XXIV awarie budowlane
XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

Dr inż. GRZEGORZ HORODECKI, *ghor@pg.gda.pl*
Prof. zw. dr hab. inż. EUGENIUSZ DEMBICKI, *edemb@pg.gda.pl*
Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego,
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

# AWARIA ŚCIANY SZCZELINOWEJ STANOWIĄCEJ OBUDOWĘ WYKOPU GŁĘBOKIEGO

## FAILURE OF DIAPHRAGM WALL PROTECTING DEEP EXCAVATION

**Streszczenie** W artykule przedstawiono awarię ściany szczelinowej stanowiącej obudowę wykopu głębokiego. Omówiono warunki geologiczne, hydrogeologiczne i geotechniczne podłoża. Przeprowadzono analizę rozwiązań konstrukcyjnych w kolejnych oszczędnościowych modyfikacjach projektu oraz zrealizowanej wersji. Wykonano obliczenia porównawcze. Wskazano przyczyny wystąpienia awarii.

**Abstract** In the paper a failure of diaphragm wall protecting deep excavation is presented and discussed. The geological, hydrogeological and geotechnical properties are described together with the analysis of several construction solutions in subsequent stages of the project starting from the tender proposal up to its final, most economical version. The analysis was based on comparative numerical calculations. The failure causes were identified.

## 1. Wstęp

Każda awaria czy katastrofa budowlana w zakresie geotechniki jest interesującym przyczynkiem do lepszego poznanie zjawisk występujących w podłożu gruntowym oraz na styku konstrukcji i podłoża. Poznanie przyczyn wraz z analizą wsteczną obejmującą warunki początkowe i odtwarzającą wszystkie etapy prac wraz z przebiegiem zjawisk i przekroczeniem stanów granicznych stanowi rzadką możliwość weryfikacji metod projektowania i wykonawstwa oraz całego procesu budowlanego robót geotechnicznych.

W niniejszym artykule przeanalizowano awarię ściany szczelinowej stanowiącej obudowę wykopu głębokiego. Pod względem przebiegu procesu projektowania i realizacji oraz przyczyn awarii dokładna lokalizacja analizowanego obiektu nie jest istotna. Awaria miała miejsce w jednym z miast Polski centralnej. Analiza obejmowała wizje lokalne, ocenę materiałów archiwalnych, wyniki pomiarów, obliczenia numeryczne MES układu ścianka – otaczające podłoże gruntowe oraz ustalenie przyczyn awarii.

## 2. Opis sytuacji

W trakcie prac ziemnych wzdłuż kotwionej ściany szczelinowej (oś 1) usytuowanej wzdłuż ulicy (rys. 1) zaobserwowano szybko narastające nadmierne przemieszczenia poziome ściany szczelinowej i pęknięcia betonu tej ściany. W Dzienniku Budowy zapisano: *„o godzinie $11^{30}$ stwierdzono pęknięcie asfaltu w obszarze ulicy (…) na odcinku wzdłuż osi 1/A-F. Stwierdzono również zarysowanie ściany szczelinowej w osi 1. (...) w wyniku pomiarów geodezyjnych przemieszczeń ściany szczelinowej w osi 1 stwierdzono jej przemieszczenia dochodzące do 90 milimetrów. W celu zapobieżenia dalszym odkształceniom ściany podjęto decyzję o wykonaniu przypory ziemnej po stronie wykopu w obszarze osi 1-2/A-I. Powiadomiono pogotowie energetyczne i ZDM o uszkodzeniach w ulicy”*.

W kolejnym dniu zapisano dalej: *„o godzinie $17^{00}$ stwierdzono ograniczenie przemieszczeń ściany szczelinowej w osi 1 do 2 milimetrów. Wykonano 70% przypory ziemnej wzdłuż osi 1”*. Wykonywanie przypory ziemnej zakończono następnego dnia o godzinie $3^{00}$. W tym samym dniu o godz. $9^{40}$ Inspektor Nadzoru, wpisem do Dziennika Budowy, wstrzymał roboty budowlane w obszarze objętym awarią. Przyporę podwyższono o kolejne 2 m w obawie o przewody instalacji gazowej i ciepłowniczej, znajdujące się w zasięgu klina odłamu ściany.

Wyniki pomiarów ściany wykazały, że od dnia kiedy wykonano ostatni pomiar przed awarią (trzy dni wcześniej) do dnia, w którym zakończono wykonywać przyporę, przemieszczenia wzrosły o 100÷120 mm (przemieszczenie poziome ściany z obrotem wokół górnej krawędzi). Przemieszczeniom uległa również ściana w osi A (rys. 1).

## 3. Warunki geologiczne i hydrogeologiczne

Analizowany teren jest znacznie zdeniwelowany i znajduje się w silnie zurbanizowanej części miasta. Najgłębsze nawiercone podłoże stanowią osady górnego mezozoiku wykształcone w postaci skał kredowych. Powyżej zalegają osady trzeciorzędowe w postaci piasków drobnoziarnistych z przewarstwieniami węgla brunatnego. Wyżej zalegają osady miocenu w postaci facji buroweglowej. Najmłodszą warstwę trzeciorzędowa stanowią iły wieku miopliocеńskiego. Są to iły barwy pstrej, szarej i brązowej z przewarstwieniami nawodnionych piasków drobnych, przesycone konkrecjami wapiennymi.

W analizowanym obszarze stwierdzono występowanie dwóch pięter wodonośnych: czwartorzędowego i trzeciorzędowego.

Woda pierwszego poziomu wód podziemnych o charakterze napiętym lub swobodnym stabilizuje się na rzędnych 66,71÷70,36 m n.p.m. z wahaniami +3,0 m/– 1,5 m. Poziom zwierciadła wód gruntowych był zróżnicowany w obszarze inwestycji. Układ izohips z wielolecia był wyższy od określonych dla okresu badań i w rejonie ściany szczelinowej wynosił 70÷72 m n.p.m. Dane z okresu badań według różnych źródeł wynosiły: 66÷71 m n.p.m. W okresie awarii poziom wody gruntowej za ścianą z jednej strony wynosił średnio ok. 69,3 m n.p.m. z wahaniami +0,3/–0,5 m; a z drugiej strony 61,7 m n.p.m. z wahaniami +0,9/–0,6 m, czyli mieścił się w zakresie podanym w dokumentacjach. W dokumentacjach hydrogeologicznej i geologiczno-inżnierskiej zwrócono uwagę na możliwość podpiętrzenia wód gruntowych w wyniku wykonania ścian szczelinowych w wyniku przegrodzenia przez nie naturalnego kierunku przepływu.

Zwierciadło wód trzeciorzędowego piętra wodonośnego ma charakter swobodny w zakresie głębiej położonych zamkniętych soczewek w obrębie iłów.

## 4. Warunki geotechniczne

Warunki geotechniczne określono w czterech dokumentacjach: podstawowej (P) i dodatkowej (D) – wykonanej później, w których podano różny podział na warstwy i różne parametry geotechniczne (tabl. 1.) oraz dwóch dokumentacjach uzupełniających. W dokumentacji dodatkowej (D) częściowo zmieniono podział na warstwy oraz podano zmienione parametry geotechniczne. Najważniejsze różnice w wartościach parametrów stanu i parametrów wytrzymałościowych podano w tablicy 1. Porównanie ma charakter przybliżony ze względu na inny podział na warstwy geotechniczne.

Tablica 1. Porównanie niektórych parametrów geotechnicznych zawartych w dokumentacjach A i B przyjętych do obliczeń

| Nr warstwy | | Rodzaj gruntu | $I_L/I_D$ | | $\phi$ [°] | | $c_u$ [kPa] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| wg P | wg D | wg P | wg P | wg D | wg P | wg D | wg P | wg D |
| IIa | IIIa/IIIb | Pg, Gp | 0,15 | 0,20; 0,10 | 22,4 | 21,5/23,0 | 42 | 39,3/45,0 |
| IIb | IIIc/IIId | Pg, Gp | <0,00 | 0,05; 0,00 | 25,0 | 25 | 50 | 60/90 |
| IIc | IIIe | Pd, Pπ | 0,70 | 0,70 | 31,4 | 34 | – | – |
| IIIa | IVb/IVc | I, Ip, Gπ | 0,05 | 0,10; 0,05 | 12,3/6,4* | 9/10 | 57/59* | 60/70 |
| IIIb | IVd | I, Iπ, Ip | <0,00 | 0,00 | 13,0/7,2* | 10 | 60/74* | 80 |
| IIIc | IVf | Pd, Pπ | 0,85 | 0,85 | 32,1 | 34,5 | – | – |

/* – parametr określony metodą B/metodą A

Największą różnicę można zaobserwować w wartości spójności – większe wartości określono w dokumentacji dodatkowej (D). W obliczeniach do projektu przetargowego zastosowano parametry z dokumentacji podstawowej (P). W obliczeniach do projektu warsztatowego zastosowano wyższe wartości spójności podane w dokumentacji (D).

## 5. Analiza wyników wizji lokalnych oraz dokumentacji

Analizy dotyczące przyczyn awarii ściany w osi 1 i A obejmowały możliwie szerokie spojrzenie na zastaną sytuację i zachodzące zjawiska. Rozpatrywano m.in.: ścianę szczelinową (obliczenia, projekty, realizację, stan), zakotwienia (obliczenia, projekty, wykonanie, badania kontrolne – próbne obciążenia), warunki gruntowe (dokumentacje, parametry, badania, zmiany parametrów), wodę gruntową (poziomy naturalne, podpiętrzenie, ewentualny napływ ze źródła nienaturalnego – kanalizacja), ruch kołowy na ulicy za ścianą (wpływ obciążeń cyklicznych), obciążenia dodatkowe za ścianą, przemieszczenia obudowy wykopu oraz obiektów wokół (zmiany w czasie, charakter przemieszczeń), odwodnienie wykopu (zmiany lokalizacji oraz wydatków w trakcie pompowania).

Projekt zabezpieczenia analizowanych ścian wykopu od wersji z projektu przetargowego do fazy wykonawczej podlegał kolejnym zmianom zmierzając w stronę bardziej oszczędnego, a jednocześnie coraz mniej bezpiecznego rozwiązania.

### 5.1. Wersja przetargowa projektu

W wersji przetargowej projektowe parametry ściany szczelinowej w osi 1 były następujące: grubość 80 cm, długość 21,6/20,6 m (rzędna góry oczepu: 73,5 m n.p.m., podstawy ściany: 51,9/52,9 m n.p.m.), przypora ziemna do rzędnej 68,5 m n.p.m. (szerokość w podstawie

12,1 m, szerokość półki 5 m), rozparcie o konstrukcję docelową obiektu wewnątrz wykopu na poziomie 69,7 m n.p.m. Maksymalna rzędna wykopu: 61,0 m n.p.m.

Projektowe parametry ściany szczelinowej w osi A, osie 1÷8: były następujące: grubość 80 cm, długość: osie 1÷4: 21,6 m (rzędna góry oczepu: 73,5 m n.p.m., rzędna podstawy ściany: 51,9 m n.p.m.), przypora ziemna do rzędnej 68,5 m n.p.m. (szerokość w podstawie 10,1 m, szerokość półki 3 m), rozparcie o konstrukcję docelową trzonu obiektu wewnątrz wykopu (słupy) na poziomie 69,7 m n.p.m.; osie 4÷7: 21,6÷14,4 m (rzędna góry oczepu: 73,5÷68,8 m n.p.m., rzędna podstawy ściany: 51,9÷54,4 m n.p.m.), przypora ziemna do rzędnej 68,5 m n.p.m., rozparcie o konstrukcję docelową trzonu obiektu wewnątrz wykopu (słupy) na poziomie 69,7 m n.p.m. Maksymalna przegłębienie wykopu: 61,0 m n.p.m.

W projekcie przyjęto trzonową metodę wykonywania części podziemnej obiektu. Jedynie od strony północnej przewidziano system kotwienia ściany. Posadowienie obiektu na płycie fundamentowej o grubości 60 cm, docelowo podpierającej ściany szczelinowe. Ściany szczelinowe tworzą z płytą fundamentową i stropami kondygnacji podziemnych szczelną skrzynię fundamentową. Połączenie ścian szczelinowych z płytą denną i stropami zaprojektowano jako monolityczne.

W obliczeniach ścian dołączonych do projektu przetargowego przyjęto parametry geotechniczne (tabl. 1) wg dokumentacji (P). Parcie wody w postaci dodatkowego obciążenia uwzględniono jedynie w warstwie z napiętym zwierciadłem wody gruntowej. Obciążenie naziomu przyjęto 10 kPa. Trudno określić jaki rodzaj parcia od strony zewnętrznej i wewnętrznej przyjęto do obliczeń. W dokumentacji (P) zalecano przyjęcie parcia spoczynkowego od strony zewnętrznej i odporu pośredniego od strony wewnętrznej.

Wątpliwości w projekcie przetargowym budzi przyjęty sposób rozparcia – znaczne obciążenie punktowe słupów, szczególnie w narożnikach (skręcanie) oraz rzadkie podparcie ściany – korzystniejsze i pewniejsze byłoby zastosowanie metody stropowej w tej części wykopu. Wskazane byłoby też przyjęcie w obliczeniach większego obciążenia naziomu.

## 5.2. Zmiany projektowe

W wersji projektu warsztatowego wprowadzono istotne zmiany w stosunku do projektu przetargowego.

Tablica. 2. Zmiany parametrów ściany szczelinowej w osi 1 przyjęte w projekcie warsztatowym

| Oś | grubość [cm] | | długość [m] | | rzędna [m n.p.m.] | | rzędna wykopu [m n.p.m.] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | przyjęta | zmiana | przyjęta | zmiana | góra oczepu | podstawa | przyjęta | zmiana |
| A÷D (oś Z) | 60 | -20 | 14,38 | -7,22 | 71,58 | 57,2 | 61,2 | +0,2 |
| D ÷ J | 60 | -20 | 15,10 | -6,5/5,5 | 73,10 | 58,0 | 61,2 | +0,2 |
| J ÷ N | 60 | -20 | 16,60 | -4,0 | 73,10 | 56,5 | 61,2 | +0,2 |

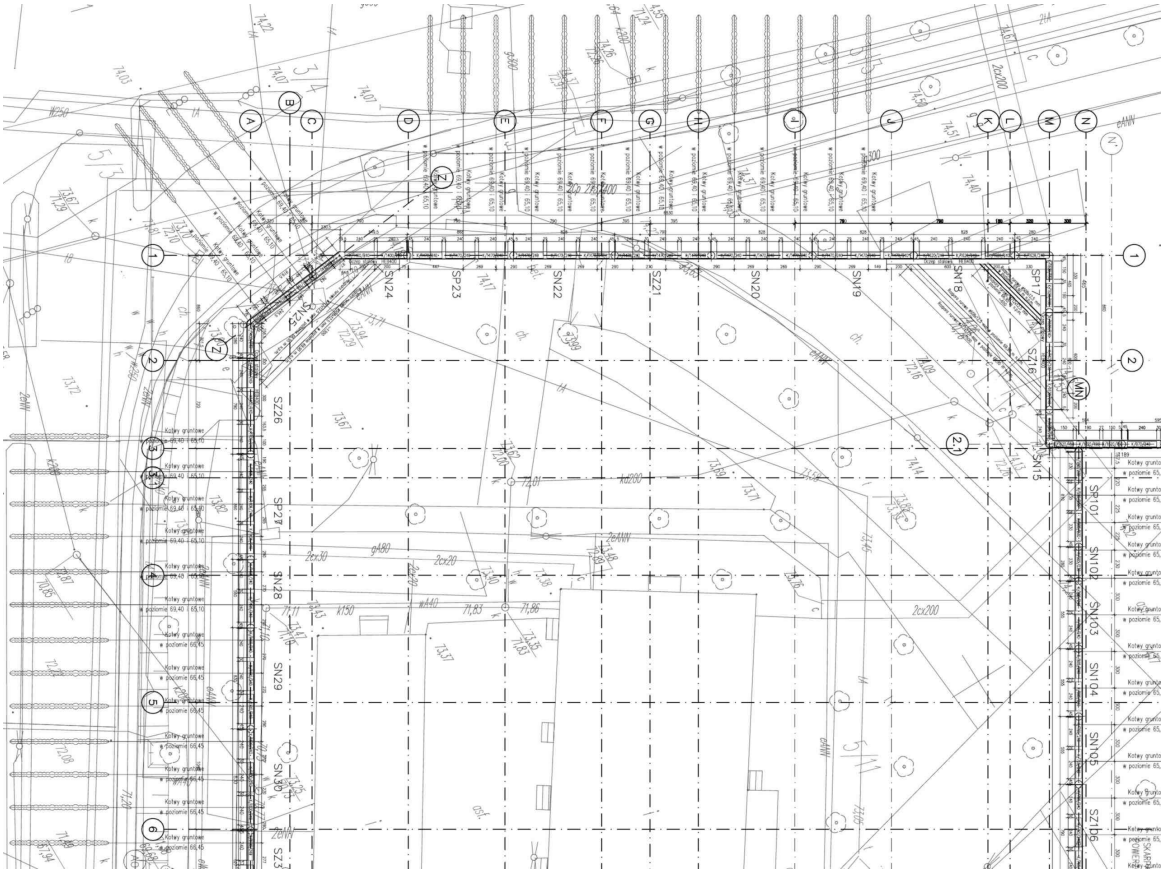
Ponadto w poszczególnych odcinkach osi 1 zmieniono sposób podparcia ściany.

Osie A÷D (oś Z): zamiast rozparcia zakotwienie ściany na dwóch poziomach: 69,4 m n.p.m. oraz 65,1 m n.p.m. oraz rozparcie narożnika. Kotwy nachylone pod kątem 20° do poziomu, wstępnie sprężane o następujących parametrach: kotwa górna – długość całkowita 17 m, długość buławy 8 m długość wolna 9 m; kotwa dolna – długość całkowita 20 m, długość buławy 12 m długość wolna 8 m.

Osie D÷J: zamiast rozparcia zakotwienie ściany na dwóch poziomach: 69,4 m n.p.m. oraz 65,1 m n.p.m. Kotwy nachylone pod kątem 20° do poziomu, wstępnie sprężane o następu-

jących parametrach: kotwa górna – długość całkowita 20 m, długość buławy 11 m długość wolna 9 m; kotwa dolna – długość całkowita 19 m, długość buławy 11 m długość wolna 8 m.

Osie J÷N: zamiast rozparcia o trzon konstrukcji rozparcie narożnika o ścianę sąsiednią.



Rys. 1. Rzut obudowy wykopu w wersji warsztatowej [1]

Tablica. 2. Zmiany parametrów ściany szczelinowej w osi A przyjęte w projekcie warsztatowym

| Oś | grubość [cm] | | długość [m] | | rzędna [m n.p.m.] | | rzędna wykopu* [m n.p.m.] | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | przyjęta | zmiana | przyjęta | zmiana | oczepu | podstawa | przyjęta | zmiana |
| 1÷4/5 | 60 | -20 | 14,38 | -7,22 | 71,58 | 57,2 | 61,2<br>60,4 | +0,2<br>-0,6 |
| 4÷6.1 | 60 | -20 | 11,40 | -10,2÷-3,0 | 68,80 | 57,2 | 61,2<br>60,4 | +0,2<br>-0,6 |

* – dolna wartość oznacza wartości w osiach słupów.

Ponadto w poszczególnych odcinkach osi A zmieniono sposób podparcia ściany.

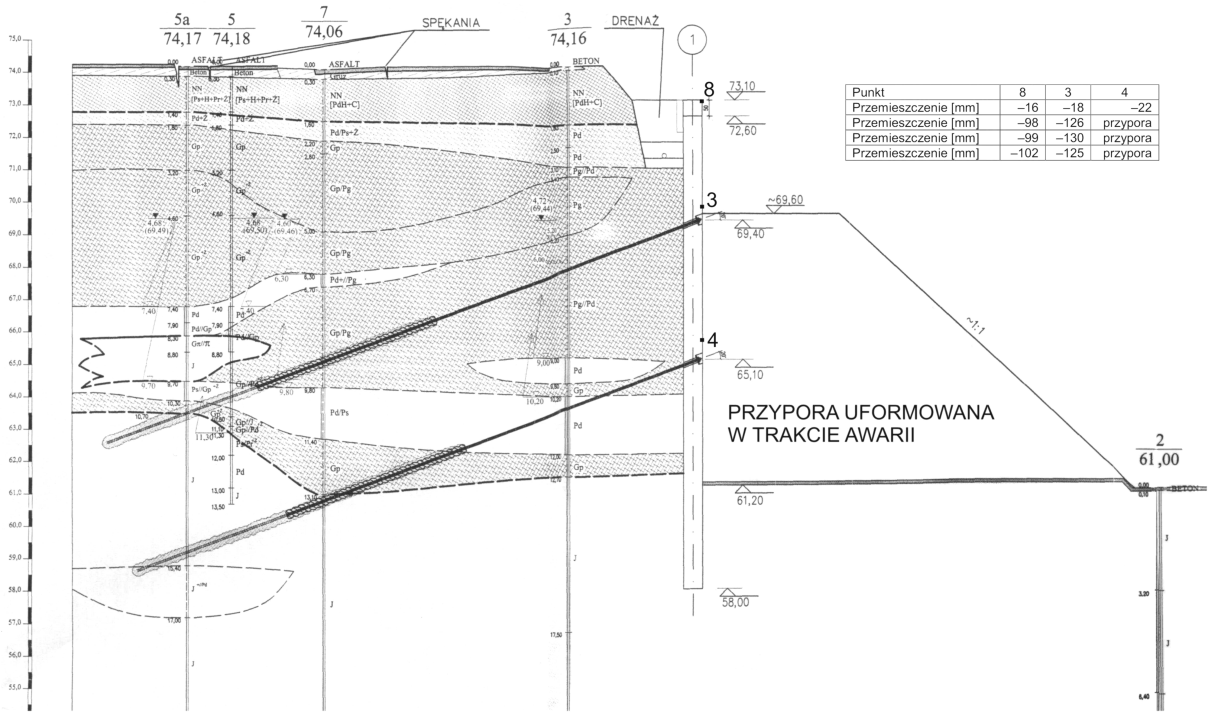
Osie 1÷4/5: zamiast rozparcia zakotwienie ściany na dwóch poziomach: 69,4 m n.p.m. oraz 65,1 m n.p.m. oraz rozparcie narożnika. Kotwy nachylone pod kątem 20° do poziomu, wstępnie sprężane o następujących parametrach: kotwa górna – długość całkowita 23 m, długość buławy 14 m długość wolna 9 m; kotwa dolna – długość całkowita 18 m, długość buławy 9 m długość wolna 8 m;

Osie 4÷6.1: zamiast rozparcia zakotwienie ściany w jednym poziomie: 66,45 m n.p.m. Kotwy nachylone pod kątem 20° do poziomu, wstępnie sprężane o następujących parametrach: długość całkowita 23 m, długość buławy 15 m długość wolna 8 m, (na rysunku długość buławy 14 m długość wolna 9 m);

W projekcie warsztatowym zmianie uległ również sposób posadowienia z płyty fundamentowej na posadowienie słupów na stopach fundamentowych. W konsekwencji nie wykonano „gniazd” w ścianach szczelinowych na połączenie z płytą fundamentową.

W obliczeniach dołączonych do projektu warsztatowego przyjęto parametry geotechniczne (tabl.1.) wg dokumentacji (D), parcie wody (poziom zwierciadła wody gruntowej zgodnie ze stanem z okresu badań (D)) w postaci dodatkowego obciążenia uwzględniono jedynie w warstwie z napiętym zwierciadłem wody gruntowej. Obciążenie naziomu przyjęto 10 kPa.

Obliczenia nośności kotew przeprowadzono metodą pala wyciąganego wg normy palowej PN-83/B-02482. Do wyboru przez wykonawcę podano dwa możliwe warianty rodzaju zakotwień: cięgnowe i prętowe oraz dodatkowo trzy możliwe warianty dotyczące nachylenia, długości i liczby zakotwień i buław. Nie podano czy przewidziano iniekcję jednokrotną czy powtarzalną zakotwień co w sposób istotny wpływa na nośność zakotwienia.




| Punkt | 8 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Przemieszczenie [mm] | –16 | –18 | –22 |
| Przemieszczenie [mm] | –98 | –126 | przypora |
| Przemieszczenie [mm] | –99 | –130 | przypora |
| Przemieszczenie [mm] | –102 | –125 | przypora |

Rys. 2. Przekrój poprzeczny. Ściana szczelinowa wg projektu warsztatowego z zaznaczeniem skrócenia kotew i warunków gruntowych z uwzględnieniem badań uzupełniających po awarii. Przemieszczenia poziome ściany narastające w trakcie awarii [1]

Pocienienie ściany o 20 cm oraz radykalne zmniejszenie jej zagłębienia przy zmianie systemu podparcia uzyskano przyjmując bardziej optymistyczne parametry podłoża (przede wszystkim spójności) i przenosząc zasadnicza wagę bezpieczeństwa na system zakotwienia. W takiej sytuacji, biorąc pod uwagę niedoszacowanie wartości sił w zakotwieniach, pozostawienie tak dużej dowolności wykonawcy w zakresie rodzaju i sposobu zakotwienia budzi wątpliwości.

Kolejną zmianą – na etapie wykonawstwa – było radykalne skrócenie zakotwień (buławy) na podstawie krótkiej notatki, nie spełniającej wymogów projektu zastępczego wobec braku podstawowych informacji dotyczących technologii i wymogów stawianych wykonawcy oraz akceptacji projektanta ściany szczelinowej. W notatce tej, kotwy obliczono przy założeniu reiniekcji przy braku jednoznacznej informacji o tym założeniu dla wykonawcy.

Wprowadzone zmiany były następujące:

W osi 1: osie A÷D (oś Z): długość buławy zakotwienia górnego 5 m (zmiana –3 m);
długość buławy zakotwienia dolnego 7 m (zmiana –5 m);
zmiana liczby cięgien z 3 na 2;
osie D÷N: długość buław zakotwienia górnego i dolnego 7 m (zmiana – 4 m);
W osi A: osie 1÷4/5: długość buławy zakotwienia górnego 8 m (zmiana – 6 m);
długość buławy zakotwienia dolnego 6 m (zmiana –3 m);
zmiana liczby cięgien z 4 na 3;
osie 4÷6.1: długość buławy zakotwienia 8,4 m (zmiana – 5,6/6,6 m);
zmiana liczby cięgien z 5 na 4;

We wszystkich etapach projektowania brak informacji na temat obliczeniowego sprawdzenia globalnej stateczności uskoku naziomu.

### 5.3. Parametry geotechniczne

W obliczeniach ściany szczelinowej w projekcie przetargowym i projekcie warsztatowym przyjmowano różne parametry geotechniczne na podstawie dwóch dokumentacji. Parametry podane w dokumentacji A były bardziej zachowawcze – dotyczy to szczególnie spójności, która jest parametrem obarczonym znacznie większym współczynnikiem niepewności. W obliczeniach obciążeń ściany szczelinowej – parcia i odporu gruntu spoistego, nie dopuszczalne jest przyjmowanie tak dużych wartości spójności (60÷80 kPa) bez żadnych współczynników zmniejszających, szczególnie gdy stosuje się uproszczony sposób obliczeń – bez kompleksowej analizy sprężysto-plastycznej współpracy gruntu i konstrukcji w złożonych warunkach geotechnicznych. Przyjęcie wysokich wartości spójności skutkuje m.in. zmniejszeniem obciążenia ściany, niedoszacowaniem wartości sił w zakotwieniach i w konsekwencji zmniejszeniem współczynnika bezpieczeństwa.

W obliczeniach do projektu przetargowego i warsztatowego przyjmowano obciążenie ściany szczelinowej parciem wody jedynie w warstwie, gdzie występowało napięte zwierciadło wody gruntowej. Jednak uwzględniając obserwacje długotrwałe warunków hydrogeologicznych w przedmiotowym terenie bardziej bezpieczne byłoby przyjęcie do obliczeń obciążenia statycznym zwierciadłem wody gruntowej, uwzględniając możliwe połączenie warstw umożliwiające przepływ wody w wyniku wykonania ścian i zakotwień oraz dane hydrogeologiczne – przyjmując jego poziom z danych z wielolecia oraz biorąc pod uwagę możliwość podpiętrzenia wody za ścianą.

### 5.4. Wykonawstwo

Wykonawstwo ścian szczelinowych nie budziło większych zastrzeżeń, natomiast wykonanie zakotwień – szczególnie ściany w osi 1 – budziło poważne wątpliwości. Metryki kotew, a przede wszystkim wyniki badań kontrolnych wskazują na wykonanie w większości przypadków jednokrotnej iniekcji buław oraz na prawdopodobnie kilkudziesięcio-centymetrową długość wolną kotwy lub całkowity jej brak. Skutkuje to zupełnie innym charakterem pracy zakotwienia. Zamiast przenosić siły poza bryłę odłamu zakotwienie obciąża całą bryłę gruntu, szczególnie w bliskim sąsiedztwie ściany (klin odłamu).

### 5.5. Pozostałe czynniki

Analizując przyczyny nadmiernych przemieszczeń ściany szczelinowej w osi 1 sprawdzano również możliwość dodatkowego obciążenia jej wodą w wyniku podpiętrzenia wodami naturalnymi lub ewentualnego napływu ze źródła nienaturalnego np. nieszczelnej sieci wodociągowej lub kanalizacyjnej.

Podniesienie poziomu wody gruntowej i obciążenie ściany ciśnieniem wody miało miejsce (prawdopodobnie w granicach jej naturalnych wahań) – potwierdzają to wycieki z głowic zakotwień, które pojawiły się po ich wykonaniu. Brak pomiaru poziomów piezometrycznych z okresu awarii wyklucza jednoznaczne określenie działającego w tym momencie ciśnienia wody. W obliczeniach kontrolnych przyjęto podniesienie poziomu wody gruntowej z rzędnej 67,5 do 69,5 m n.p.m.

Sieć wodociągową, jako potencjalne źródło dodatkowego podniesienia poziomu wody za ścianą, po uzyskaniu informacji od gestora wykluczono z dalszych analiz, natomiast badanie stanu kanału ogólnospławnego (z roku 1916) w ulicy wykazało wiele rozszczelnień, pęknięć, ubytków, przesunięć i korozję betonowych rur. Infiltracja ścieków w podłoże za ścianą (co potwierdziły wyniki badań) wpływa niekorzystnie na stateczność ściany, jednak wpływ ten nie ma istotnego znaczenia i prawdopodobnie nie miał takiego znaczenia na zachowanie się ściany w momencie awarii.

Kolejnym analizowanym wpływem były obciążenia dodatkowe górnego naziomu poprzez maszyny i materiały budowlane oraz wpływ ruchu kołowego. Stałe obciążenia dodatkowe po wyjaśnieniach ze strony kierownictwa i nadzoru budowy wykluczono. Obciążenie ruchem kołowym natomiast ze względu na swój charakter (obciążenia cykliczne), nie można pominąć. Nawet stosunkowo niewielkie obciążenia przykładane cyklicznie generują ciśnienie wody w porach gruntu wywołując efekt „pompowania”, powodują zmiany stanu podłoża, w efekcie wpływając na obniżenie jego parametrów i zwiększenie obciążenia ściany.

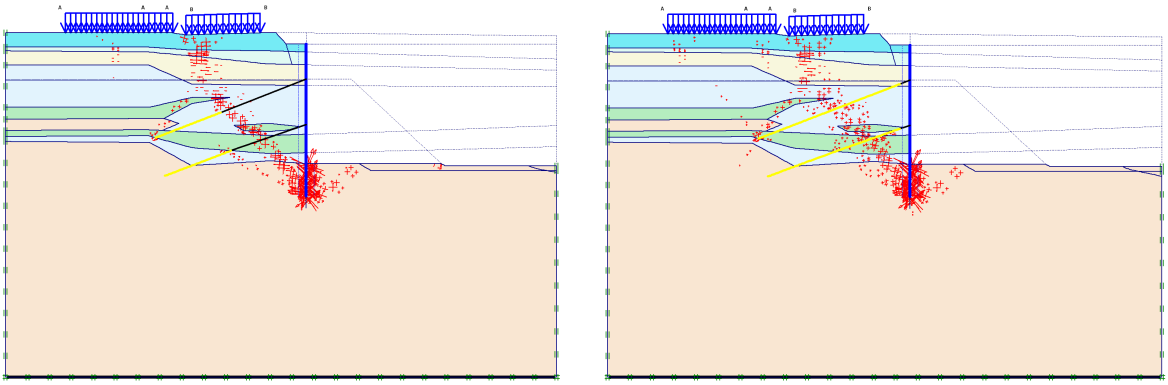
Pod uwagę wzięto również potencjalny wpływ odwodnienia wykopu na stateczność uskoku naziomu ze ścianą szczelinową. Wszelkie gwałtowne zmiany w odwodnieniu (włączanie, wyłączenie pomp, zmiany w wydatkach pompowania) wpływają negatywnie na podłoże i stateczność układu. Prawdopodobnie czynnik ten nie miał decydującego wpływu na stan awaryjny ściany jednakże w sytuacji ukształtowanej powierzchni poślizgu bryły gruntu ze ścianą, a więc również możliwej drogi filtracji, nawet niewielkie ilości wody zbyt szybko zassane lub też podpiętrzone w takiej powierzchni, mogły jeszcze bardziej obniżyć jej parametry i być przyczyną dalszych postępujących przemieszczeń ściany.

## 6. Analiza obliczeniowa

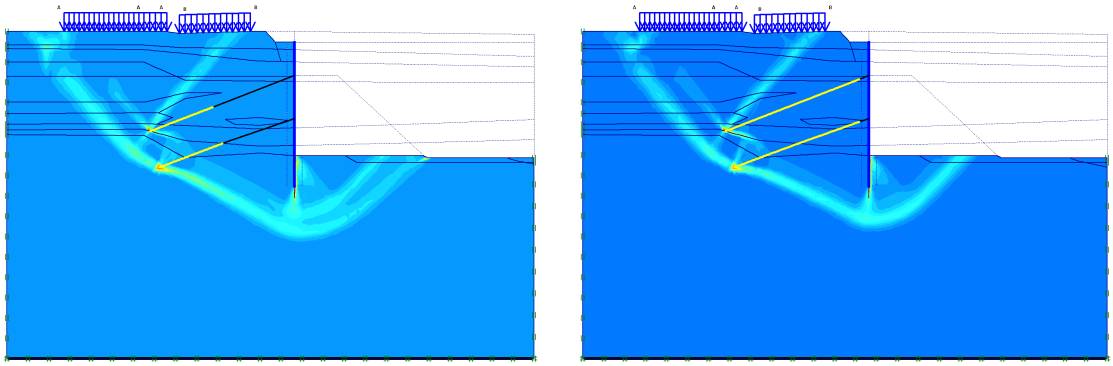
Analizę obliczeniową przeprowadzono dla przekroju najbardziej niekorzystnego ze względu na warunki i występujące, mierzone przemieszczenia. Układ warstw podłoża przyjęto z uwzględnieniem dokumentacji uzupełniającej po awarii, a parametry geotechniczne wg dokumentacji A. Parametry geotechniczne przyjęto ze współczynnikiem zmniejszającym. Obliczenia przeprowadzono programem Plaxis v. 8.2. przy przyjęciu dla gruntu modelu Coulomba-Mohra. W obliczeniach odtworzono kolejne etapy prac, jak: stan sprzed budowy, wykonanie ścian, kolejne etapy głębienia wykopu, zakładanie i sprężanie kotew. Początkowy stan zwierciadła wody gruntowej przyjęto wg dokumentacji A, następnie w trakcie obliczeń podniesiono poziom wody do poziomu aktualnego. Obciążenie naziomu o wartości 15 kPa przyjęto zarówno w obszarze ruchu, jak i w bliskim sąsiedztwie ściany.

Analizy prowadzono przy przyjęciu długości wolnych i długości buław zgodnych z założeniami wykonawczymi oraz przy skróceniu długości wolnej do 1,0 i 0,5 m. Chociaż skrócenie

długości wolnej zdecydowanie przyspieszało wystąpienie stanu granicznego to uzyskane z obliczeń poślizgu powierzchnie były w każdym przypadku w przybliżeniu takie same. Na kolejnych rysunkach przedstawiono pole przyrostów odkształceń ścinających z wyraźnie widocznymi powierzchniami poślizgu w fazie awarii (rys. 3) oraz w fazie potencjalnego zniszczenia (rys. 4).



Rys. 3. Przyrosty odkształceń – wektory wartości głównych (parametry zakotwień zgodne z założeniami wykonawczymi oraz z skróconymi długościami wolnymi zakotwień)



Rys. 4. Pole odkształceń ścinających w stanie na etapie zniszczenia (parametry zakotwień zgodne z założeniami wykonawczymi oraz z skróconymi długościami wolnymi zakotwień)

Na rysunku 4 miejsca znacznych przyrostów odkształceń na górnym naziomie pokrywają się w przybliżeniu z miejscami spękań nawierzchni jezdni. Jeszcze lepsza zbieżność jest widoczna na rys. 4 przy przyjęciu skróconych długości wolnych kotew. Na rysunku 4 warto zwrócić uwagę na pojawienie się drugiej, głębszej powierzchni poślizgu. Wyniki obliczeń potwierdzają charakter i wartości mierzonych przemieszczeń. Na podstawie wyników można stwierdzić również, ze każdy z czynników, które były przyczyną utraty stateczności obniżał zapas bezpieczeństwa.

## 7. Wnioski końcowe

Wyniki wizji lokalnych, analiz dokumentacji projektowej i wykonawczej oraz obliczeń i analiz wyników pomiarów przemieszczeń wskazują na złożony charakter przyczyn awarii.

Chwilowa utrata stateczności uskoku naziomu w trakcie odsłaniania ściany w osi 1 od strony wykopu była efektem zsumowania się wpływów różnych czynników.

Najważniejszymi przyczynami zaistniałej, chwilowej utraty stateczności uskoku naziomu i nadmiernych przemieszczeń poziomych ściany szczelinowej w osi 1 (wystąpienia stanu granicznego podłoża) były:

a) nieprawidłowa praca zakotwień spowodowana niewłaściwym wykonaniem kotew – ograniczenie długości wolnej lub jej prawdopodobny brak,
b) przyjęcie w obliczeniach ściany szczelinowej zbyt wysokich wartości spójności i zbyt niskiego obciążenia wodą gruntową – w efekcie m.in. niedoszacowanie wartości sił w kotwach i zbyt małe zagłębienie ściany (jej radykalne skrócenie),
c) znaczne skrócenie buław kotew i wykonanie ich jako jednokrotnie iniektowane – przy założeniu reiniekcji (brak jednoznacznych zapisów dotyczących reiniekcji na każdym etapie projektu); dokumentacja zamienna nie spełniała wymogów projektu,
d) prawdopodobne niesprawdzenie stateczności uskoku naziomu w żadnej z coraz oszczędniejszych wersji projektu.
e) w mniejszym stopniu wpływ ruchu kołowego.

Należy podkreślić, że wobec zaistniałych faktów kierownictwo budowy podjęło w odpowiednim czasie prawidłowe decyzje, które zapobiegły prawdopodobnej katastrofie, obejmującej znaczne przemieszczenie się ściany szczelinowej i w konsekwencji obsunięcie się części ulicy (obciążonej znacznym ruchem kołowym) do wykopu.

## Literatura

1. Materiały archiwalne (dokumentacje geologiczne, hydrogeologiczne, geotechniczne, projektowe, wyniki pomiarów i obserwacji, ekspertyzy).