

Wpływ odchyłek grubości otuliny betonowej na przewidywaną trwałość konstrukcji żelbetowych

Dr inż. Paweł Tworzewski, Politechnika Świętokrzyska

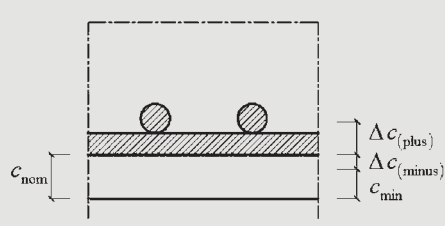
1. Wprowadzenie

Każda konstrukcja żelbetowa projektowana zgodnie z normą [N1] powinna mieć zapewnioną trwałość, tj. przez cały projektowany okres użytkowania (przypisany dla danej klasy konstrukcji) „[...] powinna spełniać wymagania ze względu na użytkowość, nośność i stateczność, bez istotnego obniżenia przydatności lub nadmiernych, nieprzewidzianych kosztów utrzymania” [N1]. Do znacznego obniżenia trwałości konstrukcji żelbetowych może dojść na skutek elektrochemicznej korozji zbrojenia spowodowanej niekorzystnym wpływem niektórych czynników środowiska [1, 2]. Należy zatem dążyć do tego, aby nie dopuścić do wystąpienia korozji [3]. Ochronę zbrojenia przed korozją powinna zapewnić otulina betonowa. Beton otuliny powinien być odpowiednio zagęszczony, wykonany z właściwie dobranych składników, z uwzględnieniem optymalnego stosunku w/c i minimalnej ilości cementu, a otulina powinna spełniać wymagania dotyczące minimalnej grubości zależnie od założonej klasy konstrukcji i klasy ekspozycji [N1, N2, 1, 2]. Spełnienie ww. wymagań

co do otuliny betonowej, nawet przy stałym oddziaływaniu na konstrukcję niekorzystnych warunków środowiska, powinno zapewnić trwałość konstrukcji (jeśli nie dojdzie do uszkodzeń mechanicznych).

Ochronna rola betonu względem zbrojenia wynika z jego wysoko alkalicznego odczynu $pH = 12,5-13,5$ (minimum 11,8), co skutkuje powstaniem na prętach zbrojeniowych warstwy pasywnej chroniącej je przed korozją [N1, 1, 2, 3]. Jeśli warstwa pasywna nie ulegnie uszkodzeniu, nie rozpoczną się procesy korozyjne na zbrojeniu. Uszkodzenie warstwy pasywnej może nastąpić w wyniku zubożenia czy korozji betonu otuliny na całej jej głębokości. Najczęściej może do tego dojść na skutek oddziaływania dwutlenku węgla zawartego w powietrzu (co doprowadza do karbonatyzacji betonu) czy chlorków pochodzących ze środków odladzających lub wody morskiej (powodujących korozję wżerową), a także zmian wilgotności i temperatury otoczenia – które to czynniki doprowadzają do stopniowych zmian w strukturze i składzie chemicznym betonu otuliny [4]. Obszary skorodowanego betonu sięgają z czasem coraz dalej w głąb otuliny. Jednak dopóki

Tabela 1. Dopuszczalne odchyłki dla otulenia zgodnie z normą PN-EN 13670 [N3]

Rodzaj odchyłki	Opis	Dopuszczalna odchyłka	
		Klasa tolerancji 1	Klasa tolerancji 2
$\Delta c_{(plus)}$ ^a	$h \leq 150$ mm	+ 10 mm	+ 5 mm
	$h = 400$ m	+ 15 mm	+ 10 mm
	$h \geq 2500$ mm	+ 25 mm	+ 20 mm
$\Delta c_{(minus)}$	–	Δc_{dev} ^b	Δc_{dev} ^b
c_{min} – wymagana otulina minimalna c_{nom} – otulina nominalna c – rzeczywista otulina Δc – dopuszczalna odchyłka h – wysokość przekroju poprzecznego		$c_{nom} + \Delta c_{(plus)} > c > c_{nom} - \Delta c_{(minus)} $ 	
^a – dopuszczalne odchyłki dodatnie otuliny zbrojenia fundamentów i elementów z betonu w fundamentach można zwiększyć o 15 mm			
^b – $\Delta c_{dev} = 10$ mm, jeśli nie podano innej wartości			

nie dotrą do zbrojenia i nie spowodują uszkodzenia warstwy pasywnej, dopóty zbrojenie jest zabezpieczone przed korozją. Dlatego bardzo ważne jest spełnianie zaleceń dotyczących przyjęcia minimalnej grubości otuliny uwzględniającej agresywność środowiska (klasa ekspozycji) i projektowany czas użytkowania konstrukcji (klasa konstrukcji). W tym aspekcie grubość otuliny betonowej jest ważnym elementem zapewnienia trwałości elementów konstrukcji żelbetonowych.

Szczegółowe informacje dotyczące dopuszczalnych odchyłek dla otulenia zbrojenia przedstawiono w normie PN-EN 13670 [N3]. Wyróżniono następujące odchyłki:

$\Delta c_{(minus)}$ (równa jest wartości Δc_{dev}),

$\Delta c_{(plus)}$ – wartość ustalana zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w tabeli 1.

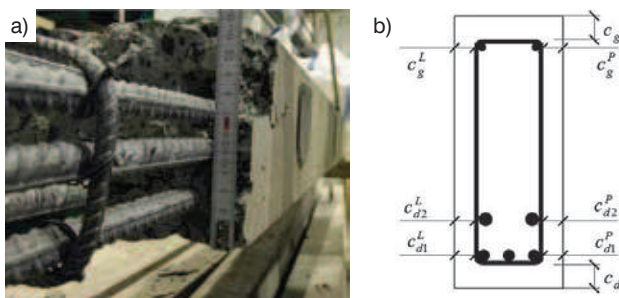
Wartość odchyłek dopuszczalnych zależna jest od klas tolerancji. Klasa tolerancji 1 określana jest jako normalna. Klasa tolerancji 2, przy której stosowane są zmniejszone materiałowe współczynniki bezpieczeństwa, wymusza zmniejszenie dopuszczalnych odchyłek. Klasę taką uzyskać można w przypadku prefabrykatów betonowych o wysokim poziomie jakości wykonania i kontroli.

Właściwe zagęszczenie i jakość otuliny można kontrolować na etapie wykonywania mieszanki betonowej poprzez kontrolę doboru składników, w tym przede wszystkim ilości cementu i stosunku w/c. Ostateczną grubość otuliny można określić dopiero po wykonaniu elementu [5]. Niestety przy ciągłych, wzrastających oszczędnościach, jakość budowlanej jest często daleka do zakładanej. Odchyłki grubości w stosunku do projektowanej grubości otuliny są często znaczące i tym samym wpływają na trwałość elementów czy konstrukcji żelbetonowych [6].

Celem pracy jest przedstawienie wyników dotyczących odchyłek grubości otuliny betonowej w belkach żelbetonowych wykonanych przez zakład prefabrykacji i określenie ich teoretycznego wpływu na przewidywaną trwałość elementów.

2. Opis przeprowadzonych badań

Pomiary grubości otuliny wykonano w ramach inwentaryzacji rozmieszczenia prętów zbrojeniowych w przekrojach 43 jedno- i dwuprzęsłowych belek żelbetonowych przebadanych w ramach dwóch projektów badawczych [N4, N5]. Wszystkie elementy wykonane zostały w zakładzie prefabrykacji. Wymiary przekroju poprzecznego wszystkich belek wynosiły 0,12×0,30 m. Całkowita długość elementów jednoprzęsłowych wynosiła 3,3 m (rozpiętości w osiach podpór 3,00 m), natomiast dwuprzęsłowych 6,3 m (rozpiętości w osiach podpór wynosiła również 3,00 m). Poszczególne belki różniły się konstrukcją oraz stopniem zbrojenia podłużnego. Pomiary grubości otuliny betonowej wykonywano dla każdej z belek po rozkuciu elementów (rysunek 1a) w wybranym przekroju, zgodnie z rysunkiem 1b. Wszelkie



Rys. 1. Inwentaryzacja zbrojenia podłużnego w przebadanych belkach żelbetonowych wraz z oznaczeniami, a) zdjęcie wykonane podczas inwentaryzacji, b) oznaczenie mierzonej grubości otuliny

nieprawidłowości w wykonaniu belek żelbetonowych przedstawione w pracy nie były projektowane. Wynikały one z błędów popełnionych podczas wykonywania elementów w zakładzie prefabrykacji.

3. Analiza uzyskanych wyników pomiarów grubości otuliny betonowej

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono analizę rozkładu grubości otuliny betonowej, której opis przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki analizy rozkładu grubości otuliny betonowej (uzyskane na podstawie inwentaryzacji przeprowadzonej w wybranych przekrojach 43 belek żelbetonowych)

Wartość średnia – \bar{c} [mm]	Wartość maksymalna – c_{max} [mm]	Wartość minimalna – c_{min} [mm]	Odchylenie standardowe – s [mm]	Współczynnik zmienności – V [%]	Wariancja – v
22,16	42,00	8,00	6,41	28,91	41,04

W celu uszczegółowienia analizy uzyskanych wyników wyznaczano odchyłki tej wartości poprzez porównanie rzeczywistej grubości otulenia z wartością $c_{nom} = 20$ mm – założoną w projekcie wykonawczym – wzór (1).

$$\Delta c = c - c_{nom} \quad (1)$$

gdzie:

Δc – odchyłka grubości otuliny betonowej,

c – grubość otuliny betonowej,

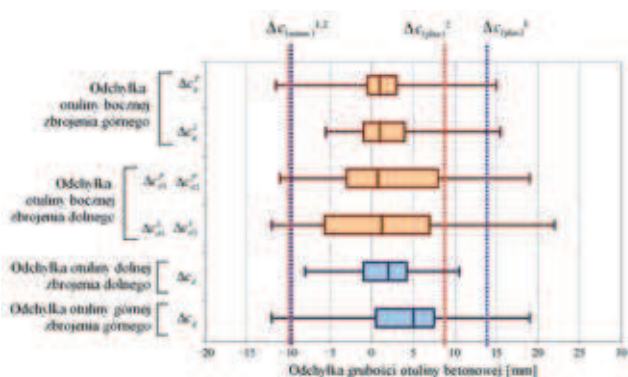
c_{nom} – projektowana grubość otulenia nominalnego równa 20 mm dla badanych elementów.

Uzyskane odchyłki uporządkowano w zależności od ich umiejscowienia w przekroju poprzecznym belek (zgodnie z rysunkiem 1b), a następnie przeprowadzono analizę ich rozkładu. Pozwoliło to na określenie miejsc charakteryzujących się największymi odchyłkami. Wyniki przedstawiono w tabeli 3 oraz w postaci graficznej – wykresy pudełkowe, na rysunku 2.

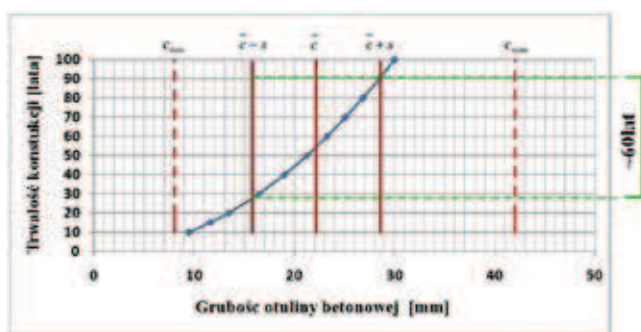
Największy rozrzut wyników odchyłek grubości otuliny

Tabela 3. Wyniki analizy rozkładu odchyłek grubości otuliny betonowej

Oznaczenie odchyłki	Wartość średnia [mm]	Wartość maksymalna [mm]	Wartość minimalna [mm]	Odchylenie standardowe [mm]	Wariancja
Δc_g^P	1,51	15,00	-11,50	4,54	20,62
Δc_g^L	2,24	15,50	-5,50	4,65	21,58
$\Delta c_{d1}^P, \Delta c_{d2}^P$	2,34	19,00	-11,00	7,78	60,53
$\Delta c_{d1}^L, \Delta c_{d2}^L$	1,16	22,00	-12,00	7,84	61,39
Δc^P	2,02	19,00	-11,50	6,69	44,76
Δc^L	1,58	22,00	-12,00	6,77	45,77
Δc_d	1,65	10,50	-8,00	3,95	15,60
Δc_g	4,51	19,00	-12,00	6,48	41,94



Rys. 2. Rozkład odchyłki grubości otuliny betonowej w zależności od umiejscowienia w przekroju belki



Rys. 3. Zależność pomiędzy grubością otuliny betonowej i trwałością, przy współczynniku 3 mm/rok^{0,5}

betonowej uzyskano dla grubości otuliny bocznej głównego (dolnego) zbrojenia rozciąganego w badanych belkach i jest on zdecydowanie większy niż w przypadku pozostałych rozpatrywanych miejsc. Uzyskana wartość odchylenia standardowego dla odchyłek $\Delta c_{d1}^L, \Delta c_{d2}^L$ osiągnęła wartość 7,84 mm natomiast dla odchyłek $\Delta c_{d1}^P, \Delta c_{d2}^P$ wartość ta wyniosła 7,78 mm. Jest to niepokojący wynik, ponieważ na jego podstawie można stwierdzić, że ochrona zbrojenia rozciąganego przed korozją (w rozumieniu grubości otuliny betonowej), podlega

największym wpływom jakości wykonania (największe odchyłki grubości otuliny betonowej).

Na rysunku 2 naniesiono również liniami pionowymi dopuszczalne odchyłki wyznaczone zgodnie z PN-EN 13670 [N3] (wymiary przekroju poprzecznego belki: 120x300 mm) dla klasy tolerancji 1 ($\Delta c_{(minus)}^1 = 10$ mm, $\Delta c_{(plus)}^1 = 13$ mm) oraz klasy tolerancji 2 ($\Delta c_{(minus)}^2 = 10$ mm, $\Delta c_{(plus)}^2 = 8$ mm). Jak wynika z rysunku 2, dopuszczalne odchyłki grubości otuliny betonowej były wielokrotnie przekroczone.

4. Wpływ odchyłek grubości otuliny betonowej na przewidywaną trwałość konstrukcji

Analizę wpływu wyznaczonych odchyłek otuliny betonowej oparto na zależności pomiędzy grubością zubożnienia betonu spowodowanego oddziaływaniem środowiska, a czasem [7] wyrażoną wzorem (2):

$$c_0 = K \sqrt{t} \tag{2}$$

gdzie:

- c_0 – grubość zubożnienia betonu,
- K – współczynnik doświadczalny,
- t – czas.

Współczynnik doświadczalny K we wzorze (2) jest parametrem uwzględniającym warunki otoczenia oraz właściwości betonu i zawiera się w dość dużym przedziale od 0 do 15 mm/rok^{0,5}. Ze względu na rozważania teoretyczne przyjęto współczynnik o wartości 3 mm/rok^{0,5} dla konstrukcji ostioniętej przed opadami atmosferycznymi, wykonanej z betonu o dużej zawartości cementu i $w/c \leq 0,5$. Parametry te są typowe dla większości konstrukcji żelbetowych.

Uzyskane wyniki zależności pomiędzy grubością otuliny betonowej a trwałością dla wybranego współczynnika przedstawiono na rysunku 3. Na wykresie naniesiono średnie, minimalne oraz maksymalne pomierzone grubości otuliny betonowej. Zaobserwowano, że rozrzut

grubości otuliny w granicach odchylenia standardowego ($s = 6,41$ mm), wiąże się z rozrzutem trwałości w zakresie około 60 lat.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano, że:

- w badanych prefabrykowanych belkach żelbetonowych występowały znaczne odchyłki grubości otuliny betonowej,
- największe odchyłki dotyczyły otuliny bocznej głównego (dolnego) zbrojenia rozciąganego,
- wartości dopuszczalne odchyłek grubości otuliny betonowej (określone dla analizowanych elementów zgodnie z PN-EN 13670) zostały przekroczone,
- minimalna zinwentaryzowana grubość otuliny wynosząca 8 mm nie jest w stanie zapewnić wymaganej trwałości przez okres 10 lat (dla założonych w analizie warunków),
- dla badanych belek rozrzut grubości otuliny w granicach odchylenia standardowego ($s = 6,41$ mm), wiąże się z rozrzutem przewidywanej trwałości sięgającym 60 lat.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ściślewski Z., Ochrona konstrukcji żelbetonowych, Warszawa, Arkady 1999
- [2] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetonowych, Inżynieria i Budownictwo, 10/2010, str. 519–525
- [3] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych, Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, PWN, Warszawa 2011
- [4] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Ocena zagrożenia korozją zbrojenia konstrukcji żelbetonowych cz. 1. – Badania właściwości ochronnych betonu, Przegląd Budowlany, 11/2012, str. 29–35
- [5] Runkiewicz L.: Stosowanie metod nieniszczących w zakładowej kontroli produkcji wyrobów i elementów budowlanych. 34 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Zakopane 2005, str. 75–84.

[6] Kucharska L., Katastrofy, awarie i uszkodzenia, a beton i jego rozwój, XX Konferencja Awarie Budowlane, 2001, str. 89–118

[7] Praca zbiorowa, Podstawy projektowania konstrukcji żelbetonowych i sprężonych według Eurokodu 2, Sekcja Konstrukcji Betonowych KLiW PAN, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2006

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

[N1] PN-EN 1992-1-1:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

[N2] PN-EN 206-1:2003/Ap1:2004 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność

[N3] PN-EN 13670:2011 Wykonywanie konstrukcji z betonu

[N4] Raport naukowy z realizacji Tematu Badawczego T.6.3

[N5] Raport z Projektu Rozwojowego NR 04 0007 10

NOWE OBLCZE BIM

KONFERENCJA \ 7 LISTOPADA 2017 \ WARSZAWA
MULTIKINO ŻŁOTE TARASY \ UL. ŻŁOTA 59

WŚRÓD PRELEAGENTÓW:

\ JESPER BOYE ANDERSEN
BIG - BJARKE INGELS GROUP \

\ KATARZYNA ORLIŃSKA-DEJER
DATACOMP \

\ STEFAN MORDUE
DIGITAL BUILT BRITAIN \

\ PAUL TUNSTALL
HLM \

\ LESZEK WŁOCHYŃSKI
HOCHTIEF POLSKA S.A. \

\ GRZEGORZ ROSIK
MIASTOPROJEKT WROCŁAW \

\ JANNE SALIN
YIT GROUP \

PATRONI HONOROWI

PATRONI MEDIALNI

SPONSORZY

WSC.PL/BIM