

AARSLEFF Sp. z o.o.

**PREFABRYKOWANE
ŻELBETOWE PAŁE
WBIJANE**

PROJEKTOWANIE, WYKONAWSTWO, NADZÓR

Dr inż. Dariusz Sobala
2010-09-15

Spis treści

1. Cel opracowania	3
2. Zakres opracowania	3
3. Zarys historii pali prefabrykowanych.....	3
4. Pojęcia podstawowe	7
4.1 Klasyfikacja pali	7
4.2 Słownik pojęć palowych.....	8
4.3 Zakres stosowania pali prefabrykowanych.....	11
5. Podstawowe zasady projektowania pali prefabrykowanych.....	15
5.1 Informacje ogólne	15
5.2 Wymagania w stosunku do prefabrykatów palowych.....	18
5.3 Materiały konstrukcyjne do produkcji prefabrykatów palowych.....	19
5.4 Typowe rozwiązania konstrukcyjne prefabrykatów palowych	20
5.4.1 Zasady ogólne	20
5.4.2 Pale prefabrykowane pojedyncze	21
5.4.3 Pale złożone.....	22
5.4.4 Złącza mechaniczne	23
5.4.5 Fundamenty palowe pod konstrukcje wsporcze	23
6. Produkcja prefabrykatów pali żelbetowych.....	24
7. Załadunek/rozładunek, transport i składowanie prefabrykatów pali żelbetowych	26
8. Wbijanie pali prefabrykowanych przy użyciu kafarów z młotami wolnospadowymi	28
8.1 Informacje ogólne	28
8.2 Sprzęt do wbijania pali.....	28
8.3 Prace przygotowawcze.....	29
8.4 Wbijanie pali	30
8.5 Roboty wykończeniowe i porządkowe.....	33
9. Badania.....	33
9.1 Informacje ogólne	33
9.2 Badania nośności pali prefabrykowanych	35
9.2.1 Statyczne badania nośności pali metodą belki odwróconej	36
9.2.2 Badania dynamiczne nośności pali przy wysokich naprężeniach	39
10. Dokumentacja powykonawcza	41
11. Nadzór	41
12. Trwałość pali prefabrykowanych.....	42
13. Podsumowanie	42
14. Dokumenty i publikacje związane.....	42
14.1 Publikacje	42
14.2 Akty prawne, normy i wytyczne	43

1. Cel opracowania

Celem opracowania jest przybliżenie czytelnikom współczesnej technologii prefabrykowanych żelbetowych pali wbijanych. Opracowanie przeznaczone jest dla studentów kierunku budownictwo, projektantów, wykonawców, inspektorów nadzoru oraz inwestorów.

2. Zakres opracowania

Zakres omawianych zagadnień obejmuje:

- słownik podstawowych pojęć związanych z technologią pali prefabrykowanych wbijanych zgodnych ze współczesnym systemem normalizacyjnym;
- krótką historię (kalendarium) pali prefabrykowanych;
- podstawowe zasady projektowania technologicznego, konstrukcyjnego i geotechnicznego pali i fundamentów palowych z wykorzystaniem prefabrykatów żelbetowych,
- materiały do produkcji żelbetowych prefabrykatów pali;
- typowe rozwiązania konstrukcyjne pali prefabrykowanych,
- opis procesu produkcji prefabrykatów,
- zasady transportu i składowania prefabrykatów pali żelbetowych,
- badania nośności pali prefabrykowanych (statyczne i dynamiczne przy wysokich naprężeniach),
- wbijanie pali prefabrykowanych żelbetowych przy użyciu kafarów z młotami hydraulicznymi,
- dokumentację powykonawczą dla fundamentu na palach prefabrykowanych wbijanych (w tym analizę dzienników wbijania pali),
- szczegółową specyfikację techniczną na roboty palowe z wykorzystaniem pali prefabrykowanych dostępną w serwisie projektowym - <http://www.aarsleff.com.pl/serwis.php> .

Opracowaniem objęto prefabrykaty palowe z płaską podstawą (bez ostrza) o przekroju kwadratowym i wymiarach przekroju poprzecznego od 0,2x0,2 do 0,4x0,4m ze skokiem wymiaru przekroju poprzecznego co 0,05m i skokiem długości prefabrykatu co 1,0m. W Polsce w największym zakresie wykorzystywane są obecnie prefabrykaty o wymiarach przekroju poprzecznego 0,25x0,25m, 0,30x0,30m i 0,40x0,40m. W praktyce europejskiej i światowej stosowane są także prefabrykaty o innych wymiarach i kształtach do których stosują się generalne zasady i procedury przedstawione poniżej.

3. Zarys historii pali prefabrykowanych

Człowiek zaczął wykorzystywać pale prefabrykowane wbijane (pale drewniane) około 6000 lat temu i stosuje je z powodzeniem do dnia dzisiejszego. Przez ponad 99% tego okresu była to jedyna technologia palowa. Można zaryzykować stwierdzenie, że pale prefabrykowane wbijane oprócz fundamentów konkretnych obiektów, stanowią w niemałej części również fundament ludzkiej cywilizacji.

Autorstwo koncepcji fundamentowania na palach drewnianych jest obecnie przypisywane ludziom z okresu Neolitu nazywanym "Swiss Lake Dwellers", którzy żyli na obszarze dzisiejszej Szwajcarii w okresie 4300÷500 r. p.n.e. Prawdopodobnie dla ochrony przed dzikimi zwierzętami budowali oni swoje domy na jeziorach w niewielkiej odległości od brzegu wykorzystując pale drewniane. Odtworzony współcześnie na podstawie podwodnych wykopalisk archeologicznych dom tego typu można obejrzeć w skansenie Laténium w Neuchatel w Szwajcarii lub na stronach internetowych poświęconych historii Szwajcarii:

- <http://history-switzerland.geschichte-schweiz.ch/prehistory-lake-dwellings.html>,
- http://www.swissinfo.ch/eng/Rediscovering_the_legend_of_the_lake_dwellers.html?cid=1288560.

Do około 1800 roku naszej ery prefabrykowane wbijane pale drewniane (ich długości, przekroje i ciężar oraz dostępne techniki wbijania) wyznaczały możliwości technologii palowania. Na początku XIX wieku zastosowano pierwsze pale żelazne, a następnie, wraz z rozwojem metalurgii, pale stalowe.

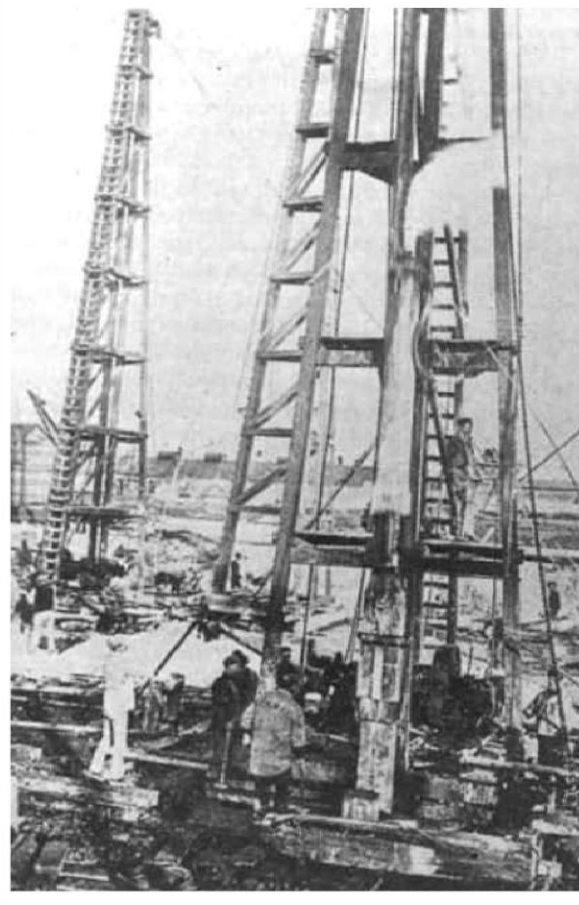
Jednak o rewolucyjnych zmianach w technologii pali prefabrykowanych wbijanych możemy mówić od czasu gdy na przełomie XIX i XX w. Francois Hennebique wykorzystał żelbet jako podstawowy materiał konstrukcyjny pala. W rzeczywistości Francois Hennebique, który opatentował pale prefabrykowane żelbetowe w 1896 r. we Francji, a rok później w Wielkiej Brytanii, nie był ani pierwszy, ani jedyny. Przed nim analogiczny patent zgłosił i uzyskał Philip Brannon już 1871 roku. Jego pomysł nie został jednak prawdopodobnie nigdy wykorzystany w praktyce. Równoległe z systemem Hennebique'a

stosowane były inne ówczesne systemy pali prefabrykowanych pełnych Coignet'a (patent francuski z 1894 r. oraz brytyjski z 1906 r.) i Considere'a (1902) oraz systemy pali z drążonymi trzonami, np. Mouchela (1907) [9]. Bardzo ciekawe wydaje się porównanie urządzeń stosowanych do wbijania pali przez Rzymian oraz na przełomie XIX i XX wieku, które pokazano na zdjęciach poniżej (Fot. 1 i 2). Pomimo upływu czasu istota procesu wbijania i podstawowe rozwiązania konstrukcyjne kafarów pozostały niezmiennie.

Aby przejść na trwałe do historii budownictwa oprócz genialnego pomysłu (Brannon) potrzebna jest skuteczność (Hennebique) udowodniona wieloma aplikacjami.



Fot. 1. Zrekonstruowany kafar z czasów rzymskich służący do wbijania pali drewnianych – muzeum w Koblenji, Niemcy



Fot. 2. Wbijanie żelbetowych pali 0,355 x 0,355 x 9,11m prefabrykowanych systemu Hennebique'a w porcie Plymouth w 1900 r.[9]

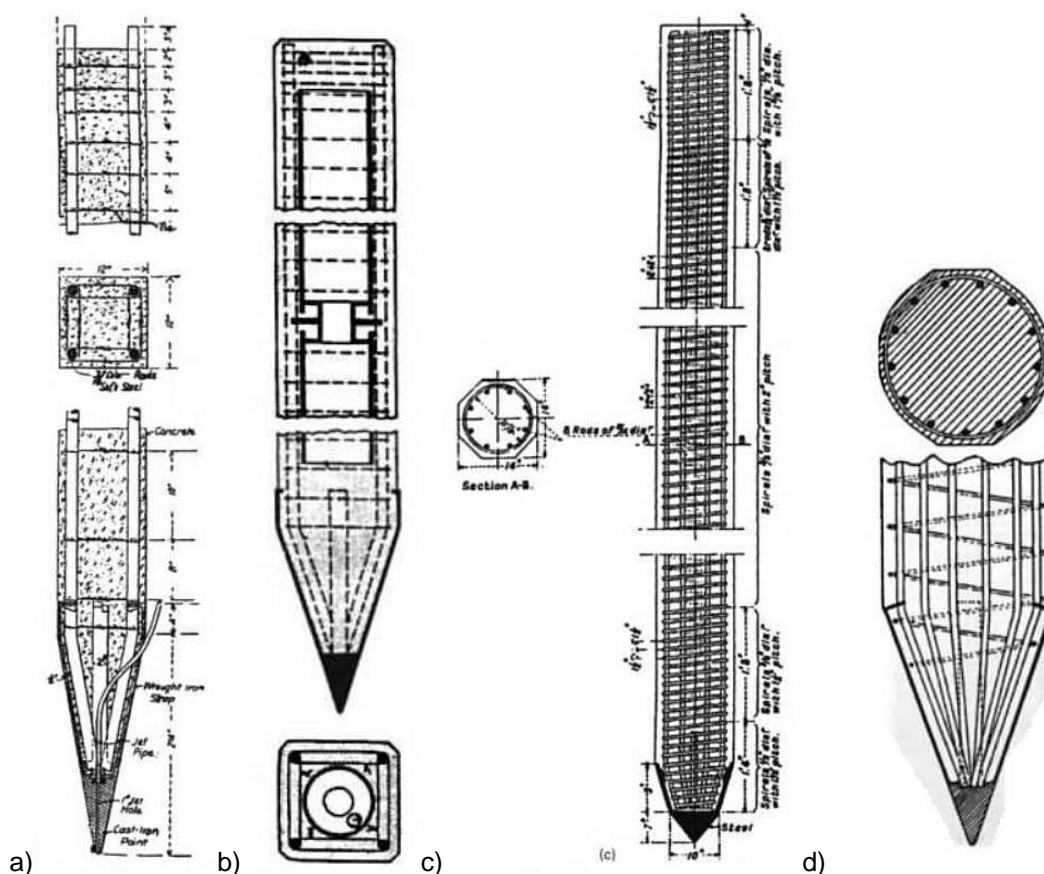
Zastosowanie żelbetu jako materiału konstrukcyjnego pali wbijanych było naturalną konsekwencją wcześniejszych odkryć związanych z technologią betonu:

- 1756 r. – opatentowanie spoiwa hydraulicznego przez John'a Smeaton'a;
- 1824 r. – opatentowanie cementu portlandzkiego przez Joseph'a Aspdin'a;
- 1825 r. – budowa pierwszej cementowni;
- 1867 r. – wynalezienie żelbetu przez Joseph'a Monier'a;
- 1871 r. – opatentowanie żelbetowych pali prefabrykowanych przez Philip'a Bannon'a (prawdopodobnie nigdy nie zostały użyte);
- 1875 r. – budowa pierwszego mostu żelbetowego przez Joseph'a Monier'a;
- 1894 r. – opatentowanie i zainstalowanie eksperymentalnych prefabrykowanych pali żelbetowych przez Coignet'a w Levallois-Peret we Francji, po 1906 szeroko wykorzystywane w Wielkiej Brytanii (pale okrągłe z dwoma ściętymi płaszczyznami);
- 1896 r. – opatentowanie i pierwsze w Europie na szeroką skalę zastosowanie żelbetowych pali

prefabrykowanych przez Francois'a Hennebique'a (pale kwadratowe);

- 1900 r. – L. G. Mouchel opatentował żelbetowe prefabrykowane pale drążone (pale kwadratowe);
- 1902 r. – opatentowanie sześciokątnych żelbetowych pali prefabrykowanych systemu Considere;
- 1901(2) r. – pierwsze zastosowanie pali żelbetowych w Stanach Zjednoczonych;
- 1930 r. – Eugene Freyssinet wykorzystuje sprężone pale prefabrykowane w porcie Havre we Francji.

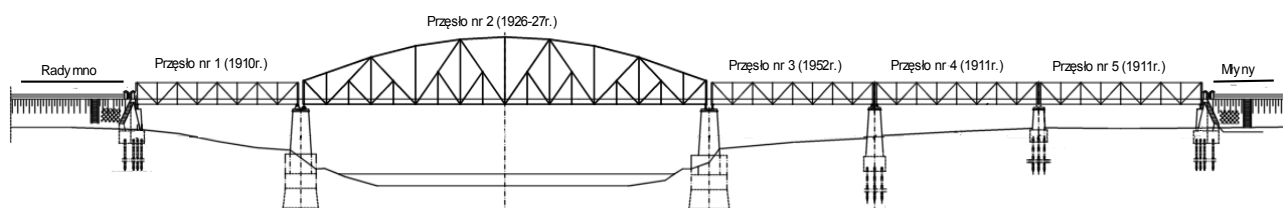
Rozwiązania konstrukcyjne żelbetowych pali prefabrykowanych bazowały na doświadczeniach z instalacji pali żelaznych, stalowych i drewnianych. Kształt pala w większości ówczesnych rozwiązań odwzorowywał kształt pala drewnianego (okrągłe lub sześciokątne), jednak już wtedy względy technologiczne związane z produkcją pali przesądziły na długie lata o sukcesie pali kwadratowych Hennebique'a. Do dnia dzisiejszego w świadomości wielu starszych inżynierów w Polsce pale te funkcjonują jako pale Hennebique'a.



Rys. 1. Pale prefabrykowane z przełomu XIX i XX wieku: a) pal Hennebique'a z 1897 r., b) pal drążony systemu Mouchel'a z 1907 roku, c) pal systemu Considere'a z 1908 roku, d) pal systemu Coignet'a z 1906 roku



Fot. 3. Stary most przez San w Radymnie w ciągu obecnej DK 4



Rys. 2. Schemat konstrukcji starego mostu przez San w Radymnie z wiekiem poszczególnych przęseł (młodsze odbudowywane) oraz rozwiązaniem konstrukcyjnym fundamentów poszczególnych podpór



Fot. 4. Stare podpory nowego mostu przez San w Radymnie – w fundamentach wykorzystano istniejące studnie i pale prefabrykowane

Na tle zastosowań światowych ciekawie wygląda udokumentowana historia zastosowań pali prefabrykowanych na ziemiach polskich. Przykładem ich stosunkowo wczesnego wykorzystywania jest budowa w latach 1902+1907 fundamentów podpór zalewowych mostu przez San w Radymnie posadowionych na wbijanych palach żelbetowych prefabrykowanych o wymiarach 30x30cm. Pali po odkopaniu podczas przebudowy obiektu w 2002 roku okazały się być w bardzo dobrym stanie i zostały wykorzystane w nowym moście drogowym klasy B zlokalizowanym w ciągu DK4. Należy oczekiwać, że nie było to zastosowanie ani jednostkowe, ani wyjątkowe.

Sprawdzona w praktyce trwałość pali prefabrykowanych > 100 lat

Po pewnym czasie gamę rozwiązań konstrukcyjnych żelbetowych pali prefabrykowanych uzupełniły pale sprężone (1930). Współcześnie stosowane są również na małą skalę pale kompozytowe (np. stalowo-betonowe).

Na podstawie licznych zdobytych doświadczeń rozwiązania konstrukcyjne pali prefabrykowanych ewoluowały. Produkowane i wbijane w wielu krajach prefabrykaty palowe utraciły odziedziczone po palach drewnianych ostrza. W drugiej połowie XX wieku rozwiązany został również problem sprawnego przedłużania pali, dzięki opracowaniu wielu rodzajów złączy palowych, w tym złączy mechanicznych.

Do podstawowej funkcji pala prefabrykowanego, jako fundamentu budowli, próbuje się z sukcesami dodać również funkcję wymiennika energii geotermalnej. Pali takie nazwano „energy piles”, co w wolnym tłumaczeniu oznacza „pale energetyczne”, zawierające elementy wymienników ciepła.

Praktycznie równocześnie z bardzo szybkim rozwojem technologii żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych Hennebique'a, które w naturalny sposób zastąpiły pale drewniane, wykorzystywano z reguły na mniejszą skalę inne technologie palowe.

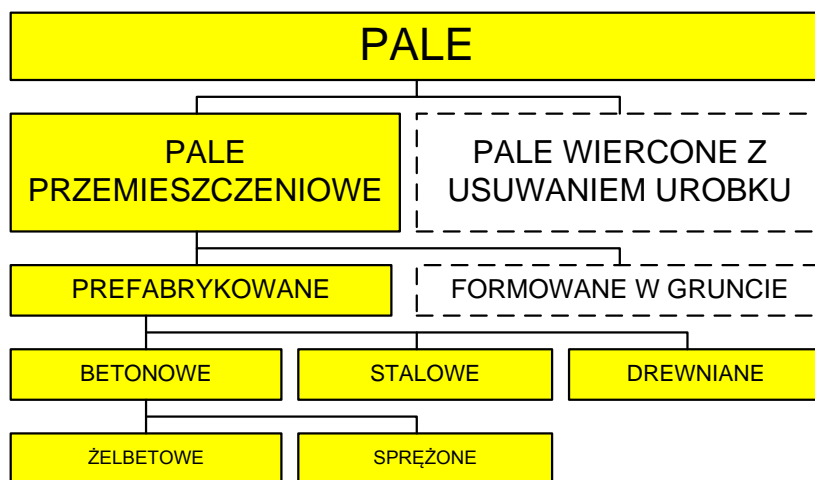
Były to:

- pale przemieszczeniowe formowane w gruncie wykonywane w ten sposób, że wbijano pal drewniany, który następnie wyrywano i zastępowano zagęszczonym piaskiem;
- pale wkręcane, których wynalazcą jest irlandzki inżynier Alexander Mitchell (1830) – ich zastosowanie ograniczało się ówczesnie do prefabrykatów żelaznych;
- pale wiercone, w których techniki wiertnicze wykorzystywane były do pogrążania żelaznych cylindrów, następnie wypełnianych betonem (odpowiednik współczesnych pali wierconych z traconą rurą obsadową);
- pale systemu Raymonda (1897), które formowane były z betonu otworach po wbitych wcześniej, zwężających się ku dołowi stalowych cylindrach, później również zbrojone;
- zastosowanie podpłukiwania wodą pod wysokim ciśnieniem przy wbijaniu cylindrów Raymonda (1901);
- pale Simplex w wersji z traconą stopą (1903) i późniejszej z rurą rozwieraną na spodzie pala (rura osłonowa pozostawiana w gruntach nawodnionych);
- pale Franki (1909).

Przełom XIX i XX wieki oraz początek XX wieku był okresem budowy podwalin pod praktycznie wszystkie współczesne technologie fundamentowania głębokiego i wzmocnienia gruntu.

4. Pojęcia podstawowe

4.1 Klasyfikacja pali

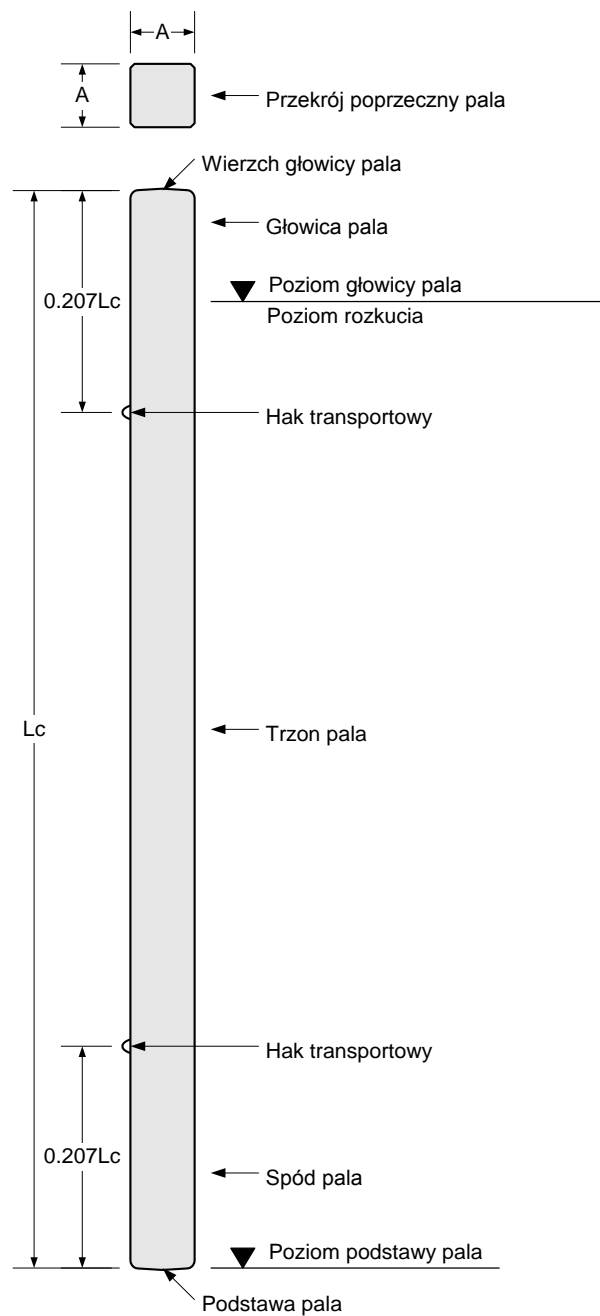


Rys. 3. Uproszczona klasyfikacja pali – kolorem oznaczono pale prefabrykowane

Rysunek powyżej pokazuje uproszczoną klasyfikację pali. Wyróżniony kolorem fragment klasyfikacji dotyczący pali prefabrykowanych. Spośród stosowanych w praktyce światowej pali prefabrykowanych żelbetowych, sprężonych, stalowych i drewnianych w Polsce do fundamentowania obiektów trwałych na szeroką skalę stosowane są wyłącznie pale żelbetowe. W ograniczonym zakresie, w większości do podparcia konstrukcji tymczasowych (np. mostów objazdowych), stosowane są pale stalowe rurowe (częściiej), z grodzic stalowych lub dwuteowników (stosunkowo rzadko). Z dużymi oporami pale stalowe przebijają się w Polsce jako fundamenty konstrukcji trwałych, np. fundamenty mostów zintegrowanych oraz trwałe, stalowe ściany oporowe.

W dalszej części opracowania pod pojęciem **pale prefabrykowane** należy rozumieć **pale prefabrykowane żelbetowe**.

4.2 Słownik pojęć palowych



Rys. 4. Schemat żelbetowego pala prefabrykowanego

B

Badania dynamiczne ciągłości (przy małych odkształceniach) (sonic test, low strain integrity test). Badania w którym seria fal akustycznych jest przesyłana od nadajnika do odbiornika przez beton pala, a charakterystyki odbieranych fal są mierzone i wykorzystywane do oceny ciągłości i zmian przekroju trzonu pala.

Badania akustyczne. Patrz: Badania dynamiczne ciągłości

D

Długość pala (pile length). Odległość pomiędzy wierzchem, a podstawą pala.

Długość segmentu (segment length). Długość segmentu stanowiąca część długości pala.

Dobicie (restrike). Pojedyncze uderzenia młota w pal prefabrykowany, podczas którego są mierzone energia uderzenia oraz odkształcenia jednostkowe/przyśpieszenia i/lub wstępny wpał, w celu umożliwienia oceny nośności pala.

Dobijanie (redrive). Dodatkowa seria uderzeń młota używana do wbicia pala prefabrykowanego w celu odtworzenia wymaganego oporu wbijania (stosowane do pali kotwiących uniesionych nadmiernie w trakcie próbnego lub do pali uniesionych przez wysadzinę w wyniku wbijania pali sąsiednich w gruntach spoistych).

Dokumentowanie (recording). Sporządzenie trwałego zapisu faktów dotyczących wykonywania pali i rejestrowanych danych w formie „Dziennika wbijania pali” złożonego m.in. z „Metryk pali”.

Dziennik wbijania pali (piling/driving report). Dokument stanowiący szczegółowy zapis czynności realizowanych przez wykonawcę w trakcie realizacji robót palowych.

F

Fundament palowy (pile foundation). Odmiana fundamentu pośredniego, określana również jako fundament głęboki - obciążenia przenoszone są w tego rodzaju fundamencie na głębsze warstwy podłoża.

G

Głowica pala (pile head). Górny odcinek pala.

K

Kołpak (helmet). Urządzenie, zwykle stalowe, umieszczone pomiędzy podstawą młota udarowego, a palem lub rurą formującą w celu równomiernego rozłożenia uderzenia młota w głowicę pala.

Kryteria wbijania (driving criteria). Parametry wbijania, które powinny być spełnione podczas wbijania pala.

M

Metryka pala (driving log). Szczegółowy zapis postępu zagłębiania pojedynczego pala zawierający następujące informacje [22]: numer podpory/fundamentu, numer pala, lokalizację pala, wymiary pala, klasa betonu pala, informacje na temat zbrojenia pala, informacje na temat liczby złączy i ich położenia, nachylenie projektowanego i wykonanego pala, datę rozpoczęcia i zakończenia zagłębiania pala, rodzaj i typ urządzenia do zagłębiania pala, ciężar młota, wysokość spad młota, rodzaj stosowanej przedłużki oraz wpał pala (w metryce należy podać jako wartość wpału ilość uderzeń młota na każde 20cm postępu zagłębiania pala), rzędną terenu oraz rzędną projektowaną i wykonaną podstawy i głowicy pala, numer rysunku na podstawie którego realizowana jest robota, imię i nazwisko Kierownika Robót Palowych. Metryka pala jest częścią składową dziennika wbijania pali.

Młot udarowy (impact hammer). Narzędzie budowlane do udarowego wbijania pali (masa uderzająca lub spadająca).

Monitorowanie (monitoring). Prowadzenie obserwacji w ramach kontroli jakości technicznej procesu palowania.

N

Nadzór (supervision). Aktywna funkcja w nadzorowaniu i kierowaniu wykonaniem pali

O

Ostrze pala (pile shoe). Końcówka przymocowana do dolnego końca pala służąca do formowania podstawy pala

P

Pal (pile). Długi element wprowadzony w grunt stanowiący podparcie fundamentu.

Pal do prób wstępnych (preliminary pile). Pal wykonywany przed rozpoczęciem zasadniczych robót palowych lub fragmentu robót, w celu ustalenia przydatności wybranego rodzaju pala, sprzętu do wbijania lub/i potwierdzenia rozwiązania projektowego, wymiarów i nośności.

Pal próbny (trial pile). Pal wykonywany w celu oceny przydatności metody fundamentowania.

Pal do próbnego obciążenia (test pile). Pal poddawany próbnemu obciążeniu w celu określenia zależności oporów od przemieszczeń pala oraz otaczającego gruntu

Pal początkowy (initial pile). Pierwszy pal roboczy na placu budowy.

Pal pojedynczy (single length pile). Pal bez złączy.

Pal prefabrykowany (prefabricated pile). Pal lub element pala, który jest wykonywany przed zagłębieniem jako jeden odcinek lub z kilku odcinków.

Pal przemieszczeniowy (displacement pile). Pal, który jest zagłębiony w grunt bez wiercenia lub usuwania urobku, z wyjątkiem zabiegów ograniczających wysadzinę, drgania, usuwania przeszkód lub ułatwiania zagłębienia.

Pal segmentowy (segmental pile). Pal ze złączami.

Pal wbijany (driven pile). Pal który jest zagłębiony w grunt przez wbijanie, przy czym grunt jest przemieszczany przez pal lub rurę obsadową

Pal wciskany statycznie (jacked pile). Pal wciskany w grunt za pomocą siły statycznej.

Pal złożony (combined pile). Pal wykonywany z połączonych dwóch lub większej liczby różnych rodzajów lub wymiarów pali. Połączenie części składowych jest projektowane na przeniesienie obciążenia oraz zapobieganie rozdzieleniu się pala podczas i po wykonaniu (= pal zespolony).

Podkładka młota (hammer cushion). Urządzenie lub materiał, umieszczany pomiędzy młotem udarowym, a kołpakiem w celu ochrony młota i głowicy pala przed niszczącymi bezpośrednimi uderzeniami. Materiał podkładki młota powinien być dostatecznie sztywny, aby przekazać bez strat energię uderzeń młota w pal.

Podkładka pala (pile cushion). Materiał, zwykle miękkie drewno, umieszczany pomiędzy kołpakiem a głowicą prefabrykowanego pala betonowego.

Podplukiwanie (jetting). Użycie strumienia wody do ułatwiania zagłębienia pala za pomocą wyplukania części gruntu.

Podstawa pala (pile base). Dolna powierzchnia pala.

Poziom głowicy (poziom skucia głowicy pala) (cut of level). Projektowany poziom, do którego pal jest ścinany lub wyrównywany przed jego połączeniem z konstrukcją.

Poziom podstawy (toe level). Poziom dolnego końca pala.

Poziom roboczy (working level). Poziom terenu palowania (platformy roboczej), na którym pracują palownice/kafary.

Platforma robocza. Patrz: Poziom roboczy.

Próbne obciążenie dynamiczne pala (przy dużych odkształceniach) (dynamic pile load test). Próbne obciążenie w którym na głowicę pala jest wywierana siła dynamiczna w celu analizy jego nośności.

Próbne obciążenie pala zwiększone stopniami (maintained load pile test). Próbne obciążenie statyczne, w którym pal do próbnego obciążenia jest obciążany siłą zwiększaną stopniami, utrzymanymi przez pewien czas albo dopóki przemieszczenia pala praktycznie zanikną lub osiągną przewidzianą granicę (badania ML).

Próbne obciążenie ze stałą prędkością wciskania (constant rate of penetration pile load test). Próbne obciążenie statyczne, w którym pal do próbnego obciążenia jest wciskany w grunt ze stałą prędkością z pomiarem siły wciskającej (badanie CRP).

Przedłużka (follower). Tymczasowe przedłużenie pala, używane podczas wbijania, które pozwala zagłębić wierzch pala poniżej powierzchni gruntu, lustra wody, albo poniżej najniższego punktu, do którego urządzenie wbijające może sięgnąć bez rozłączania prowadnicy.

Prześwietlanie akustyczne (sonic coring). Akustyczne badanie ciągłości betonu pala, wykonywane z otworu rdzeniowego w trzonie pala lub z wbudowanych rurek.

S

Segment pala (pile segment). Pojedynczy odcinek pala segmentowego.

Spód pala (pile bottom). Dolna część pala.

T

Trzon pala (pile shaft). Element pala pomiędzy głowicą i podstawą.

W

Wierzch głowicy pala (pile top). Górna powierzchnia pala.

Wpęd (set). Średnie trwale zagłębienie pala w grunt na jedno uderzenie, mierzone po serii uderzeń.

Wspomaganie zagłębiania (driving assistance). Metoda używana do ułatwienia zagłębiania pala w grunt, np. podpłukiwanie, wstępne przewiercanie, użycie materiałów wybuchowych, wstępne wbijanie.

Współczynnik kształtu (shape factor). Stosunek długości segmentu pala do najmniejszego wymiaru przekroju poprzecznego (dla pali prefabrykowanych żelbetowych ≤ 75).

Wstępne przewiercanie (świdrem, płuczkowe) (preboring, preaugering, predrilling). Wiercenie przez przeszkody lub materiały zbyt zwarte, by mogły być przebite za pomocą projektowanego pala i urządzenia do zagłębiania

Wysadzina (heave). Przemieszczenie ku górze gruntu lub pala

Z

Zagłębianie (driving). Metody wprowadzania pali w grunt na wymaganą głębokość, takie jak wbijanie młotem, wibrowanie, wciskanie, wkręcanie albo kombinacje tych lub innych metod.

Złącze pala (pile joint). Element połączenia segmentów pala przez spawanie albo połączenie mechaniczne.

4.3 Zakres stosowania pali prefabrykowanych

Pale prefabrykowane są szeroko stosowane do posadowienia:

- obiektów mostowych (mostów (Fot. 5), wiaduktów (Fot. 8), estakad (Fot. 10), kładek i przepustów);
- nasypów drogowych (Fot. 9) i podtorza kolejowego;
- nabrzeży portowych;
- obiektów mieszkalnych jedno i wielorodzinnych;
- obiektów kubaturowych (przemysłowych (Fot. 13), handlowych i sakralnych (Fot. 6)) i sportowych;
- konstrukcji oporowych;
- różnego typu zbiorników (Fot. 7);
- stacji benzynowych;
- elektrowni wiatrowych (Fot. 14);
- słupów energetycznych i wież telefonii komórkowej;

- ciężkich maszyn iciągów technologicznych;
- kominów (Fot. 11) i wież przemysłowych;
- słupów oświetleniowych;
- słupów reklamowych;
- masztów i anten satelitarnych;
- stacji transformatorowych;
- żurawi stacjonarnych;
- pomostów i dalszych cumowniczych;
- ekranów akustycznych;
- słupów trakcyjnej sieci kolejowej;
- konstrukcji tymczasowych (np. podpór tymczasowych do budowy obiektów mostowych) itp.

Przedstawiona wyżej lista na pewno nie wyczerpuje wszystkich możliwości zastosowania i wykorzystania pali prefabrykowanych, choćby z tego powodu, że fantazja projektantów nie zna granic.

Pale te stosowane są również do wzmocnienia istniejących lub wadliwie wykonanych fundamentów palowych (np. most przez Wartę w ciągu A2). Znane są również nietypowe sposoby wykorzystania pali prefabrykowanych jako:

- elementy fundamentów płytowo-palowych, tzw. „raftów” palowych;
- jako wspomniane elementy systemu chłodzenia/ogrzewania obiektów budowlanych, tzw. „energy piles”;
- a także prefabrykowane, gotowe rozpory wiaduktów ramowych.



Fot. 5. Fundament filara mostu drogowego przez Regalicę w ciągu ul. Autostrada Poznańska w Szczecinie – przykład palowania „z wody”



Fot. 6. Wykonanie fundamentu palowego dzwonnicy – Białystok



Fot. 7. Fundament palowy zbiornika oczyszczalni ścieków „Pomorzan” – Szczecin



Fot. 8. Wykonanie fundamentów palowych obiektów mostowych – Autostrada A1



Fot. 9. Wzmocnienie podłoża pod nasypem - Autostrada A-2 pod Nowym Tomysłem



Fot. 10. Obiekty i palowanie fundamentu estakady w węźle Marsa



Fot. 11. 80-cio metrowy komin posadowiony na palach prefabrykowanych – teren WSK Rzeszów



Fot. 12. Wiadukt nad koleją w ciągu obwodnicy Wyszkowa



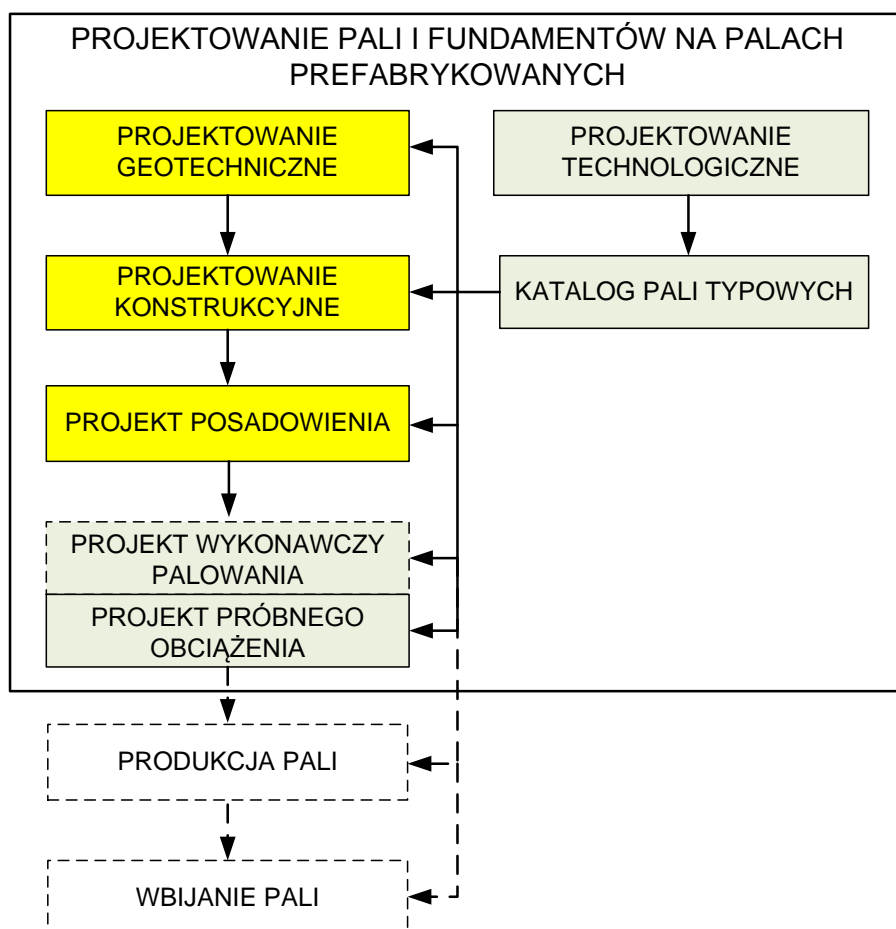
Fot. 13. Fundamenty hali przemysłowej AluPol w Tychach wykonywany tuż przy istniejącej hali



Fot. 14. Turbiny farmy wiatrowej w Kisielicach posadowione na palach prefabrykowanych

5. Podstawowe zasady projektowania pali prefabrykowanych

5.1 Informacje ogólne



Rys. 5. Projektowanie pali prefabrykowanych

Powyżej pokazano uproszczony schemat projektowania pali prefabrykowanych. Na proces ten składają się:

- projektowanie technologiczne;
- projektowanie geotechniczne;
- projektowanie konstrukcyjne;
- projektowanie wykonawcze.

Projektowanie technologiczne prefabrykatów palowych należy do wytwórcy i pozwala na określenie minimalnych wymagań (klasa betonu, minimalna wymagana powierzchnia i klasa zbrojenia) w poszczególnych fazach produkcji i realizacji robót palowych od przygotowania formy do wbicia pala. Efektem projektowania technologicznego jest najczęściej KATALOG TYPOWYCH PALI PREFABRYKOWANYCH. Współczesna produkcja prefabrykatów palowych ma charakter przemysłowy, co powinno być uwzględniane przez projektantów, podobnie jak ma to miejsce w przypadku kształtowników stalowych: w największym możliwym zakresie należy wykorzystywać rozwiązania typowe. Ewentualne rozwiązania indywidualne powinny stanowić rozwinięcie rozwiązań przedstawianych w katalogach producentów (patrz również p. 5).

Ze względu na stawiane prefabrykatom palowym liczne i wysokie wymagania jakościowe, bezpowrotnie minął już okres ich wytwarzania na zaimprovizowanych na budowie placach prefabrykacji. Współcześnie, praktycznie jedynym miejscem wytwarzania prefabrykatów palowych jest wytwórnia prefabrykatów.

Produkcję prefabrykatów palowych prowadzi się zgodnie z normą [23] lub w oparciu o projekty

indywidualne. Producent deklaruje zgodność projektowanych pali z:

- wymaganiami indywidualnej dokumentacji projektowej,
- normą [23] lub

ubiega się o przyznanie, a następnie oznacza pale znakiem CE. Przyznanie producentowi przez odpowiednią jednostkę certyfikującą znaku CE jest poświadczeniem pełnej zgodności procesu produkcji z wymaganiami normy polskiej i europejskiej. W związku z ustanowieniem normy [23] na prefabrykaty palowe ważność utraciły wszystkie wcześniej wydane dla tego rodzaju wyrobów aprobaty techniczne.

Projektowanie geotechniczne ma na celu określenie wymaganego przekroju i długości pała ze względu na jego pracę w gruncie. W projektowaniu geotechnicznym należy uwzględnić dostępne na rynku przekroje pali prefabrykowanych, np. 0,25x0,25m, 0,3x0,3m i 0,4x0,4m oraz fakt, że prefabrykaty pali produkowane są w długościach zmieniających się co 1,0m. Na stronie <http://www.aarsleff.com.pl/serwis.php> dostępny jest darmowy Kalkulator Pali Prefabrykowanych pozwalający w łatwy sposób wyznaczyć ich nośność w gruncie zgodnie z [19]. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że metoda wyznaczania nośności pali opisana w normie [19] opracowana została w latach 70-tych XX wieku i znacznie zaniża nośności żelbetowych pali prefabrykowanych wbitych w „mocne” grunty spójne (zwarne i półzwarne) oraz zagęszczone i silnie zagęszczone grunty sypkie.

Współcześnie projektowanie geotechniczne pali należy prowadzić zgodnie z zasadami podanymi w normie Eurokod 7 [25]. Norma Eurokod 7 [25] podaje wyłącznie ogólne zasady bezpieczeństwa jaki należy stosować w projektowaniu pali. Brak jednoznacznego określenia w normie metod wyznaczania odpowiednich charakterystyk pali w poszczególnych stanach granicznych dopuszcza stosowanie dowolnych metod, które w pełni uwzględniają wymagania bezpieczeństwa określone w [25]. Najbardziej wiarygodne wyniki obliczeń nośności pali w gruncie uzyskuje się stosując metody projektowania oparte na badaniach statycznych nośności, bezpośrednio na wynikach sondowań (np. na podstawie oporu q_c pod podstawą stożka sondy CPT) lub na wynikach badań dynamicznych [25]. Zalety projektowania na podstawie testów statycznych lub dynamicznych są oczywiste i nie wymagają dodatkowych objaśnień. W praktyce (poza nielicznymi przypadkami, jak np. posadowienie Stadionu Narodowego, są jednak rzadko na etapie projektowania wykorzystywane ze względów formalnych i kosztowych. Bardzo intensywnie rozwijają się wysoko cenione metody bezpośredniego projektowania na podstawie wyników sondowań, których zaletą jest wyeliminowanie pośredniego etapu wyprowadzania parametrów uogólnionych typu I_L lub I_D oraz zmniejszenie ryzyka popełnienia błędów interpretacyjnych.

Projektowanie konstrukcyjne ma na celu określenie wymaganej minimalnej klasy betonu oraz klasy i powierzchni zbrojenia w prefabrykacie ze względu stan graniczny nośności (sytuacje obliczeniowe trwałe i przejściowe) oraz stan graniczny użytkowania. W projektowaniu konstrukcyjnym należy uwzględnić, że rozwiązania zawarte w KATALOGU PALI PREFABRYKOWANYCH określają minimalne wymagania technologiczne i można je zmieniać jedynie przez zwiększenie wymagań (np. zwiększając wymaganą powierzchnię przekroju zbrojenia). W żadnym wypadku nie należy w trakcie projektowania konstrukcyjnego zmniejszać wymagań sformułowanych w projekcie technologicznym przez wytwórcę prefabrykatów palowych.

W praktycznym projektowaniu konstrukcyjnym wykorzystywane są różne metody ustalania sił wewnętrznych w palach. Pale i fundamenty palowe obiektów mostowych analizowane są jako:

- oddzielne modele fundamentów obciążane zastawami sił/reakcji będących wynikiem odrębnie prowadzonej analizy konstrukcji górnych lub
- stanowią integralną część kompletnego modelu konstrukcji.

Każde podejście ma swoje istotne zalety i wady. Projektowanie w oparciu o modele zintegrowane jest zdecydowanie bardziej zaawansowane i stawia projektantom zdecydowanie wyższe wymagania w zakresie:

- opisu i sparametryzowania ośrodka gruntowego;
- definiowania właściwych kombinacji obciążeń na podpory/fundamenty i
- prawidłowego modelowania interakcji grunt-konstrukcja.

Jest to wciąż zadanie dość skomplikowane ze względu na generalnie nieliniowy charakter pracy ośrodka gruntowego. Projektowane w ten sposób fundamenty wymagają większego nakładu pracy, ale jednocześnie, prawidłowo zaprojektowane, umożliwiają uzyskanie ekonomicznych fundamentów. Wyniki tego typu analiz mają charakter rozwiązań zamkniętych („sztywnych”), trudnych do zmiany i adaptacji do rzeczywistych warunków posadowienia ze względu na tzw. „efekt motyla”, czyli lawinowo narastające konsekwencje wprowadzanych zmian. Stosowanie tego rodzaju projektowania ma zdaniem autora uzasadnienie jedynie w przypadku bardzo skomplikowanych i odpowiedzialnych fundamentów, w przypadku których uzyskane oszczędności zrekompensują z nadstatkiem poniesione koszty.

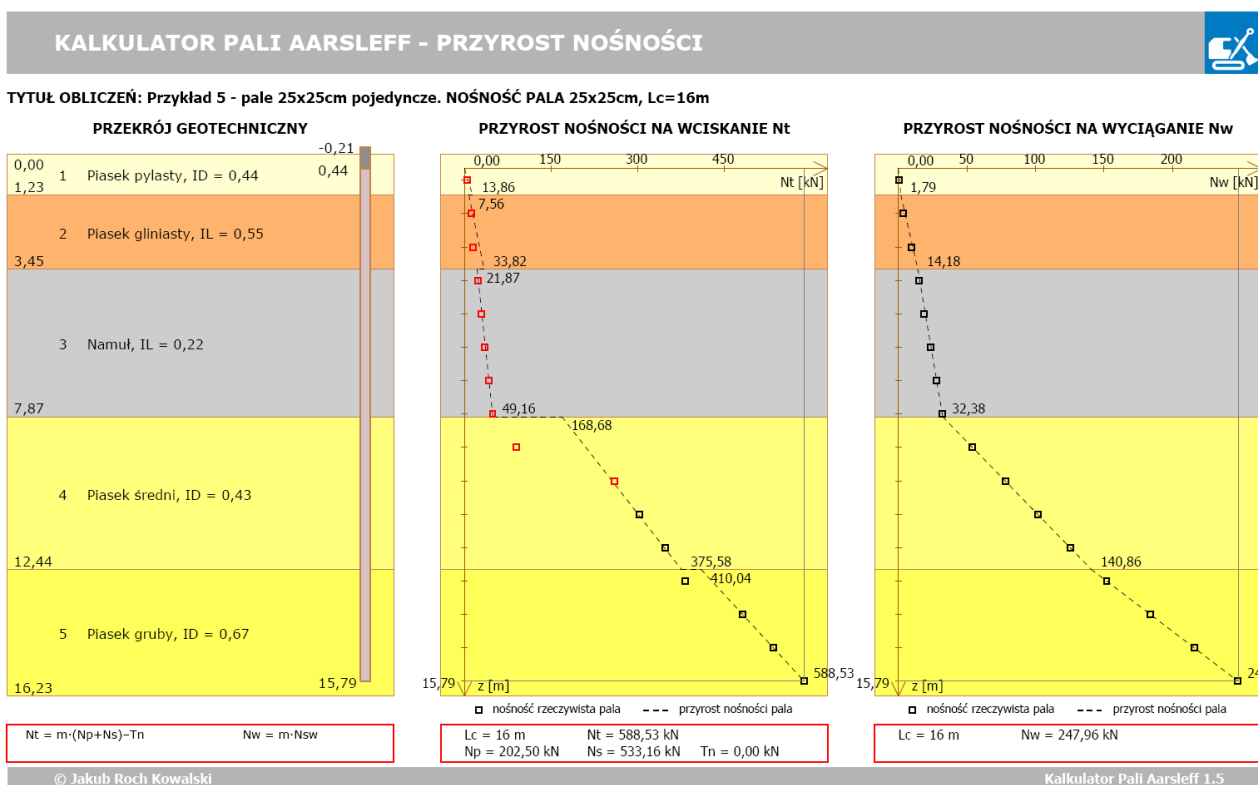
Tradycyjnie stosowana analiza wydzielonych modeli fundamentów jest z reguły prostsza, ale wymaga jasnego sprecyzowania wymagań w stosunku do projektowanego fundamentu wynikające z założeń przyjętych do projektowania konstrukcji górnej. Najczęściej są to akceptowalne zakresy lub/i różnice przemieszczeń pionowych i poziomych poszczególnych fundamentów/podpór, a więc stan graniczny użyteczności. W przypadku większości fundamentów filarów mostowych na palach prefabrykowanych adekwatnym modelem fundamentu jest rama płaska ze sztywnym zwieńczeniem. Zalecane jest przyjmowanie przegubowego mocowania pali w oczepie oraz sprężystego podparcia pali w gruncie. Takie założenie generuje zwykle większe przemieszczenia fundamentu oraz nieco mniejsze siły wewnętrzne w samych palach. Często wykorzystywane w praktyce modele pali prefabrykowanych z utwierdzoną głowicą w zwieńczeniu są adekwatne w przypadku zwieńczeń o relatywnie małych sztywnościach (grubościach) w stosunku do pali lub w przypadku analizy zarysowania pali. W analizie stanu granicznego przemieszczeń fundamentu lub nośności trzonów pali bardziej adekwatnym modelem jest model przegubowy. Jeżeli z pewnych względów niezbędne jest przyjęcie modelu pala zamocowanego w zwieńczeniu należy prawidłowo odczytywać wyniki sił wewnętrznych uwzględniając rzeczywiste położenie przekrojów obliczeniowych na poziomie lub poniżej spodu zwieńczenia. W przypadku nieco bardziej złożonych lub wysokich przyczółków (szczególnie wspornikowych) na palach prefabrykowanych bardziej efektywne rozwiązania fundamentów uzyskuje się stosując analizę przestrzenną.

W zakresie modelowania interakcji grunt-konstrukcja dominującą rolę w Polsce odgrywa metoda uogólniona opisana przez Koseckiego. Praktyczne wykorzystanie tej metody w obliczeniach jest obecnie ułatwione przez wykorzystanie ogólnie dostępnego i darmowego oprogramowania typu KxGenerator. Ostatnia wersja tego programu umożliwia zróżnicowanie charakterystyki podparcia pali w zależności od ich położenia w fundamencie (pale wewnętrzne, zewnętrzne i narożne), które należy wykorzystywać w analizie posadowienia bardzo odpowiedzialnych konstrukcji.

Efektom projektowania geotechnicznego i konstrukcyjnego (uwzględniających wyniki projektowania technologicznego) jest PROJEKT POSADOWIENIA obiektu. Projekt ten powinien jednoznacznie określać:

- warunki posadowienia obiektu (układ, rodzaj i grubości poszczególnych warstw gruntu w odniesieniu do przyjętego i znanego poziomu odniesienia, parametry geotechniczne poszczególnych warstw gruntu wykorzystane w projektowaniu pali (np. I_L lub/i I_D lub wyniki sondowania CPT);
- wymiary i charakterystyczne rzędne, tj. wymiary przekroju poprzecznego pali, długość całkowitą pali z uwzględnieniem długości zakotwienia w zwieńczeniu, rzędną spodu pali i rzędną spodu zwieńczenia, wymiary określające jednoznacznie położenie pali w układzie lokalnym lub globalnym (współrzędne lub domiary do osi głównych) oraz pochylenie pali;
- klasę betonu, klasę i powierzchnię zbrojenia;
- obciążenia maksymalne pali (najlepiej charakterystyczne i obliczeniowe) i wyliczone nośności oraz
- ewentualne wymagania dodatkowe.
- **projektowanie wykonawcze** ma na celu zaadaptowanie rozwiązań z PROJEKTU POSADOWIENIA do możliwości wykonawcy w zakresie:
 - realizacji robót palowych (PLAN PALOWANIA) oraz
 - wykonania próbných obciążeń (PROJEKT PRÓBNEGO OBCIĄŻENIA).

W przypadku fundamentów palowych ważne, jeśli nie ważniejsze od przyjętych modeli obliczeniowych, parametrów i wyników obliczeń jest prawidłowe ich wykonanie i odpowiednio prowadzona kontrola robót palowych.



Rys. 6. Przykład graficznej prezentacji wyników obliczeń nośności pali prefabrykowanych w gruncie – Kalkulator Pali Prefabrykowanych <http://www.aarsleff.com.pl/serwis.php>

W oparciu o opracowaną dokumentację projektową zamawiane są w wytwórni prefabrykaty pali, które są produkowane na indywidualne zamówienie lub odbierane z magazynu wyrobów gotowych.

Pale prefabrykowane jako wyroby gotowe przedmiaruje się i rozlicza w sztukach, a nie w metrach jak pale formowane w gruncie. W uzasadnionych przypadkach dostawy materiału i robocizną związaną z wbiciem pali należy rozliczać oddzielnie, płacąc za cały prefabrykat dostarczony na budowę zgodnie z projektem (szt.) i za rzeczywistą głębokość wbicia (mb).

5.2 Wymagania w stosunku do prefabrykatów palowych

Typowe prefabrykaty palowe powinny jednocześnie spełniać:

- większość wymagań stawianych w projektach posadowień:
 - minimalną wymaganą długość całkowitą pala¹,
 - minimalną wymaganą nośność trzonu,
 - maksymalne dopuszczalne rozwarście rys (typowe wymaganie $\leq 0,3\text{mm}$),
 - odporność na działanie czynników agresywnych (typowe pale prefabrykowane spełniają wymagania dla wszystkich klas agresywności środowiska z wyjątkiem środowisk silnie agresywnych chemicznie XA2 i XA3, które wymagają modyfikacji podstawowego rozwiązania konstrukcyjnego przez zastosowanie cementu HSR),
 - minimalną wymaganą trwałość (standard w budownictwie ogólnym to 50 lat, a w mostowym to min. 100 lat),
- wszystkie wymagania technologiczne procesów produkcji, składowania, transportu i wbijania, m.in.:
 - maksymalne długości technologiczne,
 - maksymalny ciężar prefabrykatu,
 - maksymalne dopuszczalne rozwarście rys,
 - sposób łączenia prefabrykatów, itp.

¹ najdłuższy pal prefabrykowany żelbetowy zainstalowany w Polsce miał do tej pory długość całkowitą 45m i czynna 42,75m

- wszystkie wymagania aktualnych rozporządzeń i norm [23] dotyczące wytwarzania i stosowania prefabrykatów palowych, m.in.:
 - odporność na działanie czynników agresywnych,
 - trwałość,
 - odpowiedni wymagany skład mieszanki betonowej,
 - maksymalny i minimalny stopień zbrojenia,
 - nasiąkliwość,
 - wodoszczelność,
 - mrozoodporność, itp..

Nietypowe wymagania sformułowane w projekcie posadowienia wymagają modyfikacji podstawowego rozwiązania konstrukcyjnego pala na przykład w zakresie:

- zmiany rozwiązań materiałowych:
 - klasy betonu lub/i stali zbrojeniowej,
 - składu mieszanki betonowej, np. przez zastosowanie cementu HSR,
 - rodzaju zbrojenia (np. na zbrojenie ze stali nierdzewnej, powleczonej żywicą epoksydową, prętów z włókien węglowych lub innego rodzaju tworzyw sztucznych, itp.)
 - zastosowanie dodatkowych powłok, np.:
 - specjalnej powłoki bitumicznej nakładanej na powierzchnię betonu pala w strefie występowania gruntów słabych w celu zmniejszenia wpływu tarcia negatywnego na pobocznicy,
 - uszczelnienie wgłębne betonu przez hydrofobizację powierzchni zewnętrznej w strefie występowania określonych czynników agresywnych;
 - uszczelnianie powierzchni betonu przez nakładanie powłok zewnętrznych (najczęściej z żywicy epoksydowej) odpornych na uszkodzenia w trakcie wbijania,
 - zabezpieczanie zbrojenia przed betonowaniem pala przez nakładanie powłok antykorozyjnych (np. z żywicy epoksydowej lub powłok metalowych);
 - zastosowanie dodatków do mieszanki betonowej (np. płynnych lub lotnych inhibitorów korozji),
- zmiany rozwiązań konstrukcyjnych:
 - zastosowanie złączek o większej liczbie elementów łączących;
 - zastosowanie większej liczby lub/i przekroju prętów zbrojeniowych;
 - zwiększenie otuliny zbrojenia w pali;
 - zwiększenie przekroju poprzecznego pala (znane są na świecie przykłady instalowania żelbetowych pali prefabrykowanych o przekroju przekraczającym 0,5x0,5m),
 - wzmocnienie/okucie stopy lub/i głowicy pala przy ciężkim wbijaniu, np. w grunty skaliste;
 - zamontowanie w palu instalacji geotermalnej, ochrony katodowej, itp.

Zgodnie z normą [23] nie formułuje się wymagań dla jakości wykończenia powierzchni prefabrykatów palowych. Brak takich wymagań jest merytorycznie uzasadniony koniecznością uzyskania najwyższego z możliwych współczynnika tarcia na pobocznicy. Zbyt gładka powierzchnia prefabrykatu niewątpliwie zmniejsza wartość współczynnika tarcia.

5.3 Materiały konstrukcyjne do produkcji prefabrykatów palowych

Ze względu na złożoność wymagań wymienionych w pp. 5.2 i 0 produkcja prefabrykatów palowych:

- ma zwykle charakter produkcji przemysłowej, gwarantującą wysoką jakość produktu końcowego;
- odbywa się w kontrolowanych warunkach wytwórni prefabrykatów żelbetowych;
- jest prowadzona w największym możliwym zakresie w oparciu o katalog rozwiązań typowych z wykorzystaniem najwyższej jakości materiałów konstrukcyjnych (beton i stal zbrojeniowa) stosowanych w danym okresie w masowych procesach produkcyjnych.

W 2010 roku są to:

- beton zwykły klasy C40/50² ($f_{ck}=40\text{MPa}$, $\gamma_c=1,5$, $f_{cd}=26,7\text{MPa}$) wg [27];
- zbrojenie główne:
 - w przypadku koszy zbrojeniowych wykonywanych w automacie zbrojarskim wyłącznie z prętów żebrowanych o średnicy 12mm ze stali o wytrzymałości min. $f_{yk}=500\text{MPa}$;
 - w przypadku koszy wykonywanych ręcznie z prętów żebrowanych o średnicy 12, 16, 20, 25(32)mm ze stali o wytrzymałości min. $f_{yk}=500\text{MPa}$ (A-IIIN, np. [B500SP EPSTAL](#)³, $\gamma_s=1,15$)
- zbrojenie poprzeczne:
 - dla koszy zbrojeniowych wykonywanych ręcznie ze stali zbrojeniowej gładkiej o średnicy 5mm i wytrzymałości min. $f_{yk}=500\text{MPa}$ (stal A-IIIN, $\gamma_s=1,15$);
 - dla koszy zbrojeniowych wykonywanych ręcznie ze stali zbrojeniowej gładkiej o średnicy 6mm i wytrzymałości min. $f_{yk}=235\text{MPa}$ (stal A-I, np. S235JR, $\gamma_s=1,15$);

Obecnie większość żelbetowych pali wbijanych w Polsce ma kosze zbrojeniowe wykonywane w automacie zbrojarskim.

Ponadto typowe prefabrykaty palowe, ze względu na zapisy różnego rodzaju aktów prawnych [11]-[15], spełniają standardowo następujące wymagania:

- odporność na działanie czynników agresywnych wszystkich klas agresywności środowiska, np. wg [24] i [21], z wyjątkiem środowisk silnie agresywnych chemicznie XA2 i XA3⁴ kwalifikowanych ze względu na podwyższone stężenia SO₂,
- podwyższona wodoszczelności (W8),
- bardzo mała nasiąkliwość (< 5%),
- wysoka mrozoodporność⁵ (F150) oraz
- wykonane są z mieszanki betonowej na bazie kruszywa łamanego⁶.

Po uzgodnieniu możliwe są modyfikacje procesu wytwarzania pali mające na celu sprostanie zwiększonym, indywidualnym wymaganiom zawartym w projekcie fundamentowania obiektu.

Zgodnie z wymaganiami [22] źródła dostaw materiałów do wyrobu pali prefabrykowanych są na bieżąco dokumentowane.

Większość prefabrykatów żelbetowych pali produkowanych i wbijanych w Polsce oznakowanych jest znakiem CE. Oznakowane w ten sposób wyroby dopuszczone są do stosowania w budownictwie bez potrzeby przeprowadzania skomplikowanego procesu akceptacji materiałów, dostawców etc. Oznakowanie znakiem CE oznacza również, że prowadzony proces produkcji prefabrykatów jest systematycznie kontrolowany przez jednostki kontroli wewnętrznej i zewnętrznej oraz, że pale produkowane są zgodnie z wymaganiami normy [23]. Znak CE jest w hierarchii zapewnienia jakości wyżej niż deklaracja zgodności z normą oraz deklaracja zgodności z aprobatą techniczną krajowa lub/ europejską.

5.4 Typowe rozwiązania konstrukcyjne prefabrykatów palowych

5.4.1 Zasady ogólne

Ze względu na uprzemysłowiony proces produkcji prefabrykatów pali są one wytwarzane w praktyce wyłącznie o długościach z przedziału 4,0m ÷ 14,0 (16,0)m stanowiących wielokrotność 1,0m.

² W fazie produkcji wymaga się, aby przed wyciągnięciem z formy beton odpowiadał klasie C16/20 ($f_{ck,cyl}=16\text{MPa}$, $\gamma_c=1,5$, $f_{cd}=10,7\text{MPa}$).

³ Stal zbrojeniowa odpowiada jedynie wytrzymałościowo klasie A-IIIN i charakteryzuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi

⁴ W przypadku środowisk silnie agresywnych chemicznie XA2 i XA3 (grunty silnie skażone chemicznie – np. na terenie zakładów chemicznych) wymagane jest stosowanie cementów o podwyższonej odporności na działanie czynników agresywnych np. cementu HSR.

⁵ Wymaganie merytorycznie bardzo słabo uzasadnione w stosunku do elementu całkowicie otoczonego gruntem poniżej głębokości przemarzania i uzasadnione dla pali znajdujących się w strefie przemarzania i ponad terenem.

⁶ Ze względu na konieczność spełnienia wymagań obowiązujących rozporządzeń pale w Polsce produkuje się na bazie kruszywa łamanego. Na świecie z powodzeniem wykorzystywane jest do tego celu kruszywo otoczkowe, nawet przy wyższych klasach betonów.

Tak określona długość jest długością całkowitą na którą składa się w rzeczywistym fundamencie długość czynna i długość zakotwienia pała w zwieńczeniu. Dla przykładu, jeśli wymagana długość czynna jest równa 12,2m, a długość zakotwienia w fundamencie jest równa 0,6m, to do wykonania fundamentu zostanie wykorzystany prefabrykat o długości całkowitej równej $13,0m > 12,2m + 0,6m = 12,8m$. Zasada ta może być złamana praktycznie wyłącznie w przypadku bardzo dużych realizacji, w przypadku których może być opłacalne wprowadzenie dodatkowego zróżnicowania długości prefabrykatów co 0,5m. Jednak jest to niezalecane, ze względu na łatwość pomyłki na budowie. Zatem projektant na etapie opracowania projektu posadowienia powinien (nie musi) uwzględnić uwarunkowania wynikające z technologii produkcji prefabrykatów zawartych w KATALOGU PALI PREFABRYKOWANYCH. Na tym polega prawidłowy dobór długości pali.

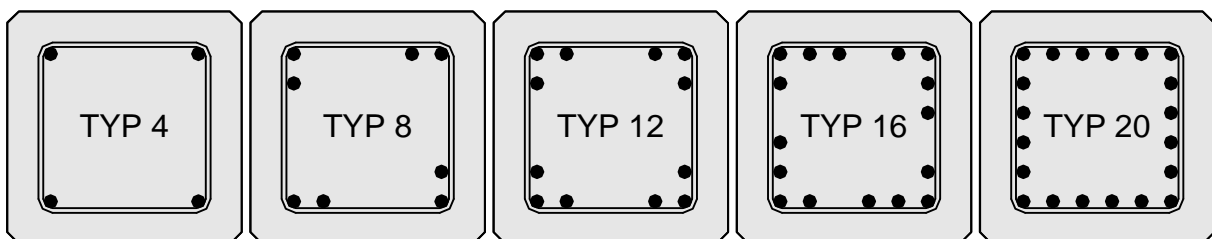
W przypadku konieczności wykonania pali dłuższych niż długość wytwarzanego prefabrykatu stosuje się różnego rodzaju połączenia prefabrykatów. W Polsce najczęściej stosowane są złącza mechaniczne.

5.4.2 Pale prefabrykowane pojedyncze

Pale pojedyncze to pale wytwarzane, transportowane, składowane i wbijane w jednym odcinku. O długości pała pojedynczego decyduje najbardziej ostry z następujących warunków:

- ograniczenia skrajni transportowej:
Obecnie na drogach publicznych obowiązuje ograniczenie skrajni pozwalające na transport bez dodatkowych zezwoleń prefabrykatów o długości do 14(15)m włącznie. Transport dłuższych prefabrykatów jest możliwy na zasadzie przejazdów ponadnormatywnych, co w sposób znaczący zwiększa koszt całkowity robót palowych.
- ograniczenia wynikające z możliwości technicznych zakładu prefabrykacji oraz kafarów, tj. długość form, udźwig suwnic, długość maszty itp.:
Decydujące w tym zakresie są zwykle uwarunkowania związane z formami, które z reguły pozwalają na wyprodukowanie prefabrykatu o długości do 18m włącznie. Maszty większości kafarów pozwalają na zainstalowanie elementów o długości od 18 do 21(24)m.
- ograniczenie wynikające z nośności przekroju żelbetowego:
Warunek ten nie jest z reguły decydujący, choć racjonalne jest minimalizowanie ilości zbrojenia w trzonie pała, co związane jest ze stosowaniem najkrótszych z możliwych prefabrykatów. O ilości zbrojenia w większości przypadków decydują stany technologiczne, a więc obciążenia o charakterze chwilowym lub/i jednostkowym (jedno wyciąganie z formy, najczęściej dwa załadunki i rozładunki, dwa transporty, w tym jeden bardzo krótki, jedno podnoszenie do kafara). Jedynie proces wbijania ma inną charakterystykę: w grę wchodzi złożone układy obciążeń dynamicznych.

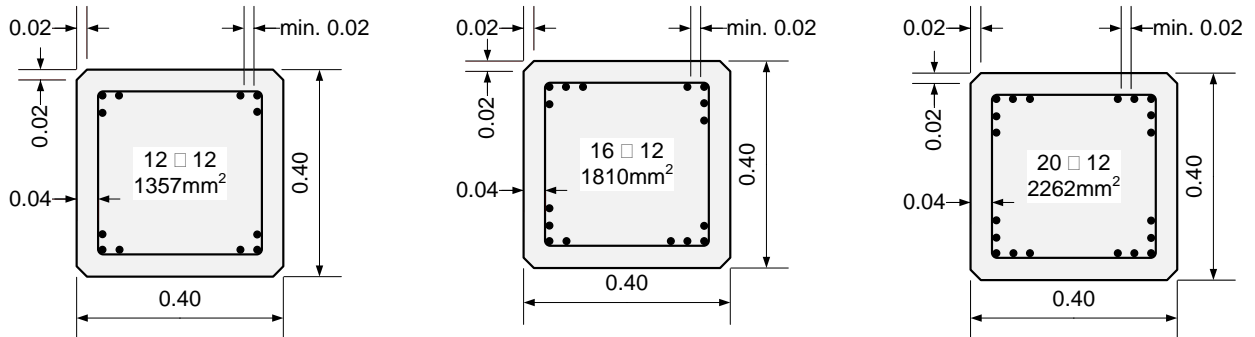
W praktyce najczęściej decyduje ograniczenie dotyczące skrajni transportowej. W wyjątkowych, uzasadnionych technicznie przypadkach produkowane, transportowane i wbijane są pale o długości do 16(18)m.



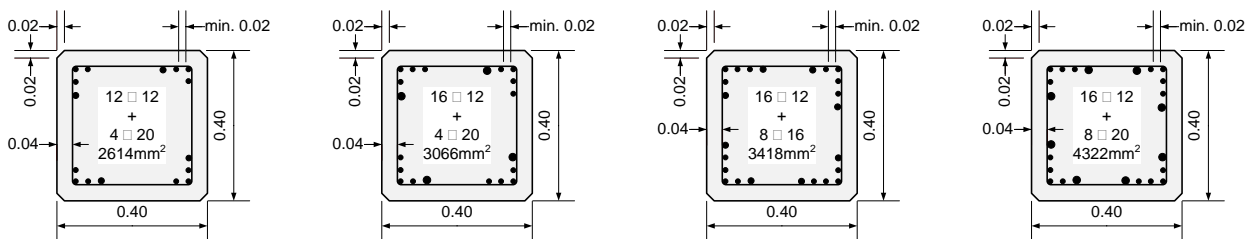
Rys. 7. Schematy zbrojenia pała wykorzystywane w automacie zbrojarskim

Typowym układem zbrojenia dotychczas produkowanych pali pojedynczych ze zbrojeniem montowanym ręcznie jest TYP 4. W przypadku zbrojenia wiązane ręcznie wymagana powierzchnia jest z reguły regulowana średnicą pręta, a dopiero w drugiej kolejności liczbą prętów. Ma to związek z dążeniem do zmniejszenia nakładu robocizny na wykonanie jednego pała. W przypadku obecnie wykonywanego zbrojenia z wykorzystaniem automatów zbrojarskich sytuacja jest zgoła odmienna. Do zbrojenia prefabrykatów palowych wykorzystywane są wyłącznie pręty o średnicy 12mm, a wymaganą powierzchnię zbrojenia uzyskuje się przede wszystkim dzięki zwiększeniu liczby prętów. Zatem typowe schematy zbrojenia w koszach formowanych automatycznie to TYP 4+20 stosowane w zależności od

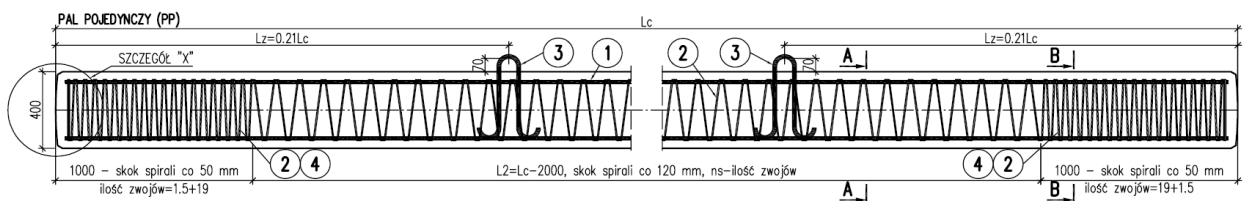
długości prefabrykatu i wymiarów jego przekroju poprzecznego (np. dla pali o przekroju 400x400mm są to schematy: 12#12 - minimalne wymagane, 16#12 oraz 20#12). Dalsze zwiększanie powierzchni zbrojenia uzyskuje się z reguły dokładając ręcznie pręty do podstawowego kosza wykonanego automatycznie (np. 12#12 + 4#20 lub 16#12 + 4#20)(Rys. 9). W zupełnie wyjątkowych przypadkach stosowane są pale o znacznie większej wymaganej powierzchni zbrojenia i wtedy wykorzystuje się szkielet zbrojenia złożony z czterech prętów #12 i strzemion i dozbraja się go ręcznie prętami o znacznej średnicy (np. 4#12 + 8#25).



Rys. 8. Przykłady przekrojów poprzecznych pali 0,4x0,4m ze zbrojeniem wykonywanym automatycznie



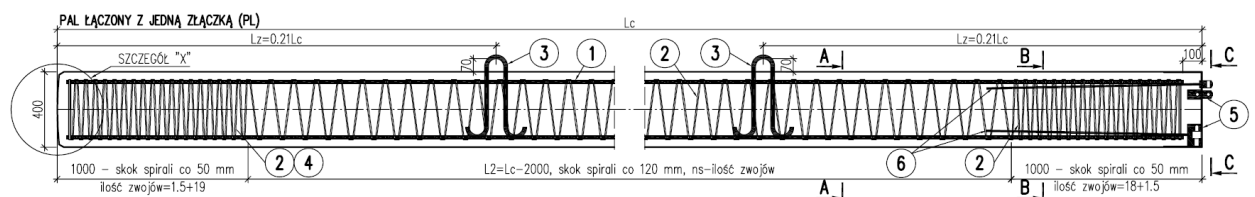
Rys. 9. Schematy dozbrajania pali pokazanych na Rys. 8



Rys. 10. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego pala pojedynczego

5.4.3 Pale złożone

Pale prefabrykowane złożone (łączone) stosowane są wtedy, gdy niemożliwe jest osiągnięcie wymaganej nośności zewnętrznej pala w gruncie przy wykorzystaniu pali pojedynczych. Prefabrykaty tworzące docelowo pal złożony produkowane są w odcinkach jak pale pojedyncze i dodatkowo wyposażone w element złączki montowany na jednym lub na dwóch końcach prefabrykatu. Ze względu na konstrukcję złączki typowym układem zbrojenia montowanego ręcznie jest TYP 8 (Rys. 7). W przypadku zbrojenia wykonywanego automatycznie obowiązują podobne zasady jak dla pali pojedynczych przy minimalnej ilości 8szt. prętów w przekroju.



Rys. 11. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego pala ze złączką

5.4.4 Złącza mechaniczne

Jednym z bardzo popularnych sposobów łączenia pali prefabrykowanych jest wykorzystanie złączy mechanicznych. Zasada pracy złącza mechanicznej jest bardzo prosta, a łączenie pali nie jest czasochłonne i polega na klinowaniu wystających z kolejnych prefabrykatów trzpieni. Złączki są kształtowane w taki sposób, aby ich nośność nie była mniejsza od nośności trzonu pala. W przypadku pali wciskanych, zginanych niewielkim momentem zginającym lub wyciąganych niewielką siłą można stosować złącza z czterema bolcami (łącznikami), a w przypadku pali silnie zginanych lub wyciąganych z dużą siłą należy stosować złącza z ośmioma bolcami (łącznikami) (Fot. 15). Ze względu na lokalizację złącza (najczęściej ok. 2/3 długości całkowitej pala) zwykle pracuje ono na ściskanie, a w nielicznych przypadkach na wyciąganie (np. fundamenty turbin wiatrowych lub nabrzeży portowych).



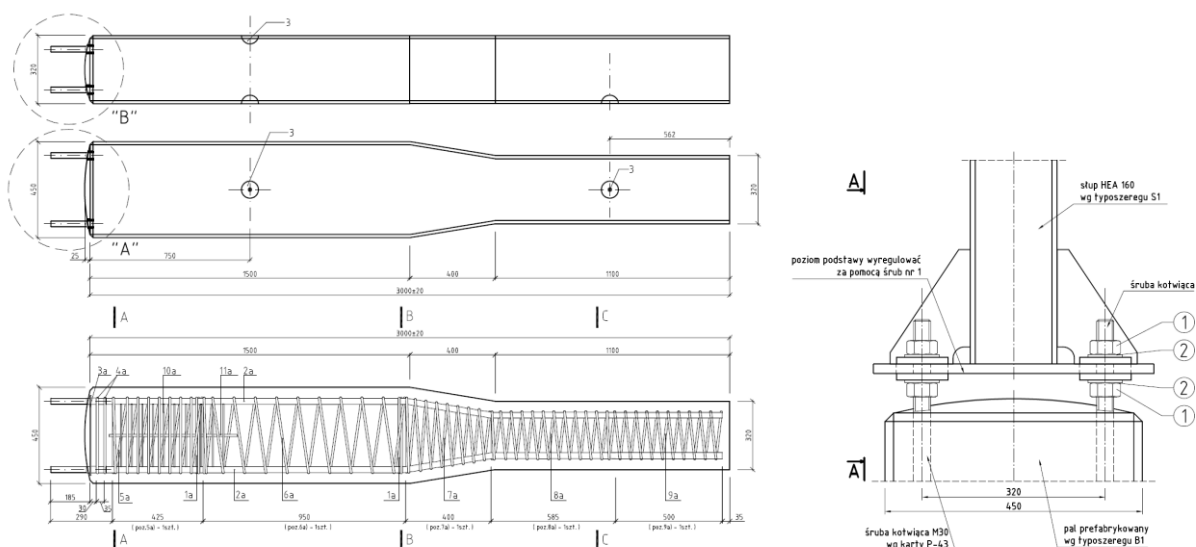
Fot. 15. Kolejność czynności przy łączeniu pala złączką mechaniczną (od lewej: wbicie dolnego odcinka pala z użyciem podkładki zabezpieczającej, osadzenie na złączu górnego odcinka pala, wbicie bolców blokujących i kontynuowanie wbijania pala)

Często, w przypadku zastosowania złączy, zadawane jest pytanie o ich odporność korozyjną. Związane to jest z pewnymi, głęboko zakorzenionymi w Polsce, stereotypami związanymi z kontaktem elementów stalowych z gruntem. Warto zatem przypomnieć fakt, że elementy stalowe są na świecie stosowane w styku z gruntem na ogromną skalę. Są to m.in. fundamenty stalowe różnego rodzaju konstrukcji (w tym mostów), trwałe konstrukcje oporowe ze stalowych ścianek szczelnych, zbiorniki, kolektory deszczowe, mosty i przepusty z blach falistych. Wracając do złączy należy stwierdzić, że każda konstrukcja jest tak dobra jak jej projekt, a więc lokalizacja złączy i ich rozwiązanie nie jest dziełem przypadku, lecz wynika z przemyślanego planu ich zastosowania. Samorzutnie proces korozji zachodzi, gdy możliwe jest naturalne ukształtowanie się w gruncie ogniwa korozyjnego w którego skład wchodzi: katoda i anoda oraz elektrolit przy obecności tlenu (produkty procesu korozji to przecież tlenki żelaza). O ile obecność elektrolitu (woda gruntowa) oraz możliwość ukształtowania się elektrod w gruncie nie podlega dyskusji, o tyle występowanie dużych ilości łatwo dostępnego tlenu w gruncie na dużych głębokościach rzędu kilku metrów jest mało prawdopodobne. Warunki korozyjne dla pali w normalnych warunkach gruntowych określane są jako łagodne. Dodatkowo złączka mechaniczna jest tak projektowana i wykonywana, aby po wykonaniu połączenia szczelina na styku elementów złączki nie była szersza niż 0,3mm, co odpowiadała typowym wymaganiom szczelności dla przekroju żelbetowego.

Zupełnie inne zasady obowiązują w przypadku gruntów wykazujących cechy silnej agresywności chemicznej w stosunku do stali (np. grunty zanieczyszczone chemicznie lub naturalne grunty organiczne o takich cechach) w których mamy do czynienia z zagrożeniem korozją chemiczną nie wymagającą obecności tlenu. W takich warunkach złączki mogą być stosowane jedynie poza strefą występowania gruntów silnie agresywnych.

5.4.5 Fundamenty palowe pod konstrukcje wsporcze

Fundamenty palowe pod różnego rodzaju konstrukcje wsporcze to specjalny rodzaj pala prefabrykowanego zaprojektowany pierwotnie na potrzeby przebudowy trakcji europejskich linii kolejowych. Obecnie fundamenty palowe tego typu znalazły zastosowanie również jako fundamenty słupów ekranów akustycznych i innych konstrukcji wsporczych (np. słupów reklamowych).



Rys. 12. Typowy fundament pałowy wraz ze szczegółem połączenia ze słupem stalowym

Prefabrykaty mają w ramach typu stałą grubość i zmienną na długości szerokość, co pozwala na ukształtowanie głowicy kotwiącej prefabrykowany słup konstrukcji górnej poddanemu podstawowemu rodzajowi obciążenia w postaci momentu zginającego. Połączenie fundamentu z konstrukcją górną jest również prefabrykowane, realizowane przy pomocy śrub zabetonowanych/zakotwionych w pału oraz podkładek i nakrętek tworzących połączenie sprężone (Rys. 12).

6. Produkcja prefabrykatów pali żelbetowych

Pał prefabrykowane produkowane/wytwarzane są w wytwórniach prefabrykatów. Jedną z takich wytwórni jest KPB Kutno, która nastawiona jest głównie na produkcję żelbetowych prefabrykatów pałowych różnego rodzaju i przeznaczenia. Wytwarzane są tam tzw. pał inżynierskie pojedyncze (Rys. 10) i ze złączkami (Rys. 11) o przekrojach poprzecznych 0,25x0,25m, 0,3x0,3m i 0,4x0,4m oraz żelbetowe prefabrykowane fundamenty pałowe (Rys. 12) pod słupy ekranów akustycznych, słupy sieci trakcyjnej kolejowej lub tramwajowej i inne konstrukcje wsporcze.

Proces produkcyjny prefabrykatu pała inżynierskiego składa się z następujących etapów (Rys. 13. Produkcja pali prefabrykowanych Rys. 13):

- przygotowanie zbrojenia i formowanie kosza/szkieletu zbrojeniowego,
- ewentualne przygotowanie i montaż w szkielecie zbrojenia elementów złączek,
- przygotowanie form,
- montaż zbrojenia w formach (m.in. montaż elementów dystansowych);
- wytworzenie mieszanki betonowej i betonowanie pała;
- pielęgnacja prefabrykatów w formach;
- wyciąganie prefabrykatów z form;
- transport na magazyn wyrobów gotowych i składowanie prefabrykatów.



Przygotowanie zbrojenia



Montaż złączki



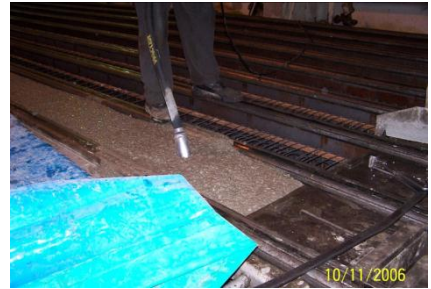
Przygotowanie form



Układanie zbrojenia



Betonowanie



Wibrowanie



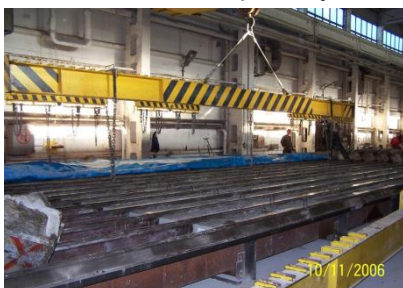
Montaż haków transportowych



Dojrzewanie prefabrykatów



Znakowanie prefabrykatów



Wyciąganie z formy



Składowanie pali



Robot zbrojeniowy

Rys. 13. Produkcja pali prefabrykowanych

Pojedynczy cykl produkcyjny pomiędzy kolejnymi betonowaniami trwa przeciętnie 1-2 dni. Od betonowania prefabrykatu w formie do jego wbicia powinno upłynąć 28 dni lub tyle czasu, aby beton pala osiągnął pełną wytrzymałość odpowiadającą klasie C40/50.

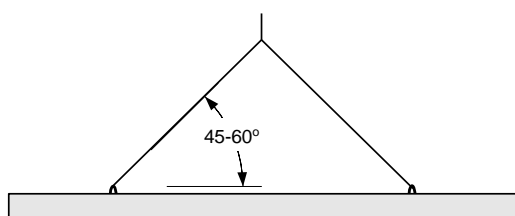
Mieszanka betonowa wykorzystywana do formowania prefabrykatów palowych może być zwykła wibrowana lub samozagęszczająca się.

Możliwe jest prefabrykowanie pali żelbetowych na budowie, jednak obecnie jest ono bardzo rzadko praktykowane ze względu na stawiane prefabrykatom palowym wysokie wymagania jakościowe

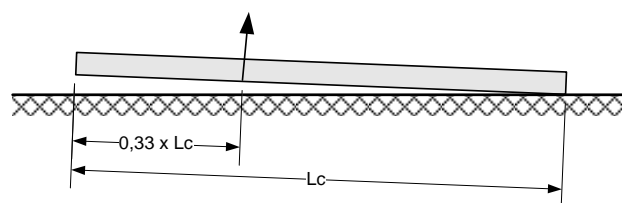
7. Załadunek/rozładunek, transport i składowanie prefabrykatów pali żelbetowych

Transport i składowanie prefabrykatów odbywa się w fazie produkcji:

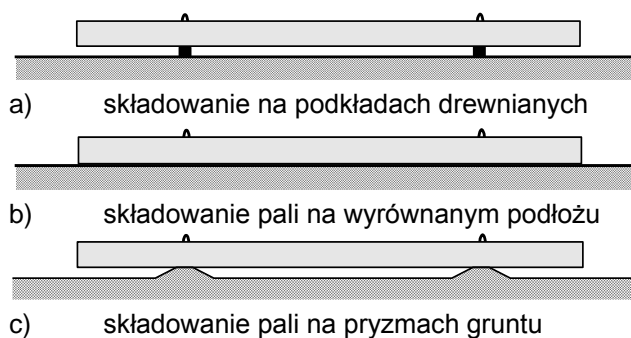
- wyciąganie z formy (Rys. 15),
 - załadunek na środki transportowe,
 - transport,
 - rozładunek,
 - składowanie na placu wyrobów gotowych wytwórni
- oraz w fazie przygotowania i realizacji robót palowych:
- załadunek prefabrykatów na środki transportowe,
 - transport prefabrykatów pali żelbetowych na budowę,
 - rozładunek,
 - składowanie na placu budowy,
 - podnoszenie do kafara (Rys. 15).



Rys. 14. Schemat pracy żelbetowego pala prefabrykowanego w czasie załadunku/rozładunku



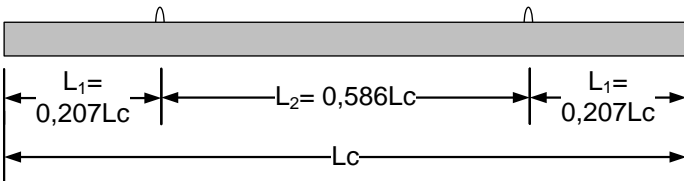
Rys. 15. Schemat pracy żelbetowego pala prefabrykowanego w czasie podnoszenia do kafara



Rys. 16. Sposoby składowania żelbetowych pali prefabrykowanych

Załadunek i rozładunek prefabrykatów pali odbywa się przy użyciu suwnic lub dźwigów. W obydwu przypadkach pale należy zaczepiać za uchwyty transportowe zabetonowane w prefabrykacie. Zawiesia powinny być nachylone w stosunku do podnoszonego prefabrykatu pod kątem w zakresie $45^{\circ}\pm 60^{\circ}$, a w przypadku stosowania trawersy - 90° .

Tabela 1. Geometria haków transportowych i ciężary pali



Geometria haków transportowych			Ciężar pala w kN dla poszczególnych przekrojów i długości				
Lc [m]	L1 [m]	L2 [m]	0,20x0,20	0,25x0,25	0,30x0,30	0,35x0,35	0,40x0,40
4	0,83	2,34	4,27	6,70	9,67	13,18	17,23
5	1,04	2,93	5,34	8,38	12,09	16,48	21,54
6	1,24	3,52	6,41	10,05	14,51	19,77	25,85
7	1,45	4,10	7,48	11,73	16,93	23,07	30,16
8	1,66	4,69	8,54	13,40	19,34	26,36	34,46
9	1,86	5,27	9,61	15,08	21,76	29,66	38,77
10	2,07	5,86	10,68	16,75	24,18	32,95	43,08
11	2,28	6,45	11,75	18,43	26,60	36,25	47,39
12	2,48	7,03	12,81	20,10	29,01	39,54	51,69
13	2,69	7,62	13,88	21,78	31,43	42,84	56,00
14	2,90	8,20	14,95	23,46	33,85	46,14	60,31
15	3,11	8,79	16,02	25,13	36,27	49,43	64,62
16	3,31	9,38	17,09	26,81	38,69	52,73	68,93
17	3,52	9,96	18,15	28,48	41,10	56,02	73,23
18	3,73	10,55	19,22	30,16	43,52	59,32	77,54
Ciężar jednostkowy [kN/mb]			1,07	1,68	2,42	3,30	4,31
Powierzchnia przekroju pala [m ²]			0.040	0.062	0.090	0.122	0.160
Min. powierzchnia zbrojenia [mm ²] ⁷			79.1	124.1	179.1	244.1	319.1
Maks. powierzchnia zbrojenia [mm ²] ⁸			1582	2482	3582	4882	6382

W obydwu ww. fazach prefabrykaty pali żelbetowych różnią się własnościami wytrzymałościowymi. W fazie produkcji przyjmuje się, że beton prefabrykatu pala żelbetowego osiągnął parametry wytrzymałościowe odpowiadające klasie C16/20. W fazie realizacji robót palowych beton prefabrykatu palowego powinien spełniać wszystkie wymagania stawiane w dokumentacji projektowej lub/i katalogu pali typowych, czyli obecnie powinien odpowiadać klasie betonu C40/50 lub wyższej.

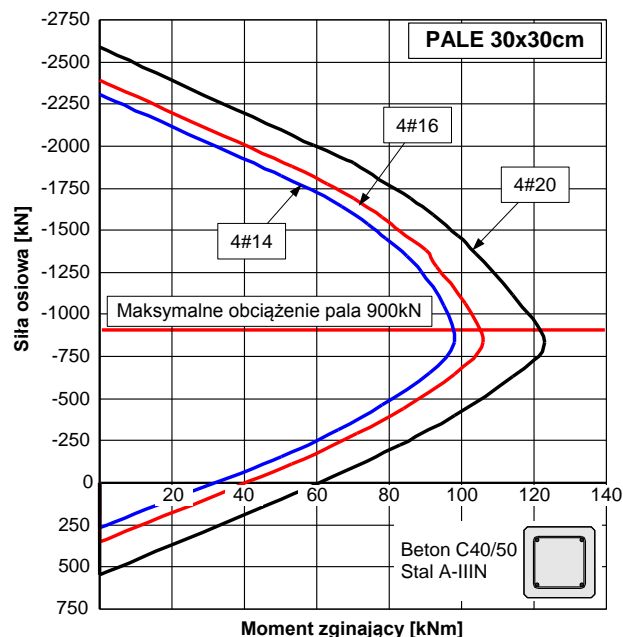
O wymaganej powierzchni zbrojenia w prefabrykatkach palowych decydują zwykle stany technologiczne odpowiadające schematom transportu pala w fazie produkcji i instalacji prefabrykatów.

Krytyczne pod tym względem są:

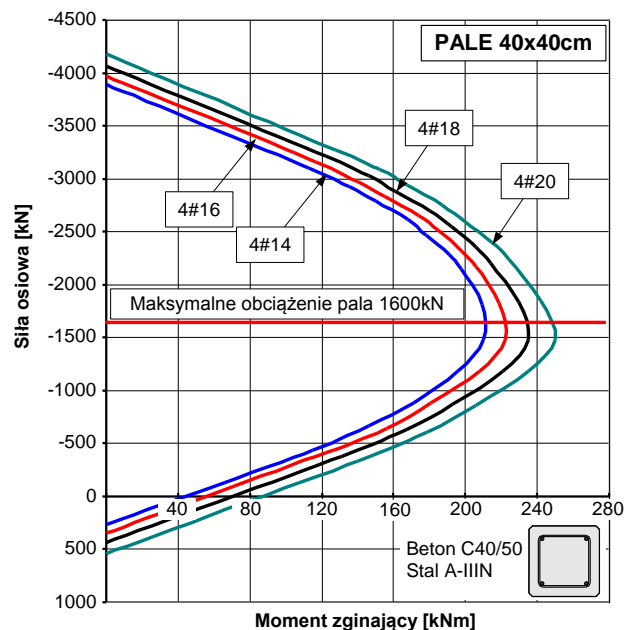
- wyciąganie prefabrykatu pala z formy (beton C16/20) oraz
- podnoszenie prefabrykatu pala do kafara (beton klasy C40/50 lub wyższej).

⁷ Przyjęto jako 0,2% powierzchni przekroju betonowego

⁸ Przyjęto jako 4% powierzchni przekroju betonowego



Wykres 1. Nośności trzonu pały 0,3x0,3m TYP 4 przy ściskaniu mimośrodowym wg [24]



Wykres 2. Nośności trzonu pały 0,4x0,4m TYP 4⁹ przy ściskaniu mimośrodowym wg [24]

Składowanie pali powinno odbywać się na podkładach umieszczonych, co najmniej w miejscach haków transportowych lub na poziomej, równej powierzchni. Na placu budowy najlepiej pale składać w jednej warstwie na pryzmach uformowanych z gruntu.

Warunki pracy pały w większości fundamentów palowych (poza obciążonymi znacznymi siłami poziomymi) są bardziej korzystne od osiągniętych w fazach technologicznych pracy prefabrykatu palowego, tzn. podczas wyciągania z formy, transportu i wbijania.

8. Wbijanie pali prefabrykowanych przy użyciu kafarów z młotami wolnospadowymi

8.1 Informacje ogólne

Roboty palowe prowadzone są przez kierownika robót palowych i zespoły robocze posiadające odpowiednie uprawnienia i doświadczenie. Ze względu na gabaryty kafarów i ciężary instalowanych elementów roboty palowe należy zaliczyć do niebezpiecznych i wymagających dużego doświadczenia zarówno od robotników, jak i osób kierujących robotami. Bezwzględnie w trakcie robót palowych należy przestrzegać wszystkich zasad bezpieczeństwa i higieny pracy. Teren prowadzenia robót palowych powinien być odpowiednio oznaczony i zabezpieczony przed dostępem osób postronnych.

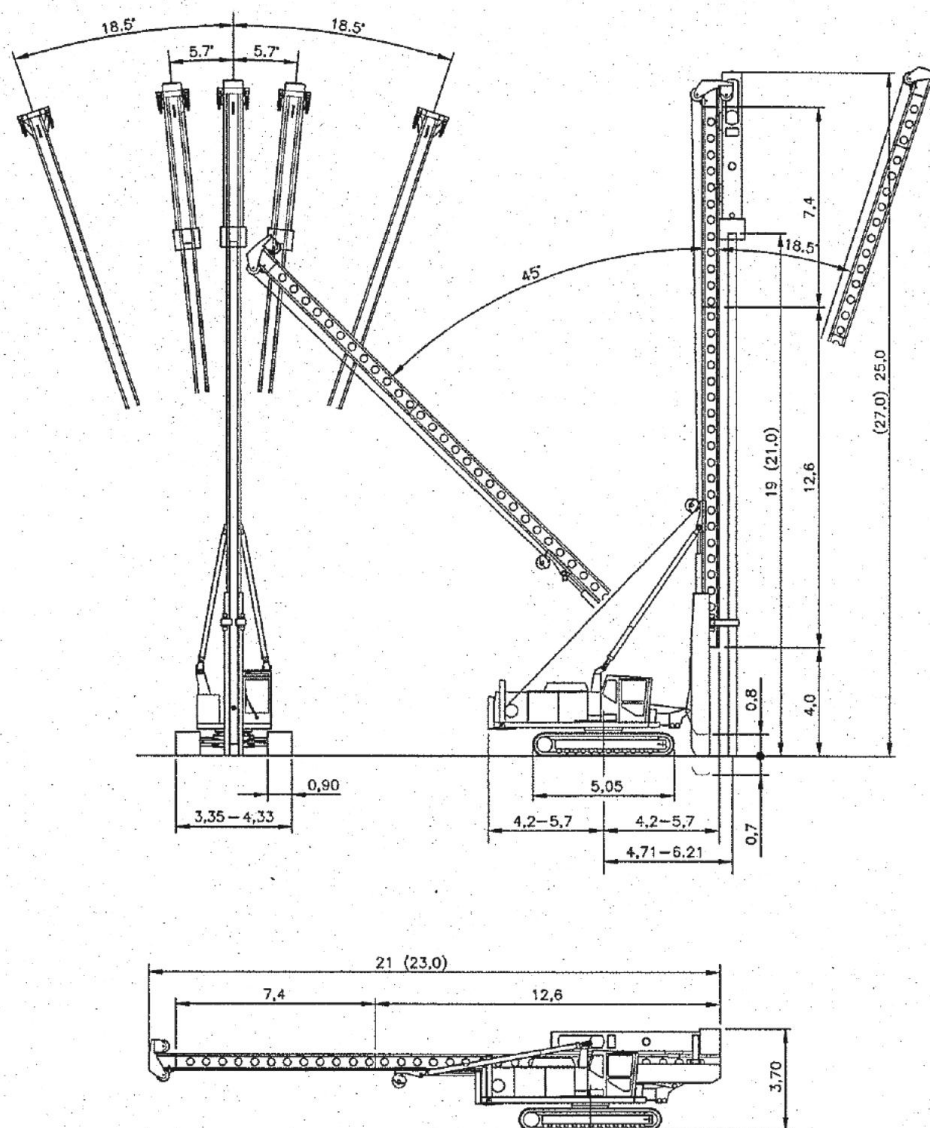
W skład najmniejszego zespołu realizującego roboty palowe wchodzi kierownik robót palowych oraz obsługa kafara: operator i pomocnik. W przypadku większych realizacji odpowiednio zwiększa się liczbę kafarów wraz z obsługą.

8.2 Sprzęt do wbijania pali

Wykorzystanie do instalacji pali prefabrykowanych kafarów z młotami wolnospadowymi to najstarsza i jedna z najbardziej niezawodnych, skutecznych i ekonomicznych metod instalacji pali wbijanych. Swobodne opadanie młota wzdłuż masztu kafara minimalizuje straty energii, która prawie w całości przekazywana jest na instalowany pał. Wysoko wydajne młoty wolnospadowe osiągają sprawność bliską 1,0. W analizach (np. we wzorach dynamicznych) należy przyjmować sprawność młotów wolnospadowych na maksymalnym poziomie ok. 0.95.

⁹ Odpowiednikiem zbrojenia 4#20mm jest układ 12#12mm.

Każdy kafar posiada opisane w karcie technicznej parametry, które definiują jego przydatność do realizacji określonego typu robót palowych. Poniżej na schemacie pokazano przykład karty technicznej kafara Junttan PM 20 LC.



Rys. 17. Wyciąg z karty technicznej kafara Junttan PM 20LC

Podane w karcie technicznej kafara Junttan PM20 LC informacje (Rys. 17) pozwalają wywnioskować, że kafar ten może wbić pale pionowe i pochylone maksymalnie 1:1 (45°) „na siebie” oraz o nachyleniu 18,5° „pod siebie”. Istnieje również możliwość pochylenia masztu na boki do 18,5° oraz opuszczenia masztu pod poziom platformy roboczej o 0,7m. Maksymalna wysokość masztu dla tego typu kafara wynosi 27,0m, a długość czynna z uwzględnieniem długości młota wynosi 19,0m (typowa) lub 21,0m (maksymalna). Na powyższe informacje należy nałożyć parametry pali (przekrój i długość), przewidziane w projekcie nachylenia pali oraz ciężar młota, aby ostatecznie zdecydować o możliwości wykorzystania kafara dla konkretnej realizacji. Nie bez znaczenia dla sposobu realizacji robót są również: ciężar kafara i jego gabaryty w pozycji transportowej i operacyjnej, jakość platformy roboczej, drogi dojazdowe, maksymalne spadki terenu, itp.

8.3 Prace przygotowawcze

Przed przystąpieniem do instalacji pali należy:

- dostarczyć pale na budowę (w pierwszej kolejności pale do próbnych obciążeń, a następnie pale

- docelowe);
- rozładować je i zapewnić właściwe warunki składowania;
- sprawdzić jakość platformy roboczej;
- przeprowadzić prace geodezyjne, które mają na celu wyznaczenie i oznaczenie na gruncie w sposób trwały lokalizacji pali.

Do oznaczenia pozycji pali na gruncie wykorzystuje się najczęściej paliki drewniane lub stalowe pręty z końcówką wystającą z gruntu pomalowaną transparentną farbą. W przypadku pali pionowych pozycja palika wyznacza dokładnie lokalizację pala. W przypadku pali pochylonych palik wyznacza lokalizację przecięcia osi pala z poziomem platformy. Poprawkę wynikającą z aktualnego poziomu platformy wyznacza się na budowie na podstawie wyników pomiarów niwelacyjnych platformy i informacji zawartych w dokumentacji projektowej. Należy pamiętać, że dokumentacja projektowa podaje lokalizację pala w planie najczęściej na poziomie spodu przyszłego zwieńczenia.

8.4 Wbijanie pali

Jeżeli w projekcie palowania nie określono inaczej to pale należy wbijać zachowując następujące tolerancje geometryczne zgodnie z [22]:

- położenie w planie pali pionowych i ukośnych mierzone w poziomie spodu zwieńczenia:
 - na łądzie: $e \leq 0,1\text{m}$;
 - na wodzie: zgodnie z projektem wykonawczym;
- pochylenie pali pionowych $i \leq i_{max} = 0,04$ (0,04m/m);
- pochylenie pali ukośnych $i \leq i_{max} = 0,04$ (0,04m/m);

gdzie i oznacza tangens kąta między projektowaną, a rzeczywistą osią pala.

Ponadto, o ile w dokumentacji projektowej nie określono inaczej, obowiązują następujące tolerancje wysokościowe instalacji pali:

- rzędna głowicy pala po rozkuciu/obciążeniu $\pm 3\text{cm}$;
- przekrój pala $-5/+8\text{mm}$.

Kolejnym wymaganiem, które musi zostać jasno sformułowane w projekcie, jest wymaganie osiągnięcia projektowanej rzędnej spodu pala (np. w przypadku zagrożenia podmyciem, pali wyciąganych itp.) lub tolerancji jej osiągnięcia. Dokładność położenia spodu pala z reguły nie powinna być definiowana w mniejszym zakresie niż $+10/-50\text{cm}$. Projektant powinien w projekcie określić minimalne wymagane zagłębienie pala. Może ono z jednej strony wynikać np. z wyznaczonej głębokości podmycia podpory nurtowej mostu lub/i wymaganiem osiągnięcia przez fundament zastępczy minimalnej nośności lub/i minimalnego zagłębienia zapewniającego ograniczenie osiadań do wymaganego poziomu.

Geometryczne odchyłki wykonania pali należy uwzględnić w projekcie palowania. Jeżeli określone odchyłki zostaną przekroczone, to należy zbadać zakres możliwego przeciążenia jakiegokolwiek elementu konstrukcyjnego, a w razie konieczności podjąć odpowiednie działania naprawcze. Decyzję w tym zakresie podejmuje projektant na podstawie analizy fundamentu z uwzględnieniem rzeczywistych odchyłek wykonawczych poszczególnych pali. Dopiero negatywna opinia projektanta stanowi podstawę do odrzucenia pala, jako wykonanego nieprawidłowo. Dzieje się tak dlatego, że odchyłki pojedynczych pali nie mają zwykle znaczącego wpływu na prawidłową pracę całego fundamentu palowego złożonego ze znacznej liczby pali. Jeżeli są wymagane lub dopuszczone odchyłki geometryczne inne niż podane w projekcie lub normie [22], to należy je uzgodnić przed rozpoczęciem robót.

Przed przystąpieniem do wykonania palowania zasadniczego należy wbić pale do próbnych obciążeń (badane i kotwiące). W trakcie wbijania pali do testów należy na całej ich długości odnotować poziomy zagłębienia w gruncie i odpowiadające im wpędy pali lub ilość uderzeń na 0,2m zagłębienia pala.

Zaleca się, aby w przypadku wszystkich pali energia przekazywana przez urządzenie wbijające była tak dobrana, aby zostały spełnione następujące wymagania:

- maksymalne obliczone naprężenia ściskające nie było większe od $0,8 \times$ charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w czasie wbijania;
- maksymalna obliczona siła rozciągająca nie była większa od $0,9 \times f \times A$, gdzie f - charakterystyczna granica plastyczności zbrojenia, A - pole przekroju zbrojenia.

Jeżeli podczas wbijania są mierzone naprężenia w palu to ich wartości mogą być o 10% większe

od podanych wyżej i przyjętych na podstawie obliczeń.

Przy ocenie naprężeń od wbijania szczególną uwagę należy zwrócić na przypadek przebijania pałami warstwy mocnej podścielonej warstwą gruntów słabych, gdyż wówczas mogą w pały wystąpić duże naprężenia rozciągające.

O ile w dokumentacji projektowej nie określono inaczej:

- w trakcie palowania zasadniczego pały zaleca się wbijać:
 - zaczynając od pał wewnętrznych i kończąc na pałach zewnętrznych w przypadku gruntów zagęszczonych lub
 - zaczynając od pał zewnętrznych w kierunku wewnętrznych w przypadku gruntów słabo zagęszczonych.
- o ile w dokumentacji projektowej nie określono inaczej to przyjmuje się, że:
 - bezpośrednio po wbiciu wierzchy głowicy pały powinny znajdować się na poziomie +0,6m w stosunku do spodu zwieńczeń;
 - głowice należy rozkuć na długości 0,55m do poziomu +0,05m w stosunku do spodu zwieńczenia.

W przypadku zsuwania się pały w projektowanym położeniu w początkowej fazie wbijania, należy pałę wyciągnąć i wbić ponownie. Gdy pała uzyska prowadzenie w gruncie sprawdza się współosiowość pały i młota oraz zachowanie zaprojektowanego kierunku wbijania. Po ewentualnym wprowadzeniu poprawki położenia można przystąpić do właściwego wbijania.

Początkowo pały wbija się spuszczać młot z małej wysokości i wprowadzając korekty położenia pały. Po doprowadzeniu spodu pały w grunt nośny i uzyskaniu prowadzenia pały w gruncie, wbijanie należy kontynuować przy wysokości spadu młota zgodnej z wartością przyjętą do wyznaczenia wępu pały (osiągnięcie zagłębienia pały serią 10 uderzeń młota o znanej masie lub ilość uderzeń młota dla uzyskania 0,2m zagłębienia pały) aż do uzyskania projektowanej rzędnej lub spełnienia kryterium wępu. Uzyskane wyniki odnotowuje się w metryce pały.

Skoki (energiję) młota należy zmniejszyć po wbiciu pały do przewarstwień twardej gliny, bardzo zagęszczonego drobnego piasku, głazów, dużych otczaków itp., gdy powyżej zalegają grunty słabe. W tych warunkach może nastąpić podłużne zginanie pały szczególnie niebezpieczne przy silnych uderzeniach młota.

W celu ochrony głowicy pały wymaga się umieszczenia na nich kołpaków. Głównym zadaniem kołpaków jest rozłożenie na cały przekrój poprzeczny głowicy obciążeń przekazywanych przez młot, zmniejszenie naprężeń stykowych i zabezpieczenie przed miejscowymi wybozeniami głowicy. W przypadku uszkodzenia głowicy pały należy przerwać wbijanie, a uszkodzony odcinek odciąć. W przeciwnym przypadku rosną straty energii, skuteczność wbijania maleje, a uszkodzenie może się rozprzestrzenić dalej wzdłuż pały.

Nie należy za wszelką cenę dążyć do pograżenia pały na projektowaną rzędną. Dla pał prefabrykowanych wbijanych, dla których w projekcie nie sformułowano wymagania osiągnięcia projektowanej rzędnej spodu pały, jako kryterium jego prawidłowego wykonania przyjmuje się:

- osiągnięcie projektowanej rzędnej spodu pały lub
- osiągnięcie przez pałę wymaganej nośności.

Zatem, po osiągnięciu dużych oporów wbijania należy proces wbijania zakończyć ponieważ jego kontynuowanie grozi uszkodzeniem lub zniszczeniem trzonu pały. Za graniczną wartość minimalnego wępu uznaje się zwykle 4mm, czyli maksymalnie 50 uderzeń młota na 0,2m pograżenia pały przy dużych wysokościach spadu młota rzędu 0,8-1,0m. Poniżej tej wartości wępu lub przy większej liczbie uderzeń pałę doznaje praktycznie wyłącznie odkształceń sprężystych bez postępu w pograżaniu w grunt.

Jak pisał A. Jarominiak i inni [2], cytując innego autora: „czasami inżynier zgadza się na publiczne wychłostanie niewinnego pały, ale to z pewnością nie przynosi chluby jego dyplomowi”.

Jeżeli wymagania osiągnięcia rzędnej projektowanej spodu pały zostało określone w projekcie, przed rozpoczęciem palowania zasadniczego przeprowadza się:

- szczegółową analizę warunków gruntowych oraz
- próbę wbijania (przed palowaniem lub najczęściej w trakcie wbijania pały kotwiących do próbnego obciążenia statycznego/dynamicznego).

W oparciu o wyniki prób i analiz kierownik robót palowych podejmuje decyzję o:

- kolejności wbijania pali (o ile ta nie została określona w projekcie);
- potrzebie i sposobach wspomagania wbijania (np. podwiercanie, popłukiwanie, stosowanie pali pilotujących itp.).

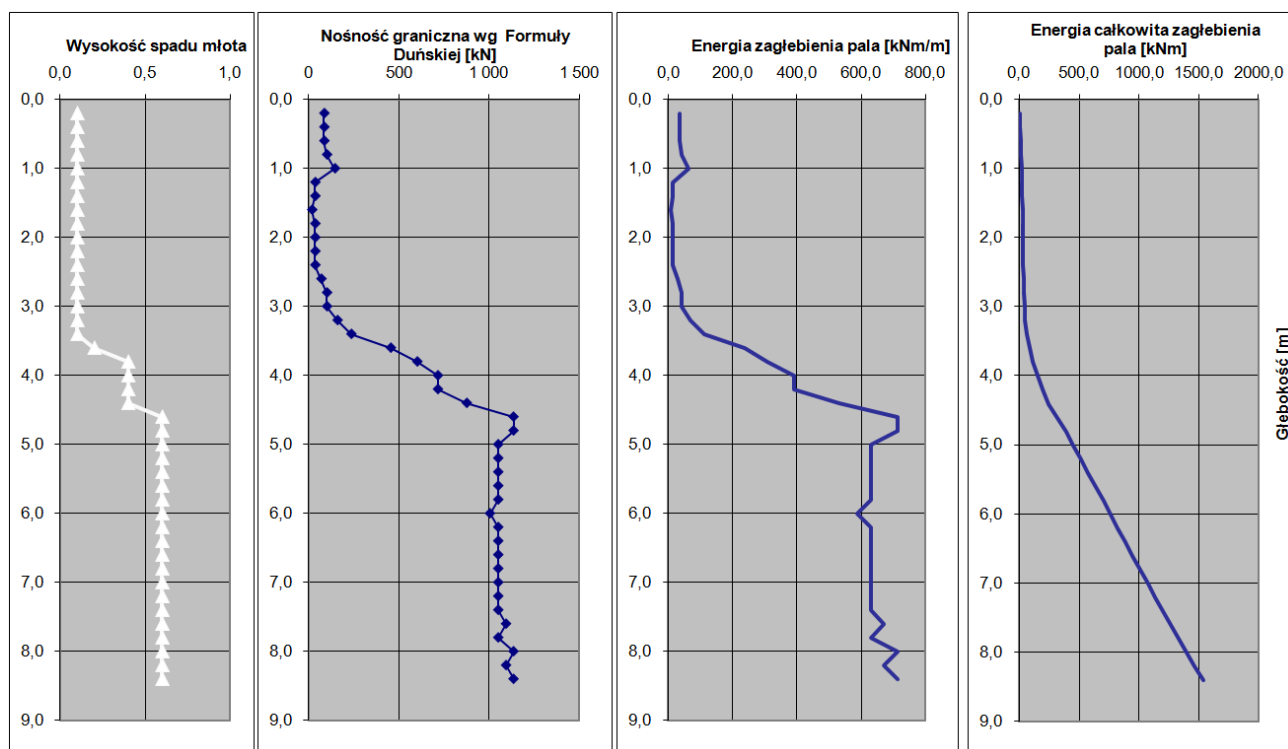
Dla każdego pala na ostatnich 3÷4 metrach wbijania prowadzi się kontrolę wpędów lub/i zliczanie ilości uderzeń młota na 0,2m pograżenia pala. Wyniki pomiarów/obserwacji zapisuje się w metryce pala. Wszystkie pale mają prowadzone metryki (Rys. 18). Większość współczesnych kafarów wyposażona jest w urządzenia służące do automatycznego sporządzania metryki wbijanego pala. Urządzenia te pozwalają na łatwą, masową analizę porównawczą nośności wszystkich pali w fundamencie np. z wykorzystaniem formuły dynamicznej (formuły duńskiej).

BUDOWA: PROJECT:	WDR1 - 7 prawa	UMOWA NR: CONTRACT No.:	210 210
ZAMAWIAJĄCY: EMPLOYER:	PPRM		
ciężar młota: hammer weight:	60 kN		
przekrój poprzeczny pala: pile cross section:	40 x 40	rysunek nr: drawing No.:	
typ pala: pile type:	prefabrykowany żelbetowy z betonu B 50.	palownica: rig:	Hitachi KH125
data: date:	06.06.2007	poziom gruntu: ground level	3,7 m n p m
		kierownik budowy: site manager:	Tomasz Pilarski

nr pala pile No.	długość pala pile length	kąt nachylenia inclination angle	wys. spadu młota drop height	ilość uderzeń na 20 cm zagłębienia pala amount of hits for 20 cm of pile's immersion					głęb. depth	poziom stopy pala level of pile's foot	uwagi remarks
				20	40	60	80	100			
	(m)	(°)	(m)						(m)	(m n.p.m.)	
2	6+11	0°	0.2	7	7	8	8	8	1		pal testowy
			0.2	8	8	8	9	9	2		
			0.2	10	10	10	10	10	3		
			0.2	10	10	11	11	10	4		
			0.2	10	10	11	11	11	5		
			0.2	12	12	11	12	12	6		
			0.2	12	12	13	13	13	7		
			0.2	13	13	13	13	13	8		
			0.4	9	10	10	10	10	9		
			0.4	11	11	11	12	13	10		
			0.4	14	14	14	15	15	11		
			0.6	11	11	12	12	12	12		
			0.6	13	14	14	15	15	13		
			0.6	17	18	20	21	22	14		
			0.8	18	18	19	19	21	15		
			0.8	21	22						
			0.9			19	19	20	16		
			0.9	21	23	25	25	26	17	-12.97	

Tomasz Pilarski
OPRACOWAŁ
PREPARED BY

Rys. 18. Przykładowa metryka pala



Rys. 19. Przykład analizy metryki pała

8.5 Roboty wykończeniowe i porządkowe

Po zakończeniu wbijania nadmiar długości wynikający z niedobicia pała na przewidywaną rzędną zostaje obcięty, a głowica pała zostaje rozkuta do projektowanego poziomu. Pał zostaje nacięty piłą do betonu po obwodzie na głębokość ok. 0,02m na poziomie projektowanej głowicy pała po rozkuciu. Najczęściej poziom rozkucia podawany jest w postaci odległości od spodu przyszłego zwieńczenia/góry chudego betonu, która zazwyczaj jest równa ok. 0,05m. Typowa długość rozkucia pała jest równa 0,55m, co odpowiada całkowitej długości pała w zwieńczeniu równej 0,6m i długości odkutego pręta zbrojenia głównego równej 0,50m. Długość rozkucia pała zależy od schematu jego pracy: w przypadku pali osiowo wciskanych może być mniejsza, nawet „zerowa”, a w przypadku pali rozciąganych lub rozciąganych lub wciskanych (np. fundamenty turbin wiatrowych) większa. Stosowane są również rozwiązania w których głowica pała wpuszczana jest na odpowiednią głębokość w zwieńczeniu bez rozkuwania. Spirala zbrojeniowa zostaje przecięta na długości głowicy prefabrykatu podlegającej rozkuciu. W pierwszej kolejności odkuwa się pręty zbrojenia głównego, a następnie usuwa się niezbrojony rdzeń betonowy. Pręty zbrojenia głównego wystające ponad trzon pała zostawia się proste lub lekko odgięte, jeżeli tak przewidziano w dokumentacji projektowej. W oczepie zostaną zabetonowane jedynie pręty zbrojenia głównego - spirala zbrojeniowa po rozkuciu głowicy zostaje usunięta.

Plac budowy po zakończeniu robót pałowych podlega uporządkowaniu, a odpady powstałe w wyniku rozkucia głowic podlegają w 100% utylizacji.

9. Badania

9.1 Informacje ogólne

W ramach realizacji robót pałowych zwykle oferowany jest przez wykonawców komplet usług związanych z wykonaniem badań. Związane jest to ze specyfiką określonej technologii fundamentowania oraz koniecznością sprawnej realizacji robót.

Wszelkie badania powinny być prowadzone na podstawie zatwierdzonych projektów lub programów badań opracowanych przez osoby posiadające stosowne uprawnienia i odpowiednie doświadczenie. Projekty lub programy podlegają zatwierdzeniu przez nadzór budowy. Badania

przeprowadza zwykle wykonawca robót lub firma/jednostka przez wykonawcę wynajęta przy obecności/udziale nadzoru. Interpretację wyników badań powinna przeprowadzić osoba posiadająca odpowiednie uprawnienia i doświadczenie. W przypadku wątpliwości dotyczącej wyników badań lub ich interpretacji należy każdorazowo powoływać niezależnego eksperta w dziedzinie badań, który może badania powtórzyć lub/i przeprowadzić ponowną interpretację ich wyników.

Badania towarzyszące zastosowaniu pali prefabrykowanych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- badania pali oraz
- badania dotyczące procesu ich instalacji.

Badania dotyczące procesu wbijania pali prefabrykowanych mogą dotyczyć:

- monitoringu pali lub
- oddziaływania tego procesu na otoczenie.

Monitoring wbijania polega na bieżącej obserwacji procesu pogrążania pala. Zapisy monitoringu wbijania znajdują się w metryce pala, gdzie odnotowywane są wszelkie zdarzenia towarzyszące jego instalacji. W wyjątkowych przypadkach prowadzi się ciągłą obserwację procesu wbijania wykorzystując analogiczne metody jak przy dynamicznych badaniach nośności pali (patrz niżej).

Monitoring oddziaływania wbijania na otoczenie może polegać na:

- obserwacji terenu robót oraz istniejącej infrastruktury z inwentaryzacją jej stanu przed i po zakończeniu robót;
- monitoringu drgań;
- monitoringu hałasu.

Monitoring oddziaływania wbijania pala na otoczenie obejmuje także aktywną akcję informacyjną wśród lokalnej społeczności dotyczącą:

- planowanych robót palowych,
- ich celu i zakresu,
- czasu trwania robót palowych;
- stosowanych sposobów kontroli i zabezpieczenia przed ewentualnymi negatywnymi skutkami ich prowadzenia.

Ten rodzaj monitoringu społecznego jest w naszym kraju lekceważony, czego przykładem mogą być liczne, wstrzymane inwestycje komunikacyjne. Ma on szczególnie znaczenie w przypadku pali wbijanych, w stosunku do których zakorzenionych zostało w świadomości ludzi wiele mitów. Ich podstawowym źródłem jest brak wiedzy oraz nieodpowiedzialne stosowanie tej technologii w przeszłości.

Pale prefabrykowane udaje się świadomie instalować w sąsiedztwie istniejącej infrastruktury technicznej, zabytków, budynków mieszkalnych, itp., a nawet wewnątrz obiektów. Decyzja o palowaniu w takim przypadku jest każdorazowo poprzedzona:

- wizją lokalną;
- analizą warunków gruntowych,
- analizą i oceną ryzyka,
- analizą kosztów ewentualnych dodatkowych zabezpieczeń itp.

Poniżej na fotografiach (Fot. 16) przedstawiono przykłady instalacji pali, wydawałoby się, w ekstremalnych lokalizacjach. Pełna kontrola procesu wbijania (np. monitoring drgań) i świadome kształtowanie jego przebiegu (np. zmiany wysokości i częstości spadu młota), pozwalają na skuteczną, szybką i bezpieczną realizację robót palowych w takich warunkach. Podstawą sukcesu jest wiedza i w pełni świadome działanie.



Fot. 16. Przykłady wbijania pali przy istniejących budynkach

Badania pali po zainstalowaniu można podzielić na dwie kolejne grupy:

- badania nośności pali;
- badania jakości wykonanych pali.

W przypadku pali prefabrykowanych dominujące znaczenie w tej grupie mają badania nośności, ponieważ pale tego typu są mało podatne na uszkodzenia typowe dla innych rodzajów pali (tj. brak ciągłości, ubytki przekroju). Badania jakości pali sprowadzają się do kontroli wizualnej prefabrykatu przed wbiciem i obserwacji samego procesu wbijania. Jeżeli wymagane jest przeprowadzenie badań ciągłości pali to należy je przeprowadzać przy wysokich naprężeniach. Niskoenergetyczne metody badania ciągłości pali (np. PIT) nie dają z reguły wiarygodnych wyników w przypadku pali prefabrykowanych.

9.2 Badania nośności pali prefabrykowanych

Podstawowym rodzajem badań wykonywanych w trakcie realizacji robót palowych przy użyciu pali prefabrykowanych są badania nośności pod próbnym obciążeniem statycznym wykonywanym metodą belki odwróconej i badania dynamiczne przy wysokich naprężeniach. Obydwa rodzaje badań umożliwiają uzyskanie podobnych ogólnych informacji na temat nośności pali. Różnią się one między sobą wydajnością oraz zakresem możliwych do uzyskania wyników szczegółowych.

Od strony formalnej obydwa rodzaje badań mogą być w Polsce stosowane w oparciu o aktualne Polskie Normy. W przypadku badań pod próbnym obciążeniem statycznym najczęściej wykorzystywana jest procedura szczegółowo opisana w normie [19]. W przypadku badań dynamicznych dokumentem odniesienia jest norma [25] wraz z odwołaniem do szczegółowej procedury prowadzenia badań dynamicznych nośności pali opisanej w normie [16]. Warunkiem wykonywania badań nośności pali pod próbnym obciążeniem dynamicznym jest wykonanie min. jednego próbnego obciążenia statycznego w ramach kontraktu (badanie cechujące metodę dynamiczną) lub posiadanie tzw. doświadczeń porównywalnych z badań statycznych wykonywanych w zbliżonych warunkach gruntowych. Profesjonalne firmy zajmujące się fundamentowaniem wykonują rokrocznie kilkaset badań każdego rodzaju, więc generalnie nie mają problemu ze znalezieniem przykładów badań wykonanych w warunkach zbliżonych. W przypadku małych firm o ograniczonym doświadczeniu w badaniu nośności pali podstawową metodą jej określania powinny być badania statyczne lub badania statyczne uzupełnione badaniami dynamicznymi.

Należy w tym miejscu przypomnieć, że zarówno norma [19], jak i dobra tradycja wymagają wykonania próbnych obciążeń w przypadku przekroczenia 25szt. pali w fundamencie obiektu. Zwykle jedno próbne obciążenie wykonywane jest dla 26÷50szt. pali oraz dwa próbne obciążenia dla 51÷100szt. pali. Obowiązuje również zasada przeprowadzania dla każdej następnej rozpoczętej setki pali kolejnego próbnego obciążenia. W praktyce napotyka się, szczególnie w przypadku fundamentów obiektów mostowych opartych na wielu podporach, różną interpretację wymaganej liczby badań w zależności od ilości pali w fundamencie lub/i pod całym obiektem. Zdarza się, że analizuje się odrębnie fundament każdej podpory i ilość pali w niej docelowo instalowane lub ilość pali pod całym obiektem. W skrajnych przypadkach bardzo duży obiekt mostowy mógłby teoretycznie zostać „zapalowany” bez próbnych obciążeń lub ze stosunkowo małą ich liczbą zupełnie nieadekwatną jego rangi. Planując próbne obciążenia należy pamiętać, że nie tylko liczba pali jest wyznacznikiem konieczności ich wykonania. Równie ważne jest zróżnicowanie warunków gruntowych oraz cel jakiemu wyniki z próbnych obciążeń mają służyć. Z doświadczeń autora wynika brak możliwości zdefiniowania jednej reguły opisującej wszystkie możliwe przypadki. Dla przywołanego przykładu mostu wieloprzęsłowego rozsądnym wydaje się wykonanie po jednym badaniu statycznym w lokalizacjach charakteryzujących się znacząco innymi warunkami gruntowymi, a ponadto wykonanie min. jednego badania dynamicznego w każdym oddzielnym fundamencie.

Tabela 2. Terminy wykonywania próbnych obciążeń pali [19]

Rodzaj pali	Rodzaj gruntu		
	niespoiste	nawodnione piaski drobne, pylaste i gliniaste oraz pyły i gliny piaszczyste	spoiste
Wbijane	7 dni	20 dni	30 dni
Wykonywane w gruncie	30 dni	30 dni	30 dni

W tabeli powyżej podano wymagane czasy oczekiwania na przeprowadzenie próbnego obciążenia statycznego/dynamicznego dla pali prefabrykowanych wbijanych oraz pali wykonywanych w gruncie. Terminy podane w tabeli dla pali wbijanych mają na celu zapewnienie obiektywnej oceny nośności pali w zależności od rodzaju gruntu. Mają one ścisły związek z obserwowanym w praktyce przyrostem nośności pali w czasie (ang. „set-up”) zależnym głównie od rodzaju gruntu odpowiedzialnego za nośność pala. W przypadku gruntów grubo i średnioziarnistych przyrosty nośności pali wbijanych nie przekraczają zwykle 20% i z reguły mogą być pominięte. Zupełnie inna sytuacja jest w gruntach drobnoziarnistych nawodnionych i spoistych, w których obserwuje się długotrwałe przyrosty nośności dochodzące nawet do 200% nośności początkowej pala mierzonej bezpośrednio po wbiciu.

Projektant na podstawie wyników wbijania pali testowych może podjąć decyzję o skróceniu terminu oczekiwania na wykonanie badań nośności mając na uwadze fakt, że w zdecydowanej większości przypadków następuje przyrost nośności w czasie. Termin ten zdaniem autora w żadnym przypadku nie powinien być krótszy niż 5 dni od daty wbicia pala. W przypadku negatywnego wyniku takiego przyspieszonego próbnego obciążenia należy je powtórzyć w pierwotnie przewidywanym terminie. Nie należy przyspieszać badań w przypadku palowania w tzw. gruntach wrażliwych o bardzo małej nośności i nietrwałej strukturze. Ponadto w niektórych przypadkach obserwuje się istotne przyrosty nośności pali po upływie okresów czasu przekraczających znacznie wymagane maksymalnie w normie [19] 30 dni.

Czas oczekiwania na przeprowadzenie próbnego obciążenia nie oznacza braku możliwości kontynuacji robót palowych. Ich prowadzenie jest jednak możliwe wyłącznie na własną odpowiedzialność wykonawcy, który w ten sposób może, dla przyspieszenia realizacji robót, wykorzystać nabyte doświadczenie.

9.2.1 Statyczne badania nośności pali metodą belki odwróconej

Statyczne badania nośności pali metodą belki odwróconej są wciąż najlepiej znaną i najbardziej wiarygodną metodą określania nośności. W niniejszym opracowaniu poświęcono im stosunkowo mało uwagi ze względu na dostępne szczegółowe opisy procedury ich przeprowadzania, interpretacji wyników oraz zawartości raportu z badań podane w normie [19].

Warto wspomnieć o kilku zagadnieniach związanych bezpośrednio z technologią samych pali

prefabrykowanych. Ze względu na znaczącą liczbę pali w fundamencie zwykle nie ma problemu z przeprowadzeniem badania przy wykorzystaniu pali docelowych jako pala badanego i pali kotwiących. Projektant w projekcie palowania powinien wskazać pale przeznaczone do próbnego obciążenia i zadbać o to, aby to z jednej strony były to pale pionowe, a z drugiej znajdowały się w odpowiednich odległościach od siebie, czyli pale kotwiące min. 2,0m osiowo od pala badanego. Brak takiego układu pali w fundamencie znacznie zwiększa koszty prowadzenia badań statycznych. Pale kotwiące mogą być wykorzystywane jako pale docelowe w fundamencie pomimo nadmiernych uniesienia w trakcie próbnego obciążenia. Wynika to z możliwości ich powtórnego dobitcia w trakcie palowania zasadniczego. Do próbnych obciążeń statycznych wykorzystywany jest układ lekkich belek stalowych pokazany na zdjęciu (Fot. 17). Na kolejnym zdjęciu (Fot. 18) pokazano uzbrojoną w urządzenia pomiarowe głowicę badanego pala oraz siłownik hydrauliczny w trakcie próbnego obciążenia statycznego. Ze względu na niewielkie gabaryty i ciężary układu belek do próbnego obciążenia statycznego można je stosunkowo szybko zmontować. Przeciętnie można wykonać jedno próbne obciążenie statycznie dziennie przy użyciu jednego kompletu belek. Przykładowy wynik próbnego obciążenia statycznego w postaci zależności obciążenie-osiadanie pokazano na rysunku (Rys. 20). Z wykresu można określić nośność i podatność pala dla poszczególnych poziomów obciążenia.

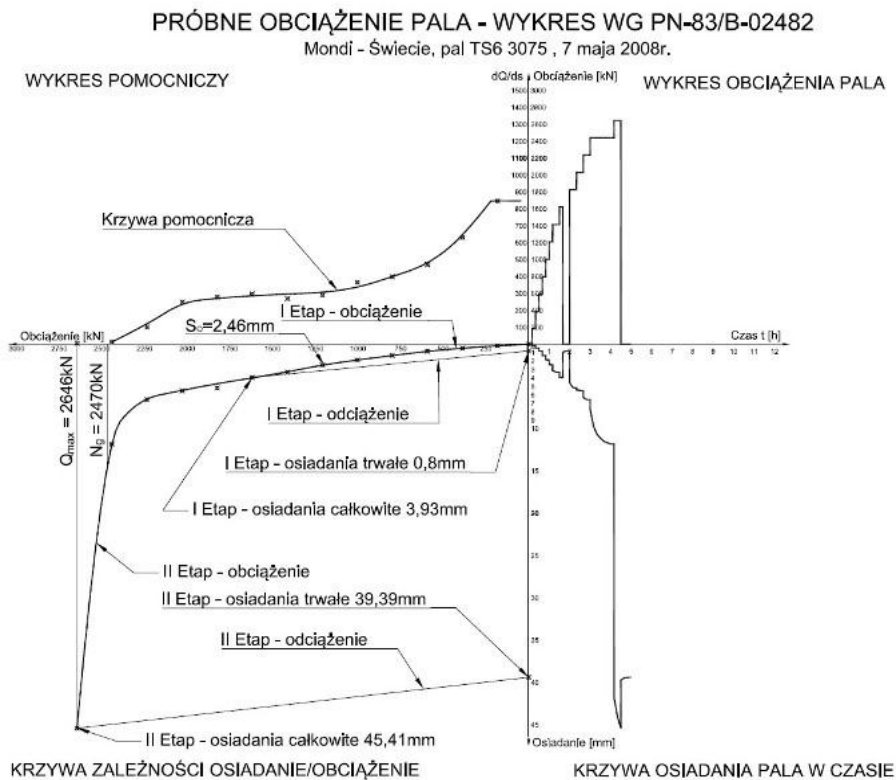
Z reguły w trakcie próbnego obciążenia statycznego rzadko udaje się określić nośność graniczną pala. Próbne obciążenie, a tym samym wykres zależności obciążenie-osiadanie kończy się na zbliżonym do poziomego odcinku krzywej. Takie wyniki związane są z bardzo częstym niedoszacowaniem nośności pali wbijanych. Wynik takiego próbnego obciążenia informuje nas, że pal ma zdecydowanie większą nośność od wyliczonej, jednak nie jesteśmy w stanie oszacować rzeczywistego zapasu nośności. Dlatego ważnym uzupełnieniem dla badań statycznych stały się badania dynamiczne, które z reguły dają informację o nośności granicznej pala.



Fot. 17. Typowe stanowisko do badania nośności pali pod próbnym obciążeniem statycznym metodą belki odwróconej

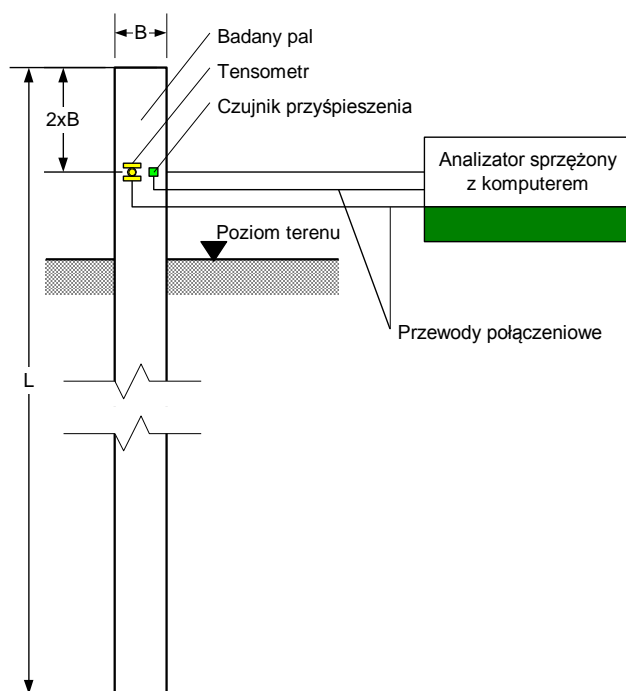


Fot. 18. Układ obciążenia (siłownik hydrauliczny) oraz układ pomiarowy (czujniki zegarowe) w trakcie próbnego obciążenia statycznego



Rys. 20. Przykładowy wynik badania nośności pala prefabrykowanego pod próbnym obciążeniem statycznym - wykres zależności obciążenie-osiedlenie

9.2.2 Badania dynamiczne nośności pali przy wysokich naprężeniach



Rys. 21. Schemat układu pomiarowego do próbnego obciążenia dynamicznego



Fot. 19. Montaż czujników do badania dynamicznego nośności pala

Obciążeniem wykorzystywanym w trakcie próbnego obciążenia dynamicznego jest młot kafara opuszczony na badany pale z określonej wysokości (Fot. 19). Dostępność kafara na budowie czyni tę metodę badań nośności szczególnie przydatną dla pali prefabrykowanych wbijanych. Dobór ciężaru młota oraz wysokości jego spadu pozostawia się do decyzji kierownika badań podjętej na podstawie analizy wpędów pala zanotowanych w dzienniku wbijania. Ciężar młota i wysokość spadu młota w trakcie testu powinny mieć wartości zbliżone do odnotowanych w dzienniku wbijania pala na ostatnim odcinku jego pograżania.

Pomiar reakcji dynamicznej pala należy zarejestrować przy użyciu układu pomiarowego (Rys. 21) złożonego z:

- tensometru – 2 szt.;
- czujnika przyspieszenia – 2 szt.;
- przewodów połączeniowych układu pomiarowego;
- analizatora sprzężonego z komputerem klasy PC.

Badanie dynamiczne pali wbijanych należy przeprowadzać w analogicznych terminach jak badania pod próbnym obciążeniem statycznym.

W trakcie badania należy wyeliminować możliwość oddziaływania na badany pale dodatkowych czynników, np. w postaci wstrząsów i drgań. Siła wymuszająca powinna być ustawiona osiowo w stosunku do pala obciążanego, ale sam pale nie musi być pionowy.


Próbnego obciążenie należy przeprowadzić w następujący sposób:

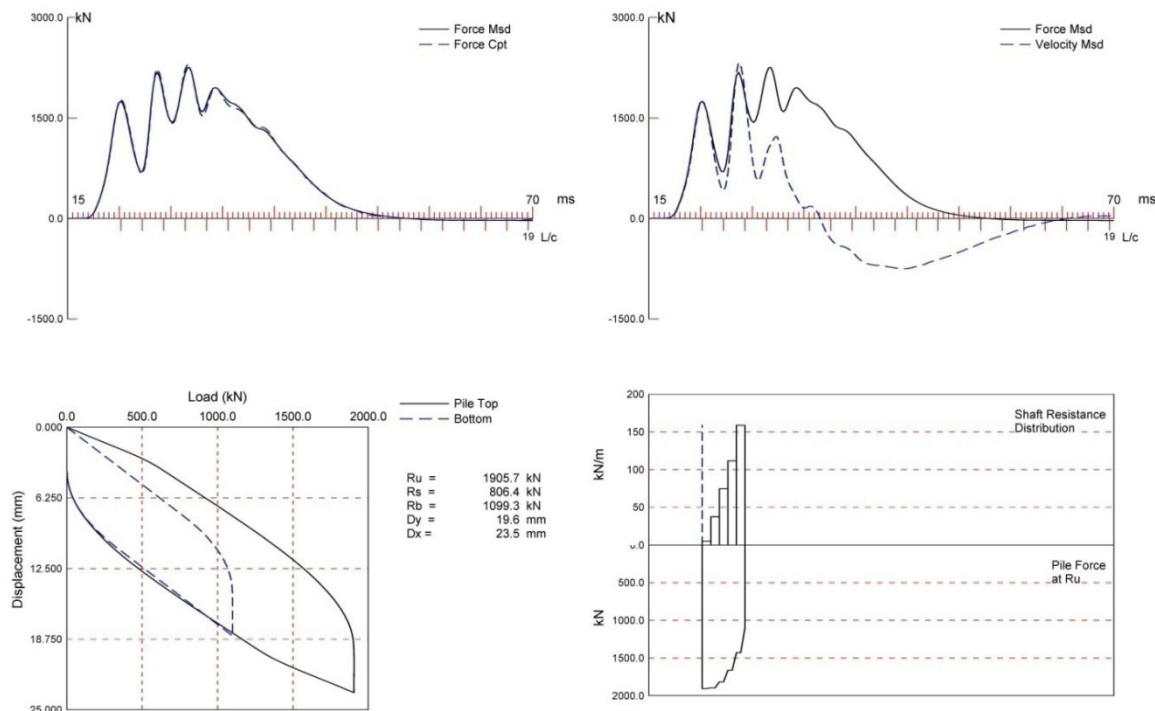
- najechać kafarem nad badany pale;
- unieść młot na wyznaczoną wysokość;
- opuścić dwa, trzy razy młot na pale badany;
- zarejestrować wyniki pomiaru odkształceń i przyspieszeń.

Pomiary w trakcie próbnego obciążenia dynamicznego polegają na zarejestrowaniu odkształceń (naprężeń) i przyspieszeń po uderzeniu młota kafara w pale badany. Pomiar odbywa się automatycznie przy użyciu skomputeryzowanego i odpowiednio oprogramowanego układu pomiarowo-rejestacyjnego.

Przykładowy wynik graficzny analizy nośności pala opracowany metodą CAPWAP pokazano na rysunku (Rys. 22).

Hala Sportowa w Białogardzie; Pile: 56; Blow: 4 (Test: 14-Apr-2008 13:24:)
Aarsleff Sp. z o. o.

15-Apr-2008
CAPWAP(R) 2006 



CAPWAP(R) 2006 Licensed to Aarsleff Sp z o o

Objaśnienia do wykresów:

- **GÓRNY LEWY** - dopasowanie krzywych siły pomierzonej (Msd) i wyliczonej (Cpt)
- **GÓRNY PRAWY** - pomierzona siłę (For Msd) i prędkość (Vel Msd). Na osi x wykresów naniesiono czas, na osi y siłę. Prędkość wykreślona jest w skali siły. Współczynnikiem proporcjonalności jest opór dynamiczny pala $Z = c\rho A$
- **DOLNY LEWY** - symulacja testu statycznego krzywą zależności osiadania od obciążenia wyliczoną na podstawie parametrów metody CAPWAP. Wykres prezentuje przemieszczenie głowicy pala Pile Top (linia ciągła) i stopy pala Bottom (linia przerywana). R_u – nośność graniczna pala, R_s – nośność graniczna poboczniczy pala, R_b – nośność graniczna stopy pala, D_y – przemieszczenie głowicy pala, dla którego pal uzyskuje nośność graniczną, punkt płynięcia, D_x – maksymalne obliczone przemieszczenie głowicy pala.
- **DOLNY PRAWY** - graficzny obraz rozkładu nośności pala na pobocznicę. Głowica pala jest w początku wykresu. Wykres nad osią x przedstawia nośność elementów obliczeniowych na pobocznicę, pod osią x siłę w palu dla obciążenia granicznego R_u .

Rys. 22. Przykładowe wykresy z raport dot. analizy nośności pala metodą pośrednią CAPWAP

Podstawowe zalety badań nośności pali metodą dynamiczną to:

- bardzo dobra korelacja z wynikami badań statycznych;
- wysoka wydajność,
- brak wykorzystywania pali kotwiących;
- możliwość wykonania badania na palach nachylonych pod dowolnym kątem;
- praktyczna gwarancja określenia nośności granicznej;
- wyniki opisujące rozkład nośności na stopę i pobocznicę oraz na długości poboczniczy.

Komplet wyników badań nośności pali (statycznych i dynamicznych) należy przekazać projektantowi w celu sprawdzenia wiarygodności modelu przyjętego do projektowania obiektu lub, w razie konieczności, wprowadzenia zmian do projektu fundamentu.

10. Dokumentacja powykonawcza

Odbiór robót palowych dokonywany jest na podstawie obserwacji poczynionych w trakcie realizacji robót oraz dokumentacji powykonawczej zawierającej:

- dokumentację projektową z naniesionymi zmianami i uzupełnieniami, dokonanymi w trakcie wykonywania robót,
- dziennik wbijania pali zawierający m.in. metryki pali;
- znak CE dla zainstalowanych pali lub deklaracje zgodności z Polską Normą, Aprobata Techniczną lub projektem indywidualnym,
- wyniki pomiarów geodezyjnych wykonywanych przez służbę geodezyjną Wykonawcy i sprawdzonych przez służbę geodezyjną Nadzoru,
- wyniki badań rutynowych i dodatkowych badań zleconych przez Nadzór oraz
- wyniki próbnego obciążenia, o ile jego przeprowadzenie jest wymagane.

Wszystkie przeprowadzone badania i próby, z których raporty zawarte są w dokumentacji powykonawczej, powinny dać wynik pozytywny. Jeżeli którekolwiek badanie lub próba dała wynik negatywny wadę należy usunąć przed ostatecznym odbiorem robót palowych.

Dokumenty stanowiące podstawę oceny i odbioru robót powinny być dostarczone przez wykonawcę i przechowywane przez co najmniej 5 lat po zakończeniu robót, a dokumenty wskazane przez nadzór powinny być dołączone do dokumentacji archiwalnej obiektu. Roboty palowe mają zazwyczaj charakter robót zanikających, więc szczególnie ważne jest rzetelne ich udokumentowanie. Elementy dokumentacji powykonawczej robót palowych które powinny zostać włączone do dokumentacji archiwalnej obiektu to:

- dokumentacja projektowa z naniesionymi zmianami i uzupełnieniami, dokonanymi w trakcie wykonywania robót,
- dziennik wbijania pali zawierający m.in. metryki pali oraz
- wyniki próbnych obciążeń.

W ogólnych warunkach kontraktu w stosunku do dokumentacji powykonawczej mogą zostać sformułowane dodatkowe wymagania szczegółowe wymagające spełnienia.

11. Nadzór

Generalnie nadzór nad robotami palowymi jest bardzo złożonym zagadnieniem ze względu na różnorodność wykorzystywanych technologii. Technologia pali prefabrykowanych na tym tle wydaje się stosunkowo prosta i łatwa do prawidłowego skontrolowania, ponieważ minimalizowany jest w niej negatywny, wyjęty spod kontroli wpływ czynnika ludzkiego na jakość wykonywanych robót.

W przypadku technologii pali prefabrykowanych należy przeprowadzić:

- ocenę wizualną prefabrykatów przed instalacją w gruncie pod kątem:
 - uszkodzeń transportowych prefabrykatów,
 - wymiarów pali;
 - zbrojenia pali;
 - zarysowania elementów żelbetowych zgodnie z wymaganiami dokumentacji projektowej, jednak nie większych niż 0,3mm;
- obserwację przebiegu wykonania robót palowych (patrz p. 8) oceniając:
 - jakość platformy roboczej;
 - sposób składowania pali na placu budowy;
 - sposób podnoszenia pali do kafara;
 - wbijanie pali;
 - prawidłowość dokumentowania robót palowych;
- sprawdzenie zgodności wykonanych robót z dokumentacją projektową, specyfikacją techniczną i uzgodnionym sposobem wykonania, m.in. w zakresie:
 - dokładności wbicia w planie i poziomie;
 - pochyleń pali;
 - długości rozkucia i zakotwienia odsłoniętych prętów zbrojeniowych;
- sprawdzenie wyników próbnego obciążenia i porównanie z wymaganiami dokumentacji

- projektowej (najczęściej projektu próbnego obciążenia);
- analizę zawartości i kompletności dokumentacji powykonawczej.

Ponadto w trakcie bieżącego nadzoru nad prowadzonymi robotami palowymi należy stosować zasady podane w poprzednich rozdziałach (np. nie żądać wbicia pala na projektowaną rzędną za wszelką cenę, gdy takiego wymagania nie sformułowano w projekcie posadowienia obiektu, nie rozliczać pali na metry bieżące, uwzględniać w rozliczeniach długość obciążenia i rozkucia pala itp.).

Warto zauważyć, że wynik próbnego obciążenia pala/pali wraz wpędami z metryk mogą posłużyć do określenia nośności wszystkich pali w fundamencie. Daje to niewątpliwą przewagę technologii pali prefabrykowanych nad wieloma innymi technologiami głębokiego fundamentowania.

Warto również zaznaczyć, że obliczenia w zakresie nośności pali w gruncie w bardzo dużym zakresie zależy od jakości przeprowadzonych na etapie projektowania badań geotechnicznych określających warunki posadowienia obiektu. Wbijaniem pali można je jedynie potwierdzić lub nie. W każdym jednak przypadku obliczenia geotechniczne mają zdecydowanie mniejszą dokładność od obliczeń elementów konstrukcyjnych ze stali, czy betonu. Dlatego należy je traktować z należyтым dystansem i weryfikować na budowie poprzez badanie nośności wykonywane w terenie. W tym kontekście wyniki próbnych obciążeń nie są jedynie kolejnym dokumentem spełniającym formalne wymogi kontraktu, lecz stają się ważnym narzędziem dla projektanta pozwalającym na weryfikację założeń przyjętych do projektowania. W uzasadnionych przypadkach należy projektantowi umożliwić weryfikację rozwiązań projektowych w oparciu o wyniki próbnych obciążeń.

Osiągnięcie 20% dokładności (najlepiej na plus) nośności projektowanej w stosunku do tej otrzymanej z próbnego obciążenia należy traktować jako sukces.

Zmiana rodzaju pali nie jest zmianą istotną, jednak decyzja w zakresie kwalifikacji zmiany każdorazowo należy do projektanta.

12. Trwałość pali prefabrykowanych

Zagadnienie trwałości pali prefabrykowanych zostało szczegółowo omówione w artykułach prof. dr hab. inż. Lecha Czarnieckiego oraz dr inż. Tomasz Piotrowskiego z Politechniki Warszawskiej zamieszczonych w czasopiśmie Materiały Budowlane i Inżynieria i Budownictwo. Elektroniczne kopie artykułów można ściągnąć ze strony: www.aarsleff.com.pl

13. Podsumowanie

Technologia żelbetowych pali prefabrykowanych pozwala na szybkie i bezpieczne wykonanie praktycznie dowolnego fundamentu palowego. Mogą o tym świadczyć liczne realizacje, które wykorzystują zakres długości prefabrykatów od 2,5m (pale ekranowe) do 45m (pale pod filarami estakady drogowej w Międzyzdrojach). Technologia, pomimo stosunkowo sędziwego wieku, ma się dobrze i rozwija zarówno w zakresie technologii produkcji prefabrykatów palowych (mieszanki samozagęszczające), robot zbrojarski, itp.), technologii wbijania (coraz nowocześniejsze kafary), jak i różnorodności metod kontroli i zastosowań. Również perspektywy na przyszłość dla technologii żelbetowych pali prefabrykowanych są w Polsce dobre. W porównaniu z innym krajami podobnej wielkości w Europie, Polska w dziedzinie fundamentowania wciąż stanowi rynek rozwijający się pod względem wielkości, choć rozwinięty pod względem technologicznym.

Niewątpliwie największą słabością odczuwalną w trakcie realizacji robót palowych jest bardzo niska jakość większości badań geotechnicznych.

14. Dokumenty i publikacje związane

14.1 Publikacje

- [1]. Gwizdała K., Kowalski J. R.: Prefabrykowane pale wbijane. Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska. Katedra Geotechniki. Gdańsk, wrzesień 2005.
- [2]. Jarominiak A. i inni: Pale i fundamenty palowe. Arkady. Warszawa 1976.
- [3]. Biernatowki K.: Fundamentowanie. Projektowanie i wykonawstwo. PWN. Warszawa 1987.
- [4]. Rosiński B.: Fundamentowanie. Arkady. Warszawa 1978.
- [5]. Rybak Cz. i inni: Fundamentowanie. Projektowanie posadowień. DWE. Wrocław 1999.
- [6]. Stiller-Szydło E.: Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego. DWE. Wrocław 2005.

- [7]. FIP Technical Report. Precast concrete piles. Thomas Telford, London 1986.
- [8]. Katalog pali prefabrykowanych Aarsleff Sp. z o.o. Promost Consulting. Rzeszów, 2004.
- [9]. Sutherland R. J. M., Humm D., Chrimes M.: Historic Concrete. Thomas Telford, 2001.
- [10]. Kosecki M.: Statyka ustrojów palowych. Zasady obliczania konstrukcji palowych metodą uogólnioną i fundamentów płytowo-palowych metoda podłoża dwuparametrowego. Szczecin 2006.

14.2 Akty prawne, normy i wytyczne

- [11]. Dz. U. 2000 nr 63 poz. 735. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie.
- [12]. Dz. U. 1999 nr 43 poz. 430 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.
- [13]. Dz. U. 1998 nr 151 poz. 987 Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie.
- [14]. Dz. U. 1998 nr 101 poz. 645. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 1 czerwca 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać morskie budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie.
- [15]. Dz. U. 1997 nr 132 poz. 878 Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 30 września 1997 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [16]. ASTM Designation D 4945. Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
- [17]. AT/2005-04-18-15. Prefabrykowane pale żelbetowe AARSLEFF. IBDiM Warszawa. Termin ważności AT: 2010-01-11.
- [18]. Designers' Guide to EN 1997-1. Eurocode 7: Geotechnical design – General rules. Editor: Haig Gulvanessian. Tomas Telford 2004.
- [19]. PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
- [20]. PN-89/S-10042. Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie.
- [21]. PN-B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone - Obliczenia statyczne i projektowanie (wraz z PN-B-03264:2002/Ap1:2004).
- [22]. PN-EN 12699. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe.
- [23]. PN-EN 12794. Prefabrykaty betonowe. Pale fundamentowe.
- [24]. PN-EN 1992-1-1. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [25]. PN-EN 1997-1. Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.
- [26]. prEN ISO 22477-1 Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures - Part 1: Pile load test by static axially loaded compression (ISO/DIS 22477-1:2005)
- [27]. PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.