

Zygmunt MEYER, Sebastian CHRUŚCIEWICZ  
Politechnika Szczecińska

## ZASTOSOWANIE MODELU SZTYWNEGO USTROJU PŁYTOWO-PALOWEGO DO ANALIZY POSADOWIENIA WYSOKICH BUDYNKÓW

**Streszczenie.** Przedmiotem pracy jest zastosowanie przyjętego modelu do analizy posadowienia wysokich budynków na sztywnej płycie z palami. Rozkład naprężeń w gruncie określono za pomocą wzorów Boussiensa uzupełnionych o współczynnik koncentracji naprężeń Fröhlicha. W celu uzyskania rozwiązania numerycznego podzielono powierzchnię fundamentu na elementarne pola, na których przyłożono elementarne siły skupione. Całkowite naprężenia uzyskano stosując zasadę superpozycji. Autorzy w pracy przedstawili wyniki obliczeń numerycznych i porównali je z wynikami z badań terenowych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zarówno całkowite osiadanie, jak i wysiłki w poszczególnych palach pomierzone i obliczone dają dużą zgodność. Wskazuje to, że przyjęty model matematyczny i mechanizm obliczeniowy jest poprawny i ma wartość praktyczną.

## MODEL OF STIFF PILED RAFT SYSTEM USE TO ANALYSE FOUNDATIONS OF HIGH BUILDINGS

**Summary.** The paper presents the application of the model adopted to analyse foundations of high buildings on stiff piled raft. The distribution of Boussiensa tensions in soil was measured by means of formulae supplemented with concentration coefficient of Fröhlich tensions. To obtain a numeric solution the area of foundation was divided into small elementary surfaces, at which elementary concentrated strengths were applied. Total tensions in soil were achieved applying the superposition rule. The authors presented results of numeric calculations and compared them with results of field investigations. The analysis carried out shows that both the total settlement and also efforts in individual piles measured and counted give a good agreement. This shows that the adopted mathematical model and computational mechanism are correct and have practical value.

## 1. Wstęp

Szybko rozrastająca się infrastruktura zarówno miejska, jak i przemysłowa powoduje, że terenów pod zabudowę jest coraz mniej, a te, które są, osiągają coraz większe ceny. Również pod względem nośności gruntu nie ma w czym przebierać i należy posadawiać obiekty na gruntach o znacznie gorszych parametrach mechanicznych. Sytuacja ta wymusza na inżynierach poszukiwania takich rozwiązań, które pozwolą na  $1 \text{ m}^2$  umieścić jak największy ciężar. Jednak nie każdy grunt nadaje się do posadowienia bezpośredniego tak dużych obiektów, jakim są wieżowce i wysokie kominy przemysłowe. Tak ogromne obciążenia są w stanie przenieść tylko pale. Pał, ze względu na swoją specyficzną budowę, przenosi obciążenie poprzez pobocznicę i podstawę. Udział poszczególnych elementów w przenoszeniu obciążenia jest zależny od rodzaju pała i od ośrodka, w jakim się znajduje.

## 2. Opis modelu matematycznego przyjętego do analizy

W pracy założono, że obciążenia zewnętrzne działają osiowo i wywołują odpór gruntu pod płytą oraz nacisk na pale i dalej reakcje podłoża na ostrza pali. Siły te wywołują stan naprężeń i odkształceń w gruncie.

Celem pracy jest określenie rozkładu odporu gruntu  $R_i$  pod powierzchnią sztywnej płyty oraz udźwigów pali  $U_i$  przy założeniu, że układ płyta-pale jest sztywny i osiadanie płyty oraz pali jest takie same. Założono, że płyta obciążona jest obciążeniem zewnętrznym równomiernie rozłożonym na powierzchni. Analizę rozkładu naprężeń w gruncie przyjęto według wcześniejszych prac autorów [3]. W celu uproszczenia analizy autorzy przyjęli, że nośność pała wynika jedynie z nośności podstawy pała. Przypadek wpływu tarcia o pobocznicę na osiadanie ustroju przedstawiono w poprzednich pracach [4]. W obliczeniach osiadania uwzględniono jedynie pionową składową naprężeń w gruncie (metoda jednoosiowego osiadania). Jako warunek brzegowy przyjęto, że naprężenia krawędziowe płyty są zadane.

Zależności na osiadanie pali otrzymano na podstawie wzorów Boussinesqa przez odpowiednie całkowanie rozkładu naprężeń [1].

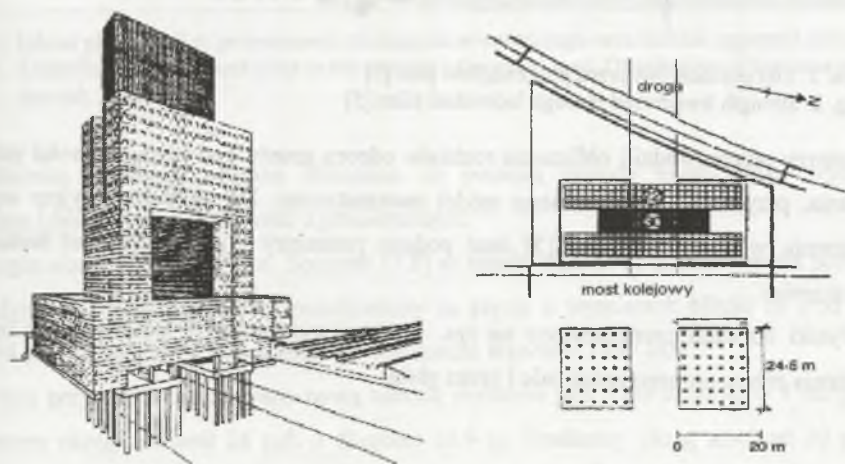
W pracy przyjęto następujące założenia dotyczące konstrukcji i podłoża:

- płyta z palami tworzy sztywną konstrukcję,
- podłoże jest jednorodne i sprężyste. Metoda pozwala uwzględnić rozluźnienie gruntu bezpośrednio pod płytą, jeżeli wykonano zasypkę,

Dla tak przyjętych założeń można napisać układ równań liniowych opisujący całkowite osiadanie w poszczególnych profilach obliczeniowych. Ostatnim, zamykającym równaniem jest suma sił pionowych działających na konstrukcję.

W celu uwzględnienia niejednorodności modułów ścisłości zasyпки gruntowej pod płytą, wprowadzono do układu równań współczynnik  $M$ . Różnicę modułów ścisłości gruntu uwzględniono przy określaniu osiadania gruntu w pionach obliczeniowych. Współczynnik  $M$  reprezentuje zredukowany moduł ścisłości gruntu o miąższości równej długości pali i uwzględnia zasypkę pod płytą, której moduł zwykle jest mniejszy od gruntu rodzimego. Szczegóły opisu metodycznego zjawiska oraz rozwiązania numeryczne przedstawiono w poprzednich pracach [1,3].

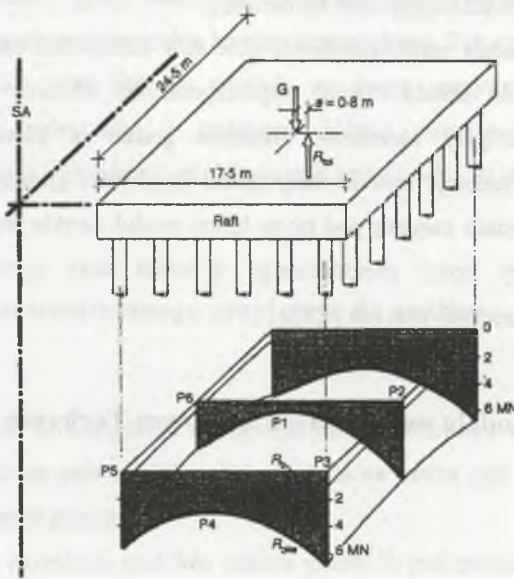
### 3. Weryfikacja modelu na podstawie wieżowca Torhause Frankfurt 1983-1985



Rys. 1. Widok wieżowca oraz schemat i wymiary rozmieszczenia pali pod budynkiem [6]

Fig. 1. View of high building as well as diagram and dimensions of distribution of piles under the building [6]

W latach 1983-1985 podczas budowy wieżowca w Frankfurcie Sommer [5,6] przeprowadził pomiary wysiłków poszczególnych pali oraz osiadania budynku. Budynek o wysokości 130 m posadowiono na dwóch płytach o wymiarach 17,5x24,5 m. Pod każdą z nich umieszczono 42 pale o długości 20 m i średnicy 0.9 m. Całkowite obciążenie jednej płyty wynosiło 200 MN. Maksymalne osiadanie zaobserwowane wynosiło 150 mm. Uzyskane z pomiarów wysiłki w palach pokazano na rys. 2. Natomiast na rys. 3 pokazano udział płyty i pali w przenoszeniu obciążenia pionowego.

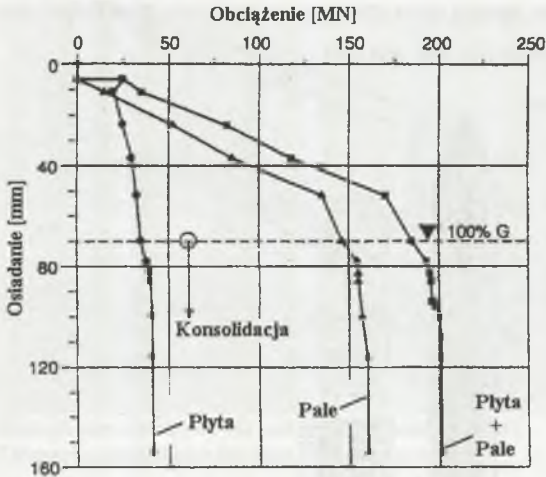


Rys. 2. Siły przenoszone przez poszczególne pale [5]

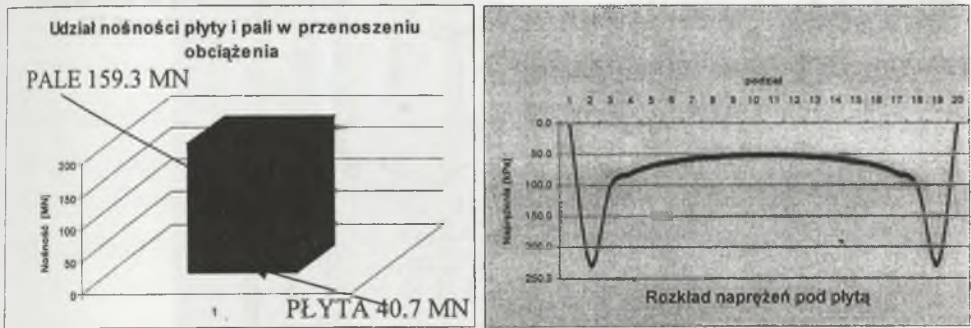
Fig. 2. Strength transferred through individual piles [5]

Autorzy przeprowadzili obliczenia rozkładu odporu gruntu pod płytą, nośności pali oraz osiadania, przyjmując przedstawiony model matematyczny. Do obliczeń przyjęto wymiary fundamentu w pracy Sommera [5] oraz podane parametry gruntowe (moduł ścisłości, zagęszczenie).

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4. Uzyskano zgodny z pomierzonym rozdział obciążenia przenoszonego przez pale i przez płytę.



Rys. 3. Udział płyty i pali w przeniesieniu obciążenia zewnętrznego oraz osiadanie obiektu [5]  
 Fig. 3. Contribution of raft and piles in the transfer of external load and settlement of the building [5]



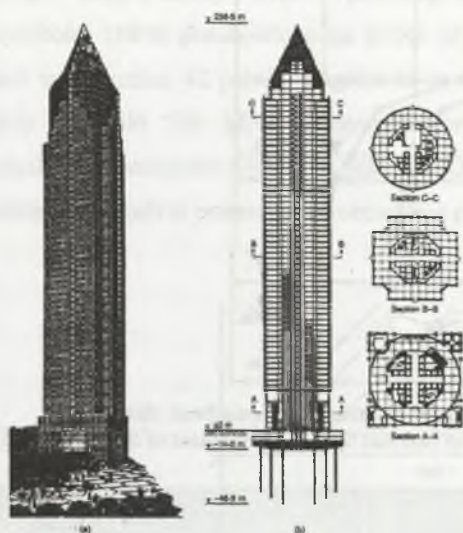
Rys. 4. Udział płyty i pali w przeniesieniu obciążenia zewnętrznego oraz rozkład naprężeń pod płytą  
 Fig. 4. Contribution of raft and piles in the transfer of external load. Distribution of tensions under the raft.

Całkowite osiadanie obiektu obliczone za pomocą metody numerycznej wyniosło 152,4 mm i jest w dobrej zgodności z pomierzonym.

Drugim obiektem, na którym Sommer [7,8] w latach 1988-1991 przeprowadził pomiary, był budynek o wysokości 256 m posadowiony na płycie o wymiarach 60x60 m. Pod płytą wbito 64 pale o średnicy 1.3 m. Całkowite obciążenie wynosiło 1880 MN.

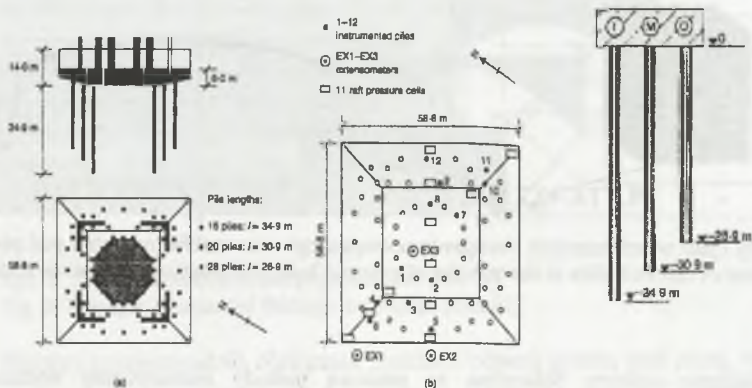
W tym przypadku zastosowano nową metodę rozstawu pali. Pale ułożono w 3 okręgach. Zewnętrzny okrąg zawierał 28 pali o długości 26.9 m. Środkowy okrąg zawierał 20 pali o długości 30.9 m, a wewnętrzny okrąg zawierał 16 pali o długości 34.9 m. Zmiana długości pali miała za zadanie wyrównanie wysiłków w palach i zmniejszenie wewnętrznych naprężeń

płyty. Wyprowadzenie okręgu zewnętrznego, poza ściany nośne budynku, miało zapobiegać niekontrolowanym przechyleniom budowli.



Rys. 5. Schemat budynku oraz układ pali pod płytą [7]

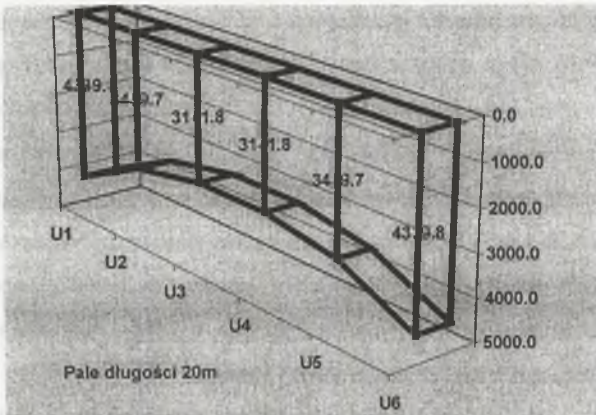
Fig. 5. Diagram of building as well as piles arrangement under the raft [7]



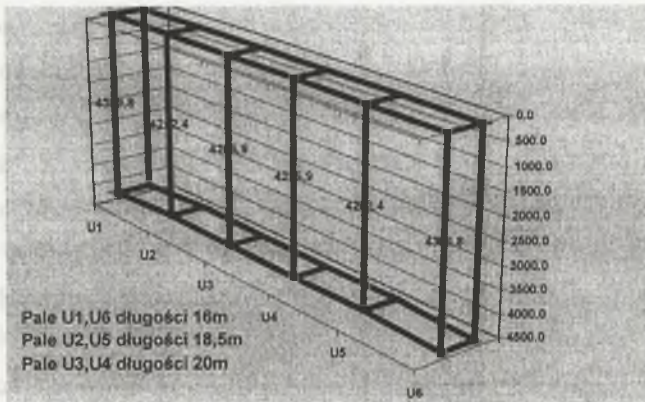
Rys. 6. Schemat rozmieszczenia pali oraz układ pali pod płytą względem długości [8]

Fig. 6. Diagram of piles distribution as well as piles arrangement under the raft in relation to length [8]

Podobnie jak w poprzednim przypadku, autorzy przeprowadzili obliczenia numeryczne, wykorzystując wymiary budynku podane przez Sommera [8] oraz parametry gruntowe. Gdyby założyć, że pod płytą wszystkie pale miały jednakową długość 20 m, to wówczas ich wysiłki bardzo by się różniły (rys. 7). Jeżeli przyjąć różne długości pali podane przez Sommera [8], to wysiłki są w przybliżeniu równe we wszystkich palach (rys. 8). Obliczone w tym przypadku osiadanie całego ustroju wyniosło 24 cm.



Rys. 7. Wyniki obliczeń numerycznych dla pali o takiej samej długości  
Fig. 7. Results of numeric calculations for piles of the same lengths



Rys. 8. Wyniki obliczeń numerycznych dla pali o zmiennej długości  
Fig. 8. Results of numeric calculations for piles of varying lengths

#### 4. Wnioski

1. W pracy przedstawiono analizę warunków posadowienia przedstawionych przez Sommera [5,8] dwóch wieżowców, które oparto na sztywnych ustrojach płytowo-palowych. Analizę przeprowadzono wykorzystując model matematyczny opracowany przez autorów i przedstawiony w poprzednich publikacjach. Do obliczeń przyjęto wymiary i obciążenia oraz parametry gruntowe podane w tych opracowaniach.
2. Dla pierwszego z wieżowców o wysokości 130 m obliczono rozkład naprężeń pod płytą, wysiłki w palach oraz osiadanie ustroju. Przeprowadzone obliczenia dały wyniki rozdziału obciążenia pionowego na płytę i pale zgodne z pomierzonym. Obliczenia

- numeryczne osiadania również pozostawały w dobrej zgodności z pomierzonym [5]. Pomierzone wysiłki w palach wskazują na bardzo różniące się udźwigi. Fakt ten został potwierdzony w obliczeniach numerycznych.
3. Dla drugiego wieżowca o wysokości 256 m przeprowadzono obliczenia numeryczne, które miały na celu sprawdzenie, czy zaprojektowanie pali o różnej długości pozwala na uzyskanie jednakowych udźwignięć. Obliczenia te potwierdziły pomierzone w naturze wysiłki w palach o różnej długości. Gdyby przyjęto w projekcie pale o jednakowej długości, wówczas udźwignięcia różniłyby się znacznie, o 30%. Obliczone osiadanie również pozostaje w dobrej zgodności z pomierzonym w naturze [8].
  4. Program dalszych badań przewiduje weryfikację proponowanej metody dla różnych obiektów posadowionych na sztywnym ustroju płytowo-palowym.

#### LITERATURA

1. Meyer Z. Chruściewicz S.: Model osiadania sztywnej płyty fundamentowej posadowionej na palach. IX Seminarium Naukowe. Regionalne problemy ochrony środowiska w ujęciu Odry. Rugia 2001.
2. Meyer Z. Chruściewicz S.: O obliczaniu osiadania fundamentu sztywnego według teorii Boussinesqa i PN-81/B-03020. Inżynieria i Budownictwo 2001, nr 5.
3. Meyer Z. Chruściewicz S.: Osiadanie dużych fundamentów sztywnych. Inżynieria Morska i Geotechnika 2001, nr 5.
4. Meyer Z. Chruściewicz S.: Wpływ nośności poboczniczy pali w sztywnej konstrukcji płytowo-palowej na udźwignięcie i rozkład naprężeń w gruncie. X Seminarium Naukowe. Regionalne problemy inżynierii środowiska. Geotechnika w warunkach oddziaływania morza. Międzyzdroje 2002.
5. Sommer H., Wittmann P., Ripper P. Piled raft foundation of a tall building in Frankfurt clay. Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Foundn Engng, San Francisco 1985, 4, 2253-2257.
6. Sommer H. Kombinierte Pfahl-Plattengründung eines Hochhauses im Ton. Vorträge der Baugrundtagung in Nürnberg 1986, 391-405.
7. Sommer H., Katzenbach R., DeBenedittis C. Last-Verformungsverhalten des Messturms Frankfurt/Main. Vorträge der Baugrundtagung in Karlsruhe 1990, 371-380.



8. Sommer H. Tamaro G. DeBenedittis C. Messe Turm, foundations for the tallest building in Europe. Proc. 4<sup>th</sup> Int. conf. On Piling and Deep Foundations, Stresa, April 1991, 139-145. Balkema. Rotterdam 1991.
9. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WkiŁ, Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

### Abstract

The paper presents the application of the model adopted to analyse foundations of high buildings on stiff piled raft. The distribution of Boussiensq tensions in soil was measured by means of formulae supplemented with concentration coefficient of Fröhlich tensions. To obtain a numeric solution the area of foundation was divided into small elementary surfaces, at which elementary concentrated strengths were applied. Total tensions in soil were achieved applying the superposition rule. The authors presented results of numeric calculations and compared them with results of field investigations. The analysis carried out shows that both the total settlement and also efforts in individual piles measured and counted give a good agreement. This shows that the adopted mathematical model and computational mechanism are correct and have practical value.