

Michał Lidner

Przegląd wybranych metod przybliżonego określania odporności i nośności ogniowej słupów żelbetowych w świetle badań prowadzonych z uwzględnieniem usztywnienia elementami przylegającymi

Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy 18 (1), 33-44

2016

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Michał Lidner

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie,
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
e-mail: michal.lidner@wat.edu.pl

Przegląd wybranych metod przybliżonego określania odporności i nośności ogniowej słupów żelbetowych w świetle badań prowadzonych z uwzględnieniem usztywnienia elementami przylegającymi

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono przegląd wybranych metod służących przybliżonemu określeniu odporności i nośności ogniowej słupów żelbetowych w warunkach pożarowych. Przedstawiono również program badawczy i wyniki badań słupów żelbetowych oraz słupów ze zbrojeniem rozproszonym, które w warunkach pożarowych obciążano siłownikiem poprzez trójwymiarową ramę stalową, uwzględniając tym samym usztywnienie elementami przylegającymi. Następnie wykorzystano przedstawione metody do obliczenia nośności ogniowej bądź nośności obliczeniowej słupów i porównano wyniki obliczeń z wynikami badań.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo pożarowe, słupy żelbetowe w warunkach pożaru, przybliżone oceny odporności/nośności ogniowej.

Wstęp

Do momentu pojawienia się metody izotermy 500°C oraz prenormy ENV 1992-1-2 (później normy EN 1992-1-2) projektanci konstrukcji używali tablic do projektowania słupów żelbetowych. Wprowadzenie tej metody, dokumentu normowego oraz innych podobnych umożliwiło zastosowanie metod uproszczonych obliczania elementów żelbetowych. Ich użycie jest jednak bardziej zasadne w odniesieniu do belek lub płyt, dlatego metody tabelaryczne cały czas znajdują zastosowanie w cyklu projektowym. J.-M. Franssen oraz J.-C. Dotreppe, naukowcy belgijscy z Uniwersytetu w Liege, postawili pytanie, czy projektowanie słupów żelbetowych ze względu na pożar metodą tabelaryczną nie powoduje zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji. W wyniku ich prac badawczych opisanych w [3] powstały dwie metody obliczania nośności ogniowej słupów żelbetowych. Wyprowadzone wzory skalibrowali tak, żeby wyniki były adekwatne również do badanych wcześniej słupów o przekroju prostokątnym przedstawionych w [1, 2, 4, 6]. Pierwsza zaproponowana przez nich metoda pojawiła się w normie PN-EN 1992-1-2 [9]. Venkatesh Kodur oraz Nikhil Raut, naukowcy z Uniwersytetu Michigan, w swoich pracach przedstawionych w [5] wyprowadzili wzory służące

określaniu nośności ogniowej słupów żelbetonowych uwzględniające dodatkowe czynniki, jak dwukierunkowe zginanie słupa, termiczne odpryskiwanie otuliny podczas pożaru. W pracy przedstawiono wyżej opisane metody oraz wykorzystano je do wyznaczenia przybliżonej nośności ogniowej słupów żelbetonowych badanych w warunkach pożarowych z uwzględnieniem usztywnienia elementami przylegającymi [7, 8, 10–12]. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań i przedstawiono w formie graficznej.

Uproszczona metoda obliczania odporności ogniowej słupów

Odporność ogniową słupów (czas, przez jaki słupek żelbetonowy zachowuje swoją nośność w warunkach pożarowych) można wyznaczyć za pomocą poniższych empirycznych wzorów opisanych w [3, 9]:

$$R = 120 \left(\frac{R_{\eta,fi} + R_a + R_l + R_b + R_n}{120} \right)^{1,8}, \quad (2.1)$$

$$R_{\eta,fi} = 83 \left[1.00 - \mu_{fi} \frac{1 + \omega}{\frac{0.85}{\alpha_{cc}} + \omega} \right], \quad (2.2)$$

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}}, \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_c f_{cd}}, \quad (2.4)$$

$$R_a = 1.60(a - 30), \quad (2.5)$$

$$R_l = 9.60(5 - l_{o,fi}), \quad (2.6)$$

$$R_b = 0.09b', \quad (2.7)$$

$$R_{f,n} = \begin{cases} 12 & \text{dla } n > 4 \\ 0 & \text{dla } n \leq 4 \end{cases}, \quad (2.8)$$

$$b' = \frac{2A_c}{b+h}; \quad 200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm}, \quad (2.9)$$

gdzie:

$N_{Ed,fi}$ – obliczeniowe obciążenie osiowe w sytuacji pożaru, N

N_{Rd} – obliczeniowa nośność słupa w warunkach temperatury normalnej, N

a – odległość osiowa do podłużnych prętów stalowych, mm; $25 \text{ mm} \leq a \leq 80 \text{ mm}$

$l_{o,fi}$ – efektywna długość słupa w warunkach pożarowych, m; $2000 \text{ mm} \leq l_{o,fi} \leq 6000 \text{ mm}$

b, h – wymiary przekroju poprzecznego, mm; $h \leq 1,5 b$

n – liczba prętów zbrojenia podłużnego w słupie

A_c – pole powierzchni przekroju poprzecznego betonu, mm²

- A_s – pole powierzchni prętów zbrojenia podłużnego, mm²
 f_{cd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie, N·mm⁻²
 f_{yd} – obliczeniowa granica plastyczności zastosowanego zbrojenia, N·mm⁻²
 α_{cc} – współczynnik dla wytrzymałości na ściskanie (wartość zalecana $\alpha_{cc} = 1.0$)

Metoda obliczania nośności ogniowej słupów w warunkach pożaru

Nośność ogniową słupów ściskanych mimośrodowo w warunkach pożaru można wyznaczyć za pomocą poniższych wzorów [3]:

$$N_u(t) = \gamma(t) \cdot \eta(\lambda) \cdot N_p(t), \quad (3.1)$$

$$\gamma(t) = 1 - 0.3t \quad \text{dla } t < 0.5h, \quad (3.2)$$

$$\gamma(t) = 0.85 \quad \text{dla } t \geq 0.5h, \quad (3.3)$$

$$\eta(\lambda) = \frac{\chi(\lambda)}{1 + \frac{1}{h} \frac{10e}{\left(\frac{1}{\chi(\lambda)} - 3.10^{-5} \lambda^2 \right)}}, \quad (3.4)$$

$$\chi(\lambda) = 1 - \frac{\lambda}{100} \quad \text{dla } \lambda \leq 20, \quad (3.5)$$

$$\chi(\lambda) = 0.80 \left(\frac{20}{\lambda} \right)^{0.7 \left(\frac{225-c}{200} \right)^5} \quad \text{dla } 20 < \lambda \leq 70, \quad (3.6)$$

$$\chi(\lambda) = 0.80 \left(\frac{20}{\lambda} \right)^{0.7 \left(\frac{\lambda}{70} \right) \left(\frac{225-c}{200} \right)^5} \quad \text{dla } \lambda > 70, \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{L}{i}, \quad (3.8)$$

$$N_p(t) = \beta_1(t) \cdot A_c \cdot f_c + \beta_2(t) \cdot A_s \cdot f_y, \quad (3.9)$$

$$\beta_1(t) = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.3 A_c^{-0.5} t)^{A_c^{-0.25}}}}, \quad (3.10)$$

$$\beta_2(t) = 1 - \frac{0.9t}{0.046c + 0.111} > 0, \quad (3.11)$$

gdzie:

- t – wartość nośności ogniowej, h
 h – mniejszy wymiar przekroju poprzecznego słupa, mm
 e – mimośród siły podłużnej, mm
 c – otulina, mm

- L – długość wybozeniowa słupa, mm
 i – promień bezwładności przekroju poprzecznego słupa, mm
 A_c – pole powierzchni przekroju poprzecznego betonu, m²
 A_s – pole powierzchni prętów zbrojenia podłużnego, m²
 f_c – wytrzymałość betonu na ściskanie, N·mm⁻²
 f_y – granica plastyczności zastosowanego zbrojenia, N·mm⁻²

Przy określaniu nośności ogniowej słupów należy spełnić niżej podane warunki:

- metoda dotyczy pożaru o przebiegu zgodnym z krzywą standardową [9] i betonu na kruszywie krzemianowym,
- smukłość słupa $\lambda \leq 100$,
- $0.04 \text{ m}^2 \leq A_c \leq 0.2 \text{ m}^2$,
- $h / b \geq 0.5$,
- $20 \text{ mm} \leq c \leq 50 \text{ mm}$,
- $e \leq 0.5 h$,
- w przypadku osiowego ściskania słupa należy uwzględnić mimośród $e = 10 \text{ mm}$.

Metoda wyznaczania odporności ogniowej słupów poddanych działaniu siły ściskającej i dwukierunkowemu zginaniu w warunkach pożaru z uwzględnieniem dodatkowych parametrów

Przedstawiona metoda określania odporności ogniowej słupów żelbetowych daje poprawne wyniki, jeżeli:

- przebieg pożaru odpowiada krzywej standardowej [9] lub o podobnym rozkładzie temperatury,
- słup jest obciążony osiowo lub występuje siła podłużna na mimośrodku względem jednej głównej osi bezwładności,
- słup jest nagrzewany jednakowo z każdej strony.

Venkatesh Kodur i Nikhil Raut, autorzy poniższej metody, zaprezentowali w [5] wzory uwzględniające dodatkowo:

- możliwość uwzględnienia siły podłużnej na mimośrodkach względem dwóch głównych osi bezwładności,
- możliwość nagrzewania jednego boku, dwóch przyległych boków, dwóch przeciwnych boków oraz nagrzewania z trzech stron słupa,
- możliwość odpadania otuliny betonowej pod wpływem wysokiej temperatury,
- możliwość wystąpienia pożaru o przebiegu niezgodnym z krzywą standardową [9].

Odporność ogniowa słupów wg tej metody wyraża się następującymi wzorami:

$$R = C_i \left[8 \cdot k_{sh} \cdot k_{cp} \cdot (30 - (\lambda + 5) \cdot (L_R - 0.2)) \right]^{0.94}, \quad (4.1)$$

$$\lambda = \frac{L}{i}, \quad (4.2)$$

$$L_R = \frac{P}{P_{cr}}, \quad (4.3)$$

$$P_{cr} = 0.8 \cdot (0.85 \cdot A_c \cdot f_c + A_s \cdot f_y), \quad (4.4)$$

$$k_{sh} = k_{ec} \cdot k_{sp}, \quad (4.5)$$

$$k_{ec} = 1.0 \text{ dla } E_c = 0, \quad (4.6)$$

$$k_{ec} = \frac{[(\lambda - 243) \cdot (E_c - 768) - 83250]}{99880} \cdot k_{e2} \text{ dla } E_c \neq 0, \quad (4.7)$$

$$k_{e2} = 1.0 \text{ dla } E_{d2} = 0, \quad (4.8)$$

$$k_{e2} = \frac{3600000}{(7600 + E_{d2}) \cdot (E_c + 550) + 870} \text{ dla } E_{d2} \neq 0, \quad (4.9)$$

$$E_c = E_{op} + E_{eq}, \quad (4.10)$$

gdzie:

$C_t = 1.0$ dla kruszywa krzemianowego i 1.1 dla kruszywa wapiennego

L – długość efektywna słupa, mm

i – promień bezwładności przekroju poprzecznego słupa, mm

P – siła podłużna przyłożona do słupa, N

A_c – pole powierzchni przekroju poprzecznego betonu, mm²

A_s – pole powierzchni prętów zbrojenia podłużnego, mm²

f_c – wytrzymałość betonu na ściskanie, N·mm⁻²

f_y – granica plastyczności zastosowanego zbrojenia, N·mm⁻²

k_{ec} – współczynnik uwzględniający mimośród obciążenia, współczynnik obciążenia i smukłość słupa

E_c – całkowity mimośród obciążenia, mm

E_{op} – mimośród obciążenia wzdłuż jednej z głównych osi bezwładności, mm

E_{d2} – mimośród obciążenia wzdłuż drugiej z głównych osi bezwładności, mm

E_{eq} – ekwiwalentny mimośród pochodzący od nagrzewania słupa z jednej, dwóch lub trzech stron, równy -17 dla słupów prostokątnych narażonych na działanie wysokiej temperatury z dwóch przeciwległych stron, a w pozostałych przypadkach wyrażony następującym wzorem:

$$E_{eq} = -\frac{d^2 + \alpha \cdot d - \beta}{\gamma}, \quad (4.11)$$

gdzie:

d – wymiar słupa, mm

α, β, γ – w tabeli 4.1

k_{sp} – współczynnik uwzględniający termiczne odpryskiwanie otuliny betonowej, równy 1.0 gdy przepuszczalność pary wodnej przez pory betonu $perm \geq 10^{-17} \text{ m}^2$, a także, gdy $perm < 10^{-17} \text{ m}^2$, ale do mieszanki betonowej dodano włókna polipropylenowe. Jeśli $perm < 10^{-17} \text{ m}^2$ i nie zastosowano w mieszance betonowej dodatku włókien polipropylenowych to współczynnik k_{sp} wyraża się następującym wzorem:

$$k_{sp} = \frac{[\log(\text{perm}) + 20]}{2.75} \quad (4.12)$$

Tabela 4.1. Współczynniki α, β, γ do wyznaczenia ekwiwalentnego mimośrodru

Lp.	Warunki nagrzewu słupa	α	β	γ
1	Nagrzewanie jednego boku	900	120 000	5000
2	Nagrzewanie dwóch przyległych boków	930	73 000	3000
3	Nagrzewanie trzech boków	1000	115 000	5000

Źródło: [5].

Autorzy uwzględnili również w swojej metodzie wpływ wyników odporności ogniowej słupów w zależności od przebiegu krzywej czas–temperatura podczas pożaru. Obliczenia można wykonać dla dowolnego rozkładu temperatury, jednak należy porównać ze sobą wykres dla projektowanego pożaru z wykresem krzywej standardowej [9]. Jeśli pole powierzchni A jest mniejsze niż pole powierzchni B, istnieje ryzyko, że słup nie zachowa nośności przez wymagany czas trwania pożaru. Jeśli zachodzi odwrotna sytuacja, słup zachowa swoją nośność przez cały czas trwania pożaru. Należy zaznaczyć, że proponowana metoda nie jest słuszna w przypadku, gdy wartości temperatur na wykresie krzywej projektowanej nie są zbliżone do wartości temperatur krzywej standardowej przez czas co najmniej pierwszych 10 minut od rozpoczęcia pożaru.

Poza ww. ograniczeniem występują jeszcze inne, które należy spełnić, aby wyniki uzyskane przy użyciu tej metody były poprawne:

- odporność ogniowa słupa w przedziale od 1 h do 5 h,
- wytrzymałość betonu na ściskanie określana po 28 dniach od zabetonowania – od 25 do 100 N·mm⁻²,
- wymiary przekroju poprzecznego słupa od 200 do 600 mm,
- stopień zbrojenia od 1% do 4%,
- długość efektywna słupów zawierająca się w przedziale od 2000 mm do 4500 mm,
- mimośród obciążenia zawierający się w przedziale od 0.00 do 0.75 b, gdzie b jest wymiarem przekroju poprzecznego słupa w kierunku działania mimośrodru,
- nie uwzględnia się efektów interakcji wynikających z połączenia słupa z przylegającymi elementami konstrukcyjnymi.

Analiza przedstawionych metod w świetle badań

Badania prowadzono na uniwersytecie w Coimbrze [7, 8, 10–12]. Uwzględniono w nich wpływ na odporność ogniową słupów stopnia zbrojenia podłużnego, smukłości, sztywności otaczającej konstrukcji oraz rodzaju zastosowanego zbrojenia.

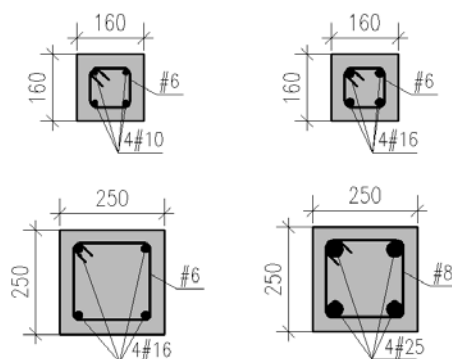
Badane słupy miały wysokość 3000 mm, wymiary przekroju poprzecznego 160 x 160 mm lub 250 x 250 mm. Z obu stron były zakończone stalową płytą umożliwiającą przykręcenie słupa do zewnętrznej konstrukcji nośnej. Stalowe płyty miały wymiary 450 x 450 x 30 mm i były wykonane ze stali S355. Płyty stalowe zostały przyspawane do podłużnego zbrojenia

słupa. Do wykonania elementów użyto pręty zbrojeniowe ze stali klasy A500NR. Otulina betonowa do lica strzemion miała wartość 30 mm. Charakterystyczne parametry słupów przedstawiono w tabeli 5.1. oraz omówiono dalej w tekście, a przekroje poprzeczne słupów oraz widok zbrojenia podłużnego wraz z rozmieszczeniem strzemion pokazano odpowiednio na rys. 5.1 i rys. 5.2.

Tabela 5.1. Charakterystyczne parametry badanych słupów

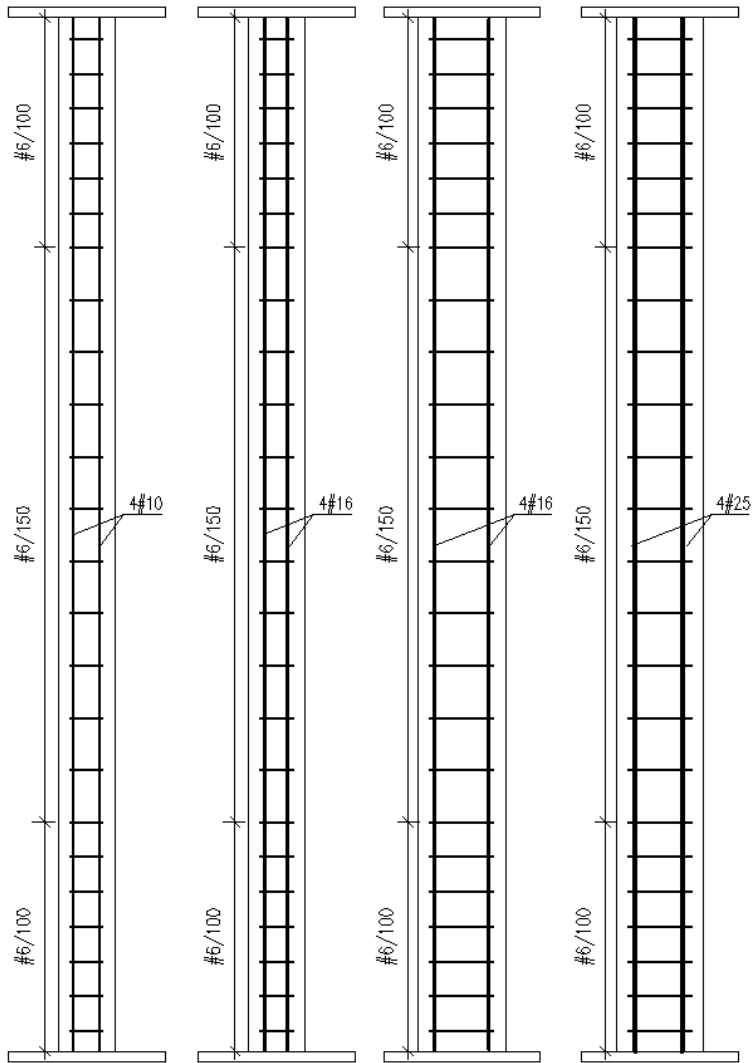
Lp.	Symbol	Wymiary $b \times h$ (mm)	Klasa betonu	Zbrojenie podłużne ilość i średnica (mm)	Obciążenie przyłożone (kN)	Czas badania (min)
1	C16-10-K1	160 x 160	C20/25	4 Φ 10	144	65
2	C16-10-K2	160 x 160	C20/25	4 Φ 10	152	77
3	C16-16-K1	160 x 160	C20/25	4 Φ 16	181	88
4	C16-16-K2	160 x 160	C20/25	4 Φ 16	185	87
5	C25-16-K1	250 x 250	C20/25	4 Φ 16	495	136
6	C25-16-K2	250 x 250	C20/25	4 Φ 16	507	132
7	C25-25-K1	250 x 250	C20/25	4 Φ 25	656	144
8	C25-25-K2	250 x 250	C20/25	4 Φ 25	675	118
9	C25-16-K1-LL	250 x 250	C20/25	4 Φ 16	666	28
10	C1	250 x 250	C12/15	4 Φ 10	686	17
11	C2	250 x 250	C12/15	4 Φ 16	686	92
12	C3	250 x 250	C12/15	4 Φ 20	686	141
13	C4	250 x 250	C16/20	4 Φ 25	686	140

Źródło: [8,12].



Rysunek 5.1. Przekroje poprzeczne badanych słupów żelbetowych

Opracowanie własne na podstawie [8].



Rysunek 5.2. Badane słupy żelbetowe w widoku z pokazanym rozmieszczeniem zbrojenia

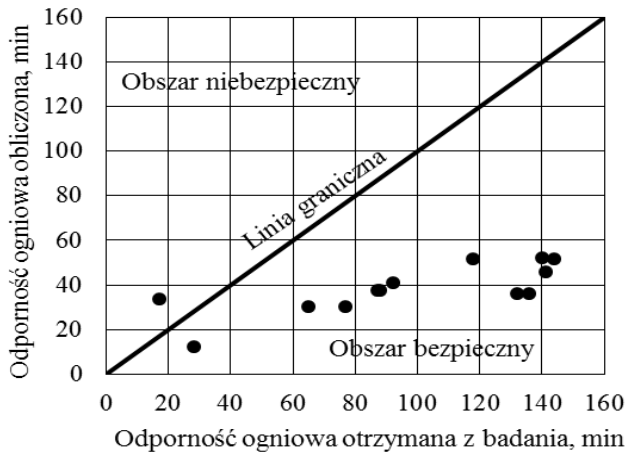
Opracowanie własne na podstawie [8].

Analizowano trzynaście słupów, w tym cztery o przekroju 160x160 mm (symbol C16) i cztery o przekroju 250x250 mm (symbol C25). Słupy o tych samych wymiarach przekroju różniły się pomiędzy sobą stopniem zbrojenia oraz sztywnością belki przylegającej do słupa (określenie K1 w symbolu oznaczało, że belka miała sztywność giętną $13 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, a K2 odpowiednio $45 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$), za pośrednictwem której przykładano do słupa obciążenie. Obciążenie generowane przez siłownik było utrzymywane przez cały czas trwania badania na stałym poziomie 70% wartości nośności obliczeniowej słupa w temperaturze pokojowej z wyjątkiem słupa oznaczonego symbolem LL, obciążonego siłą równą wartości nośności obliczeniowej słupa w temperaturze pokojowej. W słupach C1 do C3 zmniejszono średnicę

prętów zbrojeniowych w stosunku do C4, a jednocześnie dodawano do mieszanki włókien stalowych w takiej ilości, aby całkowita waga zbrojenia była identyczna w każdym słupie. Do mieszanki betonowej słupów C1-C3 dodano również włókna polipropylenowe.

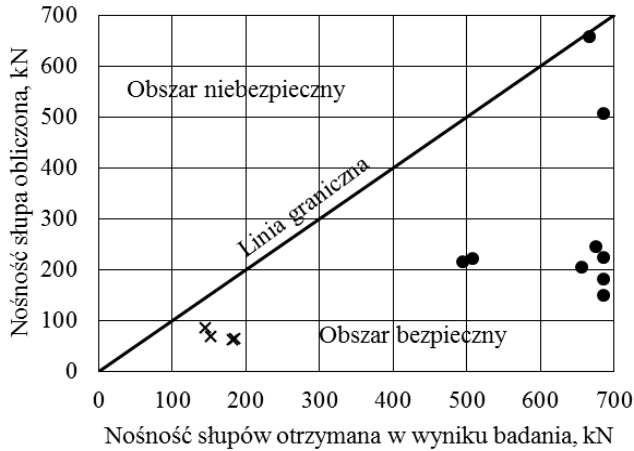
W celu sprawdzenia zgodności przedstawionych metod przybliżonego określania odporności i nośności ogniowej słupów żelbetowych w uwzględnieniem usztywnienia elementami przylegającymi wykonano następujące obliczenia:

- wszystkich słupów przedstawionych w tab. 5.1 metodą zaprezentowaną w rozdziale 2 (wyniki przedstawiono na rys. 5.3),
- wszystkich słupów o wymiarach przekroju poprzecznego 250 x 250 mm metodą zaprezentowaną w rozdziale 3, gdyż słupy o wymiarach 160 x 160 mm nie spełniały ograniczeń tej metody (wyniki przedstawiono na rys. 5.4),
- słupów o wymiarach przekroju poprzecznego 250 x 250 mm zbrojonych wyłącznie stalą zbrojeniową (C25-16 i C25-25) metodą zaprezentowaną w rozdziale 4, gdyż tylko te słupy spełniały ograniczenia tej metody (wyniki przedstawiono na rys. 5.5).



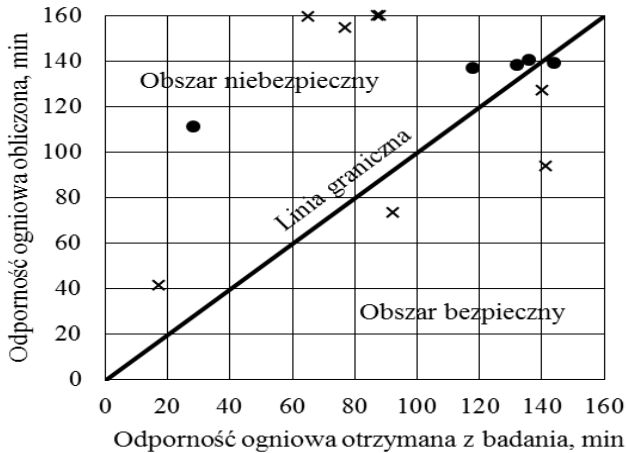
Rysunek 5.3. Porównanie odporności ogniowej otrzymanej z badania z odpornością ogniową obliczoną wg [3, 9]

Opracowanie własne na podstawie: [3, 9, 7, 8, 10–12].



Rysunek 5.4. Porównanie nośności słupów otrzymanej z badania z nośnością słupów obliczoną wg [2] (gwiazdkami przedstawiono wyniki dla słupów niespełniających ograniczeń metody)

Opracowanie własne na podstawie: [2, 7, 8, 10–12].



Rysunek 5.5. Porównanie odporności ogniowej otrzymanej z badania z odpornością ogniową obliczoną wg [5] (gwiazdkami przedstawiono wyniki dla słupów niespełniających ograniczeń metody)

Opracowanie własne na podstawie: [5, 7, 8, 10–12].

Na rys. 5.3–5.5 przedstawiono również (gwiazdkami) wyniki dla słupów niespełniających ograniczeń danej metody w celu oceny stopnia rozrzutu.

Z analizy wykresów przedstawionych na rys. 5.3–5.5 wynika, że wykorzystując metody przedstawione w [2] i [9], można otrzymać wartości bezpieczne. Natomiast odmiennie prezentują się wyniki obliczeń metodą przedstawioną w [5]. Autorzy tej metody zastrzegli jednak, że nie uwzględnia się w niej efektów interakcji słupa i konstrukcji przylegającej, co może tłumaczyć fakt zawyżenia nośności ogniowej w przypadku analizowanych słupów.

Wyniki obliczeń dla badanych słupów niespełniających ograniczeń metody opisanej w [2] przedstawiają się po bezpiecznej stronie, jednak wyniki te znajdują się blisko linii granicznej, co może świadczyć o zaniżeniu na korzyść bezpieczeństwa wyników obliczeń. Zupełnie odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku identycznych obliczeń metodą opisaną w [5]. Rozrzut wyników dla tych słupów jest duży, a wyniki są raz po bezpiecznej, innym razem po niebezpiecznej stronie, co dyskwalifikuje tę metodę do stosowania dla słupów niespełniających ograniczeń tej metody.

Podsumowanie

Przedstawione metody przybliżonego określania nośności ogniowej lub nośności obliczeniowej słupów żelbetowych w warunkach pożaru wyprowadzono dla elementów bezpośrednio obciążanych siłownikiem maszyny wytrzymałościowej. Obecnie większość badań słupów w warunkach pożaru prowadzi się z uwzględnieniem usztywnienia elementami przylegającymi. Wyniki odporności ogniowej bądź nośności ogniowej słupów żelbetowych w warunkach pożarowych wyznaczone metodami przedstawionymi w [2, 9] oraz w [3] dają wartości większe od otrzymanych w wyniku badań, więc są metodami bezpiecznymi z punktu widzenia projektanta konstrukcji. Odmienna sytuacja ma miejsce w przypadku metody przedstawionej w [5], gdzie większość wyników otrzymanych z obliczeń była mniejsza od wyników badań.

Bibliografia

- [1] Dotreppe J.-C., Franssen J.-M., Bruls A., Baus R., Vandeveldel P., Minne R., Nieuwenburg van D., Lambotte H., 1997, *Experimental research on the determination of the main parameters affecting the behavior of reinforced concrete columns under fire conditions*, Magazine of Concrete Research, vol. 49, nr 149, p. 9–18.
- [2] Dotreppe J.-C., Franssen J.-M., Vanderzeypen Y., 1999, *Calculation Method for Design of Reinforced Concrete Columns under Fire Conditions*, ACI Structural Journal, vol. 96, nr 1, 9–18.
- [3] Franssen J.-M., Dotreppe J.-C., 2003, *Fire Tests and Calculation Methods for Circular Concrete Columns*, Fire Technology, vol. 39, 89–97.
- [4] Hass R., 1986, *Practical Rules for the Design of Reinforced Concrete and Composite Columns Submitted to Fire*, Technical Report 69, T.U. Braunschweig.
- [5] Kodur V., Raut N., 2012, *A simplified approach for predicting fire resistance of reinforced concrete columns under biaxial bending*, Engineering Structures, vol. 41, 428–443.
- [6] Lie T.T., Woollerton J.L., 1988, *Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Test Results*, Technical Report 569, NRCC, Ottawa.
- [7] Martins A.M.B., Rodrigues J.P.C., 2009, *Fire resistance tests on concrete columns with restrained thermal elongation*, App. of Struct. Fire Eng. – Proceed. of Int. Conf., Prague, 277–282.

- [8] Martins A.M.B., Rodrigues J.P.C., 2010, *Fire resistance of reinforced concrete columns with elastically restrained thermal elongation*, Engineering Structures, vol. 32, p. 3330–3337.
- [9] PN-EN 1992-1-2:2008. *Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe*.
- [10] Rodrigues J.P.C., Luís L., Correia A.M., 2010, *Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire*, Composite Structures, vol. 92, 1263–1268.
- [11] Rodrigues J.P.C., Luís L., Gonçalves M., 2012, *Fire resistance of square and circular cross-section concrete columns*, Proceed. of 7th Int. Conf. on Struct. in Fire, Switzerland, 823–832.
- [12] Rodrigues J.P.C., Luís L., Mihailovschi G., 2009, *Fire resistance of fiber reinforced concrete columns*, App. of Struct. Fire Eng. – Proceed. of Int. Conf., Prague, 271–276.

SUMMARY

Michał Lidner

Review of selected methods for determining fire resistance and load-bearing capacity of reinforced concrete columns based on the research conducted with restraint elements

The paper presents a review of selected methods for determining the fire resistance and load-bearing capacity of reinforced concrete columns in fire conditions. It also presents a research program and the results of reinforced concrete columns or fiber reinforced concrete columns that were loaded actuator through a three-dimensional steel frame, taking into account the stiffening by restraint elements. Then the presented method were used to calculate the fire resistance or load – bearing capacity of columns and the results of these methods were compared with the results of research.

Key words. Fire safety, reinforced concrete columns in fire conditions, methods of determining fire resistance/load-bearing capacity.

Data wpływu artykułu: 12.11.2014 r.

Data akceptacji artykułu: 30.06.2015 r.