

Wzmacnianie słabego podłoża kolumnami w budownictwie drogowym



- mgr inż. Beata Gajewska, Instytut Badawczy Dróg i Mostów
- dr inż. Bolesław Kłosiński, Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Wzmacnianie lub ulepszenie podłoża jest obecnie codzienną praktyką w budownictwie drogowym. Coraz częściej drogi budowane są na terenach mało przydatnych do zabudowy. Dąży się do wykorzystywania w budowlach ziemnych niemal wszystkich miejscowych gruntów oraz materiałów odpadowych. Wprowadzane w kraju nowe technologie stwarzają bogate możliwości wzmacniania i ulepszenia słabych podłoży. Istnieje duża liczba metod, specjalistycznych zabiegów i wyrobów, o szerokim lub też o bardzo ograniczonym, specjalnym przeznaczeniu.

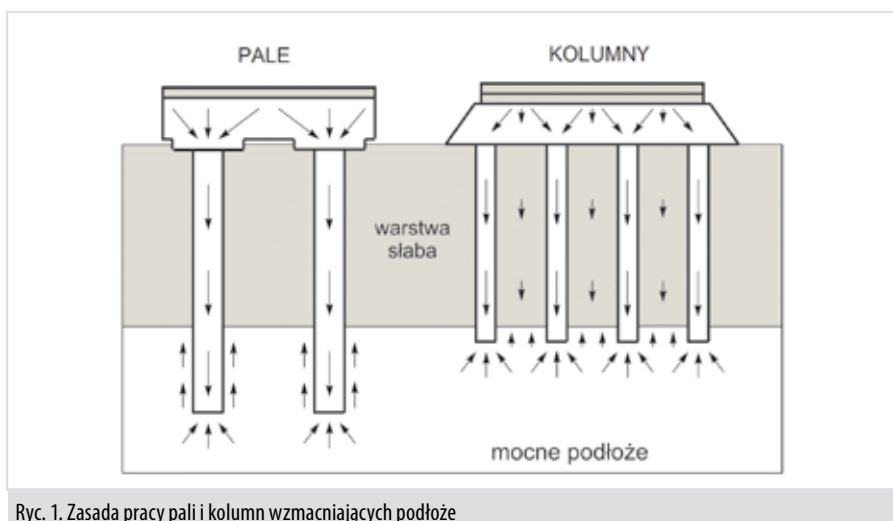
Rozróżnia się metody wzmacniania płytkiego, stosowane do bezpośredniego podłoża nawierzchni drogowej, oraz metody wzmacniania wglębnego – do głębokości nawet 20–30 m. Wzmacnianie i ulepszenie właściwości podłoża obejmuje grupę różnorodnych zagadnień, przedstawionych m.in. w *Wytucznych wzmacniania podłoża w budownictwie drogowym* [26] oraz w wielu monografiach [np. 18]. W artykule omówiono metody wykonywania różnego rodzaju kolumn stanowiących wzmocnienie podłoża nasypów.

1. Zakres i cele wzmacniania podłoża drogowego

Cele wzmacniania podłoża zależą od rodzaju zadania budowlanego i występujących warunków gruntowych. Należą do nich: zwiększenie nośności i zmniejszanie osiadań budowli, zapobieganie utracie stateczności (poślizgom lub osuwiskom), zabezpieczenie skarp wykopów i ochrona pobliskich konstrukcji, zapobieganie upłynnianiu podłoża i stabilizacja struktury podłoża.

Podłoże powinno zapewniać wymagany zapas bezpieczeństwa w odniesieniu do nośności i stateczności. Nie powinno się też nadmiernie odkształcać przez cały okres użytkowania budowli. Zgodnie z normą PN-S-02205:1998 [14] i Rozporządzeniem MTiGM [19] obliczeniowe osiadanie powierzchni nasypu (suma osiadań korpusu nasypu, podłoża wzmocnionego i podłoża rodzimego), od momentu wykonania nasypu oraz podbudowy nie powinno przekraczać 10 cm. Późniejsze osiadania eksploatacyjne nie mogą powodować deformacji profilu nawierzchni, zwłaszcza przy obiektach z mało podatnymi fundamentami, aby w miejscu styku osiadanie nasypu było równe osiadań obiektu. Jeżeli wymagania te nie są spełnione, to należy inaczej ukształtować budowlę lub poprawić właściwości podłoża. Jednym z częściej stosowanych zabiegów jest formowanie kolumn.

Potrzeba wzmacniania podłoża budowli ziemnych zachodzi wówczas, gdy występują



Ryc. 1. Zasada pracy pali i kolumn wzmacniających podłoże

w nim grunty bardzo ściśliwe, o małej lub nietrwałej wytrzymałości oraz o niestabilnej strukturze. Należą do nich:

- grunty o małej wytrzymałości (c_u do 50 kPa w warunkach bez odpływu i $CBR \leq 3$) i bardzo ściśliwe (moduł odkształcenia do 5 MPa), przede wszystkim grunty organiczne i nasypowe (antropogeniczne),
- grunty o niestabilnej strukturze (pęczniące, zapadowe – lessowe i ulegające deformacjom filtracyjnym – sufozji, podatne na upłynnienie itp.),
- podłoża w terenach osuwiskowych, krasowych i zagrożone deformacjami górnymi.

Opis metod badania słabego podłoża dla potrzeb poszczególnych rodzajów metod jego wzmacniania zawierają *Wytuczne* [26]. Badania powinny być wykonywane zgodnie z *Instrukcją badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych* [8] i Eurokodem EC7-2. Wybór metod wzmacniania oraz podstawy projektowania opisano m.in. w [3].

2. Wglębne wzmacnianie podłoża kolumnami

Wśród zalet wzmocnienia podłoża za pomocą kolumn można wyróżnić: dostosowanie długości kolumn do rzeczywistej miąższości warstw słabych, krótsza długość kolumn

w stosunku do pali, duża szybkość wykonania, zwykle niski poziom hałasu w czasie robót (z wyjątkiem kolumn wybijanych), poprawienie parametrów wytrzymałościowych słabego gruntu otaczającego kolumny.

Istnieje kilka grup metod wzmacniania wglębnego podłoża i wiele specyficznych technologii. Metody te były szeroko omówione, np. w *Wytucznych* [26] oraz publikacjach [1, 2, 4, 5, 7, 10, 18, 23, 24]. Zawierają one ogólne wskazówki wyboru rodzaju kolumn w przypadku różnych gruntów. Należy jednak mieć na uwadze, że możliwość i skuteczność zastosowania poszczególnych metod zależy nie tylko od rodzaju gruntu, ale też od jego właściwości, które mogą zmieniać się w bardzo szerokim zakresie.

W artykule przedstawiono techniki wytwarzania kolumn w warstwach słabych, zazwyczaj przy użyciu dodatkowych materiałów. Kolumny te rozmieszczane są w regularnej siatce (kwadratowej, kwadratowej z przesunięciem itp.). Do budowy kolumn używa się takich materiałów, jak np. kruszywa łamane i naturalne w przypadku kolumn kamiennych oraz kolumn wykonanych techniką wymiany dynamicznej, wapno lub cement w przypadku kolumn DSM, zaczyn cementowy lub beton niskiej klasy w przypadku kolumny CMC

i kolumn *jet grouting*. W efekcie uzyskuje się warstwę materiału kompozytowego o zwiększonych parametrach wytrzymałościowych w stosunku do gruntu w stanie naturalnym.

Należy odróżnić konstrukcję i działanie pali od kolumn. Pale są zwykle smukłymi elementami konstrukcyjnymi, formowanymi w gruncie lub prefabrykowanymi, o dużej sztywności osiowej oraz zwykle dużej wytrzymałości na zginanie. Pale są zazwyczaj zbrojone na całej lub części długości. Osiadania pali pod obciążeniem są niewielkie. Natomiast kolumny wzmacniające podłoże są rodzajem zbrojenia słabego gruntu, z którym współpracują w przenoszeniu obciążeń (ryc. 1). Kolumny mogą być podatne, częściowo podatne lub sztywne. Zasada ich działania różni się od posadowienia na palach, które przenoszą 100% obciążenia na podłoże nośne; grunt między palami nie przekazuje obciążeń (lub nawet wywołuje ich obciążenie tarciami negatywnym). W przypadku kolumn obciążenie powierzchni terenu, np. nasypem, powoduje osiadanie gruntu wraz z kolumnami. W kolumnach powstają siły wciskające działające na głowice, a na ich pobocznicę naprężenia ścinające. W górnej części słabej warstwy naprężenia te są skierowane w dół i dociążają kolumnę (przez tarcie negatywne), natomiast w dolnej jej części oraz w głębszej warstwie nośnej naprężenia ścinające są skierowane do góry i łącznie z oporem podstawy „podtrzymują” kolumnę. Istota działania kolumn to zwiększenie sztywności „uzbrojonej” nimi warstwy słabej. W niektórych metodach wykonanie kolumn poprawia też właściwości otaczającego gruntu – przez rozpychanie go na boki, ułatwienie odprowadzenia nadmiaru wody albo przez efekt stabilizujący spoiwa (wapna lub cementu).

Kolumny – w odróżnieniu od pali – nie wymagają dużego zagłębienia w grunt nośny – zwykle wynosi ono od 0,5 do 1 m, tj. tylko tyle, by zapewnić dobre osadzenie w mocnym podłożu. W czasie wprowadzania obciążenia (np. wznoszenia nasypu) dolny odcinek kolumny jest wciskany w nośne podłoże aż do wzbudzenia jego reakcji i osiągnięcia stanu równowagi naprężeń w kolumnach i otaczającym gruncie. W tej fazie kolumny i cały nasyp doznają sporych osiadań, lecz nie jest to szkodliwe. Z upływem czasu następuje konsolidacja podłoża i słabej warstwy, a osiadania szybko się stabilizują. W wyniku wzmocnienia podłoża osiadania po wykonaniu warstw konstrukcyjnych nawierzchni są już nieznaczne i mieszczą się w dopuszczalnych granicach.

Warto podkreślić, że kolumn nie należy wymiarować jak pale, zagłębiając je w mocne podłoże. Nie należy także wymagać ich próbnymi obciążeniami jak pali – do 150% obciążenia obliczeniowego. Sposoby

Tab. 1. Kolumny wzmacniające podłoże

Rodzaje kolumn	Typowe średnice [cm]	Typowa / max głębokość [m]	Typowa / max nośność N_t [kN]
żwirowo-kamienne	40–80	8/20	250–500
wibrobetonowe	28–42	12/25	300–700
piaskowe w osłonie geosyntetycznej	60–150	10/25	brak danych
wiercone przemieszczeniowe	30–60	10/25	400–750
wybijane udarowo (wymiana dynamiczna)	200	3/6	1500–2000
iniekcyjne – jet grouting	60–100 (400)	15/30	> 1000
mieszanie wgłębne DSM na sucho i mokro	60–150 (240)	12/25	słabe 300–500 kPa mocne 1–10 MPa
formowane mikrowybuchami DDR	60–120	10/30	brak danych

wymiarowania kolumn opierają się na wynikach obserwacji i zaleceniach specjalistycznych wykonawców. Działania tych kolumn nie można więc utożsamiać z palami. Wymiarowanie kolumn na podstawie normy palowej PN-B-02482:1983 w praktyce eliminuje ich zalety. W takim przypadku bowiem powinny zostać spełnione wymagania dotyczące pali, tj. wymiarów, wytrzymałości materiału, zagłębienia w grunt nośny itp., a także kontroli za pomocą próbnymi obciążeniami zgodnie z normą palową.

W przypadku dużych obciążeń poziomych należy przeanalizować nośność podłoża i kolumn, gdyż ich zdolność przenoszenia sił bocznych, a zwłaszcza momentów zginających, jest niewielka. Wzmocnienie kolumnami może być wówczas mało skuteczne. Szczególnie kolumny „sztywne”, z materiałów o dużej wytrzymałości (np. betonowe, wibrobetonowe, iniekcyjne), po złamaniu tracą praktycznie zdolność przenoszenia sił bocznych, a także w dużym stopniu – pionowych.

Kolumny są szczególnie przydatne do posadawiania na słabym podłożu nasypów obiektów komunikacyjnych (dróg i autostrad, szybkiej kolei). Różne rodzaje kolumn różnią się sztywnością (czy podatnością). Najbardziej podatne są kolumny niezwiązane (żwirowo-kamienne, piaskowe w osłonie z geosyntetyku, wybijane udarowo), sztywniejsze – formowane metodami mieszania wgłębne DSM lub wibrobetonowe, a najbardziej sztywne – zbliżone do pali kolumny wiercone przemieszczeniowe i iniekcyjne. Podstawowe dane o różnych rodzajach kolumn zestawiono w tabelicy 1. Sztywność kolumn zależy więc od sposobu formowania oraz od użytych materiałów, np. ich wytrzymałości. Mocniejsze i o dość jednorodnych właściwościach są kolumny formowane z kontrolowanej zaprawy czy betonu. Bardziej podatne są kolumny z mieszanki spoiwa z miejscowym gruntem – mniej jednorodne, z lokalnymi strefami słabszymi, o nie w pełni przewidywalnych parametrach.

Racjonalne wykorzystanie wzmocnienia kolumnami jest łatwiejsze w przypadku ich większej podatności, gdyż wówczas możliwe jest włączenie do współpracy gruntu pomię-

dzy kolumnami oraz lepsze współdziałanie kolumn. Wzmocnione podłoże z kolumnami jest swoistym kompozytem. Jego parametry często wyznacza się jako wartości uśrednione, z uwzględnieniem pola przekroju elementów składowych.

Ważne jest zapewnienie odpowiedniego rozłożenia obciążeń przekazywanych na głowice kolumn. W celu zapewnienia równomiernego oparcia nasypu na stosunkowo sztywnych kolumnach i przekazania obciążenia na ich głowice wykonuje się nad nimi warstwę z zagęszczonego mechanicznie kruszywa, zazwyczaj zbrojonego geosyntetykiem (geotkaniną, geosiatką). Niezwykle istotny jest właściwy dobór geosyntetyków. W przypadku nasypów na kolumnach mamy do czynienia z tzw. zbrojeniem hamakowym. Do konstrukcji takich materacy należy stosować geosyntetyki o dużej sztywności i niskim pełzaniu, aby uniknąć nadmiernych i nierównomiernych odkształceń opieranej budowli ziemnej.

Kontrola jakości robót w czasie wykonywania kolumn polega na bieżącej kontroli parametrów, takich jak długość kolumny, czas wykonania, przebieg procesu oraz w większości przypadków ilości zużytego materiału. W przypadku kosztownych robót zaleca się wykonywanie nasypów próbnymi oraz ich obserwację, zwłaszcza przebiegu osiadań w czasie i zmian wytrzymałości gruntu w podłożu.

Dobrym przykładem może być budowa Stadionu Narodowego w Warszawie [23], gdzie projekt konstrukcji poprzedzono próbami technologicznymi i badaniami nośności pali i kolumn. Grupę czterech próbnymi kolumn żwirowo-betonowych o długości 7 m, wykonanych techniką wibrowymiany, obciążano siłą do 2250 kN, wywołując osiadanie 6 mm. Na podstawie uzyskanych wyników określono sztywność podłoża wzmocnionego kolumnami na 80 000 kN/m³, wobec sztywności ok. 18 500 kN/m³ bez wzmocnienia. Nośność podłoża wzmocnionego czterema kolumnami oceniono na 560 kPa. Wykonano także badanie nośności kolumny iniekcyjnej o średnicy 1000 mm i długości 8 m. Przy sile 3000 kN osiadła ona tylko 9,9 mm. Sztywność kolumny

przy obciążeniu spodziewanym w konstrukcji oceniono na 400 000 kN/m, tj. zbliżoną do wielkośrednicowych pali wierconych. Weryfikacja doświadczalna parametrów pozwoliła racjonalnie zaprojektować posadowienia obiektów stadionu na wzmocnionym podłożu.

3. Wybrane metody wykonywania kolumn

3.1. Metody wibracyjne formowania kolumn

Metody wibracyjne należą do najczęściej stosowanych. Polegają one na zagęszczaniu gruntu lub formowaniu kolumn w podłożu. Istnieją różne odmiany metod [17, 26]. Poniżej opisano metody wibracyjnego formowania kolumn.

3.1.1. Wibrowymiana

Metoda polega na formowaniu w słabym podłożu kolumn z kamienia lub żwiru, „zbrojących” i drenujących grunt. Kolumny te formowane są w celu zwiększenia nośności podłoża oraz zmniejszenia i przyspieszenia osiadań. Stosuje się je głównie w miękkoplastycznych glinach i iłach, a także w warstwach torfu, gytii lub namułu o grubości do kilku metrów. Metoda może być przydatna przy wzmacnianiu niekontrolowanych nasypów, zawierających m.in. gruz, żużel, popioły, itp.

Należy pamiętać, że drgania wywołane przez wibrator mogą spowodować upłynnienie gruntów spoistych o właściwościach tiksotropowych i dużej wrażliwości strukturalnej.

W metodzie wibrowymiany stosuje się zwykle wibrator wgłębny z rurą do rdzeniowego podawania kruszywa do dna otworu. Aby uniknąć rozplukiwania podłoża, wibrator jest zagłębiany bez tłoczenia wody, a przy wyciąganiu można tłoczyć sprężone powietrze. Po uzyskaniu wymaganej głębokości wibrator jest wyciągany ruchem posuwisto-zwrotnym z jednoczesnym wsypywaniem porcji kruszywa. Ruchy wibratora w dół rozpychają i zagęszczają kruszywo. W trakcie formowania kolumny kruszywo wciskane jest w otaczający grunt i następuje poprawienie jego parametrów mechanicznych. Duża przepuszczalność kolumny pozwala na szybki odpływ wyciskanej z gruntu wody i zmniejszenie ciśnienia porowego. Wytworzenie w podłożu stosunkowo sztywnych kolumn powoduje zmniejszenie jego ściśliwości i osiadań oraz przyspieszenie konsolidacji.

Kolumny żwirowe zachowują się jak podatne słupy. Pod obciążeniem osiowym osiadają i odkształcają się poprzecznie – „pęcznieją”, wzbudzając odpór otaczającego słabego gruntu, który przeciwdziała nadmiernym odkształceniom. Dlatego kolumny mogą być formowane w gruncie o wystarczającej wytrzymałości. W gruntach bardzo słabych (np. silnie nawodnionych torfach) odpór boczny jest zbyt mały, by uformować kolumnę, a wpro-

wadzony materiał rozplywa się i miesza ze słabym gruntem, nie zapewniając sztywności osiowej kolumny.

Typowe obciążenie przejmowane przez kolumnę żwirową wynosi od 250 do 300 kN. Pod długotrwałym obciążeniem następuje konsolidacja gruntu spoistego i redystrybucja nacisków, czemu towarzyszy pewne dodatkowe osiadanie. W celu przyspieszenia mobilizacji oporów gruntu i ograniczenia późniejszych osiadań stosuje się zwykle okresowe wstępne przeciążenie wzmocnionego podłoża nakładem gruntu.

Badania kontrolne kolumn żwirowych obejmują badania uziarnienia zastosowanego kruszywa oraz sondowania dynamiczne w trzonach kolumn. Sondowania mają na celu potwierdzenie zakładanego w projekcie stopnia zagęszczenia oraz ciągłości. Niekiedy wykonywane są próbne obciążenia kolumn żwirowych lub podłoża wzmocnionego grupą kolumn żwirowych.

3.1.2. Kolumny wibrocementowe i wibro-betonowe

Kolumny wibrocementowe i wibro-betonowe formowane są z kruszywa związanego cementem. Metodę tę stosuje się w bardzo słabych gruntach (torfach, namulach), których wytrzymałość nie zapewnia bocznego oparcia podczas formowania kolumny. Kolumny są wykonywane wibratorami wgłębnymi, „śluzowymi”, z rurą do rdzeniowego podawania materiału do dna otworu. Średnica kolumn zależy od oporów otaczającego gruntu i zwykle wynosi ok. 60 cm. W czasie formowania kolumny wibrocementowej do materiału wypełniającego tłoczony jest zaczyn cementowy. Kolumny wibro-betonowe są formowane z tłoczonego betonu o konsystencji „ubijalnej” klasy B10 lub betonu konstrukcyjnego B25. Podczas formowania wibrator może być wielokrotnie opuszczany i podciągany w celu rozepchnięcia materiału na boki i powiększenia średnicy kolumny.

3.2. Kolumny z piasku lub kruszywa w osłonie geotekstylnej

Kolumny formowane metodą pali Franki z wypełnionego piaskiem „rębkawa” geotekstylnego stosowano w kraju już w latach 90. XX w. W ostatnich latach ten rodzaj kolumn został bardzo udoskonalony. Kolumny te znalazły zastosowanie w ekstremalnych warunkach gruntowych – w wielometrowych warstwach bardzo słabych gruntów (torfów, gytii, miękkoplastycznych namułów). Są one alternatywą dla dawnej metody „zatapiania” nasypów z gruntów mineralnych w takim słabym podłożu.

Metoda opracowana w Niemczech polega na formowaniu kolumn o średnicy 800 mm przy użyciu stalowej rury zamykanej od dołu klapą, zagłębianej i wyciąganej wibratorem,

albo w rurach o średnicy do 1500 mm, zagłębianych ciężką palownicą z wybieraniem z nich urobku. Do zagłębianej rury wprowadzana jest osłona geotekstylna o dużej wytrzymałości, tkana „na okrągło” (bez szwu), którą wypełnia się piaskiem i wyciąga rurę wibratorem. Metodę tę zastosowano w dużej skali przy budowie autostrady A2, szczegółowo opisano w [21]. Wzmocniono tam bardzo słabe podłoże z nawodnionych gruntów organicznych o niespotykanej głębokości aż do 28 m, z zachowaniem restrykcyjnych wymagań dotyczących osiadań wykonanego korpusu drogowego, których spełnienie i kontrolę zapewnia rozbudowany system monitorowania.

3.3. Wgłębne mieszanie gruntu

Mieszanie wgłębne (*Deep Soil Mixing* – DSM) polega na formowaniu w podłożu kolumn (pojedynczych kolumn, ścian, rusztów lub bloków), utworzonych z miejscowego gruntu mieszanego ze spoiwem, podawanym w postaci suchej (*dry mixing*) lub mokrej (*wet mixing*). W metodzie suchej najczęściej stosuje się cementy oraz mieszanki cementu z wapnem, a w metodzie mokrej różne cementy, w tym zwłaszcza hutnicze lub z domieszkami popiołu lotnego. Metoda DSM jest wykorzystywana do wzmacniania grubych warstw (nawet ponad 20 m) słabych gruntów spoistych, namułów i torfów, które trudno byłoby wymienić albo wzmocnić innymi metodami.

Istotą procesu jest odspajanie gruntu i jego mieszanie (oraz częściowa wymiana) ze spoiwem, przy czym mieszanie może odbywać się w sposób mechaniczny lub ze wspomaganie hydraulicznym (tj. z udziałem iniekcji strumieniowej w metodzie mieszania na mokro). Średnica kolumn DSM wykonywanych metodą na sucho wynosi od 0,6 do 1 m (zwykle 0,6 i 0,8 m), a metodą na mokro od 0,4 do 2,4 m (najczęściej od 0,8 do 1,5 m); długość zwykle do 10 m (maksymalne długości przekraczają 20 m). Kolumny są zwykle rozmieszczane w regularnej siatce albo w rzędach (styczne lub wcięte). Odmianą kolumn są cienkie „minipale” o średnicy do 200 mm, ze słabego gruntu mieszanego z wprowadzaną świdrem ślimakowym mieszanką piaskowo-cementową. Ich długość wynosi od 3 do 10–12 m, a liczba od 1 do 2 na m².

Celem wgłębne mieszanie gruntu jest poprawa właściwości mechanicznych podłoża. Kolumny wykonywane tą metodą mogą być obciążane już po paru tygodniach po ich wykonaniu. Dzięki temu możliwe jest szybsze uzyskanie przejeźdźności drogi w trudnych warunkach podłoża (np. w porównaniu do konsolidacji z drenami). Mieszanie wgłębne, w zależności od warunków gruntowych, jest wykorzystywane do wzmacniania podłoża w celu zwiększenia nośności i poprawy stateczności oraz ograniczenia osiadań pod nasy-

pami drogowymi lub kolejowymi, dojazdami do mostów, stabilizacji bloków gruntu (zwykle o głębokości od 2 do 5 m) w celu uzyskania ich jednorodnej wytrzymałości, formowania przegród przeciwnieprzepuszczalnych oraz zapobiegania upłynnieniu luźnych gruntów piaszczystych.

Jeżeli w gruncie występują przeszkody utrudniające mieszanie lub grunt ma niekorzystne właściwości chemiczne itp., przydatność metody jest ograniczona. W celu określenia ilości spoiwa potrzebnej w danej lokalizacji należy przeprowadzić wstępne badania na próbnym mieszkankach w laboratorium oraz wykonać kolumny próbne na obiekcie. W przypadku gruntów o dużej zawartości części organicznych powinno się sprawdzić możliwość uzyskania wymaganej wytrzymałości, przepuszczalności i długotrwałej stateczności.

W metodzie mieszania na sucho wytrzymałość na ścinanie stabilizowanego gruntu wzrasta od 10 do 40 razy. Uzyskuje się wytrzymałość wzmocnionego gruntu zwykle na poziomie 100–150 kPa. W metodzie mieszania na mokro wytrzymałość na ściskanie kolumn cementowo-wapiennych osiąga od 1 do 10 MPa, zależnie od właściwości gruntu oraz rodzaju i ilości użytego spoiwa. Szczególnie dużą wytrzymałość osiągają kolumny formowane z użyciem mieszanki cementu i granulowanego żużla wielkopieczowego. Jednak w gruntach organicznych wytrzymałość jest znacznie mniejsza. W świeżej kolumnie może być osadzone zbrojenie w postaci kosza lub profilu stalowego.

W celu kontroli ze świeżo wykonanych kolumn DSM pobiera się próbki do badań laboratoryjnych wytrzymałości materiału kolumny na ściskanie. W szczególnych przypadkach możliwe jest pobranie próbek po stwardnieniu. Po zakończeniu robót niekiedy wykonywane są próbne obciążenia kolumn.

Opisy różnych zastosowań zawierają publikacje [np. 22, 24, 25], a wymagania dotyczące wykonywania i projektowania – norma EN 14679:2005 [16].

3.4. Kolumny wiercone przemieszczeniowe

Do formowania kolumn wzmocniających podłoże wykorzystywane są maszyny do wykonywania przemieszczeniowych pali wierconych w systemie bezurobkowym, z użyciem świdra rozpychającego grunt na boki. Kolumny te wzmocniają podłoże, zagęszczając luźne grunty piaszczyste lub „zbroją” słabe grunty spoiste i organiczne. Kolumny są formowane z betonu słabszego niż pale (zwykle B10–B20, w zależności od wymaganej podatności), nie muszą być zagłębione w grunt nośny, wystarczy gdy tylko sięgają jego stropu.

W drogownictwie kolumny przemieszczeniowe zwykle wzmocniają i stabilizują podłoże



Ryc. 2. Wykonanie kolumn w technologii DSM podwójnym mieszkankiem, źródło: Keller Polska Sp. z o.o.

nasypów. Dlatego niefortunne jest nazywanie tych kolumn palami, co może wprowadzać w błąd. Zaletą kolumn przemieszczeniowych, w stosunku do kolumn formowanych metodą wibrowymiany lub mieszania wgłębnego, jest możliwość formowania ich również w warstwach bardzo słabych gruntów. Dzięki ciągłemu procesowi tłoczenia mieszanki betonowej, która rozpycha słaby grunt i tworzy w nim pogrubienia trzonu, małe jest niebezpieczeństwo „rozplięcia się” lub osłabionych przewarstwień kolumn.

3.5. Iniekcja strumieniowa

Iniekcja strumieniowa (*jet grouting*) [1, 15] jest metodą wzmocniania podłoża i formowania w nim elementów z tłoczonego zaczynu i związanego nim gruntu. Proces formowania kolumny polega na niszczeniu struktury i odpajaniu gruntu (lub słabej skały) oraz jego częściowej wymianie i mieszanii ze spoiwem – najczęściej zaczynem cementowym. Odpajanie gruntu odbywa się za pomocą strumienia cieczy o bardzo wysokim ciśnieniu (zaczynu lub wody). W wyniku iniekcji strumieniowej powstaje kompozyt gruntowocementowy. W procesie iniekcji formowane są elementy walcowe – kolumny, lub płaskie – ściany. Z elementów tych mogą być tworzone różne konstrukcje: bloki zeskalonego gruntu, palisady, przegrody, płyty, sklepienia itp. Iniekcja strumieniowa bywa też stosowana do wzmocniania słabego podłoża budowli drogowych [10, 11].

Metoda iniekcji strumieniowej jest przydatna praktycznie we wszystkich rodzajach gruntów (mineralnych i antropogenicznych), w zwietrzelinach, a nawet w słabych skałach. Jednak w gruntach spoistych, a zwłaszcza w organicznych, wytrzymałość powstałego tworzywa jest mała (nawet tylko 500 kPa). Średnica kolumn wynosi zwykle od 60 cm do 3 m, rekord wynosi 8 m.

Główne parametry procesu to: ciśnienie i wydatek cieczy z żerdzi iniekcyjnej, skład zaczynu iniekcyjnego, prędkość przesuwu i obrotów żerdzi iniekcyjnej. Skuteczność zabiegu i wybór parametrów weryfikowane są podczas prób wstępnych, a dobór parametrów iniekcji jest oparty głównie na wcześniejszych miejscowych doświadczeniach. W systemie jednomediumowym [15] ciśnienie iniektu wynosi zwykle 30–50 MPa, a wydatek 50–450 l/min. Możliwe jest wspomaganie iniekcji tzw. iniekcją wstępną, za pomocą strumienia wody lub wody i powietrza.

Kolumny iniekcyjne mogą być zbrojone elementami stalowymi (prętami, rurami, kształtownikami), osadzonymi podczas lub po wykonaniu iniekcji strumieniowej. Mimo to elementów tych nie należy traktować jak pale. Międzynarodowe zalecenia dotyczące takich konstrukcji ograniczają użyteczną wytrzymałość cementogruntu do 5 MPa, mimo że uzyskiwane są większe wartości. Do wytrzymałości materiału kolumn iniekcyjnych należy stosować większe zapasy bezpieczeństwa niż wobec betonu o kontrolowanej jakości.

Konstrukcje iniekcyjne są formowane następująco:

- „świeży w świeżym”, tj. kolejno, bez oczekiwania na związanie zachodzących elementów,
- „pierwotny – wtórny”, gdy zachodzące na siebie elementy wykonuje się po upływie określonego czasu twardnienia lub po osiągnięciu przewidzianej wytrzymałości wcześniej wykonanych elementów.

W trakcie procesu iniekcji strumieniowej następuje wpływ na powierzchnię urobku, będącego mieszaniną cząstek gruntu i cieczy iniekcyjnej. Należy zwrócić uwagę na postępowanie z urobkiem, tj. odbiór z otworu wiertniczego, czasowe składowanie na budowie, możliwą utylizację i końcowe składowanie w celu ograniczenia jego szkodliwego wpływu na środowisko.

3.6. Kolumny wybijane – wymiana dynamiczna

Wymiana dynamiczna (*Dynamic Replacement – DR*) jest odmianą konsolidacji dynamicznej [2, 4, 7, 26]. W podłożu formowane są kolumny tłuczniowe o średnicy 2–3 m. Metoda ta ma zastosowanie przede wszystkim w bardzo słabych gruntach o niewielkiej miąższości, od 2 do 5–7 m. Formowanie kolumn polega na wybijaniu w podłożu kilkoma uderzeniami ubijaka (ryc. 3) krateru, w który wsypane jest materiały formujące kolumnę, ponownie go ubija i dosypuje grunt. Trwa to aż do zaniku osiadań gruntu pod kolejnymi uderzeniami ubijaka. Kolumny formowane są z lokalnie dostępnych materiałów, przy czym najlepszy jest gruby tłuczeń i okruchy skalne.

Istnieje możliwość wykorzystania materiałów odpadowych (żużel, spieki, odpady kopalniane, gruz, destrukty betonowy) albo żwiru lub piasku. Typowa masa ubijaka wynosi od 8 do 20 t. W stosunku do tradycyjnej konsolidacji dynamicznej wymianę dynamiczną charakteryzuje szybszy proces wzmocnienia podłoża, większa niezawodność wzmocnienia oraz skuteczniejsza poprawa właściwości słabego gruntu wzmocnianego dzięki przemieszaniu z dodawanym materiałem. Kolumny formowane w podłożu zwiększają jego nośność, znacznie ograniczają osiadania, a także zwiększają stateczność wznoszonych budowli. Kolumny mogą być obciążone praktycznie niezwłocznie po uformowaniu.

Wyniki badań wybijanych kolumn oraz propozycje projektowania zawiera praca [20].

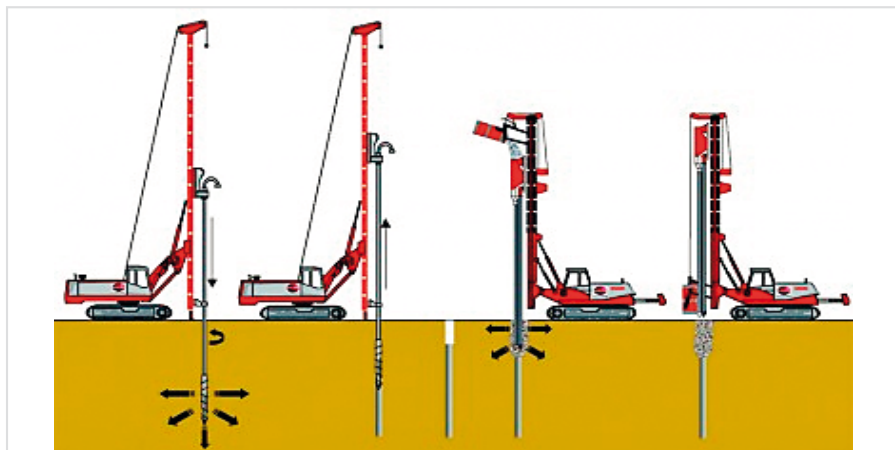
3.7. Kolumny kombinowane

Specjalnym rozwiązaniem są kolumny kombinowane (hybrydowe) o zmiennym module tworzywa. Są to betonowe kolumny ze stopą żwirową, głowicą żwirową lub stopą i głowicą żwirową. W zależności od rodzaju kolumny hybrydowej do jej wykonania stosowana jest jedna lub dwie maszyny. Głowica żwirowa wykonywana jest po ok. 4–10 godzinach po zbudowaniu trzonu betonowego. Jako materiał na stopę i głowicę żwirową najczęściej stosowane jest kruszywo o uziarnieniu od 0 do 32 mm. Średnica części betonowej wynosi 25–60 cm, części żwirowej zwykle 60–80 cm. Stopa żwirowa zapewnia lepsze podparcie kolumny, a głowica żwirowa zapewnia podatny charakter podparcia. Kolumny z głowicą żwirową są szczególnie przydatne w przypadku niskich nasypów drogowych. Schemat ich wykonywania pokazano na rycinie 4. Kolumny ze stopą żwirową zwykle mają nośność od 400 do 700 kN.



Ryc. 3. Formowanie kolumny wybijanej

Stosowane są też kolumny betonowe z głowicą betonowo-żwirową. W przypadku tych kolumn w pierwszym etapie wykonuje się betonowy trzon, którego podstawa powinna być zakotwiona w gruntach nośnych na głębokość ok. 0,5 m, a głowica sięga górnej rzędnej platformy roboczej. Następnie za pomocą koparko-ładowarki głowica kolumny ścinana



Ryc. 4. Schemat formowania kolumny betonowej z głowicą żwirową: faza I – kolumna betonowa, faza II – formowanie głowicy żwirowej, źródło: Menard Polska Sp. z o.o.

jest do głębokości minimum 0,5 m. Powstała w ten sposób wolną przestrzeń wypełnia się kruszywem, które dogęszcza się. Głowicę kolumny należy wykonać w jak najkrótszym czasie od wykonania trzonu, nie dłuższym niż 3–4 godziny.

W ramach badań kontrolnych jakości wykonanych robót wykonywane są badania kruszywa użytego do wykonania stopy (głowicy) żwirowej, sondowania dynamiczne stóp (głowic) żwirowych oraz badania wytrzymałości betonu. Niekiedy wykonywane są próbne obciążenia kolumn.

W kraju kolumny hybrydowe ze stopami żwirowymi zostały zastosowane z powodzeniem przy wzmocnianiu podłoża (grunty słabe o miąższości do 8 m) na obwodnicy Elku (ryc. 5 i 6), kolumny betonowe z głowicą betonowo-żwirową przy wzmocnianiu słabego podłoża przy przebudowie linii kolejowej na stacji Gdańsk Południowy. Szczegółowy opis zastosowania kolumn betonowych z głowicą i stopą żwirową do wzmocnienia podłoża nasypu kolejowego modernizowanej linii kolejowej E-30 podano w [9].

3.8. Kolumny formowane metodą mikrowybuchów

Technologia mikrowybuchów wykorzystuje energię powstałą w efekcie eksplozji niedużych ładunków wybuchowych. Stosuje się ją przy budowie dróg i innych budowli. Pozwala na wzmocnienie słabego podłoża gruntowego o dużej objętości w krótkim czasie, dzięki zdecydowanej poprawie parametrów wytrzymałościowych gruntu. Główne zalety to znacznie szybsza konsolidacja gruntu oraz mniejsze

koszty w stosunku do innych metod wzmocnienia podłoża.

Metoda mikrowybuchów polega na zdetonowaniu ładunków wybuchowych, co powoduje w otoczeniu wzrost temperatury i powstanie pęcherza gazowego, wzrost ciśnienia wody w porach, drgania i chwilowe upłynnienie gruntu. Następuje zniszczenie



Ryc. 5. Wsypanie kruszywa do rury formującej stopę żwirową kolumn (obwodnica Elku), źródło: Menard Polska Sp. z o.o.



Ryc. 6. Wykonywanie trzonów betonowych kolumn z głowicą betonowo-żwirową, źródło: Menard Polska Sp. z o.o.



Ryc. 7. Wzmocnienie podłoża metodą mikrowybuchów, źródło: Polbud-Pomorze Sp. z o.o.

pierwotnej struktury gruntu i jego przemieszczenie, powodujące bardziej ściśle ułożenie ziaren oraz zagęszczenie gruntu. Efekt zagęszczenia jest tym większy, im luźniejszy jest początkowo grunt. Ładunek wybuchowy może być umieszczony na powierzchni terenu, w wywierconym otworze lub zatopiony pod wodą. Praktycznie do celów budownictwa drogowego wykorzystuje się ładunki wydłużone umieszczane w otworze w gruncie. Masę ładunków należy określić doświadczalnie, mając na względzie bezpieczeństwo budowlane w okolicy prac strzałowych. Masa ta wynosi zwykle 1–5 kg/m. Wybuchy przeprowadza się w kilku seriach, stopniowo zagęszczając siatkę otworów.

Metoda mikrowybuchów znajdowała zastosowanie głównie do wzmocniania nawodnionych gruntów niespoistych lub mało spoistych, a także lessów (po ich nawodnieniu). Zaletą metody jest możliwość zagęszczenia gruntu do znacznej głębokości (rzędu 25–30 m) i pod wodą oraz konkurencyjność w stosunku do innych metod w przypadku dużego zakresu prac (rzędu kilkudziesięciu tysięcy metrów kwadratowych).

Ostatnio metoda ta jest coraz częściej stosowana również do wzmocniania słabych gruntów spoistych i organicznych. Zabieg polega na wywołaniu przez wybuchy natychmiastowego osiadania, a jednocześnie uformowaniu w nich kolumn piaskowych z materiału platformy roboczej, który samoistnie wysypuje się do powstałych po wybuchach kawern. Kolumny mają średnice od 60 do ponad 200 cm. Przyspieszają one konsolidację i zwiększają sztywność podłoża. Rozmieszczenie otworów strzałowych i kolejność detonacji ładunków są tak dobierane, aby kolejne serie strzałów „wyciskały” wodę z wykonanych już sąsiednich kolumn. Eksplozje powodują duże natychmiastowe osiadania gruntu – nawet ponad 1 m. W krótkim czasie występują osiadania konsolidacyjne, osiągające od 20 do 50 cm.

Metoda wybuchów ma niedostatki: jest skuteczna tylko poniżej zwierciadła wody gruntowej, a możliwość wykonania na terenach zabudowanych jest ograniczona. W każdym przypadku konieczne jest zweryfikowanie przyjętej technologii za pomocą wybuchów próbnych.

Warstwa powierzchniowa terenu lub platformy pozostaje luźna i wymaga dodatkowych zabiegów, np. zagęszczenia walcami. Bardzo dobre wyniki i szybki trwały efekt [5] daje dogęszczenie powierzchni za pomocą ubijania (ciężkiego lub impulsowego).

4. Zagrożenia i kontrola jakości

Zabiegi wzmocniające podłoże zastępują metody droższe, ale bardziej niezawodne, jak np. pale. Występujące niepewności związane są głównie z niedostatkami rozpoznania podłoża oraz z samymi zabiegami wzmocniania. Szczególnie ważne są głębokość występowania warstw słabych wymagających wzmocnienia oraz parametry i inne właściwości (np. chemiczne) słabego gruntu.

W projektowaniu wzmocnienia kolumnami potrzebna jest pewna nadwymiarowość, odwrotnie proporcjonalna do możliwej dokładności kontroli jakości. Przy wyborze metod wzmocnienia należy rozważyć to, że zapewniają one różne sztywności i niezawodności wzmocnienia, ale też różne są koszty.

Wieloletnie doświadczenia wskazują typowe zagrożenia związane ze wzmocnianiem podłoża za pomocą różnego rodzaju kolumn. Ogólnie ryzyko dotyczy przekroczenia stanów granicznych według PN-EN 1997-1:2008:

- SG użyteczności (SLS): nadmiernych osiadań, przechyleń lub przesunięcia fundamentu,

- SG nośności (ULS): osiadania powodujące uszkodzenia konstrukcji, zniszczenie materiału lub nadmierne osiadanie kolumn w podłożu, wyparcie gruntu spod fundamentu, utrata stateczności ogólnej (osuwisko) lub poślizg.

Skala zagrożeń zależy od właściwości słabego podłoża i metody wzmocnienia. Osiadania, nawet znaczne, w trakcie wznoszenia korpusu nasypu nie są dużym problemem – są one bieżąco wyrównywane przy układaniu następnych warstw. Normy ograniczają dopiero osiadania końcowe powierzchni nasypu po wykonaniu podbudowy. Przyjęto, że nie powinny one przekraczać 10 cm. Osiadania nie powinny powodować deformacji profilu nawierzchni, zwłaszcza przy obiektach z mało podatnymi fundamentami.

Szczególne zagrożenie wiąże się z bardzo małą zdolnością kolumn do przeniesienia sił poziomych, zwłaszcza w fazie małego obciążenia pionowego. Czynnikiem ten należy mieć na uwadze także w czasie



Ryc. 8. Połamane kolumny w wyniku przemieszczenia się mas słabego gruntu

robót, w czasowych stanach ukształtowania nasypów. Dotyczy to np. kolumn przy podstawie skarpy nasypu, na które napiera słaby grunt wyciskany na boki spod nasypu. W celu przejęcia sił poziomych stosuje się np. odpowiednie zbrojenie geotekstylne w podstawie nasypu. Zniszczenie kolumn może łatwo nastąpić przy zbyt bliskim sytuowaniu kolumn później wykonywanych, które rozpychając otaczający grunt, mogą przemieszczać i niszczyć kolumny wcześniej wykonane. Należy także unikać wykopów naruszających stateczność podłoża w rejonach przyległych do terenów wzmocnionych kolumnami.

W bardzo słabym podłożu (orientacyjnie o wytrzymałości c_u poniżej 10–15 kPa) może nastąpić „rozsypanie się” kolumn z niezwiązanego kruszywa. Dlatego w takich warunkach potrzebne są kolumny związane spoiwem (np. wibrobetonowe albo formowane z tłoczonego betonu) lub piaskowe w osłonie geotekstylnej.

Kontrola jakości robót jest dostosowana do specyfiki poszczególnych metod. Obejmuje ona w szczególności:

- geometrię zabiegów, zwłaszcza głębokość kolumn – w praktyce decyduje o tym na bieżąco operator maszyny, najlepsza jest kontrola niezależna (np. automatyczna rejestracja zagłębienia i oporów narzędzia oraz wydatku energii, materiałów itp.),

- właściwości produktu wynikowego, badane na próbkach lub in situ (np. wytrzymałości tworzywa, stany zagęszczenia, sztywności osiowe kolumn).

Sporządzane protokoły i metryki powinny być bieżąco oceniane i akceptowane (lub nie!) przez nadzór własny wykonawcy oraz inwestorski. Niezwłoczna analiza wyników pozwala usunąć ewentualne nieprawidłowości na początku, a nie na końcu robót, kiedy są one trudne do naprawienia. Nadzór powinien być rozsądny – nie „czepiać się” np. drobiazgowo w papierach, lecz dbać o sprawy merytoryczne. Kontrola powinna być ciągła

nie okazjonalna, bo wiadomo – „pańskie oko konia tuczy”.

Projekt wykonawczy wzmocnienia podłoża powinien zawierać dokładny opis metody (*method statement*) np. w formie szczegółowej specyfikacji technicznej, zawierający wielkości lub parametry kontrolowane, program (częstotliwość) sprawdzania, kryteria akceptowania, osoby odpowiedzialne.

Przydatne wskazówki dotyczące większości metod zawierają normy EN grupy *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych* [15, 16, 17], *Wytyczne IBDiM* [26] z 2002 r. (wskazane byłoby ich uaktualnienie, ale brak zainteresowania tym administracji drogowej). Niektóre – nowsze w kraju – techniki wymagają opracowania odpowiednich dokumentów w tym przypadku podstawowe znaczenie ma dobra specyfikacja techniczna.

Na dużych obiektach, zwłaszcza liniowych, rozciągniętych w czasie i przestrzeni, szczególnie zalecana jest w Eurokodzie 7-1 metoda obserwacyjna projektowania.

5. Podsumowanie

Wzmacnianie słabego podłoża budowli drogowych za pomocą kolumn jest korzystną kosztowo, a często i czasowo, metodą budowy. Wzmacnianie podłoża gruntowego stwarza możliwości wykorzystania terenów nieprzydatnych do zabudowy. Technika formowania kolumn stale się rozwija. Poprawia się jakość robót i możliwości ich kontroli, co sprzyja zwiększaniu zakresu ich stosowania. Istnieje zbiór norm europejskich dla większości metod.

Podstawą racjonalnego wyboru rodzaju kolumn i metod wzmacniania są wyczerpujące, dostosowane do konkretnych potrzeb badania gruntu, obejmujące wyznaczenie zakresu słabego podłoża, jak i jego parametrów. Ponieważ powodzenie wzmacniania ściśle zależy od właściwości gruntu, na ogół konieczny jest większy zakres wstępnego rozpoznania podłoża oraz uzupełnienie go specjalnymi badaniami dostosowanymi do wybranej metody, a także badania kontrolne w czasie robót. Wskazane są też obserwacje zachowania budowli.

Do wzmacniania podłoża kolumnami stosowane są zwykle specyficzne metody i procesy. Programowanie i ich projektowanie oraz prowadzenie i kontrolowanie wymaga specjalistycznej wiedzy i doświadczenia. Rodzaj metody powinien być dostosowany do właściwości konkretnego terenu. Powinni się tym zajmować doświadczeni projektanci geotechniczni oraz specjalistyczni wykonawcy (a nie najtańszy!), co pozwoli uniknąć nieraz kosztownych niepowodzeń.

Ulepszane jest projektowanie procesów wzmacniania podłoża, lecz zachowanie

gruntu kryje jeszcze wiele niewiadomych, dlatego konieczne są bieżące obserwacje wyników i aktywne reagowanie. Skutecznym narzędziem do racjonalizacji rozwiązań jest metoda obserwacyjna projektowania.

Literatura

- [1] Bzówka J.: *Kolumny iniekcyjne dużych średnic*. „Inżynieria i Budownictwo” 2005, nr 3, s. 126.
- [2] Fudali J., Saloni J.: *Wzmocnienie podłoża gruntowego metodą konsolidacji dynamicznej*. „Inżynieria i Budownictwo” 2007, nr 7–8, s. 387–389.
- [3] Gajewska B., Kłosiński B.: *Rozwój metod wzmacniania podłoża gruntowego*. Seminarium PZWFS i IBDiM „Wzmacnianie podłoża i fundamentów”, Warszawa, 31 marca 2011 r. Warszawa 2011, s. 13–54.
- [4] Godlewski T., Saloni J.: *Wzmocnienie podłoża gruntowego kolumnami DR na przykładzie odcinka trasy Siekierskiej w Warszawie*. XIX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Augustów, czerwiec 2006 r. „Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo” 2006, R. 28, t. 2, s. 347, 348.
- [5] Imiołek R.: *Łączenie technologii w geotechnice – obwodnica Barczewa*. „Magazyn Autostrady” 2008, nr 10, s. 110–113.
- [6] Gryczmański M.: *Metody analizy nośności i osiadania podłoża wzmoczonego kolumnami kamiennymi*. „Inżynieria Morska i Geotechnika” 1993, nr 5, s. 224–231.
- [7] Gryczmański M.: *Wzmacnianie słabego podłoża gruntowego wbijanymi kolumnami kamiennymi. Przegląd doświadczeń śląskich*. „Inżynieria i Budownictwo” 2003, nr 3.
- [8] *Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych*. IBDiM. Warszawa 1998.
- [9] Jurczak J., Musiał B., Szczepaniak S., Świniański J.: *Zastosowanie wibrowymiany do wzmocnienia nasypu i podłoża na odcinku Węglińca – Pieńsk linii kolejowej E-30*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Modernizacji Linii Kolejowej E-30”, Kliczków k. Bolesławca, 8–9 listopada 2007 r. [b.m.w.] 2007.
- [10] Kościak P., Noga L.: *Zastosowanie wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej do wzmacniania podłoża gruntowego i fundamentów*. XVI Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Ustroń, 21–24 lutego 2001 r. T. 1. Referaty. Katowice 2001, s. 213–228.
- [11] Michalski T.: *Kolumny o średnicach od 2,5 do 5 metrów*. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2008, nr 2 (17), s. 62–65.
- [12] PN-83/B-02482 *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.
- [13] PN-81/B-03020 *Grunty budowlane. Posadowienie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [14] PN-S-02205:1998 *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*.
- [15] PN EN 12716:2002 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Iniekcja strumieniowa*.
- [16] EN 14679:2005 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Wgłębne mieszanie gruntu*.
- [17] EN 14731:2005 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Wgłębne wibrowanie*.
- [18] Pisarczyk S.: *Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2005.
- [19] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. DzU 1999, nr 43, poz. 430.
- [20] Sękowski J., Kwiecień S.: *Wymiana dynamiczna – praktyczne aspekty zastosowania w budownictwie drogowym*. „Magazyn Autostrady” 2010, nr 10, s. 124–128.
- [21] Sobolewski J., Ajdukiewicz J.: *Budowa autostrad A1 i A2 na terenach o zdegradowanym oraz słabym podłożu z zastosowaniem geosyntetyków i monitoringu w ich posadowieniu*. Konferencja „Podłoże i fundamenty budowli drogowych”, Kielce, 9 maja 2012 r. IBDiM. Warszawa 2012.
- [22] Świniański J., Turczyn K.: *Zastosowanie iniekcji wspomaganiej mechanicznie (DSM) i stabilizacji do wzmocnienia podłoża na odcinku Szymankowo – Lisewo linii kolejowej E-65*. Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne metody stabilizacji podłoża pod nawierzchnie drogowe i kolejowe”, Żmigród-Węglewo, 22–23 października 2009 r. [b.m.w.] 2009.
- [23] Tężyk S., Głodzik K.: *Wzmocnienie podłoża gruntowego pod budowę Stadionu Narodowego w Warszawie*. Seminarium IBDiM i PZWFS „Fundamenty palowe”, Warszawa, 22 kwietnia 2009 r. Warszawa 2009.
- [24] Topolnicki M.: *Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania in-situ (Soil Mixing)*. „Inżynieria Morska i Geotechnika” 2003, nr 6, s. 385–398.
- [25] Topolnicki M.: *Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą wgłębego mieszania na mokro (DSM)*. XXIV Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Wisła, 17–20 marca 2009 r. Katowice 2009.
- [26] *Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym*. (Autorzy: B. Kłosiński, K. Grzegorzewicz, P. Rychlewski, S. Wierzbiński, P. Wileński), GDDP. Wyd. IBDiM. Warszawa 2002.

Perfekcja wykonania

- > Jesteśmy wiarygodnym partnerem oferującym kompleksowe rozwiązania z zakresu wzmocnienia gruntu.
- > Gwarantujemy to, co w realizacji wielkich przedsięwzięć jest najważniejsze – jakość, niezawodność i terminowość.
- > Nasza praca jest podstawą najbardziej trwałych i nowoczesnych inwestycji.

