

Oddziaływania środowiskowe na żelbetowe pale fundamentowe

Terminologia, wymagania, podstawowe kryteria dotyczące właściwości użytkowych, metody badań i oceny zgodności prefabrykowanych pali z betonu są określone w PN-EN 12794 [1].

Zgodnie z PN-EN 13369 [2] trwałość elementów prefabrykowanych z betonu jest zapewniona, jeżeli są spełnione wymagania materiałowe dotyczące:

- minimalnej zawartości cementu,
- maksymalnego stosunku w/c (woda/cement),
- maksymalnej zawartości chlorków w betonie,
- maksymalnej zawartości alkaliów.

Pozostałe wymagania według PN-EN 13369 [2], których spełnienie warunkuje trwałość, to:

- ochrona świeżo zaformowanego betonu przed wysychaniem,
- zapewnienie odpowiedniej hydratacji przy stosowaniu obróbki cieplnej (jeżeli jest stosowana),
- stosowanie betonu o wytrzymałości powyżej minimalnej,
- zapewnienie co najmniej minimalnego otulenia betonem i odpowiedniej jakości betonu w otulinie,
- inne szczegółowe wymagania mające na celu zapewnienie stabilności powierzchni (odporności betonu na procesy niszczące, takie jak agresja chemiczna, zamrażanie i rozmrażanie, ścieranie mechaniczne itp.) i stabilności strukturalnej (chemicznej).

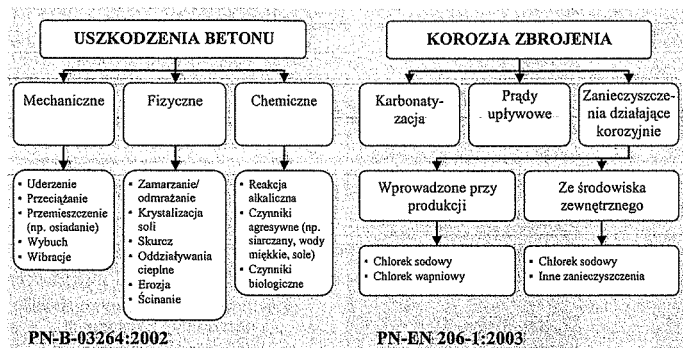
Zaleca się także zastosowanie metody projektowania uwzględniającej trwałość betonu, określonej w PN-EN 206-1 [3].

Klasyfikacja przyczyn uszkodzeń elementów żelbetowych jest zawarta w PN-EN 1504-9 [4] (rys. 1).

Zapewnienie trwałości elementów z betonu w postępowaniu normowym według PN-EN 206-1 [3] powinno następować przez analizę warunków środowiskowych oraz dobór klasy ekspozycji reprezentującej te warunki (tabl. 1).

W normie PN-EN 13369 [2] definiuje się dodatkowo nominalną skalę warunków zewnętrznych w odniesieniu do trwałości prefabrykatów z betonu, z punktu widzenia ochrony stali zbrojeniowej przed korozją (tabl. 2).

Dopuszcza się redukcję klasy ekspozycji, jeżeli ekspozycja na powierzchnia betonu została odpowiednio zabezpieczona. Nie sprecyzowano jednak o ile stopni ją obniżyć, a także spo-



Rys. 1. Potencjalne przyczyny uszkodzeń elementów żelbetowych według PN-EN 1504-9 [4], z zaznaczeniem obszaru oddziaływań objętych zakresem PN-EN 206-1 [3] i PN-B-03264:2002 [5] (według [6])

Tablica 1

Klasy ekspozycji i odpowiadające im przykłady fundamentów palowych

Klasa ekspozycji	Przykłady fundamentów palowych
1. Brak zagrożenia agresją środowiska lub zagrożenia korozją	
X0	pal zagłębiony w gruncie spoiwym powyżej wody gruntowej, poniżej głębokości przemarzania, bez agresji chemicznej
2. Korozja spowodowana karbonatyzacją	
XC1	pal poniżej poziomu zwierciadła wody gruntowej, część pala w akwenach i ciekach wodnych, np. podpory mostów
XC2	pale zagłębione w gruncie, narażone na czasowe długotrwałe zawilgocenie
XC3	pal nad poziomem gruntu osłonięty przed deszczem, np. w otwartych halach przemysłowych
XC4	pal nad poziomem gruntu/wody
3. Korozja spowodowana chlorkami nie pochodzącymi z wody morskiej	
XD1	pal nad poziomem gruntu narażony na działanie chlorków z powietrza
XD2	pal zanurzony w wodzie przemysłowej z chlorkami
XD3	pal nad poziomem gruntu narażony na działanie chlorków z soli odładowanych (zimowe utrzymanie dróg)
4. Korozja spowodowana chlorkami z wody morskiej	
XS1	pal nad poziomem gruntu w obszarze nadmorskim
XS2	pal zanurzony w wodzie morskiej lub wodzie gruntowej w obszarze nadmorskim
XS3	pal/podpora w strefie rozbryzgów, np. w portach
5. Agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmrażania bez środków odładowanych albo ze środkami odładowymi	
XF1	pal nad poziomem gruntu narażony na działanie mrozu, pal w gruncie do głębokości przemarzania
XF2	pal nad poziomem gruntu narażony na działanie mrozu, w sąsiedztwie dróg
XF3	powierzchnia pozioma głowicy pala powyżej poziomu terenu, bez środków odładowanych
XF4	pal/podpora ponad poziomem wody w strefie rozbryzgu w budowlach morskich
6. Agresja chemiczna	
XA1+3	według odrębnej klasyfikacji kwasowości gruntu i skażenia siarczanami oraz agresywności chemicznej wody gruntowej
7. Agresja wywołana ścieraniem	
XM1	nie występuje
XM2	nie występuje
XM3	pal fundamentowy jako filar mostu

Tablica 2

Nominalna skala warunków zewnętrznych według PN-EN 13369

Warunki zewnętrzne	Agresywność	Klasy ekspozycji według PN-EN 206-1 [3]
A	brak	X0
B	niska	XC1
C	umiarkowana	XC2-XC3
D	normalna	XC4
E	wysoka	XD1-XS1
F	bardzo wysoka	XD2-XS2
G	ekstremalna	XD3-XS3

Tablica 3

Poglądowe przedstawienie sytuacji użytkowania pali i odpowiadających im klas ekspozycji
(oznaczenia: G – grunt, GO – grunt organiczny, W – woda, P – powietrze, Hz – głębokość przemarzania gruntu, Hw – poziom wody gruntowej, $Hw_{max,min}$ – poziom pływów wody powierzchniowej)

sobu takiego zabezpieczenia. W przypadku prefabrykowanych pali żelbetowych (PN-EN 12794 [7]) również wymaga się, aby skład betonu był odpowiedni do klasy ekspozycji. Sytuację komplikuje fakt, że określenie warunków środowiskowych może wymagać uwzględnienia kilku klas ekspozycji (tabl. 3). Norma nie precyzuje wówczas sposobu doboru rozwiązania materiałowego, tzn. zalecanych ograniczeń do składu i właściwości betonu. Należy założyć, że w takim przypadku jest właściwe – z uwagi na możliwość współdziałania różnych oddziaływań – przyjęcie rozwiązania materiałowego, jak w przypadku klasy o stopień wyższej od najostrejszej spośród wymaganych [6]. Należy także zwrócić uwagę, że w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego, środowiskiem użytkowania pali mogą być nie tylko grunty lub grunty i wody gruntowe, ale dodatkowo także cieki i zbiorniki wodne oraz w górnej części pala powietrze atmosferyczne. Dobór właściwej klasy ekspozycji (nominalnej skali warunków zewnętrznych) jest zatem decyzją rozstrzygającą o zapewnieniu trwałości i w związku z tym obarczoną dużą odpowiedzialnością [8].

W normie PN-EN 12794 [7] dotyczącej w szczególności prefabrykowanych pali z betonu ustalono poziom minimalnej klasy wytrzymałości betonu na ściskanie elementów żelbetowych i sprężanych niezależnie od klasy ekspozycji na C35/45. Jest to najostrejsze wymaganie zawarte w dokumentach normowych (tabl. 4).

Spśród pozostałych wymagań w odniesieniu do żelbetowych prefabrykowanych pali fundamentowych, związanych z zapewnieniem trwałości, należy wymienić minimalną grubość otulenia prętów zbrojeniowych (tabl. 5) oraz maksymalną szerokość rys (tabl. 6).

Rozwarcie rys w betonie zwiększa zagrożenie korozyjne, a w konsekwencji zmniejsza trwałość pala żelbetowego. Największemu wytężeniu pal podlega podczas podnoszenia z formy i podnoszenia do kafara, a także podczas wbijania pala. Wśród dodatkowych warunków należy wymienić fakt, że pal jest podnoszony z formy w stosunkowo młodym wieku (1–2 dni). Do chwili wbudowania stan pala może być sprawdzany zarówno optycznie, jak i innymi metodami, w tym nieniszczącymi; po umieszczeniu w gruncie jest to znacznie trudniejsze. Przyjmuje się, że w typowych warunkach gruntowych trzon pala nie jest zagrożony wybočeniem. Odmierna sytuacja ma miejsce w słabych gruntach o dużej miąższości lub w palach wystających nad gruntem, a tak-

Schemat fundamentu palowego – klasy ekspozycji	Przykładowa realizacja	Opis realizacji Szczególne zagrożenia
		– klasyczny fundament palowy zwieńczony grubym ocepem, np. pod fundament wieży elektrowni wiatrowej – szczególne zagrożenia – brak
		– fundament palowy słupów energetycznych w bagnie – szczególne zagrożenia – agresja chemiczna wody gruntowej
		– fundament palowy podpory mostowej w nurcie rzeki, brak bezpośredniego obmywania przez wodę płynącą noszącą materiał mineralny oraz krę – szczególne zagrożenia – zanieczyszczenie wody – agresja chemiczna, chlorki z wody morskiej
		– pale fundamentowe jako filar w nurcie rzeki z bezpośrednim obmywaniem przez wodę płynącą – szczególne zagrożenia – korozja mrozowa, wymywanie (zmienny poziom wody-falowanie), abrazja (włóczenie materiału mineralnego po dnie), tarcie i uderzenia kry, zanieczyszczenie wody – agresja chemiczna, chlorki z wody morskiej, oddziaływanie mgły solnej ze środków odładowczych
		– pale fundamentowe jako podpory pod molo – woda słona lub słodka, stojąca – szczególne zagrożenia – korozja mrozowa, wymywanie (zmienny poziom wody – falowanie), ewentualnie chlorki z wody morskiej
		– pale fundamentowe w konstrukcji ekranu i jednocześnie ściany oporowej wystające ponad poziom gruntu w środowisku przemysłowym – szczególne zagrożenia – zanieczyszczenie powietrza i gruntu, oddziaływanie mgły solnej ze środków odładowczych, okresowe zwilżanie i wysychanie z jednoczesnym działaniem mrozu nad gruntem i w gruncie
		– pale fundamentowe wystające nad poziom terenu pod słupy ekranów akustycznych wzdłuż ciągu komunikacyjnego – szczególne zagrożenia – oddziaływanie mgły solnej ze środków odładowczych, okresowe zwilżanie i wysychanie z jednoczesnym działaniem mrozu nad gruntem i w gruncie
		– fundament palowy zbiorników oczyszczalni ścieków zlokalizowanej na wysypisku śmieci – szczególne zagrożenia – środowisko gruntowe silnie zanieczyszczone

Tablica 4

Wymagania minimalnej klasy wytrzymałości betonu na ściskanie według wybranych norm

Klasa ekspozycji	Skala warunków zewnętrznych	Wymagania*				
		konstrukcja	beton	beton	prefabrykaty	pale
PN-EN 206-1 [3]	PN-EN 13369 [2]	PN-B-03264 [5]	PN-EN 206-1 [3]	PN-B-06265 [9]	PN-EN 13369 [2]	PN-EN 12794 [7]
XO	A	C12/15	C12/15	C8/10	C20/25	C35/45
XC1	B	C16/20	C20/25	C16/20	C20/25	
XC2	C	C16/20	C25/30	C16/20	C25/30	
XC3	C	C20/25	C30/37	C20/25	C25/30	
XC4	D	C25/30	C30/37	C25/30	C30/37	
XD1	E	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	
XD2	F	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	
XD3	G	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	
XS1	E	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	
XS2	F	C35/45	C35/45	C35/45	C30/37	
XS3	G	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	
XF1	-	C25/30	C30/37	C30/37	C20/25	
XF2	-	C25/30	C25/30	C25/30	C20/25	
XF3	-	C25/30	C30/37	C30/37	C20/25	
XF4	-	C30/37	C30/37	C30/37	C20/25	
XA1	-	C25/30	C30/37	C30/37	C20/25	
XA2	-	C35/45	C30/37	C30/37	C20/25	
XA3	-	C35/45	C35/45	C35/45	C20/25	
XM3	-	-	-	C35/45	-	

* Zaznaczono najostrzejsze wymaganie.

że zanurzonych w wodzie. Wówczas należy przeprowadzić odpowiednią analizę i w razie potrzeby zwiększyć nośność trzonu przez odpowiednie zwiększenie zbrojenia i/lub zwiększenie przekroju poprzecznego pala.

W PN-EN 12699 [11] wymaga się, aby podczas wbijania pala maksymalne naprężenia:

- ściskające były nie większe niż 80% wytrzymałości charakterystycznej betonu na ściskanie (w praktyce wartość ta jest kontrolowana podczas wbijania pala i z reguły wynosi 30 ÷ 60%),

- rozciągające były nie większe niż 90% charakterystycznej granicy plastyczności stali zbrojeniowej.

Bez względu na przyczynę powstania rysy jej rozwarcie w warunkach użytkowania jest niekorzystne z punktu widzenia trwałości pala. W typowych warunkach gruntowych pal jest ściskany. Nieliczne naprężenia ściskające z reguły powodują opóźnienie procesów korozji [12]. W niektórych przypadkach mogą wystąpić naprężenia rozciągające i ścinające (wyboczenie, ściskanie mimośrodowe); wtedy ich oddziaływanie na trwałość zależy od szerokości rozwarcia rysy.

W normie PN-B-03264:2002 [5] nawet w klasie ekspozycji XA3 (bardzo silna agresja chemiczna) dopuszcza się rozwarcie rysy 0,2 mm. Można szacować, że może to powodować zwiększenie szybkości korozji stali zbrojeniowej o co najmniej 25% [13] (rys. 2).

Należy zauważyć, że istotne jest nie tylko rozwarcie, ale również liczba rys i odległości między nimi; zgrupowanie rys powoduje tendencję do „sumowania” procesów korozyjnych. Aspekty te powinny być przedmiotem analiz poprzedzających zastosowanie i stanowić podstawę właściwego doboru rodzaju i wymiarów pala. Ponadto, w przypadku trudnych warunków fundamentowania, należy rozważyć możliwość kontrolowania stanu pali podczas użytkowania bądź przez odpowiednie wbudowanie czujników, bądź też okresowo – metodami nieniszczącymi, np. za pomocą ultradźwięków [15, 16, 17].

Tablica 5

Minimalne otulenie zbrojenia ze względu na trwałość stali zbrojeniowej
C_{min,dur}, mm

Klasa ekspozycji	Klasa ekspozycji według PN-EN 206-1 [3]						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
	skala warunków środowiskowych według PN-EN 13369						
	A	B	C	D	E	F	G
Klasa konstrukcji	Według PN-EN 1992-1-1 [10] (klasyfikacja ogólna) zalecaną klasą konstrukcji dla projektowanego okresu użytkowania 50 lat jest S4						
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	55	55
Według PN-EN 13369 [2]							
<ul style="list-style-type: none"> • zapewniona kontrola jakości – obniżenie klasy konstrukcji o 1 • S3 lub S2 w zależności od klasy wytrzymałości betonu zgodnie z tabl. 6 							
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
Według PN-EN 13369 [2]							
<ul style="list-style-type: none"> • zapewniona kontrola jakości – zmniejszenie klasy konstrukcji o 1 • projektowany okres użytkowania 100 lat – podniesienie klasy konstrukcji o 2 • S5 lub S4 w zależności od klasy wytrzymałości betonu zgodnie z tabl. 6 							
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
Według PN-EN 13369 [2]							
<ul style="list-style-type: none"> • zapewniona kontrola jakości – zmniejszenie klasy konstrukcji o 1 • projektowany okres użytkowania 100 lat – podniesienie klasy konstrukcji o 2 • S5 lub S4 w zależności od klasy wytrzymałości betonu zgodnie z tabl. 6 • po uwzględnieniu Δc wg PN-EN 12794 [7] = +10 mm 							
S4	20	25	35	40	45	50	55
S5	25	30	40	45	50	55	60
Według PN-B-03264 [5]							
C _{min}	10	15	20	25	40	40	40
Według PN-B-03264 [5]							
<ul style="list-style-type: none"> • po uwzględnieniu Δc = +5 mm • C_{min1} gdy klasa wytrzymałości betonu o dwie klasy wyższa niż zalecana (-5 mm), z wyjątkiem XC1 							
C _{min1} +Δc	10	20	20	25	40	40	40
C _{min} +Δc	15	20	25	30	45	45	45
Według PN-B-03264 [5]							
<ul style="list-style-type: none"> • po uwzględnieniu Δc = +5 mm • C_{min1} gdy klasa wytrzymałości betonu o dwie klasy wyższa niż zalecana (-5 mm), z wyjątkiem XC1 • projektowany okres użytkowania 100 lat (+10 mm) 							
C _{min1} +Δc	20	30	30	35	50	50	50
C _{min} +Δc	25	30	35	40	55	55	55

Pogrubiono ostateczne wartości wymaganego otulenia, podkreślono najbardziej rygorystyczne wymaganie.

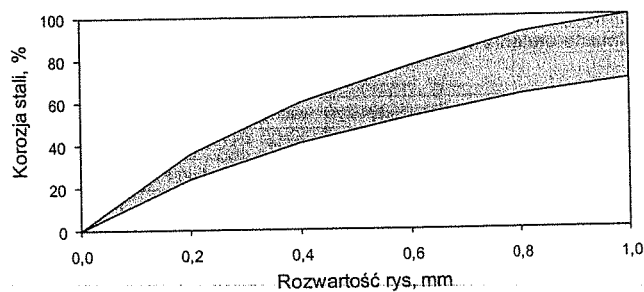
Tablica 6

Graniczne szerokości rys w konstrukcjach żelbetowych według PN-B-03264:2002

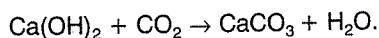
Wymagania użytkowe	Klasa ekspozycji	w _{lim} [mm] w przypadku kombinacji obciążeń długotrwałych
Ochrona przed korozją	X0, XC1÷4, XF1, XF3	0,3
	XD1÷3, XS1÷3, XF2, XF4, XA1÷3	0,2
Zapewnienie szczelności		0,1

Mechanizmy destrukcji

- **Karbonatyzacja i korozja węglanowa.** Karbonatyzacja polega na reakcji dwutlenku węgla z otoczenia z różnymi składnikami stwardniałego zaprawy cementowej, przede wszystkim z wodorotlenkiem wapnia według reakcji



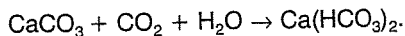
Rys. 2. Orientacyjna zależność względnej szybkości korozji stali w zależności od szerokości rys [14]



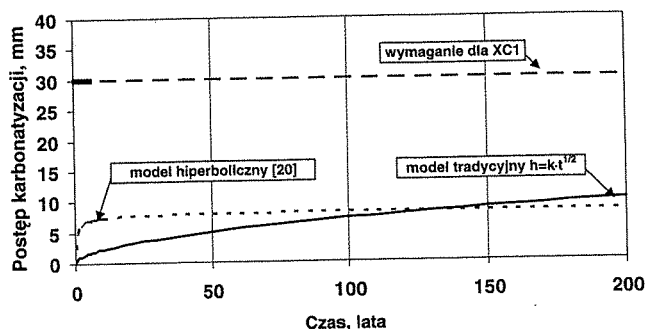
Objętość CaCO_3 jest o 6% większa od objętości Ca(OH)_2 , a jego rozpuszczalność około 100 razy mniejsza. W związku z tym w początkowym okresie użytkowania karbonatyzacja jest korzystna, gdyż zwiększa szczelność i odporność betonu na ługowanie. Jednocześnie jednak proces karbonatyzacji, rozpoczynający się na powierzchni i postępujący w głąb betonu, prowadzi do zmniejszenia alkaliczności betonu, co sprawia, że stal zbrojeniowa nie jest już chroniona przez warstwę pasywną powstającą w środowisku zasadowym. W wyniku postępującego frontu karbonatyzacji otulina betonowa traci zatem właściwości ochronne wobec zbrojenia stalowego. Szybkość tego procesu zależy w dużym stopniu od wilgotności środowiska [18]. Wnikanie CO_2 w beton w warunkach stale mokrych (wypełnione wodą pory betonu) jest bardzo powolne. W konsekwencji, beton przy pełnym nasyceniu wodą prawie nie ulega karbonatyzacji. Największy postęp karbonatyzacji występuje przy wilgotności względnej powietrza 50÷80%. Czynnikiem przyspieszającym karbonatyzację jest zawartość dwutlenku węgla w powietrzu. Szybkość karbonatyzacji jest proporcjonalna do pierwiastka stężenia CO_2 . W czystym powietrzu atmosferycznym jest ono stosunkowo niewielkie; wynosi 0,03%. W atmosferze przemysłowej i na ciągach komunikacyjnych może osiągnąć nawet 0,3%. W powietrzu glebowym natomiast, w warstwie grubości do 20 cm, zawartość dwutlenku węgla wynosi około 0,2%, a na głębokości 1 m dochodzi do 0,6%. W warstwach leżących blisko wód gruntowych zawartość CO_2 szybko się zwiększa i dochodzi do 2,4%. W silnie zawilgoczonych glebach torfowo-glejowych zawartość CO_2 może wynosić nawet 7% [19]. Należy jednak zwrócić uwagę, że wraz z głębokością porowatość powietrzna w gruncie zmniejsza się, począwszy od 50% przy powierzchni. Przy zagłębieniu powyżej 1 m poniżej poziomu gruntu korozja stali zbrojeniowej jest w znacznym stopniu ograniczona, również ze względu na utrudniony dostęp odpowiedniej ilości tlenu.

Modelowe analizy postępu karbonatyzacji wskazują, że sam proces karbonatyzacji nie jest groźny w odniesieniu do betonów klasy C35/45, z którego powinny być wykonywane prefabrykowane pale żelbetowe (rys. 3). Mała wartość współczynnika wodno-cementowego ($w/c = 0,4$) zapewnia odpowiednią szczelność betonu, tj. utrudnia wnikanie substancji powodujących skażenie i zubożenie betonu, w tym również CO_2 .

Większym zagrożeniem jest korozja węglanowa betonu, będąca efektem działania wody zawierającej znaczne ilości wolnego (agresywnego) CO_2 [21]. Taką sytuację klasyfikuje się do klas ekspozycji XA1+3. Korozja węglanowa jest procesem dwuetapowym. W pierwszym zachodzi reakcja karbonatyzacji, ale w drugim węglan wapnia przechodzi w wodorowęglan

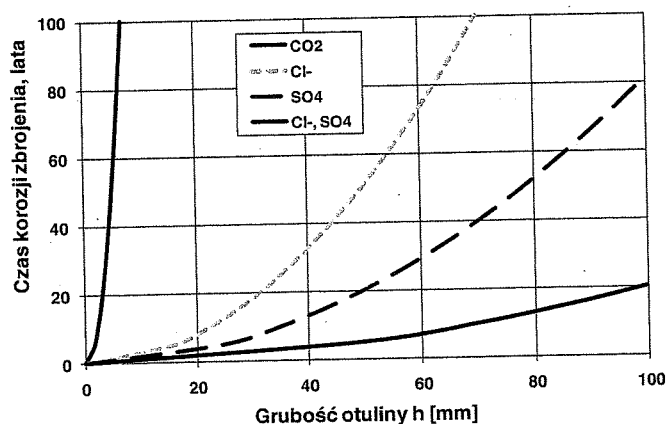


Powstały produkt jest łatwo rozpuszczalny i ulega wylugowaniu z betonu, co powoduje zwiększenie jego porowatości i zmniejszenie wytrzymałości.



Rys. 3. Szacowany postęp karbonatyzacji w czasie na podstawie modeli obliczeniowych w odniesieniu do wymagania w przypadku klasy ekspozycji XC1

• **Korozja chlorkowa i siarczanowa.** Niekorzystnie przedstawia się sytuacja, jeśli grunt jest istotnie skażony substancjami agresywnymi chemicznie. Chlorki wskutek swojej dużej przenikalności mogą stanowić korozyjne zagrożenie stali zbrojeniowej już po 30 latach ciągłego oddziaływania, przy grubości otuliny 40 mm. Jeszcze groźniejsze jest oddziaływanie siarczanów, gdyż równocześnie z korozją stali następuje korozja betonu. Najniekorzystniejszy jest przypadek równoczesnego oddziaływania chlorków i siarczanów – synergia negatywna (rys. 4). Naprężenia ściskające, nieprzekraczające 50% naprężenia niszczącego, zwiększają trwałość elementu betonowego w warunkach zagrożenia korozją siarczanową [12], a jak już zaznaczono w typowych warunkach gruntowych pali jest ścisłany.



Rys. 4. Szacowany czas do wystąpienia korozji zbrojenia w warunkach korozji chlorkowej i siarczanowej oraz postęp karbonatyzacji dla betonu klasy C35/45 [14]

British Board of Agreement [22] stwierdza, że w odniesieniu do typowych warunków i mało agresywnego chemicznie środowiska (XA1) *nie ma przesłanek, aby sugerować, iż nastąpi degradacja redukująca trwałość elementu poddanego tylko ścisłaniu, jeśli zastosujemy rodzaj cementu właściwy dla przewidzianych warunków użytkowania.* Do wytwarzania pali przewidzianych do użytkowania w warunkach wysokiego stopnia agresywności chemicznej (XA2, XA3) – a zwłaszcza stężenia jonów siarczanowych SO_4^{2-} (>600 mg/l) należy w mieszance betonowej zastosować cement o wysokiej odporności na siarczany, HSR, zgodny z PN-B-19707 [23].

• **Korozja mrozowa.** W przypadku pali głęboko zagłębionych w gruncie, tj. poniżej głębokości przemarzania gruntu [24], zagrożenie korozją mrozową nie występuje. W odniesieniu do pali częściowo zagłębionych użycie betonu o stopniu mrozoodporności F150 i nasiąkliwości poniżej 5% stanowi z reguły wystarczającą ochronę.

Podsumowanie

Odpowiednio dobrany i poprawnie wykonany, a następnie właściwie przetransportowany i wbudowany żelbetowy prefabrykowany pali fundamentowy zagłębiony w gruntach chemicznie mało agresywnych odznacza się dużą trwałością, przekraczającą 50 lat. Potwierdzają to zarówno przeprowadzone analizy modelowe, jak i ponadstuletnie doświadczenia praktyczne w Polsce i na świecie [25]. Jedną z pierwszych realizacji żelbetowego fundamentu palowego w Polsce było posadowienie w latach 1902-1907 podpór mostu przez San w Radymnie [26]. W związku z modernizacją tego mostu w 1999 roku przeprowadzono odkrywki niektórych pali. Pozwoliło to na stwierdzenie, że *po ponad 90 latach użytkowania stan pali żelbetowych nie budzi zastrzeżeń* [26].

W przypadku przewidywanego użytkowania żelbetowych pali prefabrykowanych w warunkach, w których należy się dodatkowo liczyć z korozją mrozową, zwiększoną karbonatyzacją, korozją węglanową, chlorkową czy siarczanową dobór rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego pala powinien być poprzedzony indywidualną analizą w celu uzyskania właściwej ochrony. Zwiększenie trwałości pala w takich warunkach może wymagać zmiany i optymalizacji składu jakościowego i ilościowego mieszanki betonowej, w tym np. zmiany rodzaju cementu czy wartości wskaźnika w/c . W szczególnych przypadkach występowania czynników korozyjnych (w tym także prądów błędzących) należy rozpatrzyć zastosowanie dodatkowych środków zapobiegawczych wymienionych w PN-EN 12699 [11], tj.:

- użycie stali o odpowiednim składzie chemicznym (w tym stali nierdzewnej),
- użycie betonu o odpowiedniej recepturze (np. z inhibitorami korozji stali [27]),
- ochronę katodową,
- impregnację organiczną lub nieorganiczną,
- obetonowanie lub powłoki betonowe, czyli zwiększenie poprzecznego przekroju pala,
- przyjęcie dodatkowej grubości materiału, czyli zwiększenie grubości otuliny zbrojenia,
- użycie pozostawianych rur osłonowych lub koszulek.

W efekcie może to prowadzić do zwiększenia zarówno zakresu stosowania żelbetowych pali fundamentowych, jak i ich niezawodności. Wymaga to jednak zmiany dotychczasowej koncepcji z projektowania według składników materiałowych na projektowanie według użyteczności – cech technicznych i odpowiedniego opracowania/dostosowania związanych z tym procedur. Oznacza to w stosunku do wydzielonego podzbioru zamawianych pali, że ich projektowane właściwości będą ukeinrowane na konkretne zastosowanie. Będą to pale o zdefiniowanej użyteczności (DPP – Defined Performance Pile) bądź nawet w następnej generacji o dobrze zdefiniowanej użyteczności (WDPP – Well Defined Performance Pile).

Artykuł opracowano w ramach pracy statutowej Politechniki Warszawskiej 504 G 1080 7007. Autorzy dziękują dr. inż. *Dariuszowi Sobali* z firmy Aarsleff Spółka z o.o. za udostępnienie niektórych materiałów, danych technicznych i fotografii oraz wymianę poglądów.

PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] PN-EN 12794:2008 Prefabrykaty z betonu – Pale fundamentowe.
- [2] PN-EN 13369:2005 Wspólne wymagania dla prefabrykatów z betonu.
- [3] PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [4] PN-EN 1504-9:2008 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności. Część 9: Podstawowe zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów.
- [5] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [6] *Czarnecki L.* [edit], Beton według normy PN EN 206-1 – komentarz. Polski Cement, Kraków 2004.
- [7] PN-EN 12794:2008 Prefabrykaty z betonu – Pale fundamentowe.
- [8] *Zybura A., Śliwka A.*: O interpretacji warunków środowiskowych przy określaniu klasy ekspozycji w projektach konstrukcji żelbetowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/2010.
- [9] PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [10] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [11] PN-EN 12699:2003 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Pale przemieszczeniowe.
- [12] *Piasta W.G., Sawicz Z., Koprowski G.*: Trwałość obciążonego betonu w warunkach agresywności chemicznej. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 6/1996.
- [13] *Arya C., Ofori-Darko F.K.*: Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete. „Cement and Concrete Research”, 3/1996.
- [14] *Czarnecki L., Emmons P.H.*: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement, Kraków 2002.
- [15] *Wang, Wu Ping et al.*: Detecting Inner Quality of foundation Pile with Ultrasonic CT Technology, 10th APC NDT Brisbane, 2001.
- [16] *Sansalone M., Carino N.J.*, Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Wave. NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Gaithersburg 1986.
- [17] *Garbacz A.*: Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
- [18] *Czarnecki L., Woyciechowski P.*: Model of concrete carbonation as limited process – experimental investigations of fluidal ash concrete. Brittle Matrix Composites 9, Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [19] *Nosalewicz M.*: Stężenie CO_2 i CH_4 w profilu gleby mineralno-murszowej nawadnianej oczyszczonymi ściekami miejskimi. „Acta Agrophysicci”, nr 10(3)2007.
- [20] *Więclawski R.*: Przebieg karbonatyzacji betonów w środowisku miejsko-przemysłowym. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, 2002.
- [21] *Pawlicka D.*: Content of the Dissolved Oxygen and Carbon Dioxide in Rainwaters and Groundwaters in Chosen Preserve and Urban Areas. „Geological Quarterly”, 2003.
- [22] Durapile piling system, Certificate of British Board of Agreement – Technical Approvals for Construction, no 04/4152, 2006.
- [23] PN-B-19707:2003 Cement – Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [24] PN-B-03020:1981 Posadowienie bezpośrednie budowli.
- [25] *Ascalew A., Smith J.G.N.*: Pile Foundation Design. www.sbe.napier.ac.uk.
- [26] *Trojnar K.*: Badania nośności podpór mostu drogowego przez San w Radymnie. Rzeszów, 1999.
- [27] *Czarnecki L.* [edit]: Ocena skuteczności działania migrujących inhibitorów korozji stali w betonie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.

OFERUJEMY ZAMIESZCZANIE OGŁOSZEŃ NA ŁAMACH
„INŻYNIERII I BUDOWNICTWA”

SZCZEGÓŁOWE INFORMACJE POD ADRESEM REDAKCJI, TEL./FAX (0-22) 629 69 86