

Ireneusz Dyka¹, Piotr E. Srokosz¹

Obliczenia statyczne fundamentów płytowo-palowych

Streszczenie: W referacie przedstawiono zagadnienia związane z obliczeniami statycznymi płyt fundamentowych na podporach palowych. W analizach zastosowano procedurę iteracyjną, wykorzystującą własną metodę obliczeń osiadań pali w grupie oraz klasyczną metodę wyznaczania sił wewnętrznych w sprężystych płytach na podłożu Winklera. Oceniono wpływ sztywności płyty fundamentowej oraz nadbudowy na rozkład i wartości sił wewnętrznych na wybranym przykładzie obliczeniowym. Przeanalizowano wpływ nierównomiernych osiadań poszczególnych pali w grupie na redystrybucję sił wewnętrznych w fundamencie.

Wprowadzenie

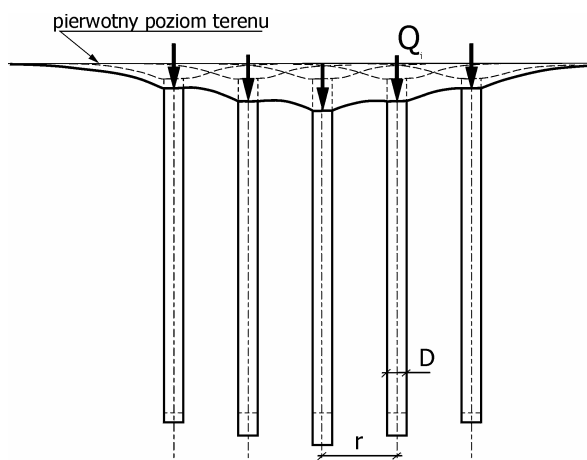
Duże obszary województwa warmińsko-mazurskiego obfitują w podłoża z gruntami słabonośnymi lub nośnymi, lecz bardzo niejednorodnymi. Wiele inwestycji realizowanych na tych obszarach, wymusiło na projektantach posadawianie wznoszonych bądź dobudowywanych obiektów na fundamentach płytowo-palowych. Realizacja większości z tych obiektów (najczęściej przemysłowych), ze względów technologicznych, nakładała bardzo ostre wymagania dotyczące warunków II stanu granicznego użytkowania, w odniesieniu do wybranych fundamentów precyzyjnych maszyn. Niejednokrotnie fundamenty płytowo-palowe stosowano nawet tam, gdzie podłoże zbudowane było wyłącznie z warstw nośnych, lecz niejednorodność układu warstw i różnorodność występujących tam gruntów mogła wywołać, w przypadku posadowienia

¹ dr inż., Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

bezpośredniego, takie różnice osiadań, które mogły doprowadzić nie tylko do wadliwej pracy, ale też do trwałych uszkodzeń zainstalowanych urządzeń.

W projektowaniu tego typu posadowień najczęściej korzysta się z komercyjnych programów komputerowych do statyki sprężystych płyt na sprężystych podporach [11]. Niestety, kwestia realnego zamodelowania współpracy fundamentu z podłożem gruntowym (np. poprzez „rzeczywiste” wartości parametrów stosowanych w obliczeniach modeli), wciąż pozostaje aktualnym problemem (zmartwieniem) użytkownika [11]. Jednocześnie różnorodność metodyk obliczeniowych [4,5,11] wraz z niewątpliwymi ich zaletami, ale też i wadami, zwykle wprawia projektanta w zakłopotanie.

To właśnie osiadania fundamentu w dużym stopniu decydują o rozkładzie i wielkości sił przekrojowych w fundamencie i w konstrukcji nadbudowy. W przypadku fundamentów palowych, problem oszacowania realistycznych osiadań jest bardziej skomplikowany niż w przypadku fundamentów posadowionych bezpośrednio. Wynika to między innymi z wzajemnego oddziaływania między palami, które determinuje pracę pali w grupie (rys. 1).



Rys. 1. Schemat osiadania pali w grupie

Biorąc pod uwagę fakt, że w szerokiej gamie metod obliczeniowych, brakuje propozycji pozwalającej uwzględnić realistyczną pracę pali w grupie oraz uwzględniającej wpływ sztywności płyty na ich zachowanie, autorzy zdecydowali się podać iteracyjną procedurę obliczeniową, stosowaną przez nich w praktyce inżynierskiej.

1. Własna metodyka obliczeniowa

W proponowanej procedurze obliczeniowej autorzy wykorzystali własne programy komputerowe [1,10].

Program do obliczeń statycznych płyt sprężystych [10] bazuje na jednoparametrowym modelu podłoża gruntowego Winklera-Zimmermanna.

Uwzględniając współpracę fundamentu płytowego z fundamentem pośrednim (pale), reakcje na podpory palowe (sprężyny) wyznaczone są z podstawowej zależności Winklera po uprzednim wyliczeniu całkowitych odkształceń układu (osiadań), wyznaczonych z równania różniczkowego ugięcia płyty na podłożu sprężystym:

$$\frac{\partial^4 s(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 s(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 s(x,y)}{\partial y^4} + \frac{C(x,y)}{N(x,y)} s(x,y) = \frac{p(x,y)}{N(x,y)}, \quad (1)$$

gdzie: N – sztywność płyty;
 C – współczynnik sprężystości podpór;
 p – obciążenie podłoża;
 s – ugięcie (osiadanie).

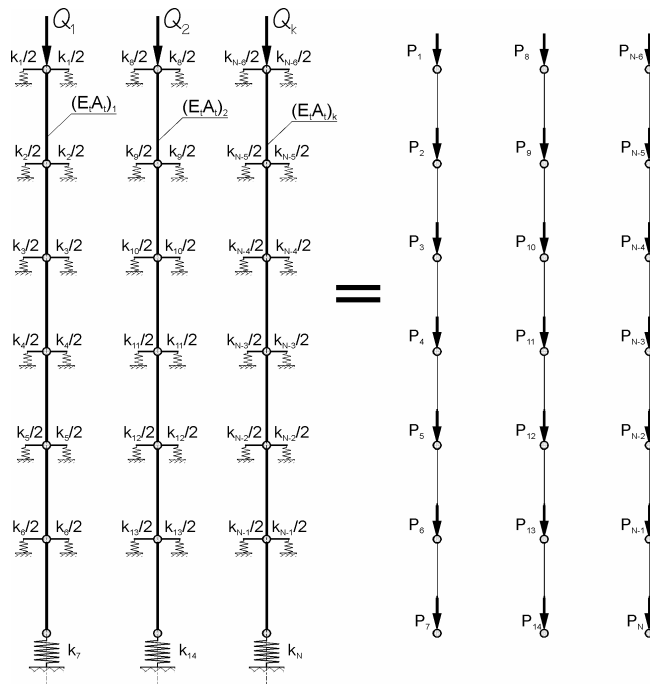
Program [10] układa i rozwiązuje równania postaci (1) stosując metodę różnic skończonych – MRS (implementacja w „Delphi®” propozycji [9]).

Do obliczeń osiadań poszczególnych pali posłużył autorski program komputerowy „GRUPAL” [1]. Zastosowana w nim metoda [2,3] uwzględnia nieliniową charakterystykę zależności przemieszczenie-osiadanie dla pala pojedynczego i oddziaływanie między palami w grupie przy założeniu małych odkształceń ($G_{\max}$ – moduł odkształcenia postaciowego dla małych odkształceń).

Program służy do obliczania osiadania pali pojedynczych oraz pali w grupie obciążonych siłami pionowymi w dowolnie uwarstwionym podłożu gruntowym.

Na rysunku 2 przedstawiono zastosowany sposób dyskretyzacji pali w grupie. Pojedynczy pal przyjęto traktować jako odkształcalny pręt osiowo ściskany. Pal podzielony jest na odcinki. W węzłach umieszcza się podpory sprężyste modelujące opór gruntu.

Obliczenia przeprowadza się dla kolejnych przyrostów obciążenia, w każdym kroku obliczana jest nowa wartość modułu odkształcenia dla aktualnego naprężenia w danym węźle. Wraz ze wzrostem obciążenia następuje mobilizacja oporów gruntu.

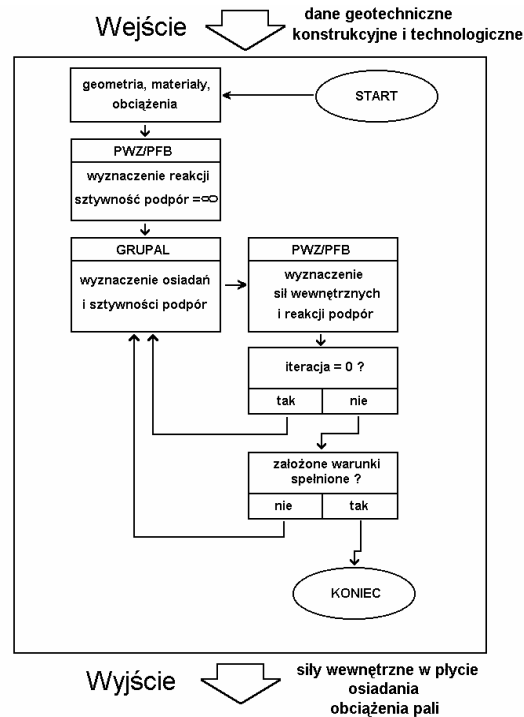


Rys. 2. Sposób dyskretyzacji pali w grupie w programie „GRUPAL”

Obliczenia programem „GRUPAL” wykonywane są przy założeniu fundamentu wiotkiego.

W celu uwzględnienia współpracy między palami a płytą o określonej sztywności, proponuje się iteracyjną, sekwencyjną pracę wymienionych wyżej dwóch programów. W iteracji zerowej wyznaczane są wartości reakcji z fundamentu płytowego na podpory palowe, traktowane jako nieskończenie sztywne. Reakcje te obciążają rzeczywisty układ pali w grupie wywołując, ich osiadanie.

Wyliczone charakterystyki sprężyste uwzględniane są następnie w iteracji pierwszej, w obliczeniach sił wewnętrznych fundamentu płytowego, jako pierwsze przybliżenie parametrów podpór sprężystych. Wyliczanie wartości reakcji podpór palowych, ich osiadań, charakterystyk sprężystości i sił wewnętrznych w płycie powtarzane jest do momentu spełnienia założonych warunków zgodności (np. stabilizacji wartości reakcji podpór). Schemat algorytmu przedstawia rysunek 3.



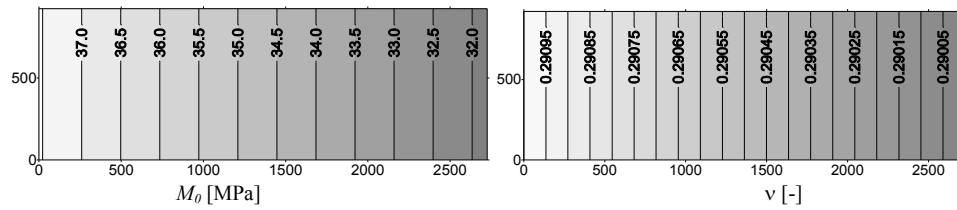
Rys. 3. Algorytm obliczeń

2. Przykład obliczeń

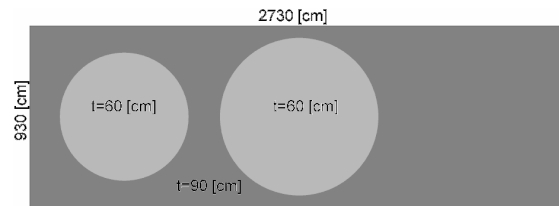
Wpływ uwzględnienia pracy pali w grupie oraz sztywności fundamentu płytowego przedstawiono na przykładzie wyników obliczeń statycznych (trzech początkowych iteracji) fundamentu pod zespół maszyn (rys. 5). Wybrano jeden z dziewięciu wariantów obciążeń – obciążenie równomiernie rozłożone na całej powierzchni płyty, przedstawiając rozkład wartości momentów zginających w przypadku braku podpór palowych (rys. 4 i 6) oraz w przypadku iteracyjnego uwzględnienia pracy pali w grupie (rys. 7-9, ciemniejsze odcienie szarości oznaczają wartości mniejsze).

Na rysunkach 10-12 przedstawiono rozmieszczenie pali pod płytą oraz wartości obciążeń (rys. 11 – rozkład obciążeń w planie, rys. 12 – zmiany wartości w kolejnych iteracjach). Jak można zauważyć, kolejne iteracje zróżnicowały rozkład wartości obciążeń pali, redukując je w polach środkowych pod płytą,

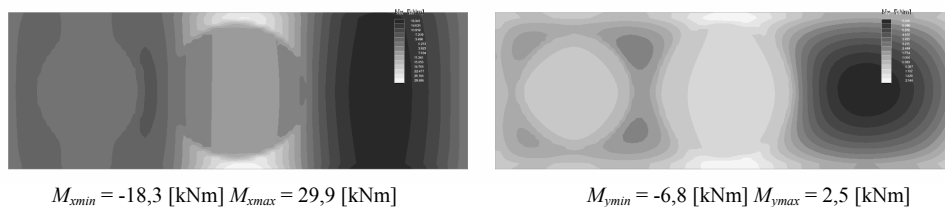
a koncentrując w strefach przykrawędziowych. Związane jest to właśnie z redystrybucją sił w układzie płyta-pale wywołaną wpływem sztywności płyty, jak i zwiększonymi osiadaniem pali wewnętrznych w stosunku do pali skrajnych (praca pali w grupie). Zestawienie ekstremalnych wartości obciążeń pali przedstawiono w tabeli 1.



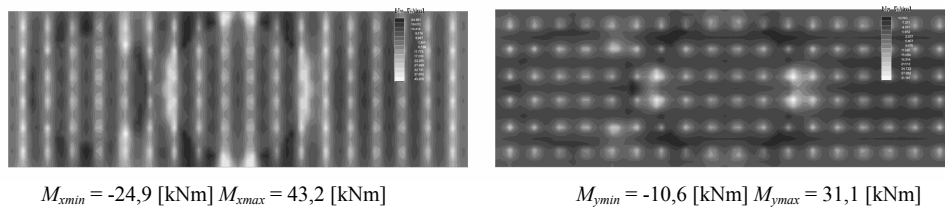
Rys. 4. Uśrednione parametry podłoża



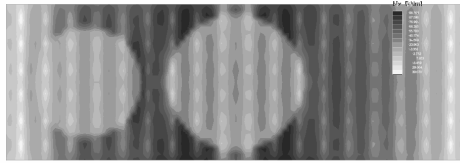
Rys. 5. Geometria płyty



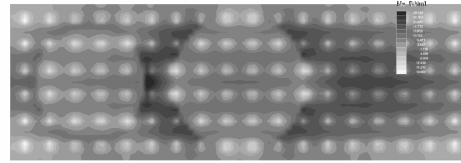
Rys. 6. Posadowienie bezpośrednie. Rozkład momentów zginających



Rys. 7. Iteracja 0. Rozkład momentów zginających

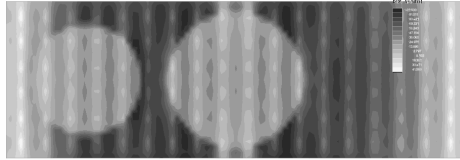


$$M_{x\min} = -98,2 \text{ [kNm]} \quad M_{x\max} = 39,7 \text{ [kNm]}$$

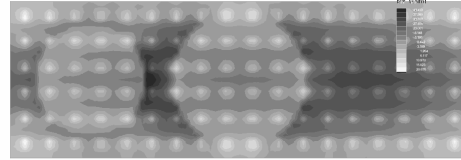


$$M_{y\min} = -29,0 \text{ [kNm]} \quad M_{y\max} = 20,0 \text{ [kNm]}$$

Rys. 8. Iteracja 1. Rozkład momentów zginających

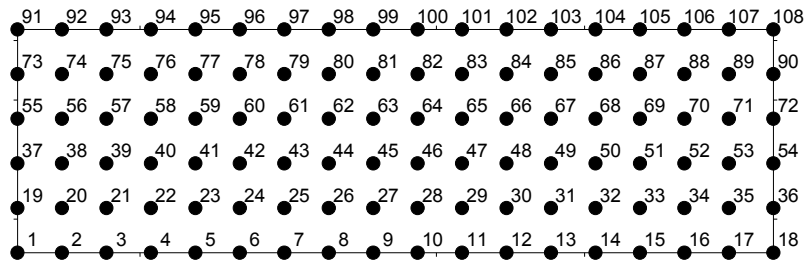


$$M_{x\min} = -102,6 \text{ [kNm]} \quad M_{x\max} = 41,6 \text{ [kNm]}$$

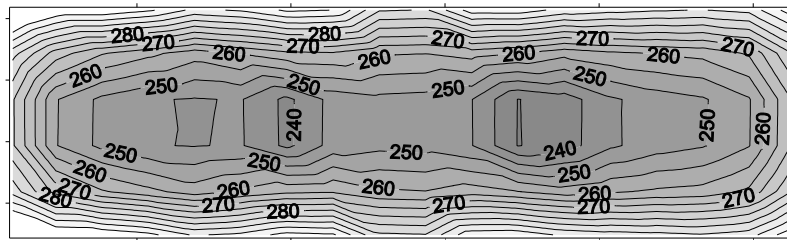


$$M_{y\min} = -42,4 \text{ [kNm]} \quad M_{y\max} = 20,7 \text{ [kNm]}$$

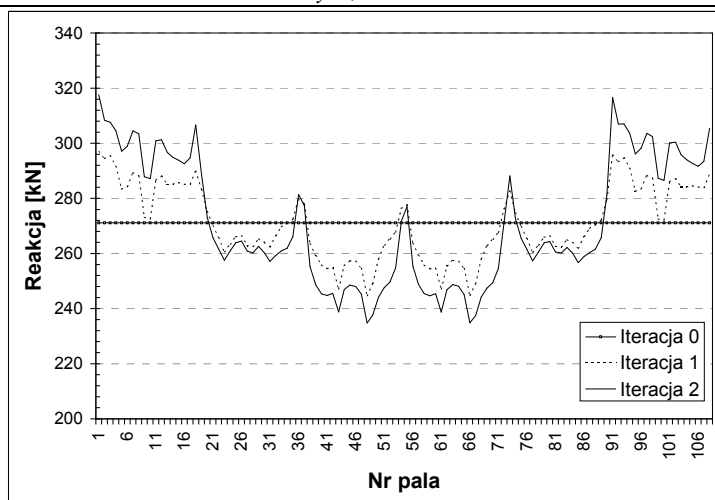
Rys. 9. Iteracja 2. Rozkład momentów zginających



Rys. 10. Układ podpór palowych



Rys. 11. Rozkład wartości obciążeń podpór palowych [kN] (iteracja 2)



Rys. 12. Wartości obciążeń podpór palowych

Tablica 1. Zestawienie ekstremalnych wartości reakcji na podpory palowe

	Iteracja 0	Iteracja 1	Iteracja 2
$R_{\min}$ [kN]	271.1	244.6	234.8
$R_{\max}$ [kN]	271.1	296.9	317.6

Wnioski

Proces projektowania konstrukcji budowlanych najczęściej nie uwzględnia przemieszczeń fundamentów, które wynikają ze współpracy fundamentu z podłożem. Pomija się tym samym istotne oddziaływania, które generują dodatkowe siły wewnętrzne w przekrojach konstrukcji. Te dodatkowe siły mogą być określone, pod warunkiem zastosowania odpowiednich modeli i procedur obliczeniowych, adekwatne do rozpatrywanego problemu.

W niniejszym artykule przedstawiono prostą procedurę obliczeń statycznych dla fundamentów palowych, której celem jest wyznaczenie realistycznych wielkości i rozkładu sił przekrojowych w konstrukcji nadbudowy o określonej sztywności. Zaprezentowana metodyka opisywana była przez różnych autorów [6]. Oryginalnym elementem przedstawionej procedury obliczeń jest sekwencyjne współdziałanie dwóch autorskich programów komputerowych. Jeden program umożliwia obliczanie sił wewnętrznych i odkształceń fundamentu o dowolnej

geometrii i zmiennej sztywności na liniowych podporach sprężystych, drugi program służy natomiast do obliczania osiadań pali w grupie w dowolnych warunkach gruntowych. Zastosowana metoda obliczeń osiadania pali w grupie była weryfikowana na podstawie pomiarów osiadań rzeczywistych obiektów posadowionych na palach [12], które wykazywały dużą zgodność z wynikami obliczeń.

Literatura

- [1] Dyka I.: *Program GRUPAL v 1.4. Obliczanie osiadań grup palowych*, 2001.
- [2] Gwizdała K., Dyka I.: *Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego*. Inżynieria i Budownictwo, 12/2001, s.729-733
- [3] Gwizdała K., Dyka I.: *Estimation of settlements of piles in group*. Proceedings of the 9th Conference on Piling and Deep Foundations, Nice, 3/4/5 June 2002,
- [4] Kosecki M.: *Ocena możliwości zastosowania wzorów Boussinesqa do obliczania fundamentów płytowo-palowych*. Inżynieria i Budownictwo, 6/2004r., s.335-338
- [5] Kosecki M.: *Obliczanie fundamentów płytowo-palowych według założeń podłoża dwuparametrowego*. Inżynieria i Budownictwo, 12/2001, s.725-728
- [6] Krasieński A., Świniański J., Gwizdała K., Tejchman A.: *Obliczanie fundamentów palowych z uwzględnieniem zmiennej podatności pali*. Materiały I Problemowej Konferencji Geotechniki: „Współpraca budowli z podłożem gruntowym”, Białystok-Wigry, 1998
- [7] Krasieński A.: *Obliczenia statyczne fundamentów palowych*. Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, 2004
- [8] Meyer Z., Chruściewicz S.: *Ocena zmian projektowych warunków posadowienia sztywnego ustroju płytowo-palowego wspierającego konstrukcję komina*. Konferencja naukowo-techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje, 2003
- [9] Rosiński B. (praca zbiorowa): *Fundamenty. Projektowanie i wykonawstwo*. Arkady, Warszawa, 1976
- [10] Srokosz P.E.: *Program PWZ/PFB v.3.5 Płyta na sprężystym podłożu*, 2002
- [11] Świniański J.: *Ocena podatności podłoża przy wymiarowaniu płyt fundamentowych*. Inżynieria Morska i Geotechnika 5/2003, s.314-319
- [12] Tejchman A., Gwizdała K., Dyka I.: *Nośność i osiadanie pylonu mostu podwieszonego przez Martwą Wisłę w Gdańsku*. Materiały 50-tej Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, 2004

STATIC CALCULATIONS OF PLATE-AND-PILE FOUNDATIONS

Summary: In the paper the problems of static calculations of foundation plates rested on piles are presented. In the analyses an iteration procedure of determination of settlements of piles working in a group and classical method of evaluation of internal forces in elastic foundation plates based on Winkler's basis were exploited. The influence of plate's rigidity and superstructure on internal forces distribution on the chosen example is presented. The influence of irregular piles settlement distribution on redistribution of internal forces in foundation plate was observed.