

METODY OBLICZEŃ OSIADANIA DUŻYCH GRUP PALOWYCH

Dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, mgr inż. Ireneusz Dyka

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Geotechniki

W projektowaniu nabrzeży, pirsów, terminali przeładunkowo-składowych i innych portowych obiektów hydrotechnicznych spotykamy się najczęściej z zagadnieniem posadowienia na palach. Nierzadko trzeba się liczyć z tym, że projektowany fundament będzie posadowiony na dużej liczbie pali. Mogą to być grupy o bardzo różnych kształtach, zbliżonych do prostokąta, kołowych lub wydłużonych. Zwykle są to bardzo odpowiedzialne budowle i wymagają one dokładnych obliczeń zarówno nośności, jak i osiadania fundamentów.

Randolph [18] zwraca uwagę, że podstawowym powodem decyzji o zastosowaniu fundamentu na palach jest konieczność redukcji osiadania projektowanego obiektu. Jednak gdy zapadnie decyzja o zastosowaniu rodzaju pali, to tradycyjnym podejściem w projektowaniu fundamentu palowego jest skupienie się na spełnieniu warunku stanu granicznego nośności. Fakt ten może być częściowo związany z istniejącym na ogół przekonaniem, że problem oszacowania przemieszczeń fundamentów palowych jest dużo bardziej skomplikowany niż określenie ich nośności. W rzeczywistości w przeciągu ostatnich 20 lat nastąpił olbrzymi rozwój różnych analitycznych i numerycznych technik prognozowania zachowania się pali w grupie, głównie dzięki powszechnej dostępności komputerów, systematycznemu poszerzaniu ich możliwości oraz również dzięki rozwojowi metod badań terenowych i coraz obszerniejszemu bankowi danych dotyczących zachowania się istniejących obiektów posadowionych na palach.

Analizując literaturę z zakresu geotechniki zauważa się, że liczba istniejących metod obliczania osiadań zarówno pali pojedynczych ([7]) jak i grup pali jest bardzo duża ([14], [17], [21]). Mogą one różnić się między sobą wieloma czynnikami począwszy od samej idei i głównych założeń (fundament zastępczy, wykorzystanie rozwiązania Mindlina dla półprzestrzeni sprężystej, MES, zależności empiryczne, itp.), a kończąc na rodzaju i liczbie wymaganych parametrów wejściowych. Wszystkie te czynniki wpływają bezpośrednio na stopień skomplikowania procedury obliczeniowej oraz pracochłonność i coraz częściej występuje konieczność stosowania zaawansowanych technik obliczeniowych. Istnieje potrzeba weryfikacji tych metod z rzeczywistymi pomiarami w terenie oraz porównania metod między sobą.

Obiekty posadowione za pośrednictwem dużych grup pali wskutek wzajemnego przenikania się i nakładania stref naprężeń od poszczególnych pali fundamentu, są szczególnie narażone na zwiększone osiadania. Doświadczenie wykazuje, że osiadanie to jest większe od osiadania pala pojedynczego w identycznych warunkach często o ponad rząd wielkości. Różnorodność i zakres zjawisk związanych z pracą pali w grupie powoduje konieczność stosowania znacznych uproszczeń. Stopień tych uproszczeń rzutuje bezpośrednio na stopień skomplikowania obliczeń i dokładność danej metody.

Generalnie metody stosowane do obliczeń osiadania grup pali można podzielić na trzy grupy:

- metody empiryczne;
- metody oparte na analizach teoretycznych (np. wykorzystujące rozwiązania teorii sprężystości);
- metoda fundamentu zastępczego.

Charakterystyka metod obliczania osiadania grup pali

Metody empiryczne

Osiadanie grupy palowej s_G w ogólnej formie można zapisać następująco:

$$s_G = s_p \cdot R \quad (1)$$

gdzie:

s_p - osiadanie pala pojedynczego dla tych samych warunków obciążenia i posadowienia;

R - współczynnik uwzględniający wzrost osiadania grupy palowej w stosunku do osiadania pala pojedynczego.

Wynika z tego, że mając określone osiadanie pala pojedynczego można w przybliżony sposób wyznaczyć osiadanie grupy pali, pod warunkiem że znany jest współczynnik R .

Tablica 1. Zestawienie wzorów empirycznych do obliczania współczynnika R .

Autor	Wzór	Objaśnienia	Uwagi i zakres stosowalności
Skempton, Yassin, Gibson [21]	$R = \frac{(4B + 3)^2}{(B + 4)^2}$	B – szerokość grupy pali	Na podstawie obserwacji terenowych; pale wbijane w gruntach niespoistych
Meyerhof [11]	$R = \frac{\frac{r}{D} \left(5 - \frac{r}{3D} \right)}{(1 + 1/n)^2}$	r - osiowy rozstaw pali, D - średnica pala, n - liczba rzędów pali ekwiwalentnej grupy kwadratowej.	Na podstawie badań modelowych w małej skali; kwadratowe grupy pali wbijanych w gruntach niespoistych
Vesic [15]	$R = \sqrt{\frac{B}{D}}$	B – szerokość grupy palowej D – średnica pali	Na podstawie pomiarów w skali naturalnej.
Berezancew [1]	$R = \frac{\sqrt{A_2}}{\sqrt{A_1}}$	A_1 i A_2 - pola powierzchni podstawy fundamentów zastępczych zgodnie z rys. 1.	
Poulos [14]	$R_s = (R_{25} - R_{16})(\sqrt{n} - 5) + R_{25}$	n - liczba pali, R_{25} - współczynnik dla grupy 25 pali, R_{16} - współczynnik dla grupy 16 pali.	Wartości współczynników na podstawie analiz teoretycznych w postaci stabelaryzowanej (rozwiązanie Mindlina); kwadratowe grupy pali ze sztywnym oczepem
Zalecenia włoskie AGI - 1984 [10]	$R = \left(\frac{1.2B + 2.7}{0.3B + 4} \right)^2$ - pale wbijane $R = \left(\frac{0.6B}{0.3B + 0.3} \right)^2$ - pale wiercone	B – szerokość grupy pali	
Fleming [4]	$R = n^w$	n - liczba pali w grupie, w - wykładnik potęgowy ($w = 0,4 \div 0,6$)	Na podstawie przeprowadzonych analiz obliczeniowych; $L/D > 25$
Van Impe [22]	$R = \left(C_1 + C_2 \frac{r}{D} \right) \frac{3B^2 - r^2 - 2Br}{Br}$	$C_1 = 2,266$; $C_2 = -0,427$; r - osiowy rozstaw pali; B - szerokość grupy pali; D - średnica podstaw pali.	Jeżeli stosunek sumy przekrojów poprzecznych wszystkich pali do przekroju poprzecznego całej grupy spełnia warunek: $\omega = \frac{\sum A_p}{BL} \geq 10\%.$
Mandolini [10]	$R = 0,34 \sqrt{\frac{nL}{r}}$	L - długość pali; n - liczba pali w grupie; r - rozstaw osiowy pali.	Na podstawie 104 udokumentowanych badań modelowych oraz pomiarów terenowych.

Wartości osiadania otrzymane przy użyciu równań zamieszczonych w tabeli 1 należy traktować jako orientacyjne, a dla celów projektowych można wykorzystać inne dokładniejsze metody.

Obecna polska norma dotycząca obliczania fundamentów na palach [26] zaleca prostą, praktyczną metodę opartą na pracach **Poulos'a** [13].

Metoda ta nosi nazwę metody współczynników wpływów (Interaction Factors Method) i opiera się na założeniu, że osiadanie pala i w grupie składającej się z n pali podlega bezpośredniemu nakładaniu się osiadań własnych i osiadań wywołanych przez pozostałe pale w grupie według wzoru:

$$s_i = \sum_{j=1}^n (s_{1j} \cdot Q_j \cdot \alpha_{ij}) \quad (2)$$

gdzie:

s_{1j} – osiadanie pala j pod wpływem jednostkowego obciążenia;

Q_j – obciążenie pala j ;

$\alpha_{ij} = \frac{\Delta s_{ij}}{s_{pi}}$ – współczynnik oddziaływania między palami i oraz j ($\alpha_{ij} = 1$ dla $i = j$);

Δs_{ij} – przyrost osiadania pala i wskutek oddziaływania innego tak samo obciążonego pala j ;

s_{pi} – osiadanie pojedynczego pala i pod wpływem przyłożonego obciążenia.

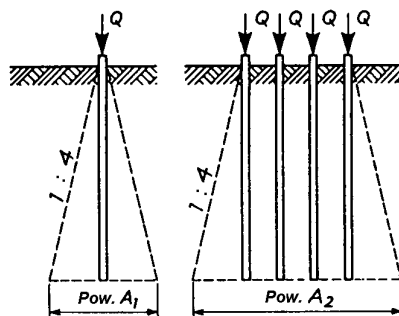
Wartość współczynnika wpływu α wynika z analizy wzajemnego oddziaływania na siebie dwóch pali. Wartości liczbowe uzyskano z rozwiązania Mindlina dla siły działającej wewnątrz półprzestrzeni sprężystej.

Rozpatrując różne warunki geometryczne i gruntowe, wartości α przedstawiono w formie wykresów ([14], [26]). Poszczególne przypadki posadowienia np. występowanie warstwy o skończonej miąższości, poszerzona podstawa pali, wpływ współczynnika Poisson'a czy występowanie warstwy wytrzymałej w poziomie podstawy pali, są uwzględniane poprzez współczynniki korekcyjne. Przedstawiono je w formie wykresów, w funkcji parametrów geometrycznych i gruntowych.

Powyższa metoda wywodzi się z analizy obliczeniowej zależności obciążenie-przemieszczenie dla pali przy wykorzystaniu metody elementów brzegowych, która jest najczęściej wykorzystywana w obliczeniach numerycznych grup pali.

W 1978 roku **Randolph i Wroth** [16] przedstawili własną propozycję określania osiadania pali pojedynczych, a następnie rozszerzyli ją na grupę pali [17]. Sposób analizy osiadania pali zaproponowany przez nich zakłada charakterystyki obciążenie-przemieszczenie osobno dla pobocznic i osobno dla podstawy pala. Wynika to z obserwacji zachowania pali w trakcie badań modelowych, podczas których zwrócono uwagę na różne proporcje obciążenia przypadającego na podstawę i pobocznice dla pali pojedynczych i pali w grupie.

Rozpatrując równania równowagi pionowej stwierdzili oni, że naprężenia styczne w gruncie wokół pobocznicy pala maleją w miarę wzrostu odległości r od pala według równania: $\tau = \tau_0 R_0 / r$. Zakładając, że istnieje pewien skończony promień r_m , przy którym wpływ obciążenia pobocznicy pala jest już pomijalnie mały, równanie określające przemieszczenie pionowe punktu znajdującego się w odległości r od osi pala może być opisane w następujący sposób:



Rys. 1. Schemat obliczeniowy do obliczania osiadań grup pali według propozycji Berezancewa [21].

$$\left. \begin{aligned} w(r) &= \frac{\tau_0 R_0}{G} \ln\left(\frac{r_m}{r}\right), & R_0 \leq r \leq r_m \\ w(r) &= 0, & r > r_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

gdzie:

τ_0 - składowa styczna stanu naprężenia na pobocznicy pala,

R_0 - promień pobocznicy pala,

r_m - granica oddziaływania pala.

Dla podstawy pala zakłada się, że działa ona jak sztywny stempel. Przemieszczenie podstawy s_b pod wpływem przyłożonej siły P_b opisane jest rozwiązaniem Boussinesq'a [20]:

$$s_b = \frac{P_b}{R_b G_b} \frac{(1 - \nu_b)}{4} \quad (4)$$

gdzie:

G_b, ν_b - moduł ścinania oraz współczynnik Poisson'a dla gruntu pod podstawą pala,

R_b - promień podstawy pala.

Dalsze prace, uwzględniające dodatkowo ściśliwość pala, doprowadziły do ogólnego równania, za pomocą którego można bezpośrednio obliczyć wielkość osiadania pala w_t pod wpływem przyłożonej siły P_t :

$$\frac{P_t}{G_L r_0 w_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh(\mu L)}{\zeta} \frac{L}{\mu L} \frac{r_0}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda} \frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{L}{\mu L} \frac{r_0}{r_0}} \quad (5)$$

gdzie:

$\eta = R_b / R_0$; $\xi = G_L / G_b$; $\rho = G_{L/2} / G_L$; $\lambda = E_t / G_L$;

$\zeta = \ln(r_m / R_0)$; $r_m = \{0,25 + \xi[2,5\rho(1-\nu) - 0,25]\}L$;

$\mu L = (L/R_0)\sqrt{2/(\zeta\lambda)}$.

Parametry ζ i ξ określają pionową niejednorodność sztywności gruntu.

Kontynuując swoją pracę Wroth rozszerzył ważność tego równania również na przypadek jednakowo obciążonych pali w grupie, gdzie wpływy z obciążeń pozostałych pali są uwzględniane w wielkości parametrów ζ^* i ξ^* :

$$\zeta^* = n\zeta - \sum_{i=2}^n \ln(r_i / R_0) \quad (6)$$

$$\xi^* = \xi \left[1 + \frac{2}{\pi} \sum_{i=2}^n \frac{R_b}{r_i} \right] \quad (7)$$

gdzie r_i jest odległością między rozpatrywanym palem a palem i .

Istnieje wiele metod, które łączą w sobie elementy różnych sposobów analizy. O'Neill i in. [12] przedstawili metodę obliczania osiadania grup pali nazwaną „*hybrid method*”, w której przemieszczenia pali pojedynczych modelowane są przy wykorzystaniu funkcji przekazywania obciążenia (*Load Transfer Method*), a oddziaływanie między palami odbywa się tak, jak w metodzie elementów brzegowych za pośrednictwem ośrodka gruntowego z wykorzystaniem rozwiązania Mindlina dla siły skupionej działającej w jednorodnej, izotropowej półprzestrzeni sprężystej.

Udoskonalenie tej metody przedstawił **Chow** [3], który w podobny sposób rozpatrywał osiadania poszczególnych węzłów pala jako sumę osiadań wywołanych obciążeniem pala pojedynczego oraz osiadań od obciążeń węzłów innych pali w grupie, co można zapisać jako:

$$s_i = \sum_{j=1}^n (f_{ij} P_j) \quad (8)$$

gdzie:

f_{ij} - współczynnik podatności gruntu opisujący osiadanie węzła i wskutek obciążenia siłą jednostkową węzła j ;

P_j - obciążenie w węźle j ;

n - całkowita liczba węzłów w grupie.

Podobne równania zapisane dla wszystkich węzłów można przedstawić w zapisie macierzowym:

$$\{s\} = [F]\{P\} \quad (9)$$

Wyrazy f_{ii} znajdujące się na głównej przekątnej macierzy podatności gruntu $[F]$ (przemieszczenie węzła i pod wpływem jednostkowej siły w tym samym węźle i) obliczane są przy wykorzystaniu przyjętej funkcji transformacyjnej t - z . Kraft i in. [9] proponują konstruowanie funkcji transformacyjnej przy wykorzystaniu teoretycznej metody analizy osiadania pali przedstawionej przez Randolph'a i Wroth'a [16]. Chow opierając się na wnioskach Krafra proponuje wykorzystać te prace przy obliczaniu współczynnika podatności f_{ii} .

Obciążenie rozłożone w sposób ciągły na poboczniczy pali i w ich podstawie jest zastępowane przez siły skupione przyłożone w węzłach pali. Współczynniki oddziaływania między palami wyznaczone są za pomocą rozwiązania Mindlina.

Odwracając macierz podatności gruntu w równaniu (9) i dodając do macierzy sztywności poszczególnych pali otrzymuje się pełną macierz sztywności układu, a równanie zależności *obciążenie-przemieszczenie* można zapisać w następujący sposób:

$$\{P\} = [K]\{s\} \quad (10)$$

Zarówno metody bazujące na rozwiązaniu Mindlina jak i te wykorzystujące podejście Randolpha dają dobre wyniki przy obliczaniu niewielkich grup palowych. Natomiast dla grup dużych zauważa się, że osiadania otrzymywane przy użyciu tych metod są znacznie większe od obserwowanych w rzeczywistości.

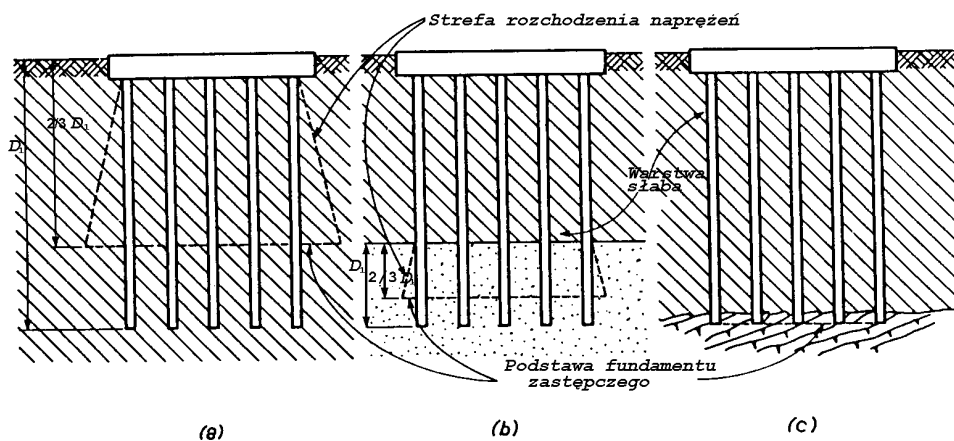
Znacznie lepsze wyniki można otrzymać stosując do obliczeń metodę elementów skończonych, która pozwala na wariantową analizę problemu, uwzględniając wiele przypadków związanych z układem warstw podłoża, zmienność charakterystyk danego ośrodka, zarówno pala jak i gruntu, sposób obciążenia, układ geometryczny itp. Jednak właściwe modelowanie siatki w przypadku fundamentów palowych wymaga dużego nakładu pracy i odpowiednich założeń związanych z uwzględnieniem rodzaju pali, warstw gruntowych oraz zdefiniowania właściwych warunków brzegowych, co eliminuje tę metodę jako praktyczne narzędzie służące do obliczeń dużych grup palowych. Można ją natomiast wykorzystać do analizy zachowania się pala pojedynczego lub niewielkich grup palowych.

Metoda fundamentu zastępczego

Idea metody fundamentu zastępczego ma dziesiątki lat, już w 1948 roku Terzaghi i Peck [19] zaproponowali ją w niektórych warunkach gruntowych do obliczania osiadania grup pali w sposób, w jaki robi się to w przypadku fundamentów bezpośrednich. Do tego celu grupa pali jest zastępowana prostszą formą fundamentu, którego osiadanie można następnie obliczyć metodami stosowanymi dla tego rodzaju fundamentu. W ostatnich latach w praktyce inżynierskiej coraz częściej powraca się do tej metody szczególnie w przypadkach obliczeń dużych grup pali, kiedy dokładniejsze metody (Poulos, Randolph) wymagają przeprowadzenia obliczeń na szybkich maszynach obliczeniowych za pomocą odpowiednich programów, a które dodatkowo, jak już wspomniano wcześniej wykazują tendencję do zawyżania wartości obliczonego osiadania.

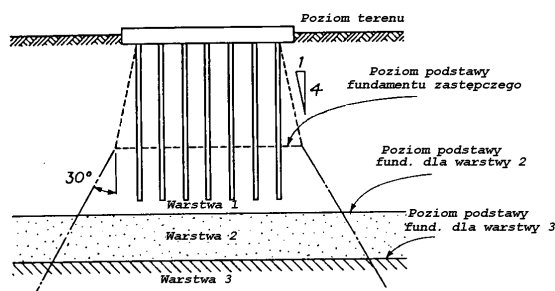
Metoda fundamentu zastępczego oraz przykłady jej stosowania była opisywana w wielu pracach dotyczących fundamentowania ([1], [2], [19], [21], [22]). Między poszczególnymi propozycjami istnieją różnice dotyczące zasad przyjmowania fundamentu zastępczego reprezentującego grupę pali oraz różnice dotyczące procedury obliczania osiadania dla przyjętego fundamentu zastępczego. W przypadku, gdy na pewnej głębokości poniżej poziomu dolnych końców pali zalega warstwa słabych gruntów niespoistych Terzaghi i Peck [19] zalecali wykonanie obliczeń osiadania przy przyjęciu, że fundament jest idealnie wiotki i że obciążenie działa bezpośrednio na powierzchnię warstwy nośnej w poziomie dolnych końców pali. Dla przypadku pali "tarciowych" (pale zagłębione są w gruntach, dla których przekazywanie obciążenia odbywa się głównie wskutek tarcia na pobocznicach pali) stwierdzili oni, że na głębokości do $2/3$ długości pali L wilgotność gruntu nie ulega zmianie, a poniżej tego poziomu proces konsolidacji przebiega tak jakby budowla była posadowiona za pośrednictwem wiotkiej płyty fundamentowej znajdującej się na tym poziomie.

Podobnie Tomlinson [21] rozpatruje fundament płytowy zagłębiony w gruncie na pewną głębokość, której wielkość zależy od przekroju geotechnicznego podłoża i mieści się w granicach od $2/3L$ do L . Różnicą jego metody w stosunku do tych pierwszych propozycji jest to, że w przypadku pali przekazujących część obciążenia przez tarcie na pobocznicach, przyjmuje się dodatkowo strefę rozchodzenia się naprężeń wzdłuż



Rys. 2. Przekazywanie obciążenia na grunt przez grupę pali w zależności od warunków gruntowych według Tomlinsona [21].

- (a) Pale przekazujące obciążenie głównie wskutek tarcia na pobocznicach.
- (b) Pale przechodzące przez warstwę słabych gruntów z końcami zagłębionymi w warstwę gruntów nośnych, przekazujące obciążenie częściowo wskutek tarcia na pobocznicach i częściowo przez podstawę pali.
- (c) Pale słupowe podparte przez twarde grunty skaliste lub skały.



Rys. 3. Rozkład obciążenia poniżej pali w grupie dla podłoża uwarstwionego [21].

pobocznicę odchyloną względem pionu w stosunku 1:4. Tomlinson do celów obliczeniowych zaleca wzór ustalony przez Janbu, Bjerrum'a i Kjaernsli'ego służący do wyznaczania natychmiastowego osiadania fundamentu zagłębionego na głębokość D_1 poniżej powierzchni terenu:

$$s_0 = \frac{\mu_i \mu_0 q_n B}{E_0} \quad (11)$$

gdzie: q_n - przyłożone obciążenie;

B - szerokość fundamentu;

E_0 - moduł odkształcenia ogólnego.

W powyższym wyrażeniu przyjęto współczynnik Poisson'a równy 0,5. Współczynniki μ_i oraz μ_0 można określić w oparciu o odpowiednie krzywe [21] w zależności od zagłębienia fundamentu zastępczego D_1 , miąższości ściśliwej warstwy gruntu poniżej podstawy fundamentu H oraz od stosunku długości do szerokości fundamentu zastępczego L/B .

W gruntach uwarstwionych o różnych wartościach modułu odkształcenia lub w gruntach odznaczających się wzrostem wartości modułu wraz z zagłębieniem, podłoże poniżej podstawy fundamentu zastępczego dzieli się na pewną liczbę poziomych warstw, które charakteryzowane są przez różne wartości modułu E_{0i} . Wymiary L i B strefy na powierzchni poszczególnych warstw są określone przy założeniu, że obciążenie rozchodzi się pod kątem 30° od krawędzi fundamentu zastępczego do powierzchni rozpatrywanej warstwy (rys. 3). Całkowite osiadanie fundamentu palowego stanowi sumę średnich osiadań obliczonych dla każdej z warstw.

Metoda obliczania osiadań fundamentu na palach według poprzedniej edycji polskiej normy [25] jest oparta na zaleceniach proponowanych przez Berezancewa [1]. Metoda obliczania osiadań pali w grupie proponowana przez Berezancewa polega na wyznaczeniu osiadania przyjętego zastępczego fundamentu płytowego w poziomie końców pali, którego wymiary określa się przy założeniu, że rozchodzenie się naprężeń następuje pod kątem $\phi/4$ (około 7°) względem pionu.

Według polskich norm [25] i [26] przyjmuje się, że strefa rozkładu naprężeń w gruncie dookoła pala ma kształt stożka kołowego o nachyleniu tworzącej zależnym od rodzaju i stanu gruntu. W gruntach uwarstwionych tworząca stożka jest linią łamaną.

Linie graniczne strefy naprężeń wokół grupy pali tworzą bryłę o podstawie $l_1 \times l_2$ w poziomie dolnych końców pali, obejmującą pale wraz z gruntem zawartym w tej bryle, którą dalej rozpatruje się jako fundament zastępczy. Osiadanie dla tak określonego fundamentu można obliczyć metodami stosowanymi dla fundamentów bezpośrednich [24] przyjmując, że dodatkowe obciążenie jednostkowe gruntu σ_d w poziomie dolnych końców pali wynosi:

$$\sigma_d = \frac{Q}{l_1 l_2} \quad (12)$$

gdzie:

Q - pionowa składowa wszystkich sił obciążających fundament wraz z jego ciężarem własnym.

Obecna norma [26] powyższą metodę fundamentu zastępczego zaleca stosować w przypadkach, gdy poniżej podstaw pali zalegają warstwy gruntów o wytrzymałości mniejszej niż wytrzymałość warstw otaczających pal [PN-83/B-02482, pkt 4.5.3.c].

Inna procedura postępowania przy obliczaniu osiadania metodą fundamentu zastępczego została zaproponowana przez **Van Impe** [22]. Według Van Impe grupę pali zastępuje się równoważnym fundamentem blokowym. W rzucie poziomym wymiary fundamentu zastępczego odpowiadają wymiarom obrysu grupy pali: $B \times L$, a poziom podstawy przyjmuje się na głębokości, która podobnie jak w przypadku wcześniej opisanych propozycji jest zależna od sposobu przekazywania obciążenia przez pale. Rozpatruje się dwa przypadki:

- I - pale słupowe (podparte przez wytrzymałą warstwę podłoża);
- II - pale przekazujące obciążenie w znacznej części wskutek tarcia na poboczniczy.

W pierwszym przypadku zagłębienie fundamentu zastępczego przyjmuje się na głębokości H (H - zagłębienie pali), w drugim natomiast na głębokości $2/3H$.

Metoda Van Impe uwzględnia dodatkowo wpływ tarcia τ_m mobilizowanego na zewnętrznym obwodzie grupy pali. Długość h_f , na której działa tarcie τ_m przyjmuje się jako zagłębienie fundamentu zastępczego. Jednostkowe tarcie τ_m wyznacza się na podstawie wyników badań sondą statyczną CPT (Tablica 3).

Tablica 3. Wartości tarcia jednostkowego τ_m wyrażone w funkcji oporu sondy CPT [22].

Sposób wykonania pali	Sposób przekazywania obciążenia	Grunty piaszczyste ($q_c > 15$ MPa)	Pyły, gliny piaszczyste i piaski gliniaste ($5 \text{ MPa} < q_c < 15 \text{ MPa}$)	Gliny plastyczne $I_L > 0,2$ ($q_c < 2$ MPa)	Gliny twardoplastyczne do zwartych: $I_L < 0,2$ ($q_c > 2$ MPa)
Pale wiercone	I	$\frac{1}{300} q_c$	$\frac{1}{400} q_c$	—	—
Pale wbijane	I	$\frac{1}{150} q_c$	$\frac{1}{200} q_c$	$\frac{1}{250} q_c$	$\frac{1}{300} q_c$
oraz typu CFA	II	$\frac{1}{300} q_c$	$\frac{1}{500} q_c$	$\frac{1}{300} q_c$	$\frac{1}{350} q_c$

q_c - opór sondy CPT-E1 otrzymany na podstawie sondowania przeprowadzonego po wykonaniu palowania w odległości 1,5 średnicy pala od jego osi [22].

Przyjmuje się, że dodatkowe naprężenie $\Delta\sigma_z$ wynikające z przyłożonego obciążenia zewnętrznego oddziałuje do głębokości $1,5B$ poniżej podstawy fundamentu zastępczego.

W przypadku I osiadanie grupy pali oblicza się według wzoru:

$$s = \sum_{z=H}^{z=H+1,5B} \sigma_{z,p} \frac{\Delta z}{E^*} \ln \frac{\sigma_{z,p} + \Delta\sigma_z}{\sigma_{z,p}} \quad (13)$$

W przypadku II:

$$s = \sum_{z=2H/3}^{z=2H/3+1,5B} \sigma_{z,p} \frac{\Delta z}{E^*} \ln \frac{\sigma_{z,p} + \Delta\sigma_z}{\sigma_{z,p}} \quad (14)$$

$\Delta\sigma_z = i_z \frac{Q_z - F}{BL}$ - dodatkowe naprężenie na poziomie z w środku rozpatrywanej warstwy gruntu wynikające z przyłożonego naprężenia zewnętrznego;

i_z - współczynnik wpływu według Fröhlich'a;

Q_z - obciążenie zewnętrzne na poziomie $z = H$,

$\sigma_{z,p}$ - początkowe naprężenie efektywne w gruncie na poziomie z (bez obciążenia zewnętrznego).

$$F = \tau_m 2(B + L)h_f \quad (15)$$

Wymagany w równaniach (13) i (14) moduł odkształcenia E^* jest wyznaczany na podstawie wyników sondowania CPT w gruncie naturalnym według Van Impe [22].

Propozycja Meyerhofa dotycząca osiadania pali w grupie metodą fundamentu zastępczego wykorzystuje wzór służący do obliczania osiadania fundamentów bezpośrednich w gruntach niespoistych na podstawie wyników sondowania SPT. Meyerhof ogranicza stosowanie tej metody tylko do przypadku podłoża niespoistego (bez słabej warstwy poniżej poziomu końców pali) dla obciążenia nie przekraczającego $1/3 \div 1/5$ końcowej nośności grupy pali [11]. W celu przystosowania wspomnianego wzoru do obliczania osiadania fundamentu zastępczego dla grupy pali, Meyerhof wprowadza współczynnik wpływu I zależny od zagłębienia D_1 oraz szerokości B fundamentu zastępczego. Zagłębienie fundamentu zastępczego D_1 przyjmuje się zgodnie z zaleceniami Terzaghi'ego [19] lub Bowles'a [2]. Ostatecznie Meyerhof podaje następujące wyrażenie na osiadanie grupy pali w gruntach piaszczystych i żwirowych:

$$s = \frac{2pI\sqrt{B}}{N} \quad [\text{cale}] \quad (16)$$

gdzie:

$$I = 1 - \frac{D_1}{8B} \geq 0,5$$

p - nacisk przekazywany przez fundament w t/ft^2 [$1 \text{ t/ft}^2 \approx 100 \text{ kPa}$];

B - szerokość grupy pali w stopach [$1 \text{ ft} \approx 0,3 \text{ m}$];

N - średnia liczba uderzeń sondy SPT/1 ft zagłębienia w warstwie poniżej zastępczego fundamentu o miąższości równej szerokości grupy pali.

Dla gruntów pylastych Meyerhof zaleca otrzymaną wartość osiadania przemnożyć przez 2.

W podobny sposób można obliczyć osiadanie grupy pali w nawodnionych gruntach niespoistych wykorzystując wyniki sondowania CPT. Do tego celu wykorzystuje się zależność:

$$s = \frac{pBI}{2q_c} \quad (17)$$

gdzie q_c jest średnim oporem sondy wciskanej w rozpatrywanej warstwie gruntu o miąższości określonej jak poprzednio. Pozostałe oznaczenia są analogiczne jak we wzorze (16).

Osiadanie grup pali w gruntach spoistych według Meyerhofa można oszacować pod warunkiem znajomości cech charakteryzujących własności deformacji początkowej oraz własności konsolidacji podłoża spoistego.

Do grupy metod fundamentu zastępczego można również zaliczyć metodę zaproponowaną przez **Poulos'a** [14], polegającą na tym, że grupę pali zastępuje się przez zastępczą pojedynczą kolumnę o odpowiednio dobranych wymiarach, tak aby jej osiadania mogły odzwierciedlać osiadania rozpatrywanej grupy pali. W tym przypadku konieczna jest jednak znajomość jednej z metod obliczania osiadania pala pojedynczego, za pomocą której można by określić osiadanie zastępczej kolumny. Poulos metodę tę zaleca w przypadku analizy oddziaływania wewnętrznej grupy na grupy sąsiednie lub w przypadku obliczania osiadania grupy pali, poniżej

której znajduje się warstwa gruntów bardziej ściśliwych. Autor proponuje dwa sposoby przyjmowania zastępczej kolumny:

- zastępcza kolumna o tych samych wymiarach w planie jak dana grupa pali i odpowiednio dobranej zastępczej długości L_e ;
- zastępcza kolumna o długości L równej długości pali i zastępczej średnicy d_e .

Odpowiednie wykresy do wyznaczania tych zastępczych wartości można znaleźć w pracy Poulosa i Davisa [14].

Rozwinięcie tej metody dla drugiego rozwiązania zostało przedstawione w pracy [15], gdzie przyjmuje się dodatkowo zastępczy moduł kolumny jako:

$$E_z = E_t \frac{\sum A_p}{A_G} + E_0 \left(1 - \frac{\sum A_p}{A_G} \right) \quad (18)$$

gdzie:

A_p - pole przekroju poprzecznego pojedynczego pala,

A_G - pole powierzchni grupy pali w planie.

Średnicę zastępczą proponuje się obliczać ze wzorów:

a) dla pali przekazujących obciążenie w znacznej części przez poboczną:

$$d_e = 1,27 \sqrt{A_G} \quad (19)$$

b) dla pali przekazujących obciążenie głównie przez podstawę:

$$d_e = 1,13 \sqrt{A_G} \quad (20)$$

Porównanie metod i wnioski

Przedstawione metody zostały porównane na podstawie przeprowadzonych obliczeń osiadania grup pali o różnych wymiarach w rzucie, liczbie pali, dla tych samych układów warunków gruntowych i geometrii pali. Nie uwzględniano tutaj wpływu wykonawstwa pali na wielkość osiadania.

Analizie poddano kwadratowe grupy pali żelbetowych o następujących parametrach:

średnica $D = 0,4$ m lub przekrój $0,35 \times 0,35$ m;

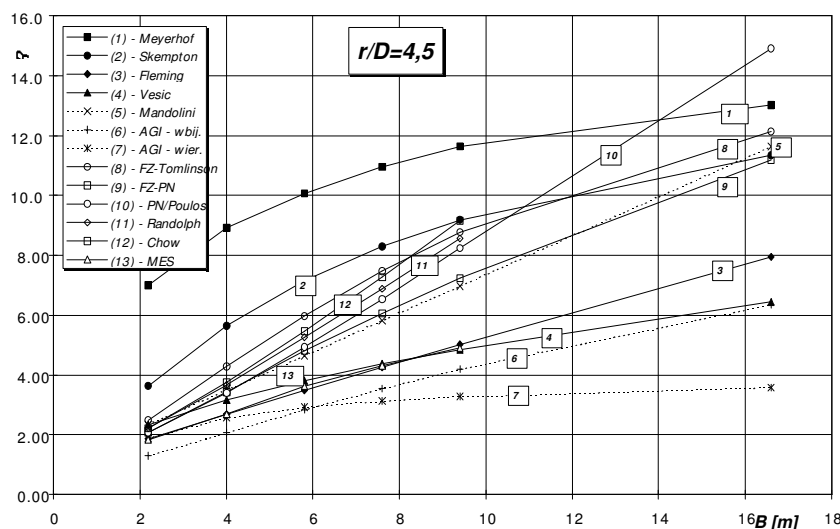
moduł sprężystości $E_t = 24000$ MPa, długość $L = 12$ m, obciążenie pojedynczego pala $P_t = 800$ kN.

Obliczenia przeprowadzono dla grup o stałym rozstawie osiowym pali $r = 1,8$ m ($r/D = 4,5$) dla układu pali: 2×2 , 3×3 , 4×4 , 5×5 , 6×6 i 10×10 .

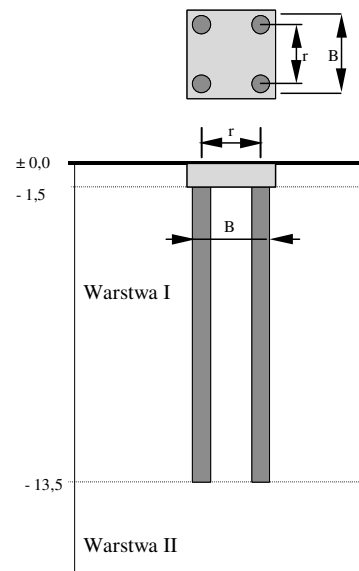
Dla celów porównawczych wykorzystano do obliczeń również program CADSAP, umożliwiając przeprowadzenie trójwymiarowej analizy obliczeniowej ośrodka liniowo sprężystego metodą elementów skończonych. W tym przypadku analizowano pale o przekroju kwadratowym $0,35 \times 0,35$.

Tablica. 4. Parametry geotechniczne warstw gruntowych.

Nr warstwy	Rodzaj gruntu	γ [kN/m ³]	I_D	E_0 [MPa]	ν	M_0 [MPa]
I	Pd	11	0,4	33	0,3	45
II	Pd	11	0,6	55	0,3	75



Rys. 5. Zestawienie wyników uzyskanych przy użyciu różnych metod.



Rys. 4. Grupa pali 2x2 dla analizowanego profilu gruntowego.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5. W zależności od rodzaju metody rozrzut otrzymywanych wyników może być bardzo duży, zwłaszcza w przypadku metod empirycznych. Wielkość oddziaływania między palami reprezentowana przez współczynnik wpływu grupy R jest niemal identyczna w przypadku metod Poulos'a, Randolph'a i Chow'a i rośnie szybko wraz z wielkością fundamentu. Wyniki otrzymywane za pomocą programu CADSP (MES) wykazują, że oddziaływanie to może być znacznie mniejsze zwłaszcza przy fundamentach dużych.

Rodzi się konieczność skonfrontowania osiadań obliczonych przy użyciu proponowanych metod z osiadaniami pomierzonymi na rzeczywistych obiektach. Prace takie są obecnie prowadzone przez autorów, a celem ich jest opracowanie wytycznych dotyczących sposobu postępowania przy obliczaniu osiadania grup palowych.

LITERATURA:

1. **Berezantsev V.G., Khristoforov V.S., Golubkov V.N.** (1961). "Load bearing capacity and deformation of piled foundations". *Proceeding 5-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1961, Vol. 2, s. 11-15.
2. **Bowles J.E.** (1968). "Foundation Analysis and Design". McGraw Hill, New York, 1968.
3. **Chow Y.K.** (1986). "Analysis of Vertically Loaded Pile Groups". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 10, s. 59-72.
4. **Fleming W.G.K., Weltman A.J., Randolph M.F., Elson W.K.** (1994). "Piling Engineering". John Wiley and Sons, New York and Toronto, 1994.
5. **Gwizdała K.** (1987). "Analiza obliczeń osiadania grup palowych". *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 1987, nr 52, s. 541-546.
6. **Gwizdała K.** (1980). "Zagadnienie przemieszczeń pali w ośrodku gruntowym pod wpływem obciążenia". *Archiwum Hydrotechniki*, Gdańsk, 1/1980, s. 93-117.
7. **Gwizdała K.** (1996). "Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych". *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, Nr 532, Budownictwo Wodne Nr 41, Gdańsk, 1996.
8. **Jarominiak A., Kłosiński B., Grzegorzewicz K., Cielenkiewicz T.** (1976). "Pale i fundamenty palowe". Arkady, Warszawa, 1976.
9. **Kraft L.M., Ray R.P., Kagawa T.** (1981). "Theoretical t-z curves". *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, No GT11, November 1981, s. 1543-1561.

10. **Mandolini A.** (1997). "Design of axially loaded piles – Italian practice". *Proceeding International Seminar on Design of Axially Loaded Piles, European Practice*, Brussels, 1997, s. 219-242.
11. **Meyerhof G.G.** (1976). "Bearing capacity and settlement of pile foundation". *The XI Terzaghi Lecture, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 102, No GT3, March 1976, s. 195-228.
12. **O'Neill M.W., Ghazzaly O.I., Ha H.B.** (1977). "Analyses of Three-Dimensional Pile Groups with Non-Linear Soil Response and Pile-Soil-Pile Interaction". *Proceeding of the 9-th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, May 1977, Paper No. OTC 2838, s. 245-256.
13. **Poulos H.G.** (1968). "Analysis of the Settlement of Pile Groups". *Geotechnique*, Vol. 18, s. 449-471.
14. **Poulos H.G., Davies E.H.** (1980). "Pile Foundation Analysis and Design". John Wiley and Sons, New York, 1980.
15. **Poulos H.G.** (1993). "Settlement prediction for bored pile groups". *Proceeding of the 2-nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Belgium, 1-4 June 1993, s. 103-117.
16. **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.
17. **Randolph M.F., Wroth C.P.** (1979). "An Analysis of the Vertical Deformation of Pile Groups". *Geotechnique*, Vol. 29, 4/1979, s. 423-439.
18. **Randolph M.F.** (1994). "Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts". *Proceeding 13-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, 1994, Vol. V, s. 61-82.
19. **Terzaghi K., Peck R.B.** (1948). "Soil Mechanics in Engineering Practice". John Wiley and Sons, New York, 1949.
20. **Timoshenko S.P., Goodier J.N.** (1970). "Theory of elasticity". McGraw Hill, New York, 1970.
21. **Tomlinson M.J.** (1994). "Pile Design and Construction Practice". E & FN SPON, London.
22. **Van Impe W.F.** (1991). "Deformations of deep foundations". *General Report, X ECSMFE*, Florence, 1991.
23. **Wiłun Z.** (1987). "Zarys geotechniki". Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1987.
24. **PN-81/B-03020.** "Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie".
25. **PN-69/B-02482.** "Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów na palach".
26. **PN-83/B-02482.** "Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych".

STRESZCZENIE.

Gwizdała K., Dyka I.: **Metody obliczeń osiadania dużych grup palowych.**

Charakterystyka metod obliczeń osiadania grup palowych i ich ocena pod kątem przydatności do obliczania osiadania dużych fundamentów palowych obiektów hydrotechnicznych. Porównanie przedstawionych metod na podstawie przeprowadzonych obliczeń.