

GRZEGORZ KACPRZAK*

ANALIZA PORÓWNAWCZA UKŁADU PŁYTA–PAL
– TEORIA A PRAKTYKACOMPARISON ANALYSIS OF RAFT–PILE SYSTEM
– THEORY AND PRACTICE

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę projektowania fundamentów płytowo-palowych. Wyniki analizy analitycznej i numerycznej porównano z rzeczywistymi osiadaniami płyty opartej na podłożu wzmocnionym kolumnami CMC. Wskazano na przydatność metody przy doborze optymalnej ilości kolumn zmniejszających osiadanie fundamentu płytowego.

Słowa kluczowe: fundament płytowo-palowy, wielkowymiarowe testy obciążeniowe

Abstract

The paper presents designing method of piled raft foundation. The results of analytical and numerical simulations are compared with the real settlements of the raft on a ground reinforced with CMC columns. Usefulness of analytical method to design the optimal number of piles diminishing raft settlement is proved.

Keywords: piled raft foundation, load tests in natural scale

* Dr inż. Grzegorz Kacprzak, Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska.

Oznaczenia

- K_{pr} – sztywność fundamentu płytowo-palowego [MN/m]
 K_p – sztywność grupy pali [MN/m]
 K_r – sztywność płyty [MN/m]
 β_p – procentowy udział grupy pali w przenoszeniu obciążenia [–]
 s_u – osiadanie natychmiastowe [m]
 s_{CF} – osiadanie konsolidacyjne [m]

1. Wstęp

W praktyce projektowej powszechne jest postępowanie, które przewiduje dla posadowienia bezpośredniego na stopach, ławach, płycie fundamentowej, w przypadku zbyt dużej odkształcalności gruntu pod fundamentem, przekazanie całkowitego obciążenia na pale.

W ciągu ostatnich kilku lat w Polsce można zauważyć rosnące zainteresowanie, zwłaszcza ze względów ekonomicznych, stosowaniem rozwiązania alternatywnego, tzn. ograniczonej liczby pali w posadowieniu konstrukcji budowlanych na fundamencie płytowo-palowym w celu ograniczenia osiadania budowli. W przeciwieństwie do powszechnie stosowanego posadowienia na palach, gdzie całkowite obciążenie przekazywane jest na pale, w układzie płyta–pál do współpracy włączona zostaje również płyta fundamentowa.

Temat włączenia płyty do współpracy z palami w układzie płyta–pál był już wcześniej wielokrotnie prezentowany (Zeevaert [1], Davis and Poulos [2], Hooper [3, 4], Burland [5], Sommer [6], Price and Wardle [7], Franke [8], jak również wielu innych), jednak pomimo przeprowadzenia badań i analiz teoretycznych nie w pełni można wyjaśnić wzajemny wpływ, jaki wywierają na siebie elementy fundamentu płytowo-palowego. W związku z tym, jak dotychczas, nie opracowano jednoznacznych wytycznych do projektowania. Brak wiedzy w połączeniu z przyzwyczajeniami projektantów do koncepcji pali jako fundamentów przenoszących całe obciążenie sprawiają, że stosowanie fundamentów płytowo-palowych w posadowieniu różnych konstrukcji jest nadal mało popularne.

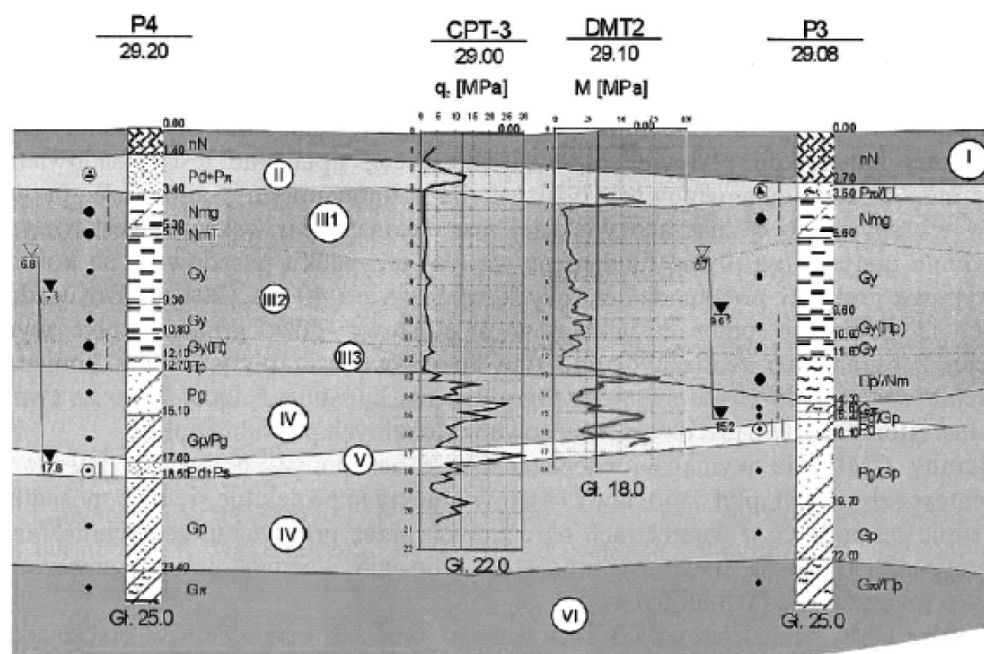
Niniejszy artykuł przedstawia metodę projektowania fundamentów płytowo-palowych na podstawie prac Poulosa (Hemsley [9]), Poulosa i Davisa [10], Randolpha [11, 12]. W pracy zostały wykorzystane pomiary osiadań płyt wykonane w czasie wielkowymiarowych prób obciążeniowych, które zostały przeprowadzone na gruncie rodzimym bez wzmocnienia (posadowienie bezpośrednie na płycie), a następnie na wzmocnionym gruncie z zastosowaniem kolumn betonowych CMC – Colonnas à Module Contrôlé (posadowienie na fundamencie płytowo-palowym).

Ostatnia część pracy została poświęcona analizie numerycznej MES 3D w programie ZSoil. Wyniki osiadań uzyskane z wyżej wymienionej analizy, jak również z metody analitycznej porównano z osiadaniami uzyskanymi z próby obciążeniowej fundamentu płytowo-palowego. Porównaniu poddano także udział procentowy pali i płyty w przenoszeniu przyłożonego obciążenia.

2. Wielkowiemiarowe próby obciążeniowe – informacje ogólne

Plan testów obejmował obciążenie o wartości 120 kPa, jakie zostało przyłożone na płytę betonową o grubości 30 cm i wymiarach 5×5 m, posadowioną bezpośrednio na gruncie rodzimym lub na 9 kolumnach CMC. Testy obciążeniowe w dużej skali zostały wykonane w zakresie projektowania fundamentów kompleksu mieszkalnego, złożonego z czterech budynków od 4 do 11 kondygnacji. Inwestycję zrealizowano w Warszawie na obszarze Rynny Żoliborskiej wypełnionej osadami jeziornymi, gdzie dominowały gytie o miąższości od 7,61 do 17,52 m (rys. 1).

Charakterystyka konstrukcji budynku, szczegóły dotyczące badań terenowych, w tym prób obciążeniowych w dużej skali, wyniki osiadań płyty na podłożu bez wzmocnienia/na podłożu ze wzmocnieniem, jak również opis metody wzmocnienia podłoża słabonośnego za pomocą kolumn CMC przedstawiono w Godlewski [13, 14].



Rys. 1. Fragment przekroju geotechnicznego pod projektowanym budynkiem

Fig. 1. Fragment of geotechnical section under designing building



Rys. 2. Wielkowymiarowe próby obciążeniowe

Fig. 2. Load tests in natural scale

3. Oszacowanie sztywności fundamentu płytowo-palowego oraz procentowego udziału pali i płyty w przenoszeniu obciążenia – zasady ogólne

Randolph [11, 12] przedstawił poręczną metodę oszacowania w sposób przybliżony sztywności fundamentu płytowo-palowego, jak również procentowego udziału pali i płyty w przenoszeniu przyłożonego obciążenia. Dla większości przypadków można stosować następujące równanie:

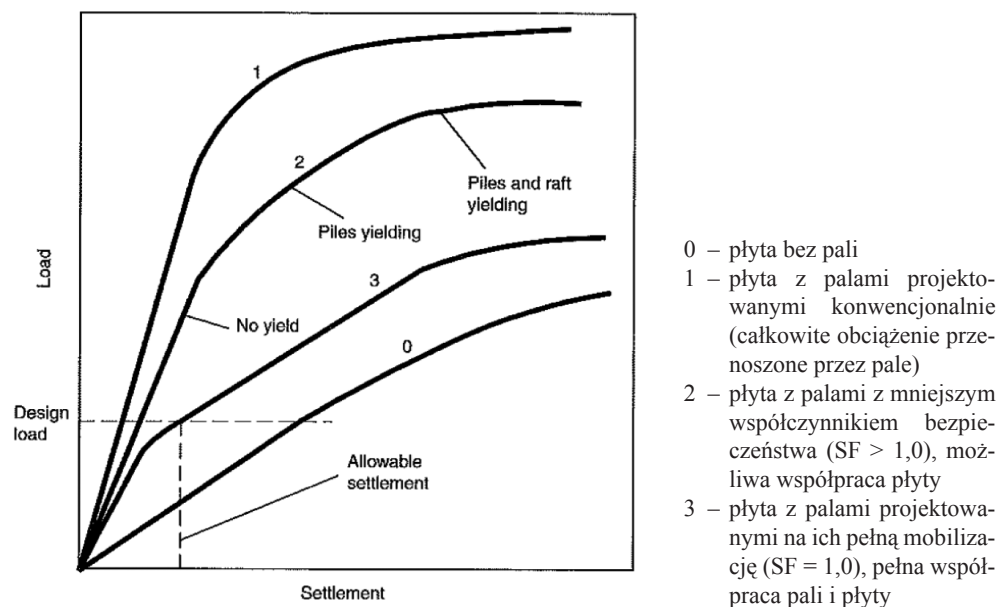
$$K_{pr} = \frac{1 - 0,6(K_r / K_p)}{1 - 0,64(K_r / K_p)} \cdot K_p \quad (1)$$

Procentowy udział grupy pali w przenoszeniu obciążenia przyłożonego na fundament płytowo-palowy można szacować zgodnie z poniższym równaniem:

$$\beta_p = \frac{1}{1 + \alpha} \quad (2)$$

gdzie:

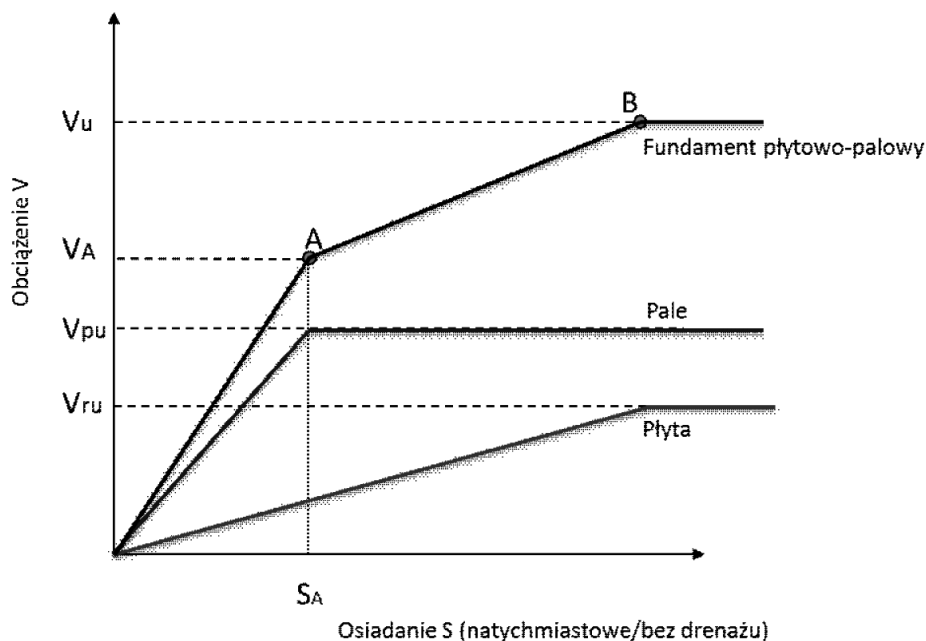
$$\alpha = \frac{0,2}{1 - 0,8(K_r / K_p)} \left(\frac{K_r}{K_p} \right)$$



Rys. 3. Zależność obciążenie–osiadanie fundamentu płytowo-palowego według różnych podejść projektowych, Hemsley [9]

Fig. 3. Dependence of load on settlement of piled raft foundation according to different design approaches, Hemsley [9]

Należy zaznaczyć, że metoda Randolpha ogranicza się do liniowej zależności obciążenie–osiadanie dla fundamentu płytowo-palowego, który rozważa się jako grupę pali z płytą fundamentową biorącą udział w przenoszeniu obciążenia. Dalszą modyfikacją tej metody może być rozwiązanie podane przez Poulosa i Davisa [10], wprowadzające trzyliniową zależność obciążenie–osiadanie fundamentu płytowo-palowego lub metoda Poulosa (Hemsley [9]), wprowadzająca hiperboliczną zależność obciążenie–osiadanie. Wszystkie wyżej wspomniane przebiegi osiadania w funkcji obciążenia zakładają pracę fundamentu płytowo-palowego w warunkach bez odpływu (ang. *non drained conditions*).



Rys. 4. Zależność obciążenie–osiadanie fundamentu płytowo-palowego przyjęta w niniejszej pracy. V_u – pionowa składowa oporu granicznego podłoża gruntowego pod płytą, V_{pu} – nośność graniczna grupy pali, V_u – nośność graniczna fundamentu płytowo-palowego

Fig. 4. Dependence of load on settlement of piled raft foundation adopted in this paper. V_u – ultimatum load of raft, V_{pu} – ultimatum load of pile group, V_u – ultimatum load of piled raft foundation

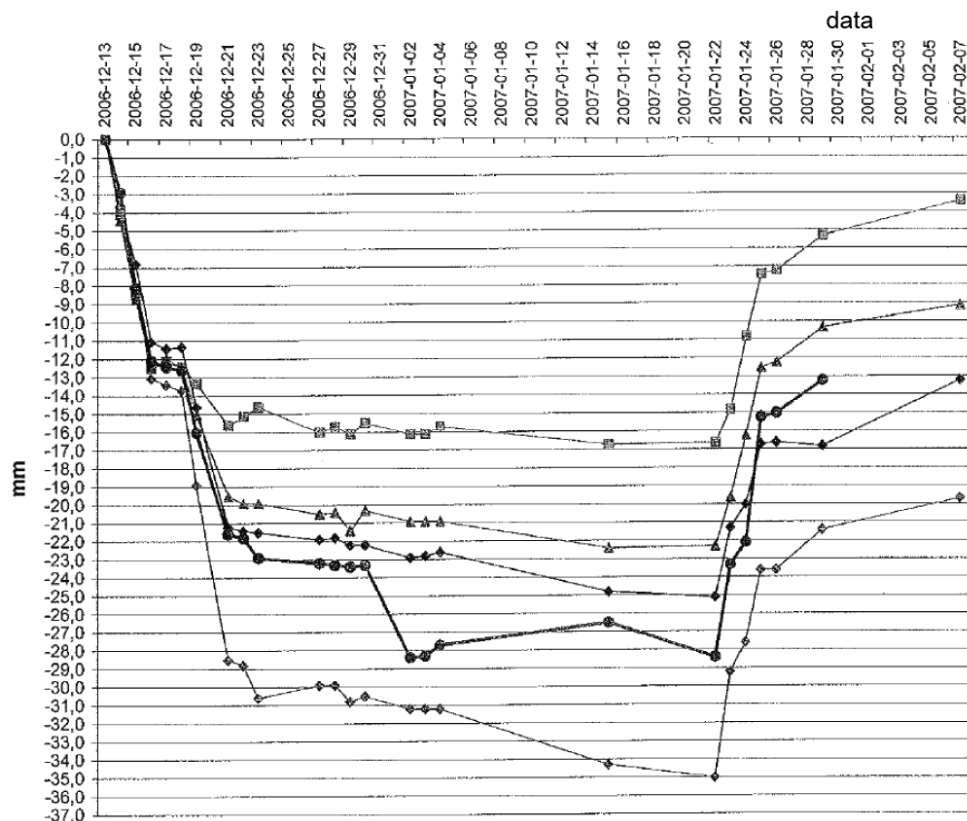
4. Sztywność płyty fundamentowej

Na podstawie obserwacji osiadania płyty w czasie próbnego obciążenia można oszacować sztywność płyty posadowionej bezpośrednio na podłożu bez wzmocnienia.

Z przeprowadzonych pomiarów osiadań płyt posadowionej na podłożu bez wzmocnienia wywnioskowano, że osiadania natychmiastowe i osiadania całkowite, odpowiadające pracy płyty w warunkach bez odpływu i z odpływem, wyniosły odpowiednio 22,0 i 28,0 mm. Dla tak przyjętej wielkości osiadania dla zadanego obciążenia o wartości 3000 kN sztywność płyty K_r wyniosła:

$K_r = 136,6 \text{ MN/m}$ w warunkach bez odpływu,
 $K_r' = 107,1 \text{ MN/m}$ w warunkach z odpływem.

5. Sztywność grupy pali



Rys. 5. Płyta na podłożu bez wzmocnienia. Przesunięcia płyty w czasie w 5 punktach kontrolnych (4 naroża + środek płyty)

Fig. 5. Raft on ground without reinforcement. Settlements of raft in function of time in 5 control points (4 corners + center of raft)

Dla analizowanego terenu badań wykonano próbne obciążenia 11 pojedynczych kolumn CMC. Rysunki 6 i 7 przedstawiają odpowiednio liniową regresję zależności osiadanie całkowite–obciążenie i osiadanie natychmiastowe–obciążenie pojedynczych pali. Wartość osiadania natychmiastowego została przyjęta za dziennikiem osiadań każdego pala jako pierwsza wartość średnia z 4 czujników, odczytana dla zadanego obciążenia. Ze względu na zmienne warunki gruntowe, w tym szczególnie zmienną miąższość gytii, można zaobserwować 3 typowe powtarzające się tendencje osiadanie–obciążenie kolumn. Przyjmując za Poulosem (Hemsley [9]), że sztywność grupy pali można oszacować jako iloczyn sztywności pojedynczego pala i współczynnika grupy pali równego $(n_p)^{0,5}$, gdzie n_p oznacza liczbę pali w grupie, do dalszych rozważań przyjęto trzy sztywności grupy pali:

$$K_{p1} = 303,0 \text{ MN/m} \times (9)^{0,5} = 909 \text{ MN/m}$$

$$K_{p1}^z = 285,7 \text{ MN/m} \times (9)^{0,5} = 857,1 \text{ MN/m}$$

$$K_{p1} = 156,3 \text{ MN/m} \times (9)^{0,5} = 468,9 \text{ MN/m}$$

$$K_{p1}^z = 149,3 \text{ MN/m} \times (9)^{0,5} = 447,9 \text{ MN/m}$$

$$K_{p1} = 62,9 \text{ MN/m} \times (9)^{0,5} = 188,7 \text{ MN/m}$$

$$K_{p1}^z = 59,9 \text{ MN/m} \times (9)^{0,5} = 179,7 \text{ MN/m}$$

w warunkach bez odpływu

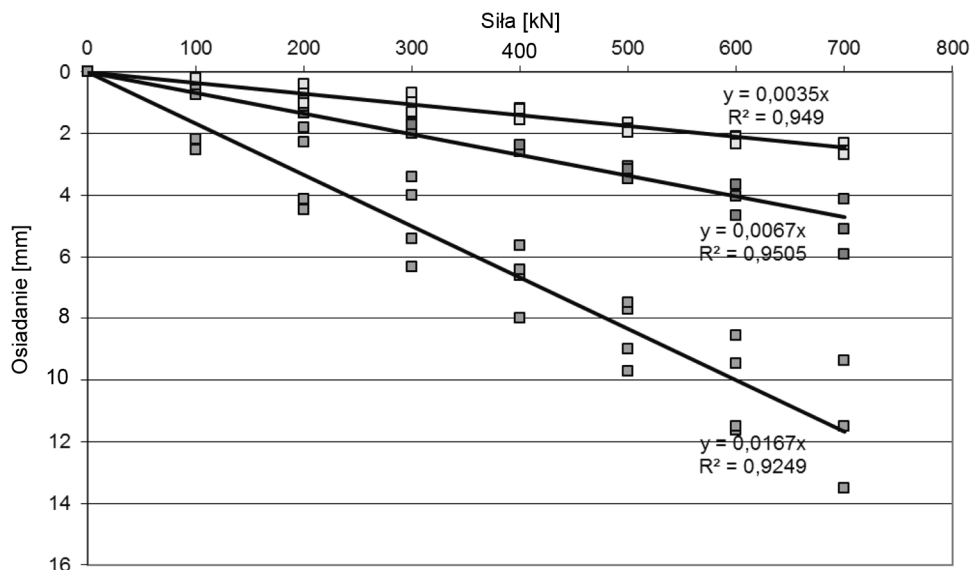
w warunkach z odpływem

w warunkach bez odpływu

w warunkach z odpływem

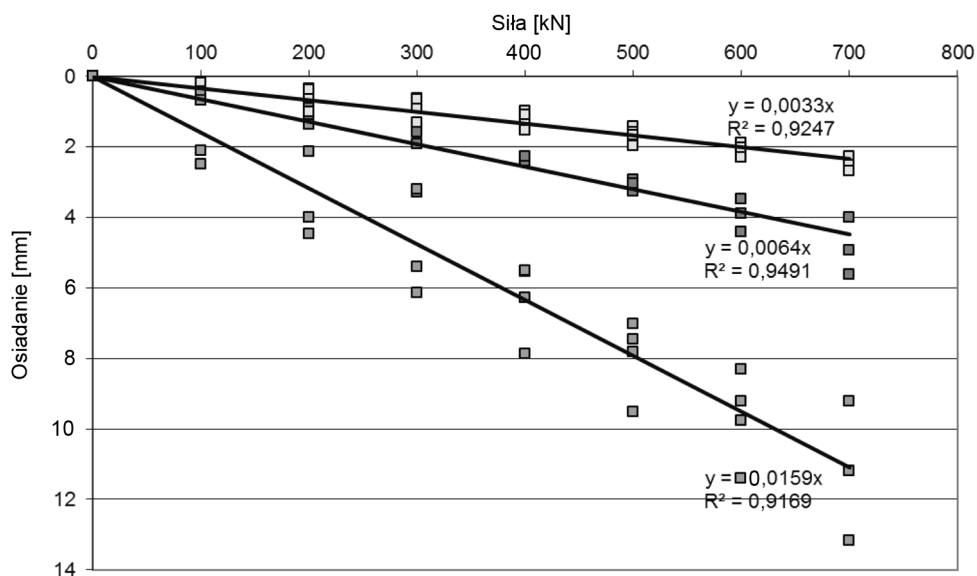
w warunkach bez odpływu

w warunkach z odpływem



Rys. 6. Zależność osiadanie całkowite–obciążenie pojedynczych kolumn CMC

Fig. 6. Dependence of total settlement on load for single columns CMC



Rys. 7. Zależność osiadanie natychmiastowe–obciążenie pojedynczych kolumn CMC

Fig. 7. Dependence of immediate settlement on load for single columns CMC

6. Sztywność fundamentu płytowo-palowego wg metody analitycznej

Korzystając z ww. obserwacji osiadań płyty i pali oraz równania (1), można wyznaczyć sztywność fundamentu płytowo-palowego K_{pr} , jak również – posługując się równaniem (2) – można oszacować udział pali i płyty w przenoszeniu obciążenia przyłożonego na fundament:

$K_{pr} = 198,9-915,1$ MN/m	w warunkach bez odpływu
$K_{pr}^s = 186,7-861,8$ MN/m	w warunkach z odpływem
$\beta_p = 0,74 - 0,97$	w warunkach bez odpływu
$\beta_p^s = 0,81 - 0,97$	w warunkach z odpływem

7. Osiadanie fundamentu płytowo-palowego wg metody analitycznej

Poulos (Hemsley [9]), podobnie jak Poulos i Davis [10], proponuje, by osiadania fundamentu płytowo-palowego obliczać jako sumę osiadania natychmiastowego i osiadania konsolidacyjnego. Osiadanie natychmiastowe w analizowanym przypadku wyniesie:

$$3 \text{ MN/ (od } 198,9 \text{ do } 915,1 \text{ MN/m)} = \text{od } 0,0151 \text{ do } 0,0033 \text{ m}$$

Osiadanie konsolidacyjne (Hemsley [9]) można obliczyć jako różnicę osiadania całkowitego i osiadania natychmiastowego:

$3 \text{ MN} \times 1 / [(\text{od } 186,7 \text{ do } 861,8 \text{ MN/m}) - (\text{od } 198,9 \text{ do } 915,1 \text{ MN/m})] = \text{od } 1,0 \text{ do } 0,2 \text{ mm}$

Stąd osiadanie całkowite fundamentu płytowo-palowego wyniesie od 16,1 do 3,5 mm.

Podane obliczenia oparto na rzeczywistych pomiarach osiadań płyty i pali. Podobną analizę można przeprowadzić na podstawie osiadań płyty i pali obliczonych wg Polskich Norm lub innych wytycznych technicznych. Należy podkreślić różnicę wyników osiadań fundamentu płytowo-palowego wynikającą z odmiennej pracy pali.

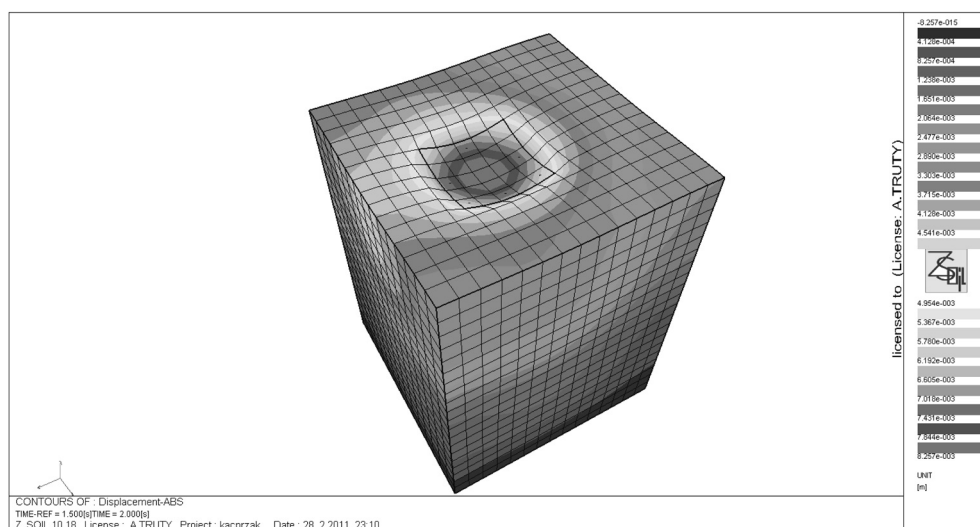
8. Interpretacja wyników analizy numerycznej

Do porównania obliczeń analitycznych wykonano analizę numeryczną MES w programie ZSoil dla fundamentu płytowo-palowego o identycznych wymiarach geometrycznych (płyta betonowa $5 \times 5 \text{ m}$, grubość 30 cm), posadowionego na podłożu rodzimym o parametrach nawierconych w sąsiedztwie badań próbnych (CPT 3) i wzmocnionym 9 kolumnami betonowymi CMC o średnicy 40 cm w rozstawie $2 \times 2 \text{ m}$. Wyniki osiadania fundamentu płytowo-palowego, jak również wykres sił w poszczególnych kolumnach, przedstawiono poniżej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy numerycznej, uwzględniającej pracę układu płyta-pal w warunkach z odpływem, otrzymano osiadanie minimalne płyty o wartości 5,4 mm oraz osiadanie maksymalne płyty o wartości 8,3 mm oraz odczytano siłę przenoszoną przez grupę pali:

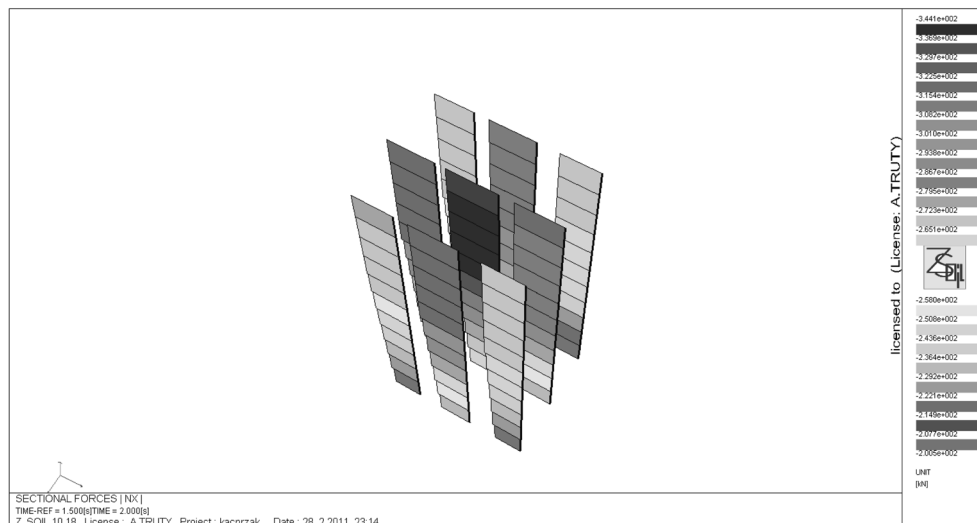
$$F_g = 344,1 \text{ kN (kolumna środkowa)} + 279,5 \text{ kN} \times 4 \text{ (kolumny narożne)} + 322,5 \times 4 \text{ (kolumny brzegowe)} = 2752,1 \text{ kN}$$

Stąd udział pali w przeniesieniu obciążenia wynosi: $\beta_p = 2752,1 / 3000 = 0,92$



Rys. 8. Analiza MES w ZSoil. Osiadanie fundamentu płytowo-palowego

Fig. 8. MES analysis in ZSoil. Settlement of piled raft



Rys. 9. Analiza MES w ZSoil. Wykresy sił w poszczególnych kolumnach CMC

Fig. 9. MES analysis in ZSoil. Forces in CMC columns

9. Osiedzenia fundamentu płytowo-palowego – terenowe próby obciążeniowe

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów rzeczywistych osiadań płyty na podłożu wzmocnionym 9 kolumnami CMC.

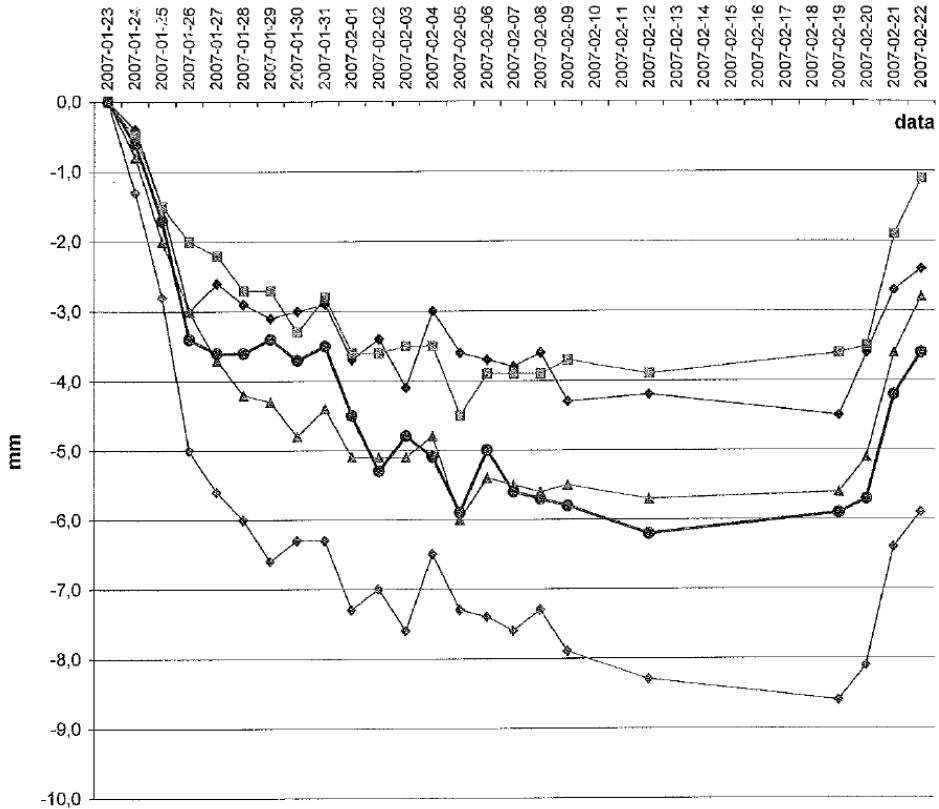
Obciążenie płyty, tak jak w przypadku płyty na podłożu bez wzmocnienia, realizowano poprzez układanie płyt drogowych aż do osiągnięcia wartości 3 MN. Osiedzenia fundamentu płytowo-palowego wahają się od 3,9 do 8,6 mm, z 6,2 mm dla repera nr 5 w środku płyty. Stąd sztywność fundamentu płytowo-palowego oraz udział pali w przenoszeniu obciążenia dla metody podanej przez Randolpha wynosi:

$$K_p^* = 348,8 - 769,2 \text{ MN/m}$$

w warunkach z odpływem

$$\beta_p^* = 0,92 - 0,97$$

w warunkach z odpływem



Rys. 10. Płyta na podłożu ze wzmocnieniem. Przemieszczenia płyty w czasie w 5 punktach kontrolnych (4 naroża + środek płyty). Układ punktów pomiarowych zgodnie z rys. 2

Fig. 10. Raft on the reinforced ground. Settlements of raft in function of time in 5 control points (4 corners + center of raft). Point localization compatible with fig. 2

10. Wnioski

W artykule przedstawiono jedną z możliwych metod projektowania fundamentów płyto-palowych na podstawie prac Poulosa (Hemsley [9]), Poulosa i Davisa [10] oraz Randolpha [11, 12]. Parametry wejściowe zostały oszacowane z pomiarów osiadań płyty w czasie terenowych testów wielkowymiarowych oraz z próbnych obciążeń 11 pali.

Z obliczeń wykonanych metodą analityczną wynika, że fundament zespolony może osiadać w zakresie od 3,5 (uwzględniając „najsilniejsze” pale) do 16,1 mm (uwzględniając „naj słabsze” pale) przy pomiarach rzeczywistych od 3,9 (na brzegu płyty) do 8,6 mm (w środku płyty). Dla porównania, analiza numeryczna pozwala na oszacowanie osiadań w zakresie od 5,4 (brzeg płyty) do 8,3 mm (środek płyty). Z przedstawionych obserwacji wynika, że

zmienne warunki gruntowe wpływają w istotny sposób na pracę pali, a co za tym idzie na szacowane wartości osiadań fundamentu płytowo-palowego. Podobną analizę można przeprowadzić, opierając się na osiadaniach płyty i pali obliczanych na podstawie Polskich Norm lub innych wytycznych technicznych.

Przedstawiona w pracy metoda analityczna pozwala również na oszacowanie udziału pali i płyty w przenoszeniu obciążenia przyłożonego na fundament płytowo-palowy. Potrzeba oceny rozdziału obciążenia wynika z podejścia optymalizacyjnego do ekonomicznego zaprojektowania odpowiedniej ilości pali, potrzebnej do ograniczenia osiadań fundamentu. Z przedstawionych wyników można wnioskować, że dla dobranego rozstawu pali, tzn. $2,0 \times 2,0$ m, i dla zadanego obciążenia (3000 kN) w konkretnych warunkach gruntowych kolumny CMC przenoszą od 74 do 97% przyłożonego obciążenia. Analizując przypadki skrajne, tzn. przy największym i najmniejszym oszacowanym osiadaniu całkowitym, równym odpowiednio 16,1 i 3,5 mm, pale będą przenosić odpowiednio 81 i 97% przyłożonego obciążenia. Zatem, im pale pracują gorzej (w gorszych warunkach gruntowych, słabsze gytie), tym płyta fundamentowa bierze więcej „na siebie”, ale nie więcej niż 20% (co wynika z „gęstego” rozstawu pali), redukując jednocześnie osiadania płyty prawie dwukrotnie (z 28 do 16,1 mm). Stąd można ostatecznie wnioskować, że znając sztywność płyty i grupy pali, można dobrać taki rozstaw pali, by spełnić w sposób optymalny warunek użyteczności fundamentu, tzn. zredukować osiadania fundamentu do konkretnej wymaganej wartości.

Literatura

- [1] Zeevaert L., *Compensated friction-pile foundation to reduce the settlement of buildings on the highly compressible volcanic clay of Mexico City*, Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Foundn Engng, 2, London 1957, 81-86.
- [2] Davis E.H., Poulos H.G., *The analysis of piled raft systems*, Australian Geomech. J., G2, 1, 1972, 21-27.
- [3] Hooper J.A., *Observations on the behaviour of piled-raft foundation on London Clay*, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 55, Oct., 1973, 855-877
- [4] Hooper J.A., *Review of behaviour of piled raft foundations*, Rep. No. 83, CIRIA, London 1979.
- [5] Burland J.B., Broms B.B., De Mello V.F.B., *Behaviour of foundations and structures*, Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Foundn Engng, 2, Tokyo 1977, 495-546.
- [6] Sommer H., Wittmann P., Ripper P., *Piled raft foundation of tall building in Frankfurt Clay*, Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Foundn Engng, 4, San Francisco 1985, 2253-2257.
- [7] Price G., Wardle I.F., Queen Elizabeth II Conference Centre: *monitoring of load sharing between piles and raft*, Proc. Instn Civ. Engrs, 80, 1, 1986, 1505-1518.
- [8] Franke E., *Measurements beneath piled rafts*, Keynote Lecture, ENPC Conf., Paris 1991, 1-28
- [9] Hemsley J.A., *Design applications of raft foundation*, Thomas Telford, 16, London 2000, 425-468.
- [10] Poulos H.G., Davis E.H., *Pile foundation analysis and design*, John Wiley and Sons, New York 1980.

- [11] Randolph M.G., *Design of pile draft foundation*, CUED/D, Soils TR 143, Cambridge University, 1983.
- [12] Randolph M.F., *Design methods for pile groups and piled rafts*, Proc. 12th Int. Conf. Soil Mechs. And Foundn. Eng., New Delhi, 5, 1994, 61-82.
- [13] Godlewski T., Fudali J., Saloni J., *Wzmocnienie podłoża budynku metodą kolumn betonowych (CMC)*, „Inżynieria i Budownictwo”, Nr 12/2007.
- [14] Godlewski T., Wszędyrówny-Nast M., *Wybór metody posadowienia na przykładzie dużego budynku na słabym podłożu*, X Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Rzeczoznawstwa Budowlanego”, Warszawa–Miedzeszyn, 22–24 kwietnia 2008.