

УДК 624.012.45

**ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ ТА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН У СІТЧАСТИХ ОБОЙМАХ**

Канд. техн. наук О. О. Петрова, асп. М. Т. Хаммуд

**DETERMINATION OF THE FAILURE MODE AND BEARING CAPACITY OF
CONCRETE COLUMNS WITH MESH REINFORCEMENT**

PhD (Tech.) O. Petrova, postgraduate student M. Hammoud

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.195.2021.241041>

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень коротких бетонних та залізобетонних стійок на предмет визначення характеру їх руйнування та руйнівних зусиль. Подано процедуру та результати випробувань вісімнадцяти дослідних зразків за трьома схемами: ступінчаста без (I) та з використанням оголовників (II), малоциклова з використанням оголовників (II). Визначено відсоток збільшення руйнівних

зусиль для залізобетонних зразків в об'ємах порівняно із чисто бетонними зразками та описано особливості їх руйнування.

Ключові слова: бетонні стійки, шпангоут, сітчаста об'ємка, просічно-витяжний лист.

Abstract. Paper deals with the results of experimental test of reinforced concrete columns with mesh reinforcement. Experimental investigations of columns were performed using hydraulic press with a maximum load level of 480 tones. On the basis of previous theoretical research three series of experimental samples which are represented with simply concrete columns (BS-0), concrete columns in mesh holder (BS-P) and concrete columns in mesh holder with additional reinforcement rings (BS-PS) were produced. The height of all samples is 1000mm and the diameter is 450mm. There three schemes of experimental tests were considered: static loading using press' plates (I), monocycle (II) and static (III) loading using additional round steel plates. The results of tests were obtained in the form of failure mode and breaking forces for three series of samples. According to the results of tests over the first scheme, it is obtained that the destruction of columns with mesh reinforcement goes more slowly than concrete columns. The appearance of cracks started at the level of loading equal to 100 tones for BS-0 samples and 200-250 tones – for BS- and BS-PS samples. The level of breaking forces for BS-P samples and for BS-PS samples is 18-26 % and 21-28 % higher than for BS-0 samples respectively. After monocycle loading it is obtained that breaking forces for BS-P and BS-PS samples are 5 % and 23 % higher than BS-0 samples. It is noted that cracking processes for all samples started near the moment of total destruction, so the failure of samples was brittle and sharp. According to the third scheme of loading the difference between breaking forces for BS-0 and BS-P samples is about 5 %, BS-0 and BS-PS is 7 %. Failure mode for third scheme is similar to second scheme, but it is also mentioned multistage destruction of columns when after achieving the level of breaking force level of loading falls and increases several times. It is recommended to apply load over whole cross section of column in real structures, because it plays a significant role in increasing of bearing capacity. The results of experimental tests were compared with results of numerical analysis, which showed qualitative and quantitative coincidence.

Keywords: concrete column, reinforcement ring, mesh reinforcement, failure mode, breaking force.

Вступ. На сьогодні актуальним залишається завдання вдосконалення залізобетонних конструкцій, які є основою капітального будівництва в більшості індустріально розвинених країн та в країнах, що розвиваються. Підвищити ефективність капітальних коштів у будівництві можна шляхом розроблення нових або вдосконалення існуючих конструктивних рішень. Прагнення створити економічні за витратою матеріалів елементи залізобетонних конструкцій, що працюють на центральний стиск, привело до використання різноманітних способів непрямого армування, які знайшли застосування в будівництві автомобільних і залізничних мостів, багатоповерхових будівель, оскільки колони і опори

перелічених об'єктів зазнають значних навантажень.

Сьогодні як непряме армування використовуються спіральні обмотки, зварні сітки, укладання бетону в металеві труби. Однак усі ці способи нерівноцінні за своїми технічними і економічними показниками. Слід зазначити, що використання зварних сіток і спіралей для армування відрізняється великою трудомісткістю і потребує великих витрат часу, а тріщиностійкість таких елементів нижча, ніж у традиційних. Більш логічним є застосування трубобетонних елементів, що забезпечує збільшення несучої здатності колони до двох разів і виключає використання опалубки. Разом з тим дані конструкції відрізняються підвищеною

власною вагою, а отже, і гіршою екологічністю, а також вимагають додаткового вогнезахисту і корозійного захисту, які слід виконувати регулярно. Альтернативою суцільній металевій трубі може служити сітчаста оболонка, що захищена від механічних пошкоджень, корозії та вогню шаром бетону.

Аналіз останніх досліджень. Огляд існуючих експериментальних досліджень залізобетонних зразків і зокрема колон із сітчастим армуванням показує, що обсяг виконаних досліджень невеликий. У зв'язку з чим, як пошук нових конструктивних рішень армування колон сітками, так і їх експериментальна верифікація є актуальним завданням.

На сьогодні відомі дослідження з використанням сіток як додаткового зовнішнього армування, коли сітки типу «рабиці» намотуються зовні стрижнів

основного армування. Авторами з Єгипту та Саудівської Аравії [1] отримано результати експериментальних досліджень, що підтверджують покращення показників міцності та пластичності таких колон порівняно з традиційними залізобетонними колонами (рис. 1, а). Подібні рішення застосовані науковцями з Пакистану [2], якими було досліджено вплив розташування додаткового шару армування сіткою – навколо бетонного ядра або зовні основного армування (рис. 1, б). Отримано результати, що осьове навантаження на колони з армуванням навколо ядра та навколо основного армування на 8.5 % і 15.7 % вище, ніж для звичайних колон, а міцність основного бетону була збільшена відповідно на 14.6 % і 23 %. В Індії проведено експерименти з дослідження розміру чарунки сіток на несучу здатність залізобетонних колон (рис. 1, в) [3].

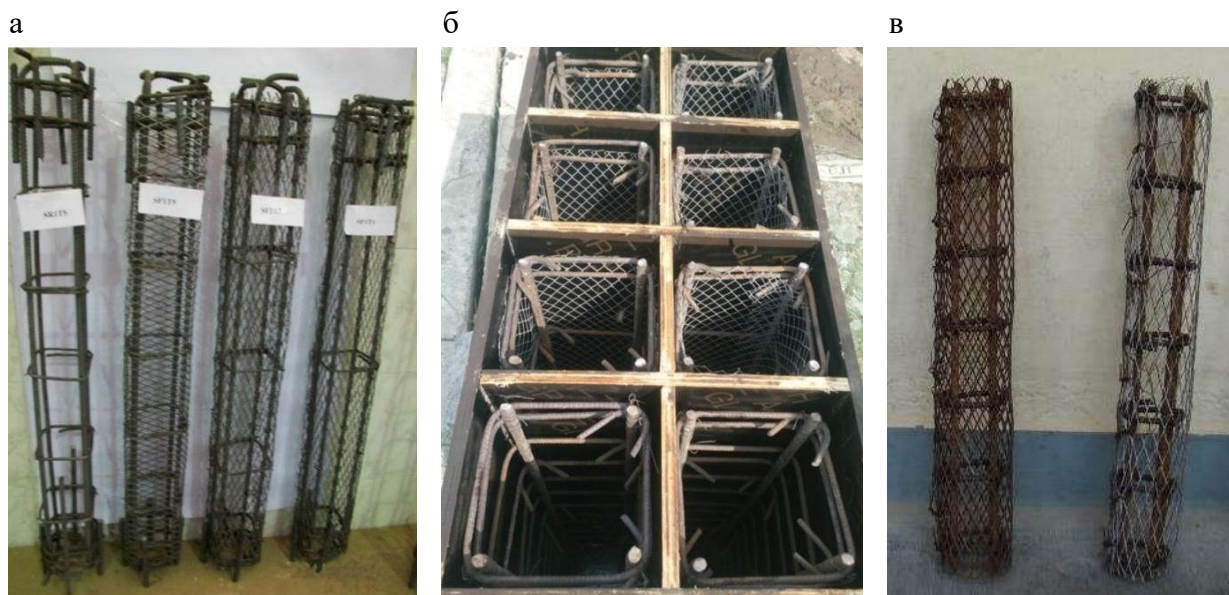


Рис. 1. Експериментальні дослідження зовнішнього сітчастого армування, проведені вченими з Єгипту (а), Пакистану (б) та Індії (в)

Разом з тим слід зазначити, що трудомісткість виконання такого типу армування пов'язана із появою додаткових технологічних операцій на будівництві, а отже – із зростанням вартості будівництва,

оскільки цей тип армування не замінює основне, а лише доповнює його. Більш виправданим у цьому випадку є застосування сіток з просічно-витяжного листа як основного армування. Раніше

Шмуклером В. С. і Синьковською О. В. були проведені експериментальні малоциклові дослідження із вивченням впливу напрямку розташування чарунки листа (вздовж чи поперек твірної) на несучу здатність колон у порівнянні з бетонними та трубобетонними зразками (рис. 2) [4]. Отримано результати, які підтверджують, що армування просічно-витажним листом з орієнтацією чарунок поперек твірної збільшує несучу здатність конструктиву у 2.32 разу, що можна порівняти із результатом для суцільного металевго листа. Збільшення несучої здатності для чарунок, розташованих вздовж твірної, складає 1.21 разу.

На розвиток сказаного, раніше було запропоновано конструктивне рішення колон у сітчастій обоймі зі шпангоутами та подано процедуру його раціоналізації [5–6]. З метою верифікації цього рішення підготовлено три серії зразків раціоналізованого конструктиву для проведення натурних експериментальних досліджень [7] на статичні та малоциклові впливи.

Метою дослідження є встановлення експериментальним шляхом характеру руйнування та руйнівних зусиль для колон у сітчастих обоймах з шпангоутами і без них у порівнянні із чисто бетонними дослідними зразками.



Рис. 2. Серія експериментальних зразків Шмуклера В. С. і Синьковської О. В.

Основний матеріал дослідження. Як було вже зазначено в попередніх публікаціях [7], дослідний зразок, у загальному випадку, являє собою коротку бетонну стійку висотою близько 1000 мм і діаметром 450 мм. При цьому висота сітчастої обойми складає 900 мм, а діаметр 400 мм. Захисний шар бетону по периметру стійки складає 25 мм; зверху та знизу – 50 мм. Серед забетонованих стійок виокремлено три серії зразків: БС-0 – чисто бетонні стійки (рис. 3, в); БС-П – бетонні стійки з сітчастою обоймою з просічно-витажного листа (рис. 3, б); БС-ППШ – бетонні стійки з обоймою з просічно-

витажного листа та додатково підкріплені арматурними шпангоутами (рис. 3, а). В кожній серії виготовлено по шість зразків.

При випробуванні зразків розглядаються три схеми навантаження, наведені в табл. 1, які характеризуються таким чином:

- схема I – ступінчасте навантаження зразка до руйнування, коли навантаження передається на всю площину зразка пластинами преса;
- схема II – малоциклове навантаження зразка до руйнування, коли навантаження передається через сталеві оголовники, що розташовані зверху та знизу дослідного зразка;

• схема III – ступінчасте навантаження зразка до руйнування, коли навантаження передається через сталеві оголовники, що

розташовані зверху та знизу дослідного зразка.

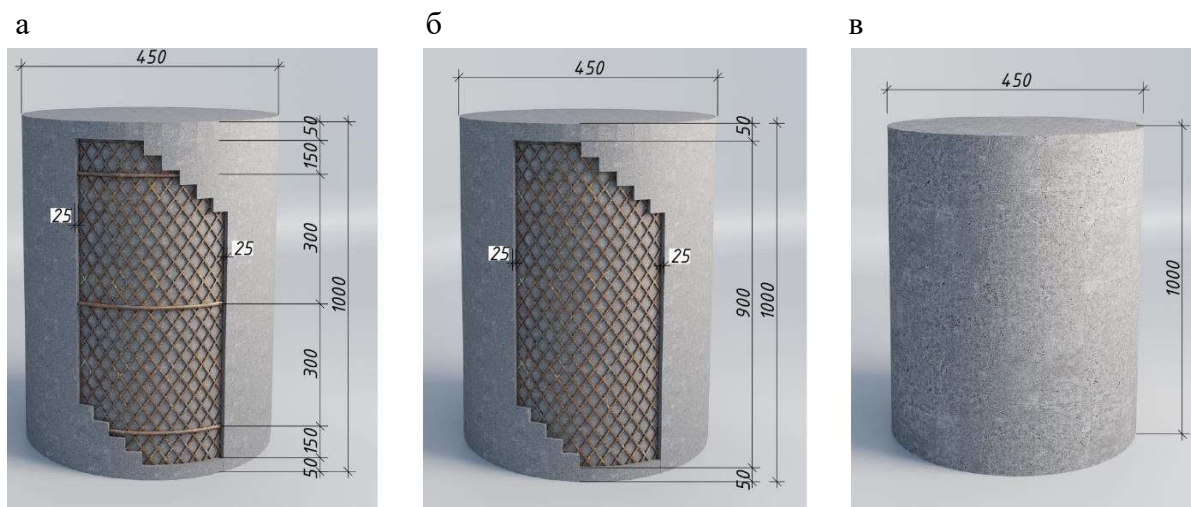


Рис. 3. Геометричні параметри та маркування дослідних зразків:
а – БС-III (Ж); б – БС-II (Х); в – БС-0 (●)

Таблиця 1

Блок-схема експериментальних випробувань

Експериментальні випробування		
Схема I – ступінчасте	Схема II – малоциклове	Схема III – ступінчасте
Дослідні зразки серій (18 шт.):		
БС-0 – 3 шт.	БС-0 – 2 шт.	БС-0 – 1 шт.
БС-II – 3 шт.	БС-II – 2 шт.	БС-II – 1 шт.
БС-III – 3 шт.	БС-III – 2 шт.	БС-III – 1 шт.

Як основна силова установка використовується прес гідравлічний для випробування будівельних конструкцій ПСУ-500, верхня опорна плита якого закріплена на рухомій траверсі і має сферичну опору для самостійної установки. Як оголовники для схеми II і III використовуються круглі сталеві пластини товщиною 16 мм і діаметром 300 мм. Для перевезення зразків по лабораторії та установлення їх у пресі додатково використані гідравлічний підкатний кран-підйомник «Intertool» вантажопідйомністю 1.0 т і ручна таль «Intertool»

вантажопідйомністю 1.0 т. Застосовуваний інструментарій наведено на рис. 4.

Ступінчасте навантаження за схемою I

Як вже було зазначено вище, за схемою I було випробувано дев'ять дослідних зразків – по три зразки в кожній серії БС-0, БС-П і БС-ПШ. Зразок кожної із серій встановлювався безпосередньо на нижню пластину пресу з подальшим його центруванням. Навантаження зразка виконувалось ступенями по 50 т (0.5 МН) до повного його руйнування.



Рис. 4. Використовуване обладнання: кран-підйомник підкатний гідравлічний, таль ручна, прес ПСУ-500

Слід зазначити, що для зразків усіх серій характерним є поява волосяних поздовжніх тріщин, що розповсюджуються від основи зразка до його центру, з подальшим їх розкриттям: для зразків серії БС-0 це можна спостерігати при рівні навантаження 100 т і більше, для зразків серій БС-П і БС-ПШ – при навантаженні 200–250 т. Процес руйнування зразка БС-0 наведено на рис. 5.

Для зразків серій БС-П і БС-ПШ розширення тріщин супроводжувалося незначним відшаруванням захисного шару бетону, однак остаточного руйнування

зразка не спостерігалося. При певному рівні навантаження, що прийнято за руйнівне, контрольна стрілка преса зупинялася, а робоча стрілка йшла у зворотному напрямку. Отримані руйнівні зусилля для схеми I наведено в табл. 2.

При випробуванні за схемою I руйнування просічної обойми або арматурних шпангоутів зазначено не було. Збільшення руйнівного навантаження у зразка БС-П у порівнянні з БС-0 складає 1.18–1.26, у зразка БС-ПШ у порівнянні з БС-0 – 1.21–1.28.

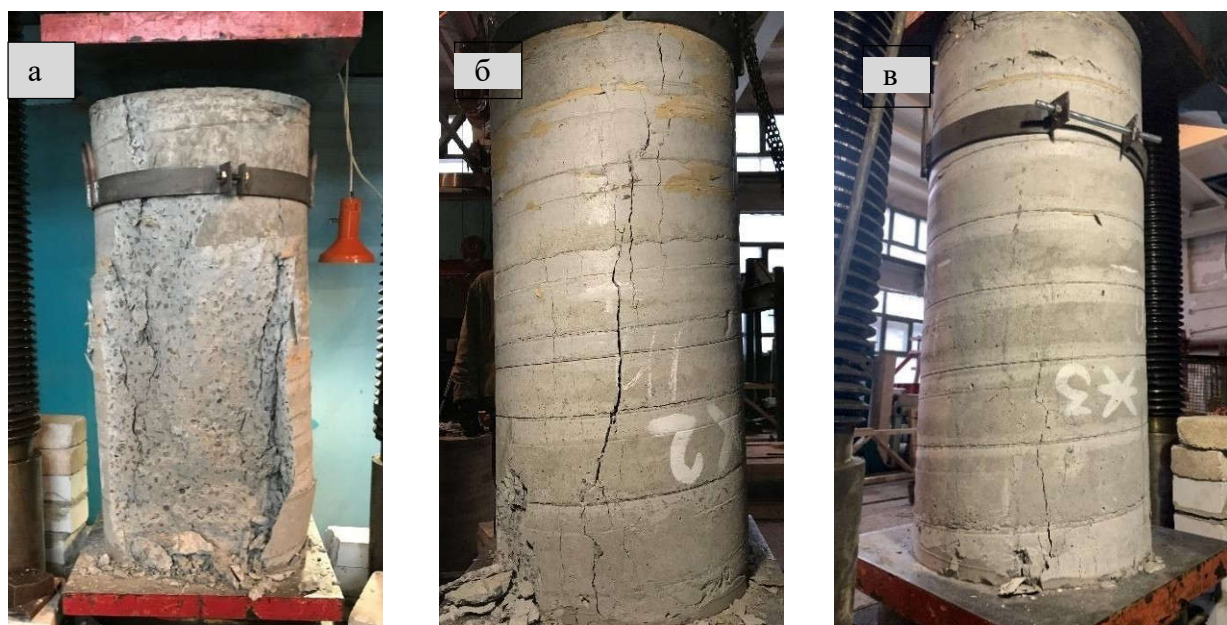


Рис. 5. Характер руйнування зразків БС-0 (а), БС-П (б) і БС-ПШ (в) для схеми I

Таблиця 2

Руйнівні зусилля для схеми I

Номери зразків (серія 1)	•1	•2	•3	X1	X2	X3	Ж1	Ж2	Ж3
Розрахункове руйнівне зусилля по бетону, т	356	356	356	356	356	356	301	301	356
Фактичне руйнівне зусилля, т	345	350	305	390	400	414	428	425	440

Малоциклове навантаження за схемою II через оголовники

За схемою II було випробувано шість дослідних зразків – по два зразки в кожній серії БС-0, БС-П і БС-ПШ. Кожен зразок встановлювався на попередньо відцентрований на пластині преса оголовник з подальшим його центруванням безпосередньо на пластині. Навантаження зразка виконувалось ступенями по 50 т (0.5 МН) з розвантаженням кожного ступеня.

Для малоциклових випробувань характерне різке крихке руйнування. Навіть для зразків серії БС-0 волосяні тріщини не спостерігались при низьких рівнях навантаження. Зазначено різке тріщиноутворення бетонного зразка при

навантаженні, близькому до руйнівного, з подальшим його розділенням на декілька частин (рис. 6, а).

Подібний характер руйнування демонструє зразок серії БС-П (рис. 6, б). При навантаженні близько 250 т починається процес утворення тріщин та їх розкриття зі збільшенням навантаження. При руйнівному значенні навантаження контрольна стрілка зупиняється, при цьому робоча стрілка показує на зменшення рівня навантаження, але процес руйнування зразка продовжується. Відбувається повторне незначне зростання навантаження до рівня, меншого за значення руйнівного навантаження. В певний момент часу відбувається «хлопок», що свідчить про

руйнування просічної оболонки, після чого робоча стрілка повертається в нульову позицію, що свідчить про повне руйнування зразка. Для зразків серії БС-ПШ руйнування відбувається аналогічно до зразків БС-П, з відмінністю у тому, що повторне зростання навантаження після того, як робоча стрілка починає йти у зворотному напрямку, сповіщаючи про початок руйнування зразка, може відбуватися декілька разів (спостерігалось п'ять повторних наборів навантаження), кожного разу підіймаючись

до все меншого рівня навантаження. Однак кожен із ступенів довантаження зразка менший за руйнівне значення та менший за попереднє. В певний момент також відбувається схлопування, що свідчить про руйнування сітки та/або шпангоутів (рис. 6, в).

Результати визначення руйнівних зусиль для дослідних зразків наведено в табл. 3. Збільшення руйнівного зусилля для зразків БС-П у порівнянні із БС-0 складає 5 %, для зразків БС-ПШ – 23 %.

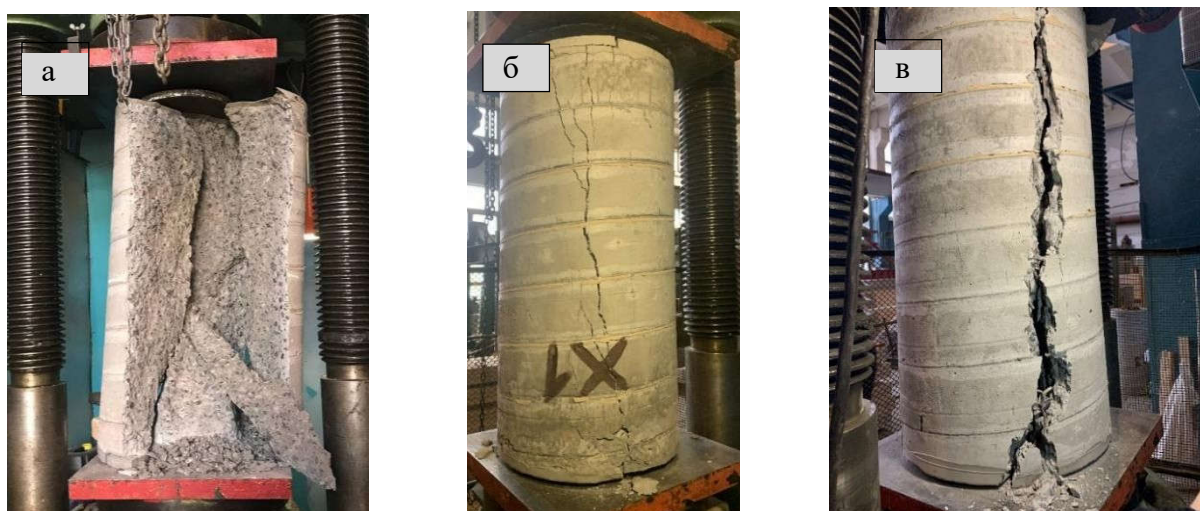


Рис. 6. Характер руйнування зразка серії БС-0 (а), БС-П (б) і БС-ПШ (в) для схеми II

Таблиця 3

Руйнівні зусилля для схеми II

Номери зразків (серія 2)	•2	•3	X1	X3	Ж1	Ж2
Розрахункове руйнівне зусилля по бетону, т	413	413	413	413	356	356
Фактичне руйнівне зусилля, т	260	265	271	275	292	320

Ступінчасте навантаження за схемою III через оголовники

За схемою III було випробувано три дослідних зразки – по одному зразку в кожній серії БС-0, БС-П і БС-ПШ. Кожен зразок встановлювався на попередньо відцентрований на пластині преса оголовник з подальшим його центруванням

безпосередньо на пластині. Навантаження зразка виконувалося ступенями по 50 т (0.5 МН) до повного його руйнування. Характер руйнування дослідних зразків усіх серій (рис. 7) аналогічний до описаного вище для випробування за схемою II. Результати визначення руйнівних зусиль для дослідних зразків наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Руйнівні зусилля для схеми II

Номери зразків (серія 2)	•1	X2	ЖЗ
Розрахункове руйнівне зусилля по бетону, т	356	413	413
Фактичне руйнівне зусилля, т	262	275	288



Рис. 7. Характер руйнування зразків БС-0 (а), БС-П (б) і БС-ПШ (в) для схеми III

Збільшення руйнівних зусиль складає 5–7 % для зразків в обоймах у порівнянні з чисто бетонною стійкою.

Отриманий характер руйнування та руйнівні зусилля для дослідних зразків корелюють з результатами чисельного аналізу, виконаного в програмному середовищі «LS-DYNA» за участю проф. Поздєєва С. В. У ході моделювання

розглянуто дві схеми випробувань (табл. 1, схеми I і III) для трьох типів колон, що були описані раніше. Результати визначення руйнівних зусиль наведено в табл. 5. Перевищення порогу 15 % різниці між чисельним аналізом та експериментальними даними пов'язаний як з якістю виконання дослідних зразків, так і з неможливістю створення навантаження на рівні вище 480 т.

Таблиця 5

Руйнівні зусилля, отримані в «LS-DYNA»

Тип дослідного зразка		БС-0	БС-П	БС-ПШ
Руйнівне зусилля, т	I схема	337	491	522
	III схема	262	342	353

Висновки. За результатами проведених досліджень, можна зробити висновок, що збільшення несучої здатності колон в обоймі зі шпангоутами можна досягти в

межах 10–30 %, при цьому вирішальним у першу чергу є характер передачі навантаження на стійку і лише потім циклічність її прикладання. В ході

випробувань колон через сталеві оголовники зазначено зменшення значень руйнівних зусиль не лише в порівнянні з випробуваннями, коли навантаження передається губками преса, але й у порівнянні із розрахунковими значеннями руйнівних зусиль. Таким чином, можна констатувати, що в реальних конструкціях найкращого ефекту обоми можна досягти, якщо конструктивно передавати навантаження на всю площу перерізу колони виключно на бетон, не зачіпаючи сітчасту обойму. Крім того, велику увагу слід приділяти якості виконання бетонних робіт і, власне, вібруванню бетонної суміші

після укладання. У разі неможливості якісного виконання вібрування слід використовувати самоущільнювані бетони.

Слід також зазначити, що при передачі навантаження через оголовок для другої і третьої схем випробування є характерним повторне збільшення навантаження після початку руйнування зразка, коли робоча стрілка вказує на падіння навантаження. Тобто процес повного руйнування біелемента відбувається ступенями до того остаточного моменту, коли руйнується сітка та/або шпангоут, а отже, ймовірно, термін експлуатації цих конструкцій може бути вищим, ніж у звичайних колон.

Список використаних джерел

1. Ahmed M. El-Kholy, Hany Dahish. Improved confinement of reinforced concrete columns. *Ain Shams Engineering Journal*. 34(2). 2016. P. 717-728.
2. M. F. Tahir, Q. U. Z. Khan, F. Shabbir, N. Ijaz, A. A. Malik. Performance of RC Columns Confined with Welded Wire Mesh Around External and Internal Concrete Cores. *Technical Journal*. University of Engineering and Technology (UET) Taxila, Pakistan. Vol. 22, No. 1. 2017. P. 8-16.
3. Krishnapriya A. K., Saravana Kumar N., Sree Rameswari A. Study on the Compression behaviour of Self-Compacting Concrete Columns using Expanded Metal Mesh as Internal Confinement. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Vol. 04. Iss. 03. 2017. P. 2295-2300.
4. Шмуклер В. С., Сильковская Е. В. Экспериментальные исследования сталебетонных столбчатых мостовых опор при внецентренном малоцикловом сжатии. *Будівельні конструкції*. 2013. Вип. 79. С. 36–369.
5. Mohammad H., Shmukler V., Reznik P., Petrova O. On the criterion of the Limit State for Concrete. *Proc. of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. Prague, Czech Republic, 2018. P. 593-599.
6. Shmukler V., Petrova O., Mohammad H. Rationalization of the parameters of the cylindrical bridge support (theoretical basis). *MATEC Web of Conferences* 230, 02031 (2018).
7. Хаммуд М. Т., Пчолкін Р. М. Експериментальне дослідження коротких сталебетонних колон на статичні впливи. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 194. С. 24–33.

Петрова Олена Олександрівна, канд. техн. наук, старший викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0003-0683-9694. E-mail: petrova.bcd@gmail.com.

Хаммуд Мохаммад Тахран, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-5509-8741. E-mail: hammoud.m.t@outlook.com.

Olena Petrova, PhD, senior lecturer, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5509-8741. E-mail: petrova.bcd@gmail.com.

Mohammad Hammoud Tahran, postgraduate student at the Department of Building Structures of O. M. Beketov NUUE in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5509-8741. E-mail: hammoud.m.t@outlook.com.

Статтю прийнято 11.01.2021 р.