

prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki*
mgr inż. Tomasz Piotrowski*

Trwałość żelbetowych pali fundamentowych

Trwałość rozumiana jest jako zachowanie – w przyjętym okresie użytkowania – zdolności do użytkowania obiektu. Innymi słowy jest to zapewnienie użyteczności obiektu w przewidywanym okresie użytkowania i zakładanych warunkach użytkowania. Norma PN-EN 206-1:2003 określa okres użytkowania jako *okres, w którym stan betonu w konstrukcji odpowiada wymaganiom eksploatacyjnym, dotyczącym tej konstrukcji, pod warunkiem, że jest ona właściwie użytkowana*. Trwałość pali fundamentowych jest szczególnie istotna, zważywszy na istotność ich funkcji w konstrukcji oraz trudnonaprawialność i w zasadzie niewymienialność. Pojęcie trwałości pali należy więc traktować szerzej, włączając do rozważań odporność, a dokładniej **potencjał niezawodności** (robustness). Oznacza to, że element powinien zapewnić (bądź tylko nieznacznie ograniczyć) stan użytkowania, także w przypadku zmiany warunków użyteczności obiektu, a ewentualne skutki destrukcji nie powinny występować w stopniu nieproporcjonalnym do przyczyn.

Charakterystyka żelbetowych pali fundamentowych

Zgodnie z normą PN-B-02481:1998 **pal jest to smukły element konstrukcyjny o dużym zagłębieniu, przenoszący obciążenia z konstrukcji na głęboko zalegające warstwy podłoża gruntowego przez podstawę (ostrze) i/lub powierzchnię boczną.**

Pale żelbetowe produkowane są jako elementy prefabrykowane w wytwórni (fotografia 1), następnie transportowane na miejsce wbudowania oraz wbijane za pomocą różnej wielkości katarów. Z reguły wykonywane są z betonu klasy wytrzymałości C40/50 o stopniu wodoszczelności W8,



przygotowanie zbrojenia pali



montaż koszyka zbrojeniowego



betonowanie prefabrykatu pala



pielęgnacja prefabrykatu



podnoszenie pala z formy



magazyn gotowych pali prefabrykowanych

Fot. 1. Fazy wytwarzania prefabrykowanych pali żelbetowych [Aarsleff Sp. z o.o.]

nasiąkliwości $\leq 5\%$ oraz stopniu mrozoodporności F150 zgodnie z PN-EN 2061:2003.

Środowiskiem użytkowania pali mogą być nie tylko **grunty** lub **grunty i wody gruntowe**, ale dodatkowo także **cieki** i **akweny wodne** oraz w górnej części **pala powietrze atmosferyczne** (fotografia 2).



środowisko gruntowe



środowisko wodne

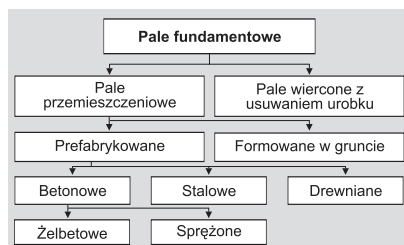


środowisko atmosferyczne

Fot. 2. Przykład użytkowania żelbetowych pali fundamentowych

* Politechnika Warszawska

Pale fundamentowe można podzielić na: **przemieszczeniowe** i **wiercone z usuwaniem urobku**. Pale przemieszczeniowe mogą być formowane w gruncie lub być umieszczane w podłożu jako gotowe elementy wytworzone z drewna, stali oraz betonu, a właściwie żelbetu (rysunek 1).



Rys. 1. Przegląd pali fundamentowych

Zapewnienie trwałości

Zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 zapewnienie trwałości elementów z betonu powinno następować przez: analizę warunków środowiskowych, dobór klasy ekspozycji reprezentującej te warunki, a w efekcie dobór składu betonu odpowiadającego wybranej klasie ekspozycji. Dobór klasy ekspozycji odpowiadający przewidywanym warunkom w miejscu stosowania betonu jest zatem decyzją technicznie rozstrzygającą o powodzeniu przedsięwzięcia i obdarzoną stosowną odpowiedzialnością. Sytuację komplikuje fakt, że warunki środowiskowe, w których będzie stosowany beton, mogą wymagać określenia za pomocą kombinacji kilku klas ekspozycji. Norma nie precyzuje wówczas sposobu dobrania rozwiązania materiałowego, tzn. zalecanych ograniczeń składu i właściwości betonu. Należy założyć, iż w takim przypadku właściwe jest – z uwagi na możliwość współdziałania różnych oddziaływań (negatywne efekty synergistyczne) – przyjęcie rozwiązania materiałowego jak dla klasy o stopień wyższej od najostrzejszej spośród wymaganych.

Trwałość betonu w środowisku odpowiadającym danej klasie ekspozycji zależy od:

- właściwego (jakościowego i ilościowego) doboru składników;
- ukształtowania odpowiedniej mikrostruktury betonu, która jest wynikiem reakcji chemicznych i procesów fizykochemicznych przebiegających pomiędzy składnikami, ale również ich wzajemnej

proporcji, np. niewypełnione jamy międzyziarnowe czy też pory powstałe po odparowaniu wody. Wszystkie te elementy ujmuje technologia procesu wytwarzania, na którą składa się: receptura, dozowanie, wymieszanie, transport, układanie i zagęszczanie oraz pielęgnacja młodego betonu przed wbudowaniem.

W przypadku właściwie dobranych jakościowo składników betonu norma PN-EN 206-1:2003 wyróżnia **trzy sposoby zapewnienia trwałości w zależności od oddziaływań środowiskowych** (dostosowanie do klasy ekspozycji), przez:

- zmianę współczynnika w/c – im większe zagrożenie, tym mniejsza zalecana wartość w/c ;

- zmianę minimalnej zawartości cementu, c_{min} – im większe zagrożenie, tym zalecana wartość c_{min} większa;

- właściwy dobór klasy wytrzymałości – im większe zagrożenie, tym klasa wyższa; w przypadku zagrożenia korozją mrozową (klasy XF) norma dodatkowo zaleca pewnego minimum napowietrzenia betonu i zastosowanie mrozoodpornego kruszywa, a w przypadku korozji chemicznej (klasy XA2 i XA3) zastosowanie cementów siarczanoodpornych (HSR).

Do wymienionych wymagań norma PN-B-03264:2002 dodaje maksymalną szerokość rys oraz minimalną grubość otulenia prętów zbrojeniowych (tabela 1).

Potencjalne mechanizmy destrukcji

W porównaniu z innymi rozwiązaniami materiałowymi (drewno, stal) żelbetowe pale fundamentowe mają największy potencjał modyfikacyjny umożliwiając zapewnienie trwałości, ale jednocześnie ich zniszczenie może mieć wiele przyczyn. Ogólnie destrukcja elementu żelbetowego może nastąpić w wyniku uszkodzeń betonu bądź korozji zbrojenia. Norma ENV 1504-9: 1996 wyróżnia chemiczne, mechaniczne i fizyczne przyczyny uszkodzenia betonu oraz przyczyny destrukcji zbrojenia w wyniku karbonatyzacji, skażenia chemicznego i prądów upływowych (rysunek 2).

W kategoriach ogólnych odporność na oddziaływanie (mechaniczne)

bezpośrednie i pośrednie określa PN-B-03264: 2002:

- **oddziaływania bezpośrednie (obciążenia)** – siły przyłożone bezpośrednio do konstrukcji, wywołujące naprężenia w elementach konstrukcji;

- **oddziaływania pośrednie** – odkształcenia elementów konstrukcji wymuszone przez więzy łączące je z innymi elementami lub podłożem gruntowym, np. wywołane nierównomiernym osiadaniem podpór, skurczem i pęczaniem betonu, zmianami temperatury itp.

Norma materiałowa – betonowa PN-EN 206-1:2003 przewiduje natomiast z założenia *co najmniej 50-letnią trwałość materiału w przewidywanych warunkach użytkowania*.

Analizując potencjalne przyczyny destrukcji, należy zauważyć, że w warunkach użytkowania pala zagłębionego w gruncie podlegają one korzystnym ograniczeniom. Poprawnie wykonany i wbudowany pal jest przeważnie użytkowany w warunkach ściskania, a więc ewentualne rysy ulegają zamknięciu, w mniej korzystnym przypadku może wystąpić ściskanie mimośrodowe – z możliwością zarysowania. W przypadku pali głęboko zagłębionych w gruncie, tj. poniżej głębokości przemarzania gruntu nie występuje także zagrożenie korozją mrozową, natomiast w odniesieniu do pali częściowo zagłębionych użycie betonu o stopniu mrozoodporności F150 i nasiąkliwości poniżej 5% stanowi z reguły wystarczającą ochronę. Odmiennie również przedstawia się podatność pali na karbonatyzację. W warstwie gruntu grubości do 20 cm zawartość CO_2 w powietrzu glebowym wynosi $< 0,2\%$, na głębokości 1 m dochodzi do $0,6\%$, a w warstwach leżących blisko wód gruntowych szybko wzrasta i dochodzi do $2,4\%$. W silnie nawilgotnionych glebach torfowo-glejowych zawartość CO_2 może wynosić nawet 7% . Należy jednak zwrócić uwagę, że wraz z głębokością porowatość powietrzna w gruncie maleje, począwszy od 50% przy powierzchni. Przy zagłębieniu powyżej 1m poniżej poziomu gruntu korozja stali zbrojeniowej jest w znacznym stopniu ograniczona również ze względu na utrudniony dostęp odpowiedniej ilości tlenu. Dotyczy to także procesów karbonatyzacji betonu spowo-

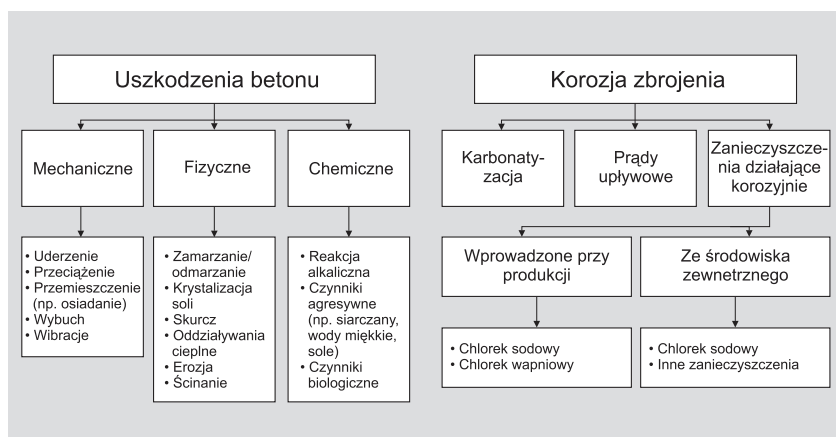
Tabela 1. Wymagania wg PN-B-03264:2002 i PN-EN 206-1:2003 oraz przykłady fundamentów palowych odnośnie do betonu na tle klas ekspozycji z PN-EN 206-1:2003

Klasa ekspozycji	Opis środowiska	Przykłady dotyczące pali i ich części	Wymagania dotyczące betonu (trwałość 50 lat) wg PN-EN 206-1:2003 i PN-B-03264:2002				
			maks. w/c	min. klasa wytrzymałości	min. zawartość cementu [kg/m ³]	szerokość rys w _{lim} [mm]	otulenie c _{min} + Δc* [mm]
Brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją							
X0	środowisko bardzo suche o bardzo niskiej wilgotności powietrza	– pal zagłębiony w gruncie powyżej wody gruntowej, poniżej głębokości przemarzania, bez agresji chemicznej	–	C8/10	–	0,3	10+5
Korozja spowodowana karbonatyzacją							
XC1	stałe zanurzony w wodzie	– pal poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej, część pala w akwenach i ciekach wodnych, np. podpory mostów	0,65	C16/20	260	0,3	15+5
XC2	długotrwały kontakt z wodą, najczęściej fundamenty	– pal zagłębiony w gruncie narażony na czasowe długotrwałe zawilgocenie	0,60	C16/20	280	0,3	20+5
XC3	umiarkowanie wilgotne, na zewnątrz osłonięty przed deszczem	– pal nad poziomem gruntu osłonięty przed deszczem, np. w otwartych halach przemysłowych	0,60	C20/25	280	0,3	20+5
XC4	cyklicznie mokre i suche, powierzchnie narażone na kontakt z wodą (z wyj. XC2)	– pal nad poziomem gruntu/wody	-	C20/25	300	0,3	25+5
Korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej							
XD1	działanie chlorków z powietrza	– pal nad poziomem gruntu narażony na działanie chlorków z powietrza	0,55	C30/37	300	0,2	40+5
XD2	działanie wody przemysłowej zaw. chlorki; baseny	– nie występuje	0,55	C30/37	300	0,2	40+5
XD3	działanie rozpylonych cieczy zaw. chlorki; elementy mostów	– pal nad poziomem gruntu narażony na działanie chlorków z soli odladzających (bezp. na drogach)	0,45	C35/45	320	0,2	40+5
Korozja spowodowana chlorkami z wody morskiej							
XS1	działanie soli zawartych w powietrzu, na/w pobliżu wybrzeża	– pal nad poziomem gruntu w obszarze nadmorskim	0,50	C30/37	300	0,2	40+5
XS2	stałe zanurzenie; budowle morskie	– pal zanurzony w wodzie morskiej lub wodzie gruntowej w obszarze nadmorskim	0,45	C35/45	320	0,2	40+5
XS3	strefy rozbryzgów, pływów i aerozoli; budowle morskie	– pal/podpora w strefie rozbryzgów, np. w portach	0,45	C35/45	340	0,2	40+5
Agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmarzania bez środków odladzających albo ze środkami odladzającymi							
XF1	deszcz i zamarzanie bez środków odladzających; pow. pionowe	– pal nad poziomem gruntu narażony na działanie mrozu, pal w gruncie do głębokości przemarzania	0,55	C30/37	300	0,3	wg wymagań dla XC, XD i XS
XF2	deszcz, zamarzanie i środki odladzające; pow. pionowe	– pal nad poziomem gruntu narażony na działanie mrozu, w okolicy dróg	0,55	C25/30 Zaw.pow. <4,0%	300	0,2	
XF3	deszcz i zamarzanie bez środków odladzających; pow. poziome	– nie występuje	0,50	C30/37 Zaw.pow. <4,0%	320	0,3	
XF4	deszcz, zamarzanie i środki odladzające; pow. poziome, strefy rozbryzgu w budowlach morskich	– pal/podpora ponad poziomem wody w strefie rozbryzgu w budowlach morskich	0,45	C30/37 Zaw. pow <4,0%	340	0,2	
Agresja chemiczna							
XA1	mało agresywne	– wg odrębnej klasyfikacji: a) kwasowości gruntu i skażenia siarczanami	0,55	C30/37	300	0,2	wg wymagań dla XC, XD i XS
XA2	średnio agresywne	b) agresywności chemicznej wody gruntowej	0,50	C30/37	320	0,2	
XA3	silnie agresywne		0,45	C35/45	360	0,2	

dodatkowo kruszywo o odpowiedniej mrozoodporności wg PN-EN 12620

 agresja SO₂ cement HSR

*) wg PN-B-03264:2002 dla trwałości 100 lat należy podaną wartość grubości otulenia zwiększyć dodatkowo o 10 mm



Rys. 2. Potencjalne przyczyny uszkodzeń elementów żelbetowych

dotychczas agresywnym CO₂ występującym w wodzie gruntowej. W wyniku karbonatyzacji otulina betonowa traci właściwości ochronne wobec zbrojenia stalowego. Ponadto wnikanie CO₂ w beton w warunkach stale mokrych (wypełnione wodą pory betonu) jest bardzo powolne. W konsekwencji w praktyce beton prawie nie ulega karbonatyzacji w warunkach powietrzno-suchych, jak również przy pełnym nasyceniu wodą. Proces karbonatyzacji nasila się przy wilgotności względnej powietrza 40 – 70%. Istotne z punktu widzenia trwałości żelbetowych pali fundamentowych jest również oddziaływanie środowiskowe. Zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 przez oddziaływanie środowiska rozumie się *takie oddziaływania chemiczne i fizyczne na beton, które wpływają na niego lub jego zbrojenie lub inne znajdujące się w nim elementy metalowe, a które nie zostały uwzględnione w projekcie konstrukcyjnym*. Można więc wnioskować, że norma PN-EN 2061:2003 zajmuje się odpornością na te oddziaływania, które nie zostały objęte normą „konstrukcyjną” PN-B 03264:2002.

Ze względu na zastosowanie pale fundamentowe narażone są na oddziaływanie środowiska gruntowego. Norma PN-EN 206-1:2003 rozróżnia trzy stopnie agresywności (XA1, XA2 i XA3) gruntu i wód gruntowych w klasie ekspozycji „agresja chemiczna” (tabela 2).

Podsumowanie

Jedną z pierwszych realizacji na świecie był fundament palowy mostu na Sanie pod Jarosławiem, zbudowa-

nie budzi zastrzeżeń. Należy także dodać, iż zwiększa się liczba doniesień ze świata o coraz częściej mającym miejsce powtórny wykorzystaniu w budowanych już pali – w przypadku wznoszenia nowego obiektu budowlanego w miejsce istniejącego. Na tej podstawie można stwierdzić, że odpowiednio dobrany i poprawnie wykonany, a następnie właściwie przetransportowany i wbudowany żelbetowy, prefabrykowany pali fundamentowy zagłębiony w gruncie mało agresywnym chemicznie odznacza się dużą trwałością, przekraczającą 50 lat zgodnie z PN-EN 206-1:2003. Potwierdzają to zarówno przeprowa-

Tabela 2. Wartości graniczne klas ekspozycji agresji chemicznej gruntów naturalnych i wody gruntowej wg PN-EN 206-1:2003

Podana niżej klasyfikacja środowisk agresywnych chemicznie dotyczy gruntów naturalnych i wody gruntowej o temperaturze 5 – 25 °C oraz przepływie wody dostatecznie małym, aby warunki uznać za statyczne. Klasę ekspozycji określa najbardziej niekorzystna wartość dla dowolnej, pojedynczej charakterystyki chemicznej. Gdy dwie lub więcej agresywnych charakterystyk wskazuje na tę samą klasę, środowisko należy zakwalifikować do następnej, wyższej klasy, chyba że specjalne badania tego szczególnego przypadku wykażą, że nie jest to konieczne.

Charakterystyka chemiczna	Powołana metoda badania	XA1	XA2	XA3
Woda gruntowa				
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	EN 196-2	≥ 200 i ≤ 600	> 600 i ≤ 3000	> 3000 i ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 i ≥ 5,5	< 5,5 i ≥ 4,5	< 4,5 i ≥ 4,0
CO ₂ agresywny [mg/l]	prEN 13577:1999	≥ 15 i ≤ 40	> 40 i ≤ 100	>100 i do nasycenia
NH ₄ ⁺ [mg/l]	ISO 7150-1 lub ISO 7150-2	≥ 15 i ≤ 30	> 30 i ≤ 60	> 60 i ≤ 100
Mg ²⁺ [mg/l]	ISO 7980	≥ 300 i ≤ 1000	> 1000 i ≤ 3000	>3000 i do nasycenia
Grunt				
SO ₄ ²⁻ całkowite [mg/kg ^a]	EN 196-2 ^b	≥ 2000 i ≤ 3000 ³⁾	> 3000 ^c i ≤ 12000	> 12000 i ≤ 24000
Kwasowość [ml/kg]	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	w praktyce nie spotykane	

^a Grunty ilaste o przepuszczalności poniżej 10⁻⁵ m/s można zakwalifikować do niższej klasy.
^b Metoda badania przewiduje ekstrakcję SO₄²⁻ z użyciem kwasu chlorowodorowego; alternatywnie można zastosować ekstrakcję wodną, jeżeli przeprowadzano już takie badanie w miejscu zastosowania betonu.
^c Ograniczenie do 3000 mg/kg należy zmniejszyć do 2000 mg/kg w przypadku, gdy istnieje ryzyko akumulacji jonów siarczanowych w betonie na skutek cyklicznego wysychania i nawilżania lub podciągania kapilarnego.

ny pod koniec XIX w. W 1910 r. posadowienie fundamentów podpór na palach żelbetowych zastosowano podczas budowy sąsiedniego mostu na Sanie w miejscowości Radymno. W związku z projektowaną modernizacją mostu w 1999 r. przeprowadzono odkrywki niektórych pali. Pozwoliło to na stwierdzenie, że **po 90 latach użytkowania stan pali żelbetowych**

dzone analizy modelowe, jak i ponad 100-letnie doświadczenia ze stosowania na świecie.

Podziękowania

Autorzy dziękują prof. Henrykowi Zobłowi i dr. Dariuszowi Sobali za owocne dyskusje i firmie Aarsleff Sp. z o.o. za udostępnienie niektórych danych technicznych i fotografii.