

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 Gianselli'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 granicznego 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 w na podstawie zastępczego oporu sondy w poziomie spodu pala wyznaczonego wg schematu pokazanego na rys. 1 i opisanej procedury.

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

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

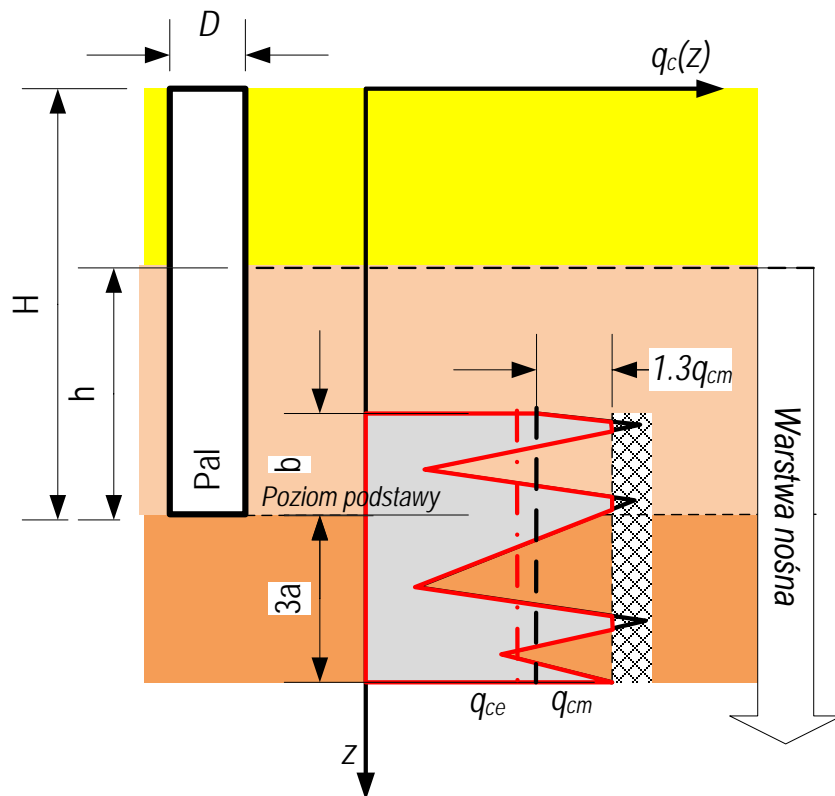
$$R_m^c = A_s q_s + A_b q_b,$$

gdzie A_s jest powierzchnią czynną poboczniczy, a A_b jest powierzchnią podstawy pala.

Tablica 2. Współczynnik oporu poboczniczy β i podstawy k_b dla żelbetowych pali prefabrykowanych

Rodzaj gruntu	q_c (MPa)	Współczynnik β	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	≥ 1	150	0.120	0.5

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



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

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

$$A = 400mm$$

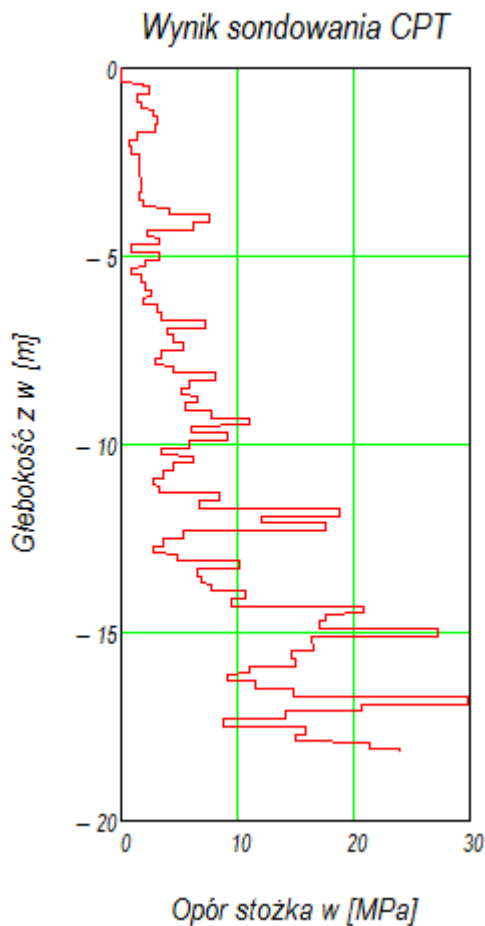
$$D = 1.128 \cdot A = 0.451m$$

$$L_{pp} = 14m$$

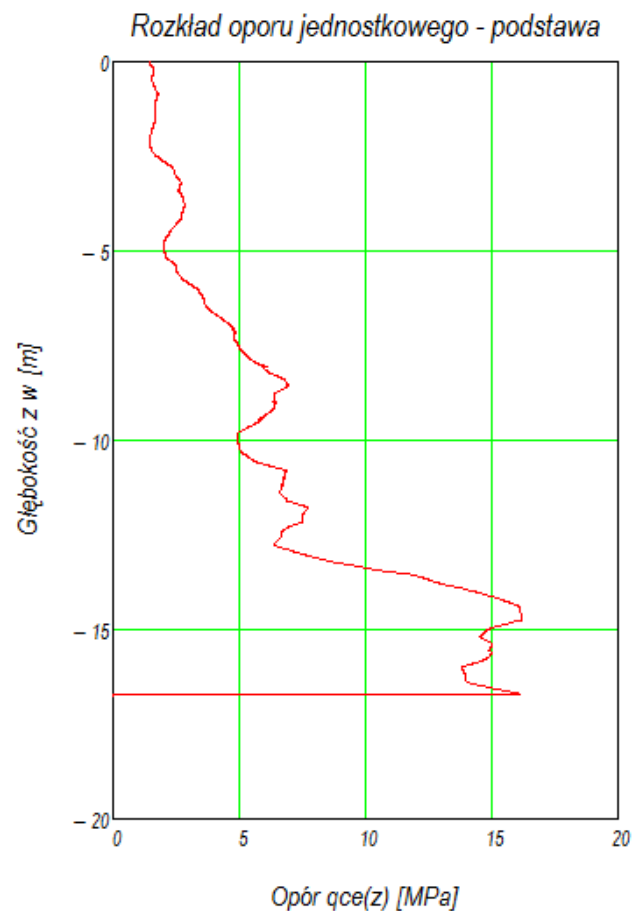
$$L_z = 0.6m$$

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

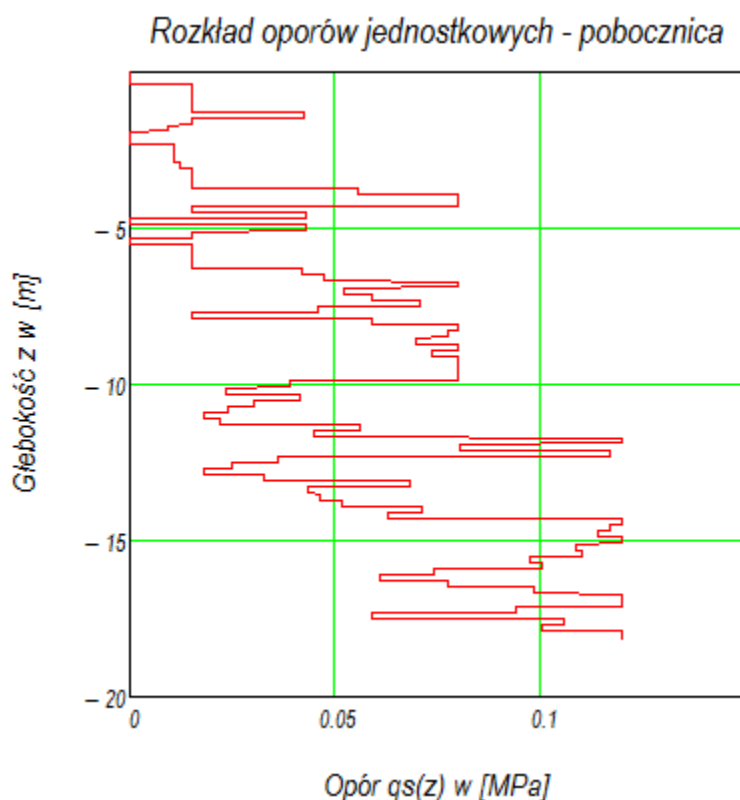
$L_c = 13.4m$
 $O_p = 1.6m$
 $A_s = 21.44m^2$
 $A_b = 0.16m^2$
 1.28m ppt.
 14.68m ppt.
 $k_b(z) = 0.5$
 $a = 0.5m$
 $b = 0.451m$
 $q_{ce}(z) = 16.2MPa$
 $q_b(z) = q_{ce}(z) \cdot k_b(z) = 8.1MPa$
 $R_{sm}^c = 1293kN$
 $R_{sm}^c = 965kN$
 $R_m^c = 2258kN$



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 zwiercenie (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:

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

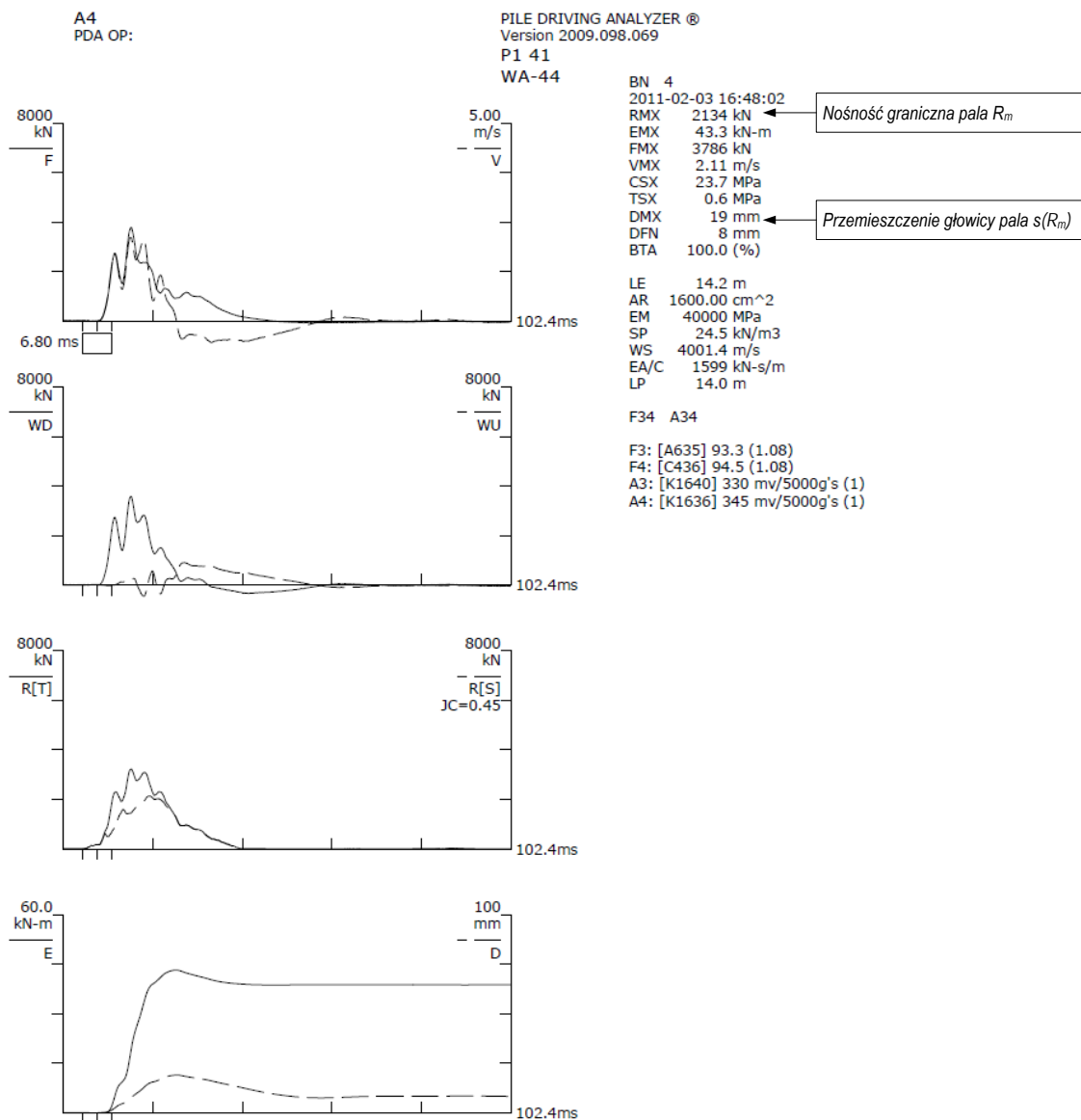
Dla pała wciskanego $\gamma_c = 1.1$, zatem ostatecznie przyjęto nośność obliczeniową pojedynczego pała jako równą: $R_{cd} = \frac{R_{ck}}{1.1} = \frac{R_m^c}{1.27 \cdot 1.1} = \frac{R_m^c}{1.4} = 1613 kN$

Weryfikacja projektu (obliczeń) wynikami badań nośności pali

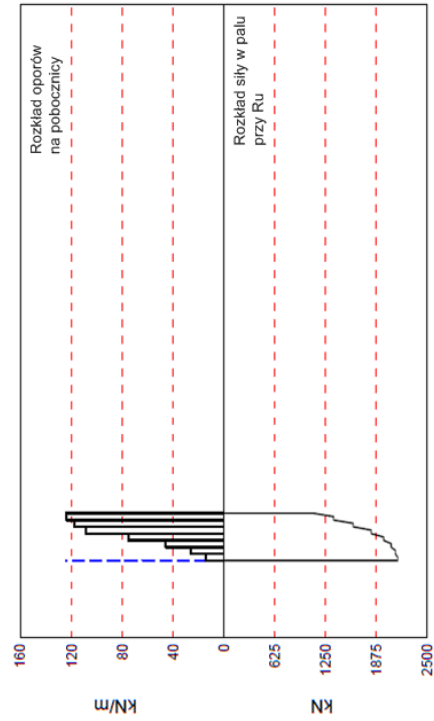
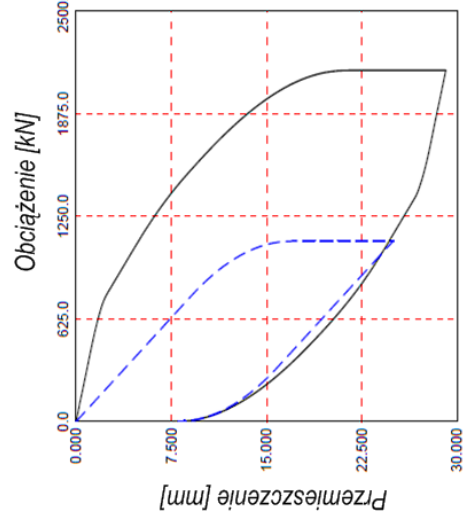
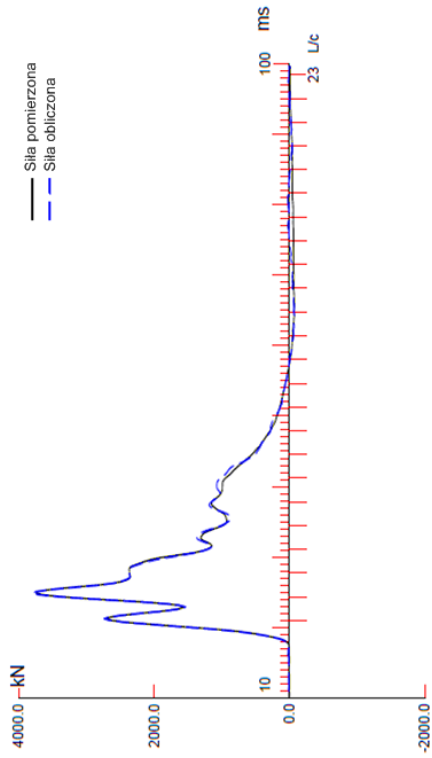
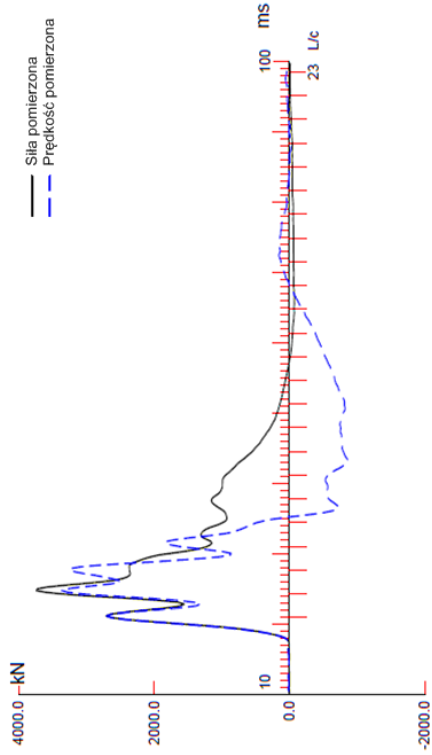
W ramach wymaganej przez PN-EN 1997-1 (Eurokod 7) weryfikacji metody projektowania przewidziano wykonanie próbnego obciążenia metodą dynamiczną przy dużych odkształceniach. Wyniki badań poddano analizie metodą CASE (bez dopasowania sygnału) oraz metodą CAPWAP (z dopasowaniem sygnału). Jako wymagane przez 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 umożliwić 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 = 2130.0 kN
Rs = 1038.7 kN
Rb = 1100.3 kN
Dy = 21.1 mm
Dx = 29.1 mm
LEGENDA:
Ru - nośność graniczna
Rs - nośność graniczna poboczniczy
Rb - nośność graniczna stopy
Dy - przemieszczenie głowicy pala towarzyszące zmianie odkształceń sprężystych w płastyczne
Dx - przemieszczenie maksymalne

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

Tablica 4. Wyniki analizy CAPWAP

A4; Pile: P1 41
WA-44; Blow: 4
Aarsleff Sp z o o

Test: 03-Feb-2011 16:48:
CAPWAP (R) 2006

CAPWAP SUMMARY RESULTS

Total CAPWAP Capacity: 2139.0; along Shaft 1038.7; at Toe 1100.3 kN

Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake 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 poboczniczy pała
3. nośność graniczna podstawy pała
4. numer wydzielonej warstwy gruntu
5. odległość od czujników pomiarowych
6. odległość od powierzchni terenu
7. opór graniczny poboczniczy w warstwie
8. siła w pału
9. suma narastająca oporów granicznych na długości poboczniczy pała
10. opór na poboczniczy na jednostkę długości pała
11. opór na poboczniczy na jednostkę powierzchni
12. przemieszczenie towarzyszące osiągnięciu nośności granicznej
13. średni opór na poboczniczy w pojedynczej warstwie
14. opór podstawy
15. średni opór na jednostkę długości poboczniczy pała
16. średni opór na jednostkę powierzchni poboczniczy pała

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

Tablica 5. Podsumowanie wyników obliczeń i badań

	Całkowita [kN]	Podstawy [kN]	Poboczniczy [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 pala 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 zadawalający.