

Stabilizacja gruntów wapnem palonym w inżynierii komunikacyjnej – teoria i praktyka

Dr inż. Cezary Kraszewski, mgr inż. Marcin Dreger, inż. Michał Mitrut, inż. Mieczysław Przygoda
Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie, Laboratorium Geotechniki

W artykule przedstawiono technologię stabilizacji gruntów wapnem palonym w budownictwie komunikacyjnym z uwzględnieniem najnowszych wymagań normowych [12] oraz katalogów projektowania nawierzchni [2, 3], jak również dotychczasowych doświadczeń [11, 14].

Nawierzchnia drogowa powinna przejmować obciążenie od ruchu drogowego na podłoże gruntowe. Obowiązująca w Polsce klasyfikacja obejmuje kilkadziesiąt rodzajów gruntów. Jednak do projektowania nawierzchni drogowych zastosowano uproszczenie sprowadzające dużą liczbę różnorodnych gruntów do czterech grup nośności podłoża nawierzchni: G1, G2, G3 lub G4. Jako miarę nośności podłoża przyjęto wskaźnik nośności CBR, który porównuje nośność podłoża gruntowego z warstwą zagęszczonego tłucznia, w procentach, czyli 100% oznacza nośność zagęszczonego tłucznia. Grupa G1 to niewysadzinowe podłoże o wskaźniku nośności nie mniejszym niż 10%, na którym można projektować warstwy nawierzchni bez wzmocnienia podłoża. W przypadku gdy podłoże nawierzchni zaklasyfikowano do grupy G2, G3 lub G4, oznacza to, że podłoże nie ma odpowiedniej nośności. Należy je wówczas doprowadzić do grupy nośności G1, stosując odpowiednie zabiegi [2, 3, 13].

Jednym ze sposobów wzmocnienia podłoża jest powierzchniowa stabilizacja gruntów spoiwami lub lepiszczami, na przykład: cementem, wapnem, aktywnymi popiołami lotnymi, emulsją asfaltową, asfaltem spienionym lub kompozycjami spoiw oraz spoiw i lepiszczy. W rezultacie uzyskuje się dodatkową warstwę ze stabilizowanego gruntu o wskaźniku nośności co najmniej 10%.

Wapno jest używane do stabilizacji gruntów spoistych oraz innych gruntów zawierających dużą ilość cząstek ilowych. W zależności od wilgotności gruntu można stosować wapno palone CaO lub suchogaszzone (hydratyzowane) $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a także wapno pokarbidowe.

W niniejszym artykule omówiono stabilizację gruntów wapnem palonym, które w praktyce jest używane najczęściej spo-

śród spoiw wapiennych ze względu na możliwość stabilizowania rodzimych przewilgoconych gruntów spoistych.

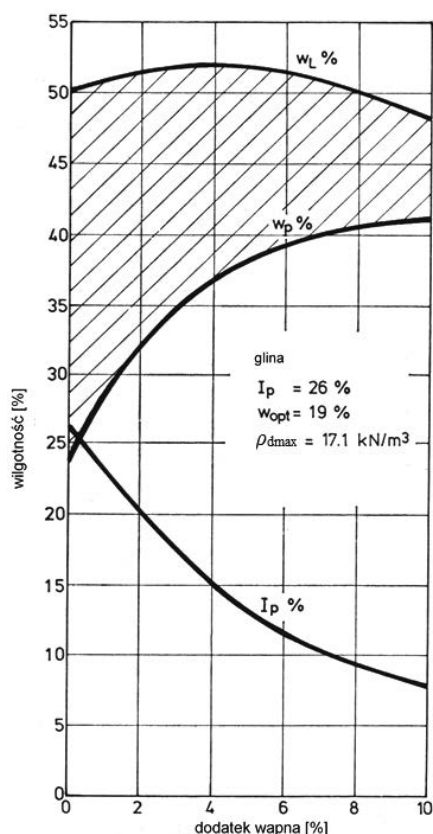
PROCESY ZACHODZĄCE PODCZAS STABILIZACJI GRUNTÓW WAPNEM

Stabilizacja gruntu wapnem palonym to proces polegający na rozdrobnieniu i spulchnieniu gruntu, zmieszaniu go z wapnem palonym i zagęszczeniu mieszanki gruntowo-wapiennej. W wyniku tego procesu można uzyskać trwałe poprawienie właściwości mechanicznych oraz odporności otrzymanej mieszanki na oddziaływanie wody i mrozu. Wówczas taka mieszanka może być wykorzystana do wykonania dolnych warstw konstrukcji nawierzchni. Wapno palone może być także wykorzystane do poprawienia właściwości geotechnicznych gruntu, czyli jego ulepszenia. Jest to metoda stabilizacji mająca na celu osuszenie spoistego gruntu i zwiększeniu nośności podłoża, wbudowanie w nasyp lub przygotowanie przewilgoconego gruntu do stabilizacji innym spoiwem lub lepiszczem.

Wapno palone, czyli tlenek wapnia CaO, jest spoiwem wytworzonym po wypaleniu i zmieleniu kamienia wapiennego. Podczas wypału przebiega reakcja CaCO_3 (węglan wapnia) $\rightarrow$ CaO (tlenek wapnia) + $\text{CO}_2\uparrow$ (dwutlenek węgla). Otrzymane wapno palone może mieć różne właściwości ze względu na zanieczyszczenia występujące w kamieniu wapiennym oraz różnice w technologii wypału. Istotną właściwością wapna palonego jest jego czas gaszenia t_{60} , w ciągu którego po dodaniu do wapna wody mieszanina osiąga temperaturę 60°C. Do stabilizacji przewilgoconych gruntów stosuje się wapno wysoko reaktywne, którego $t_{60} < 10$ min.

Innowacyjnym rozwiązaniem jest tak zwane wapno niskoemisyjne zawierające dodatek, który łączy z sobą najdrobniejsze cząstki wapna palonego. Dzięki temu podczas mieszania wapna z gruntem obniżona jest znacznie emisja pyłów do środowiska.

Wapno palone nadaje się do stabilizacji przewilgoconych gruntów spoistych i innych gruntów zawierających dużą ilość cząstek ilowych, które wchodzi w reakcję z wapnem. Podczas stabilizacji tych gruntów wapnem palonym zachodzi reakcja chemiczna polegająca na wytworzeniu wodorotlenku wapnia z wydzielaniem dużej ilości ciepła i parowaniem wody, wynikające z procesu gaszenia wapna opisanego wzorem CaO (tlenek wapnia) + H_2O (woda) = Ca(OH)_2 (wodorotlenek wapnia) + 64 kJ (ciepło). Reakcja egzotermiczna zachodzi natychmiast po wymieszaniu wilgotnego gruntu z wapnem palonym i trwa około 1,5 ÷ 3 godz. w zależności od reaktywności wapna. Dlatego w krótkim czasie możliwe jest przesuszenie przewilgoconego gruntu. Generowanie się ciepła podczas stabilizacji



Rys. 1. Zmiany plastyczności gruntu w zależności od dodatku wapna

gruntów wapnem palonym pozwala na prowadzenie prac nawet podczas obniżonych temperatur (-5°C). Oprócz właściwości wapna, zmniejszenie wilgotności gruntu zależy od innych czynników, na przykład rodzaju gruntu, temperatury otoczenia, wilgotności powietrza.

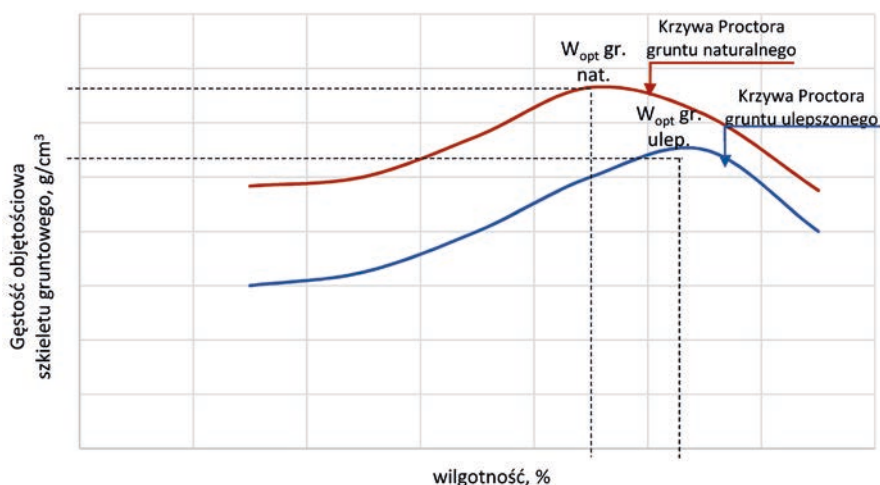
Po dodaniu wapna palonego w strukturze gruntu zachodzą zmiany polegające na wymianie jonowej pomiędzy wodorotlenkiem wapnia Ca^{2+} i OH^{-} a jonami minerałów ilastych występujących w gruncie. Wymiana jonowa zależy od składu mineralnego gruntu i jego wilgotności, a podczas stabilizacji gruntu wapnem palonym występuje zjawisko łączenia się cząstek ilastych w większe agregaty. Zjawisko wymiany jonowej wywołuje korzystne zmiany fizyczne w gruntach spoistych, tak zwaną zmianę granic Atterberga, to znaczy zmianę granicy płynności w_L i granicy plastyczności w_p , których różnica ($w_L - w_p$) zmniejsza się w miarę dodatku wapna [1] i w konsekwencji maleje wartość wskaźnika plastyczności I_p (rys. 1).

Ponadto zmniejsza się spójność gruntu. Ponieważ dodanie wapna palonego powoduje zwiększenie pH do około 11 ÷ 12, po dłuższym czasie w tak silnym środowisku zasadowym zwiększa się rozpuszczalność związków krzemu i glinu zawartych w gruncie. Wynikiem tego procesu jest łączenie się cząstek gruntu i zwiększenie wytrzymałości na ściskanie mieszanki gruntowo-wapiennej.

W rezultacie w gruncie spoistym lub innym gruncie zawierającym dużą ilość cząstek ilowych pod wpływem wapna palonego zachodzą korzystne zmiany, a mianowicie:

- zmniejszenie wilgotności,
- zmniejszenie plastyczności,
- poprawa zagęszczalności,
- zwiększenie odporności na wysadziny mrozowe,
- zwiększenie wodoodporności,
- zwiększenie wytrzymałości i nośności.

W procesie stabilizacji szczególną uwagę należy zwrócić na zmiany wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mieszanki wapienno-gruntowej w porównaniu do powyższych cech gruntu. Pod wpływem wapna zwiększa się wilgotność optymalna i maleje maksymalna gęstość objętościowa gruntu (rys. 2). Znajomość tych właściwości jest niezbędna podczas zagęszczania mieszanki wapienno-gruntowej.



Rys. 2. Zmiany wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej gruntu pod wpływem wapna palonego

WYMAGANIA I BADANIA

Wapnem palonym można stabilizować grunty spoiste i inne grunty zawierające frakcję ilową, czyli cząstki mniejsze od 0,002 mm. Zawartość frakcji kamienistej w tych gruntach nie powinna przekraczać 15%. Należą do nich na przykład żwiry gliniaste, pospółki gliniaste, piaski gliniaste, gliny piaszczyste, gliny, ropy. W praktyce do stabilizacji wapnem przydatne są grunty, które charakteryzują się wskaźnikiem plastyczności $I_p > 5$. Istotną zaletą jest możliwość stabilizowania gruntów, których wilgotność naturalna jest znacznie większa od wilgotności optymalnej, nawet przy zawartości części organicznych do 10%. Nieprzydatne do stabilizacji wapnem są grunty gruboziarniste i niespoiste oraz grunty o zawartości części organicznych powyżej 10%.

Grunt przeznaczony do stabilizacji należy rozpoznać i przeprowadzić następujące badania:

- uziarnienie [6],
- wilgotność naturalna [5],
- wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [8],
- granica plastyczności [7],
- granica płynności [7],
- zawartość części organicznych [13].

Do stabilizacji gruntów stosuje się wapno palone o następujących właściwościach określonych w normie PN-EN 459-1 [4]:

- zawartość $\text{CaO}+\text{MgO}$ klasa CL90 lub CL80,
- uziarnienie P4 lub drobniejsze,
- reaktywność wapna R5.

W celu ustalenia procentowej ilości wapna, jaka ma być dodana do gruntu, należy przeprowadzić badania kilku mieszanek o różnym dodatku wapna i wybrać optymalną ilość wapna. Po zmieszaniu składników otrzymuje się mieszaninę świeżą, czyli zagęszczoną mieszaninę gruntu z wapnem palonym po okresie hydratacji i zakończeniu reakcji egzotermicznej. Taką mieszaninę charakteryzują następujące właściwości technologiczne: wilgotność (w , %), natychmiastowy wskaźnik nośności (IPI , %) oraz moduł odkształcenia ($E_{1,2}$, MPa). Badania te powinny być wykonane według procedur podanych w aktualnych normach [5, 10, 13].

Wymagane właściwości technologiczne **świeżej mieszanki** zależą od jej przeznaczenia i są następujące:

- wilgotność naturalna powinna być zbliżona do wilgotności optymalnej,
- natychmiastowy wskaźnik nośności $IPI = 10 \div 50\%$,
- moduł odkształcenia $E_2 = 30 \div 80$ MPa.

Mieszanka gruntowo-wapienna stopniowo wiąże i po stwardnieniu charakteryzują ją następujące właściwości: wskaźnik nośności CBR , wytrzymałość na ściskanie R_c oraz moduł odkształcenia $E_{1,2}$. Wymagane właściwości **stwardniałej mieszanki** również zależą od jej przeznaczenia i są następujące:

- kalifornijski wskaźnik nośności $CBR = 10 \div 50\%$,
- wytrzymałość na ściskanie $R_c = 0,2 \div 1,0$ MPa,
- moduł odkształcenia $E_2 \geq 50 \div 80$ MPa.

W praktyce projektowania składu mieszanki gruntowo-wapiennej orientacyjny dodatek wapna palonego w % masy do gruntu w zależności od przeznaczenia mieszanek przyjmuje się w ilości:

- $2 \div 5\%$ na dolną warstwę podbudowy drogi o ruchu KR1 i KR2,
- $2 \div 4\%$ na warstwę mrozochronną drogi o ruchu KR1 i KR2,
- $1 \div 5\%$ na górną warstwę ulepszanego podłoża drogi do 1,0 m,
- $1 \div 4\%$ do wbudowania w nasyp poniżej 1,0 m,
- $1 \div 4\%$ do ulepszenia gruntu w celu dalszej stabilizacji spoiwami lub lepiszczami,
- $1 \div 4\%$ do osuszenia gruntu.

Po ustaleniu procentowego dodatku wapna należy sporządzić receptę roboczą, w której będzie podana ilość wapna palonego w kg/m^2 , odpowiednio do grubości stabilizowanej/ulepszonej warstwy.

Przykład: określony laboratoryjnie wymagany dodatek wapna wynosi 2%, maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowo-wapiennego $\rho_{d \max} = 1,7 \text{ g/cm}^3$, grubość stabilizowanej warstwy 30 cm, a wówczas ilość wapna palonego wyniesie $1700 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 0,02 = 10,2 \text{ kg/m}^2$.

Oprócz wapna palonego do stabilizacji gruntów może być stosowane wapno hydratyzowane lub pokarbidowe. Te rodzaje wapna nie nadają się do stabilizacji gruntów przewilgoconych, ale mogą być używane do gruntów średnio spoistych o wilgotności zbliżonej do optymalnej. Ponadto w procesie stabilizacji gruntów wapnem palonym mogą być wykorzystywane różne dodatki, na przykład popiół lotny lub zmielony żużel granulowany. Skład mieszanek z takimi dodatkami ustala się w drodze badań laboratoryjnych.

ZASTOSOWANIE

Stabilizacja gruntów wapnem palonym może być wykorzystana do następujących robót:

- wykonywania dolnej warstwy podbudowy drogi o ruchu KR1 lub KR2,
- warstwy mrozochronnej drogi o ruchu KR1 lub KR2,
- wykonywania górnej warstwy ulepszanego podłoża drogi do głębokości 1,0 m pod podbudowę drogi dla kategorii KR1 ÷ KR7,
- wbudowania w nasyp na głębokości poniżej 1,0 m,
- do ulepszenia gruntu w celu dalszej stabilizacji spoiwami lub lepiszczami,
- do osuszenia gruntu.

Stabilizacja gruntów wapnem palonym pozwala na uzdatnienie lub poprawienie właściwości gruntów spoistych i innych gruntów zawierających dużą ilość cząstek ilowych na miejscu prowadzenia robót budowlanych.

Mieszanki gruntu z wapnem palonym wykonuje się z reguły technologią mieszania na miejscu „*in situ*”. Technologia ta polega na rozłożeniu wapna na gruncie w ilości około $10 \div 50 \text{ kg/m}^2$,

rozdrobnieniu gruntu i wymieszaniu z wapnem palonym specjalną mieszarką, a następnie wyprofilowaniu i zagęszczeniu gruntu. Do rozłożenia wapna stosuje się specjalne rozścielacze (rys. 3) z regulacją ilości dozowanego spoiwa wyposażonymi w osłony przeciwpylne. Na mniejszych obszarach lub w miejscach trudnodostępnych wapno może być rozłożone ręcznie.



Rys. 3. Rozścielanie wapna palonego



Rys. 4. Samojedzna mieszarko-frezarka do stabilizacji gruntów

Mieszanie gruntu z wapnem wykonuje się profesjonalną mieszarko-frezarką (rys. 4) samojezdną lub na ciągniku rolniczym (rys. 5) z regulacją głębokości mieszania. Do stabilizacji gruntów spoistych wapnem palonym najlepiej używać mieszarek wyposażonych w bęben z frezami.

Dokładność wymieszania sprawdza się wizualnie. Mieszanka powinna być jednorodna, bez brył nierozkruszonego gruntu i grudek wapna. Po wymieszaniu gruntu z wapnem należy odczekać, pozwolić na odparowanie wody, a zagęszczenie gruntu stabilizowanego wapnem palonym należy rozpocząć dopiero po zakończeniu procesu gaszenia, to znaczy 1,5 ÷ 3 godz. od zmieszania gruntu z wapnem. W wyniku zmieszania gruntu z wapnem palonym w ciągu tego czasu z nieurabialnego plastycznego gruntu można uzyskać grunt podsuszony, dający się zagęścić.

Do zagęszczania mieszanki gruntowo-wapiennej stosuje się walce gładkie, okołkowane lub gumowe. W miejscach mniej dostępnych mogą być używane zagęszczarki płytowe lub ubijaki mechaniczne. Ze względu na korzystne zmiany zachodzące w gruntach po zmieszaniu z wapnem palonym kolejną warstwę gruntu stabilizowanego można wykonywać bezpośrednio na wcześniej zagęszczonej warstwie.

Wymagany wskaźnik zagęszczenia gruntu stabilizowanego wapnem dotyczy mieszanek przeznaczonych do dolnej warstwy podbudowy, warstwy mrozochronnej, ulepszonego podłoża oraz nasypu i wynosi co najmniej $0,97 \div 1,00$ w zależności przeznaczenia wbudowanej mieszanki [13, 14].

Należy zauważyć, że wytwarzanie się ciepła podczas stabilizacji gruntów wapnem palonym pozwala na prowadzenie prac nawet przy temperaturach do -5°C , co jest korzystne podczas wykonywania robót w okresie zimowym.

W przypadku wykonywania robót na terenach zaludnionych można do stabilizacji gruntów stosować wapno niskoemisyjne, pozwalające na mniejsze pylenie podczas wykonywania prac, a zachowujące taką samą reaktywność jak zwykłe wapno palone.

Podczas robót wykonuje się badania kontrolne pozwalające na określenie wilgotności gruntu, ilości rozłożonego wapna, jednorodności i głębokości wymieszania. Jeśli przyjęte są odpowiednie wymagania, należy także sprawdzać wskaźnik zagęszczenia, moduł odkształcenia i wytrzymałość na ściskanie gruntu stabilizowanego wapnem oraz równość poprzeczną i podłużną zagęszczonej warstwy.



Rys. 5. Mieszarko-frezarka do stabilizacji gruntów na ciągniku rolniczym

LITERATURA

1. Amadi, A. A. & Okeiyi, A. Geo-Engineering (2017) 8: 3. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0041-3>; Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data, 2017.
2. Katalog Typowych Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych; Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
3. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych; Załącznik do zarządzenia Nr 30 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
4. PN-EN 459-1 Wapno budowlane – Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
5. PKN-CEN ISO/TS 17892-1:2017 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów. Część 1: Oznaczanie wilgotności.
6. PN-EN ISO 17892-4:2017 Rozpoznanie i badania geotechniczne - Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Badanie uziarnienia gruntów.
7. PN-EN ISO 17892-12:2018 Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 12: Oznaczanie granic płynności i plastyczności.
8. PN-EN 13286-2:2010 Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie – Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora.
9. PN-EN 13286-41:2005 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 41: Metoda oznaczania wytrzymałości na ściskanie mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.
10. PN-EN 13286-47:2012 Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym – Część 47: Metoda badania do określenia kalifornijskiego wskaźnika nośności, natychmiastowego wskaźnika nośności i pęcznienia liniowego.
11. PN-EN 14227-11:2006 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Specyfikacja – Część 11: Grunty stabilizowane wapnem (wycofana).
12. PN-EN 14227-15:2015-12 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym - Specyfikacje – Część 15: Grunty stabilizowane hydraulicznie.
13. PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe – Roboty ziemne – Wymagania i badania.
14. PN-S-96011:1998. Drogi samochodowe. Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych.