УДК 624.073.11:539.371

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕБЕТОННИХ ПЛИТ ПРИ ДІЇ ПОЖЕЖІ

С.Ю. Берестянська, доцент, к.т.н., ХНАДУ

Анотація. *Описано процес деформації і руйнування сталебетонних плит при синхронній дії навантаження і температури, розроблено математичний апарат, який дозволяє оцінити напружено-деформований стан (НДС) і несучу здатність сталебетонних плит при вказаних діях.*

Ключові слова: *сталебетонна плита, жорсткість, стандартна пожежа, температурне поле, метод кінцевих різниць, вогнестійкість.*

Вступ

Застосування сталебетонних конструкцій дозволяє значно поліпшити показники матеріаломісткості, вартості та трудомісткості будівництва, що досягається завдяки багатофункціональному використанню сталевого листа. Плоский сталевий лист працює в умовах двохосьового розтягування, завдяки чому підвищується жорсткість та несуча спроможність сталебетонної плити у порівнянні із залізобетонною плитою за тієї самої витрати металу.

Аналіз публікацій

Аналіз робіт, присвячених сталебетонним плитам, показав, що, незважаючи на ефективність, розглянуті конструкції мають ряд
недоліків. Зокрема конструкції з відкрито розташованою листовою арматурою в порівнянні із залізобетонними мають меншу межу вогнестійкості. Дія температури призводить до швидкого нагрівання сталевого листа до критичної температури і втрачання ним міцносних властивостей. На практиці є досвід боротьби з указаним недоліком. Однак для широкого застосування розглянутих конструкцій потрібен математичний апарат, що дозволяв би ще на стадії проектування розраховувати такі конструкції не тільки на міцність, жорсткість і тріщиностійкість, але й на вогнестійкість.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розробка математичного апарата для розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) сталебетонних плит на силові та температурні впливи. Для досягнення поставленої мети було сформульовано основні задачі:
1. Розробити математичний апарат для розрахунку сталебетонних плит під впливом навантаження і стандартної пожежі.
2. Розробити конструкції захисту сталевого листа від теплових впливів при пожежі та методику їхніх розрахунків.

НДС сталебетонних плит при пожежі

Ця стаття є розвитком досліджень [1, 2, 3, 4] і містить у собі основні положення теорії сталебетонних плит, що враховує, крім силових, і температурні впливи. Використовуємо умови рівноваги елемента сталебетонної плити, отримані в [3]

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(M_T - M_x\right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(M_T - M_y\right) - \\ - \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) M_T = q(x, y) \quad (1)$$

Температурні згинальні моменти в бетоні і сталевому листі визначаються в такий спосіб:

$$M_T = M_T^b + M_T^s \quad ;$$

(2)

$$M_T^b = -\int_{x_{ti}}^{x_i} \frac{\alpha_b E_b (T - T_0)}{3(1 - \nu_b)} x \, \mathrm{d}x \, ;$$

$$M_T^s = -\int_{h_b}^{h_b + \delta} \frac{\alpha_b E_b (T - T_0)}{3(1 - \nu_b)} x \, \mathrm{d}x \, ,$$

де T_0 – початкова температура; α_b, α_s – коефіцієнти об'ємного розширення бетону і сталі.

Моменти M_x, M_y, M_{xy} пов'язані з жорсткими коефіцієнтами і кривизнами залежностями [1]

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} , \qquad (3)$$

$$K_x = -\partial^2 w / \partial x^2 \, ;$$
$$K_y = \partial^2 w / \partial y^2 \, ;$$
$$K_{xy} = \partial^2 w / \partial x \partial y \, .$$

(4)

Для вирішення задачі про напружено-деформований стан сталебетонної плити необхідно знати розподіл температурно-вологісного поля в її перерізі. Припустимо, що плита прогрівається рівномірно: а) з боку сталевого листа; б) з боку бетону; в) з боку сталевого листа і бетону одночасно.

У роботах [3, 4] на основі аналізу рівняння балансу мас у фазах, рівнянь руху і рівнянь балансу енергії показано, що для мікропористих середовищ з розмірами пор $r \le 10^{-7}$ м типу щільних важких бетонів з пористістю порядку 20 – 30 % тепломасообмін описується такою системою рівнянь

$$c\rho \, \partial T / \partial t = \partial / \partial x \left(\lambda \, \partial T / \partial x \right)$$

$$\partial \rho_3 / \partial t = (8r/3) \sqrt{R/2\pi M} \, \partial \left(\rho_3 \sqrt{T} \right) / \partial x \, , \quad (5)$$

де T – температура твердого каркаса разом з парою, К; c – питома теплоємність бетону; ρ – щільність сухого твердого каркаса; λ – коефіцієнт теплопровідності сухого каркаса; ρ_3 – щільність пари; M – молярна маса пари; R – газова постійна; t – час.

Для кожної схеми температурного впливу записуються початкові і граничні умови, і шляхом різницевої апроксимації вирішується задача тепломасообміну.

Знаючи розподіл температурного поля по товщині плити, за залежностями (2) визначаються температурні моменти, а рішенням рівняння рівноваги (1) з урахуванням залежностей (3) визначається напружено-деформований стан сталебетонної плити.

Як чисельний метод рішення використовується метод кінцевих різниць (МКР). Для цього на серединній поверхні плити вибирається кінцеве число точок, розподілених з деякою закономірністю, і вузли кінцево-різницевої сітки з дискретними координатами (*I*, *J*). Для кожної точки, отриманої таким чином, записують вихідні рівняння, в яких часткових похідних заміняють наближеними значеннями шуканої функції прогинів у вузлах сітки. У результаті безперервне рішення заміняють його дискретними значеннями у вузлах сітки, а

диференціальне рівняння зводять до системи алгебраїчних.

Для рішення поставленої задачі рівняння (1), (3) і (4) зводилися в єдине розрахункове рівняння. Рівняння рівноваги [1, 2] було представлене в кінцево-різницевій формі з використанням звичайних центральних різниць щодо невідомих прогинів W. Вирази для кривизн відповідно до (4) являють собою похідні другого порядку. Температурні моменти M_T записувалися в кінцевих різницях і після обчислень є величиною, що не залежить від прогину.

У згорнутому вигляді кінцеве розрахункове рівняння для точки з координатами (I, J) можна представити у такому вигляді

$$\sum_{L=-2}^{L=2}\sum_{K=-2}^{K=2} B(N)\,w(I+K, J+L) = P(I,J) + I_T(J, \ ), \qquad (6)$$

де $N = 5K + L + 13$;
$L, K = -2.0, -1.0, 0, 1.0, 2.0$.

Як уже відмічалося, жорсткості D_{ij}, що входять у рівняння (3) і визначають матрицю коефіцієнтів СЛАР, є функціями кривизни перерізів, $K_i(I, J)$ $(i = 1,2)$, (I, J) – номера вузлів сітки (дискретні координати). Для лінеаризації рішення організується процес послідовних наближень, що полягає в послідовному уточненні жорсткостей елементів конструкції за результатами попереднього розрахункового циклу.
При записі розрахункового рівняння (6) для точок на контурі і біля контуру доводиться мати справу із законтурними значеннями функцій прогинів. Для цих точок використовувалися центральні різниці. Розглядається випадок шарнірного опирання плити. У цьому випадку прогини на контурі дорівнюють нулю, і розрахункове рівняння для цих точок не записується. При записі рівнянь (6) для точок, що лежать біля контуру, необхідно знати значення прогинів для точок, що лежать поза контуром.

Сукупність розрахункових рівнянь виду (6), отриманих для кожної точки кінцево-різницевої сітки, з урахуванням граничних умов є системою лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) щодо невідомих значень $W(I, J)$ прогинів. Рішення СЛАР виконувалося методом Гаусса, для чого використовувалася стандартна підпрограма. У результаті рішення СЛАР знаходить значення функції прогинів $W(I, J)$ нульового наближення. Моделювання процесу деформування сталебетонної плити під навантаженням здійснювалося кроками в 10 кН/м^2. Дія температури враховувалася за рівнянням стандартної пожежі і моделювалася як добавка до навантаження в кожній точці кінцево-різницевої сітки. Температурні поля визначалися з інтервалом часу до випару вологи – 0,67 хв, після випару – 1,67 хв.

Процес послідовних наближень організований таким чином, що в кожнім n-му наближенні уточнюються жорсткісні характеристики відповідно до деформованого стану $(n-1)$-го наближення. Організований у такий спосіб процес збігається не у всіх випадках. За малих навантажень, безпосередньо після утворення тріщин, унаслідок різкого падіння жорсткостей у місцях локального тріщиноутворення і сильних перерозподілів зусиль, ітераційний процес розходиться. Це обумовлюється тим, що тріщини у процесі переходу від розрахункового циклу до циклу то розкриваються, то закриваються, і відповідно жорсткості то зменшуються, то збільшуються. Таке явище є характерним для статично невизначених залізобетонних конструкцій.

Для поліпшення збіжності ітераційного процесу зусилля, що вводяться в наступну ітерацію, визначалися як середнє арифметичне зусиль, отриманих на всіх попередніх ітераціях. У [3] цю процедуру рекомендовано застосовувати не до зусиль, а до жорсткостей, для чого жорсткості, що беруть участь у процесі формування матриці коефіцієнтів СЛАУ, визначаються за формулою

$$D'_n = \frac{D_{n-1} \cdot n + D_n}{n+1}, \qquad (7)$$

де D_n – жорсткість, отримана в поточній ітерації; D_{n-1} – жорсткість, використана у процесі формування матриці коефіцієнтів СЛАУ в $(n-1)$ – ітерації; n – номер

поточної ітерації. Такий прийом забезпечує впевнену збіжність процесу послідовних наближень, хоча викликає його уповільнення.

Висновки

Межа вогнестійкості конструкції характеризується її здатністю чинити опір температурі і визначається часом *t*, за який перекриття втрачає несучу здатність. У свою чергу несуча здатність характеризується такими факторами: міцністю бетону, міцністю сталевого листа, міцністю контакту.

Література

1. Огнестойкость бетонных и сталебетонных конструкций: Сб. научн. тр. – Харьков: ХарДАЗТ. – 2000. – Вып. 40. – 97 с.
2. Чихладзе Э.Д., Веревичева М.А., Берестянская С.Ю. Напряженно-деформированное состояние сталебетонных плит при силовых и температурных воздействиях // Коммунальное хозяйство городов. – Научно-техн. сб. – К.: Техника. – 2002. – Вып. 39. – С. 98 – 104.
3. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Напряженно-деформированное состояние сталебетонных плит // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №2. – С. 22 – 26.
4. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Несущая способность сталебетонных плит // Бетон и железобетон. – 1990. – №10. – С. 30 – 31.
5. Жакин А.И., Чихладзе Э.Д., Веревичева М.А. Теория тепломассообмена в пористых средах // Изв. вузов. Строительство. – 1998. – №1. – С. 111 – 116.

Рецензент: Є.М. Єрмак, професор, д.т.н., УкрДАЗТ.

Стаття надійшла до редакції 2 квітня 2008 р.