

Geotechnika w infrastrukturze komunikacyjnej na przykładzie budowy Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju

Dr inż. Tomasz Kozłowski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Geotechnika jest nauką o pracy i badaniach ośrodka gruntowego na potrzeby projektowania i wykonawstwa budowli ziemnych i podziemnych oraz fundamentów budynków i nawierzchni drogowych [8]. Jest specjalizacją specjalności konstrukcyjno-budowlanej, określoną w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju w sprawie samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie [5].

Znaczną część robót budowlanych związanych z budową infrastruktury transportowej stanowią roboty geotechniczne. Przykładem może być budowa czterokilometrowej trasy Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju (SST) na terenie Międzyodrza, w złożonych warunkach gruntowych. W celu realizacji trasy tramwajowej wykonano 788,9 m wykopu obudowanego w technologii ścian szczelinowych, na długości 455 m wzmocniono podłoże gruntowe w technologii kolumn podatnych MSC (Menard Suple Columns), posadowiono na palach fundamentowych estakadę, kładkę nad przystankiem tramwajowym, budynki stacji prostownikowych, ekrany akustyczne, przesunięto o około 45 m, a następnie obrócono budynek jednorodzinny – willę Grüneberga o ciężarze 7000 kN. Inwestycja obejmowała również budowę tunelu dla pieszych pod torami kolejowym i tunelu dla pieszych pod torowiskiem tramwajowym, budowę wiaduktu drogowego nad torami tramwajowymi i budowę trzech stacji prostownikowych. Roboty geotechniczne prowadzone w ramach tej inwestycji były związane również z budową nasypów, wykopów, podbudów pod drogi i torowiska, głębokich wyko-

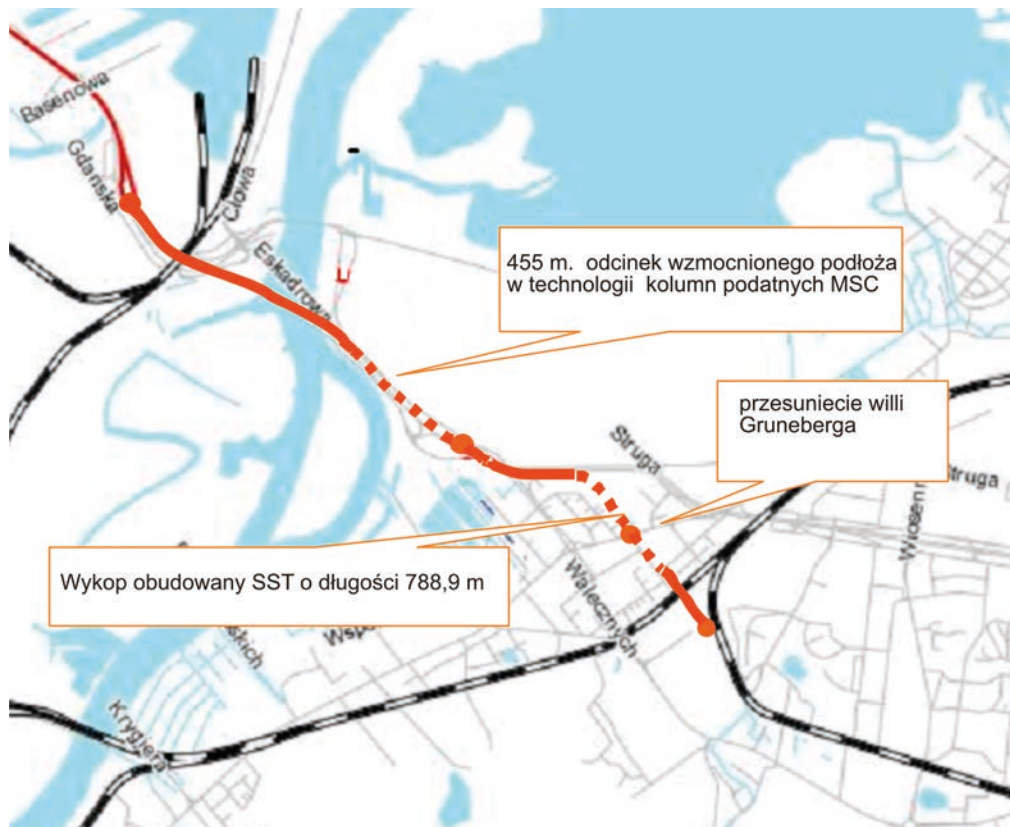
pów liniowych, głębokich wykopów punktowych pod budowę pompowni i komór kanalizacyjnych. Ze względu na wysoki poziom wód gruntowych, w przypadku części wykonywanych wykopów, obniżano lokalnie ich zwierciadło.

W niniejszym artykule, ze względu na duży zakres robót geotechnicznych przy budowie Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju, przedstawiono tylko roboty związane z budową wykopu w technologii ścian szczelinowych i roboty związane ze wzmocnieniem podłoża pod nasypem tramwajowym w technologii kolumn podatnych MSC.

SZCZECIŃSKI SZYBKI TRAMWAJ

Do 2015 roku układ komunikacyjny linii tramwajowych w Szczecinie obejmował jedynie lewobrzeżną część miasta i kończył się na pętli Basen Górnicy na terenie Międzyodrza. Koncepcje budowy połączenia tramwajowego prawobrzeżnej i lewobrzeżnej części Szczecina opracowano już w latach siedemdziesiątych XX wieku. W obecnym projekcie SST przewiduje się budowę bezkolizyjnego połączenia tramwajowego o długości 6,9 km od istniejącej sieci tramwajowej na pętli Basen Górnicy do pętli Kijewo przy ulicy Dąbskiej.

Miasto Szczecin długo przygotowywało się do realizacji zadania, a pierwsze roboty budowlane na potrzeby SST wykonano latach 1993-2003, w ramach budowy „Przeprawa mostowa



Rys. 1. Schemat przebiegu trasy I etapu Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju

przez rzekę Regalicę w Szczecinie”, gdy wybudowano most tramwajowy i wiadukty dojazdowe umożliwiające zaprojektowanie bezkolizyjnej trasy tramwajowej.

W kwietniu 2013 roku Gmina Miasto Szczecin podpisała umowę z konsorcjum firm Szczeciński Tramwaj sp. z o.o. – Strabag sp. z o.o., której przedmiotem była budowa I etapu Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju.

Przedsięwzięcie to obejmowało budowę trasy szybkiego tramwaju na odcinku od Basenu Górniczego do pętli pośredniej „Turkusowa” o długości 4 km. Powstało torowisko biegnące po estakadach i moście przez rzekę Regalica. W dalszej części linia tramwajowa biegnie po powierzchni terenu oraz w wykopie obudowanym. Po przekroczeniu Regalicy, linia tramwajowa przebiega między jezdniami ulic Hangarowej i Eskadrowej, po czym – bezkolizyjnie dla ruchu samochodowego – skręca na ulicę Jaśminową, a dalej jest prowadzona pod wiaduktem kolejowym w kierunku osiedla Słonecznego. Inwestycja obejmowała również budowę 2 wiaduktów, estakady, 2 tuneli dla pieszych, 3 stacji prostownikowych, kładki dla pieszych, 3 przystanków tramwajowych, pętli tramwajowej, centralnej dyspozytorni oraz przebudowę i budowę sieci oraz dróg.

W maju 2015 roku przekazano do eksploatacji odcinek pierwszego etapu Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju. Wartość projektu wynosiła 188,5 mln PLN. Projekt budowy pierwszego etapu Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju jest współfinansowany przez Unię Europejską z Funduszu Spójności – wartość dofinansowania wynosi 86,1 mln PLN.

W dniu 18.08.2015 roku, pierwszy raz od zakończenia II Wojny Światowej, tramwaj przejechał z lewobrzeżnej części miasta Szczecin na część prawobrzeżną.

WYKOP OBUDOWANY NA POTRZEBY SZCZECIŃSKIEGO SZYBKIEGO TRAMWAJU

Z wybudowanej czterokilometrowej linii tramwajowej odcinek o długości 788,9 m przebiega w wykopie obudowanym konstrukcją żelbetową w technologii ścian szczelinowych (zwanym potocznie wanną). Głębokość wykopu obudowanego jest zmienna, zależy od ukształtowania terenu i układu geometrycznego trasy torowiska, nie przekracza jednak około 3,5 m (licząc do powierzchni żelbetowej płyty fundamentowej o grubości 80 cm). Szerokość wewnętrzna „wanny” wynosi 10 m. Jedynie w miejscu przystanku „Gryfińska”, ze względu na budowę w wykopie 2 przykrytych peronów, szerokość wykopu wynosi 17,2 m. Spadki płyty fundamentowej obudowanego wykopu różnią się od spadków układu geometrycznego trasy torowiska. Dno wanny ukształtowane jest w sposób, który umożliwia odprowadzenie wód deszczowych poza obręb wykopu, ma spadek poprzeczny 2% w stronę prawej ściany, gdzie przebiega rura drenażowa. Spadki podłużne płyty fundamentowej przebiegają w kierunku środkowej części obudowanego wykopu. Z tego miejsca jest odpompowywana woda z drenażu, poza obręb „wanny”, do grawitacyjnej sieci deszczowej.

Podłoże terenu wzdłuż budowanego torowiska w wykopie obudowanym tworzą osady wieku czwartorzędowego wykształcone jako późnopleistoceny utwory rzeczne oraz lokalnie utwory bagienne, a także powstałe w ciągu ostatnich stuleci utwory antropogeniczne – nasypy niekontrolowane i lokalnie nasypy budowlane. Poziom terenu układa się na rzędnych od 2,1 do 5,2 m n.p.m.. Pierwszą warstwę geotechniczną stanowią zasadniczo nasypy niekontrolowane (Mg) złożone z piasków



Rys. 2. Zabezpieczenie tymczasowe rozporami wykopu obudowanego wraz ze zbrojeniem płyty fundamentowej

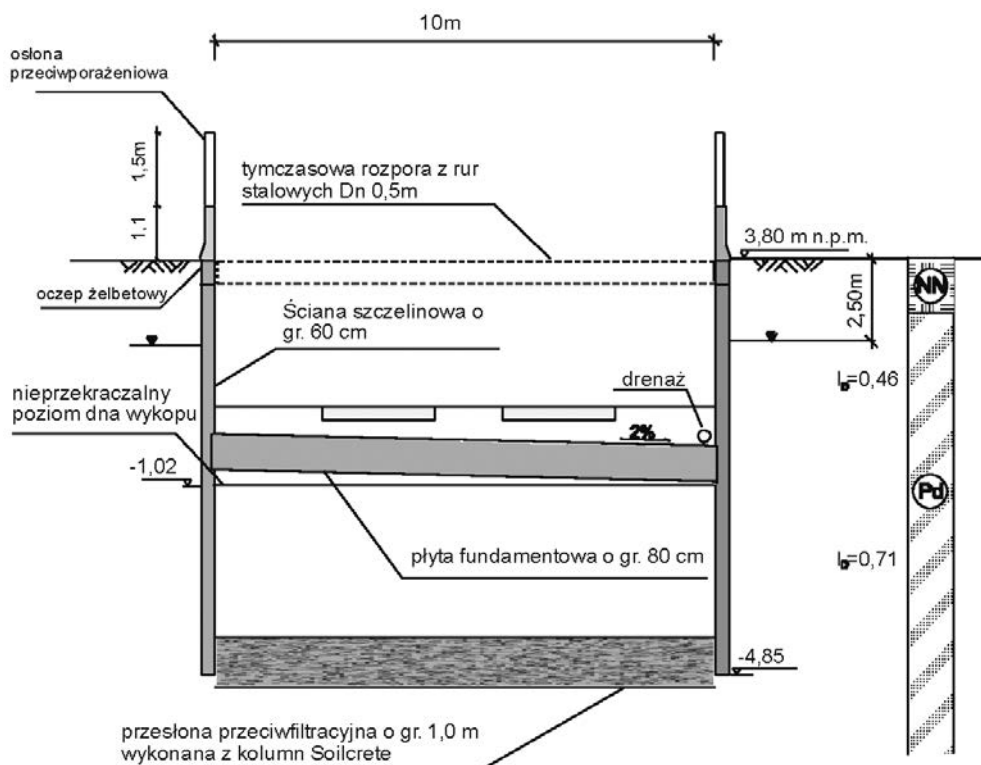


Rys. 3. Przygotowany do odbioru obudowany wykop Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju – odcinek przy ulicy Batalionów Chłopskich

drobnych o stopniu zagęszczenia od $I_D = 0,2$ do $I_D = 0,4$, z domieszkami – najczęściej humusem. Miąższość warstwy nasypów waha się od 0,4 do 4,8 m. Drugą warstwę geotechniczną stanowią średnio zagęszczone rzeczne piaski drobne lub piaski drobne na pograniczu piasku średniego, wilgotne i nawodnione. Miąższość poszczególnych stref piasków warstwy II waha się od 0,3 do 6 m. Warstwa ta najczęściej zalega pod nasypami niekontrolowanymi. Trzecią warstwę geotechniczną stanowią zagęszczone rzeczne piaski drobne, podrzędnie piaski drobne na pograniczu piasku średniego (FSa/MSa), wilgotne i nawodnione. Warstwa ta jest położona najczęściej pod drugą warstwę geotechniczną. Niemniej w kilku miejscach układa się bezpośrednio pod nasypami. Lokalnie występują grunty organiczne, które

stanowią madowe gliny pylaste humusowe o niewielkiej miąższości $0,4 \div 1,4$ m. Grunty te występują w najpłytszych partiach mineralnego podłoża. Grunty organiczne nie stanowiły problemu przy posadowieniu torowiska w wykopie obudowanym, ponieważ usunięto je w trakcie budowy, ze względu na fakt, że znajdowały się powyżej poziomu posadowienia płyty fundamentowej. Woda gruntowa stabilizuje się na głębokościach od $1,4 \div 3,0$ m p.p.t., to jest na rzędnych $0,3 \div 2,4$ m n.p.m..

Konstrukcję wanny wykonano w technologii żelbetowych ścian szczelinowych, z płytą fundamentową zamocowaną w ścianach. Tymczasowe zabezpieczenie przed napływem wody gruntowej podczas realizacji robót budowlanych stanowiła



Rys. 4. Schemat obudowy wykopu Szczecińskiego Szybkiego Tramwaju [na podstawie 2, 4]

przesłona przeciwfiltracyjna o grubości około 1,0 m wykonana w technologii *jet-grouting*. Przesłonę przeciwfiltracyjną tworzą zachodzące na siebie krótkie kolumny Soilcrete połączone z wykonanymi uprzednio ścianami szczelinowymi. Większość z 1800 kolumn iniekcyjnych, wykonanych z cementogruntu, ma średnicę 3,3 m i długość 1,0 m (zastosowano cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S, 32R). Docelowe zabezpieczenie przeciw napływowi wody do wnętrza wanny stanowi 80 cm płyta fundamentowa. Ściany szczelinowe, wykonane z betonu C30/37 W8, mają grubość 0,6 m i długość od 6 do 8,55 m, były wybudowane w sekcjach o długościach od 3 do 6 m. Od góry ściany szczelinowe są zwieńczone oczepem żelbetowym o wysokości około 0,5 m. Ściany szczelinowe do momentu wykonania płyty fundamentowej były tymczasowo rozpięte rurami stalowymi (o średnicy 0,5 m) zamontowanymi w poziomie oczepu żelbetowego. Rozpory montowano po wykonaniu wykopu wstępnego o głębokości $0,5 \div 1,5$ m, licząc od poziomu rzędnej góry oczepu ścian szczelinowych.

Długość ścian szczelinowych dostosowano do położenia przesłony przeciwfiltracyjnej. Rzędne dna wykopu, niezbędne w robotach związanych z budową płyty fundamentowej, były zawsze powyżej tak zwanego nieprzekraczalnego poziomu dna wykopu. Poziom ten wynika ze spełnienia warunku stateczności dna wykopu ze względu na działanie ciśnienia wody (wypór). Warunek ten spełniony jest wówczas, gdy ciężar przesłony przeciwfiltracyjnej wraz z ciężarem gruntu położonego nad przesłoną jest większy od działania siły wyporu na spodzie przesłony.

W pierwotnym projekcie założono wykonanie wykopu metodą mokrą. Metoda ta polega na wybieraniu gruntu pod wodą oraz wymaga wykonania w dnie korka betonowego za pomocą betonowania podwodnego [7]. Korek betonowy ze względu na wypór wody miał być dodatkowo kotwiony za pomocą pali. Betonowanie pod wodą w celu wykonania korka betonowego wymaga doświadczonego wykonawcy, zwłaszcza w przypadku głębokich wykopów o dużej powierzchni dna. Do najważniejszych utrudnień należy zaliczyć uzyskanie wymaganej szczelności na powierzchni kontaktu korka betonowego z obudową wykopu oraz zapewnienie jednorodności i ciągłości w betonowaniu [6]. Alternatywą korka betonowego jest wykonanie poziomej przesłony przeciwfiltracyjnej metodą iniekcji strumieniowej [6]. Wykonawca robót skorzystał z tej alternatywy, wprowadzając rozwiązanie zamiennie w stosunku do pierwotnego projektu. Rozwiązanie zamiennie dotyczyło również zmiany rodzaju obudowy wykopu. Pierwotnie w projekcie założono zabezpieczenie wykopu na czas robót za pomocą ścianek szczelnych, stanowiących również zewnętrzne tracone deskowanie podczas betonowania konstrukcji żelbetowej wanny. Natomiast zabezpieczenie wykopu, zgodnie z docelowym rozwiązaniem, wykonano w technologii żelbetowych ścian szczelinowych.

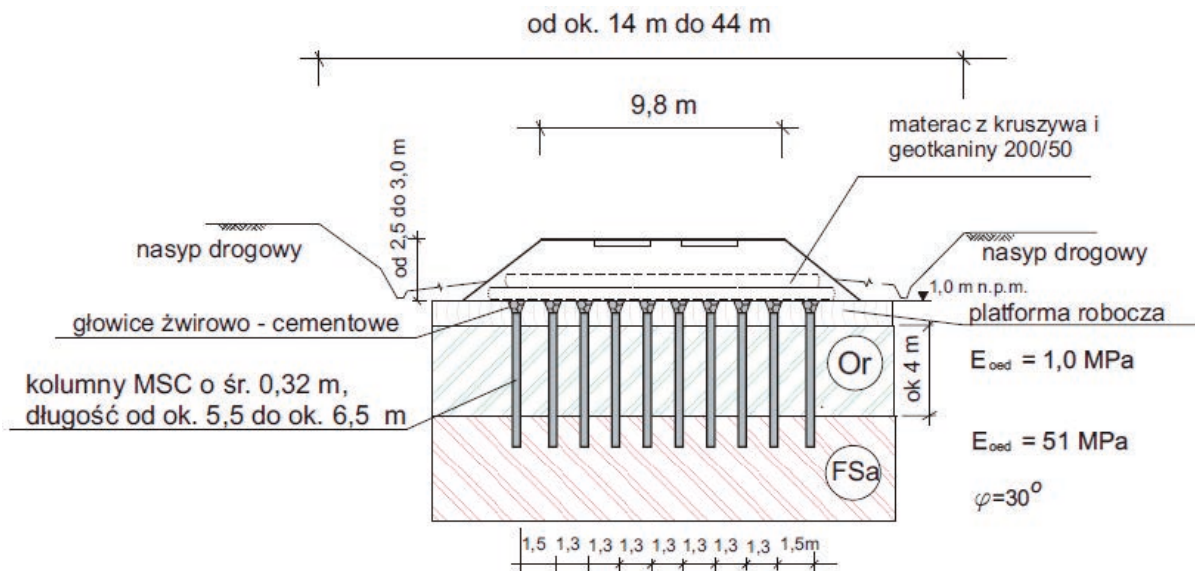
WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO POD NASYPYM TRAMWJOWYM W TECHNOLOGII KOLUMN PODATNYCH MSC

Z czterokilometrowej linii tramwajowej odcinek o długości 455 m wzdłuż ulicy Eskadrowej przebiega pomiędzy dwiema jezdniami zbudowanymi na nasypach. Pas rozdziału, na którym posadowiono torowisko tramwajowe, był obniżony

o $1,5 \div 4,0$ m w stosunku do istniejących powierzchni koron nasypów drogowych. Teren ten charakteryzuje się złożonymi warunkami gruntowo-wodnymi.

W podłożu, od powierzchni terenu, występują nasypy budowlane związane z budową wykonanych kilka lat wcześniej nasypów drogowych w ciągu ulicy Eskadrowej oraz nasypy niekontrolowane. Nasypy są słabo zagęszczone i niejednorodne (ze sporymi domieszkami humusu, namulów i gruzu). Miąższość warstw nasypów waha się od 1 do 4 m p.p.t.. Głębiej, pod nasypami zalegają holocenijskie grunty organiczne – torfy i namuły o miąższości od 1,7 do 6 m. Miejscowo grunty organiczne uległy skompromowaniu wskutek obciążenia nasypami budowlanymi i niekontrolowanymi. Poniżej warstw organicznych występują rzeczne piaski drobne w stanie średniozagęszczonym i zagęszczonym (I_D od 0,46 do 0,71). W omawianym terenie występują dwa poziomy wody gruntowej. Woda z pierwszego poziomu o zwierciadle swobodnym występuje na głębokości $0,9 \div 3,0$ m p.p.t. i przesyca warstwy nasypów. Drugi poziom wody gruntowej to woda przesycająca piaski rzeczne, zalegające poniżej torfów, nawiercona na głębokości $4,4 \div 7,9$ m p.p.t. Zwierciadło wody z drugiego poziomu stabilizuje się na głębokości $1,3 \div 1,7$ m p.p.t.. Ze względu na zaleganie w podłożu gruntowym gruntów organicznych przyjęto posadowienie nasypu tramwaju na materacu z dobrze zagęszczonego kruszywa i trzech warstw geotkaniny 200/50, opartego na kolumnach podatnych cementowo-piaskowych MSC. W tym celu wykonano 4226 sztuk kolumn MSC o średnicy 320 mm o łącznej długości 27,73 km. Zasadnicze wzmocnienie stanowiła siatka kolumn o długości kolumn od 5,5 do 6,5 m w rozstawie trójkątnym $1,3 \times 1,3$ m (skrajne rzędy w kierunku poprzecznym 1,5 m). Zasada wzmocnienia podłoża gruntowego kolumnami MSC polega na stworzeniu kompozytu gruntu i kolumn, który charakteryzuje się zwiększonymi parametrami wytrzymałościowymi w stosunku do gruntu w stanie naturalnym. W celu zapewnienia równomiernego oparcia nasypu tramwaju i przekazania obciążenia na głowice kolumn, wykonano nad nimi materac zbudowany z dobrze zagęszczonego kruszywa i zbrojony geotkaniną 200/50. W celu zmniejszenia naprężeń rozciągających przenoszonych przez geotkaniny, z których zbudowano materac, poszerzono głowice kolumn cementowo-piaskowych. Projekt wzmocnienia podłoża przewidywał osiadanie nasypu w fazie eksploatacji na poziomie 2,4 cm. Czas wykonania wzmocnienia podłoża za pomocą 4226 kolumn wyniósł 22 dni. Do wykonania kolumn zastosowano mieszankę piaskowo-cementową o wytrzymałości na ściskanie $R_m = 5,0$ MPa. Średnia wysokość nasypu tramwajowego posadowionego na kolumnach MSC wynosi około 2,5 m. Kolumny MSC, służące do wzmocnienia podłoża, należą do grupy technologii przemieszczeniowych. Oznacza to, że w trakcie wykonywania kolumn urobek gruntowy nie jest wydobywany na powierzchnię. Grunt jest natomiast przemieszczany w kierunku promieniowym. Do wykonania kolumn najczęściej stosuje się specjalnie dostosowaną stalową rurę, która jest połączona z wciskającą maszyną – urządzeniem generującym wibracje pionowe.

Rura pogrąża się pod wpływem ciężaru własnego, wibracji oraz siły docisku maszyny. Po uzyskaniu żądanej głębokości następuje podciąganie narzędzia przy jednoczesnym pompowaniu mieszanki – iniektu. Podczas wykonywania kolumn MSC są rejestrowane takie parametry kolumny jak: głębokość wykonania,



Rys. 5. Schemat wzmocnienia podłoża gruntowego pod nasypem tramwajowym wzdłuż ulicy Eskadrowej w Szczecinie [3]



Rys. 6. Budowa nasypu tramwajowego na matacach z kruszywa i geotkaniny – rejon wzmocnienia podłoża kolumnami podatnymi MSC wzdłuż ulicy Eskadrowej [9]

zużycie iniektu i pobór energii wibratora. Czynna analiza tych odczytów daje możliwość ciągłej kontroli jakości wykonania kolumn oraz weryfikacji warunków gruntowych w danym miejscu [1]. Poza rejestracją parametrów kolumn MSC podczas ich formowania w przypadku wytypowanych losowo kolumn przeprowadzono badania długości, ciągłości oraz badania nośności kolumn za pomocą obciążeń próbnych.

PODSUMOWANIE

Korzystanie z nowoczesnych technologii wzmacniania podłoża pozwala na szybką i efektywną budowę nasypów drogowych.

Rozwój technologii zabezpieczania wykopów umożliwia bezpieczne budowanie, ograniczając do minimum lub nie dopuszczając do niekorzystnego oddziaływania wykopu na sąsiednie obiekty budowlane.

Wykonawca wraz z projektantem prawidłowo przyjęli rozwiązanie projektowe i technologię prowadzenia robót fundamentowych. Wprowadzone podczas realizacji budowy rozwiązanie zamienne wykonania przesłony przeciwfiltracyjnej z metody betonowania podwodnego (korka betonowego) na metodę iniekcji strumieniowej pozwoliło na wykonanie wykopu „na sucho”, co przyczyniło się do poprawienia bezpieczeństwa i jakości robót.

LITERATURA

1. Kurek N., Zaremba A.: Modyfikacja podłoża gruntowego pod niskimi nasypami – kolumny MSC, Nowoczesne budownictwo inżynieryjne, nr 2/2013.
2. Projekt technologiczny konstrukcji wykopu obudowanego w technologii ścian szczelinowych - ściany szczelinowe dla budowy SST wykonany przez GT Projekt Sp. z o.o., Swadzim 2014, projektant Różański M., Wieczorek Ł.
3. Projekt technologiczny wykonania wzmocnienia podłoża gruntowego w technologii kolumn podatnych MSC w km 2+000 do km 2+444 dla budowy SST, wykonany przez Menard Polska Sp. z o.o., Warszawa 2013 r, projektant Binder K..
4. Projekt wykonawczy poziomej przesłony jet-grouting na terenie budowy SST wykonany przez Keller Polska Sp. z o.o. Specjalistyczne Techniki Fundamentowania, Ożarów Mazowiecki 2014, projektant Wackowski Ł, Wujek Ł..
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 11 września 2014 r w sprawie samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie – Dz.U. z dnia 24 września 2014r., Poz. 1278.
6. Topolnicki M., Buca R., Dymek D.: Bezpieczeństwo dużych i głębokich wykopów budowlanych. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2015.
7. Topolnicki M., Mitrosz O.: Zastosowanie mikropali do kotwienia i posadowienia konstrukcji pod Martwą Wisłą. Geoinżynieria drogi mosty tunele, nr 2/2016.
8. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, Warszawa 1987.
9. Strona internetowa www.szybki.tramwaj.szczecin.pl, z 05.2015.