

Stabilizacja chemiczna gruntów problematycznych

dr hab. inż., Waldemar Szajna, prof. uczelni, Uniwersytet Zielonogórski

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się intensywny rozwój metod wzmocnienia podłoża gruntowego oraz stosowanie ich na coraz szerszą skalę i w coraz większej liczbie przypadków. Spowodowane jest to wznoszeniem coraz większych i cięższych obiektów, deficytem terenów o dobrych warunkach posadowienia (dotyczy to w szczególności budownictwa kubaturowego) oraz ogromnym rozwojem infrastruktury komunikacyjnej, której cechą charakterystyczną jest konieczność budowy obiektów w bardzo zróżnicowanych warunkach gruntowych, obejmujących także grunty słabe czy np. podatne na pęcznienie. Obecnie niemal na każdej budowie drogi stosuje się kilka metod wzmocnienia i modyfikacji podłoża.

Przez stabilizację chemiczną gruntu rozumie się metody poprawy cech fizycznych i mechanicznych gruntu w wyniku wprowadzenia w podłoże substancji chemicznych wiążących cząstki i ziarna oraz wypełniających pory lub zmieniających właściwości podłoża rodzimego. Do stabilizacji chemicznej dochodzi podczas powierzchniowych zabiegów mieszania gruntów z wapnem lub cementem, podczas wgłębego mieszania gruntu (np. technologia DSM), a także w technologiach wykorzystujących iniekcje zaczynu w podłoże (np. technologii *jet-grouting*). Wprowadzany materiał wiążący oraz sposób i głębokość wprowadzania substancji różnicują poszczególne metody stabilizacji. Ponieważ jednak zjawiska fizykochemiczne zachodzące w podłożu są wspólne dla znacznej części wymienionych powyżej metod, celowe jest ich zebranie we wspólną grupę i przeanalizowanie przebiegu zjawisk.

We wstępie warto zacząć do terminologii stosowanej w niniejszym artykule. Nazewnictwo techniczne z jednej strony powinno nawiązywać do tradycji stosowanej w naszym kraju, z drugiej zaś powinno się cechować precyzją, logiką i pragmatyzmem. Użyty w tytule termin: grunty problematyczne (*problematic soils*) jest powszechnie używany w literaturze anglojęzycznej. W Polsce zaczyna być stosowany w wewnętrznych opracowaniach międzynarodowych koncernów budowlanych działających na naszym rynku. Odnosi się nie tylko do gruntów słabych, ale także do gruntów pęczniących, zapadowych, czy też podatnych na zjawiska sufozyjne. Grunty takie można nazwać niestabilnymi w zmieniających się warunkach zewnętrznych lub po prostu metastabilnymi. Warto wspomnieć, że termin grunty słabe obejmuje nie tylko grunty o niskiej wytrzymałości, jak wynika to z nazwy, ale również grunty

bardzo ściśliwe. Używany jest także termin grunty słabo- nośne mający wyraźną konotację tylko z jednym aspektem zachowania – z nośnością. Wprowadzenie terminu grunty problematyczne wydaje się logiczne i ma znaczenie porządkujące.

Grunty słabe można identyfikować przez badania ich cech mechanicznych. Określa się przy tym graniczne wartości parametrów mechanicznych, przy których grunt można zaliczyć do słabych, np. wytrzymałość bez drenażu $c_u < 50$ kPa, kalifornijski wskaźnik nośności $CBR < 3$, moduł edometryczny $E_{oed} < 5$ MPa [6]. Identyfikacja jest także możliwa w badaniach terenowych, w których nie mierzy się bezpośrednio parametrów mechanicznych, lecz jedynie opory na zagłębienie przyrządu badawczego, np. opory q_c stożka w teście CPT. Gdy $q_c < 1$ MPa, grunt traktowany jest jako słaby.

Do identyfikacji pozostałej grupy gruntów problematycznych – gruntów metastabilnych – konieczne jest określenie ich cech fizycznych. Specyfika analizowanego problemu determinuje konkretną badaną cechę. Do najczęściej badanych należą:

- cechy związane z naturą gruntu (rodzaj gruntu, wskaźnik różnoziarnistości C_u , granice konsystencji Atterberga w_L i w_p , wskaźnik plastyczności I_p , zawartość części organicznych I_{om});
- parametry związane ze stanem, w którym aktualnie znajduje się grunt (stopień zagęszczenia I_D , stopień plastyczności I_L , wilgotność w , gęstość objętościowa ρ , stopień saturacji S_r);
- informacje genetyczne, np. eQ_h , iQ_h – odpowiednio czwartorzędowe holocenijskie osady eoliczne i limniczne (jeziorne).

Istotnym elementem identyfikacji gruntów metastabilnych jest także ich struktura. Przez strukturę rozumie się układ cząstek i powiązania pomiędzy nimi. Znaczenie struktury zostanie omówione w dalszej części.

Wspomniana we wstępie tendencja rozwoju i coraz szerszego stosowania metod wzmocnienia ma swoje odzwierciedlenie w publikacjach. Przykładowo w [6] przedstawiono 22 metody, [2] opisują 34 metody, zaś [11] omawia ich aż 46. Owocuje to powstawaniem bardzo obszernych opracowań – dwutomowy poradnik [12] zawiera niemalże 1000 stron. Powstają także monograficzne publikacje poświęcone poszczególnym metodom, np. [1] dotycząca wgłębego mieszania gruntu. Duża liczba metod sprawia, że z jednej strony wzmocnienie podłoża staje się samodzielnym segmentem geotechniki, z drugiej zaś inżynierowie mogą czuć

się zagubieni w ofercie nazw i metod dostępnych na rynku. Zorientowaniu się w problematyce nie sprzyjają odmienne kryteria klasyfikacji metod przedstawiane w poszczególnych publikacjach. Przykładowo [2] jako kryterium przyjmuje rodzaj gruntu, do którego technologia ma zastosowanie, zaś [4] – podstawowe zadanie, które ma spełnić technologia. Koncerny, aby się wyróżnić, stosują odmienne nazwy na bardzo zbliżone metody wzmacniania, a dodatkowo w praktyce wykorzystuje się odmiany poszczególnych metod oraz różne ich kombinacje. W tej sytuacji celowe jest syntetyczne przedstawienie istotnej grupy metod, jaką stanowi stabilizacja chemiczna, z zaakcentowaniem procesów fizycznych i chemicznych, które są wspólne dla tej grupy metod.

W potocznym języku termin stabilizacja odnosi się do stanu trwałości i równowagi procesów, co także oddaje techniczne znaczenie tego określenia. Rezultatem zabiegów stabilizujących może być wzrost wytrzymałości, sztywności i szczelności gruntu, wzrost mrozoodporności bądź np. redukcja pęcznienia i skurczu. Wiele gruntów naturalnych, a w szczególności organicznych charakteryzuje się zróżnicowaniem cech nawet na małym obszarze. Stabilizacja chemiczna redukuje tę zmienność.

W odniesieniu do gruntów problematycznych termin stabilizacja jest bardziej ogólny i bardziej adekwatny niż termin wzmocnienie. W gruntach słabych wzmocnienie jest podstawowym zadaniem prac geoinżynierskich. W gruntach metastabilnych konieczna jest zmiana ich struktury na przykład przez ich wypełnienie, uszczelnienie, czy cementację składników.

Celem artykułu jest przedstawienie jednego z szybko rozwijających się działów geoinżynierii, jakim jest stabilizacja chemiczna gruntów problematycznych. Akcent położony będzie na syntetyczne omówienie wspólnych dla poszczególnych metod stabilizacji zjawisk fizykochemicznych, z jednoczesnym zaproponowaniem terminologii porządkującej problematykę. Autor wyraża nadzieję, że zaprezentowane ujęcie zagadnienia pozwoli czytelnikom na lepsze zorientowanie się w istocie dużej grupy metod modyfikacji cech podłoża występujących na rynku.

W kolejnych punktach przedstawione zostaną problemy: podziału metod stabilizacji chemicznej, wymagań dotyczących minimalnych informacji o podłożu, procesów fizykochemicznych stanowiących istotę stabilizacji.

Termin stabilizacja chemiczna używany jest także w odniesieniu do projektowania i wykonawstwa podbudowy dróg w postaci gruntu związanego spoiwem hydraulicznym lub wapnem. Specyfika tych problemów wychodzi po zakres niniejszego artykułu, który zgodnie z tytułem odnosi się do gruntów problematycznych.

2. Informacje o podłożu

Grнты problematyczne można podzielić na grнты słabe i grнты metastabilne.

Do gruntów słabych można zaliczyć:

- grнты gruboziarniste (piaski i żwirы) znajdujące się w stanie luźnym,
- grнты mineralne, np. iły, pyły i gliny, znajdujące się w stanie plastycznym bądź miękkoplastycznym, w których konieczne jest zmniejszenie ich wilgotności, aby poprawić ich wytrzymałość i zwiększyć sztywność,
- grнты organiczne (humus, torf, gytie i namuły), które są bardzo ściśliwe,
- grнты podatne na upłynnienie, np. źle uziarnione pyły i piaski pylaste, w których problemem jest tworzące się nadciśnienie przy obciążeniu dynamicznym – wymagają cementacji, aby zwiększyć ich wytrzymałość,
- nasypy antropogeniczne o zmiennym składzie lub w zmiennym stanie.

Przykładami gruntów metastabilnych są:

- grнты pęczniące, takie jak iły zawierające silnie pęczniące minerały, np. montmorylonit sodowy, w których zmiany wilgotności dramatycznie zmieniają objętość i w których konieczne jest zastąpienie kationów Na^+ kationami redukującymi ekspansywność;
- makroporowate grнты zapadowe, jak lessy, w których w wyniku zawilgocenia rozpuszczeniu ulegają naturalne substancje cementujące lub pod obciążeniem substancje te ulegają zniszczeniu i konieczne jest ich uszczelnienie bądź scementowanie;
- grнты podatne na sufozję i przebicia hydrauliczne, w których w wyniku przepływu wody gruntowej najdrobniejsze frakcje są wymywane, zwiększając przez to przepływ i inicjując lawinowy mechanizm zniszczenia;
- grнты wrażliwe, w których naruszenie struktury istotnie zmniejsza wytrzymałość i sztywność.

Poważnym mankamentem wielu dokumentacji geotechnicznych i geologiczno-inżynierskich jest marginalne traktowanie gruntów potencjalnie problematycznych, w sensie zakresu badań opisujących ich cechy, kiedy to właśnie te grнты wymagają specjalnego potraktowania, gdyż będą stanowiły najsłabszy element podłoża budowli. Dotyczy to w szczególności budownictwa drogowego i kolejowego, gdy obszarów zalegania tych gruntów nie daje się ominąć, ze względu na wymaganą geometrię szlaków. Przykładowo informacja w dokumentacji, opisująca grunt organiczny jako nienośny bez jednoczesnego określenia jego szczegółowych parametrów, jest bezwartościowa.

Ze względu na rozległą problematykę zakresu badań poszczególnych gruntów problematycznych, ograniczmy się jedynie do dwóch przykładów. W przypadku gruntów organicznych badania zawartości części organicznych są elementem koniecznym w dokumentacji. Ze względu na ich koszt liczba tych badań nie musi być duża. Konieczne jest natomiast pobranie znacznej liczby próbek do oznaczenia wilgotności. Badania te są tanie, a wilgotność dobrze się koreluje z zawartością części organicznych. Znając wilgotność gruntów organicznych można także oszacować ich

ściśliwość. Ponieważ zawartość substancji organicznych nawet blisko sąsiadujących stref podłoża bywa bardzo zróżnicowana, stąd próbki do oznaczenia wilgotności w otworze wiertniczym powinny być pobierane nawet co 1 m. Pozwala to na oszacowanie zakresu zmienności części organicznych w podłożu.

Grunty potencjalnie ekspansywne można wstępnie identyfikować badaniami granic konsystencji w_L i w_{pr} , które są równie tanie jak badania wilgotności. Stosunkowo tanim testem jest badanie zawartości frakcji iłowej f_i oraz badanie maksymalnych odkształceń pęcznienia ε_p^{max} . Mając takie informacje, stopień ekspansywności gruntu można określić z zależności korelacyjnych, np. przedstawionych przez Niedzielskiego [10]. Przykładowo na występowanie gruntu bardzo silnie pęczniącego wskazują następujące wartości parametrów: $\varepsilon_p^{max} > 30\%$, $I_p > 40\%$, $f_i > 50\%$, $w_L > 60\%$, $S > 200 \text{ m}^2/\text{g}$, $p_c^{max} > 1 \text{ MPa}$, gdzie: S jest powierzchnią właściwą w rozwinięciu, zaś p_c^{max} jest ciśnieniem pęcznienia. Określenie pełnego składu chemicznego iłów wymaga zastosowania specjalistycznych badań np. spektrometrycznych.

W podsumowaniu tej części można stwierdzić, że warunkiem wstępnym użycia metod stabilizacji podłoża jest poprawna diagnoza warunków geotechnicznych w postaci właściwego rozpoznania określonych cech gruntów problematycznych.

3. Zasadnicze materiały stosowane do stabilizacji gruntów i podstawowe reakcje chemiczne

Zasadniczymi materiałami wykorzystywanymi do stabilizacji gruntów są:

- wapno,
- cement,
- popioły lotne,
- żużle,
- polimery i żywice.

W dalszej części ograniczymy się jedynie do pierwszych trzech materiałów, dla których charakterystyczne są trzy następujące reakcje chemiczne:

- hydratacja spoiwa wapiennego,
- wymiana jonowa,
- reakcja pucolanowa.

Wapno stosowane do stabilizacji gruntu może mieć postać tlenku wapnia CaO (wapno palone) lub postać wodorotlenku wapnia Ca(OH)_2 (wapno hydratyzowane). Tlenek wapnia wyjątkowo dobrze nadaje się do stabilizacji gruntów spoiw zawierających ponad 10% frakcji iłowej. W trakcie stabilizacji gruntu wapnem palonym dochodzi do reakcji hydratacji, która przebiega zgodnie z równaniem:



Reakcja powoduje wiązanie wody zawartej w gruncie, redukując jego wilgotność. Efekt wysuszania gruntu potęgowany jest wydzielaniem ciepła hydratacji. W [8] przedstawiono formułę pozwalającą na określenie utraty wilgoci gruntu w wyniku hydratacji wapna CaO :

$$\Delta w = w_0 - \frac{w_0 - 0,32a_c}{1 + 1,32a_c}$$

gdzie: w_0 = wilgotność początkowa gruntu, a_c = stosunek masy gruntu do masy wapna.

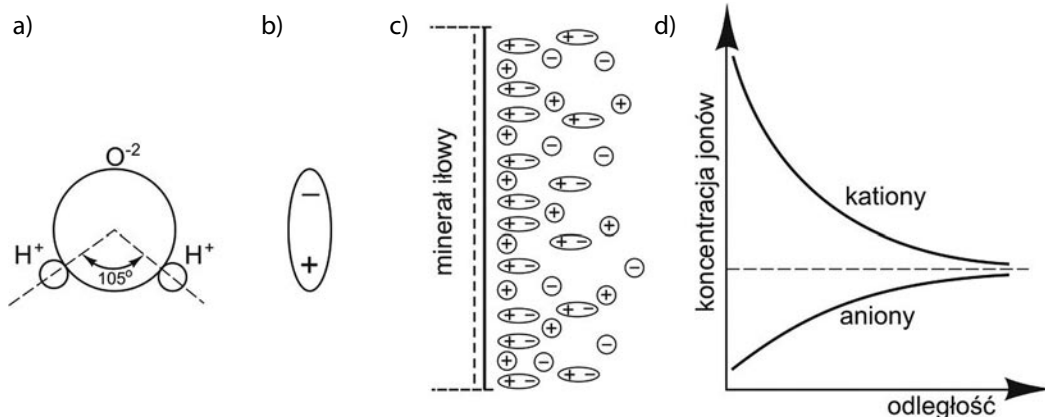
Wartość dodatkowej utraty wilgotności związanej z wydzielaniem się ciepła hydratacji przedstawia związek:

$$\Delta w = 0,45a_c$$

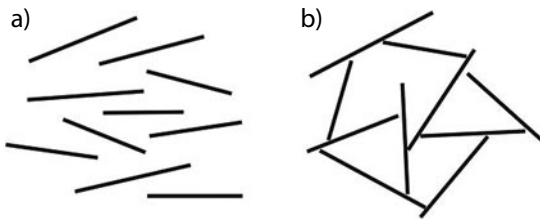
Zmniejszenie wilgotności gruntu spoiwego zwiększa jego wytrzymałość i sztywność.

Minerały iłowe cechujące się ujemnym ładunkiem na powierzchniach licowych płytek, przyciągają tzw. podwójną warstwę dyfuzyjną wody, składającą się z dipoli wody i wolnych kationów (rys. 1). Cechy minerału, w tym grubość warstwy dyfuzyjnej, bardzo silnie zależą od rodzaju kationu wymiennego w jego strukturze, przy czym zdolności wiązania wody maleją zgodnie z szeregiem: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+}$ [5]. Poszczególne kationy wymienne mają różne zdolności izomorficznego zastępowania. Zdolności te rosną zgodnie z szeregiem: $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+}$. Zmieszanie wapna z gruntem ilastym wywołuje wymianę jonową. W silnie ekspansywnych minerałach iłowych, takich jak

Rys. 1. Schemat i symbol dipoli wody (a) i (b), podwójna warstwa dyfuzyjna wody (c), koncentracja jonów (d) [7] – uzupełniony



montmorylonit sodowy, kationy sodu zostają zastąpione kationami wapnia, redukując zdolność wiązania wody. Redukcja warstwy podwójnej ma jeszcze jeden pozytywny efekt – powoduje zmiany strukturalne minerałów łąkowych. Dwa podstawowe układy płytek łąkowych: strukturę dyspersyjną (rys. 2a) i strukturę sflokulowaną (rys. 2b) pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Elementarne struktury minerałów łąkowych: a) dyspersyjna, b) sflokulowana

Jak podaje [8], redukcja adsorbowanej wody warstwy podwójnej umożliwia kontakty typu krawędź – lico, czyli przejście od struktury dyspersyjnej do struktury sflokulowanej. Przejściu temu towarzyszy zwiększenie wytrzymałości, sztywności oraz zdolności filtracyjne. Zmniejsza się natomiast jego plastyczność i potencjał pęcznienia.

W środowisku wysokiego pH krzem i glin obecne w minerałach łąkowych ulegają rozpuszczeniu w wodzie i reagują z wodorotlenkiem wapnia, tworząc stabilne związki żelowe, które następnie krystalizują. Jest to tzw. reakcja pucolanowa. Źródłem pucolan (materiału krzemionkowo-glinowego) mogą być także popioły lotne lub cement portlandzki.

Zastosowanie cementu do stabilizacji gruntu jest szczególnie efektywne w przypadku gruntów gruboziarnistych. Warto w tym miejscu przypomnieć, że zgodnie

z obowiązującą normą PN EN ISO 14688 piaski i żwiry należą do grupy gruntów gruboziarnistych. Klasyfikacja taka wydaje się słuszna, gdyż na potrzeby mechaniki gruntów zasadniczym kryterium podziału winno być zachowanie mechaniczne i model konstytutywny, a te są wspólne dla piasków i żwirów.

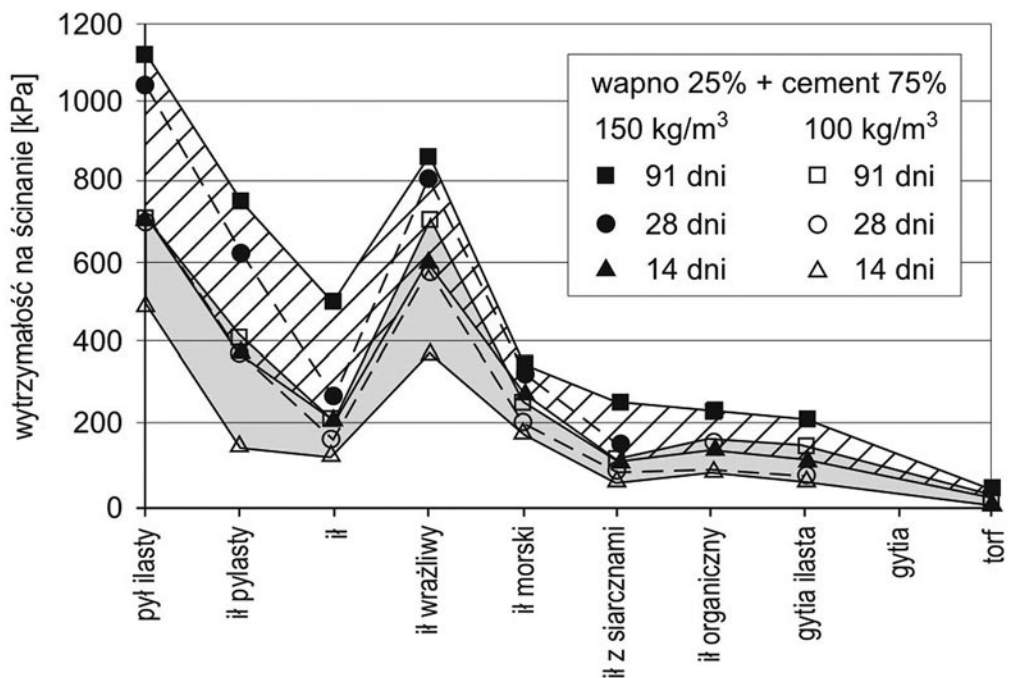
W przeciwieństwie do stabilizacji wapnem, która przebiega powoli, dodanie cementu wywołuje znacznie szybsze skutki. Oznacza to, że zagęszczenie stabilizowanego gruntu, w przypadku zabiegów powierzchniowych powinno następować szybko, w ciągu 2 godzin od wstępnego mieszania cementu z gruntem. W łąkach może wystąpić trudność mieszania go z cementem, z tego względu wstępnie dodaje się wapno, aby poprawić urabialność gruntu, a w drugiej kolejności stosuje się cement.

Na ostateczną efektywność zabiegu stabilizacji cementem wpływają: ilość i stopień rozdrobnienia cementu, jakość i równomierność wymieszania cementu z gruntem, stopień zagęszczenia mieszanki, wilgotność mieszanki oraz właściwe warunki dojrzewania. Ogólnie jednak można stwierdzić, że im większa jest zawartość frakcji łąkowej f_l oraz im większy jest wskaźnik plastyczności gruntu I_p , tym większa powinna być ilość cementu użyta do stabilizacji. Do niekorzystnych czynników obniżających skuteczność stabilizacji należy niska wilgotność, zaś w przypadku stabilizacji powierzchniowej: wiatr, wysoka temperatura i zbyt długi okres od wymieszania składników do ich zagęszczenia.

W [9] podano następujące wytyczne stosowania wapna do stabilizacji gruntu:

- $I_p > 7\%$,
- zawartość frakcji kamienistej $f_k < 15\%$,
- $I_{om} < 10\%$, wskaźnik piaskowy $W_p < 30\%$,
- gdy $f_l > 10\%$, zaleca się stosować wapno palone.

Rys. 3. Wpływ ilości substancji stabilizującej oraz czasu wiązania na wytrzymałość gruntu [14]



W odniesieniu do stabilizacji cementem wytyczne te wyglądają następująco:

- $I_p = 0-15\%$,
- $w_L < 40\%$,
- $pH = 5-8$,
- $I_{om} < 2\%$.

Popioły lotne mogą być źródłem pucolan, stąd stosowane są samodzielnie lub jako dodatki w przypadku stabilizacji gruntów wapnem bądź cementem. Popioły lotne z węgla brunatnych i kamiennych mają odmienne cechy. Cechy popiołów z poszczególnych elektrowni także różnią się od siebie, stąd trudno jest sformułować ogólne ich charakterystykę.

W [9] podaje się także zakres krzywych granicznych uziarnienia, dla których stabilizacja jest skuteczna. Ponadto podano maksymalną zawartość siarczanów lub soli, wynoszącą 1%. Zbyt duża zawartość siarczanów powoduje reakcję tych substancji ze związkami wapnia i glinu, zawartymi w gruncie drobnoziarnistym, tworzącymi pęczniący ettringit. Wzrost objętości ettringitu wywołuje pękanie mieszanki i obniżenie jej wytrzymałości.

Efekty stabilizacji chemicznej gruntu w dużej mierze zależne są od jego rodzaju i stanu. Przykładowe wartości wzrostu wytrzymałości na ścinanie kilku rodzajów gruntów drobnoziarnistych, stabilizowanych mieszanką cementu i wapna w proporcji 75/25%, dodawaną w ilości 100 i 150 kg/m³ gruntu przedstawiono na rysunku 3, zaczerpniętym z pracy [4]. Rysunek potwierdza wszystkie sformułowane wcześniej uwagi, akcentując wpływ czynnika czasu oraz ilości substancji stabilizującej.

4. Metody wprowadzania substancji stabilizujących

Można wyróżnić trzy grupy metod wbudowania materiałów stabilizujących w podłoże gruntowe:

- stabilizacja powierzchniowa,
- wgłębne i masowe mieszanie gruntu,
- zastrzyki (iniekcje) gruntu substancjami stabilizującymi (np. iniekcje zagęszczające, czy też iniekcje strumieniowe).

Substancja stabilizująca może mieć postać suchego proszku bądź bardziej lub mniej płynnego zaczynu. W każdym przypadku jednak ważne jest jej równomierne rozprowadzenie w gruncie.

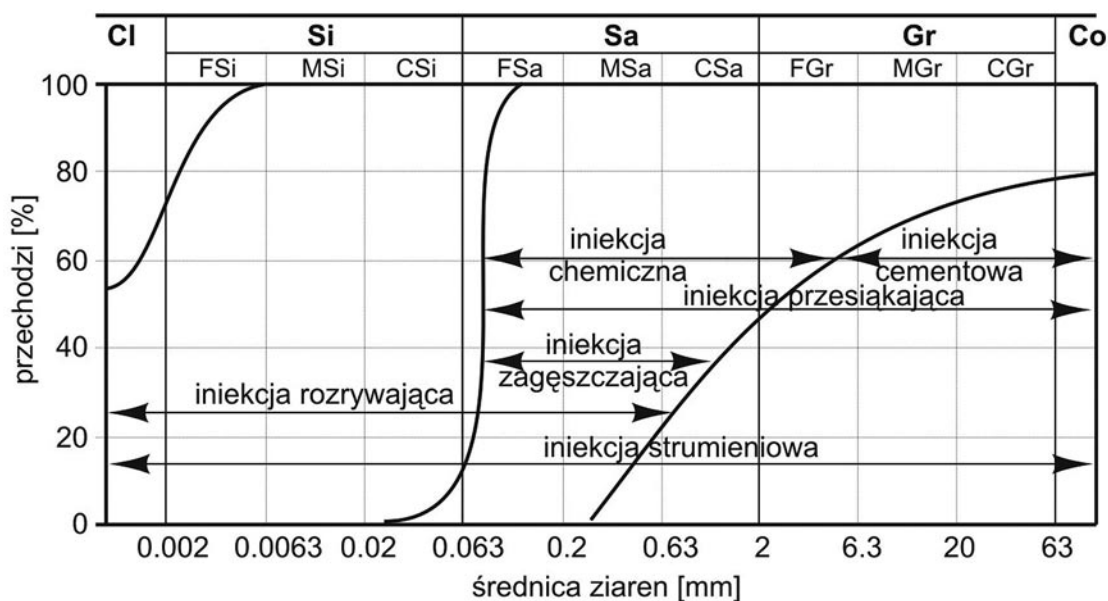
Stabilizacja powierzchniowa polega zazwyczaj na rozłożeniu sproszkowanego stabilizatora na powierzchni gruntu, wymieszaniu go z jednoczesnym dozowaniem wody, a następnie zagęszczeniu. Zależnie od rodzaju gruntu i zamierzonego celu stabilizacji używane mogą być wapno, cement, popioły lotne bądź inne dodatki. Do realizacji zadania coraz częściej używa się specjalistycznych, wielofunkcyjnych maszyn – recyklerów.

Kolejną grupą metod jest wgłębne mieszanie gruntu (*deep soil mixing* – DSM) i masowe mieszanie gruntu (*mass soil mixing* – MSS). Technologia polega na wprowadzaniu w podłoże, za pomocą sprzętu o dużej mocy, żerdzi z odpowiednio ukształtowanymi końcówkami mieszającymi. W trakcie mieszania in situ jest dozowana substancja stabilizująca. Stabilizator może mieć postać suchego proszku, np. cementu wapna lub popiołów lotnych (metoda sucha) bądź postać zaczynu (metoda mokra). Metody DSM pozwalają na tworzenie kolumn, najczęściej ułożonych w odpowiednie sekwencje, spełniające funkcje elementów wzmacniających lub przesłon odcinających.

W publikacjach i ofertach firm podział iniekcji gruntowych jest mniej lub bardziej rozbudowany. Ze względu na zachodzące zjawiska fizyczne celowe jest rozróżnienie:

- iniekcji przesiąkających (*permeation grouting*),
- iniekcji zagęszczających (*compaction grouting*),
- iniekcji rozrywających (*fracture grouting*),
- iniekcji strumieniowych (*jet grouting*).

Rys. 4. Zakresy stosowania technologii iniekcyjnych



Zależnie od zastosowanej metody wbudowania iniektu stabilizator może mieć konsystencję plastycznej zaprawy, pasty, zawiesiny, roztworu lub emulsji. Istotnym parametrem mającym wpływ na łatwość penetracji ośrodka gruntowego w metodach iniekcyjnych jest lepkość dynamiczna aplikowanego materiału. [4] podaje, że np. lepkość zawiesiny standardowego cementu wynosi $5 \cdot 10^{-2}$ N·s/m², ultradrobno cementu $8 \cdot 10^{-3}$ N·s/m², zaś roztworów akrylowych $1 \cdot 10^{-3}$ N·s/m². Im mniejsza jest lepkość, tym większa zdolność penetracji.

W przypadku iniekcji przesiąkającej, nazywanej także iniekcją wypełniającą lub penetrującą (dwa ostatnie terminy gorzej opisuje istotę metody) stabilizator przemieszcza się w porach gruntu bez niszczenia jego struktury. Zakres penetracji jest zależny od lepkości substancji i w przypadku zawiesin cementowych metoda ma zastosowanie do żwirów i grubych piasków.

Istotą iniekcji zagęszczających jest redukcja porowatości gruntu i jego dogęszczenie przez wprowadzenie pod ciśnieniem zapraw o konsystencji plastycznej lub gęstoplastycznej, tworzących zwarte bryły. Metodę stosuje się do luźnych utworów gruboziarnistych. Dokonując zastrzyków na kolejnych głębokościach, co 0,3–0,9 m, możliwe jest tworzenie swego rodzaju kolumn. Metoda może być stosowana do podchwycenia nadmiernie osiadających fundamentów bezpośrednich.

Iniekcje rozrywające realizowane są pod dużym ciśnieniem, powodującym niszczenie pierwotnej struktury gruntu i wypełnianie powstałych przestrzeni stabilizatorem. Także i ta metoda może kompensować nadmierne osiadania.

Technologia iniekcji strumieniowej jest realizowana w trzech wersjach. W wersji pojedynczej jest podawany jedynie zaczyn. W wersji podwójnej zaczyn aplikowany jest w otulinie powietrznej. W wersji potrójnej strumień wody jest podawany w otulinie powietrznej, zaś zaczyn aplikowany jest z niezależnej dyszy. W każdym przypadku, w wyniku bardzo dużego ciśnienia (30–60 MPa), z którym podawane jest medium, niszczona jest struktura gruntu, a w wyerodowanym gruncie zaczyn tworzy w miarę jednorodną kolumnę gruntobetonu. Zasięg wzmocnienia jest zależny od warunków gruntowych i zastosowanej wersji systemu. W [13] podano maksymalną wartość średnicy kolumny uzyskanej w Polsce, wynoszącą 5 m. Technologia wykorzystywana jest nie tylko do wzmocnień, ale także do tworzenia poziomych i pionowych ekranów hydraulicznych. Zakres stosowania technologii w poszczególnych warunkach gruntowych pokazano na rysunku 4, zaczerpniętym z pracy [3].

5. Podsumowanie

Deficyt terenów inwestycyjnych o dobrych warunkach gruntowych oraz rozwój infrastruktury komunikacyjnej powoduje konieczność zajęcia się problemami ich przystosowania do celów budowlanych. Pierwszym krokiem na tej drodze powinno być precyzyjne nazwanie problemów. Ponieważ

podłoże o niekorzystnych cechach tworzą nie tylko grunty słabe, lecz także grunty metastabilne (pęczniejące, czy zapadowe) proponuje się wspólną nazwę całej grupy – grunty problematyczne.

Do modyfikacji cech gruntów problematycznych wykorzystuje się powszechnie metody stabilizacji chemicznej. Rozważana klasa metod obejmuje: metody stabilizacji powierzchniowej, metody wgłębnej i masowego mieszania gruntu, a także metody iniekcyjne.

Duża liczba oferowanych metod oraz różnorodność nazw stosowanych przez poszczególne firmy na opisanie zbliżonych technologii może powodować zagubienie wśród inwestorów. Celem artykułu było wyodrębnienie wspólnych cech poszczególnych metod oraz syntetyczny opis skutków oddziaływania najczęściej stosowanych substancji stabilizujących: wapna, cementu i popiołów lotnych na ośrodek gruntowy, koncentrując się na ich oddziaływaniu na grunty ilaste.

Warunkiem koniecznym doboru właściwej metody stabilizacji jest rozpoznanie, w jakim zakresie problematyczny grunt nie spełni stawianych mu wymagań. W artykule wskazano, jakie cechy należy bezwzględnie zbadać i opisać w dokumentacji geotechnicznej, aby dobrać odpowiednią metodę stabilizacji. Pokazano zakresy stosowania metod w poszczególnych warunkach gruntowych oraz przykładowe parametry gruntu po wzmocnieniu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bruce M. E. i inni, Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, Raport FHWA-HRT-13-046, Washington, 2013
- [2] Chu J., Varaksin S., Klotz U., Mengé P., State of the Art Report: Construction Processes, Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Egypt, Alexandria, 2009, str. 3006–3135
- [3] Elias V. i inni, Ground Improvement Methods, FHWA, NHI-06-020, Washington, 2006
- [4] Han J., Principles and practices of ground improvement, J. Wiley & Sons, New Jersey, 2015
- [5] Holtz R. D., Kovacs W. D., Sheahan T. C., An introduction to geotechnical engineering, Prentice Hall, Boston, 2011
- [6] Kłosiński B. i inni, Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, IBDiM, Warszawa, 2002
- [7] Mitchell J. K., Soga K., Fundamentals of soil behavior, J. Wiley & Sons, Inc., New York, 2005
- [8] Nicholson P. G., Soil improvement and ground modification methods, Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2015
- [9] Pisarczyk S., Geoinżynieria: Metody modyfikacji podłoża gruntowego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005
- [10] Przysański (red.), Posadowienie budowli na gruntach ekspansywnych, Rozprawy nr 244, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1991
- [11] Schaefer V. R., Berg R. R., Geotechnical Solutions for Soil Improvement, Rapid Embankment Construction, and Stabilization of the Pavement Working Platform, Final Phase 2 Summary Report by SHRP II R02, TRB, Washington, 2012
- [12] Schaefer V. R. i inni, Ground Modification Methods – Reference Manual, tom I i II, Raport FHWA-NHI-16-028, Washington, 2017
- [13] Topolnicki M., Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą kontrolowanych iniekcji geotechnicznych, XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie budowlane, Międzyzdroje, 2011, str. 175–200
- [14] Holm G., Deep mixing properties and applications, Powerpoint presentation, STAR Conference, Cambridge, UK, 2005