

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ГАЛАГУРЯ ЄВГЕНІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 624.072.31:075.23

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕБЕТОННИХ
КОЛОН ПРИ РІЗНИХ СХЕМАХ
НАВАНТАЖЕННЯ**

Спеціальність 05.23.01 - будівельні конструкції,
будівлі та споруди

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2008

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки Української державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту і зв'язку України.

Науковий керівник -

доктор технічних наук, професор
Чихладзе Елгуджа Давидович,
завідувач кафедри будівельної механіки
Української державної академії залізничного транспорту.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор
Кожушко Віталій Петрович,
професор кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки
Харківського національного автомобільно-дорожнього
університету;
- кандидат технічних наук, доцент
Бондаренко Юрій Вікторович,
доцент кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій
Харківського державного технічного університету
будівництва і архітектури.

Захист відбудеться _____ о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 при Українській державній академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7.

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

Автореферат розісланий _____ 2007р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, доцент

Ватуля Г.Л.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Розвиток будівельних конструкцій характерний пошуком нових видів сполучень сталі та бетону для їх раціональної спільної роботи, спрямований на забезпечення економії матеріалів, енерго- і трудовитрат. Традиційні залізобетонні конструкції мають істотні недоліки. Основні з них - трудомісткість виготовлення, слабкий опір механічним ушкодженням. Опалубка є дорогою і, як правило, нераціональною для використання. Недоліком залізобетону є також необхідність рішення проблеми тріщиностійкості. У збірних залізобетонних конструкціях досить гостро стоїть проблема стиків, які вимагають великої кількості закладних деталей. Недолік сталевих конструкцій - можливість втрати загальної чи місцевої стійкості, у край низька вогнестійкість, необхідність захисту від корозії. У сталобетонних конструкціях можна в значній мірі усунути ці недоліки, а в деяких випадках і зовсім їх уникнути, збільшити міцність бетону за рахунок бічного обтиснення, створюваного обоймою, у значній мірі підвищити стійкість останньої та несучу здатність усієї конструкції в цілому.

Приймаючи до уваги переваги конструкцій із зовнішнім армуванням, і недостатній рівень розвитку методів їхнього розрахунку та проектування, особливо стержневих елементів прямокутного перерізу, актуальність досліджень по сформульованій у назві дисертації темі, є цілком обґрунтованою.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках наукової теми "Розробка способів підсилення аварійних та передаварійних споруд та методів оцінки їх несучої здатності після посилення з урахуванням реальних властивостей матеріалів", реєстраційний номер 0102U002542, та "Розробка теорії та методів розрахунку комбінованих конструкцій транспортних споруд", реєстраційний номер 0106U004122. Особистий внесок - розробка алгоритму розрахунку сталобетонних колон на позацентровий стиск.

Мета дисертаційної роботи полягає в розробці методики розрахунку сталобетонних, по різному навантажених, колон прямокутного перерізу з урахуванням особливостей деформування бетону та обойми.

Завдання дослідження:

- вивчити роботу пустотілих і заповнених бетоном колон прямокутного перерізу при осьовому та позацентровому стиску;
- розробити методику урахування роботи бетону при тривісному напруженому стані;
- на підставі експериментальних даних побудувати залежність жорсткості сталобетонних гнучких стержнів від кривизни;
- одержати функцію, що зв'язує навантаження та прогини сталобетонних позацентрово стиснутих колон;
- розробити алгоритм розрахунку колон з урахуванням відзначених особливостей роботи бетону та контактної взаємодії між елементами конструкції: ядром і обоймою;

- виконати експериментальні дослідження пустотілих і заповнених бетоном колон при осьовому та позацентровому стиску;
- зробити чисельні розрахунки та порівняти експериментальні дані з теоретичними результатами;
- впровадити результати досліджень у практику проектування та будівництва, а також у навчальний процес.

Об'єкт дослідження.

Сталебетонні та сталеві колони прямокутного перерізу.

Предмет дослідження.

Напружено-деформований стан сталебетонних колон прямокутного перерізу при осьовому та позацентровому навантаженні.

Методи дослідження.

Аналітичними методами отримані рівняння, що описують напружено-деформований стан сталебетонних позацентрово стиснутих колон при різних схемах навантаження. Експериментальними методами знайдені навантаження та переміщення колон на всьому діапазоні навантаження. Кроково-ітераційним методом здійснене рішення рівнянь стану стержнів.

Наукова новизна:

1. Розроблено методику розрахунку по різному навантажених (на одному торці, у межах довжини та ін.) сталебетонних колон прямокутного перерізу на позацентровий стиск, що враховує: роботу бетону в умовах тривісного напруженого стану; змінність жорсткості сталебетонного стержня і його кривизни до величин, які характеризують граничний стан; функцію, що зв'язує подовжні навантаження та прогини; нелінійність деформування бетону; контактну взаємодію між бетонним ядром і сталевією обоймою.

2. Проведено експериментальні дослідження та отримані дані: про роботу пустотілих і заповнених бетоном колон при осьовому та позацентровому стиску: показано взаємний вплив обойми і ядра на напружено-деформований стан сталебетонних колон.

3. Розроблено алгоритм і програму розрахунку сталебетонних колон на ЕОМ.

Практичне значення. Розроблена методика розрахунку дозволяє вірогідно оцінити напружено-деформований стан сталебетонних колон, що особливо важливо при проектуванні конструкцій у важких умовах будівництва, що характеризується великими навантаженнями та обмеженими розмірами перерізів.

Впровадження. Методика розрахунку сталебетонних колон впроваджена в практику проектування ВАТ "Харківметропроект" (м. Харків), і в навчальний процес УкрДАЗТу.

Особистий внесок: наведено огляд літературних джерел; удосконалена методика обліку роботи бетону при тривісному напруженому стані; на підставі своїх експериментальних даних і даних інших дослідників побудована залежність жорсткості сталебетонного гнучкого стержня з кривизною; удосконалена методика визначення, в тому числі, граничних характеристик жорсткості і моменту, який сприймається перерізом, отримані функції, що

зв'язують навантаження і прогини сталобетонних, по різному навантажених, позацентрово стиснутих колон, розроблено алгоритм розрахунку колон; здійснено впровадження.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

1. Міжнародній науково-технічній конференції кафедр академії і фахівців залізничного транспорту і підприємств (м. Харків, 2004р., 2005р., 2006р., 2007р.).

2. LXVI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2006г.).

3. П'ятій науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди» (м. Рівне, 2006р.).

4. Другій міжнародній науково-технічній конференції «Математичні моделі процесів у будівництві» (м. Луганськ, 2007г.).

5. Международной научно-практической конференции «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии» (г. Белгород, Россия, 2007г.).

6. П'ятій всеукраїнській науково - технічній конференції «Науково - технічні проблеми сучасного залізобетону» (м. Полтава, 2007р.).

Публікації:

Основні результати дисертації були опубліковані в 6 наукових працях. З них 4 - у виданнях рекомендованих ВАК України для публікації результатів дисертаційних робіт, 1 - в Росії, 1 – тези доповідей.

Структура й обсяг роботи.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури з найменувань. Загальний обсяг роботи - сторінок, у тому числі: рисунків, таблиць, додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, наведена загальна характеристика роботи і її зв'язок з державними науковими програмами.

У **першому розділі** описано огляд існуючих способів розрахунку залізобетонних і сталобетонних колон при осьовому і позацентровому стиску, виконано аналіз роботи бетону в умовах складного напруженого стану.

Експериментальним і теоретичним дослідженням міцності й стійкості центрально та позацентрово стиснутих сталобетонних і залізобетонних колон та іншим несучим конструкціям присвятили свої роботи: Амелянович К.К., Бабич Е.М., Бич П.М., Бондаренко В.М., Бондаренко Ю.В., Безгодов Н.М., Бамбура А.Н., Воронков Р.В., Ватуля Г.Л., Геніїв Г.А., Гвоздьов А.А., Голосоїв В.Н., Городецький О.С., Глазунов Ю.В., Долженко А.А., Жакін І.А., Козачевський А.І, Карпенко М.І., Карпинський В.І, Квядарас А.Б, Кобзева О.М., Кікін А.І., Клованіч С.Ф., Клімов Ю.А., Кожушко В.П., Санжаровський Р.С., Круглов В.М., Лейтес Е.С., Лукша Л.К., Людковський І.Г., Малашкін Ю.Н., Молодченко Г.А., Тибляков Б.В., Кудзіс А.П., Ноткус А.Н., Опанасенко

О.В., Передерій Г.П., Росновський В.А., Стороженко Л.І., Чихладзе Е.Д., Шагін О.Л., Шмуклер В.С., Яременко О.Ф., Яшин О.В. та інші вчені.

Відзначені роботи сприяли рішенню складної проблеми оцінки міцності та жорсткості колон із зовнішнім армуванням. Однак не всі питання вирішені. Зокрема: недостатньо вивчена робота статично визначних, і статично невизначних колон, стиснутих ексцентрично на одному торці і таких, що зазнають осьове стискання - на іншому, а також колон, з ексцентрично прикладеною подовжньою силою в межах їх довжини; має потребу в удосконаленні методика урахування роботи бетону в умовах об'ємного напруженого стану; вимагає розгляду та уточнення сили контактної взаємодії між ядром і обоймою при оцінці напружено-деформованого стану конструкції; необхідне урахування зміни жорсткості сталобетонних колон у процесі навантаження та ін.

Другий розділ присвячено теоретичному дослідженню напружено-деформованого стану сталобетонних колон. У дисертації наведена умова, при виконанні якої скривлення осі колони може відбутися раніше випинання її стінок,

$$\delta / a \leq \left(\sigma_{кр} \frac{3(1-\nu_s^2)}{E_s \pi^2} \right)^{0,5} \quad (1)$$

де $\sigma_{кр}$ - значення критичного напруження в стержні рівне $F_{кр}/A$, $F_{кр}$ - найбільше навантаження на колону, що розраховується за запропонованою методикою, ν_s - коефіцієнт Пуассона сталі, E_s - модуль пружності сталі, δ - товщина стінки, a - розмір поперечного перерізу колони.

Аналіз дослідних даних для прямокутних тонкостінних стержнів, заповнених бетоном, дозволив знайти наступну залежність, що характеризує зміну їх жорсткості.

$$D(x) = D_0 - r \left(\frac{l}{\rho} \right)^2, \quad (2)$$

де D_0 - початкова жорсткість, що відповідає пружній роботі стержня;

$$r = \frac{(D_0 - D_{пр})}{M_{пр}^2} \cdot D_{пр}^2, \quad D_{пр}, M_{пр} - \text{жорсткість та згинальний момент у}$$

граничному стані стержня. Для оцінки граничних характеристик жорсткості та моменту використано метод розрахунку сталобетонних елементів прямокутного перерізу, розроблений проф. Чихладзе Е.Д.

Для опису процесу деформування бетону при тривісному напруженому стані застосовані результати досліджень НДІЗБ. Дотримуючись цих робіт, залежність між напруженнями і деформаціями в бетоні для випадку простого навантаження приймається у формі закону Гука. При цьому параметри деформування: січний модуль деформацій E бетону при стисканні (розтяганні) і коефіцієнт поперечних деформацій ν записуються в наступному вигляді:

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

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(G + 3K)}, \quad (4)$$

де G – січний модуль зсуву;

K – січний модуль відносних об'ємних деформацій бетону.

Далі в дисертації отримані рішення для оцінки напружено-деформованого стану по різному навантажених сталобетонних колон (рис.1):

Колона, що навантажена по торцях поздовжніми силами з рівними, і в одну сторону спрямованими ексцентриситетами (рис. 1, а.)

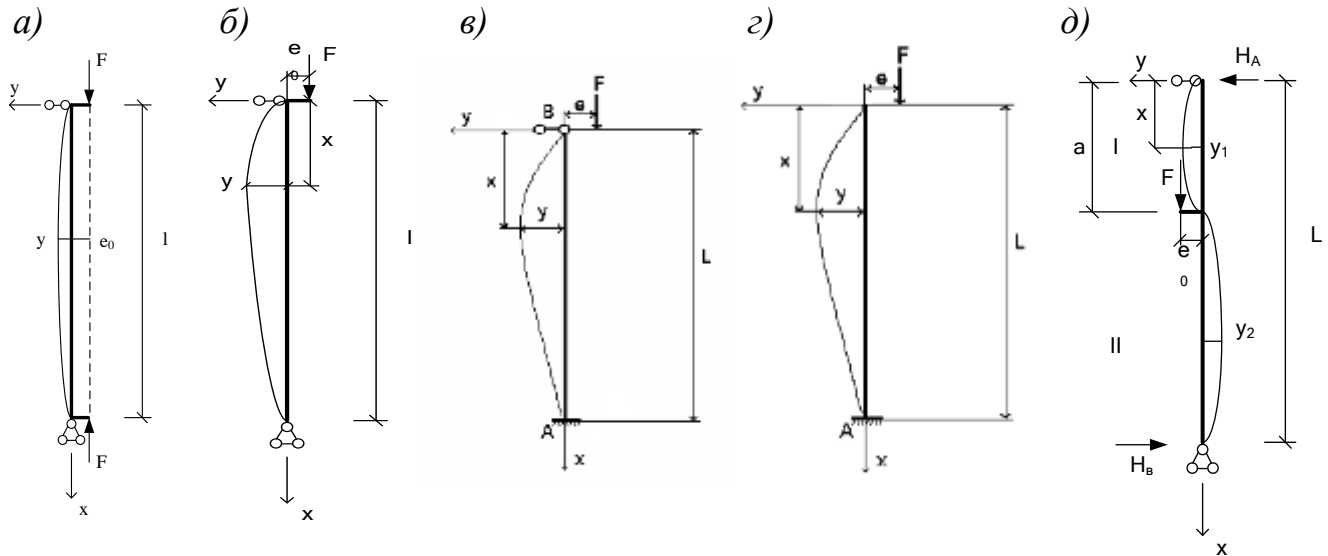


Рис. 1. Схеми навантаження сталобетонних колон

Диференційне рівняння вигнутої осі буде мати такий вигляд:

$$y'' + k^2 \cdot y = -k^2 e_0, \quad (5)$$

де $k^2 = \frac{F}{D(x)}$.

Рішення (5) при $D(x) = \text{const}$:

$$y_x = e_0 \left(\cos kx + \frac{1 - \cos kl}{\sin kl} \sin kx - 1 \right). \quad (6)$$

Переріз з максимальним прогином знаходиться на відстані $x = l/2$ від початку координат. Максимальний прогин дорівнює:

$$y_{\max} = e_0 \left(\cos k \frac{l}{2} + \frac{1 - \cos kl}{\sin kl} \sin k \frac{l}{2} - 1 \right). \quad (7)$$

Колона, навантажена на одному торці ексцентрично прикладеною силою (рис. 1, б)

Диференційне рівняння вигнутої осі:

$$y'' + k^2 \cdot y = \frac{k^2 \cdot e \cdot x}{l} - k^2 \cdot e. \quad (8)$$

Рішення диференційного рівняння (8):

$$y = e \cdot \left[\cos(k \cdot x) - \operatorname{ctg}(k \cdot l) \cdot \sin(k \cdot x) - 1 + \frac{x}{l} \right]. \quad (9)$$

Тут і далі для знаходження максимального прогину використовується підпрограма на ЕОМ, що входить у загальну програму розрахунку сталобетонних колон.

Колона, жорстко затиснена внизу, шарнірно закріплена вгорі та навантажена ексцентрично поздовжньою силою на верхньому торці (рис. 1,в)

Диференційне рівняння вигнутої осі:

$$y'' + k^2 \cdot y = \frac{k^2 \cdot e \cdot x}{2 \cdot l} - k^2 \cdot e. \quad (10)$$

Рішення рівняння (10):

$$y = e \cdot \left[\cos(k \cdot x) - \left(\frac{\cos(k \cdot l) + 0,5}{\sin(k \cdot l)} \right) \cdot \sin(k \cdot x) - 1 + \frac{x}{2 \cdot l} \right]. \quad (11)$$

Колона, жорстко затиснена внизу, навантажена на вільному кінці ексцентрично прикладеною силою (рис. 1,г)

Диференційне рівняння вигнутої осі:

$$y'' + k^2 \cdot y = -k^2 \cdot e. \quad (12)$$

Рішення рівняння (12):

$$y = e \cdot \cos(k \cdot l) \cos(k \cdot x) + e \cdot \sin(k \cdot l) \sin(k \cdot x) - e. \quad (13)$$

Колона, навантажена позацентрово прикладеною силою в прольоті (рис 1,д.)

Диференційні рівняння:

$$y_1'' = \frac{k^2 \cdot e \cdot x}{l}, \quad 0 \leq x \leq a, \quad (14)$$

$$y_2'' + k^2 \cdot y = \frac{k^2 \cdot e \cdot x}{l} - k^2 \cdot e, \quad a \leq x \leq l. \quad (15)$$

Рішення рівнянь (14,15):

$$y_1 = \frac{k^2 \cdot e \cdot x^3}{6l} + \left(\left(\frac{\frac{k^2 ea^3}{2l} - e}{\frac{ka \sin kl \sin ka}{\cos kl} + \frac{\sin kl \cos ka}{\cos kl} + ka \cos ka - \sin ka} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{k \sin kl \sin ka}{\cos kl} + k \cos ka \right) + \frac{e}{l} - \frac{k^2 ea^2}{2l} \right) x, \quad 0 \leq x \leq a \quad (16)$$

$$y_1 = \frac{k^2 \cdot e \cdot x^3}{6l} + \left(\left(\frac{\frac{k^2 ea^3}{2l} - e}{\frac{ka \sin kl \sin ka}{\cos kl} + \frac{\sin kl \cos ka}{\cos kl} + ka \cos ka - \sin ka} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{k \sin kl \sin ka}{\cos kl} + k \cos ka \right) + \frac{e}{l} - \frac{k^2 ea^2}{2l} \right) x, \quad a \leq x \leq l \quad (17)$$

Залежності (7,9,11,13,16,17) з урахуванням (2) являють собою рівняння, які містять трансцендентні функції від невідомої сили F . Вони можуть бути вирішені тільки чисельно. Для рішення рівнянь розроблено кроково-ітераційний метод. Жорсткості перерізів є функціями деформованого стану і для будь-якої стадії роботи колони можуть визначатись за залежністю (2). Процес послідовних наближень організовано у такий спосіб: задається змінний крок по навантаженню, у кожному наближенні обчислюється прогин, уточнюється жорсткість. Ітераційний процес триває до досягнення задовільної збіжності по прогинах. У результаті розрахунку визначається максимальне навантаження ($F_{кр}$), при якому починається інтенсивне зростання прогинів.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням сталобетонних брусів. Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено тридцять п'ять дослідних зразків, які об'єднані у три серії. Їх конструктивне рішення розроблено в наступних варіантах. Зразки першої серії запроектовані та виготовлені у вигляді сталевої обойми довжиною 450 мм прямокутного поперечного перерізу, заповнені бетоном і пустотілих. Зразки другої серії відрізнялися від зразків першої серії розмірами поперечного перерізу, довжиною $l=500$ мм і класом бетону для заповнювача. Зразки третьої серії склалися з обойми прямокутного поперечного перерізу довжиною 900 мм із бетоном і тільки обоймою. У табл. 2 наведені геометричні розміри дослідних зразків.

До зразків №№(1, 2, 3, 4, 5, 6) всіх серій прикладалося осьове навантаження, а зразки №№(7, 8, 9, 10, 11, 12) також всіх серій навантажувалися позакентровим навантаженням (рис. 1,б). При осьовому стисканні в розрахунок приймався випадковий ексцентриситет $l/300$.

Дані про фізико-механічні властивості бетону та сталі були отримані при проведенні стандартних випробувань (табл. 3).

Сталобетонні та сталеві колони випробовували на гідравлічних пресах ВП-2000 і ПММ125. Опорні пристрої забезпечували шарнірну схему закріплення зразка.

Геометричні розміри дослідних зразків

№№ серій колон	№ колон	Розміри перерізів, мм			Довжи- на l , мм	Площа бетону A_b , см ²	Площа сталі A_s , см ²	$\frac{A_b}{A_s}$	$\frac{a}{l}$
		а	в	δ					
I	К-1П-1	50	50	2	450	0	3.84	0	$\frac{1}{9}$
	К-2П-1					0		0	
	К-3П-1					0		0	
	К-4Б-1					21.16		5.51	
	К-5Б-1					21.16		5.51	
	К-6Б-1					21.16		5.51	
	К-7П-1					0		0	
	К-8П-1					0		0	
	К-9П-1					0		0	
	К-10Б-1					21.16		5.51	
	К-11Б-1					21.16		5.51	
	К-12Б-1					21.16		5.51	
II	К-1П-2	101.0	98.8	2	500	0	7.836	0	$\frac{1}{5}$
	К-2П-2	107.7	106.1	2.75		0	11.46	0	
	К-3П-2	106.3	106.0	2.75		0	11.374	0	
	К-4Б-2	104.7	103.7	2		100.39	8.76	12.27	
	К-5Б-2	104.0	103.6	2.75		96.629	11.115	8.69	
	К-6Б-2	104.3	103.4	2.75		96.725	11.121	8.69	
	К-7П-2	106.7	106.0	2.75		0	11.396	0	
	К-8П-2	101.4	100.3	2		0	7.908	0	
	К-9Б-2	104.2	104.4	2		100.6	8.184	12.29	
	К-10Б-2	105.1	103.8	2		100.89	8.196	12.31	
	К-11Б-2	104.0	103.6	2		99.6	8.144	12.22	
III	К-1П-3	50	50	2	900	0	3.84	0	$\frac{1}{18}$
	К-2П-3					0		0	
	К-3П-3					0		0	
	К-4Б-3					21.16		5.51	
	К-5Б-3					21.16		5.51	
	К-6Б-3					21.16		5.51	
	К-7П-3					0		0	
	К-8П-3					0		0	
	К-9П-3					0		0	
	К-10Б-3					21.16		5.51	
	К-11Б-3					21.16		5.51	
	К-12Б-3					21.16		5.51	

Міцнісні й деформативні характеристики матеріалів

σ_T , МПа	E_s , МПа	R_b , МПа	E_b , МПа
Зразки I, III серій			
245.1	$2.05 \cdot 10^5$	16.5	$21.4 \cdot 10^3$
Зразки II серії			
349.9	$1.96 \cdot 10^5$	25.21	$28 \cdot 10^3$

У процесі випробувань вимірялися поздовжні та поперечні деформації. Для цього в зразках по всьому периметру середнього по довжині перерізу наклеювались вісім тензодатчиків: у поздовжньому (4 тензодатчика) і поперечному (4 тензодатчика) напрямках. Тензодатчики в поперечному напрямку наклеювались ближче до кутів перерізу, для того, щоб зменшити вплив деформацій вигину пластин, що утворюють поперечний переріз.

Результати випробувань дослідних зразків і порівняння їх з теоретичними розрахунками представлені в табл. 4.

Аналіз результатів випробувань дозволяє відзначити наступне:

Короткі пустотілі колони (осьове стискання) $\lambda=26.51$. Пустотілі короткі колони під дією поздовжньої стискаючої сили зазнають місцевої втрати стійкості. Явище місцевої втрати стійкості має наступні властивості: збереження прямих кутів між пластинами, що утворюють конструкцію; загальні кромки пластин залишаються прямолінійними; місцева втрата стійкості поширюється на весь переріз так, що всі пластини, які складають переріз стержня випинаються одночасно та мають однакову кількість напівхвиль у поздовжньому напрямку (рис. 2), середнє значення величини поздовжніх напружень у момент втрати стійкості в наших дослідках становить ~ 209 МПа.

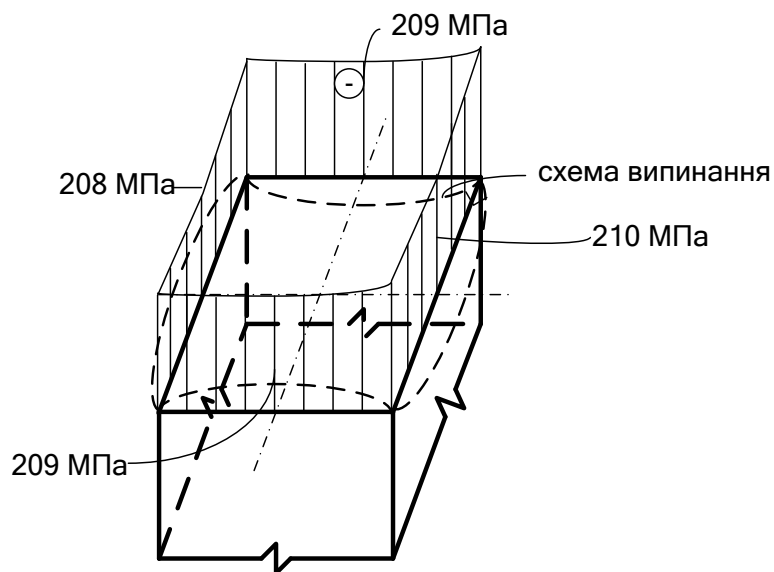


Рис. 2. Елюра поздовжніх напружень в обоймі та схема її випинання

Результати випробувань дослідних зразків і порівняння їх з теоретичними
розрахунками

№№ серій КОЛОН	Тип колон	e/a	$F_{кр}$, кН	$\sigma_{кр}$, МПа	$N_{теор} = F_{кр} \cdot As$	$F_{оп}$, кН	Δ , %	$D_{пр}$, Н·м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	К-1П-1	0.034		210	134.361	133	1	4444
	К-2П-1	0.034		210	134.361	126	6.2	4444
	К-3П-1	0.034		210	134.361	140	4.1	4444
	К-4Б-1	0.034	166.5			155	7.4	5012
	К-5Б-1	0.034	166.5			156	6.7	5012
	К-6Б-1	0.034	166.5			153	8.8	5012
	К-7П-1	0.1	64.004			64	0.006	2216
	К-8П-1	0.1	64.004			66	3.1	2216
	К-9П-1	0.1	64.004			65	1.5	2216
	К-10Б-1	0.1	92.082			96	4.2	4654
	К-11Б-1	0.1	92.082			92.6	0.5	4654
	К-12Б-1	0.1	92.082			93.1	1.1	4654
II	К-1П-2	0.038		206.5	147.9	138	7.2	5039
	К-2П-2	0.038		206.5	269.2	284	5.6	8826
	К-3П-2	0.038		206.5	258.1	280	7.8	8557
	К-4Б-2	0.038	643.8			660	2.4	11144
	К-5Б-2	0.038	639.8			700	8.6	12740
	К-6Б-2	0.038	640.3			660	3.0	13512
	К-7П-2	0.2	162.5			150	7.6	5433
	К-8П-2	0.2	72.0			70	2.7	2429
	К-9Б-2	0.2	369.1			338	8.4	6707
	К-10Б-2	0.2	373			329	11.8	6877
	К-11Б-2	0.2	366			356	2.7	6675
III	К-1П-3	0.064	119.563			110	7.9	11462
	К-2П-3	0.064	119.563			120	0.3	11462
	К-3П-3	0.064	119.563			120	0.3	11462
	К-4Б-3	0.064	137.008			137	0.005	13962
	К-5Б-3	0.064	137.008			142	3.6	13962
	К-6Б-3	0.064	137.008			130	5.1	13962
	К-7П-3	0.1	55.183			56	1.4	5612
	К-8П-3	0.1	55.183			54	2.1	5612
	К-9П-3	0.1	55.183			55	0.3	5612
	К-10Б-3	0.1	71.00			67.2	5.3	6203
	К-11Б-3	0.1	71.00			72.4	1.9	6203
	К-12Б-3	0.1	71.00			74	4.2	6203

Довгі пустотілі колони (осьове стискання), $\lambda=49.46$. При випробуванні на осьове стискання колони зазнають втрату стійкості деформування. Внаслідок появи прогинів у колонах виникає додатковий момент, що приводить до прискорення процесу деформування в порівнянні з короткими колонами. Як результат, руйнування довгої колони відбувається при менших у порівнянні з короткими колонами навантаженнях. При цьому середні значення поздовжніх напружень рівні 220 МПа (рис. 3), а значення поперечних напружень становлять 55 МПа, (у коротких 62 МПа). У довгих колонах при навантаженнях рівних 0.8 від руйнівного навантаження спостерігається інтенсивне зростання прогинів і поздовжніх деформацій. На рис. 4 представлено графік залежності прогину від навантаження.

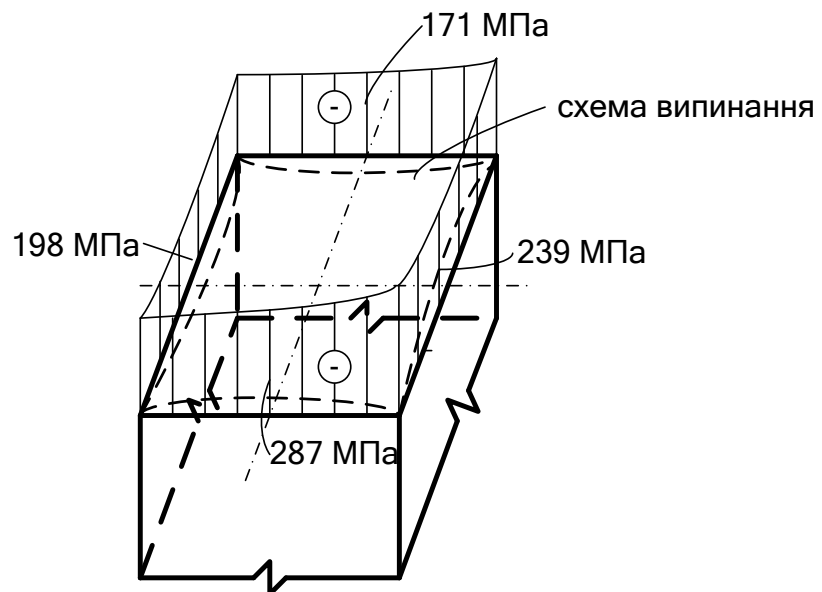


Рис. 3. Епюра поздовжніх напружень в обіймі

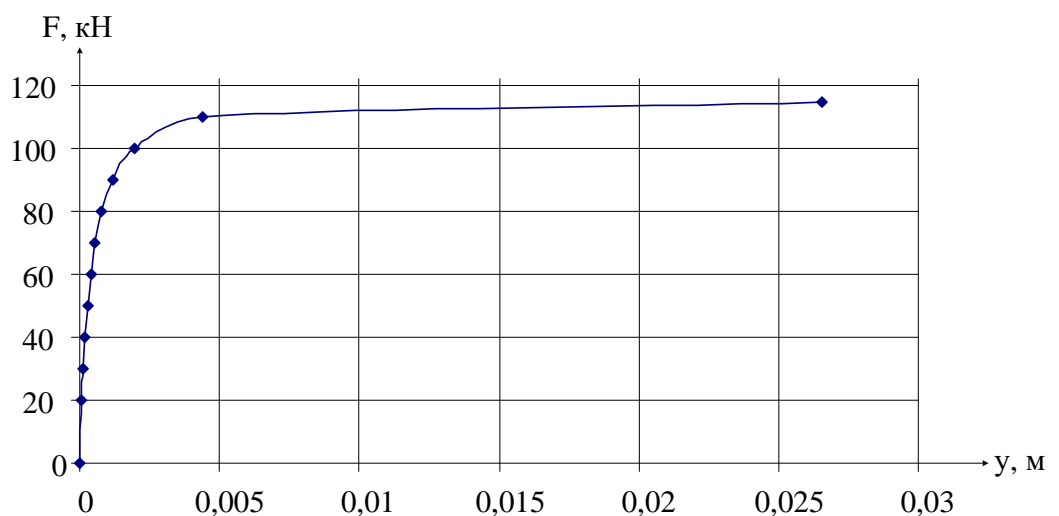


Рис. 4. Графік залежності прогину від навантаження

Короткі колони заповнені бетоном (осьове стискування), $\lambda_{прив}=29.19$. При малих рівнях напруженого стану бетонне ядро розтягнуте в поперечному напрямку, але напруження, що розтягують, не перевищують напружень, що характеризують міцність контакту між ядром і обіймою.

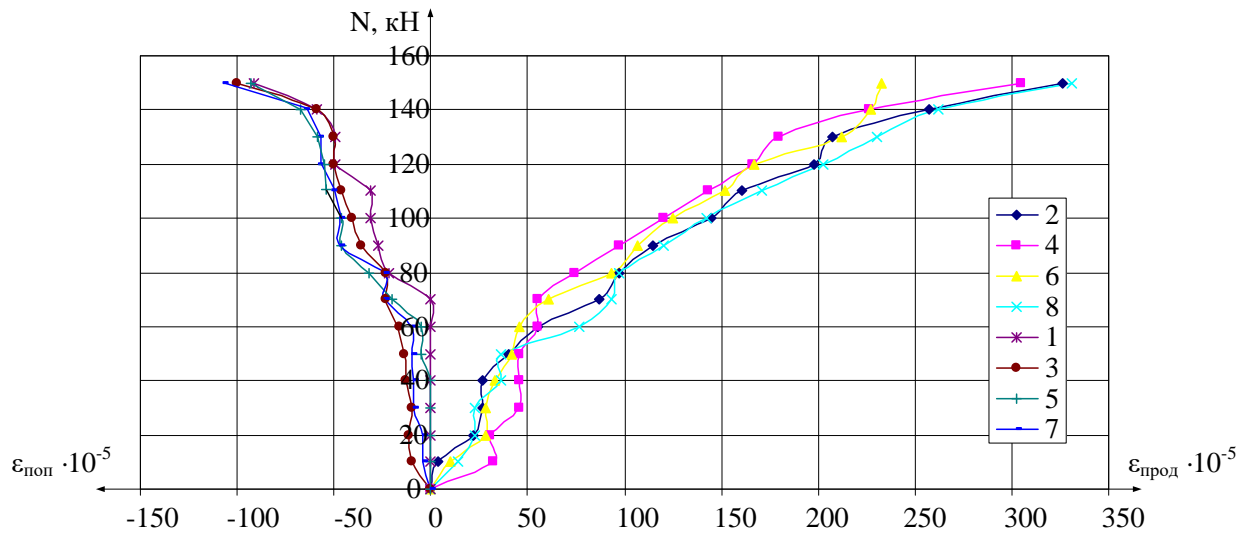


Рис.5. Графіки зміни поздовжніх і поперечних деформацій від навантаження в середньому перерізі колони К-4Б-1:

1,3,5,7 - поперечні тензодатчики; 2,4,6,8 - поздовжні тензодатчики

При рівні напруженого стану в бетоні $\sim (0.3 - 0.4$, що відповідає навантаженню 45 кН - 60 кН (рис.5) напруження в поперечному напрямку в бетонному ядрі міняє знак і воно стає стиснутим, а обійма розтягнутою.

При навантаженнях 0.75 – 0.85 від руйнуючого спостерігається інтенсивне зростання поздовжніх і більшою мірою поперечних деформацій. Досягнення поздовжніми деформаціями величин, що перевищують межу текучості в середньому на 18 – 20%, приводить до випинання пластин, які складають обійму. При цьому прями кути між пластинами не зберігаються, пластини випинаються одночасно опуклістю назовні, загальні кромки пластин викривляються.

Довгі колони заповнені бетоном (осьове стискування), $\lambda_{прив}=54.46$. На розподіл деформацій у перерізах колон (рис. 6) впливає додатковий момент, який виникає внаслідок прогину. Руйнівне навантаження в довгих колонах нижче, ніж у коротких, при цьому середні значення поздовжніх напружень у довгих колонах рівні 300 МПа (у коротких 320 МПа), поперечних 80 МПа (у коротких 100 МПа).

Якщо порівняти довгі заповнені бетоном колони з пустотілими, то можна відзначити наступне: за рахунок бетонного ядра збільшилася несуча здатність колон на 20.3%, при цьому поздовжні напруження в обіймі перевищили аналогічні в пустотілих на 24%.

Короткі колони заповнені бетоном (позацентрове стискування). У поперечному перерізі колони з'являються в загальному випадку дві зони: стисла та розтягнута. В кожній із цих зон бетон працює в умовах об'ємного напруженого стану. Як і при центральному стиску, причиною цьому є обійма,

що перешкоджає поперечним деформаціям бетонного ядра. Обойма в сталобетонній позацентрово стиснутій колоні, як і в короткій колоні при осьовому стисканні, працює за схемою чотирьох шарнірно-обіпертих пластин. Одна пластина стиснута в поздовжньому напрямку, інша - розтягнута. Дві бічні пластини сприймають знакозмінні поздовжні зусилля (залежно від місця проходження нейтральної осі (рис. 7,а)).

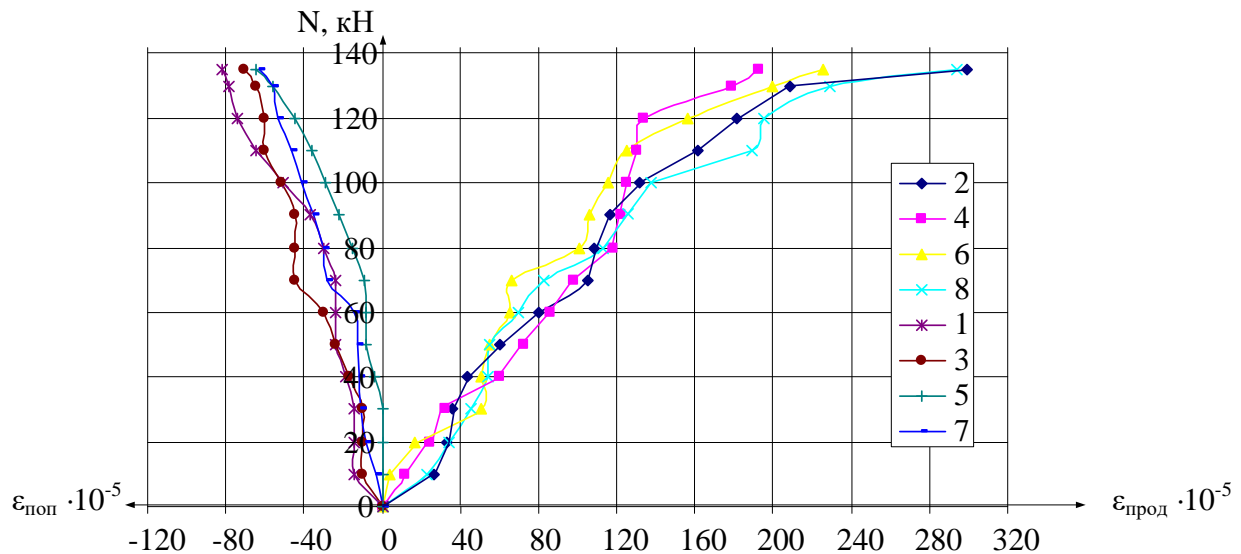


Рис.6. Графіки зміни поздовжніх і поперечних деформацій від осьового навантаження в довгій колоні, заповненій бетоном:

1,3,5,7 – поперечні тензодатчики; 2,4,6,8 – поздовжні тензодатчики

Якщо порівняти несучу здатність обойми, бетонного ядра й сталобетонної колони, то можна відзначити наступне: несуча здатність сталобетонної колони не дорівнює сумі несучих здатностей ядра й оболонки; причина цього полягає в збільшенні міцності стислого бетону, причому більшою мірою в порівнянні із центральним стиском, а також у збільшенні несучої здатності обойми за рахунок бетонного ядра. Як показали експериментальні дослідження, руйнування сталобетонної позацентрово стиснутої колони починається із втрати стійкості пластинки, розташованої в стиснутій зоні при напругах приблизно рівних 300 МПа. Слідом за нею випинаються пластинки на бічних сторонах при середніх напруженнях - 195 МПа. Напруження в розтягнутій пластинці не перевищують 90 МПа. Відносний (до розміру поперечного переріза) прогин колони в момент попередній руйнуванню склав 0.12 (рис. 8).

Короткі пустотілі колони (позацентрове стискання). При випробуванні на позацентрове стискання у поперечному перерізі, як і у всіх позацентрово стиснутих колонах, є дві зони: стиснута та розтягнута. Через відсутність бетонного ядра деформації наростають швидше, ніж у колонах заповнених бетоном, несуча здатність знижується на 30%, при цьому поздовжні напруження в стислих пластинках обійм колон рівні ~ 200 МПа (рис.7,б), а в колонах заповнених бетоном ~ 300 МПа (рис.7,а), тобто наявність бетонного ядра дозволяє обіймі працювати за межею текучості. Відносний прогин колони в момент попередній руйнуванню склав 0.08 (рис. 8).

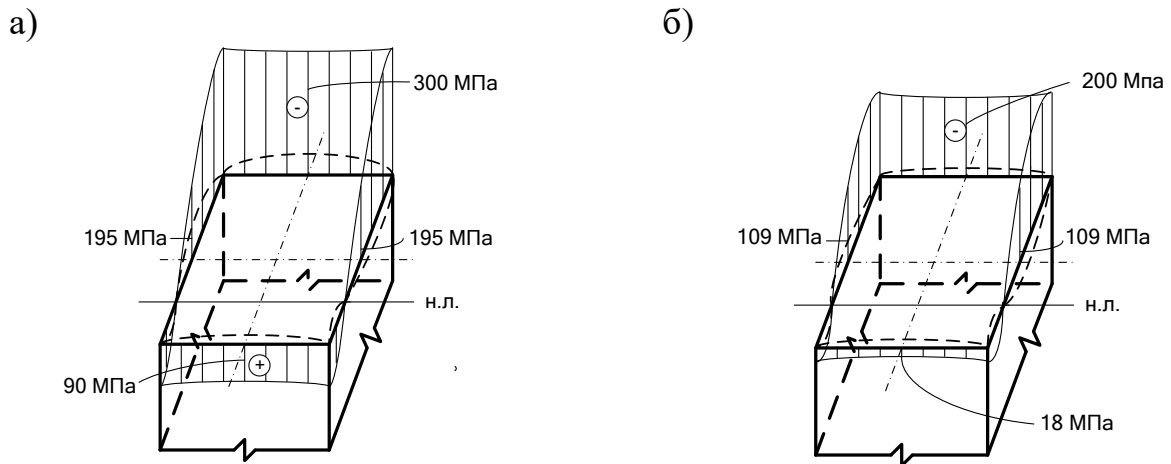


Рис. 7. Епюри поздовжніх напружень:
а) у короткій колоні, заповненій бетоном; б) у короткій пустотілій колоні

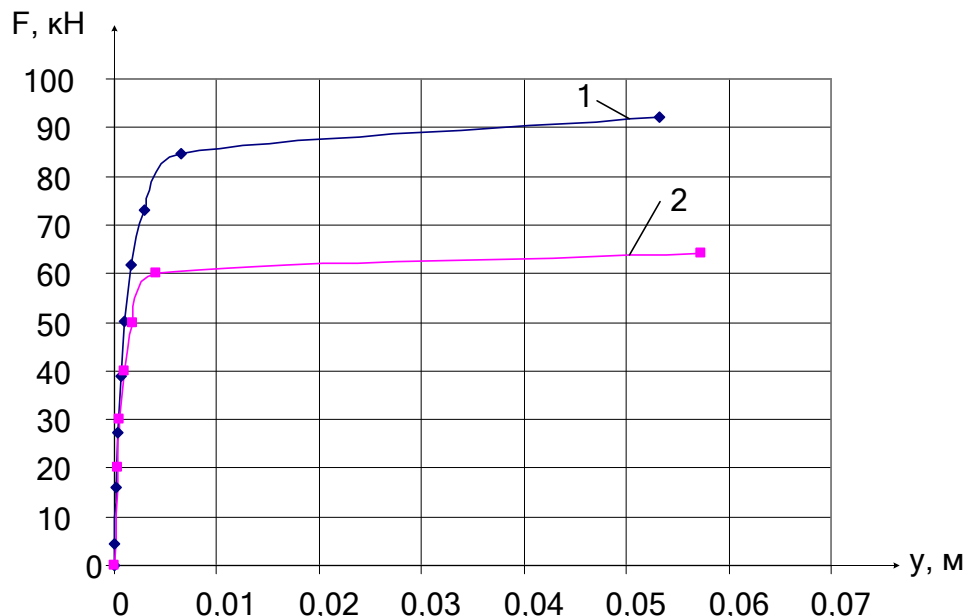


Рис. 8. Графік залежності прогину від навантаження в колонах при позацентровому стиску: 1 - у короткій колоні, заповненій бетоном; 2 - у короткій пустотілій колоні

Довгі колони заповнені бетоном (позацентрове стискання). Руйнування колони починається із втрати стійкості пластинки розташованої в стислій зоні при напруженнях ~ 300 МПа. Слідом за нею випинаються пластинки на бічних сторонах при середніх напруженнях ~ 170 МПа. Напруження в розтягнутій пластинці ~ 41 МПа. Відносний прогин колони в момент попередній руйнуванню склав 0.3 (рис. 10). При цьому в довгих колонах, заповнених бетоном при позацентровому стисканні руйнівне навантаження на 22% нижче, ніж в коротких (рис. 9,а).

Довгі пустотілі колони (позацентрове стискання). У довгих пустотілих колонах при позацентровому стисканні руйнівне навантаження на 16% нижче,

ніж в коротких. Руйнування колони відбувається внаслідок випинання стиснутої пластинки, при цьому середні поздовжні напруження склали ~ 200 МПа, напруження в розтягнутій пластинці рівні ~ 50 МПа, середні напруження в бічних пластинках становлять ~ 115 МПа (рис. 9,б). Відносний прогин колони в момент попередній руйнуванню склав 0.2 (рис. 10). Порівнюючи довгі заповнені бетоном колони з довгими пустотілими можна відзначити наступне: бетонне ядро збільшує несучу здатність колон на 28%.

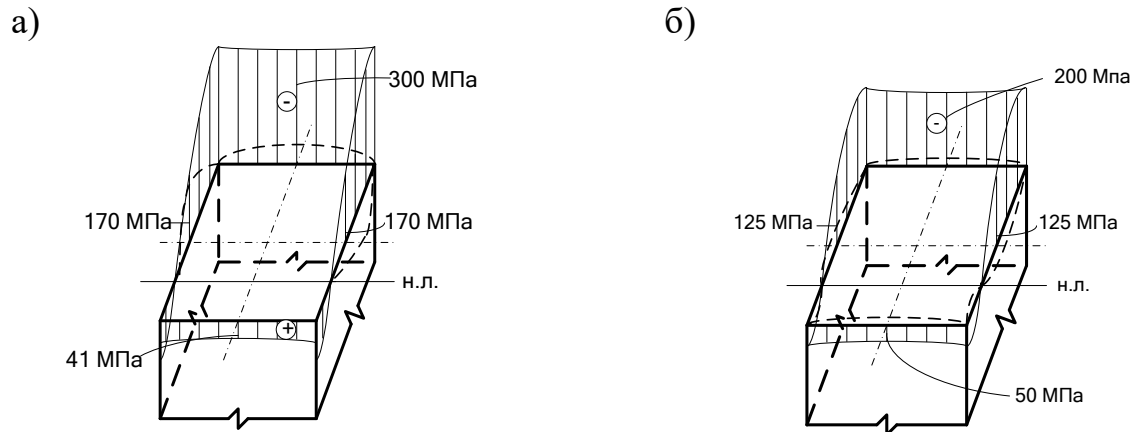


Рис.9. Епюри поздовжніх напружень:

а) у довгій колоні, заповненій бетоном; б) у довгій пустотілій колоні.

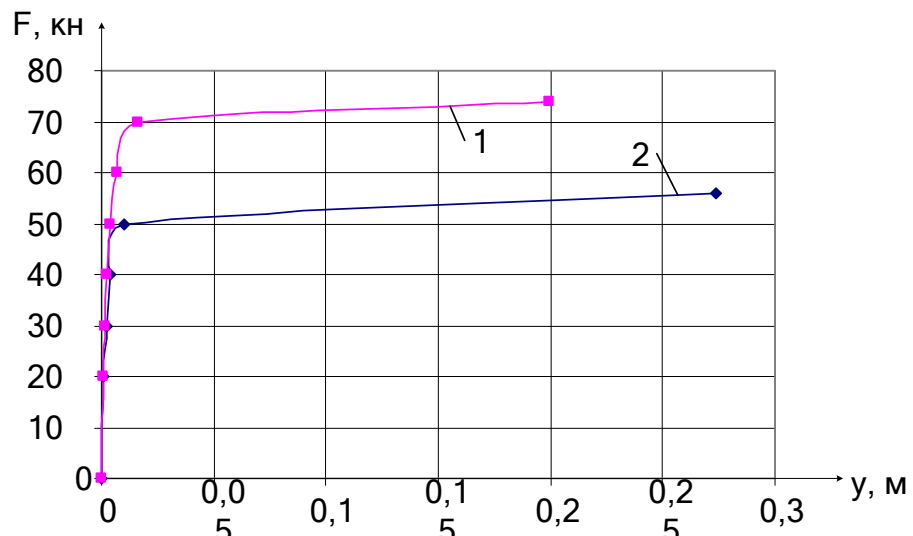


Рис. 10. Графік залежності прогину від навантаження в колонах при позacentровому стиску: 1 - у довгій колоні, заповненій бетоном; 2 - у довгій пустотілій колоні

На рис.11 представлено графік залежності несучої здатності колон від величини ексцентриситету навантаження. Наведені на графіку результати добре узгоджуються з даними інших дослідників.

Оцінка ефективності сталобетонних колон у порівнянні із залізобетонними колонами здійснювалась шляхом розрахунку. Порівняльний розрахунок колон виконано у двох варіантах: підбір перерізів при заданих

однакових комбінаціях розрахункових зусиль; розрахунок несучої здатності при рівних розмірах і площах арматури.

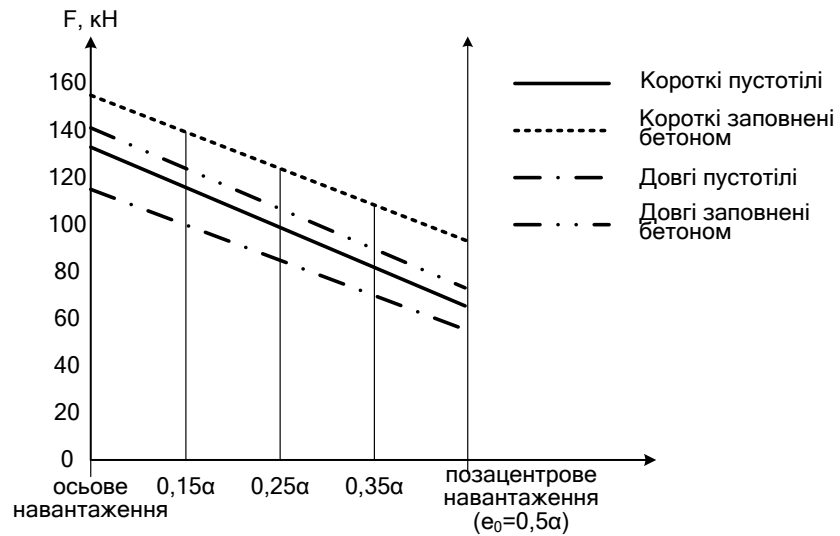


Рис. 11. Графік залежності несучої здатності від величини ексцентриситету прикладеного навантаження

Залізобетонна колона розраховувалася по нормах СНиП 2.03.01-84, сталобетонна - за запропонованою методикою.

1 Варіант: зусилля $N=1600$ кН, $M=12.8$ кН·м, $e_0=1.9$ см, бетон В20, $l=4.8$ м. В результаті розрахунків підібрані перерізи, показані на рис. 12. В сталобетонній колонні у порівнянні із залізобетонною міститься менше сталі (на 35%) і бетону (на 56%).

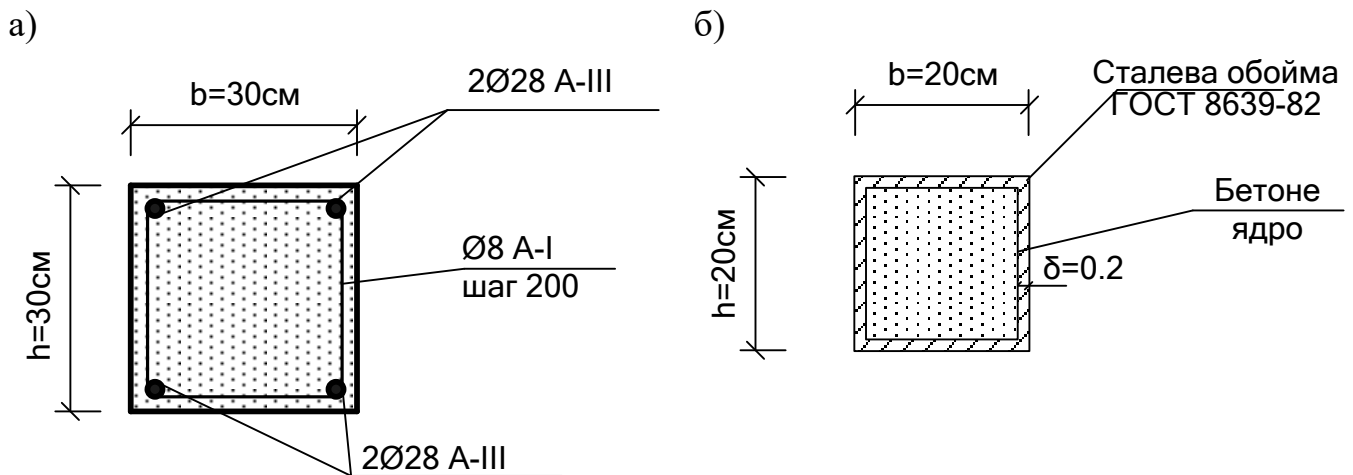


Рис. 12. Геометричні розміри колон: а) - залізобетонна колона; б) - сталобетонна колона

2. Варіант: $e_0=1.9$ см, бетон В20, $l=4.8$, площа поперечного перерізу арматури $A=24.64$ см² (рис. 12,а). Результати розрахунку для 2 варіанту

представлено на рис.13. Тут несуча здатність сталобетонної колони виявилася в 2 рази вище у порівнянні із залізобетонною.

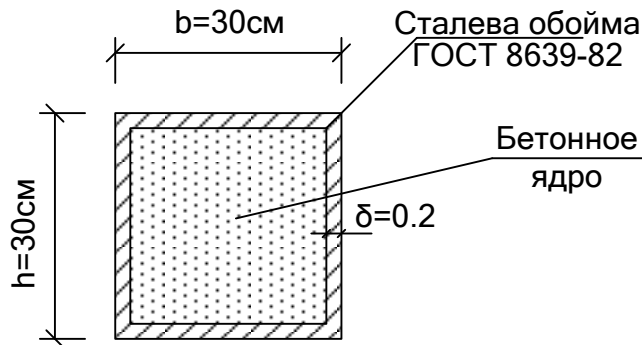


Рис. 13. Геометричні розміри сталобетонної колони

Висновки

У роботі викладені результати теоретичних і експериментальних досліджень несучої здатності сталобетонних стержнів квадратного поперечного перерізу при осьовому та позацентровому стисканні.

1. Отримано функції, що зв'язують навантаження та прогини наступних розрахункових схем сталобетонних колон: шарнірно-обіперта, навантажена на торцях поздовжніми силами з рівними і в одну сторону спрямованими ексцентриситетами; жорстко затиснена внизу, шарнірно-обіперта вгорі, навантажена на верхньому торці ексцентрично-прикладеною поздовжньою силою; консольна, навантажена на вільному кінці ексцентрично-прикладеною поздовжньою силою; шарнірно-обіперта, навантажена в межах висоти ексцентрично прикладеною поздовжньою силою.

2. На підставі експериментальних даних побудована залежність жорсткості сталобетонного гнучкого стержня від кривизни $D = f(1/\rho)$.

3. Розроблено алгоритм і програму розрахунку колон з урахуванням нелінійності бетону при тривісному напруженому стані та контактній взаємодії між елементами конструкції: ядром і обоймою.

4. Зроблено чисельні розрахунки, здійснено порівняння експериментальних даних з теоретичними результатами. Розбіжності між ними не перевищили: при осьовому стисканні – 8.8 %, при позацентровому – 11.8 %.

5. Виконано експериментальні дослідження пустотілих і заповнених бетоном колон при осьовому та позацентровому стисканні. У результаті показано:

- бетонне ядро збільшує несучу здатність сталобетонних колон у порівнянні з пустотілими: при осьовому стисканні до 14% у коротких колонах і до 15% у довгих колонах; при позацентровому стисканні до 31% у коротких колонах і до 22% у довгих колонах;

- руйнівне навантаження в коротких пустотілих колонах ($\lambda=26.51$) при осьовому стисканні в середньому на 13.96 % вище, ніж у довгих пустотілих колонах ($\lambda=49.46$);

- руйнівне навантаження в коротких заповнених бетоном колонах ($\lambda_{\text{прив}}=29.19$) при осьовому стисканні на 13.5 % у середньому вище, ніж у довгих колонах заповнених бетоном ($\lambda_{\text{прив}}=54.46$);

- руйнівне навантаження в коротких пустотілих колонах при позацентровому стисканні в середньому на 18.1 % вище, ніж у довгих пустотілих колонах;

- руйнівне навантаження в коротких колонах, заповнених бетоном при позацентровому стисканні в середньому на 31.96 % вище ніж у довгих колонах заповнених бетоном.

6. Короткі пустотілі колони при осьовому стисканні зазнають місцеву втрату стійкості. В сталобетонних колонах обойма працює за схемою чотирьох шарнірно-обіпертих пластин. Наявність бетонного ядра дозволяє обоймі сприймати поздовжні напруження, що перевищують межу текучості на 18 - 20 %.

7. Результати дисертаційної роботи у вигляді методики та програми розрахунку прийняті до використання ВАТ «Харківметропроект» при проектуванні й реконструкції об'єктів метрополітенів та інших транспортних споруд і в навчальний процес УкрДАЗТу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Галагуря Є.І., Галагуря Є.Ю. Розрахунок позацентрово стиснутих гнучких стержнів // Зб. Наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 60. – С. 139 – 146.

Особистий внесок – розроблено методику розрахунку.

2. Галагуря Е.И. Испытание стальных колонн коробчатого сечения на осевое сжатие. // Тези LXVI Міжн. наук.-практич. конф. – Д.: ДИИТ, 2006. – С. 278 – 279.

3. Галагуря Е.И. Испытание стальных и сталобетонных колонн коробчатого сечения на осевое сжатие // Зб. наук. праць: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Видавн. Укр. держ. універс. водного господарства та природокористування: Рівне, 2007. – Вип. 15. – С.125 – 130.

4. Галагуря Е.И. Экспериментальные исследования сталобетонных колонн при осевом сжатии // Зб. наук. праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2007 - № 71 (94) – С. 56 – 59.

5. Галагуря Е.И. Испытание стальных и сталобетонных колонн коробчатого сечения на внецентренное и осевое сжатие // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород: БГТУ, 2007. – Ч.3 – С. 25 – 29.

6. Галагуря Е.И. Испытание стальных и сталобетонных колонн коробчатого сечения на внецентренное и осевое сжатие // Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць. Державного науково-дослідного інституту будівельних

конструкцій Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. – Київ: Видавництво НДІБК, 2007. – Вип. 67. – С. 112 – 118.

АННОТАЦІЯ

Галагура Е.И. Напряженно-деформированное состояние сталебетонных колонн при различных схемах нагружения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2008.

В диссертации рассматриваются сталебетонные колонны при различных схемах нагружения. Их напряженно-деформированное состояние исследуется с учетом пространственной работы бетона: бетонное ядро нагружается в продольном и поперечном направлениях соответственно внецентренно приложенными силами и силами контактного взаимодействия между ядром и обоймой; предполагается, что в продольном направлении ядро и обойма работает совместно без проскальзывания и отрыва; продольная нагрузка в торцах колонн передается на бетон и сталь одновременно; зависимости между напряжениями и деформациями в бетоне принимаются в форме обобщенного закона Гука с переменными параметрами деформирования E_b и ν_b .

Получены функции, связывающие нагрузки и прогибы следующих расчетных схем сталебетонных колонн: шарнирно-опертая, нагруженная на торцах продольными силами с равными и в одну сторону направленными эксцентриситетами; жестко защемленная внизу, шарнирно-опертая вверху, нагруженная на верхнем торце эксцентрично-приложенной продольной силой; консольная, нагруженная на свободном конце эксцентрично-приложенной продольной силой; шарнирно-опертая, нагруженная в пределах высоты эксцентрично приложенной продольной силой. Эти функции представляют собой трансцендентные уравнения относительно искомой продольной силы F . Они могут быть решены только численно. В диссертации разработан шагово-итерационный метод решения трансцендентных уравнений. Жесткости сечений являются функциями деформированного состояния и определяются для каждого шага нагрузки по экспериментально найденным зависимостям от кривизны. Процесс последовательных приближений организован следующим образом: задается переменный шаг нагрузки (с ростом уровня напряженного состояния шаг сужается). В каждом приближении вычисляется прогиб, уточняется жесткость: итерационный процесс продолжается до той нагрузки, при которой начинается интенсивный рост прогибов. Найденная таким образом нагрузка принимается за критическую $F_{кр}$, характеризующая несущую способность колонн.

Проведены экспериментальные исследования сталебетонных колонн. Для чего было изготовлено тридцать пять опытных образцов, объединенных в три серии. К образцам прикладывалась осевая и внецентренная нагрузка. При осевом сжатии в расчет принимался случайный эксцентриситет $l/300$. Данные

о физико-механических свойствах бетона и стали получены путем проведения стандартных испытаний. По результатам экспериментальных исследований получены эпюры продольных и поперечных напряжений в сечениях; зависимости продольных и поперечных деформаций от нагрузки; прогиба от нагрузки; жесткости от кривизны. Осуществлен анализ работы колонн: короткие пустотелые колонны при осевом сжатии претерпевают местную потерю устойчивости; в сталебетонных длинных и коротких колоннах обойма работает по схеме четырех шарнирно-опертых пластин. Наличие бетонного ядра позволяет обойме воспринимать продольные напряжения, превышающие предел текучести на 18 – 20 %. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими результатами. Расхождение между ними не превысило: при осевом сжатии – 8.8 %, при внецентренном – 11.8 %.

Оценка эффективности сталебетонных колонн по сравнению с железобетонными колоннами осуществлялась путем расчета. Сравнительный расчет колонн выполнен в двух вариантах: подбор сечений при заданных одинаковых комбинациях расчетных усилий; расчет несущей способности при равных размерах и площадях арматуры. В результате расчетов (1 вариант) в сталебетонной колонне по сравнению с железобетонной содержится меньше стали (на 35%) и бетона (на 56%). Несущая способность сталебетонной колонны (вариант 2) оказалась в 2 раза выше по сравнению с железобетонной.

Результаты диссертационной работы приняты к использованию ОАО «Харьковметрострой» (г. Харьков) при проектировании и реконструкции объектов метрополитенов и других транспортных сооружений, и в учебный процесс УкрГАЗТа.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; сталебетонная колонна, стальная обойма, эффект обоймы, бетонное ядро, объемное напряженное состояние.

АНОТАЦІЯ

Галагура Є.І. Напружено-деформований стан сталебетонних колон при різних схемах навантаження. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди. - Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2008.

У дисертації розглядаються сталебетонні колони при різних схемах навантаження. Їх напружено-деформований стан досліджується з урахуванням просторової роботи бетону: бетонне ядро навантажується в повздовжньому і поперечному напрямках відповідно позацентрово прикладеними силами і силами контактної взаємодії між ядром і обоймою; передбачається, що в повздовжньому напрямку ядро та обойма працюють спільно без прослизання і відриву; повздовжнє навантаження в торцях колон передається на бетон і сталь одночасно; залежності між напруженнями і деформаціями в бетоні приймаються у формі узагальненого закону Гука з перемінними параметрами деформування E_b і ν_b .

Отримано функції, що зв'язують навантаження й прогини наступних розрахункових схем сталобетонних колон: шарнірно-обіперта, навантажена на торцях подовжніми силами з рівними й в одну сторону спрямованими ексцентриситетами; жорстко затиснута внизу, шарнірно-обіперта вгорі, навантажена на верхньому торці ексцентрично-прикладеною подовжньою силою; консольна, навантажена на вільному кінці ексцентрично-прикладеною подовжньою силою; шарнірно-обіперта, навантажена в межах висоти ексцентрично прикладеною подовжньою силою.

Проведено експериментальні дослідження сталобетонних колон. Для чого було виготовлено тридцять п'ять експериментальних зразків, об'єднаних у три серії. До зразків прикладалося осьове й позацентрове навантаження.

Ключові слова: напружено-деформований стан; сталобетонна колона, сталева обійма, ефект обійми, бетонне ядро, об'ємний напружений стан.

ABSTRACT

Galagurya E.I. Stress-strained state of steel-concrete pillars under the different load distribution. - Manuscript.

Dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences by specialty 05.23.01 - building constructions, buildings and structures. - Ukrainian State Academy of the Railway Transport, Kharkov, 2008.

Steel-concrete pillars under different load distribution are considered in the thesis. Their stress-strained state is investigated taking into account spatial work of the concrete. Concrete core loads up in longitudinal and vertical directions by eccentric attached loads and loads of contact interaction between concrete core and steel shell. It is expected that in longitudinal direction concrete core and steel shell works without slippage and separation. The longitudinal loads in pillars end is applied to the concrete and steel simultaneously. The dependences between stress and deformation in concrete are taken in the form of Hooks generalized law with variable deformation parameters.

During the research author obtains several functions for loads and deflections for different analytical models of the pillar, such as: hinged column loaded on the ends by longitudinal loads with equal and in one directed eccentricities; top hinged and down restrained column loaded on the top end by eccentrically attached longitudinal strength; cantilever column loaded on the free edge by eccentrically attached longitudinal strength; hinged column loaded in height by eccentrically attached longitudinal strength. The author provides the experimental researches of steel-concrete pillars loaded by axial and eccentric loads.

Key words: stress-strained state, steel-concrete pillar, steel shell, concrete core, ring effect, three-dimensional stress state.

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕБЕТОННИХ
КОЛОН ПРИ РІЗНИХ СХЕМАХ НАВАНТАЖЕННЯ

Галагура Євгеній Іванович

Відповідальний за випуск
Романенко В.В.

Підписано до друку

Формат паперу 60x84. Папір для множних апаратів.

Друк офсетний. Умовн. – друк. арк. 0,9. Обл. – вид. арк. 1,0.

Замовлення № . Тираж 100 екз. Безкоштовно.

Видавництво УкрДАЗТа, свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 г.

Друкарня УкрДАЗТа: 61050: Харків – 50, майдан. Фейєрбаха, 7