

Osiadanie podłoża gruntowego wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi

Prof. zw. dr hab. inż. Eugeniusz Dembicki – Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Mgr inż. Michel Wojnarowicz – Sepia G.C. Paris, mgr inż. Grzegorz Augustyniak – Gdańsk

Kontrola osiadania gruntów wzmocnianych wierconymi kolumnami żwirowymi opiera się na dwuetapowym podejściu do zagadnienia osiadania [2, 5, 8]. Budowa elementów wierconych kolumn żwirowych tworzy sztywniejszą strefę ze zmniejszoną ścisłością, redukując osiadanie nasypów i budowli związanych z transportem. Osiadanie poniżej strefy wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi wyznacza się tradycyjnym podejściem geotechnicznym.

Całkowite osiadania s_{calc} budowli stanowi sumę osiadania strefy górnej s_{uz} oraz strefy poniżej wzmocnionego obszaru s_{tz} :

$$s_{calc} = s_{uz} + s_{tz} \quad (1)$$

OSIADANIE W STREFIE WZMOCNIONEJ

Osiadanie w strefie wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi (górna strefa) określa się w funkcji naprężenia w górnej części kolumn żwirowych q_g wyznaczonego z równania:

$$q_g = q \cdot \frac{n_g}{n_g R_a - R_a + 1} \quad (2)$$

gdzie:

q – średni nacisk na podłoże,

R_a – stosunek przekroju poprzecznego obszaru pokrytego elementami wierconej kolumny żwirowej do przekroju gruntu rodzimego,

n_g – wskaźnik koncentracji naprężenia między elementami wierconej kolumny żwirowej a gruntem rodzimym.

Pomierzona i przyjęta wartość wskaźnika koncentracji dla fundamentów sztywnych wynosi od 4 do 45. W przypadku fundamentów wiotkich wskaźnik koncentracji naprężenia może być mniejszy niż zaobserwowany przy fundamentach sztywnych; należy dobierać go z dużą ostrożnością.

Osiadanie strefy wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi określone jest wzorem:

$$s_{uz} = \frac{q_g}{k_g} \quad (3)$$

gdzie:

q_g – naprężenie w górnej części wierconej kolumny żwirowej,

k_g – moduł sztywności (sprężystości) wierconej kolumny żwirowej.

W obliczeniu osiadania górnej strefy uwzględniono odkształcenie wierconych kolumn żwirowych, bez uwzględnienia gruntu pomiędzy kolumnami, a uzyskane wyniki pomiarów wskazują jedynie niewielkie nierównomierne osiadanie pomiędzy górną częścią wierconych kolumn żwirowych a gruntem rodzimym. W nasypach o dużej wysokości wpływ na powierzchniowe osiadanie podłoża jest mniejszy. Wynika to z powstania w płaszczyźnie styku gruntu macierzystego z nasypem przesklepienia w nasypie spowodowanego sztywnością wierconych kolumn żwirowych.

OSIADANIE PODŁOŻA PONIŻEJ STREFY WZMOCNIONEJ WIERCONYMI KOLUMNAMI ŻWIROWYMI

Osiadanie poniżej strefy wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi określa się na podstawie analizy osiadań sprężystych (4) lub osiadań konsolidacyjnych (5) tej strefy:

$$s_{tz} = \frac{\Delta q \cdot H}{E} \quad (4)$$

lub

$$s_{tz} = c_c \left(\frac{1}{1 + e_o} \right) \cdot H + \log \left(\frac{p_o + \Delta H}{p_o} \right) \quad (5)$$

gdzie:

H – miąższość dolnej warstwy (poniżej wierconych kolumn żwirowych),

E – moduł odkształcenia gruntu rodzimego strefy dolnej,

c_c – wskaźnik ścisłości gruntu rodzimego,

e_o – wskaźnik porowatości gruntu rodzimego,

p_o – składowa pionowa naprężenia efektywnego w środku warstwy ścisłej,

Δq – średni nacisk wywierany przez budowlę lub nasyp.

Średni nacisk jest iloczynem wywieranego nacisku i współczynnika oddziaływania naprężenia I_6 . Współczynnik oddziaływania naprężenia wewnątrz dolnej strefy, ze względu na dużą szerokość konstrukcji, przyjmuje się równy 1.

W gruntach ziarnistych oraz pęczniejących prekonsolidowanych gruntach spoistych do obliczeń osiadania przyjmuje się moduł odkształcenia. Wartość modułu odkształcenia gruntu rodzimego może być wyznaczona z korelacji badań sondowania sondą SPT, badań wytrzymałości na ścinanie bez odpływu, badań sondowania CPT lub innych badań *in situ*.

PRĘDKOŚĆ OSIADAŃ

Wartość osiadań po zakończeniu budowy może być zredukowana poprzez użycie wierconych kolumn żwirowych zbudowanych z kruszywa spełniającego funkcję drenów pionowych. Obliczenie radialnego drenażu służyć może do określenia poziomu rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach. Wartość rozproszenia ciśnienia wody w porach występująca w okresie budowy służyć może do określenia osiadań występujących po ukończeniu budowy.

PRĘDKOŚĆ OSIADANIA W STREFIE WZMOCNIONEJ WIERCONYMI KOLUMNAMI ŻWIROWYMI

Radialny drenaż wierconych kolumn żwirowych można wyznaczyć metodą Barrona. Określa się tu czas osiadania t w zależności od czynnika czasu T współczynnika radialnej konsolidacji c_r i kwadratu efektywnej długości drenażu d_e według wzoru:

$$t = \frac{T_r \cdot d_e^2}{c_r} \quad (6)$$

Czynnik czasu oblicza się z wyznaczenia stosunku średnicy n będącej stosunkiem efektywnej skonstruowanej średnicy drenu do średnicy zainstalowanego drenu d_w . Efektywne średnice drenu wyznaczone na podstawie geometrii elementów umieszczonych w trójkątnych i kwadratowych siatkach określa się z zależności:

- siatka trójkątna

$$d_e = 1,05 s \quad (7)$$

- siatka kwadratowa

$$d_e = 1,13 s \quad (8)$$

gdzie:

s – osiowe rozmieszczenie elementów.

Wartość współczynnika konsolidacji radialnej przyjmuje się na ogół między dwu- i czterokrotną wartością współczynnika konsolidacji pionowej c_v . W poziomo uwarstwionych gruntach stosunek ten może być znacznie większy. Wartości współczynnika konsolidacji pionowej zależą od wielu czynników, m.in. od składu mineralogicznego, historii naprężenia i innych gruntu rodzimego.

W gruntach spoistych wartości te wyznacza się z badań konsolidacji lub określa się z wartości granicy płynności i historii naprężenia.

Przy danej wartości n i pożądanym procencie rozproszenia ciśnienia wody w porach U wartość czynnika czasu można wyznaczyć z nomogramu podanego na rys. 1.

Czynnik czasowy T_r w połączeniu z długością drogi drenażu d_e stosuje się do oszacowania czasu drenażu t podanego równaniem (6).

W analizach przygotowanych przez Han i Ye [4] opisuje się modyfikację podejścia drenażu radialnego, w których wyjaśnia

się koncentrację naprężenia w sztywnych wierconych kolumnach żwirowych. Koncentracja naprężenia powoduje redukcję wartości naprężenia w gruncie rodzimym i przyczynia się do przyspieszenia osiadań oraz wywołuje wzrost wartości współczynnika konsolidacji radialnej.

Współczynnik konsolidacji radialnej

Współczynnik konsolidacji radialnej skorygowany przez Hana i Ye ma postać:

$$c'_r = c_r \cdot \left[1 + n_s \cdot \left(\frac{1}{n^2 - 1} \right) \right] \quad (9)$$

gdzie:

n_s – stosunek koncentracji naprężenia.

Zmodyfikowany współczynnik konsolidacji radialnej (9) służy do określenia procentu nadmiaru ciśnienia rozproszenia wody w porach przy danym okresie czasu konsolidacji T_r .

Prędkość osiadania poniżej strefy wzmocnionej wierconymi palami żwirowymi

Czas prędkości osiadania poniżej strefy wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi można wyznaczyć z wzoru:

$$t = \frac{T_v \cdot (H_{dr})^2}{c_v} \quad (10)$$

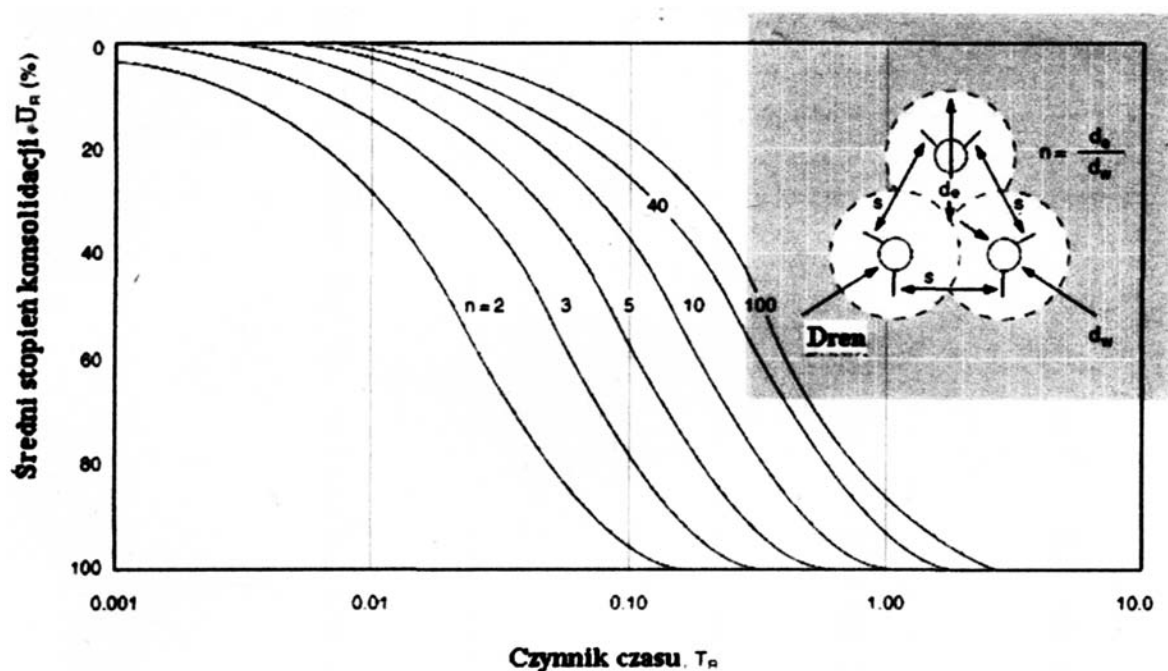
gdzie:

t – czas drenażu,

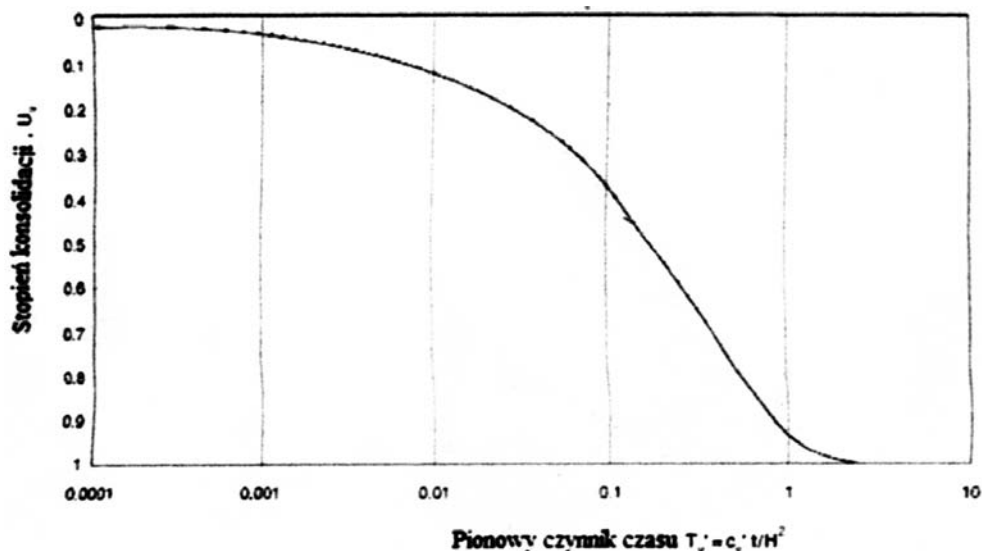
c_v – współczynnik konsolidacji pionowej,

H_{dr} – długość pionowej drogi drenażu,

T_v – pionowy czynnik czasu wyznaczony z rys. 2.



Rys. 1. Stopień konsolidacji drenażu radialnego [7]



Rys. 2. Stopień konsolidacji drenażu pionowego [4]

Przykład obliczeniowy

Przykładowe obliczenia osiadania wykonano do nasypu o wysokości 6,10 m posadowionego na warstwie miękkiej gliny o miąższości 4,5 m podścielonej podłożem skalnym (rys. 3).

Warunki geometryczne nasypu i podłoża i ich parametry gruntowe podano na rys. 3.

Określenie osiadań warstwy miękkiej gliny.

$$p_o = z (\gamma_{sat} - \gamma_w) = 2,25 \cdot (18,84 - 9,81) = 20,34 \text{ kN/m}^2$$

$$q = \gamma H = 19,63 \cdot 6,1 = 120 \text{ kN/m}^2$$

Współczynnik oddziaływania obciążenia przy obciążeniu powierzchniowym: $I_6 = 1,0$

Moduł E sprężystości gruntu rodzimego

$$E_r = \frac{(I_6 q)}{c_c \log \left[\frac{p_o + I_6 q}{p_o} \right]} = \frac{1,0 \cdot 120}{0,15 \log \left[\frac{20,34 + 1,0 \cdot 120}{20,34} \right]} = 955 \text{ kPa}$$

$$s_{niewzm} = \frac{I_6 q H}{E_v} = \frac{1,0 \cdot 120 \cdot 4,5}{955} = 0,56 \text{ m}$$

Osiadanie po 90 dniach (po zakończeniu budowy nasypu)

Czynnik czasowy osiadania

$$T_{90} = \frac{T_{90} (H_{dr})^2}{c_v} = \frac{0,848 \cdot 2,25^2}{0,0093} = 462 \text{ dni}$$

Osiadanie po okresie 90 dni

$$T_{90} = \frac{t c_v}{(H_{dr})^2} = \frac{90 \cdot 0,0093}{2,25^2} = 0,16$$

Dla $T = 0,16$ stopień konsolidacji U wynosi 45%.

Osiadanie końcowe po 90 dniach:

$$(1 - U\%) \cdot s = (1 - 0,45) \cdot 0,56 = 0,31 \text{ m}$$

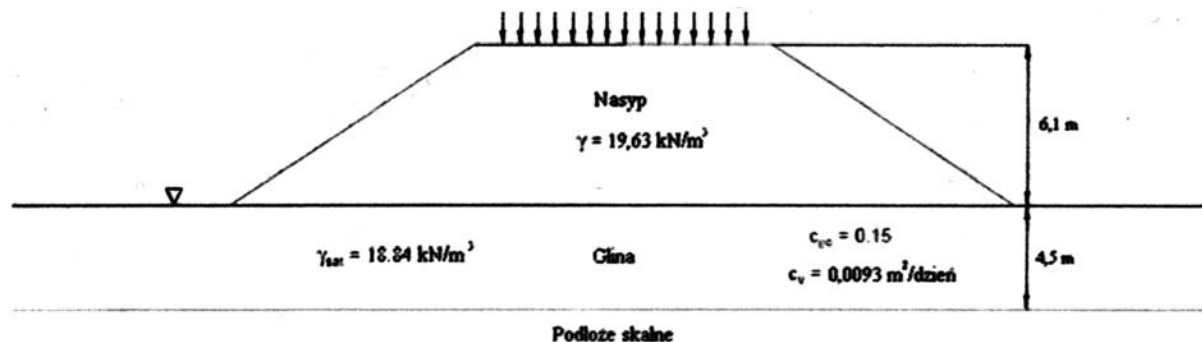
Schemat do obliczeń osiadania miękkiej gliny wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi podano na rys. 4.

Wartość osiadania

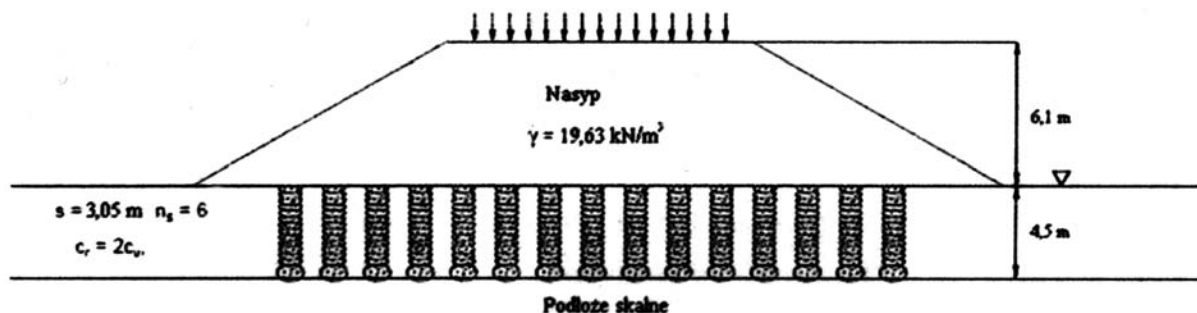
$$R_a = \frac{A_g}{A} = \frac{0,55}{3,05^2} = 0,0594$$

$$q = \gamma H = 19,63 \cdot 6,1 = 120 \text{ kN/m}^2$$

$$q_g = \left[\frac{n_g}{n_s R_a - R_a + 1} \right] = 120 \left[\frac{6}{6 \cdot 0,0594 - 0,0594 + 1} \right] = 555 \text{ kN/m}^2$$



Rys. 3. Konstrukcja i parametry nasypu i gruntu wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi



Rys.4. Konstrukcja parametry gruntu wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi

$$s_{uz} = \frac{q_g}{k_g} = \frac{555}{17400} = 0,032 \text{ m}$$

Czynnik czasowy osiadania:

$$\eta = \frac{d_e}{d_w} = \frac{1,13}{d_w} = \frac{1,13 \cdot 3,05}{0,84} = 4,1$$

$$c'_r = c_r \left[1 + n_s \left(\frac{1}{n^2 - 1} \right) \right] = 0,0186 \cdot \left[1 + 6 \left(\frac{1}{4,1^2 - 1} \right) \right] = 0,026 \text{ m}^2/\text{dzień}$$

Osiadanie po zakończeniu budowy wzmocnienia i nasypu (po okresie 90 dni)

$$T = \frac{t_{90} \cdot c'_r}{(d_e)^2} = \frac{90 \cdot 0,026}{3,45^2} = 0,20$$

Dla $T = 0,20$ i $N = 4,1$ stopień konsolidacji $U = 90\%$

Osiadanie końcowe po 90 dniach wynosi:

$$(1 - U) \cdot s = (1 - 0,90) \cdot 0,032 = 0,003 \text{ m}$$

Przedstawiono wartości osiadania i jego czas trwania w przypadku słabego podłoża wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi.

W obliczeniach pominięto osiadanie poniżej końców wierconych kolumn żwirowych, ponieważ opierają się one na warstwie skalistej o dużej wytrzymałości i małej ściśliwości.

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, w jaki sposób budowa wzmocnionego gruntu wierconymi kolumnami żwirowymi redukuje wartość tego osiadania. Dodatkowe osiadanie występuje ze względu na zwiększane jego przyspieszenie dające większą osiadanie w okresie trwania budowy.

STATECZNOŚĆ GLOBALNA BUDOWLI NA PODŁOŻU WZMOCNIONYM WIERCONYMI KOLUMNAMI ŻWIROWYMI

Budowa ścian oporowych, nasypów ziemnych i innych budowli wywołuje często powstawanie dużych składowych ścinających naprężenia w warstwach niżej leżącego gruntu. Jeżeli wytrzymałość na ścinanie gruntu jest mniejsza niż wywołane naprężenie ścinające, utrata stateczności budowli następuje na skutek obrotu budowli w powierzchni poślizgu w gruncie. Podobnie, jeśli w naturalnych lub wykonanych nasypach grunto-

wych wytrzymałość na ścinanie jest mniejsza niż składowa ścinająca naprężenia, wystąpi w nasypach zjawisko osuwiska.

Określenie współczynnika bezpieczeństwa ze względu na wywołany obrót budowli, można określić za pomocą różnych metod obliczeniowych. We wszystkich tych metodach należy ustalić odpowiednie parametry wyjściowe, którymi są: geometria budowli lub nasypu, ciężar objętościowy gruntu wzmocnionego, jego charakterystyki na ścinanie (kąt tarcia wewnętrznego i spójność) oraz poziom wody gruntowej.

Parametry wytrzymałości na ścinanie

Wytrzymałość na ścinanie gruntu wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi wyznacza się jako średnią ważoną wytrzymałości na ścinanie elementów wierconych kolumn żwirowych i materiału gruntu rodzimego:

$$\tau_{sr} = \sigma'_v \cdot \tan \phi'_{sr} + c'_{sr} \quad (11)$$

średnia spójność c'_{sr} oblicza się z wzoru

$$c'_{sr} = c'_g \cdot R_a + c'_r \cdot (1 - R_a) \quad (12)$$

gdzie:

c'_g – spójność kruszywa wierconej kolumny żwirowej,

c'_r – spójność gruntu rodzimego,

R_a – stosunek powierzchni wierconej kolumny żwirowej do powierzchni pokrycia kolumnami strefy gruntu wzmocnionego.

Spójność kruszywa wierconej kolumny żwirowej równa się zero, stąd wzór (12) ma postać:

$$c'_{sr} = c'_r (1 - R_a) \quad (13)$$

Średni kąt tarcia ϕ'_{sr} określa się z wzoru:

$$\phi'_{sr} = \arctan \left[R_a \tan \phi'_g + (1 - R_a) \tan \phi'_r \right] \quad (14)$$

gdzie:

ϕ'_g – kąt tarcia wewnętrznego kruszywa wierconej kolumny żwirowej,

ϕ'_r – kąt tarcia wewnętrznego gruntu rodzimego.

Średnie parametry wytrzymałości na ścinanie przy uwzględnieniu koncentracji naprężenia

W przypadku ścian oporowych, nasypów wzmocnianych wierconymi kolumnami żwirowymi przechodzącymi przez słabe grunty do mocnych, występująca znaczna różnica sztywności elementów kolumny powoduje koncentrację naprężenia w gór-

nej warstwie kolumny. Rezultatem jest znaczący dalszy wzrost złożonej wytrzymałości na ścinanie.

Parametry średniej wytrzymałości na ścinanie strefy wzmocnionej wierconymi kolumnami żwirowymi wyznacza się wzorami (15) i (16), w których uwzględniono koncentrację naprężenia:

$$\phi'_{sr} = \arctg \left[\frac{R_s}{R_a R_s - R_a + 1} \cdot R_a \cdot \tg \phi'_g + \frac{1}{R_a R_s - R_a + 1} (1 - R_a) \cdot \tg \phi'_r \right] \quad (15)$$

$$c'_{sr} = \frac{1}{R_a R_s - R_a + 1} (1 - R_a) \cdot c'_r \quad (16)$$

gdzie:

R_s – stosunek sztywności elementów wierconych kolumn żwirowych do sztywności gruntu macierzystego.

Pozostałe oznaczenia jak we wzorach (11) i (12).

Przykład obliczeniowy

Przykładowe obliczenia oszacowania wartości średnich parametrów wytrzymałości na ścinanie pokazano na przykładzie konstrukcji oporowej posadowionej na podłożu wzmocnionym wierconymi kolumnami żwirowymi. Rozpatrzono dwa przypadki określenia średnich parametrów wytrzymałości na ścinanie. Do obliczeń przyjęto stosunek powierzchni kolumny i podłoża równy $R_a = 0,2$.

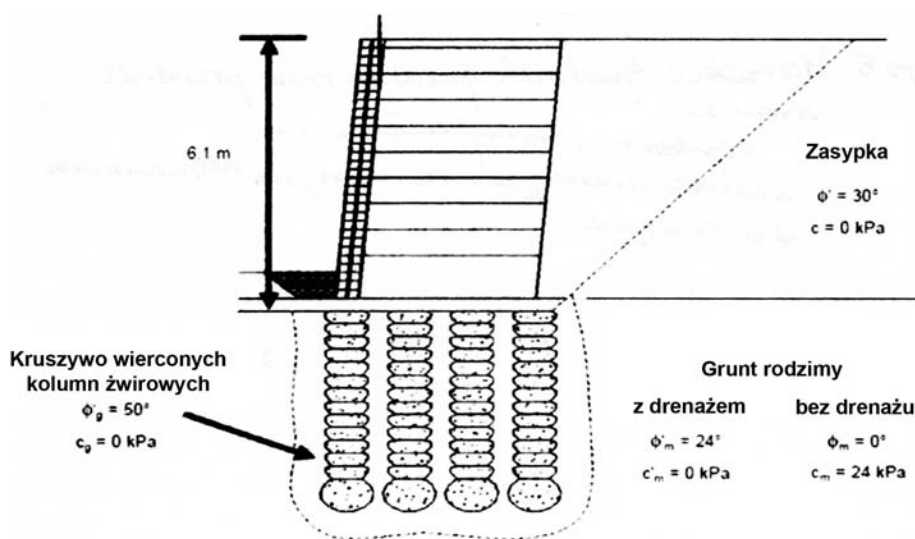
1. Przy braku koncentracji naprężenia (rys. 5).

Wartości średnich parametrów wytrzymałości na ścinanie wyznaczono przy warunkach wyjściowych podanych na rys. 5.

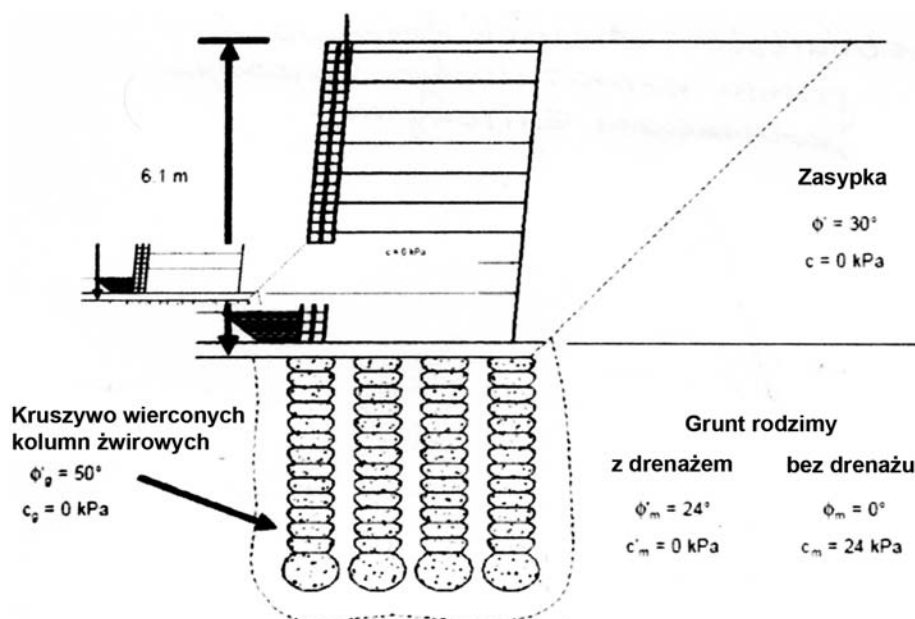
Wartości parametrów z warunkiem drenażu

$$c'_{sr} = (1 - 0,2) \cdot 0 = 0 \text{ kPa}$$

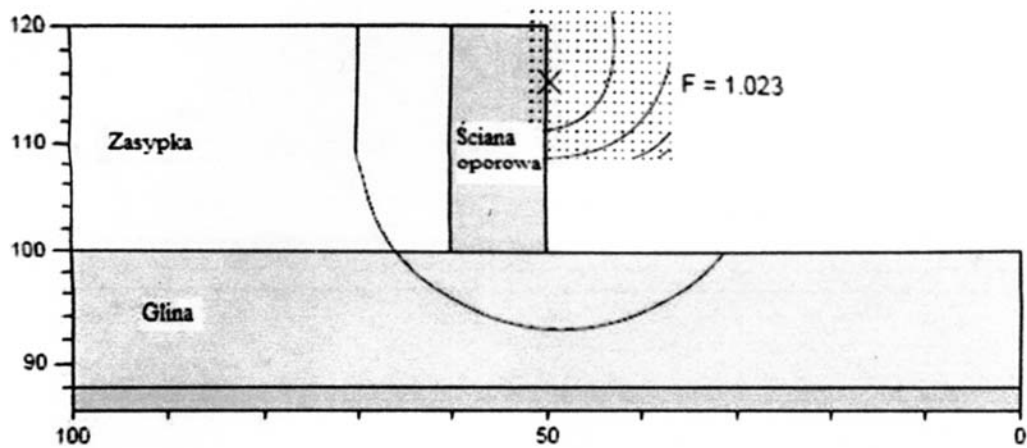
$$\phi'_{sr} = \arctg [0,20 \cdot \tg 50^\circ + (1 - 0,20) \cdot \tg 24^\circ] = 30,7^\circ$$



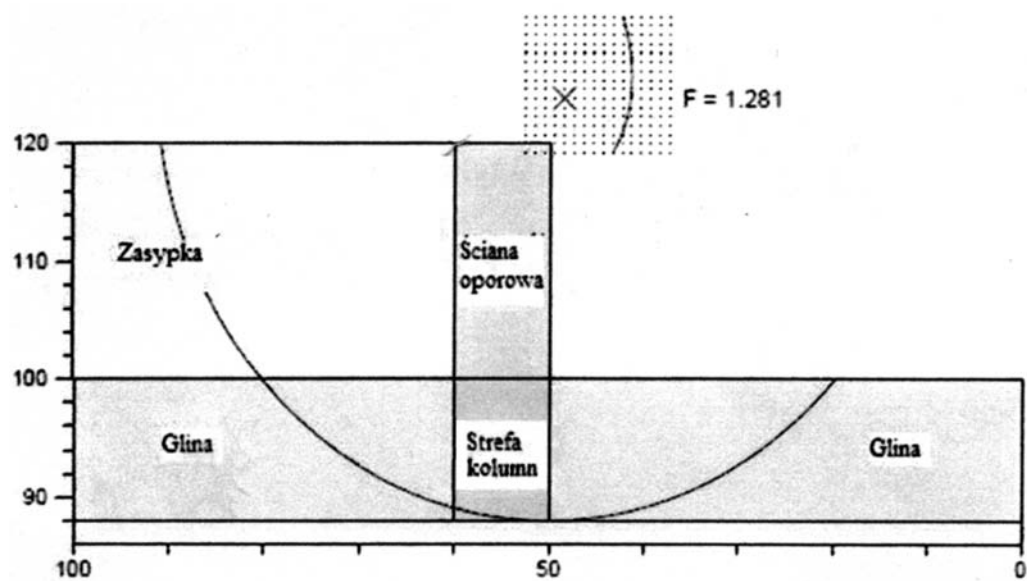
Rys. 5. Wartości średnich parametrów gruntu wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi



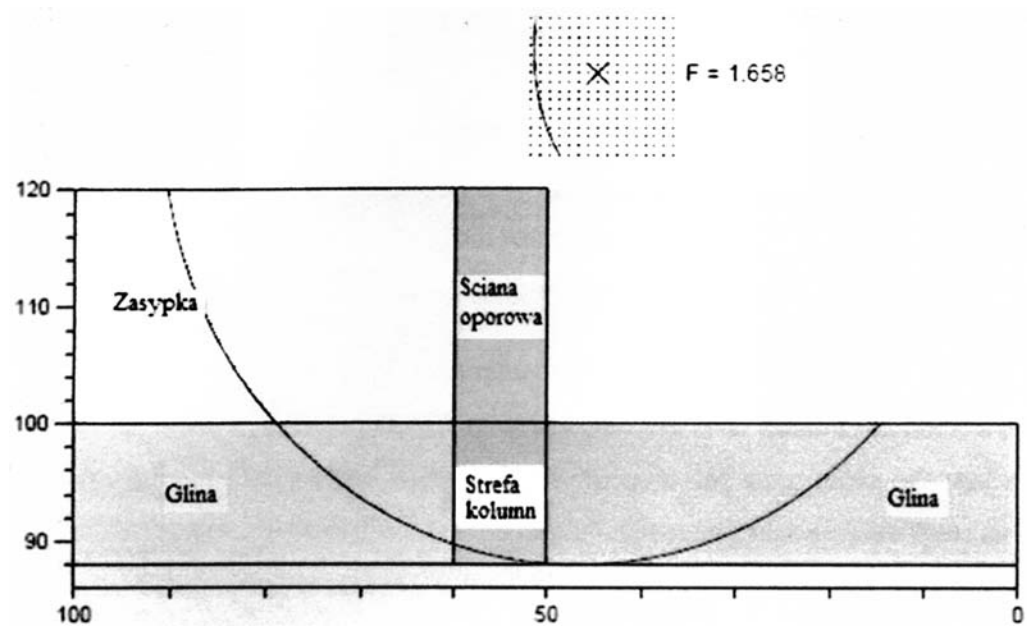
Rys. 6. Wartości średnich parametrów gruntu wzmocnionego wierconymi kolumnami żwirowymi



Rys. 7. Analiza stateczności skarpy bez wzmocnienia wierconymi kolumnami żwirowymi



Rys. 8. Analiza stateczności skarpy z uwzględnieniem strefy wzmocnienia wierconymi kolumnami żwirowymi



Rys. 9. Analiza stateczności skarpy z uwzględnieniem koncentracji naprężenia w strefie wierconych kolumn żwirowych

Wartości parametrów z warunkiem bez drenażu

$$c'_{sr} = (1 - 0,2) \cdot 24 = 19,2 \text{ kPa}$$

$$\phi'_{sr} = \arctan [0,20 \cdot \tan 50^\circ + (1 - 0,20) \cdot \tan 0^\circ] = 13,4^\circ$$

2. Z uwzględnieniem koncentracji naprężenia wartości średnich parametrów wytrzymałości na ścinanie przy stosunku sztywności równym 5 (rys. 6).

Wartości parametrów z warunkiem drenażu:

$$c'_{sr} = \left[\frac{1}{10(0,20) - 0,20 + 1} \right] (1 - 0,20) \cdot 0 = 0 \text{ kPa}$$

$$\phi'_{sr} = \arctan \left\{ \left[\frac{10}{10(0,20) - 0,20 + 1} \right] 0,20 \tan 50^\circ + \left[\frac{1}{10(0,20) - 0,20 + 1} \right] (1 - 0,20) \tan 24^\circ \right\} = 44,4^\circ$$

Wartości parametrów z warunkiem bez drenażu:

$$c_{sr} = \left[\frac{1}{10(0,20) - 0,20 + 1} \right] (1 - 0,20) \cdot 24 = 6,9 \text{ kPa}$$

$$\phi_{sr} = \arctan \left\{ \left[\frac{10}{10(0,20) - 0,20 + 1} \right] 0,20 \tan 50^\circ + \left[\frac{1}{10(0,20) - 0,20 + 1} \right] (1 - 0,20) \tan 0^\circ \right\} = 40,4^\circ$$

Na rys. 7 przedstawiono wyniki badania stateczności globalnej w warunkach bez drenażu, stosując geometrię ściany oporowej i właściwości gruntu rodzimego podane na rys. 5. Wyniki badań z warunkiem bez drenażu wskazują, że współczynnik bezpieczeństwa wynosi 1,0. Wyniki analiz obejmują strefę wzmocnioną wierconymi kolumnami żwirowymi wraz z krytyczną powierzchnią poślizgu przedstawioną na rys. 8 i 9.

Przyjmując stosunek powierzchni $R_a = 0,2$ oraz sztywności $R_s = 1,0$ (brak koncentracji naprężenia), współczynnik bezpieczeństwa wzrósł do 1,3. W przypadku przyjęcia współczynnika stosunku sztywności $R_s = 5,0$ współczynnik bezpieczeństwa wzrósł w przybliżeniu do 1,7.

ZAKOŃCZENIE

Wzmocnienie gruntu wierconymi kolumnami żwirowymi zwiększa efektywnie współczynnik bezpieczeństwa zapobiega-

jący brakom globalnej stateczności ścian oporowych, nasypów i skarp. Brak globalnej stateczności występuje w przypadku, gdy moment wywracający działający na budowlę przekracza moment utrzymujący wywołany siłami oporu gruntu. W przypadku umieszczenia wierconych kolumn żwirowych w strefie krytycznej powierzchni ścinania, wysoki kąt tarcia wewnętrzny wykazywany przez elementy wierconych kolumn żwirowych powoduje wzrost oporu na ścinanie wzmocnionego podłoża gruntowego.

LITERATURA

1. Augustyniak G.: Ubijane kolumny gruntowe GEOPIER. Praca dyplomowa. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk 2011.
2. Fox N. S., Cowell M. J.: Geopier® Soil Reinforcement Manual. Geopier Foundation Company, Inc. 8283 North Hayden Road, Suite 291, Scottsdale, AZ, 1998.
3. Dembicki E., Wojnarowicz M., Augustyniak G.: Wzmocnienie podłoża gruntowego za pomocą ubijanych kolumn gruntowych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2012.
4. Han J., Ye S. L.: Simplified Method for Consolidated Rate Stone Column Reinforced Foundations. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, 2001, №7.
5. Lawton, E. C., Fox N. S.: Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers. Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, A. T. Yeung and G. Y. Fello (Editors), American Society of Civil Engineers, 1994, 2, 962-974.
6. Minks A. G., Wissmann K. J., Caskey J. M. and Pando M. A.: Distribution of Stresses and Settlements Below Floor Slabs Supported by Rammed Aggregate Piers, 2001.
7. Naval Facilities Design Command (NAV FAC), Design Manual DM 7.2, 1983.
8. Wissmann, K. J., Fitz P. B. T., White, D. J., Lien, B. H.: Improving global stability and controlling settlement with Geopier soil reinforcing elements, 2002.
9. Wojnarowicz M., Dembicki E.: Wzmocnienie podłoża gruntowego krótkimi kolumnami GEOPIER. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/2010.