

Wybrane techniki wzmacniania słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym

Dr hab. inż. Joanna Bzówka, prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa

Projektowanie budowli ziemnych obejmuje bardzo szeroki zakres prac, począwszy od rozpoznania i przygotowania podłoża gruntowego [1, 9, 24, 50, 51, 57], projektowania budowli ziemnych [66, 67, 68], poprzez określenie odpowiednich materiałów do budowy nasypów [9, 73], ustalenie technologii wykonawstwa i kryteriów odbioru robót.

Podczas procesu projektowania posadowienia budowli ziemnej niezbędne jest sprawdzenie obu stanów granicznych nośności i przydatności do użyteczności.

Sprawdzenie stanu granicznego nośności obejmuje analizę stateczności skarp i zboczy oraz sprawdzenie nośności podłoża.

Stan graniczny przydatności do użytkowania sprawdza się, porównując wartości osiadań (odkształceń) budowli ziemnej od obciążeń charakterystycznych z wartościami dopuszczalnymi.

Według Załącznika nr 4 do Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie z dnia 2 marca 1999 r. [56], dopuszczalne wartości osiadań eksploatacyjnych korpusu i podłoża drogowej budowli ziemnej nie mogą przekraczać wartości 10 cm. Warunek ten jest zaostrzony na styku nasypu z obiektem inżynierskim (najczęściej przyczółkiem mostowym), gdzie osiadanie powinno być równe osiadowi tego obiektu. Osiadania nie powinny powodować deformacji profilu nawierzchni, zwłaszcza przy obiektach z mało podatnymi fundamentami. Osiadanie podłoża należy obliczać według [52, 54].

Obliczenia osiadania nasypu i podłoża budowli ziemnej mogą być pominięte, jeśli do głębokości strefy aktywnej, określonej zgodnie z [52], występują grunty [54]: skaliste i kamieniste, gruboziarniste i drobnoziarniste grunty niespoiste w stanie średnio za-

gęszczonym, zagęszczonym lub bardzo zagęszczonym oraz grunt spoiste w stanie zwałym, półwałym i twardoplastycznym.

Sposób wzmocnienia powinien być podany w projekcie budowlanym drogi. Suma obliczonych osiadań końcowych nasypu, podłoża wzmocnionego i podłoża rodzimego w okresie jego konsolidacji nie powinna przekraczać 10 cm [54].

Zgodnie z Warunkami technicznymi [71] prognoza osiadań podtorza powinna obejmować wartości osiadań podtorza w eksploatacji oraz ocenę – według [52] – możliwości usuwania skutków tych osiadań poprzez regulację położenia toru. W drogach szynowych sprawdza się różnice osiadań torowiska. Dopuszcza się wartości nie większe niż 4 mm/rok na długości 30 m toru lub 10 mm/rok na długości 200 m toru.

W przypadku niespełnienia warunku stanu granicznego przydatności do użytkowania niezbędne jest – podobnie jak dla drogi kołowej – zastosowanie wzmocnienia podtorza i/lub podłoża. Należy zapewnić również stopniową zmianę sztywności podtorza na styku z obiektami inżynierskimi [9, 73].

WZMACNIANIE SŁABEGO PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Wybór odpowiedniej metody wzmocnienia słabego podłoża poprzedza analiza wielu czynników, takich jak: budowa geologiczna podłoża (między innymi miąższość i głębokość występowania warstwy słabego gruntu), wartość projektowanych obciążeń przekazywanych na podłoże gruntowe, rodzaj czynnika wpływającego na brak nośności (np. nieodpowiednie zagęszczenie warstwy, nadmierne zawilgocenie gruntu itd.), możliwości technologiczne i koszty wykonania oraz zagospodarowanie terenu.

Podłoże gruntowe jest wzmocniane w celu [35, 36, 73]: zwiększenia nośności, zmniejszenia osiadań budowli, zapobieżenia utracie stateczności (poślizgom lub osuwiskom), zabezpieczenia skarp wykopów i ochrony pobliskich konstrukcji, zapobieżenia upłynnianiu podłoża, stabilizacji struktury podłoża oraz łagodzenia skutków deformacji górniczych podłoża.

Zgodnie z normą [50] metodę ulepszania podłoża należy zaprojektować, uwzględniając w miarę potrzeby następujące czynniki: miąższość i właściwości podłoża lub materiału nasypowego, wartości ciśnienia wody w różnych warstwach, rodzaj, wymiary oraz usytuowanie konstrukcji, która ma być posadowiona na analizowanym podłożu, ochronę przed uszkodzeniem przyległych konstrukcji i instalacji, trwałe lub tymczasowe efekty ulepszania podłoża, zależność pomiędzy metodą ulepszania podłoża a kolejnością operacji na budowie (ze względu na przewidywane odkształcenia), wpływ na środowisko, z uwzględnieniem zanieczyszczeń substancjami toksycznymi lub zmian poziomu wody gruntowej oraz długoterminowe starzenie się materiałów.

CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH METOD WZMACNIANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W BUDOWNICTWIE KOMUNIKACYJNYM

Wymiana gruntu

Wymiana gruntu polega na wybraniu warstwy istniejącego gruntu nienośnego i zastąpieniu jej warstwą nasypu budowlanego.

W celu uzyskania wymaganych parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych materiał o odpowiednim uziarnieniu powinien być zagęszczany przy wilgotności zbliżonej do optymalnej. Za stosowaniem tej metody przemawia dostępność zamiennego materiału nasypowego, który może stanowić zarówno grunt naturalny (piaski, żwiry, pospółki), jak i antropogeniczny (żużel wielkopiecowy, popioły elektrowniane, łupki przepalony). Materiał ten powinien spełniać wymogi normy [54].

W przypadku przypowierzchniowego zalegania warstw gruntów nienośnych o niewielkiej miąższości, w których nie stwierdzono występowania zwierciadła wód gruntowych, jest stosowana pełna wymiana gruntu. Polega ona na wybraniu istniejącego gruntu do głębokości występowania stropu podłoża nośnego. Wykonanie wykopu może wiązać się z koniecznością zabezpieczenia jego ścian przed utratą stateczności, np. poprzez zastosowanie ścianek szczelnych.

Częściowa wymiana gruntu jest stosowana w przypadku, gdy miąższość warstw nienośnych osiąga znaczne wartości lub gdy w podłożu występuje zwierciadło wód gruntowych na niewielkiej głębokości.

Motywy przemawiającym za zastosowaniem wymiany podłoża jest dostępność materiałów zamiennych. W tym celu są wykorzystywane [9]: żwiry, pospółki i piaski – mające odpowiednie uziarnienie, umożliwiające łatwe zagęszczenie; mieszanki optymalne – powstałe przez mieszanie gruntów różnych frakcji; grunty stabilizowane; niektóre grunty spoiste oraz grunty antropogeniczne, np. łupki przepalone, żużle wielkopiecowe.

Informacje na temat możliwości wykorzystania odpadów kopalnianych, jakimi są przepalone czerwone łupki kopalniane w budownictwie drogowym, można uzyskać m. in. z pracy [62].

Konsolidacja dynamiczna

Według [73] wyróżnia się następujące metody ubijania wgłębnego: ubijanie lekkie, ubijanie ciężkie, ubijanie szybkie oraz formowanie w podłożu słupów tłuczniowych.

Wzmocnianie podłoża metodą konsolidacji dynamicznej polega na przekazywaniu energii uderzenia z ubijaka o znacznej masie, opuszczanego cyklicznie z dużej wysokości, na grunty podłoża. Pod wpływem uderzeń zwiększa się ciśnienie wody w porach gruntu. Następuje efekt upłynnienia gruntu, co skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości gruntu na ścinanie. Powstanie licznych powierzchni ścinania w strukturze gruntu umożliwia odprowadzenie wody poza strefę sprężenia, co skutkuje odwodnieniem zagęszczanego gruntu. Wolne przestrzenie są wypełniane przez cząstki gruntu, przemieszczające się pod wpływem siły grawitacji.

W wyniku tego działania zagęszczeniu ulega bryła gruntu podłoża do głębokości zależnej od parametrów ubijania.

O głębokości efektywności zagęszczenia decydują następujące czynniki [49, 67, 68]: masa ubijaka, wysokość, z której opuszczany jest ubijak, szerokość lub średnica ubijaka, powierzchnia kontaktu ubijaka z gruntem oraz spójność gruntu.

Reakcja gruntu na przekazaną energię uderzenia jest związana między innymi z jego składem granulometrycznym i wilgotnością. Grunty niespoiste grubookruchowe ulegają zagęszczeniu w sposób natychmiastowy. W nawodnionych gruntach drobnoziarnistych konsolidacja następuje w późniejszej fazie przerwy

w uderzeniach, ponieważ ze względu na strukturę tych gruntów przepływ wody jest utrudniony. Zagęszczanie podłoża powinno być przeprowadzane w sposób umożliwiający rozpraszanie wzbudzonego przez energię ubijania ciśnienia wody w porach gruntu. Ze względu na ten fakt grunty nawodnione są zagęszczane kilkunastokrotnie, przy zapewnieniu odpowiedniej przerwy pomiędzy kolejnymi fazami zagęszczania. W przypadku występowania gruntów nienawodnionych ubijanie jest przeprowadzane jednofazowo [68]. Konsolidacja dynamiczna podłoża może okazać się mało skuteczna w przypadku występowania warstw słabych gruntów spoiowych o dużej miąższości.

Na przebieg procesu zagęszczania wpływają [9]: rodzaj gruntu, parametry fizyczne gruntu (gęstość objętościowa, wilgotność, współczynnik filtracji, porowatość, stopień wilgotności), skład granulometryczny, kształt ziaren i ich ułożenie oraz rodzaj i lepkość cieczy wypełniającej pory gruntu.

Na skutek zadawanego obciążenia na powierzchni terenu powstaje krater. Jego wymiary są związane z przekazywaną energią oraz charakterystyką gruntów podłoża. Przypowierzchniowa warstwa zagęszczanego gruntu ulega rozluźnieniu. Ze względu na ten fakt po zakończeniu ubijania powierzchnia terenu powinna być wyrównana i dogęszczona.

Wadą impulsowego wzmacniania podłoża jest możliwość występowania uszkodzeń otaczających obiektów w wyniku rozchodzenia się fal poprzecznych, podłużnych i powierzchniowych, powstających podczas prowadzenia prac. Wobec powyższego należy zachować odpowiednią odległość od pobliskich obiektów, która zwykle wynosi od 20 do 40 m.

O szczegółach dotyczących ulepszania podłoża gruntowego techniką konsolidacji dynamicznej można zapoznać się między innymi w pracach: [9, 20, 45, 49].

Kolumny kamienne

Jednym ze sposobów wzmocnienia słabego podłoża jest formowanie kolumn z kruszywa. Wzmocnienie podłoża następuje na skutek wprowadzenia materiału, który, po uprzednim zagęszczeniu, ma korzystniejsze parametry wytrzymałościowe od otaczających kolumnę słabych gruntów. Zważywszy, że formowanie kolumn z kruszywa ma na celu przyspieszenie konsolidacji słabego podłoża, materiał tworzący kolumnę powinien mieć dobre właściwości filtracyjne. Na skutek wprowadzania materiału kamiennego następuje niszczenie istniejącej struktury gruntu. Materiał otaczający kolumnę ulega zagęszczeniu na skutek rozpychania cząstek gruntów na boki.

Kolumny kamienne mogą być wykonywane metodą wymiany dynamicznej. Proces ubijania poprzedza ułożenie warstwy kruszywa o miąższości od 0,5 do 1,5 m, pełniącej rolę platformy roboczej. Jej zadaniem jest umożliwienie poruszania się ciężkiego sprzętu, odprowadzenie wody wyciskanej w czasie ubijania i zapobieganie jej gromadzeniu na powierzchni terenu oraz dociążenie warstwy słabego gruntu (ograniczenie wypierania gruntu na boki).

Do wykonywania kolumn mogą być wykorzystywane materiały gruboziarniste o trwałej strukturze, np. gruz betonowy. W wyniku przekazywania na podłoże energii z ubijaka o znacznej masie, opadającego z ustalonej wysokości, kruszywo jest

wbijane w grunt. Powstały na powierzchni terenu krater jest zasypywany kruszywem.

Czynności te są powtarzane do momentu odnotowania braku osiadań podłoża. Następstwem wymiany dynamicznej jest powstanie kolumny kamiennej o średnicy wynoszącej zwykle od 1,0 do 1,5 m i długości nieprzekraczającej zwykle 5,5 m. Spód kolumny powinien sięgać głębokości zalegania warstwy gruntów o dobrych parametrach wytrzymałościowych. Ze względu na ten fakt miąższość warstwy słabej nie powinna przekraczać 6,0 m.

Kształt i wymiary powstałej kolumny są związane z: przekazaną na podłoże energią ubijania (ciężaru ubijaka i wysokości, z której jest opuszczany), rodzajem i stanem gruntów tworzących podłoże gruntowe oraz rozmiarem ubijaka.

Po zakończeniu procesu wymiany dynamicznej powierzchnia terenu powinna być dogęszczona. Jest to tzw. faza „ironingu”, która polega na opuszczaniu na podłoże płaskiego ubijaka w kształcie kwadratu. W razie konieczności podłoże może być dodatkowo dogęszczone z zastosowaniem tradycyjnego sprzętu, np. ciężkich walców.

Przykłady wykonania kolumn kamiennych, jako wzmocnienie podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, przedstawiono między innymi w pracach: [7, 8, 32, 45, 59, 61]. Tok postępowania przy projektowaniu kolumn kamiennych można znaleźć w pracach [9, 44, 49].

Kolumny DSM

Kolumny DSM (*Deep Soil Mixing*) powstają w wyniku mieszania gruntu *in situ* ze spoiwem i dodatkami. Metodę głębokiego mieszania wykorzystuje się w celu wzmocnienia słabych gruntów spoiowych, takich jak plastyczne grunty spoiowe, torfy i namuły. Jej stosowanie umożliwia poprawę nośności i stateczności słabych warstw o znacznych miąższościach oraz zmniejszenie osiadań obciążonego podłoża.

Proces tworzenia kolumny polega na niszczeniu istniejącej struktury gruntu za pomocą mieszadła pogrążanego w podłoże gruntowe przy udziale sprężonego powietrza i/lub wtłaczanego zaczynu cementowego. Spoiwo podaje się: w postaci zaczynu – w trakcie penetracji mieszadła, ze względu na zmniejszenie oporu tarcia podczas wiercenia lub też bez dodatku wody – w trakcie podciągania mieszadła po uprzednim wkręceniu świdra na żadaną głębokość.

Efektywność wzmocnienia podłoża kolumnami DSM zależy od warunków, w jakich zachodzi proces wiązania i twardnienia mieszanki gruntu i spoiwa. W związku z powyższym badania powinny obejmować również oznaczenie zawartości części organicznych, zanieczyszczeń, np. w postaci związków siarki, oraz oznaczenie agresywności wody gruntowej.

Skład mieszanki określa się odpowiednio do występujących w podłożu gruntów na podstawie badań próbek. Dobór spoiwa i dodatków jest związany z rodzajem i stanem wzmacnianych gruntów oraz technologią wykonywania kolumn DSM. Według Wytycznych [73] mieszanie głębokie gruntu może odbywać się na sucho lub na mokro.

W metodzie mieszania na sucho wykorzystuje się cement, wapno i dodatki w postaci gipsu, popiołów lotnych i żużli wielkopieczowych. Mieszanie gruntu z cementem wpływa na poprawę

parametrów wytrzymałościowych, natomiast wapno osusza grunt i poprawia jego mrozoodporność. Zaletą tej metody w porównaniu do metody „mokrej” jest brak konieczności wprowadzania dodatkowej ilości wody do słabo przepuszczalnego podłoża.

Kolumny wapienne stosuje się w przypadku występowania słabych gruntów spoistych. Ze względu na porowatą strukturę elementy te mogą pełnić funkcję drenów pionowych. **Kolumny cementowo-wapienne** wykonuje się w nawodnionych gruntach spoistych. W odróżnieniu od kolumn wapiennych mogą być stosowane w gruntach organicznych.

Zgodnie z Wytycznymi [73] wykonywanie kolumn metodą na mokro polega na zmieszaniu gruntu z materiałem wiążącym i wodą oraz ewentualnymi dodatkami, takimi jak popioły lotne i żużle wielkopiecowe. Ilość dodanego spoiwa jest związana z rodzajem wzmacnianego gruntu. Większa ilość spoiwa jest dodawana w przypadku występowania gruntów organicznych oraz piasków.

Głębokość, do której są wykonywane kolumny DSM, nie przekracza zwykle 20 m i powinna być nie mniejsza niż 3 m. Na potrzeby wzmocnienia podłoża kolumny wykonuje się: pojedynczo – w siatkach kwadratowych lub trójkątnych o wymiarach od 1 x 1 m do 2 x 2 m lub w rzędach – kolumny wzajemnie styczne lub nachodzące na siebie; stosowane głównie do zabezpieczenia wykopów, stabilizacji zboczy i wykonywania szczelnych przesłon.

Obliczenia nośności kolumn można przeprowadzać według [53], przyjmując, że kolumny są wciskane. Przykłady wykonania kolumn DSM, jako wzmocnienie podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, są przedstawione między innymi w pracach: [7, 8, 32, 42, 45, 69].

Kolumny iniekcyjne

Iniekcja strumieniowa znajduje szerokie zastosowanie w geoinżynierii. Służy między innymi do: wzmocnienia fundamentów lub ich wykonywania (np. w postaci kolumn fundamentowych lub stóp fundamentowych), wzmocnienia podłoża, formowania konstrukcji oporowych, ścian nośnych lub szczelnych oraz szczelinowych, wykonywania sklepień tunelowych, jak również uszczelniania palisad.

W wyniku zachodzącego w podłożu gruntowym procesu wiązania i twardnienia zaczynu z drobnymi frakcjami powstaje jednolita, sztywna bryła gruntowo-cementowa. Wykazuje ona odpowiednie parametry wytrzymałościowe i charakteryzuje się niską ścisłością i wodoprzepuszczalnością.

Iniekcja strumieniowa może być stosowana w niemal wszystkich rodzajach gruntów, zarówno naturalnych, jak i antropogenicznych. Na wytrzymałość na ściskanie cementogruntu wpływa niekorzystnie zawartość części organicznych w gruncie.

W zależności od celu stosowania kształt elementów iniekcyjnych może przybierać różnorodną formę, np. walcową (kolumny) lub płaską (ściany). W wyniku obrotowego ruchu stopniowo podnoszonej żerdzi podczas wykonywania iniekcji strumieniowej kolumna uzyskuje formę walca.

Średnica kolumn wynosi zwykle od 0,4 do ponad 5,0 m. Na wymiary przekroju poprzecznego kolumny iniekcyjnej wpływa [73]: rodzaj procesu, parametry iniekcji (ciśnienie i wydatek

cieczy mierzone w żerdzi iniekcyjnej, skład zaczynu i prędkość przesuwu i obrotów żerdzi iniekcyjnej) oraz system sterowania, rodzaj gruntu, jego niejednorodność i występujące przeszkody. Długość kolumny zależy od głębokości występowania stropu gruntów nośnych. Przyjmuje się, że nośność kolumny jest związana w głównej mierze z wartościami oporów tarcia występującymi wzdłuż pobocznic. Metodyka wymiarowania kolumn iniekcyjnych jest wciąż udoskonalana i podana między innymi w pracach [6, 9].

Przykłady wykonania kolumn iniekcyjnych, jako wzmocnienie podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, przedstawiono między innymi w pracach: [7, 8, 32, 38, 45].

Wyroby geosyntetyczne

Obecnie szerokie zastosowanie w budownictwie drogowym znajdują geosyntetyki. Wyroby geosyntetyczne różnią się między sobą ze względu na właściwości mechaniczne, chemiczne i filtracyjne. Wybór odpowiedniego produktu spośród szerokiej palety wyrobów oferowanych na rynku wiąże się ze znajomością właściwości materiałowych oraz jego przeznaczeniem.

Geosyntetyki wykorzystywane w celu wzmocnienia słabego podłoża budowli ziemnych przejmują obciążenia od ruchu pojazdów oraz ciężaru gruntu nasypowego. Stosowanie zbrojenia sprawia, że grunt zyskuje pewną wytrzymałość na rozciąganie dzięki siłom tarcia występującym na styku zbrojenia i gruntu. Według Wytycznych [73] wyroby geosyntetyczne znajdują zastosowanie do wzmocnienia podłoża i do budowy konstrukcji z wykorzystaniem gruntu.

Do celów wzmocnienia podłoża wykorzystuje się geosyntetyki mające wytrzymałość przy zerwaniu nie mniejszą niż 25 kN/m oraz odkształcalność jednostkową przy zerwaniu mniejszą niż 20%.

Stosowane są następujące wyroby geosyntetyczne: geotkaniny, geowłókniny, georuszty, geosiatki oraz geokraty.

Wyroby geosyntetyczne układane w rejonie podstawy nasypu posadowionego na słabym podłożu gruntowym przejmują obciążenia rozciągające dzięki odpowiednim parametrom wytrzymałościowym. Powoduje to, że osiadania rozkładają się równomiernie. Ich stosowanie pozwala zapobiec powstawaniu deformacji przekroju poprzecznego drogi pod wpływem obciążenia.

Zbrojenie w postaci warstwy geosyntetyku lub materaca geosyntetycznego może być układane na: słabym gruncie lub na palach bądź kolumnach wzmacniających słabe podłoża.

W przypadku występowania warstwy gruntu bardzo ściśłego w celu zmniejszenia osiadań nasypy są posadowiane na elementach sztywnych (pale żelbetowe, pale CFA, kolumny wibrobetonowe) lub podatnych (kolumny z kruszyw, pale piaskowe). Elementy te są rozmieszczane w siatce prostokątnej lub trójkątnej w rozstawie nieprzekraczającym 2 m. Stosowanie zbrojenia w podstawie nasypu posadowionego na palach powoduje, że obciążenie jest przejmowane prawie całkowicie przez pale, jak i zbrojenie geosyntetyczne w miejscach pomiędzy palami. W porównaniu z innymi metodami wzmocnienia podłoża rozwiązanie to pozwala uniknąć oczekiwania na skonsolidowanie warstwy ściśłego gruntu (metody statyczne) oraz transportu mas ziemnych (wymiana gruntu). Warstwę zbrojenia

układa się na żelbetowych płytach lub ławach umiejscawianych na głowicach pali. Geosyntetyk powinien zapewniać przepuszczalność wody.

Zbrojenie może być układane w postaci [23]: jednej warstwy (w kierunku działania największych sił, najczęściej w poprzek nasypu) lub dwóch warstw (układane w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach; pierwsza warstwa układana jest w poprzek nasypu).

Przykłady wykorzystania wyrobów geosyntetycznych, jako wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym przedstawiono między innymi w pracach: [4, 11, 30, 37].

Zabezpieczenie skarp nasypów i wykopów

W celu zapewnienia stateczności skarp nasypów należy przestrzegać zaleceń normatywnych odnoszących się do projektowania i realizacji. Dobór metody zabezpieczania zboczy oraz skarp budowli ziemnych jest związany ściśle z rodzajem czynnika wywołującego zagrożenie powstawaniem osuwiska. Najczęściej utrata stateczności jest związana z występowaniem wody, dlatego w każdym przypadku należy zapewnić uporządkowanie stosunków wodnych i zapobiec nadmiernemu nawodnieniu gruntów.

Instrukcja ITB nr 424/2011 [25] rozróżnia trzy podstawowe rodzaje stosowanych zabezpieczeń: naturalne, konstrukcyjne oraz geosyntetyczne.

W przypadku powstania osuwiska lub bezpośredniego zagrożenia wystąpienia tego zjawiska (pojawienie się spękań w naziemiu skarpy świadczących o przekroczeniu wytrzymałości gruntu na rozciąganie), celem zabezpieczenia terenu przed wystąpieniem dalszych deformacji stosuje się zabezpieczenia doraźne [13]: dociążenie podnoża skarpy konstrukcją nasypu z gruntów przepuszczalnych, wzmocnienie powierzchniowe (gwoździowanie, geosiatki, kołki kotwiące) lub wypełnienie występujących szczelin materiałem nieprzepuszczalnym.

Prowadzenie tras komunikacyjnych na terenach występowania gruntów skalnych wiąże się często z koniecznością zabezpieczenia zboczy przed powstawaniem obrywów.

W tym celu stosuje się następujące rozwiązania [43]: zabezpieczenie powierzchniowe, zabezpieczenie powierzchniowe dodatkowo wzmocnione linami, zabezpieczenie powierzchniowe „aktywne”, bariery oraz wolno stojące nasypy.

Według normy [50] poślizgowi izolowanych bloków skalnych można zapobiec zazwyczaj poprzez: zmniejszenie pochylenia skarpy, np. poprzez wykonanie tarasów, stosowanie kotew, gwoździ skalnych i wewnętrznego drenażu lub wybór kierunku i orientacji skarpy wykopu tak, aby ruchy pojedynczych bloków były kinematycznie niemożliwe.

Kotwy i gwoździe to elementy stalowe przejmujące siły rozciągające. Buława kotwy powinna być zagłębiona w strefie gruntu, znajdującej się za powierzchnią poślizgu. Najbardziej ekonomiczne jest stosowanie kotew o długości buławy w granicach od 6 do 10 m. **Kotwy** znajdują zastosowanie między innymi przy stabilizacji zboczy, do wzmacniania obudów wykopów oraz w celu poprawy stateczności skarp i ścian oporowych [28].

Gwoździe gruntowe to stalowe bolce o średnicy od kilku milimetrów do kilku centymetrów. Stosuje się je w celu zmonoli-

tyzowania bryły gruntu w gruntach zwięzłych lub w skałach. Do gwoździowania nie nadają się grunty spoiste plastyczne i twarde plastyczne o stopniu plastyczności większym niż 0,1 [25].

O efektywności stosowania gwoździ gruntowych decyduje stopień ich zespolenia z materiałem gruntowym. Gwoździowanie może odbywać się metodą bezpośrednią (udarowo, wibracyjnie, strzałowo) lub wiertniczą [13].

Według Sieranta [60] najbardziej wydajne są tzw. technologie „samowierzące”, polegające na wierceniu otworu z jednoczesną iniekcją przy użyciu traconych elementów pełniących funkcję zbrojenia.

Długość gwoździ wynosi zwykle od 0,5 do 0,8 wysokości ściany. Maksymalny rozstaw poziomy i pionowy wynosi 1,5 m [13].

Technologia gwoździowania znajduje częste zastosowanie przy stabilizacji osuwisk, formowaniu pionowych lub stromych ścian wykopów, formowaniu *in situ* ścian oporowych i przy budowie tuneli.

Gabiony znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie komunikacyjnym. Wykorzystuje się je między innymi do budowy murów oporowych i wykonywania zabezpieczeń skarp przed osunięciem lub erozją. Elementy konstrukcji gabionowych wykonuje się zwykle z siatki stalowej wypełnionej kruszywem w formie prostopadłościennych koszy lub materacy. Wypełnienie w postaci materiału kamiennego sprawia, że konstrukcje gabionowe wykazują dobrą wodoprzepuszczalność. Zaletą konstrukcji gabionowych jest ich duża podatność na odkształcenia, co sprawia, że są w stanie przenosić nierównomierne osiadania rzędu kilku centymetrów bez widocznych oznak [21, 25].

Gabiony mogą pełnić funkcję oblicowania ze względu na estetyczny wygląd i odporność na szkodliwe działanie czynników atmosferycznych. O trwałości konstrukcji oblicowania decyduje najczęściej trwałość siatki, z której wykonuje się gabiony.

Konstrukcje z gruntu zbrojonego wykonuje się najczęściej w przypadku, gdy realizacja obiektu wiąże się z wykonywaniem znacznej ilości robót ziemnych [25]. W wyniku współpracy materiału nasypowego ze zbrojeniem grunt zyskuje wytrzymałość na rozciąganie, a budowla ziemna zyskuje dużą odporność na nierównomierne osiadania, które są szczególnie niekorzystne w przypadku budowli o charakterze liniowym. Czynniki te umożliwiają budowę statecznych nasypów na podłożach o znacznej odkształcalności, na terenach działalności górniczej lub występowania gruntów zapadowych.

Do celów budowy konstrukcji z gruntu zbrojonego wykorzystuje się głównie wyroby geosyntetyczne. Pasma geosyntetyków układa się warstwami o długości zapewniającej prawidłowe zakotwienie za powierzchnią poślizgu.

Przykład wykorzystania idei gruntu zbrojonego do wykonania kładki rowerowej przedstawiono w pracy [41].

W celu poprawy stateczności skarp i zboczy często stosuje się **przypory dociążające** z materiału o dobrych właściwościach filtracyjnych, np. narzutu kamiennego, żwiru, pospółki. Woda spływająca ze skarpy powinna być ujęta przez urządzenia odwadniające.

Częstym zabiegiem zapobiegającym utracie powierzchniowej stateczności jest **umacnianie biologiczne**. Istnienie pokrywy roślinnej ogranicza szkodliwe oddziaływanie opadów atmosferycznych i wpływa dodatnio na utrzymywanie właści-

wego stanu wilgotności na powierzchni terenu. Zachodzi zjawisko odpływu wody z gleby do korzeni roślin.

Do metod powierzchniowego umacniania stosuje się **humusowanie, darniowanie (kożuchowe i w kratę), biowłókniny, hydroobsiew i mulczowanie, płyty ażurowe wypełnione gruntem oraz różnego rodzaju geosyntetyki**, np. geosiatki płaskie lub geokraty. Geosyntetyki powinny być układane wzdłuż pochylenia skarpy i kotwione na górze oraz u podnóża skarpy w rowkach kotwiących [14].

Więcej informacji na temat robót ziemnych, hydroobsiewu i innych zabezpieczeniach antyerozyjnych skarp można znaleźć między innymi w pracach: [16, 17, 39], natomiast o zabezpieczaniu dróg i obiektów komunikacyjnych przed spadającymi odłamkami skalnymi oraz o zabezpieczeniu skarp gruntowych siatkami stalowymi w pracy [40].

Przykłady wzmocnienia i zabezpieczania powierzchniowego skarp przedstawiono między innymi w pracach: [37, 39, 72].

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wybrane techniki wzmocniania podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym nie wyczerpują zagadnienia, jakim jest ulepszenie słabego podłoża, wybranie odpowiedniej technologii wzmocnienia z uwagi na efektywność wzmocnienia, czas wykonania robót, możliwości sprzętowe, materiałowe, lokalizację, jak również koszty wykonania.

Należy dodać również, że znane są w praktyce przypadki wzmocnienia podłoża gruntowego za pomocą lekkich wypełnień [15], ubocznych produktów spalania i odpadów [19, 55, 65], mikrowybuchów [46, 47, 61], czy też kolumn z piasku w opaskach geosyntetycznych [63].

Przykład rozwiązania bezpośredniego posadowienia drogi dojazdowej na bagnach w postaci wykonania nasypu z lekkiego materiału, jakim jest keramzyt, przedstawiono w pracy [58].

O możliwościach zastosowania w technologii ulepszania podłoża gruntowego różnych stabilizacji można dowiedzieć się między innymi z prac: [10, 26, 27, 34, 48].

O wzmocnieniu podłoża gruntowego pod nasypami w ciągu Obwodnicy Południowej Gdańska można znaleźć informacje w [2], o wzmocnieniu podłoża na Trasie Sucharskiego w Gdańsku w [3], zaś o budowlach ziemnych węzła skrzyżowania autostrad A1 i A4 w [18].

Należy pamiętać również, że prawidłowo zaprojektowane i wykonane odwodnienie [12, 22] jest gwarancją trwałości obiektów komunikacyjnych, natomiast błędy projektowe czy wykonawcze skutkują podmyciem nawierzchni jezdni i pobocza, obniżeniem nośności podłoża, a tym samym powstaniem zjawisk osuwiskowych. O problemie utraty stateczności oraz zabezpieczaniu skarp w rejonach osuwisk można znaleźć informacje między innymi w pracach: [5, 29, 31, 33, 64, 70].

Podsumowując, należy podkreślić, że właściwe rozpoznanie warunków gruntowo-wodnych, znajomość zachowania się gruntów słabych, wybór odpowiedniej metody wzmocnienia i ulepszania podłoża gruntowego, poprawne odwodnienie, sprawdzenie stateczności skarp i zboczy, czy wybór właściwych materiałów do budowy nasypów komunikacyjnych decydują o jakości szlaków komunikacyjnych.

LITERATURA

1. Batóg A., Hawryś M.: Projektowanie budowli ziemnych w skomplikowanych i złożonych warunkach geotechnicznych. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 3/2013, 34-44.
2. Białobrzęski T.: Wzmocnienie podłoża gruntowego pod nasypami w ciągu Obwodnicy Południowej Gdańska. *Magazyn Autostrady*, nr 4/2011, 70-72.
3. Binder K.: Wedługłębne wzmocnienie podłoża na Trasie Sucharskiego w Gdańsku. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 3/2012, 42-46.
4. Bolt A., Duszyńska A.: Wybrane zagadnienia dotyczące geosyntetyków stosowanych w drogownictwie. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2011, 16-24.
5. Budka E., Dorada P., Lewandowski G., Izdebski M.: Niestabilność korpusu nasypu kolejowego i naprawa osuwiska. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 3, 2012, 26-29.
6. Bzówka J.: Współpraca kolumn wykonywanych techniką iniekcji strumieniowej z podłożem gruntowym. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
7. Bzówka J., Juzwa A.: Metody wzmocnienia podłoża gruntowego. *Magazyn Autostrady*, nr 12/2011, 70-73.
8. Bzówka J., Juzwa A.: Selected problem of motorway embankments founded on weak subsoil. 12th Baltic Sea Geotechnical Conference „Infrastructure in the Baltic Sea Region”, Rostock, Germany, 31 May – 2 June 2012.
9. Bzówka J., Juzwa A., Knapik K., Stelmach K.: Geotechnika komunikacyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
10. Cyske W., Jałoszyński B.: Właściwości gruntów stabilizowanych spoiwami drogowymi w różnym czasie pielęgnacji. *Magazyn Autostrady*, nr 4/2011, 74-78.
11. Czmiel K.: Uwagi dotyczące projektowania nasypów wzmocnionych geosyntetykami – na przykładzie odcinka autostrady A4. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2009, 35-41.
12. Florkiewicz A., Grabowski W.: Wzmocnianie i odwadnianie podłoża nawierzchni autostrad. *Drogownictwo*, nr 12/1999, 381-385.
13. Furtak K., Sala A.: Stabilizacje osuwisk komunikacyjnych metodami konstrukcyjnymi. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 3/2005, 12-22.
14. Gajewska B.: Wybrane przykłady zapobiegania erozji skarp. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 1/2011, 27-32.
15. Gajewska B., Grzegorzewicz K., Kłosiński B.: Wzmocnianie podłoża gruntowego z zastosowaniem lekkich wypełnień. *Drogownictwo*, nr 1/2013, 9-15.
16. Głazewski M., Nowocień E., Piechowicz K.: Roboty ziemne i rekultywacyjne w budownictwie komunikacyjnym. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
17. Głazewski M., Piechowicz K., Nowocień E.: Roboty ziemne, rekultywacyjne i prądoteknikowe w drogownictwie. *Drogownictwo*, nr 3/2013, 86-90.
18. Gradkowski K., Wyszynski K.: Budowle ziemne węzła skrzyżowania autostrad A1 i A4. *Magazyn Autostrady*, nr 8-9/2009, 74-75.
19. Gradkowski K., Wyszynski K.: Ulepszanie i wzmocnianie warstw gruntów ubocznymi materiałami spalania i odpadowymi w drogowych budowlach ziemnych. *Drogownictwo*, nr 3/2010, 87-90.
20. Gryczmański M.: Zastosowanie urządzenia DYZAG do wzmocnienia podłoża metodą ciężkiego ubijania. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 3/2000, 174-175.
21. Grzegorzewicz K.: Gabiony, Seminarium IBDiM oraz firm Maccaferri. Konsort, P.P.H. TEX-1, Betafence, Dawid i Arcelor Mittal: Konstrukcje siatkowe w drogownictwie i geotechnice, Warszawa 2013, 35-52.

22. Gudelis-Taraszkiewicz K.: Odwodnienia dróg – bagatelizowany problem? *Magazyn Autostrady*, nr 11/2009, 32-33.
23. IBDiM: Metody stosowania geosyntetyków do budowy i wzmocnienia nawierzchni ziemnych budowli drogowych. Zadanie B. Zastosowanie geosyntetyków w budowlach ziemnych. Studium poznawczo-techniczne, Warszawa 2003.
24. Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Cz. 1 i 2. IBDiM, GDDP, Warszawa 1998.
25. Instrukcja ITB nr 424/2011: Ocena stateczności skarp i zboczy. Zasady wyboru zabezpieczeń. Warszawa 2011.
26. Iwański M.: Stabilizacja gruntu w technologii asfaltu spienionego. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2011, 30-38.
27. Iwański M., Buczyński P.: Wpływ rodzaju spoiwa na osuszanie gruntów spoistych. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2010, 22-28.
28. Jarominiak A.: Propozycja prekonsolidacji podłoża podpór wiaduktów kotwami gruntowymi. *Drogownictwo*, nr 9/2010, 318-319.
29. Jarominiak A., Bichajło L., Folta L., Trojnar K.: Odbudowa drogi krajowej nr 4 na odcinku ul. Krakowskiej w Przemysłu zniszczonym wskutek osuwiska. *Drogownictwo*, nr 9/1999, 267-278.
30. Jarominiak A., Folta L.: Ocena możliwości zwiększania stateczności maszynów gruntowych pasmami geosyntetyków instalowanych bez rozkopywania gruntu. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 8/2000, 410-413.
31. Jermołowicz P.: Stabilizacja skarp i osuwisk. *Magazyn Autostrady*, nr 11-12/2014, 38-42.
32. Juzwa A., Bzówka J.: Zastosowanie kolumn fundamentowych w budownictwie drogowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Rzeszów 2011, z. 58, nr 3/2011/II, 39-45.
33. Kania M.: Bezpieczne skarpy i zbocza. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 1/2013, 28-33.
34. Karp E.: Silment. Drogowe spoiwo stabilizacyjne. Zastosowanie przy realizacji autostrady A1 Sośnica – Gorzyczki. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2010, 37-38.
35. Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDKiA, Warszawa 1997, 2013.
36. Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. Warszawa 2001, 2013.
37. Kessler A., Topolewicz A.: Zastosowanie geosiatki komórkowej do umocnienia skarpy i budowy ściany oporowej w Gdyni. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 6/2000, 284-286.
38. Kępa J., Gryksa Ł.: Posadowienie obiektów mostowych na kolumnach jet-grouting. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 2/2013, 66-67.
39. Kosiński T.: Wzmocnienia i zabezpieczenia powierzchniowe skarp. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 3, 2013, 54-55.
40. Kosiński T.: Zabezpieczenia dróg i obiektów komunikacyjnych przed spadającymi odłamkami skalnymi oraz zabezpieczenia skarp gruntowych siatkami stalowymi. Seminarium IBDiM oraz firm Maccaferri, Konsport, P.P.H. TEX-1, Betafence, Dawid i ArcelorMittal: Konstrukcje siatkowe w drogownictwie i geotechnice, Warszawa 2013.
41. Kosiński T., Kuc M.: Budowa kładki rowerowej z gruntu zbrojonego Macres. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2009, 42-45.
42. Kurek N., Zaremba A.: Modyfikacja podłoża gruntowego pod niskimi nasypami. Kolumny MSC (Menard Supple Columns). *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 2/2013, 72-75.
43. Kuźniak K.: Zabezpieczenia skarp przed obrywami skalnymi. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 9/2006, 24-25.
44. Kwiecień S., Sękowski J.: Kolumny kamienne formowane w technologii wymiany dynamicznej. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
45. Łach K.: Geoinżynierijne wzmocnianie podłoża gruntowego pod nasypem komunikacyjnym. *Magazyn Autostrady*, nr 11-12/2014, 20-24.
46. Łoszewski M.: Mikrowybuchy przy budowie obwodnicy Babimostu. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, nr 9-10/2009, 52-54.
47. Łoszewski M., Brzeski T.: Mikrowybuchy jako metoda wzmocniania słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 4/2012, 196-200.
48. Piasecki S., Figlerowicz P.: Stabilizacja gruntu nowoczesnymi spoiwami hydraulicznymi. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2009, 26-28.
49. Pisarczyk S.: Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
50. PN-EN 1997-1:2008 – (EN 1997-1:2004) – maj 2008 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
51. PN-EN 1997-2:2009 – (EN 1997-2:2007) – kwiecień 2009 – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
52. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
53. PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
54. PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
55. Renevis Inżynieria Środowiska Sp. z o.o.: Stabilizacje i podbudowy na bazie ubocznych produktów spalania z energetyki. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2011, 40.
56. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dn. 2 marca 1999 r., w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. nr 43, poz. 430).
57. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dn. 25 kwietnia 2012 r., w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. z 2012 r., poz. 463).
58. Rzeźniczak J.: Nasypy z keramzytu. Rozwiązania dla bezpośrednich posadowień dróg dojazdowych na bagnach. *Magazyn Autostrady*, nr 7/2009, 56-58.
59. Sękowski J., Kwiecień S.: Wymiana dynamiczna. Praktyczne aspekty zastosowania w budownictwie drogowym. *Magazyn Autostrady*, nr 10/2010, 124-128.
60. Sierant J.: Przegląd konstrukcji gwoździowanych w drogownictwie. Możliwości technologii gwoździowania gruntu przy realizacji inwestycji w budownictwie drogowym. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 1/2009, 32-34.
61. Sikora Z., Wyroślak M.: Wzmocnianie gruntów słabonośnych pod nasypem drogowym techniką łączenia technologii. *Magazyn Autostrady*, nr 11/2010, 20-22.
62. Sobczyński P.: Czerwone przepalone łupki kopalniane. *Magazyn Autostrady*, nr 11/2009, 64-65.
63. Sobolewski J., Raithel M., Küster V., Friedl-Lhotzky G.: Nasyp autostrady A2 posadowiony na kolumnach z piasku w opaskach geosyntetycznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4/2012, 504-514.
64. Sternik K., Grygierek M.: Zabezpieczenie skarpy drogowej w rejonie osuwiska we fliszu karpackim. *Magazyn Autostrady*, nr 10/2009, 138-145.
65. Szczygilewski T.: Uboczne produkty spalania w drogownictwie. Normy a aprobaty techniczne. *Magazyn Autostrady*, nr 10/2009, 72-75.

66. Stilger-Szydło E.: Drogowe i autostradowe budowle ziemne – nośność i stateczność. *Geoinżynieria drogi mosty tunele*, nr 1/2009, 56-64.
67. Stilger-Szydło E.: Osiadanie nasypów drogowych. *Drogownictwo*, nr 3/2005, 90-95.
68. Stilger-Szydło E.: Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego. Teoria – Projektowanie – Realizacja. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2005.
69. Topolnicki M.: Wzmacnianie i uszczelnianie gruntu metodą mieszania *in-situ* (Soil Mixing). *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 6/2003.
70. Trojnar K.: Zagrożenia dróg osuwiskami i przykłady ich eliminowania. *Drogownictwo*, nr 11/2009, 359-366.
71. Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3. Załącznik do Zarządzenia nr 9/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dn. 4 maja 2009, Warszawa.
72. Wolski K.: Biologiczne zabezpieczanie skarp przed erozją. *Magazyn Autostrady*, nr 7/2010, 68-73.
73. Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. GDDP, Wydawnictwo IBDiM, Warszawa 2002.