

RELATION BETWEEN RELIABILITY AND REINFORCEMENT MANUFACTURING ERRORS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

BŁĘDY W WYKONAWSTWIE ZBROJENIA BELEK ŻELBETOWYCH A NIEZAWODNOŚĆ ELEMENTU

Abstract

Ensuring the reliability of the structure or its elements is mainly dependent on the quality of materials and workmanship. A huge problem for reinforced concrete structures is both: employee awareness that the concrete works hide all their errors, and inadequate quality control mainly at the stage of reinforcement inspection. These attitudes result in frequent errors in rebar location, or even lack of rebars. This paper attempts to assess the impact of position deviations in the longitudinal reinforcing bars in cross-section of beams on the reliability of element. The calculation is based on the experimentally determined random variation of parameters characterizing elements which have been made in the precast factory.

Keywords: reliability, reliability index, concrete, reinforced concrete, quality control, workmanship quality

Streszczenie

Zapewnienie niezawodności konstrukcji bądź jej elementów jest uzależnione w dużej mierze od jakości stosowanych materiałów oraz prowadzonych robót. W wykonawstwie konstrukcji żelbetowych duży problem stanowią zarówno świadomość pracowników, że prace betoniarskie ukryją ich wszystkie błędy, jak i niedostateczna kontrola jakości, głównie na etapie odbioru zbrojenia. Rezultatem są często błędy w rozmieszczeniu prętów zbrojeniowych bądź ich niedobór. W pracy podjęto próbę oceny wpływu odchyłek w położeniu prętów zbrojenia podłużnego w przekroju belek żelbetowych na niezawodność elementu. Obliczenia oparto na doświadczalnie ustalonej zmienności losowej parametrów wykonanych w zakładzie prefabrykacji elementów.

Słowa kluczowe: niezawodność, wskaźnik niezawodności, belki żelbetowe, kontrola jakości, jakość wykonania

1. Introduction

The formation of risks, failures, and even building disasters is often associated with quality and durability of the materials used for construction [1, 2]. The influence of workmanship quality on the reliability of structures is very difficult to define. It depends among other things on subjective factors including the human factor (the designer experience, and above all, the reliability of the contractor) [1, 3, 4].

In engineering practice, the assessment of structure or its part safety is based on the analysis of the reliability index β . This index is an objective determinant of the construction safety and allows the measure of safety to pass from deterministic to probabilistic. Reliability index depends on the

1. Wstęp

Powstawanie zagrożeń, awarii, a nawet katastrof budowlanych jest często związane z jakością i trwałością zastosowanych materiałów konstrukcyjnych [1, 2]. Wpływ jakości wykonania na niezawodność konstrukcji należy do oddziaływań bardzo trudnych do zdefiniowania. Uzależniony jest on między innymi od czynników subiektywnych obejmujących czynnik ludzki, tzn. doświadczenie projektanta, a przede wszystkim rzetelność wykonawcy [1, 3, 4].

W praktyce inżynierskiej ocena bezpieczeństwa konstrukcji bądź jej elementu bazuje na analizie wskaźnika niezawodności β , który stanowi obiektywną miarę jej bezpieczeństwa i umożliwia przejście od probabilistycznej do deterministycznej miary bezpieczeństwa.

probability of structure/element failure (for example, exceed in Ultimate Limit States) which according to FORM (First Order Reliability Methods) [5], is expressed by equation:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1)$$

where: P_f – the probability of failure, Φ – the cumulative distribution function of the standardised normal distribution.

Reliability index value can be estimated from formula (2), provided that the performance function g (3) (the relevant function of limit state) is normally distributed.

$$\beta = \frac{\bar{g}}{\Delta g} \quad (2)$$

where: \bar{g} – the mean value of g , Δg – standard deviation of the function g ,

$$g = R - E \quad (3)$$

where: R – the resistance (for example: capacity), E – the effect of actions.

The most common method of estimating the reliability index is the Monte Carlo method. In this method, individual parameters (components of the considered model) are random numbers generated by computer. This is possible by selection of the input data, typically in the form of: the mean value and standard deviation [3]. Other methods include: the interval method, linearization and analytical method [6].

According to PN-EN 1990 [5], ensuring of the reliability is guaranteed by: design complying with the standards, proper workmanship, adequate materials quality. There are three classes of reliability: RC3, RC1 and RC2 (defined by minimum values of reliability index β – Table 1) [7, 8]. Reliability classes are correlated with:

- consequences classes: CC3, CC2, CC1 – dependent on the threats to human life and the economic, social and environmental consequences of failure of the structure,
- design supervision levels: DSL3, DSL2, DSL1,
- inspection levels: IL3, IL2, IL1.

Compressive strength of concrete and its control is considered to be the dominant parameter affecting the load capacity of reinforced concrete structures. Hence, issues related to the quality of the concrete in relation to the reliability of the structure has been widely presented in many

Wskaźnik ten zależny jest od prawdopodobieństwa zniszczenia konstrukcji/elementu tj. przekroczenia stanu granicznego, co zgodnie z metodą FORM - first order reliability methods [5], wyraża się wzorem:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1)$$

gdzie: P_f – prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji, Φ – funkcja rozkładu prawdopodobieństwa standaryzowanego rozkładu normalnego.

Wartość wskaźnika niezawodności można oszacować ze wzoru (2), pod warunkiem, że rozważana funkcja stanu granicznego g (wzór (3)), ma rozkład normalny.

$$\beta = \frac{\bar{g}}{\Delta g} \quad (2)$$

gdzie: \bar{g} – wartość średnia g , Δg – odchylenie standardowe g ,

$$g = R - E \quad (3)$$

gdzie: R – odporność (np. nośność), E – efekt oddziaływań.

Najpopularniejszą metodą szacowania wskaźnika niezawodności jest metoda Monte Carlo. W metodzie tej wartości poszczególnych parametrów, będących składowymi rozpatrywanego modelu, są liczbami losowymi generowanymi komputerowo. Jest to możliwe dzięki wprowadzeniu danych wejściowych, zazwyczaj w postaci wartości średniej i odchylenia standardowego [3]. Do innych metod można zaliczyć metodę przedziałową, linearyzacji oraz analityczną [6].

Zgodnie z normą PN-EN 1990 [5], zapewnienie niezawodności gwarantowane jest poprzez: projektowanie zgodne z normami, poprawne wykonanie, zapewnienie odpowiedniej jakości materiałów. Wyróżniamy trzy klasy niezawodności: RC3, RC2 i RC1 (definiowane przez minimalne wartości wskaźników niezawodności β – tabela 1) [7, 8]. Klasy niezawodności skorelowane są z klasami:

- konsekwencji: CC3, CC2, CC1 – zależnymi od zagrożenia życia ludzkiego i konsekwencji ekonomicznych, społecznych oraz środowiskowych zniszczenia konstrukcji,
- poziomu nadzoru przy projektowaniu: DSL3, DSL2, DSL1,
- inspekcji w trakcie wykonania: IL3, IL2, IL1.

Wytrzymałość betonu na ściskanie i jej kontrola uznawana jest za dominujący parametr wpływający na nośności konstrukcji żelbetowych. Problematyka związana z jakością betonu w odniesieniu do niezawodno-

papers [9, 10]. This includes compliance criteria for a sample size $n = 3$ (PN-EN 206-1 [11]). It has been found that sample size criteria may in some cases result in failure to provide the quality and reliability of new structures [10].

ści konstrukcji jest szeroko poruszana w wielu pracach [9, 10]. Dotyczy to między innymi kryterium zgodności dla próby o liczebności $n = 3$ (PN-EN 206-1 [11]). Stwierdzono, że może to w niektórych przypadkach wiązać się z niezapewnieniem odpowiedniej jakości i niezawodności realizowanych obiektów [10].

Table 1. Minimum values of the reliability index depending on the reliability class [5]

Tabela 1. Minimalne wartości wskaźników niezawodności w zależności od klasy niezawodności [5]

Reliability Class	Minimum values for reliability index β	
	12 years reference period	50 years reference period
RC3	5.2	4.3
RC2	4.7	3.8
RC1	4.2	3.3

Assessment of reinforcement quality and its impact on the reliability of the construction is much more difficult. It should be underlined that in the case of reinforced concrete structures the most common mistakes include: incorrect number of rebars, incorrect position of rebars and their deformations. Studies carried out by ITB show that these errors are the most common cause of defects in concrete structures [12]. There are many methods to control the reinforcement quality in concrete products and components [2], which are widely used in the diagnosis, but rarely used in the quality control. In this paper the influence of incorrect longitudinal reinforcement bars position in cross-section of element on beam reliability was estimated (based on the measurements carried out for the real elements).

2. Experiment and Collected Data

The results used in analysis were collected during research conducted in the Laboratory of Concrete Structures and Technical Objects Diagnosis in Kielce University Technology, in the framework of two research projects: research and development Project NO 04000710 [13] and research topic T.6.3 [14]. The data included the position inventory of the longitudinal reinforcement bars in cross-section of reinforced concrete beams and strength properties for materials which were used to prepare those elements. For the analysis single-span beams with the dimensions 120 x 300 mm in cross-section and a total length of 3300 mm were selected (planned concrete class C40/50, steel BS500). Longitudinal reinforcement was composed of the following rebars 3 ϕ 12 and 2 ϕ 14 at the bottom, arranged in two layers (reinforcement ratio 2.14%) and 2 ϕ 8 at the top. The elements were made in the precast factory.

Ocena jakości wykonania zbrojenia i jego wpływu na niezawodność konstrukcji jest znacznie trudniejsza do oszacowania. Należy podkreślić, że w przypadku konstrukcji żelbetowych do najczęstszych błędów pojawiających się na etapie wykonania można zaliczyć: niedobór zbrojenia, niezgodność rozmieszczenia oraz deformacje prętów. Badania Instytutu Techniki Budowlanej wykazały, że błędy te są najczęstszą przyczyną uszkodzeń konstrukcji żelbetowych [12]. Istnieje wiele metod kontroli zbrojenia w wyrobach i elementach żelbetowych [2]. Mają one szerokie zastosowanie w diagnostyce, ale rzadko są stosowane w kontroli wykonawstwa. W niniejszej pracy podjęto próbę oceny wpływu odchyłek w położeniu prętów zbrojenia podłużnego w przekroju belek żelbetowych na ich niezawodność, w oparciu o wykonane podczas badań pomiary.

2. Opis przeprowadzonych badań

Analizę wykonano na podstawie danych zgromadzonych podczas wykonywania badań 24 belek żelbetowych w ramach zrealizowanych w Katedrze Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych Politechniki Świętokrzyskiej dwóch projektów badawczych: projektu badawczo-rozwojowego NR 04000710 [13] oraz tematu badawczego T.6.3 [14]. Dane te obejmowały inwentaryzację położenia prętów zbrojenia podłużnego w przekroju belek żelbetowych oraz wyniki pomiarów cech wytrzymałościowych zastosowanych do ich wykonania materiałów.

Do analizy wybrano elementy jednoprzęsłowe o wymiarach przekroju 120 x 300 mm i długości całkowitej 3300 mm (planowana klasa betonu C40/50, stal BS500). Zbrojenie podłużne belek złożono z prętów 3 ϕ 12 i 2 ϕ 14 dołem, ułożonych w dwóch warstwach (stopień zbrojenia głównego 2,14%) oraz 2 ϕ 8 góra. Elementy wykonano w zakładzie prefabrykacji.

During studies beams were loaded monotonically until failure with two concentrated forces as it is shown in Table 2 on two static schemes. Maximum values of bending moments which were obtained during studies are also shown in Table 2.

Podczas badań poszczególne belki obciążane były w sposób monotoniczny do zniszczenia za pomocą dwóch sił skupionych przyłożonych zgodnie ze schematami statycznymi przedstawionymi w tabeli 2, w której podano także wartości uzyskanych momentów niszczących.

Table 2. The experimental load capacity values for considered reinforced concrete beams
Tabela 2. Wartości nośności rzeczywistej rozpatrywanych belek żelbetowych

Beam symbol	Maximum value of bending moment M_{Rd} [kNm]	Static scheme
A2M-1	82.86	
A2M-2	79.03	
C2M-1	88.82	
C2M-2	85.03	
D2M-1	87.79	
D2M-2	82.37	
S2M-1	90.35	
S2M-2	91.29	
S2M-3	80.84	
S2M-4	80.81	

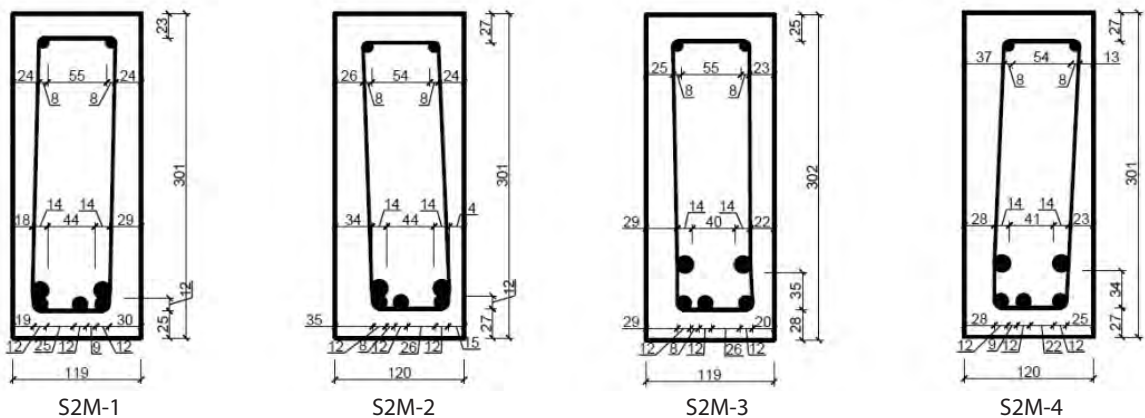


Fig. 1. Examples of results of the inventory – the real position of the longitudinal reinforcement bars
Rys. 1. Przykładowe wyniki inwentaryzacji położenia prętów zbrojenia podłużnego

After the studies (failure of beams) the inventory of longitudinal reinforcing bars position in the cross-section for each beam was carried out. The results of the inventory are shown on the four beams (Fig. 1.) The analysis of distribution of measured concrete cover deviations (for 43 beams) and comparison of the results with the limit values

Po wykonaniu badań obciążania do zniszczenia belek przeprowadzono inwentaryzację położenia prętów zbrojenia podłużnego w przekroju każdej z nich. Uzyskane rezultaty pomiarów przedstawiono na przykładzie czterech belek (rys. 1.) Analizę rozkładu odchyłek grubości otuliny betonowej zmierzonych w 43 belkach oraz zestawienie otrzymanych

according to PN-EN 13670 [15] were presented in [16, 17].

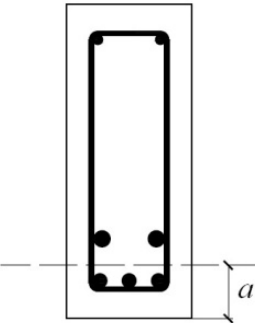
Based on the results of the inventory, the main reinforcement center of gravity in relation to the bottom edge was calculated for each element – value a . The obtained values and the results of the statistical analysis are shown in Table 3.

wyników z wartościami dopuszczalnymi, zgodnie z PN-EN 13670 [15], przedstawiono w pracach [16, 17].

W oparciu o wyniki inwentaryzacji położenia zbrojenia wyznaczono wartości a , czyli odległości środka ciężkości prętów rozciąganego zbrojenia do krawędzi dolnej belek. Otrzymane wartości wraz z wynikami analizy statystycznej rozkładu wartości a przedstawiono w tabeli 3.

Table 3. Analysis results for the distribution of a

Tabela 3. Wyniki analizy rozkładu wartości a dla rozpatrywanych belek

Beam symbol	a [mm]	The results of the analysis of the distribution of value a	
A2M-1	47.31		\bar{a} – average value = 47.54 mm
A2M-2	56.64		S – standard deviation = 6.03 mm
D2M-1	49.22		a_{\min} – minimum value = 37.18 mm
D2M-2	53.55		a_{\max} – maximum value = 56.64 mm
C2M-1	44.32		V – coefficient of variation = 12.67%
C2M-2	47.17		
S2M-1	37.18		
S2M-2	39.18		
S2M-3	51.13		
S2M-4	49.65		

3. Analysis and Results

To assess the impact of deviations in the position of the main reinforcement bars in cross-section of beams on their reliability, the following data were used:

- data concerning the longitudinal reinforcement bars position in cross-section of elements determined based on inventory,
- data about the design position of the bars shown on the working drawings,
- data about the distribution of the yield strength of reinforcing steel determined on the basis of the accompanying studies (tensile test for rebars).

Theoretical bearing capacity of reinforced concrete beam was adopted in the form of the function expressed by equation:

$$M_{Rd} \leq A_{s1} f_y z \quad (4)$$

where: A_{s1} – is the area of reinforcement in the tension zone, f_y – is the yield strength of reinforcing steel, z – is the arm of internal forces.

The values of basic variables used in the analysis are summarized in Table 4. The standard deviation for the area of the rebar was adopted to be 0 cm². This simplification was considered sufficient, due to the small real deviation of this value.

3. Przeprowadzona analiza oraz uzyskane wyniki

Do przeprowadzenia oceny wpływu odchyłek w położeniu prętów zbrojenia głównego, w przekroju belek żelbetowych, na ich niezawodność wykorzystano:

- dane dotyczące położenia prętów zbrojenia podłużnego w przekroju elementów określone na podstawie wykonanej inwentaryzacji,
- dane dotyczące projektowanego położenia prętów podane na rysunkach wykonawczych,
- dane dotyczące rozkładu granicy plastyczności stali zbrojeniowej określone na podstawie badań towarzyszących (próba rozciągania prętów użytych do zbrojenia).

Nośność teoretyczną belki żelbetowej przyjęto w postaci funkcji wyrażonej wzorem:

$$M_{Rd} \leq A_{s1} f_y z \quad (4)$$

gdzie: A_{s1} – pole powierzchni zbrojenia w strefie rozciąganej, f_y – granica plastyczności stali zbrojeniowej, z – ramię sił wewnętrznych.

Wartości zmiennych podstawowych wykorzystanych w analizie zestawiono w tabeli 4. Odchylenie standardowe dla pola powierzchni prętów zbrojeniowych przyjęto równe 0 cm². Uproszczenie to uznano za wystarczające, ze względu na niewielki rzeczywisty rozrzut tej wartości.

Table 4. Basic variables specified for the considered beams
Tabela 4. Wartości zmiennych podstawowych określone dla rozważanych belek

Symbol of the variable	Average value	Standard deviation	Coefficient of variation
f_y [MPa]	562.55	11.45	2.03%
A_{s1} [cm ²]	6.47	–	–
z^{inwent} [cm]	21.83	1.36	6.22%
z^{proj} [cm]	22.40	0.15	0.66%

The following values were estimated on the basis of variables presented in Table 4:

- the average value M_{Rd}^{inwent} and standard deviation ΔM_{Rd}^{inwent} calculated based on the arm of the internal forces for the real rebars position – z^{inwent} ,
- the average value M_{Rd}^{proj} and standard deviation ΔM_{Rd}^{proj} calculated based on the arm of the internal forces for the designed rebars position – z^{proj} .

The results are shown in Table 5.

W oparciu o przedstawione w tabeli 4 zmienne wyznaczono kolejno:

- średnią wartość M_{Rd}^{inwent} oraz odchylenie ΔM_{Rd}^{inwent} przy przyjęciu rozkładu zmiennej określającej ramię sił wewnętrznych dla rzeczywistego rozmieszczenia zbrojenia – z^{inwent} .
- średnią wartość M_{Rd}^{proj} oraz odchylenie ΔM_{Rd}^{proj} przy przyjęciu rozkładu zmiennej określającej ramię sił wewnętrznych dla projektowanego rozmieszczenia zbrojenia – z^{proj} .

Wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Table 5. Theoretical capacity of reinforced concrete beams
Tabela 5. Uzyskane wartości nośności teoretycznej zginanych belek żelbetowych

Calculations performed for the variable z determined on the basis of:	Average value M_{Rd} [kNm]	Standard deviation ΔM_{Rd} [kNm]
inventory	79.48	5.20
design	81.55	1.74

The standard deviation of capacity ΔM_{Rd} was determined as the mean square deviation for each variable according to equation:

$$\Delta M_{Rd} = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial A_{s1}} M_{Rd}(A_{s1}, f_y, z)\right)^2 \Delta A_{s1}^2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial f_y} M_{Rd}(A_{s1}, f_y, z)\right)^2 \Delta f_y^2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial z} M_{Rd}(A_{s1}, f_y, z)\right)^2 (\Delta z)^2} \quad (5)$$

Extraction of individual components (equation (6)) from equation (5), allows specifying which basic variable has the greatest impact on the standard deviation ΔM_{Rd} . It should be highlighted that this is the parameter defining the arm of the internal forces that depends directly on the position of longitudinal reinforcing bars in the cross-section of a beam.

Odchylenie standardowe nośności ΔM_{Rd} wyznaczono jako średnią kwadratową odchyleń, dla każdej zmiennej, zgodnie z wzorem:

$$\Delta M_{Rd} = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial A_{s1}} M_{Rd}(A_{s1}, f_y, z)\right)^2 \Delta A_{s1}^2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial f_y} M_{Rd}(A_{s1}, f_y, z)\right)^2 \Delta f_y^2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial z} M_{Rd}(A_{s1}, f_y, z)\right)^2 (\Delta z)^2} \quad (5)$$

Wyodrębnienie z wzoru (5) poszczególnych składowych - wzory (6), pozwala określić, jaka zmienna podstawowa ma największy wpływ na odchylenie ΔM_{Rd} . Stwierdzono, że jest to parametr określający ramię sił wewnętrznych, czyli zależny bezpośrednio od położenia prętów zbrojenia podłużnego w przekroju belki.

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial}{\partial A_{s1}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right) &= 122804.54 \text{ kN/m} & \left(\frac{\partial}{\partial A_{s1}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right) &= 122804.54 \text{ kN/m} \\
 \left(\frac{\partial}{\partial f_y} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right) &= 0.00014 \text{ m}^3 & \left(\frac{\partial}{\partial f_y} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right) &= 0.00014 \text{ m}^3 \\
 \left(\frac{\partial}{\partial z^{inwent}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right) &= 364.07 \text{ kN} & \left(\frac{\partial}{\partial z^{inwent}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right) &= 364.07 \text{ kN} \\
 \left(\frac{\partial}{\partial A_{s1}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right)^2 \Delta A_{s1}^2 &= 0 \text{ kN}^2 \text{ m}^2 & \left(\frac{\partial}{\partial A_{s1}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right)^2 \Delta A_{s1}^2 &= 0 \text{ kN}^2 \text{ m}^2 \\
 \left(\frac{\partial}{\partial f_y} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right)^2 \Delta f_y^2 &= 2.62 \text{ kN}^2 \text{ m}^2 & \left(\frac{\partial}{\partial f_y} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right)^2 \Delta f_y^2 &= 2.62 \text{ kN}^2 \text{ m}^2 \\
 \left(\frac{\partial}{\partial z^{inwent}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right)^2 (\Delta z^{inwent})^2 &= 24.45 \text{ kN}^2 \text{ m}^2 & \left(\frac{\partial}{\partial z^{inwent}} M_{Rd} (A_{s1}, f_y, z^{inwent}) \right)^2 (\Delta z^{inwent})^2 &= 24.45 \text{ kN}^2 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

Distribution for effect of actions was taken based on the distribution of external load – real capacity of the beams obtained during the studies. Subsequently distributions of load at 50%, 60%, 75% and 90% of the maximum values of bending moment were calculated. The distributions of effect of actions is shown in Table 6.

Rozkład oddziaływania w postaci obciążenia zewnętrzznego przyjęto, wykorzystując rzeczywiste nośności belek uzyskane podczas badań. Następnie wyznaczono rozkłady obciążeń na poziomie 50%, 60%, 75% oraz 90% wyężenia belek. Przyjęte rozkłady obciążenia przedstawiono w tabeli 6.

Table 6. Distribution of load used in analysis

Tabela 6. Przyjęty do analizy rozkład obciążenia

Effort	Average value M_{ed} [kNm]	Standard deviation ΔM_{ed} [kNm]	Coefficient of variation [%]
50%	42.46	2.19	5.15
60%	50.95	2.63	
75%	63.69	3.28	
90%	76.43	3.94	

Table 7. Values of reliability index

Tabela 7. Otrzymane wartości wskaźników niezawodności

Effort	Reliability index β	
	The real position of the longitudinal rebars (inventory)	Design position of longitudinal rebars
50%	6.56	13.97
60%	4.89	9.70
75%	2.57	4.80
90%	0.47	1.19

Reliability index β was calculated based on equation (7). The obtained results are summarized in Table 7 and shown in Figure 2.

Wskaźniki niezawodności β określono na podstawie wzoru (7), a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 7 oraz przedstawiono na rysunku 2.

$$\beta = \frac{M_{Rd} - M_{Ed}}{\sqrt{(\Delta M_{Rd})^2 + (\Delta M_{Ed})^2}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{M_{Rd} - M_{Ed}}{\sqrt{(\Delta M_{Rd})^2 + (\Delta M_{Ed})^2}} \quad (7)$$

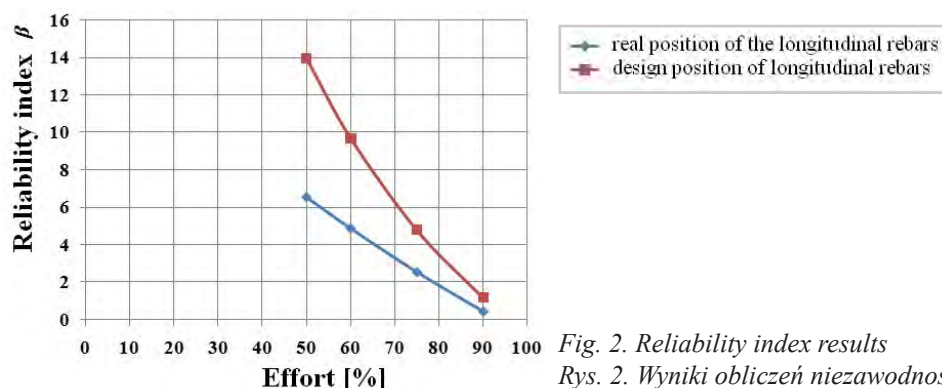


Fig. 2. Reliability index results

Rys. 2. Wyniki obliczeń niezawodności

4. Conclusions

The results allow the conclusion that the incorrect longitudinal reinforcing bars position in the cross-section of beam has a significant influence on decrease of reliability. The biggest differences for the values of reliability were obtained for the low levels of beams effort (load distribution on the level 50% of the maximum values of bending moment), which corresponds to the typical level of load for elements in use. The difference between the value of reliability index calculated for the real position and design position of the longitudinal rebars was 7.41, which indicates that decrease of reliability index value reached 53%.

Based on the analysis it was found that:

- incorrect longitudinal rebars position in relation to the assumed position, affects the decrease reliability of considered elements. This is confirmed by the differences in the values of reliability index given in Table 7;
- the greatest impact on standard deviation ΔM_{Rd} was recorded in variable defining the arm of internal forces z (the highest value of the square of the standard deviation of this variable – equation (6)).

4. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że niezgodne z projektem położenie prętów zbrojenia podłużnego w przekroju belki ma dość istotny wpływ na spadek niezawodności rozpatrywanych belek żelbetowych. Największe rozbieżności wartości wskaźników niezawodności uzyskano dla niskich poziomów wyężenia (rozkład obciążenia na poziomie 50% wyężenia), które odpowiada poziomowi obciążenia eksploatacyjnego elementów. Różnica pomiędzy wskaźnikiem niezawodności, wyznaczonym na podstawie rzeczywistego rozmieszczenia zbrojenia a współczynnikiem niezawodności, wyznaczonym na podstawie projektowanego rozmieszczenia zbrojenia, wynosi 7,41. Pozwala to stwierdzić, że spadek niezawodności względem projektowanego układu zbrojenia wynosi 53%.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że:

- niezgodne z projektem rozmieszczenie zbrojenia głównego w przekrojach badanych belek żelbetowych wpływa na spadek niezawodności rozpatrywanych elementów, o czym świadczą różnice w wartościach wskaźników niezawodności podane w tabeli 7;
- największy wpływ na odchylenie ΔM_{Rd} ma zmienna określająca ramię sił wewnętrznych (najwyższa wartość kwadratu odchylenia standardowego zmiennej – wzór (6)).

References

- [1] Murzewski J.: *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*, Arkady, Warszawa 1989.
- [2] Runkiewicz L.: *Stosowanie metod nieniszczących w zakładowej kontroli produkcji wyrobów i elementów budowlanych*. 34 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Zakopane 2005, pp. 75-84.
- [3] Nowak A.: *Analiza ryzyka i oceny niezawodności konstrukcji w praktyce budowlanej*. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 23-26 maja 2007, *Awarie budowlane 2007*, pp. 123-130.

- [4] Woliński S.: *Rozmyta ocena bezpieczeństwa żelbetonowych elementów zginanych*. XLI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZiTb, Kraków 1995, tom 5, Konstrukcje betonowe, pp. 213-220.
- [5] PN-EN 1990:2002 *Basis of Structural Design*.
- [6] Kinash R.: *Metody oceny niezawodności konstrukcji budowlanych przy niepełnych parametrach*. Gócnictwo i Geoinżynieria 2 (2008), pp. 187-195.
- [7] Ajdukiewicz A.: *Wyzwanie dla projektantów – projektowanie konstrukcji betonowych na okres użytkowania*. Inżynier Budownictwa 9 (2006), pp. 10-16.
- [8] Starosolski W.: *Niezawodność obiektu budowlanego (w świetle pakietu norm PN-ISO)*. Przegląd Budowlany 1 (2008), pp. 44-50.
- [9] Caspele R., Sykora M., Taerwe L.: *Influence of quality control of concrete on structural reliability: assessment using a Bayesian approach*. Material and Structures 47 (2014), pp. 105-116.
- [10] Skrzypczak I., Buda-Ożóg L.: *Influence of Compliance Criteria on the Value of Reliability Index*. Archives of Civil Engineering 2 (2016), vol. LXII, pp. 191-203.
- [11] PN-EN 206-1:2000 *Concrete Specification, performance, production and conformity*.
- [12] Pawłowski W., Przewłocki S.: *Procedury pomiarowe dla potrzeb diagnostyki obiektów budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 715, Budownictwo, z. 45, 1994, pp. 69-84.
- [13] Raport z Projektu Rozwojowego NR 04 0007 10.
- [14] Raport naukowy z realizacji Tematu Badawczego T.6.3.
- [15] PN-EN 13670:2009 *Execution of concrete structures*.
- [16] Goszczyńska B., Tworzewski P.: *Wpływ błędów wykonania belek żelbetonowych na ich odkształcenia i zarysowanie oraz grubość otuliny*. Przegląd Budowlany 9 (2015), pp. 24-29.
- [17] Tworzewski P.: *Errors during Manufacturing of Reinforced Concrete Beams at the Example of Concrete Cover Deviations*. Transcom Proceedings 2015, section 7 Civil Engineering, pp. 310-314.