

PRZYKŁAD USZKODZEŃ DROGI NA PODŁOŻU WZMOCNIONYM W TECHNOLOGII INIEKCJI ROZPYCHAJĄCEJ

PIOTR KOKOTKIEWICZ, e-mail: piotr.kokotkiewicz@tgd.pl

MARCIN TRZCIŃSKI

Transprojekt Gdański Sp. z o.o.

Streszczenie: Przebudowa dróg często wiąże się z koniecznością poszerzenia oraz podwyższenia istniejących nasypów. W przypadku występowania w podłożu gruntów organicznych inwestycje takie są zawsze zagadnieniem skomplikowanym i wymagającym zastosowania odpowiednich metod wzmocnienia podłoża. Znacznym utrudnieniem jest brak krajowych norm oraz wytycznych projektowych dotyczących nowoczesnych metod wzmacniania gruntu. W artykule opisano awarię drogi na podłożu wzmocnionym w technologii iniekcji rozpychającej, będącą wynikiem niedostatecznego rozpoznania warunków geotechnicznych na etapie projektowania, jak też ciągu błędnych decyzji i działań w trakcie opracowywania projektu naprawczego oraz w trakcie budowy.

Słowa kluczowe: niedostateczne rozpoznanie podłoża, grunty organiczne, awaria drogi, wzmocnienie podłoża, iniekcja rozpychająca

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich kilkunastu lat wybudowano oraz wyremontowano w Polsce wiele odcinków dróg. Zarówno nowe, jak i istniejące drogi przebiegają lokalnie przez obszary występowania gruntów o bardzo niskiej wytrzymałości oraz znacznej ściśliwości. Przebudowa istniejących dróg wiąże się często z koniecznością poszerzenia oraz podwyższenia nasypów, co w tak niekorzystnych warunkach zawsze jest zagadnieniem skomplikowanym i wymagającym zastosowania odpowiednich metod wzmocnienia podłoża gruntowego.

Obecnie stosuje się w Polsce wiele sposobów modyfikacji gruntu, mających na celu zarówno zwiększenie jego nośności, jak też ograniczenie wielkości osiadań do wartości akceptowanych. Technologie te różnią się trudnościami w trakcie realizacji, czasem prowadzenia robót oraz kosztami, co w każdym przypadku czyni zagadnienie wzmocnienia podłoża problemem techniczno-ekonomicznym.

Pod wpływem presji rynku oraz stałego dążenia do obniżania kosztów budowy i skracania czasu realizacji robót geotechnicznych (szybkie wykorzystanie efektu wzmocnienia podłoża) zakres stosowania znanych i sprawdzonych metod wzmacniania gruntu uległ znacznemu rozszerzeniu, często w kierunku metod obarczonych znacznym ryzykiem.

Dodatkowym utrudnieniem jest brak krajowych norm i wytycznych projektowych dotyczących nowoczesnych metod wzmocniania podłoża, a w normie EC7 [7] oraz w załączniku krajowym do tej normy [8] brak współczynników cząstkowych dotyczących elementów wzmocnienia podłoża. W tej sytuacji najczęstszym przypadkiem jest stosowanie w praktyce projektowej wytycznych i norm zagranicznych, które nie zawsze odpowiadają doświadczeniom oraz warunkom gruntowym występującym w Polsce.

W artykule przedstawiono awarię drogi na podłożu wzmocnionym w technologii iniekcji rozpychającej, będącą wynikiem ciągu błędów i niewłaściwych decyzji zarówno na etapie projektowania, jak i w trakcie budowy. Analiza przedmiotowego przypadku obejmowała przeprowadzenie wizji lokalnej, ocenę dokumentacji projektowych, działań wykonawcy i nadzoru

inwestorskiego, jak też określenie przyczyn awarii oraz wskazanie możliwych sposobów naprawy.

Dokładna lokalizacja analizowanego obiektu nie jest istotna, opisana sytuacja miała miejsce w ciągu jednej z przebudowywanych dróg krajowych. Niniejsza publikacja nie zawiera jakichkolwiek elementów pozwalających na identyfikację uczestników procesu inwestycyjnego, ma ona na celu wskazanie problemu oraz sposobów na uniknięcie podobnych przypadków w przyszłości.

2. Opis zaistniałej sytuacji

Odcinek nasypu o długości około 260 m, na którym doszło do awarii, stanowi fragment drogi krajowej wyremontowanej i zmodernizowanej kilka lat temu. Przeprowadzone prace wiązały się z korektą niwelety (jej nieznacznym podniesieniem – maksymalnie do dwudziestu kilku centymetrów) oraz z poszerzeniem nawierzchni jezdni z 7,0 do 10,0 m. Zwiększenie szerokości jezdni wiązało się z koniecznością poszerzenia nasypu drogowego w jego koronie, po około 1,5–2,0 m z każdej strony.

W trakcie prowadzenia prac remontowych zaobserwowano spękania nowo ułożonej warstwy wiążącej. Zdecydowano się na wykonanie dodatkowych, znacznie głębszych badań geotechnicznych. Wykazały one, że w podłożu nasypu drogowego występują osady organiczne o niskiej wytrzymałości, znacznej ściśliwości oraz zróżnicowanej miąższości. Nadmienić należy, że na etapie tworzenia pierwotnej dokumentacji projektowej wykonano na tym obszarze jedynie płytkie odwierty o głębokości 2,0 m, które nie wykazały występowania gruntów organicznych.



Rys. 1. Widok na uszkodzenia jezdni

Poszerzenie nasypu drogowego oraz związany z tym przyrost obciążeń doprowadziły do powstania nadmiernych osiadań oraz pęknięcia wykonanej nawierzchni. Dodatkowym, negatywnie oddziałującym czynnikiem, były zmiany stanu wód powierzchniowych oraz wód gruntowych (zaobserwowane w trakcie budowy zastoiska wody spowodowane brakiem konserwacji rowów melioracyjnych oraz awaria wodociągu, która spowodowała długotrwałe nawadnianie podłoża i wzrost poziomu wód gruntowych).

Aby zlikwidować przyczynę powstawania nierównomiernych osiadań oraz uszkodzeń nasypu drogowego zaprojektowano wgłębne wzmocnienie podłoża słabonośnego za pomocą iniekcji rozpychającej. Z uwagi na brak możliwości wykonania objazdu przewidziano etapowe prowadzenie robót, przy wahadłowo prowadzonym ruchu po jednym pasie drogi.

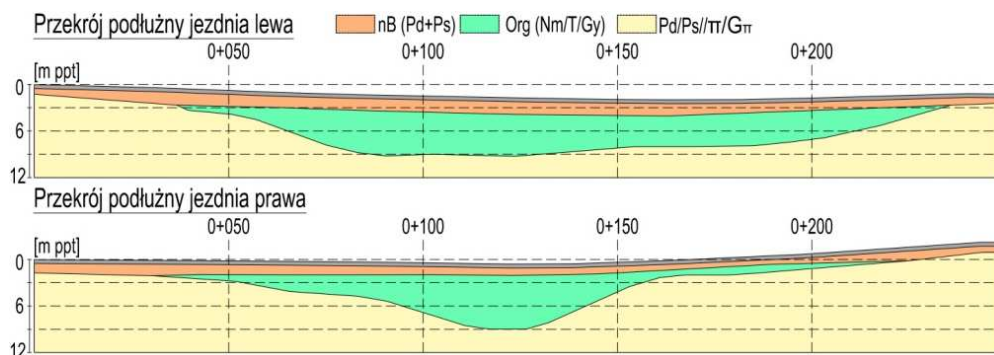
Po wykonaniu wzmocnienia oraz odbudowie drogi, w czasie jej użytkowania, na nawierzchni pojawiły się regularne, owalne wzniesienia o średnicy kilkudziesięciu centymetrów i wysokości od kilku do kilkunastu milimetrów. Uszkodzenia wystąpiły na znacznej części obszaru wykonanego wcześniej wzmocnienia, a ich układ był zbliżony do schematu wykonanych wcześniej kolumn. Stwierdzono także lokalne, podłużne spękania nawierzchni, część z nich ujawniła się na powstałych wzniesieniach. Wyniki geodezyjnych pomiarów przemieszczeń reperów, które zainstalowano po wykonaniu wzmocnienia, potwierdzały trwające w dalszym ciągu (w momencie opracowywania przez autorów ekspertyzy) osiadanie nawierzchni, co wiązało się ze stopniowym powiększaniem skali uszkodzeń.



Rys. 2. Widok na uszkodzenia jezdni

3. Warunki geotechniczne

Teren, na którym zlokalizowany jest przedmiotowy odcinek drogi, charakteryzuje się złożonymi warunkami gruntowo – wodnymi. Powierzchniowe warstwy gruntu w rejonie nasypu drogowego stanowią utwory antropogeniczne – jest to mieszanina piasków drobnych i średnich (w stanie od luźnego do średnio zagęszczonego), kamieni i humusu. Pod korpusem drogi występują mineralne grunty niespoiste oraz spoiste nieskonsolidowane (piaski drobne i średnie w stanie luźnym i średnio zagęszczonym, pyły i gliny pylaste w stanie plastycznym i twardoplastycznym), a także grunty organiczne – torfy i gytie, o niskich parametrach wytrzymałościowych (opory na stożku sondy CPT w zakresie 0,10–0,70 MPa). Spąg gruntów organicznych jest lokalnie nachylony poprzecznie do osi drogi, ich miąższość sięga około 7 m. Osady organiczne podścielone są gruntami niespoistymi – piaskami pylastymi, drobnymi i średnimi, w stanie luźnym i średnio zagęszczonym, lokalnie przewarstwowanymi pyłami oraz glinami pylastymi w stanie plastycznym.



Rys. 3. Warunki gruntowe – schematyczne przekroje podłużne przez jezdnię lewą i prawą

Woda gruntowa pierwszego poziomu występuje w dolnych partiach nasypów antropogenicznych oraz w obrębie osadów piaszczystych w postaci swobodnego i napiętego zwierciadła wody, przy czym warstwę napinającą stanowią przewarstwienia osadów spoistych oraz grunty organiczne. Woda występuje także w obrębie gruntów organicznych w postaci sączeń. Zwierciadło wody gruntowej stabilizowało się na głębokości od około 1,1 do około 2,3 mpt. Lokalizacja przedmiotowego odcinka drogi w zagłębieniu terenowym, z którego odpływ wody jest utrudniony (zanieczyszczenia w rowach, podmokły teren) powoduje, że wszelkie wahania poziomu wód negatywnie oddziałują na konstrukcję drogi.

4. Zastosowany sposób wzmocnienia podłoża gruntowego

W celu zlikwidowania głównej przyczyny powstawania nadmiernych osiadań nasypu drogowego zaprojektowano wgłębne wzmocnienie słabonośnych osadów organicznych w technologii iniekcji rozpychającej / zagęszczającej. Iniekcja rozpychająca polega na wypompowywaniu w podłoże gruntowe mieszanki betonowej o konsystencji plastycznej zaprawy, w postaci pasty o niskim opadzie, podawanej pod ciśnieniem kilkakrotnie wyższym od ciśnienia nadkładu w celu wyparcia, wymiany i wzmocnienia luźnego lub słabego gruntu.

Uzasadnieniem dla przyjęcia tej właśnie metody wzmocnienia podłoża było przede wszystkim zaawansowanie robót drogowych – ułożone były warstwy bitumiczne, łącznie z warstwą wiążącą. Zaprojektowano rozwiązanie, które miało zapewnić prawidłowe wzmocnienie przy minimalnej ingerencji w już wykonane elementy konstrukcji drogi. Zdyskwalifikowano metody wymagające całkowitej rozbiórki warstw konstrukcyjnych nawierzchni lub wykonywania odwiertów w zbyt gęstej siatce punktów, takie jak np. kolumny betonowe, żwirowe lub cementowo-gruntowe. Kolumny z cementogruntu zdyskwalifikowano dodatkowo z uwagi na znaczną zawartość części organicznych w warstwach gruntów słabonośnych.

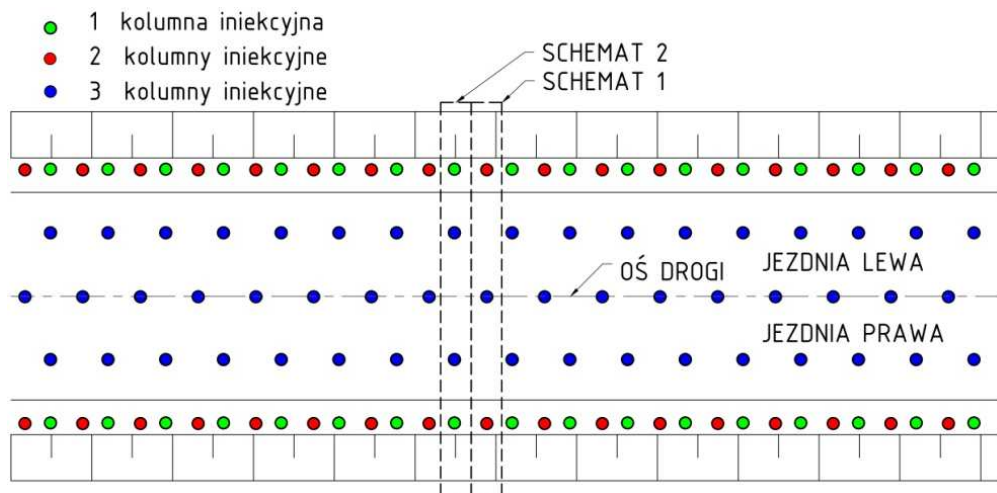
Wykonanie wzmocnienia rozpoczęto od wykonania przewiertów na konieczną głębokość, przy możliwym wspomaganiu wiercenia za pomocą płuczki wodnej. Następnie nad podwiercony punkt najeżdżała maszyna do iniekcji. W odwierty, do głębokości przewidzianej w dokumentacji projektowej, wprowadzano stalową rurę do iniekcji. Iniekcję rozpierającą prowadzono od dołu do góry, podciągając rurę stopniami określonymi w projekcie. Proces iniekcji kończył się około 1 m poniżej powierzchni terenu lub ponad stropem warstwy wzmacnianej. Właczanie zaprawy w punkty drugiego etapu robót nie mogło nastąpić wcześniej niż po 24 godzinach po wykonaniu iniekcji pierwszego etapu.

Celem metody było spowodowanie, aby otaczający miejsce iniekcji grunt niespoisty został w procesie wzmocnienia przemieszczony i dogęszczony, natomiast grunty spoiste i organiczne

pod wpływem ciśnienia uległy stopniowej konsolidacji. W przypadku wzmacniania gruntów organicznych elementy wzmocnienia służą zmniejszeniu porowatości ośrodka gruntowego oraz pozwalają przenosić obciążenia na głębiej położone nośne warstwy gruntów.

5. Szczegóły rozwiązania projektowego

Dla wzmocnienia podłoża na przedmiotowym odcinku drogi zaprojektowano wykonanie regularnej siatki iniekcji. Zasadnicza siatka miała wymiary $2,5 \times 2,5$ m, natomiast pod skrajnymi częściami nasypu rozstaw kolumn był zagęszczony do 1,25 m. Z jednego wykonanego w nawierzchni odwiertu (o minimalnej średnicy 0,50 m) przewidziano wykonanie dwóch lub trzech kolumn iniekcyjnych. Zaprojektowano kolumny pionowe oraz nachylone do pionu pod kątem 15° lub 20° . Kolumny nachylone miały być wykonane w płaszczyźnie prostopadłej do osi drogi. W strefach przejściowych (na skraju obszaru wzmocnienia), dla najmniejszych miąższości gruntów organicznych, przewidziano po jednej pionowej kolumnie na odwiert w nawierzchni. Schemat planu rozmieszczenia punktów iniekcji przedstawia rys. 4, natomiast przykładowe przekroje z konstrukcją wzmocnienia pokazano na rys. 5 i 6. Oba schematy wzmocnienia wykonane były naprzemiennie, co miało zapewnić jak najbardziej równomierne wzmocnienie gruntu.

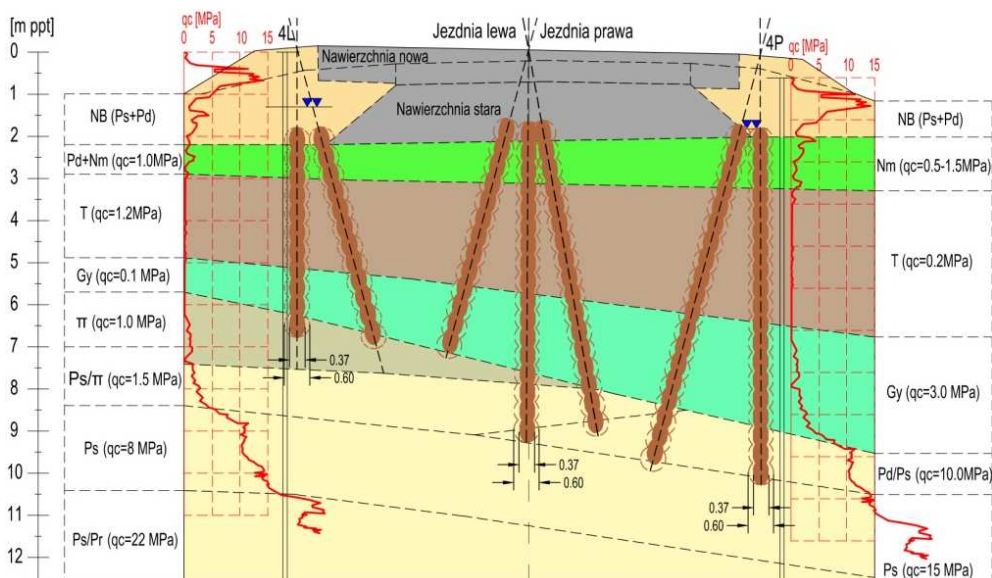


Rys. 4. Schemat rozmieszczenia punktów iniekcji

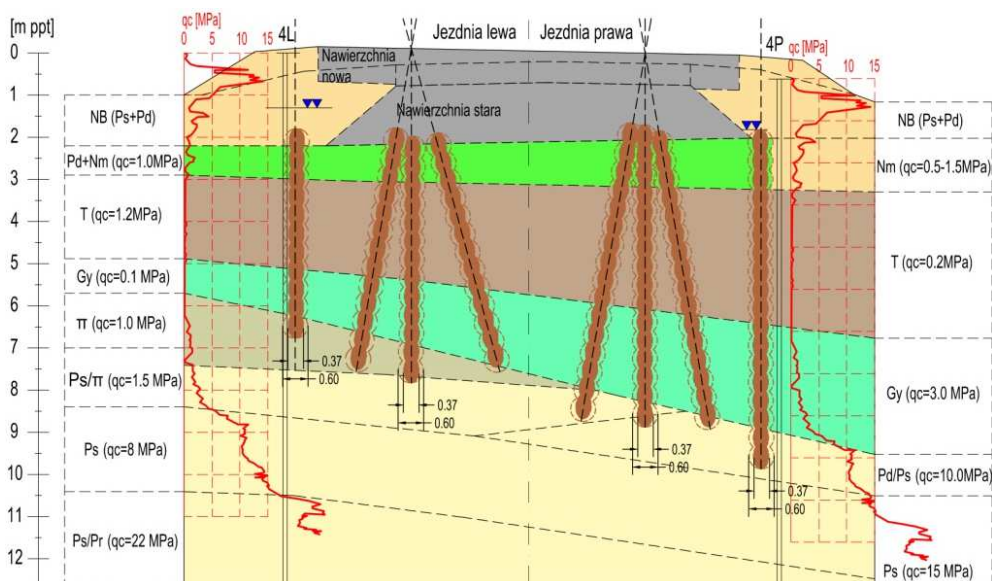
Zaprojektowano wykonanie 996 punktów iniekcji, natomiast łączna długość zaprojektowanych kolumn iniekcyjnych wyniosła 5440 m.

Kolumny iniekcyjne miały być wykonywane z poziomu istniejącej drogi. Z uwagi na ich założoną średnicę wynoszącą około 0,60–0,70 m przewidywano zużycie iniektu na poziomie 0,3–0,4 m³ na 1 m uformowanej kolumny. Iniekcje miały być wykonane z mieszanki cementowo-piaskowej odpowiadającej wytrzymałością betonowi klasy C12/15 (B15).

Kolumny powinny być wykonane w obrębie całej miąższości gruntów organicznych, przy czym ich podstawę należało wprowadzić w grunty mineralne na głębokość przynajmniej 1,0 m. Górny odcinek kolumn należało wprowadzić na minimalną głębokość 0,5 m w grunty mineralne znajdujące się ponad warstwami gruntów słabonośnych, przy zachowaniu minimalnej odległości 1,0 m poniżej powierzchni terenu. Do wykonania zasklepienia otworów w nawierzchni przewidziano zastosowanie zagęszczonego kruszywa łamanego.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny wraz z konstrukcją wzmocnienia (schemat 1)



Rys. 6. Przekrój poprzeczny wraz z konstrukcją wzmocnienia (schemat 2)

W specyfikacji, stanowiącej integralną część dokumentacji projektowej, zamieszczono informację, że w przypadku wzmocniania nawodnionych gruntów plastycznych lub organicznych, w celu przyspieszenia rozproszenia ciśnienia wody w porach gruntu, jakie może zostać wzbudzone w trakcie iniekcji, zaleca się zainstalowanie w podłożu siatki rurek drenarskich o średnicy około 50 mm. Zastosowanie drenażu uzależniono od zapisów dokumentacji projektowej, w której jednakże nie przewidziano takiego rozwiązania. Drenaż taki nie został również wykonany w trakcie robót.

Kontrola procesu iniekcji polegała na sprawdzaniu jakości mieszanki, jej objętości przy wtłaczaniu, jak też badaniu wytrzymałości zaprawy cementowej. Kontrolowano także kruszywo oraz jego zagęszczenie w miejscu zasklepień otworów w nawierzchni. Istotne było prowadzenie bieżącego monitoringu geodezyjnego w trakcie robót, co miało na celu zabezpieczenie przed wtłaczaniem zbyt dużej objętości iniektu, skutkującego podniesieniem istniejącej nawierzchni. Monitoring drogi po wzmocnieniu obejmował założenie reperów geodezyjnych do obserwacji osiadań nawierzchni drogi. Przewidziano prowadzenie pomiarów przez okres 24 miesięcy od zakończenia robót.

6. Wykonanie wzmocnienia

W pierwszej kolejności wykonane zostały kolumny pod prawą jezdnią oraz część kolumn zlokalizowanych w osi drogi. W drugim etapie zrealizowano pozostałe kolumny w osi oraz pod jezdnią lewą. Jako kryterium zakończenia iniekcji stosowano kontrolę objętości wtłoczonej zaprawy, osiągnięcie granicznego ciśnienia iniekcji, wystąpienie podniesienia terenu, wyparcie rury iniekccyjnej lub wydostanie się zaprawy iniekccyjnej na poziom terenu.

W trakcie prowadzenia robót dochodziło do licznych przemieszczeń nawierzchni drogowej. W pierwszym etapie, podczas wzmocnienia pod prawym pasem, nieznacznie podniosła się nawierzchnia w osi drogi oraz na krawędzi prawego pasa jezdni, przy jednoczesnym obniżeniu się lewego pasa jezdni. Dodatkowo, w osi drogi na długości robót powstała szczelina, która powiększała się w miarę postępu prowadzonych prac, przy zaobserwowanym odsunięciu lewego pasa jezdni od osi drogi. Przemieszczenia te miały wielkość od 5 do 35 mm. Po oddaniu do ruchu prawego pasa zaobserwowano nieznaczne obniżenie terenu – o wielkości około 1 cm. W trakcie prac prowadzonych pod lewym pasem ruchu stwierdzono jego odsunięcie od osi drogi (maksymalnie o 9 cm), a także jego obniżenie, dochodzące do 5 cm. Maksymalne osiadania stwierdzono w miejscach, gdzie wystąpiły największe odsunięcia całego pasa od osi drogi.

Po zakończeniu robót iniekcyjnych powstałe spękania zostały uszczelnione, górne odcinki wykonanych przewiertów w nawierzchni wypełniono kruszywem łamanym, po czym ułożono warstwę nawierzchni drogowej.

7. Ocena zastosowanego sposobu wzmocnienia

Po przeanalizowaniu dokumentacji powykonawczej stwierdzono, że w czasie prowadzonych prac ostatecznie wykonano 1001 kolumn o łącznej długości 5684 m. Łączne zużycie mieszanki betonowej wyniosło 633,4 m³. Średnie zużycie iniektu na 1 m wytworzonej kolumny, z uwzględnieniem strat przy pompowaniu i całkowitej długości wiercenia, łącznie z wolnym przelotem w strefie nasypu wyniosło 0,11 m³. Na tej podstawie określono uśrednioną rzeczywistą średnicę kolumn, która wyniosła około 37 cm. Wynika z tego, że uzyskano kolumny o powierzchni przekroju poprzecznego przeszło 2,5 razy mniejszej, niż zakładano w projekcie (przy założeniu wykonania kolumn o średnicy 60 cm, przy założeniu wykonania kolumn o średnicy 70 cm różnica ta jest jeszcze większa).

Wytworzenie kolumn o mniejszej średnicy skutkuje znacznie mniejszą efektywnością wzmocnienia podłoża oraz prowadzi do zwiększenia efektu grzybkowania. Nadmienić jednak należy, że zarówno w przypadku uzyskania założonej w projekcie średnicy kolumn (0,60 m) jak i przy średnicy uzyskanej na budowie (0,37 m), nie jest spełnione zalecenie zawarte w normie [6] dotyczące uniknięcia ryzyka powstania nierównomiernych deformacji ponad głowicami sztywnych pali (kolumn) wzmacniającymi słabonośne podłoże gruntowe:

$$H \geq 0,7(s - a) \quad (1)$$

gdzie:

a – wymiar zwieńczenia kolumny (średnica kolumny),

s – rozstaw kolumn,

H – wysokość nasypu.

Zgodnie z zapisami specyfikacji głowice kolumn mogły znajdować się w odległości 1,0 m poniżej poziomu terenu (najwyższy poziom dopuszczony w dokumentacji projektowej), co po uwzględnieniu faktu, że kolumny wykonywano z poziomu warstwy wiążącej daje wartość $H \approx 1,10$ m. Dla założonej w projekcie średnicy kolumn $a = 0,60$ m i rozstawu $s = 2,50$ m uzyskujemy: $H = 1,10 < 0,7 \times (2,5 - 0,60) = 1,33$, natomiast dla rzeczywistej, uzyskanej w trakcie robót średnicy kolumn $a = 0,37$ m i rozstawu $s = 2,50$ m uzyskujemy odpowiednio: $H = 1,10 < 0,7 \times (2,5 - 0,37) = 1,49$. W obu przypadkach warunek normowy nie jest spełniony.

Z powyższej analizy jednoznacznie wynika, że w projekcie przyjęto zbyt duży rozstaw elementów wmacniających. Znaczne rozstawy (2,50×2,50 m) pomiędzy sztywnymi elementami wzmocnienia, przy braku warstwy transmisyjnej o odpowiedniej wytrzymałości i sztywności spowodowały, że pomiędzy kolumnami iniekcijnymi (wykonanymi w technologii iniekcji rozpychającej) grunt osiadał w większym stopniu, niż bezpośrednio nad nimi. Efektem tego było powstanie regularnych wzniesień na nawierzchni jezdni, które w znaczącym stopniu ograniczyły komfort oraz bezpieczeństwo użytkowników drogi.

Dodatkowym, wpływającym negatywnie na rozwiązanie czynnikiem było uzyskanie w trakcie robót znacznie mniejszej średnicy kolumn w stosunku do założeń projektowych. W trakcie analizowania przedmiotowego przypadku autorzy nie napotkali w udostępnionych dokumentach żadnej informacji, aby ktokolwiek wnosił zastrzeżenia do zmniejszonej średnicy kolumn iniekcyjnych.

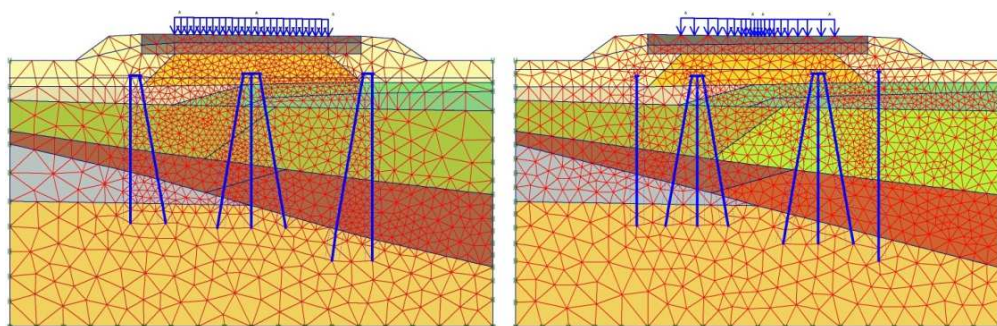
Zastosowanie technologii iniekcji rozpychającej w obrębie słabonośnych gruntów organicznych o niskiej przepuszczalności spowodowało osłabienie (uplastycznienie) tych gruntów w trakcie wykonywania wzmocnienia na skutek znacznego wzrostu ciśnienia porowego i zniszczenia struktury gruntu. Zjawisko takie, wywołane wykonaniem iniekcji w gruncie organicznym lub spoistym, jest opisywane w literaturze [4]. Szybkie wprowadzenie obciążenia na grunt, bez zapewnienia możliwości rozproszenia nadwyżki ciśnienia porowego, spowodowało powstanie nadmiernych osiadań długoterminowych. Nadmienić należy, że pomimo znajdującego się w specyfikacjach zalecenia dotyczącego wykonania drenażu mającego na celu odprowadzenie nadwyżki ciśnienia wody ze wmacnianych gruntów, rozwiązanie takie nie zostało zastosowane.

Dodatkowym, bardzo prawdopodobnym zjawiskiem, jakie mogło mieć miejsce w przedmiotowym przypadku, było podniesienie się poziomu głowic kolumn po zakończeniu procesu iniekcji. W trakcie jej wykonywania grunt słabonośny poddawany jest znacznemu ciśnieniu powodującemu jego przemieszczenia, wzrasta również ciśnienie porowe wody gruntowej w obrębie kolumn. Po zakończeniu procesu iniekcji i po spadku ciśnienia następuje odprężenie gruntu, które skutkuje wyparciem iniektu w kierunku odwiertu, a podniesienie poziomu głowic kolumn skutkuje zwiększeniem efektu „grzybkowania” z uwagi na zmniejszenie grubości warstwy nasypu ponad kolumnami. Możliwość powstania takiego zjawiska potwierdza zbliżony do okręgów kształt powstałych wzniesień, zlokalizowanych dokładnie nad miejscami wykonanych odwiertów.

8. Analiza numeryczna deformacji nasypu

W ramach oceny przedmiotowej awarii przeprowadzono wariantową analizę numeryczną. Obliczenia wykonano dla charakterystycznych przekrojów poprzecznych oraz przekroju podłużnego, dla dwóch wariantów parametrów opisujących odkształcalność gruntów organicznych. W pierwszym wariantcie zastosowano parametry opisane w dokumentacji geologicznej, natomiast w wariantcie drugim parametry wyprowadzone na podstawie wyników sondowań statycznych, w oparciu o metody opisane w literaturze [2].

Obliczenia wykonano w płaskim stanie odkształceń z wykorzystaniem metody elementów skończonych zaimplementowanej w programie Plaxis 2D. Do zamodelowania gruntów wykorzystano model Mohra-Coulomba. Model ten jest idealnie sprężysto-plastycznym modelem konstytutywnym opisu gruntu, który do obliczeń wykorzystuje liniową sprężystość opisaną prawem Hook'a, a także kryterium wytrzymałościowym Mohra-Coulomba.



Rys. 7. Model obliczeniowy wraz z dyskretyzacją (schemat 1 po lewej, schemat 2 po prawej)

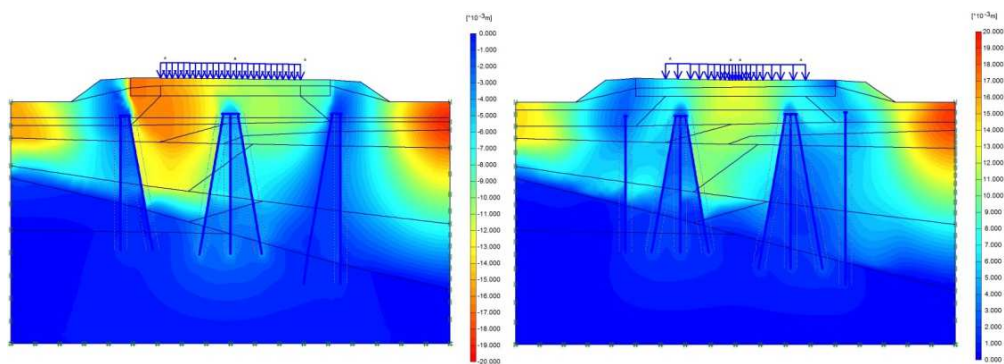
Zastosowanie do obliczeń płaskiego stanu odkształceń wiąże się z pewnymi ograniczeniami, co uniemożliwia dokładne oddanie geometrii zastosowanego wzmocnienia podłoża, jednakże stosując pewne uproszczenia pozwala on na próbę oddania charakteru deformacji konstrukcji nasypu drogowego opartego na sztywnych punktowych elementach wzmocnienia gruntu słabonośnego.

Wzmocnienie podłoża zamodelowano elementami belkowymi. W oparciu o projekt oraz dokumentację powykonawczą do obliczeń przyjęto, iż uśredniona powierzchnia przekroju poprzecznego iniekcji wynosi $0,11 \text{ m}^2$, co odpowiada średnicy równej $0,37 \text{ m}$. Parametry materiałowe przyjęto jak dla betonu klasy C12/15. Z uwagi na niski nasyp oraz niewielkie zagłębienie sztywnych elementów w gruntach nośnych, w modelu uwzględniono podstawę i głowicę kolumn poprzez wprowadzenie elementów belkowych o zastępczej szerokości. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe modele obliczeniowe wraz z dyskretyzacją gruntu zastosowane w przeprowadzonej analizie.

Podchodząc do interpretacji wyników obliczeń wykonanych przy zastosowaniu metody elementów skończonych należy pamiętać, iż jest to metoda przybliżona. Przybliżenie to wynika z zastosowanych modeli obliczeniowych ośrodka gruntowego oraz elementów strukturalnych, które nie są w stanie dokładnie odzwierciedlić ich rzeczywistego zachowania. Rzeczywisty obiekt dzielimy ponadto na skończoną ilość elementów zakładając, że w wydzielonych warstwach występują jednorodne warunki gruntowe. Upraszczamy także przestrzenny charakter pracy do płaskiego stanu odkształceń. Pomimo tego metoda ta pozwala na uwzględnienie wielu czynników takich jak rozkład obciążenia, różnice sztywności elementów wzmocnienia

oraz podatnego podłoża, wzajemną współpracę gruntu oraz elementów wzmocnienia, konsolidację i inne, dzięki czemu możemy analizować charakter interakcji między obciążeniem a zachowaniem konstrukcji.

Analizując wyniki modeli obliczeniowych można stwierdzić, iż w obrębie nasypu drogowego podpartego na sztywnych elementach belkowych dochodzi do nierównomiernego przemieszczania się gruntu, w wyniku jego zagłębiania pomiędzy elementy wzmocnienia. Charakter tych przemieszczeń uzależniony jest od układu warstw geologicznych oraz parametrów wydzielonych warstw gruntowych. Interpretacja przebiegu warstw wykonana została dla dość rzadkiego rozstawu otworów geologicznych, natomiast parametry gruntu oszacowano dla pojedynczych badań podstawowych oraz dla dających nieco szerszy obraz sondowaniach statycznych CPTu. Zarówno to, jak i niedoskonałości modeli obliczeniowych, mają bezpośredni wpływ na rozbieżności wyników obliczeń z pomiarami rzeczywistymi. Pomimo stwierdzonych różnic w wartościach bezwzględnych przemieszczeń, wyniki analizy potwierdziły występowanie zjawiska „grzybkowania” nawierzchni w miejscach wykonania iniekcji rozpychającej. Uzyskane przykładowe wyniki pionowych przemieszczeń gruntu w analizowanych schematach obliczeniowych przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Wyniki obliczeń – przemieszczenia pionowe dla schematu 1 i 2

Dodatkowym czynnikiem mającym wpływ na wielkość nierównomiernych przemieszczeń jest sposób przekazywania obciążeń na nawierzchnię przez pojazdy. W obliczeniach przyjęto powszechnie stosowane obciążenie zastępcze równomiernie rozłożone na powierzchni korony nasypu w obrębie pasów ruchu. W rzeczywistości charakter tego obciążenia jest bardziej skupiony, co może być wariantem bardziej niekorzystnym, szczególnie w przypadku niskich nasypów.

9. Sposób naprawy

W ramach opracowywanej ekspertyzy zaproponowano dwa warianty postępowania przy naprawie powstałych uszkodzeń. Pierwszy wariant zakładał pozostawienie istniejącego zakresu wzmocnienia oraz wykonywanie bieżących napraw nawierzchni, aż do czasu całkowitej stabilizacji osiadania. W zakres napraw wchodziłoby w takim przypadku częściowe lub całkowite frezowanie nawierzchni (samej warstwy ścieralnej lub dodatkowo głębiej położonych warstw bitumicznych) oraz wykonywanie nakładek, przy ewentualnym zastosowaniu warstw geosyntetyków wklejanych w warstwy bitumiczne, których zadaniem byłoby ograniczenie spękań.

Drugi wariant zakładał całkowitą rozbiórkę konstrukcji nawierzchni oraz wykonanie dodatkowego wgłębnego wzmocnienia podłoża (kolumny betonowe, żwirowo-betonowe, pale itp.) w siatce o większym zagęszczeniu w stosunku do wzmocnienia pierwotnego, wykonanie warstwy transmisyjnej, pozwalającej na przekazanie obciążeń z drogi na zalegające głębiej nośne warstwy podłoża, a następnie odbudowa warstw konstrukcyjnych nawierzchni.

Istotnym czynnikiem przy zaproponowanych wariantach postępowania były koszty dodatkowych robót. Przy obu powyższych wariantach konieczne było wykonanie dodatkowych badań geotechnicznych w celu bardziej szczegółowego określenia parametrów dla gruntów słabonośnych znajdujących się pod nasypem, jak też wykonanie odrębnej dokumentacji projektowej. Na podstawie przedstawionych wniosków Inwestor podjął decyzję o rozpisaniu przetargu na taką dokumentację i po jej wykonaniu zrealizowano prace naprawcze. Ostatecznie, na odcinku tym zrealizowano naprawę polegającą na zastosowaniu dodatkowych pali żelbetowych (pomiędzy istniejącymi kolumnami) przy zwieńczeniu całości płytą żelbetową. Zastosowane rozwiązanie z pewnością zapewni właściwą jakość przedmiotowego odcinka drogi.

10. Podsumowanie i wnioski

Przypadki wystąpienia awarii spowodowanych przez jedną przyczynę są niezmiernie rzadkie. Zwykle prowadzi do nich cały ciąg zdarzeń, poczynwszy od niedostatecznego lub nieprawidłowego rozpoznania warunków geotechnicznych, poprzez błędne decyzje projektowe, na błędach wykonawczych kończąc. Nie inaczej było w omawianym przypadku. Konsekwencjami zaistniałej sytuacji było powstanie znacznych uszkodzeń nawierzchni drogi krajowej, które wpływały negatywnie na bezpieczeństwo oraz komfort jej użytkowników.

Podstawową i pierwotną przyczyną powstałej awarii było niedostateczne rozpoznanie warunków gruntowych na etapie opracowywania projektu przebudowy drogi. Doprowadziło to do pierwszych uszkodzeń, które miały miejsce jeszcze przed zakończeniem robót budowlanych.

Z racji tego, że wzmocnienie podłoża na przedmiotowym odcinku projektowano na etapie budowy w sytuacji, gdy znaczna część robót była już wykonana (łącznie z częścią nawierzchni), istotnym problemem był dobór takiej technologii wzmocnienia, który nie spowodowałby nadmiernej ingerencji w wykonane elementy (na takim etapie realizacji na wybór sposobu wzmocnienia mają dodatkowo wpływ takie czynniki, jak możliwy czas wykonania robót oraz dodatkowe koszty).

Zaprojektowanie sztywnych elementów wzmocnienia w zbyt dużych rozstawach, przy braku warstwy transmisyjnej o odpowiedniej wytrzymałości i sztywności spowodowały, że pomiędzy kolumnami wykonanymi w technologii iniekcji rozpychającej grunt osiadał w większym stopniu, niż bezpośrednio nad nimi. Na skalę powstałych uszkodzeń wpłynęło również uzyskanie w trakcie robót znacznie mniejszej, niż zostało to zaprojektowane, średnicy kolumn. Wprawdzie proces wykonywania wzmocnienia iniekccyjnego wykonywany był zgodnie z dokumentacją projektową, nie zareagowano w żaden sposób po uzyskaniu znacznie mniejszych średnic kolumn w stosunku do założeń projektowych.

Dyskusyjne jest również samo przyjęcie technologii iniekcji rozpychającej w obrębie słabonośnych gruntów organicznych o niskiej przepuszczalności, gdyż spowodować to mogło osłabienie (uplastycznienie) tych gruntów w trakcie wykonywania wzmocnienia na skutek znacznego wzrostu ciśnienia porowego i zniszczenia struktury gruntu, zwłaszcza przy braku jakiegokolwiek drenażu. Najprawdopodobniej główną przyczyną wyboru tej technologii była chęć uniknięcia rozbiórki wykonanych wcześniej robót, z perspektywy czasu widać jednakże, że takiej właśnie trudnej decyzji w przedmiotowym przypadku zabrakło.

Znacznym utrudnieniem dla projektantów, wykonawców oraz inwestorów jest brak krajowych wytycznych projektowych dotyczących wielu nowoczesnych technik wzmocnienia

podłoża, jak też profesjonalnego nadzoru geotechnicznego. Sytuacja, gdy jedynym kryterium wyboru oferty jest cena, sprzyja podejmowaniu nadmiernego i trudnego do rzeczywistej oceny ryzyka technicznego.

Prawidłowe projektowanie oraz wykonawstwo wzmocnienia podłoża za pomocą technik iniekcyjnych wymaga bardzo dokładnego rozpoznania geotechnicznego, a zwłaszcza precyzyjnego określenia parametrów przyjmowanych do obliczeń. Nawet najlepsze projekty w pewnych sytuacjach mogą nieco odbiegać od rzeczywistości i wymagają wprowadzenia korekt na etapie realizacji, dlatego też tak ważna jest właściwa współpraca w trakcie trwania budowy pomiędzy Wykonawcą, Nadzorem i Projektantem. Konieczne wydaje się również jak najszybsze opracowanie krajowych wytycznych dla tego rodzaju technologii wzmocnień, aby zapewnić ich rozwój oraz bezpieczne projektowanie i wykonawstwo.

Literatura

1. Materiały archiwalne (dokumentacje geologiczne, geotechniczne, projektowe, powykonawcze, wyniki pomiarów i obserwacji, ekspertyzy).
2. Sikora Z.: Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
3. Wiłun Z.: Zarys Geotechniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Sp. z o.o. Wydanie 8, Warszawa 1967, 2007.
4. Kirsch K., Bell A.: Ground Improvement, 2nd Edition, CRC Press, 2007.
5. DGGT: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements – EBGeo, (Translation of the 2nd German Edition), Ernst & Sohn, 2011.
6. BS 8006:1995, Code of practice for Strengthened / reinforced soils and other fills, 1995.
7. PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
8. PN-EN 1997-1:2008/NA Załącznik krajowy do Polskiej Normy Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.

EXAMPLE OF THE WEARING SURFACE DAMAGE ON COMPACTION GROUTING STABILIZED SOIL

Abstract: Road modernization often results in the need for broadening of the roadway width and for banking up the existing embankments. In the case when soils under embankment consist organic layers, such investments are always very complicated and require appropriate methods of soil improvement. The considerable obstacle is the lack of national standards and design guidelines describing modern soil improvement technologies. This paper describes a damage of the wearing surface, on the ground improved by compaction grouting technique, which was caused both by the insufficient geotechnical investigation at the design stage and incorrect decisions and actions in repair design and on the construction site.

Keywords: insufficient geotechnical investigation, organic soils, road damage, soil improvement, compaction grouting