

Geotechniczny dowód przyczyny nieszczęśliwego zdarzenia

Mgr inż. Marek Inerowicz¹, prof. dr hab. inż. Maciej Werno^{1,2}

¹Geostab Sp. z o.o.

²Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

Na budowie stanowiska przeładunku LNG w akwenu Portu Zewnętrznego w Świnoujściu w czerwcu 2012 roku wydarzył się wypadek, który polegał na zsunięciu się do wody i przewróceniu koparki Robex 290LC-7A, w wyniku czego śmierć poniósł operator koparki.

Analizę przyczyn zaistniałego zdarzenia Autorzy artykułu dokonali w 2013 roku na podstawie wszystkich dostępnych materiałów w liczbie dwudziestu, w tym wysłuchań świadków, wyników badań i pomiarów oraz sporządzonych opinii.

Wypadek wydarzył się w południowo-wschodniej części basenu Portu Zewnętrznego w Świnoujściu, w sąsiedztwie naroż-

nika odwodnego platformy ujęcia wody technologicznej i przeciwpożarowej budowanej przy falochronie. Miejsce to znajduje się w odległości około 170 m od pierwotnej linii brzegowej, a licząc wzdłuż falochronu – około 275 m od jego nasady, gdzie docelowa głębokość wody zgodnie z projektem robót czepalnych miała wynieść 12,5 m.

Miejsce wypadku pokazano na rys. 1 z 2011 roku i na rys. 2 z 2012 roku, dwa dni po zdarzeniu.

Skarpa, na której zdarzył się wypadek, nie stanowiła naturalnego brzegu morskiego. Jak widać na rys. 1 miejsce wypadku jeszcze w 2011 roku znajdowało się w obrębie akwenu, gdzie



Rys. 1. Miejsce wypadku zaznaczone na fotografii wykonanej w 2011 roku

głębokość wody przed budową Portu Zewnętrznego, a także już w czasie jego budowy wynosiła około 2,0 m. W trakcie budowy nastąpiła w tym rejonie istotna, choć nie planowana, zmiana położenia linii brzegowej.

Z porównania rys. 1 i rys. 2 jest widoczna zasadnicza zmiana przebiegu linii brzegowej w okresie od 2011 do 2012 roku, w wyniku której nieprzewidywalnemu w projekcie załadowni uległ cały południowo-wschodni narożnik akwenu wewnętrznego, aż do końca platformy wody technologicznej i przeciwpożarowej, to jest do miejsca wypadku. Zamulenie basenu w tym rejonie było przedmiotem wykonanej w czerwcu 2012 opinii autorstwa Musielaka, Wiśniewskiego i Bucholza ze Szczecina. Zgodnie z wnioskami zawartymi w tej opinii problem akumulacji brzegu w tym rejonie ma głównie podłoże naturalne i wynika ze specyficznej cyrkulacji wody w obrębie akwenu portowego, będącej skutkiem geometrii akwenu i silnych wiatrów dobrzegich wiejących po linii wejście do basenu – narożnik południowo-wschodni basenu, przy czym, co wyraźnie stwierdzono

w wyżej wymienionej opinii, zjawisko to „będzie występować zawsze, a okresowe zwiększenie tych procesów wynikać może także z prac pogłębiarskich i tym samym okresowego zwiększenia rumowiska dyspozycyjnego do akumulacji brzegu”. Biorąc pod uwagę, że w okresie 2011-2012 prowadzono prace czerpalne przy pogłębianiu akwenu w obrębie obrotnicy portowej, można stwierdzić, że gwałtowna akumulacja brzegu w południowo-wschodnim narożniku akwenu wewnętrznego w tym okresie nastąpiła głównie w wyniku sedymentacji najdrobniejszych cząstek czerpanego rumowiska. Wyniki badań prób gruntu naniesionego przy budowanym stanowisku postojowym LNG w lutym 2013 roku wykazują, że akumulacja dna następuje z piasków pylistych i pyłów piaszczystych. Biorąc pod uwagę, że południowo-wschodni narożnik akwenu jest jeszcze bardziej oddalony od miejsca prowadzenia prac czerpalnych, należy stwierdzić, że uziarnienie gruntu naniesionego w tym rejonie miało zbliżoną charakterystykę.



Rys. 2. Widok miejsca wypadku z czerwca 2012 roku, dwa dni po zdarzeniu. Zaawansowanie prac budowlanych

GEOMETRIA BRZEGU, BUDOWA SKARPY I DNA MORZA W MIEJSCU WYPADKU

Nieplanowane wspomniane załadowanie akwenu w tym rejonie wykorzystano w trakcie budowy estakady pod rurociągi przebiegającej wokół platformy, po uformowaniu z naniesionego materiału drogi dojazdowej do końca platformy, utwardzonej powierzchniowo za pomocą pospółki, o rzędnej od około 0,6 do 0,9 m n.p.m. Taki sposób uformowania skarpy, na której w chwili wypadku znajdowała się koparka, pozwala założyć, że jej pochylenie w kierunku wody, zarówno w części nadwodnej, jak i podwodnej, wynosiło około 0,75:1. Głębokość wody do naturalnego dna morskiego, zgodnie z wykonanymi dzień po wypadku pomiarami, wynosiła w tym miejscu około 1,8 m, przy czym nachylenie dna w kierunku morza było pomijalne z punktu widzenia wpływu na przebieg zdarzenia.

Na podstawie najbliższych otworów badawczych wykonanych przez Autorów niniejszego artykułu do celów budowy Por-

tu Zewnętrznej i stanowiska przeładunkowego LNG w 2008 roku, jak również badań zagęszczenia podłoża naturalnego i nasypu w obrębie platformy przy falochronie, wykonanych przez GEOPROJEKT Szczecin w 2011 roku należy stwierdzić, że podłoże naturalne dna morskiego, stanowiące podłoże rozważanej skarpy, było zbudowane w tym rejonie ze średnio zagęszczonych i zagęszczonych piasków drobnych i średnich.

Z kolei można przyjąć, że skarpa nasypu, uformowana z naniesionego najdrobniejszego materiału pochodzącego z prowadzonych w obrębie obrotnicy robót czerpalnych, była zbudowana ze znacznie drobniejszego materiału, to jest z piasków pylastych z domieszką pyłów piaszczystych. Powierzchniowe utwardzenie skarpy za pomocą pospółki jest bez znaczenia w przypadku jej globalnej stateczności, a zatem nie uwzględniono go w dalszych obliczeniach.

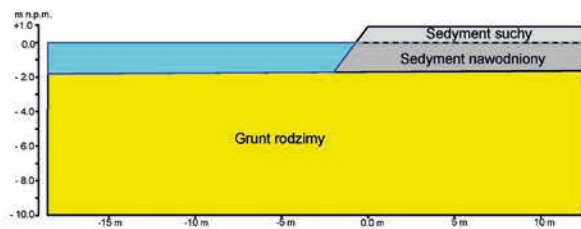
Biorąc pod uwagę opisane warunki geotechniczne panujące w miejscu wypadku, właściwości geotechniczne nasypu i podłoża decydujące o stateczności skarpy, można opisać, w oparciu o wszystkie dostępne dane, w sposób przedstawiony w tabl. 1.

Tabl. 1. Właściwości geotechniczne skarpy nasypu i podłoża

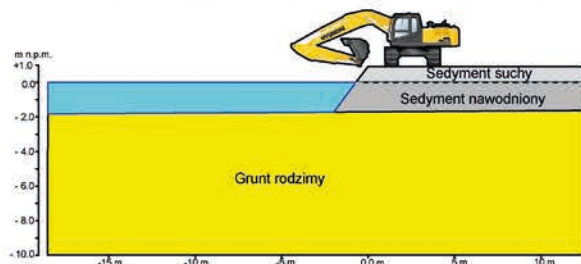
	Grunt rodzimy	Sedyment nawodniony	Sedyment suchy
Ciężar objętościowy [kN/m ³]	18,5	18,1	15,7
Spójność [kPa]	–	4	3
Kąt tarcia wewnętrznego [°]	35	30	30

ANALIZA PRZYCZYN WYPADKU

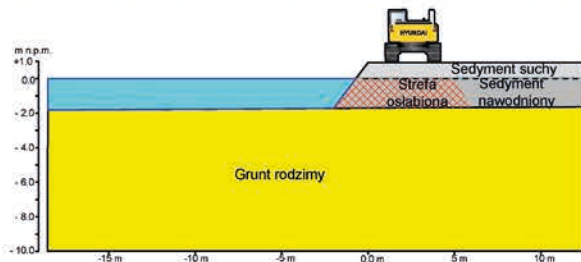
Zasadniczym zadaniem operatora gąsienicowej koparki podsiębiernej HYUNDAI, typu Robex 290LC-7A, było przytrzymanie końcówki rury refulacyjnej lub jej przemieszczanie wzdłuż plaży za pomocą łyżki, przy czym ze względów bez-



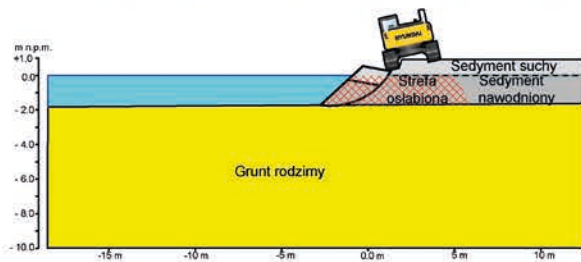
1. Nasyp nieobciążony. Przyjęte pochylenie skarpy 0.75:1.



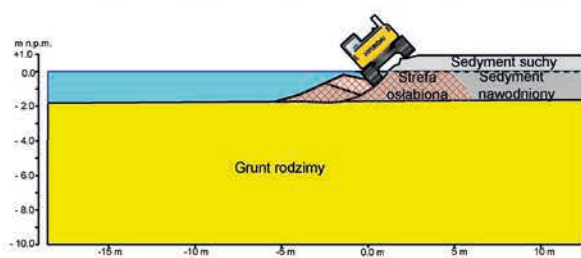
2. Nasyp obciążony koparką podającą końcówkę rurociągu na łódź motorową



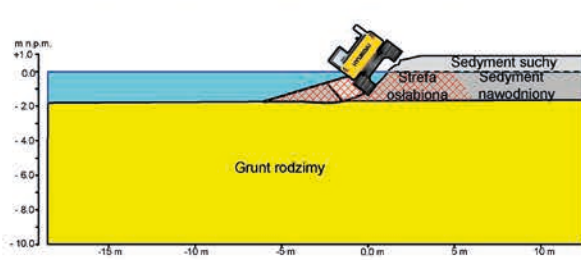
3. Nasyp obciążony koparką z włączonym silnikiem przez ponad godzinę czasu. Powstanie strefy osłabionej w warstwie nawodnionej nasypu w wyniku drgań pochodzących od pracy silnika koparki.



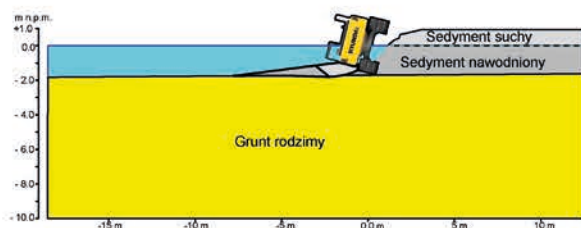
4. Uruchomienie się procesu osuwiskowego skarpy w wyniku zmniejszenia się parametrów wytrzymałościowych warstwy nawodnionej nasypu, spowodowanej generacją ciśnienia wody w porach gruntu pod wpływem wibracji pracującego silnika koparki.



5. Dalsze gwałtowne osuwanie się koparki z obrotem wokół osi. Szybkie rozluźnienie osuwającego się klina odłamu w wyniku przemieszczenia i zanurzania się w wodzie.



6. Koparka zatrzymuje się na dnie akwenu obrócona o prawie 90 stopni i jest oparta z lewej strony na osuniętym na dno materiale z osuwiska. Prawa strona kabiny operatora wystaje około 5 cm powyżej powierzchni wody. W krótkim czasie grunt w strefie osłabionej odzyskuje właściwości wytrzymałościowe zbliżone do stanu pierwotnego.



Rys. 3. Przebieg zdarzenia

pieczęństwa, w trakcie pracy na linii brzegowej, koparka miała ustawiać się zawsze prostopadłe do brzegu.

W miejscu zdarzenia zadaniem operatora koparki było przekazanie na motorówkę, za pomocą wysięgnika koparki, elementu końcówki rury refulacyjnej i później ponowny jej odbiór na ląd po dokonaniu modyfikacji na zakotwiczonej w basenie pogłębiarce. Modyfikacja elementu końcówki rury refulacyjnej miała na celu uzyskanie optymalnego przepływu refulatu w rurociągu nadawczym przebiegającym od pogłębiarki do miejsca wylotu na plaży.

Przebieg zdarzenia przedstawiono na rys. 3. W miejscu parkowania koparki po długotrwałych trudnościach z uruchomieniem silnika, koparka po podjechaniu na miejsce wypadku, ustawiła się równolegle do linii wody w odległości około 2 m od wody (to jest około 1 m od krawędzi skarpy) i po podaniu na motorówkę końcówki rurociągu, pozostawała na tym samym miejscu przez przynajmniej godzinę czasu, mając wysięgnik ustawiony również w pozycji równoległej do brzegu w kierunku wschodnim. Ten fakt wyklucza możliwość powstania zaistniałego zsuwu skarpy wskutek jej statycznego obciążenia ciężarem stojącej na skarpie koparki. Największe obciążenia skarpy wystąpiły bowiem pod lewą gąsienicą położoną najbliżej krawędzi skarpy w momencie podawania końcówki rurociągu na motorówkę. Tymczasem po podaniu końcówki rurociągu i odłożeniu wysięgnika z łyżką równolegle do brzegu skarpa przez dłuższy czas była nadal stabilna.

Należy również wykluczyć podmycie skarpy przez zaburtowy silnik płaskodennej lekkiej motorówki o mocy 55 KM, tym bardziej, że odbijała ona od brzegu na biegu wstecznym, czyli strumień wody skierowany w stronę skarpy był generowany przez śrubę motorówki w odległości około 6 m od powierzchni skarpy.

Wykluczony jest również wpływ prac pogłębiarskich prowadzonych przez pogłębiarkę M30 na stateczność skarpy, gdyż w momencie wypadku pogłębiarka nie pracowała. Znajdowała się w znacznej odległości od skarpy, a ponadto, pomiary batymetryczne wykonane następnego dnia po wypadku wskazują na to, że przed budową falochronu naturalna powierzchnia dna morskiego w rejonie wypadku nie była nigdzie pogłębiona poniżej jej naturalnego położenia. Oznacza to, że praca pogłębiarki w okresie poprzedzającym wypadek nie polegała na pogłębianiu akwenu, a jedynie na oczyszczaniu jego dna z naniesionego sedymentu.

W związku z tym jedyną logiczną przyczyną zaistniałego zsuwu była zmiana właściwości mechanicznych nasypu uformowanego z nasuniętego sedymentu, która nastąpiła w trakcie postoju koparki. Zmianę taką mogły spowodować drgania pochodzące od pracującego cały czas silnika koparki. Istotnym argumentem za tym, że silnik koparki przez cały czas pracował są poranne trudności operatora z uruchomieniem silnika. W tej sytuacji bardzo prawdopodobne jest, że operator, obawiając się ponownych trudności z uruchomieniem silnika, w ogóle nie wyłączył go.

Trzeba podkreślić, że całkowicie nawodnione piaski pylaste z domieszką pyłów piaszczystych, stanowiące sedyment, z którego zbudowana była skarpa w miejscu wypadku, są bardzo wrażliwe na długotrwałe drgania, które prowadzą do upłynienia gruntu, to jest do radykalnego zmniejszenia parametrów

wytrzymałościowych w wyniku chwilowego wzrostu ciśnienia wody w porach gruntu. Po ustaniu drgań ciśnienie to ulega rozproszeniu, a grunt wraca do stanu pierwotnego. Za wystąpieniem tego zjawiska świadczy fakt, że ciało operatora było zagłębione do połowy w osuniętym gruncie sedymentu i nie można było go wydobyć bez wypłukania gruntu wokół ciała.

W celu potwierdzenia zmiany właściwości wytrzymałościowych sedymentu poniżej powierzchni wody w wyniku drgań działającego silnika koparki, jako podstawowej przyczyny zsuwu skarpy i wywrócenia się koparki, przeprowadzono obliczenia stateczności odtwarzające przyjęty przebieg zdarzeń, pokazany graficznie na rys. 3, to jest:

1. Nasyp w miejscu wypadku nie jest obciążony ciężarem koparki.
2. Nasyp jest obciążony koparką podającą końcówkę rurociągu na łódź motorową.
3. Nasyp obciążony koparką z włączonym silnikiem przez ponad godzinę. Powstanie strefy osłabionej w warstwie nawodnionej nasypu w wyniku drgań pochodzących od pracy silnika koparki.
4. Uruchomienie się procesu osuwiskowego skarpy w wyniku zmniejszenia się parametrów wytrzymałościowych warstwy nawodnionej nasypu, spowodowanej generacją ciśnienia wody w porach gruntu pod wpływem wibracji pracującego silnika koparki.
5. Gwałtowne osuwanie się koparki z obrotem wokół osi. Szybkie rozluźnienie gruntu w klinie odłamu w wyniku przemieszczania i zanurzenia się w wodzie.
6. Koparka zatrzymuje się na dnie akwenu obrócona o prawie 90° i jest oparta z lewej strony na osuniętym na dno gruntu z osuwiska. Prawa strona kabiny operatora wystaje około 5 cm powyżej powierzchni wody. W krótkim czasie grunt w strefie osłabionej odzyskuje właściwości wytrzymałościowe zbliżone do stanu pierwotnego.

OBLICZENIA STATECZNOŚCI

Obliczenia stateczności przeprowadzono dla trzech pierwszych faz przyjętego przebiegu zdarzeń w celu sprawdzenia, w którym momencie dochodzi do obliczeniowej utraty stateczności skarpy, przy czym dla tych samych faz wykonano obliczenia dla koparki ustawionej równolegle i prostopadłe do krawędzi skarpy.

Właściwości wytrzymałościowe poszczególnych warstw podłoża przyjęto zgodnie z tabl. 1. Osłabienie właściwości wytrzymałościowych nawodnionej warstwy sedymentu modelowano na dwojako, jako zmniejszenie alternatywnie:

- przyjętej wartości spójności sedymentu o 1 kPa,
- przyjętej wartości kąta tarcia wewnętrznego o 2° .

Należy podkreślić, że jest to bardzo niewielkie zmniejszenie wartości parametrów wytrzymałościowych w stosunku do przyjętych dla stanu pierwotnego sedymentu (patrz tabl. 1).

Obciążenia skarpy pochodzące od koparki przyjęto zgodnie ze specyfikacją techniczną koparki HYUNDAI, typu Robex 290LC-7A, jako obciążenie maksymalne, rozłożone równomiernie pod gąsienicami koparki (50 kPa).

Wyniki obliczeń pokazano graficznie na rys. 4 oraz w tabl. 2 w postaci minimalnej wartości obliczeniowego współczynnika stateczności na poślizg skarpy zewnętrznej. Obliczenia wykonano programem SLOPE/W wchodzącym w skład pakietu GEOSTUDIO, metodą Morgensterna-Price'a. Oprogramowanie

SLOPE/W i pakiet GEOSTUDIO Autorzy stosują w podobnych przypadkach od ponad 20 lat. Z własnego doświadczenia stwierdzają, że uzyskano w takich obliczeniach wysoce akceptowalne wyniki stateczności.



Rys. 4. Wyniki obliczeń stateczności

Tabl. 2. Wyniki obliczeń stateczności w poszczególnych fazach

Faza zdarzenia		Obliczeniowy współczynnik stateczności F_{min}	
		Koparka ustawiona równolegle do skarpy	Koparka ustawiona prostopadłe do skarpy
1. Nasyp w stanie pierwotnym bez obciążenia zewnętrznego		1,43	
2. Nasyp w stanie pierwotnym obciążony najazdem koparki		1,02	1,11
3. Warstwa nawodniona nasypu osłabiona w wyniku wibracji pochodzącej od pracy silnika koparki	Zmiana spójności o 1 kPa	0,95	1,05
	Zmiana kąta tarcia wewnętrznego o 2°	0,99	1,07

Jak wynika z tabl. 2 skarpa utworzona z sedymentu i nie-obciążona koparką ma wysoki zapas bezpieczeństwa. Najazd koparki powoduje znaczne zmniejszenie się zapasu bezpieczeństwa, tym niemniej skarpa nadal pozostaje stateczna. Powstanie strefy osłabionej w wyniku drgań pracującego silnika koparki prowadzi do zsuwu skarpy, przy czym utrata stateczności następuje już po nieznacznym obniżeniu parametrów wytrzymałościowych nawodnionego sedymentu. Należy przy tym zaznaczyć, że przy prostopadłym ustawieniu koparki utrata obliczeniowej stateczności skarpy nie następuje nawet przy

obniżonych parametrach wytrzymałościowych nawodnionego sedymentu.

WNIOSKI

1. Zgromadzone fakty i wykonane obliczenia świadczą jednoznacznie o tym, że przyczyną wypadku, w wyniku którego śmierć poniósł operator koparki, było osłabienie właściwości wytrzymałościowych nawodnionego sedymentu pod wpływem drgań pracującego silnika koparki przez ponad godzinny czas postoju na krawędzi skarpy. Skutkiem osłabienia właściwości wytrzymałościowych nawodnionego sedymentu nastąpiła utrata stateczności skarpy po powierzchni obejmującej całą skarpe zbudowaną z sedymentu oraz lewą gąsienicę, zlokalizowaną najbliżej krawędzi skarpy.
2. Wykonane obliczenia stateczności wskazują, że gdyby koparka stała prostopadłe do brzegu, nie nastąpiłaby utrata stateczności.
3. Dodatkowo należy stwierdzić, że ze względu na niewielkie rozmiary skarpy, zasięg potencjalnej powierzchni poślizgu oraz płaską i stabilną powierzchnię dna, nawet osunięcie się skarpy z koparką ustawioną prostopadłe do jej krawędzi nie spowodowałoby jej wywrócenia, a jedynie zsuniecie się do wody.