

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

ШИЛЯЄВ ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 624.012.46:692.5

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЕРЕХРЕСНО-БАЛКОВИХ СИСТЕМ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, професор
Ковров Анатолій Володимирович,
Одеська державна академія будівництва
та архітектури Міністерства освіти і
науки України, в.о. ректора академії.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Азізов Талят Нуредінович,
Уманський державний педагогічний
університет імені Павла Тичини,
завідувач кафедри техніко-технологічних
дисциплін, охорони праці та безпеки
життєдіяльності;

кандидат технічних наук, доцент
Хміль Роман Євгенович,
Національний університет «Львівська
політехніка», доцент кафедри будівельних
конструкцій та мостів.

Захист відбудеться «11» січня 2021 р. о 11 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

Автореферат розісланий «09» грудня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.085.01, д.т.н., доц.

С.О. Кровяков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Розвиток сучасного будівництва ставить задачі дослідження роботи конструкцій будівель і споруд, спрямованих на підвищення економічності будівництва з підвищенням надійності конструктивних рішень.

Розповсюдженим видом будівельних конструкцій, що зазнають складного поєднання силових впливів, є перехресно-балкові системи. Такі системи у тому чи іншому вигляді застосовуються в фундаментах, перекриттях, покриттях будівель і споруд.

Опір залізобетонних конструкцій крученню зі згином в даний час вивчено недостатньо. Про це свідчить той факт, що у нормативних документах наведено лише загальні положення розрахунку, які не завжди узгоджуються з реальною роботою залізобетонних елементів в стадії утворення та розвитку тріщин, а також у граничній стадії.

Загалом, в будь-якому конструктивному елементі, що працює на згин, виникає кручення за рахунок випадкового ексцентриситету, зумовленого асиметрією перерізу, неоднорідністю матеріалів або позацентровим прикладенням вертикального навантаження.

Неправильне врахування згинальної та крутильної жорсткостей, що змінюються в процесі тріщиноутворення в залізобетонних елементах, може призвести до хибного визначення зусиль в системі і, як наслідок, до руйнування конструкції.

Таким чином, проведення теоретичних та експериментальних досліджень з вивчення напружено-деформованого стану перехресно-балкових систем, що зазнають згину з крученням, є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках держбюджетної теми «Розвиток чисельно-аналітичного методу граничних елементів для моделювання та розрахунку стержневих, пластинчатих та оболонкових конструкцій» на кафедрі будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури (номер державної реєстрації – 0117 U 000484).

Мета роботи – створення розрахункової моделі деформування залізобетонних перехресно-балкових систем з врахуванням тріщиноутворення на основі чисельно-аналітичного методу граничних елементів.

Завдання досліджень:

- створити методику застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку перехресно-балкових систем;
- вдосконалити пропозиції з врахування процесів тріщиноутворення під час розрахунку залізобетонних елементів, що зазнають згину з крученням;
- провести експериментальні дослідження конструкції залізобетонної перехресно-балкової системи;
- розробити комп'ютерну програму, що реалізує запропоновану розрахункову модель деформування залізобетонних перехресно-балкових систем;

- виконати порівняння результатів, отриманих аналітично, експериментально і на основі комп'ютерного моделювання.

Об'єкт досліджень – процес деформування перехресно-балкових систем.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан залізобетонних перехресно-балкових систем при силових впливах.

Методи дослідження: експериментальні дослідження, теоретичні методи будівельної механіки, чисельно-аналітичний метод граничних елементів, метод скінчених елементів, комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропоновано підхід до розрахунку перехресно-балкових систем на основі чисельно-аналітичного методу граничних елементів;
- вперше запропоновано новий підхід до формування компонентів розв'язуючого рівняння методу граничних елементів;
- отримала подальший розвиток методика врахування кручення під час розрахунку стрижневих залізобетонних елементів;
- вперше запропонована методика врахування кручення під час розрахунку перехресно-балкових систем методом граничних елементів;
- отримала подальший розвиток методика розрахунку перехресно-балкових систем з врахуванням кручення в сучасних інженерних програмах;
- вперше запропонована розрахункова модель деформування залізобетонних перехресно-балкових систем з врахуванням тріщиноутворення;
- отримані нові експериментальні дані про роботу залізобетонних перехресно-балкових систем.

Практичне значення отриманих результатів роботи:

Розроблена методологія комплексного дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних перехресно-балкових систем на основі сумісного використання аналітичних, чисельних та експериментальних методів.

Отримана просторова розрахункова модель вказаних систем та описана методика її розрахунку чисельно-аналітичним методом граничних елементів. Достовірність розробленої методики підтверджена експериментальними даними.

Отримані аналітичні залежності чисельно-аналітичного методу граничних елементів стосовно розрахунку розглянутих конструкцій, комп'ютерна реалізація яких не потребує використання дорогих скінчено-елементних програм.

Запропонована в роботі розрахункова модель деформування та комп'ютерна програма, що реалізує її, дозволяє визначати напружено-деформований стан залізобетонних перехресно-балкових систем з врахуванням тріщиноутворення.

Основні результати досліджень по дисертаційній роботі запроваджені в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури при проведенні лекційних та практичних занять для магістрів з дисциплін «Будівельна механіка» та «Залізобетонні конструкції», а також в проектну практику ТОВ «ППП «ГППРОПРОМ» (м. Запоріжжя).

Особистий внесок здобувача:

Здобувач виконав експериментальні дослідження конструкцій залізобетонних перехресно-балкових систем. Основні результати дисертаційної роботи розроблено особисто автором. В дослідженнях, виконаних та опублікованих у співавторстві із науковим керівником Ковровим А.В., а також із Квашею В.Г., Отрошем Ю.А., Сур'яніновим М.Г., Яременко О.Ф., особистий вклад здобувача полягає в постановці задач, науковому обґрунтуванні та безпосередній участі в їх реалізації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на 3-й Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса, 2016 р.; на 4-й Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса, 2017 р.; на 5-й Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса, 2018 р.; на Міжнародній конференції з новітніх досліджень в матеріалах та інженерії, Вішакхапатнам, Індія, 2018 р., на 6-му Міжнародному конгресі з технології – Інженерії та Науки, Куала-Лумпур, Малайзія, 2018 р.; на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури у 2010...2018 рр.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 16 наукових роботах, серед них: 7 статей в журналах з переліку спеціальних фахових видань України, 6 статей у періодичних виданнях інших держав, з яких 2 статті у виданнях, що індексуються Scopus, 1 стаття у виданні, що індексується Web of Science.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг дисертації – 206 стор., з них 114 стор. основного тексту, 46 стор. додатків. Дисертація включає 64 рисунки, 5 таблиць та список використаних джерел, що складається із 192 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведене обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовані мета і завдання досліджень, наукова новизна та практичне значення роботи, представлена її загальна характеристика і зв'язок з науковими планами та програмами.

У **першому розділі** виконано огляд та критичний аналіз доступних автору досліджень перехресно-балкових систем та методів їх розрахунку.

Розвиток загальних класичних методів будівельної механіки відображено у роботах І.М. Рабиновича, А.А. Уманського, А.А. Гвоздева, Н.К. Снітко, Б.Н. Кутукова, А.Ф. Смірнова, та ін. Створенню та розвитку методів розрахунку перехресно-балкових систем присвячено роботи І.Г. Бубнова, П.Ф. Папковича, А.Н. Крилова, Н.В. Маттес, А. Ломео, В.А. Постнова, Д.М. Ростовцева, А.І. Сегалія, С.В. Сімеонова, С.П. Тимошенко та ін. У роботах

А.В. Коврова, Л.В. Коломійця, В.Ф. Оробея, М.Г. Сур'янінова було започатковано та розвинено чисельно-аналітичний метод граничних елементів.

Відповідно до цих робіт, основне рівняння чисельно-аналітичного методу чисельних елементів у матричній формі має вигляд:

$$\vec{Y}(l_i) = \bar{A}(l_i)\vec{X}(0) + \vec{B}(l_i) \quad (1)$$

де $\vec{Y}(l_i)$ – матриця зусиль та переміщень в кінці елементів; $\vec{X}(0)$ – матриця зусиль та переміщень в початку елементів; $\bar{A}(l_i)$ – матриця коефіцієнтів системи рівнянь напружено-деформованого стану елементів; $\vec{B}(l_i)$ – матриця зовнішнього навантаження; l_i – довжина i -го елемента.

Після низки перетворень, це рівняння набуває виду:

$$\begin{aligned} \vec{Y}(l_i) = \bar{A}(l_i)\vec{X}(0) + \vec{B}(l_i) &\rightarrow \bar{A}(l_i)\vec{X}(0) - \vec{Y}(l_i) = \\ &= -\vec{B}(l_i) \rightarrow \bar{A}^* \vec{X}^* = -\vec{B}(l_i) \end{aligned} \quad (2)$$

Визначенням крутильної жорсткості залізобетонних елементів займалися П. Андерсен, Г. Коуен, В.Н. Байков, О.К. Бахоєв, В.І. Попов та ін. Розробка та вдосконалення методів розрахунку нерозрізних залізобетонних стержневих конструкцій з врахуванням тріщиноутворення відображені в роботах Т.Н. Азізова, Н.І. Карпенко, Е.Г. Єлагіна, Е. Мерша, Е. Рауша, Н.Н. Лессіг А.А. Гвоздєва, П.І. Бурлаченко, І.М. Ляліна, Ю.В. Чиненкова, Т.П. Чистова, А.В. Коврова, та багатьох інших. Серед закордонних вчених в області розрахунку перехресно-балкових систем, а також методів розрахунку залізобетонних стержневих елементів, що працюють із тріщиноутворенням або із крученням, важливий внесок в розвиток питання внесли: О. Becker, С.З. Bywalski, Р.І. Chang, W.D. Pilkey, М.Р. Collins, Р.Е. Walsh, F.E. Archer, A.S. Hall, Н.І. Cowan, S. Armstrong, G.C. Ernst, Н. Gesund, L.A. Boston та ін.

Одним із найбільш досконалих методів, що дозволяють розраховувати перехресно-балкові системи, є чисельно-аналітичний метод розрахунку стержневих систем та кесонних перекриттів Т.Н. Азізова, який дозволяє точніше визначати зусилля в балках перехресно-балкових систем. Однак метод не позбавлений недоліків.

Врахувати кручення перехресно-балкової системи дозволяє інший фундаментальний метод будівельної механіки – метод переміщень. При формуванні загальної системи рівнянь від початку враховано шарнірне спирання поздовжніх і поперечних балок. Для розрахунку нерозрізних прогонових будов спочатку формується глобальна матриця жорсткості для однопрогової системи сумарної довжини. Потім в тих вузлах поперечних балок, де розміщені проміжні опори, переміщення вузлів прирівнюються до нуля. Це досягається шляхом перетворення загальної системи рівнянь за методикою, прийнятою в методі скінчених елементів.

На основі виконаного огляду робіт за темою дисертації виявлено ряд методик розрахунку ортогональних перехресно-балкових систем. Методи,

запропоновані С.В. Симеоновим, П.Ф. Папковичем та А.І. Сегалем, є громіздкими та незручними для практичного застосування. Чисельно-аналітичний метод стержневої апроксимації, запропонований Т.Н. Азізовим, дозволяє розраховувати перекриття та перехресно-балкові системи, однак в числі його недоліків слід відмітити складність виконання розрахунків за наявності отворів в конструкції, відмінності граничних умов спирання балок від прийнятих в його методиці.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено застосуванню чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку перехресно-балкових систем.

Нумерацію вузлів перехресно-балкових систем приймаємо від початку глобальної системи координат, при цьому в першу чергу нумеруються вузли в напрямку осі OY , потім в напрямку осі OX . Нумерація елементів виконується в тому ж порядку. Спочатку від початку глобальної системи координат нумеруються стержні, паралельні осі OY , потім – паралельні осі OX . Порядок нумерації вузлів та елементів наведено на рис. 1.

Кожному елементу назначається локальна лівогвинтова система координат з початком у вузлі з меншим порядковим номером, вісь OX локальної системи координат елемента при цьому спрямована вздовж елемента.

Напрямки осей локальних систем координат елементів наведено на рис. 2.

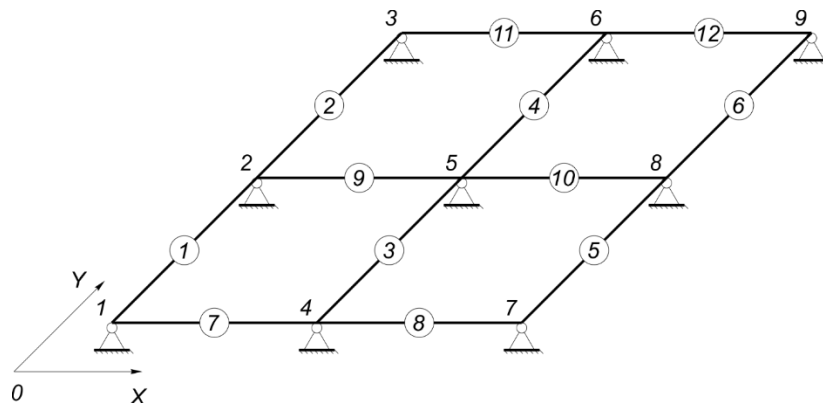


Рис. 1. Порядок нумерації вузлів та елементів

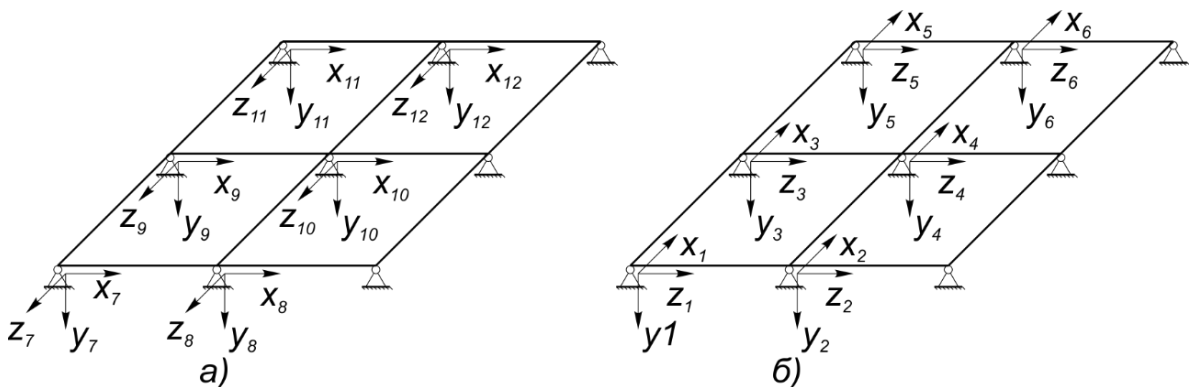


Рис. 2. Напрямки осей локальних систем координат для елементів в напрямку OX (а); елементів в напрямку OY (б)

Формування матриць, що входять в рівняння деформування та граничні умови, накладені на стержні перехресно-балкових систем і їх математичний опис майже не відрізняються від таких, що застосовуються для довільних стержневих систем. Втім, велике значення має порядок формування розв'язуючого рівняння чисельно-аналітичного методу граничних елементів.

Для розрахунку перехресно-балкової системи з використанням чисельно-аналітичного методу граничних елементів, необхідно сформулювати та розв'язати рівняння (1).

Розв'язуюче рівняння формується в наступному порядку:

- записується матриця $\bar{A}(l_i)$, вектори $\vec{X}(0)$, $\vec{Y}(l_i)$ та $\vec{B}(l_i)$;
- розглядаються граничні елементи вектору початкових параметрів $\vec{X}(0)$, беручи до уваги умови закріплення, сумісність деформацій та переміщень, а також рівняння рівноваги. Якщо елемент вектору переміщень дорівнює нулю, обнуляємо стовпчик матриці $\bar{A}(l_i)$, номер якого дорівнює порядковому номеру елементу в векторі початкових параметрів. Якщо деякий елемент дорівнює іншому елементу вектору початкових параметрів, прирівнюємо елемент з більшим номером до нуля та обнуляємо стовпчик матриці $\bar{A}(l_i)$, номер якого дорівнює порядковому номеру обнуленого елементу в векторі початкових параметрів. Таким чином, зменшується кількість невідомих параметрів у векторі початкових параметрів.
- розглядаються граничні елементи у векторі кінцевих параметрів $\vec{Y}(l_i)$. Записуємо рівняння рівноваги, сумісності переміщень, а також умови закріплення. При розгляді елементів в порядку зростання порядкового номеру, якщо елемент з меншим номером дорівнює елементу з більшим номером, то елемент з більшим номером вважається невідомим.
- переносяться невідомі вектору кінцевих параметрів $\vec{Y}(l_i)$ на нульові місця вектору початкових параметрів $\vec{X}(0)$. При цьому в матрицю коефіцієнтів $\bar{A}(l_i)$ вносяться компенсуючі елементи, що дорівнюють «-1» в комірку, яка знаходиться на перетині рядка з номером невідомого у векторі кінцевих параметрів $\vec{Y}(l_i)$ та стовпчика з номером того ж невідомого вже у векторі початкових параметрів $\vec{X}(0)$. Після такого переносу вектор початкових параметрів $\vec{X}(0)$ перетворюється на вектор невідомих $\vec{X}^*$.
- виходячи із записаних раніше рівнянь рівноваги, вносимо в матрицю коефіцієнтів $\bar{A}(l_i)$ компенсуючі елементи, що дорівнюють коефіцієнтам при доданках в рівнянні, взятих з протилежним знаком на місце перетину рядка з номером елемента в векторі кінцевих параметрів $\vec{Y}(l_i)$ та стовпчиків, що відповідають номерам доданків у векторі невідомих $\vec{X}^*$.
- виходячи із записаних раніше рівнянь сумісності деформацій, вносимо до матриці коефіцієнтів $\bar{A}(l_i)$ компенсуючі елементи, що дорівнюють коефіцієнтам при доданках у рівнянні, взятим з протилежним знаком, на місце перетину рядка з номером елементу у векторі кінцевих параметрів

$\vec{Y}(l_i)$ та стовпчиків, що відповідають номерам доданків у векторі невідомих $\vec{X}^*$. Слід зазначити, що при рівності кутів повороту та закручування, а також лінійних переміщень, в рівняння відповідні параметри входять з жорсткостями. Тому компенсуючі елементи для таких параметрів слід домножувати на співвідношення:

$$N_{ij} = \frac{E_i I_i}{E_j I_j}; R_{ij} = \frac{G_i I_{kpi}}{G_j I_{kpi}}; S_{ij} = \frac{G_i I_{kpi}}{E_j I_j}; T_{ij} = \frac{E_i I_i}{G_j I_{kpi}}, \quad (3)$$

де i – номер граничного елементу, для граничних параметрів якого складаються рівняння сумісності переміщень; j – номер елементу, з граничними параметрами якого зв'язуються граничні параметри поточного елементу.

Таким чином, запропоновано універсальний алгоритм прямого формування вказаних компонентів для плоских ортогональних стержневих систем. Перевагами методу є простота його алгоритмізації при програмуванні, легкість його розвитку для просторових та/або неортогональних систем, універсальність, можливість врахування зміни жорсткості та утворення тріщин.

Серед недоліків способу слід відмітити наявність вимог з нумерації вузлів та елементів, що входять до складу розрахункової схеми та неможливість розширення способу для розрахунку пластин та об'ємних тіл.

У другому розділі запропонований універсальний алгоритм прямого формування компонентів розв'язуючого рівняння чисельно-аналітичного методу граничних елементів для плоских ортогональних стержневих систем, перевагами якого є простота алгоритмізації при програмуванні, легкість розвитку для просторових та/або неортогональних систем, універсальність, можливість врахування зміни жорсткості та утворення тріщин.

У **третьому розділі** описано експериментальні дослідження роботи залізобетонних перехресно-балкових систем.

Експериментальні перехресно-балкові системи запроектовані з врахуванням вимог діючих нормативних документів. Бетонна суміш, що застосовувалась при виготовленні зразків, готувалась із співвідношенням компонентів Ц:П:Щ = 1:1,78:2,631 при В/Ц = 0,41. Експериментальні моделі виготовлялись в попередньо змащній емульсолом розбірній опалубці. Перехресно-балкові моделі виготовлялись в одній опалубці послідовно. Ущільнення бетонної суміші при укладанні виконувалось за допомогою глибинного вібратора. Формовка конструкції виконувалась в приміщеннях лабораторії кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури. Загальний вид моделі перехресно-балкової системи, підготовленої до випробувань, показаний на рис. 3.

Для реалізації програми експериментальних досліджень були запроектовані та виготовлені залізобетонні експериментальні конструкції.

Експериментальні конструкції являють собою залізобетонні перехресно-балкові системи, що складаються із чотирьох попарно взаємно перпендикулярних балок, розміщених на відстані 500 мм від краю конструкції.

Балки прямокутного перерізу з розмірами $b \times h = 60 \times 120$ мм та довжиною 2000 мм кожна. Армовані експериментальні конструкції поздовжньою арматурою класу А400С діаметром 8 мм в нижній зоні (два стержні в кожній балці). Приопорні зони армуються додатково двома стержнями арматури класу А400С діаметром 8 мм довжиною 470 мм у верхній зоні з перев'язкою з нижньою арматурою хомутами з проволоки в'язальної Вр-І, діаметром 3 мм. Товщина захисного шару складає 15 мм. Тіло експериментальної конструкції виконано з бетону класу С20/25.



Рис. 3. Загальний вид перехресно-балкової системи, підготованої до випробувань

Геометричні характеристики експериментальної конструкції показано на рис. 4.

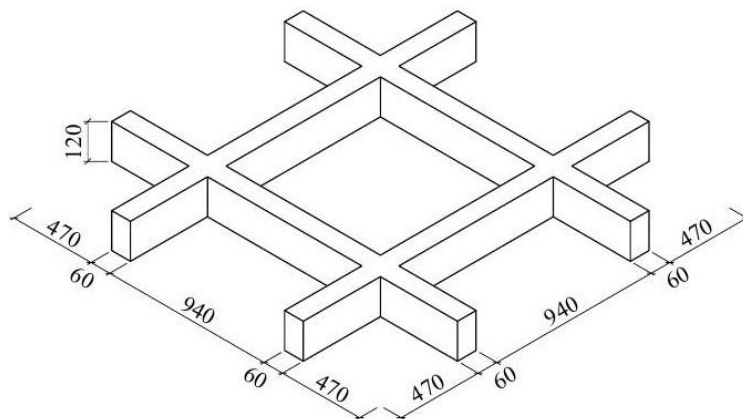


Рис. 4. Геометричні характеристики експериментальної конструкції

Для проведення експериментальних досліджень перехресно-балкових систем було запроектовано та зібрано стенд для випробувань.

Стенд для випробувань залізобетонних перехресно-балкових систем на дію статичного навантаження (рис. 5) зібраний у випробувальній лабораторії кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури. Для цього на висоті 1,6 м над рівнем підлоги була закріплена

прямокутна металева рама 1, зварена із швелерів №20У. Розміри рами в плані складали 2 х 2 м, що дозволяє сперти на неї перехресно-балкову систему 2 на величину 60 мм (ширину полиці). Схема випробування конструкції відповідала роботі перехресно-балкової системи з шарнірним закріпленням. На перехрестя балок були встановлені прокладочні металеві пластинки 3, на котрі встановлювали два швелери 4 №10У, посилені ребрами жорсткості. Навантаження на зразок створювали за допомогою гідравлічного домкрату на 100 кН 6, який упирали через швелер в плити перекриття, а іншим кінцем – в двотавр 5, який передавав навантаження через швелери та прокладочні пластинки безпосередньо на конструкцію 2.

Для визначення вертикальних переміщень досліджуваної конструкції, використовувались три прогиноміри 6ПАО та один індикатор годинникового типу ІЧ-10 з ціною поділки 0,01 мм. Вертикальні переміщення конструкції передавались безпосередньо на шток індикатора годинникового типу.

Також із внутрішньої сторони конструкції встановлювались індикатори годинникового типу ІЧ-10 в розтягнутій та стиснутій зонах бетону для визначення деформацій конструкції.

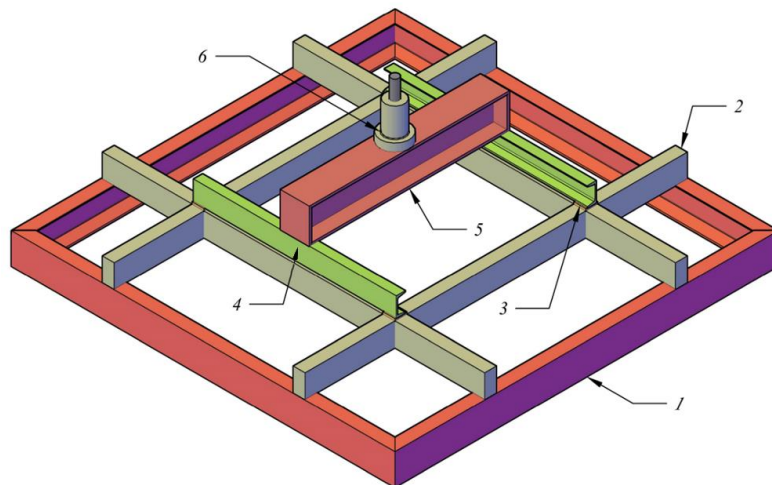


Рис. 5. Стенд для випробувань перехресно-балкових систем:

1. Опорна рама. 2. Експериментальна конструкція. 3. Стальні навантажувальні пластинки. 4. Розподільні швелери. 5. Розподільний двотавр. 6. Домкрат

Було випробувано три серії перехресно-балкових систем. Перша серія перехресно-балкової системи випробовувалась в три етапи – спершу моделювалось зосереджене навантаження, прикладене у вузлі системи. Максимальне навантаження склало 2,445 кН. Після розвантаження, на другому етапі випробувань перехресно-балкової системи моделювалось рівномірно розподілене навантаження вздовж всіх балок, що її складають. Максимальне навантаження, прикладене до перехресно-балкової системи, склало 6,534 кН. На третьому етапі навантаження виконувалось за допомогою стенду, описаного вище. Перехресно-балкову систему було доведено до руйнування. Руйнуюче навантаження склало 61,5 кН.

При випробуванні другої серії перехресно-балкових систем навантаження

прикладалось східчасто з кроком 2,5 кН. Руйнуюче навантаження склало 41,5 кН.

При випробуванні третьої серії перехресно-балкових систем було відмічене руйнування за нормальними перерізами в середині кожної із складових балок при навантаженні в 75,5 кН.

За даними, отриманими протягом проведення експериментальних досліджень залізобетонних перехресно-балкових систем, були побудовані графіки залежності прогинів від навантажень, прикладених до перехресно-балкових систем відповідних серій (рис. 6...8).

Проведення випробувань супроводжувалось фотофіксацією поверхні досліджуваних перехресно-балкових систем з метою визначення процесу їх тріщиноутворення.

На першому та другому етапах випробувань I серії перехресно-балкових систем процесу тріщиноутворення зафіксовано не було. В процесі навантаження дослідних конструкцій не було виявлено утворення, розвитку та розкриття тріщин. На третьому етапі випробувань I серії перехресно-балкових систем при статичному навантаженні перші тріщини в прогоновій частині почали утворюватись при навантаженні в 35 кН, що складає 0,6 від руйнуючого. Утворилися 11 тріщин на бічній грані, нормальних по відношенню до нижньої грані конструкції. Ширина розкриття тріщин при цьому склала 0,1 мм. При подальшому збільшенні навантаження до 39 кН утворилося 3 тріщини на додачу до утворившихся раніше. Ширина розкриття тріщини №5, яка була вибрана з метою контролю ширини розкриття, склала 0,15 мм. При навантаженні 44 кН на досліджуваній конструкції було виявлено 18 тріщин, при цьому ширина розкриття тріщини №5 склала 0,2 мм. Після досягнення навантаження в 48 кН, що складає 0,78 від руйнуючого, було зафіксовано утворення 23 тріщин. Максимальна ширина розкриття тріщини склала 0,2 мм.

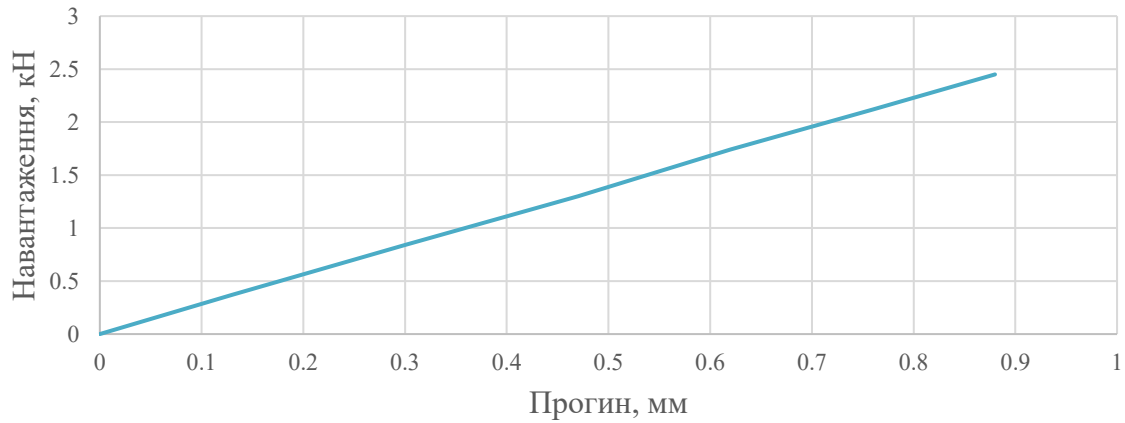
Фотографії тріщин у I серії перехресно-балкових систем наведено на рис. 9. Фотофіксація тріщиноутворення на інших експериментальних конструкціях наведена у дисертації.

Додатково було досліджено роботу перехресно-балкових систем при дії асиметричного навантаження та виконано порівняння отриманих результатів із результатами, отриманими за допомогою авторського методу та за допомогою ПК ANSYS R17.1.

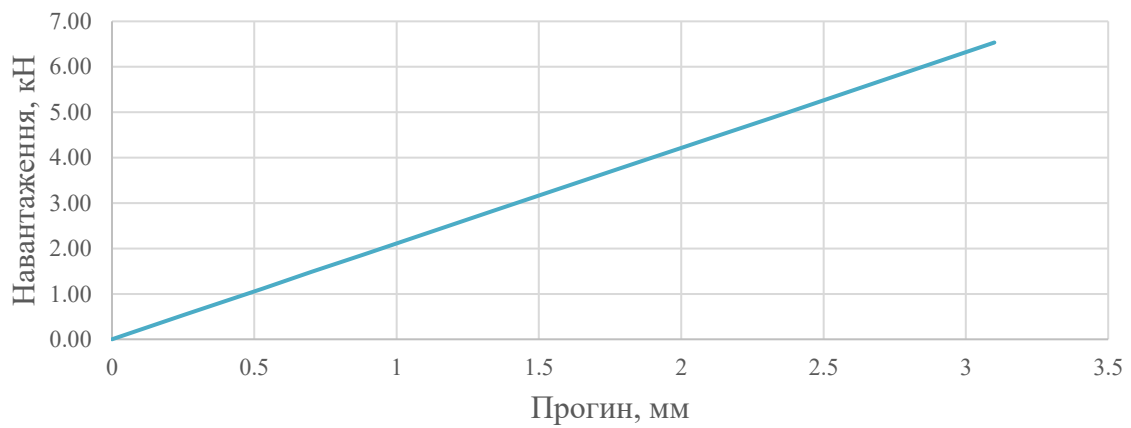
У **четвертому розділі** виконано моделювання напружено-деформованого стану перехресно-балкових систем за допомогою чисельно-аналітичного методу граничних елементів та у ПК ANSYS R17.1, що базується на методі скінчених елементів.

На основі методики застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку перехресно-балкових систем, запропонованої у другому розділі, було розроблено алгоритм та реалізовано його шляхом створення програми CrossBeam в системі комп'ютерної математики MATLAB. Програма дозволяє розраховувати перехресно-балкові системи ортогональної конфігурації як з регулярною, так і з нерегулярною структурою. Спочатку задаються пружні характеристики матеріалу. Існує також можливість

Прогини I серії перехресно-балкових систем на 1 етапі
випробувань



Прогини I серії перехресно-балкових систем на 2 етапі
випробувань



Прогини I серії перехресно-балкових систем на 3 етапі
випробувань

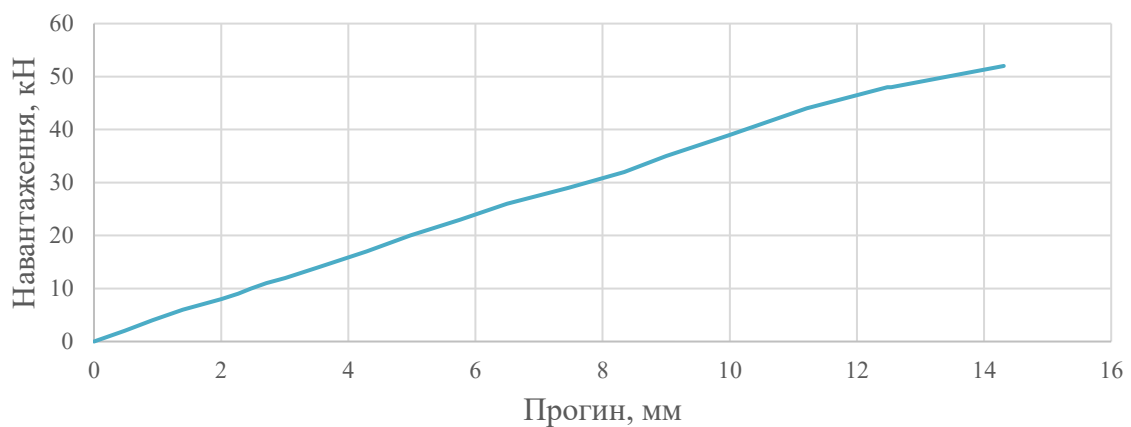


Рис. 6. Графіки залежності прогинів від навантаження для I серії перехресно-балкових систем

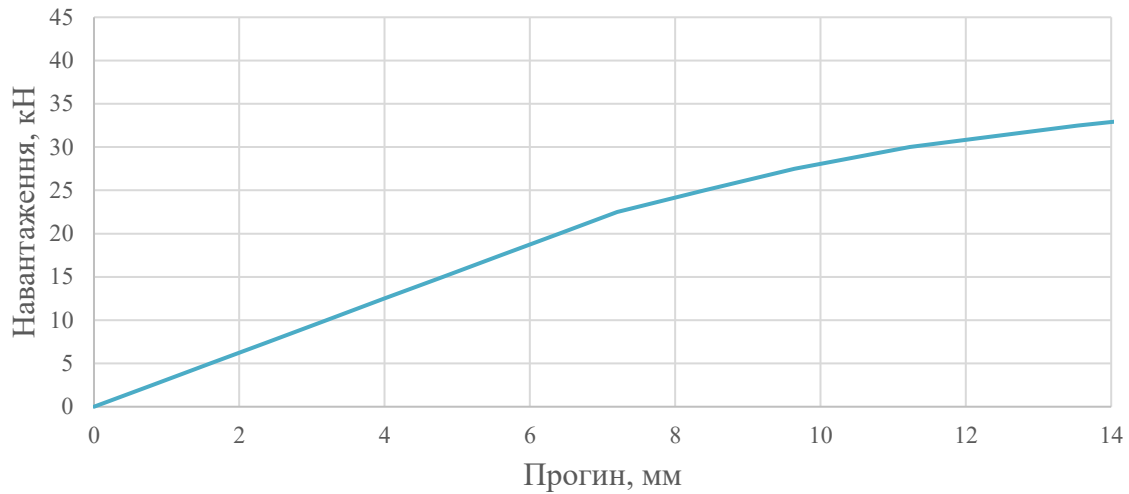


Рис. 7. Графік залежності прогинів від навантаження для II серії перехресно-балкових систем

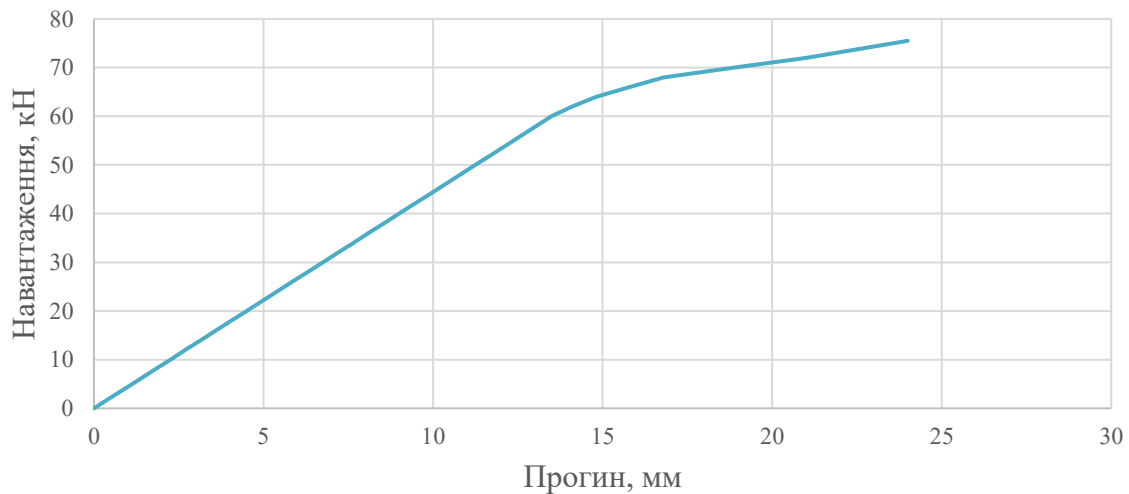


Рис. 8. Графік залежності прогинів від навантаження для III серії перехресно-балкових систем

коригувати характеристики матеріалів.

Розроблено інтерфейс програми, який дозволяє вводити дані в інтерактивному режимі. Деякі вікна програми наведено на рис. 10. У програмі реалізовано врахування процесів тріщиноутворення. Алгоритм програми дозволяє використовувати будь-які моделі тріщиноутворення шляхом коригування блоку, що відповідає за тріщиноутворення без редагування програми взагалі.

В стадії деформування без тріщин жорсткість визначають за формулою:

$$B = E_{b1} I_{red}, \quad (4)$$

де E_{b1} – модуль деформації бетону; I_{red} – момент інерції наведеного перерізу елементу.

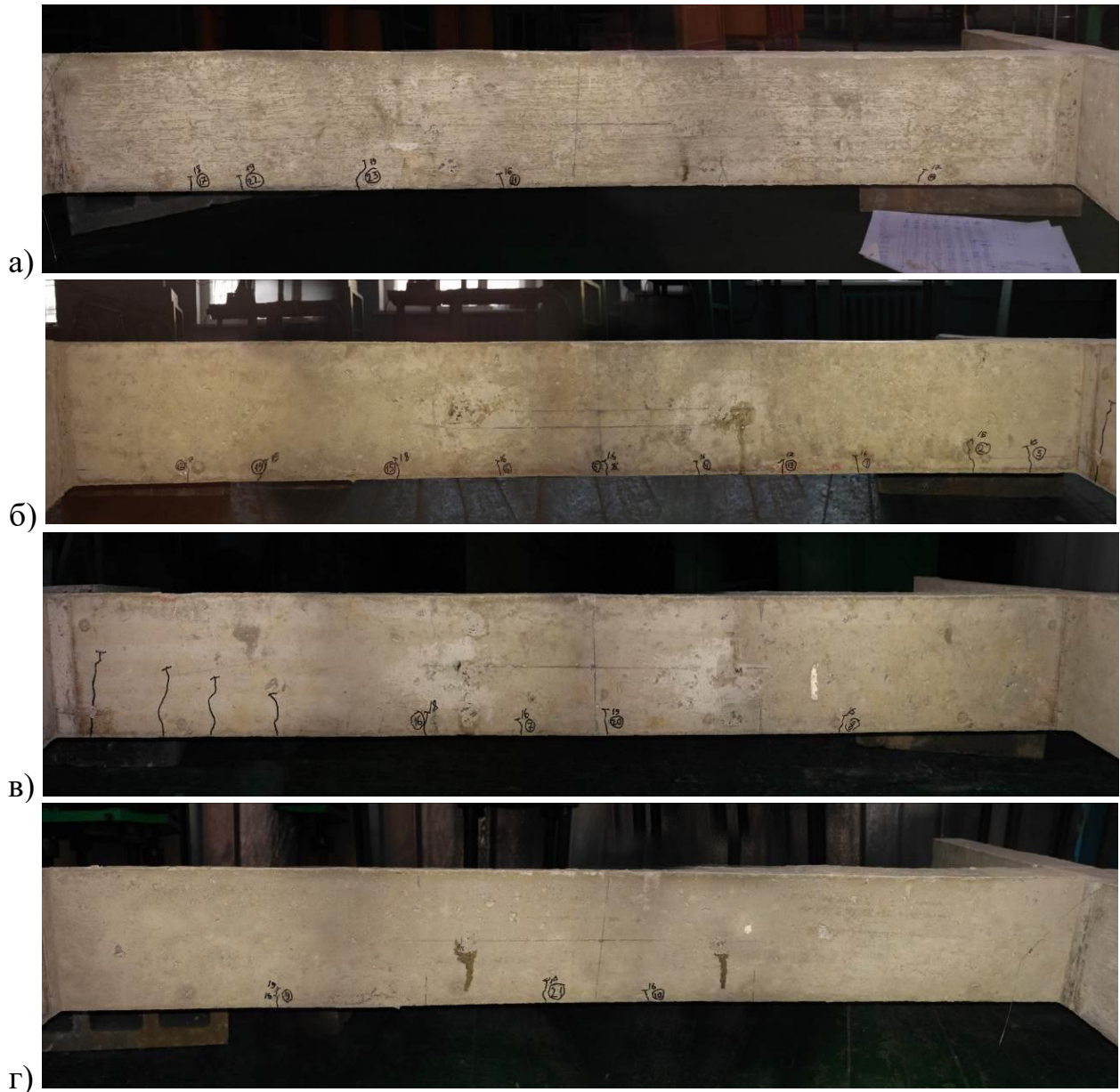


Рис. 9. Тріщиноутворення перехресно-балкової конструкції I серії
а) балка по осі 2; б) балка по осі B; в) балка по осі 3; г) балка по осі B

При короткочасній дії навантаження згинальна жорсткість в стадії роботи з нормальними тріщинами (при $M > M_{crc}$) пропонується визначати за формулою:

$$B_g = E_b A_b h_0^2 \sqrt{\mu n_1} K, \quad (5)$$

де A_b – площа поперечного перерізу балки;

h_0 – розрахункова висота перерізу

$\mu = A_s / A_b$ – коефіцієнт армування перерізу;

A_s – площа поперечного перерізу арматури;

$n_1 = E_s / E_b$ – відношення модулів пружності арматури та бетону.

Коефіцієнт K визначається наступним чином:

$$K = b_1 + b_2 \left(\frac{M_{crc}}{M} \right)^2. \quad (6)$$

Для елемента, що має прямокутний поперечний переріз, приймаються наступні значення коефіцієнтів $b_1 = 0,159$, $b_2 = 0,074$.

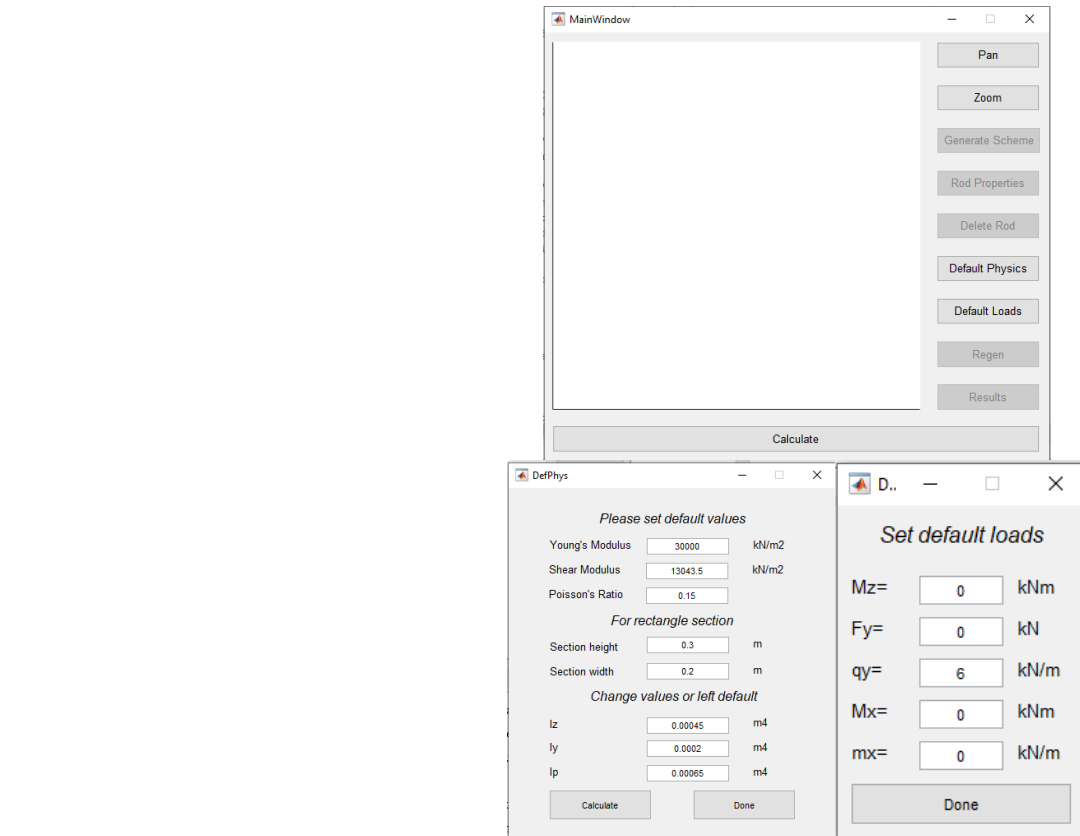


Рис. 10. Робочі вікна програми *CrossBeam*

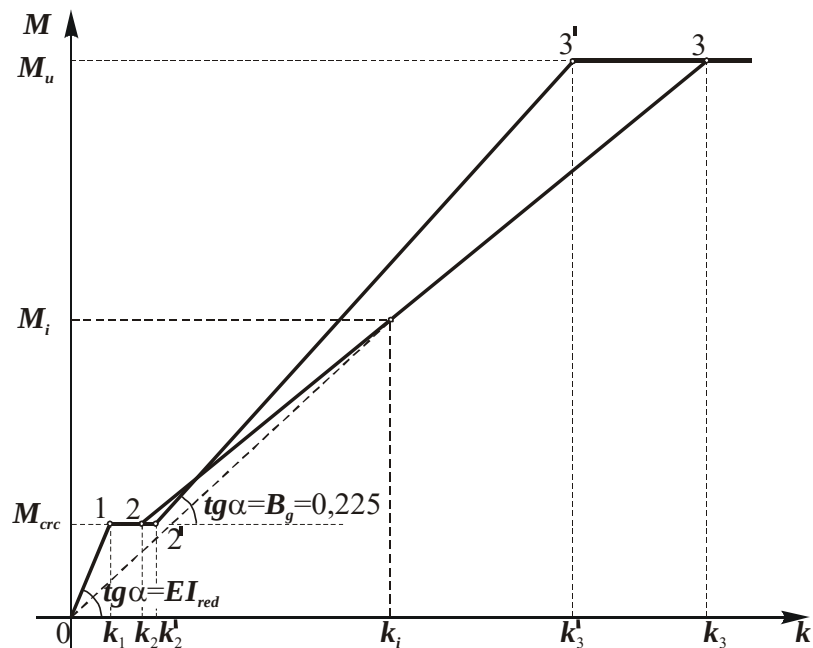


Рис. 11. Діаграма деформування згинального залізобетонного елемента

На рис. 11 представлена діаграма деформування згинальних залізобетонних елементів «згинальний момент-кривизна», побудована виходячи з наведених пропозицій.

На діаграмі прямолінійна ділянка 0 - 1 відповідає пружній роботі перерізу. При цьому жорсткість перерізу B постійна та визначається за формулою (4). Ділянка 1 - 2 відповідає інтенсивному тріщиноутворенню, при якому без збільшення згинальних моментів збільшується кривизна. На ділянці 2 - 3 ($k_2 < k_i < k_3$) елемент працює з тріщинами. Остання ділянка діаграми, при значенні згинальних моментів, що дорівнюють граничним M_u , відповідає утворенню в перерізі пластичного шарніру.

В роботі зроблено припущення, що взаємне переміщення берегів тріщини є чіткою функцією від висоти стиснутої від згину частини перерізу відносно повної висоти перерізу та відстані між тріщинами відносно повної висоти перерізу.

$$\Delta_{Mt} = f\left(\frac{x_{crc}}{h}, \frac{l_{crc}}{h}\right) \quad (7)$$

Зазначимо, що вираз (7) можна використовувати з розумінням того факту, що при одних і тих же значеннях x_{crc}/h та l_{crc}/h , величина взаємного зміщення берегів нормальної тріщини буде різною для різних розмірів балок.

Запропонована методика має своєю перевагою той факт, що формули, за якими визначається зміщення берегів тріщин один відносно досить легко отримати, тобто ці формули можна легко застосовувати у інженерних розрахунках.

Для виконання порівняння експериментальних досліджень та результатів розрахунків за методикою, запропонованою у роботі, було виконано моделювання у ПК ANSYS R17.1 із застосуванням об'ємних елементів, оскільки застосування стержневих скінчених елементів не дозволяє врахувати зміну жорсткості елемента при тріщиноутворенні.

Геометричну модель перехресно-балкової системи та сітку скінчених елементів наведено на рис. 12...13.

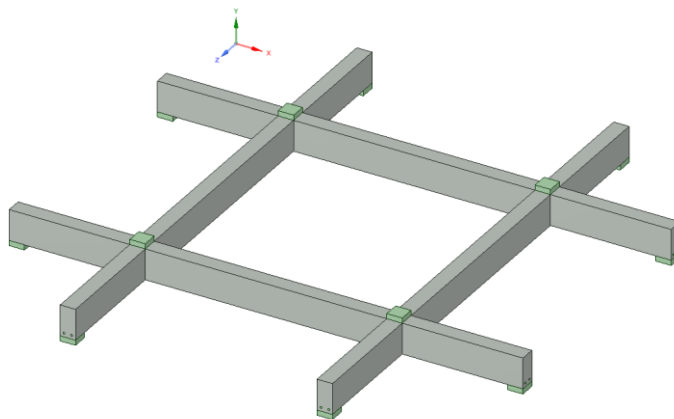


Рис. 12. Геометрична модель перехресно-балкової системи

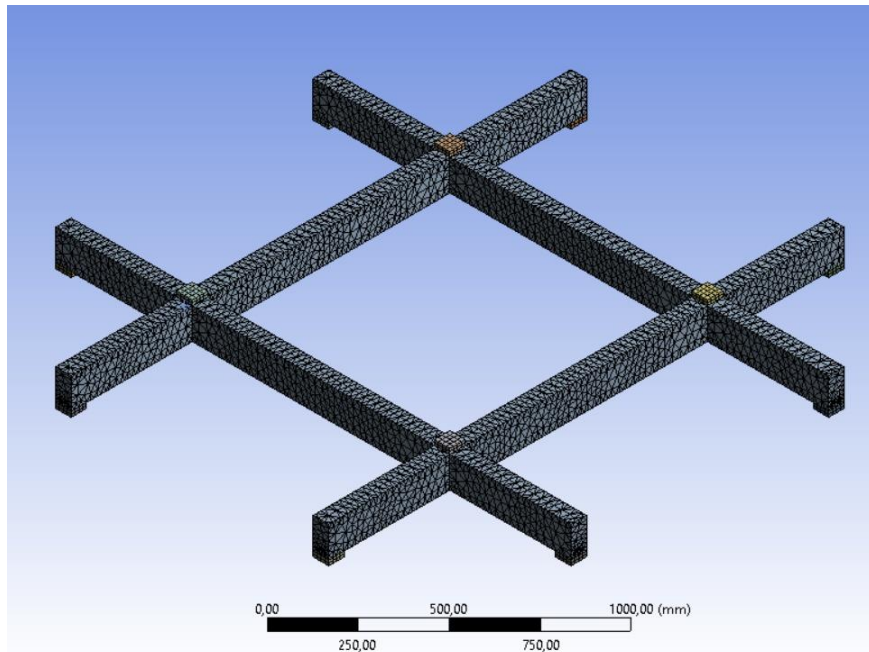


Рис. 13. Сітка скінчених елементів

Напруження та прогини, визначені в ході проведення комплексних досліджень перехресно-балкової системи І серії, показаної на рис. 4, зведені в табл. 1. Відповідні значення для ІІІ серії наведені в табл. 2.

Аналіз табл. 1 та 2 показує, що різниця між результатами розрахунків ЧА МГЕ та ANSYS R17.1 для залізобетонної перехресно-балкової системи складає до 9%. Різниця в результатах, отриманих з використанням ANSYS R17.1, та експериментальними даними складає до 17%. Розбіжність в результатах, отриманих за запропонованою розрахунковою моделлю та експериментальними даними складає до 7%.

Таблиця 1

Зведена таблиця напружень і прогинів, І серія перехресно-балкових систем

№№ точок	Експеримент	ЧА МГЕ		ANSYS R17.1	
	Прогини, мм	Напруження, МПа	Прогини, мм	Напруження, МПа	Прогини, мм
1	8,357	16,699	7,736	15,277	7,024
2	8,217	16,699	7,736	15,277	7,024
3	8,287	16,699	7,736	15,277	7,024
4	8,147	16,699	7,736	15,277	7,024
5	2,386	22,021	2,259	20,195	7,027
6	2,406	22,021	2,259	20,195	7,027

Зведена таблиця напружень та прогинів,
III серія перехресно-балкових систем

№№ точок	Експеримент	ЧА МГЕ		ANSYS R17.1	
	Прогини, мм	Напруження, МПа	Прогини, мм	Напруження, МПа	Прогини, мм
1	5,219	15,916	4,832	13,875	7,023
2	5,308	15,916	4,832	13,875	7,023
3	5,175	15,916	4,832	13,875	7,023
4	5,219	15,916	4,832	13,875	7,023
5	1,457	20,992	1,367	18,751	7,027
6	1,507	20,992	1,367	18,751	7,027

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Було розв'язано важливу науково-технічну задачу з удосконалення розрахунку залізобетонних перехресно-балкових систем за допомогою чисельно-аналітичного методу граничних елементів з врахуванням тріщиноутворення.

1. Запропонована методика застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку перехресно-балкових систем, що легко піддається алгоритмізації, може бути адаптованою для розрахунку просторових та неортогональних систем, дозволяє використовувати будь-які моделі деформування та тріщиноутворення у залізобетонних стержневих елементах.

2. Створена розрахункова модель деформування залізобетонних перехресно-балкових систем з врахуванням тріщиноутворення на основі чисельно-аналітичного методу граничних елементів, яка дозволяє одночасно спростити розрахунок перехресно-балкових систем та підвищити його точність.

3. Вдосконалені пропозиції з врахування процесів тріщиноутворення під час розрахунку залізобетонних елементів, що зазнають згину з крученням. При цьому розроблена методика врахування згинальної та крутильної жорсткостей. Запропонована методика включає отримання інженерних формул, які з високою точністю відображають реальне переміщення в тріщині. Використання запропонованих залежностей не потребує визначення центру кручення, оскільки визначається безпосередньо переміщення в тріщині..

4. Проведені серії експериментальних досліджень конструкцій залізобетонних перехресно-балкових систем при дії симетричного та асиметричного навантажень з метою апробації запропонованої методики розрахунку перехресно-балкових систем. Досліджено картину

тріщиноутворення та встановлено, що утворення тріщин в розглянутих конструкціях починалося з навантаження величиною 0,6 від руйнуючого.

5. Розроблена комп'ютерна програма, що реалізує запропоновану розрахункову модель деформування залізобетонних перехресно-балкових систем, дозволяє розраховувати залізобетонні перехресно-балкові системи довільної конфігурації з врахуванням запропонованої моделі деформування залізобетонних елементів та тріщиноутворення у них.

6. Різниця між результатами розрахунків за запропонованою методикою та ANSYS R17.1 для залізобетонної перехресно-балкової системи складає до 9%. Відмінність в результатах, отриманих з використанням ANSYS R17.1, та експериментальними даними, складає до 17%. Розбіжності в результатах, отриманих за запропонованою розрахунковою моделлю, та експериментальними даними складає до 7%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Яременко О.Ф. Розрахунок нерозрізних залізобетонних балок із застосуванням повних діаграм деформацій матеріалів / О.Ф. Яременко, А.Я. Будзул, О.С. Шиляєв. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – №39. – С. 366–372. (*Внесок здобувача: виконано розрахунок нерозрізних балок за методикою, розробленою співавторами*).

2. Яременко О.Ф. Сучасний стан в сфері розширення та посилення мостових прогонових конструкцій накладною ребристою плитою / О.Ф. Яременко, В.Г. Кваша, О.С. Шиляєв. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2012. – №46. – С. 394–398. (*Внесок здобувача: виконано аналіз літературних джерел стосовно посилення мостових прогонових конструкцій*).

3. Шиляєв А.С. Програмная реализация алгоритмов численно-аналитического метода граничных элементов / А.С. Шиляєв. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – №92. – С. 11–17.

4. Ковров А.В. Идентификация систем с перекрестными связями с использованием теории графов / А.В. Ковров, А.М. Чучмай, А.С. Шиляєв. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – №60. – С. 435–439. (*Внесок здобувача: виконано аналіз впливу порядку нумерації вузлів та елементів перехресно-балкових систем на формування системи рівнянь*).

5. Сур'янінов М.Г. Згин і кручення систем з перехресними зв'язками / М.Г. Сур'янінов, О.М. Чучмай, О.С. Шиляєв. // Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ", Луцьк. – 2017. – №58. – С. 295–300. (*Внесок здобувача: виконано аналіз побудову вихідного диференційного рівняння та його подальше спрощення методом Канторовича-Власова*).

6. Сур'янінов М.Г. Чисельна реалізація розв'язку завдання про вигин і крутіння систем з перехресними зв'язками / М.Г. Сур'янінов, О.М. Чучмай,

О.С. Шиляев. // Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ", Луцьк. – 2017. – №59. – С. 257–262. *(Внесок здобувача: розроблено програму, що реалізує запропонований метод розрахунку, виконано розрахунки).*

7. Корнеева И.Б. Компьютерные исследования напряженно-деформированного состояния плиты перекрытия из сталефибробетона / И.Б. Корнеева, Н.Г. Сурьянинов, А.С. Шиляев. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – №257. – С. 271–276. *(Внесок здобувача: запропоновано методику врахування наявності фібрового армування під час розрахунку, виконано комп'ютерне моделювання та безпосередньо розрахунки).*

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

8. Surianinov M. Numerical and analytical boundary element method application in ribbed slab analysis / M. Surianinov, O. Chuchmai, O. Shylyiaiev. // Tehnički glasnik. – 2015. – №4. – С. 432–436. *(Внесок здобувача: виконано порівняльний аналіз розрахунку перекресно-балкових систем чисельно-аналітичним методом граничних елементів та методом скінчених елементів). (індексується Web of Science)*

9. Сурьянинов Н.Г. Адаптация алгоритма численно-аналитического метода граничных элементов к расчету перекрестно-балочных систем / Н.Г. Сурьянинов, А.С. Шиляев. // International Academy Journal. Web of Scholar. – 2018. – №7. – С. 9–14. *(Внесок здобувача: виконано спрощення формування основних рівнянь чисельно-аналітичного методу граничних елементів для розрахунку перекресно-балкових систем).*

10. Surianinov M. Investigation of Free Vibrations of Three-Layered Circular Shell Supported by Annular Ribs of Rigidity / M. Surianinov, T. Yemelianova, O. Shylyiaiev. // Materials Science Forum. – 2019. – №968. – С. 437–443. *(Внесок здобувача: розроблено алгоритм застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку тришарових оболонок та виконано розрахунок такої оболонки).*

11. Surianinov M. Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements / M. Surianinov, O. Shylyiaiev. // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – №7 (2.23). – С. 238–241. *(Внесок здобувача: запропоновано підхід до розрахунку плитно-балкової системи та виконано такий розрахунок). (індексується Scopus)*

12. Сурьянинов Н.Г. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование железобетонной балки при пожаре / Н.Г. Сурьянинов, Ю.А. Отрош, А.С. Шиляев. // Natural and Technical Sciences. – 2018. – VI (22), Вып. 186 – С. 76–79. *(Внесок здобувача: запропоновано алгоритм виконання комп'ютерної симуляції напружено-деформованого стану залізобетонної балки при дії пожежі та виконано відповідні розрахунки).*

13. Neutov S. Influence of long-term compressive stresses on strength of concrete and steel-fiber concrete prismatic element / S. Neutov, M. Sydorchuk, O. Shylyiaiev. // MATEC Web of Conferences. – 2018. – №230. – С. 1–6. *(Внесок здобувача: виконано розрахунки бетонних та залізобетонних елементів із застосуванням)*

методу скінчених елементів та чисельно-аналітичного методу граничних елементів). (індексується Scopus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

14. Yemelianova T.A. Free Vibrations Of Three-layered Closed Shell Supported By Longitudinal Stiffness Ribs [Електронний ресурс] / Т.А. Yemelianova, М.Н. Surianinov, O.S. Shyliaiev // 6TH International Congress on Technology - Engineering - Kuala Lumpur3 - Malaysia (2018-07-19). – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://procedia.org/cpi/ICONTES-6-2111403>. *(Внесок здобувача: виконано розрахунки бетонних та залізобетонних елементів із застосуванням методу скінчених елементів та чисельно-аналітичного методу граничних елементів).*

15. Аніскін А. Розрахунок систем перехресних балок з використанням ПК ANSYS / А. Аніскін, О.С. Шиляєв // Тези 5 міжнародної конференції Актуальні проблеми інженерної механіки, Одеса, 22-25 травня 2018. – Одеса: Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2018. – С. 245–247. *(Внесок здобувача: вдосконалено методику розрахунку перехресно-балкових систем із застосуванням ПК ANSYS).*

16. Сорока Н.Н. К расчету перекрестно-балочных систем / Н.Н. Сорока, И.А. Твардовский, А.С. Шиляев / Тези доповідей 74-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу академії 17-18 травня 2018. – Одеса: Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2018. – С. 36. *(Внесок здобувача: розглянуто застосування алгоритму методу граничних елементів до розрахунку перехресно-балкових систем. Виконано побудову всіх матриць розглянутого методу, в тому числі матриці фундаментальних функцій).*

АНОТАЦІЯ

Шиляєв О.С. Напружено-деформований стан залізобетонних перехресно-балкових систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2020.

Дисертаційна робота присвячена визначенню напружено-деформованого стану залізобетонних перехресно-балкових систем теоретичними чисельно-аналітичним методом граничних елементів та методом скінчених елементів, та експериментальними методами. Створена інженерна розрахункова модель деформування залізобетонних перехресно-балкових систем з врахуванням тріщиноутворення на основі чисельно-аналітичного методу граничних елементів. Запропонована методика застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку перехресно-балкових систем. Вдосконалені пропозиції з врахування процесів тріщиноутворення під час розрахунку залізобетонних елементів, що зазнають згину з крученням.

Ключові слова: перехресно-балкові системи, чисельно-аналітичний метод граничних елементів, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан, ANSYS, MATLAB, тріщиноутворення, кручення, експериментальні дослідження.

АННОТАЦИЯ

Шиляев А.С. Напряженно-деформированное состояние железобетонных перекрестно-балочных систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Одесса, 2020.

Диссертационная работа посвящена определению напряженно-деформированного состояния железобетонных перекрестно-балочных систем теоретическими численно-аналитическим методом граничных элементов и методом конечных элементов, а также экспериментальными методами. Создана инженерная расчетная модель деформирования железобетонных перекрестно-балочных систем с учетом трещинообразования на основе численно-аналитического метода граничных элементов. Предложена методика применения численно-аналитического метода граничных элементов к расчету перекрестно-балочных систем. Усовершенствованы предложения по учету процессов трещинообразования в процессе расчета железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением.

Ключевые слова: перекрестно-балочные системы, численно-аналитический метод граничных элементов, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, ANSYS, MATLAB, трещинообразование, кручение, экспериментальные исследования.

ABSTRACT

Shylyayev O.S. Stress-strain state of reinforced concrete cross-beam systems. – Manuscript.

The thesis for the PhD scientific degree (doctor of philosophy) in specialty 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, 2019.

The PhD thesis is devoted to the determination of the stress-strain state of reinforced concrete cross-beam systems by the theoretical numerical-analytical boundary elements method and the finite elements method, as well as by experimental methods.

Study contains an overview and critical analysis of available to the author research and methods of cross-beam systems calculation are performed. The development of methods for calculating cross-beam systems, including classical,

analytical and numerical, works on determining the torsional stiffness of reinforced concrete elements, development and improvement of methods for calculating continuous reinforced concrete rod structures considering cracking was considered.

An engineering design model of the deformation of reinforced concrete cross-beam systems, considering cracking, was created on the basis of the numerical-analytical boundary elements method.

The formation of matrices included in the deformation equations and boundary conditions imposed on the rods of cross-beam systems and their mathematical description are almost indistinguishable from those used for arbitrary rod systems. However, of great importance is the order of formation of the solving equation of the numerical-analytical method of boundary elements.

Thesis work, in contrast to the previously accepted methods of forming the components of the solving equation of the numerical-analytical boundary elements method, which consist in constructing analytical functions for forming general matrices of coefficients and vectors from partial matrices and vectors, a universal algorithm for direct formation of these components for flat orthogonal rod systems is proposed. The advantages of the method are the simplicity of its algorithmization during programming, the ease of its development for spatial and/or non-orthogonal systems, versatility, the ability to consider changes in stiffness and the formation of cracks.

The paper presents the results of experimental studies of reinforced concrete cross-beam systems under the action of symmetric and asymmetric loads. A test bench has been designed and manufactured to carry out experimental research. Three series of cross-beam systems were tested. The first series of cross-beam system was tested in three stages – first, the concentrated load applied at the system node was modeled. After unloading, in the second stage of tests of the cross-beam system, a uniformly distributed load was modeled along all the beams that make it up. In the third stage, the loading was performed using the stand described above. The second and third series of cross-beam systems were loaded with a step load in nodes. All series of cross-beam systems were destroyed. According to the results of experimental studies of reinforced concrete cross-beam systems under static influence, the schemes of fracture and deformation, deflections, destructive loading were determined, graphs of dependence of deflections on loads applied to cross-beam systems of corresponding series were plotted.

A method is proposed for applying the numerical-analytical boundary elements method to the calculation of cross-beam systems, which allows calculating cross-beam systems of an arbitrary configuration with different conditions for its rods fastening. The results of calculations using the proposed method are in good agreement with the results of numerical simulation in the ANSYS R17.1 software and with experimental data.

Proposals for taking into account the processes of cracking in the process of calculating reinforced concrete elements subjected to bending with torsion have been improved, which makes it possible to refine the results of calculations of such elements.

To simplify the calculations by the proposed method and to test different models of cracking in the MATLAB computer mathematics environment, an algorithm was developed and implemented by creating a CrossBeam program in computer mathematics environment MATLAB. The program allows to calculate cross-beam systems of orthogonal configuration with both regular and irregular structure. First, the elastic characteristics of the material are set. It is also possible to adjust the characteristics of the materials.

The results of the research are implemented in the design of real objects, about which there is a corresponding certificate of implementation in the appendices.

The results of the dissertation research make it possible to save labor and machine resources when calculating reinforced concrete cross-beam systems considering cracking with a simultaneous increase in the accuracy of such calculations in comparison with the finite element method. The effectiveness of the proposed methods and models is shown on specific examples.

Keywords: cross-beam systems, numerical-analytical boundary element method, finite element method, stress-strain state, ANSYS, MATLAB, cracking, torsion, experimental studies.

Підписано до друку 07.12.2020 р.
Формат 60 X 84/16 Папір офісний Гарнітура Times
Друк-різографія. Ум.-друк. арк. 1,45.
Наклад 90 прим. Зам. №20-33

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: rio@ogasa.org.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА