

OCENA ZGODNOŚCI BETONU A NIEZAWODNOŚĆ ŻELBETOWYCH ELEMENTÓW ŚCISKANYCH W KONSTRUKCJACH OBIEKTÓW KOLEJOWYCH

Streszczenie

W pracy określono wpływ kontroli jakości betonu na niezawodność żelbetowych elementów ściskanych zakwalifikowanych do klasy niezawodności RC2. Dokonano weryfikacji normowych kryteriów zgodności krzywymi AOQ w celu określenia kwantyla wytrzymałości betonu po przeprowadzonej kontroli zgodności.

Przeprowadzone analizy niezawodności odniesione zostały do jakości betonu weryfikowanego na podstawie kryteriów zgodności dla próby o liczebności $n=3$ i niezawodności słupa ściskanego. W przeprowadzonych analizach rozpatrywano najprostsz przykład elementu ściskanego, bowiem celem była ocena wpływu normowych kryteriów zgodności na wartość wskaźnik niezawodności.

WSTĘP

Zagadnienia niezawodności i trwałości betonowych obiektów infrastruktury kolejowej (wiaduktów, mostów i estakad) są nierozdzielnie związane z postanowieniami i wymaganiami norm europejskich.

W współczesnych normach wskazuje się na istotny wpływ przestrzegania środków zarządzania jakością na niezawodność konstrukcji, dlatego w pracy podjęto próbę określenia wpływu kontroli zgodności wytrzymałości betonu na ściskanie na niezawodność żelbetowych elementów ściskanych.

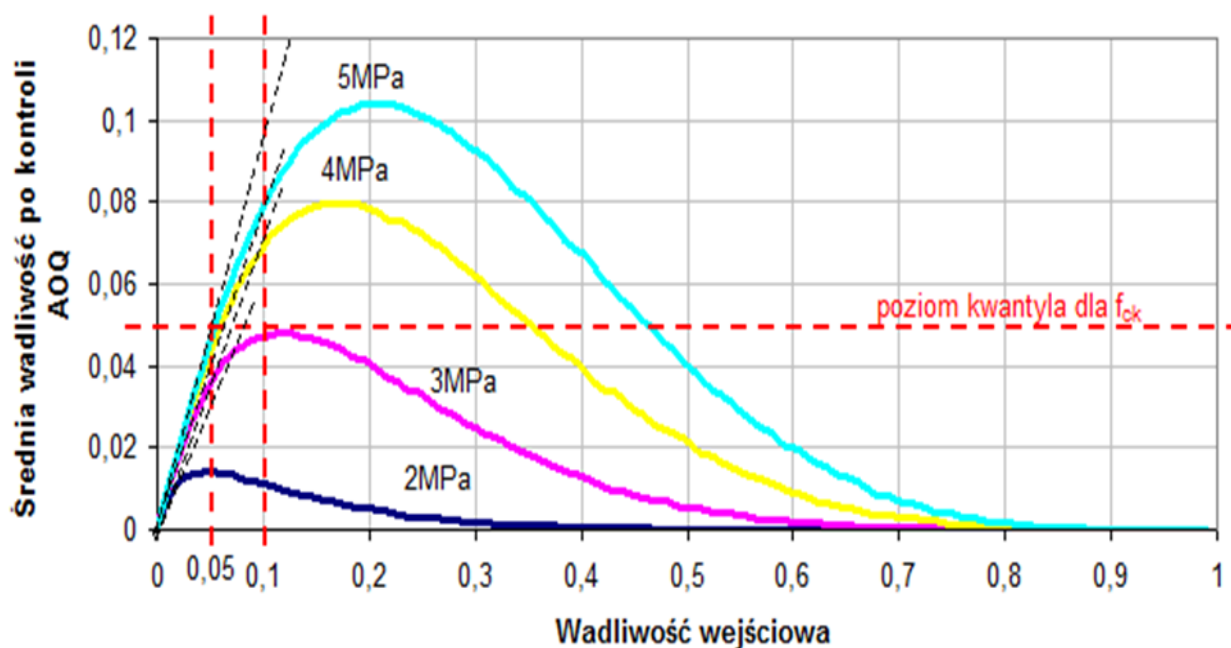
Niezawodność w normach projektowania konstrukcji definiowana jest jako zdolność konstrukcji do spełnienia określonych wymagań i obejmuje nośność, użyteczność i trwałość [1, 2].

Wymaganą niezawodność konstrukcji należy zapewnić projek-

tując zgodnie z zaleceniami normowymi, a także wykonując i podejmując odpowiednie środki mające na celu zapewnienie należytej jakości wykonania.

Kontrola jakości polega na sprawdzaniu, mierzeniu bądź testowaniu jednej lub większej liczby charakterystyk produktu (materiałów, wyrobów, elementów, konstrukcji) i porównaniu wyników z wyspecyfikowanymi wymaganiami w celu potwierdzenia zgodności. Celem kontroli jakości jest zapewnienie akceptowalnego poziomu jakości projektu, materiałów, wykrywania grubych „błędów” i innych czynników zagrażających niezawodności i bezpieczeństwu konstrukcji [3, 4].

Działania związane z uzyskaniem odpowiedniej jakości elementów i obiektów budowlanych obejmują: zarządzanie jakością, zapewnienie jakości oraz kontrole jakości i zgodności. Zarządzanie jakością obejmuje wszystkie działania podejmowane w celu okre-



Rys. 1. Średnia wadliwość po kontroli skonstruowana dla podwójnego kryterium zgodności, różnego odchylenia standardowego i próby o liczebności $n=3$

ślenia planu, zadań i podziału odpowiedzialności i wdrożenia systemu jakości. Zapewnienie jakości obejmuje wszystkie przedsięwzięcia niezbędne do uzyskania odpowiedniego stopnia pewności, że zostaną spełnione wymagania dotyczące jakości. Działania wpływające na jakość konstrukcji na etapie projektowania, realizacji, utrzymania, napraw i rozbiórki obiektu budowlanego tworzą tzw. pętlę jakości [2].

Niezawodność konstrukcji budowlanych zależy więc od wielu skorelowanych czynników, do których zaliczyć należy:

- jakość materiałów, dokładność wykonania i poziom kontroli,
- zabezpieczenia przed szkodliwymi wpływami środowiskowymi i poziom utrzymania w czasie eksploatacji,
- właściwy, zgodny z projektem sposób użytkowania,
- przyjęte rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe, szczegóły konstrukcyjne i stopień technologiczności konstrukcji,
- właściwości użytych materiałów budowlanych,
- rodzaje przyjętych oddziaływań, ich wartości i kombinacje,
- wymagania normowe dotyczące nośności, użyteczności i trwałości,
- adekwatność i jakość przyjętych modeli obliczeniowych wykorzystywanych w procesie projektowania konstrukcji [5].

Wymagania dotyczące niezawodności konstrukcji są formułowane w normach projektowania, a wymagania dotyczące jakości w normach kontroli jakości [3, 5].

1. KWANTYL WYTRZYMAŁOŚCI BETONU W KONSTRUKCJI A NORMOWE KRYTERIA ZGODNOŚCI

Podstawą kwalifikacji betonu i określenia jego jakości poprzez podanie jego klasy jest wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie, określana jako kwantyl na zadanym poziomie prawdopodobieństwa. W celu zweryfikowania zgodności wytrzymałości rozważanej partii betonu z projektowaną klasą betonu, należy sprawdzić czy wyniki badań próbek spełniają odpowiednie kryteria statystyczne. Zalecane w [6] normowe kryteria zgodności wykazują liczne wady, wskazane między innymi w pracach [7, 8, 9, 10].

Zgodnie z [10] dla próby o liczebności $n=3$ nie są spełnione wymagania dotyczące jakości betonu, a uzyskana w konstrukcji wadliwość betonu po kontroli jest większa od 0,05. Beton o odchyleniu standardowym powyżej 3 MPa nie spełnia wymogu zalecanej w normie PN-EN 206-1:2014 [6] wartości kwantyla wytrzymałości betonu na ściskanie do uzyskania projektowanej wytrzymałości charakterystycznej (klasy betonu) (rys. 1).

Wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie po kontroli nie odpowiada wymaganiom klasy betonu według [6], dlatego w pracy określono wpływ kontroli zgodności na niezawodność elementów żelbetowych.

2. NORMOWE KRYTERIA ZGODNOŚCI A NIEZAWODNOŚĆ ŚCISKANYCH ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

W celu określenia wpływu wadliwości po kontroli zgodności w przypadku zweryfikowania betonu na podstawie próby o liczebności $n=3$, na wartość wskaźnika niezawodności w konstrukcjach żelbetowych, przeprowadzono obliczenia dla ściskanego słupa żelbetowego zgodnie z zalecaną w [1,2,11] metodą FORM.

Przyjęto słup, jako wewnętrzny element wydzielony, usztywniony za pośrednictwem belki wieloprzęsłowej, wysokości $l = 2,8\text{m}$, $l_0 = 0,7 \cdot l = 1,96\text{m}$.

Obciążony głównie siłą ściskającą pochodzącą od obciążeń stałych i zmiennych, o następujących parametrach:

Obciążenia stałe: współczynnik zmienności $v_P = 5\%$, obciążenie charakterystyczne: $P_k = 2222\text{kN}$,

obciążenie średnie: $\bar{P} = P_k \cdot (1 - 1,645 \cdot v_P) = 2053\text{kN}$,

obciążenie obliczeniowe: $P_d = 1,35 \cdot 2222 = 3000\text{kN}$,

odchylenie standardowe: $\sigma_P = 102,6\text{kN}$.

Obciążenia zmienne: współczynnik zmienności $v_Q = 30\%$, obciążenie charakterystyczne: $Q_k = 952\text{kN}$,

obciążenie średnie: $\bar{Q} = Q_k \cdot (1 - 1,645 \cdot v_Q) = 637\text{kN}$,

obciążenie obliczeniowe: $Q_d = 1,5 \cdot 0,7 \cdot 952 = 1000\text{kN}$,

odchylenie standardowe $\sigma_Q = 191\text{kN}$.

Ciężar własny słupa: współczynnik zmienności $v_g = 5\%$,

$\bar{g} = g_k \cdot (1 - 1,645 \cdot v_g) = 23,1\text{kN/m}$,

$g_k = 25\text{kN/m}$, $g_d = 1,35 \cdot 25 = 33,75\text{kN/m}$,

$\sigma_g = 1,1\text{kN/m}$.

Parametry wymiarów geometrycznych: współczynnik zmienności $v_d = 5\%$, $h = h_m$, $d = d_m$, $b = b_m$.

Z uwagi na przyjęte założenie o stałym polu przekroju zbrojenia ściskanego ($A = 9,42\text{cm}^2$), zmieniano przekrój poprzeczny słupa, tak aby dla tej samej siły spełniony był warunek nośności, we wszystkich analizowanych przypadkach.

Dane materiałowe

Stal zbrojeniowa: współczynnik zmienności

$v_y = 8\%$, $f_{ym} = f_{yk} / (1 + 1,645 \cdot v_y) = 575\text{MPa}$,

$f_{yk} = 500\text{MPa}$, $f_{yd} = 435\text{MPa}$, $\sigma_y = 46\text{MPa}$.

Parametry dla beton przyjęto wg tabeli 1.

Niejednorodność betonu po kontroli zgodności oszacowano na podstawie kwantyla wadliwości betonu po kontroli określonego na podstawie rys. 1 dla założonej wytrzymałości średniej betonu na ściskanie. Wartości wadliwości wyjściowej zamieszczone w Tabeli 1 otrzymano na podstawie krzywych AOQ (styczne, linie przerywane - rys. 1), gdy zweryfikowane partie nie są segregowane.

Tab.1. Kwantyle dla charakterystycznej wytrzymałości betonu na ściskanie określone na podstawie wadliwości wyjściowej po kontroli zgodności dla próby o liczebności $n=3$

Lp.	σ_c [MPa] (odchylenie standardowe przed kontrolą)	Kwantyl dla f_{ck}	$\sigma_{c(AOQ)}$ [MPa] (odchylenie standardowe wyjściowe)
1	1,5	$t_{tck}(w=0,009) \rightarrow 2,365$	3,4
2	2,0	$t_{tck}(w=0,014) \rightarrow 2,365$	3,6
3	3,0	$t_{tck}(w=0,049) \rightarrow 1,654$	4,8
4	4,0	$t_{tck}(w=0,065) \rightarrow 1,514$	5,3
5	4,8	$t_{tck}(w=0,099) \rightarrow 1,287$	6,2
6	5,0	$t_{tck}(w=0,104) \rightarrow 1,259$	6,4

Tab.2. Wytrzymałość średnia, charakterystyczna i obliczeniowa dla betonu po przeprowadzonej kontroli zgodności (wartości wytrzymałości dla wadliwości wyjściowej po kontroli)

Lp.	Klasa betonu	f_{cm} [MPa]	f_{ck} [MPa]	f_{cd} [MPa]
1	C16/20	24	16	11,43
2	C20/25	28	20	14,29
3	C25/30	33	25	17,86
4	C30/37	38	30	21,43

W obliczeniach probabilistycznych posłużono się programem komputerowym Matlab. Z uwagi na smukłość słupa $\lambda \leq \lambda_{lim}$, pominięto wpływ efektów II rzędu a zdefiniowana funkcja stanu granicznego Z przyjmuje postać:

$$Z = N_R - N_E \quad (1)$$

gdzie: $N_E = \chi_E (Q_S + P + Q)$

Q_S - siła ściskająca wywołana ciężarem własnym słupa,

χ_E – niepewność modelu efektu oddziaływań
 N_R – nośność słupa określona przy założeniu ściskania „technicznie osiowego”.

Tab.3. Wartość wskaźnika niezawodności β dla słupa ściskanego i wadliwości wejściowej (teoretycznej)

Lp.	Odchylenie standardowe przed kontrolą [MPa]	Wskaźnik niezawodności w zależności od klasy betonu i przekroju poprzecznego słupa			
		C16/20 b = h = 55 cm	C20/25 b = h = 50 cm	C25/30 b = h = 45 cm	C30/37 b = h = 41 cm
1	1,5	7,38	7,61	7,7	7,7
2	2	6,48	6,83	7,0	7,18
3	3	5,04	5,49	5,9	6,15
4	4	4,04	4,48	4,92	5,26
5	4,86	3,43	3,84	4,27	4,62
6	5	3,35	3,76	4,18	4,53

Tab.4. Wartość wskaźnika niezawodności β dla słupa ściskanego i wadliwości wyjściowej

Lp.	Oszacowana wartość odchylenia standardowego po kontroli [MPa]	Wskaźnik niezawodności w zależności od klasy betonu i przekroju poprzecznego słupa			
		C16/20 b = h = 55 cm	C20/25 b = h = 50 cm	C25/30 b = h = 45 cm	C30/37 b = h = 41 cm
1	3,4	3,99	4,60	5,25	5,77
2	3,6	3,82	4,42	5,07	5,59
3	4,8	3,01	3,57	4,14	4,66
4	5,3	2,76	3,26	3,83	4,34
5	6,2	2,40	2,84	3,37	3,85
6	6,4	2,33	2,76	3,28	3,75

Według [3] przy mimośrodku $e_0 = 0$ wzór na nośność słupa zmierza do wartości brzegowej określonej wzorem (2):

$$N_R = \chi_R \cdot (b \cdot d \cdot f_c + 2 \cdot A_s \cdot f_y) \quad (2)$$

gdzie: χ_R – niepewność modelu nośności słupa
 χ_E, χ_R – przyjęto wartość charakterystyczną współczynników równą 1, współczynnik zmienności oraz odchylenie standardowe:
 $v_\chi = 10\%$, $\sigma_\chi = 0,1$.

Otrzymane wartości wskaźnika niezawodności dla wadliwości rzeczywistej oraz teoretycznej w zależności od klasy betonu i odchylenia standardowego, zestawiono w tabeli 3 i 4.

Tab.5. Spełnienie wymagań dla klasy niezawodności RC2 dla ściskanych elementów żelbetowych przy kontroli zgodności dla próby o liczebności $n=3$

Lp.	Wartość odchylenia standardowego przed kontrolą [MPa]	Wartość odchylenia standardowego po kontroli [MPa]	Spełnienie wymagań dla klasy niezawodności RC2			
			C16/20 b = h = 55 cm		C20/25 b = h = 50 cm	
			Przed kontrolą	Po kontroli	Przed kontrolą	Po kontroli
1	1,5	3,4	+	+	+	+
2	2	3,6	+	+	+	+
3	3	4,8	+	-	+	-
4	4	5,3	+	-	+	-
5	4,86	6,2	-	-	- / +	-
6	5	6,4	-	-	-	-

3. JAKOŚĆ BETONU A NIEZAWODNOŚĆ ŚCISKANYCH ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

Niezawodność osiągana jest m.in. poprzez wbudowanie materiałów o odpowiedniej jakości. Jakość materiałów implikuje więc osiągnięcie przez konstrukcję założonego poziomu bezpieczeństwa i niezawodności. W odniesieniu do analizowanego przypadku (słupa ściskanego) zależność między jakością wbudowanego materiału konstrukcyjnego, a niezawodnością przedstawiono w Tabeli 5.

Na podstawie danych zamieszczonych w tej tabeli, zauważalny jest wpływ kontroli zgodności na wartość wskaźnika niezawodności ściskanych elementów żelbetowych i spełnienia wymagań dla minimalnego poziomu niezawodności dla klasy RC2. W przypadku słupa ściskanego wykonanego z betonu klasy C16/20 oraz próby o liczebności $n=3$ i odchylenia standardowego oszacowanego przed kontrolą na poziomie powyżej 2 MPa, nie spełnione są wymagania EN 1990: 2002 [1] odnośnie docelowej wartości wskaźnika niezawodności. W przypadku słupa wykonanego z betonu C25/30 dla odchylenia standardowego przed kontrolą 4,86 MPa i 5 MPa otrzymana wartość wskaźnika niezawodności analizowanego elementu również nie spełnia wymagań dotyczących wymagań niezawodności dla klasy RC2.

Normowe kryterium zgodności dla wartości średniej zaproponowane w normie PN-EN-206-1:2014 [6] dla $n=3$ przyjęte zostało zgodnie z poniższym algorytmem (3 – 6)

$$f_{cm} \geq f_{ck} + k_1 \quad (3)$$

$$f_{cm} \geq f_{ck} + \left(\frac{k_1}{\sigma}\right) \cdot \sigma \quad (4)$$

$$f_{cm} \geq f_{ck} + \lambda' \cdot \sigma \quad (5)$$

gdzie: $k_1 = 4 \text{ MPa}$ - wartość współczynnika testowego zalecanego przez normę [6]

σ - odchylenie standardowe dla populacji.

$$\frac{k_1}{\sigma} = \lambda' \quad (6)$$

Zaproponowane przez Taerwe [12] i zalecane w normie PN-EN 206-1:2014 [6] wartości λ' dla skorelowanych wyników i próby o liczebności $n=3$ to $\lambda' = 2,67$.

W przypadku produkcji początkowej norma narzuca stałą wartość odchylenia standardowego na poziomie $4/2,67=1,5 \text{ MPa}$ bez względu na wartość średniej wytrzymałości betonu.

Otrzymane wartości wskaźników niezawodności potwierdzają fakt, że normowe kryteria zgodności dla próby o liczebności $n=3$, zostały opracowane dla odchylenia standardowego 1,5 MPa i dla tej wartości w każdym analizowanym przypadku spełnione są wymagania dotyczące niezawodności.

PODSUMOWANIE

Stwierdzono wpływ kontroli zgodności na wartość wskaźnika niezawodności dla ściskanych elementów żelbetowych. Przeprowadzone analizy dotyczące niezawodności słupa ściskanego potwierdziły, że normowe kryteria zgodności dla próby o liczebności $n=3$ zostały sformułowane dla odchylenia standardowego 1,5 MPa i dla tej wartości odchylenia standardowego otrzymane wartości wskaźnika niezawodności są mniejsze od docelowego wskaźnika niezawodności dla klasy RC 2.

W przypadku słupa ściskanego wykonanego z betonu klasy C16/20 dla próby o liczebności $n=3$ i wartości odchylenia standardowego przed kontrolą większego od 2 MPa, nie spełnione są

wymagania normy PN-EN 1990:2002 odnośnie minimalnego poziomu niezawodności zalecanego dla klasy niezawodności RC 2.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 1990 Eurokod 0: Projektowanie konstrukcji
2. PN-ISO 2394: kwiecień 2000, Ogólne zasady niezawodności konstrukcji budowlanych
3. Pawlikowski J. Podstawy projektowania probabilistycznego konstrukcji z betonu. Prace naukowe ITB, WITB, Warszawa 2004
4. Murzewski J. Niezawodność konstrukcji inżynierskich. Arkady, Warszawa 1989
5. Woliński Sz., Niezawodność konstrukcji budowlanych. Rozdział 4.11, w: Praca zbiorowa, Budownictwo ogólne. T.3, Arkady, Warszawa 2008, s. 376-419.
6. PN-EN 206-1: 2014 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, PKN
7. Brunarski L. Podstawy matematyczne kształtowania kryteriów zgodności wytrzymałości materiałów, Prace naukowe ITB, WITB, Warszawa, 2009
8. Szczygielska E., Tur W., Kryterium zgodności wytrzymałości betonu na ściskanie opracowane na podstawie statystyk porządkowych, Budownictwo i Architektura 12(3), 2012, s. 223-230
9. Skrzypczak I., Woliński Sz. Influence of distribution type on the probability of acceptance of conformity criteria for concrete strength. Archives of Civil Engineering 53(3), 2007, s. 479-495
10. Skrzypczak I., Analiza kryteriów oceny jakości betonu oraz ich wpływu na ryzyko producenta i odbiorcy, OWPRz, Rzeszów 2013
11. Nowak A.S, Collins K.R: Reliability of Structures. McGraw-Hill Higher Education, 2000.
12. Taerwe L.: Evaluation of compound compliance criteria for concrete strength, RILEM, Materials and Structures 21, 1988, str 13-20.
13. PN-EN 1992 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu

ASSESSMENT OF THE CONCRETE COMPLIANCE AND RELIABILITY OF COMPRESSIVE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN STRUCTURES OF RAILWAY OBJECTS

Abstract

The influence of conformity control of concrete with regard to the recommended class reliability for RC2 have been identified in this article. In order to determine the average maximum defective after control, verification of compliance criteria using curves AOQ has been made. In order to determine reliability with regard to the quality of the concrete verified on the basis of the conformity control for the sample of $n = 3$, calculations for reinforced concrete elements - compressed column have been made.

Autorzy:

dr **inz. Lidia Buda-Ożóg** – Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Poznańska 2, lida@prz.edu.pl

Klaudia Kwaśniak - Politechnika Rzeszowska, studentka Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Kierunek Ochrony Środowiska

dr **hab. inz. Izabela Skrzypczak** – Politechnika Rzeszowska, Zakład Geodezji i Geotechniki, ul. Poznańska 2, izas@prz.edu.pl