

Красніков Сергій Васильович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Макаров Степан Андрійович, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## **МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО ЕЛЕМЕНТУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Більшість сучасних опорних конструкцій для постійної експлуатації виготовляють з залізобетону. Найбільш розповсюдженими опорними конструкціями є мости та фундаменти. Перший залізобетонний міст було побудовано за патентом Монье у 1875 році. За століття залізобетон став одним з традиційних матеріалів при будівництві найрізноманітніших конструкцій. Побудовані з залізобетону конструкції мають вражаючі розміри: найбільша у світі магістральна дорога - Даньян-Куньшанський віадук (КНР) має довжину 164,8 км. Сучасне транспортне, цивільне та промислове будівництво використовує залізобетонні конструкції різної форми та складу [1]. Проте для рамних мостів та фундаментів найбільш розповсюдженим елементом є балка з прямокутним перетином [1, 2] (рис. 1). Існують різні схеми дослідження міцності балок із залізобетону [1 - 4]. Більшість розроблених методів базуються на використанні гомогенних моделей, що враховують внутрішній склад залізобетонних балок лише узагальнено. Ці методи дозволяють оцінити міцність залізобетонних конструкцій, проте не дозволяють оптимізувати структуру окремих елементів та провести докладний аналіз напружено-деформованого стану її складових частин. Тому сучасний розвиток методів розрахунку залізобетонних конструкцій базується на безпосередньому врахуванні їх структури [2].



Рисунок 1 - Ціндаоський міст через затоку Цзяочжоу (КНР), довжина 42,5 км, 5200 залізобетонних опор

Пропонується метод дослідження міцності типових елементів залізобетонних опорних конструкцій на базі розрахункових моделей, що враховують їх внутрішню структуру. Залізобетон є композитом та складається з арматури, а також суміші бетону з наповнювачем. З урахуванням тривалої експлуатації залізобетону його характеристики та параметри всіх його елементів є випадковими величинами. Їх можна поділити на три групи: характеристики бетону з наповнювачем, параметри арматури та набір пошкоджень композиту. Позначимо наступні вектори:  $\{\bar{Y}(\bar{I}, \bar{J})\}$  – структура окремого елемента опори;  $\{\bar{I}\}$  – параметри армування;  $\{\bar{J}\}$  – характеристики бетону з наповнювачем;  $\{\bar{O}\}$  – ушкодження опорного елемента. Вектори  $\{\bar{Y}(\bar{I}, \bar{J})\}$  та  $\{\bar{I}\}$  мають детермінований початковий стан, що встановлено технічним проектом, проте при будівництві та експлуатації набувають стохастичний характер. Таким чином всі зазначені вектори є випадковими та залежать від часу. Результати експериментальних досліджень залізобетону за першою категорією тріщиностійкості [1 - 3] показали, що у цьому випадку характеристики  $\{Y(t)\}$ ,  $\{I(t)\}$ ,  $\{J(t)\}$ ,  $\{O(t)\}$  можна розглядати як квазістатичні процеси. Для аналогічного висновку щодо інших категорій тріщиностійкості потрібно провести аналіз окремого робочого стану конструкції або використовувати спеціалізовані моделі.

Загальне рівняння міцності для одного елемента або всієї залізобетонної опорної конструкції:

$$L(t, \{Y(t)\}, \{I(t)\}, \{J(t)\}, \{O(t)\}) \{q(t)\} = \{R(t)\}, \quad (1)$$

де  $L(t, \{Y(t)\}, \{I(t)\}, \{J(t)\}, \{O(t)\})$  – диференціальний матричний оператор з квазістатичною випадковою структурою,

$\{R(t)\}$  - вектор випадкового зовнішнього навантаження.

Оператор  $L(t, \{Y(t)\}, \{I(t)\}, \{J(t)\}, \{O(t)\})$  можна розкласти на дві типові частини: детермінований залежний від часу оператор  $L_{det}$ , що визначається середніми значеннями  $\{\bar{Y}(t)\}$ ,  $\{\bar{I}(t)\}$ ,  $\{\bar{J}(t)\}$ ,  $\{\bar{O}(t)\}$  та оператор змінної випадкової структури та параметрів  $L_{var}$ , що визначається випадковими центрованими складовими  $\{Y_0(t)\}$ ,  $\{I_0(t)\}$ ,  $\{J_0(t)\}$ ,  $\{O_0(t)\}$ :

$$\begin{aligned} L(t, \{Y(t)\}, \{I(t)\}, \{J(t)\}, \{O(t)\}) = \\ = L_{det}(\{\bar{Y}(t)\}, \{\bar{I}(t)\}, \{\bar{J}(t)\}, \{\bar{O}(t)\}) + \\ + L_{var}(\{Y_0(t)\}, \{I_0(t)\}, \{J_0(t)\}, \{O_0(t)\}) \end{aligned} \quad (2)$$

Для моделювання опорних елементів з урахуванням геометрії складових частин зручно використовувати метод скінчених елементів (МСЕ) [5, 6]. Згідно з МСЕ рівняння (1) можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
& [M_{\text{det}}(\{\bar{Y}\}, \{\bar{I}\}, \{\bar{J}\}, \{\bar{O}\}) + M_{\text{var}}(\{Y_0\}, \{I_0\}, \{J_0\}, \{O_0\})] \{\ddot{q}\} + \\
& + [C_{\text{det}}(\{\bar{Y}\}, \{\bar{I}\}, \{\bar{J}\}, \{\bar{O}\}) + C_{\text{var}}(\{Y_0\}, \{I_0\}, \{J_0\}, \{O_0\})] \{\dot{q}\} + \\
& + [K_{\text{det}}(\{\bar{Y}\}, \{\bar{I}\}, \{\bar{J}\}, \{\bar{O}\}) + K_{\text{var}}(\{Y_0\}, \{I_0\}, \{J_0\}, \{O_0\})] \{q\} = \{R(t)\}
\end{aligned} \quad (3)$$

Для задач статичної міцності співвідношення (3) має спрощений вигляд:

$$[K_{\text{det}}(\{\bar{Y}\}, \{\bar{I}\}, \{\bar{J}\}, \{\bar{O}\}) + K_{\text{var}}(\{Y_0\}, \{I_0\}, \{J_0\}, \{O_0\})] \{q\} = \{R(t)\} \quad (4)$$

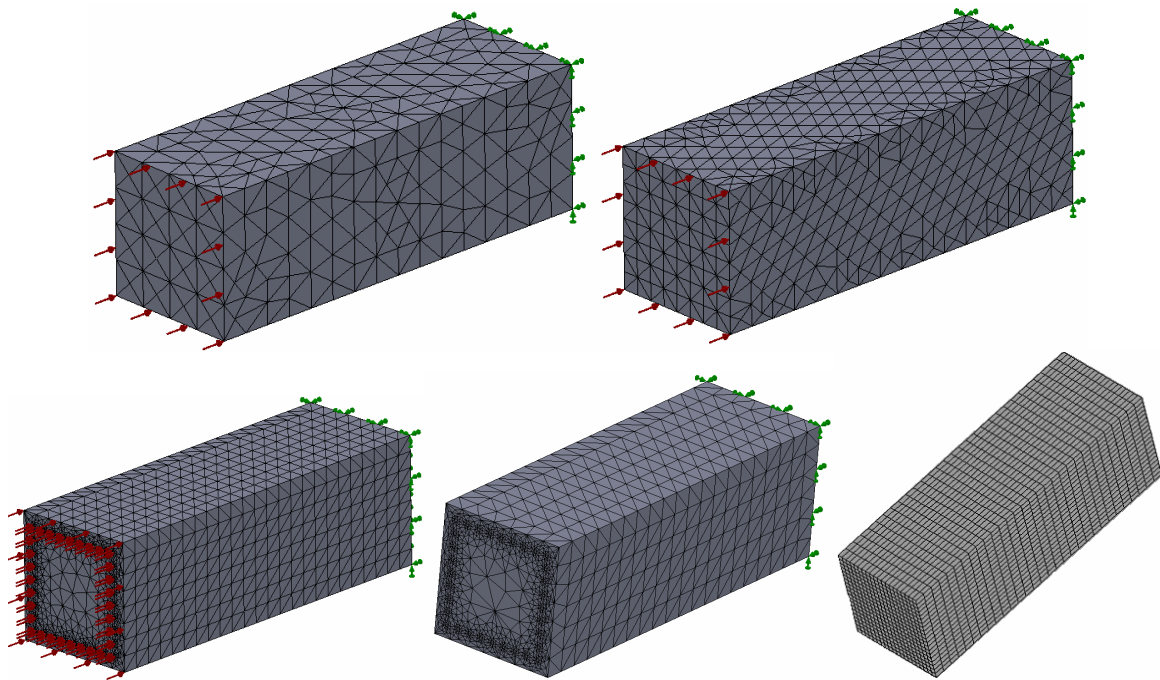


Рисунок 2 – Моделі залізобетонного елемента 1, 2, 3, 4, 5

Для типового елемента опорної залізобетонної конструкції у вигляді балки з квадратним перетином було побудовано кілька серій розрахункових скінчено-елементних моделей (рис. 2). Навантаження балки – рівномірний тиск по площині 1 кПа. Граничні умови – жорстке кріплення з протилежного боку від навантаження. Параметри моделей та аналіз похибки обчислення напруг при гомогенній структурі наведені у таблиці 1. Бетон з наповнювачем моделювався об'ємними скінченими елементами. Арматура моделювалась стрижневими скінченими елементами. Розглядається міцність за першою категорією тріщиностійкості, тому арматура має щільний контакт з бетоном. Розмір перетину - 1х1 м, довжина балки - 3 м.

Таблиця 1 – Параметри скінчено-елементних моделей

| Модель | Кількість скінчених елементів | Кількість вузлів | Кількість ступенів волі | Макс. напруги, Па | Відносна похибка, % |
|--------|-------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|---------------------|
| 1      | 3282                          | 774              | 2199                    | 1017,0            | 1,70                |

|   |       |       |        |        |      |
|---|-------|-------|--------|--------|------|
| 2 | 7218  | 1606  | 4575   | 1021,2 | 2,12 |
| 3 | 84818 | 14861 | 41856  | 1067,0 | 6,7  |
| 4 | 65563 | 11606 | 32325  | 1029,4 | 2,94 |
| 5 | 43020 | 44206 | 137295 | 1017,7 | 1,7  |

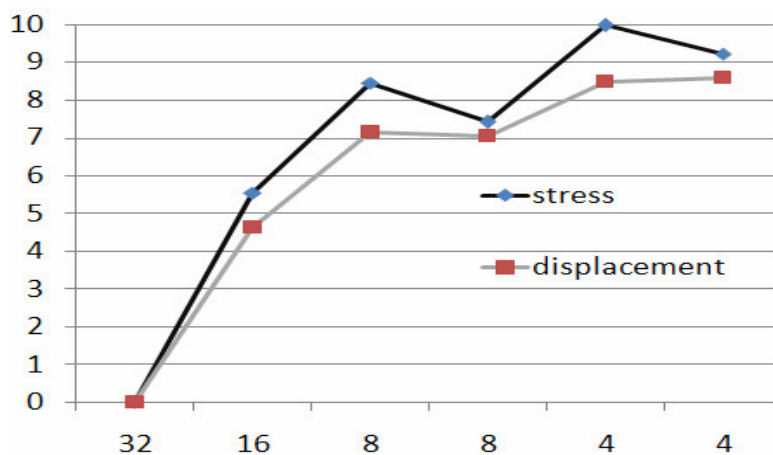


Рисунок 3 – Напруги та переміщення за моделлю 4

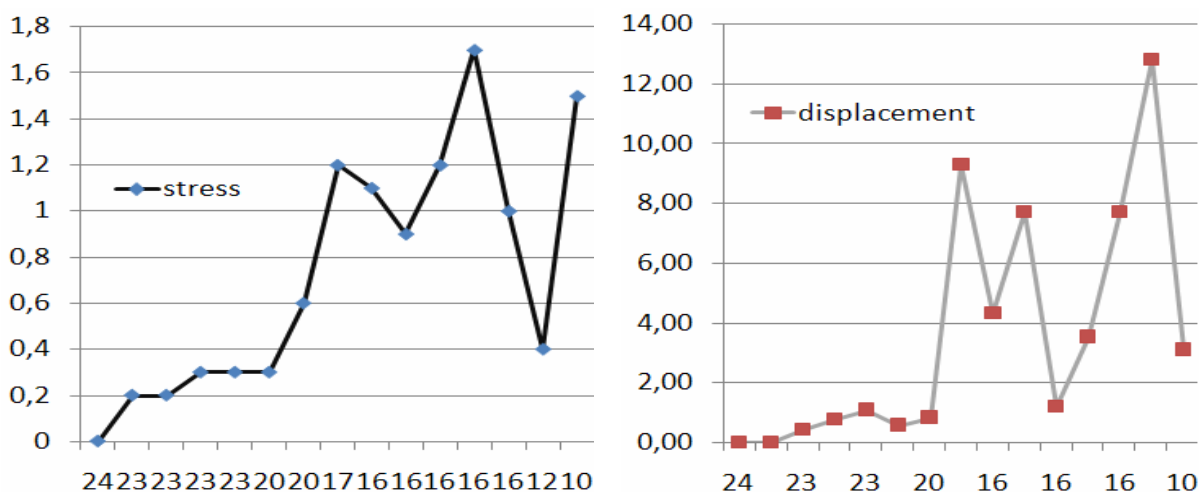


Рисунок 4 – Напруги та переміщення за моделлю 5

Було проведено розрахунки напруг та переміщень при різних параметрах векторів армування  $\{\bar{I}\}$  та бетону  $\{\bar{J}\}$ . Результати за моделлю 4 (базова кількість арматур 32) показано на рис. 3, а за моделлю 5 (базова кількість арматур 24) – на рис. 4. На рис. 3 та 4 горизонтальна шкала – кількість арматури, вертикальна шкала – відхилення від базового варіанту у процентах. Однакова кількість арматур з різними значеннями відхилень напруг або переміщень відповідають різному розміщенню арматури.

В результаті роботи розроблено модель дослідження міцності типового елемента залізобетонної опорної конструкції, а також серії розрахункових моделей. Проведено розрахункові дослідження напруг та переміщень типового елемента. Визначено чутливість напруг та переміщень до параметрів армування та фізичних характеристик складових елементів залізобетонного елемента.

## Література

1. Пересыпкин Е.Н. Расчет стержневых железобетонных элементов.-М.: Стройиздат, 1998.- 168 с.
2. Чистяков Е.А. Основы теории, методы расчета и экспериментальные исследования несущей способности сжатых железобетонных элементов при статическом нагружении: Автореф. дис. докт. техн. наук.-М., 1988.- 48 с.
3. Scott B.D., Park R., Priestly M.J.N. Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Stress Rates // ACI J. Proc. V. 79, 12, Jan.-Feb., 1982. - p. 13-27.
4. Soroushian P., Obaseki K. Strain Rate-Dependent Interaction Diagrams for Reinforced Concrete Sections // ACI J. Proc. V.83, 43, Jan.-Feb. 1986, p. 108-116.
5. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. – Харьков: Основа, 1991.-271с.
6. Жовдак В.О., Красников С.В., Степченко О.С. Решение задачи статистической динамики машиностроительных конструкций с учетом случайного изменения параметров // Проблемы машиностроения. – Харків: “Контраст“. - 2004. - Т.7, № 3. - С. 39 – 47.

Малахов Евгений Сергеевич, аспирант, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, [malahov1234@gmail.com](mailto:malahov1234@gmail.com)

## ПРЯМАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ ТРЕХ СТРУН

Целью данной работы является определение сил контактного взаимодействия между струнами в сложной системе. Рассматривается система из трех закрепленных струн конечных длин (рис. 1), две из которых параллельны, а третья пересекает их. Предполагается, что в точке контакта двух струн их перемещения полностью совпадают. К одной из струн приложена сосредоточенная нагрузка  $F_0(x,t) = P(t)\delta(x - x_0)$ , которая вызывает нестационарные колебания исследуемой системы.

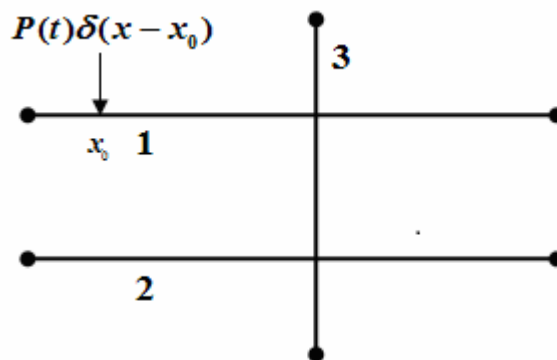


Рисунок 1 – Исследуемая система струн