

PROBLEMATYKA ORAZ SPOSOBY STABILIZACJI I WZMACNIANIA GRUNTÓW BUDOWLANYCH

BADANIA GEOTECHNICZNE A FUNDAMENTOWANIE BUDYNKÓW I BUDOWLI.

Zagadnienie geotechnicznych badań podłoża gruntowego oraz fundamentowania jest jednym z istotnych elementów każdego procesu projektowania i realizacji inwestycji budowlanej. Niezależnie od wielkości i rangi planowanej inwestycji problematyce posadowienia należy i warto poświęcić należną jej uwagę. Zakres badań podłoża winien być adekwatny do tzw. kategorii geotechnicznej obiektu. Już na etapie dokumentowania geotechnicznego celowa i konieczna jest współpraca pomiędzy geotechnikiem – dokumentatorem a projektantem, gwoźli dostarczenia pełnego zestawu danych do projektowania.

Rozwój budownictwa coraz częściej stwarza konieczność posadowienia budynków i budowli w terenach o złożonej, niekorzystnej budowie geologicznej i skomplikowanych bądź złożonych warunkach geotechnicznych, w miejscach występowania gruntów słabonośnych. Pojęcie gruntów słabonośnych obejmuje podłoża o niewielkiej wytrzymałości na ścinanie i względnie dużej ściśliwości. Do grupy gruntów słabonośnych zalicza się rodzime osady organiczne, miękkoplastyczne grunty spoiste, luźne osady piaszczyste oraz nasypy antropogeniczne. Podkreślić należy, iż analizując właściwości podłoża gruntowego należy mieć na uwadze planowaną inwestycję. Wielkość obciążeń przekazywanych na podłoża gruntowe oraz wymagania dotyczące ograniczenia i ujednoczenia osiadań fundamentów decydują niejednokrotnie o ostatecznej ocenie jakości podłoża gruntowego i – w konsekwencji – przyjęciu określonego sposobu posadowienia.

POSADOWIENIE BEZPOŚREDNIE A GŁĘBOKIE.

W klasycznym podziale, zawartym w większości podstawowych podręczników mechaniki gruntów i fundamentowania, wyodrębnione zostały: posadowienie bezpośrednie oraz posadowienie pośrednie, głębokie. W praktyce inżynierskiej, w przypadku występowania korzystnych warunków gruntowo – wodnych, projektowano fundamenty bezpośrednie: stopy, ławy, bądź – dla większych obiektów – płyty lub ruszty fundamentowe. Występowanie gruntów słabonośnych było najczęściej przyczynkiem do projektowania i realizacji fundamentów głębokich.

Na przestrzeni minionych, ponad dwudziestu lat, dynamiczny rozwój geotechniki i geoinżynierii, zarówno w zakresie szczegółowych badań „in-situ” podłoża gruntowego jak i technik posadowienia spowodowały, że podział na fundamentowanie bezpośrednie i pośrednie jest już dziś anachroniczny. Coraz częściej – wykorzystując nowoczesne technologie fundamentowania – budynki i budowle posadawiane są bezpośrednio na podłożu wzmocnionym, przy czym wzmocnianiu i stabilizacji podlegają zarówno słabonośne grunty rodzime jak i antropogeniczne.

ROZWÓJ NOWYCH TECHNOLOGII FUNDAMENTOWANIA.

Minione lata przyniosły gwałtowny rozwój technik fundamentowania. Skala zmian w fundamentowaniu głębokim najlepiej widoczna jest po analizie normy [2] oraz porównaniu typów i technologii wykonywania pali fundamentowych wymienionych w tej normie z dominującymi w praktyce inżynierskiej ostatnich lat.

Jeszcze szybszy i bardziej dynamiczny jest rozwój nowych technologii wzmocnienia słabonośnych podłoża gruntowych. Przyczyn tego rozwoju szukać należy w:

- poszukiwaniu nowych sposobów posadowienia budynków i budowli, alternatywnych w stosunku do „klasycznych”, atrakcyjnych ekonomicznie i technicznie (niższy koszt realizacji robót, krótszy czas realizacji, przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów technicznych);
- szybkim rozwoju budownictwa, zwłaszcza drogowego, wytyczaniu tras dróg przez obszary wcześniej wykluczone z zabudowy, m.in. z powodu występowania na nich rodzimych gruntów słabonośnych;
- ponownym zagospodarowywaniu terenów wcześniej użytkowanych na cele budowlane, zdegradowanych, pokrytych niekiedy mięszymi warstwami niekontrolowanych nasypów antropogenicznych;
- stawianiu coraz ostrzejszych wymogów technicznych posadowieniu fundamentów, m.in. konieczności ograniczenia i ujednolicenia osiadań.

Należy zwrócić uwagę, iż coraz szerszy zakres stosowania metod wzmocnienia gruntu przyczynia się do ich modyfikacji i rozwoju, przy czym zebrane, przy kolejnych realizacjach, doświadczenia wykorzystywane są do weryfikowania i doskonalenia metod obliczeniowych. Metody obliczeń i sposoby projektowania wzmocnienia gruntu, bazują na pewnych założeniach teoretycznych i – w nie mniejszym stopniu – na praktycznych doświadczeniach.

Realizacja specjalistycznych robót ziemnych i fundamentowych, zmierzających do wzmocnienia podłoża, prowadzona jest na podstawie projektów wykonawczych, 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 – w przypadku takiej konieczności – wyników uzupełniających badań geotechnicznych prowadzonych w trakcie realizacji robót specjalistycznych. Metoda ta, zwana metodą aktywnego projektowania, przewiduje nieprzerwany udział projektanta - geotechnika w realizacji robót specjalistycznych.

Bardzo istotną rolę odgrywa monitoring geodezyjny, obejmujący m.in. szczegółowe pomiary osiadań fundamentów posadowionych na wzmocnionym podłożu gruntowym, pozwalający na zweryfikowanie założeń projektowych oraz obliczeń wykonanych na etapie projektowania i realizacji specjalistycznych robót fundamentowych. Wyniki pomiarów geodezyjnych wykorzystywane są zarówno przy weryfikacji metod obliczeniowych jak i parametrów geotechnicznych, określanych badaniami geotechnicznymi dla wzmocnianych warstw gruntu, będących podstawą obliczeń.

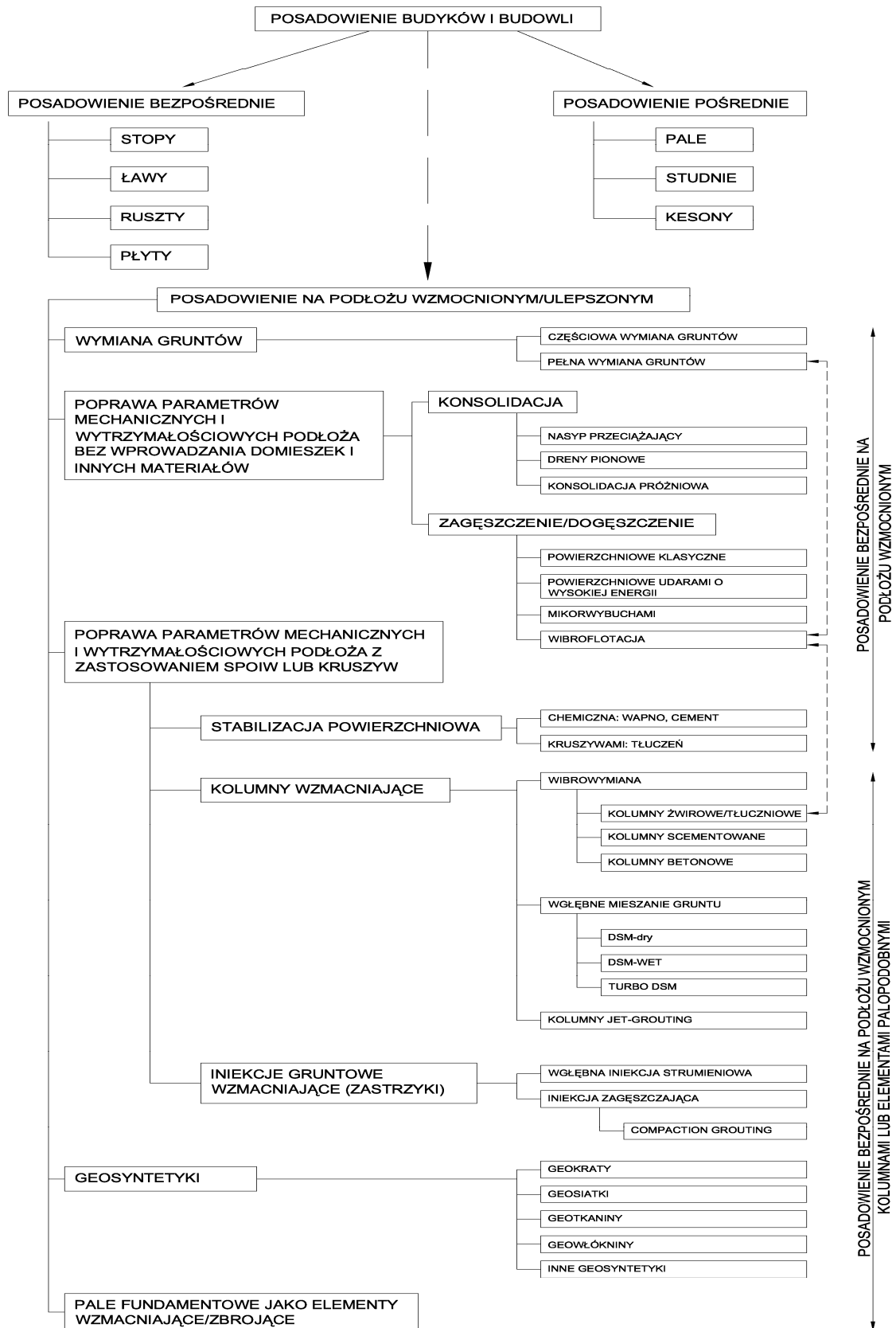


TABELA 1. Podział posadowienia budynków i budowli

KLASYFIKACJA METOD WZMACNIANIA GRUNTU.

Próba jednoznacznego sklasyfikowania metod wzmocnienia gruntu jest bardzo trudna. Jako kryterium podziału przyjmowane są: technologia wzmocnienia, głębokość ingerencji w podłoże, stosowane materiały, finalny efekt wzmocnienia. Dodatkowym czynnikiem, istotnie utrudniającym sklasyfikowanie poszczególnych metod jest fakt, że granice pomiędzy poszczególnymi technologiami są nieostre; często ponadto różne sposoby stosowane są łącznie, w celu osiągnięciażądanego efektu wzmocnienia podłoża gruntowego.

Wydaje się jednak, że celowym byłoby wydzielenie następujących grup technologii:

1. Wymiana gruntów słabonośnych na nasyp z kwalifikowanego kruszywa.
2. Wzmocnienie podłoża poprzez 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 – elementów palopodobnych.
4. Wzmocnienie podłoża przy użyciu geosyntetyków.

1. WYMIANA GRUNTU.

Wymiana gruntu jest sposobem stosowanym w fundamentowaniu od bardzo dawna. Nie jest to metoda, przynajmniej nie zawsze – 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. Ze względu na zakres i sposób wymiany, występuje kilka wariantów wymiany gruntu:

- 1.1. CZĘŚCIOWA WYMIANA GRUNTU POD FUNDAMENTAMI. Polega na uformowaniu tzw. poduszek fundamentowych pod fundamentami bezpośrednimi (ławami, stopami). Najczęściej wymiana przeprowadzana jest powyżej lustra wody gruntowej, na szerokości nieznacznie przekraczającej wymiary fundamentu bezpośredniego. Rozwiązanie to stosowane być może w celu umożliwienia posadowienia stosunkowo niewielkich i lekkich budynków i budowli, w przypadku których nie są stawiane wysokie wymagania w zakresie redukcji i ujednolicenia osiadań.
- 1.2. CZĘŚCIOWA WYMIANA GRUNTU NA CAŁYM OBSZARZE PLANOWANEJ INWESTYCJI. Polega na dokonaniu wymiany górnych, stropowych partii osadów słabonośnych, z pozostawieniem spągowych partii, nie wymienionych, 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 podłoże w podstawie formowanego nasypu budowlanego. Rozwiązanie to stosowane być może w celu umożliwienia posadowienia stosunkowo lekkich budynków i budowli, w przypadku których nie są stawiane wysokie wymagania w zakresie redukcji i ujednolicenia osiadań, a także w celu umożliwienia posadowienia dróg – o niewielkim natężeniu lekkiego ruchu.



Częściowa wymiana gruntów [Mogilno - Quarto-Sys Spółka z o.o]

- 1.3. PEŁNA WYMIANA GRUNTU „NA SUCHO”, tj. powyżej lustra wody gruntowej na nasyp budowlany z kwalifikowanego kruszywa, zagęszczanego warstwami. Zagęszczenie – w zależności od użytego sprzętu i od właściwości użytego kruszywa – winno odbywać się warstwami o miąższości od około 30 do około 80 cm. Rozwiązanie to umożliwia realizację posadowienia bezpośredniego i gwarantuje znaczącą redukcję osiadań.
- 1.4. PEŁNA WYMIANA GRUNTU PONIŻEJ LUSTRA WODY. Wykonywana 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 (Ps/Pr/Po; zawartość frakcji pyłowej: $f_{\pi} \leq 3\%$), uformowany pod wodą nasyp może i powinien zostać zagęszczony metodą wibroflotacji (\rightarrow p. 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 / tłuczniowe (\rightarrow 3.1.1.). Rozwiązanie to umożliwia realizację posadowienia bezpośredniego i gwarantuje znaczącą redukcję osiadań.



Wymiana gruntów „na sucho” i „na mokro” [A1 - Skanska / A2 - NCC]

- 1.4.1. Metodę wypierania można stosować przy wymianie płynnych i półpłynnych osadów organicznych, o wysokiej wilgotności ($w_n \geq 200\%$) i wysokiej zawartości części organicznych ($I_{om} \geq 70\%$), o wytrzymałości na ścinanie $\tau \leq 20$ [kPa].
- 1.4.2. Bagrowanie. W przypadku konieczności wymiany gruntu organicznego nie spełniającego podanych powyżej, orientacyjnych, wymogów bądź wymiany słabonośnych gruntów mineralnych, nasypów antropogenicznych – grunt słabonośny należy bagrować.

2. WZMOCNIENIE GRUNTU POPRZEZ MODYFIKACJĘ JEGO WŁAŚCIWOŚCI.

Wzmocnienie gruntu poprzez modyfikację jego właściwości / parametrów, bez stosowania domieszek innych materiałów (kruszyw, spoiw) to grupa metod, stosowanych generalnie w przypadku występowania gruntów rodzimych, podlegających wzmocnieniu, a w przypadku wzmocnienia nasypów antropogenicznych – często łączonych z częściową wymianą gruntu.

2.1. KONSOLIDACJA GRUNTU. Konsolidacja gruntu jest procesem fizycznym, zachodzącym w gruntach w pełni nasyconych (gruntach organicznych, miękkoplastycznych gruntach spoistych), cechujących się względnie niskim współczynnikiem filtracji. Proces konsolidacji aktywowany jest przyłożeniem do konsolidowanego gruntu obciążenia zewnętrznego. W pierwszym etapie, na skutek niewielkiej filtracji, przyłożone obciążenie powoduje wzrost ciśnienia porowego. W dalszym etapie następuje zmniejszenie porowatości gruntu – woda „wyciskana” jest w porów, aż do całkowitej likwidacji nadciśnienia porowego. Procesowi spadku porowatości towarzyszy wzrost wytrzymałości na ścinanie (zwłaszcza spójności gruntu c , a także kąta tarcia wewnętrznego ϕ) oraz zwiększenie wartości modułu ściśliwości. 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 wzmocnianiu warstw słabonośnych o stosunkowo niewielkiej miąższości (nie przekraczającej na ogół 2÷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, a droga filtracji równa jest połowie miąższości konsolidowanej warstwy. W przypadku, gdy osady konsolidowane podścielają grunty spoiste o niskiej filtracji – pionowa filtracja odbywa się tylko w jednym kierunku, a droga filtracji równa jest miąższości konsolidowanej warstwy. Zaletą tej metody jest prostota wykonania, niski koszt – zwłaszcza przy dostępności kruszywa na nasyp przeciążający, istotną wadą – względnie długi czas konsolidacji.



Konsolidacja nasypem przeciążającym [A2 - NCC]

- 2.1.2. Konsolidacja wspomagana drenami. W celu redukcji czasu konsolidacji ośrodka słabonośnego, zwłaszcza przy większych miąższościach wzmacnianego gruntu, proces konsolidacji gruntu pod obciążeniem zewnętrznym (nasypem przeciążającym) wspomagany jest wykonaniem drenów pionowych. Dreny wykonywane są zazwyczaj w regularnej, trójkątnej lub kwadratowej siatce, w rozstawie około 1,5÷2,5 m. Dreny mogą być projektowane i wykonywane w trojaki sposób:
- klasyczne dreny piaskowe, wykonywane metodą wiercenia;
 - dreny prefabrykowane (geodreny), wciskane w podłoże, wykonane z profilowanej taśmy plastikowej, w osłonie z geowłokny filtracyjnej;
 - kolumny żwirowe / tłuczniowe, pełniące rolę drenów; uwaga: zastosowane kolumny żwirowych / tłuczniowych (→ 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. Wykorzystują wpływ efektu obniżenia lustra wody i / 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. Każdy nasyp budowlany musi być formowany i zagęszczany warstwami, przy użyciu walców lub płyt wibracyjnych. Warstwy osadów słabonośnych mogą być zagęszczane powierzchniowe lub wgłębnie.
- 2.2.1. Zagęszczanie dynamiczne. Technika wynaleziona w połowie ubiegłego wieku przez Menarda. Polega na dynamicznym obciążaniu podłoża ciężkim ubijakiem (do 40 Mg), swobodnie spuszczanym z wysokości do około 25÷30 m. Metoda z powodzeniem stosowana w zagęszczaniu luźnych osadów piaszczystych, nasypów

antropogenicznych ze szczególnym uwzględnieniem wysypisk odpadów komunalnych. Zasięg – głębokość oddziaływania jest proporcjonalna do energii uderzenia. Metoda stosowana 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. W odróżnieniu od tej pierwszej – punkty uderzeń nie są rozłożone równomiernie na całej powierzchni wzmacnianego obszaru; kolejne uderzenia ciężkiego ubijaka – o mniejszej 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.



Dynamiczna wymiana gruntu [Nowe Marzy, A1 - Polbud Pomorze]

- 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 kilku – kilkunastu metrów, najczęściej w regularnej siatce; efektem detonacji jest dogęszczenie luźnego, porowatego podłoża. Metoda stosowana w budownictwie komunikacyjnym.
- 2.2.4. Wibroflotacja. Metoda szeroko stosowana we wzmacnianiu – zagęszczaniu luźnych osadów piaszczystych, zwłaszcza poniżej lustra wody gruntowej. Metoda, której istota polega na wprowadzeniu we wzmacniane podłoże gruntowe, na głębokość kilkunastu – a nawet do ponad trzydziestu metrów tzw. wibroflota: masywnego, pionowego wibratora, generującego drgania o określonej amplitudzie i częstotliwości. Drgania urządzenia przekazywane są na podłoże. W przypadku gruntów nienawodnionych

skutkują zmniejszeniem porowatości ośrodka i jego dogęszczeniem. W przypadku gruntów nawodnionych – wibroflotacja powoduje zmniejszenie porowatości, połączone chwilowym upłynnieniem. Wibroflotacja może być z powodzeniem stosowana przy zagęszczaniu rodzimych, luźnych piasków jak i nasypów formowanych pod wodą metodą wymiany „na mokro” (→ 1.4.). Najskuteczniejsza jest przy zagęszczaniu piasków o niewielkiej zawartości frakcji pyłowej ($f_{\pi} \leq 3\%$). Względy ekonomiczne i skuteczność tej metody decydują o jej rozpowszechnieniu.



Wibroflotacja [A2 – Keller Polska]

3. WZMOCNIENIE GRUNTU PRZY ZASTOSOWANIU SPOIW I / LUB KRUSZYW.

Wzmocnienie podłoża przy zastosowaniu domieszek (kruszywa, spoiw hydraulicznych), np. na drodze powierzchniowej lub wgłębnej stabilizacji bądź formowania kolumn – elementów palopodobnych obejmuje grupę technologii szeroko stosowanych przy wzmocnianiu niejednorodnych podłoży słabonośnych. W odróżnieniu od metod wymienionych w rozdziale 2., technologie stabilizacji i wykonywania elementów palopodobnych cechują się stosowaniem – wprowadzaniem w podłoże kwalifikowanych kruszyw i / lub spoiw hydraulicznych. Wszystkie te technologie wymagają stosowania specjalistycznego sprzętu.

3.1. WIBROWYMIANA. Technologia stanowiąca rozwinięcie i uzupełnienie metody wibroflotacji. Technologia wibrowymiany, w odróżnieniu od klasycznej wibroflotacji, wymaga zastosowania wibratora rdzeniowego, umożliwiającego wtłoczenie we wzmocniane podłoże, poprzez głowicę wibratora, kruszywa bądź suchej mieszanki betonowej. Rezultatem wibrowymiany jest zarówno dogęszczenie słabonośnego podłoża jak i uformowanie kolumny z kwalifikowanego materiału. Metoda wibrowymiany jest z powodzeniem stosowana, zarówno w budownictwie ogólnym, przemysłowym jak i w budownictwie drogowym, do wzmocniania słabonośnych podłoży, nie podatnych na wgłębne zagęszczenie wibroflotacją. Wibrowymiana stosowana jest we wszystkich słabonośnych gruntach mineralnych oraz

organicznych o odpowiednio wysokiej wytrzymałości na ścinanie ($\tau \geq 25$ [kPa]). Głębokość wibrowymiany może sięgać kilkunastu – ponad dwudziestu metrów.

- 3.1.1. Kolumny żwirowe. Najczęściej projektowanym i realizowanym wariantem wibrowymiany są tzw. kolumny żwirowe. Przy użyciu tzw. wibratora rdzeniowego (zwanego też wibratorem słuzowym) o średnicy około 30÷40 cm, w słabonośnym podłożu formowane są kolumny z kwalifikowanego kruszywa: najczęściej żwiru. Alternatywnie używana być może pospółka, rozkruszony, frakcjonowany gruz betonowy lub tłuczeń. Materiał podawany przez głowicę wibratora, zagęszczany, formuje kolumny o średnicy uzależnionej od wytrzymałości i oporu wzmocnianego podłoża, najczęściej około 60÷80 cm. W przypadku formowania kolumn w słabonośnym podłożu organicznym lub w miękkoplastycznych, nie skonsolidowanych osadach spoiwych średnica kolumn może być większa i przekraczać nawet 100 cm. Kolumny żwirowe mogą pełnić rolę drenów pionowych o dużej średnicy (→ 2.1.2.).



Kolumny żwirowe [Poznań, Keller Polska]

- 3.1.2. Kolumny scementowane. Kolumny wykonywane analogicznie do kolumn żwirowych. W przypadku wzmocnienia bardzo słabych gruntów bądź w przypadku znaczących obciążeń przekazywanych na podłoże zamiast kruszywa mineralnego stosowane być może kruszywo wymieszane ze spoiwami hydraulicznymi (np. pospółka z cementem w ilości kilkudziesięciu kg / m³ kruszywa).

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



Kolumny betonowe [Poznań, Franki Fundamenty]

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 wzmocnione, słabonośne podłoże.

Kolumny betonowe mogą natomiast z powodzeniem być wykonywane przy użyciu palownic stosowanych do wykonywania pali cfa. Kolumny betonowe wykonywane tą technologią cechują się stałą, określoną średnicą, najczęściej 500 – 600 – 800 mm.

Kolumny żwirowe, a zwłaszcza kolumny scementowane i kolumny betonowe są elementami palopodobnymi. Projektowanie tych elementów musi uwzględniać sprawdzenie zarówno nośności wewnętrznej elementu wzmocniającego podłoże jak i nośność gruntu – wzdłuż kolumny i pod jej podstawą.

- 3.2. WGLĘBNA STABILIZACJA. Technologia wglębnej stabilizacji – wglębnego mieszania gruntu ze spoiwami hydraulicznymi (ang: Deep Soil Mixing) polega, jak wskazuje nazwa, na wglębnym wymieszaniu szkieletu gruntowego słabonośnego podłoża 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. W rezultacie formowana jest kolumna z kompozytu cementowogruntowego, charakteryzującego się zwiększoną wytrzymałością na ściskanie, niewielką ścisłością i małą wodoprzepuszczalnością. Wglębnej stabilizacji podlegać mogą wszystkie mineralne grunty słabonośne oraz grunty organiczne o ograniczonej zawartości części organicznych ($I_{om} \leq 30\%$); 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 cementowogrunтового uzależniona jest od rodzaju i ilości użytego spoiwa oraz od rodzaju wzmacnianego ośrodka. Średnia wartość wytrzymałości kompozytu cementowogrunтового waha się od około 1,0 MPa (dla kolumn formowanych w gruntach organicznych) do ponad 5,0 MPa (dla kolumn formowanych w piaskach). Technologie wglębnej 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. Kolumny formowane poprzez mieszanie słabonośnego ośrodka ze spoiwem hydraulicznym (cementem, wapnem, popiołami) „na sucho”; stosowane do wzmacniania w pełni nawodnionych gruntów słabonośnych. Bardzo istotnym czynnikiem jest fakt, iż 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. Kolumny formowane poprzez mieszanie słabonośnego ośrodka ze spoiwem hydraulicznym (najczęściej z zaczynem cementowym) „na mokro”; stosowane w bardzo szerokim zakresie, do wzmacniania luźnych piasków, miękkoplastycznych i plastycznych glin, gruntów organicznych (namulów) oraz gruntów nasypowych o zróżnicowanej genezie i uziarnieniu. Pograżanie żerdzi do formowania kolumn DSM-wet wspomagane jest wpływem – iniekcją zaczynu cementowego pod ciśnieniem kilku atmosfer. Możliwość formowania kolumn w szerokim zakresie zmienności podłoża, o średnicy od 500 do 1200 mm i długości (głębokości od kilku do kilkunastu metrów), stosunkowo niewielki koszt i tempo realizacji robót stanowią o bardzo dynamicznym rozwoju tej technologii.

Uwaga: kolumny cementowogruntowe są elementami palopodobnymi. Projektowanie tych elementów musi uwzględniać sprawdzenie zarówno nośności wewnętrzną elementu wzmacniającego podłoże jak i nośność gruntu – wzdłuż kolumny i pod jej podstawą. Nośność wewnętrzną materiału – cementogruntu jest uzależniona od rodzaju gruntu, w którym formowana jest kolumna oraz od chemizmu gruntów 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 walcowanych). Kolumny DSM mogą być wykorzystywane jako elementy wzmacniające podłoże gruntowe, ale także jako elementy palisad – obudowy wykopów o głębokości sięgającej 6 m oraz jako ekrany – przegrody wodoszczelne.

Materiał kolumn DSM – kompozyt cementowogruntowy nie jest mrozoodporny. Fakt ten należy nieć na uwadze przy projektowaniu i realizacji wzmocnień w tej technologii.



Kolumny DSM-wet [A1, Rusocin - Stabilator]

- 3.3. INIEKCJA STRUMIENIOWA. Technologia jet-grouting (zwana też soilcrete) wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej polega na wprowadzeniu w podłoże żerdzi wiertniczej o niewielkiej średnicy (żerdź ta może być wprowadzana w grunt pionową lub pod kątem – do około 30°), umożliwiającej iniekcję zaczynem cementowym pod wysokim ciśnieniem, przekraczającym 100, a sięgającym niekiedy 400 atmosfer. Technologia ta różni się od wglębnego mieszania zastosowaniem pomp podających zaczyn cementowy pod ciśnieniem, umożliwiającym zniszczenie pierwotnej struktury ośrodka i penetrację na znaczną odległość od żerdzi. Średnice formowanych kolumn jet grouting wynoszą zwykle od około 50 do ponad 200 cm. Kolumny jet-grouting mogą być formowane we wszystkich gruntach, mineralnych i organicznych, rodzimych i nasypowych. Średnia wartość wytrzymałości kompozytu cementowogrunтового formowanego metodą jet-grouting waha się od około 2,5 MPa (dla kolumn formowanych w gruntach organicznych) do ponad 20,0 MPa (dla kolumn formowanych w piaskach i żwirach). Formowane kolumny jet-grouting, stanowiące elementy palopodobne, tworzące palisady lub ekrany wodoszczelne, mogą być zbrojone – podobnie jak kolumny cementowogruntowe DSM.



Iniekcja strumieniowa Jet-grouting [Poznań, Franki Fundamenty]

Technologia iniekcji strumieniowej z powodzeniem stosowana jest przy wzmocnianiu fundamentów istniejących budynków i budowli, praktycznie w każdych warunkach gruntowo – wodnych. Istotną zaletą jest jej uniwersalność, zminimalizowany wpływ na otoczenie, brak oddziaływań dynamicznych. Pewną wadą jest duża ilość urobku – zaczynu wypływającego na powierzchnię terenu w trakcie formowania kolumn jet-grouting. Zakres stosowania wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej ogranicza wysoki koszt robót.

Technologia jet-grouting jest pośrednią pomiędzy metodami wzmocniania podłoża oraz głębokiego fundamentowania.

- 3.4. INIEKCJE GRUNTOWE (ZASTRZYKI). Stosowane są w celu wzmocnienia oraz / lub uszczelnienia podłoża gruntowego. Iniekcje gruntowe zasadzają się na wprowadzaniu w głębsze partie podłoża, najczęściej poprzez otwory wiertnicze, przy użyciu pomp podających pod zróżnicowanym ciśnieniem (od kilku do kilkudziesięciu atmosfer) iniekt w postaci zaczynu, zawiesiny, roztworu lub płynnego betonu. Jednym ze sposobów iniekcji gruntowej, który znalazł względnie szerokie zastosowanie w budownictwie przemysłowym i drogowym jest iniekcja zagęszczająca (Compaction Grouting), polegająca na wtłaczaniu w słabonośny ośrodek gruntowy gęstego zaczynu cementowego lub betonu o konsystencji płynnej.

3.5. POWIERZCHNIOWA STABILIZACJA. W budownictwie drogowym, ale także w budownictwie ogólnym i przemysłowym, z powodzeniem stosowane jest powierzchniowe ulepszenie podłoża gruntowego spoiwami hydraulicznymi. Ulepszenie to najczęściej nazywane jest „stabilizacją”. Do stabilizacji chemicznej używany jest najczęściej cement, niekiedy wapno, popioły hutnicze lub inne spoiwa hydrauliczne, np. silment. Ulepszeniu – stabilizacji chemicznej poddawane mogą być grunty rodzime i antropogeniczne nasypy, o uziarnieniu od glin i pyłów do piasków, pospółek i żwirów. Nie zaleca się przeprowadzania stabilizacji chemicznej gruntów organicznych o zawartości części organicznych powyżej 5 (8) %. Głębokość skutecznego mieszania, w pojedynczej warstwie, szkieletu gruntowego ze spoiwami sięga 35 cm (maksymalnie 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;
- geokompozyty.

GEOWŁÓKNINY, wyroby tekstylne, najczęściej igłowane, polipropylenowe, znajdują zastosowanie przy wzmocnianiu podłoża gruntowego, przy wykorzystaniu ich właściwości separacyjnych i filtracyjnych oraz ochronnych.

GEOSIATKI, wyroby o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (do 400 kN/m) i stosunkowo niewielkiej odkształcalności, znajdują zastosowanie w konstrukcjach ziemnych i przy wzmocnianiu podłoża, przy wykorzystaniu ich wysokiej wytrzymałości.

GEOTKANINY, najczęściej tkane materiały syntetyczne, cechujące się również wysoką wytrzymałością na rozciąganie (do ponad 200 kN/m), znajdują zastosowanie przy wzmocnianiu podłoża gruntowego, przy wykorzystaniu ich wytrzymałości na rozciąganie oraz właściwości separacyjnych i ochronnych.

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.

Geosyntetyki stosowane są częstokroć 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.



Nasyp drogowy zbrojony geosiatką i skarpa umocniona gabionami [Śrem, Skanska]

WZMACNIANIE GRUNTU: PROJEKT – REALIZACJA – KONTROLA – MONITORING.

Nowoczesne technologie stabilizacji i wzmocnienia gruntów budowlanych rozwijane są, zwłaszcza w ostatnich latach, niezwykle dynamicznie.

Rozwojowi, modyfikacjom metod towarzyszy opracowywanie nowych metod obliczeniowych i nowych sposobów projektowania wzmocnień. Projektowania wzmocnień podłoża czerpie z poświadczeń zebranych przy zrealizowanych wcześniej inwestycjach.

Istotną rolę odgrywa nadzór geotechniczny i kontrola poprawności i skuteczności przeprowadzonych zabiegów wzmocniających. Nadzór geotechniczny winien obejmować wszystkie etapy realizacji robót, a zebrane dane powinny zostać wykorzystane, w ramach tzw. aktywnego projektowania, do weryfikacji założeń projektowych i wprowadzania 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.

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 fundamentów i wznoszenia budynku / budowli. Każdorazowo, monitoring geodezyjny należy prowadzić, zgodnie z zapisami projektu wzmocnienia podłoża, również w początkowym etapie eksploatacji inwestycji posadowionej na wzmocnionym podłożu gruntowym.

WYBRANA LITERATURA:

- [01] PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [02] PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [03] Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa 2002.
- [04] *Hansbo S.*: Grunt Improvement. eLib AB, 2004.
- [05] *Pisarczyk S.*: Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. WPW. Warszawa 2004.
- [06] *Pisarczyk S.*: Grunty nasypowe; właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2004.
- [07] *Bukowski Z.*: Stabilizacja podłoża lub podbudowy i co dalej?. Magazyn Autostrady, 2/2004.
- [08] *Gmyrek Ł., Peroński M.*: Silment – alternatywa dla cementu w stabilizacji gruntów. Magazyn Autostrady, 1-2/2005.
- [09] *Gradkowski K.*: Nowe metody stabilizacji gruntów cementem. Magazyn autostrady nr 5/2006.
- [10] *Gwizdała K.*: Współczesne technologie wykonawstwa pali. Inżynieria Morska i geotechnika, nr 6/2004.
- [11] *Gwizdała K., Kościk P.*: Zastosowanie iniekcji strumieniowej. Geoinżynieria, drogi mosty tunele, nr 02/2007 (13).
- [12] *Małozieć T.*: Kilka wybranych metod konsolidacji gruntu. Geoinżynieria i tunelowanie, nr 01/2005 (04).
- [13] *Nowacki P., Łęcki P.*: Kolumny DSM jako palisada zabezpieczająca wykop. Geoinżynieria, drogi mosty tunele, nr 02/2006 (09).
- [14] *Nowacki P., Łęcki P.*: Kolumny DSM jako palisada zabezpieczająca wykop pod budynek sali koncertowej Akademii Muzycznej w Poznaniu. Inżynieria i Budownictwo, nr 9/2005.
- [15] *Rolla S.*: Destabilizacja nazewnictwa i norm drogowych. Magazyn Autostrady, 4/2007.
- [16] *Rzeźniczak J.*: Wzmacnianie słabych podłoży. Geoinżynieria, drogi mosty tunele, nr 01/2006 (12).
- [17] *Snela A.*: Aktualne metody wzmacniania podłoża gruntowego pod obiekty przemysłowe; praca magisterska (maszynopis), PP, WBiŚ, IKB, Poznań 2007.
- [18] *Topolnicki M.*: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in-situ (Soil Miting). Inżynieria Morska i geotechnika, nr 6/2003.
- [19] *Wojtasik A., Łęcki P., Troć M., Dojcz P.*: Geotechnical conditions and soil Improvement Techniques applied in construction of the A2 Motorway in Poland. Proc. of the 2nd International Conference on Problematic Soils, Petaling Jaya, Malaysia, 2006.