

НАПРЯЖЁННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ВНЕЦЕНТРОМ НАГРУЖЕНИИ

Мордовский С.С.¹, Мурашкин В.Г.²

¹ Открытый институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет» в г. Похвистнево, Россия (446453, Самарская область, г. Похвистнево, ул. Кооперативная, 148А), e-mail: Qaer1@yandex.ru

² ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», Самара, Россия (443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194), e-mail: murvag@mail.ru

Проанализированы некоторые возможности усовершенствованной методики расчёта прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной диаграммы деформирования бетона по определению напряжённо-деформируемого состояния. Используя показания тензометрических датчиков и данные, полученные при расчёте по алгоритму, согласно экспоненциальной зависимости определялись напряжения в бетоне по высоте сечения образца, а также в зависимости от усилия в колоннах. Сравнение напряжений проводилось при значениях усилия в колонне 20, 40, 60 и 80% от максимальной величины нагрузки. Наибольшее расхождение получено при усилении в 20%, по мере увеличения усилия до 60–80% значения напряжений становятся всё ближе друг к другу. Напряжения в сжатой части бетона, полученные по показаниям тензодатчиков и теоретическим данным, являются аналитическими величинами.

Ключевые слова: внецентренное сжатие, напряжённо-деформируемое состояние (НДС), диаграмма деформирования.

STRESS STATE OF EXPERIMENTAL DESIGNS FOR LOADING ECCENTRIC

Mordovskiy S.S.¹, Murashkin V.G.²

¹ Open Institute (SSUACE Branch) Samara State University of Architecture and Civil Engineering in Pokhvistnevo, Pokhvistnevo, Russia (446453, Samara Region, Pokhvistnevo, Kooperativnaya str., 148"A"), e-mail: Qaer1@yandex.ru

² Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Samara, Russia (443001, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194), e-mail: murvag@mail.ru

Analyzed some features of the improved method of calculating the strength of eccentrically compressed concrete elements with a nonlinear strain diagram of concrete to determine the stress-strain state. Using the strain gage readings and the data obtained in the calculation of the algorithm, according to the exponential dependence of strain in the concrete were determined by the height of the sample cross section, and depending on the effort in the columns. Comparison of stress values was carried out at the efforts of the column 20, 40, 60 and 80% of the maximum load. The greatest difference was obtained by an effort of 20%, with increasing force up to 60 - 80% of the voltage values become closer to each other. The stresses in the compressed part of the concrete, obtained by the load cell readings, and theoretical data are the analytical values.

Keywords: eccentric compression, stress-strain state, diagram of deformation.

Введение

Активное применение в различных отраслях науки и техники мощных современных ПК не обошло стороной и область теории железобетона. Более производительные машины позволяют выполнять всё более сложные расчёты за считанные секунды, что помогает избегать громоздких рутинных вычислений вручную. В последние годы в расчётах железобетонных элементов находит практическое применение деформационная расчётная модель нормальных сечений, которая предполагает использование диаграмм деформирования, аппроксимирующих нелинейную работу бетона и арматуры, и закона распределения относительных деформаций по площади поперечного сечения элементов.

Процесс поиска решения нелинейной системы уравнений требует применения шагово-итерационных методов, что иногда затрудняет процесс вычислений, причём решение может быть неединственным. В Eurocode-2, нормах Германии DIN 1045-1, российском своде правил СП 52-101-2003, нормах Украины по расчёту железобетонных конструкций ДБН...2005, нормах Республики Беларусь СНБ 5.03.01-02 рекомендуется метод расчёта нормальных сечений на основе деформационной расчётной модели. В российском своде правил СП 52-101-2003 в качестве расчётных диаграмм состояния бетона, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, принимают трёхлинейную и двухлинейную диаграммы.

В СГАСУ профессором Г.В. Мурашкиным для описания диаграммы деформирования бетона была предложена экспоненциальная зависимость [6]:

$$\sigma_b(\varepsilon_b) = a_c \cdot \varepsilon_b^{b_c} \cdot \exp\left(\frac{-b_c \cdot \varepsilon_b}{p}\right), \quad (1)$$

где a_c , b_c – коэффициенты; p – величина относительной деформации, соответствующая напряжению, равному R_b ; ε_b – величина относительных деформаций крайнего сжатого волокна бетона.

Возможность применения диаграммы деформирования бетона (1) для расчётов изгибаемых железобетонных элементов была подтверждена в работах А.В. Козлова [3], А.А. Пищулёва [7].

Цель

Определение напряжённого состояния внецентренно сжатых железобетонных опытных образцов. Построение графиков зависимостей сжимающих напряжений в бетоне от результирующего усилия в колонне на основании практических и теоретических данных, сравнение полученных результатов.

Материал и методы исследования

В СГАСУ на базе лаборатории кафедры ЖБК были проведены испытания восьми экспериментальных образцов на внецентренное сжатие. Каждая серия, включающая 2 образца, отличалась от других прочностными характеристиками применяемых материалов, диаметром арматурных стержней и эксцентриситетом приложения внешнего усилия (табл. 1).

Для расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов с учётом нелинейной модели деформирования бетона был составлен алгоритм в программной среде *MathCad*. В качестве диаграммы деформирования бетона использовалась экспоненциальная зависимость (1), которая основана на фундаментальных исследованиях [1; 2; 4]; в качестве диаграммы

состояния стержневой арматуры принимают двухлинейную диаграмму по типу диаграммы Прандтля.

При расчёте нормальных сечений на внецентренное сжатие используют два уравнения статики:

$$\sum N = 0, \quad (2)$$

$$\sum M = 0. \quad (3)$$

Уравнения данной системы раскрываются при подстановке в каждое из них вместо усилий аналитические выражения, соответствующие физической работе материала. В результате некоторых преобразований получим уравнение, содержащее одно неизвестное k , являющееся высотой сжатой зоны сечения. В связи с изменением в процессе деформирования железобетонного элемента усилий в бетоне и арматуре высота сжатой зоны изменяется по определённому закону, который и необходимо выявить. Задавшись величиной относительной деформации сжатого бетона в виде ранжированной переменной $\epsilon b = 0,0.0001 \dots \epsilon b_{ult}$, определим с помощью встроенной в *MathCad* функции «root» закон изменения величины сжатой зоны бетона (рис. 1). После этого все усилия переопределяются путём замены верхнего предела интегрирования на величину $K = k(\epsilon b)$, зависящую от многих условий и отражающую реальную картину деформирования внецентренно сжатого железобетонного образца.

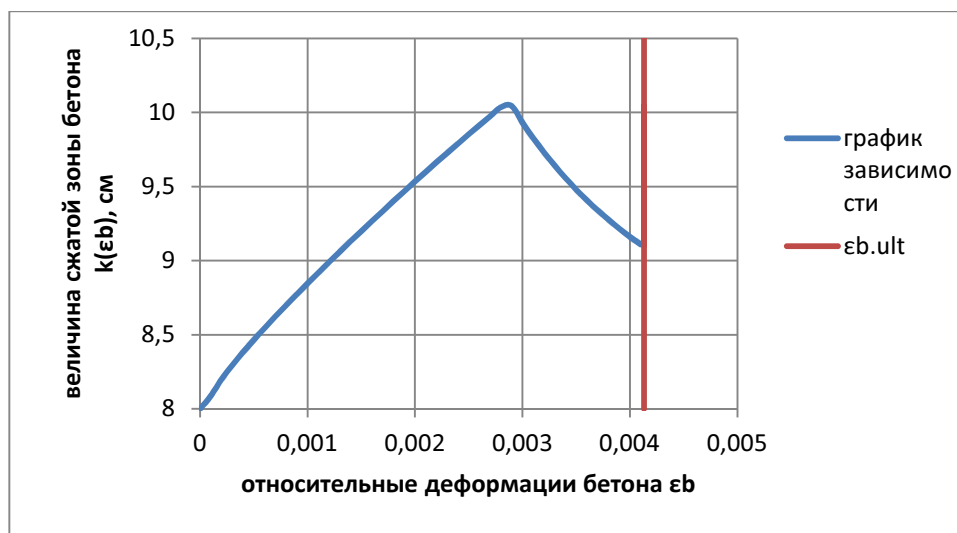


Рис. 1. График изменения высоты сжатой зоны в зависимости от относительных деформаций сжатого бетона.

При проведении эксперимента для измерения относительных деформаций бетона и арматуры использовались тензометрические датчики омического сопротивления с базой 50 и 20 мм и сопротивлением соответственно 400 и 200 Ом. В качестве регистрирующей

аппаратуры использовалась система сбора данных UCAM-60B фирмы KYOWA – прибор, разработанный для проведения точных измерений с использованием управляющего программного обеспечения (UCS-60A) при подключении к компьютеру.

По показаниям датчиков построены графики распределения относительных деформаций по высоте сечения образцов (рис. 2). Ось ординат является высотой сечения элемента в миллиметрах, а ось абсцисс показывает относительные деформации бетона в месте наклейки датчика. Так как в привычном понимании знак «минус» обозначает сжатие и при наклейке датчиков на образец отсчёт ведётся от крайней сжатой части, то для удобства представления экспериментальных данных в виде графиков высота сечения элемента представлена в единицах длины также со знаком «минус».

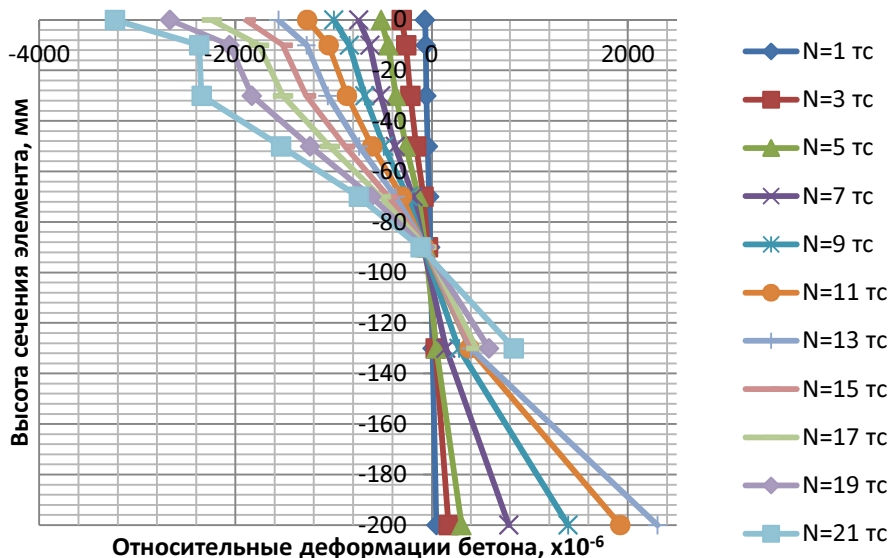


Рис. 2. Распределение деформаций по высоте сечения колонны K-2(2) на различных стадиях нагружения.

Результаты исследования и их обсуждение

Измерения напряжений являются косвенными (аналитическими) и определяются через относительные деформации бетона $\varepsilon_{b,np}$, зарегистрированные тензодатчиками при определённых значениях внешнего усилия во время испытаний, используя закон деформирования в виде экспоненциальной зависимости (1). В качестве чисто теоретических данных используются результаты, полученные при расчётах моделей данных экспериментальных образцов по усовершенствованной методике расчёта прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной диаграммы деформирования бетона [5], используя возможности САПР *MathCad*.

Таким образом, становится возможным отслеживание процесса изменения сжимающих напряжений в бетоне на различных стадиях загрузки (рис. 3). Точки на данных графиках обозначают напряжения в местах наклейки тензометрических датчиков.

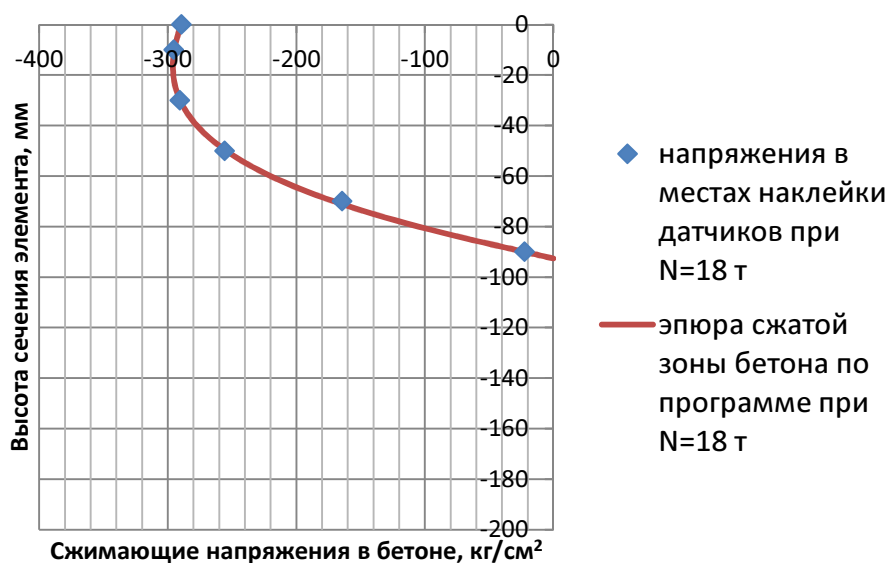


Рис. 3. Распределение сжимающих напряжений в бетоне по высоте нормального сечения образца К-2(2) на определённой стадии загрузки.

Таблица 1 – Исходные данные и несущие способности опытных образцов

Шифр колонн	l , см	h , см	b , см	h_0 , см	a_{sc} , см	e_0 , см	R_b , кг/см ²	A_s , см ²	A_{sc} , см ²	R_s , кг/см ²	R_{sc} , кг/см ²	N_{max} ТОНН
К-1	100	20	20	17	3,0	$h/2+10$	239,1	6,123	2,347	3996,8	5735,1	23,5
К-1(2)	100	20	20	17	3,0	$h/2+10$	241	6,123	2,347	3996,8	5735,1	23,7
К-2	100	20,1	20,1	16,8	3,0	$h/2+20$	296	7,646	2,353	5601,3	4463,8	21,2
К-2(2)	100	20,2	20,5	16,9	3,0	$h/2+20$	296	7,646	2,353	5601,3	4463,8	21,8
К-3	100	20,5	20,4	16,8	3,0	3,5	333	9,788	2,353	5208,7	4463,8	115
К-3(2)	100	20,5	20,5	16,8	3,0	3,5	333	9,788	2,353	5208,7	4463,8	112,5
К-4	100	20	20	16,0	3,0	$h/2$	393,1	9,788	2,308	5208,7	4462,3	58,5
К-4(2)	100	20,3	20	16,4	3,0	$h/2$	393,1	9,788	2,308	5208,7	4462,3	60,5

Величины в разработанном алгоритме усовершенствованной методики расчёта прочности [5] построены на основании зависимостей от относительных деформаций бетона, заданных в виде ранжированной переменной, что позволяет выявить зависимости напряжений в бетоне от усилия в колонне, определяя каждую величину в момент достижения относительными деформациями определённых значений. Напряжения определены при значениях усилия в колонне, равных 20, 40, 60 и 80% от N_{max} (табл. 2 столбец 2–5). При этом N_{max} – максимальная нагрузка, которую выдержал образец при испытании.

Таблица 2 – Напряжения сжатия в бетоне при некоторых значениях усилия в

колонне

Напряжения Шифр образца	$\frac{\sigma(\varepsilon_b), \text{кгс}/\text{см}^2}{\sigma(\varepsilon_{b, np}), \text{кгс}/\text{см}^2}$ при N				отношение $\frac{\sigma(\varepsilon_b)}{\sigma(\varepsilon_{b, np})}$ при N			
	20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
К-1	$\frac{90.271}{111.604}$	$\frac{162.613}{181.431}$	$\frac{214.117}{218.070}$	$\frac{238.478}{238.525}$	0.809	0.896	0.982	1.000
К-1(2)	$\frac{91.187}{103.597}$	$\frac{164.252}{178.014}$	$\frac{216.146}{225.415}$	$\frac{240.442}{240.918}$	0.880	0.923	0.959	0.998
К-2	$\frac{117.862}{134.406}$	$\frac{211.185}{230.113}$	$\frac{274.168}{282.055}$	$\frac{295.693}{295.729}$	0.877	0.918	0.972	1.000
К-2(2)	$\frac{118.596}{131.187}$	$\frac{212.253}{224.868}$	$\frac{275.068}{280.829}$	$\frac{295.437}{295.364}$	0.904	0.944	0.979	1.000
К-3	$\frac{102.768}{129.453}$	$\frac{197.567}{218.150}$	$\frac{278.870}{278.385}$	$\frac{330.960}{317.069}$	0.794	0.906	1.002	1.044
К-3(2)	$\frac{100.181}{111.593}$	$\frac{192.820}{193.511}$	$\frac{273.178}{257.347}$	$\frac{328.172}{323.902}$	0.898	0.996	1.062	1.013
К-4	$\frac{126.822}{108.442}$	$\frac{238.881}{214.013}$	$\frac{328.828}{299.395}$	$\frac{385.508}{367.283}$	1.169	1.116	1.098	1.050
К-4(2)	$\frac{128.382}{136.159}$	$\frac{241.435}{252.325}$	$\frac{331.679}{333.572}$	$\frac{387.160}{381.437}$	0.943	0.957	0.994	1.015
средние значения отношений					0.909	0.957	1.006	1.015

В столбцах 6–9 табл. 2 указаны отношения напряжений, определённых по программе $\sigma(\varepsilon_b)$, к тем, что найдены по показаниям тензометрических датчиков сопротивления $\sigma(\varepsilon_{b, np})$, при различных значениях результирующего усилия в колонне N .

Для визуализации результатов построены диаграммы (рис. 4), показывающие хорошую сходимость результатов.

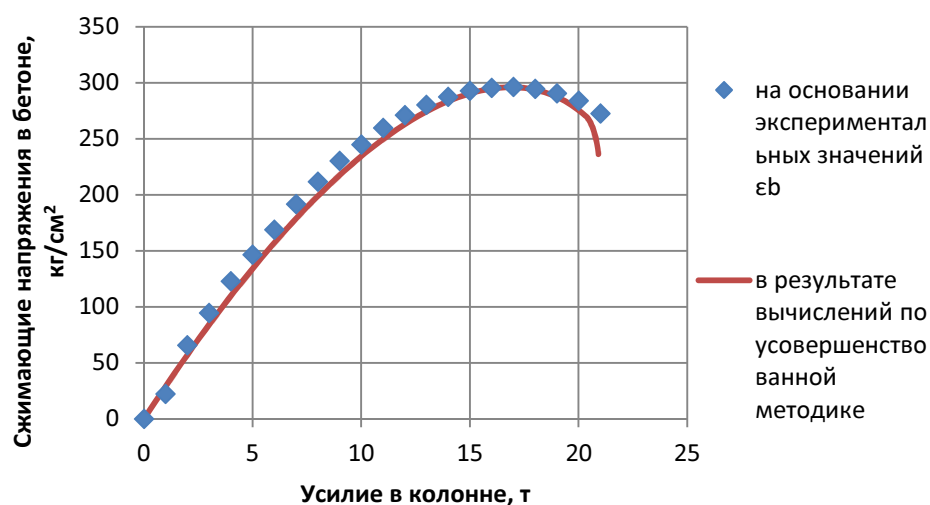


Рис. 4. Сжимающие напряжения в бетоне в зависимости от величины действующего усилия образца К-2(2).

Заключение

На основании данных, представленных в табл. 2 можно сделать вывод о возрастании сходимости результатов при увеличении результирующего усилия в колонне. Наибольшее совпадение достигается при усилии в колонне 60% от максимальной величины, при этом среднее значение $\frac{\sigma(\varepsilon_b)}{\sigma(\varepsilon_{b,np})}$ по 8 экспериментальным образцам равно 1.006, что говорит о практически полном совпадении. Меньше всего результаты «бьются» при усилиях в 20% от N_{max} , а среднее значение отношения напряжений при этом равно 0.909.

Таким образом, усовершенствованная методика расчёта прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной диаграммы деформирования бетона позволяет определять не только прочность сечения элементов в любой момент загрузки, но и определять сжимающие напряжения в бетоне по высоте нормального сечения, а также устанавливать зависимости напряжений в бетоне от усилия в колонне.

Список литературы

1. Бондаренко В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
2. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М. : Стройиздат, 1996. – 411 с.
3. Козлов А.В. Расчет нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с учетом физически обоснованной диаграммы деформирования бетона // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы Региональной 60 научно-технической конференции. – Самара : СамГАСА, 2003.
4. Крусъ Ю.А., Крусъ А.Ю. Графоаналитическое построение и математическое описание диаграммы деформирования бетона // Известия вузов. Строительство. – 2007. – № 11. – С. 104–110.
5. Мордовский С.С. Расчёт внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением диаграмм деформирования // Бетон и железобетон. – 2012. – № 2. – С. 11-15.
6. Мурашкин Г.В. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы напряженно-деформированного состояния / Г.В. Мурашкин, В.Г. Мурашкин // Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 10. – С. 4–6.
7. Пищулёв А.А. Изгибаемые железобетонные элементы с неоднородными прочностными характеристиками бетона сжатой зоны // Бетон и железобетон. – 2010. – № 2. – С. 23-26.

Рецензенты

Мурашкин Г.В., д.т.н., профессор, член-корр. РААСН, зав. кафедрой «Железобетонных и каменных конструкций», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», г. Самара.

Анпилов С.М., д.т.н., профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», г. Самара.