

Projektowanie pali wg Eurokodu 7 – metody i przykłady praktycznego wykorzystania

I. Wprowadzenie

W Eurokodzie 7 [7] wyróżniono trzy metody liczbowego określania nośności geotechnicznej projektowanych pali wykorzystujące w sposób bezpośredni lub pośredni wyniki badań gruntu lub nośności pali określonej metodą statyczną lub/i dynamiczną. W kolejności odpowiadającej zmniejszającemu się poziomowi niezawodności w normie [7] wymieniono:

METODA 1. Projektowanie na podstawie **wyników próbnych obciążeń statycznych pali**, które zostały potwierdzone **obliczeniami** lub w inny sposób.

METODA 2. Projektowanie na podstawie wyników badań podłoża z **wykorzystaniem empirycznych lub analitycznych metod obliczeniowych**, których wiarygodność została potwierdzona wynikami **próbnych obciążeń statycznych** w podobnych sytuacjach.

METODA 3. Projektowanie na podstawie wyników **próbnych obciążeń dynamicznych pali**, których wiarygodność została potwierdzona wynikami **próbnych obciążeń statycznych** w podobnych sytuacjach. W rozumieniu normy Eurokodu 7 wyniki próbnych obciążeń dynamicznych obejmują zarówno wyniki **próbnych obciążeń dynamicznych pali przy dużych odkształceniach** bez lub z dopasowaniem sygnału (dotyczy wszystkich pali), jak i wyniki analizy wępu z użyciem **wzorów dynamicznych** uwzględniające lub nie skrócenie quasi-sprężyste pala w trakcie uderzenia (dotyczy pali wbijanych).

Ponadto w Eurokodzie 7 dopuszczono możliwość projektowanie pali alternatywną **metodą obserwacyjną** na podstawie **zachowania porównywalnych fundamentów palowych**, jeżeli poczynione obserwacje potwierdzone są wynikami badań w terenie i badań podłoża. Zgodnie ze współczesną definicją (CIRIA, 1999) "**metoda obserwacyjna w geotechnice jest zarządzanym, zintegrowanym i ciągłym procesem projektowania, kontroli budowy, monitorowania i przeglądów, który w razie potrzeby umożliwi wprowadzenie w trakcie realizacji lub po zakończeniu budowy wcześniej zaplanowanych modyfikacji. Wszystkie ww. składowe procesy muszą być jednakowo ważne. Celem jest uzyskanie ekonomicznych rozwiązań geotechnicznych bez kompromisów w zakresie bezpieczeństwa**". Metoda obserwacyjna rzadko bywa wykorzystywana do bezpośredniego, liczbowego określania nośności geotechnicznej pali i dlatego nie będzie dalej omawiana.

Charakterystyczne dla ww. metod liczbowego określania nośności geotechnicznej pali jest **zasada weryfikacji otrzymanych wyników** w inny, alternatywny sposób. Pośrednią lub bezpośrednią podstawą weryfikacji nośności pali jest zawsze wynik próbnego obciążenia statycznego. Eurokod 7 w odróżnieniu od dotychczas wykorzystywanej normy [5] wyróżnia dwa rodzaje próbnych obciążeń statycznych, dzieląc je na:

- **wykonywane na palach próbnych**, których celem jest osiągnięcie/określenie nośności granicznej badanego pala wykorzystywanej później w projektowaniu pali roboczych, $Q_{\max} \cong 2R_{c,d}$,
- **wykonywane na palach roboczych**, jako badania odbiorcze powykonawcze w trakcie których sprawdza się zachowanie pala w zakresie obciążeń obliczeniowych. Celem badań jest sprawdzenie poprawności wykonania fundamentu palowego, $Q_{\max} \cong R_{c,d}$.

Warto w tym miejscu zauważyć, że zasady podane w Eurokodzie 7 rozciągają proces projektowania geotechnicznego pali poza prace stricte kameralne i zmuszają projektanta do zdobywania niezbędnego w geotechnice **doświadczenia** przez wykorzystywanie metod eksperymentalnych lub/i obserwacyjnych, realizowanych na etapie wykonawstwa robót palowych. Uzasadnieniem dla konieczności stosowania w projektowaniu geotechnicznym zasady weryfikacji wyników obliczeń badaniami lub/i obserwacjami w terenie niech będą słowa ojca mechaniki gruntów Karla Terzaghi'ego: „*Niestety, grunty są uformowane przez naturę, a nie przez człowieka, a produkty natury są zawsze złożone [...]. W chwili przejścia ze stali lub betonu do gruntu nieograniczone możliwości teorii przestają funkcjonować. Naturalny grunt nigdy nie jest jednorodny. Jego parametry zmieniają się z miejsca na miejsce, podczas gdy nasza wiedza o ich właściwościach jest ograniczona do kilku miejsc, w których pobrano próbki. W mechanice gruntów dokładność obliczeń*

nigdy nie jest większa niż grube przybliżenie, a głównym zadaniem teorii jest nauczenie nas co, i w jaki sposób obserwować w terenie”.

2. Zasady określania nośności geotechnicznej pali wciskanych wg Eurokodu 7

Projektowanie geotechniczne pali w stanie granicznym nośności sprowadza się do takiego doboru **rodzaju, długości i przekroju pala w danych warunkach gruntowych**, aby spełniony był warunek:

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$$

gdzie: $F_{c,d}$ to obliczeniowy efekt oddziaływań na projektowany pal, a $R_{c,d}$ jest **nośnością obliczeniową pala** w gruncie. Nośność obliczeniowa pala $R_{c,d}$ wyznaczana jest przez podzielenie **nośności charakterystycznej** $R_{c,k}$ przez **współczynnik bezpieczeństwa** γ_t który dla pali wciskanych i drugiego podejścia obliczeniowego wg [7] przyjmuje wartość $\gamma_t = 1.1$.

Nośność charakterystyczna $R_{c,k}$ określana jest wg ścisłych zasad [7] na podstawie wyznaczonych **nośności granicznych** R_c : **pomierzonych** $R_{c,m}$ lub **obliczonych** $R_{c,calc}$. W normie [7] nie podano sposobów określania **nośności granicznej** R_c , pozostawiając ich dobór do decyzji projektanta w ramach konkretnego projektu. Analiza statystyczna wyznaczonych nośności granicznych R_c powinna doprowadzić do określenia nośności charakterystycznej $R_{c,k}$, tj. wartości nośności wyznaczonej z prawdopodobieństwem $p = 0.95$. W praktyce rzadko dysponujemy wystraszającą liczbą wyznaczonych nośności granicznych, aby przeprowadzić pełną analizę statystyczną. Dlatego wykorzystywane są podane w normie [7] **współczynniki korelacyjne** ξ , które pośrednio opisują rozkłady prawdopodobieństwa uznane za właściwe dla podanych w normie ogólnych metod określania nośności pali. Nośność charakterystyczna $R_{c,k}$ wyliczana jest zatem z ogólnej zależności:

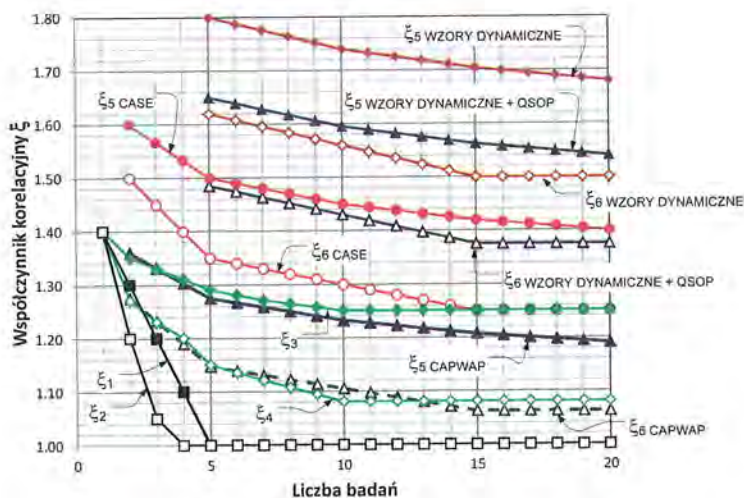
$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_c)_{mean}}{\xi_{mean}}; \frac{(R_c)_{min}}{\xi_{min}} \right\}$$

gdzie: $(R_c)_{mean}$ i $(R_c)_{min}$ są odpowiednio **średnią** i **minimalną** wartością nośności granicznych $R_{c,m}$ lub $R_{c,calc}$, a ξ_{mean} i ξ_{min} są współczynnikami korelacyjnymi, odpowiednio dla wartości średniej i minimalnej nośności granicznej.

Wartości współczynników korelacyjnych zostały tabelaryzowane w **załączniku normatywnym A** do [7] w zależności od liczby i metody wyznaczania nośności granicznych R_c . Wykorzystywane w obliczeniach wartości współczynników korelacyjnych, które uwzględniają współczynnik modelu wykorzystywanej metody i nie uwzględniają wpływu sztywności zwieńczenia, podano na wykresie (Rysunek 1).

3. Procedura określania nośności obliczeniowej pali na podstawie wyników badań pali $R_{c,m}$ lub badań podłoża (obliczeń) $R_{c,calc}$

Prezentowana poniżej praktyczna procedura i opracowane wg niej przykłady określania nośności geotechnicznej pali wciskanych oparte są wprost na zaleceniach Eurokodu 7, stosowanych na świecie sposobach wyznaczania nośności granicznej pali, danych z metryk pali i wynikach przeprowadzonych w terenie badań nośności. Procedura ta została w całości lub w części wykorzystana w praktyce, m.in. w projektowaniu i ocenie nośności wykonanych pali na dużych inwestycjach, takich jak Stadion Narodowy w Warszawie, budowa autostrady A-4 na Podkarpaciu i terminala LNG (Gazoportu) w Świnoujściu z realizacji których pochodzą dane do przykładów obliczeniowych.



Rysunek 1. Wartości współczynników korelacyjnych dla poszczególnych metod wyznaczania nośności granicznej i różnej liczby badań (QSOP – quasi-sprężyste odkształcenie pala)

Krok 1. Wyznaczenie wartości średniej $(R_c)_{mean}$ oraz minimalnej $(R_c)_{min}$ ze zbioru pomierzonych R_{c,m_i} lub obliczonych $R_{c,calc_i}$ nośności granicznych, gdzie $i = k..n$, k jest minimalną wymaganą liczbą wyznaczonych nośności granicznych na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych i badań podłoża $k \geq 1$, wyników próbnych obciążeń dynamicznych przy dużych odkształceniach $k \geq 2$ i wzorów dynamicznych $k \geq 5$, n jest ogólną liczbą wyznaczonych nośności granicznych R_c .

Krok 2. Odczytanie współczynników korelacyjnych ξ_{mean} i ξ_{min} z załącznika normatywnego A do normy [7]:

- ξ_1 i ξ_2 z tablicy A.9 dla n nośności granicznych R_c wyznaczonych na podstawie próbnych obciążeń statycznych,
- ξ_3 i ξ_4 z tablicy A.10 dla n nośności granicznych R_c obliczonych na podstawie analogicznej liczby badań podłoża lub
- ξ_5 i ξ_6 z tablicy A.11 dla n nośności granicznych R_c wyznaczonych na podstawie wyników badań dynamicznych.

Krok 3a. Wprowadzenie ewentualnej poprawki do wartości współczynników korelacyjnych ξ przyjętych w kroku 2 przez ich pomnożenie przez współczynnik $\frac{1}{1.1} = 0.91$, gdy zwięźczenie jest sztywne i zapewnia redystrybucję obciążeń z pali słabszych na mocniejsze

- wg p. 7.6.2.2 (9) [7] dla współczynników korelacyjnych ξ_1 i ξ_2 i wyników próbnych obciążeń statycznych (poprawkę należy przyjmować gdy $\xi_1 > 1.0$) lub
- wg p. 7.6.2.3 (7) [7] dla współczynników korelacyjnych ξ_3 i ξ_4 i wyników badań podłoża (poprawkę należy przyjmować gdy $\xi_3 > 1.0$).

Krok 3b. Ewentualne przemnożenie współczynników korelacyjnych ξ_5 i ξ_6 z tablicy A.11 załącznika normatywnego A do normy [7] przez współczynniki modelu γ_M uwzględniający rodzaj wykorzystanej metody badań: $\gamma_M = 0.85$ dla próbnych obciążeń dynamicznych przy dużych odkształceniach z dopasowaniem sygnału (np. CAPWAP), $\gamma_M = 1.0$ dla próbnych obciążeń dynamicznych jw. bez dopasowania sygnału (np. CASE), $\gamma_M = 1.1$ przy wykorzystaniu wzorów dynamicznych uwzględniających quasi-sprężyste odkształcenie trzonu pala lub $\gamma_M = 1.2$ przy wykorzystaniu wzorów dynamicznych bez uwzględnienia quasi-sprężystego odkształcenie trzonu pala.

Krok 4. Wyznaczenie wartości charakterystycznej nośności pala na wciskanie $R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_c)_{mean}}{\xi_{mean}}; \frac{(R_c)_{min}}{\xi_{min}} \right\}$

Krok 5. Odczytanie wartości $\gamma_t = 1.1$ współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A do normy [7].

Krok 6. Wyznaczenie wartości obliczeniowej nośności $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$

4. Projektowanie na podstawie wyników próbnych obciążeń pali i badań podłoża

4.1. Projektowanie na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych

Spośród różnego rodzaju badań pali pozwalających na bezpośrednie określenie nośności granicznej za najbardziej wiarygodne uznano w [7] próbne obciążenia statyczne. Ich wyniki stanowią zwykle podstawę opracowania i weryfikacji metod empirycznych i analitycznych projektowania pali, a dla innych metod badania nośności (np. metody dynamicznej) stanowią badania referencyjne. Generalnie rozróżnia się próbne obciążenia statyczne pali realizowane siłą zwiększaną

stopniami i utrzymywaną przez określony czas lub do zaniku przemieszczeń głowicy pala ML (Maintained Load) oraz realizowane ze stałą prędkością wciskania i pomiarem siły wymuszającej przemieszczenie CRP (Constant Rate of Penetration). Próbne obciążenie statyczne można zrealizować w jednym, dwu lub w wielu cyklach. W trakcie typowego próbnego obciążenia statycznego obciążenie jest przykładane do głowicy pala i tam odczytywane są jego przemieszczenia. W Polsce badania statyczne nośności pali realizowane są praktycznie wyłącznie wg procedury ML. Celem badania statycznego, którego wyniki mają być wykorzystane wprost do określenia nośności pala, jest bezpośrednie wyznaczenie nośności granicznej $R_{c,m}$ lub zgromadzenie danych umożliwiających ekstrapolację tej wartości jedną z wielu dostępnych metod. Wnioskowanie na temat nośności pali wg zasad [7] można przeprowadzić na podstawie minimum jednego próbnego obciążenia statycznego.

Projektowanie pali oparte na wynikach próbnych obciążeń statycznych wymaga weryfikacji. Weryfikację przeprowadza się zwykle **obliczeniami**, których wynik powinien być zbliżony do wyniku uzyskanego z badań. Ponadto obliczenia, bazujące nawet na bardzo ogólnym rozpoznaniu podłoża, umożliwiają m.in. **wstępny dobór optymalnego przekroju i długości pali do badań statycznych, oszacowanie spodziewanej wartości nośności granicznej**, a tym samym siły próbnego obciążenia, **kontrolę niekorzystnych lub przypadkowych wpływów mogących zniekształcić wynik jednostkowego próbnego obciążenia statycznego** oraz **uwzględnienie w projektowaniu czynników, których nie uwzględnia wynik badania** (np. pracę pala w grupie).

Tablica 1. Dane do przykładów obliczeniowych 1÷3 – nośności graniczne pali z badań statycznych i dynamicznych.

Lp.	Badania dynamiczne						Badanie SLT	
	Wpędy			Badanie DLT				
	Formuła duńska BOR			CASE	CAPWAP		ΔT	$R_{c,m}$
	ΔT	h [m]	s_{BOR}	$R_{c,m}$	$R_{c,m}$			
[-]	[dni]	[-]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[dni]	[-]
1	7	1.0	3.0	5136	4898	4643	-	-
2	7	0.8	2.0	4803	3913	3745	-	-
3	6	0.8	3.0	4503	3732	3445	-	-
4	6	1.0	2.0	5447	5309	5251	-	-
5	6	1.0	5.0	4610	3661	3346	-	-
6	6	0.8	2.0	4803	4781	4354	-	-
7	12	0.8	3.0	4503	4812	-	-	-
8	12	0.8	3.0	4503	4503	-	-	-
9	12	0.8	3.0	4503	3875	3774	-	-
10	11	0.8	3.0	4503	4807	-	-	-
11	11	0.8	3.0	4503	4756	-	-	-
12	11	0.8	5.0	4002	3793	3725	-	-
13	11	0.8	4.0	4238	4612	-	-	-
14	97	1.0	6.0	4385	4006	3754	-	-
15	97	1.0	6.0	4385	3682	3483	-	-
16	78	0.8	3.0	4503	3347	3233	174	3850
17	78	1.0	7.0	4181	3369	3309	-	-
18	78	1.0	4.0	4859	3479	3225	-	-
19	78	1.0	5.0	4610	3919	3801	-	-
20	47	1.0	7.0	4181	3924	3840	-	-
21	-	-	-	-	-	-	110	3100

Pale żelbetowe prefabrykowane wbijane – beton C40/50, przekrój poprzeczny 400x400 mm, długość całkowita/długość czynna – 15.0/14.2m

Omawiany sposób projektowania jest generalnie drogi i efektywny ekonomicznie wyłącznie w przypadku dużych fundamentów palowych w których optymalizacja przynosi wymierne oszczędności, a koszty i czas przeprowadzenia badań nie wpływają zasadniczo na całkowity koszt i termin realizacji robót palowych. Ze względu na uwarunkowania formalne i praktykę realizacji procesu budowlanego w Polsce projektowanie na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych jest stosunkowo rzadko wykorzystywane w praktyce. Częściej ma to miejsce w prywatnym budownictwie kubaturowym niż kontraktach publicznych. Jednym z najbardziej spektakularnych przykładów zastosowania tej metody projektowaniu pali w Polsce są jednak fundamenty obiektu budowanego ze środków publicznych - Stadionu Narodowego w Warszawie. W przypadku tej inwestycji w trakcie projektowania przeprowadzono palowanie próbne, którego wyniki zostały szeroko wykorzystane przy wyborze technologii posadowienia i w projektowaniu pali roboczych.

Tablica 2. Normowa analiza wyników badań nośności pali.

Krok wg procedury	Przykład	1	2		3	4
	Rodzaj badań	SLT	CASE	CAPWAP	WPĘDY	CPT
	Parametr/Liczba badań	2	20	15	20	1
1	$R_{c,m_{mean}}$ w kN	3475	4159	3795	4558	2258
	$R_{c,m_{min}}$ w kN	3100	3347	3225	4002	2258
2	ξ_1 tub 5	1.30	1.40	1.21	1.54	1.40
	ξ_2 tub 6	1.20	1.25	1.06	1.38	1.40
4	$R_{c,k}$ w kN	2583	2678	3035	2911	1613
5	$\gamma_t = \gamma_R$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
6	$R_{c,d}$ w kN	2348	2344	2759	2646	1466
3'	Uwzględnienie sztywności zwieńczenia γ_M	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1
6'	$R_{c,d}$ w kN	2582	2344	2759	2646	1613

Przykład 1. W fundamencie jednego z obiektów LNG posadowionego na warstwach piasków drobnych, pylastych oraz piasków średnich zmieszanych ze żwirem w stanie od średnio zagęszczonego do zagęszczonego przewidziano wbicie 90 pali obciążonych siłą wciskającą $F_{c,d} = 2450 \text{ kN}$. Na podstawie obliczeń wstępnych przyjęto, że właściwym rozwiązaniem spełniającym powyższe wymagania będzie wykorzystanie żelbetowych pali prefabrykowanych o przekroju 400x400mm o długości całkowitej prefabrykatu $L_c = 15,0 \text{ m}$. Zakres oszacowanych (obliczonych) nośności obliczeniowych wynosił od 2250kN do 2550kN. Przyjęto, że ostateczne określenie nośności obliczeniowych i dobór liczby pali zostanie dokonany w oparciu o wyniki próbnych obciążeń statycznych. Wyznaczono dwie strefy: pierwszą o niekorzystnych warunkach gruntowych (w której uzyskano najniższe wartości obliczonych nośności) oraz drugą reprezentatywną dla większości obszaru fundamentu. W tych miejscach pograżono pale testowe i kotwiące, a następnie przeprowadzono próbne obciążenia statyczne typu ML. Przyjęto maksymalną siłę próbnego obciążenia $Q_{max} > 1.5R_d \cong 4000 \text{ kN}$. W wyniku przeprowadzonych próbnych obciążeń statycznych wyznaczono nośności graniczne metodą Mazurkiewicza wg [5] i obliczeniowe wg [7] podane w tablicy 2 w kolumnie SLT (przykład 1).

Określona w tablicy 2 nośność wyznaczona została bez uwzględnienia wpływu sztywności zwieńczenia (krok 6 procedury) oraz z uwzględnieniem redystrybucji sił z pali słabszych na mocniejsze za pośrednictwem sztywnego zwieńczenia (krok 6' procedury). Ostatecznie przyjęto, że wyznaczona nośność mieści się w zakresie zweryfikowanym obliczeniami. Warunek stanu granicznego nośności dla przyjętych pali jest spełniony $R_{c,d} = 2582 \text{ kN} \geq F_{c,d} = 2450 \text{ kN}$. W przypadku analizy opartej na pojedynczych próbnych obciążeniach statycznych otrzymane nośności wynosiłyby $R_{c,d} = 2214 \text{ kN}$ lub $R_{c,d} = 2750 \text{ kN}$ w zależności od miejsca przeprowadzenia próbnego obciążenia. Zatem nie bez znaczenia dla prawidłowego wnioskowania o nośności pali pozostaje dobór liczby i lokalizacji próbnych obciążeń.

Prezentowany przykład oparty jest na rzeczywistych wynikach próbnych obciążeń statycznych, jednak przedstawiona procedura została wykorzystana nie do projektowania, lecz do kontroli wyników wcześniej wykonanych badań pali metodą dynamiczną przy dużych odkształceniach (porównaj przykłady 2 i 3).

4.2. Projektowanie pali na podstawie wyników próbnych obciążeń dynamicznych

Jedną z powszechnie wykorzystywanych współcześnie metod badań nośności osiowej pali są **próbne obciążenia dynamiczne przy dużych odkształceniach**. Badanie polega na kilkukrotnym uderzeniu odpowiednio dobranym młotem z założoną energią w głowicę oprzyrządowanego pala. Pal wyposażony w czujniki pomiaru odkształceń (tensometry) oraz przyspieszeń pod wpływem uderzenia przemieszcza się w gruncie i odkształca, a wzbudzona w nim fala odkształceń wędruje wzdłuż trzonu, odbija się od stopy i wraca do głowicy, po drodze podlegając tłumieniu, które zależy od materiału trzonu pala, rodzaju i stanu gruntu otaczającego pal. Mierzone w czasie badania odkształcenia betonu głowicy pala oraz jej przyspieszenia poddaje się analizie numerycznej. W zależności od wykorzystanej metody analizy zarejestrowanego sygnału wyniki pozwalają na określenie nośności granicznej i przemieszczeń pala towarzyszących jej osiągnięciu (metody bez dopasowania sygnału, np. CASE) lub/i na rozdzielenie oporów pomiędzy stopę i pobocznice, określenie rozkładu oporów na pobocznicy, a także określenie przybliżonej zależności obciążenie/przemieszczenie głowicy pala, analogicznej do tej uzyskiwanej w próbnych obciążeniach statycznych (metody z dopasowaniem sygnału, np. CAPWAP). Wyniki próbnych obciążeń dynamicznych pali przy dużych odkształceniach były wielokrotnie i z sukcesem korelowane z wynikami próbnych obciążeń statycznych, a zaobserwowane rozbieżności (niedokładność metody) zostały ujęte w Eurokodzie 7 w postaci zwiększonych wartości współczynników korelacyjnych metody ξ_5 i ξ_6 w stosunku do ξ_1 i ξ_2 .

Omawiane próbne obciążenia dynamiczne realizowane są zgodnie z [1]. Norma ta została przywołana w [7] jako właściwy dokument odniesienia dla tego typu badań.

Eurokod 7 wymaga, aby wyniki próbnych obciążeń dynamicznych przy dużych odkształceniach były kalibrowane wynikami próbnych obciążeń statycznych wykonanych na tego typu palach w **podobnych warunkach gruntowych**. W typowym przypadku sprowadza się to do wykonania, co najmniej jednego badania statycznego jako badania kalibrującego i badań dynamicznych jako podstawowych badań nośności pali. W przypadku dysponowania szeroką bazą wyników badań statycznych przeprowadzonych na palach tego samego rodzaju, o zbliżonych wymiarach i w podobnych warunkach gruntowych nie ma konieczności wykonywania badań kalibrujących w przypadku każdego fundamentu.

Podstawowym wynikiem próbnego obciążenia dynamicznego przy dużych odkształceniach jest nośność graniczna badanego pala $R_{c,m}$. Wnioskowanie na temat nośności pali zgodnie z zasadami [7] można przeprowadzić w oparciu o wyniki minimum dwóch próbnych dynamicznych, które przeprowadzono w obszarze o podobnych warunkach gruntowych.

Przykład 2. Opis fundamentu jak w przykładzie 1. Tym razem do oszacowania nośności pala wykorzystano wyniki badań dynamicznych nośności pali przy dużych odkształceniach. W przypadku pali prefabrykowanych wykorzystanie tej metody badań jest najszersze i najbardziej naturalne ze względu na dysponowanie na placu budowy wszystkimi niezbędnymi warunkami do ich przeprowadzenia, tj. palem zdolnym natychmiast po pogrążeniu do przenoszenia obciążeń oraz kafarem z młotem zdolnym wywołać w palu odpowiednie przemieszczenie umożliwiające interpretację pomierzonych sygnałów. W ramach zaplanowanych badań na 20 wbitych palach o jednakowej długości czynnej wykonano w obszarze fundamentu kolejno badania dynamiczne przy dużych odkształceniach. Wyniki wszystkich badań przeanalizowano metodą CASE, a 15 z nich przeanalizowano dodatkowo metodą CAPWAP. Przykład wyznaczenia nośności obliczeniowej na podstawie wyników próbnych obciążeń dynamicznych przy dużych odkształceniach bez dopasowania (CASE) i z dopasowaniem sygnału (CAPWAP) przedstawiono w tablicy 2, kolumna CASE i CAPWAP (przykład 2). Ponadto na wykresie (Rysunek 4) zestawiono zbiorcze wyniki wyznaczenia nośności obliczeniowej pali przy zwiększanej stopniowo liczbie zbadanych, uszeregowanych rosnąco i uwzględnionych w analizie nośności granicznych $R_{c,m}$. Dane do przykładów obliczeniowych zestawiono w tablicy 1.

Nośność pali określona na podstawie próbnych obciążeń dynamicznych bez dopasowania sygnału (CASE) formalnie nie spełnia warunku stanu granicznego nośności $F_{c,d} = 2450kN \geq R_{c,d} = 2434kN$. Niedobór nośności wynosi ok. 1%. Jest to różnica mała i w praktyce zaniedbywalna.

Nośność pali wyznaczona w oparciu o analizę CAPWAP spełnia warunek stanu granicznego nośności $F_{c,d} = 2450kN \leq R_{c,d} = 2759kN$.

W celu weryfikacji przyjętej procedury projektowania pali na podstawie wyników badań dynamicznych, po zakończeniu robót palowych, wytypowano na podstawie metryk 2 pale: najszabszy (o największych wstępach w trakcie wbijania) i reprezentatywny dla obszaru fundamentu i przeprowadzono na nich kontrolne próbne obciążenia statyczne. W wyniku przeprowadzonych badań statycznych otrzymano nośności graniczne podane w przykładzie 1. Uznano, że przeprowadzona weryfikacja dała wynik pozytywny, a pale zaprojektowane w oparciu o wyniki badań dynamicznych spełniają wymagania stanu granicznego nośności.

4.3. Projektowanie pali z wykorzystaniem wzorów dynamicznych

Wykorzystanie wzorów dynamicznych ma bardzo długą historię, ale ograniczone jest w praktyce do wyznaczania nośności pali przemieszczeniowych wbijanych (prefabrykowanych lub formowanych w gruncie). Znanych jest wiele wzorów dynamicznych pozwalających na oszacowanie nośności granicznej $R_{c,m}$, których wykorzystanie powinno zostać poprzedzone analizą stosowności wybranego wzoru w danych warunkach gruntowych dla określonego rodzaju pali. Zwykle o przydatności wzorów dynamicznych decydują pozytywne lokalne doświadczenia związane z jego wykorzystaniem w przeszłości. W normie [7] rozróżniono pod względem bezpieczeństwa wzory dynamiczne uwzględniające i nie uwzględniające quasi-sprężyste skrócenie pala w trakcie uderzenia. Wykorzystanie wzorów dynamicznych wymaga **znajomości układu warstw podłoża gruntowego, pozytywnych i udokumentowanych doświadczeń z próbnych obciążeń statycznych pali tego samego rodzaju, o podobnej długości i przekroju poprzecznym w podobnych warunkach gruntowych oraz prowadzenia zapisów wstępów podczas ostatnich serii uderzeń**.

Wnioskowanie na temat nośności pali na podstawie wstępów można przeprowadzić na podstawie wyników wbijania minimum 5 pali rozmieszczonych w obszarze palowania dla których ustalono wymaganą liczbę uderzeń na końcowym odcinku pogrążania. Zaleca się, aby tego typu analizy prowadzić w oparciu o wyniki dobijania pala BOR (Beginning Of Redriving) wykonanego po ok. 12 godzinach od wbicia pala w grunty sypkie lub po 48 godzinach w gruntach spoiowych w celu umożliwienia oszacowania ewentualnego przyrostu nośności pali w czasie, np. wg [8].

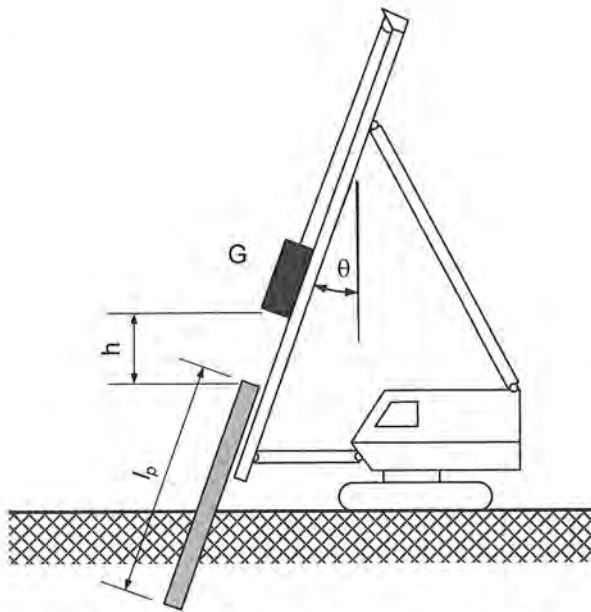
Przykład 3. W projekcie opisanym w przykładzie 1 przyjęto odmienną strategię projektowania. Zdecydowano do projektowania wykorzystać wzory dynamiczne uwzględniające quasi-sprężyste odkształcenie pała pod uderzeniem. Za najbardziej wiarygodne dla pali prefabrykowanych wbijanych w grunty sypkie uznawane są wzory dynamiczne Hilleya, Janbu i Sorensena-Hansena (tzw. formuła duńska). W projektowaniu użyta została formuła duńska, która jest stosunkowo często wykorzystywana do zgrubnej, roboczej kontroli nośności żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych w grunty sykie. Ponadto jest to formuła zalecana w normie [5]. Formuła ta może być z powodzeniem wykorzystywana do projektowania w przypadku mało odpowiedzialnych fundamentów.

Nośność graniczna pała wyznaczona wg formuły duńskiej z parametrami jak dla młotów wolnospadowych jest równa:

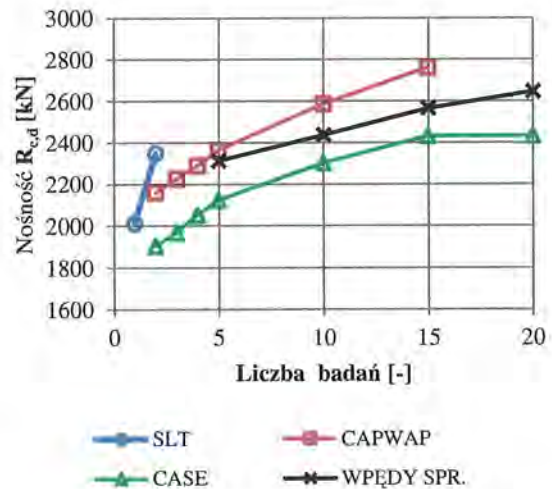
$$R_{c,m_i} = \frac{\eta \cdot h \cdot G}{s + 0.5 \cdot s_0}$$

gdzie $s_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot h \cdot G \cdot l_p}{A \cdot E}}$ jest oszacowaniem quasi-sprężystego skrócenia pała pod uderzeniem.

We wzorze należy wykorzystywać moduł sprężystości trzonu pała $E = 20 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ dla pali żelbetowych, $E = 10 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ dla pali drewnianych oraz $E = 210 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ dla pali stalowych, G jest ciężarem młota, h wysokością spadu młota mierzoną w pionie, $\eta = \eta_0 \cdot (1 - \mu \cdot \tan\theta)$ jest efektywnością młota ($\eta_0 = 0,7 \div 0,95$ oraz $\mu \cong 0,1 \div 0,4$ przyjmowane w zależności od wykorzystywanego kafara), l_p jest długością wbijanego pała, A jest powierzchnią przekroju poprzecznego pała, a s wielkością wępu na ostatnim odcinku pogrążania pała (najczęściej średnia na ostatnim odcinku 0,2m) (rys. 2).



Rysunek 2. Parametry procesu wbijania wykorzystywane w do szacowania nośności pali przy użyciu wzoru dynamicznego – formuły duńskiej.



Rysunek 3. Wyniki określania nośności pali na podstawie różnego rodzaju i liczby przeprowadzonych badań – przykłady 1÷3.

Ogólny procedura postępowania umożliwiająca określanie nośności na podstawie wzorów dynamicznych polega na:

- doborze odpowiedniej długości i przekroju pała na podstawie informacji o układzie warstw podłoża w lokalizacji fundamentu palowego i parametrów kafara;
- wstępnym ustaleniu kryterium osiągnięcia nośności (kryterium wępu) dla przyjętego pała i młota;
- wbiciu kolejnych (co najmniej) 5 pali i analizie ich nośności przy użyciu wzoru dynamicznego oraz procedury określania nośności obliczeniowej wg [7];
- dokonaniu korekty wymaganej liczby pali w fundamencie;
- ewentualnym włączeniu do analizy kolejnych wbitych pali (maks. 20) - wraz ze wzrostem ich liczby modyfikacji podlega wynik analizy nośności;
- wprowadzeniu ewentualnej korekty uwzględniającej wpływ czasu na nośność pali.

W tablicach zestawiono dane (tab. 1) i wyniki (tab. 2) analizy nośności przeprowadzonej przy użyciu formuły duńskiej dla pali w fundamencie obiektu opisanego w przykładzie 1. Analiza została przeprowadzona na podstawie wędów uzyskanych z dobijania pała w trakcie realizacji próbných obciążeń dynamicznych opisanych w przykładzie 2.

Dobijanie realizowane było po wielu dniach od wbicia pali i dlatego w wynikach analizy uwzględniony został już ewentualny przyrost nośności pali w czasie.

Zestawione w tabelicy 2 wyniki analizy pozwalają stwierdzić, że oszacowana nośność pali spełnia wymagania projektu $R_{c,d} = 2646kN \geq F_{c,d} = 2450kN$. Wynik przeprowadzonej analizy potwierdzono w przykładach 1 i 2 wynikami próbnych obciążeń statycznych i dynamicznych przy dużych odkształceniach.

Podobnie jak dla wyników innych badań na rys. 3 przedstawiono zbiorcze zestawienie wyników analizy prowadzącej do wyznaczenia nośności obliczeniowej dla zwiększanej stopniowo liczby zbadanych, uszeregowanych rosnąco i uwzględnionych w analizie nośności granicznych $R_{c,m}$.

4.4. Projektowanie na podstawie obliczeń opartych na wynikach badań podłoża

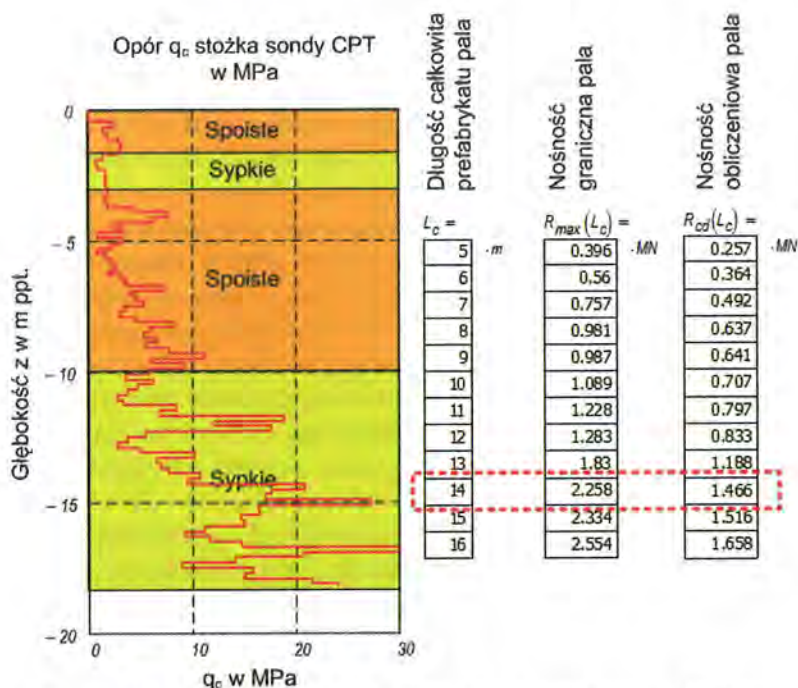
Projektowanie oparte na wynikach badań gruntu umożliwia wykorzystanie wszelkich wiarygodnych metod analitycznego lub empirycznego określania nośności granicznej pali, np. α , β , francuskiej [2], Niemieckiego Towarzystwa Geotechnicznego, a także szeroko dotychczas wykorzystywanej w Polsce metody opisanej w [5]. Propozycję tymczasowej adaptacji metody wg [5] do procedur określania nośności pali wg [7], pozwalającą na efektywne wykorzystanie zwiększonej liczby badań podłoża w projektowaniu pali przedstawiono w p. 5.

Praktyczne wykorzystanie konkretnej metody obliczeniowej wyznaczania nośności granicznej pala $R_{c,cal}$ limitowane jest dostępem do niezbędnych parametrów geotechnicznymi podłoża. Ponadto wykorzystanie każdej metody powinno być poprzedzone dokładnym określeniem zakresu jej stosowności. Niektóre metody mają ten zakres mocno ograniczony, np. do określonych rodzajów gruntów lub/i pali. Wynika to najczęściej ze sposobu i zakresu kalibracji metody, który z natury rzeczy nie może obejmować wszystkich rodzajów gruntu i technologii wykonania pali.

Oczekiwanym wynikiem wykorzystania wybranej metody obliczeniowej są wyznaczone na podstawie dostępnych profili gruntowych nośności graniczne pali $R_{c,cal}$. **Należy pamiętać, że w przypadku tej metody obliczone nośności pali są co najwyżej tak dokładne, jak parametry gruntów wykorzystane do ich wyznaczenia.**

Przykład 4. W fundamencie przyczółka nr 1 (strona lewa) wiaduktu autostradowego WA-44 (Autostrada A-4, odcinek Radymno-Korczowa) przewidziano wbicie 42 żelbetowych pali prefabrykowanych o przekroju 400x400mm. Przewidywane maksymalne obciążenie pala wynosiło $F_{c,d} = 1350kN$. W obrębie podpory wykonano sondowanie CPT 1/44 oraz otwory badawcze 1/44, 2/WD44 oraz 1/WA44. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że warunki gruntowe na obszarze podpory nie ulegają zasadniczym zmianom. W podłożu zalegają od góry: piaski pylaste ($I_D=0,32$)/pyły piaszczyste ($I_L=0,35$) 0÷3m, piaski pylaste ($I_L=0,15\div0,35$) 3÷10m oraz piaski drobne/średnie/grube ($I_D=0,45\div0,60$) 10÷18m przyjęte jako zasadnicza warstwa nośna dla pali. Obliczenia nośności pali przeprowadzono metodą opisaną w pracy [2] w wersji z francuskich wytycznych [3] na podstawie wyników sondowania CPT 1/44. Metoda ta została opisana również przez Gwizdałę [4]. Sondowanie wykonano z poziomu 187,70 m n.p.m. Spód sztywnego zwieńczenia przyjęto na poziomie 1,28m pod poziomem terenu. Wybrana metoda empiryczna została skalibrowana dla wielu rodzajów pali (w tym żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych) w gruntach spoistych (gliny i pyły) i sypkich (pisaki i żwiry).

Obliczone wartości nośności granicznej $R_{c,cal}$ i obliczeniowej $R_{c,d}$ dla pełnego profilu gruntowego przedstawiono na rysunku poniżej (Rysunek 4).



Rysunek 4. Wyniki sondowania i obliczeń nośności pali na podstawie sondowania CPT bez uwzględniania wpływu sztywności zwieńczenia

Wykorzystując jedno sondowanie CPT oraz wybraną metodę empiryczną oszacowano nośności graniczną pala o długości $L_c = 14,0m$ na poziomie $R_{c,cal_1} = 2258kN$. Wyniki analizy normowej zestawiono w tabelicy (tablica 2, kolumna CPT) bez uwzględniania sztywności zwieńczenia (krok 6 procedury) oraz z uwzględnieniem sztywnego zwieńczenia (krok 6' procedury). Wyznaczona nośność obliczeniowa nie wymaga redukcji ze względu na pracę pali w grupie. Nośność fundamentu palowego w piaskach jest nie mniejsza niż suma nośności pojedynczych pali. Warunek stanu granicznego nośności dla pala o długości $L_c = 14,0m$ jest spełniony $R_{c,d} = 1466kN \geq F_{c,d} = 1350kN$, a po uwzględnieniu dużej sztywności zwieńczenia $R_{c,d} = 1466 \cdot 1.1 = 1613kN \geq F_{c,d} = 1350kN$. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla pala o $L_c = 13,0m$. Warunek stanu granicznego nie został jednak spełniony $R_{c,d} = 1307kN \leq F_{c,d} = 1350kN$. Ostatecznie przyjęto pale o $L_c = 14,0m$. Wynik obliczeń nie wymaga dodatkowej weryfikacji, ponieważ sama metoda została szeroko zweryfikowana wynikami próbnych obciążeń statycznych wykonanych m.in. na palach prefabrykowanych wbijanych. Jednak w przypadku omawianego projektu w ramach badań odbiorczych zrealizowano próbne obciążenie dynamiczne oraz próbne obciążenie statyczne pala do nośności obliczeniowej. Wynik próbnego obciążenia dynamicznego przy dużych odkształceniach pozwolił na oszacowanie nośności granicznej pala na poziomie $R_{c,m} = 2135kN$. Pomierzona nośność graniczna różni się nieznacznie od obliczonej metodą empiryczną (ok. 6%).

Ostatecznie przyjęto, że określona przy użyciu metody empirycznej i zasad zawartych w Eurokodzie 7 [7] nośność obliczeniowa pala została pozytywnie zweryfikowana wynikami próbnego obciążenia dynamicznego przy dużych odkształceniach.

5. Propozycja tymczasowej adaptacji polskiej metody określania nośności pali wciskanych do wymagań Eurokodu 7

Projektowanie oparte na wynikach badań gruntu wg Eurokodu 7 umożliwia wykorzystanie wszelkich wiarygodnych metod analitycznego lub empirycznego określania nośności granicznej pali, m.in. szeroko dotychczas wykorzystywanej w Polsce metody empirycznej opisaną w [5]. Metoda ta, dla pełnej zgodności z zasadami i regułami Eurokodu 7, wymaga aktualizacji opisu i oznaczeń oraz uzgodnienia poziomu niezawodności, tj. zastosowania odpowiednich współczynników bezpieczeństwa lub modelu. W okresie przejściowym możliwe jest jednak, przy pewnych założeniach, wykorzystanie tej metody w obecnej formie opisaną w [5] zgodnie z wymaganiami z Eurokodu 7.

W systemie Eurokodów do decyzji krajowych komitetów normalizacyjnych pozostawiono ustalenie wartości współczynników bezpieczeństwa, co umożliwia takie ich skalibrowanie, aby zachować dotychczasowy, akceptowany w danym kraju, poziom niezawodności. **W odniesieniu do nośności geotechnicznej pali sprowadza się to do przyjęcia założenia, że obciążenia $F_{c,d}$ i nośności pali wyznaczone zgodnie z Eurokodem 7 i normą [5] powinny być jednakowe lub bardzo zbliżone.** Wartość współczynników bezpieczeństwa dla obciążeń $F_{c,d}$ określana jest w załączniku krajowym do normy [9], natomiast współczynniki bezpieczeństwa dla nośności geotechnicznej $R_{c,d}$ zostały ustalone w załączniku krajowym do [7] przez przyjęcie drugiego podejścia obliczeniowego. W załączniku krajowym do Eurokodu 7 [7] podano

bez uzasadnienia formalnego i merytorycznego wartości współczynników obciążeń, które mogą być określone wyłącznie w załączniku krajowym do normy [9]. Nie jest przedmiotem tego referatu weryfikacja, czy odpowiednie Komitety Techniczne PKN zajmujące się obciążeniami ustaliły wartości współczynników zapewniające utrzymanie w projektowaniu w kraju dotychczasowych poziomów bezpieczeństwa. W referacie skupiono się na kalibracji metody wyznaczania nośności geotechnicznej przedstawionej w [5] do wymagań Eurokodu 7 z zachowaniem dotychczasowego poziomu bezpieczeństwa po stronie nośności, co aktualnie może odbywać się praktycznie wyłącznie przez wykorzystanie współczynników modelu.

Praktyczne wykorzystanie konkretnej metody obliczeniowego wyznaczania nośności granicznej pała $R_{c,cal}$ limitowane jest dostępem do niezbędnych parametrów geotechnicznych podłoża. Metoda wg [5] umożliwia projektowanie pali w oparciu o dane zawarte w większości typowych dokumentacji geotechnicznych opracowywanych w Polsce. Umożliwia ona również wyznaczenie nośności dla wielu różnych rodzajów pali, a uzupełnienie jej o pojawiające się nowe technologie nie powinno stanowić problemu. Jest to również metoda otwarta na uaktualnienia, co niestety nie było i nadal nie jest wykorzystywane. **Należy pamiętać, że obliczone nośności pali każdą tego typu metodą są co najwyżej tak dokładne, jak parametry gruntów wykorzystane do ich wyznaczenia**, a te pozostawiają zwykle wiele do życzenia.

W celu dostosowania metody obliczeniowego wyznaczania nośności pali wg [5] do zasad i reguł Eurokodu 7 należy przede wszystkim uaktualnić stosowany dotychczas opis metody, który w obecnym stanie nie pozwala na jednoznaczne określenie nośności charakterystycznej oraz granicznej pali i umożliwia w praktyce określenie jedynie nośności obliczeniowej. Jednym z celów wprowadzenia Eurokodu 7 jest ujednoczenie i sformalizowanie stosowanego opisu w skali europejskiej. Tak więc wykorzystanie dowolnej metody szczegółowej obliczania nośności powinno polegać na wyznaczeniu na podstawie dostępnych profili gruntowych zbioru nośności granicznych pali $R_{c,cal}$, a następnie wykorzystaniu przedstawionej wyżej procedury określenia nośności charakterystycznej i obliczeniowej wg [7]. Wykorzystanie tej procedury ma ważną zaletę: premiuje szersze, sensowne wykorzystanie badań gruntu lub/i nośności pali w projektowaniu poprzez możliwość redukcji wymaganych zapasów bezpieczeństwa. Możliwe jest to poprzez dobór odpowiedniej do zrelizowanego zakresu badań podłoża/pali wartości współczynników korelacyjnych ξ , która zmniejsza się wraz ze wzrostem ich liczby.

Zgodnie z dotychczas stosowanym opisem w [5] warunek stanu granicznej nośności pali wciskanych zapisany był w następujący sposób:

$$Q_r \leq m \cdot N_t \quad (1)$$

gdzie m jest współczynnikiem niepewności modelu uwzględniającym liczbę pali w fundamencie (0.9 dla fundamntu opartego na min. trzech, 0.8 na dwóch i 0.7 na jednym pału), a N_t jest nośnością obliczeniową pała wciskanego. Rozwijając zapis (1) otrzymujemy:

$$N_t = N_p + N_s = q^{(r)} A_p S_p + \sum_i t_i^{(r)} A_{si} S_{si} = \gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \quad (2)$$

gdzie N_p jest nośnością podstawy pała, N_s jest nośnością pobocznic, γ_m jest współczynnikiem materiałowym dla gruntu przyjmowanym wg [10] zwykle o wartości 0.9, q jest stabilizowanym oporem granicznym pod podstawą pała zależnym od rodzaju i stanu gruntu, A_p powierzchnią podstawy pała, S_p jest stabelaryzowanym dla różnego rodzaju pali i gruntu współczynnikiem technologicznym modyfikującym podstawową wartość q , t jest stabelaryzowanym oporem granicznym na pobocznic pała zależnym od rodzaju i stanu gruntu, A_s jest powierzchnią pobocznic pała, a S_s jest stabelaryzowanym współczynnikiem technologicznym modyfikującym podstawową wartość t w zależności od rodzaju pała i gruntu.

W ramach wykorzystywanej metody należy ponadto uwzględnić redukcję wartości oporów pod podstawą pała i wzdłuż jego pobocznic w zależności od głębokości i średnicy pała, przyjmując prawidłowo poziom odniesienia prowadzonych obliczeń w postaci odpowiednio skorygowanego poziomu terenu.

Przyjmując zasadę równoważności zapasów bezpieczeństwa uzyskiwanych dla nośności wyznaczonej wg [5] i Eurokodu 7 możemy zapisać:

$$R_{c,d} = m \cdot N_t = m \cdot (\gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si}) \quad (3)$$

Z wcześniejszych rozważań wiemy, że

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{1}{\gamma_{Rd} \gamma_t} \cdot \min \left\{ \frac{(R_{c,calc})_{mean}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,calc})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad (4)$$

W przypadku metody opisanej w [5] za typową można uznać sytuację w której dla pojedynczego fundamentu obliczenia oparte są na jednym profilu gruntowym. Zatem $(R_{c,calc})_{mean} = (R_{c,calc})_{min}$, $\xi = \xi_3 = \xi_4 = 1.4$, a równanie (4) przyjmuje postać:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{R_{c,calc}}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t \cdot \xi} \quad (5)$$

Porównując odpowiednie strony równań (3) i (5) otrzymujemy:

$$\frac{R_{c,k}}{\gamma_t} = \frac{R_{c,calc}}{\gamma_{Rd} \gamma_t \xi} = m \cdot \left(\gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \right) \quad (6)$$

lub

$$R_{c,calc} = \gamma_t \cdot \gamma_{Rd} \cdot m \cdot \xi \cdot \left(\gamma_m q A_p S_p + \sum_i \gamma_{mi} t_i A_{si} S_{si} \right) \quad (7)$$

Współczynnik m zależny od liczby pali w fundamencie palowym jest klasycznym współczynnikiem modelu i powinien być uwzględniany na etapie określania nośności charakterystycznej. Podstawowa wartość tego współczynnika $m = 0.9$ dla fundamentów opartych na więcej niż dwóch palach ma swój odpowiednik w [7] w korekcie $\gamma_{Rd} = 0.909$ wartości współczynników korelacyjnych ξ , gdy występują warunki do redystrybucji obciążeń z pali słabszych na pale mocniejsze. Dlatego w dalszych rozważaniach te dwie wartości przyjęto jako bazowe, a zmianę wartości m uwzględniono przez wprowadzenie dodatkowego współczynnika modelu $\gamma_{Rd_3} = 1.0$ dla fundamentów na min. 3 palach, $\gamma_{Rd_2} = 1.125$ dla fundamentów na dwóch palach lub $\gamma_{Rd_1} = 1.286$ dla fundamentów na jednym pału do równania

$$R_{c,k} = \frac{R_{c,calc}}{\gamma_{Rd_{1,2 \text{ lub } 3}} \cdot \xi} \quad (8)$$

Przyjmując we wzorze (7) $\gamma_m = \gamma_{mi} = 0.9$ oraz $\gamma_{Rd} = 0.909$ otrzymujemy wartość $\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t \cdot \xi \cdot \gamma_m = 1.26$ lub $\gamma_{Rd} \cdot \gamma_t \cdot \xi = 1.4$.

Zatem ostatecznie nośność graniczna pala wciskanego wyznaczona metodą wg [5] jest równa:

$$R_{c,calc} = 1.26 \cdot \left(q A_p S_p + \sum_i t_i A_{si} S_{si} \right) = 1.4 \cdot N_t \quad (12)$$

Bardziej elegancko jest z pewnością uwzględnienie wartości współczynnika skalującego 1.26 w stabelaryzowanych wartościach q i t lub/i S_p i S_{si} , co czyni metodę bardziej jednoznaczną i czytelną. Jednak ze względów praktycznych na obecnym etapie wdrażania Eurokodu 7 w Polsce wygodniej posługiwać się wartością nośności N_t , którą można w łatwy sposób wyznaczyć przy użyciu dostępnego oprogramowania i stosowanych dotychczas arkuszy obliczeniowych.

Nie zmienia to faktu, że podane w [5] wartości oporów granicznych pala wzorcowego oraz współczynników technologicznych S_p i S_{si} należy koniecznie poddać przeglądowi, uaktualnieniu i uzupełnieniu o stosowane współcześnie rodzaje pali na bazie doświadczeń zdobytych w ciągu blisko 30 letniego okresu wykorzystania metody.

Ostatecznie proponowana procedura określania nośności obliczeniowej pali wciskanych $R_{c,calc}$ na podstawie wyników badań podłoża (obliczeń) metodą wg [5] z wykorzystaniem zasad i reguł Eurokodu 7 może być realizowana w kolejnych krokach:

Krok 1. Na podstawie n profili gruntowych wyznaczyć $i = 1..n$ nośności graniczne pala:

$$R_{c,calc_i} = 1.4 \cdot N_t \text{ przyjmując } N_t \text{ wg [5].}$$

Krok 2. Wyznaczyć wartości średnią $(R_{c,calc})_{mean}$ oraz minimalną $(R_{c,calc})_{min}$ ze zbioru obliczonych $R_{c,calc_i}$ nośności granicznych.

Krok 3. Odczytać współczynniki korelacyjne ξ_3 i ξ_4 z tablicy A.10 załącznika normatywnego A do normy [7] dla n nośności granicznych $R_{c,calc}$ obliczonych na podstawie analogicznej liczby badań podłoża.

Krok 4. Wprowadzić ewentualną poprawkę wg p. 7.6.2.3 (7) normy [7] do wartości współczynników korelacyjnych ξ_3 i ξ_4 przyjętych w kroku 3 przez podzielenie ich przez współczynnik $\gamma_{Rd} = 1.1$, gdy zwieńczenie jest sztywne i zapewnia redystrybucję obciążeń z pali słabszych na mocniejsze - poprawkę należy przyjmować gdy $\xi_3 > 1.0$.

Krok 5. Określić wartość współczynnika modelu w zależności od liczby pali w fundamencie $\gamma_{Rd3} = 1.0$ dla więcej niż 3 pali, $\gamma_{Rd2} = 1.125$ dla dwóch pali lub $\gamma_{Rd1} = 1.286$ dla jednego pala.

Krok 6. Wyznaczyć wartość nośności charakterystycznej pala na wciskanie

$$R_{c,k} = \frac{1}{\gamma_{Rd1,2 \text{ lub } 3}} \cdot \min \left\{ \frac{(R_{c,calc})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,calc})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Krok 7. Odczytać wartości $\gamma_t = 1.1$ współczynnika częściowego bezpieczeństwa zgodnie z zestawem R2 tablicy A.6 załącznika normatywnego A do normy [7].

Krok 8. Wyznaczyć nośność obliczeniową pali w fundamencie $R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$

Próbne obciążenia na palach próbnych dla wyznaczonych w ten sposób nośności granicznych pali należy projektować na maksymalne obciążenie odpowiadające $(1 \div 1.2)R_{c,calc}$. Pierwsze z próbnych obciążeń należy zlokalizować w miejscu odpowiadającym najniższej wyznaczonej nośności granicznej, a kolejne w obszarach uznanych za reprezentatywne dla całego fundamentu. Próbne obciążenia na palach roboczych należy prowadzić do wartości maksymalnej obciążenia równej $R_{c,d}$.

6. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule ogólna procedura projektowania geotechnicznego pali wciskanych prowadzi do określenia wartości nośności obliczeniowej $R_{c,d}$ na podstawie wyników badań nośności lub/i podłoża (obliczeń) zgodnie z zasadami i regułami podanymi w Eurokodzie 7. Przedstawione przykłady, pod adaptacji do warunków konkretnego projektu, mogą zostać wykorzystane w projektowaniu pali.

Wartość nośności obliczeniowej pala na wciskanie $R_{c,d}$ wg [7]:

- wyznaczana jest na podstawie wartości nośności granicznych zbadanych lub/i obliczonych, przy czym dobór właściwej metody wyznaczania nośności granicznej Eurokod 7 pozostawia się do decyzji projektanta;
- nie jest stała i zależy od liczby badań stanowiących podstawę jej wyznaczenia – Eurokod 7 premiuje dobre przygotowanie projektowe robót palowych poprzez obniżenie wymaganego zapasu wraz ze wzrostem liczby badań przeprowadzonych na etapie projektowania,;
- jest możliwa do wyznaczenia przy użyciu dotychczas stosowanej metody w [5] - przy ściśle określonych założeniach.

Eurokod 7, po skoordynowanym wdrożeniu całego systemu nowych norm europejskich, umożliwi projektowanie optymalnych ekonomicznie i technicznie fundamentów palowych. Brak koordynacji działań poszczególnych Komitetów Technicznych PKN może jednak skutkować niekontrolowanym i nieuzasadnionym wzrostem kosztów robót fundamentowych lub brakiem akceptacji środowiska inżynierów budowlanych nie pozwalającym na ich realne wdrożenie.

Literatura

- [1] ASTM Designation D 4945. (n.d.). Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
- [2] BUSTAMANTE, M., & GIANESELLI, L. (1982). Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer CPT. Proc. Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, (pp. 493–500). Amsterdam.
- [3] Fascicule No 62. (2004). Regles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de genie civil. Eyrolles.
- [4] GWIZDAŁA, K. (2010). Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [5] PN-83/B-02482. (1983). Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych. Warszawa: PKN.
- [6] PN-EN 1990. (2004). Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. Warszawa: PKN.
- [7] PN-EN 1997-1. (2008). Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne. Warszawa: PKN.
- [8] SKOV, R., & DENVER, H. (1988). Time-dependence of bearing capacity of piles. Proc. Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, 25-27 May (pp. 879-888). Vancouver: BiTech Publisher.
- [9] PN-EN 1990. (2004). Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji. Warszawa: PKN.
- [10] PN-81/B-03020. (1981). Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie. Warszawa: PKN