

УДК 691.327:620.191.33

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННОМУ СЖАТИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ С ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРОЙ

Н.В. Заслуженная, В.Н. Зиновьев, В.Ф. Захаров

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,
Россия, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1
E-mail: n.zasluzhennaya@yandex.ru

По результатам экспериментальных данных вычислены напряжения в бетоне как по упругой схеме, так и с учетом развития неупругих деформаций. По экспериментальным и теоретическим данным напряженно-деформированного состояния бетона на каждом этапе нагружения получены кривые зависимости σ - ϵ .

составные железобетонные стержни, внецентренное сжатие, кратковременное нагружение, высокопрочная арматура

Цель настоящей работы – экспериментальное и теоретическое исследование влияния ползучести на деформации внецентренно сжатых составных железобетонных стержней, армированных высокопрочной арматурой класса А-800. Для этого были изготовлены и испытаны при кратковременном действии сжимающей силы четыре образца колонн прямоугольного сечения размерами 120×100 мм². Каждый образец представлял собой стержень, составленный из двух элементов: «сборного» (ранее уложенного) и «монолитного» бетонов, соединившихся вдоль стороны шириной 120 мм. Продольной арматурой каждого элемента являлись два стержня ν 12 мм класса А-800, поперечной – хомуты из проволоки ν 4 мм класса В500 с шагом 100 мм. Гибкость всех стержней при длине 1500 мм и размерах поперечного сечения 120×100 мм² составляла 52,5.

Компоновка сечений составных стержней и схемы приложения нагрузки показаны на рис. 1.

Бетонирование элементов составных стержней проводилось с разрывом во времени, равном 135 сут. Спустя приблизительно 7 сут после соединения элементов из «сборного» и «монолитного» бетонов проводились испытания на кратковременное внецентренное сжатие до разрушения. Нагрузка на образцы колонн прикладывалась с начальным эксцентриситетом e_0/h , равным 0,25. Во время испытаний на каждом этапе нагружения при помощи электротензометрической аппаратуры, индикаторов часового типа и прогибомеров Максимова фиксировались значения продольных деформаций высокопрочной арматуры и прогибов средних сечений образцов колонн.

С помощью диаграммы растяжения стали указанного класса вычислялись напряжения в продольной арматуре, после чего по специально разработанной методике определялись усилия, воспринимаемые бетоном, а также напряжения в

нем с учетом как упругих, так и неупругих свойств в зависимости от уровня сжатия.

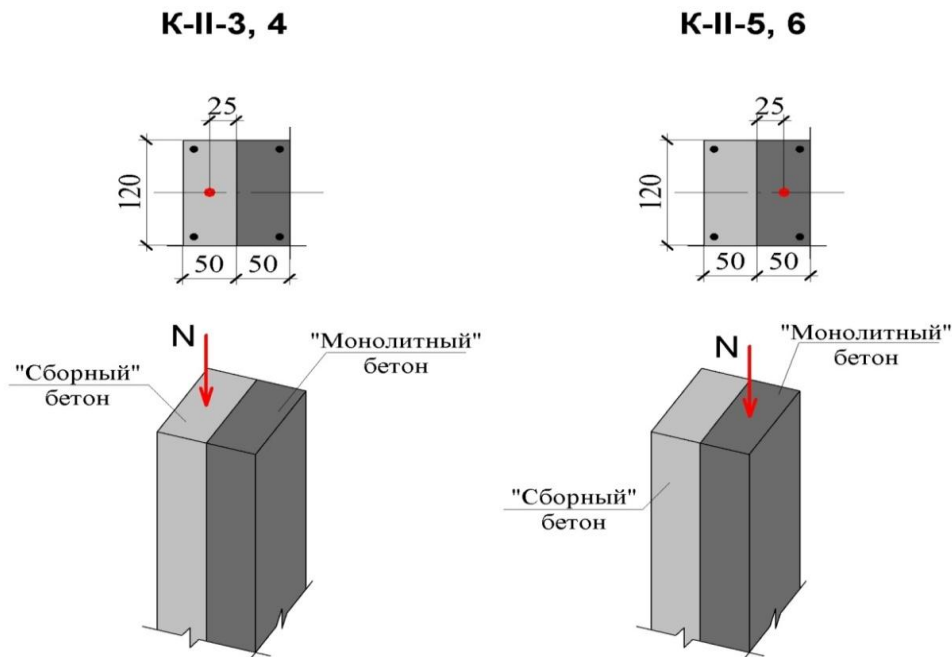


Рис. 1. Схема поперечных сечений образцов серии К-II и приложения нагрузки
Fig. 1. Scheme of cross-sections of samples of series K-II and load application

Значения разрушающих усилий испытанных железобетонных стержней приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты кратковременных испытаний колонн
Table 1. Results of short-term tests of columns

Шифр образца	Гибкость λ_c	Относительный эксцентриситет e_0/h	Разрушающее усилие $N_{sh,u}$, кН
К-II-3	52,5	0,25	172
К-II-4			197
К-II-5			184,5
К-II-6			166

В табл. 2 указаны показатели прочности и деформативных свойств, использованных при испытаниях бетонов.

Таблица 2. Прочностные и деформативные характеристики бетона
Table 2. Strength and deformation characteristics of concrete

Возраст бетона τ_1 , сут	Кубиковая прочность R , МПа	Призменная прочность R_b , МПа	Модуль упругости E_b , МПа
145 («сборный»)	17,1	12,9	$2,45 \times 10^4$
8 («монолитный»)	12,3	10,1	$2,17 \times 10^4$

В образцах К-II-3 и К-II-4 точки приложения продольных сил находились в «сборном» бетоне, в то время как в образцах К-II-5 и серии К-II-6 – в «монолитном». При таком направлении эксцентриситетов основное сопротивление сжатию оказывает соответственно «сборный» бетон – в первом случае и «монолитный» – во втором. Степень участия в сопротивлении внешней нагрузке сопряженных с ними бетонов была относительно невелика. Выбранная компоновка сечений и направление эксцентриситетов не могли не отразиться на особенностях деформирования бетонов, составлявших сечения колонн (см. рис.1). Эти особенности отслеживались на каждом этапе нагружения. Об их наличии свидетельствуют данные измерений продольных деформаций арматуры и связанных с ней «сборного» и «монолитного» бетонов.

Как отмечалось ранее, для выбранных уровней нагружения по опытным значениям деформаций арматуры вычислялись значения напряжений и усилий, воспринимаемых высокопрочной сталью. Величины внутренних усилий в бетоне вычислялись как разность между значениями внешних сил и сил, воспринимаемых арматурой на каждом этапе нагружения. В арматурных стержнях, наиболее удаленных от точки приложения сжимающей нагрузки, развивались усилия растяжения. По данным наблюдений, приведенным в табл. 3, вычислены напряжения в бетоне. Данные вычисления проводились как по упругой схеме вплоть до получения их значений, близких к пределу прочности R_b , так и с учетом развития неупругих деформаций в процессе дальнейшего нагружения вплоть до разрушения образцов. Этой стадии соответствовал процесс падения напряжений в бетоне до уровня, близкого к $0,3R_b$. Динамика развития этих взаимосвязанных параметров напряженно-деформированного состояния бетона видна на рис. 2. Приведенные здесь кривые представляют собой диаграммы деформирования бетона. В настоящее время они являются основой для расчета прочности железобетонных элементов как при сжатии, так и изгибе (см. СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»). Вид данных диаграмм однозначно зависит от физико-механических свойств применяемых бетонов. Поэтому при расчетах вряд ли можно обойтись некой усредненной кривой, как рекомендует это СНиП 52-01-2003. Диаграммы деформирования «сборного» и «монолитного» бетонов, как показывают проведенные исследования, существенно различаются между собой, что не может не отразиться на результатах расчетов, в которых они применяются.

Испытания колонн продемонстрировали высокую эффективность применения высокопрочной арматуры в сжатых элементах. Это позволяет существенно повысить их несущую способность по сравнению с аналогичными колоннами, но с обычной арматурой не выше класса А400.

Совместная работа сжатой арматуры с окружающим бетоном вплоть до разрушения сжатого элемента обеспечивает развитие в высокопрочной арматуре напряжений сжатия, которые существенно больше рекомендуемых СНиП 52-102-2004 «Предварительно напряженные железобетонные конструкции» в качестве расчетных R_{sc} . Эта разница составляет два раза и более. Очевидно, что рекомендации новых СНиП, как и ранее действовавших, не позволяют в полной мере использовать механические характеристики высокопрочных сталей.

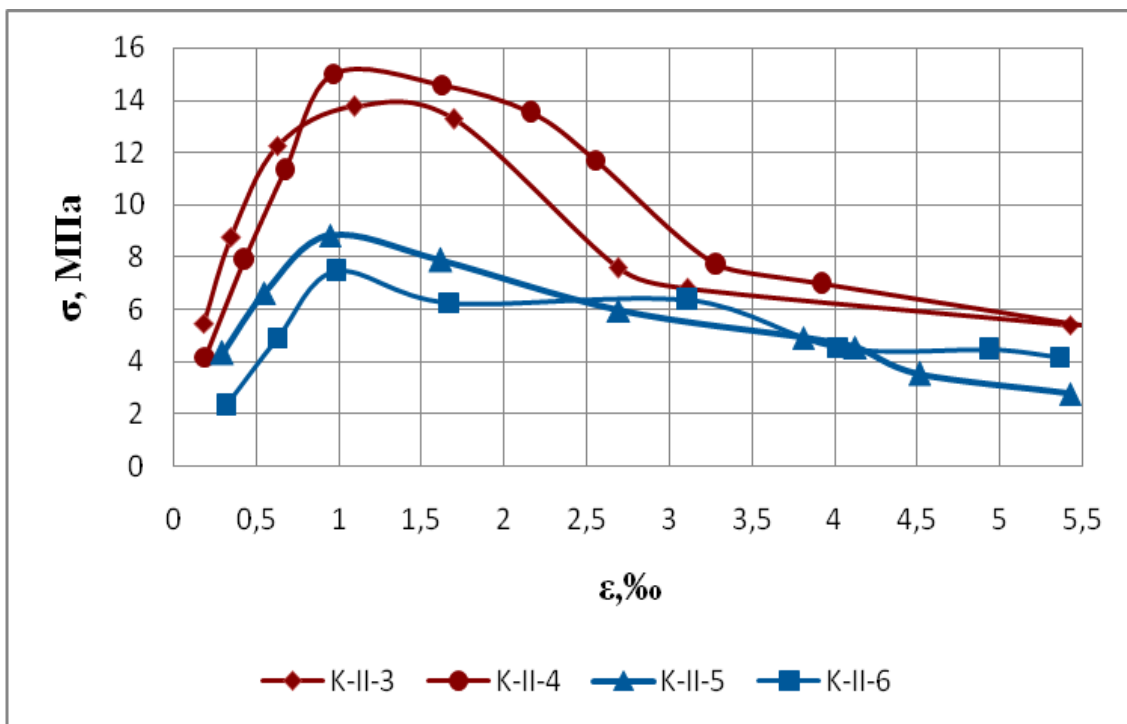


Рис. 2. Диаграммы «напряжение - деформация» составных железобетонных стержней при кратковременном нагружении с учетом прогибов

Fig. 2. «Stress – deformation» diagrams of composite reinforced concrete bars with short-time loading, taking into account the deflection

В нашем случае проявившиеся деформации кратковременной ползучести бетона способствовали более полному включению в работу сжатой арматуры, что повысило несущую способность образцов. Напряжения в арматуре при разрушении достигали значений 856,9...1014,7 МПа.

Испытания показали, что предельные деформации бетона с элементами высокопрочной арматуры при внецентренном кратковременном сжатии достигали (5...8) ‰. В процессе нагружения элементов при достижении напряжений в бетоне, когда начинают заметно развиваться неупругие деформации, происходит перераспределение усилий с бетона на упруго работающую арматуру. Как видно из диаграммы напряжений, в бетоне (рис. 2) начало заметного перераспределения усилий наступает, как правило, при напряжениях, близких к R_b : в «сборном» бетоне $R_b = 12,9$ МПа; в «монолитном» – $R_b = 10,1$ МПа, и сопровождается уменьшением напряжений в бетоне с увеличением деформаций. Характеристики бетонов приведены в табл. 3.

Несмотря на то, что рост деформаций в бетоне сопровождается уменьшением напряжений в нем, более интенсивное включение в процесс деформирования высокопрочной арматуры обеспечивает заметный положительный эффект увеличения несущей способности колонны в целом.

Таблица 3. Значения напряжений в арматуре на всех этапах нагружения
Table 3. Tension values in reinforcement at all stages of loading

Шифр образца	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁
	Деформации в наиболее сжатой арматуре $\epsilon'_{s\text{ опт}}$, %										
	Напряжения в наиболее сжатой арматуре σ'_{s} , МПа										
	Деформации в наиболее растянутой арматуре $\epsilon'_{s\text{ опт}}$, %										
	Напряжения в наиболее растянутой арматуре σ'_{s} , МПа										
II-3	37	61,5	92	123	154	166	166	172	172	-	-
	0,019	0,035	0,062	0,109	0,169	0,269	0,31	0,34	0,542	-	-
	35,98	66,54	119,9	209,3	326	502,8	569,3	613,9	856,9	-	-
	0,001	0,0006	-0,0009	-0,011	-0,037	-0,077	-0,091	-0,109	-0,191	-	-
	1,1	2,22	-1,69	-21,57	-71,69	-147,9	-174,4	-210,3	-367,2	-	-
II-4	31	61,5	92	123	154	172	184,5	184,5	191	197	197
	0,019	0,043	0,067	0,096	0,162	0,216	0,255	0,328	0,391	0,424	0,806
	36,3	82,72	129,1	184,7	311,3	411,6	480,1	596,8	685,9	727,3	1014,7
	0,0005	-0,0003	-0,01	-0,01	-0,027	-0,037	-0,062	-0,086	-0,098	-0,122	-0,147
	0,87	-0,53	-19,3	-19,3	-52,9	-70,4	-119,2	-166,5	-189,1	-234,95	-282,1
II-5	37	61,5	92,3	123	154	166	166	178	178	184,5	-
	0,029	0,054	0,094	0,162	0,269	0,381	0,412	0,451	0,542	0,647	-
	55,85	104,8	181,2	311,0	503,0	671,6	712,8	760,7	857,0	941,5	-
	0,001	-0,001	-0,006	-0,025	-0,063	-0,095	-0,107	-0,078	-0,108	-	-
	2,0	-1,92	-11,75	-48,28	-120,7	-183,6	-206,1	-150,2	-208,0	-	-
II-6	31	61,5	92	123	154	154	160	160	166	-	-
	0,031	0,063	0,098	0,167	0,311	0,402	0,493	0,536	0,658	-	-
	60,57	120,4	189,0	321,4	567,0	700,2	807,5	850,9	948,3	-	-
	-0,008	-0,011	-0,018	-0,047	-0,107	-0,128	-0,168	-0,184	-	-	-
	-14,45	-22,05	-34,0	-90,1	-206,7	-247,0	-323,5	-352,9	-	-	-

Повышение значений предельных деформаций бетона имеет место только при наличии высокопрочной арматуры. Именно она воспринимает приращения внешней нагрузки на нисходящей ветви диаграммы деформирования бетона, что невозможно при использовании в сжатых стержнях арматуры класса не выше А400.

Таблица 4. Опытные и теоретические значения прогибов в образцах колонн
Table 4. Experimental and theoretical values of deflections in samples of columns

Шифр образца	КП-3		КП-4		КП-5		КП-6	
Этап нагружения	Опытные и теоретические значения прогибов f , см							
	$f_{\text{опт}}$	$f_{\text{теор}}$	$f_{\text{опт}}$	$f_{\text{теор}}$	$f_{\text{опт}}$	$f_{\text{теор}}$	$f_{\text{опт}}$	$f_{\text{теор}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N ₁	0	0,068	0,085	0,068	0,12	0,106	0,03	0,084
N ₂	0,095	0,123	0,019	0,15	0,24	0,188	0,13	0,18
N ₃	0,21	0,216	0,28	0,2	0,43	0,309	0,26	0,283
N ₄	0,48	0,343	0,395	0,3	0,77	0,48	0,42	0,422
N ₅	0,84	0,464	0,64	0,47	1,36	0,725	0,883	0,715

Окончание табл. 4
Continued of the tabl. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
N ₆	1,4	0,675	0,94	0,63	1,76	1,072	1,09	0,963
N ₉	-	-	1,67	1,38	-	-	-	-
N ₁₀	-	-	1,82	1,06	-	-	-	-
N ₁₁	-	-	-	-	-	-	-	-

В табл. 4 приведены опытные, по показаниям прогибомера, и теоретические, вычисленные по показаниям тензодатчиков, значения прогибов в образцах на всех этапах нагружения. Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что деформации ползучести и деформации арматуры в «монолитном» бетоне значительно выше, чем в «сборном». Если сравнивать деформации образцов при внецентренном кратковременном сжатии с аналогичными образцами при однородном сжатии, то в данном случае (при внецентренном кратковременном нагружении) напряжения и деформации достигают больших значений. Значения прогибов были использованы при вычислении напряжений в бетоне, приведенных в диаграммах на рис. 2.

Анализ данных исследований позволяет сделать вывод, что использование высокопрочной ненапрягаемой арматуры в железобетонных стержневых конструкциях приводит к увеличению несущей способности элементов. Эффект ее использования, характеризуемый отношением развивающихся напряжений к нормируемому пределу прочности R_{sn} , близок к 100%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Узунова, Л.В. Экспериментальное исследование кратковременного сопротивления сжатию составных железобетонных стержней / Л.В. Узунова, В.Ф. Захаров // Эффективные строительные конструкции. Теория и практика: материалы конференции (нояб.). – Пенза, 2005. – С. 150.

2. Чистяков, В.А. Несущая способность сжатых железобетонных колонн с высокопрочной ненапрягаемой арматурой / В.А. Чистяков, В.В. Сурин // Прочностные и деформационные характеристики элементов бетонных и железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1981. – С. 70-80.

THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF SHORT-TERM RESISTANCE OF COMPOSITE ECCENTRICALLY LOADED REINFORCED CONCRETE BARS WITH HIGH-STRENGTH REINFORCEMENT

N.V. Zasluzhennaya, V.N. Zinoviev, V.F. Zakharov

The experimental research results of deforming and short-carrying capacity of concrete compound bars with high-tensile reinforcement are given. The effect of short-term loading on load-carrying capacity of columns under eccentric compression is investigated.

composite reinforced concrete bars, eccentrically loaded, short-term resistance, high-strength reinforcement