

WYBRANE ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI BETONOWYCH Z POCZĄTKU XX WIEKU W STANACH ZJEDNOCZONYCH

Patryk Ziółkowski✉, Maciej Niedostatkiwicz

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, Gdańsk

STRESZCZENIE

Podczas codziennej działalności inżynierskiej bardzo często pomija się zagadnienie zmienności w czasie zasad projektowania, w szczególności ewolucji przepisów normowych. W przypadku konstrukcji betonowych okresem ich najbardziej intensywnego rozwoju był początek XX wieku. Miejscem, w którym ten rozwój był szczególnie widoczny, są Stany Zjednoczone. Jednym z najbardziej znanych obiektów pochodzących z tamtego okresu jest budynek wysokościowy o konstrukcji żelbetowej Ingalls Building w Cincinnati w stanie Ohio. W artykule przedstawiono ewolucję zmian zasad projektowania konstrukcji betonowych w Stanach Zjednoczonych ze szczególnym uwzględnieniem początku XX wieku. W pracy wykorzystano archiwalne zbiory własne Auburn University w Alabamie.

Słowa kluczowe: konstrukcje betonowe, projektowanie, normy, inżynieria lądowa

WSTĘP

Konstrukcje betonowe są niezwykle popularne w współczesnym budownictwie. Pomimo tego, że główny składnik betonu, jakim jest cement, znany był już od czasów starożytnego Rzymu (cement pucolanowy), to prawdziwy rozkwit jego zastosowań nastąpił dopiero po wynalezieniu pod koniec XIX wieku żelbetu (Wight i MacGregor, 2011; Starosolski, 2012). Żelbet, czyli połączenie betonu i stali, prawie natychmiast od momentu pierwszego praktycznego zastosowania w konstrukcjach inżynierskich zyskał spore zainteresowanie. Żelbet jest stosowany w budownictwie kubaturowym, przemysłowym, drogowym, kolejowym, morskim, mostownictwie i w wielu innych dziedzinach budownictwa, zaś same konstrukcje betonowe rozwijane są przez naukowców do dnia dzisiejszego. W toku ponad stuletnich badań nad żelbetem wyodrębniło się wie-

le dziedzin pokrewnych, między innymi konstrukcje sprężone oraz konstrukcje prefabrykowane. W Polsce pierwszą konstrukcją żelbetową jest most na Kanale Elbląskim pochodzący z 1894 roku. Obecnie szeroko pojęte konstrukcje betonowe są nauką „okrzepłą”, z którą zaznajomiony jest każdy profesjonalista pracujący w obszarze budownictwa, dlatego też niezwykle ciekawym zagadnieniem jest to, jak ta dziedzina rozwijała się na przestrzeni lat, szczególnie w swoich początkach. Dzięki uprzejmości amerykańskiego Auburn University w stanie Alabama autorzy artykułu uzyskali dostęp do archiwalnych zbiorów książkowych z początku XX wieku. Na podstawie książki Charlesa S. Hilla „Reinforced Concrete” wydanej w 1906 roku przedstawiono wybrane zagadnienia z projektowania konstrukcji betonowych. Wspomniana pozycja jest poprawionym wydaniem drugim, a pierwsze pojawiło się na rynku w 1904 roku.

✉ patziolk@pg.edu.pl

MATERIAŁ I METODY

Pierwszym z analizowanych zagadnień są właściwości materiałowe. Przedstawione w analizowanej pozycji (Hill, 1906) wzory empiryczne były projektowane pod jednostki imperialne, ale dla wygody czytelników przedstawiono także odniesienie do jednostek SI. Jako pierwsze przeanalizowano właściwości materiałowe betonu. Wytrzymałość na ściskanie jest silnie powiązana z wiekiem betonu i wyrażona jest w funtach na cal kwadratowy (ang. *pounds per square inch*) [$\text{lb}\cdot\text{cal}^{-1}$] – wzory (1)–(4). Jeden funt na cal kwadratowy odpowiada dokładnie 6,894 kPa.

– wiek betonu 7 dni

$$f_c = 1800 - 200 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} \right) \quad (1)$$

– wiek betonu 1 miesiąc

$$f_c = 3100 - 350 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} \right) \quad (2)$$

– wiek betonu 3 miesiące

$$f_c = 3820 - 460 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} \right) \quad (3)$$

– wiek betonu 6 miesięcy

$$f_c = 4900 - 600 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} \right) \quad (4)$$

Formuła ta została opracowana przez Edwina Thacher i zakłada otrzymywanie dobrych rezultatów w badaniach eksperymentalnych dla dobrych materiałów (ang. *good materials*). Zawężenie wytrzymałości jedynie do stosunku objętości piasku i cementu, a także wieku betonu jest niezwykle uproszczeniem z punktu widzenia dzisiejszej nauki. Wytrzymałość na rozciąganie została ujęta podobnie jak w Eurokodzie 2 (EN 1992-1-1) nie od strony samej zawartości formuły, ale poprzez to, że wynika ona z wytrzymałości na ściskanie i jest określona wzorem empirycznym (Wight i MacGregor, 2011; Ghali, Favre i Elbadry, 2014; Sarja i Vesikari, 2014; Elliott, 2016). Wytrzymałość na rozciąganie wyliczana była według formuły:

$$f_t = \left(\frac{\text{wytrzymałość na ściskanie}}{8,64 + 1,8 \log [\text{wiek betonu w miesiącach}]} \right) \quad (5)$$

Kolejną wartością wytrzymałości używaną w analizowanej pozycji (Hill, 1906) jest wytrzymałość na ścinanie, którą przyjmowano jako formułę:

$$f_s = 1,3 - 1,5 f_t \quad (6)$$

Moduł sprężystości betonu wyliczany w podobnej formule jak wytrzymałość na ściskanie, a więc w funkcji wieku betonu, a wartości zostały wyrażone w funtach na cal kwadratowy – wzory (7)–(10).

– wiek betonu 7 dni

$$E = 2\,600\,000 - 700\,000 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} - 2 \right) \quad (7)$$

– wiek betonu 1 miesiąc

$$E = 2\,900\,000 - 300\,000 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} - 1 \right) \quad (8)$$

– wiek betonu 3 miesiące

$$E = 3\,600\,000 - 500\,000 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} - 2 \right) \quad (9)$$

– wiek betonu 6 miesięcy

$$E = 3\,600\,000 - 600\,000 \left(\frac{\text{objętość piasku}}{\text{objętość cementu}} - 1 \right) \quad (10)$$

Kolejno przeanalizowano właściwości materiałowe stali. Jeżeli chodzi o właściwości stali, to w rozpatrywanej literaturze wymieniono wiele stałych wartości wyrażonych w funtach na cal kwadratowy, przyjmowanych niezależnie od rodzaju stali, a mianowicie: graniczna wytrzymałość (ang. *ultimate strength*) 58 000–66 000 $\text{lb}\cdot\text{cal}^{-1}$, granica plastyczności (ang. *elastic limit*) wynosząca 55% przyjętej granicznej wytrzymałości, moduł plastyczności o wartości 29 000 000 $\text{lb}\cdot\text{cal}^{-1}$, współczynnik naprężeń pracu-

jącej stali (ang. *working stress factor*) o wartości 12 000–15 000 [–]; stopień rozszerzalności na 1°F (0°C = 32°F) wynoszący 0,00000648–0,00000686 [–]. Przeprowadzona analiza materiału źródłowego nie pozwoliła na jednoznacznie odniesienie współczynnika naprężeń pracującej stali do współcześnie stosowanych procedur.

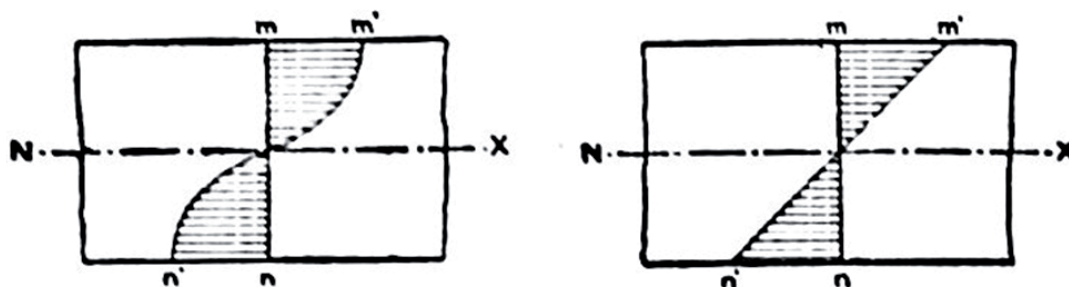
Zginanie w żelbecie

Przestudiowano, w jaki sposób opisane zostało zginanie w żelbecie według analizowanej pozycji (Hill, 1906). Warto zaznaczyć, że w przywołanej literaturze pojawia się stwierdzenie, że dotychczas nie została wykonana dostateczna liczba eksperymentów, aby potwierdzić lub zaprzeczyć opisywanym teoriom. Widać ewidentnie, w jak powściągliwy sposób kształtowała się nauka o konstrukcjach betonowych. Pierwszą z zaproponowanych teorii jest to, że naprężenia w belce żelbetowej wzrastają w sposób paraboliczny lub według innej krzywej, a teoria ogólna opiera się na założeniu, że naprężenia w betonie wzrastają wprost proporcjonalnie do odległości od osi obojętnej (rys.).

Autorzy opracowania twierdzą, że formuły pochodzące z teorii zginania (Hill, 1906) ze stałymi wyznaczonymi z eksperymentów będą wystarczające w zastosowaniach praktycznych, co zdaje się obowiązywać współcześnie. Już wtedy zauważono, że beton przenosi częściowo naprężenia rozciągające, ale jednocześnie założono błędnie, że beton przenosi więcej rozciągania, jeżeli współpracuje ze stalą. Powyższe założenie wynikało prawdopodobnie z tego, że nie znano wtedy zagadnienia mikrorys i zjawiska *tension stiffening* polegającego na tym, że średnie odkształcenie zbrojenia współpracują-

cego z betonem pomiędzy rysami jest mniejsze od odkształcenia obliczonego na podstawie naprężenia, które osiągane jest w rysie. W książce Hilla (1906) opisano wykonanie testów zginania belki żelbetowej, którą trzymano w okresie początkowym w zbiorniku z wodą. Po przeprowadzenia testów zauważono, że wilgoć pojawia się po stronie rozciąganej i układa się we wzór pajęczyny, co może wskazywać, że w tych miejscach woda ucieka przez rysy. Rysy nie były jednak widoczne z użyciem szkła powiększającego. Następnie belkę pocięto na kawałki, które zawierały domniemane rysy. Jak przypuszczano, rozpadały się one bez dodatkowego nakładu siły. Stwierdzono też trafnie, że zawilgocenie elementów zarysowanych w strefie klimatu umiarkowanego (w publikacji Hilla z 1906 roku użyto sformułowania w klimacie północy) będzie powodować niszczenie betonu poprzez powtarzające się cykle zamarzania i rozmarzania, co można łatwo skojarzyć ze współczesnym pojęciem mrozoodporności. W opracowaniu opisano cztery mechaniki zniszczenia zginanych elementów betonowych. Obecnie przyjmuje się, że istnieją trzy. Według autorów artykułu zniszczenie może nastąpić:

- poprzez ukośną rysę zaczynającą się w płaszczyźnie prętów dolnych i propagującą do krawędzi górnej w kierunku części centralnej pod średnim kątem 30° do płaszczyzny poziomej,
- poprzez pionową rysę zaczynającą się jako powiększenie rys włosowatych idących wzdłuż części dolnej belki w górę nie więcej niż 4 cale,
- poprzez nagłą ukośną rysę idącą od górnej powierzchni części centralnej do końca podpory,
- poprzez zmiażdżenie centralnej części elementu zginanego.



Rys. Naprężenia w betonie według teorii obowiązującej w 1906 roku (Hill, 1906)

Fig. Stresses in concrete according to knowledge from 1906 (Hill, 1906)

Współczesna norma Eurokod 2 (EN 1992-1-1) wyróżnia trzy główne mechaniki zniszczenia w belce żelbetowej (Drobiec, Łasiński i Piekarczyk, 2014):

- zniszczenie poprzez wyczerpanie nośności stali przy zginaniu,
- zniszczenie poprzez zmiżdżenie betonu przy zginaniu,
- zniszczenie ze względu na ścinanie w strefie przypodporowej.

Wymiarowanie słupów żelbetowych

Na początku XX wieku najwięcej badań słupów żelbetowych przeprowadzono na Massachusetts Institute of Technology (MIT). Pierwsze sposoby zbrojenia słupów przewidywały umieszczenie czterech prętów w narożach słupa i jednego w części centralnej słupa. Słupy były wylewane w pozycji pionowej, ale niszczone w pozycji poziomej, co nie odpowiadało rzeczywistym warunkom obciążania słupów. Do obliczenia maksymalnej nośności (w literaturze użyto sformułowania wytrzymałość) przekroju słupa zaproponowano formuły (11) i (12):

$$P = f(A_c + eA_s) \quad (11)$$

$$e = \frac{E_s}{E_c} \quad (12)$$

gdzie:

f – wytrzymałość betonu na zmiżdżenie (ang. *crushing strenght of concrete*) [MPa],

A_c – pole przekroju betonowego [cm²],

e – stosunek modułu sprężystości stali do modułu sprężystości

A_s – pole przekroju stali zbrojenia głównego [cm²],

E_s – moduł sprężystości stali [–],

E_c – moduł sprężystości betonu [–].

Przy zastosowaniu strzemion wzór ten należy zmodyfikować w następujący sposób:

$$P = f(A_c + eA_s + 2,4eA_h) \quad (13)$$

gdzie: A_h – pole przekroju strzemion [cm²].

Według autorów artykułu wartość 2,4 użyta we wzorach (13)–(15) jest wyznaczona empirycznie i jej

jednoznaczna interpretacja może być kłopotliwa. Należy zauważyć, że zapis wzoru wydaje się być błędny – czynnik e zdefiniowany został jako „proporcjonalność właściwości stali i betonu”, a we wzorze (13) występuje jako odniesienie stali strzemion do stali zbrojenia głównego. Wartość P można wyznaczyć także z wykorzystaniem granicy plastyczności stali we wzorze (14) określanej jako Y i granicy plastyczności stali strzemion Y' we wzorze (15).

$$P = fA_c + Y(A_s + 2,4eA_h) \quad (14)$$

$$P = fA_c + YA_s + 2,4Y'A_h \quad (15)$$

Warto dodać, że dodawanie strzemion, które we współczesnej angielszczyźnie tłumaczy się dosłownie jako *stirrups*, określano terminem *hooping*, co jest typowe dla języka angielskiego XIX wieku i oznacza dosłownie okalanie. Termin ten jest nadal wykorzystywany, ale ma on zupełnie inne znaczenie, niezwiązane z inżynierią lądową.

ANALIZA PORÓWNAWCZA PROCEDUR OBLICZENIOWYCH

W celu określenia różnic w projektowaniu elementów żelbetowych według opracowania z 1906 roku, a norm współczesnych przedstawiono analizę porównawczą na przykładzie słupa żelbetowego. Jako bazę porównawczą wykorzystano obowiązującą w Polsce normę Eurokod 2 (EN 1992-1-1). Celem analizy było określenie, czy nośność słupa żelbetowego zawyżono, czy zaniżono w stosunku do dzisiejszych norm. Porównanie przedstawiono w formie zestawienia. Do analizy przyjęto słup żelbetowy o wymiarach 25 × 25 cm i wysokości 3,30 m, na który działa obliczeniowa siła normalna 100 kN. Przyjęto beton C35/45 ($f_{ck} = 35$ MPa, $\gamma_c = 1,4$) i pręty zbrojenia podłużnego stali A-IIIN RB500 ($f_{yk} = 500$ MPa, $\gamma_s = 1,15$). Przyjęto zbrojenie poprzeczne o średnicy 6 mm i stali A-0 St0S-b ($f_{yk} = 220$ MPa, $\gamma_s = 1,15$). Do obliczeń przyjęto wartości obliczeniowe: $f_{cd} = 25$ MPa, $f_{yd} = 434,78$ MPa, $f_{ywd} = 191,30$ MPa (Czarnecki i Emmons, 2002; Neville, Ajdukiewicz, Degler i Kasperkiewicz, 2012; Runkiewicz i Sieczkowski, 2015).

Tabela. Analiza porównawcza procedury wymiarowania słupa według opracowania Hilla (1906) i normy EN 1992-1-1
Table. Comparative analysis of the column dimensioning procedure according to a Hill's study (1906) and EN 1992-1-1 standard

Opracowanie z 1906 roku	Norma EN 1992-1-1
Porównanie oszacowanej siły działającej na słup i porównanie jej z wyliczoną maksymalną siłą P ($P = fA_c + YA_s + 2,4Y'A_h$). Maksymalna siła określa nośność (w literaturze użyto sformułowania wytrzymałość) przekroju dla przyjętej ilości zbrojenia i parametrów materiałowych.	Projektowanie elementów słupowych wykonuje się, przyjmując założenia ogólne o jednoczesnym działaniu siły podłużnej i momentu zginającego. Dodatkowo w słupach ściskanych mimośrodowo z podatnym usztywnieniem c powinno się uwzględnić niedoskonałości i zjawisko wyboczenia. Wyboczenie uwzględnia się poprzez przyjęcie efektów oddziaływania II rzędu zwiększając wartości momentów przekrojowych wyliczanych według teorii I rzędu (Giżejowski, 2000).
Ilość potrzebnego zbrojenia podłużnego w przekroju A_s , wyliczona na podstawie przekształconego wzoru na P dla obliczeniowej siły normalnej 100 kN wyniosła $A_s = 1,7 \text{ cm}^2$: $A_s = (P - fA_c - 2,4Y'A_h) : Y$ Przyjęto zbrojenie symetryczne wzdłuż jednej krawędzi słupa: – po dwa pręty $\varnothing 8$ o $A_s = 1,005 \text{ cm}^2$. Przyjęto zbrojenie symetryczne wzdłuż prostopadłej krawędzi słupa: – po dwa pręty $\varnothing 8$ o $A_s = 1,005 \text{ cm}^2$. Łącznie przyjęto po cztery pręty $\varnothing 8$ o $A_s = 2,01 \text{ cm}^2$.	Przyjęto zbrojenie symetryczne wzdłuż jednej krawędzi słupa: – po dwa pręty $\varnothing 12$ o $A_s = 2,26 \text{ cm}^2$. Przyjęto zbrojenie symetryczne wzdłuż prostopadłej krawędzi słupa: – po dwa pręty $\varnothing 12$ o $A_s = 2,26 \text{ cm}^2$. Łącznie przyjęto po cztery pręty $\varnothing 12$ o $A_s = 4,52 \text{ cm}^2$.
	Warunek nośności: – dla $N_{Sd} = 100,00 \text{ kN}$: $M_{Sd,x} = 1,32 \text{ kNm} < M_{Rd,x,odp,max} = 26,98 \text{ kNm}$, – dla $M_{Sd,x} = 1,32 \text{ kNm}$: $N_{Sd} = 100,00 \text{ kN} < N_{Rd,odp,max} = 1602,53 \text{ kN}$.
	Przyjęto zbrojenie konstrukcyjne strzemionami pojedynczymi: – poza odcinkami zakładu zbrojenia głównego $\varnothing 6$ co maksymalnie 180 mm, – na odcinkach zakładu zbrojenia głównego $\varnothing 6$ co maksymalnie 90 mm.

Według autorów artykułu porównując sposób obliczeń zbrojenia słupów żelbetowych według publikacji Hilla z 1906 roku z kalkulacjami według współcześnie obowiązującej w Polsce normy Eurokod 2 (EN 1992-1-1), nie doszacowuje się jego ilości.

WNIOSKI

Po analizie materiału źródłowego stwierdzamy, że podstawy obliczania konstrukcji żelbetowych pozostają niezmiennione, a większość zmian, udoskonaleń i usprawnień istniejących wzorów dostosowuje się na drodze empirycznej. Na przestrzeni lat procedury

liczenia elementów żelbetowych zostały znacznie wzbogacone i rozszerzone. Po przeprowadzeniu analizy porównawczej dla procedury wymiarowania zbrojenia słupów żelbetowych (określenie ilości potrzebnego zbrojenia), można stwierdzić, że obecne normatywy projektowe, tj. Eurokod 2 (EN 1992-1-1), są bardziej konserwatywne i rygorystyczne pod względem wymagań projektowych w stosunku do tych z 1906 roku (Hill, 1906). Przeprowadzona analiza ma charakter poglądowy i w przyszłości można będzie ją rozszerzyć o analizę porównawczą dla innych przypadków obliczeniowych (np. inne obciążenie lub materiał) i normatywów.

PODZIĘKOWANIA

Specjalne podziękowania dla Fundacji Kościuszkowskiej, która wsparła finansowo pobyt w Stanach Zjednoczonych, przez co umożliwiła pozyskanie materiałów źródłowych, na bazie których napisano ten artykuł.

PIŚMIENNICTWO

- Czarnecki, L. i Emmons, P. H. (2002). *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*. Kraków: Polski Cement.
- Drobiec, Ł., Jasiński, R. i Piekarczyk, A. (2014). *Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych: Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Elliott, K. S. (2016). *Precast concrete structures*. Boca Raton: CRC Press.
- EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- Ghali, A., Favre, R. i Elbadry, M. (2014). *Concrete structures: Stresses and deformations: Analysis and design for serviceability*. Boca Raton: CRC Press.

- Gizejowski, M. (2010). Modele obliczeniowe stalowych ram płaskich z węzłami podatnymi. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo*, 136, 3–285.
- Hill, C. S. (1906). *Reinforced concrete*. New York: The Engineering News Publishing Company.
- Neville, A. M., Ajdukiewicz, A., Degler, A. i Kasperkiewicz, J. (2012). *Właściwości betonu*. Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu.
- Runkiewicz, L. i Sieczkowski, J. (2015). Dostosowanie polskich doświadczeń w zakresie nieniszczącej oceny wytrzymałości betonu do wymagań PN-EN. *Przegląd Budowlany*, 86, 95–100.
- Sarja, A. i Vesikari, E. (2014). *Durability design of concrete structures*. Roca Baton: CRC Press.
- Starosolski, W. (2012). *Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych*. Tom IV. Warszawa: PWN.
- Wight, J. K. i MacGregor, J. G. (2011). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. New Jersey: Pearson Education.

SELECTED PROBLEMS OF CONCRETE STRUCTURES FROM THE BEGINNING OF THE 20th CENTURIES IN THE UNITED STATES

ABSTRACT

During everyday engineering activities, the issue of variability in time of design principles, in particular the evolution of standard regulations, is often overlooked. In the case of structures, the period of their most intense development was the beginning of the 20th century. The place where this development was particularly visible is the United States of America. One of the best-known objects from that period is the high-rise building of the Ingalls Building reinforced concrete structure in Cincinnati, Ohio. The paper presents the evolution of the design principles of concrete structures in the United States with particular reference to the beginning of the 20th century. Knowledge comes from a book shared by Auburn University archive in Alabama.

Key words: concrete structures, concrete design, standards, civil engineering