

Geotechniczne aspekty – Projektowanie i konstrukcja bazy kontenerowej – Terminal G w Porcie Long Beach, Kalifornia

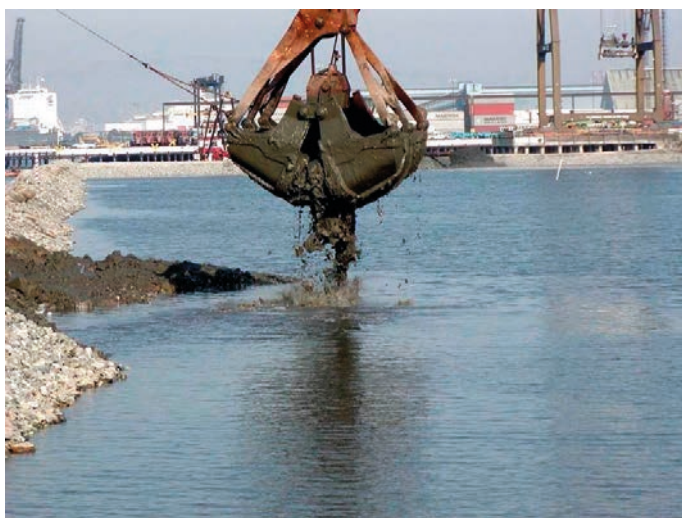
Dr inż. Mariusz P. Sieradzki
Kleinfelder, Inc., Long Beach, California

Port w Long Beach zbudowano w 1911 roku i jest obecnie drugim co do wielkości portem w Ameryce Północnej, po porcie w Los Angeles. Port zajmuje powierzchnię ponad 1200 ha, w skład której wchodzi 80 nabrzeży do przeładunku kontenerów. Każdego roku ponad 2000 statków, głównie z krajów wschodnioazjatyckich, jest obsługiwanych przez port Long Beach.

W 2014 roku obroty ładunkowe portu wyniosły ponad 82 mln ton towarów. W celu powiększenia i modernizacji istniejących nabrzeży i polepszenia ich działalności przygotowano i obecnie jest wdrażany w życie kompleksowy plan rozbudowy. Baza kontenerowa – Terminal G, która zajmuje powierzchnię ponad 100 ha, jest jednym z elementów tego planu i obejmuje budo-



Rys. 1. Baza Kontenerowa Terminal G



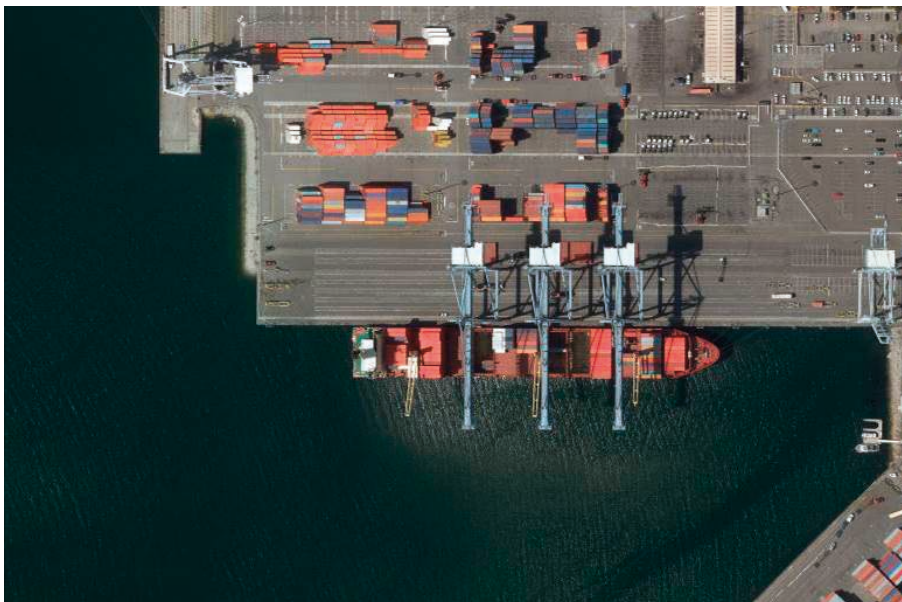
Rys. 2. Budowa Nasypu - metoda muszlowa (clamshell) i hydrauliczna, Etap 1

wę nowych i powiększenie/pogłębienie istniejących nabrzeży portowych, budowę nowych terenów portowych składowania kontenerów oraz nowych budynków i infrastruktury do obsługi bazy. Lokalizacja terminalu G wraz z planowanymi etapami projektowymi i budowlanymi pokazano na rys. 1.

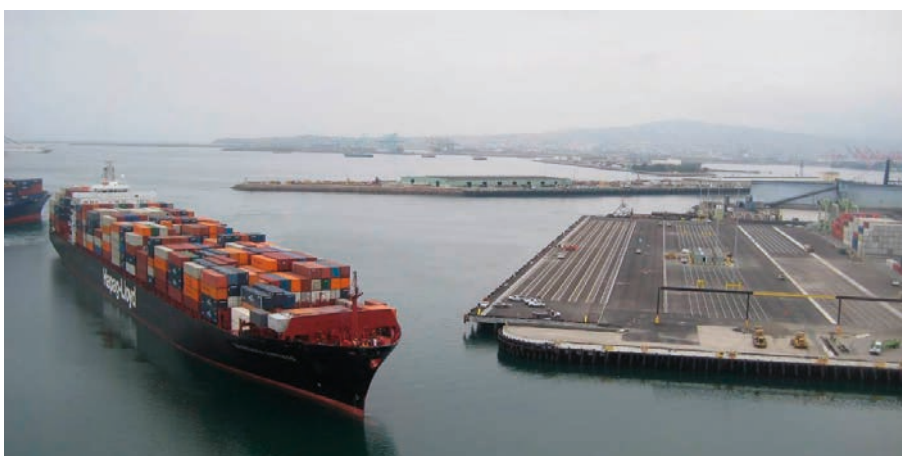
Etap 1 – obejmował pogłębienie basenu G236, budowę nasypu kamiennego o wysokości ponad 21 m i nachyleniu 1,75(H) : 1,0(V), wypełnienie gruntem części basenu pomiędzy nowym nasypem kamiennym i istniejącą skarpą nabrzeża oraz budowę

nowego nabrzeża posadowionego na palach. Konstrukcję nasypu gruntowego pod wodą wykonano, wykorzystując metodę muszlową (*clamshell*) oraz hydrauliczną, jak pokazano na rys. 2. Warstwę nasypu o grubości ponad 5 m zbudowaną powyżej poziomu wody zagęszczono przy użyciu ciężkich walców wibracyjnych.

Ponad 1600000 m³ gruntu było potrzebne do zbudowania nasypu pod przyszłą powierzchnię lądową zaplanowaną do składowania kontenerów. Nowe nabrzeże betonowe (rys. 3) o głąbo-



Rys. 3. Nowe Nabrzeże G236, Etap 1



Rys. 4. Nabrzeże G232, Etap 2



Rys. 5. Nowy Nasyp, Etap 3

kości cumowania 20 m, długości 395 m i około 40 m szerokości posadowiono na ponad 900 ośmiokątnych prefabrykowanych palach o średnicy 60 cm i długości 30,5 m. Każdy z pali ma nośność 2,7 MN.

Etap 2 – obejmował częściową rozbiórkę istniejącego nabrzeża przylegającego do północnej części basenu G232 wraz z rekonstrukcją około 38000 m² nawierzchni portowej, zabezpieczeniem skarpy narzutem kamiennym i konstrukcją nowego nabrzeża betonowego (rys. 4) o wymiarach 400 m (długość) i 40 m (szerokość) posadowionego podobnie jak w Etapie 1 na ośmiokątnych palach o średnicy 60 cm, długości do 33,5 m i nośności 2,7 MN.

Etap 3 - obejmował nowe tereny lądowe przyszłej bazy kontenerowej zbudowane poprzez częściowe wypełnienie gruntem istniejących basenów portowych G229 i G233 (rys. 5). Proces wypełniania gruntem basenów portowych poniżej poziomu wody i zagęszczanie gruntu powyżej poziomu wody był podob-

ny jak w Etapie 1. Nowy nasyp gruntowy o wymiarach 550 m (długość), 120 m (szerokość) i 20 m (głębokość) podparto od strony basenu ścianką szczelinową z systemem stalowych ściągów (rys. 6) i betonową belką kotwiącą posadowioną na ośmiokątnych palach o średnicy 60 cm.

Etap 4 – w ramach tego etapu zaprojektowano i zbudowano kilka nowych budynków administracyjnych i obiektów do obsługi bazy kontenerowej (rys. 7). Większość z nich posadowiono na betonowych palach wbijanych o długości 15 m i o przekroju kwadratowym 35 cm × 35 cm.

WARUNKI PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Istniejące warunki gruntowe podłoża w porcie są dość skomplikowane, co wynika z budowy geologicznej i historii obciążeń podłoża. Na istniejących terenach lądowych, w większości zbudowanych w pierwszej połowie ubiegłego wieku, warstwę powierzchniową stanowią nasypy o miąższości dochodzącej do 20 m. Tworzą je głównie piaski drobne i pylaste, przeważnie średnio zagęszczone, oraz gliny piaszczyste i pylaste w stanach plastycznym i twaroplastycznym. Bezpośrednio poniżej nasypów oraz na dnie basenów portowych zalega warstwa namułu organicznego o miąższości dochodzącej do kilku metrów. Warstwa ta charakteryzuje się dużą odkształcalnością. Poniżej warstwy namułu zalegają naturalne grunty niespoiste o zaburzonem układzie warstw. Tworzą je piaski grube, średnie i drobne, głównie średnio i bardzo zagęszczone. Są one doskonałym podłożem budowlanym wykazującym wysokie wartości kąta tarcia wewnętrznego i małą odkształcalność.

GEOTECHNICZNE ASPEKTY PROJEKTOWANIA BAZY KONTENEROWEJ

Port w Long Beach jest położony w rejonie charakteryzującym się częstymi trzęsieniami ziemi z dwoma silnymi źró-



Rys. 6. Zakotwienie ścianki szczelinowej, Etap 3



Rys. 7. Zespół do obsługi terminalu, Etap 4

dłami sejsmicznymi (Newport-Inglewood i Palos Verdes) znajdującymi się w odległości około 5 km od projektowanej bazy kontenerowej. Główne aspekty w projektowaniu posadowienia nowych nabrzeży i konstrukcji są związane z potencjalnie silnymi trzęsieniami ziemi i wynikającymi z tego powodu skutkami, takimi jak: upłynnienie podłoża, przemieszczenia poślizgowe skarp i osiadania sejsmiczne gruntu. Dodatkowe geotechniczne aspekty są związane z obecnością gruntów o dużej ściśliwości/odkształcalności (szczególnie w nowych nasypach) i niskiej ich wytrzymałości. Stosunkowo płytkie położenie wody gruntowej stwarza problemy przy wykopach budowlanych. Obniżenia poziomu wody gruntowej, zarówno okresowe jak i stałe, nie są dozwolone ze względu na lokalne przepisy dotyczące warunków ochrony środowiska.

Charakterystyka ruchu sejsmicznego

W analizach geotechnicznych uwzględniono następujące poziomy drgań sejsmicznych:

- Poziom Operacyjny Trzęsienia Ziemi (*Operational Level Earthquake-OLE*), zdefiniowany jako wydarzenie sejsmiczne z intensywnością trzęsienia, która może być wyższa od założonej i ma prawdopodobieństwo wystąpienia 50 % w ciągu 50 lat.
- Poziom Awaryjny Trzęsienia Ziemi (*Contingency Level Earthquake-CLE*) zdefiniowany jako wydarzenie sejsmiczne z intensywnością trzęsienia wyższą od założonej i ma prawdopodobieństwo wystąpienia 10% w ciągu 50 lat.
- Poziom Graniczny Trzęsienia Ziemi (*Ultimate Level Earthquake-ULE*) zdefiniowany jako wydarzenie sejsmiczne z intensywnością trzęsienia wyższą od założonej i ma prawdopodobieństwo wystąpienia 2% w ciągu 50 lat.

Maksymalne wartości przyspieszeń sejsmicznych przy założonych poziomach drgań wynosiły 0,21g dla OLE, 0,50g dla CLE i 0,55g dla ULE.

Stateczność skarp i zboczy

Dwa modele obliczeniowe obejmujące tradycyjną, uproszczoną metodę stateczności skarp oraz numeryczny model FLAC wykorzystano do zaprojektowania nasypów kamiennych (Etapy 1 i 2) i sprawdzenia ich stateczności w warunkach statycznych i sejsmicznych. Seria obliczeń obejmowała określenie współczynników bezpieczeństwa przed, w czasie i po trzęsieniu ziemi oraz określenie poziomych odkształceń skarp. Wyniki z wykorzystaniem uproszczonego modelu obliczeniowego wykazały, że zaprojektowane skarpy są stabilne w warunkach statycznych. Zastosowanie modelu numerycznego FLAC pozwoliło na bardziej precyzyjne określenie wzajemnego oddziaływania podłoża gruntowego i nabrzeża w warunkach sejsmicznych. Przykładowo, spodziewane deformacje pionowe nasypu (Etap 1) w przypadku poziomu operacyjnego (OLE) i poziomu awaryjnego (CLE) wynosiły około 3 cm. Deformacje poziome nasypu w analizowanych poziomach drgań sejsmicznych oszacowano odpowiednio na 3 cm (OLE) i 30 cm (CLE). Oszacowane prze-

mieszczenia nasypu, zarówno pionowe, jak i poziome, mieszczą się w dopuszczalnych wartościach i spełniają kryteria projektu ustalone przez port.

Upłynnienie i osiadanie sejsmiczne gruntu

Upłynnienie gruntów jest zjawiskiem polegającym na gwałtownym przejściu tych materiałów ze stanu o cechach ciała stałego do stanu o cechach gęstej cieczy. Upłynnienie poprzedzone jest wzrostem ciśnienia wody w porach, któremu towarzyszy redukcja naprężeń efektywnych. Kiedy ciśnienie wody w porach jest wystarczająco duże, naprężenia efektywne w gruncie znikają i grunt ulega upłynnieniu. Grunty niespoiste (piaski i nisko plastyczne pyły) położone poniżej poziomu wody gruntowej są narażone najbardziej na upłynnienie wskutek trzęsień ziemi. Badania geotechniczne przeprowadzone zarówno na istniejących, jak i na nowo konstruowanych nasypach w porcie Long Beach wykazały zaleganie warstwy podłoża o miąższości do 18 m, która ma bardzo duże prawdopodobieństwo upłynnienia w trakcie silnego trzęsienia ziemi. Towarzyszące temu osiadanie podłoża określono na 20 cm. Zjawisko upłynnienia gruntów i wynikające z tego zmiany w strukturze i wytrzymałości podłoża uwzględniono w projektowaniu skarp, ocenie ich stateczności (opisanej powyżej), jak również w określeniu poziomej i pionowej nośności pali pod nowymi nabrzeżami.

Osiadanie statyczne nasypów

Wielkość i czas osiadania nasypów gruntowych jest uzależniona od miąższości i ściśliwości warstw gruntów spoistych zalegających zarówno pod nasypami (namuły organiczne), jak i w samych nasypach (gliny plastyczne). Przykładowo, w przypadku nasypu zbudowanego w Etapie 1 (basen portowy G236) osiadania nasypu (90% konsolidacji) pod wpływem własnego ciężaru oszacowano na 60 cm i czas osiadania na ponad 3 lata. Podobnie w Etapie 3 (baseny portowe G229 i G233) wartości osiadania określono na 1 m i jego czas do około 5 lat. W celu zredukowania czasu osiadania do około 5 miesięcy zaprojektowano tymczasowe obciążenie wstępne (dodatkowy nasyp piaszczysty o wysokości 6 m) wraz z drenami pionowymi o rozstawie 2 m i głębokości do około 23 m.

Fundamenty palowe

Obliczenia pionowych i poziomych nośności pali przeprowadzono do projektowanych nowych nabrzeży kontenerowych (Etapy 1 i 2), belek kotwiących (Etap 3) oraz do planowanych budynków i obiektów (Etap 4). Analizy dotyczyły zarówno warunków statycznych, jak i dynamicznych (trzęsienia ziemi). Głównym celem projektowym było określenie wymaganej długości i wytrzymałości pali przy określonych obciążeniach. Przykładowo, w przypadku nabrzeży kontenerowych obciążenia w warunkach statycznych są związane głównie z obciążeniami od ciężaru dźwigów portowych oraz z bezpośrednim obciążeniem kontenerów składowanych na nabrzeżu. Do warunków dynamicznych konieczne było uwzględnienie tarcia ujemnego działającego na pale w wyniku upłynnienia warstw średnio

zagęszczonego gruntu niespoistego. Podstawowym celem oszacowania nośności poziomej pali było określenie reakcji podłoża (p) i odpowiadającej jej poziomej deformacji (y) na różnych głębokościach. Wykorzystując model numeryczny FLAC, przeanalizowano poziomą reakcję pali i krzywe p - y w celu określenia wzajemnego oddziaływania pali i podłoża gruntowego w warunkach statycznych i dynamicznych. Wyniki analiz potwierdziły, że projektowane ośmiokątne pale o średnicy 60 cm i o długościach 30,5 m (Etap 1) i 33,5 m (Etap 2) wykazują wymaganą pionową nośność 2,7 MN. Maksymalne osiadanie grupy pali pod obciążeniami nabrzeża oszacowano na 1 cm. Poziome przemieszczenia nabrzeży posadowionych na palach nie powinny przekraczać odpowiednio 0,5 cm i 2,0 cm w warunkach statycznych i dynamicznych. Dodatkowo w fazie projektowania przeprowadzono wstępne analizy dotyczące warunków wbijania pali, wyboru właściwego sprzętu do wbijania, określenia naprężenia ściskającego i rozciągającego, penetracji pali oraz generalnych wytycznych związanych z obserwacjami i badaniami pali w trakcie budowy.

Ścianki szczelinowe

W celu określenia parcia i oporu granicznego gruntu działającego na projektowaną ściankę szczelną (Etap 3) w warunkach statycznych i sejsmicznych przeprowadzono serię obliczeń, uwzględniając nachylenie podłoża i obciążenie naziomu. Dodatkowo określono parcie hydrodynamiczne wody na ściankę od strony basenu portowego. Na podstawie rozkładu obciążeń działających na ściankę określono jej stateczność oraz naprężenia w systemie jej podparcia (ściagi, belka kotwiąca i pale).

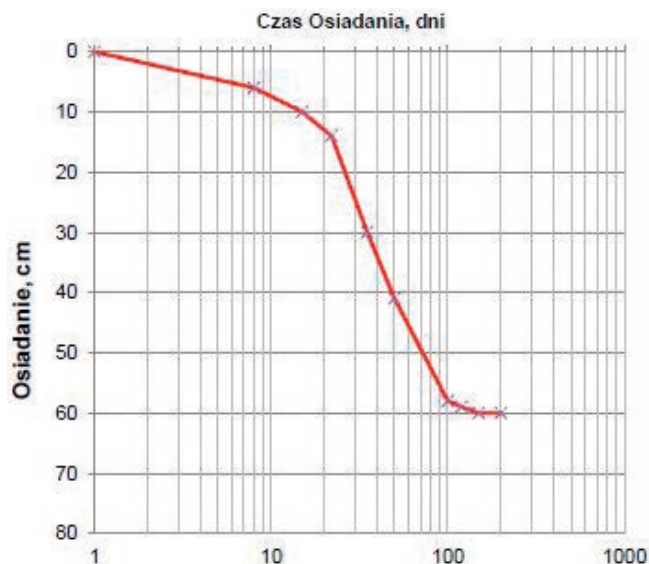
OBSERWACJE W CZASIE BUDOWY

Monitorowanie osiadania nasypów

Osiadania nowych nasypów w trakcie i po zakończeniu ich budowy były monitorowane w terenie w celu określenia wielkości, czasu konsolidacji i porównania ich z wynikami modeli obliczeniowych. Przykładowo, na rys. 8 przedstawiono wyniki pomiarów zebranych w terenie po zainstalowaniu drenów pionowych i tymczasowego obciążenia wstępnego. Widoczna jest duża zgodność między obliczeniowymi i obserwowanymi w terenie wynikami osiadań.

Roboty palowe przy nabrzeżach

Na podstawie wstępnych wytycznych opracowanych w fazie projektowej wdrożono szczegółowy program badań i obserwacji pali w trakcie robót palowych. Jednym z elementów tego planu było dynamiczne monitorowanie wybranych pali z wykorzystaniem analizatora (*pile driving analyzer*) do określenia naprężeń w pału w trakcie wbijania, określenia energii wbijania i aktualnej nośności pionowej pali. Wyniki dynamicznego monitorowania wykorzystano do opracowania szczegółowych wytycznych dotyczących wykonawstwa robót palowych oraz warunków, jakie musi spełniać każdy z wbijanych pali.



Rys. 8. Osiadanie nasypu, Etap 1



Rys. 9. Roboty palowe, Etap 2

Większość pali przy nabrzeżach była wbijana od strony basenów portowych (*offshore*), jak pokazano na rys. 9. Wymagało to precyzyjnego ustawienia i zakotwiczenia barki przed i w czasie wbijania pali.

Konstrukcje w pobliżu lub poniżej poziomu wody gruntowej:

Większość rurociągów i ścianek przy nabrzeżach była budowana poniżej zwierciadła wody gruntowej. Jak wcześniej wspomniano, ze względu na lokalne przepisy dotyczące warunków ochrony środowiska, obniżenia poziomu wody gruntowej, zarówno okresowe, jak i stałe, nie były dozwolone. Z tego też względu dno każdego z wykopów wymagało odpowiedniego wzmocnienia, jak pokazano na rys. 10. Jedną z metod stabilizacji polegała na dodatkowym wybraniu warstwy gruntów poniżej dna wykopu i zastąpieniu go warstwą gruboziarnistego żwiru i drobnego kamienia o średnicy do 7,5 cm. Dodatkowo harmonogram budowy musiał uwzględniać lokalne zmiany w przyptywach i odpływach wody gruntowej dochodzące do 3 m w ciągu doby.



Rys. 10. Konstrukcja rurociągu poniżej wody gruntowej, Etap 2



Rys.11. Stabilizacja podłoża pod nawierzchnią portową, Etap 2

Nieprzewidziane warunki gruntowe

Mimo dużej liczby kompleksowych badań polowych i laboratoryjnych oraz opracowanych przekrojów geotechnicznych w fazie projektowania, część podłoża gruntowego znajdujące-

go się bezpośrednio poniżej istniejącej nawierzchni portowej wykazywała dużą niestabilność i wymagała zarówno dalszego zbadania, jak i opracowania najbardziej optymalnych metod wzmocnienia. Proponowane rozwiązania musiały być opracowane w stosunkowo krótkim czasie i musiały uwzględniać nie tylko ich przydatność, ale również koszt i termin ich wykonania. Po dodatkowych obserwacjach i badaniach przeprowadzono stabilizację gruntu z wykorzystaniem żwiru i geowłókniny, jak pokazano na rys. 11. Wzmocnione podłoże gruntowe zagęszczono odpowiednio, ponownie przebadano i zatwierdzono pod nową nawierzchnią portową.

UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w dużym skrócie zagadnienia związane z projektowaniem i budową nabrzeża G w porcie Long Beach pokazują ich złożoną problematykę, zarówno w odniesieniu do badań podłoża gruntowego, fundamentowania, jak i prognozy ich stateczności. Istniejące warunki geologiczne, wodne, jakość gruntu pod względem budowlanym i położenie portu w terenie silnie narażonym na trzęsienia ziemi muszą być uwzględnione i odpowiednio przeanalizowane przy projektowaniu nabrzeży portowych. Dobór odpowiednich modeli obliczeniowych pozwolił na bardziej precyzyjne określenie wzajemnego oddziaływania podłoża gruntowego i nabrzeża. Tym niemniej, każda dokumentacja geotechniczna opracowana w trakcie projektowania na podstawie badań i obliczeń stanowi tylko wstępną podstawę do przygotowania technicznego projektu budowlanego. Niezależnie od kompleksowych badań polowych i laboratoryjnych podłoża gruntowego w fazie projektowej są konieczne geotechniczne obserwacje i weryfikacja wykonawstwa robót ziemnych i fundamentowych w trakcie budowy. Baza kontenerowa Terminal G w porcie Long Beach jest uważana dzisiaj za jedną z najlepiej zaprojektowanych i zbudowanych w USA. Nie byłoby to możliwe bez aktywnego zaangażowania i dobrej, stałej współpracy między projektantem, geotechnikiem, wykonawcą i właścicielem (port).