


Міністерство освіти і науки України

Українська державна академія залізничного транспорту

ІГНАТЕНКО ЄВГЕНІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 624.016+624.075

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН ПРИ СТАТИЧНОМУ
КОРОТКОЧАСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Спеціальність 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, професор
Чихладзе Елгуджа Давидович;

– кандидат технічних наук, доцент
Лобяк Олексій Вікторович,
Українська державна академія
залізничного транспорту, доцент кафедри
будівельної механіки та гідравліки.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, доцент
Єрмоленко Дмитро Адольфович,
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри
конструкцій з металу, дерева та пластмас;

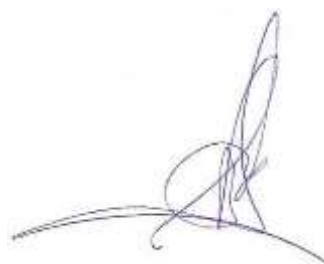
– кандидат технічних наук, доцент
Кобзева Олена Миколаївна,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, доцент кафедри мостів, конструкцій та
будівельної механіки.

Захист відбудеться «19» грудня 2013 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 при Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейербаха, 7.

Автореферат розісланий «18» листопада 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., доц.



Г.Л. Ватуля

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні тенденції в сфері будівельних конструкцій характерні пошуком нових видів поєднання сталі і бетону, що забезпечують їх раціональну спільну роботу, і спрямовані на забезпечення економії матеріалів, енерго- і трудовитрат.

Трудомісткість виготовлення, слабкий опір механічним пошкодженням, дорога 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 більш масштабного застосування сталобетонних конструкцій.

Використання сталобетонних елементів прямокутного перерізу в конструкції 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 обтиснення витримує напруження, значно перевищуючі його призмову міцність.

Основним недоліком сталобетонних колон є можливість втрати місцевої стійкості стінкою колони до моменту досягнення в бетонному ядрі граничних напружень і як наслідок неповне використання несучої здатності конструкції. У зв'язку з цим розробка нових конструктивних рішень сталобетонних колон, які дозволяють запобігти місцевій втраті стійкості, зберігаючи при цьому поперечне обтиснення бетонного ядра, є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках наукових тем кафедри будівельної механіки та гідравліки Української державної академії залізничного транспорту за 2010–2013 рр.: № 0106U004122 «Розробка теорії та методів розрахунку комбінованих конструкцій транспортних споруд»; № 0110U002127 «Розробка теорії та методів оптимізації несучих конструкцій транспортних споруд».

Мета дослідження – розробка конструкції сталобетонного елемента, яка знижує можливість втрати місцевої стійкості стінкою обойми; створення методики визначення несучої здатності даного сталобетонного елемента.

Задачі дослідження:

- виконати аналітичний огляд літературних даних з дослідження роботи сталобетонних колон;
- розробити алгоритм розрахунку сталобетонних колон з урахуванням нелінійності деформування бетонного ядра;
- виконати експериментальні дослідження коротких сталобетонних колон при центральному стиску;
- вивчити вплив наявності поперечних гофр на особливості роботи конструкції;
- виконати чисельний розрахунок коротких сталобетонних колон і порівняти отримані дані з експериментальними результатами;

- оцінити ефективність застосування запропонованого сталобетонного елемента;
- впровадити результати досліджень у практику будівництва та проектування.

Об'єкт дослідження – деформування і руйнування сталобетонних колон з гофрованою замкнутою обіймою при статичному короткочасному навантаженні.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан сталобетонних колон з поперечними гофрами при статичному короткочасному навантаженні.

Методи дослідження – експериментальні методи оцінки напружено-деформованого стану та несучої здатності сталобетонних колон з гофрованою обіймою, методи будівельної механіки для дослідження напружено-деформованого і граничного стану коротких сталобетонних колон при короткочасному центральному стиску; метод скінченних елементів для чисельної реалізації, порівняння і аналіз результатів дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна наданих досліджень визначається:

- конструкціями сталобетонних елементів квадратного перерізу;
- запропонованою інженерною методикою визначення несучої здатності сталобетонного елемента при короткочасному статичному навантаженні;
- експериментальними результатами про характер деформування і руйнування сталобетонних колон квадратного перерізу, обійма яких складається з металевого профільованого листа.

Практичне значення одержаних результатів. Використання в практиці будівництва сталобетонних колон дозволяє скоротити металоємність, отримати більш високу несучу здатність при рівних поперечних перерізах в порівнянні з залізобетонними конструкціями даного типу. Запропоновану сталобетонну конструкцію найбільш доцільно використовувати при високих рівнях напружено-деформованого стану та обмежених розмірах перерізу.

На запроповану конструкцію сталобетонного елемента отримано два патенти України на корисну модель.

Матеріали дисертаційної роботи були використані при проектуванні та реконструкції об'єктів метрополітену та інших транспортних споруд у ПрАТ «Харківметропроект», а також результати досліджень знайшли практичне впровадження в навчальному процесі і при дипломному проектуванні в Українській державній академії залізничного транспорту.

Особистий внесок здобувача.

1. На підставі літературних джерел виконано аналіз конструктивних рішень, області застосування і методів розрахунку коротких сталобетонних колон при центральному стиску.
2. Запропонована нова конструкція сталобетонного елемента та обґрунтована раціональність його застосування в практиці будівництва.
3. Розроблено математичний апарат, що дозволяє оцінити напружено-деформований стан і несучу здатність сталобетонних елементів при центральному короткочасному навантаженні.

4. Розроблено скінченно-елементну модель в ПК «Ліра» (ліцензія №4д/1217), яка враховує фізичну, геометричну і конструктивну нелінійність.

5. Проведено експериментальні дослідження коротких сталобетонних елементів, які відрізняються висотою і наявністю поперечних гофр. Досліджено вплив характеристик міцності матеріалів на несучу здатність сталобетонних елементів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на:

- Науково-технічних конференціях Української державної академії залізничного транспорту (2011 – 2013 рр.).
- VIII-й міжнародній конференції «Проблеми прочности материалов и сооружений на транспорте» (м. Санкт-Петербург, 22 – 23 червня 2011 р.).
- 27-й міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012» (www.sworld.com.ua, 19 – 30 червня 2012 р.).
- X-й міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения» (м. Ялта, 10 – 14 вересня 2012 р.).
- Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології і методи розрахунків у будівництві» (м. Луцьк, 27 – 29 вересня 2012 р.).
- 29-й міжнародній науково-практичній конференції «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012» (www.sworld.com.ua, 18 – 27 грудня 2012 р.).
- Всеукраїнській інтернет-конференції молодих вчених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (м. Полтава, 21 – 22 листопада 2012 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 11 наукових працях, у тому числі 7 статей у виданнях, рекомендованих МОН України, 2 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій. Отримано 2 патенти України на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури та додатків. Дисертація викладена на 177 сторінках і містить 129 сторінок основного тексту, 7 таблиць, 71 рисунок, 157 найменувань літератури, 5 додатків на 30 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі дисертації виконано аналіз досліджень міцності бетону в умовах тривісного напруженого стану, розглянуто існуючі види сталобетонних колон, описана світова і вітчизняна практика їх застосування. Досліджені методи розрахунку сталобетонних колон, існуючі методи оцінки місцевої стійкості конструкцій.

Дослідженням об'ємного напруженого стану займались: Т. Карман, А. Феппелю, Консидеру, далі дослідження продовжили Амелянович К.К., Берг О.Я., Біч П.М., Бондаренко В.М., Воронков Р.В., Генієв Г.А., Гвоздев О.О., Голосов В.М., Долженко А.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 А.В. Всі вони прийшли до висновку про підвищення міцності в умовах об'ємного напруженого стану.

Дослідженням сталобетонних колон займались Гвоздев О.О., Людковський І.Г., Ліпатов А.Ф., Маренін В.Ф., Долженко А.Я., Фонов В.М., Нестерович А.П., Крішан А.Л., Заїкін А.І., Купфер Г., Кобзева О.М., 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.

Проведені дослідження літературних джерел змушують зробити висновок про можливість втрати місцевої стійкості стінки колони, до моменту руйнування бетонного ядра. Розробка нових конструктивних рішень сталобетонних колон, які дозволяють знизити ймовірність втрати місцевої стійкості з забезпеченням поперечного обтиснення бетонного ядра, стала основним завданням даних досліджень.

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

Розглянута в роботі конструкція (рис. 1) являє собою сталобетонний елемент квадратного поперечного перерізу, який складається з бетонного ядра 1, металевої обойми, виконаної з профільованого листа 2, зібраної воедино за допомогою гнутих сталевих кутиків 3, з'єднаних зварним швом 4.

Автором пропонується розглядати настання граничного стану по:

- місцевій стійкості стінкою колони;
- досягненню граничних напружень у бетонному ядрі, або досягненню в металі обойми напружень текучості.

Проведемо 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.

В роботі аналізується фрагмент сталобетонної конструкції, висота якої дорівнює відстані між сторонами сусідніх гофр (рис. 1).

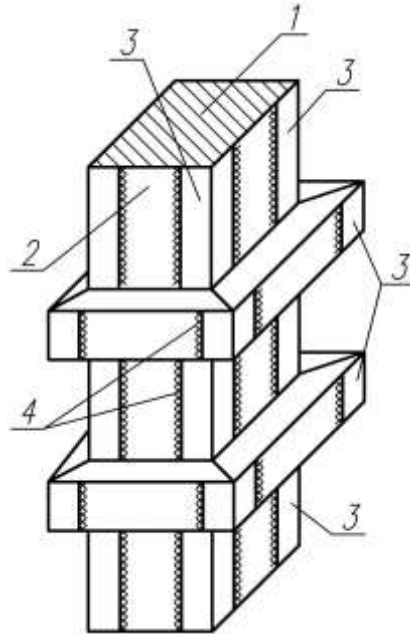


Рис. 1. Схема конструкції запропонованого сталобетонного елемента

Умова сумісності деформацій буде мати вигляд:

$$\Delta l_s = \Delta l_c, \quad \frac{N_s l}{E_s A_s} = \frac{N_c l}{E_c A_c}. \quad (1)$$

Дослідимо ймовірність втрати місцевої стійкості металевої обойми, яка складається із стиснених пластин з защемленими поздовжніми краями і поперечними краями з шарнірним обпиранням (рис. 2).

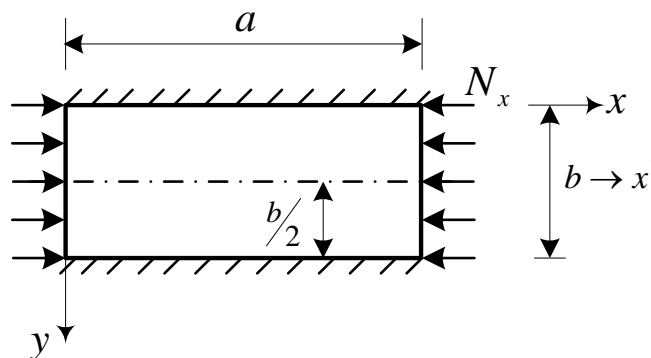


Рис. 2. Розрахункова схема пластини

Вирішивши диференціальне рівняння вигнутої поверхні пластини, отримаємо:

$$\sigma_{ul} = K \frac{\pi^2 D}{b^2 h}, \quad (2)$$

де

$$K = \frac{4}{\pi^4} \left(\frac{a}{mb} \right)^2 (\xi^2 + \eta^2)^2. \quad (3)$$

Проведемо аналіз можливості настання граничного стану з 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. Виділимо сталобетонний елемент одиничної довжини. Розрахункові схеми обойми і ядра елемента показані на рис. 3.

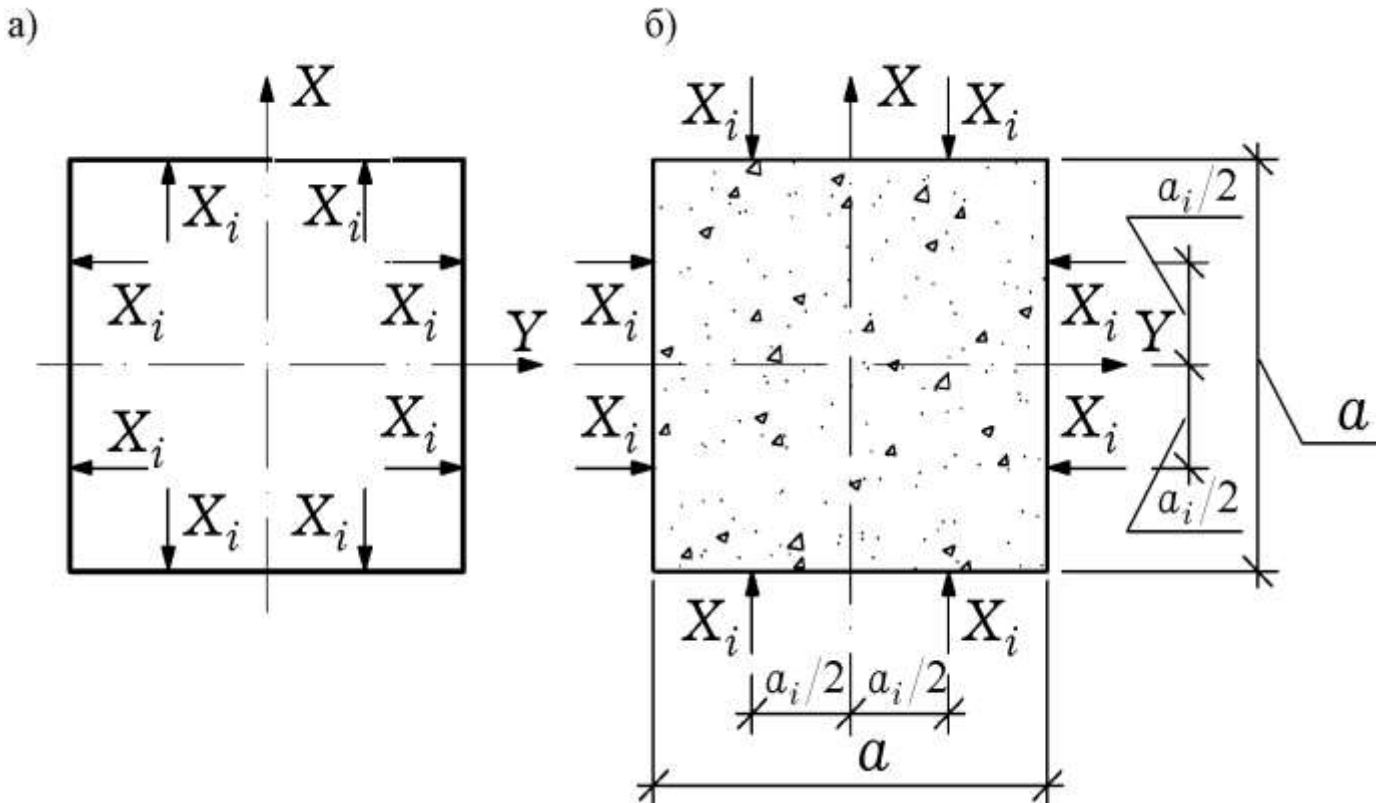


Рис. 3. Розрахункові схеми металевій обоймі (а) і бетонного ядра (б)

Розкриття статичної невизначеності даної конструкції виконуємо за допомогою методу сил. Визначимо контактні сили взаємодії між ядром і обоймою.

Приймаємо, що матеріал обойми ідеально пружнопластичний, а бетон працює в умовах об'ємного напруженого стану. Згідно робіт А.В. Яшина, залежність між напруженнями і деформаціями в бетоні для випадку простого завантаження приймаємо у формі закону Гука.

$$E = \frac{9KG}{G + 3K}, \quad (4)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(G + 3K)}, \quad (5)$$

де K – січний модуль відносних об'ємних деформацій;

G – січний модуль зсуву.

Контактні сили, що діють між ядром і обоймою, знаходимо з умов рівності переміщень на межі контакту з наступної системи рівнянь:

$$A \cdot \bar{X} = -\bar{H}, \quad (6)$$

де

$$A = \begin{Bmatrix} (\delta_{11} - \delta_{11}^*) & (\delta_{12} - \delta_{12}^*) & \dots & (\delta_{1n} - \delta_{1n}^*) \\ (\delta_{21} - \delta_{21}^*) & (\delta_{22} - \delta_{22}^*) & \dots & (\delta_{2n} - \delta_{2n}^*) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\delta_{n1} - \delta_{n1}^*) & (\delta_{n2} - \delta_{n2}^*) & \dots & (\delta_{nn} - \delta_{nn}^*) \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{Bmatrix}, H = \begin{Bmatrix} \Delta_{1c} - \Delta_{1c}^* \\ \Delta_{2c} - \Delta_{2c}^* \\ \dots \\ \Delta_{nc} - \Delta_{nc}^* \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Поперечні переміщення δ_{ki} визначаються для обоєи одиничної довжини в замкнутому вигляді.

Для визначення поздовжніх переміщень від одиничних сил в бетонному ядрі колони, вирішуємо плоску задачу теорії пружності зі змінними по сітці параметрами деформування ν , E . Для визначення поздовжніх переміщень був отриманий вираз (9), який являє собою диференціальне рівняння плоскої задачі теорії пружності із змінними параметрами деформування:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[\frac{1 - \bar{\nu}^2}{\bar{E}} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \frac{\bar{\nu} \cdot (1 + \bar{\nu})}{\bar{E}} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\frac{1 - \bar{\nu}^2}{\bar{E}} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\bar{\nu} \cdot (1 + \bar{\nu})}{\bar{E}} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right] + \\ + \frac{\partial^2}{\partial x \cdot \partial y} \left[\frac{2 \cdot (1 + \bar{\nu})}{\bar{E}} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \cdot \partial y} \right] = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Для чисельного рішення даного диференціального рівняння використовувався метод скінченних різниць. Розглянуту область розбивали на скінченне число точок, які були вузлами скінченно-різницевої сітки з дискретними координатами (I, J) . Для кожної точки сітки, отриманої таким чином, записувалося рівняння (9), причому, частинні похідні замінювалися наближеними виразами через значення шуканої функції напружень у вузлах сітки. У підсумку, диференціальне рівняння зводилося до системи алгебраїчних. Контроль вірності рішення даного диференціального рівняння здійснювався за допомогою принципу Рунге, який дозволяє отримати уточнене рішення та оцінку похибки при наявності двох рішень задачі з різним кроком сітки.

Враховуючи сумісність деформацій, на підставі закону Гука була отримана величина навантаження, яка сприймається сталеву обоймою:

$$N_s = \frac{N}{1 + \frac{A_c \cdot E_c}{A_s \cdot E_s}}. \quad (10)$$

Зв'язавши поперечні деформації обойми з поздовжніми, приймаючи до уваги (10), отримаємо шукані переміщення Δ_{kF} :

$$\Delta_{kF} = \frac{N_s \cdot v_s \cdot a}{E_s \cdot A_s \cdot 2}. \quad (11)$$

Для визначення переміщень у бетонному ядрі від зовнішніх впливів вирішуємо просторову задачу теорії пружності для призматичного тіла, виконаного з ізотропного матеріалу із змінними параметрами деформування і, завантаженого двома рівними і протилежно спрямованими зосередженими поздовжніми силами, прикладеними в геометричному центрі ваги поперечного перерізу бетонного ядра колони.

$$\Delta_{kF}^* = \frac{2N}{a \cdot E} v. \quad (12)$$

Кінцевий розподіл напружень в поперечному перерізі ядра й обойми центрально-стиснутого елемента при навантаженні:

$$N = f_{ck, prism} \cdot a^2 + f_{yk} \cdot A_s, \quad (13)$$

де $f_{ck, prism}$ – призмova міцність бетону;

a – геометрична характеристика бетонного ядра;

f_{yk} – напруження текучості сталі;

A_s – площа сталі.

При осьовому стиску граничні поздовжні напруження $\bar{\sigma}$ у бетонному ядрі обчислюються з використанням критерію міцності А.В. Яшина. Граничні напруження в металевій обоймі σ_{s1} обчислюються за допомогою енергетичного критерію міцності Мізеса:

$$\sigma_{s1} = \frac{f_{yk}}{\sqrt{1 + \eta_s^2 - \eta_s}}, \quad (14)$$

де η_s – відношення поперечних напружень σ_{s2} до поздовжніх σ_{s1} .

Вище описане рішення реалізується кроковим навантаженням пропонованої сталобетонної колони. Нелінійна сторона завдання апроксимується послідовністю наближень, змінними параметрами якого є січний модуль деформації бетону і коефіцієнт Пуассона в кожній точці скінченно-різницевої сітки, що використовується.

Гранична несуча здатність сталобетонного елемента визначається за формулою:

$$N = \sum_{n=1}^{\xi} \bar{\sigma} \cdot A_{cn} + \sum_{m=1}^{\tau} \sigma_{s1m} \cdot A_{sm}, \quad (15)$$

де ξ – кількість елементів бетонного ядра;

τ – кількість елементів металевої обойми.

Розроблена методика опису процесу деформування конструкції дозволяє зберегти якісний й кількісний впливи особливостей деформування бетонного ядра в умовах об'ємного напруженого стану на жорсткостні властивості елементів

конструкції; отримати точну оцінку деформативних властивостей перерізу з урахуванням неоднорідності напруженого стану; виразити жорсткостні характеристики через неперервні функції деформованого стану перерізу.

У роботі запропонована скінченно-елементна модель в ПК «Ліра», яка враховує фізичну, геометричну і конструктивну нелінійності.

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

Металева обойма сталобетонного елемента моделювалася за допомогою КЕ 241. Для моделювання бетонного ядра був прийнятий КЕ 231. Сумісна робота між металевою обоймою і бетонним ядром забезпечувалась за допомогою КЕ 265. 14 кусково-лінійний закон деформування використовувався для опису властивостей бетонного ядра, визначався аналітично за допомогою теорії Яшина А.В., як для бетонного зразка, що знаходиться в об'ємному напруженому стані.

Моделі конструкції розраховувалися на рівномірно розподілене статичне навантаження. Розрахунок виконувався кроково-ітераційним способом. Результати розрахунку наведено на рис. 4–8.

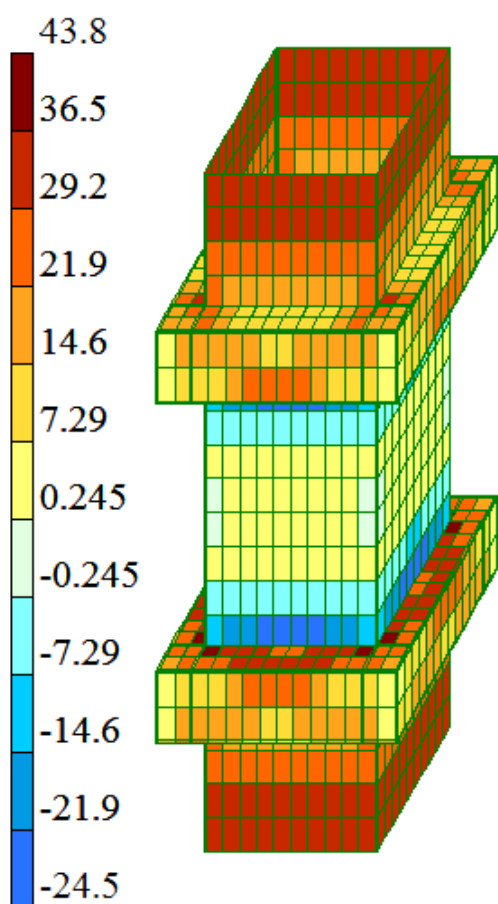


Рис. 4. Ізополя напружень σ_1 , МПа, в металевій обоймі сталобетонного елемента серії II, $N_p = 1498,6$ кН

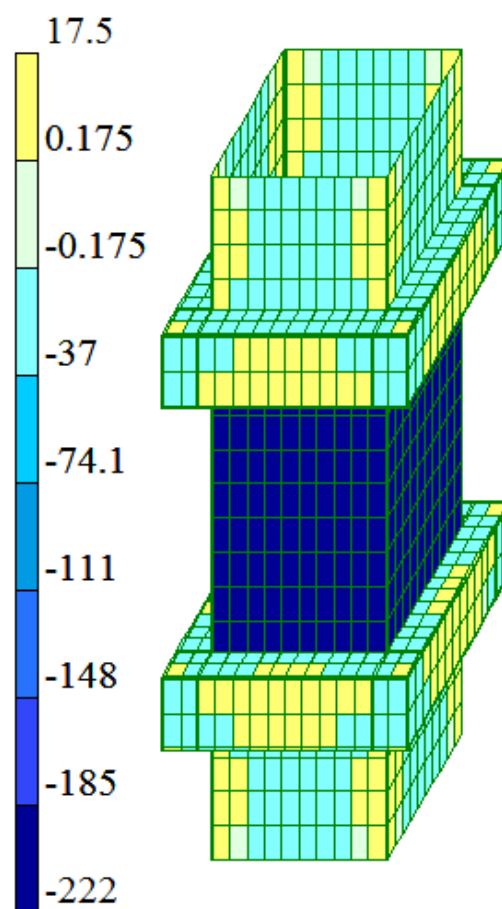


Рис. 5. Ізополя напружень σ_2 , МПа, в металевій обоймі сталобетонного елемента серії II, $N_p = 1498,6$ кН

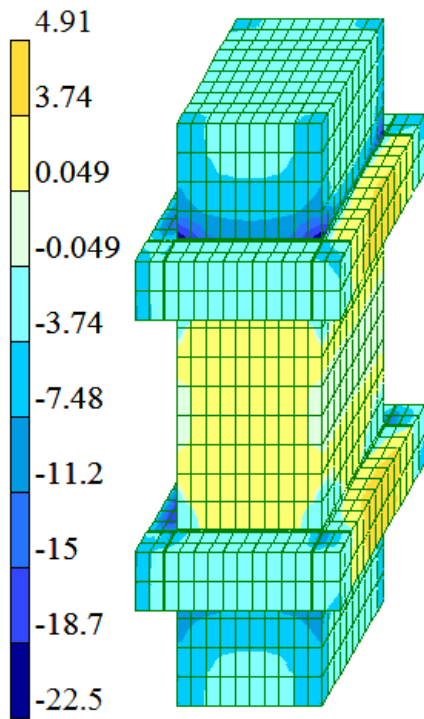


Рис. 6. Ізополя напружень σ_1 , МПа, в бетонному ядрі сталобетонного елемента серії II, $N_p = 1498,6$ кН

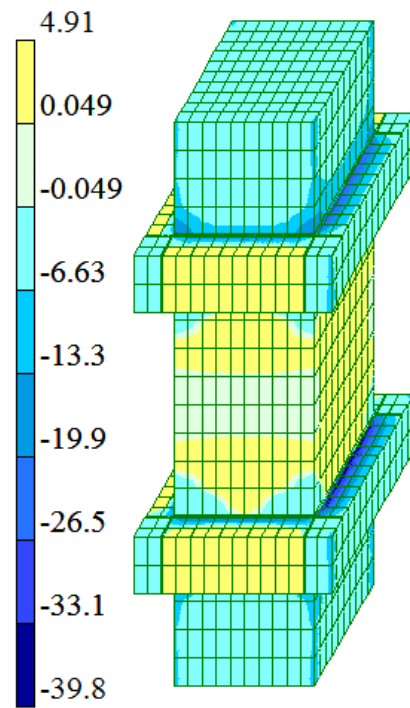


Рис. 7. Ізополя напружень σ_2 , МПа, в бетонному ядрі сталобетонного елемента серії II, $N_p = 1498,6$ кН

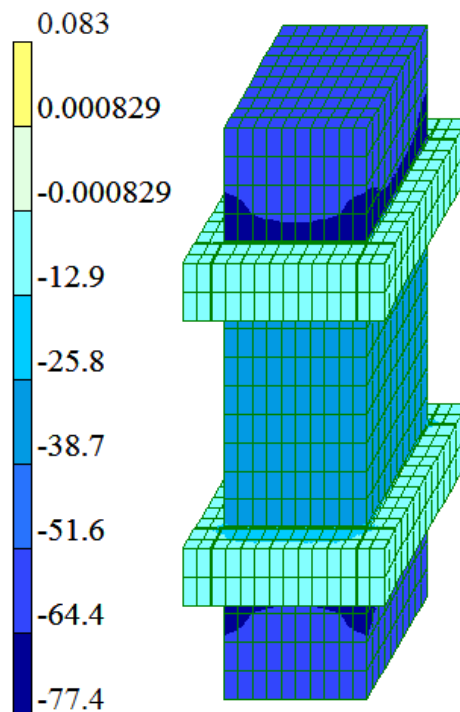


Рис. 8. Ізополя напружень σ_3 , МПа, в бетонному ядрі сталобетонного елемента серії II, $N_p = 1498,6$ кН

Чисельний аналіз конструкції вказав, що зоною концентрації головних напружень σ_1 є верхній і нижній пояси металевої обойми, величини напружень змінюються від 40 МПа до 44 МПа. Зоною концентрації головних напружень σ_2 є область, яка знаходиться між двома сусідніми гофрами, величини напружень близькі до напружень текучості у металі і змінюються від -220 МПа до 230 МПа.

У результаті проведених розрахунків визначено, що зоною концентрації головних напружень σ_3 в бетонному ядрі є кути конструкції. Як видно з отриманих результатів, руйнування настає внаслідок досягнення в бетонному ядрі (у кутових зонах) граничного рівня напружено-деформованого стану.

Третій розділ присвячений експериментальним дослідженням фрагментів сталобетонних колон. Для експериментальних досліджень були виготовлені 2 серії сталобетонних елементів. Серія I включає 6 зразків (рис. 9, 10), серія II – 5 зразків (рис. 11, 12).

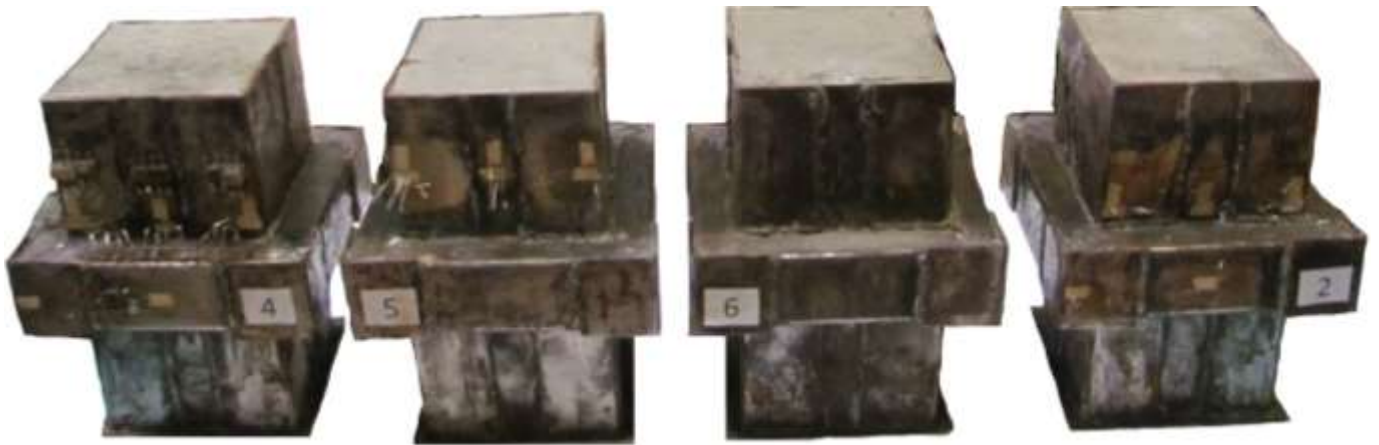


Рис. 9. Вибіркові зразки сталобетонних колон серії I

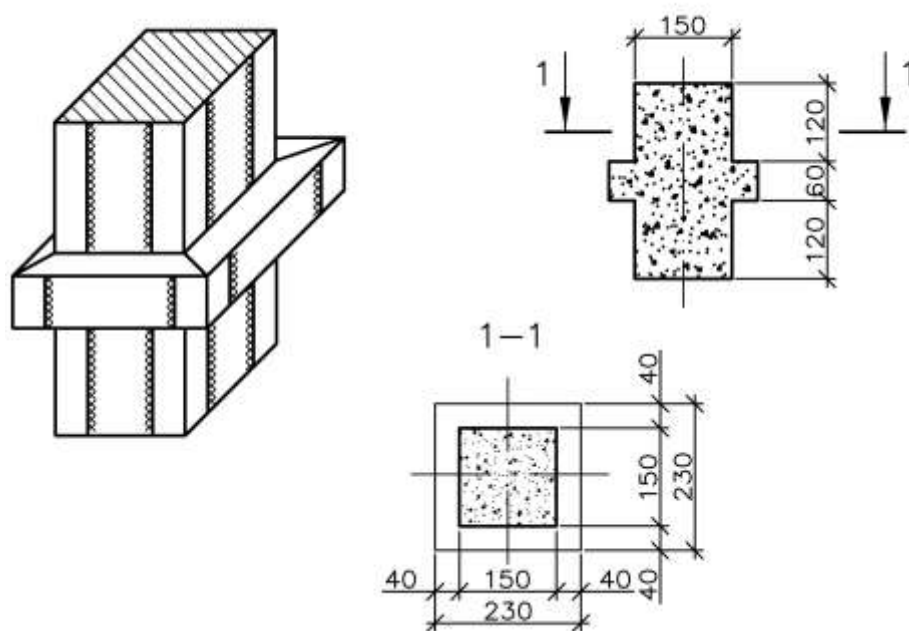


Рис. 10. Геометричні розміри сталобетонних колон серії I



Рис. 11. Дослідні зразки сталевобетонних колон серії II

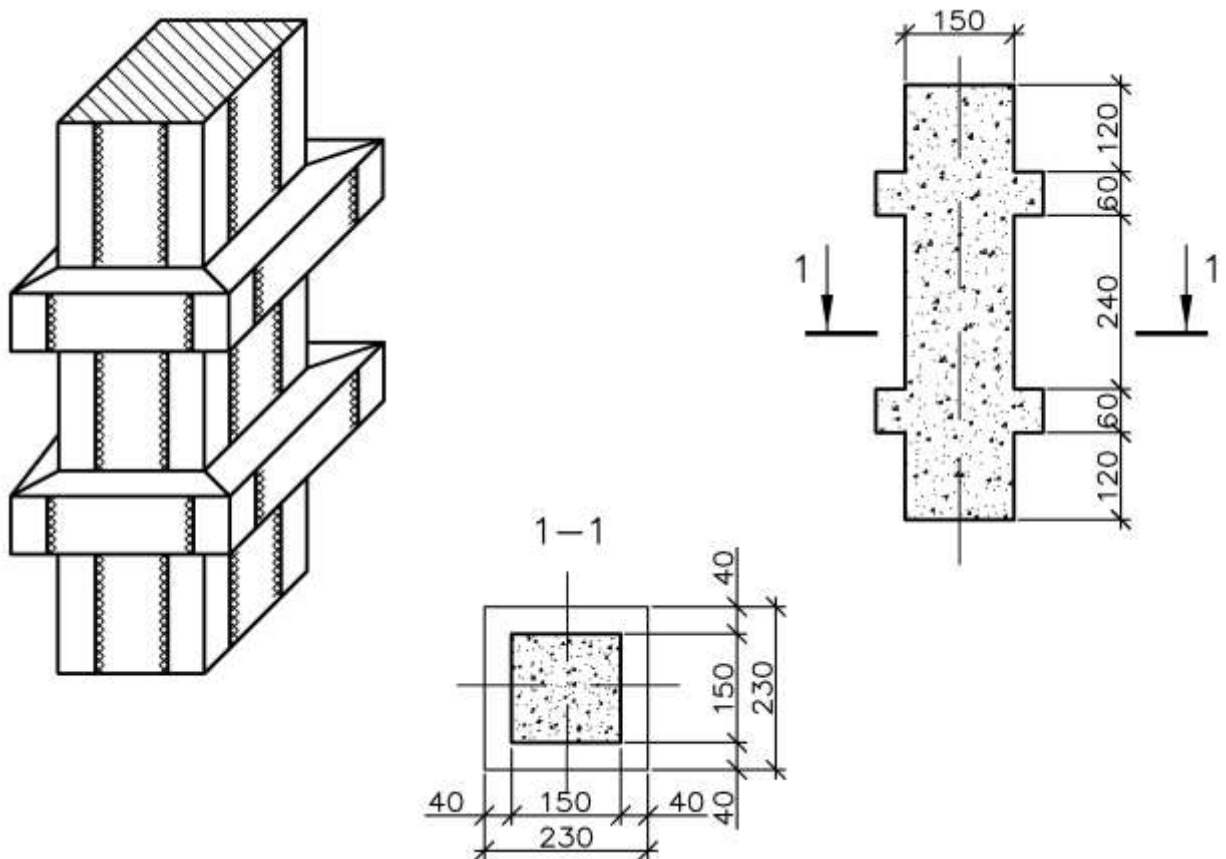


Рис. 12. Геометричні розміри сталевобетонних колон серії II

Для виготовлення бетонного ядра колон використовувався дрібнозернистий бетон С32/40 з водоцементним відношенням 0,43. При приготуванні бетонної суміші застосовувався портландцемент марки М500 Балаклеївського цементного заводу ВАТ «Балцем», пісок Полтавського піщаного кар'єру та щебінь фракції 5-20

мм. Для виготовлення металевої обійми використовувалась листова холоднокатана сталь Ст3 товщиною 2 мм.

Сталобетонні колони випробовувалися на гідравлічному пресі ПММ-250 в лабораторії кафедри будівельної механіки і гідравліки Української державної академії залізничного транспорту.

Для визначення фізико-механічних властивостей бетону і сталі були проведені стандартні випробування.

Осьове навантаження прикладалося на бетон та обійму одночасно. Опорні пристрої забезпечували шарнірну схему закріплення зразка. У процесі випробування вимірювалися поздовжні і поперечні деформації. Для цього в зразках по всьому периметру середнього по довжині перерізу наклеювалися 24 тензодатчики: 12 в поздовжньому і 12 в поперечному напрямках (рис. 13). У зразка серії II тензодатчики приклеювалися у серединній поверхні по висоті між двома сусідніми гофрами. Показання тензодатчиків знімали за допомогою тензометричної станції ВНП-8. Навантаження прикладали по 100 кН в інтервалі від 0 - 800 кН, по 50 кН в інтервалі 800 кН – 1300 кН, по 20 кН в інтервалі від 1300 кН до руйнування.

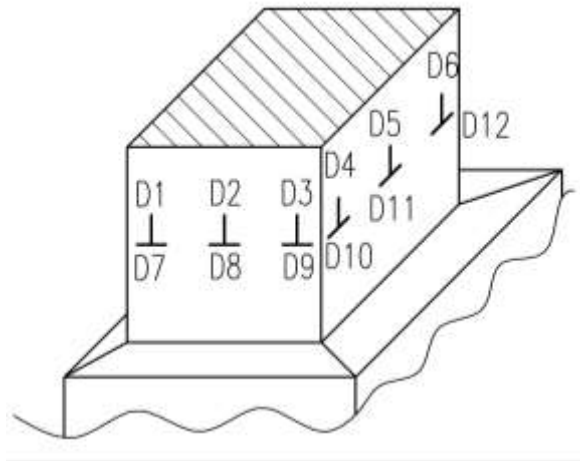


Рис. 13. Розміщення тензодатчиків у зразках

В табл. 1 наведені дані про несучу здатність серій зразків, отриманих: експериментально, за запропонованою інженерною методикою та в результаті чисельного моделювання в ПК «Ліра».

Розбіжність експериментально отриманих несучих здатностей пояснюється різною призмовою міцністю бетонних ядер випробуваних елементів. Як бачимо з наведених у табл. 3 результатів, відносна похибка між результатами, отриманими експериментальним шляхом і результатами, отриманими за допомогою МСЕ (ПК «Ліра»), становить не більше 10 %. Відносна похибка між результатами, отриманими експериментальним шляхом і результатами, отриманими за допомогою інженерної методики, становить не більше 13 %. Можна зробити висновок, що реалізована інженерна методика є прийнятною для визначення несучої здатності сталобетонних колон пропонованої конструкції.

Результати випробування сталобетонних колон на центральний стиск

№ серії	№ зразка	Розміри перерізу, мм	A_c , см ²	A_s , см ²	A_s/A_c , %	$N_{теор}$, кН	$N_{МСЕ}$ (ПК «Ліра»), кН	$N_{дос}$, кН	% розходження	
									$N_{дос} - N_{МСЕ}$	$N_{дос} - N_{теор}$
I	1	153	225	18,32	8,14	1353	1405	1528.1	8.1	11.5
	2	154	225	18,4	8,18	1353	1405	1512	7.1	10.5
	3	154	225	18,4	8,18	1467	1525	1590.7	4.1	7.8
	4	151	225	18,16	8,07	1353	1405	1513	7.1	10.6
	5	156	225	15,56	8,25	1467	1525	1617.9	5.7	9.3
	6	155	225	18,48	8,21	1353	1405	1541.2	8.8	12.2
II	9	150	225	18,08	8,04	1354	1380	1498.6	7.9	9.6
	10	152	225	18,24	8,11	1354	1380	1489.8	7.4	9.1
	11	156	225	18,56	8,25	1430	1480	1594.8	7.2	10.3
	12	155	225	18,48	8,21	1354	1380	1491.0	7.4	9.2
	13	155	225	18,48	8,21	1430	1460	1610.4	9.3	11.2

За результатами показань тензодатчиків для зразків серії I, II були побудовані залежності $N - \varepsilon$ (рис. 14 – 17).

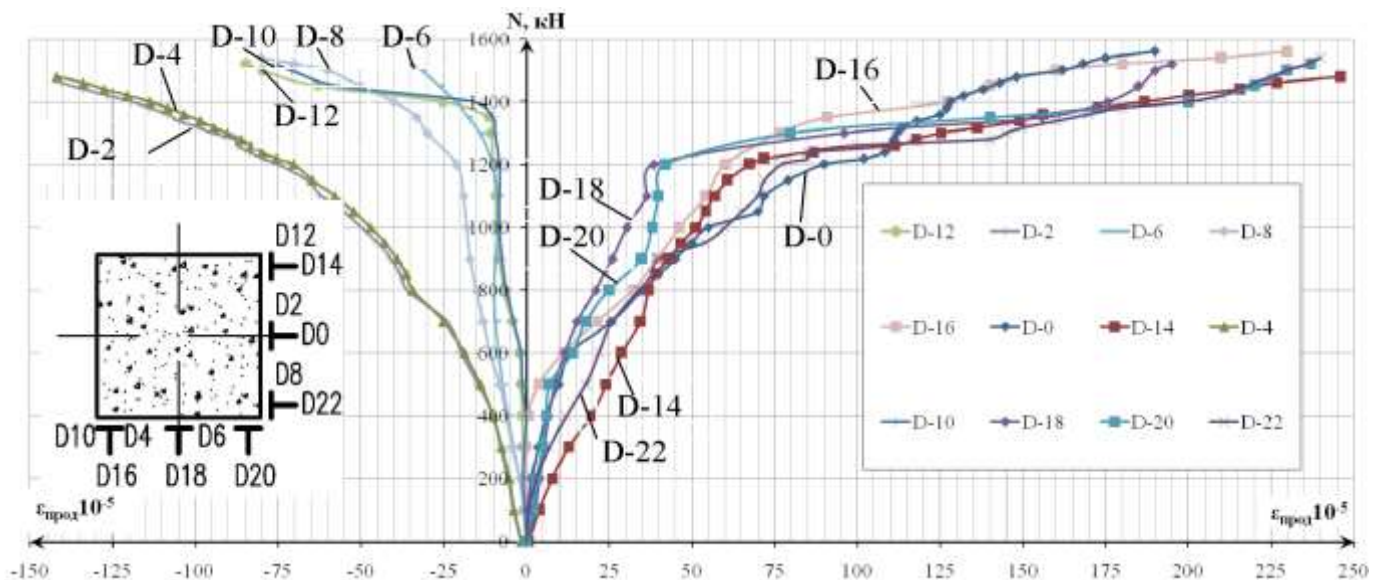


Рис. 14. Графіки зміни поздовжніх і поперечних деформацій об'єкту при центральному стиску в зразку № 5

Аналіз даних діаграм серії зразків I, II дозволяє відзначити, що характер розподілу деформацій по периметру перерізу зразків був неоднаковим. На перших етапах навантаження залежності поздовжніх і поперечних деформацій від навантаження були практично лінійні, або близькі до них. Далі при навантаженні

$(0,5-0,60) \times N_{роз}$ лінійність порушувалася, а при $(0,75-0,80) \times N_{роз}$ відбувалось їх інтенсивне зростання.

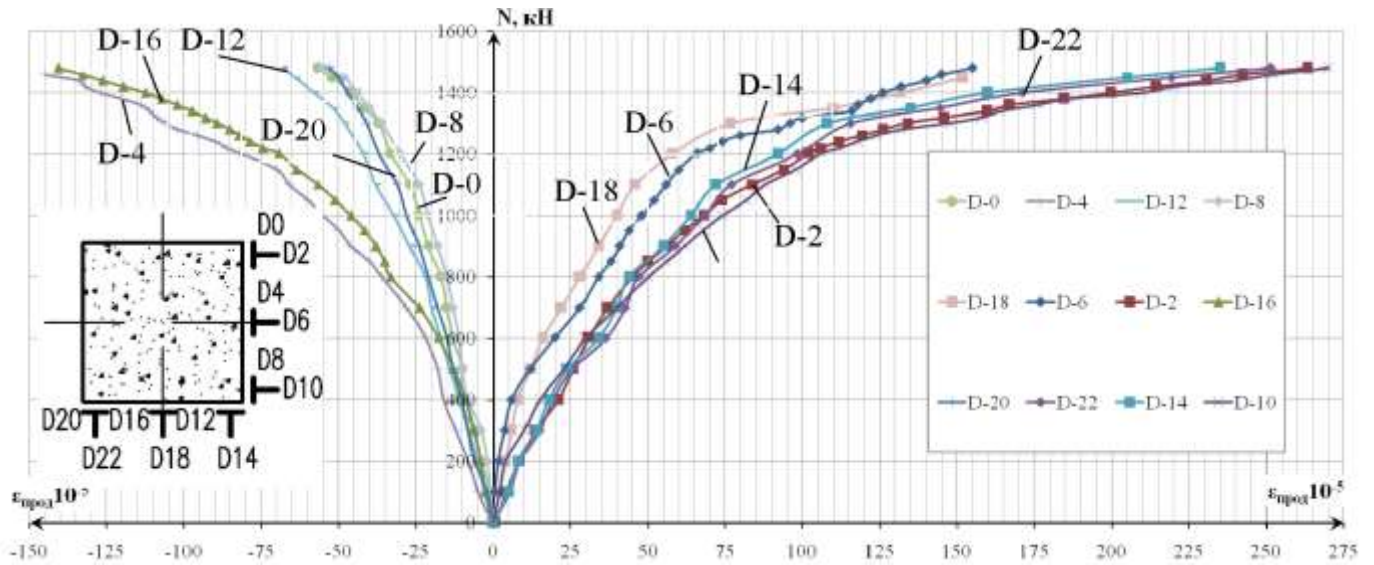


Рис. 15. Графіки зміни поздовжніх і поперечних деформацій обойми при центральному стиску в зразку № 6

Вичерпання несучої здатності зразків серії I відбувається з незначним випинанням стінки колони. Вичерпання несучої здатності зразків серії II відбувається без зовнішніх ознак втрати місцевої стійкості стінок конструкції. Візуальний огляд обойми після випробування підтвердив відсутність втрати місцевої стійкості.

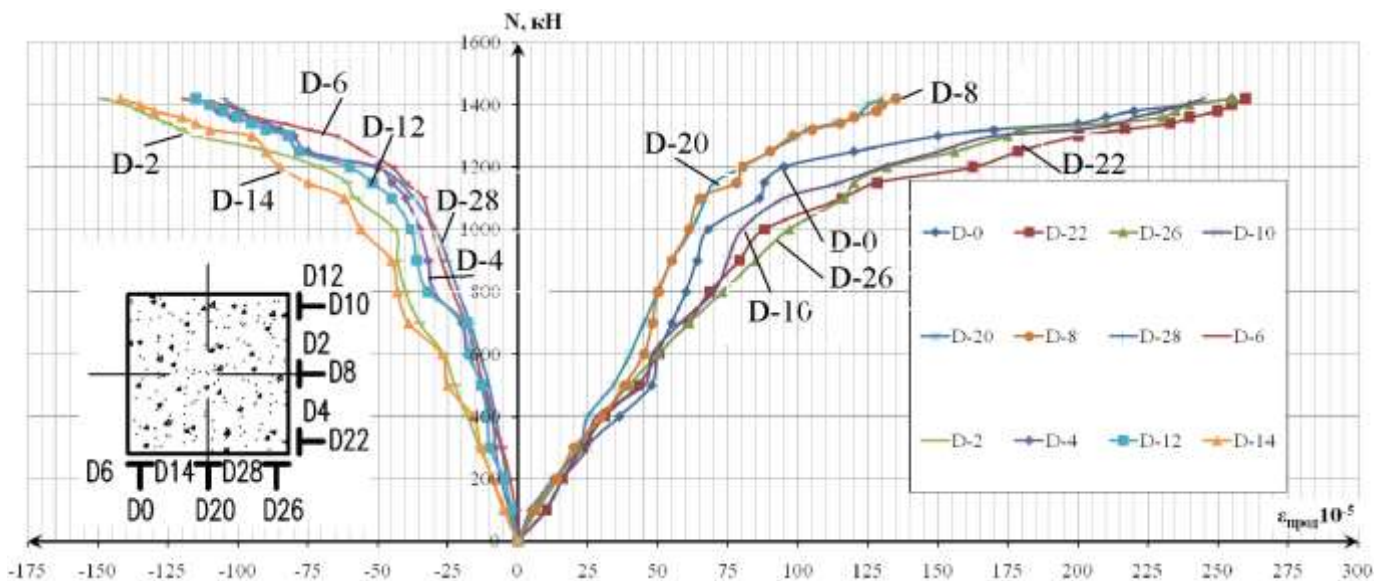


Рис. 16. Графіки зміни поздовжніх і поперечних деформацій обойми при центральному стиску в зразку № 10

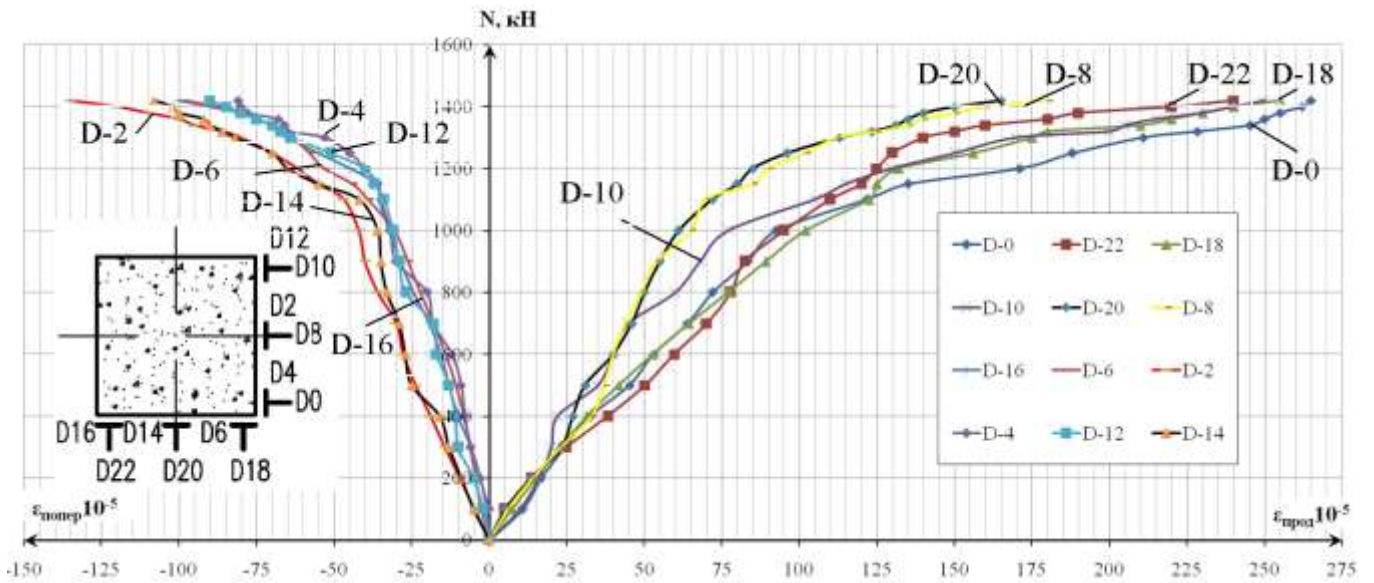


Рис. 17. Графіки зміни поздовжніх і поперечних деформацій обійми при центральному стиску в зразку № 12

Як показали дослідження, найбільші поздовжні деформації виникають в кутах перерізу, в середині перерізу вони значно менші. Поперечні деформації, навпаки, – в середині перерізу значно більші, ніж у кутах перерізу (рис. 18).

В момент руйнування поздовжні напруження в обіймі сталобетонних колон дорівнюють $1,1f_{yk}$.

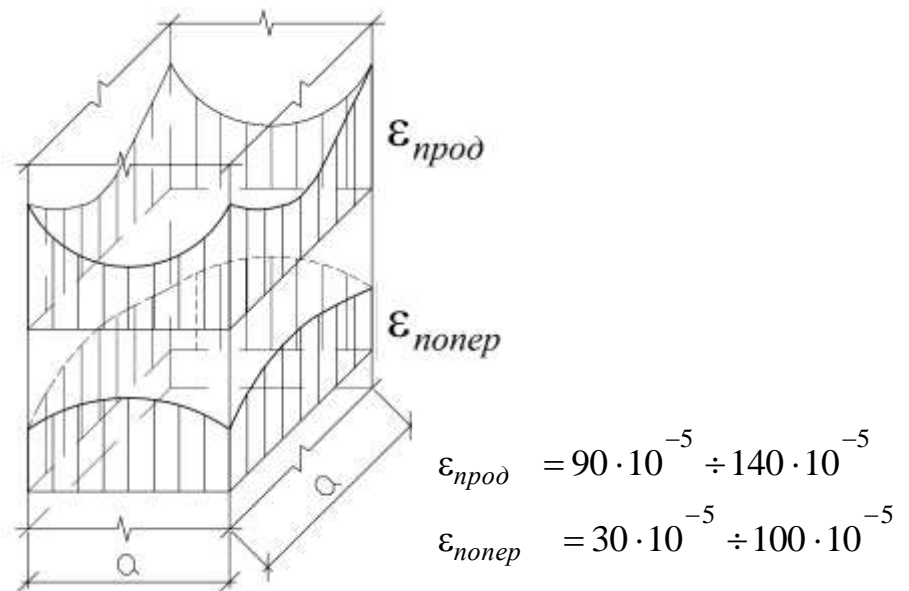


Рис. 18. Усереднені епюри розподілу поздовжніх і поперечних деформацій у перерізі контуру в зразках серії I, II

Після випробування зразків був проведений демонтаж металевої обійми, що і виявив повне руйнування бетону в кутових зонах, це ще раз доводить

справедливість припущення про настання граничного стану внаслідок руйнування бетонного ядра, і підтверджує теорію про найбільше обтиснення бетонного ядра в кутових зонах (рис. 19).



Рис. 19. Зовнішній вигляд сталобетонного зразка серії II з демонтованою металевою обіймою

Слід зазначити, що дослідні зразки серій I , II не втрачали несучої спроможності миттєво. Отримуючи значні деформації (про що свідчать діаграми $N - \varepsilon$), вони ще тривалий час витримували значне навантаження.

Четвертий розділ містить опис умов використання зовнішнього сталевго армування в будівельній практиці; порівняння ефективності роботи сталобетонних колон (з поперечними гофрами), сталобетонних колон і залізобетонних колон, впровадження сталобетонних колон.

Параметри порівнюваних зразків підібрані з умови їх еквівалентності за несучою здатністю, механічними властивостями матеріалів і геометричними розмірами. Результати зіставлення вказані в табл. 2.

Таблиця 2

Показники матеріалоемності і несучої здатності порівнюваних елементів

Тип колони	Руйнівне навантаження, кН	Площа поперечного перетину армування A_s , см ² .	Вага армування на 1 п.м. колони	Коефіцієнт ефективності (за матеріалом)
Залізобетонна колона	6144	140	109,2	1
Сталобетонна колона	7090	79	61,62	1,44
Сталобетонна колона з поперечними гофрами	6990	63,36	56,3	1,55

Як видно з наведених розрахунків, використання запропонованої сталобетонної колони дає економію сталі порівняно із залізобетонною колоною на 55 %, а порівняно із сталобетонною без поперечних гофр – на 11 %.

ВИСНОВКИ

1. Проведений огляд літературних джерел дозволяє стверджувати, що розробка нових конструктивних рішень сталобетонних колон є актуальним завданням, спрямованим на зниження ресурсоемності будівництва.

2. Запропонована розрахункова методика, що враховує можливість настання граничного стану по місцевій стійкості металевої обойми, або по досягненню граничних напружень в бетонному ядрі, напруження текучості сталі в металевій обоймі.

3. Розроблена скінченно-елементна модель в ПК «Ліра», яка враховує фізичну, геометричну і конструктивну нелінійності.

4. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують раціональність застосування запропонованого сталобетонного елемента в практиці будівництва. Металева обойма трансформує двовісний напружений стан у тривісний, таким чином, підвищуючи призмову міцність бетону, і, як наслідок, несучу здатність конструкції. Наявність поздовжніх гофр знижує можливість втрати місцевої стійкості, таким чином руйнування сталобетонної колони відбувається по досягненню граничних напружень в бетонному ядрі, що значно покращує її несучу здатність.

5. Збіжність теоретичних та експериментальних даних в межах 13 % дозволяє судити про достатню адекватність проведених досліджень.

6. При рівній несучій здатності використання запропонованої конструкції сталобетонної колони забезпечує економію сталі в порівнянні з залізобетонною колоною на 55 %, а в порівнянні зі сталобетонною без поперечних гофр – на 11 %.

7. За результатами дисертаційної роботи отримано 2 патенти України на корисну модель.

8. Запропонована конструкція впроваджена в практику проектування будівництва і реконструкції об'єктів метрополітенів та інших транспортних споруд ПрАТ «Харківметропроект».

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні публікації:

1. Игнатенко Е.В. Расчет сталобетонных элементов квадратного сечения на прочность при кратковременном осевом сжатии / Е.В. Игнатенко // Зб. наук. праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – Рівне, 2011. – Вип. 22. – С. 347 - 351.
2. Игнатенко Е.В. Расчет и конструирование коротких сталобетонных колонн / Е.В. Игнатенко // Зб. наук. праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 56 - 60.
3. Ватуля Г.Л. Экспериментальные исследования сталобетонных колонн в гофрированной обойме / Г.Л. Ватуля, Е.В. Игнатенко, Д.Г. Петренко // Сб.

науч. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск, 2012. – Вып. 65. – С. 123 - 126.

Особистий внесок: визначено граничні навантаження на сталобетонні колони, вивчено характер вичерпання їх несучої здатності.

4. Игнатенко Е.В. Экспериментальные исследования коротких сталобетонных колонн / Е.В. Игнатенко // Зб. наук. праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – Рівне, 2012. – Вип. 24. – С. 147 - 152.
5. Игнатенко Е.В. Экспериментальные исследования сталобетонных колонн при статическом кратковременном нагружении / Е.В. Игнатенко // Сб. науч. трудов SWorld. – Одесса, 2012. – Том. 47. – С. 62 - 66.
6. Игнатенко Е.В. Расчет сталобетонных колонн при действии кратковременной статической нагрузки / Е.В. Игнатенко, А.В. Лобяк // Журнал «Бетон и железобетон в Украине». – Полтава, 2012. – Вип. 5. – С. 30 - 32.
Особистий внесок: створено методику розрахунку сталобетонних колон у гофрований обоймі.
7. Игнатенко Е.В. Экспериментальные исследования сталобетонных колонн / Е.В. Игнатенко // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків, 2013. – Вип. 138. – С. 272-276.

Додаткові публікації:

1. Пат. 72655 Україна, МПК Е 04 С 3/30, Е 04 С 2/28. Сталобетонний елемент / Ватуля Г.Л., Лобяк О.В., Ігнатенко Є.В.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u2012 01547; заявл. 13.02.12; опубл. 27.08.12, Бюл. № 16.
Особистий внесок: спосіб об'єднання профільованих листів в єдину обойму.
2. Пат. 79911 Україна, МПК Е 04 С 3/30, МПК Е 04 С 2/28. 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. 26.09.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9.
Особистий внесок: спосіб виробництва металевої обойми з одного листа.
3. Игнатенко Е.В. Расчет сталобетонных колонн при действии кратковременной статической нагрузке / Е.В. Игнатенко, А.В. Лобяк // Матеріали Всеукраїнської Інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва». – Полтава, 2012. – С. 131 - 134.
Особистий внесок: створено методику розрахунку сталобетонних колон у гофрований обоймі.
4. Гапонова Л.В. Изучение влажностного режима современных ограждающих конструкций при нестационарных условиях / Л.В. Гапонова, Е.В. Игнатенко, Д.В. Головка // Сборник тезисов докладов VIII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте». – Санкт-Петербург, 2011. – С. 26 - 28.

Особистий внесок: оцінка можливості використання сталобетонних конструкцій в якості несучих і теплоізолюючих конструкцій в широкому діапазоні зміни тепловологих параметрів.

АНОТАЦІЯ

Ігнатенко Є.В. Несуча здатність сталобетонних колон при статичному короткочасному навантаженні. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. - Українська державна академія залізничного транспорту МОН України, Харків, 2013.

Дисертація присвячена теоретико-експериментальним дослідженням сталобетонних колон у гофрованій обоймі при статичному короткочасному навантаженні.

Проведений огляд літературних джерел дозволяє зробити висновок про те, що сталобетонні конструкції є конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними залізобетонними. Для зменшення металоємності сталобетонних конструкцій і більш повного використання несучої здатності бетонного ядра була запропонована нова конструкція сталобетонного елемента. Дослідження запропонованої конструкції на центральний стиск є основною метою дисертаційної роботи.

У роботі запропонована розрахункова методика, що враховує граничний стан за втратою місцевої стійкості металевої обойми, або по досягненню граничних напружень в бетонному ядрі, напружень текучості сталі в металевій обоймі.

Запропоновано алгоритм і написана програма розрахунку несучої здатності запропонованого сталобетонного елемента.

У роботі розроблена скінченно-елементна модель в ПК «Ліра», яка враховує фізичну, геометричну і конструктивну нелінійності, оцінений напружено-деформований і граничний стани.

В результаті експериментальних досліджень сталобетонних колон були отримані дані про характер їх напружено-деформованого стану на різних етапах навантаження, дані про граничний стан конструкції.

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

Експериментальні та чисельні дані дозволяють зробити висновок про раціональність застосування запропонованої сталобетонної колони в практиці будівництва. Використання запропонованої сталобетонної колони (при рівній несучій здатності) дає економію сталі порівняно із залізобетонною колоною на 55 %, а в порівнянні зі сталобетонною без поперечних гофр – на 11 %.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в практику проектування і будівництва.

Ключові слова: сталобетонна колона, несуча здатність, напружено-деформований стан, об'ємний напружений стан, профільований лист, бетонне ядро, метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, експериментальні дослідження.

АННОТАЦИЯ

Игнатенко Е.В. Несущая способность сталебетонных колонн при статическом кратковременном нагружении. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2013.

Диссертация посвящена теоретико-экспериментальным исследованиям сталебетонных колонн в гофрированной обойме при статическом кратковременном нагружении.

Проведенный обзор литературных источников позволяет сделать вывод о том, что сталебетонные конструкции являются конкурентоспособными в сравнении с традиционными железобетонными. Для уменьшения металлоёмкости сталебетонных конструкций и более полного использования несущей способности бетонного ядра была предложена новая конструкция сталебетонного элемента. Исследование предложенной конструкции на центральное сжатие является основной целью диссертационной работы.

В работе предложена расчётная методика, учитывающая предельное состояние по потере местной устойчивости металлической обоймы, или по достижению предельных напряжений в бетонном ядре, напряжений текучести стали в металлической оболочке.

Предложен алгоритм и написана программа расчёта несущей способности предложенного сталебетонного элемента.

В работе разработана конечно-элементная модель в ПК «Ли́ра», которая учитывает физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности, оценено напряжённо-деформированное и предельное состояния.

В результате экспериментальных исследований сталебетонных колонн были получены данные о характере их напряжённо-деформированного состояния на различных этапах нагружения, данные о предельном состоянии конструкции.

Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных результатов и расчётов, выполненных по предложенной инженерной методике, полученных при помощи МКЭ в программном комплексе «Ли́ра», что позволяет сделать вывод о соответствии математической модели исследуемому процессу разрушения колонны.

Экспериментальные и численные данные позволяют сделать вывод о рациональности применения предложенной сталебетонной колонны в практике строительства. Использование предложенной сталебетонной колонны (при равной несущей способности) даёт экономию стали по сравнению с железобетонной колонной на 55 %, а по сравнению со сталебетонной без поперечных гофр – на 11 %.

Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования и строительства.

Ключевые слова: сталебетонная колонна, несущая способность, напряжённо-деформированное состояние, объемное напряженное состояние, профилированный лист, бетонное ядро, метод конечных разностей, метод конечных элементов, экспериментальные исследования.

ABSTRACT

Evgeniy Ignatenko. Carrying capacity of steel concrete columns under static instantaneous loading. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.23.01 – constructions, buildings and structures. – Ukrainian State Academy of Railway Transport MON of Ukraine, Kharkov, 2013.

Dissertation is devoted to theoretical and experimental researches of steel concrete columns in the corrugated cage at a static instantaneous loading.

The paper presents the design methodology that takes into account limiting condition for the loss of local stability of the metal holder, or to achieve the limit stresses in the concrete core, the stress strength of the steel in the metal shell.

An algorithm and a program written by calculating the bearing capacity of the proposed reinforced concrete element. In developed finite element model of the PC "LIRA" which takes into account the physical, geometrical and structural nonlinearity, it is estimated stress-strain and limiting condition.

In experimental studies steel-concrete columns, data were obtained on the nature of the stress-strain state of the various stages of loading, the data on the limit state design. A satisfactory agreement between the experimental results and the calculations performed by the proposed engineering technique, obtained using finite element method in the software package "LIRA", which allows to conclude that the mathematical models of the process of destruction of the column.

Experimental and numerical data suggest the rationality of the proposed use of reinforced concrete columns in building practice. The use of the proposed reinforced concrete columns (at equal load) saves were compared with reinforced concrete column in 55%, and in comparison with reinforced concrete without transverse corrugations - 11%. The results of the thesis put into practice by designing and building.

Key words: reinforced concrete column, bearing capacity, the stress-strain state, three-dimensional stress state, corrugated sheet, concrete core, finite difference method, finite element method, the experimental study.

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН ПРИ СТАТИЧНОМУ
КОРОТКОЧАСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

Ігнатенко Євгеній Вікторович

Підписано до друку 18.11.2013р.

Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №22

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)

М. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1

Тел. 7-170-354

www.modelist.in.ua