

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН, ПОВРЕЖДЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Клименко Е.В., д.т.н., профессор,
Довгань А.Д., к.т.н., доцент,
Одесская государственная академия строительства и архитектуры
klimenkoew57@gmail.com

Кос Желько, аспирант,
Университет «Север», г. Вараждин, Хорватия
zeljko.kos@live.com

Аннотация. В ходе проведенных экспериментально-статистических исследований выполнено планирование эксперимента для трех наиболее значащих факторов, влияющих на остаточную несущую способность поврежденных железобетонных колонн прямоугольного поперечного сечения, а именно: высоты колонны (гибкости); угла наклона фронта повреждения и глубины повреждения. Результаты позволили установить влияние на несущую способность каждого из выбранных факторов, а также взаимное влияние факторов.

По оценкам экспериментально-статистической модели и однофакторным локальным полям, наибольшее влияние на несущую способность оказывает угол откола повреждения в сечении колонны.

Ключевые слова: экспериментально-статистическое моделирование, железобетонные колонны, повреждение, несущая способность.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН, ПОШКОДЖЕНИХ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Клименко Є.В., д.т.н., професор,
Довгань О.Д., к.т.н., доцент,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
klimenkoew57@gmail.com

Кос Желько, аспірант,
Університет «Север», м. Вараждин, Хорватія
zeljko.kos@live.com

Анотація. В ході проведених експериментально-статистичних досліджень виконано планування експерименту для трьох найбільш значущих факторів, що впливають на залишкову несучу здатність пошкоджених залізобетонних колон прямокутного поперечного перерізу, а саме: висоти колони (гнучкості); кута нахилу фронту пошкодження і глибини пошкодження. Результати дозволили встановити вплив на несучу здатність кожного з обраних факторів, а також взаємний вплив факторів.

За оцінками експериментально-статистичної моделі і однофакторних локальних полів, найбільший вплив на несучу здатність робить кут відколу пошкодження в перерізі колони.

Ключові слова: експериментально-статистичне моделювання, залізобетонні колони, пошкодження, несуча здатність.

EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELING OF THE WORK OF FERRO-CONCRETE COLUMNS DAMAGED IN THE OPERATION PROCESS

Klymenko Ievgenii, Doctor of Engineering, Professor,
Dovgan A.D., Ph.D., Assistant Professor,
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
klimenkoew57@gmail.com

Kos Zelyko, graduate student,
University North, Varaždin, Croatia
zeljko.kos@live.com

Abstract. In the course of the experimental and statistical studies, the experiment was planned for the three most significant factors affecting the residual load-bearing capacity of damaged reinforced concrete columns of rectangular cross-section, namely: column heights (flexibility); The angle of inclination of the front of the fault and the depth of damage.

Numerical modeling of the operation of compressed rectangular cross-section damaged during operation of reinforced concrete columns was carried out in the program complex «LIRA-SAPR» in a nonlinear setting.

The results of experimental statistical modeling made it possible to determine the influence on the carrying capacity of each of the selected factors, as well as the mutual influence of the factors.

Based on the obtained values of the destructive force for 19 brands of columns, in accordance with the experimental design, a 3-factor experimental-statistical model of the second order was constructed. This model is adequate to the experiment with an error of 8,8 kN, with 8 statically significant coefficients.

According to the estimates of the experimental statistical model and single-factor local fields, the greatest influence on the bearing capacity is exerted by the angle of deflection of damage in the cross section of the column.

From the analysis of the presented diagram of the combined influence of variable factors, it follows that, regardless of the height of the column, the destructive force is practically unchanged. Thus, as the height of the column increases, the bearing capacity first increases by approximately 2-3% at $X_1 = 1,75$ m, and then decreases by 4-6% at $X_1 = 2,5$ m.

Keywords: experimental-statistical modeling, reinforced concrete columns, damage, bearing capacity.

Постановка проблеми. В процесі експлуатації всі будівельні конструкції изнашиваються, показателі їх експлуатаційної придатності погіршуються і конструкція, відповідно, і будівля і споруда в цілому, як система, може перейти в інше технічне стан. Як відомо [1], експлуатація будівлі в стані «непридатної до нормальної експлуатації» носить обмежений характер, а в «аварійному» – не допустима.

В теперішній час гостро стоїть проблема оцінювання несущої спроможності конструкцій, які в ході експлуатації отримали пошкодження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням роботи пошкоджених в процесі експлуатації стиснутих і вигнутих бетонних і залізобетонних конструкцій присвячено досить багато робіт [3...6, 8]. В результаті проведення експериментальних і теоретичних досліджень розроблені загальні підходи [7] до визначення залишкової несущої спроможності пошкоджених бетонних і залізобетонних конструкцій, які базуються на основних положеннях діючих норм [2] і розширюють їх дію на область визначення залишкової несущої спроможності пошкоджених конструкцій. В результаті таких розрахунків вдається точно визначити несущу спроможність, а, відповідно, технічне стан конструкцій [1] і зробити висновок про подальшу безаварійну експлуатацію конструкцій і будівлі або споруди в

целом.

Однако вышеуказанные исследования не проводились над сжатыми железобетонными элементами различной гибкости, а, как известно [2] гибкость сжатого железобетонного элемента существенно влияет на его несущую способность.

Не изученным остается вопрос учета гибкости сжатого элемента на несущую способность частично поврежденного элемента, когда повреждение наблюдается лишь на части высоты сечения, и гибкость, таким образом, изменяется по высоте элемента.

В данной работе рассматривается повреждение в виде разрушения части сечения бетона, что влечет за собой уменьшение несущей способности, особенно в сжатых элементах. Такого вида повреждения получают конструкции зданий и сооружений, находящиеся в зоне боевых действий в районах проведения антитеррористической операции в восточных регионах Украины. В рассматриваемых исследованиях повреждение моделировалось разрушением части бетона у более сжатой зоны бетона. Длина повреждений по высоте колонны во всех образцах была постоянной, а варьировался угол наклона фронта повреждения и его глубина. При этом повреждение находилось по середине высоты колонны и фронт повреждения был плоскостью.

Проводимые на протяжении последних лет в Одесской государственной академии строительства и архитектуры исследования работы сжатых и изгибаемых поврежденных в процессе эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, позволили описать их напряженно-деформированное состояние и разработать методику расчета остаточной несущей способности [3-8].

Однако для сжатых элементов рассматривались лишь жесткие элементы, влияние гибкости на несущую способность сжатых элементов не учитывалось, что не позволяет использовать предлагаемые методики определения остаточной прочности для реального спектра конструкций.

Цель работы. Экспериментально-статистическое исследование деформированного состояния и определение несущей способности поврежденных в процессе эксплуатации железобетонных сжатых элементов различной гибкости, определение влияния каждого из выбранных факторов и их взаимное влияние на несущую способность конструкций.

Объект исследований. Объектом исследований был процесс деформирования и разрушения поврежденных железобетонных колонн прямоугольного поперечного сечения с различной гибкостью.

Основная часть. Для достижения поставленной цели было изготовлено и испытано 23 опытных образцов с заранее смоделированными повреждениями (при этом часть образцов были близнецами (таблица 2)).

При этом учитывалось, что моделирование коррозии арматуры осуществляется путем подстановки в расчетные формулы [2] фактического значения площади сечения арматурных стержней. Разрушение части бетона в поперечном сечении есть одним из наиболее характерных повреждений железобетонного сечения. При этом следует различать плоское повреждение (когда фронт повреждения параллелен одной из главных осей), в противном случае имеет место косое повреждение.

Основными факторами варьирования на основе изучения и анализа литературных источников выбраны:

- высота колонны (h);
- угол наклона фронта повреждения (откола) (Θ) (рис. 1);
- высота повреждения (h_1).

Варьируемые в эксперименте три фактора Y серии X_i ($i = 1 \dots 3$), нормализуемые к $-1 \leq x_i \leq +1$, представлены в таблице 1.

По полученным значениям разрушающей силы (P , тс) для 19 марок колонн, в соответствии с планом эксперимента, построена 3-х факторная экспериментально-статистическая модель (ЭС-модель) 2-го порядка (1). ЭС-модель адекватна эксперименту при ошибке $S_{\{P\}} = 0.88$ тс, с 8 статически значимыми коэффициентами.

$$\begin{aligned}
 P = & 38.7 - 0.43x_1 - 1.28x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 2.78x_2 - 0.83x_2^2 + 2.99x_2x_3 \\
 & - 3.72x_3 - 2.53x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Основными обобщающими показателями модели, в координатах экстремумов, для P являются: минимальный $P_{\min}=24.2$ тс (x_{\min} при $x_1=x_3=+1$, $x_2=-1$) и максимальный $P_{\max}=40.8$ тс (x_{\max} при $x_1=-0.168$, $x_2=+1$, $x_3=-0.148$) уровни; абсолютный $\Delta\{P\}=16.6$ тс и относительный $\delta\{P\}=1.69$ перепад.

Таблица 1 – Факторы варьирувания для трехфакторной модели эксперимента

Факторы, которые исследуются		Уровни варьирувания			Интервал варьирувания
код	натуральные значения	«-1»	«0»	«+1»	
X ₁	Висота колоны h [м]	1,0	1,75	2,5	0,75 [м]
X ₂	Угол откола Θ , градусы	0	30	60	30 [°]
X ₃	Высота откола h ₁ , мм	20	60	100	40 [мм]

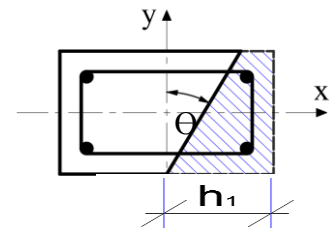


Рис. 1. Варьируемые факторы

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента

Точка плана №	X ₁	X ₂	X ₃
К 1	+1	+1	+1
К 2	+1	+1	-1
К 3	+1	-1	+1
К 4	+1	-1	-1
К 5	+1	0	0
К 6	-1	+1	+1
К 7	-1	+1	-1
К 8	-1	-1	+1
К 9	-1	-1	-1
К 10	-1	0	0
К 11	0	+1	0
К 12	0	-1	0
К 13	0	0	+1
К 14	0	0	-1
К 15	0	0	0
К 16	0	0	0
К 17	0	0	0
К 18	0	0	0
К 19	0	0	0
К 20	0	+1	0
К 21	0	-1	0
К 22	0	0	+1
К 23	0	0	-1

Оценки коэффициентов модели и обобщающих показателей характеризуют индивидуальное и совместное влияние высоты колонны (h , м), угла (Θ , градусы) и высоты (h_1 , мм) откола на уровень разрушающей силы. Визуализация этого влияния представлена на рис. 2 и 3.

Как видно по оценкам ЭС-модели и однофакторным локальным полям (рис. 2), наибольшее влияние на P оказывает X_2 – при увеличении угла откола повреждение в сечении колонны повышается разрушающая сила.

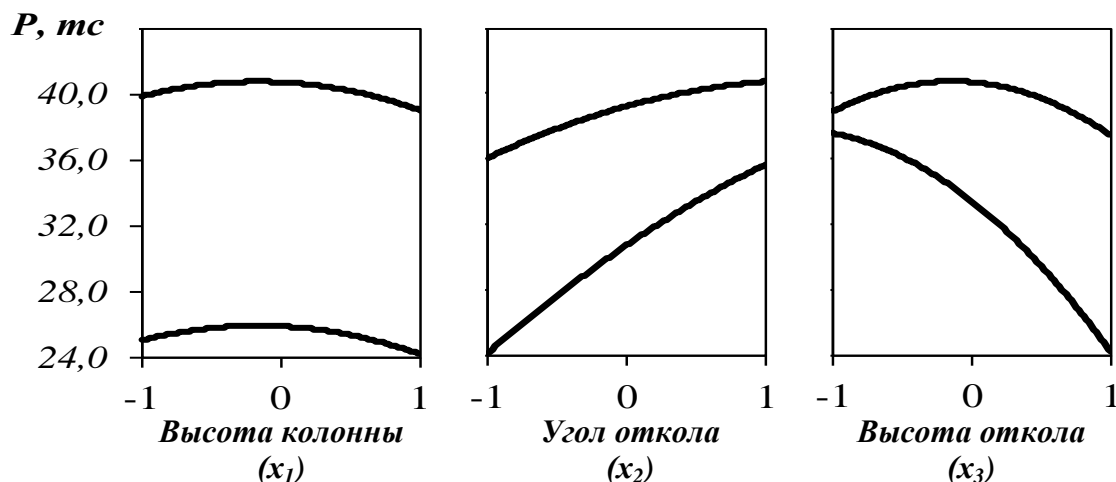


Рис. 2. Однофакторные зависимости влияния варьируемых факторов на разрушающую силу колонн

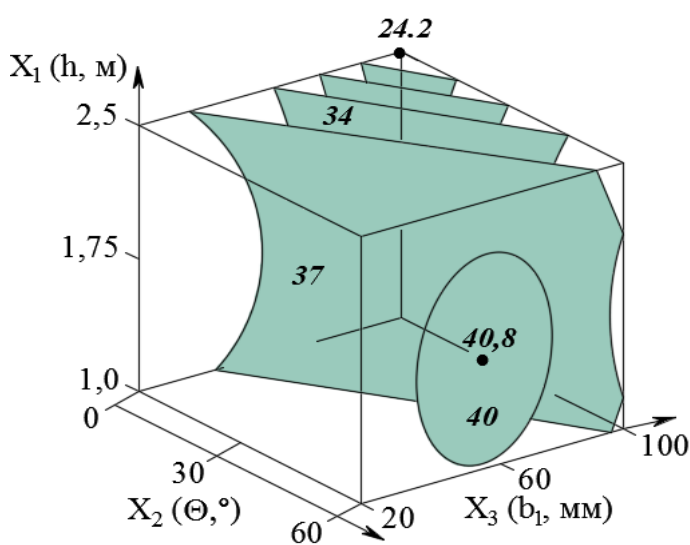


Рис. 3. Совместное влияние X_1 - X_3 на разрушающую силу колонн

Из анализа представленной диаграммы совместного влияния варьируемых факторов (рис. 2) следует, что вне зависимости от высоты колонны разрушающая сила практически не изменяется. Так, с увеличением высоты колонны, P вначале возрастает приблизительно на 2-3% при $X_1=1.75$ м, а потом снижается на 4-6% при $X_1=2.5$ м.

Влияние угла и высоты откола (X_2 и X_3) на внешнюю нагрузку несколько иное. При изменении X_2 и X_3 до основных уровней (30° и 60 мм), при условии высоты колонны $h = 1.75$ м, изделия выдерживают предельную нагрузку $P \approx 39-40$ тс. Следует также отметить, что разрушающая сила может возрастать до своего граничного значения 40.8 тс, но только при условии, когда Θ и h_1 откола колонн составят

соответственно 60° и 54.08 мм, а h колонны не будет превышать 1.624 м.

Выводы и перспективы дальнейших исследований:

1. Результаты экспериментально-статистического моделирования позволили установить влияние на несущую способность каждого из выбранных факторов, а также взаимное влияние факторов.

2. По полученным значениям разрушающей силы для 19 марок колонн, в соответствии с планом эксперимента, построена 3-х факторная экспериментально-статистическая модель 2-го порядка. Эта модель адекватна эксперименту при ошибке 8,8 кН, с 8 статически значимыми коэффициентами.

3. По оценкам экспериментально-статистической модели и однофакторным локальным полям, наибольшее влияние на несущую способность оказывает угол откола повреждения в сечении колонны.

4. Из анализа представленной диаграммы совместного влияния варьируемых факторов следует, что вне зависимости от высоты колонны разрушающая сила практически не изменяется. Так, с увеличением высоты колонны, несущая способность вначале возрастает приблизительно на 2-3% при $X_1=1.75$ м, а потом снижается на 4-6% при $X_1=2.5$ м.

5. В ходе дальнейших исследований необходимо разработать, базируясь на основных предпосылках действующих норм, методику расчета остаточной прочности поврежденных железобетонных колонн различной гибкости.

Литература

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану / Мінрегіонбуд України. – К., 2017. – 45 с.

2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування / Мінрегіонбуд України. – К., 2009. – 97 с.

3. Экспериментальные исследования работы сжатых железобетонных поврежденных колонн различной гибкости / Е.В. Клименко, А.В. Павловский, Ж.Кос // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2017. – Вип. 66. – С. 35-40.

4. Клименко Е.В. Поврежденные бетонные сжатые конструкции: работа, расчет. / Е.В. Клименко, Г.М. Мустафа // Одесса: Одесский нац. ун-т им. И.И. Мечникова, 2014. – 169 с.

5. Клименко Е.В. Работа поврежденных железобетонных колонн / Е.В. Клименко, Т.А. Крутько // Одеса: Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2014. – 137 с.

6. Клименко Е.В. Approach to calculation of structural reliability and procedures for the evaluation of current state of construction / Е.В. Клименко, М. Орешкович, Ж. Кос // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2015. – Вип. 61. – С. 176-185.

7. Клименко Є.В. Технічні проблеми керування залишковим ресурсом об'єктів культурної спадщини / Є.В. Клименко // Збереження історичної забудови центра Одеси шляхом включення до основного списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО: Матеріали III і IV конференцій. – Одеса: ОДАБА, 2016. – С. 68-74.

8. Клименко Е.В. Общий метод определения остаточной несущей способности поврежденных железобетонных конструкций / Е.В. Клименко, Т.А. Крутько, А.М. Исмаель // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. Вып. 77. – Дн-вск, ГВУЗ «ПГАСА», 2014. – С. 85-89.

Стаття надійшла 19.06.2017