



Temat specjalny

Wzmacnianie podłoża gruntowego budowli drogowych

tekst: **PAWEŁ ŁĘCKI, MICHAŁ RÓŻAŃSKI**, GT Projekt Sp. z o.o. & Co. S.K., zdjęcia: **GT PROJEKT Sp. z o.o. & Co. S.K**

Podłoże gruntowe to, według lakonicznej, normowej [2] definicji, grunt, skała lub nasyp istniejący na miejscu budowy przed wykonaniem prac budowlanych. Norma posadowienia bezpośredniego budowli [5] określa z kolei podłoże gruntowe jako strefę, w której właściwości gruntów mają wpływ na projektowanie, wykonywanie i eksploatację budowli.



fot: Superingo – Fotolia.com

I Badania podłoża gruntowego – projektowanie geotechniczne

Zakres badań podłoża gruntowego i sposób udokumentowania wyników tych badań winien być adekwatny do stopnia skomplikowania budowy geologicznej podłoża oraz do warunków gruntowych [1, 3]. Występowanie w podłożu budowli warstw gruntów mineralnych słabonośnych (np. luźnych piaszczystych, miękkoplastycznych gruntów spoistych), nieskonsolidowanych gruntów organicznych, niekontrolowanych nasypów skutkuje określeniem warunków gruntowych jako złożone bądź skomplikowane. Obiekt budowlany realizowany w takich warunkach powinien być zaliczony do drugiej bądź trzeciej kategorii geotechnicznej.

W konsekwencji, po wykonaniu szczegółowych badań podłoża gruntowego na etapie opracowywania projektu budowlanego konieczne jest sporządzenie projektu geotechnicznego, który, prócz innych elementów, winien obejmować określenie modelu obliczeniowego podłoża, prognozę zmian właściwości podłoża na skutek realizacji inwestycji, wzajemnych interakcji podłoża i budowli, a także obliczenie nośności, sprawdzenie stateczności i osiadań budowli posadowionej na analizowanym podłożu gruntowym.

Zapewnienie odpowiedniej nośności podłoża, stateczności budowli i ograniczenie jej osiadań w przypadku posadawiania na gruntach słabonośnych wymaga ich odpowiedniego wzmocnienia.

Analizując właściwości podłoża gruntowego, należy mieć na uwadze planowaną inwestycję: jej wielkość, obciążenia przekazywane na podłoże i wymagania dotyczące ograniczenia i ujednolicenia osiadań. Parametry te decydują niejednokrotnie o ostatecznej ocenie jakości i przydatności podłoża gruntowego i, w konsekwencji, przyjęciu określonego sposobu posadawienia.

II Wybór sposobu posadawienia – posadowienie bezpośrednie czy głębokie

W klasycznym podziale sposobów fundamentowania wyodrębnione zostały posadowienie bezpośrednie oraz posadowienie pośrednie, głębokie. W minionych ponad 20 latach dynamicznego rozwoju geotechniki i geoinżynierii zarówno w zakresie szczegółowych badań in situ podłoża gruntowego, jak i technik posadawienia zdezaktualizował się podział na fundamentowanie bezpośrednie i pośrednie. Coraz częściej stosując nowoczesne technologie, budowle posadawiane są bezpośrednio na podłożu wzmocnionym, przy czym zabiegom powierzchniowego bądź wgłębego wzmocnienia i stabilizacji poddawane są grunty słabonośne, zarówno rodzime, jak i antropogeniczne.

III Rozwój nowoczesnych technologii fundamentowania

Minione lata przyniosły rozwój technik fundamentowania. Skala zmian w fundamentowaniu głębokim najlepiej uwidacznia się w analizie normy [7] oraz porównaniu typów i technologii wykonywania pali fundamentowych wymienionych w normie z 1983 r. z dominującymi w praktyce inżynierskiej ostatnich lat. Jeszcze dynamiczniejszy jest rozwój nowych technologii wzmocnienia, zwłaszcza wgłębego, słabonośnych podłoży gruntowych. Przyczyn rozwoju dopatrywać się należy w poszukiwaniu nowych sposobów posadawienia budowli, atrakcyjnych ekonomicznie i technicznie, cechujących się niższym kosztem realizacji robót oraz krótszym czasem realizacji, jednocześnie



Wymiana gruntów słabonośnych

spełniających wszystkie wymogi techniczne. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na powstawanie nowych technologii jest rozwój budownictwa drogowego, związany z projektowaniem dróg w terenach wcześniej wykluczonych z zabudowy, m.in. z powodu występowania rodzimych gruntów słabonośnych, oraz ponownym zagospodarowywaniem terenów wcześniej użytkowanych na cele budowlane, zdegradowanych, pokrytych miększymi pokładami niekontrolowanych nasypów antropogenicznych.

Coraz szerszy zakres stosowania metod wzmocnienia gruntu przyczynia się do ich modyfikacji i rozwoju, a zebrane przy kolejnych realizacjach doświadczenia wykorzystywane są do weryfikowania i doskonalenia metod obliczeniowych. Metody obliczeń i sposoby projektowania wzmocnienia gruntu bazują na założeniach teoretycznych, ale także w nie mniejszym stopniu na coraz bogatszych doświadczeniach praktycznych. Realizacja specjalistycznych robót ziemnych i fundamentowych zmierzających do wzmocnienia podłoża prowadzona jest na podstawie projektów, przy opracowaniu których często zakłada się możliwość i konieczność wprowadzania bieżących korekt i zmian w przyjętych rozwiązaniach. Korekty wprowadzane są m.in. na podstawie obserwacji efektów wykonywanych robót, oporu gruntu przy wykonywaniu wzmocnienia, a także wyników uzupełniających badań geotechnicznych, prowadzonych w trakcie realizacji robót specjalistycznych. Metoda ta, zwana metodą aktywnego projektowania, przewiduje udział projektanta-geotechnika w realizacji robót specjalistycznych.

IV Klasyfikacja metod wzmocnienia gruntu

Przyjęcie prostej, jednoznacznej klasyfikacji metod wzmocnienia gruntu jest bardzo trudne. Jako kryterium podziału przyjmowane mogą być: technologia wzmocnienia, głębokość ingerencji w podłoże, stosowane materiały, finalny efekt wzmocnienia. Istotnym czynnikiem utrudniającym sklasyfikowanie poszczególnych metod jest fakt, że granice pomiędzy technologiami są nieostre; często różne sposoby stosowane są łącznie w celu osiągnięcia pożądanego efektu wzmocnienia podłoża gruntowego. Pomimo tych wątpliwości, można wydzielić następujące grupy technologii:

1. Wymiana gruntów słabonośnych na nasyp z kwalifikowanego kruszywa.



Wymiana gruntów metodą wypierania

2. Wzmocnienie podłoża przez poprawienie jego właściwości (parametrów) bez stosowania domieszek innych materiałów (kruszyw, spoiw).

3. Wzmocnienie podłoża przy zastosowaniu domieszek, np. na drodze powierzchniowej lub wgłębnej stabilizacji bądź formowania kolumn czy elementów palopodobnych.

4. Wzmocnienie podłoża przy użyciu geosyntetyków.

5. Metody mieszane, polegające na stosowaniu kilku różnych zabiegów wzmacniających.

1. Wymiana gruntu

Wymiana gruntu jest sposobem stosowanym w fundamencie od bardzo dawna. Nie jest to metoda, w pełnym tego słowa znaczeniu, wzmocnienia gruntu.

W przypadku występowania w podłożu osadów słabonośnych podlegają one częściowej bądź pełnej wymianie na nasyp budowlany z kwalifikowanego kruszywa mineralnego, naturalnego lub łamanego bądź z materiału antropogenicznego. Ze względu na zakres i sposób wymiany wyróżnić można kilka wariantów wymiany gruntu.

1.1. Częściowa wymiana gruntu

Polega na wymianie górnych, stropowych partii osadów słabonośnych z pozostawieniem dolnych, niewymienionych partii w podłożu. Najczęściej wymiana przeprowadzana jest tylko powyżej lustra wody gruntowej. Często wymiana taka połączona jest z powierzchniowym dogęszczeniem pozostawianych w podłożu gruntów słabonośnych lub (i) z zastosowaniem geosyntetyków (po dogęszczeniu istniejącego podłoża w dnie wykopu układana jest warstwa geosyntetyku, np. geotkaniny, zbrojącego podłożę w podstawie formowanego nasypu budowlanego). Rozwiązanie to może być stosowane w celu umożliwienia posadowienia niskich nasypów, dróg o niewielkim natężeniu ruchu, w przypadku których nie są stawiane wysokie wymagania w zakresie redukcji i ujednoczenia osiadań, a także w celu umożliwienia posadowienia dróg tymczasowych.

1.2. Całkowita wymiana gruntu powyżej lustra wody gruntowej

Wymiana gruntu przeprowadzana powyżej lustra wody gruntowej na nasyp budowlany z kwalifikowanego kruszywa, zagęszczanego warstwami. Zagęszczanie, w zależności od użytego sprzętu i wła-



ściwości użytego kruszywa, powinno być prowadzone warstwami o miąższości ok. 30–80 cm. Rozwiązanie to umożliwia realizację posadowienia bezpośredniego i gwarantuje znaczącą redukcję osiadań.

1.3. Całkowita wymiana gruntu poniżej lustra wody gruntowej

Wymiana gruntu poniżej lustra wody gruntowej prowadzona jest metodą wypierania lub metodą bagrowania. Niezależnie od sposobu wymiany do formowania nasypu należy stosować kruszywo mineralne o kontrolowanym uziarnieniu. W przypadku stosowania kwalifikowanego kruszywa wysokiej jakości ($P_s/P_r/P_o$; zawartość frakcji pyłowej: $f_{\pi} \leq 3\%$) uformowany pod wodą nasyp może zostać zagęszczony metodą wibroflotacji (zob. pkt 2.2.4). W przypadku stosowania kruszywa niższej jakości (piasek o zawartości frakcji pyłowej: $3\% \leq f_{\pi} \leq 10\%$) w uformowanym pod wodą nasypie w celu osiągnięcia odpowiedniej jakości należy uformować kolumny żwirowe lub kamienne (zob. pkt 3.1.1). Całkowita wymiana gruntu słabonośnego umożliwia realizację posadowienia bezpośredniego i gwarantuje znaczącą redukcję osiadań.

1.3.1. Metodę wypierania można stosować przy wymianie płynnych i półpłynnych osadów organicznych o wysokiej wilgotności ($w_n > 200\%$) i wysokiej zawartości części organicznych ($Com > 50\%$), gruntów słabonośnych o względnie niewielkiej wytrzymałości na ścinanie $\tau < 20$ kPa.

1.3.2. W przypadku konieczności wymiany gruntu organicznego niespełniającego podanych powyżej orientacyjnych wymogów bądź wymiany słabonośnych gruntów mineralnych nasypów antropogenicznych, grunt słabonośny należy bagrować, tj. wybierać spod wody.

2. Wzmocnienie gruntu przez modyfikację jego właściwości

Wzmocnienie gruntu przez modyfikację jego właściwości i parametrów geotechnicznych bez stosowania domieszek innych materiałów (kruszyw, spoiw) to grupa metod stosowanych w przypadku występowania gruntów rodzimych podlegających wzmocnieniu. W przypadku wzmacniania nasypów antropogenicznych metoda ta często łączona jest z częściową wymianą gruntu.

2.1. Konsolidacja gruntu

Konsolidacja gruntu jest procesem zachodzącym w gruntach w pełni nasyconych wodą (gruntach organicznych, miękkoplastycznych



Zagęszczanie dynamiczne



i plastycznych gruntach spoistych), cechujących się względnie niskim współczynnikiem filtracji. Przyczyną konsolidacji podłoża jest obciążenie. W pierwszym etapie przyłożone obciążenie powoduje wzrost ciśnienia porowego, a w dalszym etapie następuje zmniejszenie porowatości gruntu: woda „wyciskana” jest z porów aż do całkowitej likwidacji nadciśnienia porowego. Procesowi spadku porowatości towarzyszy wzrost wytrzymałości na ścinanie (spójności gruntu i kąta tarcia wewnętrznego) oraz zwiększenie wartości modułu ścisłości. Czas procesu konsolidacji zależy od współczynnika filtracji gruntu oraz drogi filtracji wody „wyciskanej” z porów (tj. od miąższości konsolidowanej warstwy).

2.1.1. Konsolidacja nasypem przeciążającym. Metoda stosowana przy wzmacnianiu warstw słabonośnych o niewielkiej miąższości (do ok. 3 m). W przypadku, gdy osady słabonośne podścielone i przekryte są gruntami piaszczystymi o wysokiej wodoprzepuszczalności, pionowa filtracja odbywa się ku dołowi i ku górze. W przypadku, gdy osady konsolidowane podścielają grunty spoiste o niskiej filtracji, pionowa filtracja odbywa się tylko w jednym kierunku. Zaletą tej metody jest prostota wykonania, niski koszt, zwłaszcza przy dostępności kruszywa na nasyp przeciążający, a wadą względnie długi czas konsolidacji.

2.1.2. Konsolidacja wspomagana drenami stosowanymi w celu redukcji czasu konsolidacji ośrodka, zwłaszcza przy większych miąższościach wzmacnianego gruntu, proces konsolidacji gruntu pod obciążeniem zewnętrznym (nasypem przeciążającym) wspomagany jest systemem drenów pionowych. Dreny wykonywane są zazwyczaj w regularnej, trójkątnej lub kwadratowej siatce, w rozstawie co ok. 1,5–2,5 m; mogą być projektowane i wykonywane w trojaki sposób: jako klasyczne dreny piaskowe, wykonywane metodą wiercenia; dreny prefabrykowane (geodreny), wciskane w podłoże, wykonane z profilowanej taśmy plastikowej, w osłonie z geowłókniny filtracyjnej; jako kolumny żwirowe, kamienne, pełniące rolę drenów. Zastosowane kolumny żwirowych, kamiennych (zob. pkt 3.1.1) jest zasadne i celowe w przypadkach, w których zarówno czas konsolidacji musi zostać ograniczony, jak i osiadania wzmacnianego, konsolidowanego podłoża muszą być zminimalizowane.

2.1.3. Konsolidacja poprzez odwodnienie i konsolidacja próżniowa. Metody te wykorzystują wpływ efektu obniżenia lustra wody lub odpompowania wody z ośrodka gruntowego na proces konsolidacji. Jednak ze względu na istotny wpływ na otoczenie oraz konieczność zastosowania specjalistycznego

sprzętu, stosowane są rzadziej niż konsolidacja nasypem przeciążającym i konsolidacja wspomagana drenami.

2.2. Zagęszczanie gruntu

Zagęszczanie gruntu w klasycznym ujęciu stosowane jest w gruntach mineralnych, rodzimych i nasypowych, drobno- i gruboziarnistych. Nasyp budowlany musi być formowany i zagęszczany warstwami, np. przy użyciu walców wibracyjnych. Warstwy osadów słabonośnych mogą być zagęszczane powierzchniowo lub wgłębnie.

2.2.1. Zagęszczanie dynamiczne. Technika wynaleziona w połowie XX w. przez Menarda. Polega na dynamicznym obciążaniu podłoża ciężkim ubijakiem (do 40 t), swobodnie spuszczanym z wysokości do ok. 30 m. Metoda z powodzeniem stosowana w zagęszczaniu luźnych osadów piaszczystych i nasypów antropogenicznych ze szczególnym uwzględnieniem wysypisk odpadów komunalnych. Zasięg, tj. głębokość oddziaływania, jest proporcjonalny do energii uderzenia. Metoda stosowana z powodzeniem w budownictwie komunikacyjnym, jej istotnym ograniczeniem jest znaczące, dynamiczne oddziaływanie na otoczenie.

2.2.2. Dynamiczna wymiana gruntu. Jest to metoda stanowiąca modyfikację zagęszczania dynamicznego. Kolejne uderzenia ciężkiego ubijaka, o niewielkiej powierzchni podstawy, wykonywane są w tym samym punkcie; w kolejnych fazach powstający krater wypełniany jest kwalifikowanym kruszywem i formowana jest kolumna o nieregularnym kształcie i głębokości sięgającej kilku metrów.

2.2.3. Zagęszczanie wybuchami. Metoda stanowiąca wariant zagęszczenia udarowego, w którym do zagęszczania, najczęściej luźnych osadów piaszczystych, używa się energii detonowanego ładunku wybuchowego. Ładunki umieszcza się w otworach wiertniczych na głębokości od kilku do kilkunastu metrów, najczęściej w regularnej siatce; efektem detonacji jest dogęszczenie luźnego, porowatego podłoża.

2.2.4. Wibroflotacja. Metoda stosowana do zagęszczania luźnych osadów piaszczystych, zwłaszcza poniżej lustra wody gruntowej. Istota metody polega na wprowadzeniu we wzmacniane podłoże gruntowe na głębokość do 20 m, a nawet do ponad 30 m, tzw. wibroflota: masywnego, pionowego wibratora, generującego drgania o określonej amplitudzie i częstotliwości. Wibroflotacja skutkuje zmniejszeniem porowatości



Wibroflotacja

ośrodka i jego dogęszczeniem. Uwaga, w przypadku gruntów nawodnionych wibroflotacja powoduje zmniejszenie porowatości, połączone z chwilowym upłynięciem. Może być z powodzeniem stosowana przy zagęszczaniu rodzimych, luźnych piasków, jak i nasypów formowanych pod wodą metodą wymiany „na mokro” (zob. pkt 1.3.2). Najskuteczniejsza jest przy zagęszczaniu piasków o niewielkiej zawartości frakcji pyłowej ($f_{\pi} \leq 3\%$).

3. Wzmocnienie gruntu przy zastosowaniu spoiw i (lub) kruszyw

Wzmocnienie podłoża przy zastosowaniu domieszek (kruszywa, spoiw hydraulicznych), np. w drodze powierzchniowej lub wgłębnej stabilizacji bądź formowania kolumn czy elementów palopodobnych, obejmuje grupę technologii szeroko stosowanych przy wzmacnianiu niejednorodnych podłoży słabonośnych. Technologie stabilizacji i wykonywania elementów palopodobnych cechują się wprowadzaniem w podłoże kwalifikowanych kruszyw lub spoiw hydraulicznych. Wszystkie te technologie wymagają stosowania specjalistycznego sprzętu.

3.1. Wibrowymiana

Technologia stanowiąca rozwinięcie wibroflotacji. Technologia wibrowymiany wymaga zastosowania wibratora rdzeniowego (zwanego też wibratorem śluzowym), umożliwiającego wtłoczenie we wzmacniane podłoże przez głowicę wibratora kruszywa bądź suchej mieszanki betonowej. Efektem wibrowymiany jest dogęszczenie słabonośnego podłoża oraz uformowanie kolumny wzmacniającej podłoże. Wibrowymiana może być stosowana do wzmacniania słabonośnych podłoży, niepodatnych na wgłębne zagęszczenie wibroflotacją: we wszystkich słabonośnych gruntach mineralnych oraz organicznych o odpowiednio wysokiej wytrzymałości na ścinanie ($\tau > 25$ kPa). Wibrowymiana może być prowadzona na głębokość ponad 20 m.

3.1.1. Kolumny żwirowe. Najczęściej projektowanym i realizowanym wariantem wibrowymiany są tzw. kolumny żwirowe. Przy użyciu wibratora rdzeniowego o średnicy ok. 30–40 cm w słabonośnym podłożu formowane są kolumny

z kwalifikowanego kruszywa, najczęściej żwiru. Zamiennie mogą być stosowane: pospółka, rozkruszony gruz betonowy lub tłuczeń. Materiał podawany przez głowicę wibratora, zagęszczany, formuje kolumny o średnicy uzależnionej od wytrzymałości i oporu wzmacnianego podłoża, najczęściej ok. 60–80 cm. W przypadku formowania kolumn w słabonośnym podłożu organicznym lub w miękkoplastycznych, nieskonsolidowanych osadach spoiw średnica kolumn może być większa i przekraczać 120 cm. Kolumny żwirowe mogą pełnić rolę drenów pionowych o dużej średnicy (zob. pkt 2.1.2).

3.1.2. Kolumny żwirowe w osłonie z geosyntetyku (GEC). Kolumny żwirowe w osłonie z geosyntetyku to kolumny żwirowe z dodatkowym wzmocnieniem w postaci rękawa geosyntetycznego o wysokich parametrach wytrzymałościowych. W powszechnym użyciu kolumny te określane są jako kolumny GEC (*Geotextile-Encased Columns*). W Polsce przykładem wykorzystania tej technologii jest wzmocnienie wykonane w pasie autostrady A2 Świecko – Nowy Tomyśl w 2010 r.

Kolumna formowana jest w rurze osłonowej o długości dobranej do głębokości wzmocnienia. Rura jest wibrowywana lub wciskana w podłoże, następnie do wnętrza rury wprowadzany jest geosyntetyczny rękaw. Zadaniem geotkaniny jest zabezpieczenie i usztywnienie kolumny. Ważnym elementem wzmocnienia jest wykonanie nasypu, którego funkcją jest dociążenie i skonsolidowanie słabonośnych gruntów.

Kolumny żwirowe w osłonie z geosyntetyku mogą być formowane w gruntach o niskiej wytrzymałości na ścinanie ($\tau \leq 25$ kPa).

3.1.3. Kolumny scementowane. Kolumny wykonywane analogicznie do kolumn żwirowych. W przypadku wzmacniania bardzo słabych gruntów ($\tau \leq 25$ kPa) bądź w przypadku znaczących obciążeń przekazywanych na podłoże zamiast kruszywa mineralnego może być stosowane kruszywo wymieszane ze spoiwami hydraulicznymi (np. pospółka z cementem).

3.1.4. Kolumny betonowe. Kolumny wykonywane analogicznie do kolumn żwirowych. W przypadku wzmacniania bardzo słabych gruntów, np. organicznych, bądź w przypadku większych obciążeń przekazywanych na podłoże zamiast kruszywa mineralnego stosowany być może „suchy” beton konstrukcyjny.



Kolumny piaskowo-żwirowe w technologii wibrowymiany



Kolumny żwirowe w osłonce geosyntetycznej

Uwaga, kolumny żwirowe oraz kolumny scementowane i betonowe mogą być wykonywane nie tylko w technologii wibrowymiany przy zastosowaniu wibratorów rdzeniowych. Kolumny piaskowe lub żwirowe, a także kolumny z kruszywa scementowanego realizowane są niekiedy przy użyciu palownic do wykonywania pali franki. Doświadczenia praktyczne wskazują jednak, że kolumny wykonywane metodą wibrowymiany zwykle cechują się wyższym zagęszczeniem i skuteczniej dogęszczają także wzmacniane słabonośne podłoża. Kolumny betonowe mogą natomiast z powodzeniem być wykonywane przy użyciu palownic stosowanych do wykonywania pali CFA. Kolumny betonowe realizowane tą technologią cechują się stałą, określoną średnicą, najczęściej ok. 400–800 mm. Kolumny żwirowe, a zwłaszcza kolumny scementowane i kolumny betonowe, są elementami palopodobnymi. Projektowanie tych elementów musi uwzględniać sprawdzenie zarówno nośności wewnętrznej elementu wzmacniającego podłoża, jak i nośności gruntu – wzdłuż kolumny i pod jej podstawą.

3.1.5. Betonowe kolumny przemieszczeniowe. Kolumny te wykonywane mogą być w każdym podłożu (jedynym ograniczeniem są warstwy i przewarstwienia gruntów o dużej wytrzymałości); w odróżnieniu od kolumn w technologii CFA wykonanie betonowych kolumn przemieszczeniowych skutkuje dogęszczeniem podłoża gruntowego. Betonowe kolumny przemieszczeniowe wzmacniają warstwy słabonośne i powodują dystrybucję obciążeń na głębiej zalegające warstwy gruntów o większej wytrzymałości.

3.2. Wgłębna stabilizacja

Technologia wgłębnej stabilizacji – wgłębne mieszania gruntu ze spoiwami hydraulicznymi (*Deep Soil Mixing*) – polega na wgłębny wymieszaniu szkieletu gruntowego z materiałem wiążącym. Do formowania kolumn cementowogruntowych używany jest specjalistyczny sprzęt: żerdź wiertnicza z poprzecznymi elementami gwarantującymi mieszanie gruntu i formowanie kolumn o zaplanowanej średnicy. Formowana jest kolumna z kompozytu cementowogruntowego, charakteryzującego się zwiększoną wytrzymałością na ściskanie, niewielką ściśliwością i małą wodoprzepuszczalnością. Wgłębnej stabilizacji podlegać

mogą wszystkie mineralne grunty słabonośne oraz grunty organiczne o ograniczonej zawartości części organicznych ($C_{om} < 10\%$); próby stabilizacji gruntów o wyższej zawartości części organicznych muszą być każdorazowo poprzedzone szczegółowymi badaniami wytrzymałości cementogruntu. Szczególną uwagę należy też poświęcić zbadaniu chemizmu środowiska gruntowo-wodnego. Wytrzymałość kompozytu cementowogruntowego uzależniona jest od rodzaju i ilości użytego spoiwa oraz od rodzaju wzmacnianego ośrodka. Średnia wartość wytrzymałości kompozytu cementowogruntowego waha się od ok. 1 MPa (dla kolumn w gruntach organicznych) do ponad 5 MPa (dla kolumn w piaskach). Technologie wgłębnej stabilizacji znalazły szerokie zastosowanie ze względu na stosunkowo niewielki koszt, szybkość realizacji wzmocnienia, możliwość stosowania w szerokim zakresie wzmacnianych podłoży i niewielki wpływ na otoczenie w trakcie realizacji.

3.2.1. Kolumny DSM-dry. Formowane przez wgłębne mieszanie gruntu ze spoiwem hydraulicznym (cementem, wapnem, popiołami) „na sucho”; stosowane do wzmacniania w pełni nawodnionych gruntów. Uwaga, do wiązania spoiwa wykorzystywana jest woda gruntowa, dlatego każdorazowo zaprojektowanie i wykonanie kolumn DSM-dry musi być poprzedzone szczegółowymi badaniami chemicznymi środowiska gruntowo-wodnego.

3.2.2. Kolumny DSM-wet. Formowane przez wgłębne mieszanie gruntu ze spoiwem hydraulicznym (najczęściej z zaczynem cementowym) „na mokro”; stosowane w bardzo szerokim zakresie do wzmacniania luźnych piasków, miękkoplastycznych i plastycznych glin, gruntów organicznych (namułów) oraz gruntów nasypowych o zróżnicowanym składzie. Pograżanie żerdzi do formowania kolumn DSM-wet wspomagane jest iniekcją zaczynu cementowego pod ciśnieniem kilku atmosfer. Możliwość formowania kolumn w szerokim zakresie zmienności podłoża, o średnicy od 500 do 1500 mm i długości (głębokości) do kilkunastu metrów, stosunkowo niewielki koszt i szybkie tempo realizacji stanowią o bardzo dynamicznym rozwoju technologii DSM-wet.

Uwaga, kolumny cementowogruntowe (DSM-wet, DSM-dry) są elementami palopodobnymi. Projektowanie tych elementów



Kolumny DSM

musi uwzględnić sprawdzenie zarówno nośności wewnętrznej kolumny, jak i nośności gruntu wzdłuż kolumny i pod jej podstawą. Nośność wewnętrzna cementogruntu jest uzależniona od rodzaju gruntu, w którym formowana jest kolumna, oraz od chemizmu gruntu i wody gruntowej. Dlatego szczegółowe badania chemiczne winny poprzedzać projekt i realizację kolumn cementowogruntowych, wykonywanych zwłaszcza w technologii DSM-dry. Kolumny cementowogruntowe mogą być zbrojone przy zastosowaniu zbrojenia wiotkiego (koszy z prętów zbrojeniowych) lub zbrojenia sztywnego (kształtowników). Kolumny DSM mogą być wykorzystywane jako elementy wzmacniające podłoże gruntowe, ale także jako elementy palisad – obudowy wykopów oraz jako ekrany, przegrody wodoszczelne. Materiał kolumn DSM nie jest mrozoodporny, co należy uwzględnić przy projektowaniu i realizacji.

3.3. Iniekcja strumieniowa

Technologia jet grouting – wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej – polega na wprowadzeniu w podłoże (pionowo lub pod kątem do ok. 30°) żerdzi wiertniczej o niewielkiej średnicy, umożliwiającej iniekcję zaczynem cementowym pod ciśnieniem przekraczającym 100 atm. Technologia ta różni się od wgłębnego mieszania z zastosowaniem pomp podających zaczyn cementowy pod ciśnieniem, umożliwiającym zniszczenie pierwotnej struktury ośrodka i penetrację na znaczną odległość. Średnice kolumn jet grouting wynoszą od ok. 50 do ponad 400 cm. Kolumny mogą być formowane we wszystkich gruntach, mineralnych i organicznych, rodzimych i nasypowych. Średnia wartość wytrzymałości kompozytu cementowogrunтового waha się od ok. 2,5 MPa (dla kolumn w gruntach organicznych) do ponad 20,0 MPa (dla kolumn w piaskach i żwirach). Kolumny jet grouting mogą być zbrojone, podobnie jak kolumny cementowogruntowe DSM.

Zakres stosowania wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej ogranicza wysoki koszt robót.

3.4. Iniekcje gruntowe (zastrzyki)

Stosowane są w celu wzmocnienia lub uszczelnienia podłoża gruntowego. Iniekcje gruntowe polegają na wprowadzaniu w podłoże gruntowe, najczęściej przez otwory wiertnicze, przy użyciu pomp podających pod zróżnicowanym ciśnieniem (od kilku do kilkudziesięciu atmosfer) iniektu w postaci zaczynu, zawiesiny, roztworu lub płynnego betonu. Jednym ze sposobów iniekcji gruntowej, który znalazł zastosowanie w budownictwie drogowym, jest iniekcja zagęszczająca (*Compaction Grouting*), polegająca na wtłaczaniu w słabonośny ośrodek gruntowy gęstego zaczynu cementowego lub betonu o konsystencji płynnej. Metoda CG znalazła zastosowanie zwłaszcza w pracach remontowych.

3.5. Powierzchniowa stabilizacja

W budownictwie drogowym z powodzeniem stosowane jest powierzchniowe ulepszanie podłoża gruntowego spoiwami hydraulicznymi. Ulepszanie to zwykle nazywane jest stabilizacją. Do stabilizacji chemicznej używany jest najczęściej cement, niekiedy wapno, popioły hutnicze lub inne spoiwa hydrauliczne. Ulepszeniu metodą stabilizacji chemicznej poddawane mogą być grunty rodzime i antropogeniczne nasypy, o uziarnieniu od glin i pyłów do piasków, pospółek i żwirów. Nie zaleca się



Iniekcja strumieniowa jet grouting

przeprowadzania stabilizacji chemicznej gruntów organicznych o zawartości części organicznych powyżej 5% oraz gruntów ilastych (o zawartości frakcji iłowej $f_i > 30\%$). Głębokość skutecznego mieszania w pojedynczej warstwie sięga 40 cm.

4. Wzmocnienie podłoża przy użyciu geosyntetyków

Nowoczesne metody wzmocnienia słabonośnego podłoża gruntowego wiążą się ze stosowaniem geosyntetyków. Zależnie od technologii produkcji, zastosowanych materiałów oraz finalnych właściwości geosyntetyku, wyróżnia się pięć podstawowych kategorii, cechujących się odmiennymi właściwościami i zastosowaniami: geowłókniny, geotkaniny, geosiatki, geomembrany i geokompozyty.

Geowłókniny – wyroby tekstylne, najczęściej igłowane, znajdują zastosowanie przy wzmacnianiu podłoża gruntowego. Wykorzystywane są ich właściwości separacyjne i filtracyjne oraz ochronne.

Geosiatki – wyroby o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i stosunkowo niewielkiej odkształcalności, są stosowane w konstrukcjach ziemnych (nasypach) i przy wzmacnianiu podłoża. Wykorzystywana jest ich wysoka wytrzymałość.

Geotkaniny – najczęściej tkane materiały syntetyczne, cechujące się również wysoką wytrzymałością na rozciąganie, są stosowane przy wzmacnianiu podłoża gruntowego. Wykorzystywane są ich wytrzymałość na rozciąganie oraz właściwości separacyjne i ochronne.

Geomembrany jako geosyntetyki nieprzepuszczalne stosowane są najczęściej do uszczelniania składowisk odpadów, dna sztucznych zbiorników wodnych i magazynów środków chemicznych, w tym obiektów magazynowania i dystrybucji paliw płynnych.

Geokompozyty są wyrobem stanowiącym połączenie dwóch lub trzech rodzajów geosyntetyków, np. geosiatki i geowłókniny. Stosowane są jako elementy wzmocnienia podłoża, np. przy projektowaniu i realizacji częściowej wymiany gruntu (jako elementy separujące poszczególne warstwy gruntu i zbrojące podłoże), przy konsolidacji z zastosowaniem geodrenów, przy projektowaniu i realizacji skarp ziemnych.

5. Wzmacnianie gruntu: projekt – realizacja – kontrola – monitoring

Nowoczesne technologie wzmacniania podłoża gruntowego rozwijane są niezwykle dynamicznie. Rozwojowi metod towarzyszy ich ciągła modyfikacja oraz opracowywanie nowych metod obliczeniowych i sposobów projektowania [12, 13].

Projektowanie wzmocnień podłoża czerpie z doświadczeń zebranych przy zrealizowanych wcześniej inwestycjach. Istotną rolę odgrywa nadzór geotechniczny, kontrola poprawności i skuteczności przeprowadzonych zabiegów wzmacniających oraz monitoring geodezyjny. Nadzór geotechniczny winien obejmować wszystkie etapy realizacji robót, a zebrane dane powinny zostać wykorzystane w ramach tzw. aktywnego projektowania do weryfikacji założeń projektowych i wprowadzenia ewentualnych korekt. Wszystkie zmiany wprowadzone w trakcie realizacji specjalistycznych robót ziemnych i fundamentowych powinny zostać uwidocznione w dokumentacji powykonawczej. Sporządzenie takiej dokumentacji jest obowiązkiem wykonawcy wzmocnienia.



METRIS Sp. z o.o.
Instytut Badań dla Budownictwa

mertis.com.pl

Badania nośności pali metodą statyczną
Badania nośności pali metodą dynamiczną
Badania ciągliwości pali
Pomiary wibracji
Pomiary inklinometryczne ścianek szczelnych,
ścianek szczelinowych oraz skarp



Metris Sp. z o.o. Instytut Badań dla Budownictwa

ul. Łąkoszyńska 127A
99-300 Kutno

tel./fax: +48 24 253 50 55
e-mail: biuro@metris.com.pl

PEWNY SPOŚÓB

na wzmocnienie
podłoża gruntowego

w budownictwie drogowym



Wysokiej jakości hydrauliczne spoiwa drogowe TERRAMIX od wielu lat znajdują zastosowanie w budownictwie komunikacyjnym i robotach ziemnych. Są przeznaczone do stabilizacji i ulepszenia gruntów w zakresie:

- poprawy zagęszczalności
- osuszania i poprawy parametrów geotechnicznych
- poprawy nośności
- zwiększenia wytrzymałości na ściskanie
- zwiększenia odporności na wodę i mróz



Więcej informacji na stronie
www.spoiwex.pl



Stabilizacja powierzchniowa spoiwami hydraulicznymi



Stabilizacja powierzchniowa spoiwami hydraulicznymi

Nie mniej istotną od nadzoru geotechnicznego rolę odgrywa monitoring geodezyjny. Pomiary geodezyjne, rozpoczęte już na etapie wymiany bądź wzmocnienia gruntu, powinny dostarczyć pełnych danych o deformacjach (osiadaniach) wzmocnionego podłoża, np. w okresie przeciążenia podłoża oraz w okresie wykonywania budowli drogowych. Monitoring geodezyjny należy prowadzić również na początkowym etapie eksploatacji inwestycji posadowionej na wzmocnionym podłożu gruntowym.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych. Dz.U. 2012, poz. 463.
- [2] Norma PN-EN 1997-1 (maj 2008) z późn. zm.; Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Cz. 1. Zasady ogólne.
- [3] Norma PN-EN 1997-2 (kwiecień 2009) z późn. zm.; Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Cz. 2. Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [4] Norma PN-B-02479:1998. Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
- [5] Norma PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [6] Norma PN-83/B-03010. Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] Norma PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [8] Wytyczne badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. GDDP. Warszawa 1998.
- [9] Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych. GDDP. Warszawa 1999.
- [10] Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. GDDP, IBDiM. Warszawa 2002.
- [11] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDKiA, Politechnika Gdańska. Gdańsk 2012.
- [12] Hansbo S.: *Grunt Improvement*. eLib AB, 2004.
- [13] *Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusions ground improvements*. Asiri National Project. Paris 2013.



PPI CHROBOK



- pogrążanie i wyciąganie grodzic stalowych
- przewiertki sterowane (HDD) do Ø1500mm
- kotwy, gwoździe gruntowe i mikropale
- wbijanie kształtowników stalowych dla potrzeb ścianek berlińskich
- pale przemieszczeniowe FDP
- pale CFA
- mikrotuneling do Ø2400mm
- kolumny DSM i pale rurowe
- przewiertki i przeciski poziome do Ø2800mm
- iniekcje wysokociśnieniowe jet-grouting
- wiercenia badawcze, poszukiwawczo-rozpoznawcze
- relining do Ø1000mm
- projektowanie w zakresie wyżej wymienionych robót inżynierskich

PPI CHROBOK SA
43-220 Bojszowy Nowe, ul. Kowola 11
+48 32 218 98 88 ppi@chrobok.com.pl

WWW.CHROBOK.COM.PL