

Likwidacja problemów osuwiskowych w drogownictwie

– skuteczność kompleksowych rozwiązań geotechnicznych, cz. 1

■ mgr inż. Jakub Sierant, TITAN POLSKA Sp. z o.o.

Zamierzeniem niniejszego artykułu jest próba polemiki ze spotykanym obecnie podejściem do rozwiązywania problemów osuwisk, zwłaszcza związanych z obiektami infrastrukturalnymi, oraz chęć przekonania, że pomimo wszelkich trudności dysponujemy zarówno wiedzą inżynierską, jak i skutecznymi narzędziami do racjonalnego stabilizowania osuwisk i zwalczania ich skutków. Służące do tego celu technologie omówiono w tej części artykułu, natomiast na łamach następnego numeru „Nowoczesnego Budownictwa Inżynierskiego” zostanie przedstawiony sposób ich praktycznego wykorzystania na przykładzie stabilizacji osuwiska przy drodze wojewódzkiej nr 941 między Wisłą a Istebną.

1. Wstęp

Rejon południowej Polski to z geologicznego punktu widzenia obszar występowania utworów nazywanych fliszem karpackim. Jest to złożony ośrodek gruntowy, w obrębie którego wydzielić można zazwyczaj naprzemianległe warstwy piaskowców i mułowców (łupków) oraz tzw. pokrywę zwierzelinową, zalegającą najpłycej, powstałą w procesach wietrzenia podłoża fliszowego, litologicznie odpowiadającą najczęściej pyłom i glinom z różną domieszką piasku i okruchów kamienistych. Jest to ośrodek niejednorodny, bardzo często silnie spękany i szczelinowaty, ze złożoną hydrogeologią, którego poszczególne wykształcenia litologiczne odznaczają się sporą podatnością na wpływ wody. Wszystko to wraz z młodą rzeźbą morfologiczną powoduje, że południowe rejony kraju są wybitnie predestynowane do występowania osuwisk.

Z tego samych powodów ośrodek jest jednocześnie niezwykle trudny do precyzyjnego, technicznego opisu geologicznego, umożliwiającego planowanie i projektowanie działań inżynierskich. Również aspekt wykonawczy, tj. wdrażanie zaplanowanych działań w ramach ochrony przeciw osuwiskowej, napotyka na wiele trudności. Warstwowy ośrodek z naprzemianległymi utworami miękkimi i czasem bardzo twardymi, dodatkowo spękany, powoduje że, spośród wielu technik i technologii geotechnicznych wykorzystywanych w budownictwie inżynierskim zaledwie kilka jest użytecznych i możliwych do aplikacji w trudnych warunkach fliszu karpackiego, a jeszcze mniej spośród nich odznacza się właściwą, adekwatną do kosztów skutecznością. Stąd zdarzają się nieekonomiczne próby stabilizowania osuwisk przy pomocy technik niemających technicznych racji w ośrodku fliszowym, jak choćby kolumny jet grouting. Niestety, działania zmierzające do stabilizacji osuwisk mają nierzadko charakter działań nieco ad hoc, w których właściwie metodą prób i błędów próbuje się dojść do skutecznego rozwiązania, ponosząc po drodze (niemałe) koszty kolejnych przybliżeń i narażając lokalne społeczności na dodatkowe koszty i utrudnienia (jak choćby objazdy).

Poniżej przedstawiono charakterystykę pozytywnie zweryfikowanych narzędzi geotechnicznych wykorzystywanych w zakresie stabilizacji osuwisk i zwalczania ich skutków wraz ze wskazaniem ich przydatności do naprawy i rekonstrukcji infrastruktury drogowej.

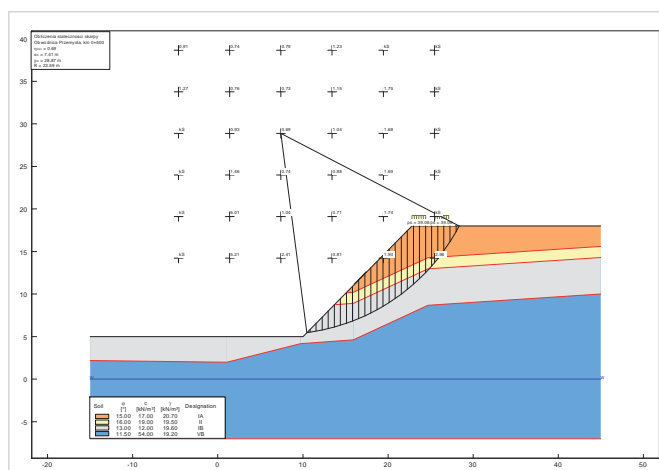
2. Przegląd konstrukcyjnych metod wzmocnienia podłoża osuwiskowego

2.1. Gwoździowanie gruntu

Uniwersalność technologii gwoździowania gruntu, przejawiająca się szerokim spektrum zastosowań i możliwościami adaptacyjnymi, w połączeniu z najwyższą efektywnością ekonomiczną sprawiają, że konstrukcje gwoździowane stały się częstym elementem dużych projektów infrastrukturalnych. Dzięki tej technologii możliwe stało się m.in. wzmocnianie istniejących nasypów dro-

gowych bez konieczności ich klasycznej przebudowy (co wiąże się np. z możliwością utrzymania przejezdności w trakcie prac), formowanie w pełni bezpiecznych skarp przekopów (o pochyleniu nawet do 60–70°), jak i tworzenie efektownych, pionowych ścian oporowych o znacznej wysokości (ponad 20 m).

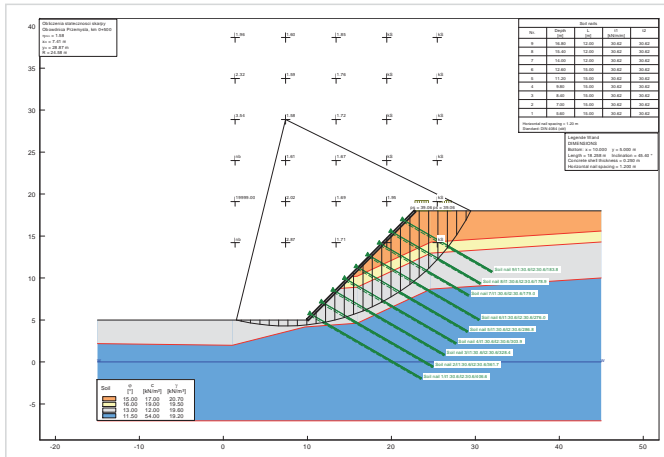
Gwoździowanie to również jedna z najefektywniejszych metod stabilizacji osuwisk związanych z obiektami komunikacyjnymi. Godny uwagi jest również fakt, że według wyliczeń CALTRANS (California Department of Transportation) konstrukcje gwoździowane są najtańszymi konstrukcjami oporowymi. Technologia do minimum ogranicza konieczność ingerencji w zabezpieczany obiekt, co nabiera szczególnej wagi w przypadku działających ciągów komunikacyjnych (zarówno drogowych, jak i kolejowych) oraz terenów osuwiskowych.



Ryc. 1. Obliczenia stateczności skarpy, Stan wyjściowy. Wskaźnik stateczności $F_s = 0,69$

Gwoździowanie jest metodą zbrojenia wglębnego gruntu. Polega na wytworzeniu w obrębie górotworu (skarpy wykopu, nasypie) materiału (struktury, bryły) geokompozytowego o znacznie wyższych parametrach wytrzymałościowych względem pierwotnych parametrów gruntowych wzmocnianego ośrodka. Idea gwoździowania gruntu jest znana od kilku dziesięcioleci, jednak dopiero rozwój odpowiednich technologii pozwolił na pełne wykorzystanie jej zalet i możliwości. Dla gwoździowania jako metody zbrojenia gruntu najistotniejsza jest efektywność zespolenia gwoździ z gruntem – im jest ona wyższa, tym formowany wglębnie geokompozyt jest bardziej jednorodny („monolityczny”), a wzrost parametrów wytrzymałościowych wyraźniejszy. Dlatego też zastosowanie odpowiedniej technologii decyduje w znacznej mierze o efekcie końcowym zabiegu. Natura w wielu przypadkach negatywnie zweryfikowała próby gwoździowania z wykorzystaniem prętów żebrowanych osadzonych w otworach wypełnionych zaczynem cementowym. Trudności z utrzymaniem statecznego, drożnego otworu i ograniczony zasięg „iniekcji” sprawiają, że podstawowy

dla gwoździowania gruntu warunk – zmonolizowania ośrodka gruntowego – nie występuje lub jest zbyt słaby dla poprawnego funkcjonowania konstrukcji. W tym świetle najbardziej wydajne zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym są technologie tzw. gwoździ samowiercących (*self-drilling soil nails*) – wiercenie z jednoczesną iniekcją przy użyciu zestawu traconych elementów przewodu wiertniczego, pełniących następnie funkcję zbrojenia gwoździa; ryc. 1, 2).



Ryc. 2. Obliczenia stateczności skarpy. Stan po zagwoździowaniu. Wskaźnik stateczności $F_s = 1,58$

System TITAN – pierwsza zastosowana na świecie technologia typu *self-drilling* – została opracowana prawie 30 lat temu przez niemiecką firmę Ischebeck. Do wykonywania gwoździ wykorzystywane są najczęściej żerdzie typu 30/11 i 40/16, wyjątkowo również 52/26. Końcówka żerdzi wyposażona jest w traconą koronkę wiertniczą, dobraną odpowiednio do rodzaju gruntu (najczęściej stosowane są koronki o średnicach z przedziału od 75 do 150 mm). Nośności projektowe gwoździ zawierają się zazwyczaj w przedziale od 10 do blisko 500 kN! Wykorzystując grunt *in situ* jako element konstrukcyjny uzyskuje się bezpieczne, „eleganckie” inżyniersko konstrukcje, o dowolnej praktycznie geometrii przy odpowiednim dopełnieniu gwoździowaniem systemem oblicowania elastycznego.

Technologiczne zalety gwoździ iniekcyjnych TITAN stają się szczególnie widoczne w przypadku obiektów zlokalizowanych w genetycznie słabym ośrodku gruntowym (typu np. drobnorytmicznego fliszu karpackiego z zaangażowaną mikrotektoniką) lub w ośrodkach osłabionych procesami geodynamicznymi. Wyjątkowy sposób osadzania gwoździ (wiercenia z jednoczesną iniekcją) pozwala nie tylko spiąć strefę aktywną i bierną form osuwiskowych, ale również zapewnić wglębne wzmocnienie iniekcyjne samego ośrodka, zwłaszcza w strefie poślizgu. Rozwiązanie to jest niezwykle skuteczne i ułatwia nadane zabezpieczeniom lekkiej formy, ograniczając tym samym znacząco zakres prac ziemnych, np. wymiany gruntu czy rozbiórki i formowania masywnych konstrukcji podpierających.

Możliwość sprawnego funkcjonowania gwoździ z elastycznym systemem zabezpieczenia powierzchniowego pozwala wtopić konstrukcję w otoczenie – uzyskać efekt „zielonego” wykończenia, z pokrywą wegetacyjną, zaś konstrukcje oporowe formowane w technologii ścian gwoździowanych, z uwagi na odmienny charakter pracy, są znacznie bezpieczniejsze i łatwiejsze w użytkowaniu niż tradycyjne konstrukcje oporowe z kotwami sprężanymi (bezproblemowa i bezobsługowa kilkudziesięcioletnia eksploatacja). Dodatkowo zaobserwowano, że tego typu konstrukcje świetnie sprawdzają się na terenach

o aktywności sejsmicznej (a także m.in. tereny eksploatowane górnictwo) właśnie dzięki względnej podatności (ryc. 3, 4).



Ryc. 3. Widok zagwoździowanych skarp osuwiskowych z oblicowaniem elastycznym. Szymbark



Ryc. 4. Widok skarpy gwoździowanej z oblicowaniem elastycznym po zazielenieniu. Grodziec Śląski

Z uwagi na zestaw unikatowych zalet, opisana technika stała się już jednym z podstawowych narzędzi przy rozwiązywaniu zagadnień związanych ze stabilizacją osuwisk. Gwoździowanie gruntu jest wydajne, oszczędne i skuteczne, a przy tym inżyniersko „eleganckie”, m.in. wskutek wykorzystania do współpracy rodzimego gruntu. Jednak zastosowanie konstrukcji gwoździowanych ma największy sens, gdy konfiguracja terenowa w rejonie osuwiska zawiera – bądź pozwala wykształcić – powierzchnię, w obrębie której rozmieszczony zostanie raster (układ) gwoździ gruntowych. Idealne zatem, pod względem przydatności metody i uzyskiwanych efektów, są wyraźnie wykształcone skarpy, urwiska, skłony dające możliwość (przynajmniej częściowej) reprofilacji oraz nasypy i korpusy drogowe, zwłaszcza poprowadzone na zboczach. Charakterystyka przypadków odpowiada więc warunkom lokalizacyjnym wielu dróg rejonu południowej Polski (ryc. 5).

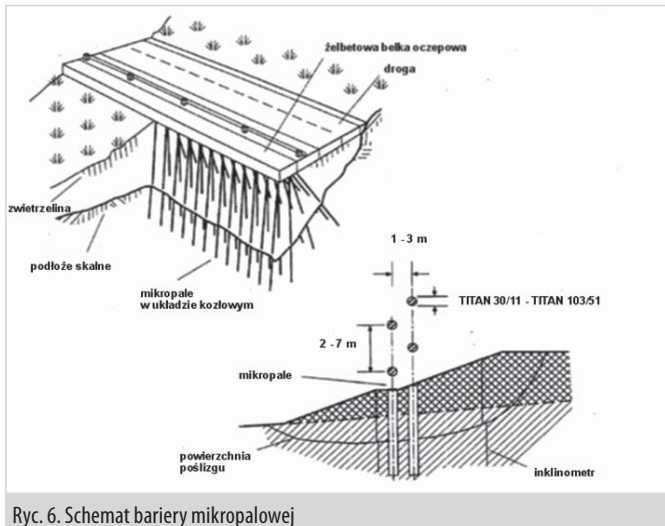


Ryc. 5. Widok zabezpieczonych skarp i urwiska skalnego. Lubień

Nieco inaczej należy podchodzić do problemów osuwiskowych na terenach, które pozornie nie są predestynowane do rozwoju zjawisk geodynamicznych.

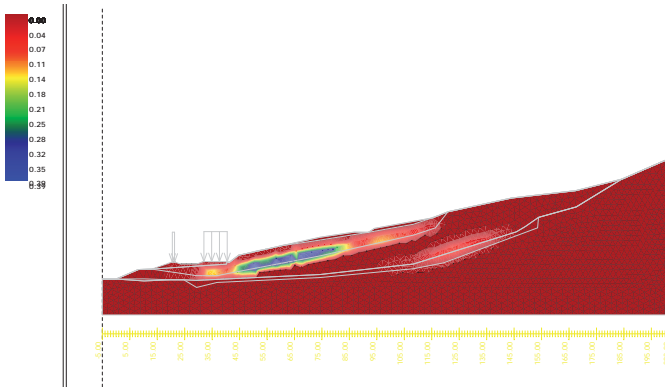
2.2. Bariery mikropalowe

Według dostępnych statystyk, pokaźna liczba form osuwiskowych rozwija się na stokach o nachyleniu 12–18°. Pomimo względnie łagodnego nachylenia osuwiska, które rozwijają się na tych terenach, mają zazwyczaj duży zasięg. W odniesieniu do obiektów infrastrukturalnych oznacza to, iż konstrukcje są zagrożone już nie tylko koluwiami osuwiska, lecz mogą znaleźć się w całości w jego obrębie. Rozległość form obejmujących nierzadko tereny użytkowane rolniczo stanowi w kwestii stabilizacji nie lada wyzwanie. Z jednej strony zabiegi stabilizujące wymagają zastosowania konstrukcji geotechnicznych charakteryzujących się dużą wytrzymałością i nośnością, z drugiej jednak istnieją poważne ograniczenia techniczne i terenowe, uniemożliwiające wprowadzenie na obszar osuwiska ciężkiego sprzętu. W sytuacji takiej idealnym rozwiązaniem są bariery mikropalowe (ryc. 6).

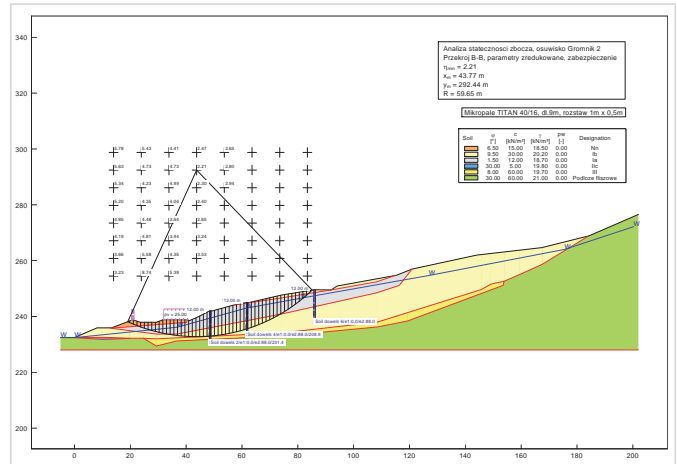


Ryc. 6. Schemat bariery mikropalowej

Z uwagi na możliwości i rozmiary sprzętu do wykonywania mikropali, bariery łączą potencjał konstrukcji o dużej wytrzymałości z zachowaniem pełnej możliwości operowania na terenie osuwiska. Zasadniczo, idea bariery polega na zdyblowaniu, zszyciu aktywnej i biernej strefy osuwiska, uniemożliwiając przemieszczenia mas koluwalnych. Elementem konstrukcyjnym są odpowiedniej długości mikropale, utwierdzone w stabilnym podłożu. Wytrzymałość bariery dobiera się stosownie do działających sił i określa się ją zazwyczaj w drodze modelowania numerycznego (ryc. 7, 8).



Ryc. 7. Wynik modelowania numerycznego MES dla zbocza osuwiskowego. Widok stref uplastycznienia



Ryc. 8. Obliczenia stateczności osuwiska z zastosowaniem barier mikropalowych

Bariery mikropalowe są elastycznie konfigurowalne. W zależności od potrzeb, składają się z jednego, dwóch lub trzech (rzadko więcej) rzędów mikropali, zwieńczonych żelbetowym odcępem. Dużą wytrzymałość na siły poprzeczne (ścinające) uzyskuje się przez odpowiednią konfigurację przestrzenną mikropali, np. rozchylenie poszczególnych rzędów w układ koźłowy. W przypadku osuwisk szczególnie głębokich bariery uzupełnia się elementem zakotwienia, np. rzędem mikropali kotwiących o nachyleniu ok. 40–45°, zamocowanych w poziomie odcępu, co pozwala na dodatkowe zwiększenie wytrzymałości poprzecznej i ograniczenie przemieszczeń w strefie przypowierzchniowej. Wyjątkową cechą barier jest ich niezwykle korzystny stosunek wartości dodatkowej siły utrzymującej wprowadzanej w masy do gabarytów samej konstrukcji – zajętość w planie rzędu 1,0–1,5 m. Dodatkowo w większości przypadków odcepy zwieńczające można umiejscowić na pewnej głębokości (ok. 1,0 m p.p.t.), co umożliwia zrekultywowanie powierzchni i przywrócenie pierwotnych funkcji terenu po wykonaniu prac stabilizujących. W zależności od warunków stateczności i konfiguracji terenowej, na osuwisku wykonuje się jedną lub więcej barier. Układy wielobarierowe charakteryzują się większym zapasem bezpieczeństwa z powodu mniejszego wyętwienia poszczególnych elementów. Pozwalają ponadto stabilizować rozległe formy z zachowaniem racjonalności ekonomicznej (ryc. 9–11).



Ryc. 9. Wykonywanie bariery mikropalowej



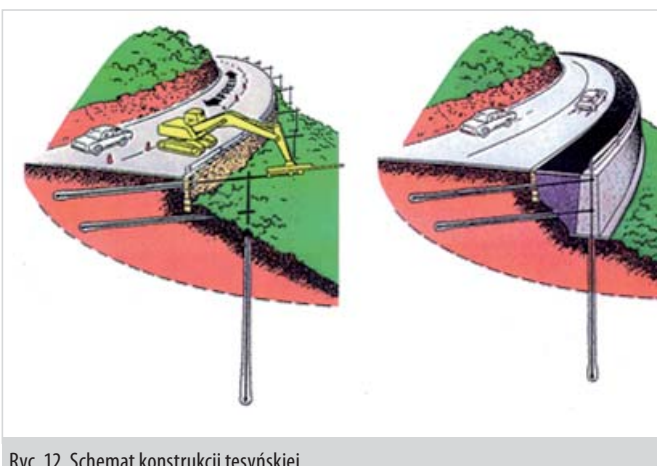
Ryc. 10. Mikropale tworzące barierę



Ryc. 11. Bariera mikropalowa z częściowo wykonanym oczepem

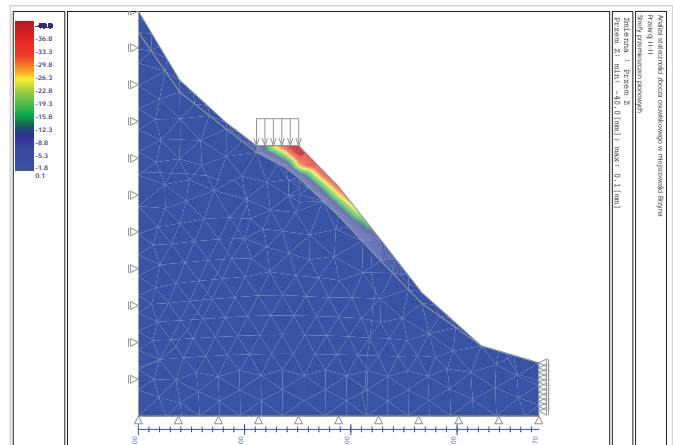
2.3. Konstrukcje tesyńskie

Ściany tesyńskie (tessyńskie) to lekkie, żelbetowe konstrukcje oporowe, których fundament stanowią mikropale, a statyka zapewniona jest przez układ zakotwień. Nazwa pochodzi od kantonu Ticino w Szwajcarii, gdzie po raz pierwszy zastosowano tę konstrukcję do poszerzania górskich odcinków dróg, z zachowaniem przejeźdnosci w trakcie robót. Technologia mikropali i mikropali CFG przyczyniła się do spopularyzowania tego typu obiektów z powodu łatwości i krótkiego czasu realizacji. Idea konstrukcji powstała z potrzeby poszerzenia odcinka drogi przez dobudowanie korpusu pod dodatkowy pas ruchu do już istniejącego obiektu ziemnego (ryc. 12).

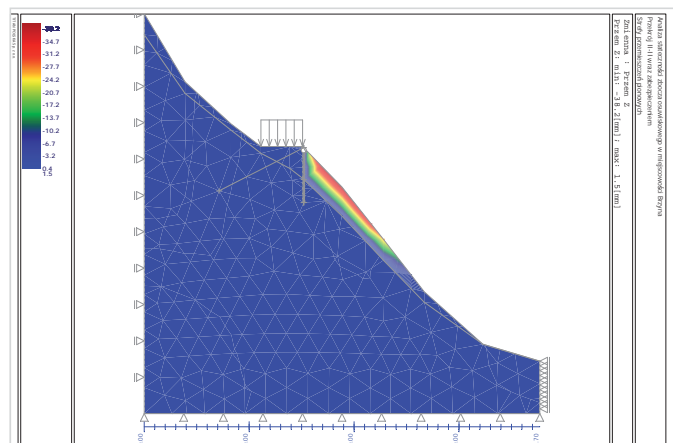


Ryc. 12. Schemat konstrukcji tesyńskiej

Proces odbył się zatem nie poprzez wcięcie w istniejące zbocze, lecz odsunięcie się w dół stoku. Możliwość dobudowywania konstrukcji drogowych w części odstokowej bardzo szybko została doceniona przy rekonstrukcji odcinków dróg uszkodzonych w wyniku osuwisk. Zazwyczaj naprawy tego typu stanowią duży problem techniczny (brak dojazdu i możliwości wprowadzenia sprzętu do prac ziemnych) i logistyczny (konieczność całkowitego wyłączenia ruchu i tyczenie, nierzadko długich, objazdów), gdyż wymagają szeroko zakrojonych robót ziemnych, rozbiórki korpusu i uformowania go na nowo. Zastosowanie konstrukcji tesyńskiej likwiduje większość problemów i minimalizuje czas naprawy, która może odbywać się z zachowaniem ciągłości ruchu. Proces tworzenia konstrukcji przebiega w kilku etapach. W pierwszej kolejności wykonuje się rząd mikropali stanowiący fundament przyszłej ściany oporowej. Mikropale wykonywane są z poziomu uszkodzonej drogi przy użyciu oprzyrządowania wiertniczego zamocowanego do ramienia koparki, wysięgnika itp. W kolejnym etapie formuje się żelbetową konstrukcję ściany z pozostawieniem otworów technologicznych dla zakotwień. Grubość ścianki wynosi zazwyczaj ok. 0,4–0,5m. W dalszych etapach wykonuje się zasypkę konstrukcyjną, wypełniając przestrzeń pomiędzy ścianą a uszkodzonym korpusem drogowym. Wykonanie zakotwień odbywa się podobnie jak w przypadku mikropali, z wysięgiem „pod siebie”, i przebiega w sposób skoordynowany z kolejnymi poziomami formowania zasypki. W ten sposób odtwarza się pierwotny przebieg drogi lub w razie potrzeby zyskuje się dodatkowe miejsce na pobocze, zatokę mijankową itp. (ryc. 13, 14)



Ryc. 13. Wyniki modelowania MES stateczności korpusu drogowego. Widoczne przemieszczenia sięgające pod drogę.



Ryc. 14. Wyniki modelowania MES zabezpieczeń dla korpusu drogowego. Widoczne wygaszenie przemieszczeń.

Konstrukcje tesyńskie wykorzystywane w rekonstrukcjach osuwiskowych mogą być obiektami samodzielnymi, tzn. poza funkcją obiektu służącego rekonstrukcji mogą równocześnie pełnić funkcje konstrukcji stabilizującej całą formę osuwiskową. W razie potrzeby, w przypadku bardziej złożonych warunków, mogą być również uzupełniane o dodatkowe elementy i kombinowane z gwoździowaniem lub barierami (ryc. 15).



Ryc. 15. Formowanie ściany tesyńskiej.

Najważniejsze zalety to możliwość odtworzenia infrastruktury do stanu sprzed osuwiska w najkrótszym możliwym czasie w wyniku wyeliminowania konieczności rozbiórki korpusu i zminimalizowania zakresu zbędnych robót ziemnych oraz utrzymania przejezdności na naprawianym odcinku dzięki technologicznym możliwościom pracy na ograniczonej przestrzeni. Rozwiązanie jest niezwykle ekonomiczne w sposób całościowy, tj. w zakresie bezpośrednich kosztów technicznych, jak i minimalizowania kosztów społecznych, niezwykle istotnych dla lokalnych wspólnot w rejonie dotkniętym awarią.

2.4. Odwodnienie wgłębne – gwoździe drenujące

Odwodnienie i regulacja stosunków wodnych w obrębie masywu osuwiskowego należą do podstawowych czynności, tj. koniecznych do wykonania w pierwszej kolejności w ramach zwalczania zjawisk geodynamicznych – stabilizowania osuwisk i napraw zniszczonych w ich wyniku konstrukcji. Właściwe wykonanie tego elementu pozwala wyeliminować lub wyraźnie zredukować wpływ jednego z najistotniejszych czynników inicjalnych, czyli wpływ wody na podatny ośrodek gruntowy.

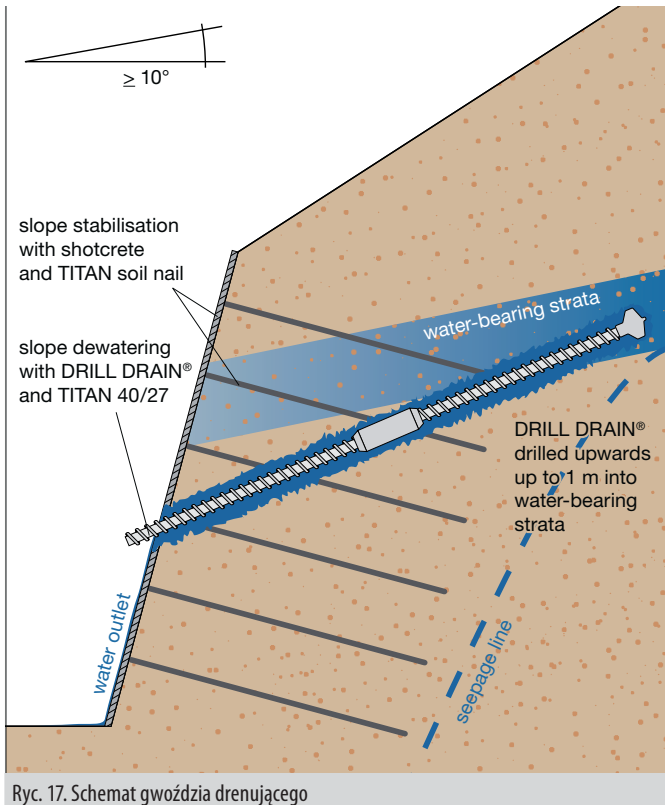
W praktyce inżynierskiej stosuje się różnorodne systemy odwodnienia. Można je zasadniczo podzielić na dwie grupy: systemy odwodnienia powierzchniowego i przypowierzchniowego oraz odwodnienie wgłębne. Wśród rozwiązań grupy pierwszej najczęściej spotyka się sączki, przypory drenażowe, dreny francuskie połączone w system z użyciem studni i ścieków. Generalnie urządzenia te wykonuje się do maksymalnej głębokości ok. 2,0–2,5 m p.p.t. W zakresie odwodnienia wgłębnego stosowane są dreny wiercone. O ile rolą systemów odwodnienia powierzchniowego jest przechwycenie i szybkie odprowadzenie wód opadowych poza zagrożony teren, tak aby nie dopuścić do ich infiltracji w podłoże, o tyle zadaniem drenażu wgłębnego jest odprowadzenie wód gruntowych niewychwyconych przez system powierzchniowy lub zasilających teren wgłębnie (np. przez filtrację poziomą z górnych partii zbocza lub terenów leżących

powyżej osuwiska). Z uwagi na uwarunkowania technologiczne w wykonywaniu drenów wierconych (wiercenie dwuprzewodowe z pełnym rurowaniem), czasochłonność i koszty, drenaż taki stosowany jest rzadko bądź w formie znacznie okrojonej w stosunku do potrzeb technicznych – dreny są zbyt krótkie, rozmieszczone zbyt rzadko lub zlokalizowane jedynie w miejscach, gdzie możliwy jest dostęp i dojazd dla wiertnicy. Powoduje to znaczne problemy z poprawnym funkcjonowaniem tego elementu i obniża wyraźnie skuteczność funkcjonowania całego rozwiązania technicznego, którego celem jest stabilizacja osuwiska. Efekt ten jest jeszcze wyraźniejszy w przypadku osuwisk zlokalizowanych w masywach fliszu karpackiego (rejon południowej Polski). W masywach fliszowych woda gruntowa ma zazwyczaj charakter szczelinowy, nie tworzy wyraźnego horyzontu (zwierciadła), lecz filtracja i infiltracja odbywa się przez systemy spękań i szczelin. Powoduje to, że wypływy i sączenia mają charakter często zupełnie nieprzewidywalny z oznakami okresowości, co oznacza, że w zależności od pory roku woda może pojawiać się w różnych miejscach i z różnym natężeniem, bez wyraźnej prawidłowości. Sprawne uchwycenie takich wód przy pomocy drenów wierconych, rozmieszczonych w rozstawie rzędu 5–10 m, w jednym poziomie (taki układ obserwowany jest najczęściej), jest w zasadzie niemożliwe. Pozostawienie tej kwestii w stanie obecnym nie wydaje się dobrym rozwiązaniem. Doświadczenia wskazują, że brak sprawnego i efektywnego systemu odwodnienia wgłębnego skutkuje postępującą degradacją parametrów wytrzymałościowych ośrodka gruntowego, rozwojem ciśnień sphywowych, co prowadzi w efekcie do ponownego uruchomienia osuwiska, i to pomimo wykonanego odwodnienia powierzchniowego. Na rycinie 16 widoczne są zerwane przypory drenażowe, zniszczone w wyniku odnowienia się osuwiska.



Ryc. 16. Widok zerwanego drenażu

Właściwe rozwiązanie kwestii odwodnienia wgłębnego wymagałoby zatem elementów odwadniających, które mogą być wykonywane szybko i sprawnie (a zatem względnie niskokosztowo), które wolne są od ograniczeń sprzętowych i terenowych (mogą być wykonane bez ograniczeń wysokościowych, na skarpie lub zboczu bez bezpośredniego dojazdu) oraz które dzięki niskim nakładom pracy i swobodzie instalacji zapewnią odpowiednią gęstość pokrycia odwadnianego masywu. Po blisko 10 latach prac badawczo-rozwojowych udało się taką technologię opracować. Nosi ona nazwę gwoździ drenujących i została opracowana według założeń opisanych powyżej, co stworzyło nowe możliwości przy projektowaniu kompleksowych rozwiązań dla stabilizacji terenów osuwiskowych (ryc. 17).



Ryc. 17. Schemat gwoźdźcia drenującego



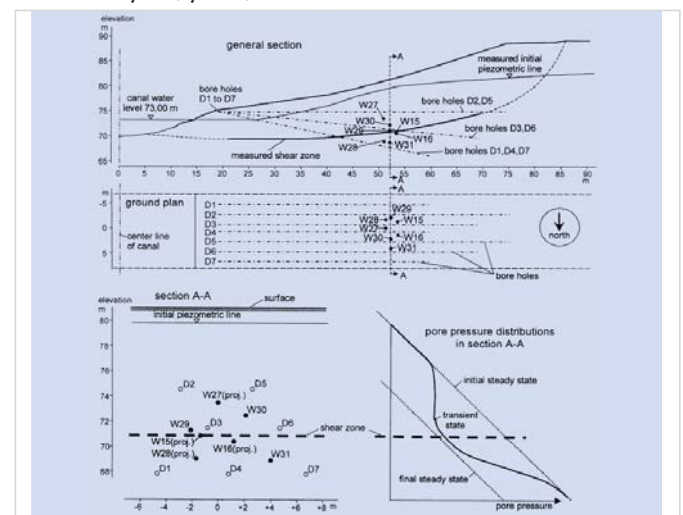
Ryc. 18. Widok trzonu filtracyjnego

Gwoździe drenujące to odmiana konstrukcyjnych, samowierzących gwoździ iniekcyjnych CFG. Ich zadaniem jest poprawa stosunków wodnych i redukcja ciśnienia porowego w obrębie wzmocnianego ośrodka gruntowego w celu kompleksowej poprawy warunków stateczności. Gwoździe drenujące redukują ciśnienia porowe i odprowadzają wodę przez filtracyjny (silnie porowaty) trzon iniekcyjny, wytworzony wzdłuż całej długości elementu. Łącząc w sobie swobodę, łatwość i wysoką wydajność instalacji pozwalają na stworzenie systemu odwodnienia głębokiego o dużej gęstości, a więc nieporównanie skuteczniejszego w wychwytywaniu wód od tradycyjnych drenów wierconych.

Gwoździe drenujące składają się z dwóch zasadniczych komponentów – stalowego elementu zbrojącego w postaci gwintowanej żerdzi oraz filtracyjnego trzonu iniekcyjnego, wypełniającego otwór na całej długości. Jako stalowy element zbrojący stosuje się elementy systemu gwoździowania CFG w odmianie 40/27 (średnica zewnętrzna / wewnętrzna żerdzi). Element podstawowy to filtracyjny trzon iniekcyjny to porowata buława iniekcyjna (silnie porowaty kamień cementowy) o współczynniku filtracji rzędu $k = 10^{-4} - 10^{-3}$ m/s. Filtracyjny trzon iniekcyjny tworzony jest z mieszanki wody, powietrza oraz specjalnej, systemowej, konfekcjonowanej mieszanki mikrocementu, mikrosfer i czynnika spieniającego. Urządzenia te wykonywane są z użyciem sprzętu i elementów

stosowanych w systemie gwoździowania CFG, zazwyczaj łącznie z gwoździami konstrukcyjnymi (jednocześnie z prowadzonymi robotami wzmocniającymi), wplecione w ich raster (ryc. 18).

Podobnie jak w przypadku konstrukcyjnych gwoździ CFG, żerdzie wraz z łącznikami, elementami dystansowymi i jednorazową końcówką wiertniczą tworzą kompletny zestaw będący konstrukcją gwoźdźcia drenującego, jednocześnie wykorzystywany do wiercenia otworu (przewód wiertniczy) i iniekcji (przewód iniekcyjny). Podczas wykonywania gwoźdźcia stosuje się płuczkę powietrzną lub specjalną, stworzoną na bazie wody z dodatkiem systemowej, mieszanki suchej do płuczki. Tak przygotowana płuczka umożliwia utrzymanie stateczności otworu bez ograniczania późniejszych zdolności filtracji (migracji) wody do zasadniczego trzonu filtracyjnego. Płuczkę przygotowuje się w proporcjach Ms/w 1:50 (mieszanka sucha / woda). Medium jest wytłaczane do otworu wiertniczego przez dysze w końcówce wiertniczej. Wiercenie odbywa się bez rur osłonowych. Nie dopuszcza się stosowania czystej płuczki wodnej. Iniekt, z którego tworzone jest trzon filtracyjny, jest podawany po zakończeniu wiercenia przez otwór centralny żerdzi i dysze w końcówce wiertniczej. Iniekcja zasadnicza (po pogrążeniu całej długości gwoźdźcia) jest prowadzona zaczynem o wskaźniku w/c = 0,5. Iniekt filtracyjny należy przygotowywać bezpośrednio przed iniekcją, czas mieszania wynosi minimum 2 minuty. Przygotowanie polega na wymieszaniu wody z systemową, konfekcjonowaną suchą mieszanką. Iniekcję prowadzi się z użyciem systemowego napowietrzacza, łączącego zaczyn ze sprężonym powietrzem w celu odpowiedniego napowietrzenia. W trakcie iniekcji zasadniczej żerdź powinna się obracać. Iniekcję prowadzi się od dna otworu do wierzchu, do momentu gdy z otworu zacznie wypływać czysty, gęsty iniekt końcowy. Iniektuje się całą długość gwoźdźcia. Uzyskuje się w ten sposób element o dowolnej praktycznie długości (instalacja gwoździ drenujących o długości 18–21m nie nastęrcza żadnych problemów) i efektywnej powierzchni roboczej odbierającej wodę na poziomie 0,4–0,6m² na każdy 1 m.b. długości. Łącząc to z wysokim współczynnikiem filtracji, charakterystycznym dla np. pospółek, oraz gęstością – przy typowym rastrze gwoździowania rozstaw poziomy wynosi 1,5–2,5m – otrzymuje się przestrzenny (wielopoziomowy) system odwodnienia głębokiego o niedostępnej dotychczas skuteczności. Z uwagi na walory techniczne i efektywność ekonomiczną gwoździe drenujące to nowe, niezwykle skuteczne narzędzie uzupełniające lukę w arsenale środków technicznych wykorzystywanych do stabilizacji terenów osuwiskowych (ryc. 19).



Ryc. 19. Schemat i wykres obrazujący skuteczność pracy gwoździ drenujących w stabilizacji osuwisk poprzez redukcję ciśnień porowych