



ДЕФОРМУВАННЯ І РУЙНУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН КРУГОВОГО ПЕРЕРІЗУ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ВИГІНІ І СУМІСНІЙ ДІЇ ПОЗАЦЕНТРОВОГО СТИСНЕННЯ І ПОПЕРЕЧНОГО ВИГІНУ

УДК 624.012

АВТОРИ

ДАВИДЕНКО О.О., асистент, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

ДАВИДЕНКО О.І., д. т. н., завідувач кафедри, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

БЕРЕЗІН В.Б., канд. техн. наук, асистент, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

БАМБУРА А.М., д. т. н., завідувач відділу ДП «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

АНОТАЦІЯ

У статті наведено результати експериментальних досліджень залізобетонних колон кругового перерізу на поперечний вигин з попередніми обтисненням і без попереднього обтиснення, виявлено збільшення несучої здатності колон з попередніми обтисненням на 47,6 %, визначені деформації поверхні колони з використанням методу кореляції цифрових зображень.

In the article the results of experimental studies of reinforced concrete columns of circular cross section on the transverse bending with pre-compression and without compression, showed an increase in the carrying capacity of columns with pre-compression by 47,6 %, defined deformation of the surface of the column using the method of digital image correlation are presented.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

метод кореляції цифрових зображень, несуча здатність, попереднє обтиснення колон.

Розрахунок міцності залізобетонних елементів за похилими перерізами виконується за емпіричними або напівемпіричними залежностями, на відміну від деформаційного методу розрахунку міцності нормальних перерізів, прийнятого в ДБН.2.6-98 [1]. У нормах проектування [2] розрахунок міцності залізобетонних елементів при дії поперечних сил виконують окремо на дію поперечної сили, на дію згинального моменту, на стиск по смузі бетону між похилими тріщинами. Методика АСІ [3] заснована на визначенні граничного зусилля зрізу, яке включає граничні поперечні сили, що сприймаються бетоном V_c і поперечною арматурою V_s . В європейських нормах [4] при розрахунку поперечної арматури можливо використання двох методик: на основі формули Мерша для визначення сколюючих напружень $\tau = Q/bz$, при цьому розрахункова формула для визначення поперечної сили, що сприймається бетоном $V_{cd} = V_{Rd1}$ (за аналогією Q_b), уточнюється введенням емпіричних коефіцієнтів і умовних сколюючих напружень τ_{Rd} , в залежності від міцності бетону; і методики змінного кута нахилу стиснутих розкосів, заснованої на фермовій аналогії Мерша. Різниця між емпіричними методиками лише в тому, що в нормах [2, 3] несуча здатність по бетону та арматурі підсумовується, а в Eurocode 2 [4] вибирається мінімальна несуча здатність (по бетону або по арматурі).

Разом з тим, руйнування згинальних елементів за похилими перерізами є наслідком спільної дії згинаючого моменту і поперечної сили, а при позацентровому стисненні необхідно враховувати і дію поздовжньої стискаючої сили. Дослідження залізобетонних колон в умовах спільної дії поперечного вигину і поздовжніх стискаючих сил проводилися лише на елементах прямокутного перерізу [5]. Для колон кругового перерізу, які широко застосовуються для колон каркасних будівель, що експлуатуються в сейсмонезбезпечних зонах, буронабивних паль підпірних стін протизсувних споруд, що



сприймають значний горизонтальний тиск ґрунту, подібних експериментальних досліджень у технічній літературі не виявлено.

Нижче наведені результати експериментальних досліджень колон кругового перерізу при поперечному вигині, \varnothing 190 мм з поздовжнім армуванням у вигляді шести стрижнів арматури \varnothing 10 A240C, поперечним спіральним армуванням з арматурного дроту \varnothing 4ВІ з кроком 100 мм і оцінка впливу позацентрово прикладеного поздовжнього зусилля стиску, що довантажує стиснуту зону при поперечному вигині, на несучу здатність елементів кругового перерізу при дії поперечних сил.

Для виготовлення зразків використовували бетон класу С 25/30. Зразки для випробувань були поділені на три серії в залежності від встановленого прольоту зрізу, що дорівнював діаметру колони, 1,5 діаметра колони, двом діаметрам колони. Довжина



Рис.1. Колонна кругового перерізу після проведення випробувань.

зразків колон становила 1000 мм. Було випробувано по три зразки кожної серії, рис.1.

В якості обладнання використовували випробувальну машину WERKSTOFFPROFMASHINEN L51PZ16 з максимальним зусиллям 20 т. Для установки колон в горизонтальне положення і можливості передачі поперечного навантаження були виготовлені опори з половин сталевих труб за діаметром колон. Дослідження деформацій бетону в зоні поперечного вигину виконували за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 10-3 мм і нового методу кореляції цифрових зображень (КЦЗ) [6,7] представленого у вигляді програмного пакета. Для методу КЦЗ використовували цифрову камеру Casio Exilim Pro EX-F1. Послідовність методики: нанесення дискретних точок матовою фарбою по сітці на поверхню бетону, установка світлодіодних прожекторів, фіксація кожного етапу навантаження за допомогою фотокамери, розбивка зони досліджень на скінченні елементи, визначення деформацій у кожному піделементі зображення і візуалізація деформацій.

Подальша обробка даних за допомогою спеціального програмного комплексу дозволила визначити деформації бетону в процесі навантажен-

ня на кожній стадії деформування, фіксувати утворення і розвиток тріщин, практично отримати повну кінематичну картину деформування і руйнування елемента при поперечному вигині.

Результати випробувань показали, що першими при поперечному вигині з'являлися нормальні тріщини (рис. 2) в місці прикладання зусилля при навантаженні, приблизно, 0,33 Рруйн, і деформації в стиснутій зоні $\epsilon_s = 41 \times 10^{-5} - 53 \times 10^{-5}$.

Утворення похилої тріщини починалося з відхилення нормальної тріщини у напрямку до місця прикладання навантаження і деформаціях стиснутої фібри, що перевищували 100×10^{-5} . При цьому процес зменшення висоти стиснутої зони відбувається так як і в нормальному перерізі. Далі, з досягненням головними напруженнями бетону в прольоті зрізу межі міцності на розтяг, відбувається утворення похилої тріщини з її початком в розтягнутій зоні і закінченням у місці найменшої висоти стиснутої зони.

Отримане розподілення деформацій, зафіксоване перед моментом руйнування, дозволило виявити причину утворення похилої тріщини як результат локального досягнення межі текучості в поздовжній арматурі в одній із раніше утворених нормальних тріщин, рис. 3. Далі з переважним зростанням розкриття однієї з нормальних тріщин відбувається різке зменшення висоти стиснутої зони над цією тріщиною і перерозподіл зусиль в елементах з поздовжньої арматури на поздовжні стрижні, розташовані вище і поперечні стрижні. При достатньому поперечному армуванні і відповідному

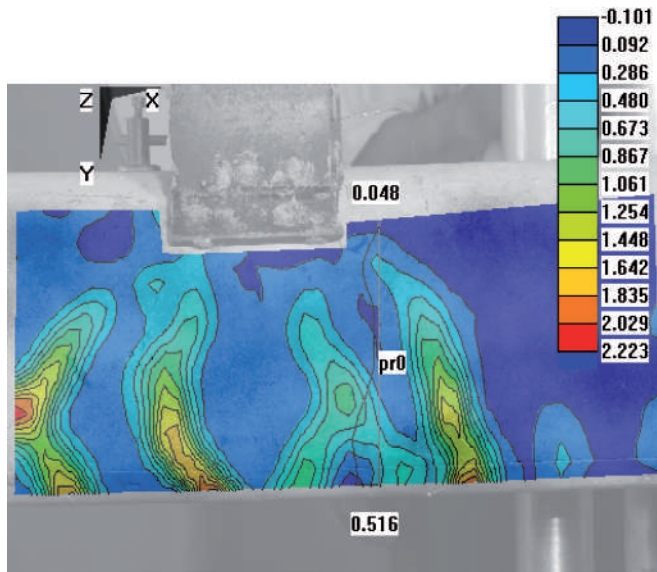


Рис.2. Початок утворення нормальних тріщин при поперечному вигині.

кроці починається розкриття похилої тріщини (або тріщин).

При відсутності поперечної арматури або при досягненні межі текучості в поперечних стержнях (їх розриві) відбувається процес руйнування за похилим перерізом, показаний на рис. 3. За даними проведених дослідів, вплив спірального поперечного армування збільшує несучу здатність кругових перерізів до 43 %. Разом з тим, кількість поздовжньої



арматури, розташованої в розтягнутій і стиснутій зонах перерізу також має вплив на граничну поперечну силу для елементів кругових перерізів. Залежність впливу відсотка армування поздовжньої арматури на несучу здатність за похилим перерізом для елементів діаметром 190 мм у співставленні з подібним впливом на прямокутні елементи, розміром 100x180 мм,

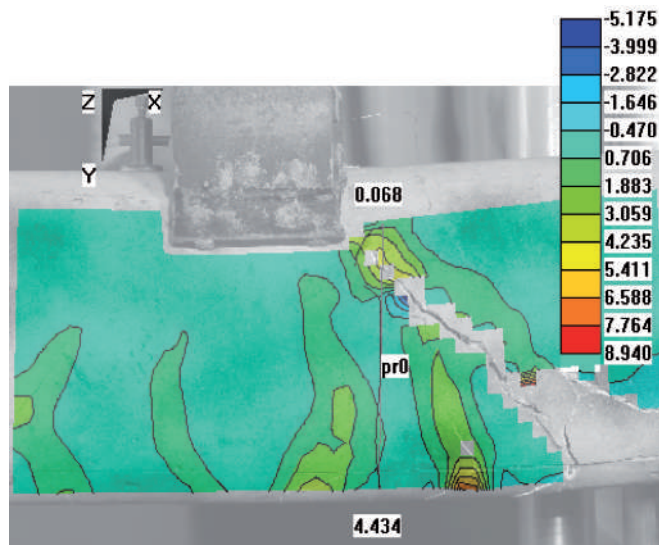


Рис.3. Процес руйнування колони за похилим перерізом.

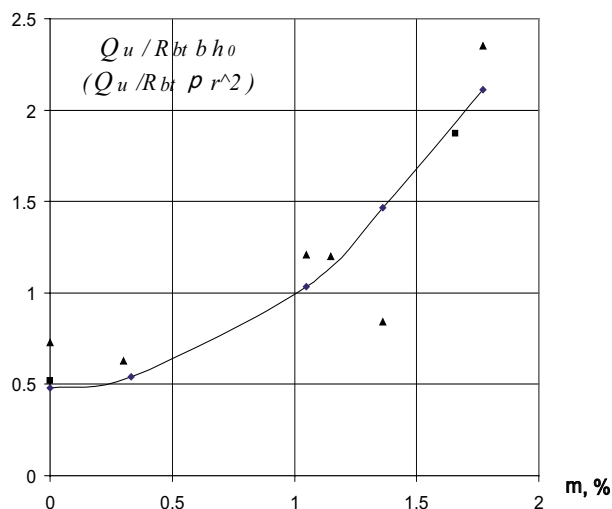


Рис.4. Експериментальна залежність впливу відсотка армування поздовжньої арматури на несучу здатність похилого перерізу при прольоті зрізу $2 h_0$ ($2 \varnothing$):
▲ - для елементів прямокутного перерізу,
■ - для елементів кругового перерізу.

100x200 мм за даними дослідів [12] при прольоті зрізу $2 h_0$ ($2 \varnothing$), наведена на рис. 4.

Щодо нагельного ефекту поздовжньої арматури, особливо, при багаторядному армуванні, слід зазначити, що даний ефект проявляється після досягнення межі текучості в стрижнях, найбільш віддалених від стиснутої зони і після початку розкриття похилої тріщини у стрижнях, розташованих вище по розрізу з напруженням нижче межі текучості.

Оцінку впливу позacentрово прикладеного поздовжнього зусилля стиску, що довантажує стисну-

ту зону при поперечному вигині, на несучу здатність елементів кругового перерізу при дії поперечних сил проводили на колонах, характеристики і армування яких наведено вище. Проліт зрізу при випробуванні дорівнював двом діаметрам колони за вирахуванням захисного шару бетону 30 мм. Було випробувано по три зразки кожної серії, з рівнем поздовжнього обтиснення не більше $0,25 R_{руйн}$ при стисненні. Величина ексцентриситету становила 4 см. Величина зусилля обтиснення становила 150 кН. Поздовжній вигин від попереднього обтиснення колон здійснювали в той же бік, що і наступний поперечний вигин від поперечної сили, що прикладалася.

Для проведення випробувань була виготовлена спеціальна установка, рис. 5. Для створення зусилля попереднього обтиснення колон використовували досить жорстку раму, що складається з двох траверс, двох напрямних, шарнірного пристрою для установки ексцентриситету прикладання навантаження, домкрату. Навантаження як в горизонтальному, так і вертикальному напрямку здійснювали за допомогою спеціальної насосної станції. Дослідження деформацій бетону в зоні поперечного вигину виконували за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 10^{-3} мм. Прогин вимірювали індикатором годинникового типу з ціною поділки 10^{-2} мм.

Результати випробувань показали, що при навантаженні від обтиску деформації не перевищували пружних значень. При подальшому, після попереднього обтиснення колон, поперечному вигині першими з'являлися нормальні тріщини в розтягнутій зоні в зоні прикладення зусилля при навантаженні, приблизно, $0,42 R_{руйн}$, і деформації в стиснутій зоні $\epsilon_v = 152 \times 10^{-5}$, що, приблизно, в два рази перевищувало деформації в стиснутій зоні елементів без попереднього обтиснення у момент появи нормальних тріщин.

Далі з розкриттям нормальної тріщини в місці додатка поперечної сили відбувалося зменшення висоти стиснутої зони над цією тріщиною і утворення похилої тріщини. Перед моментом руйнування в стиснутій зоні утворювалася одночасно і поздовжня тріщина. Процес руйнування відбувався за похилим перерізом, рис. 6.

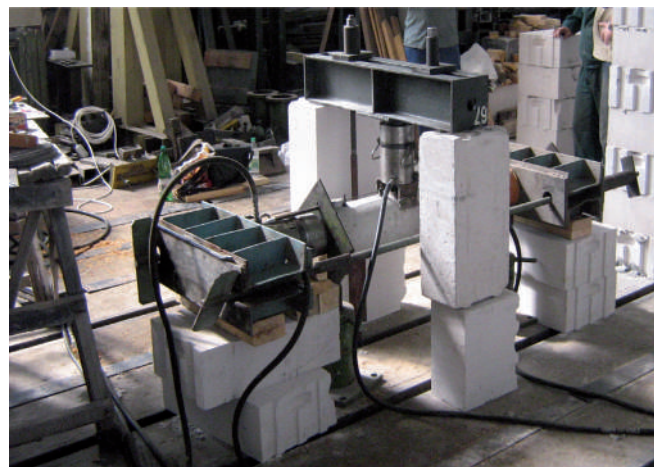


Рис.5. Установка для проведення випробувань колон з попередніми обтисненням.

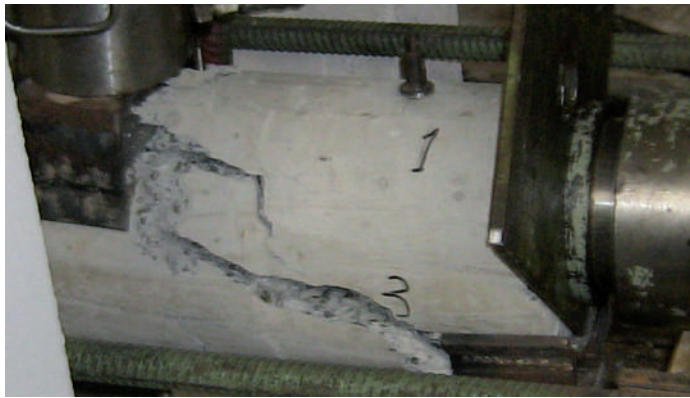


Рис.6. Руйнування колони з попереднім обтисненням за похилим перерізом.

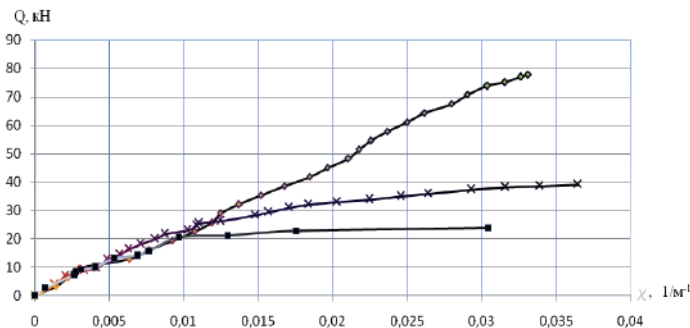


Рис.7. Зіставлення залежностей «поперечна сила - кривизна» для колон при поперечному вигині і прольоті зрізу, $a=2h_0$.

- ◆ - колони з попереднім обтисненням;
- × - колони без попереднього обтиснення з поперечною арматурою;
- - колони без попереднього обтиснення і без поперечної арматури.

Процес деформування колон при поперечному вигині до моменту утворення похилої тріщини подібний до процесу деформування при звичайному вигині. За даними дослідів, похила тріщина з'являється після значного зменшення висоти стиснутої зони, перед моментом руйнування елемента. Попереднє обтиснення з одного боку довантажує стиснуту зону колони і, тим самим, збільшує деформації стиснення, а з іншого боку стримує розкриття похилої тріщини, перешкоджаючи повороту однієї частини перерізу відносно іншої, як це відбувається при звичайному поперечному вигині. В результаті руйнування колон з попередніми обтисненням відбувається за похилим перерізом з поздовжнім розколюванням бетону стиснутої зони.

Зіставлення залежностей «поперечна сила - кривизна» для колон з поперечним обтисненням і без поперечного обтиснення, отриманих за результатами випробувань, наведено на рис. 7.

Як видно з рис. 7, попереднє обтиснення збільшує несучу здатність колон кругового перерізу у порівнянні з колонами, що випробовували при поперечному вигині без попереднього обтиснення при тому ж прольоті зрізу ($a=2\varnothing$) та ідентичному поперечному і поздовжньому армуванню - на 47,6 %. Зіставлення колон кругового перерізу, з випробуванням при поперечному вигині без попереднього обтиснення показало, що несуча здатність для колон без поперечного ар-

мування була на 39,21 % нижче, ніж для колон з поперечним армуванням.

Наведені результати досліджень свідчать, що методика розрахунку несучої здатності по поперечній силі кругових перерізів з багаторядним армуванням, повинна враховувати вплив поздовжнього армування.

Дослідження процесу руйнування з використанням методу кореляції цифрових зображень показали необхідність застосування деформаційного підходу до визначення зусиль в поздовжніх і поперечних стрижнях арматури, що не досягають граничних значень та оцінки несучої здатності похилого перерізу за відповідною деформаційною моделлю з визначенням деформацій в бетоні стиснутої зони.

Безконтактний метод кореляції цифрових зображень має широкі можливості при визначенні поля деформацій, мінімальні вимогами до устаткування, відрізняється простотою і достатньою точністю при визначенні деформації, дає можливість аналізу швидкоплинних процесів при руйнуванні за допомогою високошвидкісної камери. Деформації, отримані методом кореляції цифрових зображень, відповідали деформаціям, що визначалися за приладами, а характер руйнування (рис. 3) практично точно відповідав реальній картині руйнування (рис.1).

Випробування колон з попередніми обтисненням відповідає реальній розрахунковій схемі будівель, завантажених вертикальними і горизонтальними зусиллями. Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють сформулювати розрахункові передумови нового методу розрахунку стиснутих елементів круглого перерізу при поперечно-

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування: ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинні від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд, 2009. – 71 с. – (Будівельні норми України).
2. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного преднапряжения арматуры: СП 52-101-2003. — М. : ФГУП ЦПП, 2004. — 53 с.
3. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318r-02).
4. ENV 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings. — Brussels : European Committee for Standardization, 1992.
5. Методика испытания железобетонных элементов на внецентренное сжатие с поперечной силой / [Шейна С.Г., Сибиль В.Г., Лиджиев М.Д. и др.] // в кн.: Вопросы расчета железобетона. - Ростов н/Д, 1982. - С. 139-142.
6. Березін В.Б. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / Березін В.Б., Чаусов М.Г. // Техніческая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – №2. – С. 15 – 20.
7. Hild F. Digital image correlation / Hild F., Roux S. // Optical Methods for Solid Mechanics. A Full-Field