

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

“Допустити до захисту”

Завідувач кафедри БДМБ, канд. техн. наук, професор

_____ Владислав НАСТОЯЩИЙ

" ____ " _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

**" Дослідження впливу корозійного пошкодження на розподіл зусиль у
багатопролітних залізобетонних балках "**

Виконав: здобувач групи БІ-23М-1
спеціальності 192

“Будівництво та цивільна інженерія”

_____ Олександр Костенко

" ____ " _____ 2024 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи:
канд. техн. наук, доцент

_____ Володимир ЯЦУН

" ____ " _____ 2024 р.

Кропивницький – 2024 рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра, циклова комісія Будівельних, дорожніх машин і будівництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 192 "Будівництво та цивільна інженерія"

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, голова циклової комісії

к.т.н. проф. Настоящий В.А.

“ ” 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Костенку Олександрю Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи

Дослідження впливу корозійного пошкодження на розподіл зусиль у багатопролітних залізобетонних балках

керівник проекту (роботи) доцент Яцун В.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ” 2024 р. №

2. Строк подання студентом роботи “ 1 ” січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

Об'єкт дослідження - статично невизначені багатопрогонові залізобетонні балки.

Предмет дослідження - перерозподіл внутрішніх зусиль у статично невизначених залізобетонних балках до і після корозії арматури.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Науково-дослідницький розділ. 2. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Мультимедійна презентація, 20 аркушів (A4).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Науково-дослідницький	доцент Яцун В.В.		
Охорона праці	доцент Скриннік І.О.		

7. Дата видачі завдання 2.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження стану питання	10.09.-15.09.2024	
2	Створення методики проведення випробувань	15.09.-20.09.2024	
3	Проведення натурного експерименту	20.09.-25.09.2024	
4	Аналіз отриманих даних	25.09.-15.10.2024	
5	Розробка заходів з охорони праці	15.10.-18.10.2024	
6	Оформлення альбому документів	18.10.-20.11.2024	

Студент

(підпис)

Костенко О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Яцун В.В.

(прізвище та ініціали)

Анотація

Проведено аналіз зміни напружено-деформованого стану статично невизначених залізобетонних балок при різних сценаріях розвитку корозії арматури.

Проведено експериментальні дослідження, що дали провести валідацію й калібрування теоретичних моделей, включаючи аналітичну залежність для перерозподілу моментів у некородованих і кородованих багатопрогових залізобетонних балках.

Розроблено чисельну модель й використання алгоритми машинного навчання й штучного інтелекту, що дозволяє досліджувати різні сценарії й умови, що виходять за рамки обмежень, що накладаються як експериментальними результатами, так і наявними даними.

Annotation

An analysis of the change in the stress-strain state of statically indeterminate reinforced concrete beams under various scenarios of the development of reinforcement corrosion was carried out.

Experimental research was carried out, which made it possible to validate and calibrate theoretical models, including an analytical dependence for the redistribution of moments in uncorroded and corroded multi-span reinforced concrete beams.

A numerical model and the use of machine learning and artificial intelligence algorithms have been developed, which allows exploring different scenarios and conditions that go beyond the limitations imposed by both experimental results and available data.

[illegible]

Вступ

Одним з розповсюджених залізобетонних елементів є статично невизначені залізобетонні балки, які мають відмінні риси поведінки, що полягають у перерозподілі внутрішніх зусиль усередині всього перетину при різних навантаженнях.

Перерозподіл моментів у таких залізобетонних конструкціях при одночасному впливі кліматичних і силових факторів ще недостатньо вивчена. Залізобетонні конструкції можуть бути під впливом агресивного навколишнього середовища, такий як корозія. Із часом, робочий перетин бетону й діаметр арматурної сталі зменшується, зв'язок між арматурою й бетоном порушується, тиск на захисний шар бетону збільшується через продукти корозії арматурної сталі. Таким чином, необхідно одержати дані про роботу цих балок при корозійному ушкодженні в частині перерозподілу моментів. Перерозподіл внутрішніх зусиль вимагає визначення й перерахування всіх значимих параметрів на рівні розрахункових рівнянь із урахуванням корозії в залізобетоні.

					БЗБ 24. ПЗ			
Зм	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Дослідження впливу корозійного пошкодження на розподіл зусиль у багатопролітних залізобетонних балках	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Костенко					М	1	
Перевірив	Яцун					ЦНТУ Гр. БІ-23М-1		
Н. контр.	Дарієнко							
Затвердив.	Настоящий							

1. Постановка проблеми

Дослідження коефіцієнта перерозподілу моментів при корозійному впливі дозволить зрозуміти структурну поведінку й механізми передачі навантаження в кородованих балках. Ці знання необхідні для правильної оцінки напружено-деформованого стану статично невизначених залізобетонних балок, а також для забезпечення безпеки, довговічності й працездатності залізобетонних конструкцій у реальних умовах експлуатації.

Метою дослідження є розробка методики розрахунків перерозподілу зусиль у статично невизначених залізобетонних балках при різних розташуваннях і рівнях корозії арматури.

Об'єктом дослідження є статично невизначені багатопрогонові залізобетонні балки.

Предметом дослідження є перерозподіл внутрішніх зусиль у статично невизначених залізобетонних балках до й після корозії арматури.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Розробка аналітичної залежності перерозподілу моментів у некордованих і кордованих багатопрогонових залізобетонних балках.
2. Методика розрахунків кордованих і некордованих статично невизначених залізобетонних балок з урахуванням перерозподілу моментів.
3. Удосконалення методики прискореної корозії з метою одержання даних для перевірки й уточнення теоретичних моделей.
4. Дані експериментальних досліджень, що дозволяють провести валідацію й калібрування теоретичних моделей, включаючи аналітичну залежність для перерозподілу моментів у некордованих і кордованих багатопрогонових залізобетонних балках.
5. Аналіз зміни напружено-деформованого стану статично невизначених залізобетонних балок при різних сценаріях розвитку корозії арматури.
6. Розробка чисельної моделі й використання алгоритмів машинного навчання й штучного інтелекту, що дозволяє досліджувати різні

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

сценарії й умови, що виходять за рамки обмежень, що накладаються як експериментальними результатами, так і наявними даними.

Практична значимість роботи полягає в можливості використання запропонованого методу й результатів експериментальних досліджень при проектуванні статично невизначених залізобетонних балок до й після корозії арматури, і в розробці практичних рекомендацій з розрахунків елементів з урахуванням перерозподілу внутрішніх зусиль.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

2.СТАН ПИТАННЯ Й ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

2.1 Перерозподіл моментів у статично невизначених залізобетонних конструкціях

Визначення практичного проектування для залізобетонних елементів полягає в розробці конструкцій, які враховують вплив навколишнього середовища й різні види прикладених навантажень. Метою проектування є підвищення довговічності залізобетонних конструкцій особливо в агресивних середовищах.

и Одними з розповсюджених залізобетонних елементів є балки, зокрема, статично невизначені (нерозрізні), що мають характерну поведінку, яка полягає в перерозподілі внутрішніх зусиль (моментів). Перерозподіл моментів необхідно оцінювати шляхом аналізу НДС залізобетонних нерозрізних балок.

З середини минулого століття було проведено багато досліджень по вивченню перерозподілу моментів у статично невизначених конструкціях. Оскільки нерозрізні балки є найбільш популярними залізобетонними елементами, це явище повинне бути вивчене для досягнення ефективного практичного проектування. Як відомо, пружний розрахунок для статично невизначених конструкцій припускає, що бетон і арматури пружні й працюють як єдине ціле. Це, звичайно, справедливо до появи тріщин. Інакше кажучи, це привело до того, що постійна твердість при вигині більше не може бути використана для точного розрахунків цих елементів. Існує різниця між результатами лінійного пружного аналізу й фактичними внутрішніми силами у зв'язку з нерівномірним розподілом твердості.

Для розуміння цього процесу розглянута двопрогінна, нерозрізна залізобетонна балка із симетричним армуванням і навантаженням у кожному прольоті, з моментами в критичних перетинах на проміжному опорному й у середині пролітних перетинів (рисунок 1), де пунктирними лініями представлені моменти, отримані із пружного розрахунку. Видно, що

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

фактичні моменти починають відрізнятися від пружних моментів, коли в бетоні проміжної опорної зони утворюються тріщини. Ступінь відхилення постійно міняється в міру зміни відносної твердості на вигин. Пластичний шарнір утворюється, коли арматури тече, а фактичний момент практично постійний, оскільки пластичний шарнір повертається, передаючи момент від одного перетину до інших, поки нерозрізна балка не стане механізмом руйнування. Це називається перерозподілом внутрішніх зусиль. У результаті, коли критичний перетин досягає максимальної несучої здатності, статично невизначена залізобетонна балка не руйнується.

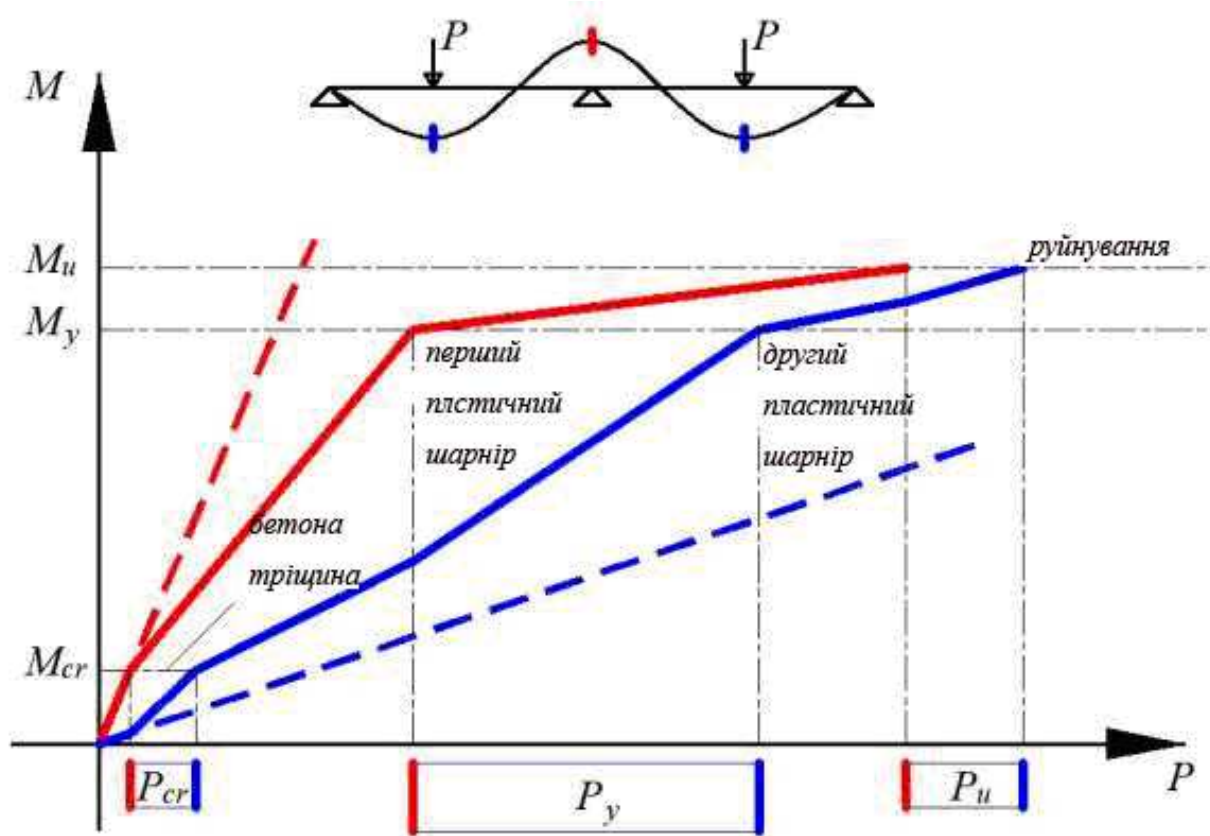


Рисунок 1 - Значення перерозподілу моментів у статично невизначених залізобетонних балках

Включення перерозподілу моментів у конструктивний аналіз є розумним і точним для розрахунків внутрішніх зусиль, на які впливає нелінійність матеріалів у конструкціях. Оскільки перерозподіл моментів звичайно здійснюється шляхом зменшення негативного моменту на опорі, з

відповідним коректуванням позитивного моменту шляхом задоволення рівноваги, можна уникнути перевантаження арматури у критичних областях, таких як з'єднання балки з колоною, що у свою чергу забезпечує зручність будівництва й поліпшує якість бетону й характеристики зчеплення в цих областях. Більше того, резервні можливості матеріалів можуть бути використані для того, щоб зробити якнайбільше критичних перетинів для досягнення граничної міцності, що сприяє економії матеріалу й досягненню ефективних конструкцій.

Завдяки всьому цьому, можна дати об'єктивну оцінку для перерозподілу моментів, таким чином, поліпшуючи етап проектування будівельних конструкцій.

Експериментальні дослідження з перерозподілу моментів

Експериментально досліджували дві серії двопрогінних нерозрізних залізобетонних балок. Серія 1 складалася із чотирьох балок прямокутного перетину, розрахованих на однакове робоче навантаження, але з різним ступенем перерозподілу моментів. Серія 2 складалася із трьох Т-образних балок, що зазнають двухточечного навантаження в кожному прольоті для імітації другорядних балок у рамній конструкції. Результати випробувань показали, що при обліку перерозподілу моментів при проектуванні навіть на величину до 25%, характеристики двопрогінних нерозрізних залізобетонних балок не погіршуються ні при робочих навантаженнях, які вони повинні нести протягом терміну служби конструкції, ні в граничному стані. Це доводить доцільність перерозподілу моментів при проектуванні.

Для дослідження впливу пластичності арматури на пластичність поперечного переріза, яка є критичною для перерозподілу моментів у статично невизначених елементах, в провели випробування серії двопрогінних нерозрізних балок і плит з різними коефіцієнтами піддатливості. Порівняння експериментальних результатів показало, що (а) використання різної арматур не змінює можливості повороту перетину для

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

однакового перерозподілу моментів, у той час як (б) для елемента з меншим коефіцієнтом піддатливості потрібна менша пластичність арматури для досягнення того ж ступеня перерозподілу моментів.

Повідомляється, що перерозподіл моментів збільшується зі зменшенням розтягнутої арматури і збільшенням стислої арматури, випробувавши в цілому 26 двопрогінних нерозрізних балок. Тим часом, вплив поперечної арматури, якою зневажають у розрахункових нормах, також було в центрі уваги. Збільшення коефіцієнта армування хомутів у середній опорній зоні може значно поліпшити пластичність перетину й, отже, збільшити перерозподіл моментів. Крім того, для подальшого уточнення регулювання варіацій був використаний аналітичний метод, який добре збігся з експериментальними результатами. На підставі експериментальних і аналітичних результатів була запропонована обґрунтована формула для перерозподілу моментів, що враховує кількість поперечної арматури.

Однак для балок з високоміцного бетону вплив коефіцієнта поперечного армування на перерозподіл моментів було незначним, як це спостерігалось в експериментальних дослідженнях 6-ти армованих балок з високоміцного бетону. Крім того, одночасно були проведені випробування ще 4-х балок з високоміцного бетону з коефіцієнтами армування на середній опорі в якості розрахункової змінної (коефіцієнти армування в прольотах були постійними). Результати випробувань показали, що при правильному проектуванні балки з високоміцного бетону можуть демонструвати значний перерозподіл моментів, і більше того, співвідношення між коефіцієнтами армування між середньою опорою й прольотом також значно впливає на перерозподіл моментів.

Звичайно вважається, що значний перерозподіл моментів відбувається після утворення пластичного шарніра. Експериментально досліджували перерозподіл моментів протягом усієї історії навантаження 37 двопрогінних залізобетонних балок. Вони підтвердили, що навіть для граничного стану

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

працездатності (SLS), значний ступінь перерозподілу моментів буде відбуватися через неоднорідну твердість при вигині, яка була викликана варіаціями в розташуванні арматури і розвитком тріщин. Про таку ж поведінку перерозподілу моментів повідомлялося в роботі, де була проведена експериментальна програма з 12 двопрогінними нерозрізними балками. Можна зробити вивід, що доступний ступінь перерозподілу моментів у граничному стані значно перевищує припустимі значення, зазначені в нормах проектування. Без обліку перерозподілу моментів в SLS положення розрахункових норм є консервативними.

Чисельні дослідження перерозподілу моментів

Оскільки лабораторні випробування для вивчення перерозподілу моментів у статично невизначених залізобетонних конструкціях обмежені кількістю й розміром зразків, була проведена велика кількість чисельних досліджень.

Історично вважається, що перерозподіл моментів пов'язаний з поворотом пластичного шарніра. Одна з основних ідей багатьох чисельних досліджень полягає в тому, що пластичний поворот, необхідний для певних ступенів перерозподілу моментів, не повинен перевищувати можливості пластичного повороту критичних областей конструкцій.

Створили аналітичну модель для прогнозування здатності до пластичного повороту за допомогою моделі змінної кривизни, яка враховувала зміну пластичної кривизни по довжині пластичної петлі, вплив тріщин зрушення й зчеплення-ковзання між бетоном і арматурами, що більш раціонально відображало деформації залізобетонних конструкцій. Дане дослідження показало, що пластичний поворот в основному викликаний подовженням розтягнутої арматури, і були представлені методи розрахунків деформації арматури в місці тріщини й між тріщинами. Провівши аналіз моментів шарніра з урахуванням твердості, геометрії й навантаження на конструкцію, були отримані необхідні пластичні повороти. Для визначення

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

коефіцієнта перерозподілу моментів проводилися ітераційні розрахунки таким чином, щоб поворот пластичного шарніра дорівнював необхідному повороту.

Деякі вчені описали підхід, заснований на моменті повороту твердого тіла для пластичних шарнірів. Цей метод об'єднав теорію часткових взаємодій, теорію тертя при зрушенні і переміщення твердого тіла, які враховували тріщини в бетоні, ковзання між бетоном і арматурами (ефект твердості при розтяганні) і клини розм'якшення бетону в зоні стиску для моделювання механізмів області пластичного шарніра. На основі цього методу розробили математичну модель перерозподілу моментів, що включає математичний розв'язок необхідного моменту повороту. Більше того, розробили рішення в замкненій формі, засновані на вищевказаних механізмах, для кількісної оцінки пластичної поведінки залізобетонних пластичних шарнірів при всіх рівнях навантаження. Завдяки застосуванню цього підходу, були отримані замкнені рішення з різними складностями в граничному стані для перерозподілу моментів для інженерного проектування. Дане дослідження розбудовує наше розуміння того, що не тільки поведінка пластичних шарнірів, але й твердість областей між шарнірами буде мати значний вплив на перерозподіл моментів.

Також оцінили можливості пластичного повороту шарнірів у критичних зонах за допомогою моделі (Deformable Strut-Tie model) (DTS), у якій ураховувалися обмеження по бетону й ефекти твердості при розтяганні. У комбінації з необхідним пластичним поворотом, отриманим за допомогою пластичного аналізу, був отриманий припустимий перерозподіл моментів. Чисельні результати показали гарну згоду з результатами випробувань.

Нелінійний метод кінцевих елементів є ефективним способом дослідження нелінійної поведінки й перерозподілу моментів у залізобетонних конструкціях. Створили аналітичну модель для нелінійного й залежного від часу аналізу залізобетонних рам. У порівнянні з результатами, отриманими в ході лабораторних випробувань, метод довів, що він точно

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

відбиває розвиток напруг, деформацій, прогинів, реакцій і внутрішніх сил залізобетонних конструкцій у часі.

Запропонували кінцево-елементну модель, що використовує співвідношення моментів і кривизни поперечного переріза й теорію балок Тимошенко для прогнозування нелінійної поведінки залізобетонних нерозрізних балок. Точність цієї моделі була підтверджена експериментальними результатами серії нерозрізних балок з високоміцного бетону. За допомогою цієї моделі був досліджений увесь процес перерозподілу моментів у нерозрізних залізобетонних балках. Можна зробити вивід, що (а) для балок з невисоким коефіцієнтом армування перерозподіл моментів відбувається з появою тріщин, що виражається в відхиленні фактичного моменту від пружного, і це відхилення збільшується після плинності арматури; (б) для балок з високим коефіцієнтом армування при розтягу вплив тріщин у бетоні й плинності арматури на перерозподіл моментів не так помітно, як для балок з невисоким коефіцієнтом армування.

2.2. Вплив корозії на поведінку залізобетонних балок

Для того щоб залізобетонні конструкції працювали з достатньою ефективністю протягом усього терміну служби, при проектуванні необхідно враховувати умови й вплив навколишнього середовища. Однією з умов навколишнього середовища, що впливають на залізобетонні конструкції, є корозія. Корозія викликає значне погіршення ефективності цих елементів на додаток до скорочення терміну служби залізобетонних елементів.

Корозія є однієї з ризикованих екологічних проблем, яким можуть зазнати залізобетонні конструкції. Поведінка залізобетонних елементів повністю змінюється. Критичний рівень корозії приводить до значного погіршення механічних характеристик залізобетонних елементів, таких як несуча здатність, твердість, міцність зчеплення, а також прогин. Через корозію збитки досягають мільярдів доларів, зв'язаних або з операціями по заміні й відновленню, або з ремонтом, а також з витратами часу, що може

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

привести більшим втратам ніж фінансові втрати. Таким чином, безпека залізобетонних елементів після виготовлення не менш важлива ніж їхня безпека на стадії проектування при очікуваних навантаженнях, щоб гарантувати їхню довговічність. У зв'язку із цим корозія залізобетонних елементів вивчалася в багатьох попередніх дослідженнях для оцінки величини збитку.

Спочатку досліджувалася гранична міцність зв'язку між бетоном і кородованими арматурними стрижнями. Yalciner et al. експериментально випробували серію арматурних стрижнів у двох випадках (кородованих і некородованих), щоб розробити моделі для прогнозування граничної міцності зв'язків залізобетонних зразків. Залежно від нової функції, було помічено, що гранична міцність зв'язку залежить від рівня корозії, рівня міцності бетону, ширини тріщини й відносного діаметра стрижня (d) до товщини захисного шару бетону (a) (a/d). Більше того, було також замічено, що попередні моделі не мали гарної відповідності з експериментами, тому що вони очікували різкого зниження міцності зв'язків. Для зразків, не зазнавших корозії, збільшення міцності бетону й глибини закладення при зменшенні водоцементного відношення (V/C) привело до збільшення граничної міцності зв'язків. Однак збільшення міцності зв'язку було більш помітним для зразків з більш низькою міцністю бетону (f'_c), ніж з більш високої. Це пояснюється тим, що гранична міцність зчеплення залежить не тільки від f'_c , але й від відношення товщини захисного шару бетону до діаметра стрижня (a/d), що означає, що зі збільшенням відношення (a/d) при більш низькій міцності бетону опір радіальному тиску збільшується. Крім того, збільшення міцності бетону краще, ніж збільшення товщини бетонного покриття. З іншого боку, кородовані бетонні зразки високої міцності, одержали більшу ширину поверхневих тріщин, ніж кородовані зразки низької міцності, оскільки кородовані зразки високої міцності з більш високим відношенням V/C , більш проникні. Крім того, більш високе відношення V/C збільшує поширення продуктів корозії по бетону й, отже,

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

зменшує об'ємне розширення й, отже, внутрішній тиск, що може затримати або зменшити передчасне розтріскування бетону. При однаковому рівні корозії розколювання бетону було легше у високоміцному бетоні, ніж в низькоміцному. Крім того, відношення (a/d) значно впливає на ширину тріщини, яка збільшується зі збільшенням відношення (a/d) , особливо при низьких рівнях корозії. Як було відомо раніше, більш хрупка поведінка спостерігалася в зразків бетону високої міцності й була більш виражена, ніж в бетону низької міцності. Проковзування арматурних стрижнів зменшувалося зі збільшенням відношення (a/d) і міцності бетону. Крім того, низький ступінь проковзування спостерігався у випадку бетону з низькою міцністю при найнижчому відношенні (a/d) . З іншого боку, при збільшенні відношення (a/d) проковзування було менше у високоміцного бетону, ніж в низькоміцного при однаковому рівні корозії й відношенні (a/d) . Слід зазначити, що запропоноване в даному дослідженні було засновано на результатах випробування на висмикування, яке не застосовне до залізобетонних перетинів, підданих вигину, таким як залізобетонні кородовані балки, оскільки й сталеві стрижні, і бетон зазнають розтягувальним напругам. Крім того, корозія давить на захисний шар бетону, що приводить до утворення тріщин і наступному значному зниженню міцності зчеплення, яка є фатальним параметром, що впливає на міцність конструкцій, або, принаймні, знижує як згинальну твердість, так і пластичність балок.

Крім того була представлена модифікована залежність " зчеплення-ковзання" для випробування балки. Була проведена чисельна модель для випадку залізобетонних балок, підданих корозії, крім експериментальних випробувань. Був зроблений вивід, що випробування на проковзування зв'язків не відбиває поведінку кородованих залізобетонних балок. Крім того, у багатьох роботах був вивчений вплив орієнтації арматури. При цьому у випадку середньої нижньої арматур з кутом $(\theta = 0^\circ)$ міцність зчеплення

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

знижується, а у випадку кутової арматури з кутом ($\theta = 135^\circ$) спостерігається найбільша деградація.

Методи одержання корозії залізобетонних балок різняться по двом типам: або створення електричного елемента або вплив на залізобетонні балки умов навколишнього середовища, які приводять до корозії (рисунок 2). Було проведено порівняльне дослідження двох методів прискореної корозії (гальванічний метод і метод впливу штучного клімату) і їх впливу на корозійні характеристики й структурні показники кородованих залізобетонних балок.

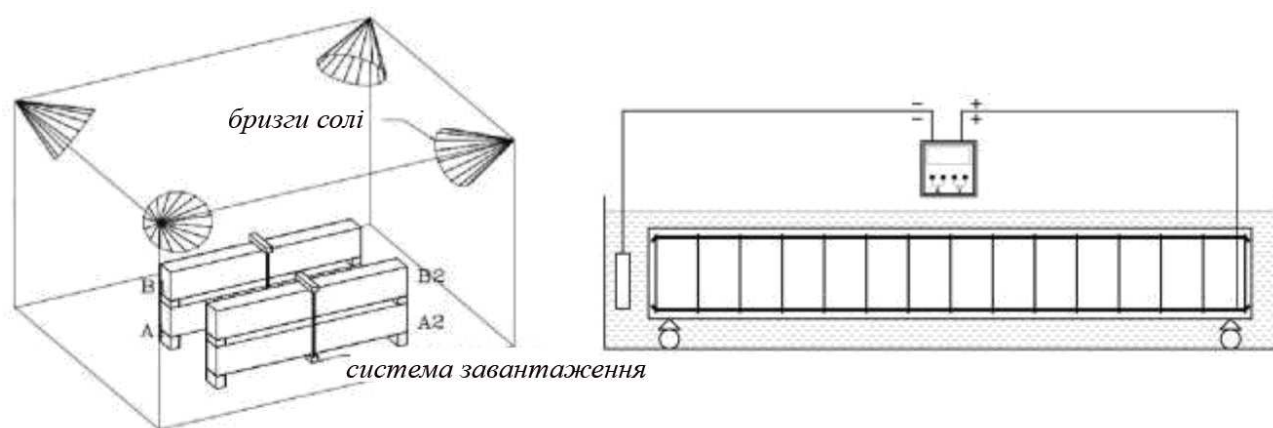


Рисунок 2 - Дві системи, використовувані для моделювання корозії

В цілому, метод впливу штучного клімату можна узагальнити в такий спосіб: додається певна кількість NaCl для активації сталі до процесу корозії. Після цього залізобетонні балки розміщуються в багатофункціональну камеру навколишнього середовища, яка була запрограмована на високу температуру й вологість протягом двох місяців, а ширина тріщин контролюється до досягнення припустимих значень. Що стосується гальванічного методу, те це звичайне прискорення електричної корозії. Для цього постійний струм силою 0,8 і 2,4 mA/cm^2 подавався на серію стандартних залізобетонних балок, щоб викликати корозію при різних рівнях втрати діаметра арматури: від 0 до 5%. Більше того, використання невеликої щільності струму в діапазоні від 150 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ до 400 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ більш реально для

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

одержання бажаного рівня корозії. Відзначимо, що найкращим способом закріплення методу струмової корозії є застосування більш високих навантажень, супроводжуваних більш низькими щільностями електричного струму. Крім того, було помічене, що ці два методи близькі по очікуванню, оскільки при досягненні максимальної ширини поздовжніх тріщин у залізобетонних балках метод впливу штучного клімату приводить до суттєво меншого ступеня корозії сталі, ніж гальванічний метод. Цікаво досліджувати результати довгострокового корозійного ушкодження залізобетонних балок. Вони зазнали впливу хлоридного середовища, і на етапі випробувань рівнялися з контрольними. Крім того, усі кородовані балки зазнали тривалих навантажень, що варіюються від експлуатаційних до граничних розрахункових навантажень. Це вказує на те, що процес корозії при тривалих навантаженнях також підсилює процес прискореної корозії. Було відзначено, що незалежно від методу прискорення, корозія підсилюється в чистій згинальній зоні за рахунок прикладання згинаючих навантажень під час корозії. Також це допомагає збільшати просторову мінливість рівня корозії в залізобетонних балках. Крім того, існує необхідність в індикації для оцінки залишкової несучої здатності кородованих залізобетонних балок, тому що коефіцієнт втрати маси кородованої розтягнутої арматури і ширина тріщин не дозволяють визначити її. Крім того, 8 залізобетонних балок були експериментально випробувані для вивчення впливу як тривалого навантаження, так і корозії на кородовані залізобетонні конструкції. Був зроблений вивід, що найкращим способом збільшення інтенсивності корозії є застосування більш високих навантажень, супроводжуваних більш низькими щільностями електричного струму. Вчені дійшли висновку, що такий випадок корозії більш реалістичний, ніж прискорений, де зв'язок між сталлю й бетоном більш міцний.

В деяких дослідженнях, відсутність сталевих хомутів була зроблена для запобігання взаємодії корозії. З іншого боку, наявність хомутів відбиває дійсну уяву залізобетонних балок. Серія з 8 залізобетонних балок була

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

експериментально випробувана для вивчення впливу кородованої поздовжньої арматури на здатність балки до зрушення при наявності поперечних стрижнів. При порівнянні результатів експерименту з рівняннями кодексу ACI 318-19 було виявлено, що рівняння кодексу ACI 318-19 переоцінюють здатність до зрушення кородованих зразків. Це пов'язане з тим, що кодекс ACI 318-19 не враховує сильний вплив втрати зв'язків на зменшення поперечного переріза через корозію.

Що стосується товщини корозії, то існує лінійна залежність між товщиною корозії й несучою здатністю залізобетонних кородованих балок. Крім того, при більш високих рівнях корозії після прикладання навантаження виникає проковзування вільного кінця, яке потім лінійно збільшується з прикладанням навантаження, що використовується для індикації рівня корозії. Було помітно, що корозійні тріщини відрізняються від згинальних тріщин і є незалежними.

Підводячи підсумок, можна сказати, що зношування залізобетонних конструкцій, підданих корозії, відбувся через те, що корозія приводить до зменшення площі поперечного переріза сталевих арматур і, отже, до втрати зв'язку між сталлю й бетоном (рисунок 3).

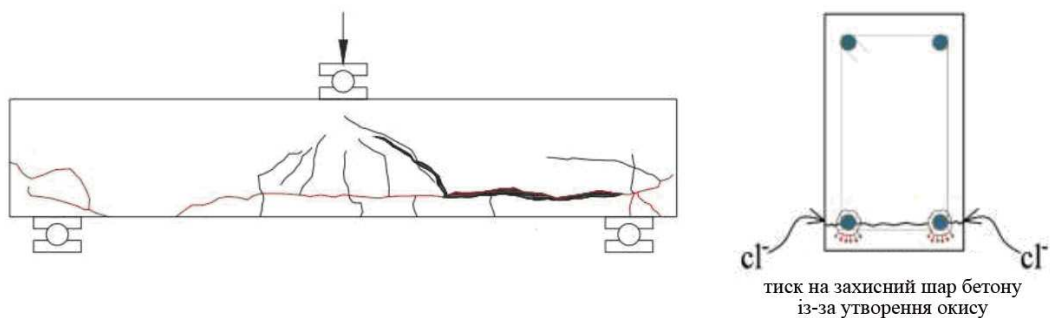


Рисунок 3 -Типовий режим руйнування проржавілих залізобетонних балок

Інакше кажучи, втрата поперечного переріза розтягувальних стрижнів у зоні руйнування була причиною втрати міцності балки. Крім того, додали, що через велику втрату перетину сталевих арматури, особливо в зоні руйнування через корозію, приблизно на чверть поменшалася границя

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

текучості й граничний момент. Також, як і в багатьох попередніх дослідженнях, корозія суттєво змінює характер руйнування. Коли випробували кородовану залізобетонну коротку балку, і було помічене, що через зменшення поперечного переріза арматури й здатності до вигину корозія змінила режим руйнування зі зрушення на згин у порівнянні з некоронованими балками. Більше того, для коронованих залізобетонних балок режим руйнування змінився із пластичного на більш хрупкий. Можливість руйнування кородованих залізобетонних балок при пластичній піддатливості або хрупкому руйнуванні була вивчена в роботі [1]. Автори цього дослідження використовували просторово-залежну від часу модель надійності, яка враховувала просторову і залежну від часу мінливість пітингової корозії, опору конструкції й впливи навантаження. Більше того, був зроблений вивід, що поведінка кородованих залізобетонних балок має тенденцію до хрупкої поведінки арматури, а не пластичної поведінки. Крім того, характер руйнування змінився від дроблення бетону для контрольної балки до розриву однієї з кородованих розтягувальних сталевих арматурних стрижнів у зоні максимального згинального моменту для кородованих залізобетонних балок. Крім того, не можна зневажати впливом корозії арматури на прогин залізобетонних балок, тому прогин збільшується через корозію.

Крім того, основним фактором граничного стану (ПС) (SLS) є прогин, а не прикладене навантаження, тому прогин збільшується за рахунок посилення корозії, особливо на ранній її стадії. Це пов'язане з тим, що корозія приводить до деградації зчеплення між бетоном і сталлю, а кожна з них працює окремо, що приводить до збільшення подовження при розтягу сталі, що супроводжується появою тріщин або руйнуванням бетону. Було помічено, що більш половини граничного прогину балки поменшало через вплив корозії. Крім того, ледве менш половини пластичності кородованої балки знизилося через велике зменшення граничного подовження сталевих стрижня при розтяганні внаслідок корозії.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

В роботі [2] автори спробували використовувати позовжню деформацію й твердість кородованого залізобетону для того, щоб дати інженерам уяву про величину втрати арматурної сталі через корозію, а також стандартизоване використання для визначення безпеки залізобетонних конструкцій. Були проведені експериментальні випробування 20-ти повномасштабних залізобетонних балок при тривалому навантаженні (у відсотках від граничного навантаження). Був зроблений вивід, що позовжня деформація не може бути використана для вираження ступеня корозії як ознака безпеки конструкцій. Це пов'язане з тим, що позовжні деформації не були рівномірними, а максимальна позовжня деформація не збігалася з місцем максимальної втрати сталі й більшим розкидом позовжніх деформацій по глибині кородованих залізобетонних балок. З іншого боку, твердість кородованих залізобетонних балок була гарним стандартом для відбиття рівня корозії, як показано на рисунку 4. Однак, вона збігалася з рівнем корозії, який був дійсний тільки на ранніх стадіях корозії (5-8% втрати маси сталі), тому вона різко зменшувалася, поки твердість балок не стала стійкою, як показано на рисунку 4.

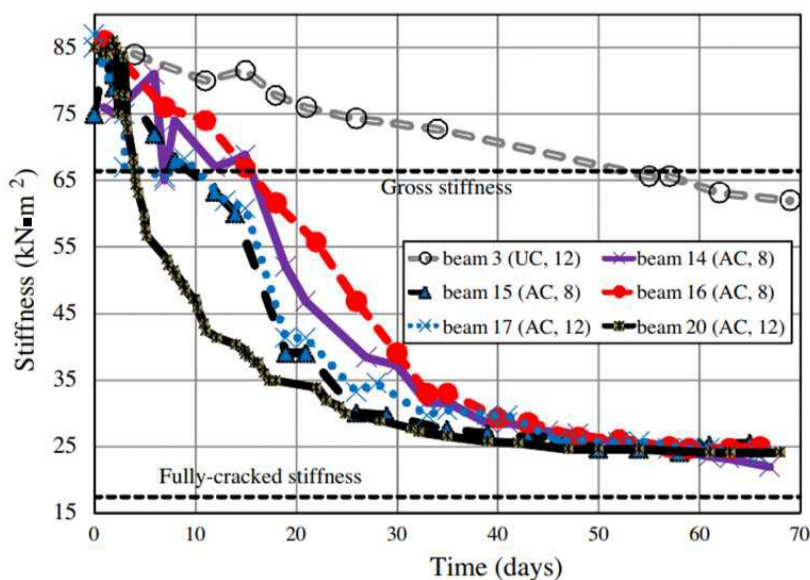


Рисунок 4 - Зміна твердості залізобетонних балок з різним ступенем корозії

UC - балка без корозії, AC - балка з корозією, а число після AC - рівень корозії.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Вивчення кородованих залізобетонних нерозрізних балок було дуже рідким. У роботі [3] нерозрізні кородовані й некородовані залізобетонні балки були посилені цементною матрицею, армованою вуглецевою тканиною (C-FRCM). Незалежно від системи посилення коефіцієнти перерозподілу моментів (β) практично не змінилися в обох випадках (кородованому і некородованому). Значення β склало майже 10% і було нижче значень, зазначених у різних розрахункових нормах. Крім того, система посилення зменшила коефіцієнти перерозподілу моментів. У роботі [4] було експериментально досліджено 12 статично невизначених залізобетонних балок при тривалому навантаженні й корозії. Двопрогінні залізобетонні балки були ближче до двопрогінних залізобетонних плит, ніж до балок, через відсутність хомутів. Відсутність хомутів була зроблена для запобігання корозії бетонного покриття. Було відзначено, що збільшення навантаження й корозії привело до збільшення прогину. Більше того, перерозподіл моментів був більш вираженим при більш низьких ступенях навантаження. Крім того, спостерігалися значні зміни в рівнях напруги, що пояснюється зменшенням поперечного переріза сталевих арматур і перерозподілом моментів. З іншого боку, корозія підсилила перерозподіл моментів, що у свою чергу забезпечило додаткову безпеку для залізобетонних конструкцій. Через невизначеність багатьох факторів, які повинні бути включені, моделювання цих елементів є занадто проблематичним і вимагає величезних зусиль, враховуючи всі змінні зношування. У кожному разі, представлена модель передбачила прогин, але не передбачила перерозподіл моментів. Також вивчався вплив корозії на статично невизначені конструкції. Чотири групи експериментальних нерозрізних залізобетонних балок зазнали впливу різних видів зосереджених статичних навантажень із різним ступенем корозії. Нерозрізні залізобетонні балки були частинами безперервної залізобетонної плити. Це було зроблено із двох причин, по-перше, тому що наявність хомутів створить потенційний прямий електричний зв'язок між верхніми й нижніми сталевими арматурними стрижнями, що приведе до втручання в процес корозії. По-

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

друге, для моделювання випадків некондиційних бетонних смуг, таких як залізобетонні плити. Усі групи залізобетонних нерозрізних балок були завантажені різними видами постійного навантаження під час корозії. Після цього, під час випробувань, крім цих постійних навантажень, прикладалося зосереджене навантаження до руйнування. Ці постійні навантаження, які були прикладені для кожної групи, були відповідно: власна вага балки, навантаження майже нижче розрахункових значень для експлуатації й подвоєне навантаження. Ця запобіжний захід був прийнятий для того, щоб змодельовати реальні випадки, з якими зустрічаються залізобетонні елементи. Прискорена корозія була застосована шляхом оцінки втрати маси сталевій арматури у результаті корозії й часу процесу шляхом підстановки в закон Фарадея, щоб корродувати поздовжню арматуру із щільністю струму нижче 350 мкА/см^2 . Таким чином, розрахунковий рівень корозії для трьох груп двопрогінних нерозрізних залізобетонних балок склав 10% (56 днів), 15% (42 днів) і 20% (100 днів). Четверта група не зазнала корозії як контрольну групу. Подробиці корозійної установки були представлені будуть розглянуті далі. Для моделювання двопрогінних залізобетонних балок використовувалася програма "DIANA". Тривимірні кінцево-елементні (КЕ) моделі не могли відтворити хрупке руйнування анкерного кріплення через розколювання. КЕ моделі вимагають більших зусиль для більш точного моделювання напруг розколювання й міцності сталевій арматури на відрив. Далі було помічено, що для нерозрізних залізобетонних балок на граничну міцність сильно впливає корозія арматури. Гранична міцність погіршилася через іржу арматури. Гранична міцність кородованих балок була на 55% нижче, ніж некородованих аналогів. Корозія порушила зчеплення між сталлю й бетоном, що привело до руйнування перетину, на який уже не діяли додаткові навантаження. Крім того, перерозподіл внутрішніх моментів був на 30% вище, чим у некородованих балках. Такий перерозподіл внутрішніх зусиль у нерозрізних залізобетонних балках вплинув на гарну відповідність між навантаженнями при руйнуванні і їх розрахунками. Перерозподіл внутрішніх

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

зусиль вплинув, однак, корозія завдала значної шкоди статично невизначеним залізобетонним балкам, оскільки вона передала напруги середнього прольоту (слабка зона) на більш міцну опору (середня опора). Це привело до затримки руйнування балок. Нарешті, залізобетонні кородовані балки зруйнувалися через руйнування анкерного кріплення. Руйнування було хрупким і передчасним. Відсутність поперечної арматури сприяло виникненню місцевих руйнувань, за якими пішло зниження міцності зв'язки, особливо для основної арматури у середньому прольоті.

2.3. Чисельне моделювання кородованих залізобетонних балок

При дослідженні поведінки багатопрогонової залізобетонної балки при корозійному ушкодженні арматури використовувалася програма Abaqus, яка являє собою надійну платформу для моделювання й аналізу поведінки конструкцій у різних умовах. Вона полегшує реалізацію складних чисельних моделей. Як уже згадувалося, раніше була проведено безліч досліджень, у яких чисельно вивчалася поведінка нерозрізних балок, а також вплив корозії на залізобетонні балки за допомогою Abaqus і інших кінцево-елементних програм. Однак у жодному із цих досліджень не моделювалася корозія арматури у потрібних місцях з різними рівнями корозії.

Розширені можливості Abaqus дозволяють моделювати складний вплив корозії на арматуру й оцінювати наступний перерозподіл моментів у статично невизначених залізобетонних балках. Здатність програми враховувати нелінійність матеріалу, деградацію, викликану корозією, і складні граничні умови забезпечує повна й точна експериментальна перевірка сценаріїв. У результаті Abaqus підвищує точність і надійність результатів дослідження, забезпечуючи критичне розуміння структурного відгуку багатопрогонових балок на корозійно-індуковані ушкодження й пов'язаних з ними механізмів перерозподілу моментів.

Дослідження й аналіз літератури підтвердили, що пружна теорія не може точно відбити реальну поведінку статично невизначених

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

залізобетонних балок. Як наслідок, існує відмінність між пластичною й пружною поведінкою після появи тріщин у бетоні. Пластична поведінка залізобетонних балок виникає після утворення тріщин у бетоні й супроводжується необоротними деформаціями, зниженням твердості й розсіюванням енергії в порівнянні з лінійною пружною поведінкою. Ці відмінності надто важливо враховувати при аналізі й проектуванні конструкцій для забезпечення точних прогнозів і безпечної роботи.

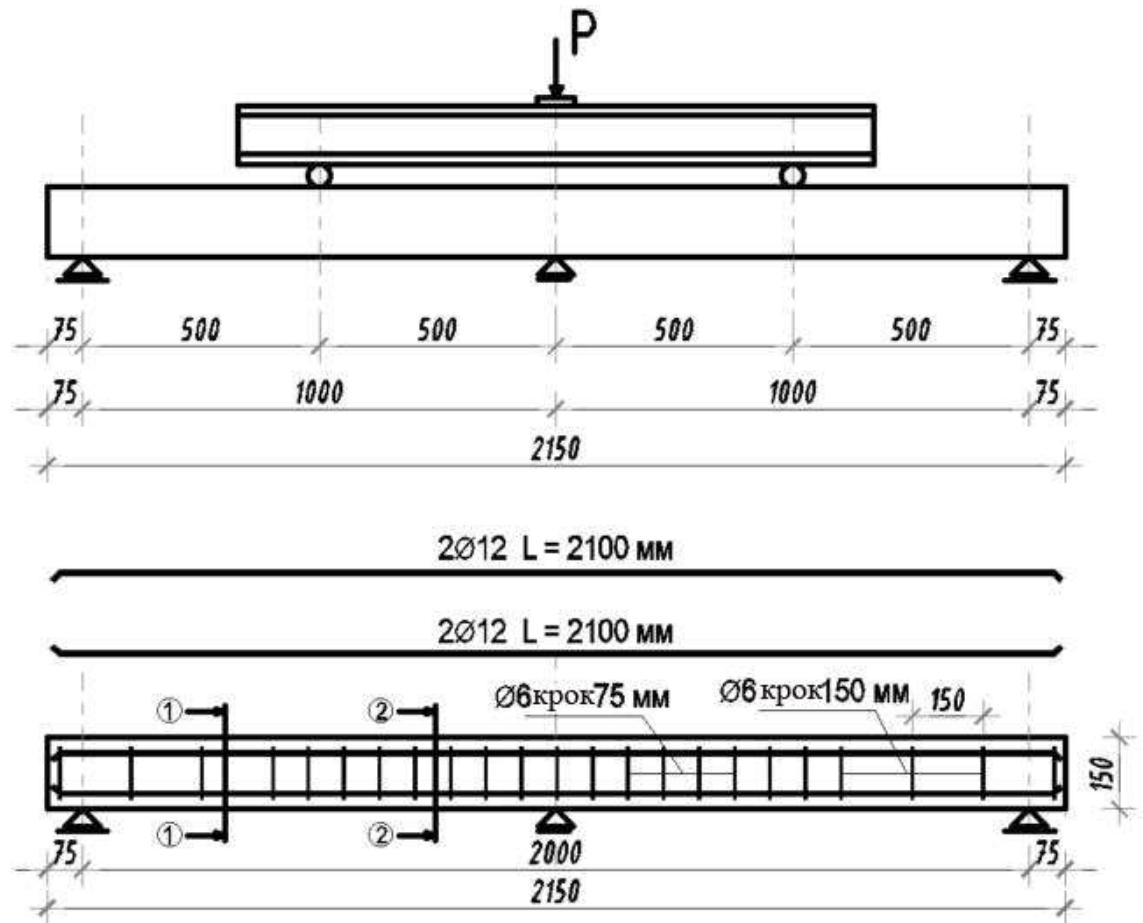
3. Корозія суттєво змінює характер руйнування, поведінку проржавілих залізобетонних балок, як правило, має хрупку поведінку арматури, ніж пластичну. Існує недолік і необхідність в області досліджень, проведення експериментальних програмних випробувань, які вимагають додаткових досліджень для оцінки перерозподілу моментів у нерозрізних кородованих залізобетонних балках. Тому, щоб усунути цей пробіл, у даному дослідженні буде розглянута програма експериментів, яка дозволить одержати повну уяву про поведінку й перерозподіл моментів у кородованих залізобетонних балках.

Методика проведення експериментальних досліджень

Усього відлито 10 двопрогінних залізобетонних балок розмірами (120 x 150 x 2150 мм) з бетону В20. Розміри й деталі залізобетонних балок показано на рисунку 5. Балки були симетрично армовано двома стрижнями А500, діаметром 12 мм зверху й знизу, а також А240 закритими хомутами діаметром 6 мм, розташованими на відстані 75 мм і 150 мм друг від друга. 10 двопрогінних статично невизначених залізобетонних балок розділені на п'ять груп залежно від типу й місця впливу корозії (рисунок 6). **Перша група (ВС)** - містить 2 балки без корозії, що працюють у якості контрольних. **Друга група (FВ)** - містить 2 балки із двома рівнями корозії, нанесеними по всій нижній частині розтягнутої арматури, **Третя група (МО)** - містить 2 балки із двома рівнями корозії, застосовувані тільки для середньої частини прольотів для розтягнутої арматури, **Четверта група (ТО)** - містить 2 балки із двома

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

рівнями корозії, застосовувані тільки для розтягнутої арматури на середній опорі, **П'ята група (ТВМ)** - містить 2 балки із двома рівнями корозії, застосованими до всіх розтягнутих стрижнів, і в зонах середньої опори, і в зонах середини прольотів.



					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

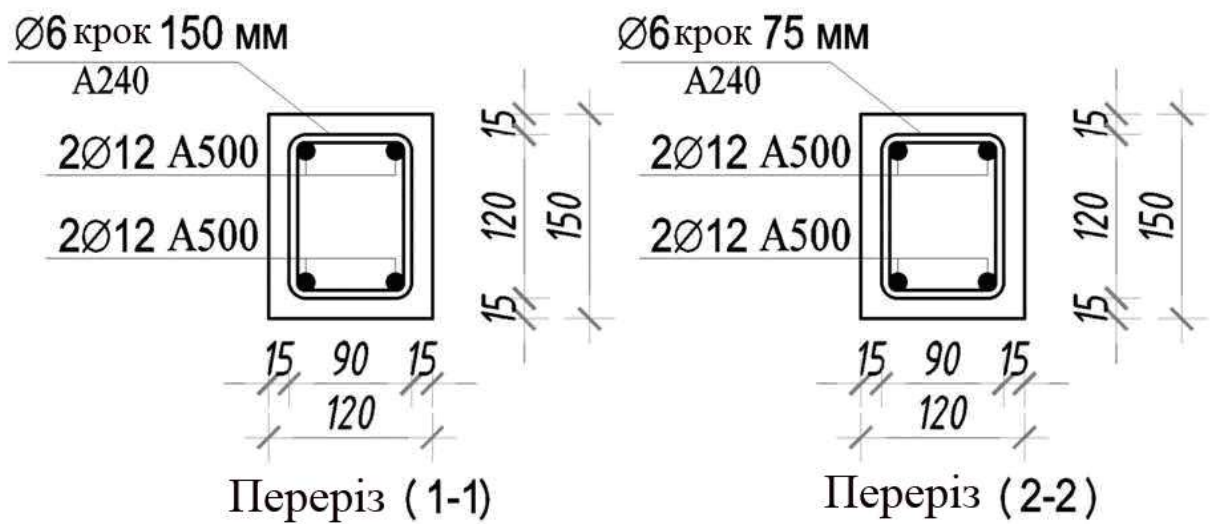
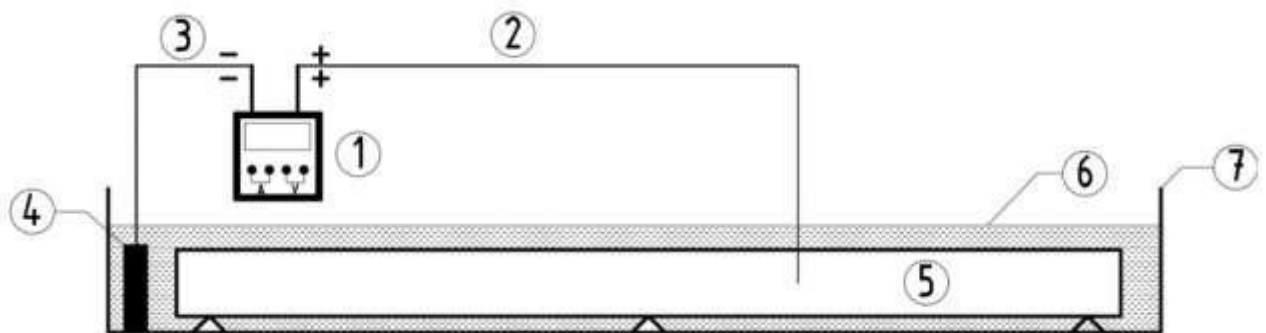


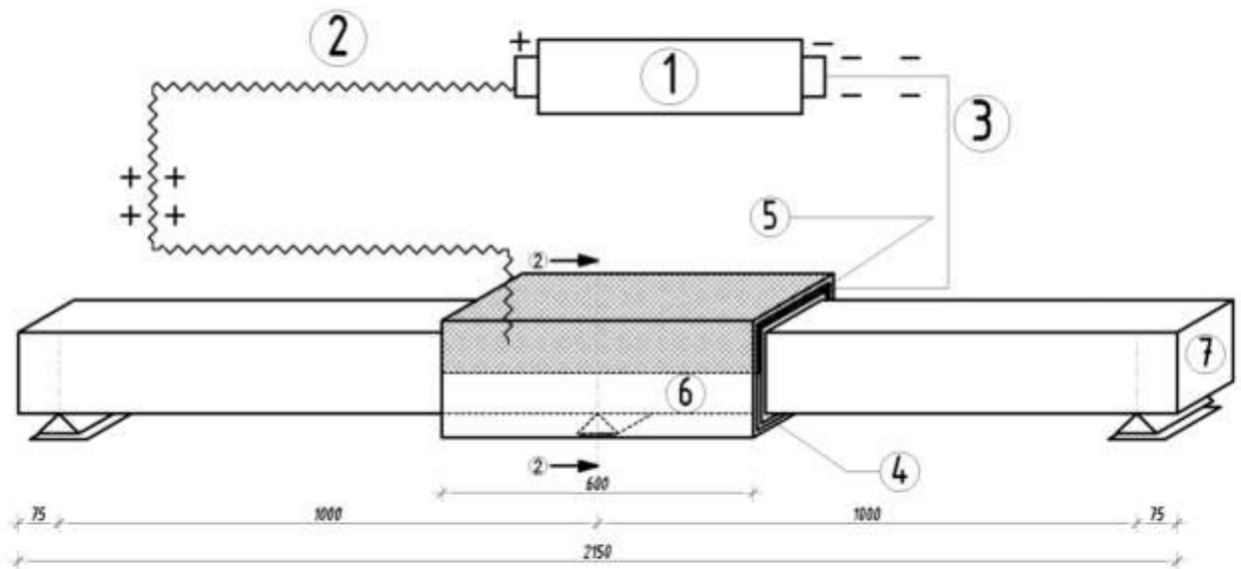
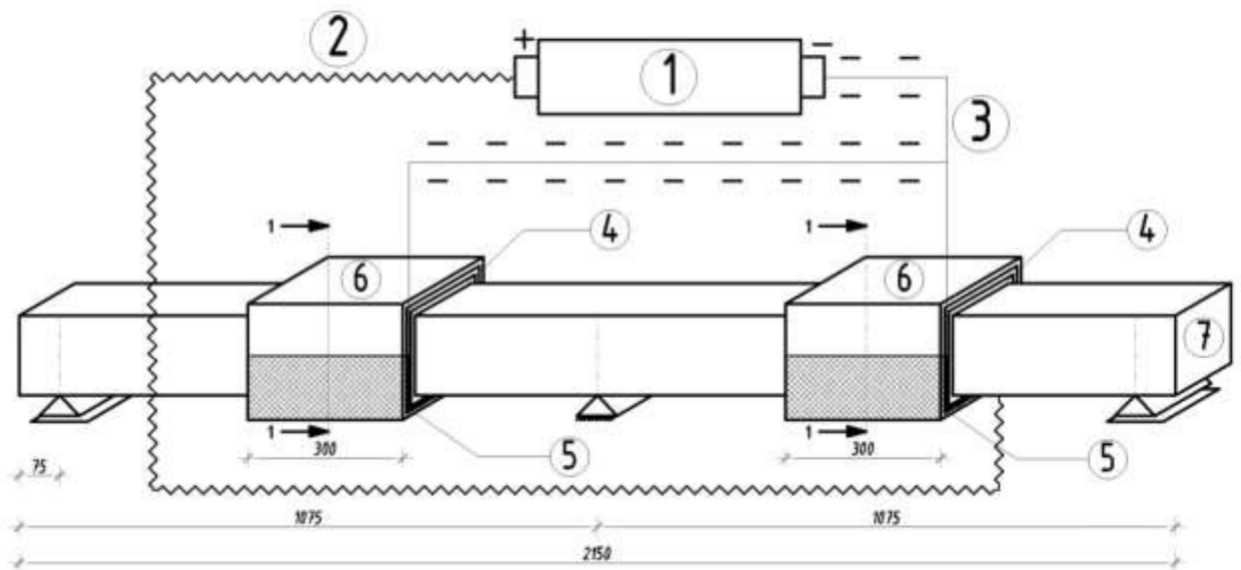
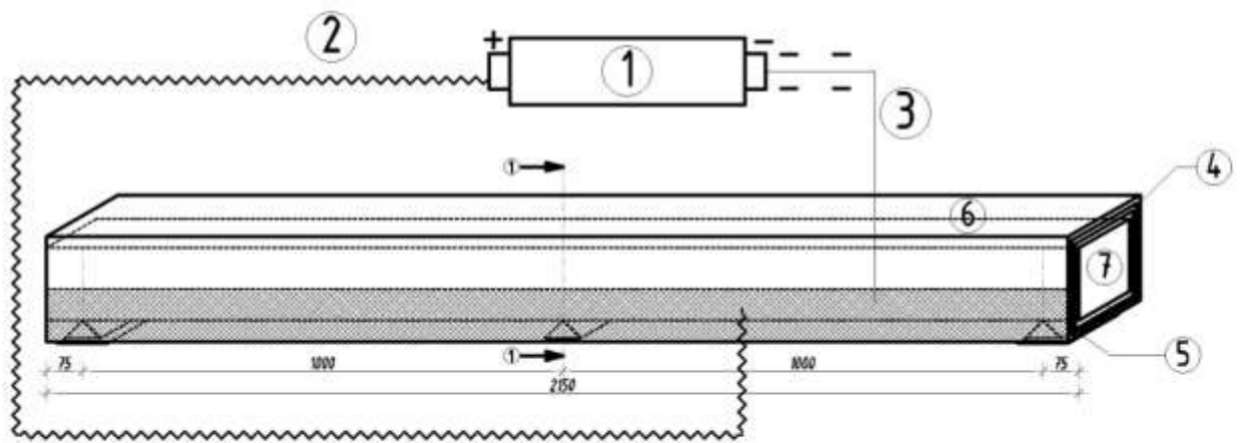
Рисунок 5 – Розрахункова схема й армування зразків

Перша стадія корозійного процесу



					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Друга стадія корозійного процесу



					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

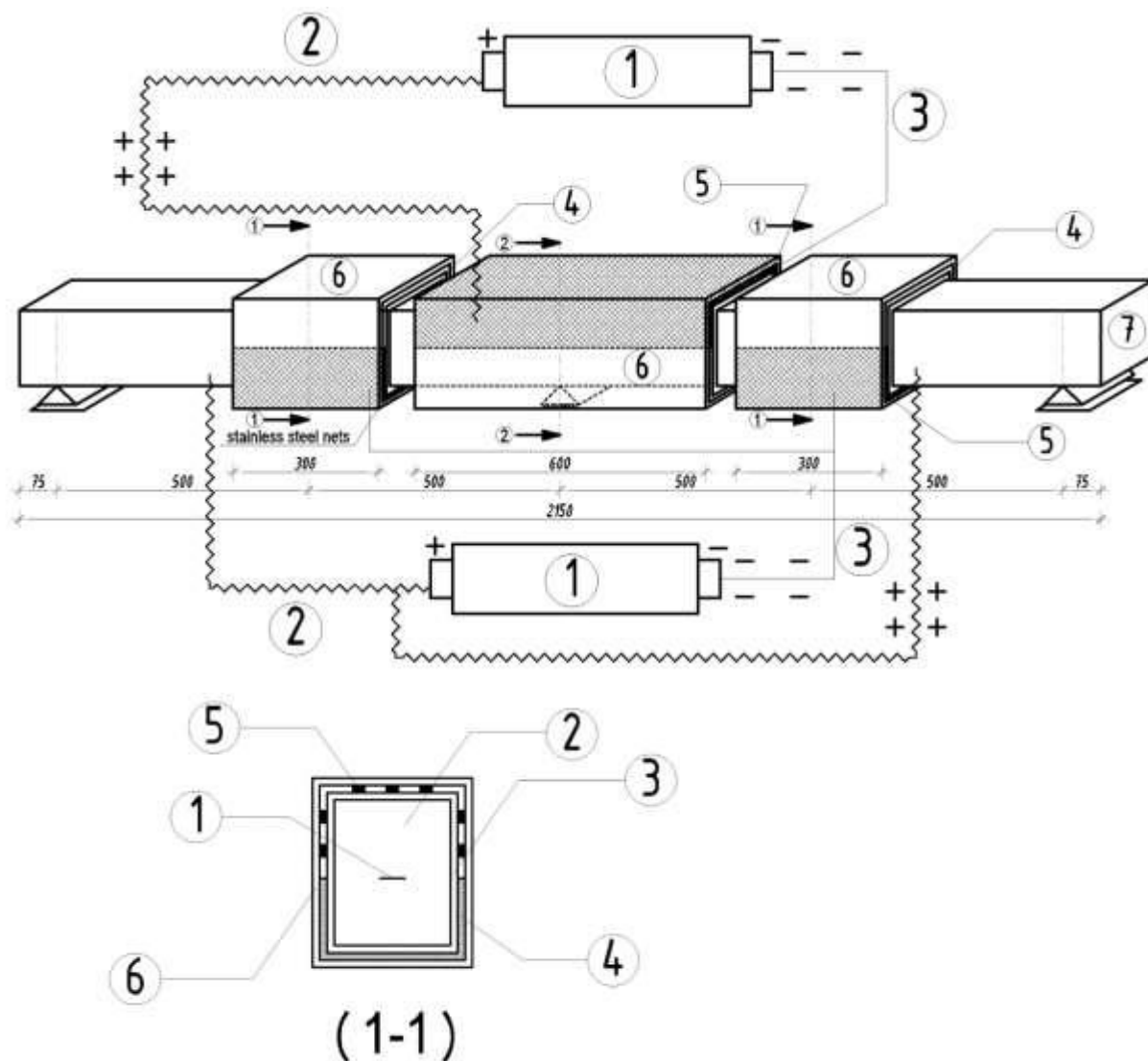


Рисунок 6 -Схема проведення корозії для груп 2, 3, 4 і 5.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Виготовлення дослідних зразків

Виготовлення прототипів статично невизначених залізобетонних балок з армуванням звичайно включає кілька етапів. У першу чергу, визначається необхідна кількість бетону й арматурної сталі на основі конструктивних вимог (рисунок 7). Потім бетонна суміш готується шляхом змішування цементу, гравію, піску й води у відповідних пропорціях. Арматурна сталь гнеться й ріжеться до необхідної довжини й форми, а потім збирається в каркас відповідно до конструктивних вимог, потім підготовлені й додані електричні дроти в місцях, де планується поява корозії, і, нарешті, додані датчики деформації для арматурної сталі (рисунок 8).

Після того, як бетон змішаний, він заливається в опалубку навколо каркаса з арматурної сталі й вібрується для видалення повітряних порожнин і гарантованого заповнення форми бетоном. Бетон залишають для твердіння й досягнення необхідної міцності протягом певного періоду часу, звичайно кілька днів. Крім того, були відлиті необхідні куби й призми й застосовані всі інструменти для визначення всіх характеристик бетону (рисунок 9).

Після того, як бетон твердне, опалубка відділяється, і отриманий прототип залізобетонної балки з армуванням зазнає різним випробуванням для її конструктивної оцінки. Ці випробування включають навантаження балки для виміру прогину й тріщин, а також випробування міцності бетону й арматурної сталі (рисунок 10).

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 7 - Арматурні каркаси в опалубці

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

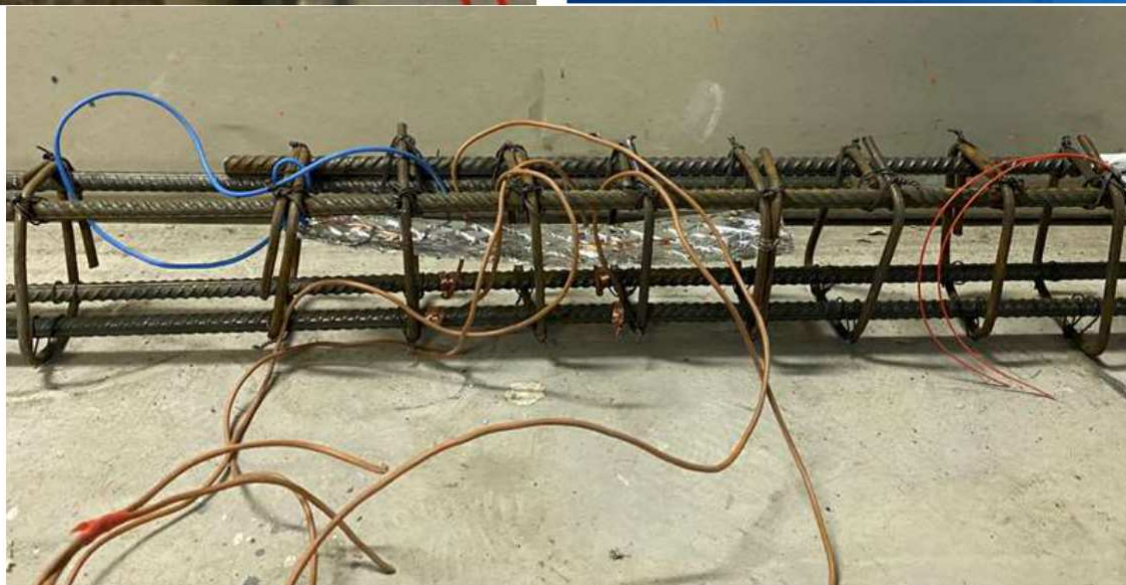
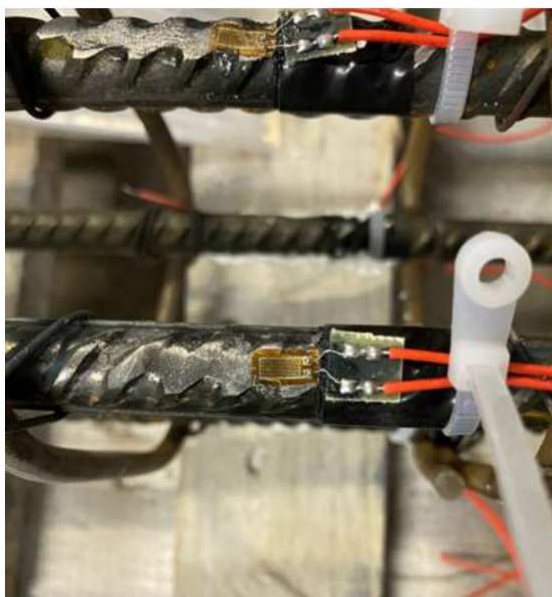


Рисунок 8 - Підготовка зразків для експерименту по корозії в дерев'яній формі

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		



Рисунок 9 -Підготовка залізобетонних балок для випробування механічних властивостей бетону перед прискореною корозією

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		



Рисунок 10 -Розпалубка дослідних зразків

Випробування дослідних зразків

Бетонна суміш складалася із цементу, щебенів, піску й води відповідно до пропорцій, зазначених у таблиці 1. Перед проведенням випробувань експериментальних зразків були протестовані контрольні куби (розміром 100x100x100 мм). Результати випробувань в таблиці 2.

Таблиця 1 Пропорція бетонної суміші для виробництва 0,4 м³ бетону В20.

Співвідношення В/Ц	Вода, кг	Цемент, кг	Пісок, кг	Щебені, кг
0,64	82	128	320	416

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 11 -Випробування бетонних кубів

Таблиця 2. Результати випробувань зразків бетонних кубів

Маркування	a (мм)	b (мм)	h (мм)	Вага (гр)	Руйнуюче навантаження, кН	Масштабний коефіцієнт	R, МПа
1	100	100	100	2280	272,9	0,95	25,93
2	98	99	100	2249	268,1		26,25
3	100	98	100	2240	240,9		23,35
4	101	100	99	2275	230,5		21,68
5	102	100	100	2388	285,8		26,62
6	100	100	100	2345	254,6		24,19
Середнє значення міцності, МПа							24.67
Нормативна міцність, МПа							22,82
Клас бетону B20							

Далі, відповідно до ДСТУ, були випробувані призми (100x100x400 мм) за допомогою тензорезисторів, приклеєних із чотирьох сторін, для визначення модуля пружності й призмочної міцності бетону.

Вид випробуваного зразка представлено на рисунку 12.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 12 - випробування зразків бетонних призм

Після визначення фактичного класу міцності були виконані випробування бетонних призм на міцність, модуль пружності й коефіцієнт Пуассона (таблиця 3 і рисунок 13). Для цього проводилися статичні навантажувальні випробування на кожну з бетонних призм. Для виміру навантаження на бічну грань кожної призми були встановлені тензорезисторів, закріплені за допомогою ціаноакрилатного клею.

Таблиця 3. Механічні характеристики бетонних призм

Середня міцність бетону (R_b), МПа	18,5
Деформації (ϵ_{u1})	0,0024
Граничні деформації (ϵ_{u2})	0,0035
Модуль пружності бетону (E_c), МПа	20887
Коефіцієнт Пуассона (ν)	0,16

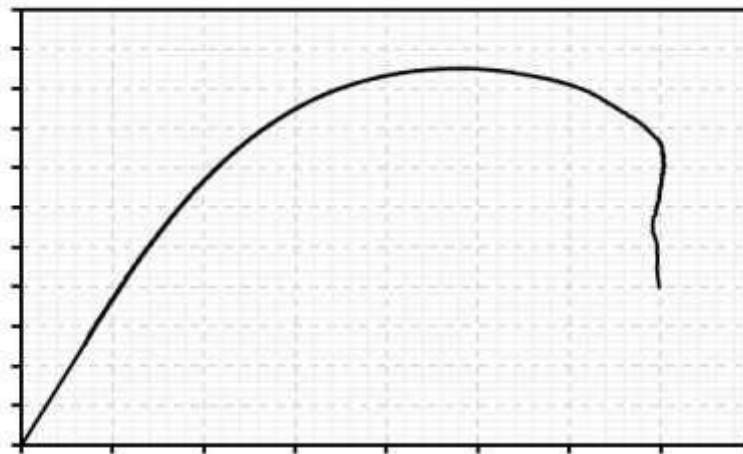


Рисунок 13 - Діаграма деформування бетонної призми при статичному навантаженні

Паралельно з випробуваннями кубів і призм були проведені випробування арматур діаметрами Ø6 мм і Ø12 мм на розтяг відповідно до норм. Значення фізико-механічних характеристик наведено в таблиці 4 і на рисунках 14 - 16. Далі, на основі фактичних характеристик міцності арматури й бетону була розрахована несуча здатність експериментальних зразків для визначення рівнів навантаження під час випробувань.

Таблиця 4 Характеристики арматурної сталі

Границя текучості, МПа	379	Межа деформація плинності	0,00191
Межа міцності, МПа	511	Гранична деформація	0,125
Модуль пружності, ГПа	200		
Середні результати для арматур діаметром 12 мм			
Границя текучості, МПа	551	Гранична деформація плинності	0,00274
Межа міцності, МПа	646	Гранична деформація	0,118
Модуль пружності стали, ГПа	201		



Рисунок 14 - Випробування арматури

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

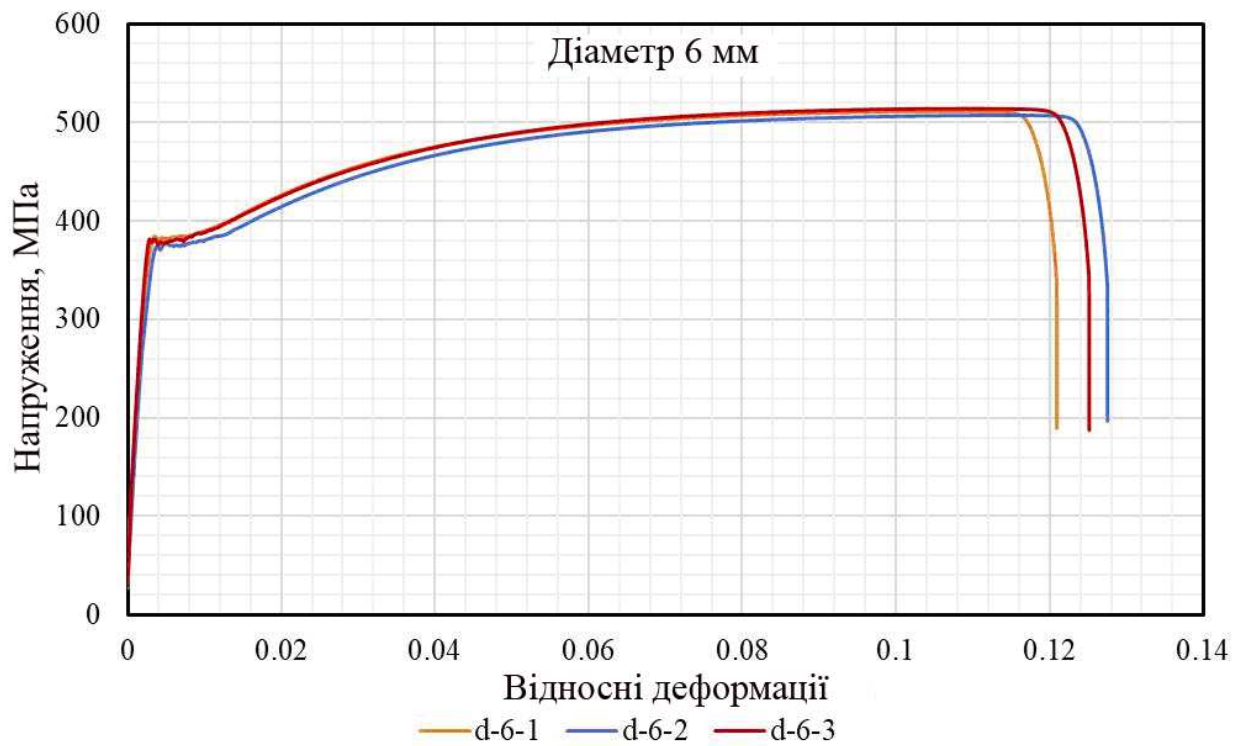


Рисунок 15 -Діаграма розтягу арматурної сталі Ø6мм А240

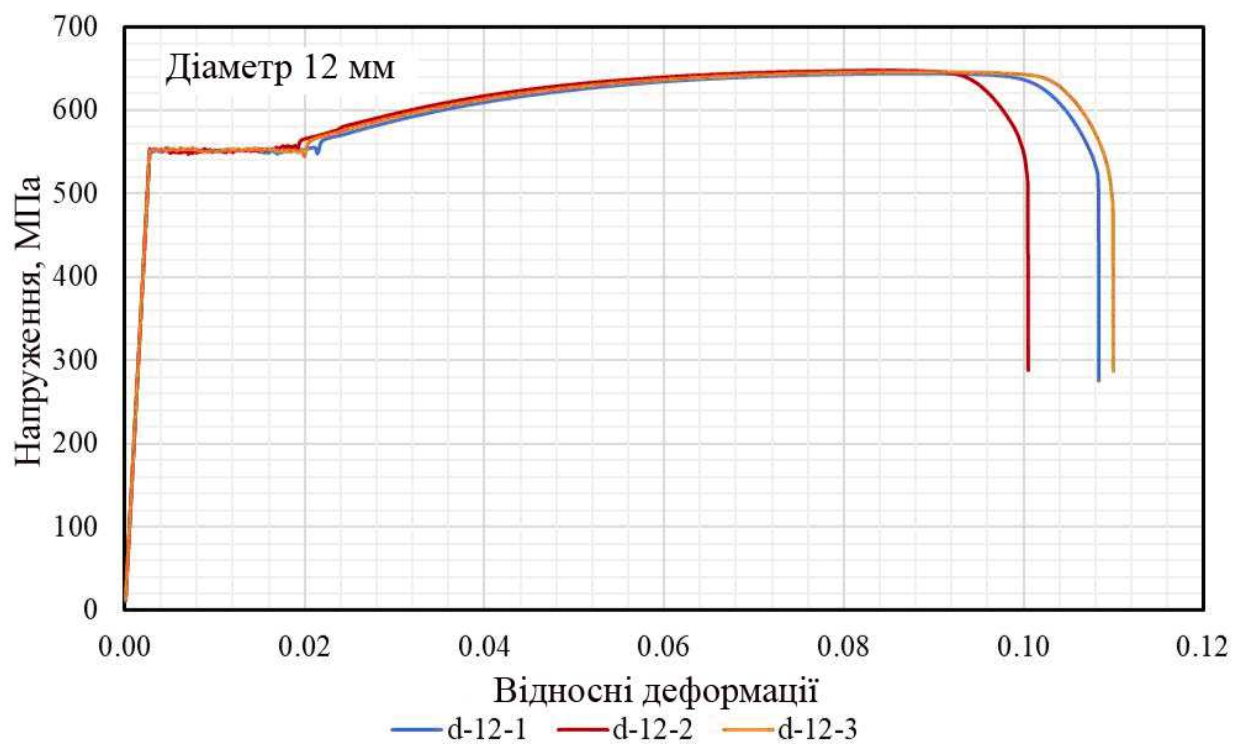


Рисунок 16 -Діаграма розтягу арматурної сталі Ø12мм А500

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Прискорені випробування зразків на корозію

Був проведений прискорений процес корозії арматурних стрижнів у певних зонах у статично невизначених залізобетонних балках. Прискорений процес корозії включав електрохімічний процес із контрольованою різницею потенціалів (з низьким струмом) між катодом, вбудованим у випробувані залізобетонні балки, і анодом, розміщеним у зовнішньому електроліті для прискорення міграції хлоридів із зовнішнього електроліту в залізобетонні балки, а також процес циклу змочування-осушення з контрольованим струмом.

Узагальнена чисельна модель кородованих і некородованих статично невизначених залізобетонних балок

Чисельне моделювання кородованих і некородованих статично невизначених залізобетонних балок з використанням ПК Abaqus є ключовим дослідженням для розуміння поведінки конструкції й наслідків, пов'язаних з руйнуванням під дією корозії. У даному розділі основна увага приділяється використанню розширених можливостей кінцево-елементного аналізу Abaqus для моделювання поведінки статично невизначених залізобетонних балок під впливом корозії. Реалізація складних моделей властивостей матеріалу й корозії в Abaqus дозволяє одержати повну виставу про складну взаємодію між корозійними ефектами й реакцією конструкції. Чисельне моделювання дозволяє досліджувати такі критичні параметри, як несуча здатність, прогини й характер тріщин, як у кородованому, так і в некородованому сценаріях.

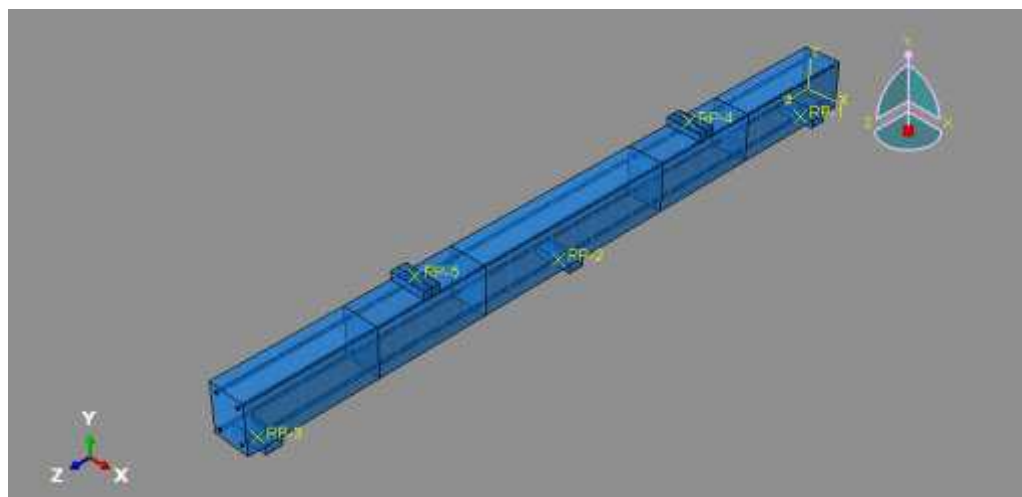
Використовуючи результати експериментальних досліджень, моделювання спрямоване на більш глибоке вивчення структурної поведінки як кородованих, так і некородованих статично невизначених залізобетонних балок. Експериментальна програма дозволила одержати цінні дані про фізичні характеристики цих балок у різних умовах, що послужило основою для наступного чисельного аналізу. Основна увага приділяється

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

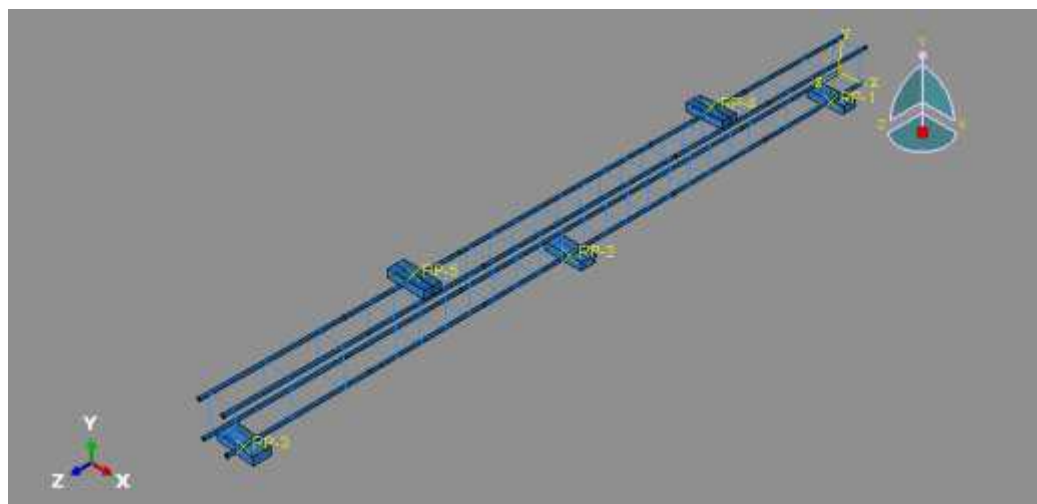
моделюванню некородованих балок, і спочатку ми докладно описуємо реалізацію моделі ушкодженої пластичності бетону в Abaqus, погоджену зі стандартними властивостями бетону. Такий підхід дозволяє ретельно досліджувати структурні характеристики й властивості некородованих залізобетонних балок, доповнюючи експериментальні дані й сприяючи всебічному розумінню матеріалів і їх поведінки в різних сценаріях корозії.

Геометричні параметри моделі

На рисунку 17 показані, що моделі для чисельного аналізу минулого сформовані відповідно до експериментально випробуваних статично невизначених залізобетонних балок. На рисунку 17а показана геометрія залізобетонної балки. На рисунку 17b показана геометрія арматури для залізобетонної балки.



(a)



(b)

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Рисунок 17 - Геометрія моделі залізобетонної балки в програмному комплексі Abaqus

Властивості матеріалів. Арматурна сталь

У якості моделі зміцнення арматури прийняте білінійне кінематичне зміцнення. Для поздовжньої арматури $\Phi 12$ мм модуль пружності сталі рівний (E_s) 201 ГПа, а коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,30$. Матеріал поводитьсся ідеально пластично до границі текучості, яка рівна $R_{sy} = 551$ МПа, після чого відбувається плинність арматури, при цьому ухвалюється зусилля розриву $R_{su} = 646$ МПа при максимальній деформації $\epsilon_u = 0,118$. Крім того, для хомутів діаметр рівним $\Phi 6$ мм, модуль пружності сталі становить (E_s) 200 ГПа, а коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,30$. Матеріал поводитьсся ідеально пластично до границі текучості, яка рівна $R_{sy} = 379$ МПа, при цьому ухвалюється зусилля розриву $R_{su} = 511$ МПа при максимальній деформації $\epsilon_u = 0,125$.

Бетон

При моделюванні некородованої статично невизначеної залізобетонної балки за допомогою Abaqus властивості матеріалу визначалися у відповідності зі стандартними характеристиками випробуваної залізобетонної балки. Властивості бетону включали модуль пружності (E_b) 20 ГПа, коефіцієнт Пуассона (ν) 0,16, щільність (ρ) 2400 кг/м³ і циліндричну міцність на стиск (f'_c) 19,74 МПа. Бетон змодельований відповідно до Європейських проектних норм з різною залежністю напруги від деформації при стиску й розтяганні, де $d\epsilon$ і dt - ушкодження бетону при стиску й розтягу, відповідно.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

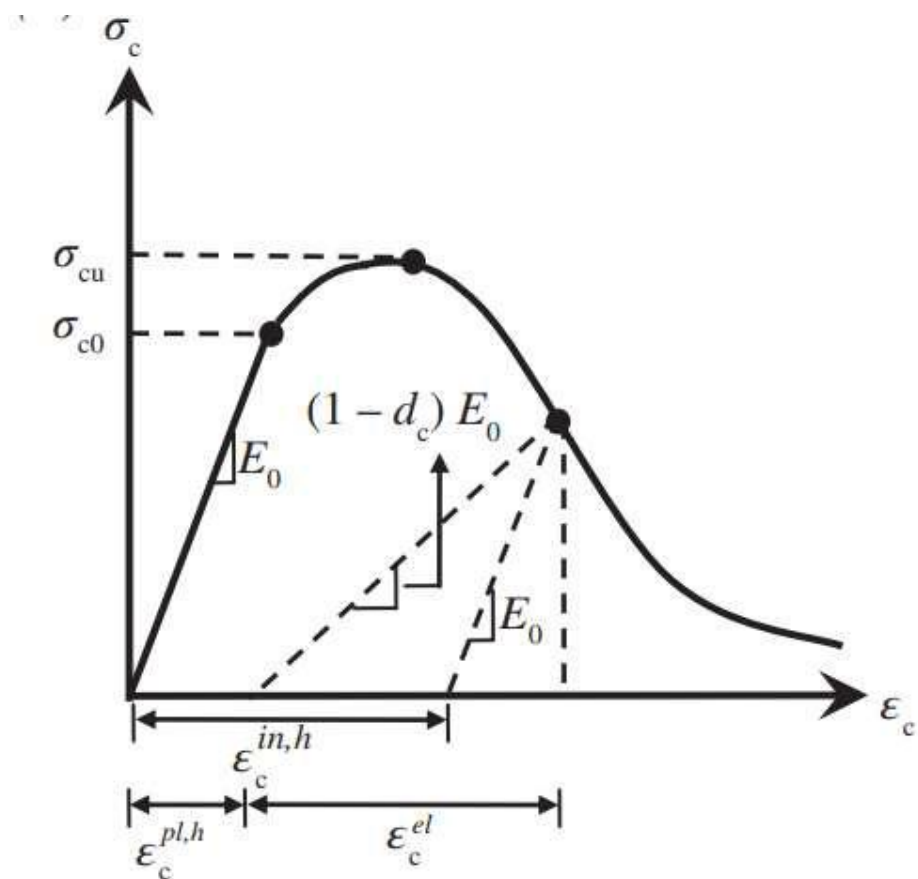


Рисунок 18 - Діаграма деформування бетону при стиску

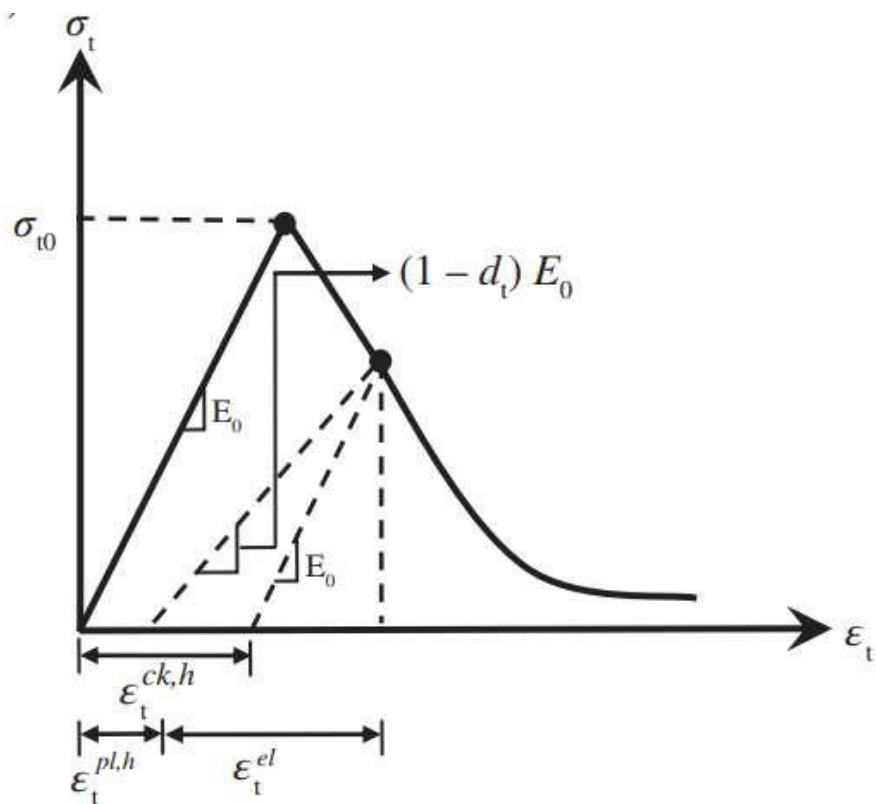


Рисунок 19 - Діаграма деформування бетону при розтягу

Для відбиття складної нелінійної поведінки бетону при різних умовах навантаження була використана модель ушкодженої пластичності бетону (CDP), наявна в Abaqus. Ця модель бетонного матеріалу дозволяє реалістично представити реакцію бетону на стискаюче й розтягувальне навантаження й містить у собі такі параметри, як міцність на стиск і розтяг, параметри зміцнення й параметри ушкодження.

Пластична поведінка бетону була охарактеризована за допомогою моделі матеріалу Concrete Damaged Plasticity (CDP). Ця модель ураховує в аналізі ушкодження бетону при стиску й розтягу, використовуючи моделі механіки руйнування, такі як гіперболічна потенційна функція пластичного плину Друкера-Прагера. Спеціально розроблена для моделювання квазіхрупких матеріалів, модель матеріалу CDP є надійним вибором. Більш докладні відомості про тонкощі моделі матеріалу CDP можна знайти в існуючих роботах. Для коректного застосування моделі CDP необхідно встановити наступні параметри:

- Розглядався діапазон значень кута дилатації ($10^\circ \leq \psi \leq 40^\circ$), при цьому в даному дослідженні було обране значення $\psi = 36^\circ$. Проведений аналіз свідчить про сприятливі результати, коли кут дилатації перебуває в діапазоні від 30° до 40° . Більше того, при різних значеннях кута дилатації в зазначеному діапазоні спостерігалися мінімальні варіації, про що свідчать попередні дослідження.

- При аналізі враховувався ексцентриситет потоку пластичного потенціалу, позначуваний як (ϵ), причому в даному дослідженні було обране значення $\epsilon = 0,1$, яке є значенням за замовчуванням. Наступне підтвердження показало, що значення за замовчуванням дає задовільні результати, що підтверджене в попередніх дослідженнях.

- Параметр, що представляє собою відношення напруг двохосьового й одноосьового плину при стиску, позначуваний як σ_{b0}/σ_{c0} , розглядався в дослідженні, при цьому обране значення $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}=1,16$, що відповідає значенню за замовчуванням. Наступне підтвердження показало,

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

що значення за замовчуванням дає задовільні результати, що підтверджується результатами попередніх досліджень.

- У дослідженні розглядався параметр, що представляє собою відношення величини відхиляючих напруг при розтягу й стиску, позначуваний як K , при цьому обране значення $K=0,666$ відповідає значенню за замовчуванням. Наступне підтвердження показало, що значення за замовчуванням дає задовільні результати, що підтверджується попередніми дослідженнями. Всебічний аналіз впливу цього параметра показав, що його вплив на результати незначно. Крім того, було показано, що більше значення K приводить до більш твердої моделі.

- У дослідженні враховувався параметр в'язкості μ , введений для полегшення збіжності розв'язку, при цьому обране значення $\mu=0,0002$. Такий вибір узгодиться з рекомендацією, згідно з якою для оптимальної збіжності параметр в'язкості повинен становити приблизно 15% від збільшення часу.

Кінцево-елементна сітка

Залізобетонна балка й поздовжня арматура дискредитовані за допомогою твердотільних кінцевих елементів C3D8R. Кожний елемент складається з 8 вузлів, розташованих по кутах, з використанням функцій лінійної інтерполяції й зниженого інтегрування. Арматурна сітка хомутів представлена кінцевим елементом T3D2, що мають два вузли на кінцях. Розміри елементів сітки залізобетонної балки становлять $5 \times 5 \times 5$ мм, а довжина кінцевих елементів арматури - 5 мм. Для зони бетону, що стикається з поздовжньою арматурою, була розроблена спеціальна техніка сітки. При таких прийнятих розмірах кінцевих елементів усі моделі балок містять у собі 502240 кінцевих елемента й 570049 вузлів (рисунок 20).

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

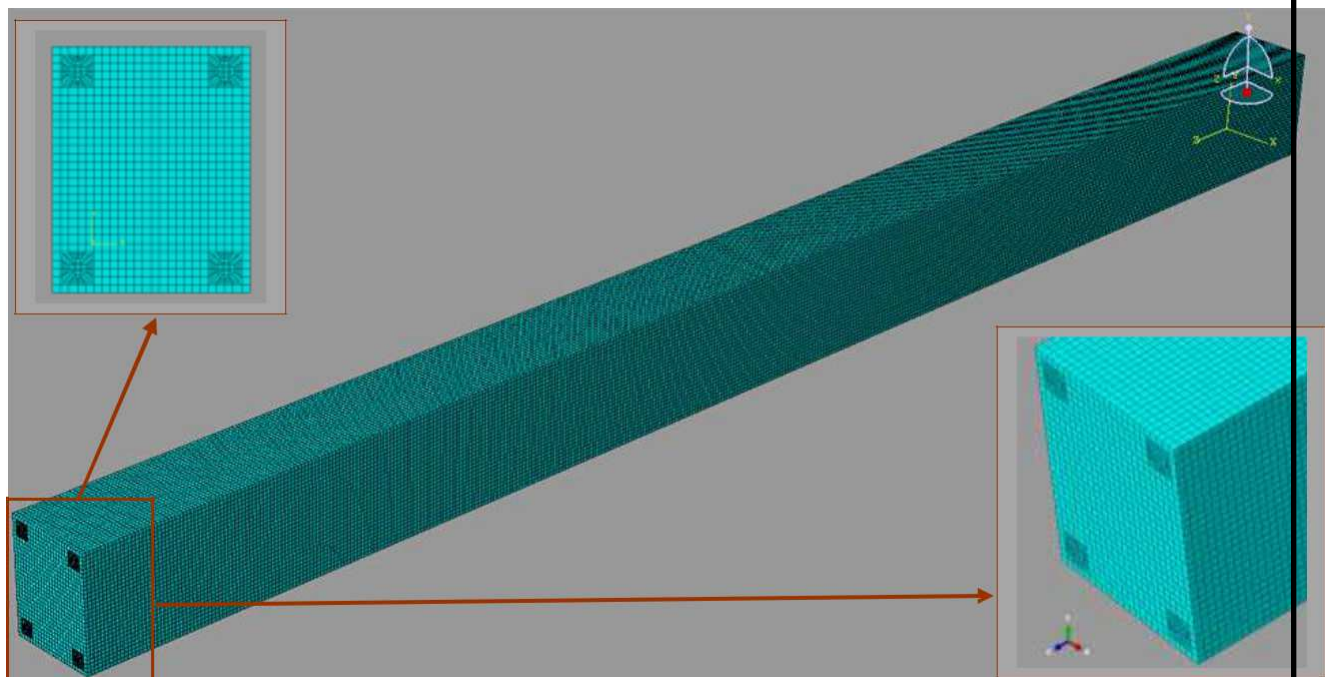


Рисунок 20 – КЕ сітка залізобетонної балки

Граничні умови й навантаження

У відповідності із програмою експерименту, у процесі моделювання були відтворені граничні умови для навантажень. У середній опорі двопрогінної залізобетонної балки моделювалася шарнірна опора шляхом обмеження зсувів вузлів кінцевого елемента в трьох ортогональних напрямках. Додатково моделювалися рухливі опори на відстані 75 мм від кожного кінця балки шляхом обмеження переміщень вузлів балки перпендикулярно осі балки (зокрема, у напрямку глобальної системи координат). Навантаження інтенсивністю 95 кН у кожному прольоті прикладається до верхньої поверхні балки на ділянці розміром 50×120 мм у середній точці прольоту. При такій конфігурації загальне навантаження на модель залізобетонної балки становить 190 кН, як показано на рисунку 21.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

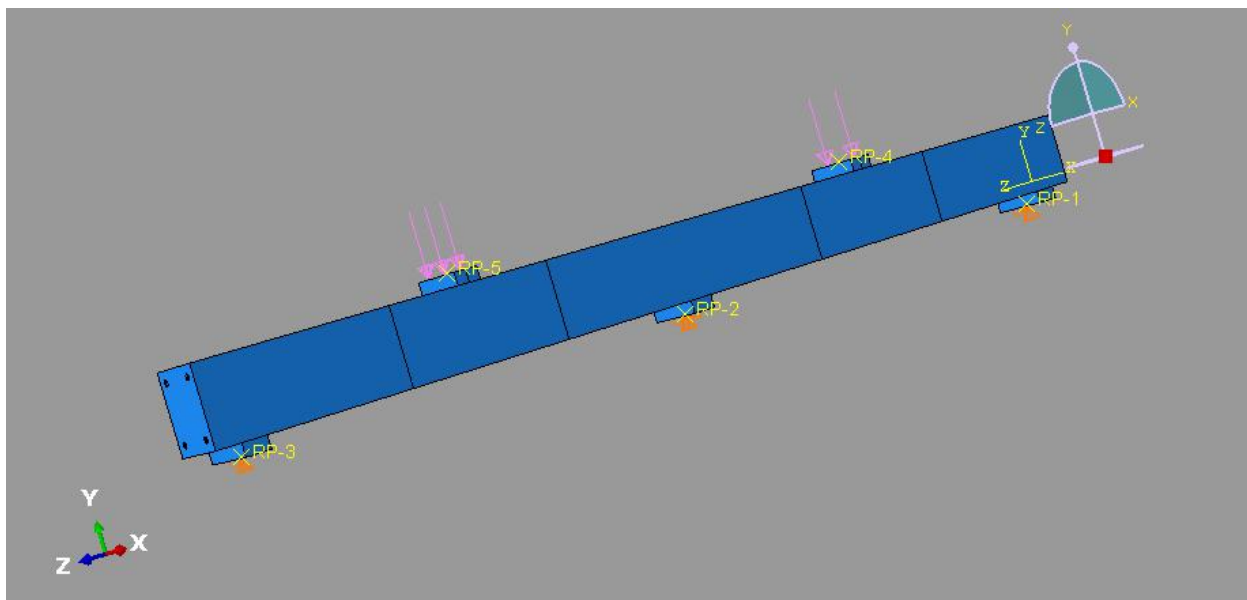


Рисунок 21 - Граничні умови й прикладене навантаження

Взаємодія між елементами

Велика увага була приділена процесу опису різних взаємодій між елементами, що беруть участь у створенні моделі (бетон, хомути й поздовжня арматура). Тому опис взаємодій між цими елементами має вирішальне значення для деталізації корозії, включаючи її місце розташування й ступінь у даній моделі.

Взаємодія між поздовжньою арматурою й бетоном

В Abaqus моделюється адгезійна поведінка (cohesive behavior) для визначення поведінки зчеплення-ковзання між кородованою арматурою й навколишнім бетоном. При такому підході до моделювання для імітації зв'язку й поведінки між поздовжньою арматурами й навколишнім бетоном використовується адгезійна поведінка з ушкодженням. Взаємодія адгезійної поведінки враховує розтягувальні й зсувні зусилля на границі розтягу, що дозволяє точно представити взаємодію між поздовжньою арматурою й бетонною матрицею. Адгезійна поведінка з ушкодженням забезпечує моделювання зародження, поширення й закриття тріщин, що дозволяє одержати уяву про реакцію конструкції при різних умовах навантаження.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Завдяки реалізації адгезійної поведінки з ушкодженням модель ефективно відтворює характеристики зв'язку між поздовжньою арматурою й бетоном, забезпечуючи комплексне розуміння їх взаємодії в рамках конструкції. Крім того, адгезійна поведінка дозволила змодельовати місце й ступінь деградації, викликаний корозією зв'язку, що впливає на міцність, між бетоном і кородованою поздовжньою арматурою.

Зчеплення визначає “linear elastic traction separation” відповідно до формул. Вектор “traction” 't' складається з однієї нормальної (з підрядковим індексом 'n') напруги й двох зсувних напруг (з підрядковими індексами 's' і 't'), а вектор 'δ' являє собою поділ (або проковзування), відповідно до вектора “traction”.

Моделювання взаємодії при адгезійній поведінці, що всебічно враховує ключові параметри, що впливають на міцність зв'язків між бетонами в кородованому і некородованому сценаріях, було розраховано за допомогою формул. Розрахунки були повторені для корозії, рівною 0, 20% і 30% відповідно. Слід зазначити, що при нульовому рівні корозії зв'язок не порушується, тобто при $\eta = 0$, $(\sqrt{f_c})\eta = \sqrt{f_c}$; а при повній корозії стрижня міцність зв'язків дорівнює нулю, тобто при $\eta = 1$, $(\sqrt{f_c})\eta = 0$. На рисунках 22 і 23 показана взаємодія зв'язку між поздовжньою арматурою й бетоном.

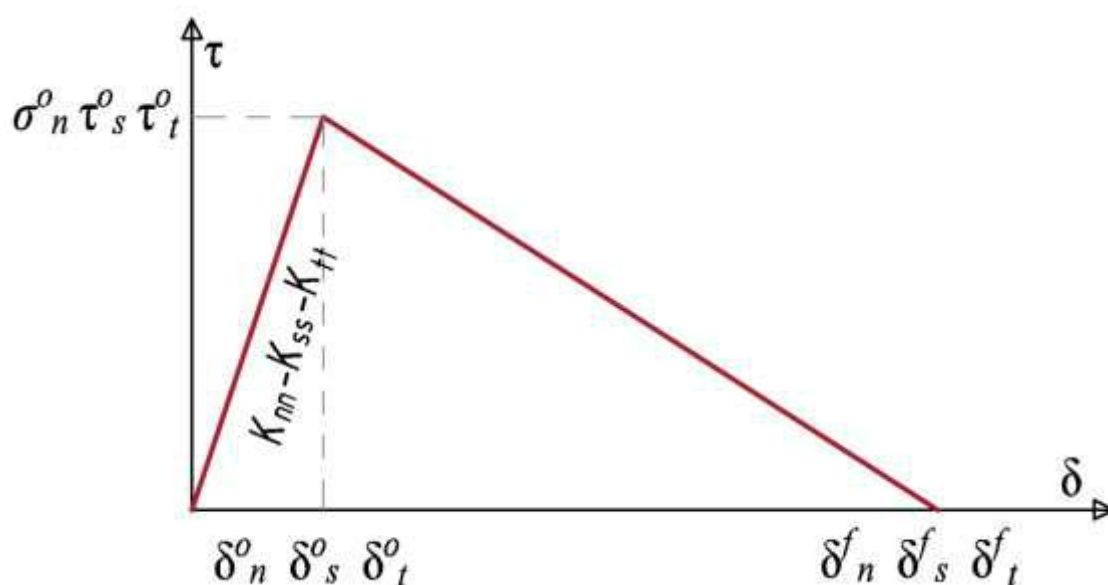


Рисунок 22 - Білінійний закон зчеплення в Abaqus

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

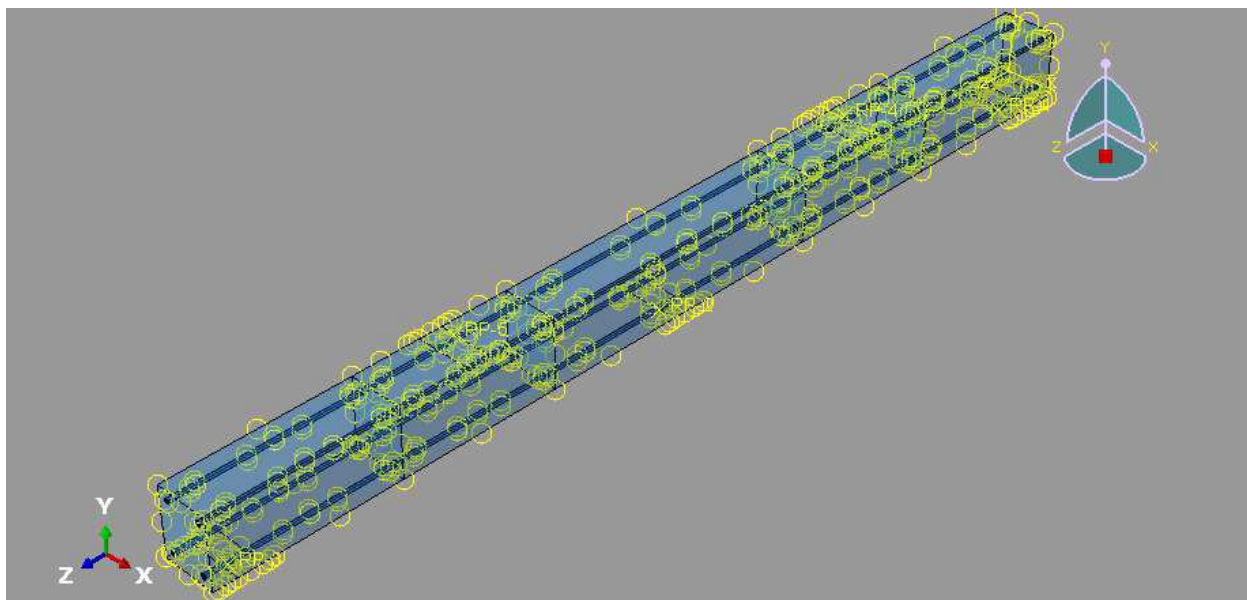


Рисунок 23 - Зчеплення між поздовжньою арматурою й бетоном

Напруга сколювання розглядається як постійний, рівномірний тиск, що розширюється назовні, надаваний на поверхню арматури залежно від рівня корозії. Напруги відколів або тиск (P_{cor}) навколо арматур визначаються по формулах .

Порівняльний аналіз отриманих результатів

Проводиться поглиблений порівняльний аналіз результатів, отриманих як у ході експериментальних досліджень, так і в ході чисельного моделювання в Abaqus/Standard. Основною метою такого порівняльного аналізу було підтвердження правильності обраних кінцевих елементів і моделей матеріалів для бетону й стали. Цей ретельний аналіз служить для створення впевненості у вірогідності чисельної моделі, забезпечуючи її обґрунтованість і надійність у відбитті складної поведінки нерозрізних балок. Перевірка чисельної моделі на відповідність експериментальним результатам дозволяє створити надійну й перевірену розрахункову схему. Така валідована модель має значну корисність, оскільки може бути ефективно використана для наступного параметричного аналізу досліджуваної проблеми, що дозволяє відмовитися від проведення ресурсномістких і дорогих

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

експериментальних випробувань. Такий підхід закладає основу для всебічного вивчення й підвищує ефективність подальших чисельних досліджень.

На рисунках 24 і 25 представлено комплексне порівняння експериментальних даних з результатами, отриманими за допомогою чисельної моделі, з особливим акцентом на співвідношення між навантаженнями й деформаціями в досліджуваних балках. У цілому, криві залежності навантаження - прогин, отримані за допомогою чисельної моделі, повністю повторюють експериментальні криві. Такий збіг тенденцій свідчить про сильну згоду між результатами, отриманими за допомогою чисельного аналізу, і експериментальними даними. Примітно, що чисельна модель ефективно відбиває граничне навантаження, демонструючи задовільний збіг з експериментально отриманими результатами. Сумісність, спостережувана у всіх цих аналізах, підтверджує надійність і точність чисельної моделі при моделюванні складної поведінки випробуваних балок.

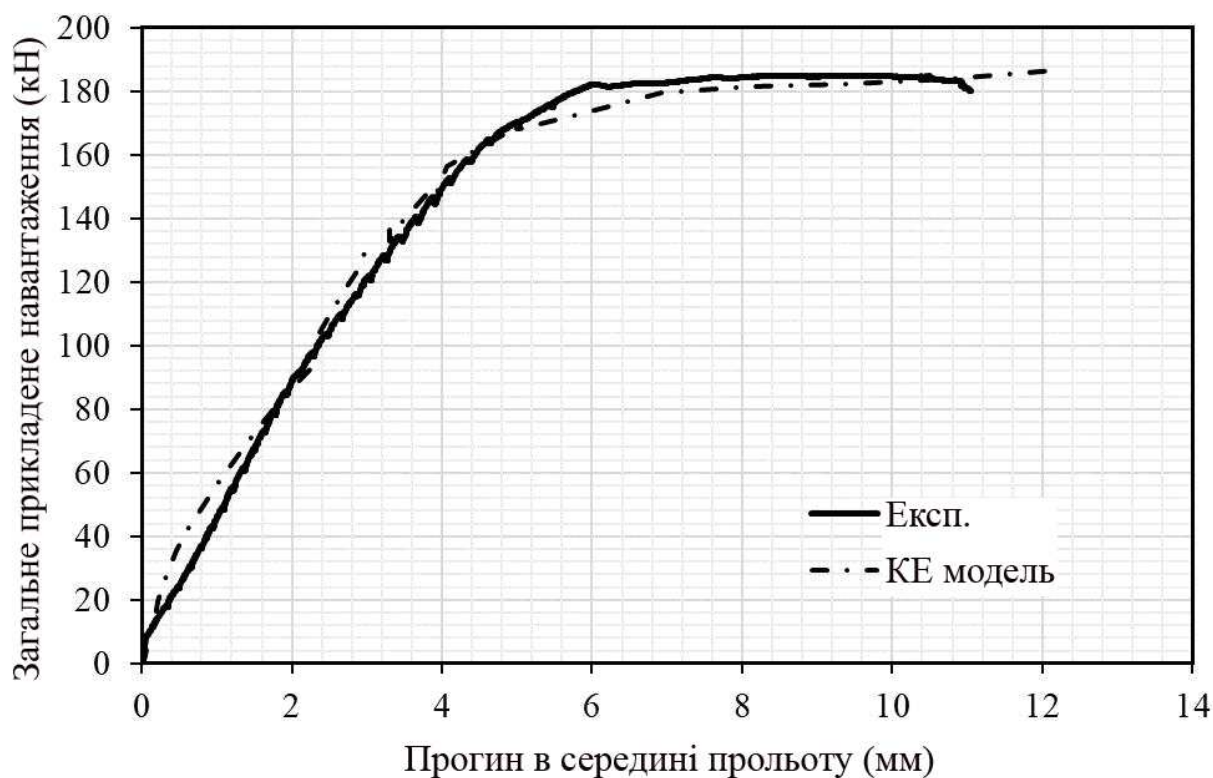


Рисунок 24- Характеристики КЕ для контрольного зразка балки (ВС) у другому прольоті

					БЗБ 24. ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата			

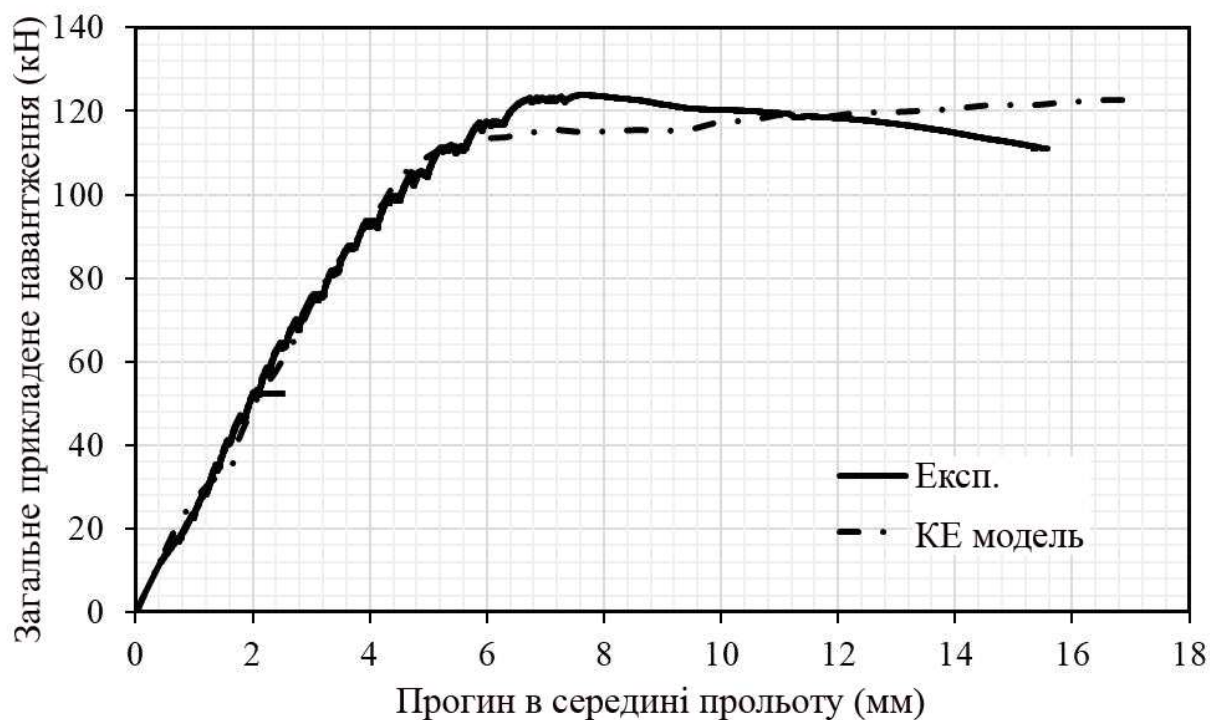


Рисунок 25 - Характеристики КЕ для балки МО-30 у другому прольоті

Чисельне дослідження пролило світло на вплив корозії на поздовжню арматуру, виявивши помітне зниження граничної напруги розтягу (рисунки 26 і 27). У міру розвитку процесу корозії порушувалася структурна цілісність поздовжньої арматури, що приводило до зниження її міцності на розтяг. Чисельне моделювання ефективно відбило це явище, викликане корозією, продемонструвавши тенденцію до зменшення граничної напруги розтягу як прямий наслідок корозії поздовжньої сталі. Погіршення механічних властивостей арматури під дією корозії, зокрема, її здатності протистояти розтяжним зусиллям, підтверджує важливість обліку корозійних ефектів у структурному аналізі. Ці дані, отримані в результаті чисельного дослідження, подають цінну інформацію для розуміння уразливості конструкції, пов'язаної з корозією поздовжньої арматури, і підкреслюють важливість обліку корозії в залізобетонних конструкціях.

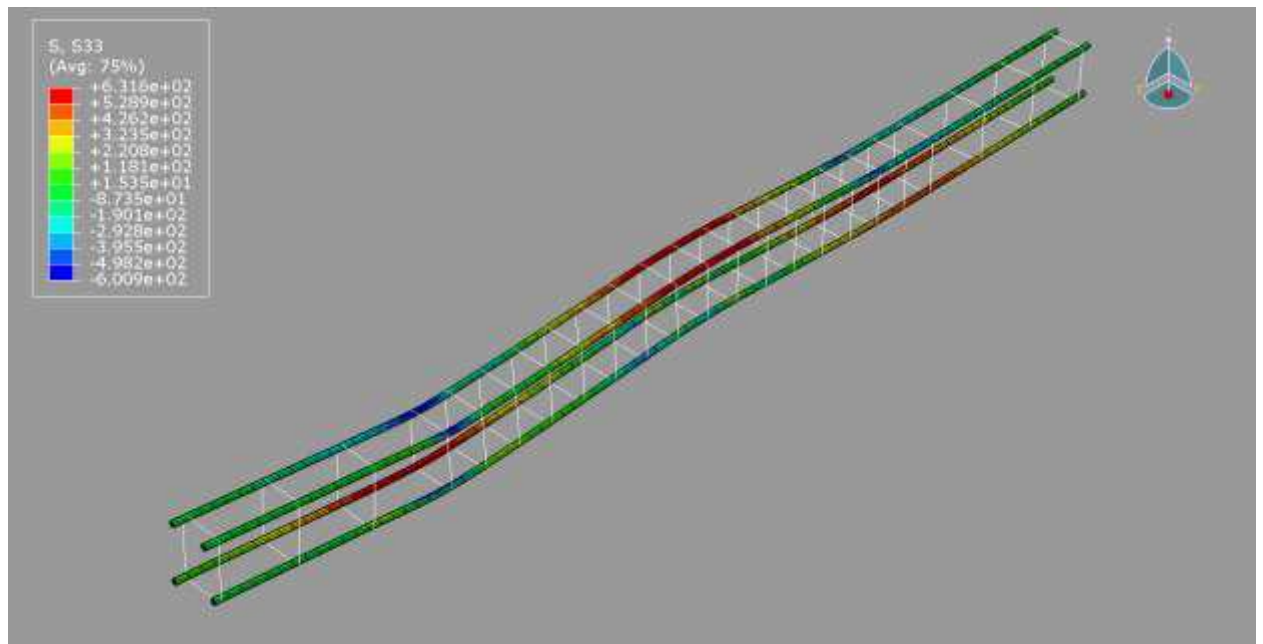


Рисунок 26 - Епюра поздовжніх напруг в арматурах для контрольного зразка балки

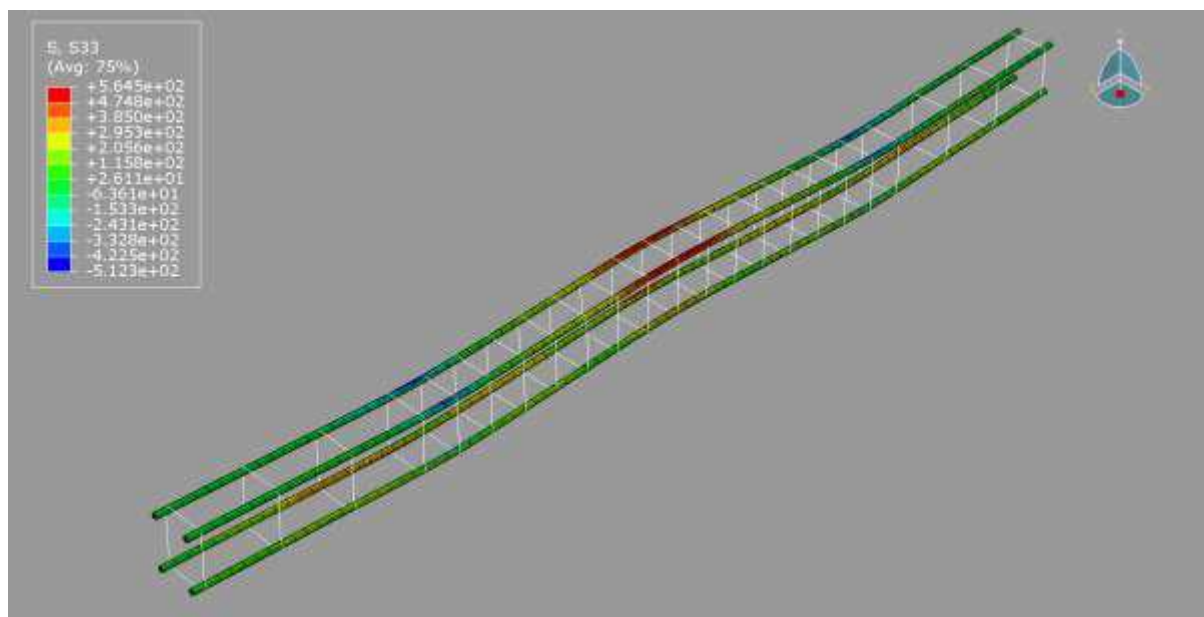
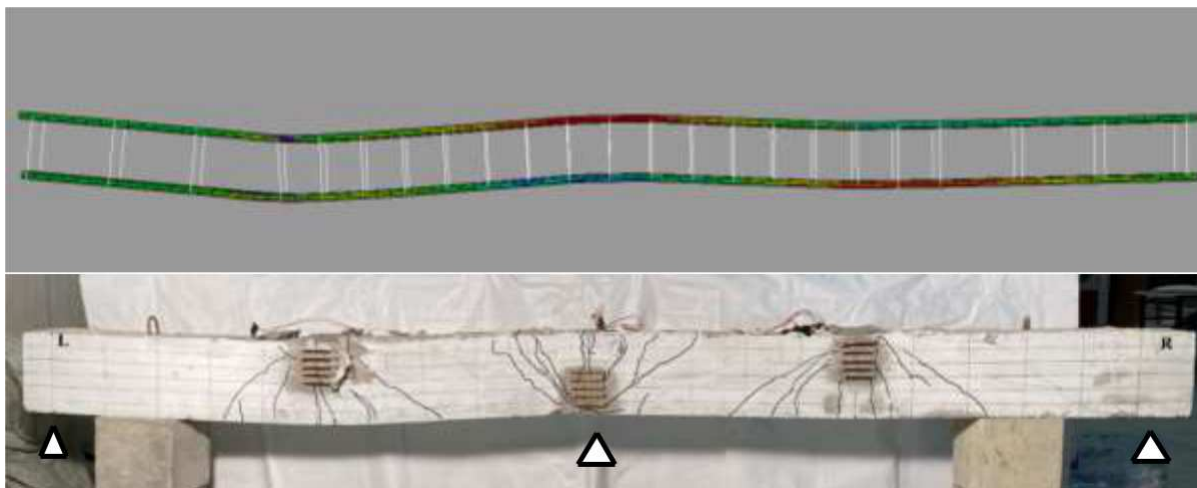
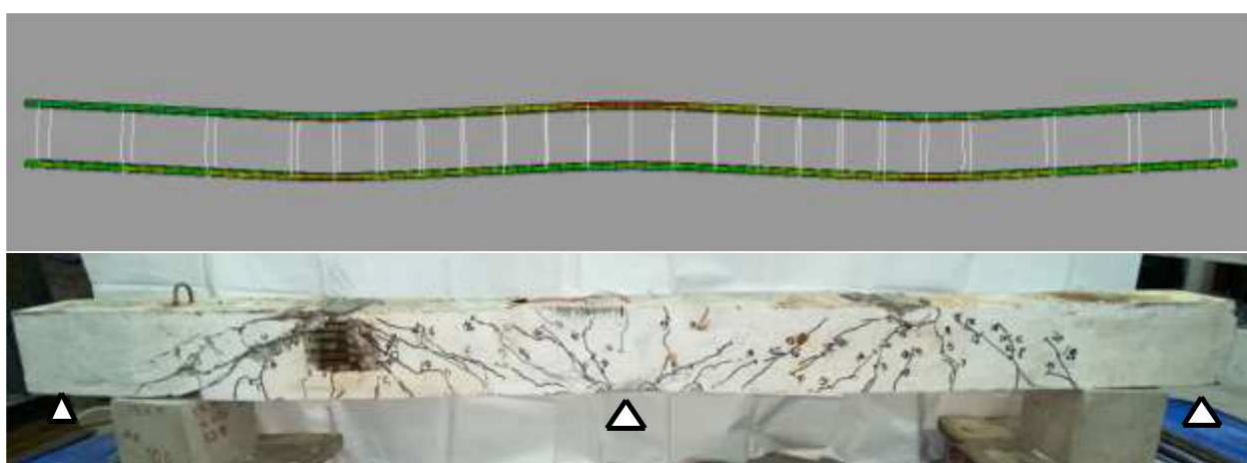


Рисунок 27 - Епюра поздовжніх напруг в арматурі для балки (МО-30) у прольотах



Контрольна балка



Балка (МО-30) корозія в прольотах

Рисунок 28 - Схеми руйнування залізобетонних балок

Рисунок 23 наочно ілюструє ефективність чисельних моделей у моделюванні складної поведінки випробуваних статично невизначених залізобетонних балок. Ці комплексні уяви не тільки відбивають загальну реакцію конструкції, але й дозволяють зрозуміти всі нюанси роботи системи. Крім того, на рисунку 23 показано, як чисельні моделі ефективно відбивають зчеплення між поздовжньою арматурою й бетоном, з особливою увагою до наслідків корозії. Візуалізовані зображення відбивають еволюцію цього зв'язку під впливом корозії, пропонуючи докладний погляд взаємодії елементів конструкції в процесі деградації.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт перерозподілу моментів у статично невизначених залізобетонних конструкціях з використанням моделей машинного навчання

Традиційні аналітичні методи прогнозування перерозподілу моментів часто опираються на складні математичні формулювання, які можуть не відбивати складну нелінійну поведінку, властиву залізобетонним конструкціям. Незважаючи на розвиток обчислювальних методів, зберігаються проблеми, пов'язані з точним моделюванням і прогнозуванням перерозподілу моментів. Такі фактори, як неоднорідність матеріалу, нелінійна поведінка й складні умови навантаження збільшують складність цього завдання прогнозування.

Прагнення до створення більш точних і ефективних методик прогнозування привело до вивчення моделей машинного навчання як потужного інструменту в області будівельної інженерії. Моделі машинного навчання, здатні виявляти складні закономірності в даних, являють собою перспективний шлях для вирішення проблем, пов'язаних з обмеженнями традиційних методів. Почата спроба використовувати потенціал машинного навчання, зокрема штучної нейронної мережі (ШНМ), для розрахунків перерозподілу моментів у статично невизначених залізобетонних конструкціях.

Збір і попередня обробка даних, використовуваних для побудови моделі машинного навчання

В таблиці докладно представлені експериментальні дані, які будуть використовуватися для створення моделей на основі машинного навчання, застосовуваних для прогнозування коефіцієнтів перерозподілу моментів (β) у статично невизначених залізобетонних конструкціях. Дані були зібрані з різних джерел, включаючи експериментальні дослідження. Після збору даних були використані методи попередньої обробки для їхнього очищення й підготовки до аналізу. Цей процес містив у собі видалення всіх відсутніх або

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

неактуальних даних, перетворення даних у підходящий для аналізу формат і нормалізацію даних для забезпечення однакового масштабу всіх характеристик. Результати тестування бази даних відповідали наступним критеріям. Були відібрані тільки двопрогінні статично невизначені залізобетонні балки або рами і відбиралися тільки статично невизначені залізобетонні конструкції, що зруйнувалися під дією згинального моменту при вигині.

Висновки

1. Характеристики зчеплення між арматурою й бетоном були оцінені й кількісно виражені за допомогою інструмента Cohesive Behavior Tool в Abaqus. Була змодельована поведінка інтерфейсу зчеплення, а також зафіксована взаємодія й передача зусиль між арматурою й навколишнім бетоном.

2. Порівняння між чисельним моделюванням і фактичними експериментальними даними вказує на високий рівень відповідності й точності. Ця згода підкреслює надійність і ефективність даного методу кінцевих елементів у прогнозуванні поведінки кородованих статично невизначених залізобетонних балок.

3. Розроблена модель, що включає 12 параметрів, досягла високої точності розрахунків при прогнозуванні перерозподілу моментів. Її середня абсолютна помилка становить 0,237, що перевершує попередні моделі щодо цього. Це вказує на те, що модель здатна точно оцінити ступінь перерозподілу моментів у статично невизначених залізобетонних балках.

4. Для підвищення доступності й зручності користувачів була розроблений застосунок, що забезпечує зручний доступ до прогностичних функцій моделі для перерозподілу моментів. Цей застосунок дозволяє користувачам легко вводити відповідні параметри й одержувати точні прогнози для перерозподілу моментів у залізобетонних балках. Забезпечуючи доступ до моделі через зручний інтерфейс, спрощує процес для інженерів і дослідників, дозволяючи їм ефективно використовувати прогностичні

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

можливості моделі, не вимагаючи спеціалізованого програмування або технічних знань.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Охорона праці

3.1 Монтажні роботи

На ділянках (захватках), де ведуться монтажні роботи, забороняється виконання інших видів робіт і перебування сторонніх осіб.

При зведенні будівель і споруд заборонено виконання робіт у тій самій секції (захватці, ділянці) на поверхах (ярусах), над якими здійснюється переміщення, установка та тимчасове закріплення елементів збірних конструкцій або обладнання.

Способи стропування конструкцій та обладнання мають забезпечувати їх подачу в положенні, максимально близькому до проектного. Підйом збірних залізобетонних конструкцій без монтажних петель або міток, що унеможлиблюють неправильне стропування, забороняється.

Стропування слід виконувати за допомогою вантажозахоплювальних засобів, які відповідають вимогам п. 7.4 (рис. 29) та дозволяють дистанційну розстроповку з робочого горизонту, якщо висота до замка вантажозахоплювального засобу перевищує 2 м.

Монтаж сходових маршів і майданчиків повинен виконуватися одночасно з монтажем основних конструкцій будівлі (рис. 30). Після встановлення сходових маршів необхідно одразу монтувати огороження.

При переміщенні конструкцій або обладнання слід забезпечувати відстань по горизонталі не менше 1 м, а по вертикалі – не менше 0,5 м від виступаючих частин інших конструкцій або обладнання.

Кути відхилення вантажних канатів та поліспастів під час монтажу не повинні перевищувати значень, зазначених у паспорті або технічних умовах на цей вантажопідйомний засіб.

Заборонено перебування людей на конструкціях або обладнанні під час їх підйому чи переміщення. Під час перерв у роботі не допускається залишати підняті елементи конструкцій у висячому положенні.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

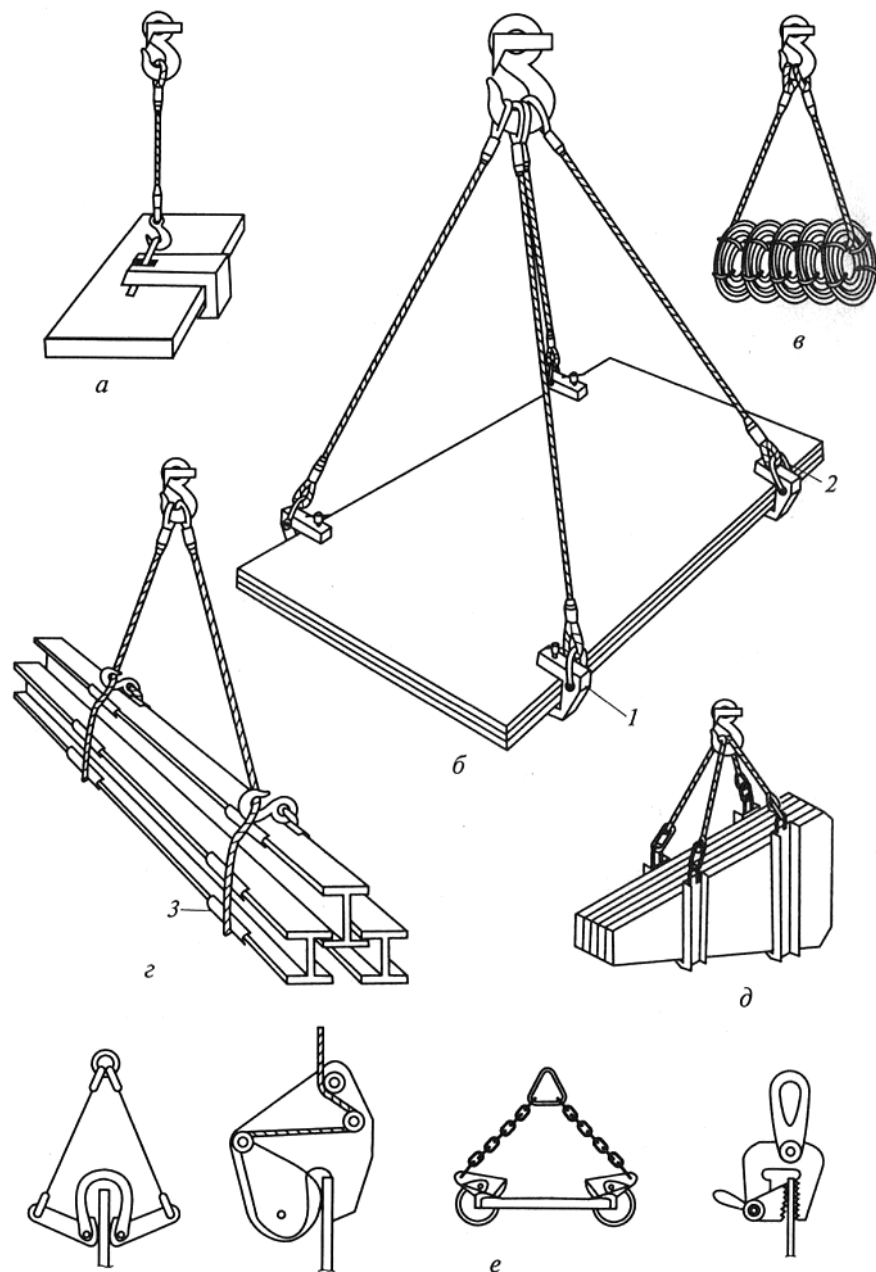


Рисунок 29 – Способи стропування

Установлені в проєктне положення елементи конструкцій або обладнання повинні бути закріплені для забезпечення стійкості та незмінності геометрії. Розстроповка елементів слід виконувати після їх надійного постійного або тимчасового закріплення.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		

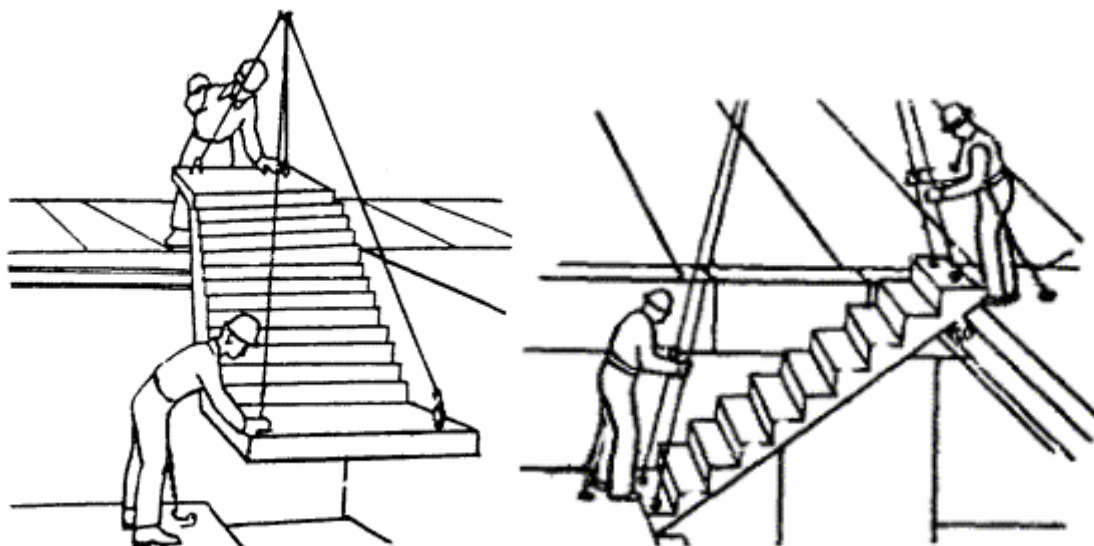


Рисунок 30 – Монтаж маршів

Переміщення вже встановлених елементів після розстроповки, крім випадків, передбачених ППР, заборонено.

Монтажні роботи на відкритій висоті забороняється виконувати при швидкості вітру 15 м/с і більше, при ожеледиці та тумані, який унеможлиблює видимість на фронті робіт.

Навісні монтажні майданчики, сходи та інші пристрої, необхідні для роботи монтажників на висоті, слід встановлювати та закріплювати на монтуюмих конструкціях до їх підйому.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

Література

1. El Maaddawy T., Soudki K. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking // Cement and concrete composites. 2007. № 3 (29). pp. 168–175.
2. Elmezayen Y., Khattak N., El-Maaddawy T. Prediction of Nonlinear Flexural Behavior of Continuous RC Beams Pre-Damaged by Corrosion // Buildings. 2023. № 6 (13). P. 1398.
3. Cvetkovska M., Todorov K., Lazarov L. Axial restraint effects on fire resistance of statically indeterminate RC beams // Journal of structural fire engineering. 2013. № 1 (4). pp. 47–58.
4. BS8110-1 Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction / BS8110-1, British Standards Institution, 1997.
5. Abdallah, M., Al Mahmoud F., Khelil A., Mercier, J., Almassri B. Assessment of the flexural behavior of continuous RC beams strengthened with NSM-FRP bars, experimental and analytical study // Composite Structures. 2020. (242). P. 112-127.
6. Alfarah B., López-Almansa F., Oller S. New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures // Engineering structures. 2017. (132). pp. 70–86.
7. Baji H., Ronagh H. R. Reliability analysis of moment redistribution in reinforced concrete beams // Magazine of concrete research. 2013. № 13 (65). pp. 769–779.

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ

1. Постановка проблеми

2. Стан питання й постановка завдання

2.1 Перерозподіл моментів у статично

невизначених залізобетонних конструкціях

2.2. Вплив корозії на поведінку залізобетонних балок

2.3. Чисельне моделювання кородованих залізобетонних балок

Висновки

3. Охорона праці

3.1 Монтажні роботи

Література

					БЗБ 24. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дата		