Mgr inż. Paweł KWARCIŃSKI, pawel.kwarcinski@arcelor.com
Arcelor Commercial Long Polska Sp. z o.o.

AWARIA STALOWEJ ŚCIANY KOMBINOWANEJ PODCZAS BUDOWY NABRZEŻA PORTOWEGO – PRZYCZYNY I SPOSOBY NAPRAWY

STEEL COMBINED WALL FAILURE DURING CONSTRUCTION OF QUAY WALL – REASONS OF FAILURE AND REPAIR METHODS

Streszczenie W pracy opisano awarię przy budowie nowego 3.5 kilometrowego nabrzeża kontenerowego w Stanach Zjednoczonych. Ważnym elementem konstrukcji nabrzeża była kotwiona ściana kombinowana HZ/AZ. W trakcie wykonywania zasypki za ścianą i pogłębiania dna przed nią, doszło do przemieszczenia poziomego ściany o 1.20 m. Doszło również do przemieszczenia ścianki kotwiącej. Awaria wystąpiła jedynie na 35 metrowym odcinku nabrzeża w miejscu, w którym wody małej rzeki wpadały do morza. Przeprowadzone dochodzenie pokazało, że projekt nabrzeża był wykonany na podstawie danych jedynie z 6 otworów badawczych rozmieszczonych wzdłuż 3.5 kilometrowej inwestycji(!). W artykule omówione są przyczyny, opisany jest stan awaryjny i podany sposób naprawy nabrzeża.

Abstract Article describes a failure of new build 3.5 km long quay wall in United States. Part of the quay is constructed with anchored HZ/AZ steel combined wall. During backfilling and dredging works around combined wall a 1.20 meter horizontal deflections of HZ/AZ wall has appeared. Also the anchorage system was displaced. That deflections happened only on 35 m long part of quay wall in place were waters from small river were earlier falling into the sea. The studies after failure showed lacks in ground investigations in place of failure. Only 6 bore holes made on 3.5 km long quay wall(!). So lack of the data in design stage was main reason of failure. Article describes actions undertaken after failure in order to repair wall.

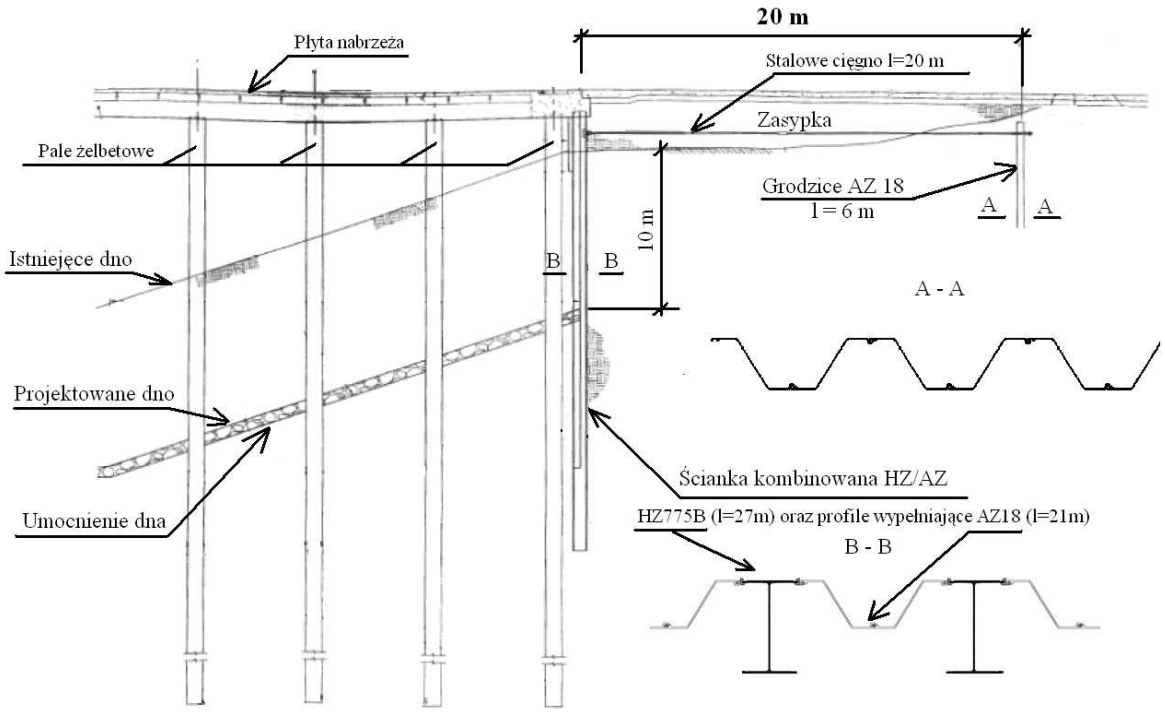
1. Opis inwestycji

Inwestycja obejmuje budowę nowego nabrzeża kontenerowego w USA. Nabrzeże ma mieć całkowitą długość 3.5 kilometra. Na Rys. 1. przedstawiono przekrój poprzeczny przez nabrzeże. Płyta nabrzeża (w formie pomostu) jest posadowiona na 4 rzędach żelbetowych pali. Od strony lądu pomost jest ograniczony zakotwioną ścianką kombinowaną HZ/AZ.

Zadaniem ściany kombinowanej jest przejęcie obciążeń poziomych od parcia gruntu, wywołanego 12 metrowym uskokiem. Ścianka ta składa się z głównych profili HZ775B o wysokości 775 mm i długości 27 m oraz z profili wypełniających AZ18 o długości 21 m. Zakotwienie zostało zrealizowane poprzez połączenie ścianki kotwiącej z 6 metrowych profili AZ18 ze ścianą kombinowaną przy użyciu stalowych cięgien. Odległość pomiędzy ścianą kombinowaną, a kotwiącą wynosi 20 m.

Prace budowlane przebiegały w następującej kolejności. Po oczyszczeniu i przygotowaniu placu budowy przystąpiono do pogrążania 27 metrowych profili HZ775B. Zgodnie

z zaleceniami w trakcie pogrążania wykorzystano specjalne kleszcze. Kleszcze to sztywna, przestrzenna, stalowa rama z prowadnicami dla profili HZ na dwóch poziomach. Zadaniem kleszczy jest zapewnienie odpowiedniej pionowości ścianki i odległości pomiędzy pogrążanymi profilami HZ. Początkowo profile HZ pogrążano wibromłotem, a gdy zachodziła konieczność dobijano je przy użyciu młota. W następnym etapie, już wyłącznie przy użyciu wibromłota, pogrążano pomiędzy profilami HZ profile wypełniające AZ. Cała ścianka kombinowana była pogrążana od strony morza z pływających platform. Po wykonaniu fragmentu nabrzeża inne ekipy przystępowały do pogrążania ścianek kotwiących i montażu cięgien. Następnie wykonywano zasypkę z gruntów sypkich pomiędzy ścianą kombinowaną i kotwiącą. W dalszej kolejności przystępowano do prac głębiarskich, których celem było obniżenie dna przy ścianie kombinowanej o 10 m. Po pogłębieniu i umocnieniu dna, należało wybudować płytę nabrzeża, jednak wcześniej doszło do awarii budowlanej.

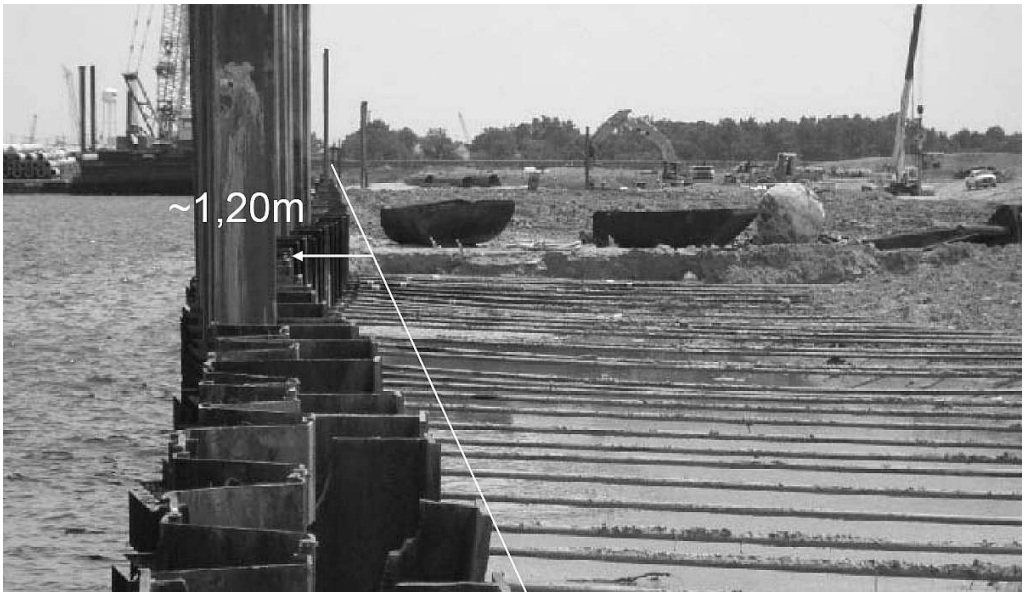


Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez nabrzeże

2. Przebieg awarii

W chwili awarii wykonano już około 200 mb ściany kombinowanej nabrzeża wraz z jego zakotwieniem, wykonaniem zasypki i pogłębieniem dna. Po wykonaniu zasypki, na kolejnym odcinku ściany nabrzeża, doszło do większych niż zwykle, na tym etapie prac, przemieszczeń korony ściany. Przemieszczenia te nie przekraczały jednak wartości dopuszczalnych. Wykonawca przystąpił więc do kolejnego etapu prac, czyli do pogłębiania dna o 10 m przed ścianą nabrzeża. Pod koniec tych prac ściana kombinowana zaczęła się znacznie przemieszczać. Doszło także do obrotu ścianki. Wraz ze ścianą główną przemieściła się ścianka kotwiąca. W trakcie awarii nie doszło w żadnym miejscu do zerwania cięgien.

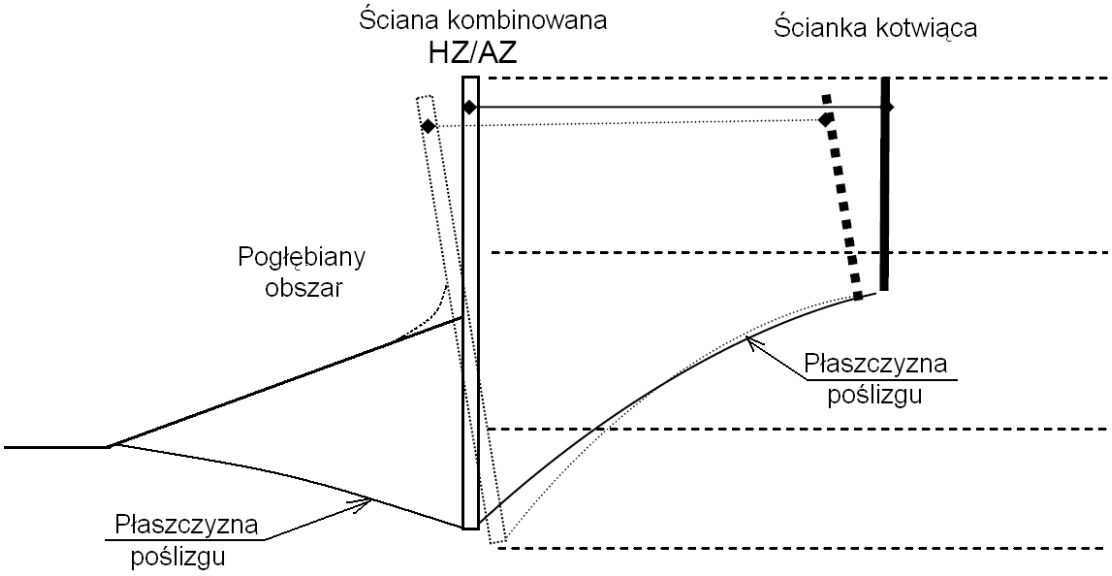
Awaria miała miejsce na odcinku nabrzeża o długości około 35 m. Przeprowadzone pomiary wykazały, że maksymalne przemieszczenia korony ścianki wyniosły 1.20 m od osi teoretycznej ściany. Na Rys. 2. pokazane jest to odchylenie.



Rys. 2. Widoczne odchylenie ściany kombinowanej od jej osi o 1.20 m

3. Przyczyny awarii

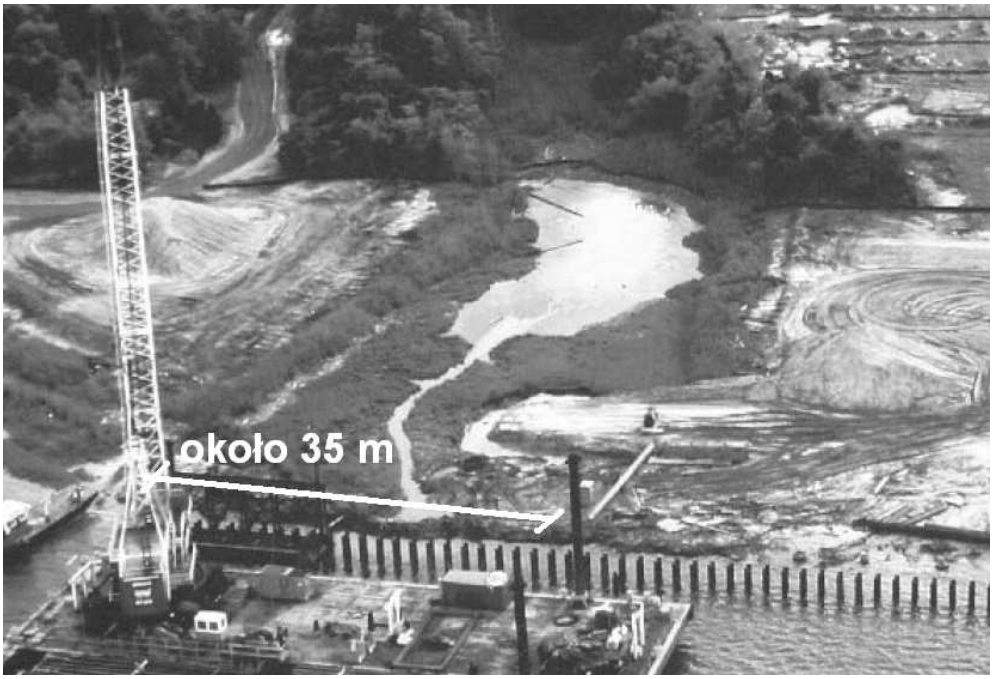
Powodem dużych odkształceń ściany kombinowanej i kotwiącej była utrata stateczności ogólnej. Mechanizm awarii wraz z płaszczyzną poślizgu został przedstawiony na Rys. 3. Projekt nabrzeża był taki sam jak na wcześniej wykonanym bezawaryjnym 200 metrowym odcinku. Dlaczego więc doszło do awarii na tym fragmencie? Jeśli projekt nabrzeża i sposób jego budowy był do momentu awarii identyczny, to najbardziej prawdopodobną przyczyną były błędnie przyjęte do obliczeń parametry gruntowe.



Rys. 3. Mechanizm awarii

Przypuszczenie to w trakcie sprawdzania obliczeń nabrzeża okazało się słuszne. Awaria wystąpiła w miejscu, w którym znajdowało się ujście rzeki (Rys. 4). Trudno w to uwierzyć, ale na przyszłym placu budowy wykonano jedynie 6 otworów badawczych. Daje to 1 otwór badawczy na około 600 m nabrzeża. Inwestor ze względu na „wysokie koszty” badań geotechnicznych nie zgodził się na wykonanie większej ich ilości. Niestety żaden

z tych otworów nie został wykonany w miejscu dawnego ujścia rzek, pomimo, że takie miejsce, aż „prosi się” o bardziej kompleksowe zbadanie. Projektant, mając tak marne informacje, podjął się ryzyka wykonania projektu.



Rys. 4. Na fotografii lotniczej miejsca awarii widoczne jest ujście rzeki do morza

Po zaleconych dodatkowych badaniach geotechnicznych okazało się, że w miejscach w których projektant spodziewał się piasków znajdowały się głównie warstwy gruntów spoistych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym.

Główną przyczyną awarii jest więc chęć zaoszczędzenia pieniędzy przez inwestora, który nie zgodził się na dodatkowe odwierty badawcze, pomimo, stanowiłyby one jedynie ułamek procenta wartości całej inwestycji.

Ale odpowiedzialność leży także po stronie projektanta, który za mało stanowczo domagał się owych badań. Projektant powinien uznać za mało wartościowe, wartości parametrów gruntowych do sprawdzenia nośności ścianki w miejscu przyszłej awarii.

Jak mogło dojść do tego, że projektant nie uwzględnił faktu występowania wzdłuż projektowanej ściany nabrzeża ujścia rzeki? Mógł przecież, nie posiadając parametrów gruntu z tego obszaru, przyjąć znacznie większe współczynniki bezpieczeństwa. Możliwe więc, że projektant nie miał w tym zakresie odpowiedniego doświadczenia. Możliwe jest także, chociaż w tą wersję trudno jest uwierzyć, że nie wiedział on o tym zagrożeniu, gdyż nie dokonał wizji lokalnej w miejscu przyszłej inwestycji lub nie posiadał odpowiednich map i zdjęć lotniczych. Najprawdopodobniej nigdy nie poznamy odpowiedzi na pytanie o świadomość projektanta o istniejącym zagrożeniu awarią.

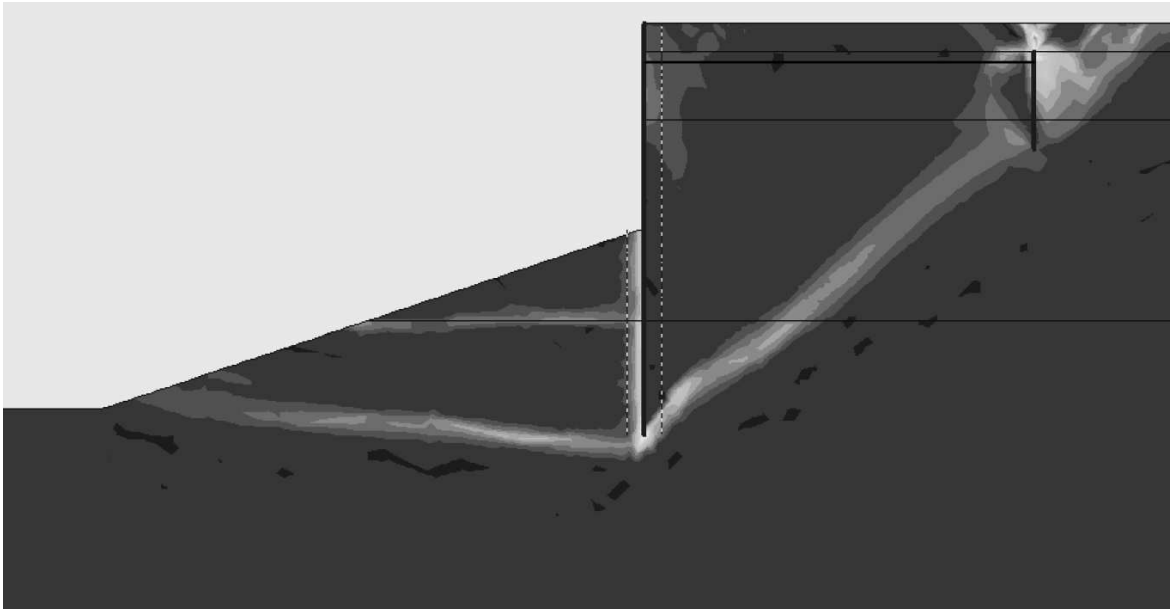
4. Sposób naprawy

Działania podjęte w celu naprawy nabrzeża można podzielić na dwa rodzaje. Pierwszy to działania doraźne, których celem było niedopuszczenie do dalszego narastania odkształceń ściany kombinowanej oraz umożliwienie przyszłej naprawy. Drugi rodzaj działań to działania naprawcze, których celem była ostateczna i trwała naprawa nabrzeża tak, aby było one dopuszczone do użytkowania i mogło spełniać wszystkie założone w projekcie funkcje.

Zaraz po zaistnieniu awarii podjęto następujące działania doraźne:
- wyciągnięto częściowo grodzice wypełniające AZ18, znajdujące się pomiędzy profilami głównymi HZ775B; dzięki temu zmniejszyło się parcie gruntu i wody na ścianę kombinowaną,
- zza ściany nabrzeża wybrano koparką 5 m gruntu w celu zmniejszenia jego parcia na ścianę,
- dokonano miejscowej wymiany gruntu przy ściance kotwiącej,
- wykonano pionowy drenaż w nasyconych gruntach spoistych celem polepszenia ich parametrów wytrzymałościowych,
- ściankę kotwiącą z profili AZ18 o długości 6 m wzmocniono, pogrążając przy nich dodatkowe grodzice o długości 15 m.

Oczywiście, aby przystąpić do działań naprawczych, trzeba było zaprojektować nową, mocniejszą konstrukcję nabrzeża. Podjęto więc prace nad poszukiwaniem najbardziej optymalnego rozwiązania. W pierwszej kolejności przystąpiono do stworzenia modelu MES ścianki kombinowanej wraz z zakotwieniem.

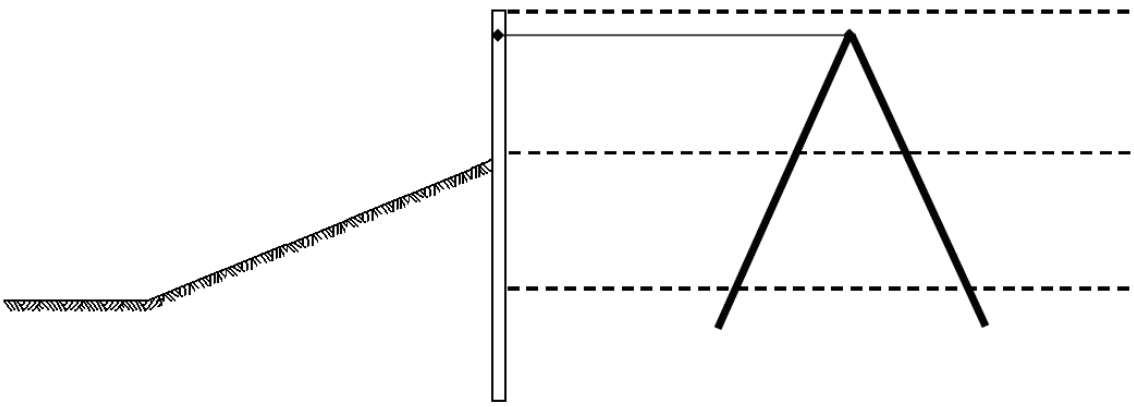
Do modelu MES wprowadzono dane z przeprowadzonych dodatkowych badań gruntu. Obliczone MES-owskim numerycznym programem komputerowym wyniki naprężeń i przemieszczeń zgadzały się z tymi zaobserwowanymi w trakcie awarii. Było to dowodem na to, iż dobrze wykalibrowano model nabrzeża i ośrodka gruntowego. Na Rys. 5. widać wyraźnie powierzchnię poślizgu w gruncie.



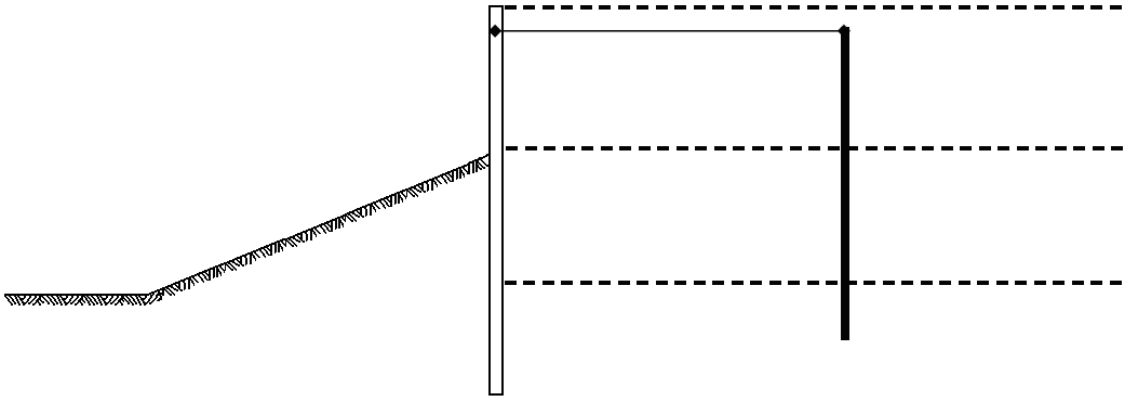
Rys. 5. Model MES nabrzeża w miejscu wystąpienia awarii

Posiadając dobry model MES nabrzeża można było przystąpić do poszukiwania możliwych sposobów trwałej naprawy. Zaproponowano pięć rozwiązań, które są wymienione w poniższych podpunktach:

a) zakotwienie ściany kombinowanej w palowym koźle kotwiącym (Rys. 6), wykonanym z pali żelbetowych lub z profili stalowych typu HP (specjalne profile do zastosowań geoinżynieryjnych o takich samych grubościach ścianek półek i środników); w tym rozwiązaniu wykorzystuje się już wcześniej użyte elementy ściany kombinowanej i te same ściągi,
b) pierwotne rozwiązanie, ale z dłuższymi i mocniejszymi grodzicami ścianki kotwiącej, z dłuższymi ściągami kotwiącymi oraz z dłuższą i głębiej pogrążoną ścianką kombinowaną (Rys. 7.); w tym rozwiązaniu należałoby wydłużać wszystkie istniejące elementy przez dospawanie nowych fragmentów profili,

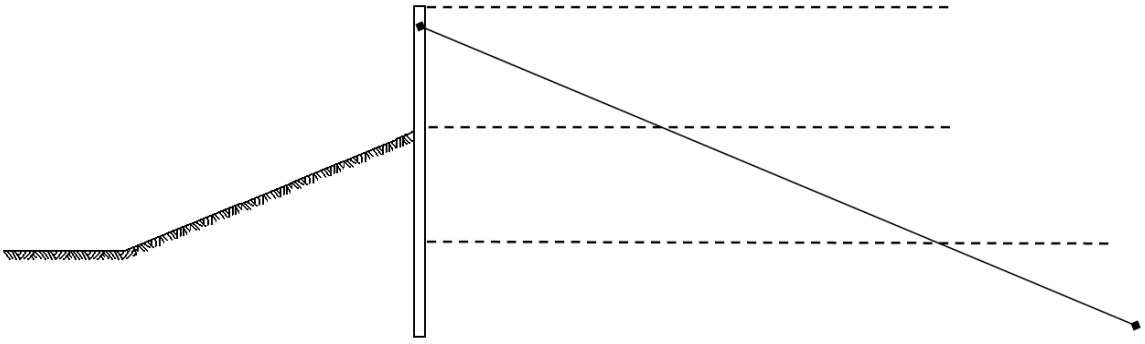


Rys. 6. Zakotwienie w ramie kozłowej



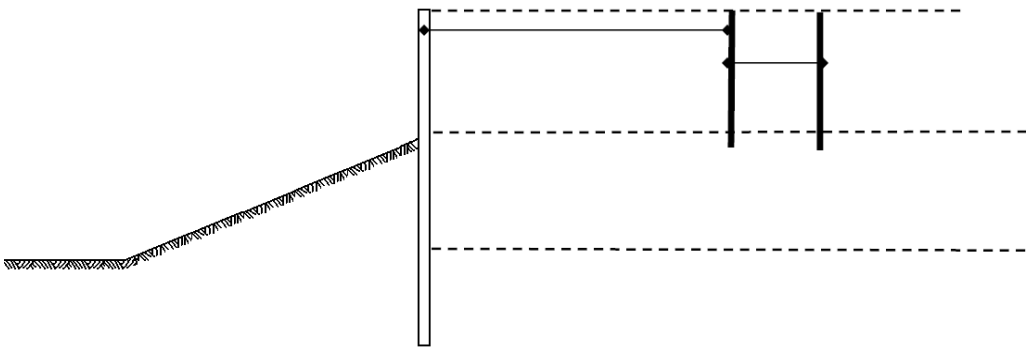
Rys. 7. Wydłużenie profili ściany kombinowanej i kotwiącej

c) wykonanie kotew gruntowych (Rys. 8.); bardzo drogie rozwiązanie, gdyż kotwy musiałyby mieć długość około 70 m, tak aby buława znajdowała się w gruntach nośnych; istniałaby też konieczność wykonywania obciążeń próbnych, sprawdzających nośność pionową ścianki kombinowanej; kolejną wadą tego rozwiązania byłaby konieczność wykonywania kotwi od strony wody z barki lub platformy pływającej,



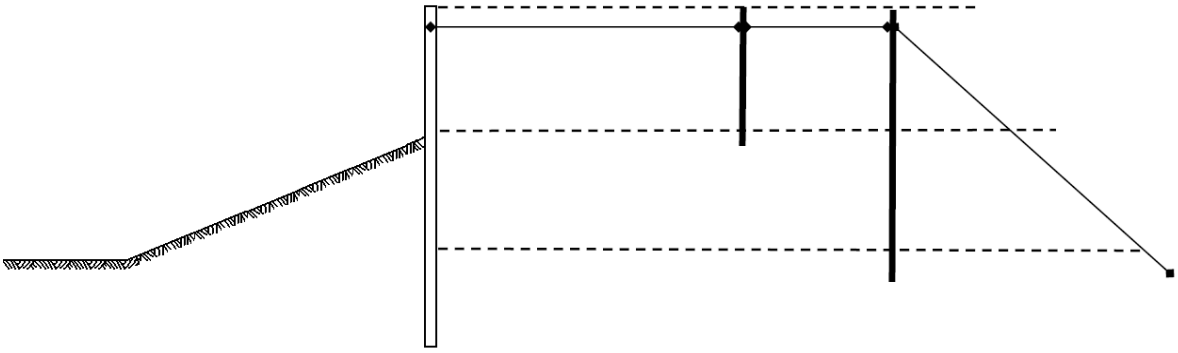
Rys. 8. Wykonanie kotew gruntowych

d) zakotwienie ściany kombinowanej w skrzyni z grodzic (Rys. 9.); wadą tego rozwiązania byłaby konieczność wymiany gruntu w otoczeniu skrzyni i pod nią tak, aby niedoszło do poślizgu jej podstawy,



Rys.9. Zakotwienie ściany kombinowanej w skrzyni z grodzic

e) pierwotne rozwiązanie, ale z dodatkowym rzędem pali, które przejmą część sił poziomych działających na ścianę kombinowaną (Rys. 10.); rozwiązanie wymagające dodatkowych obciążeń próbnych pali i wykonania ukośnych kotew.



Rys. 10. Wykonanie dodatkowego rzędu pali za ścianką kotwiącą

Ostatecznie zdecydowano się na pierwsze rozwiązanie, polegające na zakotwieniu ściany kombinowanej w palowym koźle kotwiącym (Rys. 6.). Zalecono równocześnie częściową wymianę gruntu. Wyrwane pale HZ, grodzice wypełniające AZ18 i ściągi wykorzystano ponownie. Przemieszczenia w trakcie awarii nie spowodowały uszkodzeń profili, więc po oczyszczeniu pogrążono je ponownie. Brak uszkodzeń był wynikiem sprężystości stali, zastosowania profili z gatunku stali S430GP (granica plastyczności 430 MPa) oraz małej nośności gruntu (duża część przemieszczenia korony w trakcie awarii była wynikiem obrotu, a nie ugięcia).

5. Ostateczne wnioski

Opisana awaria budowlana jest kolejnym dowodem na to, iż nie warto oszczędzać pieniędzy na badaniach geotechnicznych. Posiadając dobre rozpoznanie warunków gruntowych w miejscu inwestycji, zyskuje się dwie rzeczy. Po pierwsze zaprojektowana konstrukcja będzie w zdecydowanej większości przypadków tańsza w wykonaniu. Po drugie uniknie się podobnych do opisanej sytuacji.

Jednak duża część odpowiedzialności spływa także na projektanta, który jeżeli już wyraził zgodę na zaprojektowanie nabrzeża, to mógł bardziej stanowczo żądać wykonania dodatkowych badań geotechnicznych. Chodzi tu głównie o brak badań w miejscu tak krytycznym dla inwestycji jak ujście rzeki. Projektant powinien potraktować brak danych gruntowych z miejsca przyszłej awarii jako silną kartę przetargową, w negocjacjach z inwestorem dotyczących sfinansowania dodatkowego rozpoznania warunków gruntowych.

Jednak, jak wspomniano we wcześniejszej części referatu, istnieje pewne prawdopodobieństwo, że na skutek niewiedzy projektanta będącej wynikiem jego niedostatecznego doświadczenia, lub nie dokonania przez niego wizytacji terenu inwestycji, nie wiedział on o istniejących zagrożeniach. Zabrakło także jego zainteresowania postępem prac na budowie. Powinien on starać się uzyskiwać bieżące informacje o oporach w trakcie pogrążania, mógłby wtedy dokonać zmian w projekcie, co z kolei mogłoby zapobiec awarii.

Awaria ta pokazuje także zalety płynące z zastosowania stalowych elementów konstrukcyjnych. Dzięki dużej sprężystości i wytrzymałości (zastosowano stal w gatunku S430GP) nie doszło, w trakcie awarii do mechanicznych uszkodzeń elementów ściany kombinowanej i kotwiącej. Wszystkie profile po wyrwaniu i oczyszczeniu wykorzystano ponownie przy naprawie nabrzeża.