

РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ПЛИТИ ПЕРЕКРИТТЯ

Для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій, які об'єднані в вузли, вогневі випробування є неефективними, оскільки передбачають випробування декількох елементів конструкції – плити перекриття, ригелів та колон.

Альтернативою може бути застосування розрахункових методів, які мають меншу вартість, трудомісткість, не потребують дорогого й громіздкого експериментального устаткування.

З огляду на зазначені особливості була створена методика, що базується на застосуванні розрахункового методу оцінки класу вогнестійкості згідно з чинними в Україні нормативними документами, гармонізованими із відповідною методичною та нормативною базою Європейського Союзу, а також узгоджується із результатами досліджень, які апробовані та визнані науковою спільнотою і входять до основної бази літературних посилань [1–4, 6].

Отримані результати можуть бути використані для встановлення відповідності класу вогнестійкості досліджуваних елементів вимогам будівельних норм.

Метою роботи є розвиток методології застосування методів розрахунків меж вогнестійкості, заснованих на використанні методів кінцевих елементів та кінцевих різниць, на прикладі оцінки вогнестійкості плити перекриття. Сюди входить розроблення вимог до бази початкових даних щодо матеріалів, граничних умов, побудова розрахункових схем та сіткових моделей, набір обов'язкових постпроцесорних даних, а також критеріальна база щодо ідентифікації настання граничних станів втрати несучої та теплоізолювальної здатності та втрати цілісності за отриманими результатами розрахунку.

Для оцінки вогнестійкості розглядається плита перекриття. Схема розташування арматури у перерізі плити перекриття, яка розташовується між стіною та ригелем, наведена на рис. 1.

При розгляді теплової дії пожежі на плиту перекриття згідно із конструктивними схемами можна дійти висновку, що ця дія має односторонній тепловий вплив на нескінченну пластину із заданою товщиною. Крайова задача при цьому була поставлена з використанням розрахункової схеми (рис. 2).

Згідно із розробленою методикою для визначення температурного розподілу у перерізі



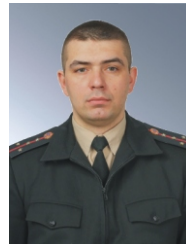
С.В. Поздєєв
начальник кафедри будівельних конструкцій Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, д.т.н., професор



Ю.А. Отрош
доцент кафедри будівельних конструкцій Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, к.т.н., доцент



В.В. Демешок
ад'юнкт Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України



І.В. Федченко
пошукач Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

залізобетонної плити перекриття використаний метод кінцевих різниць. Для його реалізації була складена кінцево-різницева схема (рис. 3).

За розрахунковою схемою плита перекриття навантажена розподіленим навантаженням $Q_1 = 2,5 \text{ кН/м}^2$. Для розрахунку також необхідно задати початкову температуру розрахункової області та параметри граничних умов, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри граничних умов для залізобетонної плити перекриття

Параметр	Позн.	Од. вим.	Вел.	Посилання
Обігрівана сторона				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	α	Вт/(м ² °С)	25	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012
Ступінь чорноти			0,7	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012
Необігрівана сторона				
Коефіцієнт теплообміну		Вт/(м ² °С)	9	ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2012

Теплофізичні властивості бетону та цементно-піщаної стяжки наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Теплофізичні характеристики матеріалів плити перекриття

Коефіцієнт теплопровідності, λ (), Вт/(м °С)	Об'ємна питома теплоємність, c_p (), Дж/(м ³ °С)	Густина, ρ (), кг/м ³	
Важкий бетон на силікатному заповнювачі ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012			
2	0,2451 $\frac{1}{100}$	0,0107 $\frac{1}{100}$	2300
	900 при 20 °С 100 °С, (900 + (-100)) при 100 °С 200 °С, (1000 + 0,5(-100)) при 200 °С 400 °С, 1100 при 400 °С 1200 °С		
Цементно-піщана стяжка [8]			
1,2	1000	1800	

Згідно з даними вимогами міцнісні властивості бетону та арматурної сталі наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Міцнісні властивості бетону та арматурної сталі

Матеріал	Клас міцності	Позначення	Характеристична міцність, МПа
Бетон	C 30/35	$f_{ck,t}$	30
Арматурна сталь	A 400 С	$f_{yk,t}$	400

Для врахування зниження міцності бетону та арматурної сталі під час нагрівання початкова міцність помножується на коефіцієнт її зниження в залежності від температури відповідно:

$$f_{ck,t}(\) = k_{c,t}(\) f_{ck,t} \tag{1}$$

де $k_{c,t}(\)$ – коефіцієнт зниження міцності бетону

$$\text{та } f_{yk,t}(\) = k_s(\) f_{yk,t} \tag{2}$$

де $k_s(\)$ – коефіцієнт зниження міцності арматурної сталі.

Використовуючи дані щодо міцності, були побудовані діаграми деформування бетону та арматурної сталі, наведені на рис. 4.

Розрахунок реалізований у програмному середовищі табличного процесора Microsoft Excel 2003. Для його проведення були побудовані сіткові моделі плити перекриття. Накладання температур у вузлові точки відбувається шляхом лінійної інтерполяції.

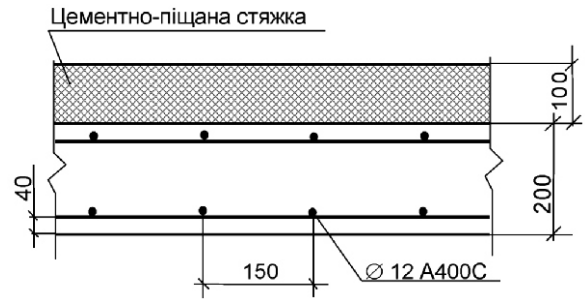


Рис. 1. Схема перерізу плити перекриття у місці між стіною та ригелем та розташування арматури у ньому

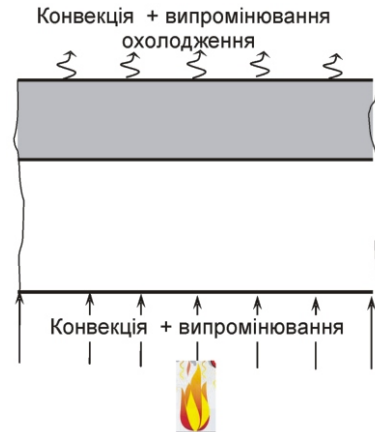


Рис. 2. Розрахункова схема впливу пожежі на плиту залізобетонного перекриття

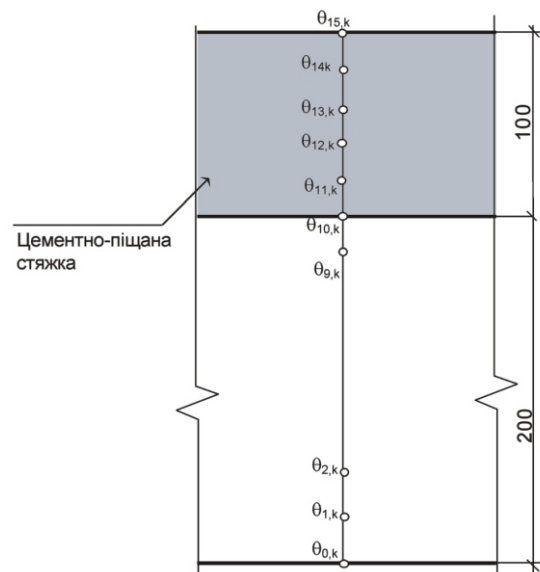


Рис. 3. Кінцево-різницєва схема для розв'язку задачі теплопровідності при визначенні температур у перерізі плити перекриття

На рис. 5 представлені результати у вигляді графіків температури нагріву контрольних точок плити перекриття у залежності від часу пожежі.

Розподіли температури по перерізу плити перекриття у різні моменти часу температурного впливу пожежі наведені на рис. 6.

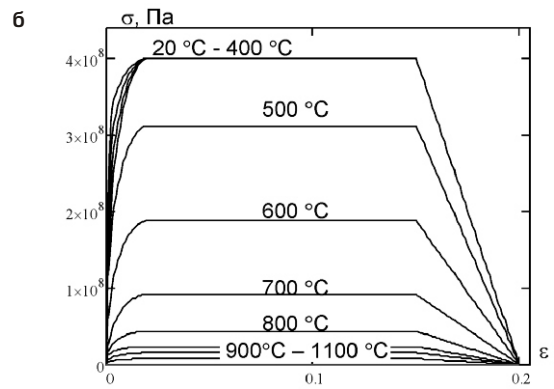
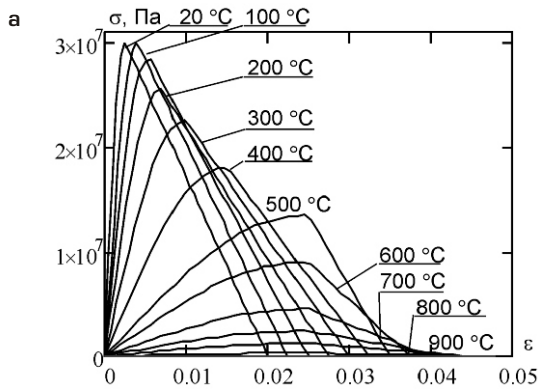


Рис. 4. Діаграми деформування бетону (а) та арматурної сталі (б)

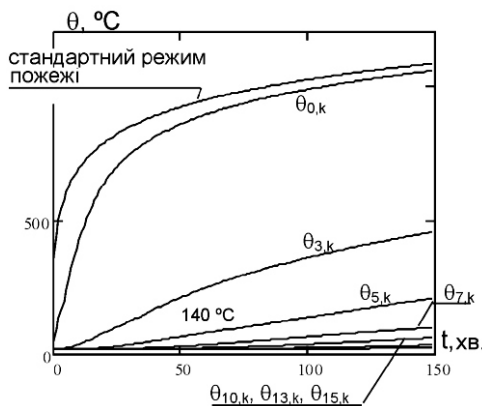


Рис. 5. Часові залежності прогріву внутрішніх шарів плити перекриття

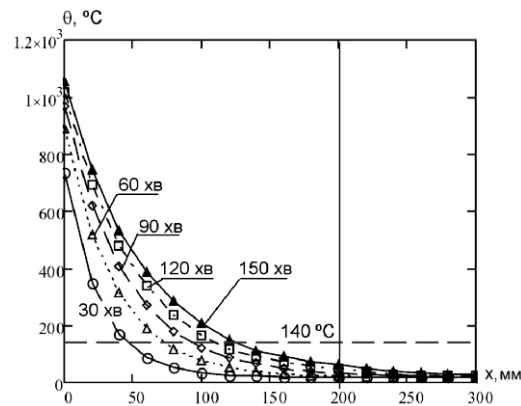


Рис. 6. Температурні розподіли по перерізу залізобетонної плити перекриття у різні моменти часу розвитку пожежі

Для забезпечення цілісності залізобетонної плити застосовується методика, визначена у джерелах [1, 2], згідно із якими цілісність контролюється за спеціальним коефіцієнтом, що визначається за формулою

$$F = \frac{b_c \cdot c_t E_s}{c / K_1 n} \quad (3)$$

де b_c – коефіцієнт пропорційності, що дорівнює $1,16 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{3/2}$; $c_t (250^\circ \text{C}) = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$ – коефіцієнт температурного розширення бетону [9]; $E_s = 1,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ – початковий модуль пружності бетону [9]; $c = 2150 \text{ кг/м}^3$ – густина бетону у сухому стані, кг/м^3 , що дорівнює густині бетону природної вологості за відніманням випареної води у кількості 150 кг/м^3 ; $K_1 = 0,47 \text{ МН} \cdot \text{м}^{3/2}$ – коефіцієнт псевдоінтенсивності напружень у бетоні [1, 2]; $n = 1,5 \text{ Вт} \cdot \text{м} \cdot ^\circ \text{C}$ – коефіцієнт теплопровідності бетону за температури 250°C [9].

Використовуючи наведені початкові дані, отримаємо параметр F :

$$F = \frac{1,16 \cdot 10^{-2} \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 \cdot 10^4 \cdot 2150}{0,47 \cdot 1,5} = 3,821 \cdot 4.$$

Параметр менший за 4 означає, що граничний стан втрати цілісності не настав.

За результатами теплотехнічного розрахунку була вирішена статична задача за допомогою зонного методу згідно із прийнятою методикою, тобто переріз плити розбиваємо на 10 шарів, як показано на рис. 7.

У таблицях 4 та 5 наведені значення середньої температури кожного шару, на які розбитий переріз плити перекриття, а також температура арматурних стрижнів протягом 150 хв пожежі за стандартним режимом та відповідні їм коефіцієнти зниження міцності бетону та арматурної сталі, визначені шляхом лінійної інтерполяції.

Таблиця 4

Коефіцієнти зниження міцності бетону у шарах залізобетонної плити перекриття протягом 150 хв пожежі за стандартним температурним режимом

Номер шару бетону у перерізі плити	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Середня температура шару, $^\circ \text{C}$	971,5	686,8	493,88	360,27	263,945	192,435	140,515	106,835	85,62	70,115
Коефіцієнт зниження міцності бетону, $k_c []$	0,051	0,32	0,609	0,79	0,886	0,954	0,98	0,997	1	1

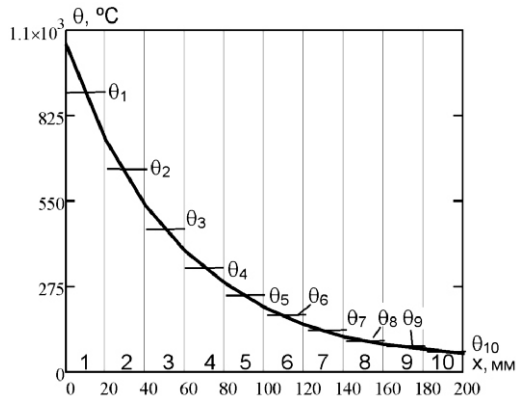


Рис. 7. Схема розбиття перерізу плити перекриття на шари для реалізації зонної методики

Таблиця 5

Коефіцієнти зниження міцності сталі в арматурних стрижнях залізобетонної плити перекриття протягом 150 хв пожежі за стандартним температурним режимом

Арматурний каркас	Нижній	Верхній
Температура арматури, °С	744,9	73,41
Коефіцієнт зниження міцності, k_s []	0,176	1

Середній коефіцієнт зниження міцності бетону для перерізу елемента, включаючи коефіцієнт $(1-0,2/n)$, що враховує при розрахунку зміну температури кожної зони:

$$k_{c,n} = \frac{(1-0,2/n)^n}{n} k_c(i) = 0,743, \quad (4)$$

де $n = 10$ – кількість зон.

Ширина пошкодженої зони перерізу плити розрахована за формулою

$$a_z = w \cdot 1 - \frac{k_{c,n}}{k_c(M)} = 51,4 \text{ мм}, \quad (5)$$

де $w = 200$ мм – ширина плити перекриття; $k_c(M) = 1$ – коефіцієнт зниження міцності бетону для температури найменш нагрітого шару плити перекриття.

Розрахункова схема плити згідно із умовами її закріплення та схема перерізу із врахуван-

ням зниження міцності складових залізобетону показана на рис. 8. Враховуючи цю розрахункову схему, визначаємо необхідні параметри для виконання розрахунку. Розрахунок виконаний у двох точках плити – у точці, розташованій посередині між опорами, та у точці з'єднання плити із опорою. Відповідно розглядаємо розрахункові схеми силової взаємодії у перерізі плити згідно із рис. 9.

Визначаємо положення нейтральної осі та параметри епюри граничних напружень в плиті у небезпечному перерізі 1 (див. рис. 9). Для цього використовуємо схему, зображену на рис. 10. Результати визначення параметрів наведені у таблиці 6.

Момент пари, що складає зусилля стисненої зони бетону та верхнього арматурного ряду, знаходимо за формулою

$$M_{u2} = A_s f_{sd,fi}(m) z = 7,06 \text{ кН м}, \quad (6)$$

де $A_s = 3 \cdot 0,25 \cdot D_1^2 = 603,2 \text{ мм}^2$ – площа стрижнів верхнього арматурного ряду;

$f_{sd,fi}(m) = \sigma_{sc} E_s = 395,3 \text{ Н/мм}^2$ – напруження у верхньому арматурному ряді;

$E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ – модуль пружності арматурної сталі;

$z = w - 0,5 \cdot x = 30 \text{ мм}$ – відстань між центрами арматурних стрижнів верхнього арматурного ряду до середини стисненої зони бетону.

Момент пари, що складає зусилля стисненої зони бетону та нижнього арматурного ряду, знаходимо за формулою

$$M_{u1} = A_s f_{sd,fi}(m) z = 6,36 \text{ кН м}, \quad (7)$$

де $A_s = 3 \cdot 0,25 \cdot D_1^2 = 603,2 \text{ мм}^2$ – площа стрижнів нижнього арматурного ряду;

$f_{sd,fi}(m) = k_s(i) f_{sd,fi}(20^\circ\text{C}) = 70,4 \text{ Н/мм}^2$ – міцність арматури на розтяг при даній температурі нагріву нижнього ряду арматурних стрижнів;

$z = 150 \text{ мм}$ – відстань між серединою стисненої зони бетону та нижнім арматурним рядом стрижнів.

Таблиця 6

Параметри для визначення епюри деформації та граничних напружень в бетоні плити (рис. 10)

Параметр	c_1	st	sc	x , мм	$k_c(M) f_{cd}(20^\circ\text{C})$, МПа	
Величина	0,0035	0,02	-0,0016	26	30	1

Таблиця 7

Параметри для визначення епюри деформації та граничних напружень в бетоні плити (рис. 11)

Параметр	c_1	st	sc	x , мм	$k_c(M) f_{cd}(20^\circ\text{C})$, МПа	
Величина	0,0035	0,014	0,0053	22	30	1

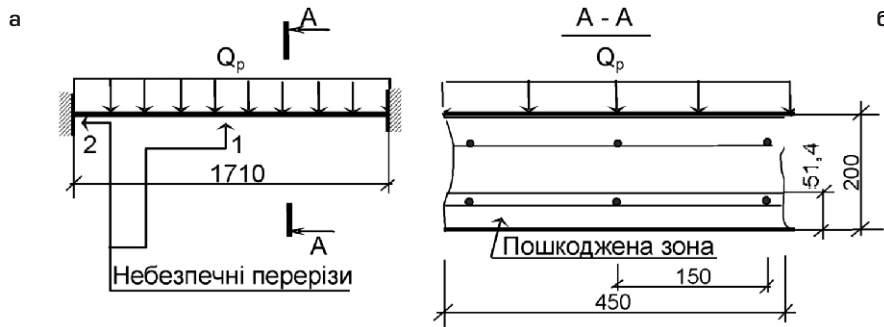


Рис. 8. Розрахункова схема плити (а) та перерізу плити перекриття (б)

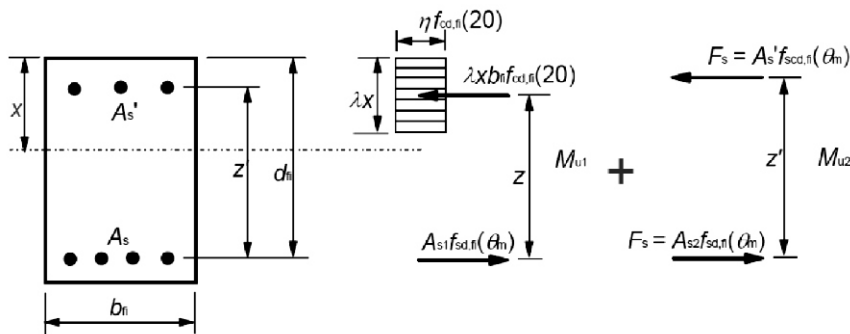


Рис. 9. Розподіл напружень при критичній несучій здатності прямокутного залізобетонного перерізу з армуванням стисненої зони

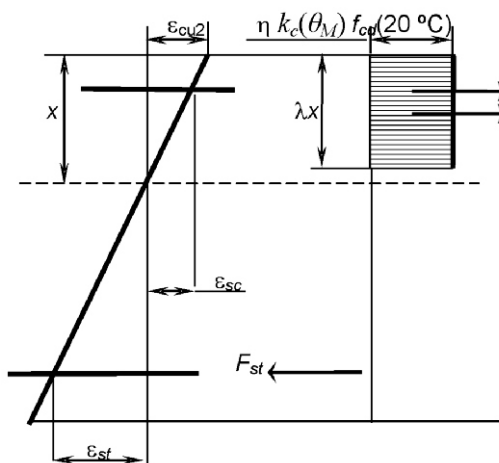


Рис. 10. Схема визначення параметрів епюри деформації та граничних напружень у бетоні плити у небезпечному перерізі 1

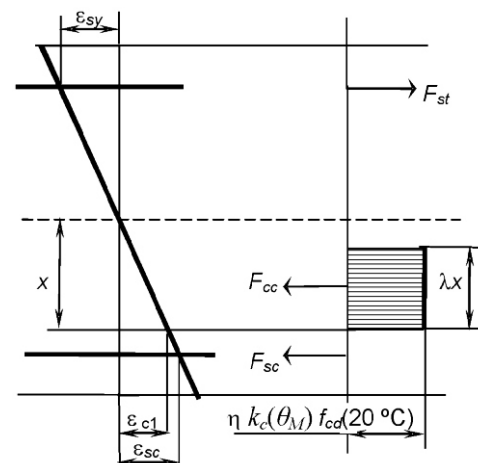


Рис. 11. Схема визначення параметрів епюри деформації та граничних напружень у бетоні плити у небезпечному перерізі 2

Спільний момент визначений за виразом

$$M_{Rd\,fi\,mid-span} = M_{u1} + M_{u2} = 13,42 \text{ кН м.} \quad (8)$$

Визначаємо положення нейтральної осі та параметри епюри граничних напружень в плиті у 2 точці. Для цього використовуємо схему, зображену на рис. 11. Значення параметрів наведені у таблиці 7.

Момент пари сил від арматурних рядів у плиті перекриття визначаємо за формулою

$$M_{u2} = A_s f_{scd,fi}(\theta_n) z = 0,479 \text{ кН м,} \quad (9)$$

де $A_s = 3 \cdot 0,25 \cdot D_1^2 = 603,2 \text{ мм}^2$ – площа стрижнів верхнього арматурного ряду;

$f_{scd,fi}(\theta_n) k_s(\theta_n) f_{scd,fi}(20 \text{ °C}) = 70,4 \text{ Н/мм}^2$ – міцність на стиск арматурної сталі нижнього арматурного ряду за умови нагрівання до заданої температури;

$z = 120 \text{ мм}$ – відстань між центрами арматурних стрижнів верхнього та нижнього рядів.

Площу перерізу робочої арматури, що сприймає момент від стисненої зони бетону, знаходимо за формулою

$$A_{s1} = A_s M_{u2} / (f_{sd,fi}(\theta_n) z) = 595,3 \text{ мм}^2, \quad (10)$$

де $A_s = 3 \cdot 0,25 \cdot D_1^2 = 603,2 \text{ мм}^2$ – площа стрижнів верхнього арматурного ряду.

Момент пари, що складає зусилля стисненої зони бетону та верхнього арматурного ряду, знаходимо за формулою

$$M_{ul} = A_s f_{sd,fi} (m) z^1 = 23,38 \text{ кН м}, \quad (11)$$

де $f_{sd,fi} (m) = k_s (m) f_{sd,fi} (20^\circ \text{C}) = 400 \text{ Н/мм}^2$ – міцність арматури на розтяг при зазначеній температурі нагріву верхнього ряду арматурних стрижнів; $z = 98 \text{ мм}$ – відстань між серединою стисненої зони бетону та верхнім рядом арматурних стрижнів.

Спільний момент визначений за виразом

$$M_{Rd,fi,endsup} = M_{Rd,fi,beg.sup} + M_{ul} + M_{u2} = 23,78 \text{ кН м}. \quad (12)$$

Загальний момент, що враховує моменти у жорстких защемленнях, визначається з використанням епюри згинальних моментів, що наведена на рис. 12.

Загальний момент визначений за формулою

$$M_{Rd,fi} = M_{Rd,fi,mid span} + M_{Rd,fi,endsup} = 37,2 \text{ кН м}. \quad (13)$$

Згідно із рис. 12 знаходимо діючий момент у плиті перекриття під час пожежі за формулою

$$M_{Ed,fi} = 0,125 \cdot f_i Q_1 b_f l_p^2 = 0,288 \text{ кН м}, \quad (14)$$

де $f_i = 0,7$ – коефіцієнт зниження, що визначає рівень навантаження при пожежі; $b_f = 450 \text{ мм}$ – ширина ділянки плити, що розглядається; $l_p = 1710 \text{ мм}$ – довжина ділянки плити, що розглядається.

Перевіряємо умову зберігання несучої здатності:

$$M_{Rd,fi} = 37,2 \text{ кН м} > M_{Ed,fi} = 0,288 \text{ кН м}. \quad (15)$$

Висновки.

1. У результаті проведеної роботи сформульовані вимоги до комплексу вихідних даних для проведення розрахунку та до побудови розрахункових схем та сіткових моделей залізобетонних плит перекриттів.

2. Визначені критерії для оцінки вогнестійкості плит перекриттів за набором розрахункових даних при ідентифікації настання граничних станів втрати несучої та теплоізолювальної здатності, а також цілісності.

3. Згідно з рис. 6 та рис. 7 температура на межі плити та цементно-піщаної стяжки протягом контрольного часу 150 хв не досягає значення 140°C , тобто клас вогнестійкості залізобетонної плити перекриття є не меншим за I150.

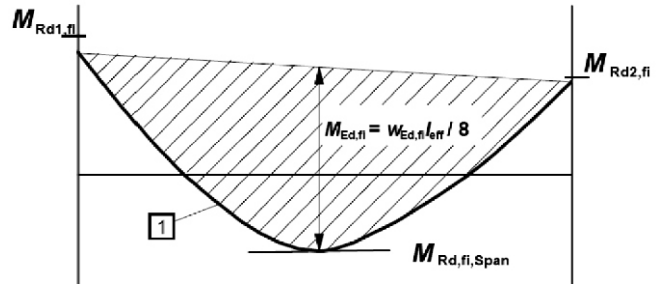


Рис. 12. Схема визначення загального моменту жорстко защемленого з обох боків зігнутого елемента

4. Коефіцієнт цілісності протягом контрольного часу 150 хв не перевищує число 4, тобто клас вогнестійкості залізобетонної плити перекриття є не меншим за E 150.

5. Збереження несучої здатності залізобетонною плитою під час пожежі означає, що плита перекриття відповідає класу вогнестійкості R150, тобто клас вогнестійкості залізобетонної плити перекриття є не меншим за R150.

Таким чином, встановлено, що клас вогнестійкості залізобетонної плити перекриття відповідає REI 150.

- [1] Жуков В.В. Взрывообразное разрушение бетона / Жуков В.В., Гуляева В.Ф., Сорокин А.Н. // Огнестойкость строительных конструкций. – Вып. 4. – 1976. – С. 42–57.
- [2] Правила по обеспечению огнестойкости и огнсохранности железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 – [Введен в действие 1996-01-01] – М.: Стройиздат, 2006. – 77 с. – (Национальный стандарт РФ).
- [3] Бартелими Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелими Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
- [4] Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
- [5] Вогнезахисні покриття для будівельних несучих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. [ENV 13381-4:2002] ДСТУ Б В.1.1-17:2007. [Чинний від 2007-01-01.] – К.: Укрархбудінформ, 2007. – 62 с. – (Національний стандарт України).
- [6] Леннон Т., Мур Д.Б., Ван Ю.К., Бейли К.Г. Руководство для проектировщиков к EN 1991-1-2:2002, EN 1992-1-2:2002, EN 1993-1-2:2002 и EN 1994-1-2:2002 : справочник по проектированию противопожарной защиты стальных, сталежелезобетонных и бетонных конструкций зданий и сооружений в соответствии с Еврокодами : пер. с англ. / Т. Леннон и др.; ред. Серии Х. Гульванесян; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т»; науч ред. пер. В.М. Ройтман, И.А. Кириллов, А.И. Плотников; 2-е изд., Москва – МГСУ, 2013. – 196 с.
- [7] Промышленные здания. Каталог систем и материалов. Пособие для проектировщиков при использовании изоляционных систем «ROCKWOOL». Москва. – 2010. – 42 с.
- [8] Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов, М.: НИИ строительной физики, 1969 – 142 с.
- [9] ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Еврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT).

Надійшла 09.07.2015 р.