

Wojciech SOŁOWSKI
Politechnika Śląska

ANALIZA INTERAKCJI KONSTRUKCJI SZKIELETOWEJ Z PODŁOŻEM

Streszczenie. W pracy przeanalizowano współdziałanie budynku szkieletowego o konstrukcji płytowo-słupowej z podłożem. Budynek zamodelowano przestrzennie przy użyciu MES, przyjmując sprężysty model materiału. Analizę przeprowadzono przy wykorzystaniu techniki superelementów. Przyjęto dwa przypadki podłoża i potraktowano je jako półprzestrzeń sprężystą. Osiedzenia policzono wykorzystując wzory Steinbrennera – Korotkina. Przeprowadzono iteracje, doprowadzając do ustalenia się ostatecznych osiadań budowli. Przeanalizowano zmianę sił w budowli przy uwzględnieniu osiadań gruntu, rozważono możliwość wzmocnienia budynku w celu przeniesienia obciążeń od osiadań.

ANALYSIS OF SLAB – COLUMN STRUCTURE INTERACTION WITH THE GROUND

Summary. The interaction of slab – column structure with ground has been analysed in this paper. 3D FEM elastic model of the structure has been created and solved with the use of superelements technique. Two examples of the ground have been taken and modelled as an elastic halfspace. The Steinbrenner-Korotkin formula has been used to calculate the settlements of the foundation. After an iteration process the settlements have been stabilized. The change of inner forces has been analysed and the possibility of strengthening the structure for increased forces has been considered.

1. Wstęp

Problem współpracy budowli z podłożem jest skomplikowany. Obecna filozofia projektowania w zasadzie rozdziela projektowanie budynku oraz jego posadowienia i sugeruje, by ograniczyć się co najwyżej do rozważania układu fundament – podłoże, pomijając wzajemny wpływ na siebie sztywnej budowli traktowanej jako całość i bryły gruntu, na której jest ona posadowiona. Rozwiązanie zadania, w którym równocześnie brane

pod uwagę są budynek i podłoże, jest trudniejsze, ale otrzymane wyniki pozwalają na bardziej realistyczną ocenę wyężenia budowli oraz pracy podłoża. Trzeba jednak pamiętać, że ostateczne osiadania układu budynek – podłoże (i ich rozkład) zależą nie tylko od pierwotnych nierównomierności obciążenia podłoża i charakterystyki warstw gruntowych, ale także od sztywności budowli i wzajemnego nakładania się naprężeń w podłożu od sąsiednich stóp/fundamentów.

Problemem jest zarówno modelowanie budowli, jak i gruntu. Model materiału dla budynku do celów inżynierskich może być modelem sprężystym, natomiast dla podłoża gruntowego taki model nie jest wystarczający i może służyć tylko jako pierwsze przybliżenie.

Zdaniem autora można wyróżnić trzy podstawowe sposoby podejścia do rozwiązania problemu: model MES zarówno gruntu, jak i podłoża, przy użyciu różnych modeli konstytutywnych, ale w obrębie jednego programu (jedno duże zadanie); model MES gruntu i podłoża, utworzony przy użyciu dwóch programów, a następnie iteracyjne ich połączenie; modelowanie budowli przy użyciu MES, a podłoża w inny sposób, a następnie połączenie modeli, np. przy użyciu iteracji.

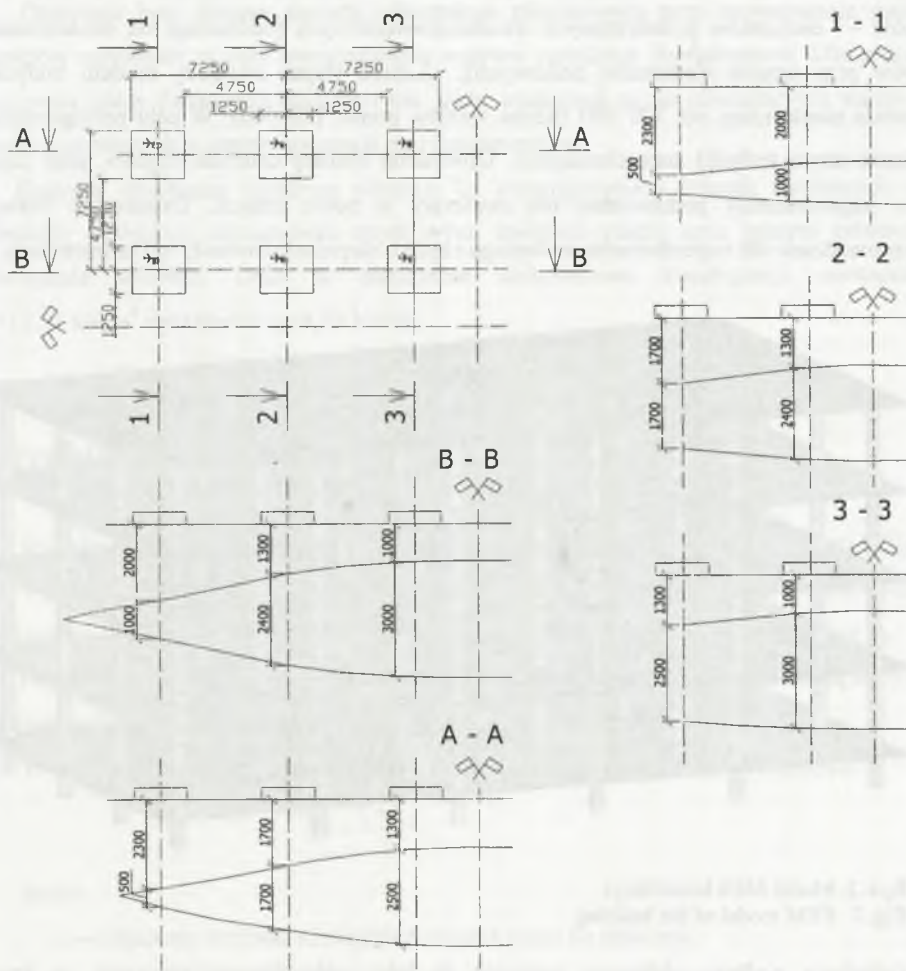
Dodatkowo istotne jest, że sztywność budowli jest o kilka rzędów wyższa od sztywności gruntu, co powoduje problemy w strefie kontaktowej. Docelowo wydaje się właściwe modelowanie zarówno budowli, jak i gruntu przy użyciu MES, z zastosowaniem różnych modeli konstytutywnych materiałów.

2. Cel pracy, przyjęte założenia

Praca jest próbą przeanalizowania interakcji budowla – podłoże przy użyciu metod dostępnych w praktyce inżynierskiej. Pokazano, że wzmocnienie budowli na zwiększone osiadania, nierównomierności osiadań jest możliwe, i może być traktowane jako kolejna metoda zapewnienia bezpieczeństwa budowli podczas współpracy z gruntem. Takie podejście może być bardziej ekonomiczne od zmiany sposobu posadowienia lub jakiegokolwiek metody szeroko rozumianego wzmocnienia podłoża. (Większe różnice osiadań i deformacje muszą być jednak dopuszczalne podczas eksploatacji budowli).

Analizę przeprowadzono na budynku o konstrukcji płytowo-słupowej o następujących parametrach geometrycznych: wymiary kondygnacji w rzucie 32,4 x 20,4 m, liczba kondygnacji – 4, grubość płyty kondygnacji 0,2 m, wymiary siatki słupów 6 x 6 m, długość wspornika 1,2 m, wymiary przekroju poprzecznego słupa 40 x 40 cm. Przyjęto parametry

materiałowe odpowiadające betonowi B30, to jest $E=E_{cm}=30500$ MPa, $\nu=0,2$, oraz posadowienie bezpośrednio na stopach fundamentowych o wymiarach $2,5 \times 2,5$ m. Problem rozwiązano dla dwóch przypadków podłoża gruntowego oraz, w celu porównania, dla podłoża idealnie sztywnego (brak osiadań). Podłoże gruntowe dobrano tak, by różnice



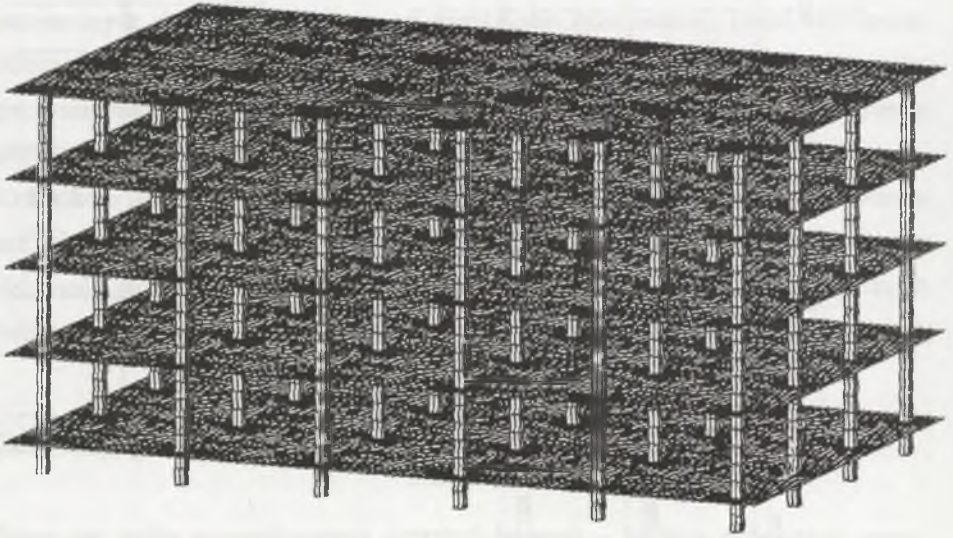
Rys. 1. Soczewka słabego gruntu pod budynkiem

Fig. 1. Lens-shaped layer of weak ground under the building

osiadań były nieco większe od dopuszczalnych. W pierwszym przypadku było ono jednorodną warstwą o parametrach $E=10000$ kPa, $\nu=0,2$, natomiast w drugim układem z symetryczną soczewką usytuowaną pod budynkiem (rys. 1), gdzie parametry gruntu $E=20000$ kPa, $\nu=0,4$ oraz parametry słabej soczewki gruntowej $E=6000$ kPa, $\nu=0,25$.

3. Model budynku i podłoża

Budynek zamodelowano przestrzennie przy użyciu MES, przyjmując sprężysty model materiału. Do modelowania stropów użyto elementów powłokowych ośmiowęzłowych, a słupów – elementów przestrzennych dwudziestowęzłowych (odchodząc od modelowania słupów przy użyciu elementów belkowych). Liczba stopni swobody modelu budynku wynosiła nieco mniej niż 700 000 (liczba węzłów ponad 120 000). W celu przyspieszenia obliczeń użyto techniki superelementów. Utworzono obiekty czterech rzędów, przy czym tylko superelementy podstawowe nie zawierały w sobie innych. Ostatecznie iteracje przeprowadzono dla superelementu czwartego rzędu o stopniach swobody w fundamentach.



Rys. 2. Model MES konstrukcji
Fig. 2. FEM model of the building

Osiadania podłoża obliczono traktując je jako półprzestrzeń sprężystą, w której naprężenia pod narożem fundamentu (wymiary $B \times L$) obciążonego równomiernie q wyznaczono przy użyciu wzorów Steinbrennera – Korotkina:

$$\sigma_x = \frac{q}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda\xi}{D \cdot (\lambda^2 + \xi^2)} - \arctan\left(\frac{\xi \cdot D}{\lambda}\right) + (1 - 2\nu) \left(\arctan \lambda - \arctan \frac{D}{\lambda \cdot \xi} \right) \right] \quad (1a)$$

$$\sigma_y = \frac{q}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\lambda\xi}{D \cdot (1 + \xi^2)} - \arctan\left(\frac{\xi \cdot D}{\lambda}\right) + (1 - 2\nu) \left(\arctan \lambda - \arctan \frac{D \cdot \lambda}{\xi} \right) \right] \quad (1b)$$

$$\sigma_z = \frac{q}{2\pi} \cdot \left[\arctan\left(\frac{\lambda}{\xi \cdot D}\right) + \frac{\lambda \cdot \xi}{D} \cdot \left(\frac{1}{1+\xi^2} + \frac{1}{\lambda^2 + \xi^2} \right) \right], \quad (1c)$$

$$\text{gdzie: } \lambda = \frac{L}{B}, \quad \xi = \frac{z}{B}, \quad D = \sqrt{1 + \lambda^2 + \xi^2}.$$

Osiadania były liczone metodą odkształceń trójosiowych przy zastosowaniu metody punktów narożnych w celu uwzględniania wpływu sąsiednich fundamentów. Dla gruntu z soczewką każdy fundament obliczano tak, jakby znajdował się na równoległych warstwach gruntu, uzyskanych z warstw soczewki pod fundamentem.

Budynek obciążono ciężarem własnym (z uwzględnieniem ścianek działowych oraz obudowy budynku), obciążeniem użytkowym, śniegiem (dach) oraz jednym schematem obciążenia wiatrem. Dało to obciążenie obliczeniowe kondygnacji powtarzalnej $q=12,21 \text{ kN/m}^2$ oraz dachu $q_d=8,03 \text{ kN/m}^2$.

4. Przebieg iteracji osiadań

Wyjściowe siły, obliczone przy braku osiadań, wynosiły: $Q_1=1026[\text{kN}]$, $Q_2=1475[\text{kN}]$, $Q_3=1432[\text{kN}]$, $Q_4=1471[\text{kN}]$, $Q_5=2156 [\text{kN}]$, $Q_6=2094 [\text{kN}]$. Przebieg procesu iteracji wybranego fundamentu w przypadku podłoża jednorodnego przedstawiono w tablicy 1.

Przy iteracji osiadań iterowano tylko różnice osiadań, ponieważ tylko one mają wpływ na zmianę reakcji oraz sił wewnętrznych w budynku.

W celu zapewnienia zbieżności iteracji iteracja była przeprowadzana następująco:

$$r = \frac{r_i + r_{i-1}}{2},$$

gdzie:

r – ostateczna wartość siły/różnicy osiadań użyta do obliczeń,

r_i – wartość siły/różnicy osiadań uzyskana w i -tym kroku iteracji,

r_{i-1} – wartość siły/różnicy osiadań przyjęta w kroku iteracji o numerze $(i-1)$.

Iterację uznano za zakończoną, kiedy różnica między kolejnymi wynikami w reakcjach była mniejsza od $1 [\text{kN}]$, a w osiadaniach od $0,1 [\text{mm}]$.

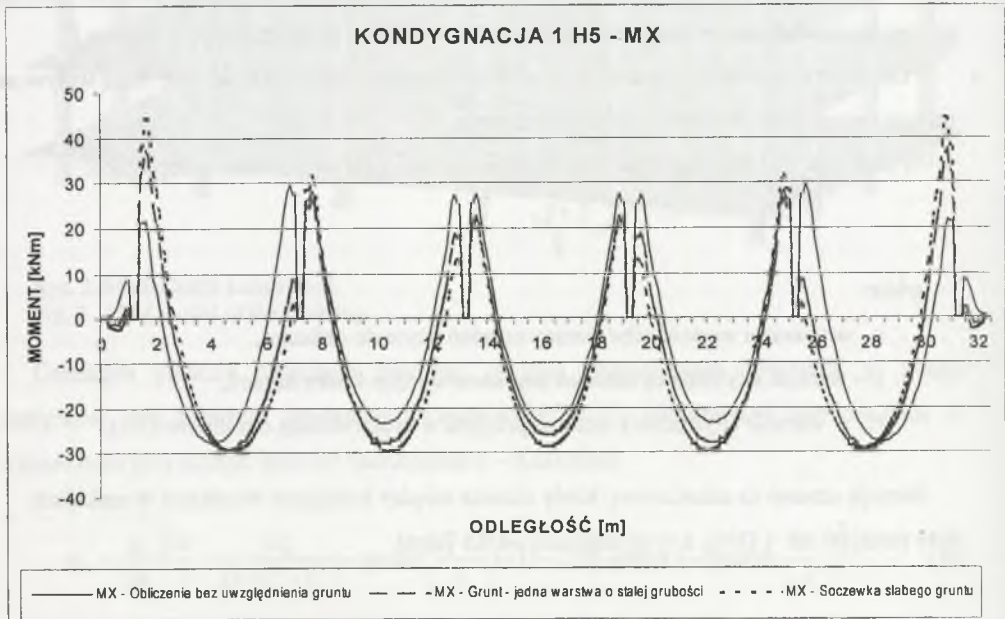
Tablica 1

Przebieg iteracji (fundament nr 4) w podłożu jednorodnym

Iteracja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Q [kN]	2156	1062	1730	1904,8	1808,6	1785	1806,2	1792	1793,3	1795	1794,8
s [mm]	103	79,11	81,52	86,62	87,16	86,92	87,23	87,09	87,05	87,06	

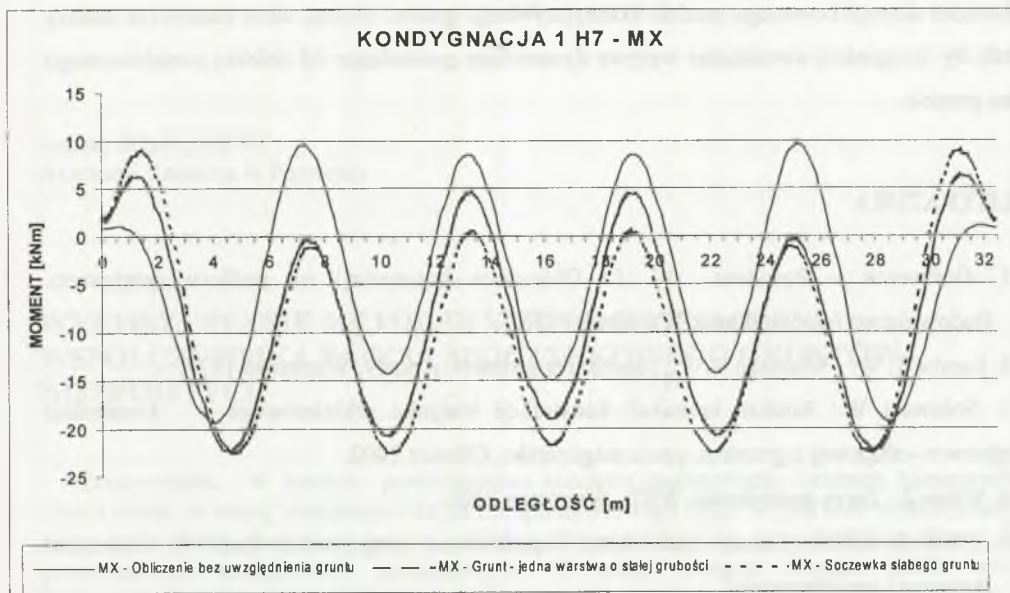
Po zakończeniu iteracji obliczono i przeanalizowano siły wewnętrzne w konstrukcji w obu przypadkach posadowienia. Generalizując, siły w konstrukcji w zasadzie rosły. Jako że najbardziej wyężoną częścią konstrukcji płytowo – słupowej jest połączenie słupów z płytą stropową, tam też wzrost sił jest największy. Należy dodać, że obszar ten nastęrcza dużych problemów w analizie numerycznej. Zmianę sił wewnętrznych przeanalizowano wzdłuż ścieżek przechodzących przez słupy, osie przęseł oraz ścieżek pośrednich. Łącznie przeanalizowano zmianę sił (M_x , M_y , M_{xy} , T_x , T_y , T_{xy}) wzdłuż dwudziestu ścieżek. Wykonano również analizę błędów wynikających z przyjętego modelu, z której wyniknęło, że miarodajne wyniki uzyskano w odległości około 30-50 cm od krawędzi słupa.

Typowy przebieg wykresu momentów zginających w paśmie słupowym przedstawiono na rysunku 3. Typowy przebieg wykresu momentów zginających w paśmie przęsłowym przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Typowy przebieg momentów zginających w paśmie słupowym

Fig. 3. Typical bending moment function in columnar band



Rys. 4. Typowy przebieg momentów zginających w paśmie przęsłowym
 Fig. 4. Typical bending moment function in span band

5. Wnioski

Wpływ osiadań ma istotne znaczenie w dystrybucji sił wewnętrznych w budynku. Zmiany wartości momentów zginających są istotne, w rozważanych przypadkach rzadko jednak przekraczają 20% wartości wyjściowej. Bardziej wzrastają siły tnące (na obszarze całego stropu), jednak pozostają na poziomie, na którym mogą być przeniesione przez żelbet niezbrojony na ścinanie. Można zaprojektować budynek na dodatkowe oddziaływania od zwiększonych osiadań, przy czym wydaje się, że całkowite obliczeniowe zbrojenie budynku zwiększy się nie więcej niż o 30%. Należy pamiętać, że zwykle duża część tego zbrojenia i tak często jest montowana w konstrukcji, np. przy standaryzowaniu zbrojenia wszystkich słupów.

Warto podkreślić, że w wielu przypadkach zmiana filozofii projektowania, potraktowanie budynku oraz podłoża razem, pozwala na podniesienie dokładności prognozowania osiadań budynku, jak i wartości sił wewnętrznych w elementach konstrukcji, a co za tym idzie na efektywniejsze (i w konsekwencji – tańsze) zaprojektowanie konstrukcji.

Prezentowane rozwiązanie jest pierwszym przybliżeniem rozwiązania problemu interakcji budynek – podłoże. W przyszłości należy zmienić sposób modelowania podłoża oraz użyć

bardziej skomplikowanego modelu konstytutywnego gruntu. Można także rozszerzyć analizę tak, by uwzględnić ewentualne wpływy dynamiczne pochodzące od obiektu posadowionego na gruncie.

LITERATURA

1. Gorbunow – Posadow M. I.: Obliczanie konstrukcji na podłożu sprężystym. Budownictwo i Architektura, Warszawa 1956.
2. Lambe T. W. , Whitman R. V.: Mechanika gruntów. Arkady, Warszawa 1977.
3. Sołowski W.: Analiza interakcji konstrukcji budynku szkieletowego o konstrukcji płytowo – słupowej z gruntem, praca magisterska. Gliwice 2002.
4. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa 2000.
5. PN-81/B-03020 „Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie”.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Eugeniusz DEMBICKI

Abstract

The interaction of slab – column structure with ground has been analysed in this paper. 3D FEM elastic model of the structure – 32.4 long, 20.4 m wide building – has been created and solved with the use of superelements technique. Such approach has been used to spare computer time needed for solution of the problem.

Two examples of the ground have been taken. The ground was modelled as an elastic halfspace. The Stinbrenner-Korotkin formula has been used to calculate the settlements of the foundation. Computer iteration of settlements has been executed. After achieving the final settlements, the change of inner forces has been analysed, in comparison with the solution that has not taken settlements into account. The possibility of projecting the structure for greater settlements and then strengthening the structure for increased forces has also been considered. The analysis has shown that such approach may be useful in cases, where the settlements are not much larger than generally acceptable values (by means of codes etc., not the conditions of use), and any strengthening of soils or changing foundations (esp. for piles) is much more expensive to the proposed strengthening of the construction.