

D - 02.01.01c

**WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO
PRZEZ MIESZANIE WGLĘBNE GRUNTU
I FORMOWANIE KOLUMN LUB BLOKÓW
WAPIENNYCH I CEMENTOWYCH**

1. WSTĘP

1.1. Przedmiot SST

Przedmiotem niniejszej szczegółowej specyfikacji technicznej (SST) są wymagania dotyczące wykonania i odbioru robót związanych ze wzmocnieniem podłoża gruntowego metodą mieszania wgłębne gruntu i formowania kolumn lub bloków wapiennych i cementowych.

1.2. Zakres stosowania SST

Szczegółowa specyfikacja techniczna (SST) jest stosowana jako dokument przetargowy i kontraktowy przy zleceniu i realizacji robót na drogach krajowych i wojewódzkich.

Zaleca się wykorzystanie SST przy zleceniu robót na drogach miejskich i gminnych.

1.3. Zakres robót objętych SST

Ustalenia zawarte w niniejszej specyfikacji dotyczą zasad prowadzenia robót związanych z wykonaniem i odbiorem wzmocnienia podłoża gruntowego metodą mieszania wgłębne słabych gruntów spoistych, namulów i torfów ze spoiwem, najczęściej z wapnem i/lub cementem (również z innymi spoiwami) i uformowanie w podłożu kolumn lub masywnych bloków. Metodę tę wykorzystuje się do wzmacniania warstw (zwykle do 20 m) słabych gruntów, które trudno byłoby wymienić albo wzmocnić innymi metodami. Metoda pozwala zwiększyć nośność, poprawić stateczność oraz ograniczyć osiadanie pod obciążeniem np. nasypem drogowym.

1.4. Określenia podstawowe

1.4.1. Wzmocnienie podłoża - trwałe nadanie podłożu gruntowemu właściwości zwiększających jego nośność oraz zmniejszających odkształcalność i wrażliwość na wpływ czynników atmosferycznych.

1.4.2. Mieszanie wgłębne miejscowego gruntu - metoda formowania w podłożu ze słabych gruntów - kolumn lub ich układów albo masywnych bloków utworzonych z miejscowego gruntu mieszanego najczęściej z wapnem i/lub cementem, niekiedy z mieszanką cementowo-piaskową lub innymi spoiwami.

1.4.3. Kolumny wapienne i cementowe - „słupy” formowane w podłożu metodą mieszania wgłębne miejscowego gruntu z wapnem i/lub cementem, wykorzystywane do wzmocnienia grubych warstw słabych gruntów.

1.4.4. Masywne bloki wapienne i cementowe - bloki różnego kształtu, formowane w podłożu metodą mieszania wgłębne miejscowego gruntu z wapnem i/lub cementem, służące do wzmocnienia grubych warstw słabych gruntów.

1.4.5. Pozostałe określenia podstawowe są zgodne z obowiązującymi, odpowiednimi polskimi normami i z definicjami podanymi w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 1.4.

1.5. Ogólne wymagania dotyczące robót

Ogólne wymagania dotyczące robót podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 1.5.

2. MATERIAŁY

2.1. Ogólne wymagania dotyczące materiałów

Ogólne wymagania dotyczące materiałów, ich pozyskiwania i składowania, podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 2.

2.2. Materiały do wykonania wzmocnienia i stabilizacji podłoża

2.2.1. Zgodność materiałów z dokumentacją projektową

Materiały do wykonania wzmocnienia i stabilizacji podłoża powinny być zgodne z ustaleniami dokumentacji projektowej lub SST.

2.2.2. Stosowane materiały

W przypadku wzmocnienia i stabilizacji podłoża gruntowego metodą formowania kolumn lub bloków, można stosować w procesie mieszania gruntu podłoża, następujące spoiwa:

- wapno (palone lub hydratyzowane),
- cement (portlandzki, hutniczy itp.),
- mieszankę cementowo-piaskową, piaskowo-wapienną,
- popioły lotne, żużle wielkopiecowe (granulowane), bentonit.

Bentonit (bardzo drobnoziarnisty il) powinien charakteryzować się:

- zawartością cząstek ilowych w zasadzie większą niż 50% wagowo, z tym że przeważającą ilość w tych cząstkach powinny stanowić montmorillonity,
- znaczną zdolnością adsorpcji wody, wynoszącą zwykle 300÷400% własnej masy,
- znaczną zdolnością do tiksotropii, tj. zdolności przechodzenia zawiesiny cząstek ilowych w wodzie ze stanu zolu do stanu żelu,
- pozbawieniem zanieczyszczeń (np. ziarnami piasku, pyłami o większej średnicy),
- dostawą w workach ocechowanych przez wytwórnię.

Cement, wapno, popioły lotne, żużle wielkopiecowe granulowane powinny odpowiadać wymaganiom dokumentacji projektowej oraz spełniać wymagania zawarte w SST D-04.05.00÷04.05.04 [5].

Inne materiały, które mogą być stosowane w czasie budowy, powinny być trwałe, odporne na kontakty z gruntem oraz zgodne z wymaganiami dokumentacji projektowej, ustaleniami producentów i ew. aprobat technicznych.

Składowanie materiałów, nie przeznaczonych do bezpośredniego wbudowania po dostarczeniu na budowę, powinno się odbywać zgodnie z zaleceniami SST D-04.05.00÷04.05.04 [5] lub ustalane indywidualnie.

3. SPRZĘT

3.1. Ogólne wymagania dotyczące sprzętu

Ogólne wymagania dotyczące sprzętu podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 3.

3.2. Sprzęt stosowany do wykonania robót

Przy wykonywaniu wzmocnienia i stabilizacji podłoża gruntowego metodą formowania kolumn lub bloków wapiennych i cementowych Wykonawca, w zależności od potrzeb, powinien wykazać się możliwością korzystania ze sprzętu dostosowanego do przyjętej metody robót:

- urządzenia z pojedynczym lub kilkoma mieszadłami obrotowymi, np. palownicy lub mieszadła na koparce gasienicowej,
- świdra ślimakowego (do formowania cienkich „minipali”),
- innego sprzętu przystosowanego do odspajania i mieszania gruntu podłoża (m.in. pomp, sprzętu do wykonywania robót ziemnych).

Sprzęt do formowania kolumn i bloków w podłożu powinien być wyposażony w urządzenie rejestrujące parametry procesu mieszania: głębokości oraz ilości podawanego spoiwa, ciśnienia tłoczenia itp. Otrzymywany wydruk stanowi metrykę kolumny lub bloku.

Sprzęt powinien odpowiadać wymaganiom określonym w dokumentacji projektowej lub instrukcji producenta i powinien być zaakceptowany przez Inżyniera.

4. TRANSPORT

4.1. Ogólne wymagania dotyczące transportu

Ogólne wymagania dotyczące transportu podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 4.

4.2. Transport materiałów

Materiały stosowane przy wzmocnieniu i stabilizacji podłoża można przewozić w sposób określony w SST D-04.05.00÷04.05.04 [5] lub ustalony indywidualnie.

5. WYKONANIE ROBÓT

5.1. Ogólne zasady wykonania robót

Ogólne zasady wykonania robót podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 5.

5.2. Zasady wykonywania robót

Konstrukcja i sposób wykonania wzmocnienia i stabilizacji podłoża powinny być zgodne z dokumentacją techniczną i SST. W przypadku braku wystarczających danych można korzystać z ustaleń podanych w niniejszej specyfikacji oraz z informacji podanych w załącznikach 1÷3.

Dokumentacja projektowa lub SST powinna określić:

- zakres powierzchniowy robót,
- rodzaj zastosowanego sposobu wzmocnienia podłoża (np. za pomocą kolumn, minipali, bloków),
- ew. średnice kolumn lub minipali w przypadku ich wykonywania,
- proponowany sprzęt do wykonywania robót,
- rodzaj spoiwa dodawanego w procesie mieszania gruntu podłoża,
- ew. sposób mieszania gruntu (na sucho, na mokro).

Wykonawca powinien przedstawić do akceptacji Inżyniera uściślony program wykonania robót, uwzględniający rodzaj stosowanego sprzętu i sposób wykonania robót.

Podstawowe czynności przy wykonywaniu robót obejmują:

1. roboty przygotowawcze, obejmujące lokalizację miejsca i elementów robót i jego parametry wysokościowe,
2. wykonanie elementów wzmacniających podłożę, w postaci kolumn, minipali lub bloków, przez odspojenie gruntu i jego mieszanie ze spoiwem oraz wykonanie ew. dodatkowych elementów nośnych,
3. ew. wykonanie warstwy wyrównawczej w poziomie głowic kolumn,
4. ew. profilowanie i zagęszczenie powierzchni terenu,
5. roboty wykończeniowe.

5.3. Roboty przygotowawcze

Przed przystąpieniem do robót należy, na podstawie dokumentacji projektowej, SST lub wskazań Inżyniera:

- ustalić lokalizację terenu robót,
- przeprowadzić obliczenia i pomiary geodezyjne niezbędne do szczegółowego wytyczenia robót oraz ustalenia danych wysokościowych,
- usunąć przeszkody, np. drzewa, krzewy, obiekty, ew. elementy dróg, ogrodzenia itp.,
- oznaczyć miejsca formowania kolumn lub bloków wzmacniających podłoże.

Zaleca się korzystanie z ustaleń SST D-01.00.00 [2] w zakresie niezbędnym do wykonania robót przygotowawczych.

5.4. Roboty przy wzmocnieniu podłoża gruntowego

5.4.1. Sposoby wykonania robót

Sposób wykonania wzmocnienia podłoża gruntowego powinien być zgodny z zasadami ustalonymi w punkcie 5.2. W przypadku niewystarczających danych szczegółowych można korzystać z ustaleń podanych w dalszym ciągu.

Wzmocnienie podłoża zaleca się wykonywać za pomocą:

- tworzenia kolumn,
- stabilizacji blokowej.

Przy wzmocnieniu podłoża można zastosować metodę:

- mieszania na sucho,
- mieszania na mokro.

5.4.2. Proces tworzenia kolumn

Kolumny określonej średnicy zwykle rozmieszcza się w postaci (patrz rys. 1.1):

- pojedynczych słupów w siatce lub rzędach,
- ścian z kolumn,
- rusztów z kolumn,
- bloków z blisko usytuowanych kolumn.

Proces tworzenia kolumn obejmuje:

- ustawienie urządzenia do wykonywania kolumny nad kolejnymi punktami formowania kolumn,
- mechaniczne formowanie kolumn przez urządzenie z pojedynczym lub kilkoma mieszadłami obrotowymi, poprzez odspojenie gruntu miejscowego i jego mieszanie oraz częściową wymianę ze spoiwem (np. wapnem i/lub cementem), w postaci suchej i mokrej.

Kolumny można wykonywać pionowo lub ukośnie, przy czym zaleca się aby pochylenie kolumn lub ścian, ze względów wykonawczych, nie było większe od 10°.

Podstawa kolumny powinna być zagłębiona co najmniej 0,5÷1 m w warstwę nośną. Jeśli dokumentacja projektowa nie przewiduje inaczej, to głowice kolumn zaleca się pozostawiać na poziomie co najmniej 1 m poniżej powierzchni wzmacnianego nasypu lub terenu.

5.4.3. Minipale

Odmianą kolumn są cienkie „minipale” o średnicy do 200 mm, formowane przez mieszanie słabego gruntu podłoża z mieszanką piaskowo-cementową lub piaskowo-wapienną, wprowadzaną świdrem ślimakowym.

Długość minipali oraz ich rozmieszczenie powinno być zgodne z ustaleniami dokumentacji projektowej, SST lub Inżyniera.

5.4.4. Stabilizacja blokowa

Stabilizacja blokowa jest metodą formowania masywnych bloków, utworzonych z miejscowego gruntu mieszanego ze spoiwem, najczęściej z wapnem i/lub cementem, niekiedy z mieszanką cementowo-piaskową.

Stabilizację blokową zaleca się stosować w warstwach od 2 do 5 m bardzo słabych gruntów organicznych (torfów, namulów) i miękkoplastycznych ilów.

Na powierzchni zaleca się układać zbrojenie z geosyntetyków, a na nim roboczą warstwę gruntu (lub kruszywa) grubości około 1 m, umożliwiającą wjazd maszyn (patrz rys. 1.2). Układanie geosyntetyków powinno odpowiadać wymaganiom SST D-02.03.01c [4], a wykonanie warstwy gruntu - SST D-02.00.00 [3].

Zaleca się mieszanie gruntu ze spoiwem wykonywać odcinkami bloku długości od 3 do 5 m, np. mieszadłem umocowanym na koparce gąsienicowej.

5.4.5. Metoda mieszania gruntu ze spoiwem

Metodę mieszania i skład mieszanki dobiera się odpowiednio do właściwości gruntu i określonego celu stabilizacji. Jeśli skład mieszanki nie został ustalony wcześniej, Wykonawca wykona przed rozpoczęciem robót odcinek próbny (poletko doświadczalne) w celu sprawdzenia prawidłowości przyjętego składu. Do próby Wykonawca powinien użyć materiału i sprzętu takich, jakie będą stosowane w czasie robót. Przyjęty sposób stabilizacji gruntu może być realizowany po akceptacji Inżyniera.

Przy mieszaniu gruntu ze spoiwem na sucho zaleca się stosować: cement (portlandzki, hutniczy, krzemionkowy itp.), wapno (palone lub hydratyzowane), popioły lotne, żużle wielkopieczowe (hydratyzowane), gips lub bentonit.

Przy mieszaniu na mokro zaleca się stosowanie mieszanki z cementu i wody, do której mogą być dodawane popioły lotne lub żużle wielkopieczowe oraz inne dodatki lub wypełniacze. Wskaźnik wodno-cementowy (w/c - wagowo) powinien wynosić w zastosowaniach konstrukcyjnych od 0,4 do 0,7.

W przypadku użycia dodatku bentonitu, mieszanina wodno-bentonitowa powinna być przygotowana przed dodaniem cementu lub innego spoiwa.

Jeśli przewiduje się zbrojenie kolumn, to można w świeżej kolumnie osadzać stalowe pręty, szkielety lub kształtowniki. Otulenie ich należy zapewnić przez użycie odpowiednich elementów dystansowych.

5.5. Warstwa wyrównawcza

Jeśli przewidziano wykonanie warstwy wyrównawczej (rozdzielczej) pomiędzy wzmocnionym podłożem a nasypem drogi, to powinna być ona zgodna z wymaganiami dokumentacji projektowej lub poniższymi wskazaniem.

Zadaniem warstwy jest równomierne rozłożenie obciążenia nasypu na podłożę wzmocnione kolumnami lub bloki. Warstwa spełnia również rolę drenażu poziomego.

Warstwa wyrównawcza może mieć grubość 50 cm. Może składać się z pospółki ułożonej w dwóch warstwach: dolnej grubości 20 cm i górnej grubości 30 cm. Pomiędzy warstwami można ułożyć geosiatkę o wytrzymałości na rozciąganie wzdłużne około 70 kN/m i rozciąganie poprzeczne około 60 kN/m.

Warstwę dolną układa się i zagęszcza na powierzchni wyrównanej po wykonaniu kolumn lub bloku. Na warstwie dolnej układa się pasma geosiatki w kierunku poprzecznym do osi drogi. Sąsiednie pasma można połączyć na zakłady szerokości 50 cm. Górną warstwę układa się na geosiatce i zagęszcza się.

5.6. Profilowanie i zagęszczenie powierzchni terenu

Jeśli dokumentacja projektowa nie przewiduje inaczej to warstwę wyrównawczą lub teren poddany wzmocnieniu metodą formowania kolumn lub bloków wapiennych i cementowych należy wyprofilować i zagęścić.

Po oczyszczeniu powierzchni ze wszelkich zanieczyszczeń należy sprawdzić, czy istniejące rzędne terenu umożliwiają uzyskanie, po profilowaniu, zaprojektowanych rzędnych podłoża. Zaleca się, aby rzędne terenu przed profilowaniem były o co najmniej 5 cm wyższe niż projektowane rzędne podłoża. Jeśli występują zaniżenia poziomu w podłożu przewidzianym do profilowania, to należy spulchnić podłoże na głębokość zaakceptowaną przez Inżyniera, dowieźć dodatkowy grunt spełniający wymagania dokumentacji projektowej, w ilości koniecznej do uzyskania wymaganych rzędnych wysokościowych i zagęścić warstwę do uzyskania wartości wymaganego wskaźnika zagęszczenia.

Do profilowania podłoża można stosować równiarki lub inny sprzęt zaakceptowany przez Inżyniera.

Po profilowaniu podłoża należy przystąpić do jego zagęszczenia, które zaleca się wykonać walcami wibracyjnymi lub zagęszczarkami wibracyjnymi.

5.7. Roboty wykończeniowe

Roboty wykończeniowe powinny być zgodne z dokumentacją projektową i SST. Do robót wykończeniowych należą prace związane z dostosowaniem wykonanych robót do istniejących warunków terenowych, takie jak:

- odtworzenie przeszkód czasowo usuniętych przed wykonaniem wzmocnienia podłoża, np. parkanów, ogrodzeń, nawierzchni, chodników, krawężników itp.,
- niezbędne uzupełnienia zniszczonej w czasie robót roślinności, tj. zatrawienia, krzewów, ew. drzew,
- roboty porządkujące otoczenie terenu robót.

6. KONTROLA JAKOŚCI ROBÓT

6.1. Ogólne zasady kontroli jakości robót

Ogólne zasady kontroli jakości robót podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 6.

6.2. Badania przed przystąpieniem do robót

Przed przystąpieniem do robót Wykonawca powinien:

- uzyskać wymagane dokumenty, dopuszczające wyroby budowlane do obrotu i powszechnego stosowania (certyfikaty na znak bezpieczeństwa, aprobaty techniczne, certyfikaty zgodności, deklaracje zgodności, ew. badania materiałów wykonane przez dostawców itp.),
- ew. wykonać własne badania właściwości materiałów przeznaczonych do wykonania robót, określone w pkt 2.

Wszystkie dokumenty oraz wyniki badań Wykonawca przedstawia Inżynierowi do akceptacji.

6.3. Badania w czasie robót

Częstotliwość oraz zakres badań i pomiarów, które należy wykonać w czasie robót podaje tablica 1.

Tablica 1. Częstotliwość oraz zakres badań i pomiarów w czasie robót

Lp.	Wyszczególnienie badań i pomiarów	Częstotliwość badań	Wartości dopuszczalne
1	Lokalizacja i zgodność granic terenu robót z dokumentacją projektową	1 raz	Wg pktu 5 i dokumentacji projektowej
2	Sprawdzenie wykonania usunięcia przeszkód	1 raz	Wg pktu 5
3	Wytyczenie miejsc wykonania kolumn,	Ocena ciągła	Wg pktu 5 i dokumen-

	bloków itp. zagęszczających podłoże		tacji projektowej
4	Wykonanie wzmocnienia i stabilizacji podłoża gruntowego przez formowanie kolumn, bloków	Ocena ciągła	Wg pktów 5.4 i 6.4
5	Ew. wykonanie warstwy wyrównawczej	Ocena ciągła	Wg pktu 5
6	Ew. profilowanie i zagęszczenie powierzchni terenu	Ocena ciągła	Wg pktu 5
7	Wykonanie robót wykończeniowych	Ocena ciągła	Wg pktu 5

6.4. Badania kontrolne kolumn i bloków

Zakres badań kontrolnych kolumn i bloków określa Inżynier. Zwykle powinny być one wykonywane na całym terenie robót, w różnych gruntach. Zaleca się wykonanie co najmniej 5 prób każdego rodzaju z każdego gatunku.

Badania mogą obejmować:

- odkopanie górnego odcinka 2-3 m i ocenę wymiarów oraz jakości i jednorodności tworzywa,
- wycięcie próbek rdzeniowych i zbadanie wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe (które daje zaniżone wyniki) lub trójosiowe,
- sondowanie materiału kolumn specjalną końcówką ze skrzydełkami (przydatne do głębokości 8 m),
- badanie wytrzymałości kolumny sondą wyciąganą (specjalna końcówka ze skrzydełkami z przymocowaną metalową linką jest osadzana podczas formowania kolumny, w badaniu rejestruje się zmienność siły potrzebnej podczas wyciągania końcówki),
- badanie presjometrem, specjalną sondą krzyżakową, sondą statyczną, badania geofizyczne (pomiar prędkości fal),
- próbne obciążenia płytą (świdrem talerzowym) na różnych głębokościach w kolumnie,
- pomiary osiadań (uniesień) i ewentualnie bocznych przemieszczeń gruntu.

Przy wykonywaniu badań zaleca się korzystać z instrukcji badań podłoża gruntowego [7].

6.5. Monitorowanie robót

Monitorowanie powinno obejmować systematyczne pomiary, obserwacje oraz dokumentowanie wyników. W fazie badań podłoża i budowy należy założyć punkty monitorowania i rozpocząć pomiary, a w razie potrzeby obserwacje i systematyczne oceny należy kontynuować w czasie eksploatacji budowli.

W czasie robót należy realizować program monitorowania, obejmujący obserwacje i dokumentowanie dostosowane do specyfiki stosowanych zabiegów, np.:

- pomiary i rejestrację parametrów technologicznych podczas wykonywania elementów,
- pomiary położenia, wymiarów i właściwości tworzywa formowanych elementów, zmiany właściwości i wytrzymałości w czasie,
- przebieg osiadań oraz zmiany ciśnienia porowego i wytrzymałości gruntu podczas konsolidacji,
- inwentaryzację wykonanych konstrukcji w podłożu.

W fazie eksploatacji rodzaj i zakres obserwacji zależy od kategorii geotechnicznej obiektu oraz od przewidywanych lub zaobserwowanych problemów, związanych z zachowaniem podłoża budowli.

7. OBMIAR ROBÓT

7.1. Ogólne zasady obmiaru robót

Ogólne zasady obmiaru robót podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 7.

7.2. Jednostka obmiarowa

Jednostką obmiarową jest m² (metr kwadratowy) wykonanego wzmocnienia podłoża.

8. ODBIÓR ROBÓT

8.1. Ogólne zasady odbioru robót

Ogólne zasady odbioru robót podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 8.

Roboty uznaje się za wykonane zgodnie z dokumentacją projektową, SST i wymaganiami Inżyniera, jeżeli wszystkie pomiary i badania z zachowaniem tolerancji wg pkt 6 dały wyniki pozytywne.

8.2. Odbiór robót zanikających i ulegających zakryciu

Odbiorowi robót zanikających i ulegających zakryciu podlegają:

- wykonanie kolumn, bloków itp. wzmacniających podłoże,
- ew. profilowanie podłoża.

9. PODSTAWA PŁATNOŚCI

9.1. Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności

Ogólne ustalenia dotyczące podstawy płatności podano w SST D-M-00.00.00 „Wymagania ogólne” [1] pkt 9.

9.2. Cena jednostki obmiarowej

Cena wykonania 1 m² wzmocnienia podłoża gruntowego obejmuje:

- prace pomiarowe i roboty przygotowawcze,
- oznakowanie robót,
- dostarczenie materiałów i sprzętu,
- wykonanie wzmocnienia podłoża metodą formowania kolumn lub bloków wapiennych i cementowych z ew. zastosowaniem innych materiałów,
- ew. profilowanie i zagęszczenie powierzchni terenu,
- roboty wykończeniowe,
- przeprowadzenie pomiarów i badań wymaganych w niniejszej specyfikacji technicznej,
- odwiezienie sprzętu.

10. PRZEPISY ZWIĄZANE

10.1. Ogólne specyfikacje techniczne (SST)

- | | | |
|----|---------------------|---|
| 1. | D-M-00.00.00 | Wymagania ogólne |
| 2. | D-01.00.00 | Roboty przygotowawcze |
| 3. | D-02.00.00 | Roboty ziemne |
| 4. | D-02.03.01c | Wzmocnienie geosyntetykiem podłoża nasypu na gruncie słabonośnym |
| 5. | D-04.05.00÷04.05.04 | Podbudowy i ulepszone podłoża z gruntów lub kruszyw stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi |

10.2. Inne dokumenty

6. Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, GDDP - IBDiM, Warszawa, 2002
7. Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych, GDDP - IBDiM, Warszawa 1998

ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK 1

ZASADY WZMOCNIENIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO PRZEZ MIESZANIE WGLĘBNE GRUNTU I FORMOWANIE KOLUMN LUB BLOKÓW WAPIENNYCH I CEMENTOWYCH (wg [6])

1.1. Zastosowanie

Mieszanie wglębne (ang. *deep soil mixing*) jest metodą formowania w podłożu kolumn (zwanych także „słupami”) lub ich układów, albo masywnych bloków, utworzonych z miejscowego gruntu mieszanego ze spoiwem: najczęściej z wapnem i/lub cementem, niekiedy z mieszanką cementowo-piaskową. Metoda ta jest wykorzystywana do wzmocnienia grubych warstw słabych gruntów spoistych, namulów i torfów, które trudno byłoby wymienić albo wzmocnić innymi metodami.

Celem zabiegu jest poprawa właściwości podłoża, głównie mechanicznych. Kolumny ze spoiwem wapiennym mają w pewnych gruntach dużą wodoprzepuszczalność, dzięki czemu spełniają zarazem rolę drenów przyspieszających konsolidację podłoża. Zaletą metody jest szybkie uzyskiwanie przejezdności drogi w trudnych warunkach podłoża dzięki możliwości obciążenia kolumn nasypem już w ciągu paru tygodni po ich wykonaniu. Natomiast formowane kolumny nie są sztywnymi elementami konstrukcyjnymi, jak pale.

Często też celowo są wykonywane jako dość podatne, co zapewnia włączenie do współdziałania z nimi otaczającego gruntu.

W zależności od warunków podłoża mieszanie węgłbne jest wykorzystywane do celów:

- wzmocnienia podłoża: pojedyncze kolumny lub rzędy kolumn używane są do wzmocnienia dużych masywów ściśliwego gruntu w celu zwiększenia nośności i poprawy stateczności oraz ograniczenia osiadań pod obciążeniem, np. pod nasypami drogowymi lub kolejowymi, dojazdami do mostów;
- stabilizacji podłoża: stabilizacja blokowa dużych objętości gruntu w celu uzyskania ich jednorodnej wytrzymałości, w związku z głębokimi wykopami lub fundamentami budowli.

Poza tym, mieszanie węgłbne można stosować do:

- formowania przegród przeciwnapływowej: ściany z przecinających się kolumn służą do zapobiegania filtracji wody przez albo pod obwałowaniami oraz do przeciwdziałania napływowi wody do głębokich wykopów poniżej wody gruntowej;
- formowania w bardzo słabym gruncie koryt dla przepustów, przewodów lub rurociągów;
- zapobiegania upłynnieniu luźnych gruntów piaszczystych: konstrukcje skrzyniowe lub komorowe z przecinających się kolumn pod wysokimi nasypami lub budowlami zapobiegają upłynnieniu się i wypieraniu gruntu podłoża, spowodowanemu np. przez wstrząsy sejsmiczne lub wybuchy.

Przydatność tej metody jest ograniczona, jeżeli występują w gruncie przeszkody utrudniające mieszanie, grunt ma niekorzystne właściwości chemiczne itp., okresowo wzrasta zasadowość (wskaźnik pH) gruntu.

1.2. Badania terenowe i projektowanie

Opracowanie dokumentacji projektowej wymaga ustalenia grubości i składu granulometrycznego słabych warstw wymagających wzmocnienia, oceny ich właściwości geotechnicznych oraz rozpoznania poziomu stropu podłoża nośnego. Szczególną uwagę należy zwrócić na zawartość części organicznych w gruncie, konsystencję gruntów spoistych, wytrzymałość na ścinanie i ściśliwość, zanieczyszczenia chemiczne gruntu (szczególnie związkami siarki) i agresywność wód gruntowych.

W badaniach terenowych pobiera się nienaruszone próbki wzmocnianego gruntu, wyznacza wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu τ_r i wrażliwość gruntu (sondą obrotową) oraz moduł odkształcalności E_0 (np. świdrem talerzowym). Do szybkiego głębokiego rozpoznania zalecana jest sonda wciskana (CPT), która pozwala oszacować wytrzymałość i odkształcalność gruntu.

W każdym przypadku należy wykonać wstępne badania mieszanki, aby określić ilość spoiwa potrzebną w występujących gruntach. Można to wykonać na próbnym mieszankach w laboratorium lub wykonując kolumny próbne na obiekcie. W przypadku gruntów o dużej zawartości części organicznych, należy sprawdzić możliwość uzyskania wymaganej wytrzymałości, przepuszczalności i długotrwałej stateczności.

Dokumentacja projektowa powinna zawierać: wymagane parametry mechaniczne (wytrzymałość, odkształcalność) tworzywa kolumn i dotyczące wodoszczelności konstrukcji (jeśli potrzebne), tolerancje wykonawcze kolumn i konstrukcji (długości, pochyleń, usytuowania). Sposób formowania kolumn należy dostosować do właściwości występujących gruntów.

1.3. Opis metody

1.3.1. Proces tworzenia kolumn

Istotą procesu jest odspajanie gruntu i jego mieszanie oraz częściowa wymiana ze spoiwem (najczęściej z wapnem i/lub cementem) w postaci suchej lub mokrej. W wyniku powstaje mieszanka gruntu i spoiwa. Mieszanie jest wykonywane mechanicznie, z użyciem urządzeń z pojedynczym lub z kilkoma mieszadłami obrotowymi, do głębokości co najmniej 3 m (pionowo lub ukośnie). Metodę można stosować w gruntach rodzimych i w

nasypach. W składowiskach odpadów, osadnikach szlamowych itp., służy ona dodatkowo do „unieruchomienia” składników mogących powodować skażenie wód gruntowych. Kształt i układ formowanych elementów zależy od rodzaju, liczby i rozmieszczenia mieszadeł maszyny. Elementy mają postać pojedynczych kolumn, ścian, rusztów, bloków lub kombinacji pojedynczych kolumn, stycznych lub przecinających się (rys. 1.1). Średnica kolumn wynosi od 0,4 do 1 m, długość zwykle do 10 m, ale osiąga 20 m i więcej.

Kolumny są zwykle rozmieszczane w siatce 1 x 1 m do 2 x 2 m, albo w rzędach (kolumny styczne lub wcięte jedna w drugą). Jeżeli kolumny podlegają regularnie zamarzaniu i rozmarzaniu, to mogą one być wykorzystywane w ograniczonym czasie, najwyżej do 2 lat.

Cienkie „minipale” o średnicy do 200 mm, formowane są przez mieszanie słabego gruntu podłoża z mieszanką piaskowo-cementową lub piaskowo-wapienną, wprowadzaną świdrem ślimakowym. Mają one długość od 3 do 10-12 m, rozmieszczane w liczbie 1 do 2 na m². Do wzmocniania słabych gruntów stosowane są też kolumny o średnicy 400-600 mm, formowane świdrem ciągłym.

1.3.2. Stabilizacja blokowa

Stabilizacja blokowa (rys. 1.2) stosowana jest najczęściej w niezbyt grubych warstwach (zwykle 2 do 5 m) bardzo słabych gruntów organicznych (torfów, namulów) i miękkoplastycznych ilów. Na powierzchni układane jest zbrojenie z geosyntetyków, a na nim warstwa gruntu lub kruszywa (zwykle około 1 m), umożliwiająca wjazd maszyn. Mieszadło na koparce gąsienicowej miesza grunt podłoża ze spoiwem sekcjami po 3 do 5 m.

1.3.3. Mieszanie gruntu ze spoiwem na sucho

W metodzie mieszania na sucho stosuje się:

- cement,
- wapno,
- gips, popioły lotne, żuźle wielkopieczowe,
- bentonit.

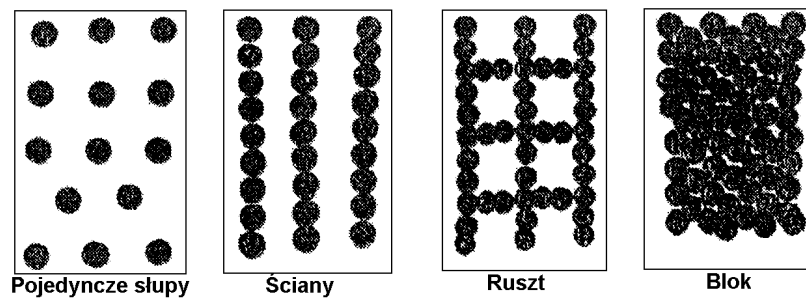
Skład mieszanki dobierany jest odpowiednio do właściwości gruntu i celu stabilizacji. Zwykle stosuje się mieszanki wapna, cementu i dodatków. Wprowadzane w grunt sproszkowane spoiwo, zwłaszcza wapno, pochłania wodę z gruntu, osuszając go i poprawiając jego właściwości. Dodatek cementu zwiększa wytrzymałość materiału kolumn oraz przyspiesza jego twardnienie. Wapno wchodzi w związki z minerałami ilastymi, co prowadzi do długotrwałego wzrostu wytrzymałości gruntu wokół kolumn. Wytrzymałość na ścinanie stabilizowanego gruntu wzrasta od 10 do 40 razy, zwykle do 100-150 kPa.

Kolumny, szczególnie wapienne, mają w niektórych gruntach spoistych specyficzną porowatą strukturę. Powoduje ona, że wodoprzepuszczalność kolumn jest często nawet 100-1000 razy większa od przepuszczalności wzmocnianego gruntu spoistego. Dzięki temu kolumny spełniają zarazem rolę drenów, umożliwiając szybszą konsolidację podłoża. Proces ten jest często przyspieszany przez przeciążenie dodatkowym nadkładem gruntu, co eliminuje późniejsze długotrwałe deformacje budowli.

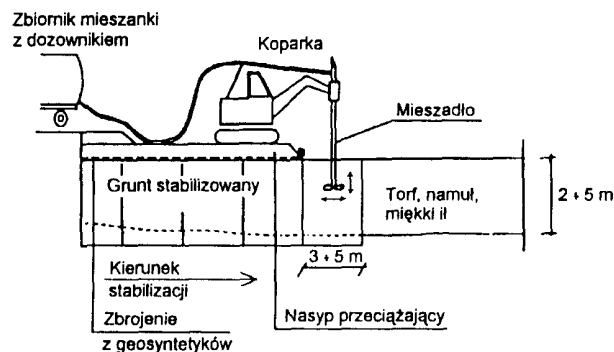
1.3.4. Mieszanie gruntu ze spoiwem na mokro

Do mieszania na mokro stosuje się zwykle mieszankę z cementu i wody. Mogą być dodawane popioły lotne lub żuźle wielkopieczowe oraz inne dodatki lub wypełniacze. Wskaźnik w/c (wagowo) powinien wynosić w zastosowaniach konstrukcyjnych od 0,4 do 0,7, w przegrodach przeciwfiltracyjnych od 1 do 2, z dużym dodatkiem wypełniacza. W przypadku użycia dodatku bentonitu mieszanina wodno-bentonitowa powinna być przygotowana przed dodaniem cementu lub innego spoiwa. Jako spoiwo jest zwykle stosowany cement, żuźle wielkopieczowe i/lub popioły lotne. W celu uzyskania

równomiernej wytrzymałości kolumny może być konieczne zwiększenie ilości spoiwa w warstwach gruntów organicznych i spoistych, w stosunku do potrzebnej w piaskach. Wytrzymałość na ściskanie kolumn cementowo-wapiennych osiąga 3 do 6 MPa, zależnie od właściwości gruntu oraz rodzaju i ilości użytego spoiwa. Szczególnie dużą wytrzymałość uzyskują kolumny formowane z użyciem mieszanki cementu i granulowanego żużla wielkopieczowego. W gruntach organicznych wytrzymałość jest znacznie mniejsza. W świeżej kolumnie może być osadzane zbrojenie (stalowe pręty, szkielety lub kształtowniki). Otulenie ich powinno zostać zapewnione przez użycie odpowiednich elementów dystansowych. Materiał kolumn grunto-cementowych ma małą wodoprzepuszczalność.



Rys. 1.1. Przykłady układów kolumn: pojedynczych oraz ścian, rusztu i bloku z kolumn stykających lub przecinających się



Rys. 1.2. Przykład stabilizacji blokowej spoiwem całej objętości gruntu

ZAŁĄCZNIK 2

PRZYKŁAD WYKONANIA KOLUMN CEMENTOWO-WAPIENNYCH

(wg artykułu A. Jarominiaka, L. Bichajły, L. Folta i K. Trojnara pt.
„Odbudowa drogi krajowej nr 4 na odcinku ul. Krakowskiej w Przemysłu,
zniszczonym wskutek osuwiska”, Drogownictwo nr 9 z 1999 r.)

2.1. Sposób tworzenia kolumn

Do osuszenia i wzmocnienia nasypu drogowego poniżej poziomu jego rozbiórki, a także podłoża nasypu, używa się kolumny cementowo-wapienne. Powodują one lokalnie wgłębna stabilizację słabych gruntów spoistych, namulów i gruntów organicznych. W rezultacie uzyskuje się w krótkim czasie w miejscach kolumn polepszenie właściwości wytrzymałościowych gruntów, w tym modułów odkształceń. Między kolumnami cechy słabych gruntów pozostają przez długi czas niezmienione. Grunty są stabilizowane suchą mieszanką cementu portlandzkiego i drobno zmielonego wapna palonego, samym cementem lub samym wapnem. Między wapnem i gruntem następują trzy reakcje:

- 1) wapno palone reaguje z wodą zawartą w gruncie stając się wapnem gaszonym. Reakcja ta jest egzotermiczna, przez co następuje zmniejszenie wilgotności gruntu, po pewnym czasie również znajdującego się między kolumnami. Wapno gaszone zwiększa wartość pH w gruncie. Cząstki wapna przemieszczają się w pory gruntu otaczające kolumny. Gaszenie wapna jest szybkim procesem - w ciągu pierwszych 5÷10 minut 100 g wapna palonego wiąże około 32 g H₂O;
- 2) następuje wymiana jonów w strukturze gruntu. Jony K⁺ i Na⁺ cząstek gruntu są wymieniane na jony Ca²⁺, wskutek czego struktura gruntu zmienia się na gruzelkową (występuje skłaczowanie). Wymiana jonowa i zmiana struktury gruntu zaczynają się natychmiast po wprowadzeniu wapna i kończą się zwykle w ciągu jednej doby (oprócz wymiany jonów, która może trwać wiele miesięcy);
- 3) wskutek reakcji pucolanowej tworzy się spoiwo podobne do cementowego. Większość gruntów zawiera wolną krzemionkę oraz krzemiany i gliniany, które reagują z wapnem, tworząc spoiwo. Reakcje te ułatwia zwiększone pH w wyniku reakcji (1). Trwają one kilka lat.

Generalnie, produktem reakcji wapna palonego (CaO) z wodą jest wodorotlenek wapnia Ca(OH)₂. Natomiast w przypadku hydratacji cementu z udziałem tlenku wapnia powstaje żel wapniowo-krzemowy zawierający CaO · SiO₂ · H₂O oraz Ca(OH)₂. Pierwszy składnik jest zhydratyzowanym cementem, drugi - wapnem gaszonym, reagującym z minerałami gruntu. Zatem oba składniki stanowią spoiwo. Korzystnym dla hydratacji cementu działaniem wapna jest zwiększenie temperatury gruntu do 40÷50°C, gdy w przypadku hydratacji samego cementu temperatura wzrasta jedynie o około 10°C - przy średniej rocznej temperaturze gruntu rzędu 8°C. Znaczny wzrost temperatury zwiększa reaktywność cementu w pierwszym okresie jego wiązania.

Procentowy udział cementu i wapna w mieszance stabilizującej przyjmuje się w zależności od cech wzmacnianego gruntu. Chociaż przy dużej dozie cementu osiągnięcie wyższej wytrzymałości materiału kolumn jest w pełni możliwe, to jednak zaleca się ograniczenie jej do 150÷250 kPa, by nie tworzyć w gruncie „sztywnych kołków” (tzw. „efektu pikowanej kołdry”).

Generalną ideą metody jest utworzenie przez kolumny, wraz z otaczającym je wzmocnionym gruntem masywu o zwiększonej sztywności. Głównym celem jest polepszenie cech wytrzymałościowych tego masywu: zwiększenie jego wytrzymałości na ścinanie, zmniejszenie wilgotności i zwiększenie modułu odkształceń. Wskutek polepszenia tych cech uzyskuje się mniejsze deformacje masywu gruntowego oraz mniej zróżnicowane i mniejsze osiadania pod obciążeniami.

Grunt zmieszany w kolumnie z wapnem i cementem nie jest materiałem jednorodnym. W czasie mieszania tworzą się zestabilizowane bryły. Wytrzymałości na ścinanie połączeń między nimi są mniejsze niż wytrzymałość wewnątrz brył.

Nieregularna struktura kolumn powoduje, że działają one jak dreny pionowe, przyspieszając konsolidację otaczającego je gruntu.

2.2. Palownica do wykonania kolumn

Kolumny wykonuje się specjalną palownicą wyposażoną w teleskopową żerdź rurową oraz w zbiorniki wapna i cementu. Palownica wkręca żerdź zakończoną specjalnym wiertłem-mieszadłem do projektowego poziomu stopy kolumny. Powoduje to mieszanie gruntu w zasięgu działania wiertła. Następnie żerdź, obracaną w przeciwnym kierunku, wyciąga się z gruntu, z równoczesnym tłoczeniem przez nią sprężonym powietrzem mieszanki stabilizującej. Mieszanka jest wydmuchiwana z żerdzi w grunt przez otwór nad mieszadłem. Postęp wyciągania żerdzi wynosi 15-20 mm/obrót. Tłoczenie mieszanki jest zatrzymywane 50 cm poniżej powierzchni nasypu. Prędkością podnoszenia żerdzi, ilością mieszanki wapna z cementem włączanej na 1 m kolumny oraz ciśnieniem włączania steruje mikrokomputer zainstalowany w kabinie operatora palownicy.

2.3. Dane dotyczące wykonania kolumn w przykładzie podanym w artykule

W celu stabilizacji zagrożonej części nasypu wykonano kolumny o nominalnej średnicy 50 cm, rozmieszczone w rzędach rozstawionych osiowo 1,25 m z lewej strony osi drogi oraz 2,5 m z prawej strony osi drogi. Rozstaw osiowy kolumn w rzędach przyjęto stały, wynoszący 2,5 m.

Na 1 m kolumny włączano 60 kg mieszanki cementowo-wapiennej o proporcji składników: 30% wapna palonego, drobno mielonego i 70% cementu portlandzkiego marki „350”.

Zastosowano kolumny o długościach od 5 do 12 m. Kolumny zagłębiano co najmniej 1 m w warstwę nośną podłoża - poniżej potencjalnej powierzchni poślizgu. Szybkość formowania kolumn była bardzo duża - wykonanie 12-metrowej kolumny trwało zaledwie kilka minut.

Zastosowanie kolumn cementowo-wapiennych do stabilizacji nasypu skutecznie poprawiło wytrzymałość nasypu na ścinanie w przekrojach kolumn przecinających potencjalną powierzchnię poślizgu. Jednocześnie działanie drenujące kolumn zredukowało możliwość lokalnego zwiększenia się ciśnienia porowego w gruncie i przez to zmniejszyło niebezpieczeństwo powstania w nim poślizgu.

Efektywność wzmocnienia nasypu została potwierdzona przez porównanie wyników sondowań statycznych przeprowadzonych przed wykonaniem kolumn z wynikami sondowań wykonanych po wykonaniu kolumn. Analiza wyników sondowań wykazała, że:

- opory sondowań w kolumnach są nieporównywalnie większe niż sondowań w gruncie przed wykonaniem kolumn;
- w miarę oddalania się od kolumny opory sondowań maleją i stają się coraz bliższe oporom uzyskanym w gruncie niestabilizowanym.

Ponadto przeprowadzono badania wytrzymałości materiału kolumn na ściskanie. Trzy próbki pobrane z kolumn zbadano po 8 dniach - ich wytrzymałość wynosiła od 2,41 do 2,96 MPa. Dwie próbki zbadano po 28 dniach - miały wytrzymałość 4,2 i 4,3 MPa. Świadczy to o zwiększaniu się efektu wzmocnienia z upływem czasu.

ZAŁĄCZNIK 3

WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO TECHNOLOGIĄ MIP

(wg materiałów firmy BAUER Spezialtiefbau Polska Sp. z o.o.,
ul. Jesionowa 31b, 25-540 Kielce)

3.1. Technologia MIP

Technologia MIP (Mixed-in-Place) dotyczy wgłębego mieszania, wiertnicą z potrójnym świdrem, gruntu oraz doprowadzaniem do niego w trakcie procesu wiertniczego mieszanki wiążącej np. zaczynu cementowego lub cementowo-bentonitowego) aż do uzyskania w podłożu po stwardnieniu trzech kolumn gruntocementowych. Metodą tą można wykonywać fundamentowanie, wzmocnienie podłoża gruntowego, ściany oporowe, pionowe przesłony filtracyjne, zabezpieczenie wykopów itp.

Technologia MIP jest opatentowana od 1992 r. i posiada aprobatę Instytutu Techniki Budowlanej w Berlinie od 2002 r.

Technologię MIP można stosować w gruntach niespoistych, także z przewarstwieniami z namulów i torfów, przy głębokościach odwiertów do 25 m. Technologia nie ma zastosowania w terenach skalistych i przy występowaniu gładzów. Zaletą jest powstawanie minimalnych drgań podczas prac wiertniczych.

3.2. Sprzęt

Przy pracach technologią MIP stosuje się:

- a) gąsienicowe urządzenie wiertnicze (rys. 3.1), na którego prowadnicy umieszczone są, przymocowane obok siebie, trzy świdry ciągłe (rys. 3.2) o średnicy 370 mm, 550 mm lub 880 mm,
- b) stację mieszania (rys. 3.3), której zadaniem jest przepompowanie do wiertnicy mieszanki wiążącej grunt (np. zaczynu cementowego) po odpowiednim jej wymieszaniu i przygotowaniu.

3.3. Materiały

W zależności od rodzaju robót i gruntów stosuje się różne rodzaje mieszanek wiążących z odpowiednio dobranymi recepturami. W skład mieszanek wiążących zwykle wchodzi: cement, bentonit, woda oraz - w zależności od potrzeb - dodatkowe substancje zmieniające właściwości mieszanki.

Zwykle uzyskuje się następujące parametry mieszanek wiążących grunt, przy wykonywaniu:

- a) ściany oporowej - wytrzymałość na ściskanie 5÷15 MPa
- b) stabilizacji podłoża - wytrzymałość na ściskanie > 1,0 MPa
- współczynnik filtracji < 1×10^{-8} m/s (> 1×10^{-10} m/s).

3.4. Przebieg prac

Potrójny świder zostaje wkręcany w podłoże z równoczesnym doprowadzaniem mieszanki wiążącej, np. zaczynu cementowego lub cementowo-bentonitowego. Po osiągnięciu założonej w projekcie głębokości doprowadza się do wymieszania gruntu

podłoża z mieszanką poprzez obustronny ruch rotacyjny pojedynczych świrdrów przy jednoczesnym unoszeniu i zagłębianiu prowadnicy wraz ze świrdrami. Po stwardnieniu materiału podłoża powstają trzy obok siebie położone kolumny gruntocementowe o średnicy zależnej od wielkości świrdrów (np. 370 mm).

W zależności od rodzaju robót lokalizacja potrójnych kolumn może mieć charakter rozproszony, może tworzyć ściany i inne formy, zbliżone do układów kolumn przedstawionych na rysunku 1.1.

Zaletą trójkolumnowej technologii robót jest możliwość uzyskania bardzo szczelnej i jednolitej ściany oporowej skonstruowanej z jednego rzędu kolumn, w którym grunt został przemieszany dwukrotnie. Schemat robót przy takiej ścianie obejmuje wykonanie (rys. 3.4):

1. pierwszych dwóch odcinków trójkolumnowych ściany, oddalonych od siebie,
2. środkowego brakującego odcinka kolejnymi trzema kolumnami,
3. dodatkowych trzech kolumn, wiążących odcinek środkowy i lewostronny,
4. dodatkowych trzech kolumn, wiążących odcinek środkowy i prawostronny,
5. nowego odcinka trójkolumnowego, oddalonego od poprzedniego odcinka ściany.

Efektom takiego wykonania jest ciągła ściana oporowa, bez spoin, z równomiernie wymieszanym gruntem we wszystkich elementach.

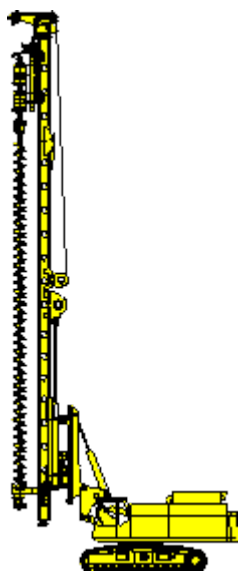
Konstrukcje liniowe z kolumn, w miarę potrzeby, można wzmocnić, wprowadzając w środek kolumn lub poza linię ściany dodatkowe elementy nośne, jak profile stalowe lub pale żelbetowe. Istnieje też możliwość zastosowania siatki zbrojeniowej, gwoździowania lub zakotwienia..

3.5. Kontrola jakości

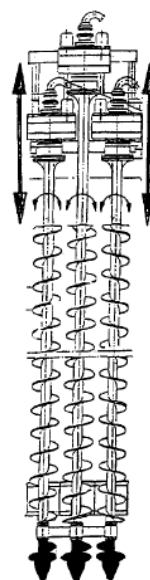
Przed rozpoczęciem robót przeprowadza się badania laboratoryjne gruntu podłoża i wody gruntowej oraz określa się skład mieszanki wiążącej grunt i jej ilości do wprowadzenia w zależności od warunków gruntowych.

W czasie robót prowadzi się obserwacje:

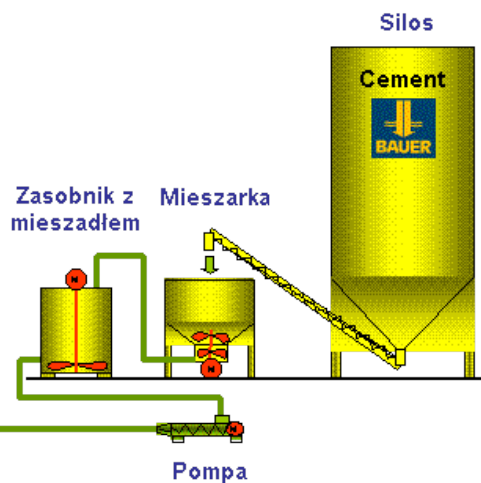
- składu i gęstości mieszanki wiążącej grunt (np. zaczynu cementowego),
- ilości pompowanej mieszanki,
- czasu wwiercania i podciągania świrdrów,
- liczby obrotów silników napędzających świrdry,
- przebiegu pracy świrdrów,
- daty i czasu wykonania pojedynczych odcinków trójkolumnowych,
- pionowego przebiegu prac.



Rys. 3.1. Widok z boku gąsienicowego urządzenia wiertniczego



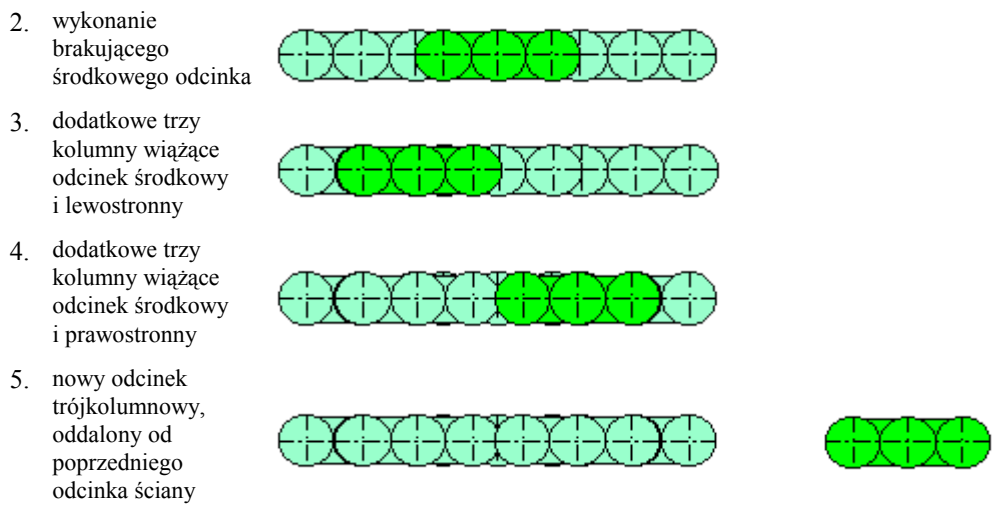
Rys. 3.2. Widok (od czola) potrójnego świda wiertnicy



Rys. 3.3. Stacja mieszania, doprowadzająca do wiertnicy mieszanek wiążącą grunt (zaczyn cementowy)

1. pierwsze dwa odcinki trójkolumnowe, oddalone od siebie





Rys. 3.4. Kolejne etapy wykonania przeszłony/ściany oporowej trójkolumnową technologią Mixed in Place