

Pale rurowe otwarte – formowanie się korka gruntowego

Dr hab. inż. Lech Bałachowski, mgr inż. Magdalena Fugiel

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego

Pale w rurach stalowych otwartych znajdują szerokie zastosowanie w hydrotechnicznym budownictwie morskim oraz śródlądowym (w nabrzeżach, pirsach jako dalby cumownicze i odbojowe, dalby kotwiące suchych doków, jako elementy przystani lub kierownic śluz). W konstrukcjach pełnomorskich, takich jak platformy wiertnicze czy fundamenty elektrowni wiatrowych, stosuje się wielkośrednicowe pale rurowe otwarte o długości dochodzącej nawet do 50 m.

W trakcie zagłębiania pala rurowego z dnem otwartym grunt penetruje do wnętrza rury, tworząc tzw. korek gruntowy, częściowo ją wypełniając. Wyznaczenie nośności takiego pala wymaga zrozumienia zjawisk związanych z instalacją pala oraz dodatkowo zjawisk wpływających na nośność korka gruntowego. Ze względu na podatność korka gruntowego pale rurowe otwarte zachowują się jako pośrednie pomiędzy palami w pełni przemieszczeniowymi (pale z dnem zamkniętym) i nie przemieszczeniowymi, co potwierdzają próbne obciążenia pali [11, 17], klasyczne badania modelowe [9], badania modelowe w komorze kalibracyjnej [15, 2, 7, 8, 16] oraz wirówce geotechnicznej [4, 3]. Takie zachowanie związane jest ściśle z procesem formowania się korka gruntowego we wnętrzu rury, który można uzależnić od następujących parametrów:

- geometrii pala (wewnętrzna średnica pala, grubość ścianki pala),
- szorstkości rury,
- zagłębienia pala w gruncie,
- uwarstwienia podłoża,
- metody instalacji pala (pale wbijane bądź wciskane).

Celem niniejszego artykułu jest scharakteryzowanie zasadniczych czynników wpływających na proces formowania się korka gruntowego, przedstawienie wielkości charakteryzujących korek gruntowy oraz opisanie istotnych zjawisk wpływających na nośność całkowitą pala rurowego otwartego oraz nośność samego korka gruntowego w gruntach niespoistych.

Formowanie się korka gruntowego

Cykliczne i dynamiczne obciążenia wywołane wbijaniem pala, powodują początkowo swobodne przemieszczanie się gruntu we wnętrzu rury. W miarę postępu instalacji pala, korek gruntowy zaczyna stopniowo przesuwac się coraz wolniej, ze względu na wzrastające siły tarcia pomiędzy gruntem a wewnętrzną powierzchnią rury. Tarcie to odgrywa decydującą rolę w formowaniu się korka gruntowego. Pal jest w pełni zakorkowany, kiedy dochodzi do stabilizacji wysokości kolumny gruntu we wnętrzu pala. Schemat formowania się korka gruntowego przedstawiono na rys. 1.

Przyrost wysokości korka gruntowego podczas instalacji i obciążenia pala można opisać następującymi wielkościami:

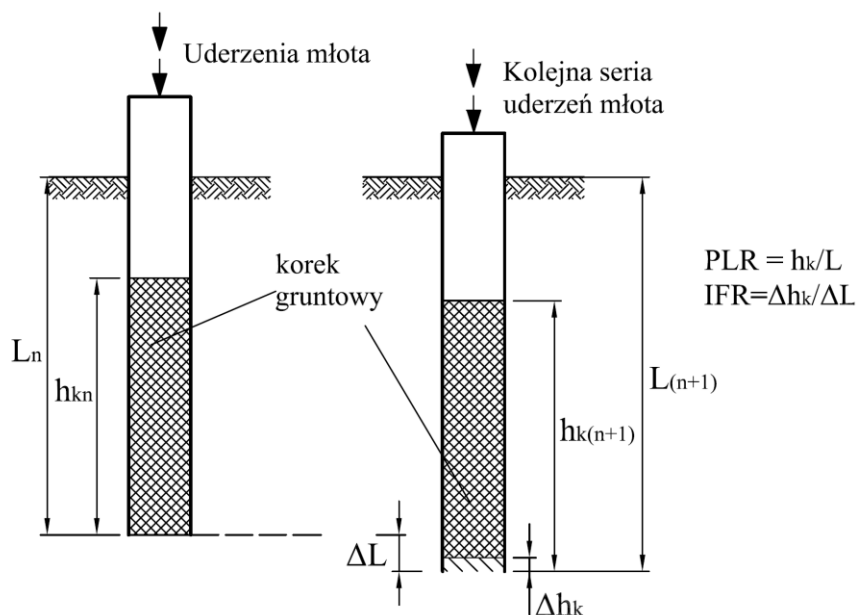
- PLR (plug length ratio) – stosunek długości korka do całkowitego zagłębienia pala,

$$PLR = \frac{h_k}{L} \quad (1)$$

- IFR (incremental filling ratio) – chwilowy współczynnik wypełnienia, określany jako stosunek przyrostu długości korka do odpowiadającego mu przyrostu zagłębienia pala.

$$IFR = \frac{\Delta h_k}{\Delta L} \quad (2)$$

Wartość IFR uzależniona jest od takich parametrów jak: uwarstwienie podłoża, wewnętrzna średnica pala, grubość ścianek pala rurowego, stopień zagęszczenia gruntu pod podstawą pala oraz sposób instalacji pala. Wartość chwilowego współczynnika wypełnienia na początku wbijania pala wynosi zazwyczaj 100% (IFR=1), malejąc stopniowo do zera, kiedy mamy do czynienia z w pełni uformowanym korkiem gruntowym. Mówimy wówczas, że pal jest zakorkowany. Dla pali przemieszczeniowych, jakimi są pale rurowe o podstawie zamkniętej, IFR wynosi zero. Pale rurowe otwarte podczas wbijania, ulegają zazwyczaj częściowemu zakorkowaniu, co oznacza, że w miarę postępującego procesu instalacji, przyrost korka gruntowego zmniejsza się w stosunku do odpowiadającego mu przyrostu zagłębienia pala, stąd $0 < IFR < 1$. Mimo częściowego zakorkowania przy obciążeniu dynamicznym, pale rurowe otwarte pod obciążeniem statycznym zachowują się najczęściej jako w pełni zakorkowane (IFR=0). W przypadku rzeczywistych pali pod konstrukcje pełnomorskie, w których długość korka gruntowego może znacznie przekraczać 10 m, nie rejestruje się żadnych zmian położenia górnej powierzchni korka podczas obciążenia statycznego [15]. Istotne jest określenie wartości IFR na przewidywanej głębokości zagłębienia pala. W takim przypadku współczynnik ten przyjmuje nazwę FFR (final filling ratio) i jest wykorzystywany w obliczeniach nośności pali rurowych otwartych pod obciążeniem statycznym.



Rys. 1 Schemat formowania się korka gruntowego

Stopień zakorkowania pala, podczas procesu instalacji, wpływa na objętość gruntu przemieszczanego radialnie spod podstawy pala, a tym samym na wartości oporu tarcia gruntu wzdłuż poboczniczy pala. Cienkościenne pale rurowe otwarte przemieszczają w procesie instalacji znacznie mniejszą objętość gruntu w stosunku do pali zamkniętych (rys.2). Przy braku zakorkowania (grunt jest przemieszczany przez przekrój cienkościennej rury (rys.2b)). Częściowe zakorkowanie powoduje zwiększenie objętości przemieszczanego gruntu w stosunku do pala niezakorkowanego (rys.2c). Wyższe wartości IFR powodują większy przyrost poziomu naprężenia w otaczającym gruncie w rejonie podstawy pala, generując tym samym wyższe wartości tarcia na poboczniczy.

W celu oszacowania stopnia zakorkowania pala można posłużyć się efektywnym współczynnikiem powierzchni - $A_{r,eff}$, który określa stosunek objętości przemieszczonego gruntu (objętość pala brutto minus objętość gruntu wprowadzonego do wnętrza pala) do objętości pala brutto.

$$A_{r,eff} = 1 - IFR \frac{D_i^2}{D_0^2} \quad (3)$$

gdzie:

D_0 – zewnętrzna średnica pala,

D_i – wewnętrzna średnica pala,

W typowych palach otwartych wykorzystywanych pod konstrukcje pełnomorskie [21] o stosunku średnicy do grubości ścianek rury ($D_0/t \approx 40$), wartość $A_{r,eff}$ dąży do 0,1 przy braku zakorkowania podczas instalacji pala (IFR=1). W przypadku częściowego zakorkowania (IFR<1), wartości efektywnego współczynnika powierzchni zawarte są w przedziale od 0,1 do 1. Przy cienkościennych profilach o wielkiej średnicy, coraz częściej stosowanych w konstrukcjach offshore, efektywny współczynnik powierzchni $A_{r,eff}$ może osiągnąć wartość 0,01 [21]. W takim wypadku przyrost składowej poziomej naprężenia w gruncie wywołanych instalacją pala będzie pomijalnie mały.

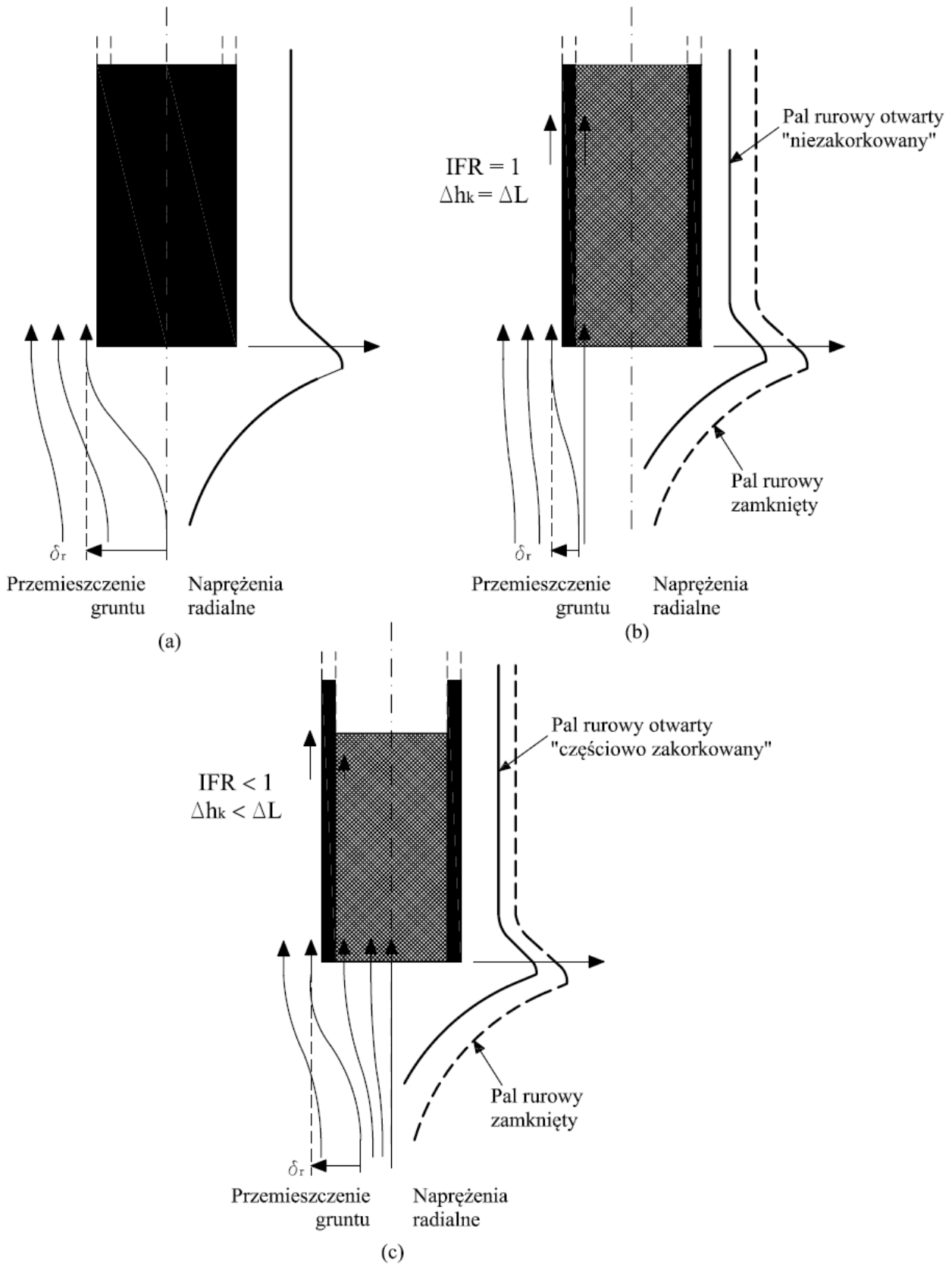
Czynniki wpływające na proces formowania się korka gruntowego z gruntu piaszczystego:

- Zagęszczenie i ściśliwość gruntu

Przyrost wysokości kolumny gruntu we wnętrzu rury zależy od zagęszczenia i ściśliwości piasku. Kiedy do wnętrza pala rurowego penetruje grunt piaszczysty w stanie zagęszczonym, narasta zjawisko dylatacji gruntu. Przemieszczający się grunt przechodzi ze strefy wysokich naprężeń pod podstawą pala do wnętrza rury, gdzie poziom naprężenia jest mniejszy, zwiększając swoją objętość. W przypadku znacznych naprężeń pod podstawą pala w piaskach zagęszczonych i dużej różnicy między naprężeniami w gruncie pod podstawą pala a naprężeniami we wnętrzu rury obserwuje się przemieszczenia zwiększonych objętości gruntu spod podstawy pala do wnętrza rury. Grunt przemieszczający się z zagęszczonej i prekonsolidowanej strefy pod podstawą pala do wnętrza rury ulega rozluźnieniu i zwiększa swoją objętość. W takich przypadkach obserwuje się wartości chwilowego współczynnika wypełnienia pala IFR większe niż 100% co pokazują wyniki:

- badań w komorze kalibracyjnej pali wbijanych w zagęszczone piaski prekonsolidowane [2],
- badań w wirówce geotechnicznej przy dużym zagłębieniu pali wbijanych w piaski zagęszczone [5].



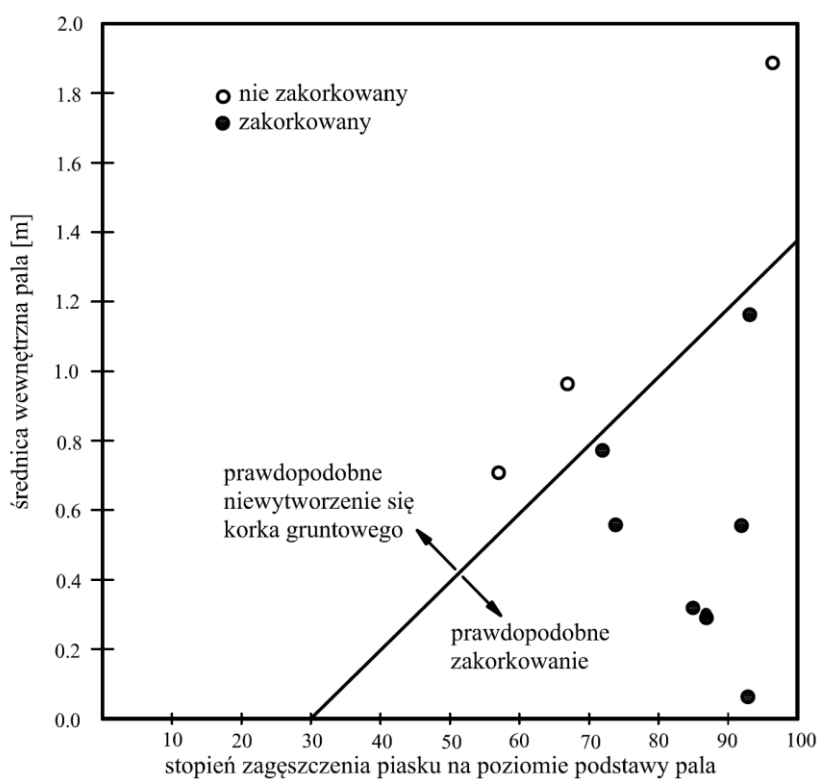


Rys. 2 Proces korkowania pąla ze schematycznie naniesionym kierunkiem przemieszczania się gruntu i naprężeniami radialnymi, (a) pal rurowy zamknięty (IFR=0, $A_{r,eff} = 1$), (b) pal rurowy otwarty „niezakorkowany” (IFR=1, $A_{r,eff} \sim 0,1$), (c) pal rurowy otwarty „częściowo zakorkowany” (IFR<1, $0,1 < A_{r,eff} < 1$) [24]

Wolniejszy przyrost wysokości korka spowodowany jest przejściem przez warstwę gruntu bardziej ściśliwego, co w krańcowym przypadku może doprowadzić nawet do zakorkowania pala. Odpowiednio dobrany kształt ostrza pala przeciwdziała zakorkowaniu pala podczas wbijania i nieosiągnięciu wymaganej głębokości pograżenia pala. Zapuszczanie rury może się również odbywać z przemiennym wykorzystywaniem urządzeń do wbijania pali i pomp do odprowadzania urobku z wnętrza rury, co zmniejsza tarcie rury o grunt podczas jej wbijania [6]. Wadą takiego rozwiązania jest generacja mniejszej składowej poziomej naprężenia w gruncie wokół pala i mobilizacja mniejszego tarcia na zewnętrznej powierzchni rury przy obciążeniu pala.

- Średnica pala

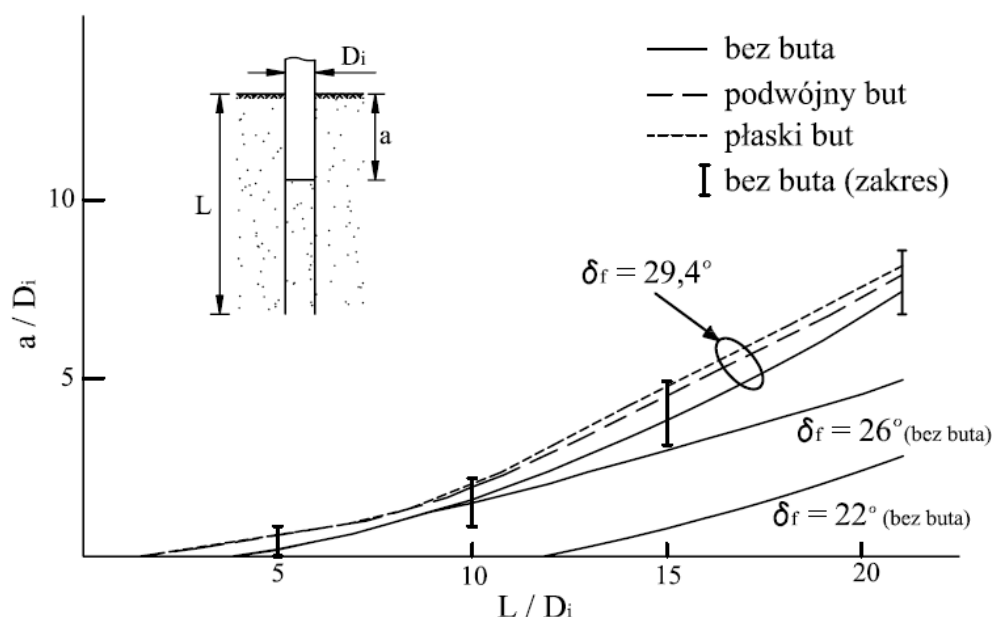
Korek gruntowy powstaje szybciej w palach o mniejszej średnicy, gdzie łatwiej tworzą się przesklepienia w materiale korka. Na podstawie obserwacji pali rurowych wbijanych w grunty piaszczyste na Morzu Północnym stwierdzono [10], że proces tworzenia się korka gruntowego zależy od średnicy pala i stopnia zagęszczenia gruntu (rys. 3). W palu o średnicy wewnętrznej nie większej niż 0,6 m powstanie korek gruntowy, gdy stopień zagęszczenia piasku pod podstawą pala będzie większy niż 0,6. Najprawdopodobniej korek gruntowy nie wytworzy się w palu o średnicy wewnętrznej większej niż 1,4 m. W przypadku wielkośrednicowych pali rurowych otwartych, stosowanych pod konstrukcje pełnomorskie, korek gruntowy przemieszcza się swobodnie we wnętrzu rury podczas instalacji i dopiero pod obciążeniem statycznym dochodzi zazwyczaj do stabilizacji jego położenia.



Rys. 3 Kryterium tworzenia się korka gruntowego dla pali o różnej średnicy w zależności od stopnia zagęszczenia gruntu na poziomie podstawy pala [10]

- Szorstkość wnętrza rury

Większe tarcie w kontakcie grunt-powierzchnia wewnętrzna rury powoduje wolniejszy przyrost wysokość korka gruntowego. Tarcie to zależy od szorstkości wewnętrznej powierzchni rury, opisanej przez kąt tarcia δ_f na styku grunt-materiał rury (rys. 4). Specjalnie dobrany but na ostrzu pala [20] lub zastosowanie dodatkowych żeber we wnętrzu rury [12, 13] mogą zmniejszyć przyrost wysokości korka gruntowego i przyspieszyć zakorkowanie pala. Sposób ten można zastosować w palach o bardzo dużej średnicy lub wbijanych w piaski luźne.



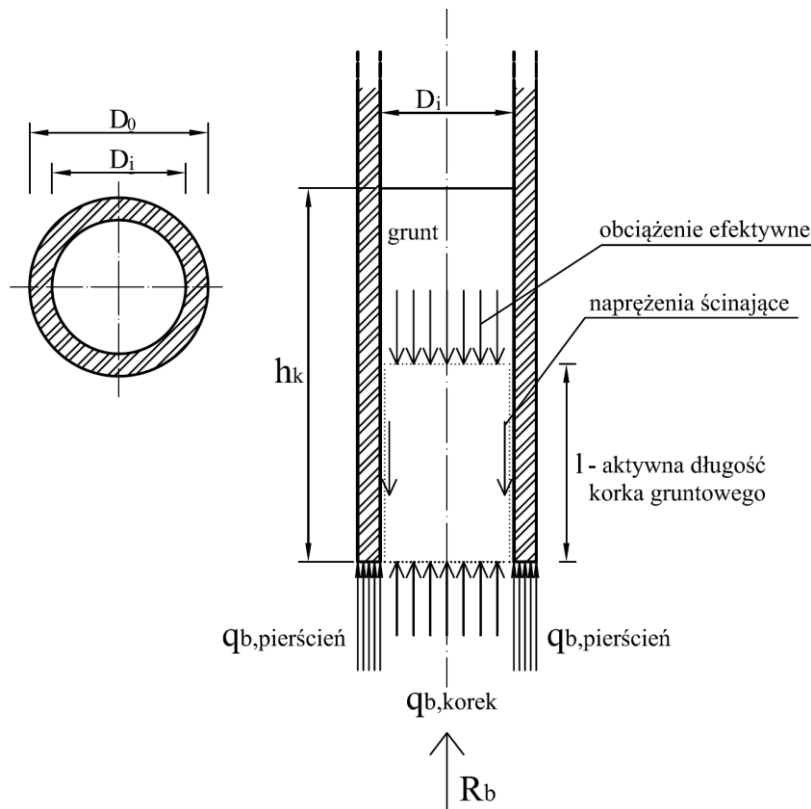
Rys. 4 Formowanie się korka gruntowego w zależności od szorstkości rury [20]

- Sposób wprowadzania pala w grunt

Formowanie się korka gruntowego zależy od sposobu wprowadzania pala w grunt. Brak obciążeń dynamicznych w przypadku pali wciskanych, powoduje, że korek gruntowy wytworzy się szybciej tzn. szybciej nastąpi zakorkowanie, ale jego długość będzie mniejsza niż w przypadku pali wbijanych.

Charakterystyka korka gruntowego

Korek gruntowy jest niejednorodny (rys. 5), co potwierdzają liczne badania [9, 14, 18, 19, 23]. Można dokonać podziału korka na dwie części. Część aktywną, położoną najniżej, która jest bardzo zagęszczona i przenosi praktycznie całość sił tarcia na wewnętrznej powierzchni rury. Mniej zagęszczona część górna korka, przekazuje obciążenia pionowe od ciężaru własnego, rozłożone na górnej powierzchni części aktywnej korka. Przyjmuje się, że długość części aktywnej korka gruntowego wynosi od 2 do 3 średnic pala.

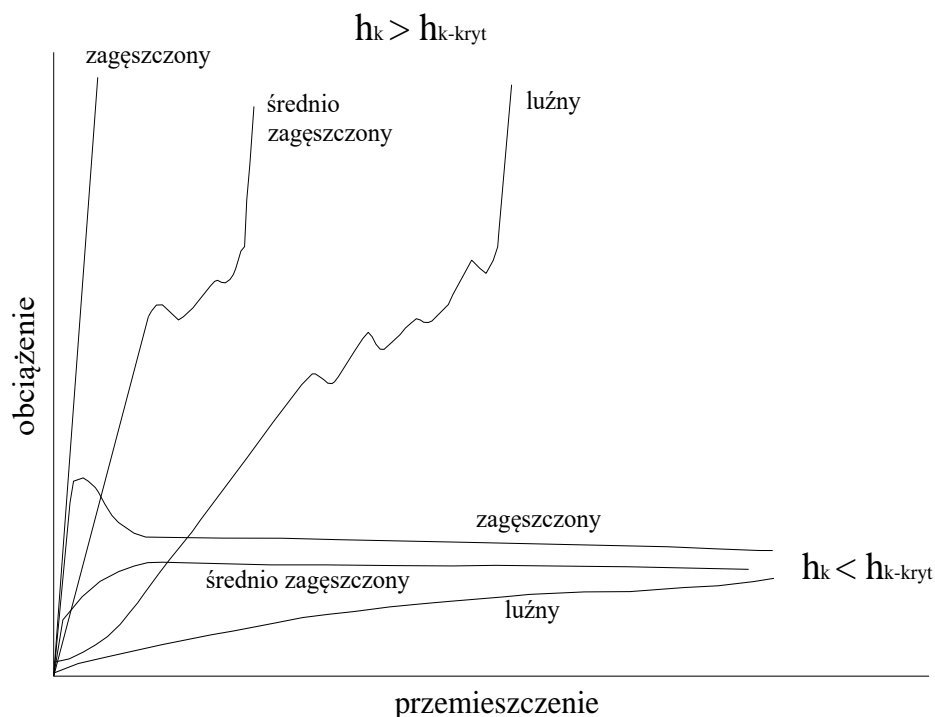


Rys. 5 Stan naprężeń w podstawie pała rurowego otwartego, korek gruntowy

Nośność korka gruntowego

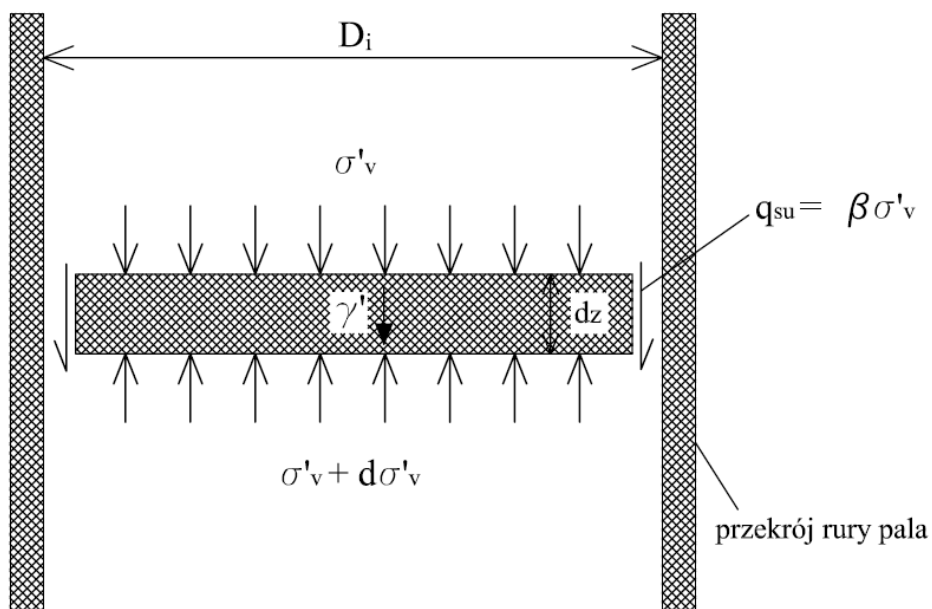
Podczas obciążenia statycznego korek gruntowy we wnętrzu rury mobilizuje się dopiero po przekroczeniu pewnej wysokości krytycznej kolumny gruntu ($h_k > h_{k-kryt}$) [14]. W sytuacjach kiedy wysokość krytyczna kolumny gruntu nie zostaje osiągnięta (bardziej prawdopodobne dla pali wciskanych), następuje utrata nośności korka w skutek przekroczenia wytrzymałości gruntu na ścinanie w kontakcie wewnętrzna powierzchnia rury-grunt (rys. 6). Po przekroczeniu krytycznej wysokości kolumny gruntu, w tworzącym się korku gruntowym formują się przesklepienia, a wysokie wartości tarcia mobilizują się we wnętrzu rury. W piaskach zagęszczonych nośność korka gruntowego osiągana jest przy niewielkich przemieszczeniach pala. Trudniejsza sytuacja ma miejsce w przypadku piasków luźnych i średnio zagęszczonych, kiedy wytworzenie przesklepień w korku gruntowym wymaga większych przemieszczeń. Korek gruntowy tworzy się wówczas po kilkakrotnej częściowej utracie nośności w kontakcie rura-grunt.

Stopień zakorkowania pala w końcowym etapie instalacji i zachowanie korka gruntowego pod obciążeniem statycznym, wpływają na późniejsze wartości oporu gruntu pod podstawą i na pobocznicę pala. Nośność korka gruntowego wynika z sił tarcia gruntu o wnętrze rury i ciężaru własnego korka. Całkowitą nośność podstawy pala otwartego jest sumą nośności korka gruntowego oraz siły pionowej przenoszonej przez przekrój rury w formie stalowego pierścienia (rys. 5).



Rys.6 Mobilizacja nośności korka gruntowego w zależności od przemieszczenia rury [14]

Prosty, jednowymiarowy model zachowania się korka gruntowego pod obciążeniem statycznym zaproponowany przez Randolpha [22] przedstawiono na rys.7.



Rys.7 Stan naprężenia w korku gruntowym [22]

Równowagę sił pionowych działających (ciężar własny korka, tarcie na wewnętrznej powierzchni rury) na odcinek kolumny gruntu (rys. 7) można przedstawić w postaci równania (4). Korkowanie

wystąpi, gdy suma tarcia gruntu we wnętrzu rury i ciężaru samego korka przekroczy opór graniczny gruntu pod podstawą kolumny gruntu.

$$\frac{d\sigma'_v}{dz} = \gamma' + \frac{4}{D_i} \beta \sigma'_v \quad (4)$$

$$\beta = \frac{q_{su}}{\sigma'_v} \quad (5)$$

gdzie:

q_{su} - jednostkowe tarcie graniczne między gruntem a wewnętrzną powierzchnią rury,

σ'_v - składowa pionowa naprężenia efektywnego,

D_i - średnica wewnętrzna pala rurowego,

γ' - efektywny ciężar objętościowy gruntu tworzącego korek gruntowy.

Wartość współczynnika β podczas mobilizacji tarcia we wnętrzu rury można oszacować na podstawie badań w aparacie bezpośredniego ścinania kontaktu stal-grunt oraz zakładając pewien współczynnik parcia K korzystając ze wzoru:

$$\beta = K \cdot \text{tg}(\delta_{cv}) \quad (6)$$

gdzie:

δ_{cv} - kąt tarcia między stalową płytą a gruntem przy dużych przemieszczeniach.

Dolne oszacowanie wartości współczynnika β można wyznaczyć przyjmując w uproszczeniu, że we wnętrzu rury panuje stan naprężenia zbliżony do warunków parcia czynnego oraz zakładając wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu ϕ_{cv} oraz kąta tarcia stal-grunt δ_{cv} przy dużych przemieszczeniach.

Nośność korka gruntowego można wyliczyć [22] z wzoru:

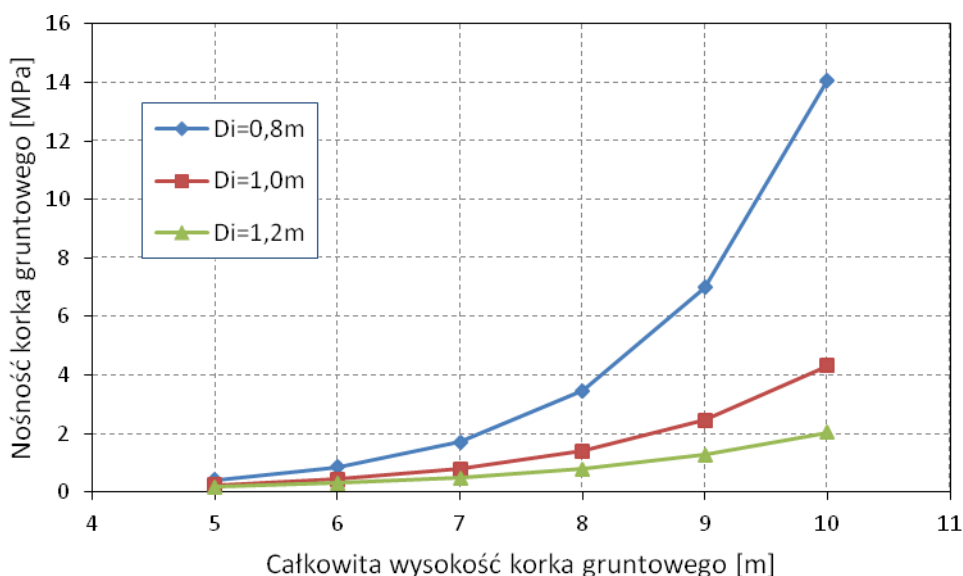
$$q_{bu-korek} = \gamma' h_k \left(\frac{e^\lambda - 1}{\lambda} \right) \quad (7)$$

gdzie:

$$\lambda = 4\beta \frac{h_k}{D_i} \quad (8)$$

h_k - całkowita wysokość korka gruntowego

Nośność korka gruntowego rośnie wykładniczo z wartością współczynnika λ , a więc ze wzrostem stosunku h_k/D_i oraz wartości β . Na rys. 8 przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń nośności korka gruntowego dla pali o trzech średnicach D_i oraz przy różnej wysokości korka gruntowego h_k . W obliczeniach założono ciężar objętościowy gruntu $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$ oraz typowe niskie oszacowanie wartości współczynnika $\beta = 0,14$ [21]. Potwierdzono zasadniczy wpływ wysokości korka gruntowego oraz średnicy rury na jego nośność.



Rys.8 Nośność korka gruntowego w zależności od średnicy pała i wysokości korka

Podsumowanie

Odpowiednia wysokość korka gruntowego i tarcie na wewnętrznej powierzchni rury mają zasadnicze znaczenie do właściwego uformowania korka gruntowego. Wielkośrednicowe pale rurowe z dnem otwartym podczas wbijania zachowują się jako niezakorkowane lub częściowo zakorkowane, pod obciążeniem statycznym mobilizują zazwyczaj wystarczające tarcie we wnętrzu rury do mobilizacji korka gruntowego. Analiza zjawisk związanych z instalacją pali rurowych otwartych stanowi podstawę do wyznaczenia nośności takich pali zwłaszcza w konstrukcjach pełnomorskich. Współczesne metody obliczeń takich konstrukcji [1], bazujące na wynikach sondowań statycznych metodą CPTU do określenia granicznej nośności podstawy oraz tarcia na poboczniczy pali, uwzględniają charakter pracy pali rurowych otwartych. Biorą zatem pod uwagę kryteria zakorkowania pała oraz takie parametry jak współczynnik powierzchni A_r , efektywny współczynnik powierzchni $A_{r,eff}$, czy współczynnik wypełnienia FFR mierzony na końcowym etapie wbijania pała. Przykładowe obliczenia pali rurowych otwartych z wykorzystaniem wyników sondowań statycznych będą przedstawione w kolejnym artykule.

LITERATURA

1. *Recommended practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design, API RP-2A-WSD, 21st edition, December 2000.*
2. Bałachowski, L. 1995. Quelques aspects de la modélisation physique du comportement de pieux: Chambre d'Etalonnage et Centrifugeuse. *Praca doktorska*, Institut National Polytechnique de Grenoble
3. Bruno, D. 1999. Dynamic and static load testing of driven piles in sand. *PhD Thesis*, University of Western Australia

4. De Nicola, A. & Randolph, M.F. 1999. Centrifuge modeling of pipe piles in sand under axial loads. *Géotechnique* 49, No. 3. pp.295-318.
5. De Nicola, A. 1996. The performance of pipe piles in sand. *PhD Thesis*, University of Western Australia
6. Drażkiewicz J. 1998 Zastosowanie pali z rur stalowych w budownictwie morskim, IMiG nr 5
7. Foray, P., Bałachowski, L. & Colliat, J.L. 1998. Bearing capacity of model piles driven into dense overconsolidated sands. *Canadian Geotechnical Journal* 35(2). pp. 374–385.
8. Gavin, K. 1998. Experimental investigation of open and closed ended piles in sand. *PhD Thesis*, University of Dublin (Trinity College).
9. Hartikainen, J., Saari, M. & Zadroga, B. 1992. Bearing capacity of open–ended and closed-ended steel pipe piles. *Proc. of the 4th Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, The Hague, The Netherlands
10. Jardine, R.J. & Chow, F.C. 1996. New design methods for offshore piles. *Imperial College, London. Publications* 96/103.
11. Kishida, H. 1967. Ultimate bearing capacity of pipe piles in sand. *Proc. of the 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. pp. 196–199.
12. Krasieński, A. 2006. Propozycja zwiększania nośności pali rurowych z otwartym dnem, IMiG nr 6
13. Krasieński, A., Cudny, M. 2008. The improvement of axial bearing capacity of open-end pipe piles. *Proc. of 11th Baltic Sea Geotechnical Conference*, Gdańsk, September 2008, pp. 511-518.
14. Murff, J.D., Raines, R.D. & Randolph, M.F. 1990. Soil plug behavior of piles in sand. *Proc. of 22nd Offshore Technology Conference (OTC)*, Houston, Texas. 7-10 May 1990
15. O'Neill, M.W. & Raines, R.D. 1991. Load transfer for pipe piles in highly pressured dense sand. *J. of Geotech. Engrg.*, ASCE, 117(8). pp. 1208–1226.
16. Paik, K. & Salgado, R. 2003. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand. *J. of Geotech. & Geoenv. Engrg.* ASCE, 129(1). pp. 46–57
17. Paik, K., Salgado, R., Lee, J. & Kim, B. 2003. Behavior of open- and closed-ended piles driven into sands. *J. of Geotech. & Geoenv. Engrg.* ASCE, 129(4). pp.296–306.
18. Paikowsky, S.G. & of Lowell, U. 1990. The Mechanism of pile plugging in sand. *Proc. of the 22nd OTC*, Huston, Texas
19. Paikowsky, S.G. & Whitman, R. V. 1990. The effects of pile plugging on pile performance and design. *Can. Geotech. Journal* 27. pp. 429-440.
20. Raines, R.D., Ugaz, O.G. & O'Neill, M.W. 1992. Driving characteristic of open-toe piles in dense sand, *Journal of Geotechnical Eng.*, Vol.118, No.1.

21. Randolph, M. & Gourvenec. S. 2011. *Offshore geotechnical engineering*, Spon Press 2011
22. Randolph, M.F., Leong, E.C. & Houlsby, G.T. 1991. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles. *Géotechnique* 41, No. 4. pp.587–598
23. Randolph, M.F., May, M., Leong, E.C., Hyden, A.M. & Murff, J.D. 1992. Soil plug response in open ended pipe piles, *Journal of Geotech. Eng.*, Vol.118, No.5
24. White D.J., Schneider J.A. & Lehane B.M. 2005. The influence of effective area ratio on the shaft friction of displacement piles in sand. *Proc. of 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Perth, Australia. 19-21 September 2001. Taylor & Francis Group, London, UK. pp. 741-747.

Streszczenie

Omówiono podstawowe czynniki wpływające na formowanie się korka gruntowego w palach rurowych otwartych wprowadzanych w grunty piaszczyste. Tarcie na wewnętrznej powierzchni rury w części aktywnej korka decyduje o jego nośności. Przedstawiono metodę wyznaczania nośności korka gruntowego pod obciążeniem statycznym.

Abstract

Basic factors which influence the plugging in open ended piles installed in sands are described. Friction on the internal side of the pipe along the active part of the plug is essential for its bearing capacity. Method for the bearing capacity of the plug under static loading was given.