usytuowania kontenerów. Pomiary osiadań wykonywano po każdym ułożeniu kolejnego kontenera, a następnie przez okres około 2 miesięcy od momentu dociążenia wybranych belek. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano osiadania legarów rzędu $1 \div 6$ mm [2].

Interpretacje wyników próbnych obciążeń wykonano na podstawie metody Meyera – Kowalowa (Metoda MK) [5]. Wykonano analizę nośności kolumn betonowych z głowicą żwirową, stanowiących fundament belek podwalinowych w oparciu o warunki mobilizacji oporu pobocznic i podstawy kolumny. Metoda MK pozwala na wykreślenie krzywej obciążenie – osiadanie pała w pełnym zakresie obciążeń i na określenie nośności granicznej pała oraz dopuszczalnych obciążeń pała przy wykrzystaniu dopuszczalnych osiadań konstrukcji.

Porównując obliczeniowe dopuszczalne obciążenia przypadające na belki podwalinowe z uzyskaną nośnością graniczną kolumny ustaloną na podstawie metody MK, nośność graniczna kolumny jest większa do około 50% od nośności dopuszczalnej ustalonej obliczeniowo. W związku z powyższym, zarządzający terenem rozważa możliwość podniesienia dopuszczalnych obciążeń placu składowego kontenerów do 250 kPa [3, 6].

Przedstawione wyniki badań potwierdzają możliwość zastosowania opisywanej metody wzmocnienia podłoża nie tylko w budownictwie drogowym, ale także w innych rodzajach konstrukcji, w tym w budownictwie portowym.

Przyjęta technologia jest stosowana w budownictwie drogowym, natomiast w budownictwie portowym jest technologią nową. Nowością w tym przypadku było przyjęcie płyty betonowej jako jezdni na placu manewrowym. Technologia ta wymaga największej staranności przy wykonaniu nawierzchni betonowej.

Opisana metoda stanowi odpowiednie wzmocnienie podłoża w przypadku występowania w podłożu gruntów słabonośnych o znacznych miąższościach i znaczących głębokościach zalegania, typowych dla dorzecza Odry.

Wykonanie posadowienia placu składowego kontenerów, placu manewrowego oraz drogi dojazdowej w konstrukcji łżejszego posadowienia na kolumnach betonowych z głowicą żwirową spełnia wymogi bezpieczeństwa i eksploatacji obiektu, a tym samym jest znacznie tańsze niż klasyczne posadowienie na palach.

Ze względu na fakt, że przyjęte rozwiązanie jest rozwiązaniem pionierskim w warunkach portu szczecińskiego przewidyuje się prowadzenie systematycznego monitoringu w zakresie odkształceń konstrukcji, jak i oceny zachowania się wykorzystanych materiałów w tych trudnych warunkach.

Wyciągnięcie ostatecznych wniosków wymaga kilkuletniej obserwacji w warunkach pełnej eksploatacji terminalu.

1. Biuro Strategii i Rozwoju Portów. Opis przedmiotu zamówienia: Koncepcja „Zagospodarowanie terenów Ostrowa Grabowskiego w Porcie w Szczecinie”, Kwiecień, 2015.
2. GCO Geotechnical Consulting Office Sp. z o.o. Sp. k. Notatka nr 59/GCO/2015 DB Port, Kontrolne pomiary osiadań w ramach prowadzenia obciążeń próbnych belek podwalinowych na placu kontenerowym, 27.02.2015.
3. GCO Geotechnical Consulting Office Sp. z o.o. Sp. k. Notatka nr 63/GCO/2015 DB Port: Analiza wyników pomiarów wykonanych podczas obciążeń próbnych kolumn na placu kontenerowym w kontekście możliwości zwiększenia ilości składowanych kontenerów, 30.03.2015.
4. Keller Polska Sp. z o.o.: Projekt technologiczny wzmocnienia podłoża w ramach wykonania wzmocnienia podłoża gruntowego w ramach budowy Terminalu Kontenerowego na Ostrowie Grabowskim w Porcie Szczecin – Etap I Faza I, 13.05.2014.
5. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2010.
6. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Określenie maksymalnych naprężeń stycznych na poboczniczy pala podczas testu statycznego. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2014.
7. Pile Test Sp. z o.o.: Wyniki statycznych próbnych obciążeń kolumn betonowych ϕ 360 mm, lipiec – wrzesień 2014, 3 raporty.
8. Projmors Sp z o.o.: Projekt Budowlany Terminalu Kontenerowego na Ostrowie Grabowskim w Porcie Szczecin – Nr 11998/PB/2010, Tom 05 Nawierzchnia na placach składowych, drogi wewnętrzne i place, wrzesień 2010.
9. Projmors Sp. z o.o.: Projekt Budowlany Terminalu Kontenerowego na Ostrowie Grabowskim w Porcie Szczecin, Gdańsk, lipiec 2010 oraz październik 2012.