

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Obliczeniowa ocena nośności płyt żelbetowych w strefie przypodporowej w warunkach działania pożaru

MICHAŁ MACIĄG, SZYMON SPODZIEJA, GRZEGORZ ADAMCZEWSKI
POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Słowa kluczowe: płyta, żelbet, nośność, pożar

STRESZCZENIE:

W pracy obliczono nośność płyt żelbetowych w warunkach działania pożaru o grubościach nie mniejszych niż 15cm. Przyjęto standardową krzywą pożarową. Obliczenia wykonano uproszczoną metodą Izoterma 500. Wyznaczono krzywe równowagi pomocne do wyznaczenia nośności ogniowej analizowanych płyt. Jako pomoc dla projektantów wyniki zebrano tabelarycznie.

Computational assessment of the load bearing capacity of reinforced concrete slabs in a support area under fire conditions

Keywords: slab, reinforced concrete, load capacity, fire

ABSTRACT:

The load capacity of reinforced concrete slabs, with a thickness not less than 15 cm, under fire conditions was calculated in the publication. A standard fire curve was adopted. The calculations were made using the simplified method of Isotherm 500. The equilibrium curves, helpful in determining the fire resistance of the analysed boards, were determined. The results were tabulated to be used by designers.

1. WSTĘP

W praktyce zawodowej konstruktor ma obowiązek zapewnienia odpowiedniej nośności konstrukcji w sytuacji pożarowej. Dla konstrukcji żelbetowych wymagania te najczęściej spełniane są poprzez zastosowanie odpowiednich gabarytów projektowanego elementu – zwykle jest to zachowanie wymaganej odległości środka ciężkości zbrojenia głównego od lica płyty i wymiarów przekroju. W celu spełnienia stawianych wymagań przeciwpożarowych dla projektowanych budynków EC2 [6] proponuje się następujące metody:

- metoda tabelaryczna,
- uproszczone modele obliczeniowe dla wydzielonych elementów konstrukcyjnych, takie jak metoda Izoterma 500 lub metoda strefowa,
- zaawansowane modele obliczeniowe.

Posługując się Izotermą 500 [4] jesteśmy w stanie ocenić nośność ogniową dowolnego elementu konstrukcyjnego, na co nie pozwalają ograniczenia tabelaryczne zgodne z EC2. W pracy sprawdzono obliczeniową nośność wybranych płyt żelbetowych korzystając z metody Izotermy 500. Porównano wiele parametrów mających wpływ na nośność konstrukcji w sytuacji pożarowej, takich jak:

- odległość środka ciężkości zbrojenia głównego od lica płyty,
- stopień zbrojenia,
- współczynnik redukcyjny obciążenia obliczeniowego.

Celem pracy jest analiza wyników uzyskanych z obliczeń. Porównanie ich z danymi tabelarycznymi podawanymi jako bezpieczne wg EC2 oraz stworzenie dokładniejszych tabel nośności. Dzięki temu uzyskane zostały oszczędniejsze wyniki z punktu widzenia inżyniera oraz inwestora.

Praca jest uzupełnieniem pracy [1] o nośność płyt w strefie podporowej w sytuacji pożarowej.

2. ZAŁOŻENIA OBLICZENIOWE ZGODNIE Z IZOTERMĄ 500

Do obliczenia nośności wykorzystano analizę bazującą na metodzie izotermy 500°C.

Założenia metody:

- redukcja granicy plastyczności stali zależna od obliczeniowej temperatury w środku ciężkości zbrojenia,
- redukcja strefy ściskania betonu wyznaczona przez zasięg izotermy 500°C; założono, że w zre-

dukowanej strefie beton posiada wytrzymałość na ściskanie zgodnie z EC2 w warunkach normalnych,

– pożar według standardowej krzywej pożarowej. Dodatkowe ograniczenia nałożone przez autorów:

– Analizowano jedynie przekroje zbrojone stalą o $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$, o odpowiedniej ciągliwości, która pozwala na osiągnięcie odkształceń nie mniejszych niż w temperaturach większych niż $\theta \geq 200^\circ\text{C}$,

– Nie analizowano betonów o wysokiej wytrzymałości na ściskanie, czyli o $f_{yk} \leq 50 \text{ MPa}$,

– Przyjęto prostokątne przekroje poprzeczne – najczęściej w praktyce stosowany przekrój konstrukcji płyt stropowych;

– Przyjęto, że ze względu na warstwy podłogowe płyty są zabezpieczone przed działaniem pożaru od górnej strony. Szlichta znacznie zwiększa bierną ochronę elementu przed niepożądanymi skutkami pożaru,

– Dopuszczono w sytuacji pożarowej zniszczenie płyty ze względu na zmiażdżenie betonu,

– Zredukowano obliczeniowe obciążenie w warunkach działania pożaru – n_f .

Poprzez znaczny wzrost odkształceń stali spowodowanych ich wysoką temperaturą spada maksymalna wysokość strefy ściskanej. Dlatego dla wysokich stopni zbrojenia w sytuacji pożarowej możliwe jest zniszczenie przekroju poprzez wyczerpanie nośności betonu. Autorzy dopuszczają taką sytuację, gdy pominięcie jej spowodowałoby niedoszacowanie nośności konstrukcji, która w sytuacji normalnej ulega zniszczeniu poprzez zerwanie stali, czyli jest zaprojektowana poprawnie.

3. TEMPERATURA W ZBROJENIU

Do obliczenia nośności potrzebujemy dodatkowo określić temperaturę w środku ciężkości projektowanego zbrojenia płyty. W strefie podporowej zbrojenie główne nie zmienia znacznie swojej temperatury, gdyż jest zabezpieczone warstwami podłogowymi.

Kolejnym typem zbrojenia stosowanym w strefie podporowej jest zbrojenie zapobiegające przebicciu stropu. Zbrojenie tego typu przyjmuje postać prętów prostopadłych lub ukośnych do osi środkowej płyty. Korzystając z wyników symulacji numerycznych ogrzewanych płyt żelbetowych z pracy [2] można dojść do wniosku, że na przeważającej długości tego typu prętów ich tempera-

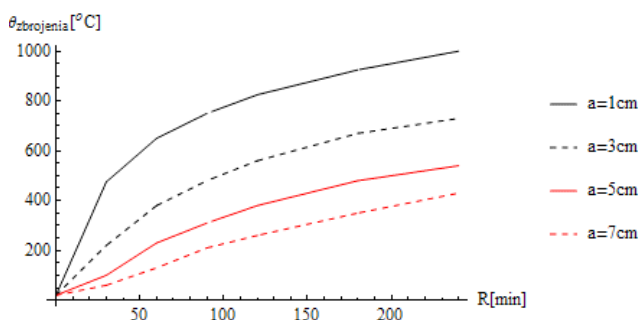
tura nie przekracza 500°C, więc ich wytrzymałość nie zmienia się. Z tego względu pominięto wpływ działania pożaru na zbrojenie płyty.

4. WSPÓŁCZYNNIKI REDUKUJĄCE WYTRZYMAŁOŚĆ BETONU

Zgodnie z założeniami metody Izotermy 500 w obliczeniach nie przyjęto współczynników redukujących wytrzymałość betonu na ściskanie. Obniżenie nośności osiąga się przez zredukowanie przekroju ściskanego betonu zgodnie z trajektorią izotermy 500 w warunkach pożarowych. Dla obszaru o temperaturze lokalnej $< 500^{\circ}\text{C}$ przyjęto $f_{cd,fi} = f_{ck}$ natomiast dla obszarów, gdzie $\theta \geq 500^{\circ}\text{C}$ założono $f_{cd,fi} = 0$.

5. REDUKCJA PRZEKROJU

W pracy [2] po przeprowadzeniu analizy numerycznej najczęściej stosowanych elementów zginanych żelbetowych zalecono arbitralne wartości a_z – położenie Izotermy 500 w płytach żelbetowych. Okazuje się, że dla płyt o grubości $h \geq 15\text{ cm}$ położenie izotermy 500 jest właściwie niezależne od grubości badanego elementu (Rys. 1).



Rysunek 1 Zależność temperatury w środku ciężkości zbrojenia od czasu trwania pożaru dla różnych odległości od ogrzewanego lica płyty, por. [2]

6. NOŚNOŚĆ PŁYT

Analizie obliczeniowej poddano najczęściej spotykane płyty stropowe o grubości powyżej 15 cm. Przyjęto wartości $d = 12\text{ cm}, 15\text{ cm}, 22\text{ cm}$, gdzie d jest wysokością użyteczną przekroju.

7. WSPÓŁCZYNNIK REDUKCYJNY OBCIĄŻENIA OBLICZENIOWEGO

Obciążenie pożarem należy do wyjątkowych obciążeń konstrukcji. Przy określaniu wytrzymałości konstrukcji narażonych na działanie pożaru często ko-

rzystamy ze stosunku obliczeniowego obciążenia w warunkach pożarowych do obliczeniowego obciążenia w warunkach zwykłych n_f . Zgodnie z zaleceniami EC2 [6] przyjęto $n_f = 0,7$. Ze strony konstruktora jest to oszacowanie po bezpiecznej stronie. Warto zaznaczyć, że przyjęcie mniejszych wartości współczynników redukcyjnych w znaczny sposób może podnieść klasę nośności ogniowej projektowanego budynku. Mniejsze wartości zostały również uwzględnione w tablicach końcowych (Tab. 1-2).

Tablica 1 Nośności pożarowe

Nośności pożarowe dla $\alpha < 0,1$						
n_f	Minimalne $d[\text{cm}]$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	-	-	-	-	13,2	15,8
0,6	-	-	-	-	-	13
0,5	-	-	-	-	-	-
0,4	-	-	-	-	-	-
0,3	-	-	-	-	-	-

Nośności pożarowe dla $\alpha < 0,2$						
n_f	Minimalne $d[\text{cm}]$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	-	-	-	-	13,6	16,3
0,6	-	-	-	-	-	13,4
0,5	-	-	-	-	-	-
0,4	-	-	-	-	-	-
0,3	-	-	-	-	-	-

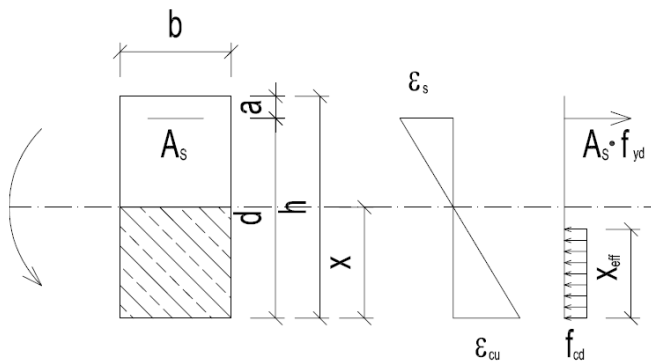
Nośności pożarowe dla $\alpha < 0,3$						
n_f	Minimalne $d[\text{cm}]$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	-	-	-	-	14	16,7
0,6	-	-	-	-	-	13,9
0,5	-	-	-	-	-	12,1
0,4	-	-	-	-	-	-
0,3	-	-	-	-	-	-

Nośności pożarowe dla $\alpha < 0,5$						
n_f	Minimalne $d[\text{cm}]$					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	-	-	-	12,1	17,2	20,7
0,6	-	-	-	-	14,4	17,3
0,5	-	-	-	-	12,2	14,7
0,4	-	-	-	-	-	12,6
0,3	-	-	-	-	-	-

Tabela 2 Nośności pożarowe przy przebiciu

n_f	Minimalne d[cm]					
	R30	R60	R90	R120	R180	R240
0,7	-	-	-	-	16	19,4
0,6	-	-	-	-	13,4	16,3
0,5	-	-	-	-	-	13,8
0,4	-	-	-	-	-	-
0,3	-	-	-	-	-	-

8. NOŚNOŚĆ PŁYTY W SYTUACJI NORMALNEJ



Rysunek 2 Siły w przekroju dla sytuacji normalnej. Strefa podporowa

9. NOŚNOŚĆ PRZY ZGINANIU

Nośność wyznaczono z uproszczonej metody modelowania przekroju betonowego, pojedynczo zbrojonego, jedynie zginanego. Równania równowagi sił i momentów (Rys. 2) przyjmują postać [3]:

$$bx_{ff}f_{cd} = A_s f_{yd} \quad (1)$$

$$M_{Rd} = x_{eff} f_{cd} \left(d - \frac{x_{eff}}{2} \right) \quad (2)$$

Po przejściu na wielkości bezwymiarowe otrzymujemy:

$$m_{Rd} = \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (3)$$

gdzie:

$$m_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{f_{cd} b d^2} - \text{bezwymiarowa nośność przekroju na zginanie,}$$

$$\alpha = \xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d} = \frac{A_s f_{yd}}{b d f_{cd}} - \text{stopień zbrojenia.}$$

W dalszych rozważaniach założono, że przekrój został zaprojektowany na 100%, tzn. że $m_{Ed} = m_{Rd}$.

Po zredukowaniu siły przez współczynnik n_f otrzymujemy bezwymiarowe obciążenie w sytuacji pożarowej $m_{Ed,fi} = n_f m_{Ed}$.

10. NOŚNOŚĆ PRZY PRZEBICIU

Zbrojenie przeciwdziałające przebiciu w sytuacji pożarowej nie traci na swojej nośności. Rezultatem jest fakt, iż nośność przy przebiciu zbrojonych obwodów kontrolnych w sytuacji pożarowej jest taka sama jak w sytuacji normalnej, a nawet wyższa poprzez pominięcie współczynników zmniejszających. Ze względu na ten fakt w pracy porównane zostaną obwody kontrolne niezbrojone. Zgodnie z [5] przy założeniu, że nie mamy sił sprężających nośność przy przebiciu wynosi:

$$V_{Rd,c} = \frac{1}{\beta} \frac{0,18}{\gamma_c} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)^3 \sqrt{100 \rho_l f_{ck}} u d$$

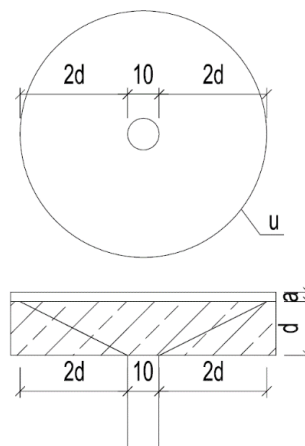
gdzie:

ρ_l – średnia geometryczna stopnia zbrojenia,

u – długość obwodu kontrolnego,

$\left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right)$ – lecz nie więcej niż 2.

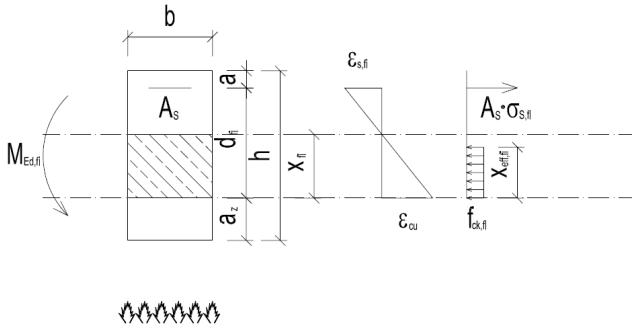
Obwód kontrolny zależy od wymiarów słupa przebijającego strop. Im większy obwód słupa, tym wpływ zmniejszenia wysokości użytecznej jest mniej widoczny, dlatego założono, że słup przebijający strop jest relatywnie mały i ma średnicę 10 cm, wtedy $u = 2\pi(5 + 2d)$ (Rys. 3).



Rysunek 3 Obliczeniowy obwód kontrolny dla okrągłego środkowego słupa o 10 cm. Przebicie stropu w warunkach normalnych

W dalszych rozważaniach założono, że przekrój został zaprojektowany na 100%, tzn., że $V_{Ed} = V_{Rd,c}$. Po zredukowaniu siły przez współczynnik n_f otrzymujemy bezwymiarowe obciążenie w sytuacji pożarowej $V_{Ed,fi} = V_{Ed} n_f$.

11. NOŚNOŚĆ PŁYTY W SYTUACJI POŻAROWEJ



Rysunek 4 Siły w przekroju dla sytuacji pożarowej. Strefa podporowa

12. NOŚNOŚĆ PRZY ZGINANIU

Analogicznie dla sytuacji pożarowej (Rys. 4):

$$b x_{eff,fi} f_{ck} = A_s \sigma_{s,fi}; \quad \sigma_{s,fi} = p f_{yd,fi};$$

$$f_{yd,fi} = f_{yk}; \quad d_{fi} = d - a_z$$

$$M_{Rd,fi} = b x_{eff,fi} f_{ck} \left(d_{fi} - \frac{x_{eff,fi}}{2} \right)$$

Po przejściu na wielkości bezwymiarowe otrzymujemy:

$$m_{Rd,fi} = \alpha \gamma_s p \left(1 - \frac{a_z}{d} - p \frac{\alpha \gamma_s}{2 \gamma_c} \right)$$

gdzie:

$$m_{Rd,fi} = \frac{M_{Rd,fi}}{f_{cd} b d^2} \text{ – bezwymiarowa nośność przekroju na zginanie w sytuacji pożarowej,}$$

$\sigma_{s,fi}$ – naprężenia w zbrojeniu w sytuacji pożarowej,

p – stopień wykorzystania zbrojenia w sytuacji pożarowej, $p \in (0,1)$,

γ_c – współczynnik częściowy betonu w warunkach normalnych (wg EC2 = 1,4),

γ_s – współczynnik częściowy stali w warunkach normalnych (wg EC2 = 1,15).

Do wyznaczenia p rozwiązano następujący układ równań:

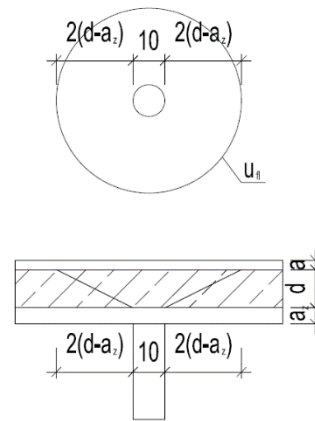
$$\begin{cases} \epsilon_{s,fi} = \frac{\epsilon_{cu} \left(d - a_z - \frac{x_{eff,fi}}{0,8} \right)}{\frac{x_{eff,fi}}{0,8}} \\ \sigma_{s,fi} = p f_{yk} \\ x_{eff,fi} = \alpha \frac{\gamma_s}{\gamma_c} p d \\ \sigma_{s,fi} = E \epsilon_{s,fi} \end{cases}$$

13. NOŚNOŚĆ PRZY PRZEBICIU

Zgodnie z [5] przy założeniu, że nie mamy sił sprężających, nośność przy przebicciu w sytuacji pożarowej wynosi:

$$V_{Rd,c,fi} = \frac{1,0,18}{\beta} \frac{1}{1} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d - a_z}} \right)^3 \sqrt{100 \rho_l f_{ck}} u_{fi} (d - a_z)$$

Obwód kontrolny zależy od wymiarów słupa przebijającego strop. Im większy obwód słupa, tym wpływ zmniejszenia wysokości użytecznej jest mniej widoczny, dlatego założono, że słup przebijający strop jest relatywnie mały i ma średnicę 10cm, wtedy $u = 2\pi(5 + 2(d - a_z))$ (Rys. 5).

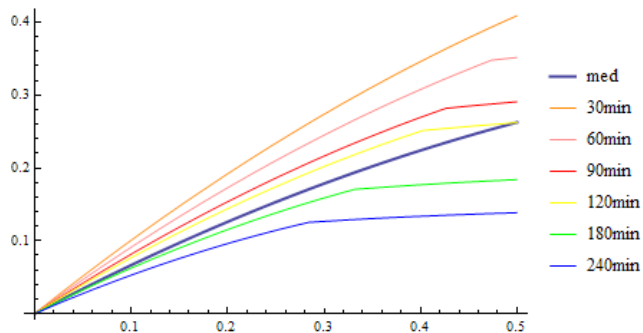


Rysunek 5 Obliczeniowy obwód kontrolny dla okrągłego środkowego słupa o 10 cm. Przebiccie stropu w warunkach pożarowych

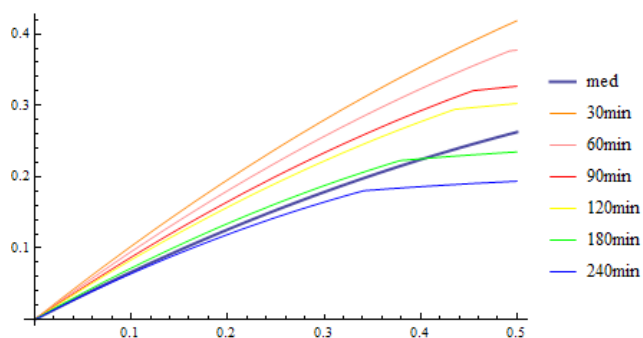
14. WYNIKI ANALIZY

14.1 Nośność przy zginaniu

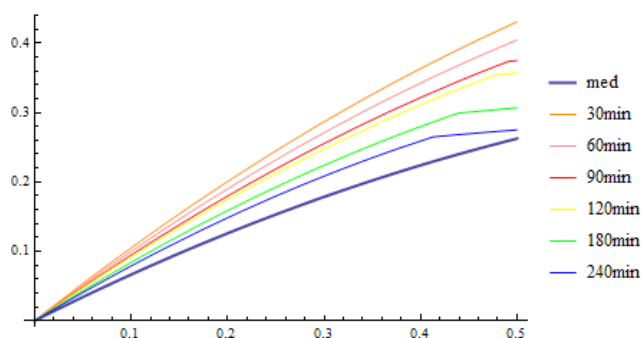
Po rozwiązaniu układu równań (10) otrzymano wykresy nośności (Rys. 6-8) dla wysokości użytecznej płyty 12 cm, 15 cm i 22 cm. Na osi poziomej odłożone są bezwymiarowe stopnie zbrojenia, natomiast na pionowej bezwymiarowa nośność przekroju. Jeżeli nośność w danej chwili pożarowej, reprezentowanej przez różne kolory wykresów, jest nad maksymalnym wykresem obciążenia, oznacza to, że dany przekrój ma co najmniej taką nośność ogniową.



Rysunek 6 Nośności pożarowe dla d = 12 cm



Rysunek 7 Nośności pożarowe dla d = 15 cm



Rysunek 8 Nośności pożarowe dla a = 22 cm

Z wykresów wynika jasno, że dla niższych stopni zbrojenia przekrój należy do wyższej klasy nośności pożarowej. Aby ułatwić korzystanie z wykresów sporządzono tabele (Tab. 1), w których pokazano dla jakich minimalnych wysokości użytecznych przy danych stopniach zbrojenia płyta należy do danej klasy nośności ogniowej. Ze względu na fakt, iż przyjęcie $n_f = 0,7$ jest bardzo restrykcyjne zwłaszcza dla płyt żelbetowych, w których ciężar samej konstrukcji jest znaczny, różniono jeszcze tę nośność dla różnych wartości tego współczynnika.

Oczywiście odpowiedzialny konstruktor nigdy nie projektuje płyty dla 100% jej wykorzystania, więc można również korzystać z wykresów i przeliczać nośność pożarową płyty korzystając ze wzoru $M_{Rd,fi} = m_{Rd,fi} f_{cd} b d^2$ i przyrównać do obciążenia w sytuacji pożarowej równego $M_{Ed,fi} = n_f M_{Ed}$. Ze względu na iteracyjny charakter obliczeń (spraw-

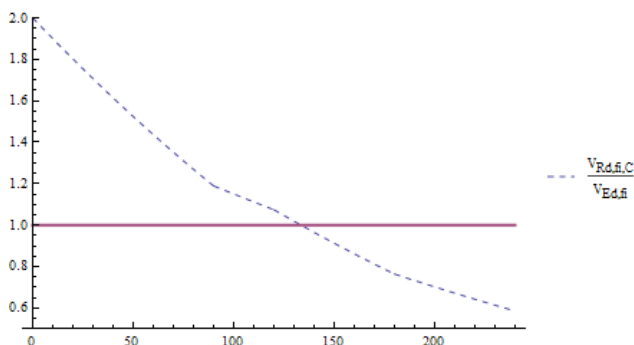
zenie maksymalnego momentu, jaki jest w stanie przenieść przekrój dla kolejnych min. działania pożaru) jest to o wiele bardziej pracochłonne i niezalecane. Zaleca się przyjąć odpowiednią odległość do środka ciężkości zbrojenia.

14.2 Nośność przy przebiciu

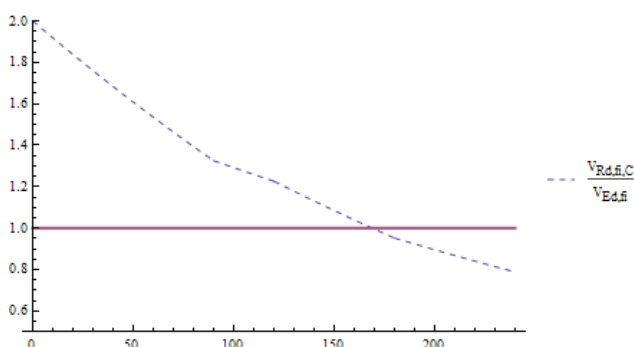
Ze względu na skomplikowanie wzorów postanowiono nie stosować współrzędnych bezwymiarowych. W zamian stosunek nośności przy przebiciu w sytuacji pożarowej do siły przebijającej

$$\frac{V_{Rd,c,fi}}{V_{Ed,fi}}$$

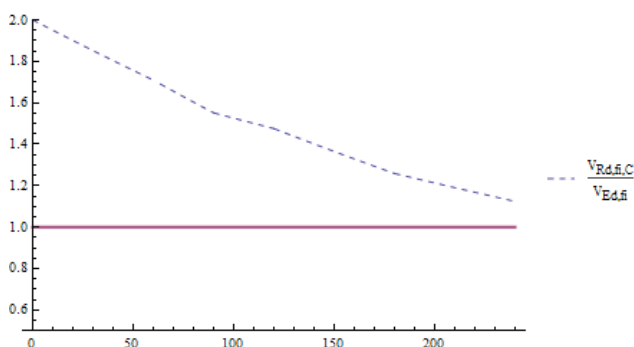
przyrównano do 1 (Rys. 9-11). Wykresy sporządzono dla wysokości użytecznej płyty 12 cm, 15 cm i 22 cm. Na osi poziomej odłożony został czas od momentu rozpoczęcia pożaru, natomiast na pionowej stosunek nośności do obciążenia.



Rysunek 9 Stosunek nośności pożarowej do obciążenia dla d = 12 cm



Rysunek 10 Stosunek nośności pożarowej do obciążenia dla d = 15 cm



Rysunek 11 Stosunek nośności pożarowej do obciążenia dla d = 22 cm

Aby ułatwić korzystanie z wykresów sporządzono tabele (tab.2), w których pokazano dla jakich maksymalnych stopni zbrojenia płyta należy do danej klasy nośności ogniowej. Ze względu na fakt iż przyjęcie $n_f = 0,7$ jest bardzo restrykcyjne zwłaszcza dla płyt żelbetowych, w których ciężar samej konstrukcji jest znaczny, rozróżniono jeszcze tę nośność dla różnych wartości tego współczynnika.

15. WNIOSKI

Z pracy wynika, że nośność pożarowa obliczona zgodnie z metodą Izotermy 500 pokrywa się w dużym stopniu z metodą tabelaryczną podaną w EC [6]. Zaproponowano dokładniejsze tabele, zgodnie z którymi można uwzględnić stopień zbrojenia, który ma wpływ na nośność ogniową. Analiza płyt razem z pracą [1] jest jednak kompletna.

LITERATURA

- [1] Abramowicz M., Kowalski R., Stress-strain relationship of reinforcing steel. Subjected to Tension and High Temperature, Application of Structural Fire Design, Prague, Czech Republic, 19-20 February 2009.
- [2] Kowalski R., Obliczeniowa ocena nośności zginanych elementów żelbetowych w sytuacji pożaru, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Tomy Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, nr 149/2008.
- [3] Knauff M., Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.
- [4] Hertz K., A Survey of a System of Methods for Fire Safety Design of Traditional Concrete Constructions, Structures in fire – proceeding of first international workshop, 2000, s. 283-292.
- [5] PN-EN 1992-1-1-2008: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [6] PN-EN 1992-1-2-2008: Projektowanie konstrukcji z betonu - Część 1-2: Reguły ogólne-Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.