

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПЕТРЕНКО ДМИТРО ГРИГОРОВИЧ



УДК 624.072.3+624.016

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ГНУЧКИХ
СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному університеті залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, доцент
Ватуля Гліб Леонідович
Український державний університет
залізничного транспорту, проректор
з наукової роботи.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, доцент
Єрмоленко Дмитро Адольфович,
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка,
професор кафедри автомобільних доріг, геодезії,
землеустрою та сільських будівель;

– кандидат технічних наук, доцент
Стоянов Євген Геннадійович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова,
доцент кафедри будівельних конструкцій.

Захист відбудеться «8» листопада 2018 року о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7 та сайті <http://kart.edu.ua>.

Автореферат розісланий «3» жовтня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасні тенденції в галузі будівництва, а саме вдосконалення будівельних конструкцій, характерні пошуком нових видів поєднання сталі й бетону, які забезпечують їх раціональну спільну роботу, і спрямовані на забезпечення економії матеріалів, енерго- і трудовитрат.

Зведення каркасних житлових будинків підвищеної поверховості із застосуванням сталобетонних колон дозволяє скоротити технологічні процеси армування, встановлення опалубки і витримування конструкцій до отримання проектної міцності, отже, знизити терміни будівництва і трудовитрати. Оскільки сталобетонні колони мають більш високу несучу здатність у порівнянні з традиційними залізобетонними, зменшується поперечний переріз колон і маса будівель, з'являється можливість поліпшення планувальних рішень і зниження загальних витрат на бетонні роботи.

Трудомісткість виготовлення, слабкий опір механічним ушкодженням, коштозна і, як правило, нераціонально використана опалубка, мала тріщиностійкість - в залізобетонних конструкціях; необхідність великої кількості закладних деталей - в збірному залізобетоні; погана робота гнучких конструкцій на стиск через втрату місцевої або загальної стійкості, низька вогнестійкість, необхідність захисту від різних видів корозії металевих конструкцій - основні причини для більш масштабного застосування сталобетонних конструкцій.

Використання сталобетонних елементів різного перерізу в конструкціях із зовнішнім листовим армуванням економічно доцільно. Сталева обойма, замінюючи стрижневу арматуру, сприймає зусилля у всіх напрямках і під будь-яким кутом. Бетон в умовах всебічного обтиску витримує напруження, що значно перевищують його призмову міцність.

Основним недоліком сталобетонних колон є можливість втрати місцевої стійкості стінки колони до моменту досягнення в бетонному ядрі граничних напружень і, як наслідок, неповне використання несучої здатності конструкції. Не менш важливим питанням є дослідження гнучкості сталобетонних колон, а також визначення їх несучої здатності в залежності від форми поперечного перерізу та величини прикладеного ексцентриситету при позацентровому стиску, оскільки руйнування таких конструкцій найчастіше пов'язане з втратою загальної стійкості. Крім того необхідно врахувати об'ємний напружено-деформований стан бетонного ядра і сталеві оболонки, що працюють спільно, під час створення скінченно-елементної моделі.

У зв'язку з вище означеним, дана дисертаційна робота спрямована на розробку математичної та скінченно-елементної моделі для визначення несучої здатності та опису напружено-деформованого стану сталобетонних колон. Дисертаційна робота є актуальною та має теоретичне і практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту за 2010 - 2016 рр.: «Розробка теорії та методів розрахунку комбінованих конструкцій транспортних споруд» - № ДР 0106U004122; «Розробка теорії та методів оптимізації несучих конструкцій транспортних споруд» - № ДР 0110U002127.

Мета дослідження – експериментально-теоретично дослідити напружено-деформований стан коротких та гнучких сталобетонних колон різного поперечного перерізу з замкнутою обоймою при статичному короткочасному навантаженні; дослідження впливу гнучкості та значень ексцентриситету на несучу здатність сталобетонних колон.

Об'єкт дослідження – деформування і руйнування коротких та гнучких сталобетонних колон різного поперечного перерізу з замкнутою обоймою при статичному короткочасному навантаженні із заданими ексцентриситетами.

Предмет дослідження – несуча здатність та напружено-деформований стан коротких та гнучких сталобетонних колон різного поперечного перерізу з замкнутою обоймою при статичному короткочасному навантаженні із заданими ексцентриситетами.

Задачі досліджень:

- розробити скінченно-елементну модель сталобетонного елемента, яка враховує фізичну, геометричну і конструктивну нелінійність для опису напружено-деформованого стану;

- розробити математичну модель на основі регресійного аналізу для визначення несучої здатності сталобетонних колон;

- виконати експериментальну верифікацію несучої здатності коротких та гнучких сталобетонних колон при позацентровому стиску та порівняти отримані результати з даними скінченно-елементного моделювання;

- розробити конструкцію глибинного датчика (одно направленою та тривимірної розетки) та експериментальним шляхом встановити характер розвитку деформацій всередині бетонного ядра та на поверхні сталевих обойми сталобетонних колон на різних етапах навантаження.

Методи дослідження – експериментальні методи оцінки напружено-деформованого стану та несучої здатності сталобетонних колон; методи будівельної механіки для дослідження напружено-деформованого і граничного стану коротких сталобетонних колон при статичному короткочасному стиску; методи математичної статистики для розробки регресійної моделі; метод скінченних елементів для чисельної реалізації; порівняння та аналіз результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше розроблено та застосовано тривимірну розетку глибинного тензодатчика для визначення характеру розвитку деформацій всередині бетонного ядра сталобетонного елемента;

- вперше запропоновано регресійну модель для визначення несучої здатності сталобетонного елемента при короткочасному статичному навантаженні з урахуванням змінних фізико-механічних властивостей матеріалів та геометричних характеристик досліджуваних колон;

- отримано нові експериментальні закономірності деформування та руйнування бетонного ядра коротких та гнучких сталобетонних колон різного поперечного перерізу;

- удосконалено скінченно-елементну модель, що враховує обтиснення бетонного ядра сталобетонного елемента та нелінійність його роботи, для оцінки несучої здатності колони на всіх етапах її навантаження.

Достовірність положень і висновків дисертації забезпечена співставленням результатів розрахунку з експериментальними даними, отриманими автором з власного натурного експерименту, і результатами інших дослідників, що відображені у відкритих публікаціях. Вимірювання в ході експерименту проводилися на сучасному обладнанні, що пройшло метрологічну повірку; показання приладів дублювалися. При розробці методики розрахунку застосовувалися загальноприйняті теорії і припущення опору матеріалів та будівельної механіки, теорії пружності та пластичності, нелінійної деформаційної теорії залізобетону, методу скінченних елементів при створенні математичної моделі.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами досліджень розроблено принципово нову модель глибинного тензодатчика, яка дозволяє вимірювати деформації як в одному напрямку так і в трьох взаємно перпендикулярних площинах. Її використання дозволяє проводити моніторинг конструкцій для забезпечення їх надійної роботи. На запропоновану конструкцію глибинного тензодатчика та способу його встановлення отримано два патенти України на корисну модель. Отримано експериментальні дані про особливості деформування бетону всередині ядра конструкцій. Розроблено математичну модель на основі регресійного аналізу для розрахунку несучої здатності сталобетонного елемента різного поперечного перерізу.

Особистий внесок здобувача. Огляд та аналіз літератури за тематикою дослідження; підготовка експериментальних зразків та проведення експериментальних досліджень сталобетонних елементів на стиск; обробка результатів досліджень; запропонована нова конструкція глибинного тензодатчика для сталобетонного елемента і обґрунтована раціональність його застосування в практиці будівництва; розроблена скінченно-елементна модель в ПК «ЛІРА-САПР». Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на науково-технічних конференціях Української державної академії/університету залізничного транспорту (м. Харків, 2012–2018 рр.); III-й міжнародній науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (м. Дніпро, 11–12 жовтня 2012 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Модернізація и научные исследования в транспортном комплексе» (м. Перм, 24–25 квітня 2014 р.); IX міжнародній конференції «Проблеми прочности материалов и сооружений на транспорте» (м. Санкт-Петербург, 27–28 травня 2014 р.); X та XI міжнародних науково-технічних конференціях «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (м. Полтава, 27–31 жовтня 2014 р., 18–20 жовтня 2016 р.); Всеукраїнських Інтернет-конференціях молодих вчених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (м. Полтава, 21–22 листопада 2012 р., 25 листопада 2016 р.); VI міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19–21 квітня 2017 р.); VII міжнародній конференції «Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering» (с. Брезовиця, Словаччина, 21–25 травня 2017 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, з них 6 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 2 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, з яких 1 – в

Scopus; 2 статті у зарубіжних періодичних виданнях, з яких 1 – в WoS; 7 публікацій апробаційного характеру, з яких 1 у матеріалах конференції, що індексується в Scopus та 3 патенти України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 216 сторінках і містить 138 - сторінок основного тексту, 8 - таблиць, 69 - рисунків, 218 - найменувань літератури, 8 додатків на 40 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність розглянутої теми, дана загальна характеристика дисертації, її основні положення, наукова новизна і практична цінність.

У першому розділі наводиться огляд наукової літератури про сталебетонні конструкції загалом та розглядаються існуючі методики розрахунку стиснутих сталебетонних елементів. Також розглянуті питання стосовно міцності та пластичності бетону в умовах складного напружено-деформованого стану. Дослідженням об'ємного напруженого стану займались: Т. Карман, А. Феппель, Консидер, далі дослідження продовжили Амелянович К.К., Берг О.Я., Біч П.М., Бондаренко В.М., Воронков Р.В., Генієв Г.А., Гвоздьов О.О., Голосов В.М., Долженко О.А., Зайцев Ю.В., Карпенко М.І., Карпинський В.І., Квядарас А.Б., Козачевський А.І., Купфер Г., Круглов В.М., Лейтес Є.С., Лукша Л.К., Малашкин Ю.Н., Тибляков Б.В., Смірнов М.В., Стороженко Л.І., Чихладзе Е.Д., Шагін О.Л., Яшин О.В. Всі вони прийшли до висновку про підвищення міцності в умовах об'ємного напруженого стану.

Проведено порівняльний аналіз найбільш відомих методів розрахунку гнучкості стиснутих сталебетонних елементів. Дослідженням сталебетонних колон займались Гвоздев О.О., Людковський І.Г., Ліпатов А.Ф., Маренін В.Ф., Долженко А.Я., Фонов В.М., Нестерович А.П., Кришан А.Л., Заїкін А.І., Купфер Г., Санжаровський Р.С., Семененко Я.П., Скворцов М.Ф., Сіна Х., Передерій Г.П., Росновський В.А., Ренський А.Б., Стороженко Л.І., Єрмоленко Д.А., Чихладзе Е.Д., Шагін О.Л., Шмуклер В.С. та інші.

Розглянуті існуючі методи глибинної тензометрії для визначення деформацій бетону всередині конструкцій. Метод тензометрії полягає у визначенні напруженого стану за рахунок виміру деформацій, постійних пружності і деформативності бетону з подальшим обчисленням напружень. Завдяки простоті, дешевизні і хорошій якості тензорезисторів, що випускаються промисловістю, цей метод знайшов широке застосування в практиці експериментальних досліджень будівельних конструкцій, в тому числі і комбінованих.

На ряду з широким досвідом проектування сталебетонних конструкцій залишається ряд недостатньо опрацьованих питань їх розрахунку. Відсутність вітчизняних норм розрахунку гнучких сталебетонних елементів потребує приділити особливу увагу вивченню питання їх стійкості. До того ж відсутні єдині рекомендації щодо визначення гнучкості та коефіцієнта поздовжнього згину для сталебетонних елементів. Також відсутні експериментальні дослідження про характер розвитку деформацій всередині бетонного ядра стиснутих сталебетонних елементів. Виходячи з усього вищесказаного були сформульовані основні задачі дослідження.

Другий розділ присвячений теоретичному і чисельному дослідженню напружено-деформованого стану сталобетонних колон при короткочасному статичному навантаженні.

Автором пропонується розглядати настання граничного стану за: місцевою стійкістю стінки колони; досягненням граничних напружень у бетонному ядрі, або досягненням в металі обойми напружень текучості; загальною стійкістю, для гнучких сталобетонних елементів.

Проведено аналіз можливості настання граничного стану за втратою місцевої стійкості стінки колони. Внаслідок різниці коефіцієнтів Пуассона металевої обойми ν_s і бетонного ядра ν_c , на початкових етапах навантаження, металева обойма, відшаровуючись від бетонного ядра, може втратити місцеву стійкість. Настання даного граничного стану можливе тільки до моменту контакту бетонного ядра з металевою обоймою. Після настання контакту втрата місцевої стійкості неможлива.

Проведено аналіз можливості настання граничного стану за умов міцності руйнування бетонного ядра, або досягнення в металі обойми напружень, рівних за величиною напруженням текучості. Для аналізу роботи сталобетонного елемента скористаємося методикою, запропонованою Е.Д. Чихладзе. Для чисельного рішення даної задачі використовувався метод скінченних різниць. Розроблена методика опису процесу деформування конструкції дозволяє зберегти якісний та кількісний впливи особливостей деформування бетонного ядра в умовах об'ємного напруженого стану на жорсткісні властивості елементів конструкції; отримати точну оцінку деформативних властивостей перерізу з урахуванням неоднорідності напруженого стану; виразити жорсткісні характеристики через неперервні функції деформованого стану перерізу.

Після аналізу експериментальних і теоретичних досліджень гнучких сталобетонних колон, були відзначені роботи, які найбільш наближено відповідають вивченню питання стійкості сталобетонних елементів з урахуванням залежності коефіцієнта поздовжнього вигину від гнучкості елемента. Практично оцінка стійкості трубобетонного елемента зводиться до визначення коефіцієнта поздовжнього вигину. Знайдені коефіцієнти подовжнього вигину трубобетонних елементів слід давати у вигляді ряду кривих $\varphi - \lambda$ в залежності від марок сталей і бетонів, що поєднуються в трубобетонних елементах.

Велика кількість результатів експериментальних досліджень несучої здатності сталобетонних колон при різних умовах навантаження, проведених за останні десятиліття вченими різних країн, дала можливість дослідити поведінку колон методами математичної статистики. Використовуючи метод кореляційно-регресійного аналізу побудовані математичні моделі для визначення максимальної несучої здатності композитних колон. Математична модель враховує спільний вплив змінних фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричних характеристик колон, що наведені у таблицях 1 та 2. Відповідність отриманої моделі експериментальним даним, а також значимість параметрів регресії, підтверджуються критеріями Фішера і Стьюдента.

Фізико-механічні властивості матеріалів та геометричні характеристики сталевобетонних колон круглого поперечного перерізу за вибіркою

Параметр	Діапазон
Зовнішній діаметр, D	88÷267 мм
Товщина обойми, t	≥ 2.5 мм
Межа текучості сталі, σ_y	200÷486 МПа
Модуль пружності сталі, E_s	$1.68 \times 10^5 \div 2.17 \times 10^5$ МПа
Призмova міцність бетону, $f_{c,prism}$	18.2÷50 МПа
Модуль пружності бетону, E_c	$2.0 \times 10^4 \div 3.6 \times 10^4$ МПа
Довжина, L	485÷5000 мм

Регресійна модель (1) для колон круглого поперечного перерізу має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{N} &= a_0 + a_1 D E_s + a_2 (D - 2t) L \sigma_y + a_3 D^2 f_{c,prism} + a_4 \frac{(D - 2t)^2 t}{E_c} + a_5 \frac{(D - 2t)t}{\sigma_y} = \\ &= 213.5814 + 0.0291 \cdot D E_s - 4.5 \cdot 10^{-6} (D - 2t) L \sigma_y + 0.0007 \cdot D^2 f_{c,prism} + \\ &\quad + 0.2322 \cdot \frac{(D - 2t)^2 t}{E_c} - 1518.73 \cdot \frac{(D - 2t)t}{\sigma_y}. \end{aligned} \quad (1)$$

Фізико-механічні властивості матеріалів та геометричні характеристики сталевобетонних колон квадратного поперечного перерізу за вибіркою

Параметр	Діапазон
Переріз, $a \times a$	76÷360 мм
Товщина обойми, t	≥ 2 мм
Межа текучості сталі, σ_y	200÷490 МПа
Модуль пружності сталі, E_s	$1.68 \times 10^5 \div 2.17 \times 10^5$ МПа
Призмova міцність бетону, $f_{c,prism}$	10÷95 МПа
Модуль пружності бетону, E_c	$2.0 \times 10^4 \div 4.4 \times 10^4$ МПа
Довжина, L	500÷4000 мм

Регресійна модель (2) для колон квадратного поперечного перерізу має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{N} &= a_0 + a_1 b h f_{c,prism} + a_2 \frac{L f_{c,prism}}{(b - 2t)(h - 2t)} + a_3 \frac{t \sigma_y}{E_s} + a_4 (b - 2t)(h - 2t)t = \\ &= 71.481 + 8.64 \cdot 10^{-4} b h f_{c,prism} - 42.534 \cdot \frac{L f_{c,prism}}{(b - 2t)(h - 2t)} + \\ &\quad + 78.996 \cdot \frac{t \sigma_y}{E_s} + 2.43 \cdot 10^{-2} (b - 2t)(h - 2t)t. \end{aligned} \quad (2)$$

Для відповіді на питання про те, наскільки отримані коефіцієнти регресії можуть відрізнятись від точних значень, були знайдені з ймовірністю $P = 0,95$ довірчі інтервали для кожного коефіцієнта, які наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Довірчі інтервали

Модель (1)	Модель (2)
$119.173 \leq a_0 \leq 307.99;$ $0.0219 \leq a_1 \leq 0.0364;$ $-4.8 \cdot 10^{-6} \leq a_2 \leq -4.2 \cdot 10^{-6};$ $6.5 \cdot 10^{-4} \leq a_3 \leq 7.8 \cdot 10^{-4};$ $0.2131 \leq a_4 \leq 0.2506;$ $-1722.28 \leq a_5 \leq -1315.17.$	$34.745 \leq a_0 \leq 108.217;$ $8.3 \cdot 10^{-4} \leq a_1 \leq 8.9 \cdot 10^{-4};$ $-47.743 \leq a_2 \leq -37.324;$ $73.682 \leq a_3 \leq 84.309;$ $1.9 \cdot 10^{-3} \leq a_4 \leq 2.9 \cdot 10^{-3}$

У таблиці 4 наведені показники якості побудованих моделей: коефіцієнт детермінації R^2 та середня помилка апроксимації $\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|N_{exp} - N_{reg}|}{N_{exp}} 100\%$.

Таблиця 4

Показники якості моделей

	Модель (1)	Модель (2)
Коефіцієнт детермінації R^2	0.988	0.997
Середня помилка апроксимації	7.68%	5.92%

Порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних значень несучої здатності сталобетонних колон для описаних вище регресійних моделей показаний на рис. 1.

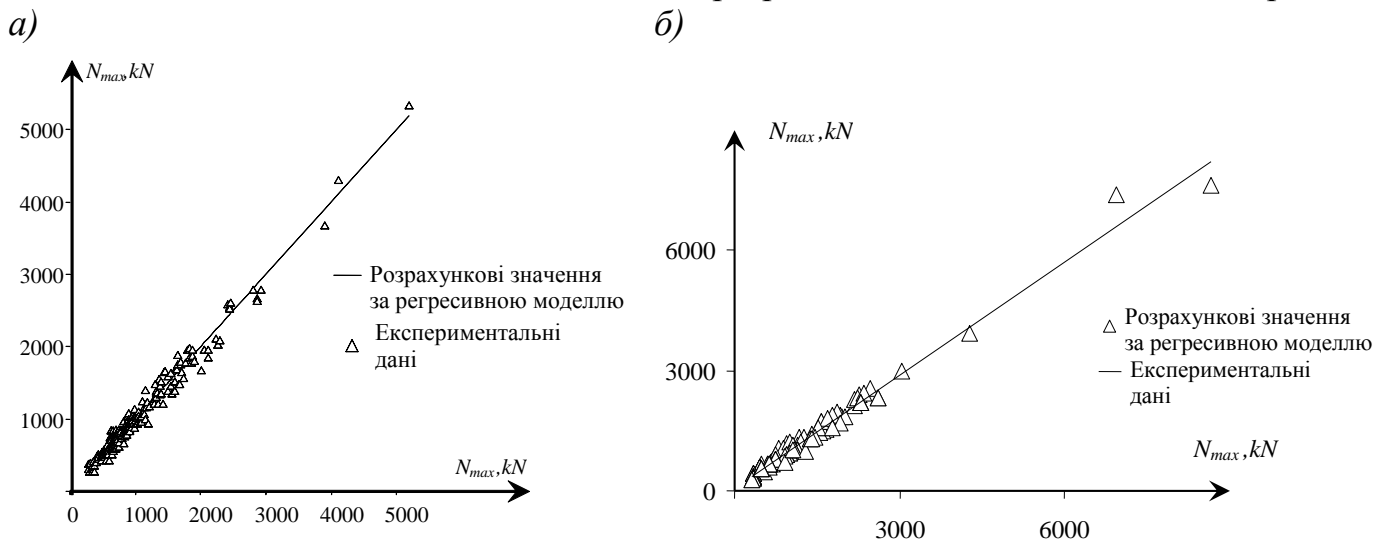


Рис. 1. Несуча здатність сталобетонних колон: а) – за моделлю (1); б) – за моделлю (2)

Встановлено аналітичну залежність величини максимальної несучої здатності композитних колон при центральному стиску, що дає можливість оцінювати вплив на величину несучої здатності геометричних і фізико-механічних характеристик колони. Порівняльний аналіз власних теоретичних і експериментальних результатів наведений у таблиці 5 підтверджує досить високу достовірність отриманих моделей.

Порівняльний аналіз власних теоретичних і експериментальних результатів

№ зразка	L, мм	N_{exp} , кН	N_{reg} , кН	Δ , %	№ зразка	L, мм	N_{exp} , кН	N_{reg} , кН	Δ , %
СБК-1	500	400	416.57	3.98	ТБ-1	500	657	693.9	5.31
СБК-2	500	395	416.57	5.18	ТБ-2	500	662	693.9	4.60
СБК-3	500	425	416.57	2.02	ТБ-3	500	670	691.4	3.10
СБК-4	500	402	416.57	3.50	ТБ-4	500	695	691.4	0.51
СБК-1.0-1	1000	426	370.42	15.00	ТБ-1.0-1	1000	550	595.6	7.66
СБК-1.0-2	1000	432	370.42	16.62	ТБ-1.0-2	1000	568	595.6	4.63
СБК-1.0-3	1000	370	370.42	0.11	ТБ-1.0-3	1000	525	595.6	11.85
СБК-1.5-1	1500	356	324.26	9.79	ТБ-1.5-1	1500	484	463.4	4.25
СБК-1.5-2	1500	342	324.26	5.47	ТБ-1.5-2	1500	389	463.4	16.06
СБК-2.0-1	2000	240	278.11	13.70	ТБ-2.0-1	2000	325	352.7	7.85
СБК-2.0-2	2000	240	278.11	13.70	ТБ-2.0-2	2000	370	352.7	4.68

Для розрахунку трубобетонних елементів чисельним методом був прийнятий програмний комплекс ЛПА-САПР, заснований на методі скінченних елементів (МСЕ). При розрахунку на міцність трубобетонних елементів у даному програмному комплексі використовується нелінійна деформаційна модель залізобетону з урахуванням особливостей деформування бетонного ядра і сталеві обойми в умовах неоднорідного напруженого стану.

Відомо, що вихідними даними для розрахунків за нелінійною деформаційною моделлю є діаграми деформування для одновісного стиску ($\sigma_c - \varepsilon_c$). Основна складність при розрахунку трубобетону, що працює в умовах об'ємного напруженого стану, полягає у відсутності діаграм для бетонного ядра ($\sigma_{c3} - \varepsilon_c$), зовнішній вигляд яких буде визначатися заздалегідь невідомою величиною бічного тиску сталеві обойми на бетон. В результаті, розрахунок необхідно виконувати кроково-ітераційним методом, що включає наступні етапи (рис. 2):

1. Визначення постійних величин – конструктивного коефіцієнта трубобетону ρ ; коефіцієнта бічного тиску k ; розрахункового опору бетонного циліндра f_{c3} ; коефіцієнта γ_c , що враховує масштабний фактор.

2. Розрахунок трубобетонного елемента на перший крок навантаження з визначенням справжнього значення міцності бетонного ядра f_{c3} .

3. На третьому етапі виконується розрахунок трубобетонного елемента на другий і наступні кроки навантаження аж до настання граничного стану.

Прийнято, що граничний стан, для випадку стиску з малими ексцентриситетами, настає при виконанні однієї з наступних умов:

– досягнення поздовжніми напруженнями в бетонному ядрі значення міцності бетону при тривісному стиску $\sigma_{c3} = f_{c3}$;

– досягнення поздовжніми відносними деформаціями значень відносних граничних деформацій стиску $\varepsilon_{c3} = \varepsilon_{cu}$;

– досягнення поперечними напруженнями в обоймі значення міцності сталі за межею текучості $\sigma_{sr} = f_y$.

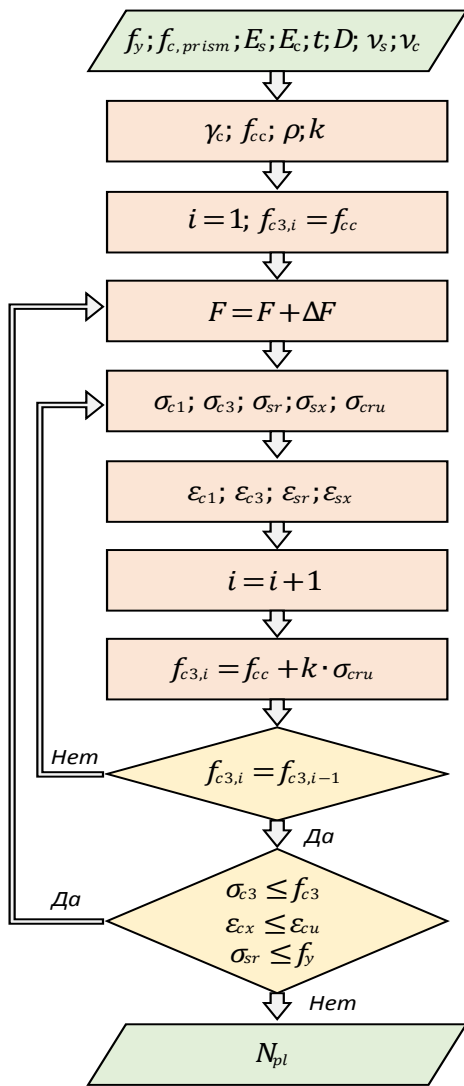


Рис. 2. Алгоритм розрахунку сталобетонного елемента

Розрахунок бетонного ядра виконується в фізично-нелінійній постановці, з використанням нелінійного процесора і крокового методу навантаження. Фізична нелінійність визначається нелінійними властивостями матеріалів і задається законами деформування бетону і сталі з початковим значенням модулів пружності матеріалів і міцністю при розтягуванні і стиску. При цьому реалізований механізм збільшення міцності бетону при стиску в залежності від ступеня його обтиску обоймою (рис. 2). Прийнята постановка задачі дозволяє встановити точний напружено-деформований стан, врахувати пластичні деформації бетону, утворення тріщин або руйнування, геометричну нелінійність обойми.

Розрахунок проводиться кроково-ітераційним методом. Для кожного випадку індивідуально визначалися оптимальні параметри крокового процесора. В результаті, з умов мінімізації часу розрахунку і похибки, отримано необхідну кількість кроків навантаження і кількість ітерацій.

Моделювання сталобетонних елементів за допомогою МСЕ дозволило детальніше дослідити роботу конструкції, вивчити особливості напружено-деформованого стану бетонного ядра в умовах об'ємного напруженого стану.

У **третьому розділі** розглянута технологія виготовлення тривимірної розетки глибинного датчика та процес виготовлення експериментальних зразків.

Для більш детального вивчення розвитку поздовжніх і поперечних деформацій в бетонному ядрі, механізму руйнування бетону, а також урахування ефекту обтиску за рахунок роботи сталеві оболонки всередині зразків встановлювалася тривимірна розетка глибинного датчика. Глибинний датчик розміщували в обоймі під час бетонування. На конструкцію, технологію виготовлення та спосіб кріплення глибинного датчика у сталобетонному елементі отримано два патенти України на корисну модель.

Глибинні тензодатчики були виготовлені за наступною технологією. У збірно-розбірну металеву форму (рис.3, а), у якій комірка для виготовлення кожного датчика має розмір $50 \times 10 \times 4$ мм, змащену солідолом, укладався шар мастики товщиною 2 мм. Мастика складалася із суміші клею БФ-2 з цементом у співвідношенні 1:2. Після її висихання (протягом 24 годин) на неї наклеювалися тензорезистори серії ВХ120-20АА-Х (рис.3, б), на які в свою чергу наносився другий шар мастики. Вільними залишалися тільки ділянки головки датчика з виводами проводів. Після того,

як до виводів були підпаяні дроти, здійснювалося ізолювання і цієї частини датчика. Після повного висихання мастики протягом 24 годин датчики витягали з форми (рис.3, а). Далі виготовлялася тривимірна розетка глибокого датчика (рис.3, з). Для цього за допомогою трафарету склеювали окремі тензодатчики таким чином, щоб між ними зберігалась взаємна перпендикулярність. Послідовність виготовлення глибокого датчика представлена на рис.3.

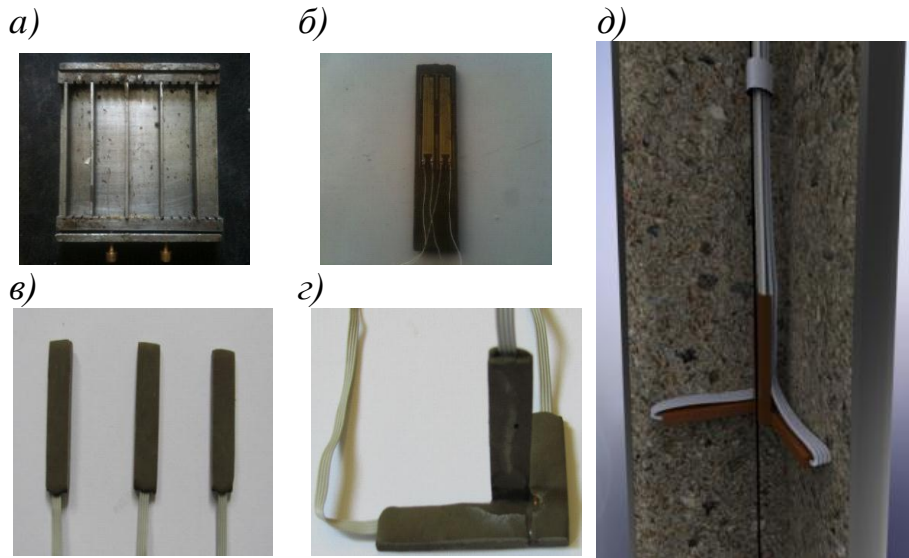


Рис.3. Послідовність виготовлення глибокого датчика: а) – форма для датчиків; б) – тензорезистори; в) – глибокий датчик; г) – розетка глибоких датчиків; д) – модель колони з глибоким датчиком

Наведена методика проведення експериментальних досліджень, розроблена конструкція та створені робочі креслення дослідних зразків, визначені фізико-механічні властивості матеріалів, підібраний оптимальний склад бетонної суміші, запропонована схема розміщення вимірювальних приладів, яка наведена на рис.4. Для вирішення поставлених завдань було виготовлено 9 серій дослідних зразків сталобетонних колон різного поперечного перерізу загальною кількістю 63 колони. Основу кожної серії становили 6 зразків-близнюків для гнучких колон та 9 зразків-близнюків для коротких колон. Сталева оболонка для експериментальних зразків прямокутного поперечного перерізу виготовлялася з двох сталевих холоднокатаних листів товщиною 2 мм, зігнутих у вигляді швелерів і зварених по всій довжині напівавтоматичним зварюванням. Для виготовлення обоими використовувалася сталь марки 08кп з межею текучості $\sigma_y = 220$ МПа. Відносні розміри квадратного поперечного перерізу $b/a = 1$; прямокутного поперечного перерізу $b/a = 1.5$. Оболонка трубобетонних колон круглого поперечного перерізу виготовлялася з електрозварної круглої труби марки сталі Ст1пс діаметром 102 мм та товщиною стінки 3 мм, з межею текучості $\sigma_y = 330$ МПа. Довжини зразків були рівні 500, 1000, 1500, 2000 мм.

Для виготовлення бетонного ядра використовувався дрібнозернистий бетон з водоцементним відношенням 0.61. При приготуванні бетонної суміші застосовувався портландцемент марки М 400 Балаклійського цементного заводу ВАТ «Балцем», пісок Безлюдівського піщаного кар'єру і щебінь фракції 5-20 мм. Перед приготуванням бетонної суміші щебінь був ретельно очищений від пилюватих частинок. Склад

бетону для сталобетонних колон: проектний клас бетону – С16/20; В/Ц = 0.61; вода = 190 кг; цемент (М 400) = 311 кг; пісок (сіяний) = 662 кг; щебінь (5-20) = 1209 кг.

Експериментальні дослідження проводились згідно з рекомендаціями до діючих нормативних документів.

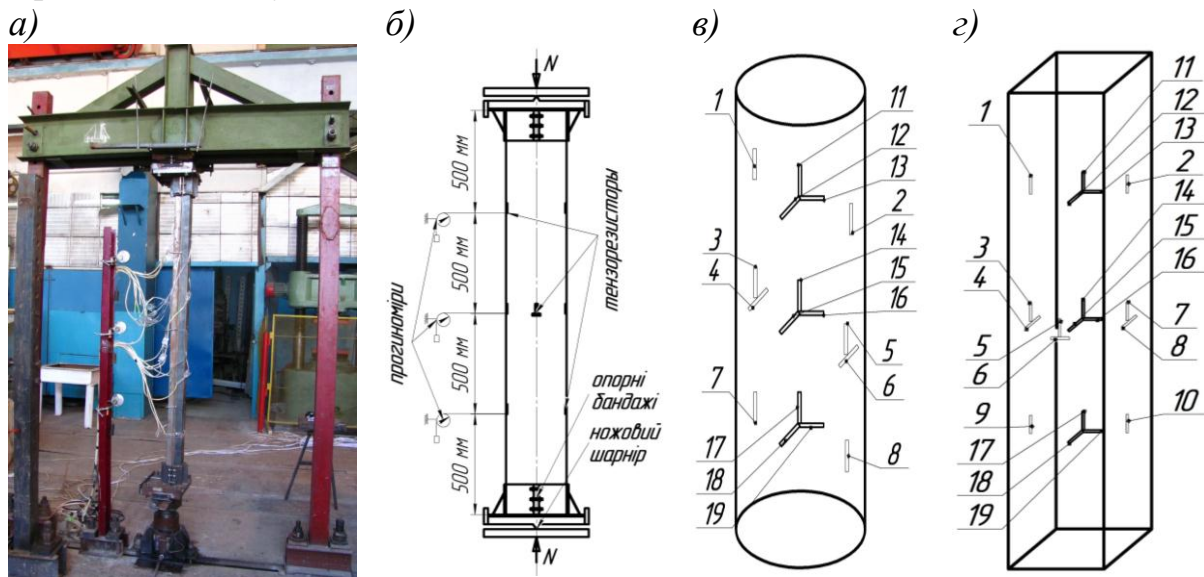


Рис.4. Схема розміщення вимірювальних приладів: а) – загальний вигляд колони перед випробуванням; б) – схема випробувань; в), г) – розташування глибинних датчиків та поверхневих електротензорезисторів у сталобетонних колонах

У **четвертому розділі** були визначені цілі та завдання експериментальних досліджень коротких та гнучких сталобетонних елементів та відповідно їм була складена програма досліджень. Для експерименту були обрані короткі ($h=0.5$ м) та гнучкі ($h=1; 1.5; 2$ м) сталобетонні колони круглого та прямокутного поперечних перерізів. Визначення фізико-механічних властивостей бетону при різних умов тверднення виконувалися на бетонних кубах. Експериментально підтверджено, що твердіння бетону в умовах замкнутого середовища збільшує його міцність на 10-15%. Методом глибинної тензометрії були проведені дослідження деформативності бетонних колон. Вивчено характер розвитку деформацій та встановлено, що поздовжні деформації всередині бетонних колон перевищують поверхневі.

Короткі сталобетонні колони випробовувалися на гідравлічному пресі ИП-2000 в лабораторії кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Експериментальні зразки довжиною 1 м, 1.5 м, 2 м випробовувалися в лабораторії кам'яних і залізобетонних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури на випробувальних пресах ПСУ-500 і ГРМ-2А, а також в спеціальній установці за допомогою 50-ти тонного домкрата у віці 60 діб.

Осьове навантаження прикладалося на бетон та об'єму одночасно. Опорні пристрої забезпечували шарнірну схему закріплення зразка. У процесі випробування вимірювалися поздовжні і поперечні деформації. Показання тензодатчиків знімали за допомогою тензометричної станції ВНП-8. Навантаження прикладали по 10 кН в інтервалі від 0 до руйнування.

Випробування коротких сталобетонних колон на центральний та позацентровий стиск показали наступні результати. Головними особливостями деформативності й

характеру роботи досліджуваних зразків було те, що у жодному зразку не відбулося розриву сталеві труби-оболонки. Проте для більшої частини зразків прямокутного поперечного перерізу було характерним утворення гофр у приопорній зоні. Тоді як у трубобетонних елементів круглого поперечного перерізу спостерігалася поява ліній Людерса-Чернова по всій висоті колони. В стадії перед безпосереднім руйнуванням спостерігалися істотні деформації укорочення. При зусиллі $N = N_u$ оболонка в центральній частині зразка вигиналась. При цьому найбільш стиснутий переріз приймав бочкоподібну форму, з подальшим утворенням гофр. Після закінчення випробувань зразків всіх серій, з метою подальшого аналізу, їх сталева оболонка розрізалась в поздовжньому напрямку і проводився демонтаж бетонного ядра (рис. 5).



Рис. 5. Зовнішній вигляд бетонного ядра і сталеві оболонки після демонтажу колон:
а) – кругла колона; б) – квадратна колона; в) – прямокутна колона

Характер руйнування коротких і гнучких зразків різко відрізнявся. Короткі зразки руйнувалися внаслідок втрати оболонкою місцевої стійкості і появи поперечних гофр. Руйнування гнучких зразків відбувалося внаслідок втрати загальної стійкості (рис.6). При цьому спостерігалася явно виражене викривлення поздовжньої вісі дослідного зразка. Прилади в цей момент показували лавиноподібний приріст деформацій. Дослідні зразки вигиналися, а після зняття навантаження в зразках спостерігалися явно виражені залишкові деформації, тому поздовжня вісь зразків залишалася викривленою. Однак більшість сталобетонних колон круглого поперечного перерізу довжиною 1.5 м та 2 м після зняття навантаження прагнули прийняти більш прямолінійну вісь, ніж під навантаженням. Це свідчить про те, що в даних елементах залишалися пружно-пластичні деформації. Така властивість пояснюється геометричною формою поперечного перерізу та наявністю в ньому радіальних та кільцевих напружень.

Під час проведення експерименту фіксували три зусилля, які відповідають різним критеріям втрати несучої здатності. Перше зусилля відповідало досягненню межі текучості сталеві обійми (N_y), яке визначалося за показниками тензорезисторів в максимально стислій зоні; друге зусилля відповідало викривленню повздовжньої вісі елемента і появі перших ознак загальної втрати стійкості (N_{stabil}); третє зусилля - максимальна величина навантаження, яку здатний витримати зразок (N_u). Друге зусилля характеризувалося постійним навантаженням на шкалі силовимірника і інтенсивним зростанням прогинів (стрілка прогиноміра не зупиняючись, повільно пливе).

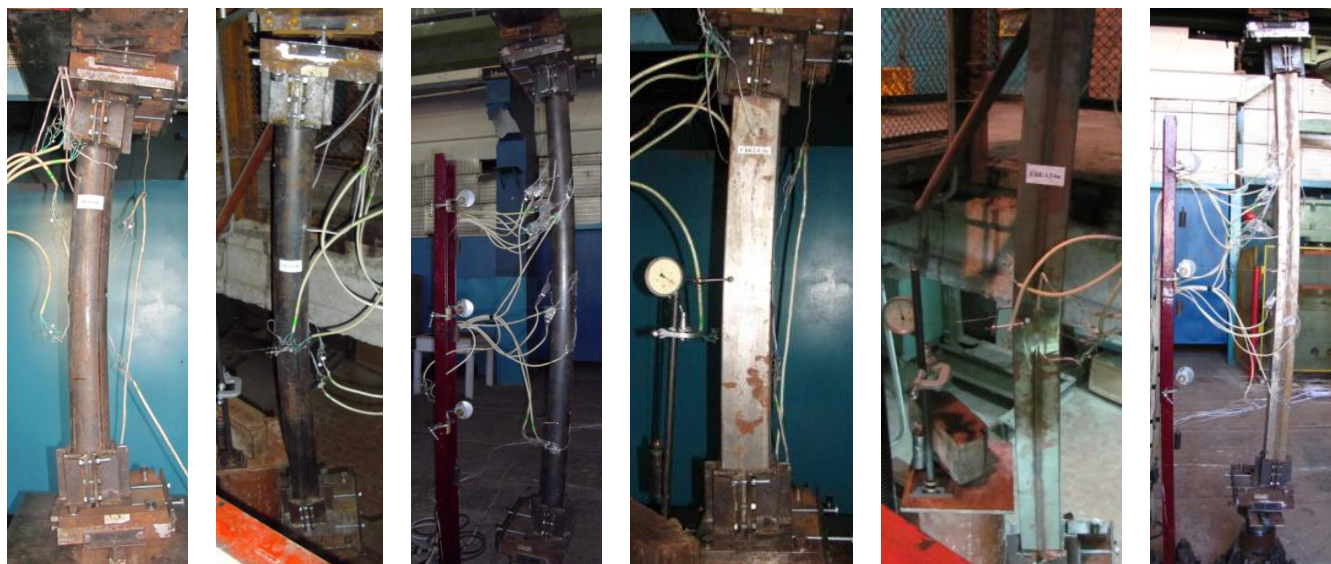


Рис.6. Зовнішній вигляд гнучких колон під час проведення випробувань

Руйнування сталобетонних колон квадратного перерізу відбувалося внаслідок місцевого випирання складок у металевій оболонці в найбільш стислій зоні з одночасним роздробленням бетону. Слід зазначити, що після зняття навантаження по вздовжня вісь у всіх позацентрово-стиснутих сталобетонних елементах залишалася викривленою і не поверталася до свого первісного стану.

Після випробувань зі зруйнованих зразків були зняті оболонки. Максимальна концентрація тріщин перебувала в розтягнутій зоні в середній частині перерізу по висоті зразка, роздроблення і викришування бетону спостерігалось в найбільш стислій зоні елемента в зоні появи складок (рис. 7). Структура бетону в цих місцях була істотно порушена. Бетон в місцях утворення складок при незначних механічних впливах розсипався.

Результати випробувань круглих сталобетонних колон виявили наступні закономірності. Несуча здатність усіх цих зразків обмежувалася загальною втратою стійкості. У сталобетонних колонах круглого поперечного перерізу при навантаженні рівному $(0.7-0.75) \times N_u$ на сталевій оболонці спостерігалася поява характерних ліній текучості. Поява ліній Людерса-Чернова відзначалася тільки для круглих сталобетонних колон. На наступній стадії роботи при незначному підвищенні навантаження спостерігалася поява зігнутої вісі, яка свідчить про загальну втрату стійкості сталобетонних колон. Це пов'язано з наявністю коефіцієнта поздовжнього вигину. Вичерпання несучої здатності гнучких сталобетонних колон круглого поперечного перерізу характеризувалось втратою загальної стійкості з меншим складкоутворенням (рис. 7).

Загальним для всіх зразків є те, що під дією навантаження відбувалося викривлення поздовжньої вісі елемента. І чим більша величина прикладеного ексцентриситету, тим яскравіше виражено і більш плавно відбувалося викривлення поздовжньої вісі сталобетонної колони. Це призводило до нерівномірного розподілу поздовжніх деформацій в листовому армуванні.

Слід зазначити, що в гнучких позацентрово-стиснутих сталобетонних зразках деформації оболонки розтягнутої зони по абсолютній величині значно менше деформацій стиснутої зони, їх значення не досягають межі текучості навіть при руйнуванні зразків. Таким чином, для характеристики напружено-деформованого стану

гнучких позацентрово-стиснутих сталобетонних елементів вирішальне значення має стисла зона. Ефект бетону підвищувати несучу здатність сталобетонних елементів в цілому при великих ексцентриситетах та гнучкості зменшується, але при цьому бетон підвищує місцеву стійкість стінки і не дає сплющуватися трубі. З цієї точки зору заповнювати труби бетоном в таких конструкціях доцільно.

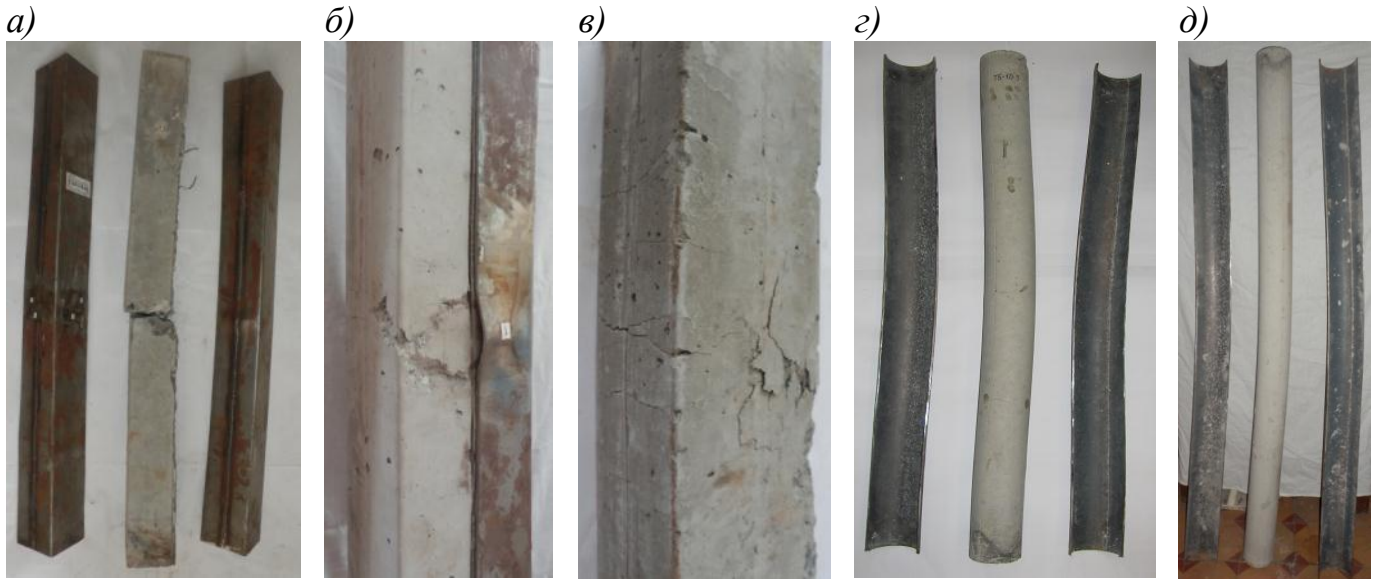


Рис.7. Зовнішній вигляд бетонного ядра і сталеві оболонки після демонтажу гнучких колон: а) – колона серії СБК-1.0-1, б) – колона серії СБК-1.0-5в, в) – колона серії СБК-2.0-6в, г) – колона серії ТБ-1.5-3в, д) – колона серії ТБ-2.0-4в

За результатами експериментальних випробувань побудовані графіки залежностей відносних деформацій від навантаження (рис.8). Аналізуючи отримані графіки можна зробити висновок, що бічний тиск, який перешкоджає поперечному розширенню бетонного ядра та розвитку в ньому мікротріщин, створює об'ємно напружений стан усього сталобетонного елемента. Цим пояснюється багато властивостей сталобетону: підвищена несуча здатність та значна деформативність. Складне завантаження бетонного ядра в сталобетонних колонах, яке можливе завдяки наявності бічного тиску, не тільки затримує виникнення тріщин, але і перешкоджає їх розвитку. Завдяки бічному тиску процес деформації сталобетону без порушення зв'язності бетону стиснутої зони може йти дуже далеко, а величини деформацій стають настільки значними, що бетон частково переходить в псевдо-пластичний стан.

Аналіз отриманих результатів показує, що прогини сталобетонних зразків були значно менші за прогини труб, незаповнених бетоном (рис.9). Причому ефект сталобетону зменшувався зі збільшенням ексцентриситету та довжини зразків. Застосування тривимірної розетки тензорезисторів дозволило виміряти деформації в трьох взаємно перпендикулярних площинах всередині бетонного ядра. Отримані дані про відносні деформації підтверджують теорію про спільну роботу бетонного ядра і сталеві оболонки у пружній стадії. Результати випробувань гнучких сталобетонних колон при центральному та позацентровому стиску представлені в таблиці 6. Для експериментальної оцінки стійкості композитних колон необхідно мати уявлення про розподіл поздовжніх напружень у найбільш напруженому поперечному перерізі.

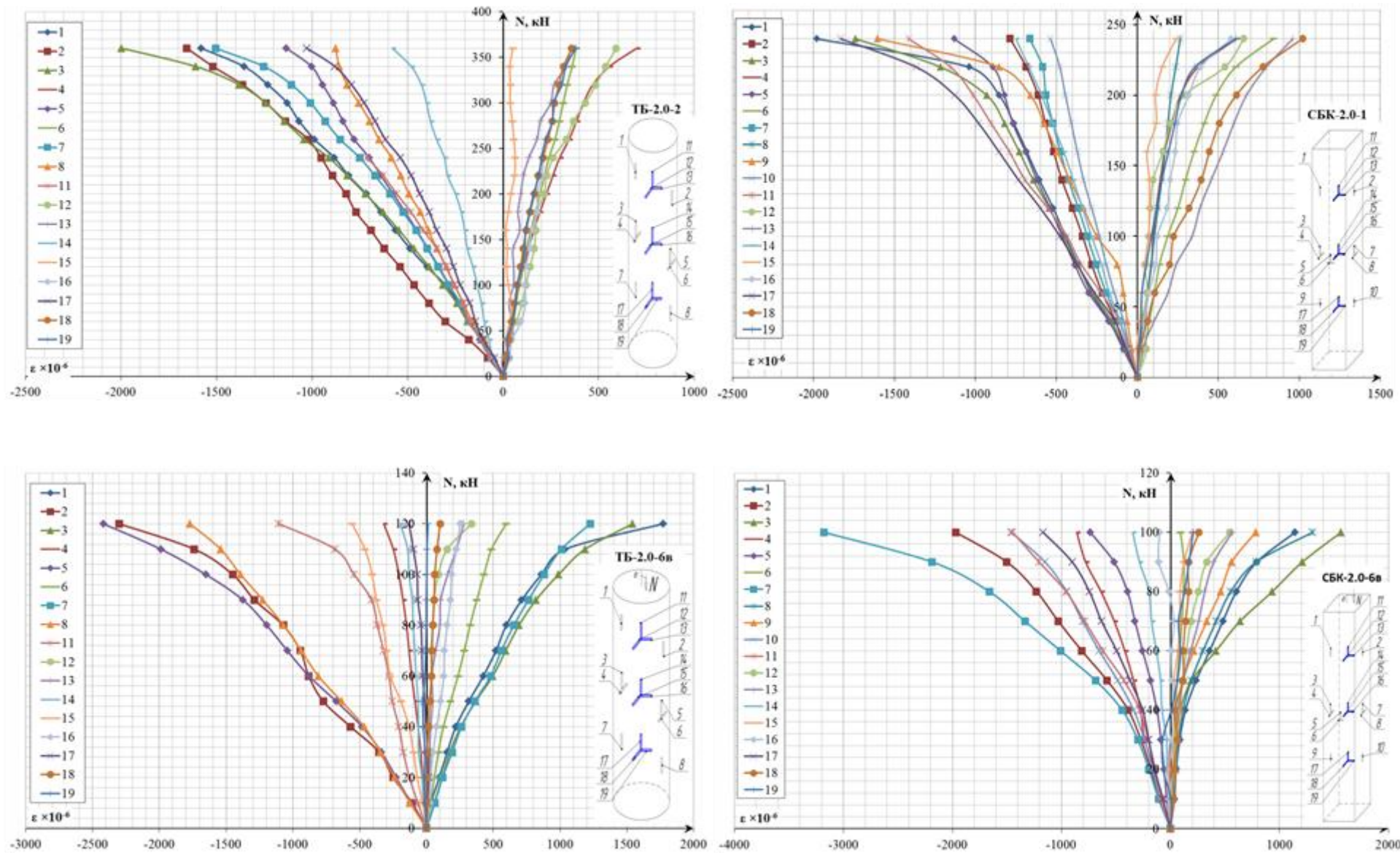


Рис.8. Графіки залежності відносних деформацій від навантаження для гнучких сталобетонних колон

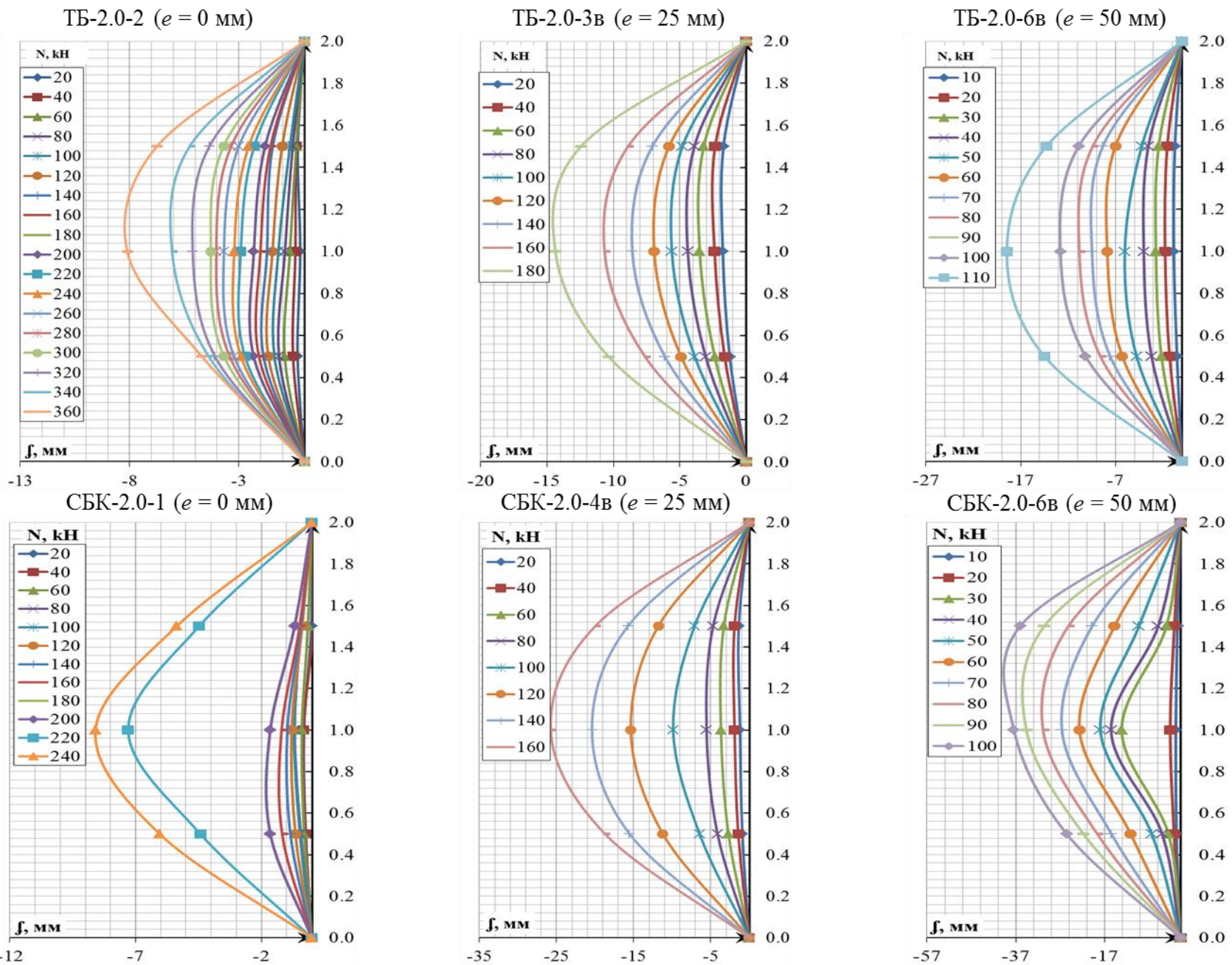


Рис.9. Графіки залежності прогинів від навантаження для гнучких сталобетонних колон

Тому метою досліджень було встановити характер розподілу деформацій у площині розрахункового перерізу.

Таблиця 6

Результати випробувань гнучких сталобетонних колон
при центральному та позацентровому стиску

№ зразка	L , см	e_0 , см	N_y , кН	N_{stabil} кН	N_u , кН	$\psi = N_y/N_u$	φ_{exp}	№ зразка	L , см	e_0 , см	N_y , кН	N_{stabil} кН	N_u , кН	$\psi = N_y/N_u$	φ_{exp}
СБК-1.0-1	100	0	325	355	406	0.80	0.97	ТБ-1.0-1	100	0	375	455	550	0.68	0.89
СБК-1.0-2	100	0	330	360	402	0.82	0.96	ТБ-1.0-2	100	0	350	476	568	0.62	0.92
СБК-1.0-3в	100	2.5	280	310	370	0.76	0.88	ТБ-1.0-3	100	0	320	468	525	0.61	0.85
СБК-1.0-4в	100	2.5	191	180	258	0.84	0.62	ТБ-1.0-4в	100	2.5	171	246	288	0.59	0.47
СБК-1.0-5в	100	5.0	148	125	218	0.68	0.52	ТБ-1.0-5в	100	2.5	168	228	279	0.60	0.45
СБК-1.0-6в	100	5.0	79	100	134	0.59	0.32	ТБ-1.0-6в	100	5.0	100	148	164	0.61	0.26
СБК-1.5-1	150	0	263	300	356	0.74	0.85	ТБ-1.5-1	150	0	340	416	484	0.70	0.78
СБК-1.5-2	150	0	278	290	342	0.81	0.81	ТБ-1.5-2	150	0	295	338	389	0.78	0.61
СБК-1.5-3в	150	2.5	135	120	168	0.80	0.40	ТБ-1.5-3в	150	2.5	170	226	254	0.67	0.41
СБК-1.5-4в	150	2.5	128	120	172	0.74	0.41	ТБ-1.5-4в	150	2.5	185	234	251	0.74	0.41
СБК-1.5-5в	150	5.0	93	110	145	0.64	0.35	ТБ-1.5-5в	150	5.0	115	138	158	0.73	0.26
СБК-1.5-6в	150	5.0	89	110	138	0.64	0.33	ТБ-1.5-6в	150	5.0	120	146	163	0.74	0.26
СБК-2.0-1	200	0	192	190	239	0.80	0.57	ТБ-2.0-1	200	0	275	288	325	0.85	0.53
СБК-2.0-2	200	0	175	200	241	0.73	0.57	ТБ-2.0-2	200	0	300	348	370	0.79	0.61
СБК-2.0-3в	200	2.5	147	120	175	0.84	0.42	ТБ-2.0-3в	200	2.5	136	166	195	0.70	0.32
СБК-2.0-4в	200	2.5	88	120	162	0.54	0.39	ТБ-2.0-4в	200	2.5	132	148	178	0.74	0.29
СБК-2.0-5в	200	5.0	56	75	95	0.59	0.23	ТБ-2.0-5в	200	5.0	68	82	120	0.57	0.19
СБК-2.0-6в	200	5.0	65	80	105	0.62	0.25	ТБ-2.0-6в	200	5.0	70	86	125	0.56	0.20

У п'ятому розділі обгрунтовано техніко-економічну ефективність застосування сталобетонних колон. Для підтвердження ефективності сталобетонних колон в порівнянні з залізобетонними були виконані відповідні розрахунки. Параметри порівнюваних зразків підібрані з умови їх еквівалентності за кількістю робочої арматури і їх механічними властивостями, міцності бетону і геометричними розмірами перерізу. Результати співставлення техніко-економічних показників для різних конструктивних рішень колон наведені у таблиці 7. Матеріали дисертаційної роботи були використані при проектуванні та реконструкції об'єктів транспортних споруд на ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», при будівництві ремонтно-екіпірувального депо для обслуговування потягів Intercity та Intercity+ Української залізничної швидкісної компанії (станція Харків-Сортувальний), а також результати досліджень знайшли практичне застосування в навчальному процесі і при дипломному проектуванні в Українському державному університеті залізничного транспорту.

Співставлення техніко-економічних показників
для різних конструктивних рішень колон

Тип колони	Руйнівне навантаження, кН	Площа бетону, см ²	Площа сталі, см ²	Коефіцієнт армування, %	Витрати арматури на 1 м.п. колони, кг	Витрати сталі, %
Залізобетонна колона 30×30 см	3000	795	105	11.67	81.75	468
Залізобетонна колона 40×40 см	3000	1530	69.1	4.5	51.83	297
Сталобетонна колона квадратного поперечного перерізу 30×30 см	3014	852.6	47.4	5.1	35.52	203
Сталобетонна колона круглого поперечного перерізу $D = 25$ см	3108	467.4	23.3	4.8	17.45	100

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі критичного аналізу наявних літературних даних, щодо експериментальних та числових результатів оцінки напружено-деформованого стану коротких та гнучких сталобетонних колон, запропоновано використання тривимірної розетки глибинного датчика для виміру деформацій бетонного ядра сталобетонного елемента при позацентровому стиску.

2. Розроблено скінченно-елементну модель стиснутих сталобетонних колон за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР з урахуванням фізичної нелінійності бетону, в результаті чого було отримано напружено-деформований стан у всьому тілі елемента. Отримані результати розрахунку підтверджуються задовільною збіжністю з даними власних і зарубіжних експериментальних досліджень. Для розглянутих параметрів перерізів похибка з результатами експериментів склала: для серії ТБ ($L/D = 4.9$; $D/t = 34$) – $\Delta_{сер} = 1.68\%$; для серії СБК ($L/a = 5$; $a/t = 50$) – $\Delta_{сер} = 4.48\%$; для серії СБП ($L/b = 3.33$; $b/t = 75$) – $\Delta_{сер} = 6.78\%$. Середнє значення коефіцієнта, який враховує ефективність роботи звичайного бетону в сталобетонному елементі: для серії ТБ – $\eta_{сер} = 3.14$; для серії СБК – $\eta_{сер} = 1.58$; для серії СБП – $\eta_{сер} = 1.45$.

3. Використавши метод математичної статистики, запропоновано регресійну модель для оцінки несучої здатності коротких та гнучких сталобетонних колон круглого та прямокутного поперечного перерізу при позацентровому стиску з випадковим ексцентриситетом. За результатами верифікації отриманих даних з результатами експериментальних даних похибка склала: для зразків серії ТБ при $\lambda = 16$ – $\Delta_{сер} = 3.38\%$; при $\lambda = 32$ – $\Delta_{сер} = 8.05\%$; при $\lambda = 48$ – $\Delta_{сер} = 10.16\%$; при $\lambda = 64$ – $\Delta_{сер} = 6.27\%$; для зразків серії СБК при $\lambda = 16$ – $\Delta_{сер} = 3.67\%$; при $\lambda = 30$ – $\Delta_{сер} = 10.58\%$;

при $\lambda = 45 - \Delta_{сер} = 7.63\%$; при $\lambda = 60 - \Delta_{сер} = 13.7\%$; для зразків серії СБП при $\lambda = 11 - \Delta_{сер} = 4.1\%$.

4. Завдяки використанню регресійної моделі вдалося встановити закономірність впливу гнучкості на несучу здатність сталобетонних колон. Так для колон квадратного поперечного перерізу при $\lambda = 30$ у порівнянні з короткими колонами несуча здатність зменшилась на 11.1%; при $\lambda = 45$ – на 22.6%; при $\lambda = 60$ – на 33.2%. Відповідно для колон круглого поперечного перерізу при $\lambda = 32$ – на 13.8%; при $\lambda = 48$ – на 32.9%; при $\lambda = 64$ – на 48.9%.

5. Графіки зміни відносних деформацій підтверджують теорію про спільну роботу бетонного ядра і сталеві оболонки у пружній стадії. Встановлено, що в місцях руйнування бетонного ядра настає миттєва втрата місцевої стійкості сталеві обійми, що призводить до вичерпання несучої здатності коротких сталобетонних зразків, у той час як несуча здатність гнучких сталобетонних колон обмежувалась втратою загальної стійкості та значними прогинами поздовжньої вісі елемента.

6. За результатами дисертаційної роботи отримано 2 патенти України на корисну модель. Запропонована конструкція впроваджена в практику проектування і в навчальному процесі УкрДУЗТ. У результаті впровадження вищезазначених розробок очікується: підвищення технічного рівня розрахунку, проектування та реконструкції комбінованих конструкцій, що працюють на стиск; забезпечення проектної міцності та підвищення надійності будівельних конструкцій у разі застосування моніторингу з використанням глибинних датчиків.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Петренко Д.Г. Методы расчета прочности сталобетонных элементов / Д.Г. Петренко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 82. – С. 154-162.
2. Петренко Д.Г. Исследование деформативности бетонных колон методом глубинной тензометрии / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко, И.В. Быченко // Сталезалізобетонні конструкції: зб. наук. статей. – Полтава, 2014. – Вип. №11. – С. 54-60.
Особистий внесок: розробка та виготовлення моделей і глибинних датчиків, аналіз результатів.
3. Петренко Д.Г. Экспериментальные исследования сталобетонных колонн в гофрированной обойме / Г.Л. Ватуля, Е.В. Игнатенко, Д.Г. Петренко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 65. – С. 123-126.
Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень.
4. Петренко Д.Г. Определение зависимости коэффициента продольного изгиба от гибкости сталобетонного элемента / Д.Г. Петренко // Мости та тунелі: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип.3. – С.132-136.

Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

5. Petrenko D. Evaluation of the carrying capacity of rectangular steel-concrete columnst / G. Vatulia, M. Rezunenکو, D. Petrenko, S. Rezunenکو // Civil and Environmental Engineering – Vol. 14, Issue 1/2018, 76-83.
Особистий внесок: проведення експериментальних досліджень, порівняння результатів із даними, що отримані при регресійному аналізі.
6. Petrenko D.H. Experimental estimation of load-carrying capacity of circular, square and rectangular CFST columns / G.L. Vatulia, D.H. Petrenko, M.A. Novikova // Scientific bulletin of National Mining University, Iss. 6, 2017, pp. 97-102.
Особистий внесок: виготовлення експериментальних зразків, виконання замірів та аналіз НДС конструкцій.
7. Петренко Д.Г. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Вестник ПНИПУ. – Пермь, 2014. – Вып.№2. – С. 48-56.
Особистий внесок: виготовлення глибинного датчика та тривимірної розетки, аналіз результатів.
8. Петренко Д.Г. Определение механических характеристик конструкций с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2013. – Вип.138. – С. 231-235.
Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень та обґрунтування конструкції глибинного датчика.

Публікації апробаційного характеру:

9. Dmytro Petrenko. Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation / Glib Vatulia, Maryna Rezunenکو, Yevhen Orel, Dmytro Petrenko // Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering MATEC Web of Conf. Vol. 107, article No. 00051, 2017.
Особистий внесок: отримання експериментальних даних, що використовуються у регресійній моделі.
10. Петренко Д.Г. Экспериментальные исследования гибких сталебетонных колонн при осевом и внецентренном сжатии / Г.Л. Ватуля, М.Е. Резуненко, Д.Г. Петренко, М.А. Рожнова // Проблемы надежности и долговечности инженерных сооружений и зданий на железнодорожном транспорте / Сборник тезисов докладов VI международной научно-технической конференции – Харьков: УкрГУЖТ – 2017. – С. 109-111.
Особистий внесок: розробка та виготовлення зразків, аналіз результатів.
11. Петренко Д.Г. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану гнучких сталебетонних колон / Д.Г. Петренко // Сталезалізобетонні конструкції: зб. наук. статей. – Полтава, 2016. – Вип. №12. – С. 199-201.

12. Петренко Д.Г. Удосконалення складу бетонної суміші при виготовленні сталезалізобетонних колон / Д.Г. Петренко, М.А. Рожнова // Проблеми сучасного будівництва: зб. наук. праць за матеріалами III Всеукраїнської Інтернет-конференції. – Полтава, 2016. – С. 160-162.
Особистий внесок: участь у підборі складів, визначення їх міцності та деформативних характеристик.
13. Петренко Д.Г. Тарировка и определение точности показаний глубинного датчика / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагуря, Д.Г. Петренко // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы международной научно-практической конференции. – Пермь, 2014. – С. 375-380.
Особистий внесок: розробка та виготовлення моделей, виконання замірів та аналіз результатів.
14. Петренко Д.Г. Определение физико-механических характеристик свойств бетона при различных условиях твердения / Ватуля Г.Л., Галагуря Е.И., Петренко Д.Г. // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сборник тезисов докладов. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 68-69.
Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень та аналіз результатів.
15. Петренко Д.Г. Сравнение методик расчета гибкости сталебетонных элементов / Г.Л. Ватуля, Д.Г. Петренко // Проблеми сучасного будівництва: матеріали Всеукраїнської Інтернет-конференції. – Полтава, 2012. – С. 209-212.
Особистий внесок: порівняльний аналіз теоретичних досліджень.

Патенти України на корисну модель:

16. Пат. 79911 Україна, МПК ЕО4С 3/30. Металева обойма сталобетонного елемента / Ватуля Г.Л., Лобяк О.В., Ігнатенко Є.В., Петренко Д.Г.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u2012 11158; заявл. 26.09.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9.
17. Пат. 79575 Україна, МПК G01 В 7/16. Глибинний тензодатчик / Ватуля Г.Л., Галагуря Є.І., Петренко Д.Г.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u2012 12536; заявл. 02.11.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
18. Пат. 79772 Україна, МПК G01L 1/22. Спосіб закріплення тензодатчика усередині сталобетонного елемента / Ватуля Г.Л., Галагуря Є.І., Петренко Д.Г.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u2012 13943; заявл. 7.12.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.

АНОТАЦІЯ

Петренко Д.Г. Напружено-деформований стан гнучких сталобетонних колон. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена експериментально-теоретичним дослідженням коротких та гнучких сталобетонних колон при статичному короткочасному навантаженні із заданими ексцентриситетами.

Проведений огляд літературних джерел дозволяє зробити висновок про те, що сталобетонні конструкції є конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними залізобетонними. Розроблено конструкцію глибинного датчика (одно направленою та тривимірної розетки) та експериментальним шляхом встановлено характер розвитку деформацій всередині бетонного ядра та на поверхні сталеві обійми сталобетонних колон на різних етапах навантаження.

Завдяки методам математичної статистики запропонована математична модель на основі регресійного аналізу для визначення несучої здатності сталобетонних колон. У роботі представлена вдосконалена скінченно-елементна модель в ПК «Ліра», яка враховує фізичну, геометричну і конструктивну нелінійності, оцінений напружено-деформований і граничний стани.

Отримано задовільний збіг експериментальних результатів і розрахунків, виконаних за запропонованою математичною моделлю, отриманих за допомогою МСЕ в програмному комплексі «Ліра», що дозволяє зробити висновок про відповідність математичної моделі досліджуваному процесу руйнування колони.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в практику проектування і будівництва, а також у навчальному процесі.

Ключові слова: сталобетонні колони, напружено-деформований стан, гнучкість, стійкість, глибинний датчик, чисельне моделювання, скінченно-елементна модель.

АННОТАЦИЯ

Петренко Д.Г. Напряженно-деформированное состояние гибких сталобетонных колонн. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена экспериментально-теоретическим исследованиям коротких и гибких сталобетонных колонн при статической кратковременной нагрузке с заданными эксцентриситетами.

Во **введении** представлена общая характеристика работы, приведены актуальность, связь с научными темами, сформулированы цель и задачи исследований, описаны практическая значимость и научная новизна.

В **первом разделе** приводится обзор научной литературы о сталебетонных конструкциях в целом и рассматриваются существующие методики расчета сжатых сталебетонных элементов. Также рассмотрены вопросы прочности и пластичности бетона в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Проведен сравнительный анализ наиболее известных методов расчета гибкости сжатых сталебетонных элементов. Рассмотрены существующие методы глубинной тензометрии для определения деформаций бетона внутри конструкций.

Во **втором разделе** представлены теоретические исследования напряженно-деформированного состояния сталебетонных колонн круглого и прямоугольного поперечных сечений при внецентренной сжатии со случайными эксцентриситетами. Рассмотрена методика расчета сталебетонных элементов по местной устойчивости стенки колонны. Используя метод корреляционно-регрессионного анализа, построены математические модели для определения максимальной несущей способности композитных колонн. В работе представлена усовершенствованная конечно-элементная модель в ПК «Лира», которая учитывает физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности, проведена оценка напряженно-деформированного и предельного состояния.

В **третьем разделе** рассмотрен метод глубинной тензометрии, который применяется для оценки напряженно-деформированного состояния бетонного ядра. Для более детального изучения развития продольных и поперечных деформаций в бетонном ядре, механизма разрушения бетона, а также учета эффекта обжатия за счет работы стальной оболочки внутри образцов устанавливалась трехмерная розетка глубинного датчика. Рассмотрена технология изготовления трехмерной розетки глубинного датчика и процесс изготовления экспериментальных образцов. На конструкцию, технологию изготовления и способ крепления глубинного датчика в сталебетонном элементе получено два патента Украины на полезную модель. В результате экспериментальных исследований сталебетонных колонн были получены данные о характере их напряженно-деформированного состояния на разных этапах нагружения и данные о предельном состоянии конструкции.

В **четвертом разделе** приведены результаты экспериментальных исследований сталебетонных колонн. Для эксперимента были выбраны короткие ($h = 0.5$ м) и гибкие ($h = 1, 1.5, 2$ м) сталебетонные колонны круглого и прямоугольного поперечных сечений. Характер разрушения коротких и гибких образцов резко отличался. Короткие образцы разрушались вследствие потери оболочки местной устойчивости и появления поперечных гофр. Разрушение гибких образцов происходило вследствие потери общей устойчивости.

Получено удовлетворительное сопоставление экспериментальных результатов и расчетов, выполненных по предложенной математической модели, полученных с помощью МКЭ в программном комплексе «Лира», что позволяет сделать вывод о соответствии математической модели исследуемому процессу разрушения колонны.

В **пятом разделе** обоснованно технико-экономическую эффективность применения сталебетонных колонн. Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования и строительства, а также в учебный процесс.

Ключевые слова: сталебетонные колонны, напряженно-деформированное состояние, гибкость, устойчивость, глубинный датчик, численное моделирование, конечно-элементная модель.

ABSTRACT

Petrenko D.G. The stress-strain state of flexible steel columns. – On the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.23.01 – building constructions, buildings and structures. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to experimental-theoretical research of short and flexible steel-concrete columns at static short-time loading with given eccentricities.

The conducted review of literary sources suggests that steel structures are competitive compared to conventional reinforced concrete. The design of a deep sensor (one directional and three-dimensional socket) was developed and the nature of deformation development inside the concrete core and on the surface of the steel strips of steel concrete columns at different load stages was determined experimentally.

Thanks to the methods of mathematical statistics, a mathematical model is proposed based on regression analysis to determine the bearing capacity of steel concrete columns. The paper presents an improved finite-element model in PC "Lira" which takes into account physical, geometric and constructive nonlinearities, evaluated stress-strain and boundary states.

The satisfactory coincidence of experimental results and calculations performed on the proposed mathematical model obtained with the help of ITU in the software complex "Lira" is obtained, which allows us to conclude that the mathematical model corresponds to the investigated process of destruction of the column.

The results of the dissertation work are introduced into the practice of designing and building, as well as in the educational process.

Keywords: steel-concrete columns, stress-deformed state, flexible bone, stability, depth sensor, numerical modeling, finite-element model.

ПЕТРЕНКО ДМИТРО ГРИГОРОВИЧ

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГНУЧКИХ
СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 1.10.2018 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Зам. №

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953).
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. 717-03-54
www.modelist.in.ua