

Kryteria doboru metod i technologii związanych ze wzmacnianiem i uszczelnianiem ośrodka gruntowego i masywu skalnego

Budowanie na pewnym gruncie

Stanisław Stryczek*, Katarzyna Jurczyszak-Pawlica**

Wraz z rozwojem infrastruktury grunty budowlane o dobrych parametrach geotechnicznych stają się w dużych aglomeracjach miejskich „towarem” deficytowym. Inwestycje lokalizowane są coraz częściej w miejscach, gdzie liczba problemów geotechnicznych, wynikających z trudnych warunków gruntowych, jest bardzo duża. Dotyczą one zagadnień posadowienia obiektów, zabezpieczenia wykopów, możliwości wystąpienia (uaktywnienia) zjawisk geodynamicznych. Każdy rodzaj inwestycji prowadzonej w takich warunkach posiada własną specyfikę. Wszystkie łączy jednak wysoki stopień komplikacji i wymagań, stawianych zarówno projektantom, wykonawcom, jak i stosowanym technologiom. Efektem dążenia do minimalizacji ryzyka związanego z problemami geotechnicznymi jest dynamiczny rozwój specjalistycznych technologii, które charakteryzują się niezawodnością, uniwersalnością oraz wysoką wydajnością. Odpowiedzią na za-

potrzebowanie rynku budowlanego są realizowane w kraju i zagranicą prace naukowo-badawcze nad opracowaniem kompletnego systemu techniczno-technologicznego o bardzo szerokim spektrum zastosowań, który umożliwiłby skuteczne i ekonomiczne rozwiązywanie większości problemów inżynierskich pojawiających się podczas prowadzenia robót budowlanych w trudnych warunkach gruntowych [2, 3].

Należy zaznaczyć, że w ostatnich latach techniki i technologie związane z modyfikacją gruntów i skał rozwijają się w imponującym tempie (rys.1). Ogromny postęp w dziedzinie technologii posadowień i fundamentowania stwarza nowe możliwości i pozwala rozwiązywać wiele problemów, z którymi dotychczas nie potrafiło sobie poradzić [1, 4, 6].

Przyczyny wzmacniania i uszczelniania gruntów i skał

Podczas prowadzenia prac górniczych, wiertniczych, geoinżynierskich oraz w budownictwie hy-

drotechnicznym i inżynierskim często występują zagrożenia naturalne, związane z nieciągłością fizyczną gruntu, obecnością wód gruntowych i złożowych [7, 8, 9]. Zagrożenia te wymagają zastosowania odpowiednich metod i technologii, w wyniku których można: wyeliminować lub zminimalizować przypadki nieciągłości górotworu, modyfikować właściwości fizykomechaniczne ośrodka gruntowego i masywu skalnego w kierunku zmniejszenia przepuszczalności (filtracji, porowatości) oraz zwiększania wytrzymałości i zwięzłości, zlikwidować lub zminimalizować dopływ wód do wyrobisk górniczych lub podziemnych obiektów inżynierskich, zmniejszyć osiadanie (kompakcję) gruntów i skał, ograniczyć możliwości upłynięcia ośrodka gruntowego i masywu skalnego pod wpływem obciążeń dynamicznych oraz zmian warunków hydrogeologicznych, przeciwdziałać rozwojowi sufozji w gruntach i skałach (mechanicznej, chemicznej), zapobiegać możliwości powstawania nowych dróg filtracji prowadzących do odkształceń górotworu.

Występujące problemy związane z zagrożeniami naturalnymi w ośrodku gruntowym lub masywie skalnym mogą być spowodowane skomplikowanymi warunkami geologicznymi i hydrogeologicznymi, w jakich prowadzone są prace iniekcyjne, oraz błędami technologicznymi powstałymi w procesie realizacji prac.

W wyniku wzniesienia nowych budowli występują w podłożu naturalnym różne zmiany, które w części są przewidywane (zmiany naprężeń i odkształceń, osiadania), ale mogą również wykraczać poza przewidywania. W konsekwencji może to doprowadzić do niekorzystnych zmian stanu budowli na tym podłożu lub budowli znajdujących się „wewnątrz” tego podłoża. Pogarszają się również charakterystyki fizykochemiczne i wytrzymałościowe podłoża. Zjawisko to określa się obecnie jako degradacja. Symptomami, a potem również przy-



Rys. 1. Zakres aplikacji metod geoinżynierskich podczas wzmacniania i uszczelniania ośrodka gruntowego

czynami tych zmian, czyli degradacji geotechnicznej podłoża, są: zmiany warunków hydrogeologicznych na obszarze znajdującym się blisko obiektu, zmiany warunków wodnych na danym terenie (np. znaczne wahania zwierciadła wód gruntowych), zmiany stopnia konsolidacji gruntów niespoistych, wynikające m.in. z obciążeń i zmian mechanicznych, spowodowanych dodatkowymi obciążeniami, zmiany stopnia uplastycznienia gruntów spoistych, penetracji wody powierzchniowej oraz zanieczyszczeń, a w szczególności substancji chemicznych do podłoża, co może doprowadzić do utraty spójności lub wewnętrznej stabilności struktury gruntu.

Wymienione wyżej przyczyny mogą być ujęte w dwie grupy: powstałe bezpośrednio lub pośrednio wskutek działalności ludzkiej. Degradacja podłoża jest niekorzystna i może być nawet niebezpieczna ze względów ekologicznych, biologicznych i chemicznych, a przede wszystkim technicznych. Niekorzystne efekty techniczne to zagrożenia budowli poprzez nierównomierne osiadanie oraz uszkodzenia systemów instalacyjnych.

Metody geoinżynierskie wzmocnienia i uszczelniania gruntów i skał

Najczęściej ośrodek gruntowy i masyw skalny można zaliczyć do układu trójfazowego. Zwykle składa się on z części stałej, zbudowanej z mineralnych ziaren i cząstek. Puste przestrzenie pomiędzy ziarnami i cząstkami wypełnione są najczęściej fazą gazową. Prace inżynierskie związane ze wzmocnieniem i uszczelnianiem gruntów i skał prowadzą do zmniejszenia objętości porów, a więc zwiększenia gęstości ośrodka, co można osiągnąć albo poprzez zagęszczenie gruntu, albo poprzez wy-

pełnienie porów specjalnym materiałem (np. typu pęczniącego) lub zaczynem uszczelniającym o właściwościach wiążących. Objętość porów ma duży wpływ na fizykomechaniczne (wytrzymałość, ścisłość, przepuszczalność), właściwości gruntów (skał) zarówno gruntu spoistego, jak i niespoistego. Mimo że podstawowa zasada wzmocnienia obu rodzajów gruntu jest taka sama, to stosowane metody i technologie są różne.

W sposób ogólny wszystkie technologie wzmocnienia i uszczelniania gruntów i skał można podzielić ze względu na charakter oddziaływania na trzy sposoby (rys. 2):

- **mechaniczny** (zagęszczenie ziaren). W metodzie tej wzmocnienie gruntów odbywa się bez konieczności stosowania dodatkowych materiałów wypełniających (cząstki ulegają przemieszczaniu względem siebie, co prowadzi do zmniejszenia objętości porów oraz wypierania z nich wody i gazu). W przypadku gruntów ziarnistych (piasek, żwir) zagęszczenie jest uzyskiwane poprzez ubijanie lub wibrowanie, natomiast w przypadku gruntów spoistych (gliny, ropy) w wyniku wstępnego obciążenia gruntu nasypem lub zastosowania próżni, co znacznie przyspiesza proces konsolidacji gruntu w stosunku do często stosowanego systemu drenażu (prekonsolidacja);
- **fizykochemiczny**. W metodzie tej istotną rolę odgrywają pewne zjawiska powierzchniowe, jak oddziaływanie elektrostatyczne, adhezja, sorpcja i wiązania wodne, występujące na powierzchni kontaktu ziaren lub cząstek gruntowych z materiałem wiążącym. Wzmocnienie ośrodka polega na wprowadzeniu w słabsze

warstwy gruntu (w przestrzeń międzyziarnową) dodatkowego nieorganicznego materiału lub zaczynu uszczelniającego, ograniczając w ten sposób pory ziarnowe na zasadzie kolmatacji lub właściwości wiążących.

Materiałem uzupełniającym ośrodek gruntowy może być materiał suchy niespoisty (kolumny żwirowe lub piaskowe oraz zagęszczanie dynamiczne), zaczyn uszczelniający o odpowiednich parametrach technologicznych (iniekcje otworowe).

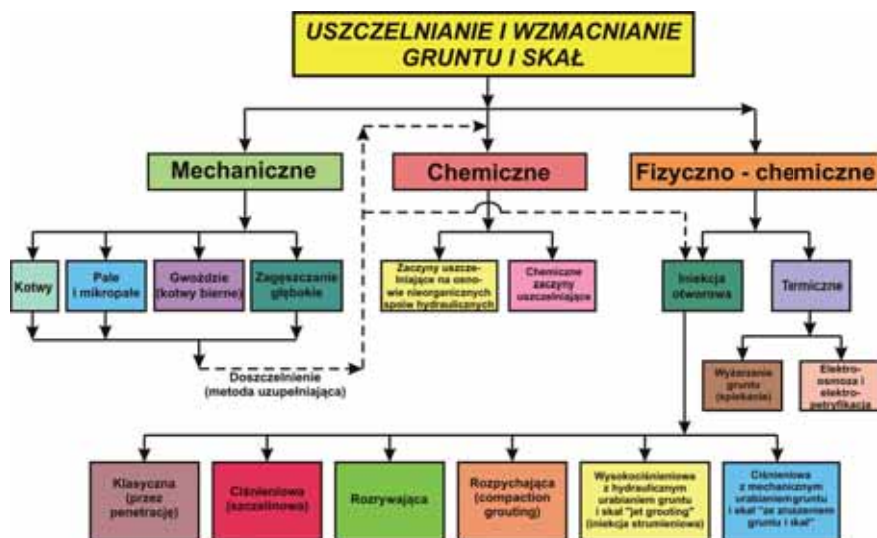
Gdy wytrzymałość gruntu spoistego zależy od sił elektrochemicznych, działających na powierzchniach cząstek ilowych, wówczas te siły mogą być wzmocnione w wyniku hydromechanicznego zmieszania zaczynu z uszczelnionym ośrodkiem (efekt stabilizacji). Wzmocniony grunt zachowuje się jak materiał kompozytowy o ulepszonych parametrach fizykomechanicznych.

- **chemiczny**. Sposób ten polega na wprowadzeniu w ośrodek gruntowy lub masyw skalny zaczynu uszczelniającego o właściwościach wiążących w środowisku wodno-gruntowym. Ze względu na rodzaj spoiwa stosowanego do sporządzania zaczynu, można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje zaczynów uszczelniających: na podstawie nieorganicznych spoiw hydraulicznych, na podstawie spoiw organicznych (tzw. zaczyny chemiczne).

Właściwości technologiczne zaczynów uszczelniających można modyfikować poprzez stosowanie odpowiednich dodatków i domieszek.

W wyniku stosowania tego sposobu, w gruncie powstaje trwały szkielet nośny na skutek procesu wiązania (polimeryzacji) zaczynu z frakcjami gruntowymi. Sztywny szkielet nadający związanemu ośrodkowi gruntowemu znaczną nośność, może być również wypełniony niezwiązanymi cząstkami gruntu. W tym przypadku cząstki te pełnią rolę amortyzatorów sił zewnętrznych działających na szkielet nośny, czego efektem jest zmniejszenie ogólnej sztywności układu.

Przy wzmocnianiu i uszczelnianiu gruntów i skał metodami geoinżynierskimi uzyskuje się z jednej strony ośrodek o zmodyfikowanych właściwościach fizyko-mechanicznych oraz z drugiej – partię gruntu naturalnego (rodzimego lub nasypowego) w jego bezpośrednim otoczeniu. W związku z tym należy się liczyć



Rys. 2. Klasyfikacja metod uszczelniania i wzmocnienia ośrodka gruntowego i masywu skalnego

z całkowicie różnym zachowaniem się pod względem geomechanicznym partii zmodyfikowanej i naturalnej. Wówczas może zachodzić obawa poślizgu na płaszczyznach ich kontaktu.

Kryteria doboru zaczynów do wzmocnienia i uszczelniania gruntów i skał

Jednym z najbardziej istotnych czynników – oprócz wyboru optymalnej metody i technologii – wpływających na skuteczność uszczelniania i wzmocnienia ośrodka gruntowego i masywu skalnego metodami geoinżynierskimi jest dobór rodzaju zaczynu uszczelniającego o odpowiednich parametrach technologicznych do istniejących warunków geologicznych, geotechnicznych i hydrogeologicznych. Różne właściwości chemiczne i fizyczne gruntów i skał mogą w rozmaity sposób oddziaływać na procesy wiązania i twardnienia zaczynu. Może przy tym zachodzić: zmiana pH środowiska gruntowego, rozkład minerałów skał z równoczesną możliwością wydzielania się ubocznych produktów reakcji, oddziaływanie cząstek minerałów na procesy hydrolizy i hydratacji (polimeryzacji), zachodzące w zaczynach uszczelniających.

W miarę rozwoju technologii uszczelniania i wzmocnienia gruntów i skał metodami iniekcji otworowej istnieje konieczność stosowania nowej generacji spoiw hydraulicznych, z których można otrzymywać zaczyny uszczelniające o wymaganych parametrach technologicznych.

Właściwy dobór spoiwa hydraulicznego winien zapewnić uzyskanie zaczynu, który powinien charakteryzować się m.in. dobrą współpracą z uszczelnionym ośrodkiem o różnym wykształceniu litologicznym, w tym także z minerałami typu ilastego, minimalną ekspansją, wysoką odpornością na działanie silnie zmineralizowanych wód gruntowych i złożowych, małym odstożem oraz niską filtracją, względnie niskim kosztem w odniesieniu do celu zadania, jakie ma spełniać w uszczelnianym ośrodku.

Spełnienie tych wymagań ma duże znaczenie dla uzyskania skutecznego efektu uszczelniania gruntów i skał. Z drugiej strony należy zauważyć, że specyficzne warunki panujące w górotworze wymagają udzielenia priorytetu niektórym z parametrów, nawet kosztem innych.

W celu zapewnienia wysokiej skuteczności wykonywanych prac, należy stosować zaczyny uszczelniające, które muszą spełniać kilka kryteriów. Pierwszym z nich jest warunek zgodności pod względem fizykochemicznym z otoczeniem. Drugi warunek wynika z kryterium przetłaczania zaczynu. Realizuje się go poprzez odpowiedni dobór modelu reologicz-

nego i parametrów reologicznych zaczynu uszczelniającego. Prawdopodobnie wyznaczone parametry reologiczne umożliwiają bowiem obliczenie oporów przepływu zaczynu w systemie cyrkulacyjnym od agregatów zatłaczających do miejsca jego lokowania. Znajomość oporów hydraulicznych pozwala na racjonalny dobór technologii uszczelniania górotworu, określenie strat ciśnień w układzie cyrkulacyjnym, ocenę rozkładu gradientu ciśnienia hydrostatycznego słupa zaczynu uszczelniającego przy jego wtlaczaniu w górotwór, określenie prędkości sedimentacji zaczynu (jeżeli występuje), projektowanie strumienia objętości tłoczenia zaczynu uszczelniającego, zapewniającego właściwe warunki przepływu w górotworze, określenie strat ciśnienia zasięgu rozchodzenia się zaczynu w górotworze w przypadku stosowania otworowej iniekcji ciśnieniowej.

Trzecim wymogiem jest potrzeba zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości oraz trwałości stwardniałych zaczynów uszczelniających, powstałych na skutek procesów fizykochemicznych. Receptury zaczynów powinny być tak dobrane, by właściwości mechaniczne utworzonego ciała były takie same lub porównywalne z właściwościami naturalnego górotworu. Zapewniając stabilność i konsolidację zarówno ośrodka gruntowego, jak i masywu skalnego, eliminuje się przyczyny występowania dodatkowych przemieszczeń i deformacji w górotworze.

Czwarty warunek powinien uwzględniać czynnik ekonomiczno-ekologiczny. W celu zminimalizowania kosztów związanych z ceną jednostkową zaczynów, można stosować dla odpowiednich warunków zazwyczaj tanie, a niekiedy odpadowe dodatki (np. pucolanowe).

Wykorzystanie tego typu dodatków do sporządzania zaczynów może wpłynąć na polepszenie parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów, zmniejszanie kosztów receptury zaczynu, użycie składowanych materiałów (dodatków), a w konsekwencji na zmniejszenie bezpieczeństwa degradacji środowiska naturalnego.

Reasumując można stwierdzić, że dobór odpowiedniego zaczynu uszczelniającego w żadnej sytuacji nie może być dziełem przypadku, czy też wynikiem nie do końca zrealizowanych badań laboratoryjnych. Od prawidłowego wykonania uszczelnienia i wzmocnienia gruntów i skał mogą zależeć dalsze prace inżynierskie (budowle hydrotechniczne, wyrobiska górnicze, szyby, posadowienia obiektów przemysłowych), a co za tym idzie – prawidłowe działanie i eksploatacja wybudowanych obiektów.

Bibliografia

1. R. Ciesielski, J. Mazur, E. Motak, *Degradacja geotechniczna podłoża pod długotrwałe eksploataowanymi obiektami przemysłowymi*, „Inżynieria i Budownictwo” 2001, nr 12.
2. K. Gradkowski, S. Żurawski, *Budowle i roboty ziemne*, Politechnika Warszawska 2003.
3. M. Gryczmański, *Współczesne kierunki rozwoju geotechniki w Polsce*, „Inżynieria i Budownictwo” 1994, nr 8.
4. M. Marjańska, A. Franków, *Nowoczesne metody wzmocnienia gruntów*, „Inżynieria i Budownictwo” 2004, nr 6.
5. T. Michalski, P. Krzykowski, *Techniki iniekcyjnego wzmocnienia podłoża*, „Inżynieria i Budownictwo” 1997, nr 12.
6. W. Miłkowski, E. Gliwa, P. Szedel, *Wzmocnienie i uszczelnianie górotworu środkami chemicznymi*, Katowice 1982.
7. A. Sawicki, W. Świdziński, *Moduły geotechniczne, moduły sprężystości i charakterystyki zagęszczania gruntów niespoistych*, „Inżynieria i Budownictwo” 1997, nr 12.
8. S. Stryczek, A. Gonet, R. Wiśniowski, *Geoinżynieria jako dyscyplina nauk technicznych – alternatywa dla tradycyjnych metod*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie” 2005, nr 1.
9. S. Stryczek, A. Gonet, R. Wiśniowski, *Kierunki rozwoju metod geoinżynierskich*, „Zeszyty Naukowe AGH. Wiertnictwo, Nafta, Gaz” 2005, nr 22/11.
10. S. Stryczek, *Stan aktualny i przyszłość metod geoinżynierskich*, „Zeszyty Naukowe AGH. Wiertnictwo, Nafta, Gaz” 2005, nr 22/1.
11. S. Stryczek, R. Wiśniowski, K. Pawlica, *Technologie wiertnicze stosowane w geoinżynierii*, Materiały IV Międzynarodowej Konferencji SNTHiT-PNiG, Bóbrka 2005.
12. S. Stryczek, A. Gonet, J. Postawa, *Technologia likwidacji zagrożenia zapadliskowego na obszarze płytkiej eksploatacji górniczej*, „Zeszyty Naukowe PŚ. Górnictwo” 2003, nr 258.
13. S. Stryczek, *Metody geoinżynierskie modyfikujące właściwości fizyko-mechaniczne ośrodka gruntowego oraz masywu skalnego*, „Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe” 1999, nr 4.
14. S. Stryczek, A. Gonet, *Geoinżynieria*, „Studia, Rozprawy, Monografie” nr 71, PAN – Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Kraków 2000.
15. A. Tajduś, *Geoinżynieria – nowe wyzwania*, „Zeszyty Naukowe AGH. Górnictwo i Geoinżynieria” 2003, nr 3-4.

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu.

**Doktorant Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków.

Pracę zrealizowano w ramach badań własnych o numerze 10.10.190.317 Akademii Górniczo-Hutniczej.