

# Przykład projektowania geotechnicznego pala prefabrykowanego wg PN-EN 1997-1 na podstawie wyników sondowania CPT metodą LCPC (francuska)

Data: 2013-04-19  
Opracował: Dariusz Sobala, dr inż.  
Liczba stron: 8

## Zadanie projektowe

Określić nośność obliczeniową na wciskanie pojedynczego pala prefabrykowanego żelbetowego wbijanego o przekroju 400x400mm i długości 14m w podanych warunkach gruntowych.

## Dane do projektowania

Parametry podłoża: w rejonie fundamentu wykonano otwór badawczy (rozpoznanie rodzaju gruntu) oraz sondowanie CPT (określenie parametrów gruntu metodą „in-situ”) (rys. 2).

## Metoda projektowania

Ze względu na zakres danych do projektowania wybrano projektowanie geotechniczne oparte na badaniach podłoża (obliczeniach) przewidziane w PN-EN 1997-1. Jako metodę projektowania wybrano metodę LCPC (francuska) określania nośności pala bezpośrednio na podstawie wyników sondowania CPT opisaną po raz pierwszy przez Bustamante i Ganeselli'ego w 1982 roku z poprawkami wg Fascicule 62 z 2004 roku. Metoda LCPC jest oceniana jako jedna z najbardziej wiarygodnych metod projektowania geotechnicznego pali. Metoda ta pozwala na wyznaczenie nośności granicznej pala. Analizę stanu granicznej nośności przeprowadzono wg PN-EN 1997-1 (EC7).

## Opis metody LCPC (francuskiej)

Opis metody określania nośności pali bezpośrednio na podstawie wyników sondowania CPT opracowanej w LCPC (Francja) został przedstawiony w kolejnych tabelach 1 i 2. Opór jednostkowy  $q_b$  pod podstawą pala wyznacza się na podstawie zastępczego oporu sondy w poziomie spodu pala wyznaczonego wg schematu pokazanego na rys. 1 i opisanej procedury.

Tabela 1. Metoda LCPC projektowania pali na podstawie CPT wg Fascicule 62 (2004)

| Opór jednostkowy         | Piaski i gliny                                                                                                                                            |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| na pobocznicy pala $q_s$ | $q_s = \min \left\{ \frac{q_c(z)}{\beta}, q_{smax} \right\},$<br>$\beta$ - współczynnik redukcji oporu stożka do wyznaczenia oporu pobocznicy (tablica 3) |
| pod podstawą pala $q_b$  | $q_b = k_b q_{ce}$<br>$q_{ce}$ - zastępczy opór sondy w poziomie podstawy pala (rys. 1)<br>$k_b$ - współczynnik nośności (tablica 2)                      |

Zastępczy średni opór sondy  $q_{ce}$  na poziomie podstawy pala jest obliczany w trzech krokach:

- obliczana jest średnia wartość oporu stożka sondy  $q_{cm}$  w przedziale  $+b/-3a$  w stosunku do przyjętego poziomu podstawy pala (rys. 1);
- w przedziale  $+b/-3a$  opory sondowania  $q_c(z)$  większe niż  $1,3q_{cm}$  są zastępowane wartością graniczną  $1,3q_{cm}$ ;
- na podstawie zmodyfikowanego wyniku sondowania wyznaczany jest zastępczy opór  $q_{ce}$  jako opór średni w przedziale  $+b/-3a$ .

Zastępczy opór średni  $q_{ce}$  pomnożony przez współczynnik  $k_b$  stanowi opór graniczny pod podstawą pala  $q_b$ .

Nośność graniczna pala  $R_m^c$  szacowana metodą LCPC wyznaczana jest ze wzoru

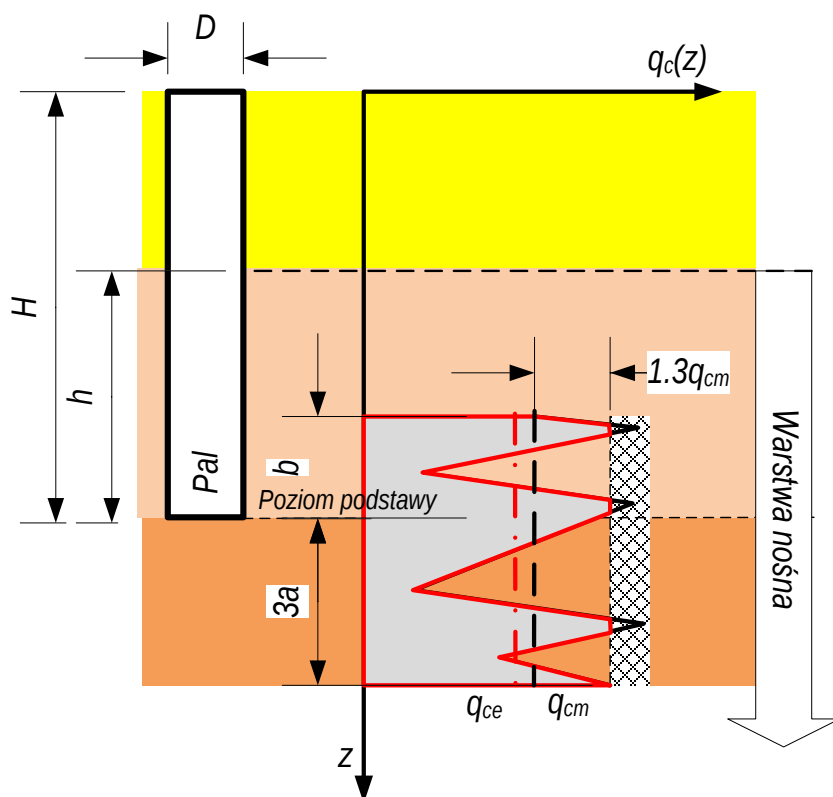
$$R_m^c = A_s q_s + A_b q_b,$$

gdzie  $A_s$  jest powierzchnią czynną pobocznic, a  $A_b$  jest powierzchnią podstawy pala.

Tablica 2. Współczynnik oporu pobocznic  $\beta$  i podstawy  $k_b$  dla żelbetowych pali prefabrykowanych

| Rodzaj gruntu      | $q_c$ (MPa) | Współczynnik $\beta$ | Maksymalna wartość $q_{smax}$ (MPa) | Współczynnik $k_b$ |
|--------------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Gliny, ility, pyły | od 1 do 3   | -                    | 0.015                               | 0.55               |
|                    | > 3         | 75                   | 0.080                               |                    |
| Piaski i żwiry     | $\geq 1$    | 150                  | 0.120                               | 0.5                |

Uwaga! Dla  $q_c(z) < 1 \text{ MPa}$  należy pominąć nośność pobocznic.



$$a = \max(D/2, 0.5m) \quad b = \min(a, h)$$

Rys. 1. Metoda LCPC – określanie zastępczego oporu sondy CPT pod podstawą pala wg Fascicule (2004)

## Nośność graniczna pala oszacowana metodą LCPC

(obliczenia przeprowadzono przy użyciu skryptu w programie MathCad – Fascicule62.xmcd)

Poziom gruntów nośnych

Rodzaj pala

Przekrój pala przyjęto jako kwadratowy

Średnica zastępcza pala

Długość prefabrykatu pala

Długość zakotwienia/rozkucia

na poziomie terenu

prefabrykowany żelbetowy wbijany

$A = 400mm$

$D = 1.128 \cdot A = 0.451m$

$L_{pp} = 14m$

$L_z = 0.6m$

Długość czynna pala

Obwód pala

Powierzchnia poboczniczy pala

Powierzchnia podstawy pala

Spód zwierczenia znajduje się na rzędnej

Podstawa pala znajduje się

Współczynnik nośności podstawy dla piasków ma wartość

Wartość

Wartość

Zastępczy opór stożka sondy CPT na poziomie podstawy pala

Opór graniczny pod podstawą pala

Nośność graniczna podstawy pala

Nośność graniczna poboczniczy

Nośność graniczna pala

$$L_c = 13.4m$$

$$O_p = 1.6m$$

$$A_s = 21.44m^2.$$

$$A_b = 0.16m^2$$

$$1.28m \text{ ppt.}$$

$$14.68m \text{ ppt.}$$

$$k_b(z) = 0.5$$

$$a = 0.5m$$

$$b = 0.451m$$

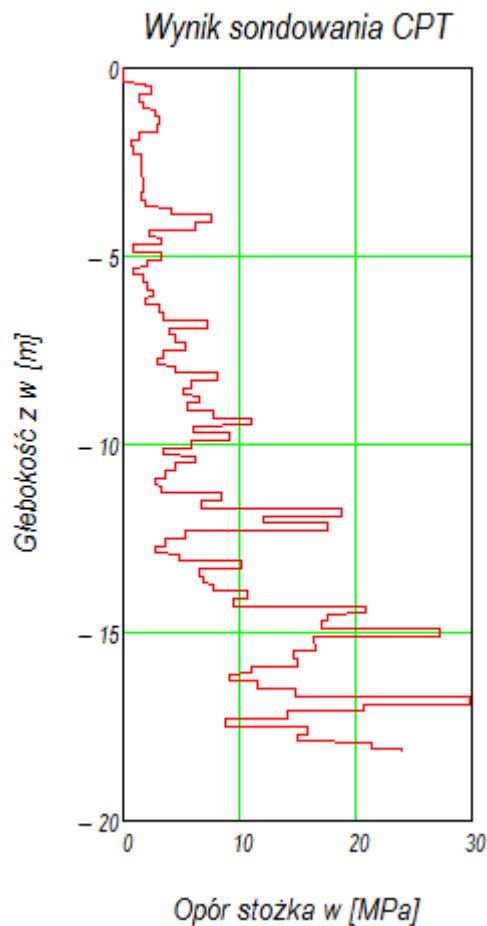
$$q_{ce}(z) = 16.2MPa$$

$$q_b(z) = q_{ce}(z) \cdot k_b(z) = 8.1MPa$$

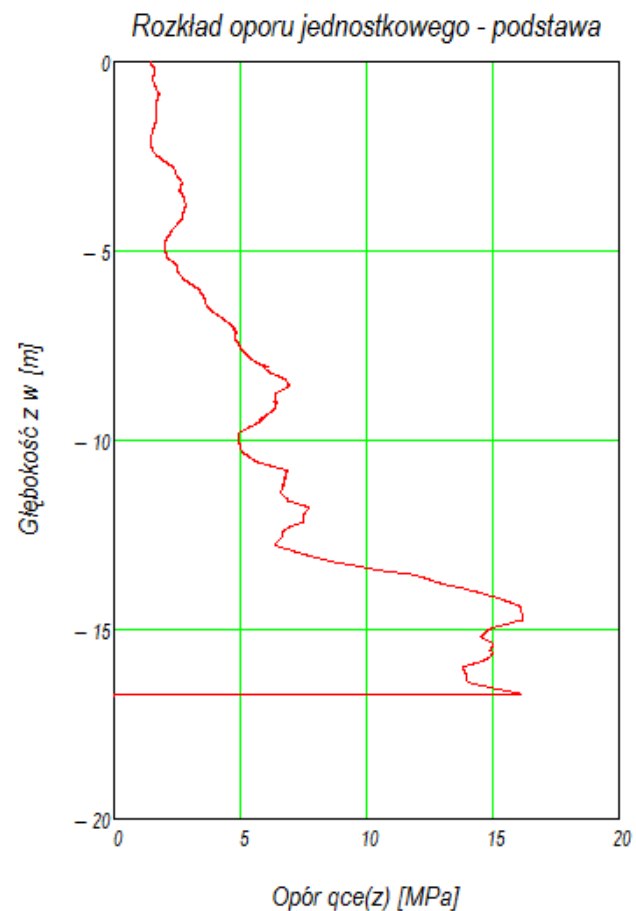
$$R_{sm}^c = 1293kN$$

$$R_{sm}^c = 965kN$$

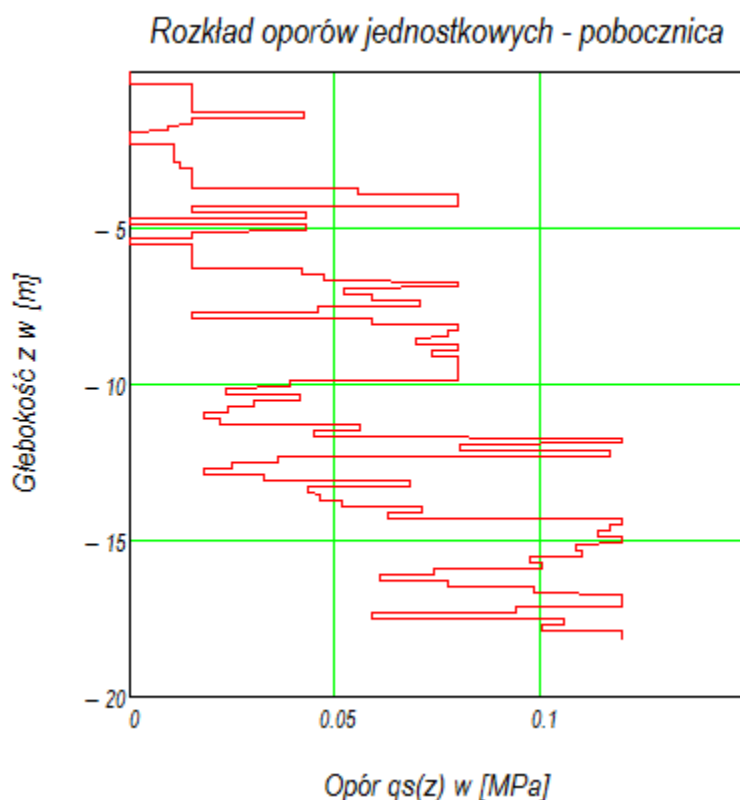
$$R_m^c = 2258kN$$



Rys. 2. Rozkład oporów stożka sondy CPT na głębokości



Rys. 3. Wartość oporów zastępczych pod podstawą pala w zależności od głębokości



Rys. 4. Rozkład oporów jednostkowych na pobocznicy w zależności od głębokości

## Analiza nośności pała wg PN-EN 1997-1 (Eurokod 7)

Oszacowaną metodą LCPC nośność graniczną poddano analizie bezpieczeństwa zgodnie z wymaganiami PN-EN 1997-1 odpowiednimi dla przyjętego w załączniku krajowym podejścia projektowego 2 oraz metody projektowania opartej na wynikach badań gruntu (obliczeniach).

Nośność charakterystyczna pała wg PN-EN 1997-1 jest równa:

$$R_{ck} = \min \left\{ \frac{R_{m,avg}^c}{\xi_3}, \frac{R_{m,min}^c}{\xi_4} \right\}$$

W analizowanym przypadku jako podstawę projektowania przyjęto jeden profil gruntowy, tak więc współczynniki korelacyjne są wg PN-EN 1997-1 równe  $\xi = \xi_3 = \xi_4 = 1.4$ , a średnia i minimalna nośność graniczna jest równa  $R_{m,avg}^c = R_{m,min}^c = R_m^c = 2258 kN$ .

Dodatkowo przyjęto redukcję wartości współczynnika korelacyjnego  $\xi / 1.1$  ze względu na sztywne zwieńczenie (nadbudowę) fundamentu palowego umożliwiającą redystrybucję obciążeń z pali o mniejszej nośności na pale o większej nośności, zatem  $\xi = \frac{1.4}{1.1} = 1.27$ .

Nośność charakterystyczna jest zatem równa:  $R_{ck} = \frac{R_m^c}{1.27} = 1778 kN$ .

Nośność obliczeniowa pała:

$$R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_c}$$

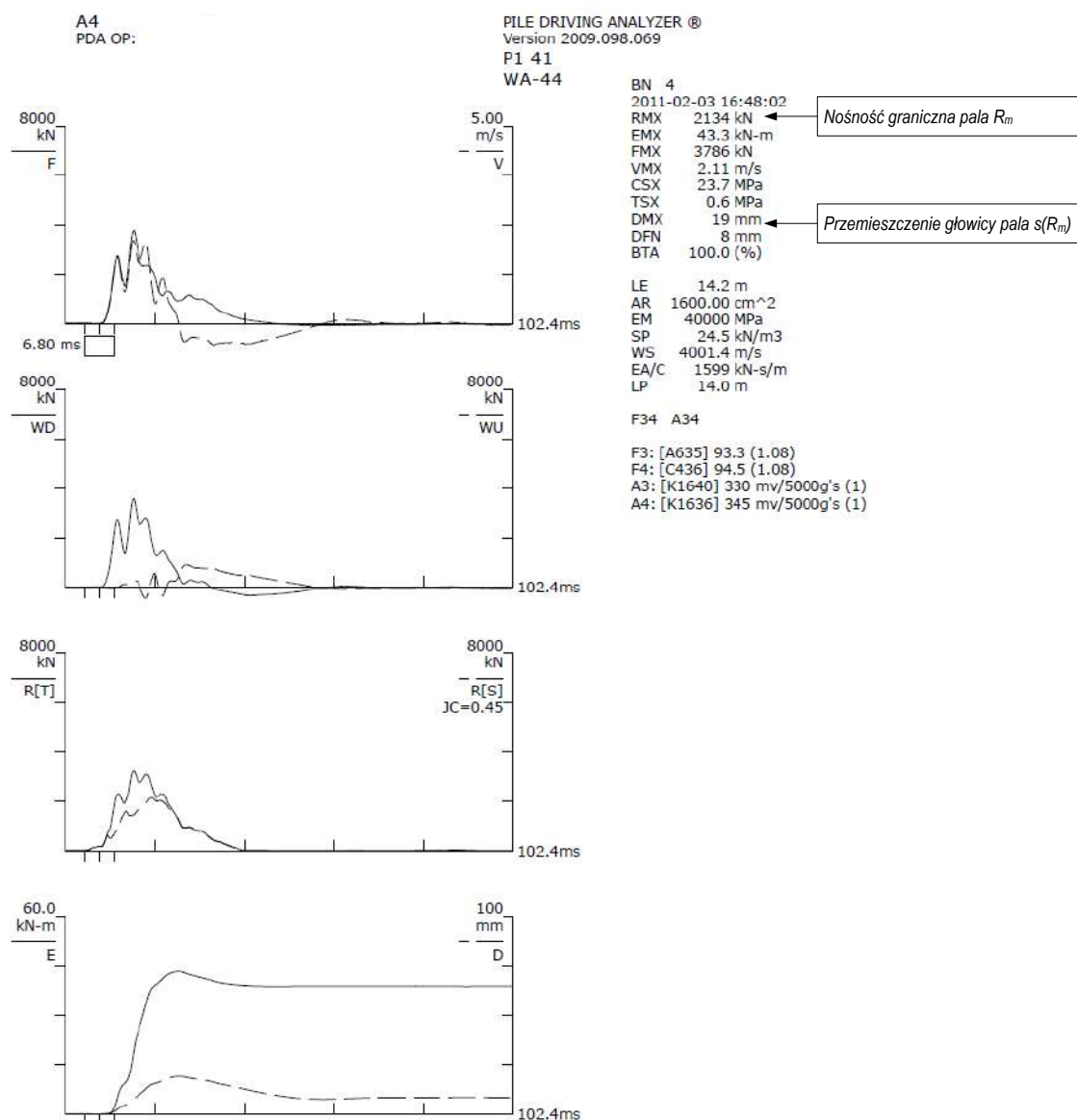
Dla pała wciskanego  $\gamma_c = 1.1$ , zatem ostatecznie przyjęto nośność obliczeniową pojedynczego pała jako równą:  $R_{cd} = \frac{R_{ck}}{1.1} = \frac{R_m^c}{1.27 \cdot 1.1} = \frac{R_m^c}{1.4} = 1613 kN$

## Weryfikacja projektu (obliczeń) wynikami badań nośności pali

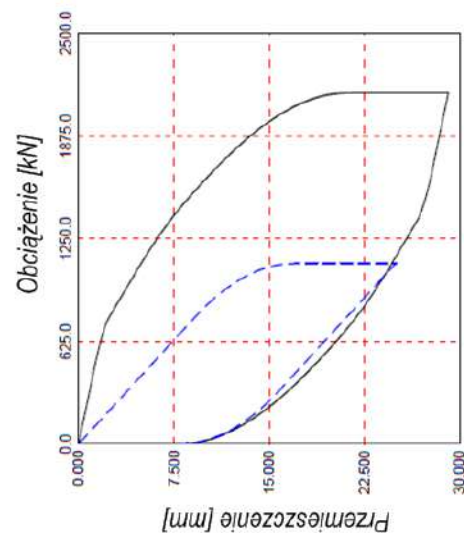
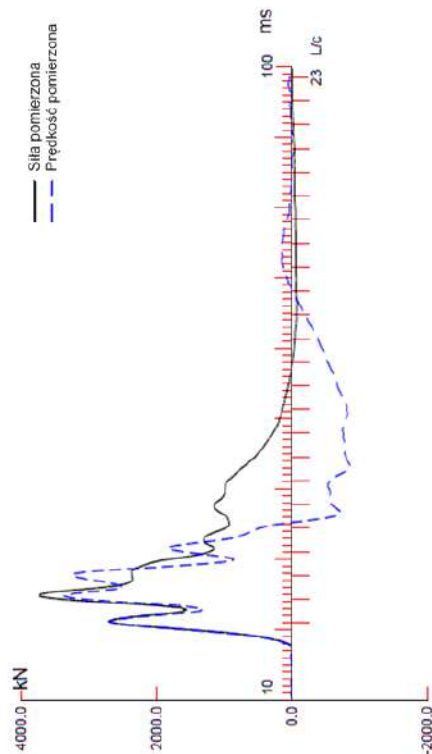
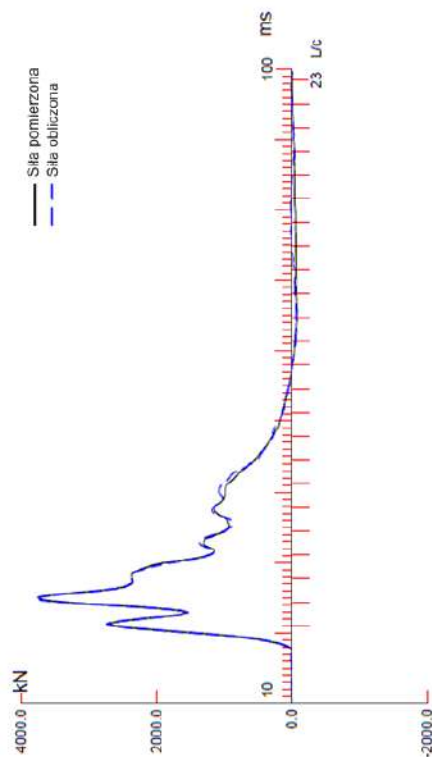
W ramach wymaganej przez PN-EN 1997-1 (Eurokod 7) weryfikacji metody projektowania przewidziano wykonanie próbnego obciążenia metodą dynamiczną przy dużych odkształceniach. Wyniki badań poddano analizie metodą CASE (bez dopasowania sygnału) oraz metodą CAPWAP (z dopasowaniem sygnału). Jako wymagane przez PN-EN 1997-1 badanie kalibrujące dla badania dynamicznego wykorzystano badanie statyczne wykonane na palu prefabrykowanym w podobnych warunkach gruntowych (doświadczenie porównywalne). Energia młota w trakcie badania powinna umożliwiać określenie nośności granicznej o wartości ok.  $R_m^c = 2258 \text{ kN}$ .

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na kolejnych rysunkach 5 (CASE) i 6 (CAPWAP) oraz w tablicy 4 (CAPWAP). Wyniki podsumowano w tablicy 5.

## Analiza wyników badań nośności pali i weryfikacja projektu palowania

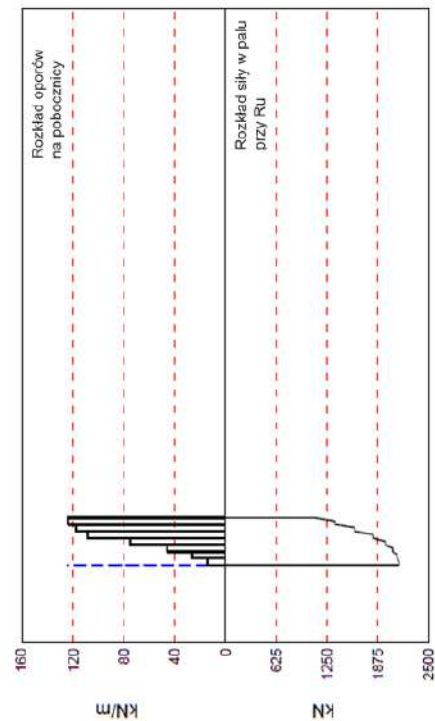


Rys. 5. Wynik badania nośności pala opracowany metodą CASE (bez dopasowania sygnału)



Ru = 2138.0 kN  
Rs = 1038.7 kN  
Rb = 1100.3 kN  
Dy = 2.11 mm  
Dx = 29.1 mm

LEGENDA:  
Ru - nośność graniczna  
Rs - nośność graniczna poboczny  
Rb - nośność graniczna słopy  
Dy - przemieszczenie głowy pala  
Dx - przemieszczenie w płaszczyźnie  
sprężystości



Rys. 6. Wykresy metody CAPWAP (z dopasowaniem sygnału)

Tablica 4. Wyniki analizy CAPWAP

|                                                                       |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------|--------------------------|-----------|----------------------|---------------------|----------------------|--------|
| A4; Pile: P1 41                                                       |                   |                   |        | Test: 03-Feb-2011 16:48: |           |                      |                     |                      |        |
| WA-44; Blow: 4                                                        |                   |                   |        | CAPWAP (R) 2006          |           |                      |                     |                      |        |
| Aarsleff Sp z o o                                                     |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| CAPWAP SUMMARY RESULTS                                                |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| Total CAPWAP Capacity:                                                |                   |                   |        | 2139.0; along Shaft      |           | 1038.7; at Toe       |                     | 1100.3 kN            |        |
| Soil Sgmnt No.                                                        | Dist. Below Gages | Depth Below Grade | Ru     | Force in Pile            | Sum of Ru | Unit Resist. (Depth) | Unit Resist. (Area) | Smith Damping Factor | Quake  |
|                                                                       | m                 | m                 | kN     | kN                       | kN        | kN/m                 | kPa                 | s/m                  | mm     |
| 1                                                                     | 2.0               | 1.8               | 29.1   | 2109.9                   | 29.1      | 15.91                | 9.95                | 0.122                | 1.168  |
| 2                                                                     | 4.1               | 3.9               | 52.5   | 2057.4                   | 81.6      | 25.88                | 16.18               | 0.122                | 1.169  |
| 3                                                                     | 6.1               | 5.9               | 92.6   | 1964.8                   | 174.2     | 45.65                | 28.53               | 0.122                | 1.169  |
| 4                                                                     | 8.1               | 7.9               | 152.6  | 1812.2                   | 326.8     | 75.23                | 47.02               | 0.122                | 1.169  |
| 5                                                                     | 10.1              | 9.9               | 220.8  | 1591.4                   | 547.6     | 108.85               | 68.03               | 0.122                | 1.169  |
| 6                                                                     | 12.2              | 12.0              | 239.5  | 1351.9                   | 787.1     | 118.06               | 73.79               | 0.122                | 7.344  |
| 7                                                                     | 14.2              | 14.0              | 251.6  | 1100.3                   | 1038.7    | 124.03               | 77.52               | 0.122                | 4.036  |
| Avg. Shaft                                                            |                   |                   | 148.4  |                          | 74.19     | 46.37                | 0.122               |                      | 3.287  |
| Toe                                                                   |                   |                   | 1100.3 |                          |           | 6876.87              | 0.495               |                      | 13.041 |
| Soil Model Parameters/Extensions                                      |                   |                   |        |                          |           | Shaft                | Toe                 |                      |        |
| Case Damping Factor                                                   |                   |                   |        |                          |           | 0.079                | 0.341               |                      |        |
| Unloading Quake (% of loading quake)                                  |                   |                   |        |                          |           | 85                   | 65                  |                      |        |
| Reloading Level (% of Ru)                                             |                   |                   |        |                          |           | 100                  | 100                 |                      |        |
| Unloading Level (% Ru)                                                |                   |                   |        |                          |           | 17                   |                     |                      |        |
| Soil Support Dashpot                                                  |                   |                   |        |                          |           | 0.800                | 0.000               |                      |        |
| Soil Support Weight (kN)                                              |                   |                   |        |                          |           | 16.23                | 0.00                |                      |        |
| CAPWAP match quality = 1.47 (Wave Up Match) ; RSA = 0                 |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| Observed: final set = 8.000 mm; blow count = 125 b/m                  |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| Computed: final set = 7.657 mm; blow count = 131 b/m                  |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| max. Top Comp. Stress = 23.7 MPa (T= 25.3 ms, max= 1.000 x Top)       |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| max. Comp. Stress = 23.7 MPa (Z= 1.0 m, T= 25.3 ms)                   |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| max. Tens. Stress = -0.84 MPa (Z= 8.1 m, T= 63.8 ms)                  |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |
| max. Energy (EMX) = 43.08 kJ; max. Measured Top Displ. (DMX)=19.12 mm |                   |                   |        |                          |           |                      |                     |                      |        |

Ważniejsze informacje zawarte w tablicy 4:

1. nośność graniczna pała wg CAPWAP
2. nośność graniczna pobocznic pała
3. nośność graniczna podstawy pała
4. numer wydzielonej warstwy gruntu
5. odległość od czujników pomiarowych
6. odległość od powierzchni terenu
7. opór graniczny pobocznic w warstwie
8. siła w pału
9. suma narastająca oporów granicznych na długości pobocznic pała
10. opór na pobocznic na jednostkę długości pała
11. opór na pobocznic na jednostkę powierzchni
12. przemieszczenie towarzyszące osiągnięciu nośności granicznej
13. średni opór na pobocznic w pojedynczej warstwie
14. opór podstawy
15. średni opór na jednostkę długości pobocznic pała
16. średni opór na jednostkę powierzchni pobocznic pała

17. opór jednostkowy pod podstawą pała
18. średnia wartość przemieszczenia pobocznic pała towarzysząca osiągnięciu nośności granicznej pobocznic
19. maksymalne przemieszczenie podstawy pała towarzyszące osiągnięciu nośności granicznej podstawy
20. maksymalne pomierzone przemieszczenie wierzchu pała w trakcie badania

Tablica 5. Podsumowanie wyników obliczeń i badań

|                                     | Całkowita [kN] | Podstawy [kN] | Pobocznicy [kN] |
|-------------------------------------|----------------|---------------|-----------------|
| Nośność graniczna obliczona         | 2258           | 1293          | 956             |
|                                     | 100%           | 100%          | 100%            |
| Nośność graniczna pomierzona CASE   | 2134           | b.d.          | b.d.            |
|                                     | -5.5%          | -             | -               |
| Nośność graniczna pomierzona CAPWAP | 2139           | 1100          | 1039            |
|                                     | -5.3%          | -14.9%        | +8.7%           |

## Wnioski końcowe

1. Całkowita nośność pomierzona i obliczona różnią się o ok. 6% (tablica 5). Przy tak dobrej zbieżności wyników obliczeń i badań nośności pali można przyjąć, że obliczenia zostały pozytywnie zweryfikowane badaniami.
2. Nośność obliczeniowa wbijanego pała prefabrykowanego żelbetowego o przekroju 400x400mm i długości całkowitej 14m i czynnej 13.4m ze zwieńczeniem na poziomie 1.28m ppt. wynosi 1613kN.
3.  $SF_{RESISTANCE} = 2258\text{kN}/1613\text{kN} = 1.4$ .  $SF_{LOAD} = \min. 1.35$ .  $SF_{TOTAL} = 1.4 \cdot 1.35 \cong \min. 1.9$  dla zwieńczenia sztywnego lub  $1.9 \cdot 1.1 \cong \min. 2.1$  dla zwieńczenia wiotkiego, bez redystrybucji obciążeń między palami. Osiągnięty poziom bezpieczeństwa uznano za zadowalający.