

Osiadanie pali i fundamentów palowych

K. Gwizdała

Katedra Geotechniki Politechniki Gdańskiej; kgwiz@pg.gda.pl

I. Dyka

Katedra Geotechniki Uniwersytetu Warmińsko Mazurskiego, Olsztyn; i.dyka@uwm.edu.pl

1. WSTĘP

W powszechnej praktyce projektowej, nie tylko w Polsce, głównym kryterium charakteryzującym pale i fundamenty palowe w danych warunkach gruntowych pozostaje jego „nośność”. Jest to podejście tradycyjne, ponieważ uwzględniając obecne i przyszłe kontakty polskich inżynierów z projektami i wykonawcami zagranicznymi, pojęcie „nośności” staje się mało czytelne w świetle różnych istniejących kryteriów określania tej wielkości.

Podstawowym wyznacznikiem pracy pali w podłożu gruntowym jest zależność osiadania od przyłożonego obciążenia. Wymienione powyżej zagadnienia związane z fundamentami palowymi są nierozdzielnie związane z prognozowaniem, kontrolą i metodami redukcji osiadania pali. Podstawowym powodem decyzji o zastosowaniu fundamentu na palach jest najczęściej konieczność redukcji osiadania projektowanego obiektu (Randolph, 1994). Decyzję taką muszą wspierać odpowiednie metody obliczeniowe i badawcze związane z określaniem i kontrolą zależności osiadania pali od obciążenia.

Z projektowaniem fundamentów palowych związane są następujące aspekty (Poulos, 2003):

- rozpoznanie podłoża – badania geotechniczne,
- analizy obliczeniowe i projektowanie,
- zagadnienia wykonawstwa,
- badania terenowe pali,
- pomiary powykonawcze – monitoring przemieszczeń fundamentu,
- naprawa i wzmacnianie fundamentu.

Nowoczesne projektowanie fundamentów palowych wymaga przede wszystkim dobrego poznania i zrozumienia procesów zachodzących w tak zmiennym ośrodku, jakim jest podłoże gruntowe wraz z przekazującymi obciążenie palami. Stosowane do projektowania „narzędzia” nie mogą opierać się wyłącznie na teorii nie popartej praktyką. Poznaniu i poszerzaniu wiedzy służą powszechnie wykonywane próbne obciążenia pali pojedynczych oraz terenowe obserwacje istniejących i nowowznoszonych budowli na palach wraz z analityczną weryfikacją obserwowanych zjawisk. Taka tematyka została przyjęta przez Prezydenta Międzynarodowego Stowarzyszenia Mechaniki Gruntów, prof. Van Impe jako jeden z głównych kierunków badań światowych w odniesieniu do fundamentowania głębokiego.

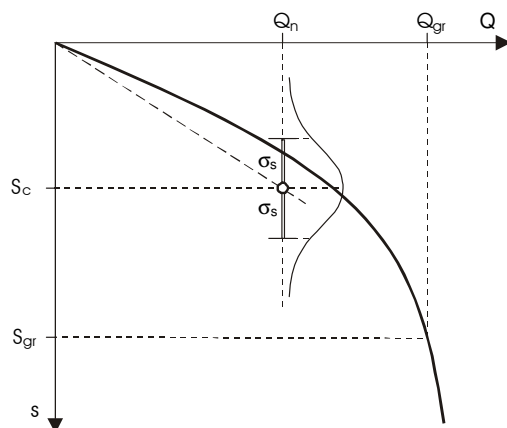
Należy dodać, że w Eurokodzie 7 jest jedynie ogólne stwierdzenie „by analiza osiadań obejmowała zarówno osiadania pali pojedynczych oraz osiadania grupy pali”.

W przyszłości w ramach nowej normy palowej lub Załącznika Krajowego do Eurokodu 7, należy przyjąć metodę, która pozwoli na miarodajną ocenę krzywej osiadania dla pali pojedynczych i grupy pali.

Kierując się tymi przesłankami, zagadnienie osiadania pali pojedynczych oraz fundamentów palowych stało się również ważnym tematem badawczym dla autorów tego artykułu. Wybrane zagadnienia zostały przedstawione poniżej.

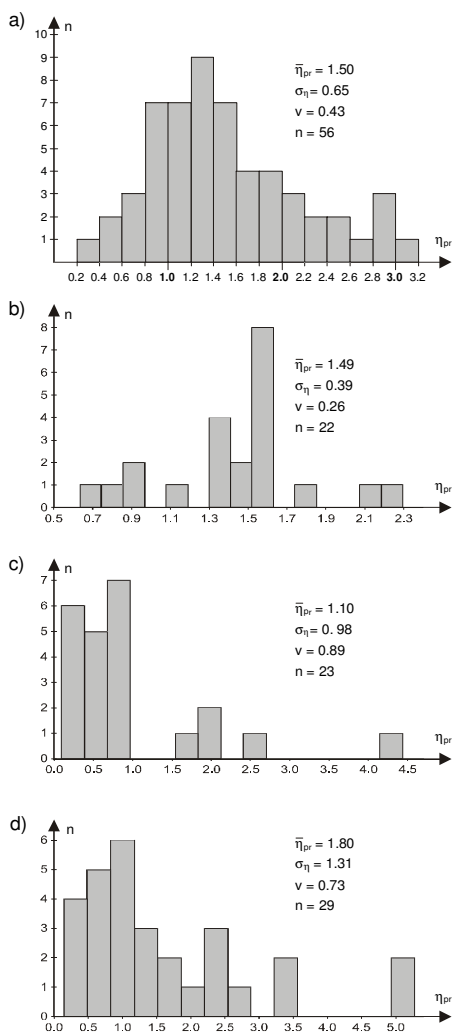
2. OSIADANIE PALI POJEDYNCZYCH

Ocena pracy fundamentów palowych prawie zawsze związana jest z analizą krzywej osiadania dla pala pojedynczego. Przykładową krzywą osiadania przedstawiono na rys. 1. W tradycyjnym sposobie analizy obliczenia wykonywano dla stanu granicznego nośności i użyteczności (dawniej nazywanego użytkowania).



Rys. 1. Krzywa osiadania pala pojedynczego

Oceniając metody obliczeń osiadań dla pala pojedynczego, patrz rys. 1, zakres możliwych obciążeń należy ograniczyć do wartości nie większych niż obciążenie charakterystyczne, Q_n . Z całej krzywej osiadania obliczenia dotyczą jednego punktu (Q_n , S_c). Położenie tego punktu może być zarówno nad jak i pod rzeczywistą krzywą osiadania. Przykładowe wyniki z wykorzystaniem metody obliczeń osiadań dla pala pojedynczego wg PN-83/B-02482 przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Histogram współczynnika zgodności osiadań obliczonych do pomierzonych; a) pale prefabrykowane wbijane; b) pale podpór mostowych; c) pale wielkośrednicowe w gruntach niespoistych; d) pale wielkośrednicowe w gruntach spoistych

Współczynniki zgodności osiadań obliczonych do pomierzonych w próbnym obciążeniu statycznym przedstawiono dla pali prefabrykowanych wbijanych, dla pali podpór mostowych (Bolt, Gwizdała, 1986), dla pali wielkośrednicowych w gruntach niespoistych i spoistych. Średnie współczynniki zgodności η wynoszą od 1,10 do 1,80 przy bardzo dużych, nieakceptowalnych współczynnikach zmienności $v = 0,26$ do $v = 0,89$. Szeroką analizę osiadań pali pojedynczych przedstawiono również w pracy autora, Gwizdała, 1996.

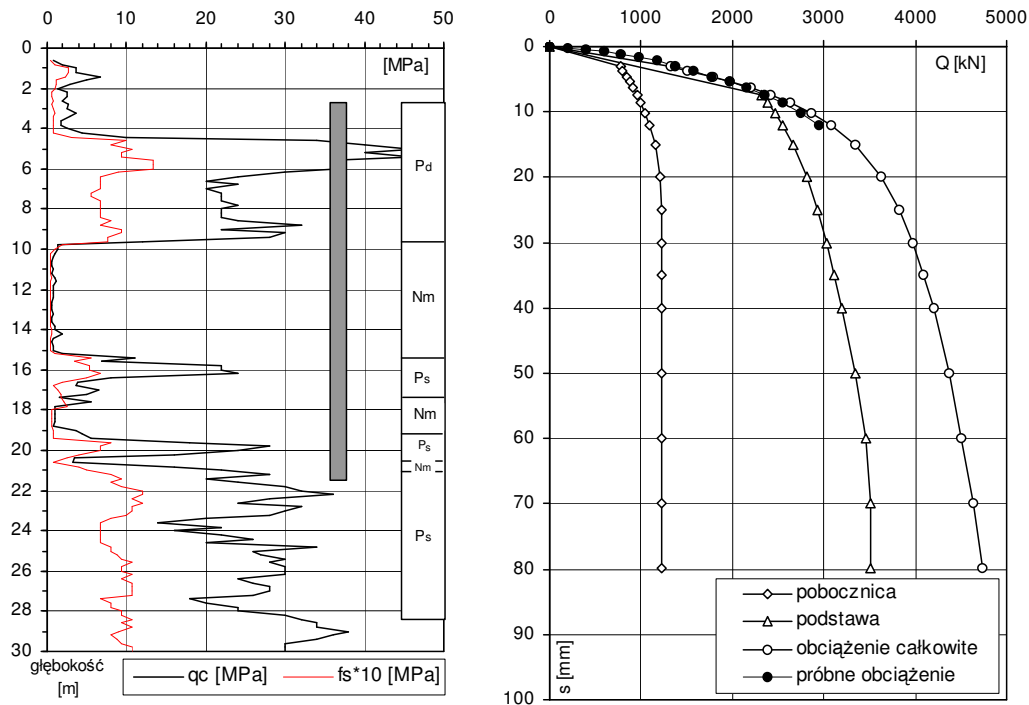
Metody obliczania osiadań pali pojedynczych można podzielić następująco:

- przybliżone zależności, korelacje, zalecenia, metody empiryczne i półempiryczne wykorzystujące rzeczywiste pomiary z próbnym obciążeniem statycznym,
- obliczenie osiadań na podstawie metod bezpośrednich z wykorzystaniem parametrów mierzonych w badaniach in situ, badania sondami SD, SPT, CPT, CPTU, badania presjometrem (PMT), badania dylatometrem (DMT),
- metody wykorzystujące rozwiązania teorii sprężystości, bazujące na rozwiązaniu Mindlina tzn. siła skupiona działająca wewnątrz półprzestrzeni sprężystej,
- metody bazujące na wykorzystaniu funkcji transformacyjnych, określone w badaniach modelowych, badaniach w skali półtechnicznej, badaniach terenowych w skali naturalnej, na podstawie pomiarów wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala,
- metody analityczne, wykorzystujące rozwiązania teoretyczne z analizą współpracy pal – podłoże gruntowe, z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES), metody elementów brzegowych (MEB), oraz inne rozwiązanie macierzowe.

W każdym przypadku należy pamiętać o założeniach wyjściowych, ograniczeniach i zalecanym zakresie stosowania.

Przykładowo, w grupie a) można przedstawić następujące zależności (szczegóły patrz Gwizdała, 1966):

- metoda Meyerhofa, 1959,
- badania Fochta, 1967,
- metoda Vesica, 1970,
- metoda Vesica, 1975,
- wytyczne IBDiM, 1993,
- zalecenia praktyczne, Jarominiak i inni, 1976,
- osiadania pomierzone w terenie, Tejchman, Gwizdała, Świniański, 1988.



Rys. 3. Krzywe osiadania dla pala Vibrex, $h = 18,3$ m, $D = 0,457$, $D_b = 0,650$ m

Szerokie omówienie wykorzystania wyników badań in situ do obliczeń pali przedstawiono w opracowaniu, Stęczniewski, 1996. W kraju największe zastosowanie znajduje test statycznego sondowania, CPT lub CPTU.

W grupie b) dotyczącej wykorzystania badań sondą statyczną rozpatruje się następujące możliwości:

- zastosowanie metody pośredniej, w której na podstawie mierzonych in situ parametrów ustala się stan gruntu, a następnie moduły odkształcenia niezbędne do obliczenia osiadań,
- ocenę modułów odkształcenia na podstawie wiarygodnych korelacji, najczęściej z uwzględnieniem rodzaju gruntu, stanu naprężenia oraz stopnia przekonsolidowania, np. Jamiołkowski, 1988; Lunne i Christoffersen, 1985; Robertson i Campanella, 1983,
- zastosowanie metody bezpośredniej, wyznaczenie nośności na podstawie wyników testu statycznego sondowania oraz zbudowanie pełnej krzywej osiadania pala przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. Ustala się empiryczne korelacje z zastosowaniem wnioskowania statystycznego, w tym estymacja parametrów, weryfikacja stawianych hipotez statystycznych oraz analiza regresji wielokrotnej. Na rys. 3 przedstawiono przykład pełnej krzywej osiadania dla pala Vibrex. Szerszy zakres omawianego zagadnienia można znaleźć w pracach, Stęczniewski, 1996; Gwizdała, Stęczniewski, 2003a; Stęczniewski, 2003b; Stęczniewski, Gwizdała, 2003c.

Metody wykorzystujące rozwiązania teorii sprężystości, dla fundamentów palowych, bazują głównie na rozwiązaniu Mindlina. Poszczególne propozycje obliczeniowe różnią się przede wszystkim przyjętym rozkładem naprężeń (tarcia) na styku pal – grunt.

Pal rozpatruje się jako szorstki cylindryczny element o średnicy D zagłębiony w jednorodnej, izotropowej pół-przeźrzeni sprężystej charakteryzującej się modułem odkształcenia E , oraz współczynnikiem Poissona ν .

W grupie tej ukazało się wiele prac i szczegółowych propozycji. Można tu przypomnieć prace Poulosa, 1989, 2003; Poulosa i Davisa, 1980; Randolpha, 1994; Fleminga i innych, 1994; Batterfielda i Banerjee, 1971.

Należy zaznaczyć, że metoda Poulosa, po pewnych modyfikacjach dotyczących przyjmowania modułu odkształcenia została wprowadzona do normy PN-83/B-02482. Oceniając obecny stan możliwości określania parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego oraz istniejące metody analityczne, nie powinno się stosować rozwiązań tej grupy do obliczeń w praktycznych zagadnieniach inżynierskich.

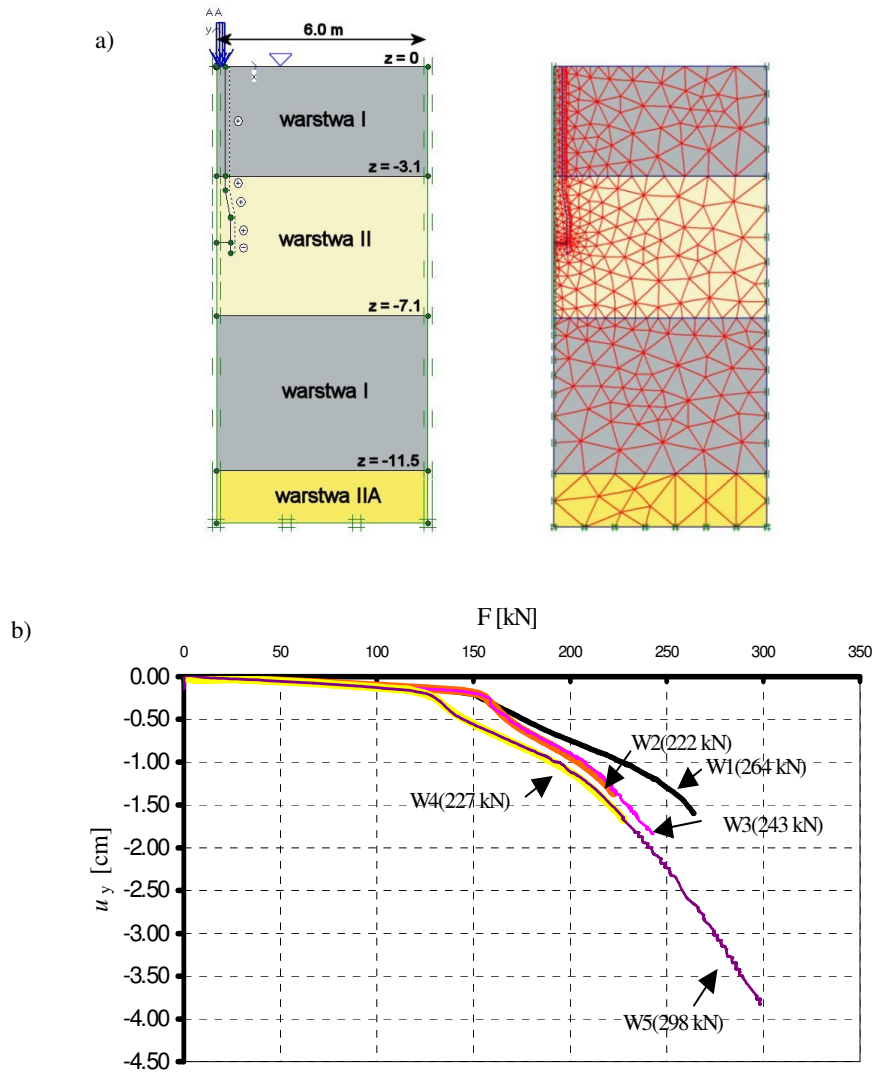
Wśród metod analitycznych najszerze zastosowanie znalazło wykorzystanie metody elementów skończonych (MES). Pierwsze, teoretyczne studium wykonał Ellison już w 1969 roku. Liczne późniejsze prace nie przyczyniły się w sposób zasadniczy do wykorzystania MES w praktyce projektowej, w zakresie stosowania do fundamentów palowych. Prezentowane prace służyły głównie do analizy w zakresie naukowo-badawczym dla trudnych warunków posadowienia. Takim przykładem może być posadowienie fundamentu palowego z podstawami zakończonymi w gruncie nośnym (piasku) pod którym zalega warstwa bardzo słaba (np. plastyczny il lub namuł), patrz Meissner H., Shen Y.I., 1992. Analizy takie można obecnie wykonywać dla praktyki inżynierskiej z wykorzystaniem istniejących programów komputerowych, np. PLAXIS, ABAQUS, itp.

Wyniki konkretnej analizy przedstawiono na rys. 4 z zastosowaniem programu PLAXIS, dla pala posadowionego w nośnych piaskach (warstwa II) pod którymi zalegają miękkoplastyczne namuły (warstwa I), obliczenia wykonał M. Cudny. Krzywe osiadania przedstawiono na rys. 4b dla pięciu wariantów opisu materiałowego poszczególnych warstw gruntu:

- w1, model sprężysto-plastyczny MC (Mohr – Coulomb) we wszystkich warstwach gruntu,
- w2, model MC w warstwach II i IIA, model SS (Soft Soil) ze wzmocnieniem objętościowym w warstwie I,
- w3, model MC w warstwach II i IIA, model SSC (Soft Soil Creep) lepko-plastyczny w warstwie I,
- w4, model HS (Hardening Soil) w warstwach II i IIA, model SS w warstwie I,
- w5, model HS w warstwach II i IIA, model SSC w warstwie I.

Analiza taka pozwala na ocenę postępującego zniszczenia, określenie stref uplastycznienia oraz wskazuje na niebezpieczeństwo przebicia warstwy nośnej.

Innym przykładem jest „obliczeniowy model pala wykonanego techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej” analizowany jako trzy strefy, pal – masyw gruntowy z cienką warstwą kontaktową (Bzówka, 2001).

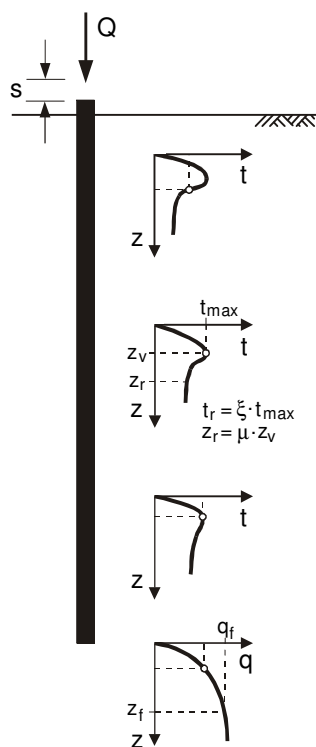
Rys. 4. Schemat obliczeniowy oraz krzywe osiadania dla pala pojedynczego, $L = 5$ m

Zastosowanie metody elementów skończonych w codziennej praktyce projektowej wciąż jest sporadyczne.

Istotne znaczenie praktyczne ma zastosowanie funkcji transformacyjnych. Obliczeniowy model pala wraz z ideą funkcji transformacyjnych przedstawiono na rys. 5. Pal dzieli się na skończoną liczbę elementów, które charakteryzują geometrię oraz właściwości materiału pala. Poszczególne elementy pala współpracują w węzłach z podłożem gruntowym poprzez nieliniowe charakterystyki, funkcje transformacyjne, t - z dla pobocznicy pala oraz q - z dla podstawy pala. Rozwiązanie zadania polega na znalezieniu w sposób iteracyjny zależności między obciążeniem, a przemieszczeniem dla dowolnego poziomu obciążenia oraz wybranego przekroju pala. Praktyczne obliczenia wykazuje się przy wykorzystaniu programu komputerowego (np. PALOS, Gwizdała, 1996r).

Wiarygodność i dokładność wyznaczanej zależności obciążenie – osiadanie zależy od (patrz rys. 5):

- wiarygodności granicznych jednostkowych oporów na poboczniczy pala, $t_{\max}$, oraz granicznych jednostkowych oporów pod podstawę, q_f ,
- obliczonej lub przyjętej nieliniowej części funkcji transformacyjnych t - z oraz q - z ,
- obliczonych lub przyjętych wartości granicznych osiadań z_v oraz z_f , przy których opory na poboczniczy i pod podstawę osiągają wartości maksymalne.



Rys. 5. Model obliczeniowy sprężystego pala oraz funkcje transformacyjne t - z i q - z

Funkcje transformacyjne oraz osiadanie z_v i z_f można określać następująco:

- na podstawie badań: laboratoryjnych, modelowych, w skali półtechnicznej, w skali naturalnej na palach wyposażonych w czujniki pomiarowe,
- na podstawie obliczeń, z zastosowaniem rozwiązań teorii sprężystości, z zastosowaniem modeli nieliniowych, z zastosowaniem modułów odkształcenia zależnych od stanu naprężenia.

W praktycznych obliczeniach stosuje się następujące rodzaje funkcji transformacyjnych (patrz również, Gwizdała, 1996):

- wykorzystanie rozwiązań z teorii sprężystości, Randolph, Wroth, Kraft, Ray, Kagawa, Frank,
- funkcje potęgowe, Vijayvergiya, Van Impe, Gwizdała,
- funkcje hiperboliczne, Hirayama, Gwizdała,
- wykorzystanie modelu Ramberg – Osgood, Armaleh, Desai,
- wykorzystanie części hiperboli, Gwizdała.

Przyjęta koncepcja jest stosunkowo prosta w praktycznych zastosowaniach jeżeli jesteśmy w stanie wiarygodnie ocenić wszystkie parametry opisujące funkcje t - z oraz q - z . Weryfikację wykonano z wykorzystaniem wyników próbnych obciążeń statycznych dla około 300 pali różnych rodzajów, patrz tablica 1 (szczegółowe założenia do obliczeń zawiera praca autora: Gwizdała, 1996).

Wartość współczynnika zgodności η jest stosunkiem obciążenia obliczonego do zmierzonego dla odpowiednich osiadań z rzeczywistej krzywej osiadania. Wartość η mniejsza od jedności świadczy o wynikach leżących po stronie bezpiecznej.

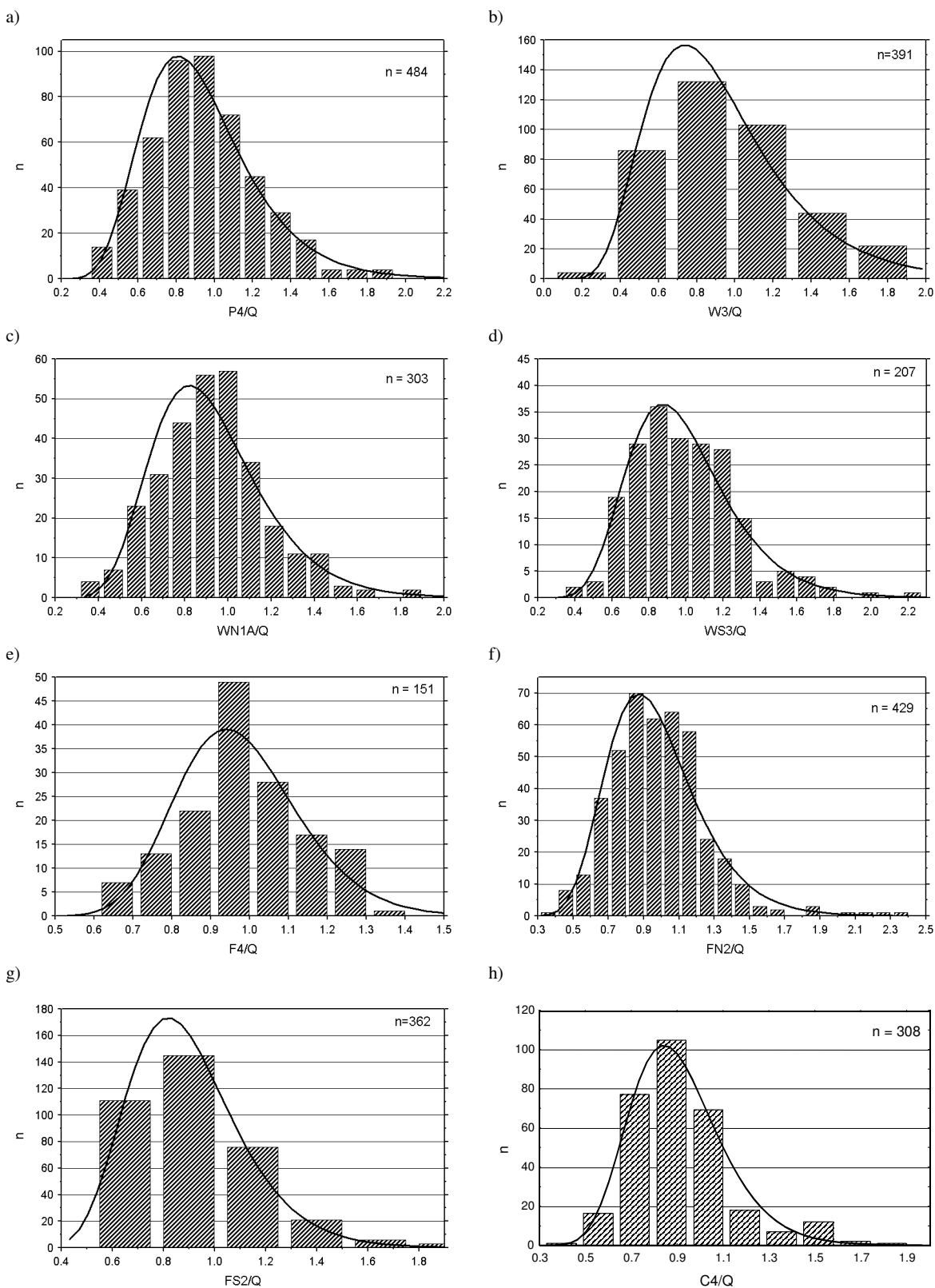
Dla wszystkich punktów badawczych, dla około 300 pali i pełnych krzywych osiadania, uzyskano średnie współczynniki zgodności rzędu od 0,909 do 0,987 przy współczynnikach zmienności od 0,157 do 0,368. Podobne wartości otrzymano również dla początkowego zakresu krzywych osiadania, dla osiadań zwykle przyjmowanych jako dopuszczalne dla pali pojedynczych, tzn. $s_d = 3 \div 10$ mm.

Graficznym obrazem wyników zawartych w tablicy 1 są histogramy i funkcje gęstości dla współczynników zgodności, rys. 6.

Tablica 1. Wartości współczynników zgodności η

Rodzaj pala	Punkty pomiarowe	Liczba punktów badawczych	Wartość średnia η	Odchylenie standardowe σ	Współczynnik zmienności v
Pale prefabrykowane	wszystkie punkty	484	0,933	0,282	0,302
	s = 3 mm	51	0,955	0,322	0,337
	s = 5 mm	37	1,014	0,304	0,300
	s = 10 mm	21	0,930	0,276	0,297
Pale Wolfsholza	wszystkie punkty	391	0,925	0,340	0,368
	s = 3 mm	28	0,907	0,350	0,386
	s = 5 mm	28	1,042	0,374	0,359
	s = 25 mm	8	0,786	0,201	0,256
Pale wielkośrednicowe, grunty niespoiste	wszystkie punkty	303	0,924	0,250	0,270
	s = 5 mm	30	0,951	0,264	0,278
	s = 10 mm	25	0,994	0,238	0,240
	s = 20 mm	19	0,960	0,200	0,208
Pale wielkośrednicowe, grunty spoiste	wszystkie punkty	207	0,987	0,285	0,288
	s = 5 mm	25	0,976	0,278	0,284
	s = 10 mm	19	0,976	0,205	0,210
	s = 20 mm	10	0,935	0,233	0,238
Pale Franki	wszystkie punkty	151	0,978	0,154	0,157
	s = 3 mm	13	0,980	0,154	0,157
	s = 5 mm	12	0,954	0,161	0,169
	s = 7 mm	11	0,961	0,151	0,157
Pale Fundex, grunty niespoiste	wszystkie punkty	429	0,974	0,269	0,276
	s = 3 mm	35	1,028	0,259	0,252
	s = 5 mm	18	1,084	0,200	0,185
Pale Fundex, grunty spoiste	wszystkie punkty	362	0,898	0,240	0,267
	s = 3 mm	26	0,972	0,270	0,278
	s = 5 mm	23	1,042	0,278	0,267
	s = 7 mm	20	1,009	0,264	0,262
Pale CFA	wszystkie punkty	308	0,909	0,216	0,238
	s = 3 mm	33	0,930	0,221	0,238
	s = 5 mm	28	0,964	0,221	0,229
	s = 10 mm	19	0,944	0,196	0,208

Powyższe obliczenia weryfikacyjne wykonane przy założeniu empirycznych funkcji potęgowych, wykonując wielo-variantowe obliczenia dla uzyskania najlepszej zgodności dla całej grupy danego rodzaju pala.



Rys. 6. Histogramy współczynników zgodności i funkcje gęstości:
 a) pale prefabrykowane; b) pale Wolfsholza; c) pale wielkośrednicowe w gruntach niespoistych;
 d) pale wielkośrednicowe w gruntach spoistych; e) pale Franki; f) pale Vibro-Fundex w gruntach niespoistych;
 g) pale Vibro-Fundex w gruntach spoistych; h) pale CFA

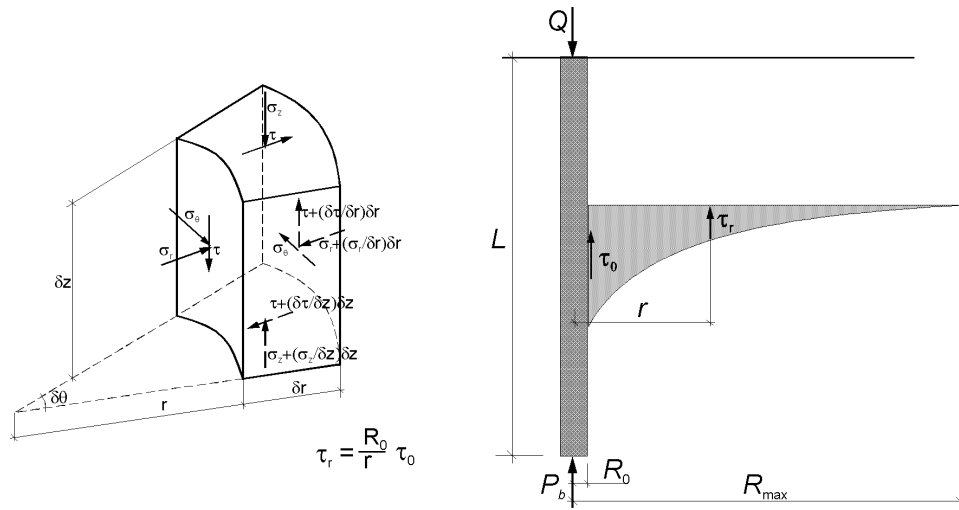
Obecnie opracowano metodę, w której funkcje transformacyjne oblicza się na podstawie rozwiązań teoretycznych, uwzględniając zmianę modułu odkształcenia w każdym kroku obliczeniowym, Gwizdała, Dyka, 2001. Krzywą t - z opisuje rozwiązanie teoretyczne wykorzystujące prace Randolph'a i Wroth'a, 1978, rys. 7.

Zakładając, że istnieje pewien skończony promień $R_{\max}$, przy którym wpływ obciążenia poboczniczy pala staje się pomijalnie mały, równanie określające przemieszczenie pionowe punktu znajdującego się w odległości r od osi pala zdefiniowane jest następująco:

$$\left. \begin{aligned} s(r) &= \frac{\tau_0 \cdot R_0}{G(\tau_0)} \ln \left(\frac{R_{\max}}{r} \right), & R_0 \leq r \leq R_{\max} \\ s(r) &= 0, & r > R_{\max} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

gdzie:

- τ_0 – naprężenie styczne na poboczniczy pala,
- R_0 – promień trzonu pala,
- $R_{\max}$ – zasięg oddziaływania pala.
- G – moduł odkształcenia postaciowego ośrodka gruntowego wzdłuż poboczniczy.



Rys. 7. Założenia wyjściowe dla teoretycznych krzywych transformacyjnych t - z (Randolph & Wroth, 1978)

Podstawa pala działa jak sztywny stempel na powierzchni podłoża gruntowego. Przemieszczenie podstawy s_b pod wpływem przyłożonej siły P_b opisane jest przy wykorzystaniu rozwiązania Boussinesq'a dla obciążenia równomiernie rozłożonego na części brzegu półprzestrzeni sprężystej. Dodatkowo uwzględnia się wpływ zagłębienia podstawy pala. Wynikające z tego rozwiązania równanie przedstawia się następująco:

$$s_b = \frac{P_b}{R_b \cdot G_b(\sigma)} \frac{(1 - \nu_b)}{4} \mu_d, \quad (2)$$

gdzie:

- P_b – wypadkowa siła działająca na podstawę pala;
- G_b, ν_b – parametry gruntu pod podstawą pala;
- R_b – promień podstawy pala;
- μ_d – współczynnik uwzględniający wpływ zagłębienia podstawy pala.

Dla występujących w praktyce stosunków średnicy pala do zagłębienia, współczynnik korekcyjny na podstawie krzywej Fox'a przyjęto jako $\mu_d = 0,5$.

We wzorach (1) i (2) moduł odkształcenia G przyjęto zmienny w funkcji aktualnego naprężenia τ_0 lub σ . Podstawiając:

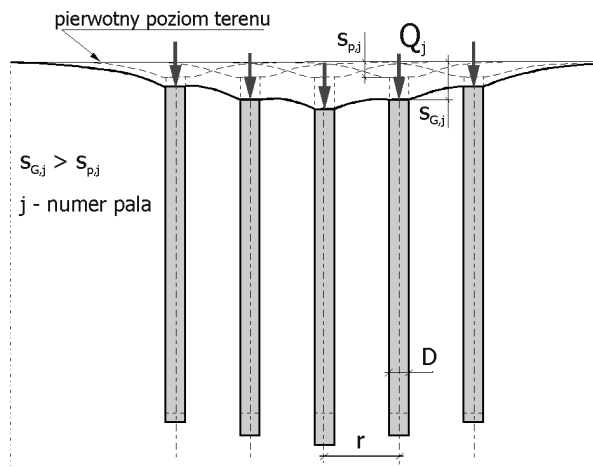
- dla poboczniczy $\tau_0 \equiv t, s \equiv z$;
- dla podstawy $\sigma \equiv q, P_b = \pi \cdot R_b^2 \cdot q, s_b \equiv z$;

oraz uwzględniając zmienność modułu odkształcenia G otrzymujemy teoretyczne krzywe transformacyjne t - z i q - z .

Założenia powyższej metody wykorzystano do opracowania metody obliczania osiadania pali w grupie. Istotne elementy oraz czynniki decydujące o poprawności uzyskanych wyników opracowana metodą omówiono w p. 3.

3. OSIADANIE PALI W GRUPIE

Praca pali w grupie w sposób jakościowy i ilościowy różni się od pracy pali pojedynczych. Jeżeli jeden z pali obciążony jest siłą osiową, spowoduje to również osiadania pali sąsiednich. Gdy obciążony jest każdy pal, następuje wzajemne przenikanie i nakładanie pól przemieszczeń oraz stref naprężeń wokół poszczególnych pali. W wyniku tego osiadanie pali w grupie jest znacznie większe niż osiadanie pala pojedynczego, rys. 8.



Rys. 8. Schemat wzajemnego oddziaływania pali w grupie

Wielkość osiadania poszczególnych pali ma decydujące znaczenie dla prawidłowego zaprojektowania całej konstrukcji budowlanej. Fakt ten jest często ignorowany w powszechnej praktyce projektowej. Należy przypomnieć, że przemieszczenie jest oddziaływaniem, które może generować znaczne siły przekrojowe (wewnętrzne) w układzie konstrukcyjnym obiektu budowlanego.

Zjawisko osiadania fundamentów jest szczególnie istotne w przypadku wszystkich dużych fundamentów. Fundamenty obciążające podłoże gruntowe na dużej powierzchni powodują duże osiadania, często odznaczające się nierównomiernością. Związane jest to ze zróżnicowanym obciążeniem, zmiennością warunków gruntowych, niejednorodnością podłoża, a także cechami mechanicznymi gruntu, które nie są stałe ale zależą od stanu naprężenia w gruncie. Powiązanie wszystkich tych czynników oraz dodatkowo uwzględnienie sztywności konstrukcji w obliczeniach, prowadzi do racjonalnego projektowania posadowień i elementów konstrukcyjnych całej nadbudowy.

Trzeba pamiętać, że nawet najdokładniejsze oszacowanie osiadania pala pojedynczego obciążonego siłą pionową, nie gwarantuje właściwego określenia osiadania pali występujących w grupie. Często jednak krzywa osiadania pala pojedynczego stanowi punkt wyjścia do obliczeń osiadania pali w grupie.

3.1. Metody obliczania osiadania pali w grupie

Metody służące do obliczania osiadania fundamentów palowych można podzielić na kilka grup:

- metoda współczynnika osiadania; w celu otrzymania wielkości osiadania fundamentu palowego, wielkość osiadania pala pojedynczego (s_p), określoną dla charakterystycznego obciążenia projektowanego, mnoży się przez współczynnik osiadania R , który odzwierciedla tzw. efekt grupy; wielkość współczynnika grupy R często określona jest na podstawie badań modelowych i terenowych, dlatego metody te nazywane są także metodami empirycznymi;
- metoda fundamentu zastępczego, polegająca na zastąpieniu grupy pali zastępczym fundamentem bezpośrednim (equivalent raft method) lub zastępczą kolumną (equivalent pier method); osiadanie fundamentu zastępczego można obliczyć następnie metodami stosowanymi dla tego rodzaju fundamentów;
- metody teoretyczne, korzystające z rozwiązań teoretycznych, które w sposób bezpośredni opisują pracę pali w grupie i oddziaływanie między nimi; w metodach tych analizuje się współpracę układu *pal-grunt-pal*, wykorzystując obliczeniowe procedury numeryczne np. metodę elementów brzegowych (MEB), metodę elementów skończonych (MES) oraz inne rozwiązania macierzowe stosowane w mechanice budowli.

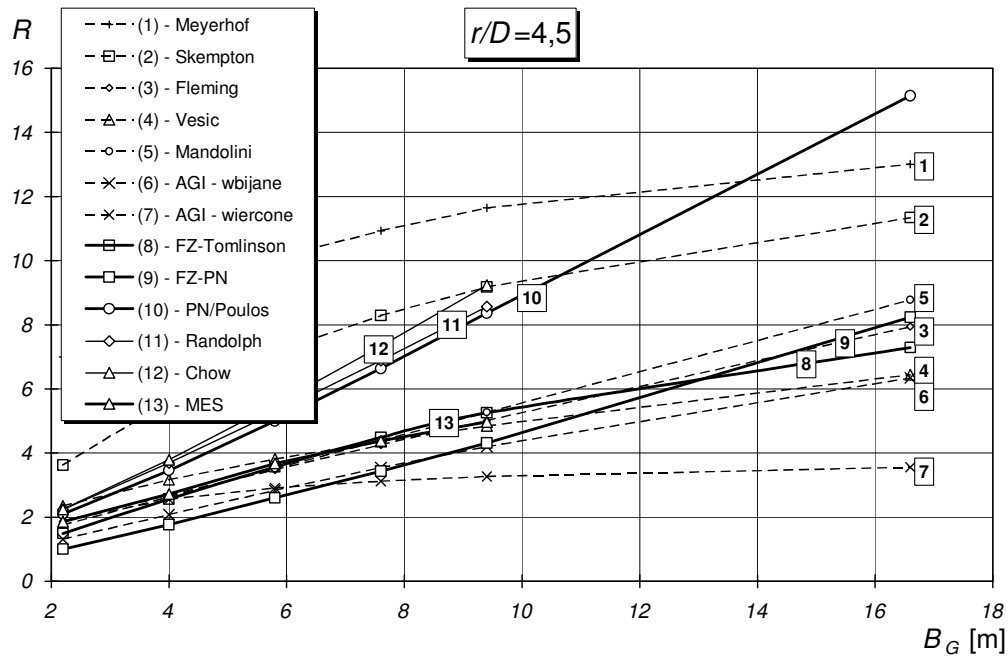
Wymienione metody prezentowane były we wcześniejszych pracach (Gwizdała, Dyka, 1998; Dyka, Gwizdała, Tejchman, 2000; Tejchman i inni, 2001; Dyka, 2001).

Metodą współczynnika osiadania można wyznaczyć przybliżoną wartość średnią osiadania fundamentu palowego. Współczynnik osiadania zdefiniowany jest następująco:

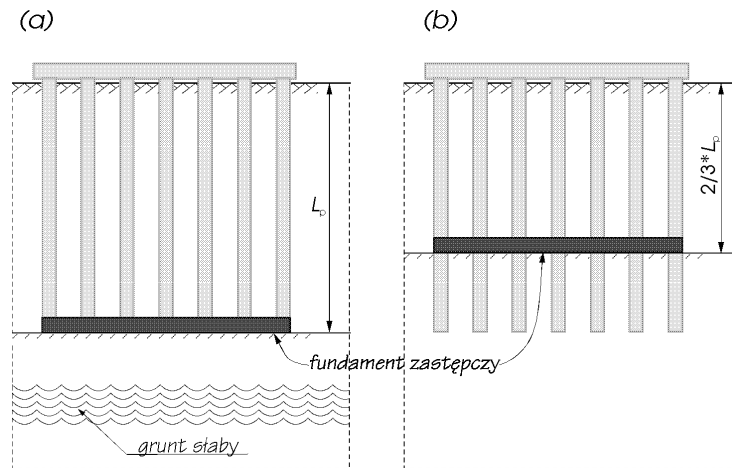
$$R = \frac{s_G}{s_p}, \quad (3)$$

gdzie: s_G , s_p – odpowiednio średnie osiadanie grupy pali i osiadanie pala pojedynczego.

Należy zwrócić uwagę na znaczne różnice między wartościami współczynników osiadania R obliczanych za pomocą różnych istniejących wzorów (Gwizdała, Dyka, 1998). Na rys. 9 porównano wyniki otrzymane dla grup jednakowych pali w tych samych warunkach geotechnicznych, o tym samym rozstawie osiowym (r) i jednakowym obciążeniu na 1 pal, w funkcji szerokości fundamentu B_G . Metody empiryczne: (1) – (7), linie przerywane.

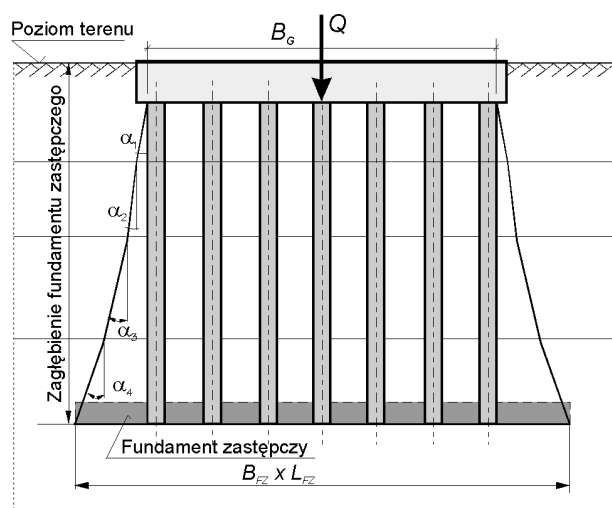


Rys. 9. Porównanie wartości współczynnika osiadania R obliczonego według różnych propozycji



Rys. 10. Metoda fundamentu zastępczego według Terzaghi'ego i Pecka'a (1948)

Za pomocą metody fundamentu zastępczego można wyznaczyć średnie osiadanie fundamentu palowego o rozstawach osiowych pali nie przekraczających wartości $(3\div 5)D$, gdzie D - średnica pala. W takich przypadkach całą grupę pali zastępuje się ekwiwalentnym fundamentem zastępczym. Wymiar fundamentu zastępczego, kształt oraz głębokość posadowienia przyjmuje się w różny sposób, w zależności od stosowanej metody. Na rys. 10 przedstawiono pierwszą propozycję metody fundamentu zastępczego, jako ukazała się w światowej literaturze geotechnicznej (Terzaghi, Peck, 1948). Kolejne przedstawiali Sowers, Bowles, Berezancew, Tomlinson, Poulos, Van Impe (Tejchman i inni, 2001; Dyka, 2001). Polska Norma „Nośność pali i fundamentów palowych” PN-69/B-02482 oraz obecna PN-83/B-02482 zalecają metodę fundamentu zastępczego, która oparta jest na propozycji Berezancewa, rys. 11.



Rys. 11. Metoda fundamentu zastępczego według PN-69/B-02482

Metodę fundamentu zastępczego w wydaniu klasycznym (metody wymienione wyżej) można stosować w sytuacjach, w których nie wymaga się określenia osiadań poszczególnych pali w grupie. W wyniku obliczeń otrzymujemy wartość średnią osiadania dla całego fundamentu zastępczego. Stosując metody obliczania osiadania dla fundamentu zastępczego należy pamiętać o dużym zagłębieniu tego fundamentu. W takim przypadku w wartości otrzymanego osiadania uwzględnić się współczynnik korekcyjny μ_d . Można do tego celu wykorzystać krzywe korekcyjne według Focha, 1948.

$$\mu_d = \frac{\text{skorygowane osiadanie fundamentu zast.}}{\text{osiadanie fundamentu zast.}}$$

W Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej Zespół profesora A. Tejchmana opracował autorski program komputerowy (OSFUZA) służący do inżynierskich obliczeń osiadań, przechyłek oraz odkształceń budowli posadowionej na fundamentach bezpośrednich lub fundamentach palowych obciążonych statycznie. Program oblicza osiadania pali w grupie metodą fundamentu zastępczego, podając wartość przemieszczenia dla każdego pala. Modyfikacja w stosunku do klasycznej metody zastępczego fundamentu bezpośredniego polega na przyjęciu, że każdy pojedynczy pal zastępowany jest pojedynczym elementarnym zastępczym fundamentem bezpośrednim, pod którym obliczane jest osiadanie. Program automatycznie uwzględnia wzajemne oddziaływanie na siebie poszczególnych fundamentów, co odzwierciedla efekt pracy pali w grupie.

Jednym z istotnych zagadnień w metodzie fundamentu zastępczego jest zasięg strefy aktywnej obciążenia $Z_{\max}$, czyli miąższość warstw poniżej poziomu posadowienia fundamentu zastępczego, dla których określa się ich odkształcenie pionowe. Spotyka się różne kryteria określenia głębokości aktywnej:

- $Z_{\max}$ według PN-81/B-03020, $\rightarrow \sigma_{z_{\max d}} \leq 0,3\sigma_{z_{\max \gamma}}(\sigma_{z_d}$ - naprężenie dodatkowe w gruncie na głębokości z z uwzględnieniem współczynnika zaniku naprężeń),
- $Z_{\max} = 1,5B_{FZ}$ (B_{FZ} - szerokość fundamentu zastępczego),
- $Z_{\max}$ dla $\sigma_{z_{\max d}} = 0,1\sigma_d$ (σ_d - naprężenie dodatkowe w poziomie posadowienia fundamentu zastępczego, które odpowiada całkowitemu obciążeniu zewnętrznemu działającemu na fundament palowy)

Istniejące w PN-81/B-03020 „Posadowienie bezpośrednie budowli” kryterium dla fundamentów bezpośrednich (kryterium A) jest niewłaściwe dla fundamentów głębokich, ponieważ fundament zastępczy znajduje się na znacznej głębokości, gdzie istnieją duże naprężenia pierwotne w gruncie. Właściwszym kryterium jest, to stosowane powszechnie w świecie, według którego zakłada się strefę oddziaływania fundamentu do głębokości $Z_{\max} = 1,5 \cdot B_{FZ}$ poniżej podstaw pali (B_{FZ} – szerokość fundamentu zastępczego).

Dla rozległych fundamentów, proponowane kryterium głębokości aktywnej powoduje konieczność ustalenia parametrów geotechnicznych głęboko zalegających warstw gruntowych. Zazwyczaj nie dysponujemy tak szerokim rozpoznaniem geotechnicznym, a głębokości otworów badawczych lub sondowań nie przekraczają 30 m. W tym wypadku należy w racjonalny sposób oszacować charakterystyki odkształceniowe warstw leżących niżej, aż do wymaganego zagłębienia $z = h_p + Z_{\max}$ (h_p – zagłębienie pali).

Na dużej głębokości parametry mechaniczne dla tej samej warstwy geotechnicznej nie mają wartości stałej lecz zmieniają się wraz z zagłębieniem z . Powszechnie przyjmuje się zmianę modułu odkształcenia (E lub M) według modelu Gibsona:

$$M(z) = M_0 + m \cdot z \quad [\text{kPa}],$$

m [kPa/m] – według Poulosa (1989):

- dla luźnych piasków $m \approx 1000$ kPa/m.
- dla średnio zagęszczonych piasków $m \approx 3000$ kPa/m.
- dla zagęszczonych piasków $m \approx 6000$ kPa/m.

Można również wykorzystać istniejące dane archiwalne z rozpoznania geologicznego w rozpatrywanym rejonie. Najczęściej dysponujemy tylko dokumentacją geotechniczną wraz z wynikami badań geotechnicznych podłoża gruntowego, które ograniczają się do określenia rodzaju gruntu, stanu gruntu i modułów edometrycznych. Podane wartości modułów odkształcenia zwykle odnoszą się do górnych warstw podłoża. Z tego względu, wartości modułów edometrycznych M_0 dla fundamentu zastępczego należy wyznaczać z uwzględnieniem wpływu głębokości według Fox’a (1948), $M_0(h_p) = M_0/\mu_d$ (μ_d - współczynnik korekcyjny ze względu na zagłębienie).

Metody teoretyczne stanowią bardzo szeroką grupę metod, do których można zaliczyć:

- metody bazujące na rozwiązaniach teorii sprężystości;
- metody wykorzystujące zależności rozkładu naprężenia w otoczeniu pała oraz krzywe transformacyjne;
- tody hybrydowe łączące różne rozwiązania teoretyczne;
- metodę współczynników wpływu;
- metody numeryczne takie jak MES i MEB.

Przy właściwych założeniach metody, zastosowaniu odpowiedniego modelu współpracy *pal-grunt-pal*, przy przyjęciu racjonalnych wielkości parametrów mechanicznych oddziałujących wzajemnie na siebie ośrodków oraz przy zastosowaniu współczesnych technik obliczeniowych możliwe jest stworzenie „narzędzia” obliczeniowego, za pomocą którego uzyskamy racjonalne wartości osiadania pali przy dowolnym obciążeniu i dowolnym układzie pali w grupie.

Metoda obliczania osiadania pali w grupie powinna umożliwiać uzyskanie krzywej osiadania dowolnego pała w szerokim zakresie obciążenia oraz uwzględniać dowolne uwarstwienie podłoża gruntowego. Takie wymagania zawarł się również w Eurokodzie 7. Metodę obliczeniową spełniającą wymienione kryteria opracowano w ramach tematu badawczego (Dyka, 2001) i przedstawiono w kilku wcześniejszych pracach (Gwizdała, Dyka, 2001a, 2001b, 2002). Metoda ta została zweryfikowana w świetle wykonywanych analiz osiadań wielu rzeczywistych obiektów posadowionych na palach (Dyka, Gwizdała, Tejchman, 2000; Tejchman i inni, 2001).

3.2. Zagadnienia związane z obliczaniem osiadania pali w grupie metodami teoretycznymi

W analizach obliczeniowych, gdy mamy do czynienia z zagadnieniami kontaktu kilku ośrodków, często o charakterystykach nieliniowych, szczególną uwagę należy zwrócić na właściwe określenie parametrów mechanicznych.

O wyborze odpowiednich wartości parametrów decydują nie tylko cechy materiałów biorących udział w zagadnieniu, ale także rodzaj stosowanej metody obliczeniowej wraz z jej założeniami i ograniczeniami.

Jeśli korzystamy z rozwiązań teorii sprężystości, głównym parametrem mechanicznym wykorzystywanym w analizach przemieszczeń jest moduł odkształcenia ogólnego gruntu E lub moduł ścinania G , między którymi zachodzi relacja:

$$E = 2G(1 + \nu), \quad (4)$$

gdzie: ν – współczynnik Poisson’a dla ośrodka gruntowego.

Analizy obliczeniowe dotyczą najczęściej przemieszczeń całkowitych, po zakończeniu procesu konsolidacji podłoża. Dlatego stosuje się parametry mechaniczne określonych dla warunków „z drenażem” (*drain*).

Wartości modułów odkształcenia gruntu można wyznaczyć na podstawie empirycznych korelacji z innymi parametrami wyznaczonymi w badaniach laboratoryjnych lub badaniach terenowych np. CPT, CPTU, SCPTU, SPT, DMT, DLT lub w wyniku analizy wstecznej próbnych obciążeń pali.

Zależności korelacyjne określone na podstawie wyników różnych badań modelowych i terenowych dotyczą zwykle modułów siecznych dla obciążeń zawierających się między 1/3 a 1/2 nośności granicznej pała. Osiedlenia obliczone dla tak określonych modułów odkształcenia odpowiadają tylko takim naprężeniom w gruncie, w zakresie których moduły były wyznaczane. W tych procedurach obliczeniowych zakłada się liniową zmienność modułu odkształcenia.

Zależność quasi-liniowa między przemieszczeniami i obciążeniem obserwowana jest dla pali, których nośność uzyskiwana jest głównie dzięki oporowi tarcia wzdłuż pobocznicy (pale tarciove). W większości przypadków, gdy pale nośność uzyskują zarówno dzięki mobilizowanemu tarcia na pobocznicy jak i oporowi pod podstawą, nie można zaniedbać krzywoliniowego charakteru zależności między przemieszczeniem i obciążeniem. Nieliniowość ta wynika nie tylko z charakterystyki pracy podłoża gruntowego, ale również ze zjawisk zachodzących w strefie kontaktu między palem a gruntem. Już w początkowym stanie naprężenia, wskutek przekroczenia oporów granicznych, wyłączają się z pracy górne odcinki pobocznicy pali. W ten sposób rośnie wielkość obciążenia przekazywana przez dolne części pali oraz podstawę. Dodatkowo, mamy do czynienia ze zmianą modułu odkształcenia gruntu wraz ze zmianą stanu naprężenia (odkształcenia). Zmienność ta powinna być rozpatrywana co najmniej w strefie kontaktu pała z gruntem. Oddziaływanie między palami, ze względu na niewielkie odkształcenia występujące w tej strefie, może być traktowane, jak w ośrodku liniowo-sprężystym.

W opracowanej metodzie (Dyka, 2001), która uwzględnia nieliniowo sprężysto – plastyczny model pracy pała w gruncie stosuje się wartość stytną modułu odkształcenia postaciowego G , zmiennego według funkcji hiperbolicznej. Konieczna jest znajomość wartości modułu początkowego G_{max} dla małych odkształceń.

Korzyści wynikające ze stosowania początkowego modułu odkształcenia postaciowego są następujące:

- sztywność gruntu przy małych odkształceniach jest taka sama dla statycznego i dynamicznego obciążenia,
- wartość G_{max} jest niezależna od warunków odpływu wody (*drain/undrain*),
- wartość G_{max} jest względnie niewrażliwa na stopień prekonsolidacji zarówno gruntów niespoistych jak i spoistych.

Wartość modułu G , odpowiadająca odkształceniom normalnym $\epsilon = 10^{-4} \div 10^{-3} \%$ może być wyznaczona w badaniach laboratoryjnych w kolumnie rezonansowej lub na podstawie pomiaru prędkości akustycznej fali poprzecznej w próbce gruntu przy wykorzystaniu związków liniowej teorii sprężystości:

$$G = \rho_s \cdot v_s^2, \quad (5)$$

gdzie: ρ_s – gęstość gruntu próbki,

v_s – prędkość fali poprzecznej w próbce gruntu.

Wartość modułu G_{max} można również określić za pomocą badań geofizycznych wykonywanych w otworach wiertniczych, sond wyposażonych w specjalną końcówkę do pomiarów sejsmicznych (np. SCPTU) lub na podstawie istniejących wzorów korelacyjnych z innymi wynikami badań, np. CPTU (Gwizdała, Dyka, Stęczniwski, 2002).

Zmienność modułu odkształcenia opisywana jest najczęściej funkcją hiperboliczną. Funkcja ta może mieć różną postać. Fahey i Carter (1993) dla opisu zachowania gruntów zaproponowali funkcję hiperboliczną w postaci:

$$G/G_{max} = 1 - (p/p_f)^{0.3}, \quad (6)$$

gdzie: G_{max} – początkowy moduł odkształcenia,

p – mobilizowany opór gruntu,

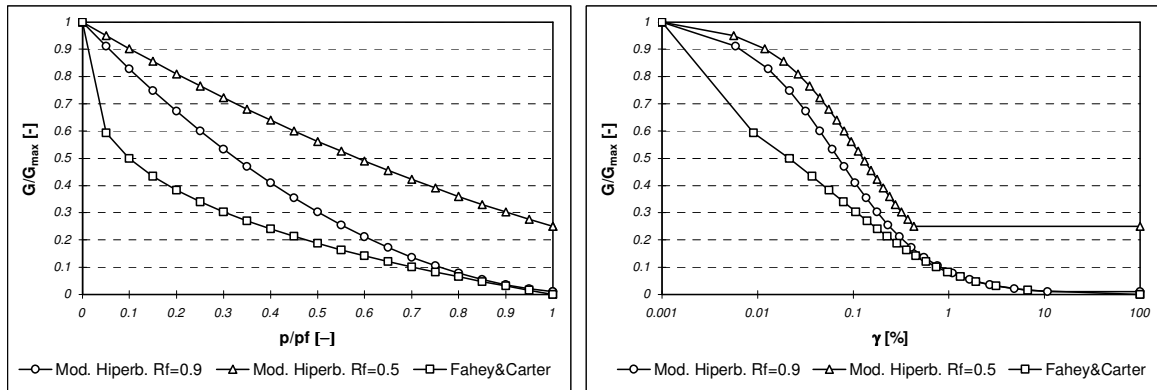
p_f – graniczny opór gruntu (w chwili zniszczenia).

W opracowanej metodzie zastosowano funkcję hiperboliczną w postaci:

$$G/G_{max} = \left(1 - \frac{p \cdot R_f}{p_f} \right)^2, \quad (7)$$

gdzie: R_f – stała (współczynnik) funkcji hiperbolicznej.

Na rys. 12 przedstawiono krzywe degradacji modułu odkształcenia postaciowego G według równań (6) i (7). Przedstawione zależności umożliwiają modelowanie zachowania się pali pod obciążeniem, gdzie p_f jest granicznym oporem gruntu: dla pobocznicy $q_f \equiv q$, dla podstawy $\tau_f \equiv t$.

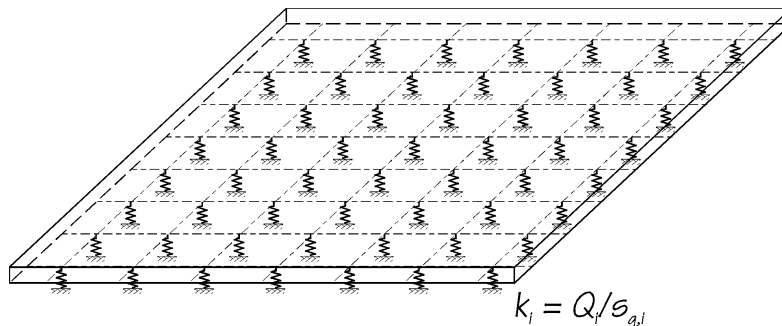
Rys. 12. Krzywe degradacji modułu odkształcenia postaciowego G

W opracowanej metodzie pojedyncza warstwa podłoża gruntowego charakteryzowana jest przez:

- graniczny, jednostkowy opór poboczniczy pała τ_f ,
- graniczny, jednostkowy opór pod podstawą pała q_f ,
- początkowy moduł odkształcenia postaciowego G_{max} ;
- współczynnik Poissona ν .

Wartości oporów granicznych można przyjmować według PN-83/B-02482 „Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych”. Wartości określone za pomocą normowych tabel jednostkowych oporów t i q będą znajdować się po stronie bezpiecznej, generalnie zaniżając graniczne wartości oporów. Dla lepszego odwzorowania charakterystyk mechanicznych pracy pali można wykorzystać inne istniejące zależności (Gwizdała, 1996; Gwizdała, Dyka, Stęczniewski, 2002).

Współczynnik Poisson'a ν dla gruntu określany jest jak dla gruntów w warunkach „z drenażem”. Jego wartość jest potrzebna dla uwzględnienia oddziaływania między palami w grupie. W opracowanej metodzie wykorzystuje się rozwiązanie teorii sprężystości dla pionowego przemieszczenia punktu znajdującego się wewnątrz półprzestrzeni sprężystej spowodowanego działaniem siły przyłożonej w innym punkcie tej półprzestrzeni (rozwiązanie Mindlina). Ze względu na małe odkształcenia w gruncie występujące w zagadnieniu oddziaływania między palami, przyjęto model liniowo-sprężysty i moduł odkształcenia dla małych odkształceń (E_{max} lub G_{max}).



Rys. 13. Schemat do obliczeń osiadań grupy pali jako płyty na podporach sprężystych

Za pomocą autorskiego programu komputerowego OSPAL na podstawie własnej metody otrzymuje się wartości osiadań poszczególnych pali w grupie. Pale obciążone są siłami skupionymi. Jest to rozwiązanie dla grupy pali z oczepek wiotkim. Dla uwzględnienia rzeczywistej sztywności oczepu zwiężczającego pale, można zastosować procedurę iteracyjną.

Pojedynczy krok obliczeń obejmuje:

- obliczenie osiadań pali w grupie $s_{g,i}$ dla określonych obciążeń na pał Q_i , przy założeniu wiotkiego oczepu;
- obliczenie konstrukcji (oczep + nadbudowa) współpracującej z palami na liniowych podporach sprężystych w miejscu pali (rys. 13) o współczynnikach sprężystości k_i wynikających z obliczeń osiadań w kroku (I);
- obliczenie osiadań pali w grupie dla obciążeń na pał równych wartościom reakcji podpór sprężystych wyznaczonym w kroku (II).

3.3. Monitoring osiadania fundamentów palowych

Na etapie wykonawstwa pali, bieżącą kontrolę jakości wykonania zapewniają różnego rodzaju badania pali pojedynczych: próbne obciążenia statyczne i dynamiczne lub kontrola parametrów rejestrowanych w trakcie wykonywania pala (opory wbijania, wiercenia, ciśnienie mieszanki betonowej itp.). Otrzymywane wyniki stanowią podstawę do korekty założeń przyjętych w projekcie i pozwalają na dokonanie w nim zmian.

W odniesieniu do pali w grupie badania na etapie wykonywania pali nie są możliwe do przeprowadzenia bez zaangażowania bardzo dużych środków i bez konieczności zastosowania wyrafinowanych technik. Z tego względu najlepszym, a jednocześnie angażującym najprostsze środki, jest bieżąca kontrola przemieszczeń fundamentów palowych pod obciążeniem eksploatacyjnym. Takie rozwiązanie pozwala na szybką reakcję w przypadku stwierdzenia nadmiernych przemieszczeń fundamentu. Gdy fundament jest już wykonany, a obiekt najczęściej jest w trakcie eksploatacji, musimy liczyć się z zastosowaniem specjalnych technologii wzmacniania fundamentów.

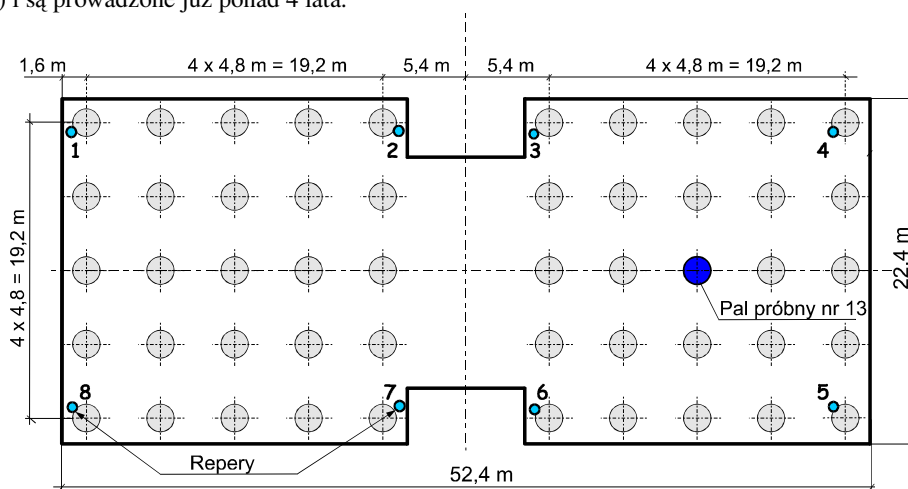
Mierzone wielkości przemieszczeń wykonanych obiektów najczęściej mieszczą się w dopuszczalnych granicach. Jednak oprócz kontroli przemieszczeń fundamentu ważniejszym celem prowadzenia bieżących pomiarów jest tworzenie bazy danych, która umożliwiłaby szczegółowe analizy obserwowanych osiadań w odniesieniu do warunków geotechnicznych, wielkości obciążeń, rodzaju pali, wymiarów, rodzaju konstrukcji itp.

Ważność prowadzenia takiego monitoringu potwierdzana jest przez wielu badaczy na całym świecie. Poulos (2003) stwierdza, że im więcej różnych obiektów jest monitorowanych pod kątem kontroli przemieszczeń ich fundamentów, tym skuteczniej można dopasować teorię i metody projektowania do rzeczywistego zachowania się tego rodzaju posadowień. Dopóki takich analiz nie będzie się prowadzić, nie będzie możliwe osiągnięcie dostatecznej zgodności między mierzonymi i obliczonymi osiadaniami a także między mierzonymi i obliczonymi wielkościami i dystrybucją obciążeń poszczególnych pali fundamentu. Należy nadmienić, że są to słowa autora metody obliczania osiadania pali pojedynczych i w grupie, która zawarta jest w PN-83/B-02482. Metoda ta oparta jest wyłącznie na zależnościach teoretycznych i jak już stwierdzono wielokrotnie powoduje nieracjonalne zawyżanie obliczonego osiadania.

Program monitoringu osiadań fundamentów palowych jest realizowany w Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej (Zespół badawczy: Tejchman A., Gwizdała K., Dyka I., Świniański J., Krasiński A., 2001), był podstawą opracowania własnej metody obliczeń osiadania pali pojedynczych i w grupie (Dyka, 2001; Gwizdała, Dyka, 2001). W ramach tego programu pomiary wykonuje się metodami geodezji precyzyjnej począwszy od stanu początkowego budowy (zabetonowanie fundamentu). Badania są prowadzone przez wiele lat, w trakcie budowy oraz w trakcie normalnej eksploatacji. Wyniki pomiarów umożliwiły ocenę postępu osiadań fundamentów w czasie narastających obciążeń, a także porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń za pomocą istniejących metod i metody własnej.

Jednym z monitorowanych obiektów mostowych pod kątem kontroli osiadania fundamentów podpór jest Most III Tysiąclecia im. Jana Pawła II przez Martwą Wisłę w Gdańsku. Projektantem mostu było Biuro Projektów Budownictwa Komunalnego S.A. w Gdańsku. Most zaprojektowano o konstrukcji podwieszanej z jednym pylonem. Pomost mostu składa się łącznie z sześciu przęseł, z których najdłuższe przęsło ma długość 230 m.

Pomiary osiadania wykonywano od stanu początkowego budowy poszczególnych podpór (po zabetonowaniu fundamentu) i są prowadzone już ponad 4 lata.



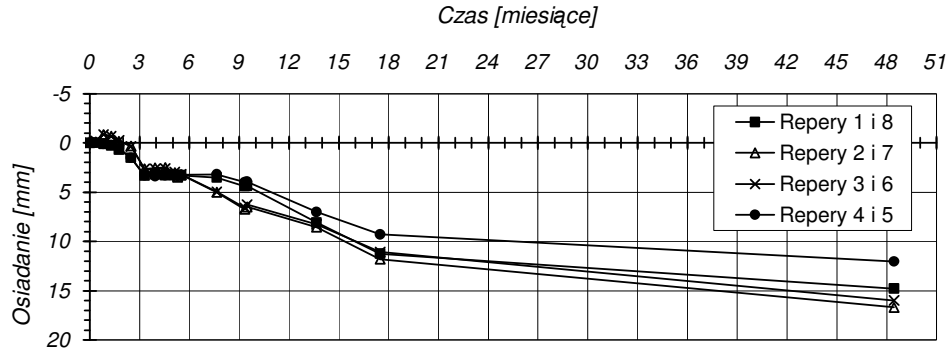
Rys. 14. Plan fundamentu pylonu mostu przez Martwą Wisłę w Gdańsku

Na rys. 14 przedstawiono rozmieszczenie ośmiu specjalnych reperów geodezyjnych na fundamencie pylonu. Zainstalowane repery wraz z aparaturą do pomiarów precyzyjnych umożliwiają pomiar geodezyjny z dokładnością 0,3 mm. Pylon, główna podpora mostu usytuowana jest na wschodnim brzegu rzeki. Konstrukcja pylonu jest

żelbetowa o wysokości 99,89 m. Fundament pylonu stanowi masywny blok żelbetowy posadowiony na palach wierconych ϕ 1800 mm i długości 30 m. Pale rozmieszczono w dwóch siatkach kwadratowych po 25 pali w rozstawach osiowych 4,8 m.

Pierwszy pomiar „0” wykonano 31 marca 2000 roku po zabetonowaniu bloku fundamentowego wieńczącego pale pod pylonem.

Na rys. 15 przedstawiono wyniki pomiarów osiadań fundamentu w czasie. Mierzone osiadania podpory są wartością względną, przedstawiającą przyrost osiadania fundamentu od chwili wykonania pierwszego pomiaru „0”. Zwraca się uwagę, że ciężar masywnego bloku fundamentowego stanowi około 35 % całego obciążenia pali. Z tego względu wyniki pomiarów na rys. 4 należy odnosić do stanu częściowego obciążenia pali.



Rys. 15. Przebieg osiadań fundamentu w czasie – Pylon Mostu Sucharskiego
(wartości średnie dla dwóch reperów, odniesione do pomiaru „0”)

Korzystając z istniejącej dokumentacji geotechnicznej i projektowych wykonano szczegółową analizę obliczeniową dotyczącą osiadań fundamentu pylonu. W pierwszym etapie wykonano obliczenia za pomocą najczęściej stosowanych metod obliczania osiadań pali w grupie. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 2 i 3.

Tablica 2. Zestawienie zbiorcze wyników obliczeń dla metody fundamentu zastępczego

Metoda obliczeń	Warianty	Osiadanie fundamentu [mm]		
		stały moduł	model Gibsona	
		(m = 0)	m = 3000 kPa/m	m = 6000 kPa/m
Fundament zastępczy wg PN-83/B-02482	bez wsp. Fox'a	71,8	53,2	44,0
	ze wsp. Fox'a	52,4	38,8	32,1
Program OSFUZA fundament palowy	bez wsp. Fox'a	78,7	60,4	51,3
	ze wsp. Fox'a	57,5	44,1	37,5
Fundament zastępczy wg Tomlinsona		56,7	–	–

Tablica 3. Zestawienie zbiorcze wyników obliczeń dla metod teoretycznych

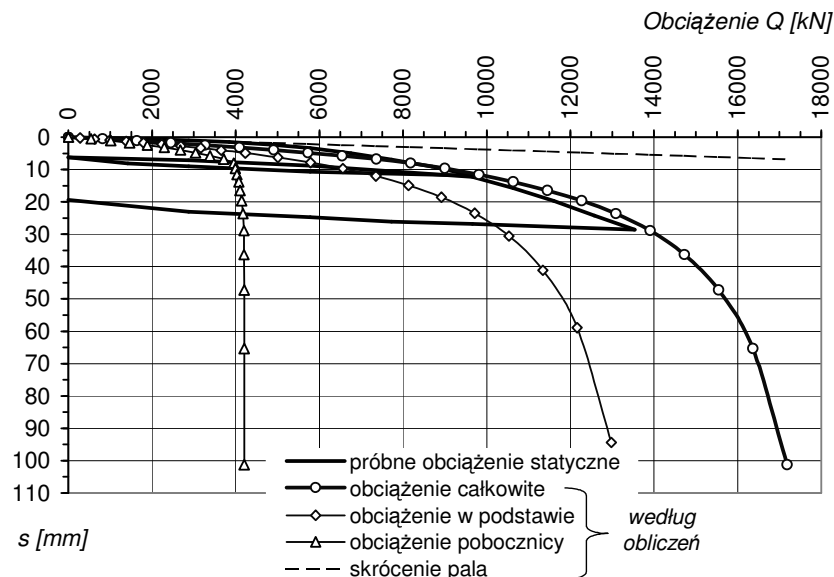
Metoda obliczeń		Osiadanie fundamentu [mm]
Metoda Poulos'a wg PN-83/B-02482	moduły odksz. zgodnie z dokumentacją	133
	z uwzgl. wyników próbnego obciążenia	118
Wzór Randolph'a		93,5
Metoda Chow'a		110
Metoda współczynników wpływu obliczonych wg Chow'a		134

Współczynnik Fox'a w metodzie fundamentu zastępczego uwzględnia zagłębienie fundamentu zastępczego odpowiadające głębokości osadzenia pali.

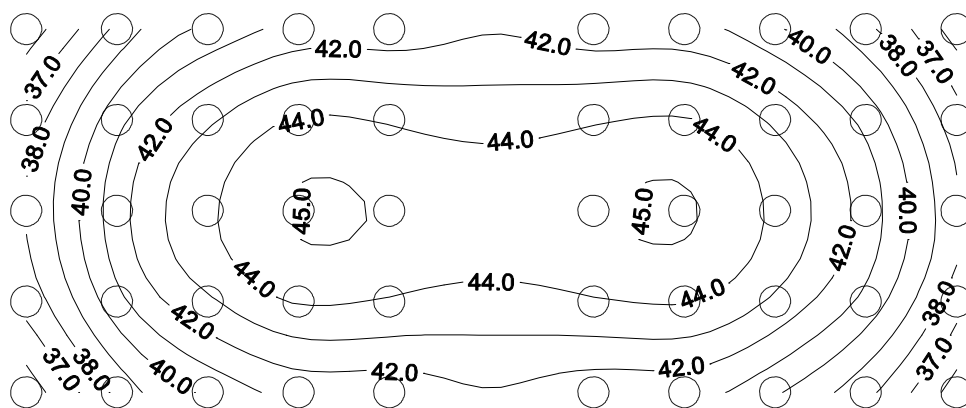
Osiadanie obliczone wyżej wymienionymi metodami jest to całkowite, końcowe osiadanie odpowiadające maksymalnej wielkości obciążenia charakterystycznego. Wartość tego obciążenia oszacowano jako 480 MN. Z danych otrzymanych od projektanta wynika, że ciężar bloku żelbetowego wieńczącego pale wynosi około 165 MN, a ciężar pylonu (bez lin) 51 MN.

Następnie, po opracowaniu autorskiej metody obliczania osiadań pali w grupie (Dyka, 2001), wykonano obliczenia sprawdzające. Za pomocą programu komputerowego OSPAL opartego na opracowanej metodzie obliczeniowej, otrzymano krzywą osiadania pala pojedynczego przedstawioną na rys. 16.

Opracowana metoda obliczania osiadań pali umożliwia również określenie obciążenia przejmowanego przez pobocznice i podstawę, rozkład opór wzdłuż długości pala oraz skrócenie pala, zarówno pala pojedynczego jak i w grupie, rys. 16. Ponadto, można ocenić rozkład siły w palu z głębokością przy poszczególnych stopniach obciążenia.



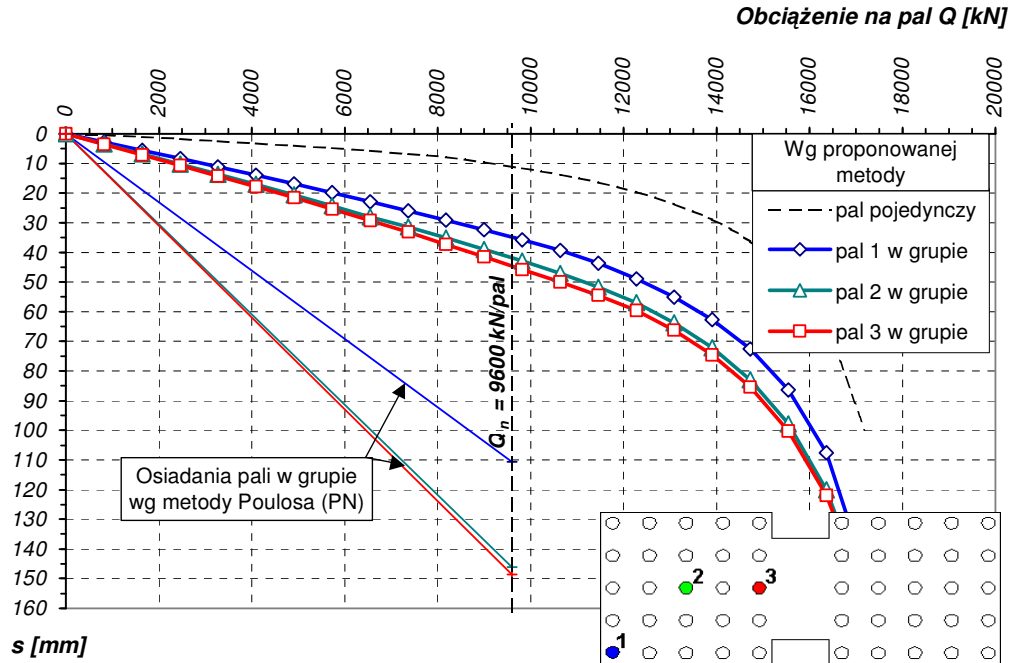
Rys. 16. Krzywe osiadania dla pala pojedynczego, wg próbnego obciążenia i wg obliczeń (rozdziół obciążenia na pobocznice i podstawę)



Rys. 17. Mapa osiadań pali pracujących w grupie w [mm] dla obciążenia charakterystycznego $Q_n = 9600$ kN/pal (obliczone za pomocą opracowanego programu komputerowego OSPAL)

Jako wynik obliczeń osiadań pali w grupie uzyskuje się przemieszczenie poszczególnych pali dla określonego poziomu obciążenia. Na rys. 17 przedstawiono mapę osiadań pali w grupie, obliczonych za pomocą opracowanej metody. Mapy rozkładu osiadania pali można wykreślić dla dowolnego układu obciążenia poszczególnych pali.

Otrzymuje się również krzywą osiadania dla dowolnego pala w grupie z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania pali. Na rys. 18 przedstawiono krzywe dla trzech różnych pali w fundamencie pylonu. Dla porównania zamieszczono także „krzywe osiadania” określone za pomocą metody Poulosa.

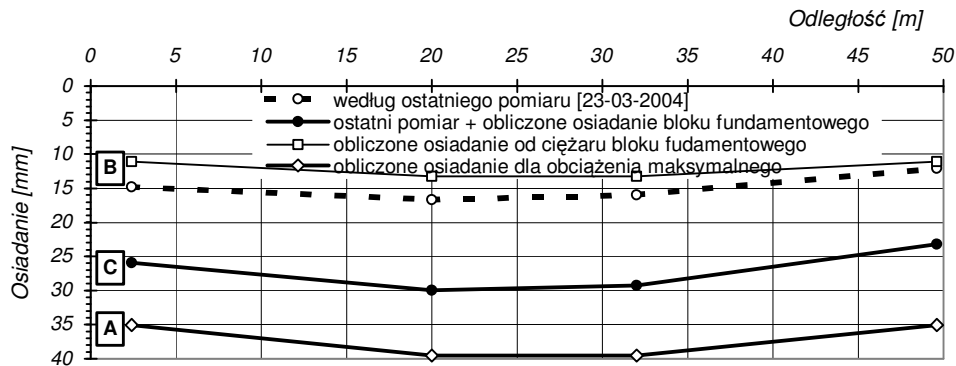


Rys. 18. Krzywe osiadania pali w grupie

Dla danego obciążenia można określić profil podłużny osiadań całego fundamentu. Na rys. 19 przedstawiono profil podłużny osiadań fundamentu wzdłuż dłuższych krawędzi (patrz rys. 14).

Krzywa A przedstawia obliczony profil podłużny osiadań fundamentu dla maksymalnego przewidzianego obciążenia charakterystycznego: 9600 kN/pal.

Profil B przedstawia obliczone osiadanie fundamentu od obciążenia ciężarem bloku fundamentowego.



Rys. 19. Profile podłużne osiadań fundamentu – pylon Mostu Sucharskiego

Na rysunku przedstawiono również profil wynikający z pomiarów osiadań, pamiętając jednak, że pierwszy pomiar „0” wykonano po zabetonowaniu bloku fundamentowego wieńczącego pale a charakterystyczny ciężar bloku wynosi 165 MN, co stanowi około 1/3 całkowitego obciążenia pali.

Profil C wynika z sumy wartości pomierzonych osiadań i obliczonego osiadania bloku fundamentowego.

Średnia wartość osiadania dla dłuższej krawędzi fundamentu wynosi:

- według proponowanej metody: 38,0 mm,
- według pomiarów geodezyjnych: 29,0 mm.

Powyższe wyniki świadczą o dostatecznej zgodności między osiadaniami otrzymanymi opracowaną metodą i wartościami pomierzonymi, świadcząc jednocześnie o dokładności metody i poprawności przyjętych założeń.

4. PODSUMOWANIE

W projektowaniu fundamentów palowych, w rozwiązywaniu praktycznych zagadnień, wykorzystuje się metodę stanów granicznych, a w szczególności stan graniczny nośności.

Pojęcie nośności pala lub grupy pali zawiera w sobie szereg niejednoznaczności i w efekcie sprawia trudność precyzyjnego określenia pracy fundamentu. Obecnie większą uwagę należy zwrócić na analizę posadowień z uwzględnieniem odkształcalności fundamentów palowych i w praktyce projektowej główny ciężar obliczeń przenieść na kryterium dopuszczalnych przemieszczeń kosztem mniejszej uwagi, jaką poświęca się nośności pali (Poulos, 2003; Randolph, 2003).

W szczególności dotyczy to grup palowych dla posadowienia budynków lub obiektów mostowych, dla których najistotniejszą wielkością jest przemieszczenie pod obciążeniem eksploatacyjnym.

Z drugiej strony, w ostatnim dziesięcioleciu zaznaczył się szybki rozwój metod obliczeniowych i badawczych służących racjonalnemu projektowaniu pali i fundamentów palowych. Postęp ten był możliwy dzięki umiejętnemu połączeniu teorii i eksperymentu. W artykule autorzy zaprezentowali badania w tej dziedzinie uwzględniając światowe osiągnięcia, wyniki własnych badań i analiz oraz współczesne potrzeby.

Opracowane procedury i metody obliczeń zostały zweryfikowane na podstawie wyników próbnych obciążeń pali pojedynczych oraz wieloletniego monitoringu przemieszczeń wybranych obiektów posadowionych na palach. Porównanie osiadań otrzymanych przy użyciu metod obliczeniowych z osiadaniami pomierzonymi na rzeczywistych obiektach okazuje się niezwykle ważne. Nie można oddzielić rozwiązań teoretycznych od wyników empirycznych. Do opracowania odpowiednich procedur i metod obliczeniowych niezbędny jest obszerny bank danych obejmujący wszystkie, możliwe do odtworzenia informacje dotyczące rozpoznania geotechnicznego podłoża, wyników próbnych obciążeń, rodzaju pali, rozwiązań konstrukcyjnych, obciążeń itp.

Podstawowe znaczenie dla praktycznej weryfikacji obliczeń ma określenie krzywej osiadania dla pala pojedynczego. Rzeczywista krzywa jest najczęściej dostępna dopiero w początkowej fazie robót palowych. Stąd istotne znaczenie dla oceny osiadań pali pojedynczych mają metody analityczne. Wyniki obliczeń przy wykorzystaniu tradycyjnych metod, nawet dla zakresu obciążeń charakterystycznych, obarczone są dużymi niedokładnościami. Wyniki aktualnych analiz wskazują, że wystarczające dla praktyki inżynierskiej dokładności można uzyskać poprzez zastosowanie funkcji transformacyjnych t - z oraz q - z . Bardzo dobre przybliżenie do rzeczywistej krzywej osiadania uzyskuje się na podstawie rozwiązań teoretycznych z uwzględnieniem zmiany modułu odkształcenia w każdym kroku obliczeniowym.

Opracowana metoda obliczeń dla pali w grupie umożliwia wyznaczenie krzywej osiadania pala pojedynczego oraz dowolnego pala pracującego w grupie w szerokim zakresie obciążenia. Otrzymane wyniki umożliwiają także obliczenia statyczne konstrukcji fundamentu z uwzględnieniem podatności pali, które można potraktować jako podpory dla całej konstrukcji. Stosując tę metodę otrzymuje się reakcje podpór sprężystych pod fundamentem, które następnie wykorzystuje się do ponownego obliczenia osiadań proponowaną metodą. Uwzględniając rzeczywistą sztywność oczipu fundamentu oraz nadbudowy uzyskuje się dokładniejszy obraz rozkładu naprężeń w konstrukcji oraz bliższy rzeczywistości rozkład obciążeń na poszczególne pale.

Ważnym problemem jest określenie parametrów mechanicznych gruntu dla współpracy między palami. Wykonane analizy obliczeniowe i porównawcze potwierdziły tezę, że oddziaływanie między palami odbywa się w zakresie małych odkształceń ośrodka gruntowego. Moduł odkształcenia dla małych odkształceń wyznacza się na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej w gruncie. Do tego celu wykorzystuje się badania laboratoryjne w zmodyfikowanym aparacie trójosiowego ściskania, w kolumnie rezonansowej lub badania metodami geofizycznymi in situ. Można także wykorzystywać korelacje z wynikami innych badań, np. z wynikami sondowań statycznych, dynamicznych, dylatometrycznych lub presjometrycznych.

Należy dodać, że przy takich zagadnieniach, jak współpraca pali z podłożem gruntowym wraz z oddziaływaniem między palami, należy wykorzystywać wszystkie dostępne wyniki badań podłoża i pali. Bardzo efektywne w głębokim rozpoznaniu podłoża gruntowego są wyżej wymienione sondowania. Mają one szczególne znaczenie w przypadku fundamentów palowych, gdzie zasięg oddziaływania wywołanych naprężeń sięga bardzo dużych głębokości. Badania te wykonywane są w warunkach in situ, dla naturalnego stanu naprężenia, uziarnienia, przy zachowaniu naturalnej wilgotności. Trzeba więc dążyć do tego, aby badania geotechniczne z zastosowaniem sondowań stały się powszechną praktyką przy geotechnicznym rozpoznaniu podłoża gruntowego. Pomimo wytycznych znajdujących się w normie PN-B-02479:1998 „Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne”, badania takie wciąż nie są zbyt częste w praktyce.

W wyniku prac badawczych i analitycznych potwierdzono także zasadność i celowość prowadzenia monitoringu przemieszczeń fundamentu na etapie trwania budowy, jak i w trakcie wieloletniej eksploatacji. Otrzymany na tej podstawie materiał stanowi doskonałe źródło wiedzy o współpracy fundamentów z podłożem, a także materiał naukowy służący tworzeniu bardziej racjonalnych metod obliczeniowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Batterfield, R., Banerje, P.K. (1971). The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Geotechnique* 1971, No. 1, March.
2. Bolt, A., Gwizdała, K. (1986). Analiza osiadań podpór mostowych posadowionych na palach. *Konf. Naukowo-Techniczna nt. Podpory i fundamenty mostów*, Szczecin, rys. 1, tab. 3, bibliogr. 3 poz., s. 58-67, 1986.
3. Bzówka, J. (2001). Obliczeniowy model pala wykonanego techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej (jet-grouting). *Praca doktorska*. Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Gliwice, grudzień 2001r.
4. Dyka, I. (2001). Analiza i metoda obliczeń osiadania grupy pali. *Praca doktorska*, Politechnika Gdańska, czerwiec 2001.
5. Dyka, I., Gwizdała, K., Tejchman, A. (2000). Zagadnienie osiadania grup palowych. *Materiały XII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania*, Szczecin-Międzyzdroje, 18-20 maja 2000.
6. Ellison, R.D. (1969). An analitical study of the mechanics of single pile foundations. 1969. Ph. D. Disseration, Carnegie – Mellon University, Pittsburg.
7. Fahey, M., Carter, J.P. (1993). A finite element study of the pressuremeter test in sand using a non-linear elastic plastic model. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, s. 348-362.
8. Fleming, W.G.K. i inni. (1994). Piling Engineering. New York and Toronto: *John Wiley & Sons* 1994.
9. Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of an uniformly loaded area at depth below the ground surface. *Proc. 2-nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, 1948, Vol. 1, s. 129-132.
10. Gwizdała K. (1996). Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, Nr 532, Budownictwo Wodne Nr 41, Gdańsk, 1996.
11. Gwizdała, K., Dyka, I. (1998). Metody obliczeń osiadania dużych grup palowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 5/1998.
12. Gwizdała, K., Dyka I. (2001a). Ocena wielkości osiadań pali w grupie. *Materiały XLVII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, Opole-Krynica, wrzesień 2001.
13. Gwizdała, K., Dyka, I. (2001b). Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 12/2001, s. 729-733.
14. Gwizdała, K., Dyka, I. (2002). Estimation of settlements of piles in group. *Proceedings of the 9th Conference on Piling and Deep Foundations*, Nice, 3/4/5 June 2002
15. Gwizdała, K., Dyka, I., Stęczniewski, M. (2002). Sondowanie statyczne w projektowaniu fundamentów palowych. *Materiały XLVIII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB*, Opole-Krynica, wrzesień 2002.
16. Gwizdała K., Stęczniewski M. (2004). Obliczanie nośności i osiadań pali Vibro na podstawie testu statycznego sondowania. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 6/2004 (w druku).
17. Gwizdała, K., Stęczniewski, M. (2003). Calculation of load-settlement curve based on CPT test results. *Proceedings of the 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Pils*. Ghent, Belgium, 2-4 June 2003, s. 191-195.
18. Meissner, H., Shen Y.I. (1992). Soft soils below the base of a bored pile. *Geotechnique et International*, s. 137-444.
19. Poulos, H.G. (1989). Pile behaviour - theory and application. *Geotechnique*, Vol. 39, No. 3/1989, s. 365-415.
20. Poulos, H.G. (2003). Deep foundations – Can further research assist practice? *Proceedings of the 4-th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ghent, Belgium, 2-4 June 2003, Millpress, Rotterdam 2003.
21. Poulos, H.G., Davis, E.H. (1980). Pile foundation analysis and design. New York: *John Wiley and Sons* 1980.
22. Randolph, M.F. (1994). Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts. *Proceedings 13-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, 1994, Vol. V, s. 61-82.
23. Randolph, M.F. (2003). Science and empiricism in pile foundation design. *Geotechnique*, Vol. 53, No 10, s. 847-875.

24. Randolph, M.F., Wroth, C.P. (1978). Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No GT12, December 1978, s. 1465-1488.
25. Stęczniewski, M. (1996). Przegląd metod badań in situ w zastosowaniu do pali. Katedra Geotechniki Politechniki Gdańskiej. *Praca przejściowa w ramach Studium Doktorskiego* (opiekun naukowy K. Gwizdała).
26. Stęczniewski, M., Gwizdała, K. (2003). Obliczanie nośności i osiadania pali pojedynczych na podstawie badań sondą statyczną CPT. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*. Seria: Budownictwo, z. 97. XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Szczyrk, czerwiec 2003, s. 267-278.
27. Stęczniewski, M. (2003). Ocena nośności pali na podstawie badań sondą CPT. *Praca doktorska*, Politechnika Gdańska, czerwiec 2003.
28. Tejchman, A., Gwizdała, K., Dyka, I., Świniański, J., Krasiński, A. (2001). Nośność i osiadanie fundamentów palowych. *Monografia*, Politechnika Gdańska.
29. Terzaghi, K., Peck, R.B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. *John Willey and Sons*, New York.
30. PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
31. Eurocode 7 1993, 1994. Geotechnical Design General Rules, Pile Foundations.