

Sprężanie ściany szczelinowej

Mgr inż. Artur Zachodni
Keller Polska

Nowoczesne budownictwo wymaga coraz bardziej złożonej geometrii obiektów oraz większej liczby kondygnacji podziemnych. Nie tylko garaże, ale również sale wystawowe, konferencyjne czy koncertowe znajdują się czasem na głębokości od kilku do kilkunastu metrów poniżej poziomu terenu. Jeśli dodamy do tego niejednokrotnie złożone warunki geotechniczne, zachodzi potrzeba wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań.

Głównym wyzwaniem przy realizacji wykopów jest zapewnienie stateczności obudowy wykopu oraz jak najszybszy czas realizacji. Do osiągnięcia powyższych celów stosuje się rozpory stalowe, metodę podstropową oraz kotwy gruntowe.

Ze względu na coraz częstsze realizacje wielkogabarytowych obiektów podziemnych, jak te wymienione, konieczne jest zapewnienie dużych rozpiętości pomiędzy stropami konstrukcji, co wraz z koniecznością skrócenia czasu realizacji inwestycji zainicjowało próby wykorzystania techniki sprężania betonu w obudowach wykopów wykonywanych w technologii ścian szczelinowych.

Główne korzyści technologii sprężonych ścian szczelinowych to:

- redukcja punktów podparcia ścian szczelinowych na etapie głębienia wykopu,
- przyspieszenie prac ziemnych, a co za tym idzie całej realizacji obiektu,
- zagwarantowanie dużych rozpiętości pomiędzy punktami podparcia obudów wykopów w fazie budowlanej i użytkowej,
- zastosowanie mniejszych grubości ścian szczelinowych przy jednoczesnym zredukowaniu zbrojenia głównego oraz ograniczeniu zarysowań.

W celu opracowania autorskiego rozwiązania zabezpieczenia wykopu łączącego technologie ścian szczelinowych oraz sprężania betonu nawiązano współpracę między firmą Keller Polska i BBV SYSTEMS, która specjalizuje się w sprężaniu konstrukcji betonowych.

Pierwsza udana próba sprężenia pilotażowego odcinka ściany szczelinowej odbyła się na budowie prowadzonej przez firmę Keller Polska w 2016 roku w Warszawie.

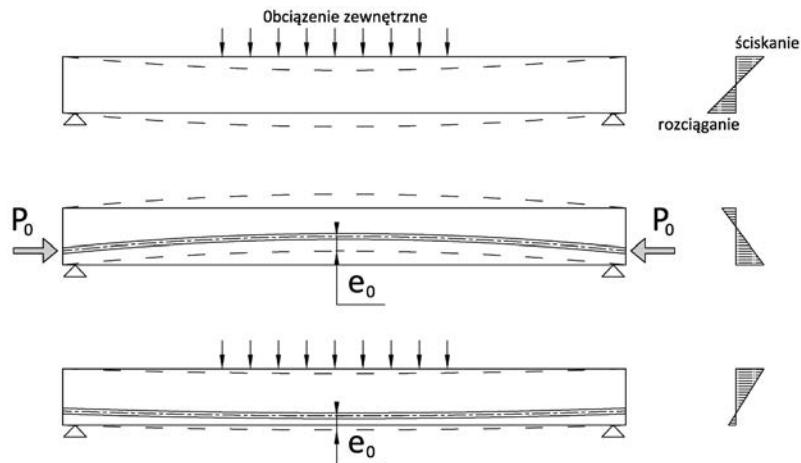
W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia dotyczące analizy statycznej oraz zagadnienia związane z wykonaniem odcinka sprężonej ściany szczelinowej. W pierwszej kolejności przedstawiono zarys teoretyczny sprężania konstrukcji betonowych. Scharakteryzowano również zastosowany system sprężający wraz z etapami wykonawstwa. Następnie przedstawiono procedurę obliczeniową wykonaną w programie konstrukcyjnym i geotechnicznym. Na końcu podsumowano próbę sprężenia pilotażowego odcinka ściany szczelinowej wraz z wykonaną analizą statyczną.

PODSTAWY SPRĘŻANIA

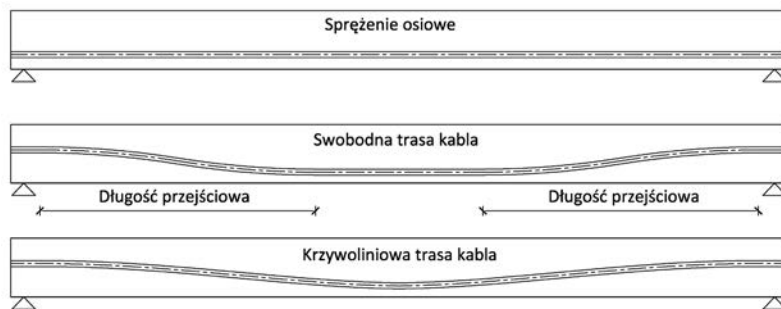
„Sprężenie jest to wprowadzenie do konstrukcji wstępnego układu sił wewnętrznych, który tak przeciwdziała niebezpiecznemu układowi sił od obciążeń zewnętrznych, że łączne działanie tych układów konstrukcja przeniesie bezpiecznie” [1]. Sprężanie umożliwia wyeliminowanie naprężenia rozciągającego w betonie i dzięki temu chroni go przed wystąpieniem zarysowań (rys. 1). Siły wprowadza się zazwyczaj za pomocą ciągów, prętów sprężających lub taśm stalowych.

Ze względu na technikę wykonania sprężany beton można podzielić na strunobeton i kablobeton. Główną różnicą między powyższymi technikami sprężania jest naciąg, który w przypadku strunobetonu następuje przed stwardnieniem mieszanki betonowej, natomiast w kablobetonie po osiągnięciu przez beton odpowiedniej wytrzymałości. Dodatkowo w strunobetonie zakotwienie między stalą a betonem uzyskuje się poprzez przyczepność pomiędzy tymi dwoma elementami. W przypadku kablobetonu jedną z większych jego zalet jest możliwość wykonawstwa w wytwórni i na budowie. Ciągna mogą mieć dowolny kształt i być wyprowadzone poza element zbrojony. Strunobeton wykonywany jest w wytwórni, a ciągna można prowadzić w linii prostej lub łamanej, ale tylko w obrębie elementu. Zbrojone elementy mogą być transportowane tylko w całości, natomiast transport kablobetonu jest możliwy w segmentach.

Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje geometrii trasy ciągu kablowego (rys. 2):



Rys. 1 Siły wewnętrzne w przekroju sprężonym ciągnem prostoliniowym na mimośrodku e_0



Rys. 2. Rodzaje tras kabli sprężających

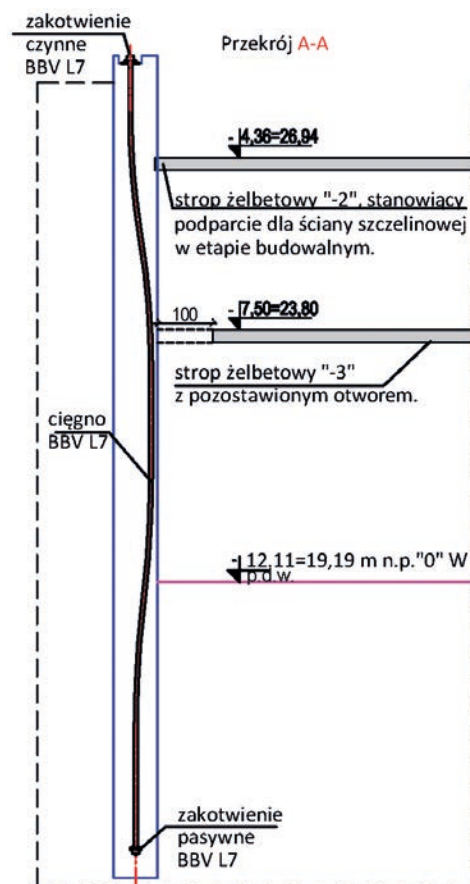
Sprężenie osiowe – wartość mimośrodu kabla w funkcji długości ciąga jest stała. Sprężenie najczęściej spotykane w przypadku konstrukcji strunobetonowych lub sprężenia wsporników belek oraz płyt.

Swobodna trasa kabla – trasa kabla składa się z prostych odcinków oraz łuków o określonym w projekcie promieniu gięcia kabla. Mimośród jest zmienny w zależności od rozpatrywanego odcinka.

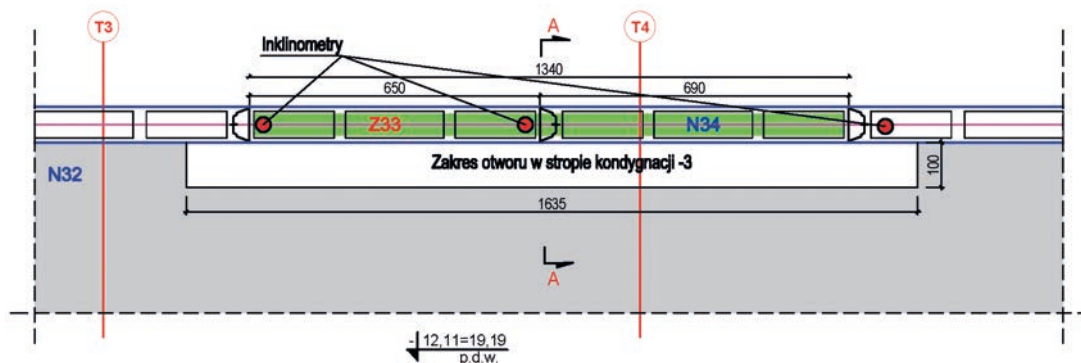
Krzywoliniowa trasa kabla – trasa kabla ma najczęściej kształt paraboliczny na całej długości elementu. Mimośród jest zmienny w danym punkcie trasy kabla.

SYSTEM SPRĘŻAJĄCY ZASTOSOWANY W ŚCIANIE SZCZELINOWEJ

Sprężenie sekcji ściany szczelinowej wykonano w fundamencie budynku będącym przedmiotem inwestycji I etapu zabudowy mieszkaniowej i usługowej wraz z garażem podziemnym oraz infrastrukturą techniczną. Budynek zaprojektowano jako monolityczny, w którym łączna powierzchnia użytkowa wynosi ponad 14 000 m². Wysokość obiektu waha się od VI do XII kondygnacji nadziemnych. Część podziemną stanowi trzykondygnacyjny garaż. Na podstawie geometrii wykopu wytypowano odcinek ściany szczelinowej o wysokości 15 m i rozpiętości 2 sekcji (Z33 i N34), który został sprężony (rys. 4, 5). Decydującą rolę w wyborze lokalizacji miała możliwość ograniczenia punktów podparcia obudowy wykopu z dwóch do jednego poprzez pozostawienie otworu w stropie kondygnacji ”-3” o szerokości



Rys. 3. Przekrój przez odcinek sprężonej ściany szczelinowej

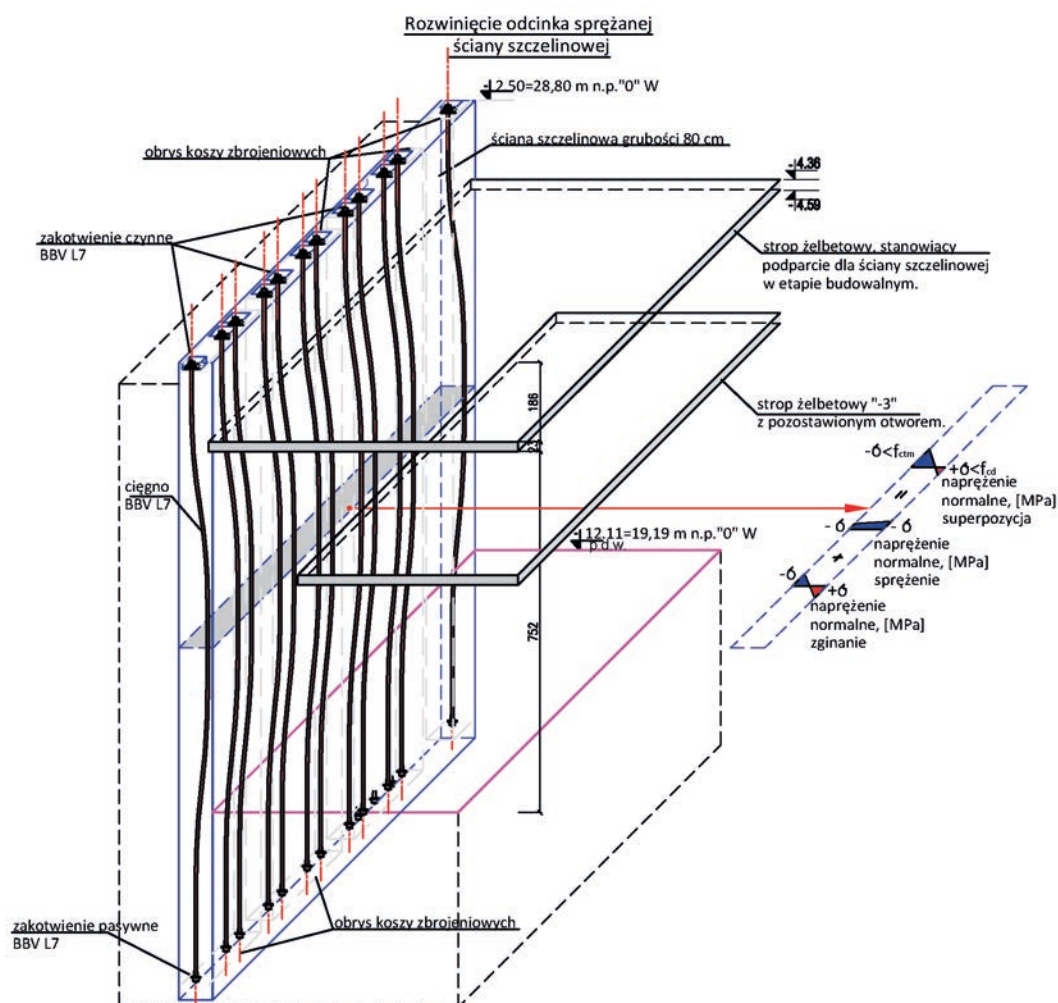


Rys. 4. Rzut sprężanych sekcji ściany szczelinowej

kości 100 cm i długości w planie 16,35 m (rys. 3, 4). Zwiększona odległość pomiędzy punktem podparcia ściany szczelinowej a dnem wykopu umożliwiła lepszą weryfikację pracy zastosowanego sprężenia. Geometria otworu w stropie kondygnacji "-3" była tak dobrana, aby w przypadku zaobserwowania odkształceń ściany szczelinowej wykraczających poza założone dopuszczalne wartości możliwa była szybka reakcja w postaci rozparcia ściany o strop "-3" i jego uzupełnienie.

Odształcenia ściany szczelinowej monitorowane były przez pomiary inklinometryczne oraz geodezyjne w poziomie odczepu ściany szczelinowej.

Sprężenie ścian szczelinowych miało za zadanie ograniczenie odkształceń oraz naprężenia rozciągającego poniżej wytrzymałości betonu na rozciąganie. Dokładnie tak jak ma to miejsce w przypadku pozostałych konstrukcji sprężonych, gdzie sprężenie przeciwdziała obciążeniu ciężarem własnym oraz innym obciążeniom zewnętrznym. Jediną zmianą z jaką mamy do czynienia w porównaniu z konwencjonalnymi konstrukcjami sprężonymi jest pomijanie wpływu ciężaru własnego konstrukcji, ponieważ działa on w płaszczyźnie sprężenia. W analizie uwzględniono obciążenia generowane przez parcie gruntu i wody gruntowej.



Rys. 5. Schemat przedstawiający odcinek sprężonej ściany szczelinowej

Zastosowane sprężenie ścian szczelinowych pełniło jedynie rolę tymczasową. Po wykonaniu płyty fundamentowej oraz stropów części podziemnej nastąpiło zwolnienie naciągu i usunięcie elementów zakotwienia znajdujących się powyżej oczepu ściany szczelinowej oraz wykonanie zabezpieczenia antykorozyjnego.

RODZAJ ZASTOSOWANEGO SPRĘŻENIA

W opisywanym rozwiązaniu zastosowano sprężanie ka-
błobetonowe. Trasa kabla o swobodnej geometrii składała się z prostoliniowych oraz krzywoliniowych odcinków o długości 470 cm (rys. 6).

Kable zaprojektowano z mimośrodem równym 100 mm względem osi obojętnej przekroju. Zastosowano system sprężenia betonu bez przyczepności BBV L7 bazujący na Europejskiej Aprobacie „ETA-05/0202 Systemy wewnętrznego sprężenia betonu BBV L3 – BBV L31” [2]. Ciężna oraz zakotwienia bierne zainstalowano i wytrasowano na budowie w koszu zbrojeniowym. Sprężenie ciężen nastąpiło po zabetonowaniu sekcji i osiągnięciu przez beton odpowiedniej wytrzymałości (według aprobaty technicznej).

W zastosowanym systemie sprężenia wyodrębnić możemy trzy podstawowe grupy elementów:

Zakotwienie czynne

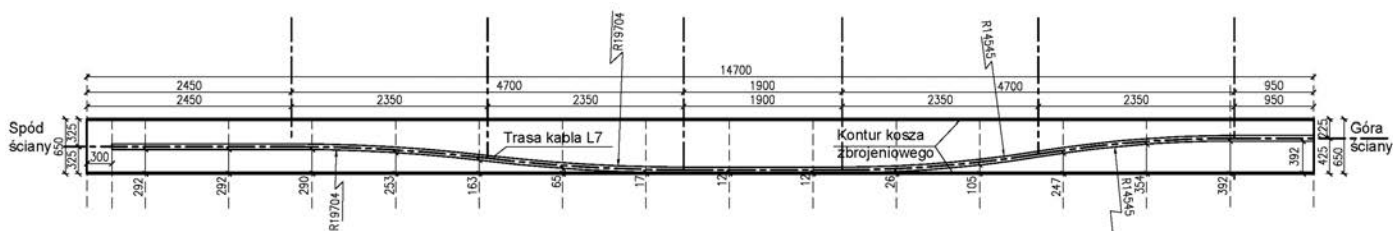
Głównymi elementami składowymi zakotwienia czynnego są: płyta oporowa, głowica oraz kliny kotwiące ciężno. Dodatkowymi akcesoriami jest stalowa trąbka wraz ze spiralą lokalnie wzmacniającą beton (rys. 7, 8). Od strony zewnętrznej, w zależności od systemu, występują akcesoria związane z ochroną antykorozyjną ciężna sprężającego oraz zakotwienia (między innymi rurki iniekcyjne).

Ciężno sprężające

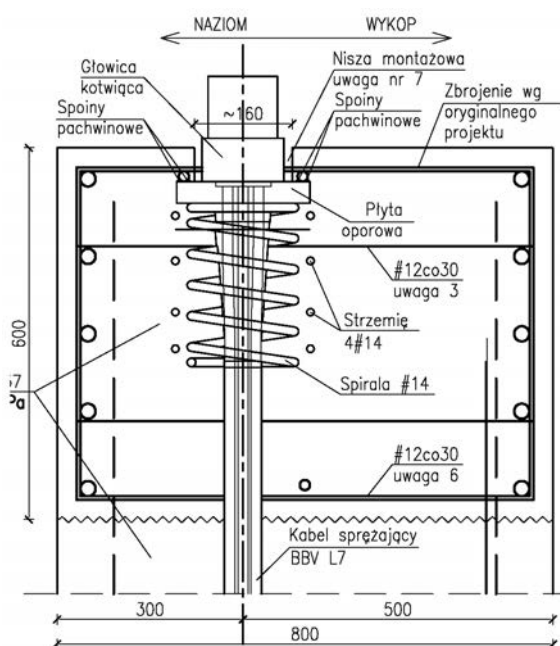
Każdy kabel składał się z 7 ciężen prowadzonych w osłonie z PE, które osadzono w polietylenowym kanale. Ciężna wykonano z siedmiodrutowych splotów o łącznej średnicy ϕ 15,7 mm ze stali nisko relaksacyjnej Y1860 (rys. 9, 10).

Zakotwienie bierne

Konstrukcja zastosowanego zakotwienia biernego zbliżona jest do konstrukcji zakotwienia czynnego, rozróżnia je jednak brak rurki do iniektowania smaru lub zaczynu cementowego (rys. 11, 12).



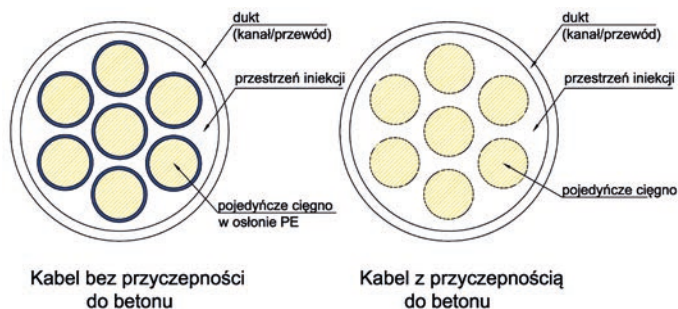
Rys. 6. Przebieg kabla sprężającego – według opracowania BBV Systems



Rys. 7. Schemat zakotwienia czynnego BBV L7 – według opracowania BBV Systems



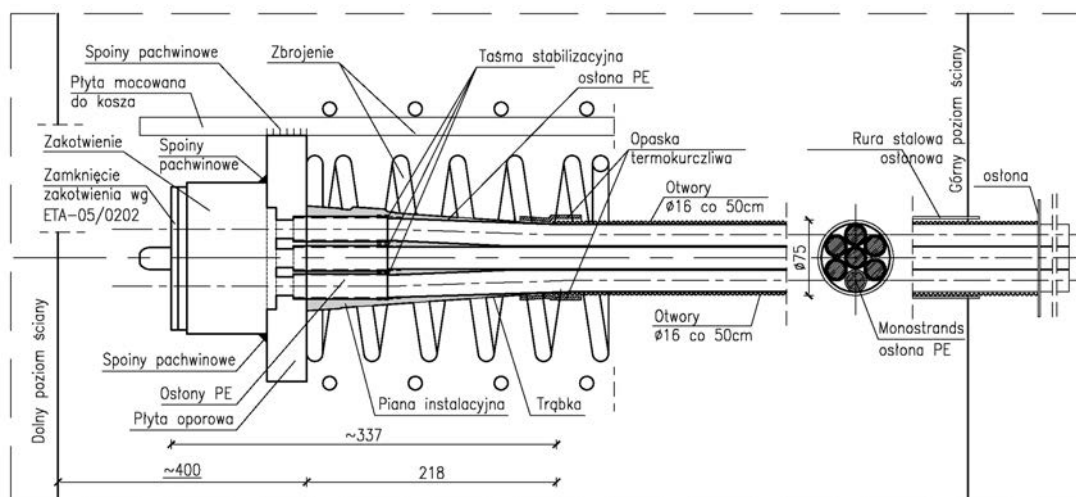
Rys. 8. Głowica zakotwienia czynnego



Rys. 9. Przekrój przez kabel sprężający (bez / z przyczepnością)



Rys. 10. Wiązki splecionych drutów



Rys. 11. Głowica zakotwienia biernego BBV L7 – według opracowania BBV Systems



Rys. 12. Zakotwienie biernie

ETAPY WYKONAWSTWA SPRĘŻONEGO ODCINKA ŚCIANY SZCELINOWEJ

Montaż kabli w koszu zbrojeniowym

Klatki zbrojeniowe w sprężanych sekcjach ściany szczelinowej specjalnie zaprojektowano i przygotowano. W tym celu wyposażono je w dodatkowe podpory montażowe. Elementy systemu sprężającego montowane były na placu budowy przez specjalistyczną brygadę montażową z firmy BBV Systems. Cię-

gna sprężające sprefabrykowano w hali produkcyjnej w Gdańsku i przetransportowano na plac budowy. Przygotowanie kabli w zakładzie znacząco usprawniło prace na budowie i pozwoliło na szybki oraz precyzyjny montaż na placu budowy. Kable systemu BBV L7 zaprojektowano i zainstalowano przy zachowaniu minimalnego osiowego rozstawu odpowiadającego betonowi o wytrzymałości minimum 34 MPa w chwili wprowadzenia sprężenia według aprobaty.

Głębień sekcji ściany szczelinowej

Po przygotowaniu klatek zbrojeniowych sprężanej sekcji ściany szczelinowej na placu budowy rozpoczął się etap głębień sekcji w zawieszinie bentonitowej, która zapewniała stateczność szczeliny. Po osiągnięciu rzędnej projektowej przed osadzeniem klatek w szczelinie przeprowadzono odpiaszczanie sekcji w celu zachowania poprawnego kontaktu zbrojenia z betonem.

Instalacja klatek zbrojeniowych

Po odpowiednim wykopaniu i przygotowaniu sekcji nastąpiła faza instalacji klatki zbrojeniowej do szczeliny (rys. 13). Instalowane klatki były jednoczęściowe. Nie było zatem potrzeby łączenia ich na placu budowy.



Rys. 13 Podnoszenie i instalowanie kosza zbrojeniowego z kablami sprężającymi

BETONOWANIE SPRĘŻONYCH SEKCJI ŚCIANY SZCZELINOWEJ

Po zainstalowaniu koszy zbrojeniowych na rzędą projektową i zablokowaniu ich o murki prowadzące nastąpił etap betonowania sekcji metodą kontraktor.

Wykonanie oczepek ściany szczelinowej wraz z montażem zakotwień czynnych

Po zabetonowaniu sekcji i osiągnięciu przez beton wymaganej wytrzymałości nastąpiło skucie warstwy betonu słabego występującego na ostatnich górnych 30 ÷ 50 cm ściany szczelinowej. W odpowiednio wykonanym oczepie zamontowano zakotwienie czynne z dodatkowym zbrojeniem wymaganym ze względu na wykonanie sprężenia. W przypadku gdyby wymagana była większa wytrzymałość betonu na ściskanie, możliwe jest wykonanie oczepu z betonu o wyższej wytrzymałości w stosunku do ściany szczelinowej.



Rys. 14. Etap sprężania ściany szczelinowej prasą sprężającą BBV L7

Sprężanie kabli

Sprężenie elementu betonowego następuje, gdy wytrzymałość betonu na ściskanie, zarówno ściany szczelinowej jak i oczepu żelbetowego, osiąga wymaganą wartość, to jest minimum 80% wytrzymałości gwarantowanej (rys. 14). Każdy kabel w pierwszym kroku (od sekcji N-34 w kierunku Z-33) sprężono do wartości 50% siły sprężającej, następnie kable doprężono do poziomu 100% dopuszczalnej siły sprężającej wynoszącej $N = 1428$ kN (maksymalna siła sprężenia według aprobaty ETA-05/0202).

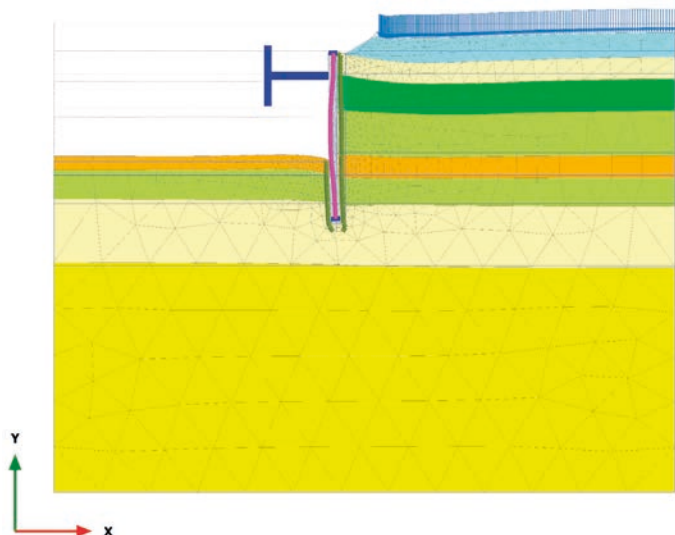
Analiza obliczeniowa

Obliczenia sprężanego odcinka ściany szczelinowej wykonano w trzech programach obliczeniowych. Pierwszą część obliczeń wykonano w programie GGU – Retain. Drugą część przeprowadzono w programie obliczeniowym SOFiStiK ver. 18.1, który umożliwił analizę konstrukcyjną sprężanej ściany szczelinowej.

Trzecią część obliczeń wykonano w programie Plaxis 2D, w którym podjęto próbę modelowania zachowania sprężonej ściany szczelinowej podczas głębienia wykopu.

Program GGU-Retain posłużył do wyznaczenia sił oddziałujących na ścianę szczelinową wynikających z parcia gruntu oraz wody gruntowej, a także do wstępnej analizy zabezpieczenia wykopu.

Analiza numeryczna, przeprowadzona w programie Plaxis 2D, miała za zadanie sprawdzić przemieszczenia ośrodka gruntowego wraz ze sprężanym elementem oporowym, którym była ściana szczelinowa. Efekt sprężenia zamodelowano przez użycie elementu "node to node" umożliwiającego wprowadzenie



Rys. 15. Plaxis 2D – Deformacja układu

siły ściskającej do przekroju (rys. 15). Wyodrębnione warstwy gruntowe modelowane były za pomocą modeli gruntowych Hardening Soil i HS Small. Do modelowania betonu użyto modelu liniowo-sprężystego.

Program SOFiSTiK, zastosowany do złożonej analizy statyczno-wytrzymałościowej, umożliwiał kompleksowe modelowanie efektu sprężenia ściany szczelinowej. Grunt w strefie oporu zamodelowano za pomocą sprężystych podpór o zmiennej liniowo sztywności. Sztywność podpór wyznaczono na podstawie wzorów empirycznych oraz doświadczeń własnych. Po przekroczeniu reakcji granicznych podpór (wynikających z oporu granicznego gruntu) były one zastępowane siłami równymi reakcom granicznym. Zachowanie takie pozwalało na kontrolę mobilizacji gruntu po stronie oporu, czyli niedopuszczenie do

sytuacji, w której wartości reakcji granicznych gruntu w podparach zostałyby przekroczone.

Analizę statyczną wykonywaną w programie SOFiSTiK przeprowadzono dla dwóch głównych schematów statycznych wynikających z pracy ściany szczelinowej podczas głębienia wykopu:

- w pierwszym schemacie ściana pracuje jako wspornik podparty podłożem gruntowym (korona ściany przemieszcza się w kierunku do wykopu),
- w drugim schemacie ściana pracuje jako belka podparta stropem oraz gruntem poniżej dna wykopu (wykop do poziomu projektowanego).

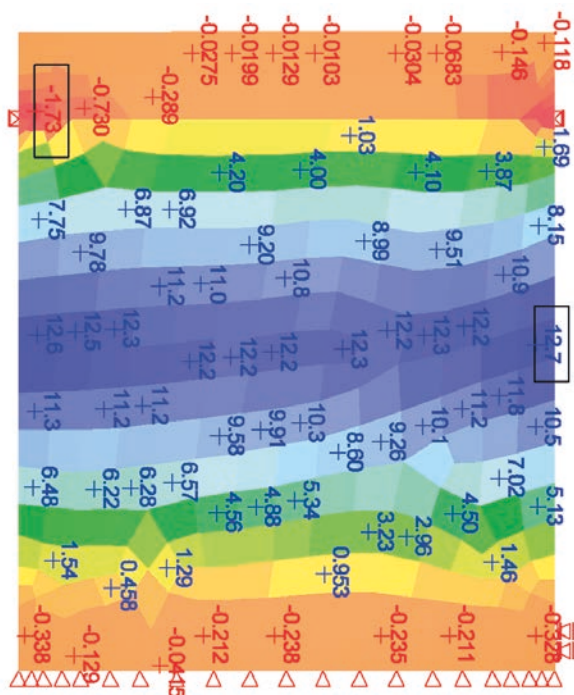
W analizie wykonanej w programie SOFiSTiK uwzględniono stratę siły sprężającej wynikającą z pełzania betonu w następstwie stałego parcia gruntu (w obliczeniach straty reologiczne uwzględniono przez redukcję wartości siły sprężającej).

Klasy wyrobów wykorzystanych do wykonania sprężanego odcinka ściany szczelinowej:

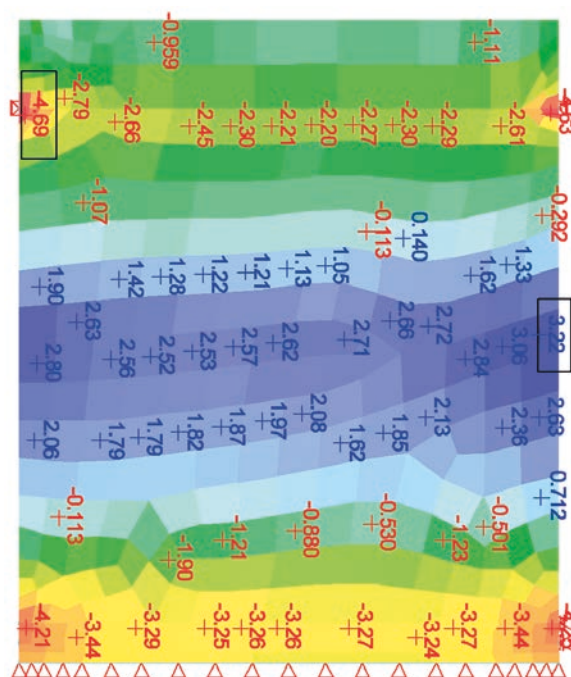
- ściana szczelinowa, oczepek żelbetowy – beton C30/37,
- zbrojenie ściany szczelinowej – stal A-IIIN,
- stal sprężająca Y1860.

Parametry wytrzymałościowe wykorzystanych wyrobów – system sprężenia bez przyczepności:

- maksymalne naprężenie rozciągające 2,9 MPa,
- maksymalne naprężenie ściskające 13,5 MPa,
- maksymalne dopuszczalne wartości rys: wykop 0,2 mm; grunt 0,3 mm,
- otulina 75 mm,
- siła sprężająca 1 428 kN,
- kryterium pionowości ściany 10 mm/1 mb.



Rys. 16. Mapa naprężenia rozciągającego bez sprężenia, kombinacja charakterystyczna [MPa] – według opracowania BBV Systems



Rys. 17. Mapa naprężenia rozciągającego ze sprężeniem, kombinacja charakterystyczna [MPa] – według opracowania BBV Systems

Do analizy zastosowano tradycyjne kombinacje obliczeniowe oparte na analizie warunków stanu granicznego nośności (ULS) oraz stanu granicznego użytkowania (SLS). Podstawowymi obciążeniami oddziałującego na ścianę wykopu są:

- G – obciążenie ciężarem własnym (ciężar ściany szczelinowej),
- G_w – obciążenie parciem zwierciadła wody gruntowej,
- E_a – parcie gruntu,
- Q – obciążenie naziomu wykopu,
- I – imperfekcje wykonania ściany szczelinowej,
- P – obciążenie w danej kombinacji.

WNIOSKI

Przeprowadzona próba sprężenia odcinka ściany szczelinowej zakończyła się powodzeniem. Ściana, pomimo znacznej rozpiętości obliczeniowej między punktem podparcia (strop kondygnacji "-2") a dnem wykopu, tak zwanego przęsła, pod działaniem obciążenia nie przekroczyła dopuszczalnych wartości odkształceń (niewielkie odkształcenia ściany na całej wysokości).

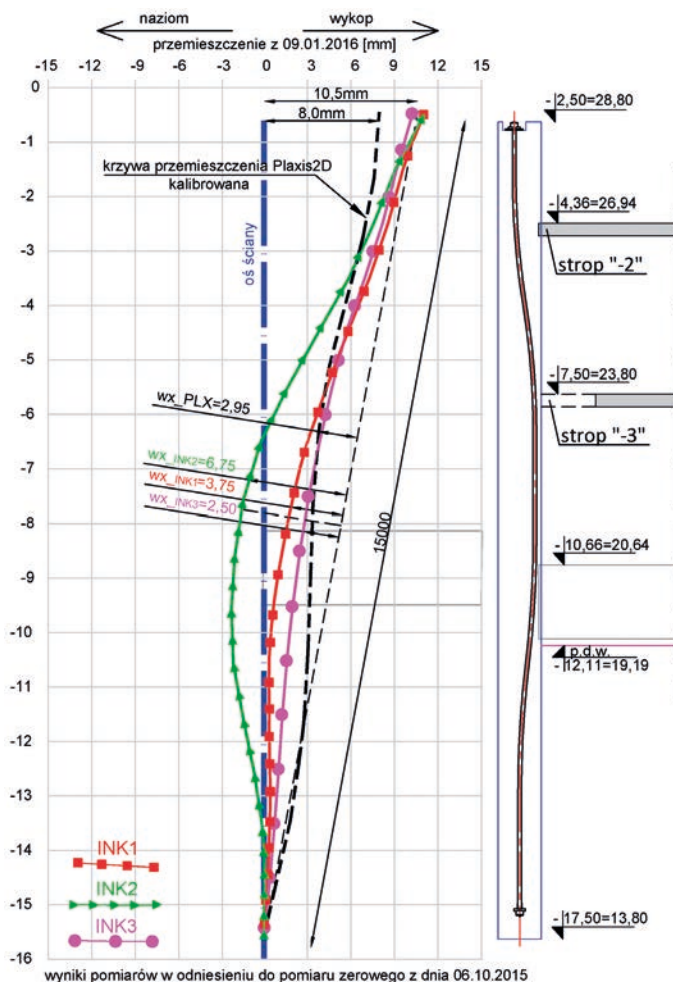
Na przykładzie realizacji wykopu przy ul. Skierniewickiej 34 w Warszawie dowiedziono, że możliwe jest zainstalowanie kabli sprężających w klatkach zbrojeniowych na placu budowy. Jednakże lepszym rozwiązaniem jest instalacja systemu sprężającego w klatkach zbrojeniowych w zakładzie prefabrykacji koszy zbrojeniowych, co wiąże się z oszczędnością miejsca na placu budowy oraz lepszą aranżacją prac.

W technologii sprężania ścian szczelinowych należy pamiętać o zachowywaniu jak najmniejszej liczby kabli sprężających w jak największych rozstawach. Ze względu na zwiększoną liczbę przeszkód wynikającą z systemu sprężającego mieszanka betonu powinna być odpowiednio dostosowana, a zawieszona przed betonowaniem dokładnie odpiaszczona. W przeciwnym razie możemy mieć problemy z zachowaniem otuliny zbrojenia.

Metoda elementów skończonych wydaje się być najwłaściwsza do analizy przemieszczeń sprężanej obudowy wykopu. Uzyskane wyniki przemieszczeń z analizy przeprowadzonej w programie Plaxis 2D były najbliższe realnym wartościom pomierzonym na budowie (rys. 18). Jednakże, w obecnej chwili, nie było możliwe wymiarowanie systemu sprężenia za pomocą tego programu.

W celu opracowania skutecznej metody obliczeń sprężanych konstrukcji betonowych w programach geotechnicznych opartych na metodzie elementów skończonych konieczne są dalsze prace. Opracowanie nowego modelu konstytutywnego dla betonu, umożliwiającego zadanie dodatkowych warunków brzegowych opisujących sprężenie, pozwoliłoby na pełną analizę elementów sprężanych i wykorzystanie ich do obliczeń obudów wykopów.

Przeprowadzając obliczenia równoległe w programie geotechnicznym i konstrukcyjnym, należy dążyć do uzyskania zbieżnych wartości przemieszczeń w obu programach. Siły działające na ścianę wynikające z parcia gruntu, wody gruntowej, obciążeń naziomu oraz podatności podłoża, otrzymane z analiz przeprowadzonych w programach geotechnicznych, po-



Rys. 18. Porównanie wyników analizy Plaxis 2D z wynikami przemieszczeń inklinometrycznych

winny zostać przeniesione do programu konstrukcyjnego w charakterystycznych etapach pracy ściany.

Należy pamiętać, że przy wykonywaniu obliczeń w programach konstrukcyjnych konieczne jest przeprowadzenie analizy wszystkich decydujących etapów z zastosowaniem odpowiedniej sztywności podparć obudowy (uwzględniając ewentualny wpływ temperatury). Pominięcie części etapów pracy obudowy lub modelowanie podpór o złej sztywności może doprowadzić do nieprawidłowych wyników końcowych. Dlatego tak ważne jest przeprowadzenie korelacji między dwoma programami do uzyskania akceptowalnej zbieżności wyników odkształceń analizowanego schematu.

Podsumowując, wykonywanie sprężonych ścian szczelinowych może przynieść zakładane korzyści w postaci:

- zredukowania ilości materiałów niezbędnych do wykonania obudowy wykopu,
- zwiększenie tempa realizacji prac na budowie przez ominięcie etapowania robót ziemnych lub ich znaczne skrócenie przez redukcję liczby podparć obudowy wykopu.

Decydując się na system sprężający, uzyskujemy dodatkowo poprawienie parametrów użytkowych ścian, takich jak ograniczenie szerokości rozwarcia rys oraz ograniczenie wartości naprężenia rozciągającego (rys. 16, 17).

Sprężenie obudów wykopów należy traktować jako rozwiązanie specjalne, które jest niezwykle trudnym zagadnieniem pod wieloma względami wykonawczymi i obliczeniowymi. Dlatego wymaga ono współpracy doświadczonych projektantów zarówno w zakresie geotechniki, jak i sprężanych konstrukcji betonowych. Cały proces wymaga odpowiedniej koordynacji na etapie przygotowywania dokumentacji projektowej. Należy pamiętać też o odpowiednim przygotowaniu produkcji klatek zbrojeniovych z systemem sprężającym wraz z planem monitorowania ich jakości tak, aby uniknąć niewłaściwego montażu systemu sprężającego oraz użycia wadliwych klatek zbrojeniovych.

LITERATURA

1. Ajdukiewicz A., Mames J.: Konstrukcje z betonu sprężonego.
2. Materiały dotyczące systemu sprężenia BBV SYSTEMS Sp. z o.o.
3. Projekt Wykonawczy ściany szczelinowej na potrzeby budowy zespołu zabudowy mieszkaniowej i usługowej w Warszawie – Etap I Keller Polska.
4. Projekt Wykonawczy sprężenia ściany szczelinowej na potrzeby budowy zespołu zabudowy mieszkaniowej i usługowej w Warszawie – Etap I BBV Systems.
5. Wykorzystane programy obliczeniowe: GGU Retain version 9, Plaxis 2D, SOFiSTIK v 18.2.