

Analiza osiadania podpór wiaduktu drogowego posadowionego na palach prefabrykowanych na podstawie obliczeń analitycznych, badań terenowych i monitoringu

Mgr inż. Maciej Zieliński, dr inż. Paweł Więclawski
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Zagadnienie dotyczące fundamentów palowych pracujących w grupie pozostaje wciąż nierozwiązane. Pomimo wielu badań doświadczalnych oraz przeprowadzonych analiz naukowych, trudno w sposób jednoznaczny sformułować i przedstawić metodę obliczeniową, która w pełni odzwierciedla rzeczywistość współpracy grupy pali z podłożem gruntowym. Podstawowe wartości, które należy zdefiniować to przede wszystkim nośność pali oraz ich osiadania.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę osiadań podpory oraz przyczółka wiaduktu drogowego nad obwodnicą S7 w ciągu ul. Żuławskiej w Elblągu, posadowionych na prefabrykowanych palach żelbetowych. Analiza ma na celu znalezienie zależności pomiędzy ogólnodostępną teorią, obliczeniami analitycznymi, numerycznymi i wreszcie faktycznymi rezultatami otrzymanymi z badań terenowych oraz monitoringu. Rezultaty otrzymane z własnych, niezależnych obliczeń porównano z wartościami wyznaczonymi w projekcie technologicznym i wykonawczym.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PALI PREFABRYKOWANYCH

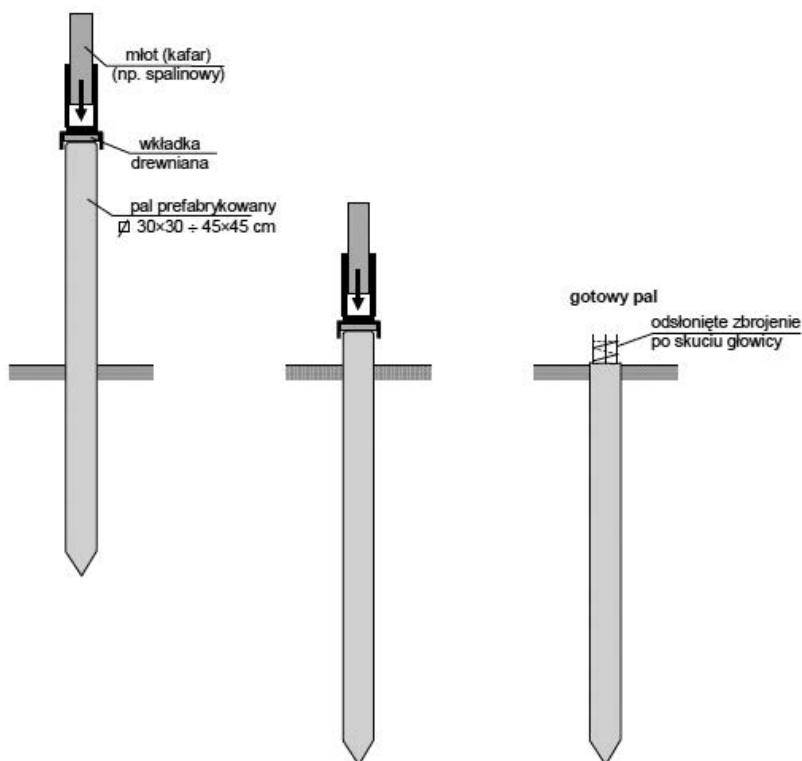
Jednym z powodów stosowania fundamentów pośrednich jest konieczność redukcji osiadania konstrukcji inżynierskich

[2]. Czynnikiem determinującym o wyborze sposobu posadowienia są warunki gruntowe oraz obciążenia, które należy przenieść z konstrukcji na grunt. Należy również pamiętać o czynnikach ekonomicznych oraz dostępności specjalistycznego sprzętu budowlanego. W niniejszej pracy przeanalizowano pale wbijane o przekroju 40×40 cm, klasie betonu C40/50 zbrojonych stalą AIIIIN.

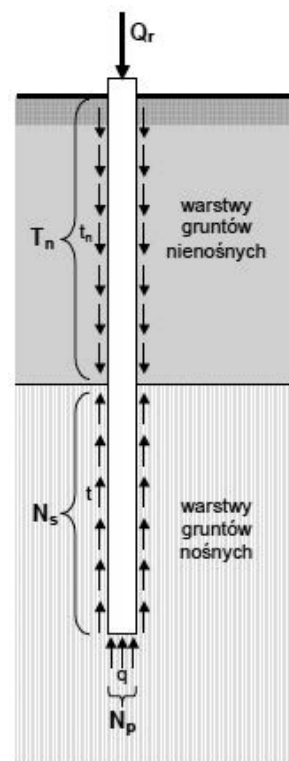
Prefabrykowane pale żelbetowe wykonywane są zazwyczaj w zakładzie prefabrykacji, a następnie przywożone na plac budowy jako elementy gotowe do wbicia. Po wytyczeniu lokalizacji następuje proces pograżania pali za pomocą kufarów hydraulicznych lub spalinowych. Wadą technologii są niestety drgania powstające podczas wbijania, ograniczające możliwość zastosowania w bezpośrednim sąsiedztwie innych konstrukcji. Na rys. 1 przedstawiono proces wbijania pala, natomiast rys. 2 to schemat współpracy pala z podłożem gruntowym.

NOŚNOŚĆ I OSIADANIE PALA POJEDYNCZEGO – METODY ANALITYCZNE

Obliczenie nośności i osiadania pala pojedynczego należy wykonać na podstawie aktualnie obowiązujących norm. Przez długi okres czasu w Polsce było dopuszczalne równoległe korzy-



Rys. 1. Pale wbijane – technologia wykonania [6]



Rys. 2. Nośność pala wciskanego [6]

stanie z norm krajowych oraz z norm europejskich – Eurokodów (EC7). W niniejszej pracy obliczenia wykonano na podstawie Polskiej Normy z dostosowaniem do wymogów EC7 [8].

Uogólniony wzór na **nośność pobocznic** pała:

$$R_s = S_s \cdot t \cdot A_s \quad (1)$$

gdzie:

t – opór gruntu na pobocznic (ze względu na rodzaj i stan gruntu – tablica nr 2 normy [7]),

A_s – pole powierzchni bocznej,

S_s – współczynnik technologiczny.

Uogólniony wzór na **nośność podstawy** pała:

$$R_b = S_b \cdot q \cdot A_b \quad (2)$$

gdzie:

q – opór gruntu na pod podstawą pała (ze względu na rodzaj i stan gruntu – tablica nr 1 normy [7]),

A_b – pole powierzchni podstawy pała,

S_b – współczynnik technologiczny.

Należy pamiętać, że wartość nośności sprawdza się dla i -tego odcinka obliczeniowego, ponieważ w zależności od miąższości zalegającej warstwy gruntu przyjmuje się odpowiednią wartość t na pobocznic pała.

Ostateczna **nośność charakterystyczna** pała to suma nośności pobocznic i podstawy pała, wyrażona wzorem:

$$R_c = R_b + R_s \quad (3)$$

Uogólnioną wartość **osiadania** pała pojedynczego wyraża się za pomocą następującego wzoru normowego [7]:

$$s = \frac{Q_n}{h \cdot E_o} \cdot I_w \quad (4)$$

gdzie:

Q_n – wartość charakterystyczna obciążenia pała,

h – zagłębienie pała w gruncie,

I_w – współczynnik wpływu osiadania,

E_o – moduł odkształcenia gruntu wokół pała.

Przyjęcie odpowiedniej wartości współczynnika wpływu osiadania jest procesem skomplikowanym, ponieważ zależy od takich czynników jak: warunki gruntowe, technologia wykonania pała, materiał pała, stosunek h/D oraz innych [9]. Szczegółowy proces doboru wartości przedstawiono w przywołanej normie krajowej [7], która zawiera także poszczególne nomogramy do obliczeń.

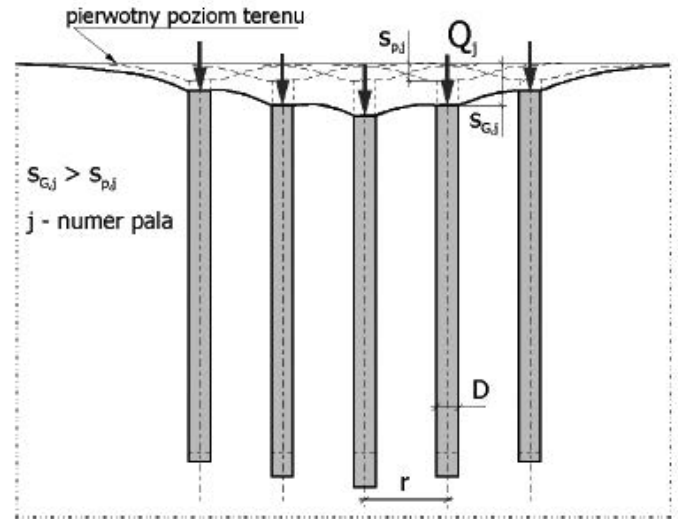
Dla pała wciskanych pracujących w grupie należy uwzględnić nakładanie się stref naprężeń w poziomie podstaw. Zjawisko to ma miejsce szczególnie w przypadku pała długich i rozmieszczonych w niewielkiej odległości.

NOŚNOŚĆ I OSIADANIE GRUPY PAŁI – METODY ANALITYCZNE

Nośność grupy pała na wciskanie wyraża się analogicznie jak w przypadku pała pojedynczego z uwzględnieniem współczynnika redukcyjnego:

$$N_t = S_b \cdot q^{(r)} \cdot A_b + m_s \cdot \sum S_{si} \cdot t_{si}^{(r)} \cdot A_{si} \quad (5)$$

Osiadanie fundamentów pałowych pracujących w grupie różni się od osiadania pała pojedynczego. Wynika to z faktu,



Rys. 3. Schemat wzajemnego oddziaływania pał w grupie [2]

że pał, który jest obciążony siłą osiową, powoduje dodatkowe osiadania pał sąsiednich (rys. 3). Oznacza to, że osiadanie pał w grupie jest większe niż osiadanie pała pojedynczego [2].

Zjawisko osiadania jest szczególnie ważne w przypadku fundamentów o dużych wymiarach ze względu na zróżnicowane obciążenia od konstrukcji oraz zmienne warunki gruntowe, możliwe jest występowanie zmiennych cech mechanicznych gruntu [9]. Uwzględnienie zmienności wymienionych czynników jest procesem trudnym przy projektowaniu posadowienia, stąd uzasadnione wydaje się stosowanie odpowiednich współczynników bezpieczeństwa przy wymiarowaniu konstrukcji.

Zgodnie z metodą empiryczną uogólnioną wartość **osiadania** pała w grupie wyraża się za pomocą wzoru:

$$S_G = S_p \cdot R \quad (6)$$

gdzie:

S_p – wartość osiadania dla pała pojedynczego w tych samych warunkach obciążenia i posadowienia,

R – współczynnik uwzględniający osiadanie grupy pał w stosunku do pała pojedynczego.

Metoda empiryczna w przejrzysty sposób umożliwia obliczenie osiadania grupy pałowej. Jednakże sama liczba proponowanych wzorów do wyznaczenia współczynnika R (przedstawiona w [1]) świadczy o tym, że metoda ta stanowi jedynie zgrubne oszacowanie i nie oddaje w pełni rzeczywistych wartości.

FUNKCJA TRANSFORMACYJNA

Podstawowy cel stosowania funkcji transformacyjnych to wyznaczenie w sposób przybliżony pełnej charakterystyki obciążenie – osiadanie (Q - s) pała. Poprzez wykres Q - s uzyskuje się bezpośrednią zależność między nośnością oraz wartościami osiadań analizowanego fundamentu pośredniego. Opisująca metoda dotyczy wyłącznie pał wciskanych obciążonych osiowo siłą pionową, przy założeniu, że pał jest elementem nieskończenie sztywnym. Jej zaletą jest nieskomplikowana procedura obliczeniowa, którą wypracowano na podstawie badań rzeczy-

Tabl. 1. Parametry geometryczne fundamentów palowych podpór P3 i P4 [9]

| Oznaczenie podpory | Długość całkowita pala [m] | Liczba pali o długości całkowitej [szt.] | Długość do próbnych obciążeń pala [m] | Liczba pali do próbnych obciążeń [szt.] | Liczba pali razem [szt.] | Obliczeniowe obciążenie pala [kN] | Nośność obliczeniowa pala [kN] |
|--------------------|----------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| P3 | 19 | 17 | 20 | 5 | 22 | 1159 | 1164 |
| P4 | 9 | 27 | 10 | 5 | 32 | 714 | 790 |

wistych [6]. W tym celu wykorzystuje się współczynniki α oraz β zgodnie z poniższymi wzorami [3]:

$$(Q_s-s)_{cal} = R_{s;cal} \left(\frac{s}{z_v} \right)^\alpha \leq R_{s;cal} \quad (7)$$

$$(Q_b-s)_{cal} = R_{b;cal} \left(\frac{s}{z_f} \right)^\beta \leq R_{b;cal} \quad (8)$$

$$(Q-s)_{cal} = (Q_s-s)_{cal} + (Q_b-s)_{cal} \quad (9)$$

ANALIZA PROJEKTU TECHNOLOGICZNEGO

Wiadukt drogowy w ciągu ul. Żuławskiej nad drogą ekspresową S7 to trójprzęsłowy obiekt inżynierski z dwoma przyczółkami oraz dwiema podporami pośrednimi. Przyczółki oznaczono jako podpory P1 oraz P4, natomiast filary oznaczono w skrócie jako P2 i P3. Analizę osiadań przeprowadzono dla podpór P3 oraz P4. Pomiary osiadania podpór z wykorzystaniem zainstalowanych reperów oraz badania nośności pali za pomocą czujników tensometrycznych umożliwiły kompleksowe porównanie rzeczywistych wartości osiadań z założeniami projektowymi.

Wszystkie podpory posadowiono na prefabrykowanych palach żelbetowych. W tabl. 1 zamieszczono parametry geometryczne fundamentów palowych podpór P3 i P4. Długość, kąt nachylenia oraz rozstaw pali uwarunkowany był zarówno reakcją sił od podpór, jak i warunkami gruntowymi. W przypadku podpór P3 i P4 wykonano pale o długości odpowiednio 19 m oraz 9 m.

Wartości maksymalne reakcji, po uwzględnieniu obciążeń od podpory, przęsła, słupów, fundamentu, parcia gruntu oraz ruchu pojazdów, a więc sumę wszystkich sił działających na grupę pali przyjętą w dokumentacji projektowej, przedstawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Stany graniczne – naprężenia pod ścianą oporową P3 i P4 [9]

| Reakcje | P3 | P4 |
|------------------|----------------------------|------------------------------|
| Siły pionowe | $N = 19821,6 \text{ kN}$ | $N = 12211,46 \text{ kN}$ |
| Moment zginający | $M_o = 7105,2 \text{ kNm}$ | $M_o = 12085,26 \text{ kNm}$ |
| Siły poziome | $E = 835,9 \text{ kN}$ | $E = 4704,17 \text{ kN}$ |

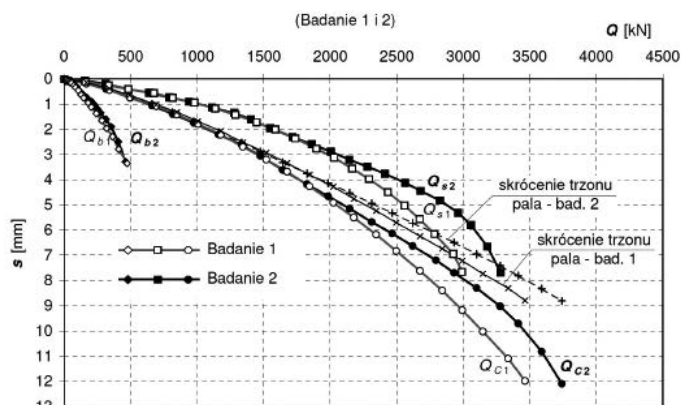
Tabl. 3. Raport z próbnych obciążeń pala pod podporą P3 i P4 [9 i 10]

| Badany pal | Długość pala w gruncie [m] | Nośność pala N [kN] | Obciążenie obliczeniowe Q_r [kN] | N/Q_r [-] | Osiadanie dla obciążenia N [mm] | Osiadanie dla obciążenia Q_r [mm] |
|------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| P3/12 | 19,0 | 3119,0 | 1159,0 | 2,69 | 11,9 | 2,1 |
| P4/21 | 8,8 | 1100,0 | 714,0 | 1,54 | 5,0 | 2,2 |

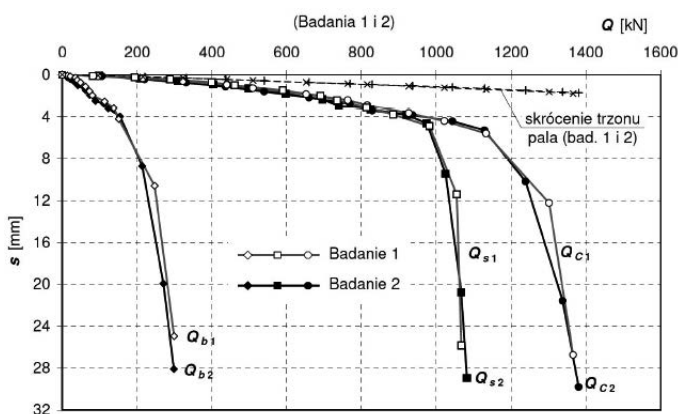
BADANIA STATYCZNE PALI

Wartości z próbnych obciążeń statycznych pojedynczego pala, zawarto w tabl. 3 oraz przedstawiono na rys. 4 i 5, w postaci charakterystyki $Q-s$.

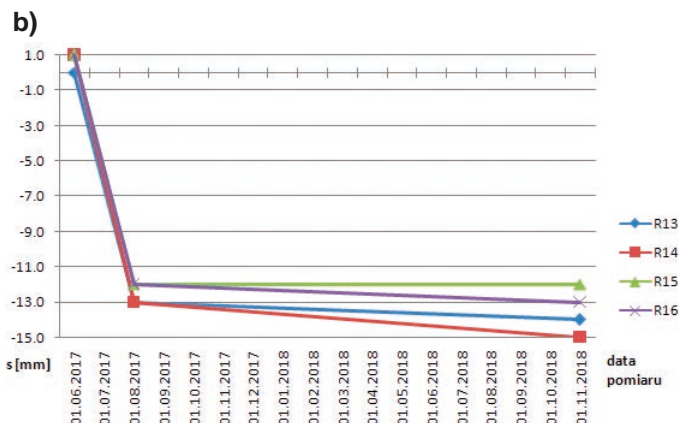
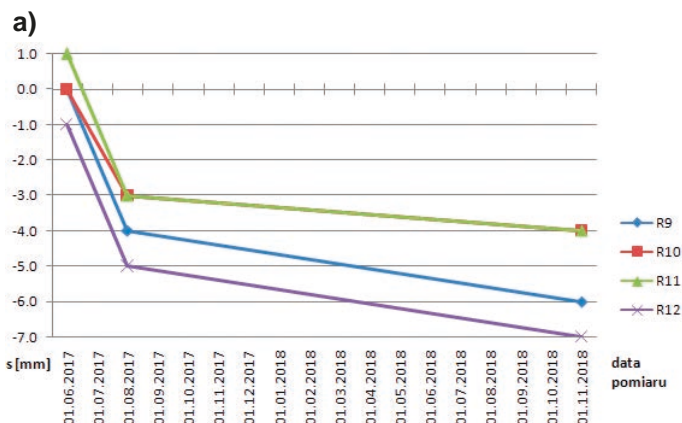
Zgodnie z powyższą tabelą oraz założeniami [7] uzyskano nośność pala powyżej $1,5 \cdot Q_r$. Zakres ten wynosi $N/Q_r = (1,54 \div 2,69)$ [-]. Przyjmuje się, że wartość graniczna osiadań pali zgodne z zaleceniami EC7 wynosi 10% średnicy pala. W przypadku pali o przekroju kwadratowym można



Rys. 4. Charakterystyki $Q-s$ z próbnych obciążeń pala P3/12 [5]



Rys. 5. Charakterystyki $Q-s$ z próbnych obciążeń pala P4/21 [5]



Rys. 6. Wykresy przemieszczeń w czasie na podstawie [4]: a) podpora P3, b) podpora P4

wyznaczyć średnicę zastępczą, która dla analizowanego przypadku wynosi $D = 0,45$ m. W tej sytuacji wartością graniczną osiadania będzie wartość $s_{gr} = 45$ mm. Jednakże w przypadku wiaduktów i mostów pale należy projektować na osiadania $s_{opt} = (5 \div 15)$ mm i dla tych wartości wyznaczać nośność, na przykład z funkcji transformacyjnej.

MONITORING OSIADANIA PODPÓR

Po zakończeniu prac związanych z budową wiaduktu drogowego, na każdej z podpór zainstalowano repery geodezyjne. Następnie dokonując regularnych pomiarów przemieszczeń uzyskano przebieg osiadania całej konstrukcji w czasie. Na rys. 6 przedstawiono odczytane wartości przemieszczeń podpór P3 i P4.

Tabl. 4. Zestawienie wyników obliczeń analitycznych

| Oznaczenie pala | P3/12 | P4/21 | Jednostka | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------|----------------|------|
| Długość całkowita badanego pala: L_c | 20 | 10 | [m] | |
| PAL POJEDYNCZY | Nośność charakterystyczna podstawy: $R_{b,k}$ | 470,44 | 311,32 | [kN] |
| | Nośność charakterystyczna poboczniczy: $R_{s,k}$ | 1362,48 | 535,75 | [kN] |
| | Nośność charakterystyczna całkowita: $R_{c,k}$ | 1832,92 | 847,07 | [kN] |
| | Nośność obliczeniowa całkowita: $R_{c,d}$ | 1666,29 | 770,06 | [kN] |
| | Zakres osiadania: S_p | 6,1 | 3,4 | [mm] |
| PAL W GRUPIE | Nośność charakterystyczna podstawy: $N_{s,k}$ | 470,44 | 311,32 | [kN] |
| | Nośność charakterystyczna poboczniczy: $N_{b,k}$ | 776,61 | 396,45 | [kN] |
| | Nośność charakterystyczna całkowita: $N_{l,eh}$ | 1247,05 | 707,78 | [kN] |
| | Nośność obliczeniowa całkowita: $N_{l,obl}$ | 1133,69 | 643,44 | [kN] |
| | Zakres osiadania: S_G | (11,41 ÷ 53,19) | (6,87 ÷ 28,49) | [mm] |

OBLICZENIA METODAMI ANALITYCZNYMI

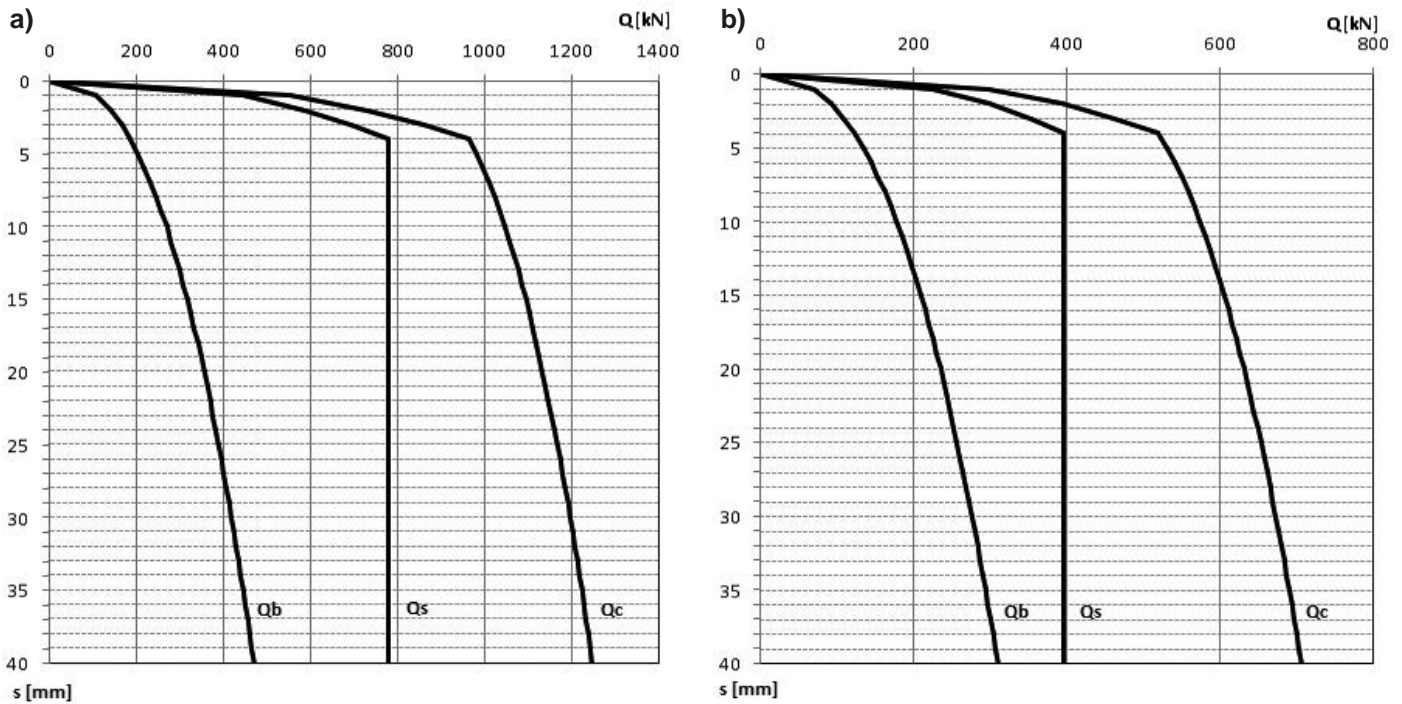
Obliczenia analityczne przeprowadzono na podstawie PN-83/B-02428 z dostosowaniem do zaleceń Eurokodu 7 [8], uzyskane wyniki zawarto w tabl. 4.

W tabl. 5 przedstawiono skrócone obliczenia oparte na metodzie funkcji transformacyjnych, natomiast na rys. 7 końcową, teoretyczną charakterystykę Q -s.

Tabl. 5. Zestawienie charakterystyki Q -s analizowanych pali P3 i P4 pracujących w grupie

| s [mm] | P3/12 | | | P4/21 | | | |
|--------|---------------|---------------|----------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| | Q_s [kN] | Q_b [kN] | Q_c [kN] | s [mm] | Q_s [kN] | Q_b [kN] | Q_c [kN] |
| 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 446,05 | 107,57 | 553,61 | 1 | 227,70 | 71,18 | 298,89 |
| 2 | 588,56 | 141,94 | 730,50 | 2 | 300,46 | 93,93 | 394,38 |
| 3 | 692,20 | 166,93 | 859,12 | 3 | 353,36 | 110,47 | 463,83 |
| 4 | 776,61 | 187,29 | 963,90 | 4 | 396,45 | 123,94 | 520,39 |
| 6 | 776,61 | 220,26 | 996,88 | 6 | 396,45 | 145,76 | 542,22 |
| 8 | 776,61 | 247,12 | 1023,74 | 8 | 396,45 | 163,54 | 559,99 |
| 10 | 776,61 | 270,20 | 1046,81 | 10 | 396,45 | 178,81 | 575,26 |
| 15 | 776,61 | 317,77 | 1094,39 | 15 | 396,45 | 210,29 | 606,74 |
| 20 | 776,61 | 356,53 | 1133,14 | 20 | 396,45 | 235,94 | 632,39 |
| 25 | 776,61 | 389,81 | 1166,43 | 25 | 396,45 | 257,96 | 654,42 |
| 30 | 776,61 | 419,30 | 1195,92 | 30 | 396,45 | 277,48 | 673,93 |
| 35 | 776,61 | 445,97 | 1222,58 | 35 | 396,45 | 295,13 | 691,58 |
| 40 | 776,61 | 470,44 | 1247,05 | 40 | 396,45 | 311,32 | 707,77 |

Przeprowadzone obliczenia nośności oraz osiadania pali metodą analityczną pozwoliły na uzyskanie wartości granicznych, zarówno przy założeniu pracy pala pojedynczego, jak i w grupie. Obliczenia przeprowadzone za pomocą funkcji transformacyjnej w przejrzysty sposób ukazują poszukiwane wartości nośności



Rys. 7. Wykres charakterystyki Q - s fundamentu palowego: a) podpora P3, b) podpora P4

Tabl. 6. Zestawienie wyznaczonych wartości nośności pali P3/12 i P4/2

| – | Nośność obliczeniowa projektowa N_f [kN] | Nośność charakterystyczna $R_{c,k}$ [kN] | Nośność obliczeniowa $R_{c,d}$ [kN] | Nośność charakterystyczna $N_{c,k}$ [kN] | Nośność obliczeniowa $N_{c,d}$ [kN] | Nośność Q - s dla $S_{opt,max} = 15$ mm $N_{Q-s,max}$ [kN] |
|-------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| P3/12 | 1164,0 | 1832,92 | 1666,29 | 1247,05 | 1133,69 | 1094,39 |
| P4/21 | 790,0 | 847,07 | 770,06 | 707,77 | 643,44 | 606,74 |

pala pojedynczego w zależności od wartości osiadań. W tabl. 6 porównano wartości nośności analizowanych pali P3/12 i P4/21 wyznaczonych w projekcie posadowienia [9] wraz z wartościami obliczonymi metodą analityczną i metodą Q - s .

Należy zauważyć, że wartość nośności obliczeniowej $N_{c,d}$ w obu przypadkach jest nieznacznie mniejsza od nośności projektowej N_f . Rozbieżności mogą wynikać z:

- warstwy geotechniczne na podstawie sondy CPTu odczytano w sposób przybliżony,
- nośność projektową wyznaczono metodą numeryczną na podstawie [7], natomiast obliczenia analityczne wykonano na podstawie [7] z dostosowaniem do zaleceń EC7,
- wartości oporów podstawy oraz poboczniczy pala zwiększono względem [7] o 20% w celu dostosowania do zaleceń EC7, gdzie zgodnie z propozycją [10] zaleca się wartość q oraz t zwiększyć o współczynnik 1,26, co odpowiada zwiększeniu o 26%.

OBLICZENIA METODĄ NUMERYCZNĄ

W niniejszym punkcie przedstawiono wartości nośności i osiadania pala pojedynczego oraz grupy pali otrzymane na podstawie obliczeń w programie Geo5 i Kalkulator pali

„PalePN”. Używając oprogramowania Robot Structural Analysis Autodesk, zweryfikowano poprawność wyznaczonych obciążeń na pojedyncze pale, ale pracujące w grupie. Dzięki obliczeniom uzyskano oczekiwane wartości graniczne. Takie podejście umożliwiło analizę porównawczą wyznaczonych osiadań podpór wiaduktu drogowego. W niniejszym artykule przedstawiono graficznie tylko niektóre modele obliczeniowe (rys. 8, 9 i 10), zaś wyniki obliczeń znajdują się w dalszej części artykułu. Podporę P4 policzono dwukrotnie, gdyż obliczenia dla rzeczywistej długości pala w niniejszej analizie okazały się niewystarczające.

Obciążenie maksymalne oraz minimalne pojedynczego pala w podporze P3 dla zadanej reakcji zgodnie z tabl. 2:

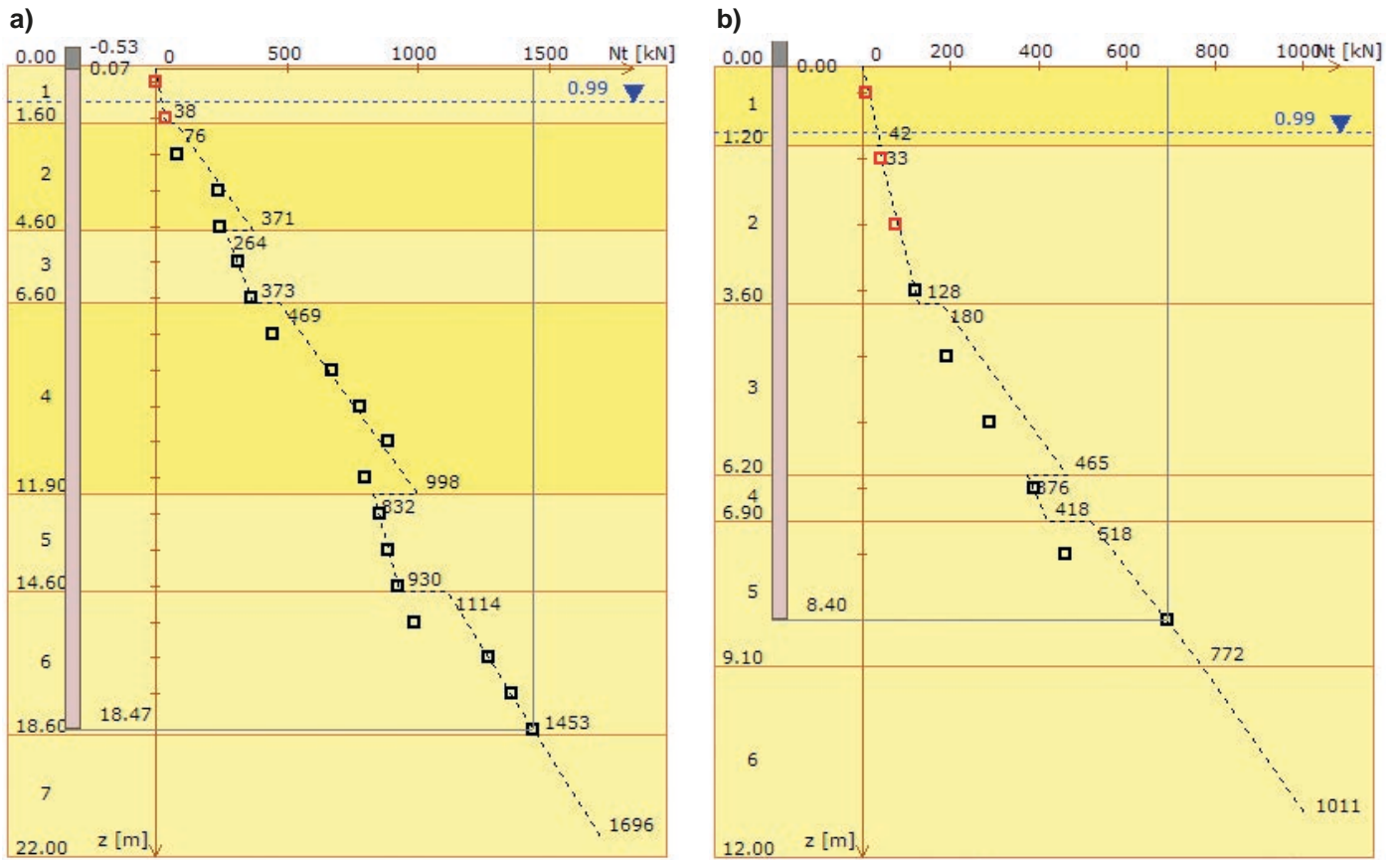
- $Q_{r,max} = 1196,73$ kN
- $Q_{r,min} = 525,01$ kN

Obciążenie maksymalne oraz minimalne pojedynczego pala w podporze P4 dla zadanej reakcji zgodnie z tabl. 2:

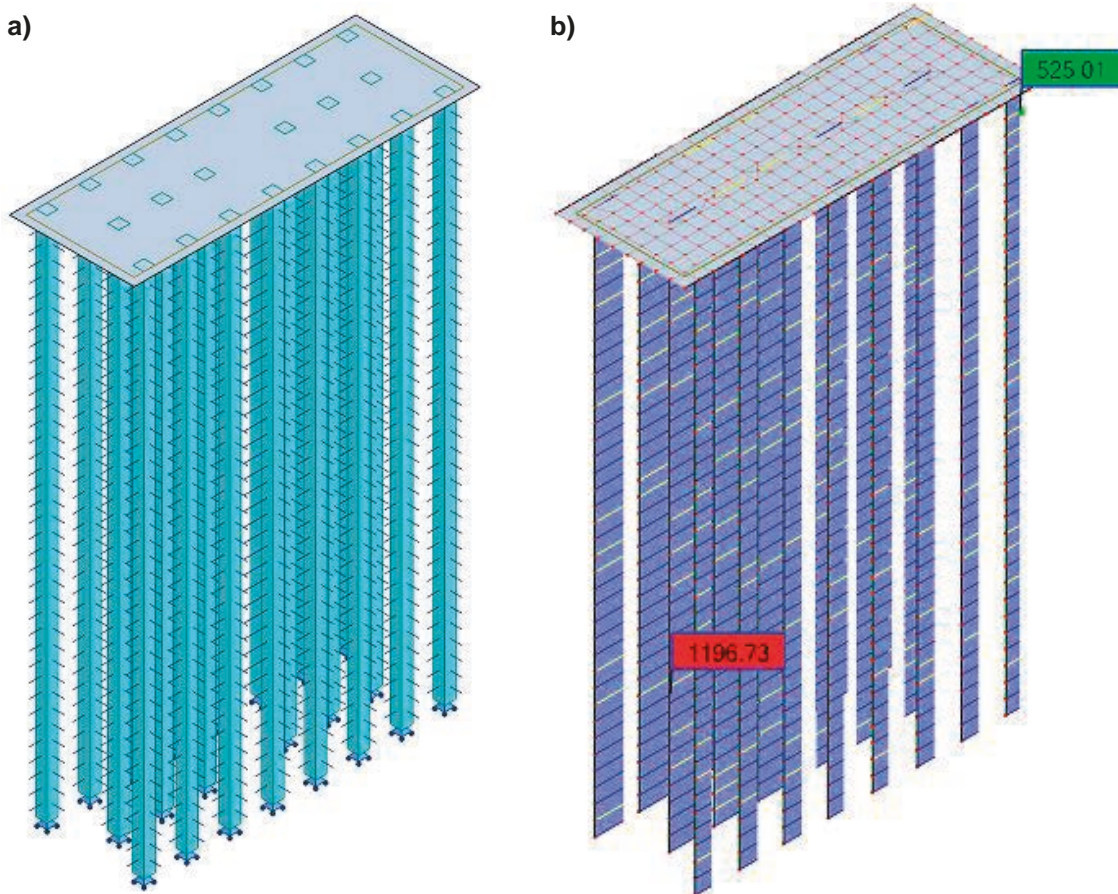
- $Q_{r,max} = 877,51$ kN
- $Q_{r,min} = 113,03$ kN

ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

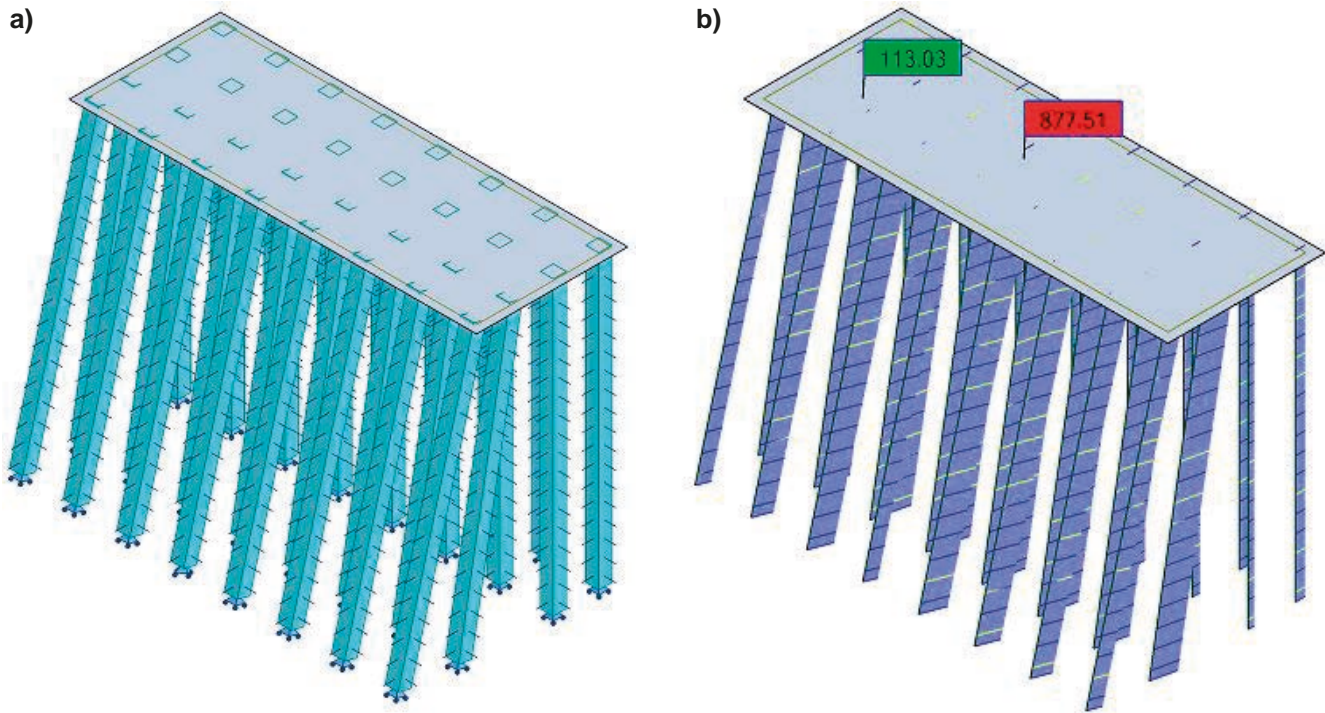
W projekcie technologicznym rozkład obciążeń na pale wyznaczono za pomocą metody sztywnego odczepu. Jest to uprosz-



Rys. 8. Nośność pala pojedynczego: a) podpora P3 b) podpora P4



Rys. 9. Grupa pali w podporze P3: a) model ROBOT, b) globalne siły pionowe



Rys. 10. Grupa pali w podporze P4: a) model ROBOT, b) globalne siły pionowe

Tabl. 7. Porównanie sił normalnych występujących w pojedynczym pału

| - | PROJEKT TECHNOLOGICZNY | | OBLICZENIA ROBOT | |
|---------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Max. siły normalne $Q_{r,max}$ [kN] | Min. siły normalne $Q_{r,min}$ [kN] | Max. siły normalne $Q_{r,max}$ [kN] | Min. siły normalne $Q_{r,min}$ [kN] |
| Podpora | | | | |
| P3 | 1159,0 | 647,0 | 1196,7 | 525,0 |
| P4 | 714,0 | 203,6 | 877,5 | 113,0 |

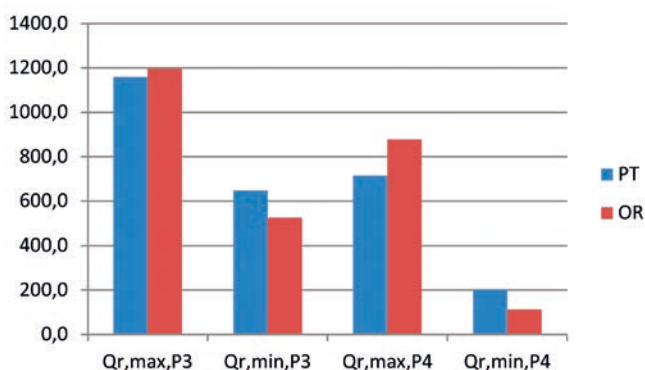
czona metoda analityczna, którą wyznacza się siły normalne ściskające lub rozciągające, gdzie pale oblicza się jako pręty przegubowo połączone ze sztywnym oczepem [5]. W tabl. 7 porównano wyniki sił normalnych wyznaczonych w projekcie technologicznym oraz w niezależnych obliczeniach numerycznych wykonanych w programie ROBOT.

Na podstawie danych przedstawionych w tabl. 7 oraz na rys. 11 można wysnuć wniosek, że wartości sił normalnych

w podporze P3 oraz P4 oscylują w tym samym zakresie wartości. Jednakże warto zauważyć, że maksymalne wartości sił pionowych wyliczone za pomocą oprogramowania Robot są nieznacznie większe niż wartości wyznaczone w projekcie technologicznym. Wpływa to na dalsze obliczenia związane z wymaganą nośnością pali pod każdą z podpór w celu spełnienia warunku SGN. Z niezależnych obliczeń wynika, że szczególnie w przypadku podpory P4 należałoby zaprojektować pale z uwzględnieniem większej siły ściskającej, którą wyznaczono za pomocą programu numerycznego.

Spełnienie warunku SGN, a więc wyznaczenie wartości nośności pionowej pala zarówno pojedynczego oraz pracującego w grupie jest bezpośrednio związane z późniejszą wartością osiadania pala. W tabl. 8 podsumowano wszystkie wartości nośności wyznaczone w projekcie technologicznym i wyliczone metodą analityczną oraz numeryczną.

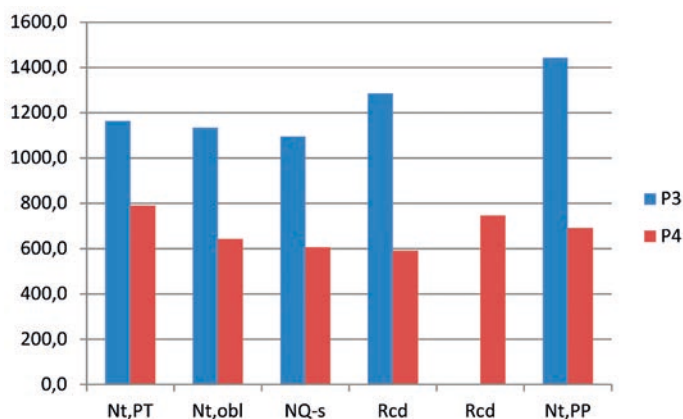
Poddając analizie dane z tabl. 8 oraz rys. 12, wyraźnie można zauważyć, iż wartości nośności pali w podporze P3 (1094,4 kN ÷ 1442,0 kN) faktycznie odpowiadają zakresowi wartości wyznaczonych w projekcie technologicznym ($N_t = 1164,0$ kN). Należy stwierdzić, że nośność pionowa podpory P3 wyznaczono w sposób prawidłowy i bezpieczny, szczególnie że podczas badania stateczności pala P3/12 uzyskano no-



Rys. 11. Porównanie sił normalnych w podporach P3 i P4
PT – projekt technologiczny, OR – obliczenia ROBOT

Tabl. 8. Porównanie nośności pionowej w pału pojedynczym pracującym w grupie

| – | | METODA ANALITYCZNA | | METODA NUMERYCZNA | | |
|---------|--------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Podpora | Projekt technologiczny N_t [kN] | dostosowanie do EC7 $N_{t,obl}$ [kN] | funkcja transformacyjna N_{Q-s} [kN] | Geo5 R_{cd} [kN] | wydłużenie pali Geo5 R_{cd} [kN] | PalenPn N_t [kN] |
| P3 | 1164,0 | 1133,7 | 1094,4 | 1284,7 | – | 1442,0 |
| P4 | 790,0 | 643,4 | 606,7 | 591,8 | 745,0 | 691,0 |



Rys. 12. Porównanie nośności pionowej w podporach P3 i P4

W tabl. 9 oraz na rys. 13, a następnie rys. 14 przedstawiono wartości osiadań uzyskane z badań statycznych, własnych obliczeń analitycznych i numerycznych, a także z przeprowadzonego monitoringu.

Tabl. 9. Porównanie wyznaczonych wartości osiadań w [mm]

| – | BS,proj | BS,max | OA | ON | Monitoring |
|----|---------|--------|------|-----|------------|
| P3 | 2,1 | 11,9 | 11,4 | 4,3 | 7,0 |
| P4 | 2,2 | 5,0 | 6,9 | 0,7 | 15,0 |

Oznaczenie:

BS,proj – badania statyczne, uzyskane wartości projektowe,
BS,max – badania statyczne, uzyskane wartości maksymalne,
OA – obliczenia analityczne,
ON – obliczenia numeryczne.

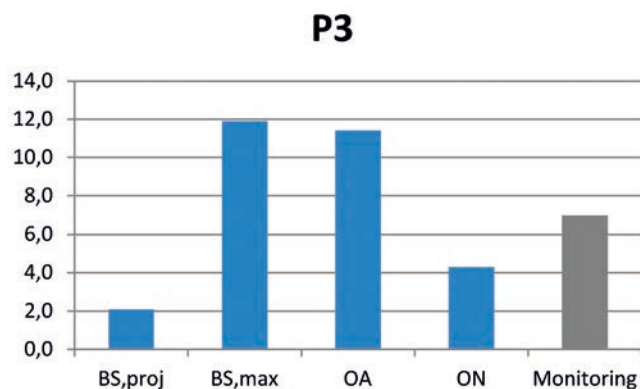
śność $N/Q_r = 2,69$ krotnie większą ($N = 3119,0$ kN). Natomiast obawy mogą pojawić się w przypadku podpory P4, dla której każda z wyznaczonej nośności pionowej (591,8 kN ÷ 691,0 kN) jest wyraźnie niższa niż wyznaczona w projekcie technologicznym ($N_t = 790,0$ kN). Propozycja wydłużenia o 2,0 m pali w podporze P4 pozwala jedynie na spełnienie warunku SGN ze względu na obciążenie pala ($R_{cd} = 745,0$ kN > $Q_r = 714,0$ kN). Jednakże w dalszym ciągu jest to wartość mniejsza niż wyznaczona za pomocą oprogramowania ROBOT ($Q_{r,max} = 877,51$ kN). Spostrzeżenie to potwierdza również wykonane badanie stateczności pala P4/21, dla którego uzyskano ostatecznie nośność 1,5 raza większą ($N = 1100,0$ kN) od projektowanej.

Jednakże, bazując na wielokrotnych badaniach statycznych i testach dynamicznych pali, stwierdzono, że istnieje zjawisko przyrostu nośności pali w czasie [11]. Oznacza to, że wartość nośności pala jest mniejsza w pierwszych dniach po wykonaniu pala w stosunku do jego nośności po 2 miesiącach. Związane jest to również z dogęszczeniem gruntu po wbiciu całej grupy pali. Oba zagadnienia omówiono szeroko w [2 i 11]. Z tego też względu wynika optymalizacja rozwiązań projektowych w zakresie wyznaczania nośności pionowej pala, co potwierdzają wyniki wyznaczone w projekcie technologicznym dla wszystkich podpór.

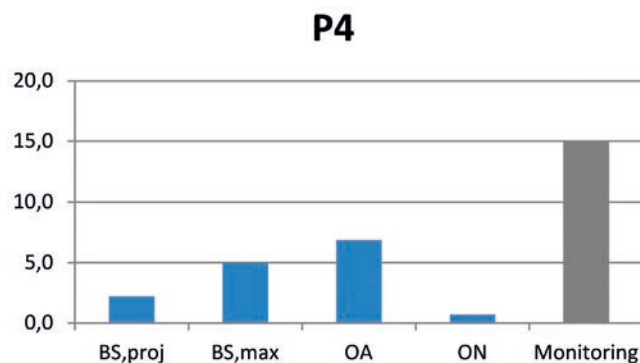
Za wynik rzeczywistych osiadań podpór wiaduktu drogowego należy uznać badania przeprowadzone za pomocą monitoringu. Badania z wykorzystaniem reperów ukazują faktyczne osiadanie całej podpory w fazie eksploatacji, a więc po docelowej konsolidacji gruntu w obszarze analizowanego obiektu. Wartości pomierzonych osiadań w funkcji czasu przedstawiono w tabl. 4.

- P3 → $s_{rc} = 7,0$ mm
- P4 → $s_{rc} = 15,0$ mm

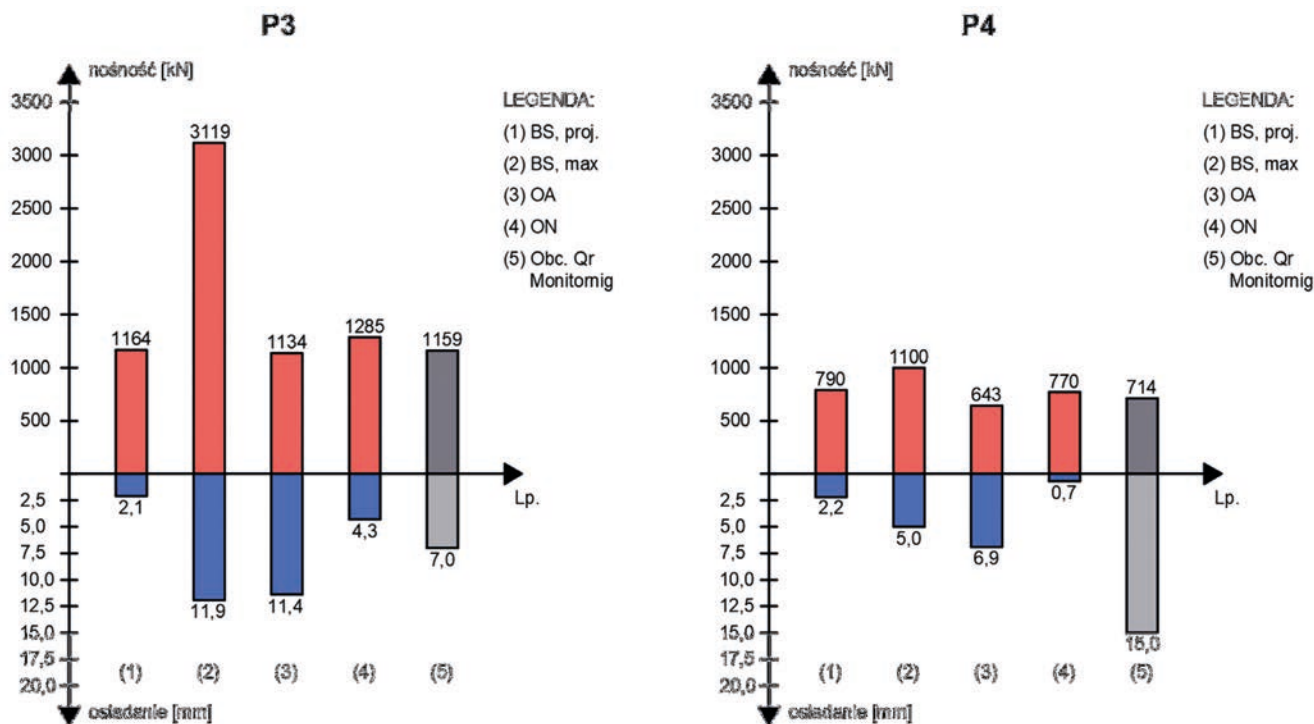
Z wykresu przedstawionego na rys. 13 można wywnioskować, że rzeczywista wartość osiadań podpory P3 analizowanego wiaduktu drogowego nie ma swojego odpowiednika w postaci



Rys.13. Wykres osiadań w podporze P3



Rys. 14. Wykres osiadań w podporze P4



Rys. 15. Wykres zależności SGN i SGU w podporze P3 i P4

badania statycznego, obliczenia analitycznego bądź numerycznego. Potwierdza to tezę postawioną już na początku pracy, że trudno jest w sposób precyzyjny i jednoznaczny określić osiadania fundamentu pracującego w grupie. Należy mieć jednak na uwadze, że różnica paru milimetrów między wartością obliczoną a faktycznie uzyskaną, jest niezauważalna dla ludzkiego oka. Dopiero specjalistyczna aparatura pozwala na określenie omawianych rozbieżności. Dlatego należy uznać, że podporę P3 zaprojektowano i wykonano w sposób prawidłowy, szczególnie że wszystkie wartości SGU są mniejsze od zalecanej granicznej wartości osiadań $s_{gr} = 15$ mm.

Wykres osiadań podpory P4 ukazany na rys. 14 wyraźnie wskazuje, że rzeczywiste osiadania pomierzone za pomocą monitoringu są nawet kilkakrotnie większe niż zakładano. Zarówno badania statyczne, obliczenia analityczne oraz obliczenia numeryczne nie odzwierciedlają rzeczywistej pracy konstrukcji, natomiast wskazują jedynie wartość przybliżoną, która w przypadku analizowanej podpory okazała się być wynikiem niedokładnym. Wynika to z faktu, że na podporę P4 działają dodatkowe siły związane z parciem gruntu na przyczółek, przez co, w celu zachowania stateczności, wykonuje się pale fundamentowe o odpowiednim nachyleniu. Geometria układu palowego podpory P4 jest bardziej złożona niż opisywana wcześniej podpora P3. Okazuje się, że nie istnieje jeszcze jednoznaczna procedura obliczeniowa, która pozwoliłaby na wyliczenie rzeczywistych wartości osiadań, czego dowodem jest analizowany przykład. Jednakże ze względu na fakt, że podpora osiadła o wartość równą $s = 15$ mm, należy uznać, że spełniony został warunek SGU dla podpory P4, który dopuszcza osiadanie na wartość graniczną $s_{gr,max} = 45$ mm (zalecane $s_{gr} = 15$ mm).

Dokonano również porównania pomiędzy wyznaczoną wartością SGN a odpowiadającą wartością SGU. Zależność pokazano na rys. 15.

Pomimo zbliżonych wartości SGN dla każdej z wykorzystanych metod obliczeniowych oraz badawczych nie uzyskano bezpośredniego odpowiednika SGU w przypadku obu analizowanych podpór. Podpora P3, dla której wyznaczone obciążenie projektowe wynosiło $Q_r = 1159$ kN, przemieściła się o wartość $s_{rz} = 7,0$ mm zgodnie z wykonanym monitoringiem. Badania statyczne dla tejże podpory wykazały zdecydowanie korzystniejszą wartość osiadań pala pojedynczego niż finalnie pracujących w grupie. Metoda analityczna wykazała ponad 1,5-krotnie większą wartość osiadań niż rzeczywiste, natomiast obliczenia numeryczne odwrotnie, to jest prawie 1,5-krotnie niższą wartość niż faktyczna. Z kolei dla podpory P4 trudno doszukać się właściwej zależności między wyznaczonym obciążeniem projektowym $Q_r = 714$ kN a rzeczywistą wartością osiadań, to jest $s_{rz} = 15,0$ mm. Zdaniem autora przyczyną rozbieżności należy szukać w: niedokładnie wyznaczonym obciążeniu projektowym działającym na pal, zbyt krótkich palach dla przyjętych warunków gruntowych. Fakt ten potwierdzają zarówno obliczenia wykonane w programie Robot, Geo5 oraz Kalkulator PalePN, a przede wszystkim badania statyczne pali [5].

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki obliczeń analitycznych oraz numerycznych skrajnej i środkowej podpory wiaduktu drogowego w ciągu ul. Żuławskiej. Obliczenia miały na celu udowodnienie tezy, że zarówno uproszczone kalkulacje, jak i bardziej zaawansowane obliczenia numeryczne w dalszym ciągu nie potwierdzają rzeczywistych wartości osiadań w fazie eksploatacji. Niewątpliwie na przestrzeni kilku lub kilkunastu lat pojawiają się kolejne propozycje obliczeniowe bądź wytyczne normowe, zawierające dodatkowe współczynniki korygujące,

dzięki czemu uda się odkryć i zrozumieć charakter współpracy grupy pali z podłożem gruntowym.

Pomimo wykonanych badań statycznych, obliczeń analitycznych oraz numerycznych, w żadnej z analizowanych podpór wiaduktu nie otrzymano wyniku odpowiadającego rzeczywistym osiadaniom określonym na podstawie monitoringu geodezyjnego. W obu podporach przewidywano mniejsze osiadanie niż faktycznie nastąpiło. Zasadne wydaje się projektowanie posadowienia konstrukcji inżynierskich o dużych obciążeniach własnych oraz użytkowych zgodnie z zaleceniami normowymi. Uzasadnione jest także zalecenie o przyjęciu wartości granicznej osiadania w przedziale od 5 do 15 mm, natomiast warunek dopuszczający osiadanie o wartość 10% średnicy pala należy traktować wyłącznie poglądowo oraz w ostateczności. Z założenia optymalnej granicy osiadania wynika pewność, że zarówno w fazie budowy, jak i eksploatacji dana konstrukcja inżynierska będzie pełnić swoją funkcję w sposób trwały oraz bezpieczny dla użytkowników.

LITERATURA

1. Gwizdała K., Dyka I.: Metody obliczeń osiadania dużych grup palowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/1998.

2. Gwizdała K., Dyka I.: Osiadanie pali i fundamentów palowych. Gdańsk 2004.
3. Gwizdała K., Krasieński A.: Fundamenty palowe, obliczenia z zastosowaniem zasad Eurokodu 7 i doświadczeń krajowych. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (2), 3-22.
4. Kospin K.: Schemat rozmieszczenia reperów. Obiekt Żuławska. Szkic nr WZ/28a. Warszawa 2016.
5. Krasieński A., Gwizdała K., Kusio T., Więclawski P., Wiszniewski M.: Mechanizm współpracy z gruntem pali prefabrykowanych wbijanych w świetle próbnych obciążeń pali oprzyrządowanych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2/2020.
6. Krasieński A.: Politechnika Gdańska. Fundamentowanie – materiały dydaktyczne.
7. PN-83/B-02482: Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
8. Sobala D.: Wyznaczanie nośności geotechnicznej pali wciskanych według EC7 i metody opisanej w PN-83/B-02482. *Mosty* 6/2011.
9. Sobczak S.: Projekt technologiczny. Projekt fundamentów palowych. Aarsleff Sp. z o.o., Rzeszów 2015.
10. Tkaczyński G.: Raport z próbnych obciążeń pali metodą statyczną. Warszawa 2016.
11. Więclawski P., Gwizdała K.: Racjonalne projektowanie podpór wiaduktu drogowego. *Mosty*, 1/2013, 20-22.