

УДК 69:624.131.43

к.т.н. Карпетян С.Х.,  
к.т.н. Емец Е.В.,  
Коняшкина О.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ОДНОКРАТНЫХ И ПОВТОРНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Приведены конечно-элементные модели для определения несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при однократных и повторных нагрузках. Полученные на моделях результаты расчетов сравниваются с данными натурных экспериментов.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, внецентренное сжатие, прочность, деформации, повторные нагрузки, количество циклов нагружений, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Железобетонные сжатые элементы, находящиеся в условиях повторных нагрузок, как показывают экспериментальные исследования, имеют определенные особенности деформирования и разрушения, не учитываемые в современных нормах проектирования. Задача учета указанных особенностей (с целью надежного прогнозирования работы и оценки долговечности конструкций) на сегодня является актуальной.

Одним из путей решения указанной задачи является совершенствование методов расчета железобетонных конструкций, основанных на учете реальных законов деформирования материалов, полученных экспериментально при повторных нагрузках.

Однако экспериментальные исследования железобетонных конструкций материалоемки и требуют больших трудозатрат, поэтому построение математических моделей конструкций и численные эксперименты - актуальное и перспективное направление исследований [12].

Вопросам влияния малоцикловых нагрузок на несущую способность вне-

центренно сжатых элементов посвящено много работ [2, 4, 5, 9, 10, 11 и др.]. Однако в большинстве из них рассматриваются стержни с малой гибкостью  $\lambda \leq 6$ , т.е. без учета влияния продольного изгиба. В приведенных работах установлены: влияния количества циклов повторных нагружений и величины начальных эксцентриситетов на напряженно - деформированное состояние, а также характер разрушения образцов. Кроме того, следует отметить, что исследования влияния повторных нагружений высокого уровня на несущую способность и устойчивость внецентренно сжатых элементов средней и большей гибкости ( $\lambda \geq 18$ ) практически отсутствуют.

В работе [5] приведены результаты экспериментальных исследований несущей способности внецентренно сжатых железобетонных стоек средней гибкости при многократно повторных нагрузках. Верхний уровень нагружений стоек принимался равным  $\eta_B = 0,85$ , коэффициент асимметрии циклов  $\rho = 0,1$ . Рассматривались железобетонные шарнирно закрепленные стойки, длиной 100 см (105 см – между центрами шарниров) прямоугольного поперечного сечения размером

60×120 мм с симметричным армированием четырьмя продольными стержнями диаметром 6мм и поперечной арматурой диаметром 3мм. Гибкость стоек в плоскости наименьшей жесткости составляла  $\lambda = 16,7$  ( $\lambda = 17,5$ ), а эксцентриситет приложения нагрузки – 10 мм.

В результате экспериментальных исследований [5] установлено влияние уровня повторных нагружений на несущую способность, деформативность (снижение модуля упругости бетона, увеличение начального эксцентриситета приложения нагрузки) и характер разрушения стоек.

#### Постановка задачи.

Основной целью численных исследований явилось определение несущей способности внецентренно сжатых железобетонных шарнирно закрепленных стоек, рассмотренных в работе [5]. При этом были поставлены следующие задачи: исследование напряженно-деформированного состояния стоек с использованием базовых диаграмм деформирования материала “ $\sigma - \varepsilon$ ” при однократных нагружениях и трансформированных (уточненных по сравнению с аналогичными, приведенными в работе [12]), учитывающих изменение физико-механических свойств бетона (снижение модуля упругости бетона  $E_b$ ) при повторных нагружениях; определение предельной нагрузки в зависимости от степени снижения модуля упругости  $E_b(n)$  бетона, а также увеличения начального эксцентриситета вследствие изменения геометрии стоек (искривление стержня) за счет остаточных прогибов при повторных нагружениях.

#### Изложение материала и его результаты.

Моделирование и расчет стоек выполнены с помощью программного комплекса ПК “ЛИРА” [3,7] методом конечных элементов (МКЭ).

Расчеты, как и в [12] выполнены на двух типах конечно-элементных моделей стоек (рис. 1, а, б):

- первый тип – стержневая аппроксимация, т.е. в модели стойки использованы

только физически и геометрически нелинейные стержневые элементы (рис. 1, а);

- второй тип – аппроксимация объемными элементами. В этой модели бетон моделировался физически нелинейными объемными элементами, а арматура – геометрически нелинейными стержневыми элементами (рис. 1, б).

Нагрузка, как и в натурном эксперименте [5], задавалась в концевых сечениях стойки с эксцентриситетом, равным 10 мм в плоскости наименьшей жесткости стойки.

Моделирование увеличения эксцентриситета приложения нагрузки (в пределах от 10 мм до 15 мм), вызванного повторными нагружениями (за счет остаточных прогибов) выполнялось двумя способами:

для первой модели – увеличением начального эксцентриситета приложения нагрузки без изменения геометрической схемы стойки;

для второй модели – заданием начальной кривизны оси стойки до приложения нагрузки.

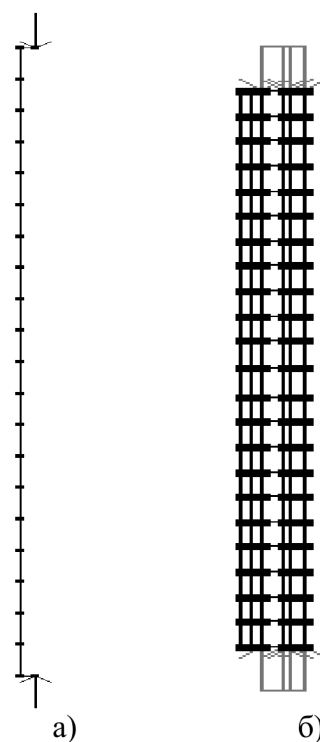


Рисунок 1 – Конечно - элементные модели стоек: а – первая модель; б – вторая модель

Для описания диаграмм деформирования “ $\sigma - \varepsilon$ ” основного и армирующего материалов стоек при однократном нагружении использован экспоненциальный закон. Значения напряжений и деформаций для основного материала (см. табл. 1) на сжатие, а также модуль упругости и предел текучести арматуры задавались на основе диаграмм деформирования, полученных при испытании бетонных призм, железобетонных коротышей и арматурных стержней [5], а на растяжение для бетона – по эмпирическим формулам, приведенным в [6]. Модуль упругости основного материала стоек в условиях повторных нагружений (табл. 1) задавался на основе деформационных кривых, полученных на циклах, предшествующих разрушению при испытании бетонных призм [8] с учетом результатов испытаний основных и вспомогательных образцов, приведенных в [5]. Диаграмма арматуры “ $\sigma - \varepsilon$ ” при этом не корректировалась, так как ее пределы текучести и модуль упругости при уровнях повторных малоцикловых нагружений до  $\sigma_{s,cyc} = 0,97R_s$  практически не изменяются [1].

Сравнение значений максимальных нагрузок и прогибов, полученных на моделях стоек с аналогичными данными, получен-

ными в результате натуральных экспериментов, приведено в таблице 2. Как видно из таблицы, численные значения несущей способности на обеих моделях и прогибов на второй модели при однократном нагружении хорошо согласуются с опытными данными. Прогибы, определенные в расчете по сравнению с опытными данными согласуются хуже, что объясняется не учётом накопления пластических деформаций в численном эксперименте.

#### Выводы и направление дальнейших исследований.

На основе численных исследований выполнена оценка несущей способности внецентренно сжатых железобетонных трансформированных (с пониженными значениями модуля упругости бетона) диаграмм деформирования. Хорошее совпадение сравниваемых величин (по несущей способности) как и в [12] позволяет говорить о надежности предлагаемых моделей и возможности их использования для определения несущей способности сжатых железобетонных элементов при малоцикловых нагружениях

Таблица 1 – Прочностные и деформативные характеристики бетона стоек при однократных (режим 1) и повторных нагружениях (режим 2)

| Режим нагружения | $E_0^-, МПа$ | $E_0^+, МПа$ | $\sigma_{np}^-, МПа$ | $\sigma_{np}^+, МПа$ | $\varepsilon_{np}^-$ | $\varepsilon_{np}^+$ | $\nu$ |
|------------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|
| 1                | 31485        | 31485        | 26,4                 | 2,06                 | 0,002                | 0,00014              | 0,2   |
| 2                | 22040        | 22040        | 26,4                 | 2,06                 | 0,002                | 0,00014              | 0,2   |

Таблица 2 – Сопоставление результатов натуральных и численных экспериментов

| Режим нагружения стоек | Натурный эксперимент |         | Численный эксперимент и сравнение с натурным экспериментом |         |                |                |               |         |                |                |
|------------------------|----------------------|---------|--|---------|----------------|----------------|---------------|---------|----------------|----------------|
|                        |                      |         | Первая модель  |         |                |                | Вторая модель |         |                |                |
|                        | $P, кН$              | $f, мм$ | $P, кН$  | $f, мм$ | $\Delta P, \%$ | $\Delta f, \%$ | $P, кН$       | $f, мм$ | $\Delta P, \%$ | $\Delta f, \%$ |
| 1                      | 115,5                | 7,63    | 123,0  | 2,69    | 6,5            | 64,74          | 127,3         | 5,08    | 10,2           | 33,42          |
| 2                      | 100,9                | 11,78   | 99,14  | 7,59    | 1,74           | 35,57          | 111,5         | 10,19   | 10,5           | 13,49          |

Примечание: значения несущей способности и прогибов стоек для режима 2 соответствуют среднему значению, полученному при циклах, предшествующих разрушению стоек.

**Библиографический список**

1. Бабич В. Є. *Напружено-деформований стан і міцність нерозрізних залізобетонних балок при одноразових та повторних навантаженнях х: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / В. Є. Бабич. — Полтава: 2005. — 20 с.*
2. Борисюк О. П. *Зміна напружено-деформованого стану перерізів керамзитозалізобетонних елементів під дією малоциклових навантажень / О. П. Борисюк // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях”. — Сумы, 1994. — С. 244–245.*
3. Верюжский Ю. В. *Компьютерные технологии проектирования железобетонных конструкций: курсовое проектирование / Ю. В. Верюжский, В. И. Колчунов, М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский. — К., 2006. — 804 с.*
4. Казачек В. Г. *Несущая способность и деформативность гибких сжато-изогнутых предварительно напряженных железобетонных элементов при кратковременном однократном и повторном нагружении : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / В. Г. Казачек. — М., 1980. — 21 с.*
5. Карапетян С. Х. *Результаты экспериментальных исследований влияния многократно повторных нагружений на несущую способность внецентренно сжатых стоек / С. Х. Карапетян, А. И. Давиденко, А. П. Иванов, В. В. Псюк // Зб. наук. праць. : Будівельні конструкції. — К. : НДІБК, 2005. — вип. 62.— Т. 1. — С. 131–136.*
6. Бамбура А. Н. *Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона / А. Н. Бамбура, В. Я. Бачинский, Н. В. Журавлева, И. Н. Пешкова. — К., 1987. — 24 с.*
7. Городецкий А. С. *ПК ЛИРА. Версия 9.0. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций : справочно-теоретическое пособие. — К.–М., 2003. — 472 с.*
8. Подобенко Т. Н. *Напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов при кратковременных повторных нагружениях : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Т. Н. Подобенко. — К., 1991. — 17 с.*
9. Пухонто Л. М. *Совершенствование колонн подсилованных этажей зерновых элеваторов / Л. М. Пухонто, Ф. К. Джуха // Бетон и железобетон. — 1992. — № 1. — С. 9–10.*
10. Чирва Т. Л. *Визначення міцності позацентрово стиснутих елементів при небогатоповторному навантаженні / Т. Л. Чирва, В. Н. Чирва // Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону : Зб. тез. : “Перша всеукраїнська науково-технічна конференція”. — К., 1996. — С. 214–216.*
11. Яковлев С. К. *Работа внецентренно сжатых бетонных элементов при повторно статическом нагружении / С. К. Яковлев, Н. П. Бащенко, М. И. Белкин // Бетон и железобетон. — 1992. № 8. — С. 21–22.*
12. Карапетян С. Х. *Численное определение несущей способности железобетонных внецентренно сжатых стоек при однократных и многократно повторных нагружениях / С. Х. Карапетян, П. Н. Кирьязов, В. В. Псюк // Зб. наук. праць. : Будівельні конструкції. — К. : НДІБК, 2007. — вип. 66. — С. 352–358.*

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Института архитектуры,  
строительства и ЖКХ ЛГУ им. Даля Андрейчуком Н.Д.,  
к.т.н., доц. ДонГТУ Бондарчуком В.В.**

Статья поступила в редакцию 13.11.15.

**к.т.н. Карапетян С. Х., к.т.н. Ємець О. В., Коняшкіна О. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)  
ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОЗАЦЕНТРОВО  
СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ОДНОРАЗОВИХ ТА ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

*Запропоновано скінчено-елементні моделі для визначення несучої здатності позацентрово стиснутих залізобетонних елементів при одноразових і небагаторазово повторних навантаженнях. Результати, які отримано в розрахунках на моделях, порівнюються з результатами експериментів.*

**Ключові слова:** бетон, залізобетон, позацентрове стиснення, міцність, деформації, повторні навантаження, кількість циклів навантажень, напружено-деформований стан, скінчено-елементні моделі.

**PhD in Engineering Karapetyan S.Kh., PhD in Engineering Yemets E.V., Koniashkina O.A.**  
(DonSTU, Alchevsk, LPR)

**NUMERICAL INVESTIGATIONS OF BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE OFF-CENTER COMPRESSED ELEMENTS UNDER SINGLE AND REPEATED LOAD**

*The finite-element models for determining bearing capacity of reinforced concrete off-center compressed elements under single and repeated load are shown. Obtained calculated results are being compared with data of full-scale experiments.*

**Key words:** concrete, reinforced concrete, off-center compression, strength, strains, repeated load, quantity of load cycles, stress-strain state, finite-element model.