

УДК 624.012.45

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН НА СЖАТИЕ С КРУЧЕНИЕМ

© 2013 Р.В. Груздев

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Поступила в редакцию 21.11.2013

В статье представлены результаты испытаний железобетонных колонн на сжатие с кручением как часть исследований работы железобетонных элементов на внецентренное сжатие с кручением. Проведены испытания моделей колонн квадратного сечения. Выполнен анализ двух выявленных схем разрушения.

Ключевые слова: *сжатие с кручением, железобетонная колонна, спиральные трещины, винтовые трещины, разрушение по бетону*

Исследования работы железобетонных конструкций на кручение имеют более чем вековую историю. На сегодняшний день наиболее изученным вопросом работы железобетонных конструкций при наличии крутящего момента является изгиб с кручением, а также изгиб с кручением и поперечной силой. Такие сочетания усилий характерны для балок. Балки, как правило, армируются так, что их разрушение носит пластический характер. Соответственно, почти все проводившиеся ранее исследования направлены на изучение этого расчетного случая. Теория расчета железобетонных конструкций на изгиб с кручением при пластическом разрушении, основателями которой были А. А. Гвоздев и Н. Н. Лессиг, продолжает уточняться и совершенствоваться до сих пор. Случай расчета балок на изгиб с кручением при разрушении по бетону изучался очень мало, поскольку для балок это не очень актуально.

По-другому обстоит дело с конструкциями колонн. В сжатых колоннах (при наличии крутящего момента или без него) разрушение по бетону – один из основных расчетных случаев. Работа железобетонных конструкций на сжатие с кручением вообще гораздо менее изучена, чем на кручение с изгибом. Для изучения прочности сжато-скручиваемых железобетонных элементов при малых эксцентриситетах приложения продольной силы, когда происходит хрупкое разрушение сжатого бетона, запланированы экспериментальные исследования. Однако предварительно нужно выбрать такое соотношение

продольной силы и крутящего момента, при котором разрушение будет иметь хрупкий характер, как с эксцентриситетом, так и без него, поскольку на характер разрушения элемента влияет не только эксцентриситет продольной силы, но и крутящий момент. С этой целью в лаборатории ЖБК СГАСУ были проведены испытания моделей железобетонных колонн на центральное сжатие с кручением.

Область прочности сжато-скручиваемых элементов в общем случае ограничивается двумя кривыми (рис. 1). Первая кривая (1) соответствует пределу прочности при разрушении от преобладающего действия сжимающей силы, вторая кривая (2) – пределу прочности при преобладании крутящего момента. Точка перехода между ними у разных исследователей соответствует разным значениям соотношения продольной силы и крутящего момента  $N/T$ . В исследованиях А. Бишара и Й.-Ч. Пейр [3] это значение равно  $N/T=43,7 \text{ м}^{-1}$ , в исследованиях В. О. Борцова [1] оно составляет около  $N/T=70 \text{ м}^{-1}$ . Это значение зависит от соотношения механических свойств продольной и поперечной арматуры (с учетом ее расположения в элементе), а также бетонного сечения (с учетом его формы).

На центральное сжатие с кручением испытаны три серии образцов одинаковой конструкции. В каждой серии было по два образца. Серии различались между собой соотношением продольной силы и крутящего момента. Серия I –  $N/T=120 \text{ м}^{-1}$ , серия IV –  $N/T=90 \text{ м}^{-1}$ , серия V –  $N/T=49,2 \text{ м}^{-1}$ . Образцы имели сечение  $150 \times 150$  мм и длину 1500 мм. Продольная арматура – четыре стержня класса А400 диаметром 10 мм, поперечная – замкнутые хомуты из проволоки

Груздев Роман Вячеславович, ассистент кафедры строительных конструкций. E-mail: gbk-sgasu@yandex.ru

класса Вр-I диаметром 5 мм, расположенные с шагом 100 мм (рис. 2). Прочностные характеристики арматурных сталей представлены в табл. 1. Средняя кубиковая прочность бетона образцов на сжатие составила 49 МПа, за исключением образца IV-2 (66 МПа).

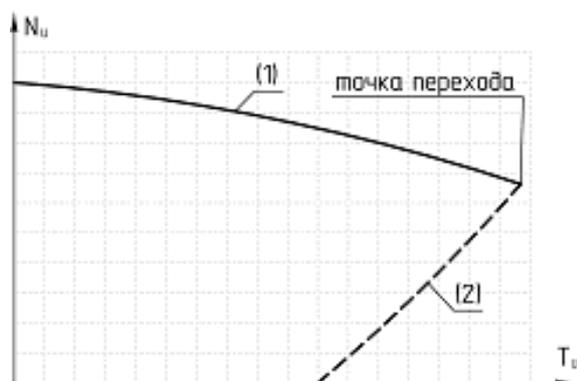


Рис. 1. Область прочности железобетонного элемента, подверженного сжатию с кручением

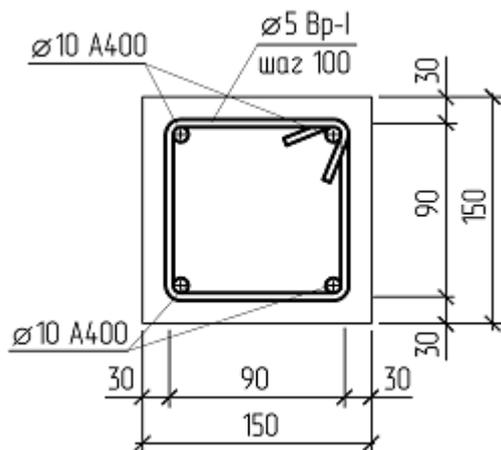


Рис. 2. Конструкция опытного образца (поперечный разрез)

Таблица 1. Характеристики арматурных сталей

Армирование	A400	Вр-I
предел текучести $\sigma_T$ ( $\sigma_{0.2}$ ), МПа	475	550
предел прочности $\sigma_B$ , МПа	706	612
относительное удлинение $\delta$ , %	12	2,05
модуль деформаций $E_s$ , МПа	$1,9 \cdot 10^5$	$1,65 \cdot 10^5$

Для испытаний моделей колонн использовалась специальная установка, которая позволяет прикладывать к испытываемому образцу продольное сжимающее усилие и крутящий момент независимо друг от друга. В результате испытаний выявлены две характерные схемы разрушения.

Первая схема – с хрупким раздроблением бетона в наклонном пространственном сечении (без предварительного раскрытия трещин), вторая схема – с образованием и раскрытием спиральных трещин. Образцы серии I разрушались по первой схеме. Видимых трещин не появлялось вплоть до момента разрушения. Разрушение образцов происходило внезапно и хрупко. Угол наклона поверхности разрушения к продольной оси образца составил от  $0^\circ$  до  $35^\circ$ . Образцы серии V разрушались по второй схеме. Разрушение образца начиналось с образования и раскрытия спиральных трещин на последнем этапе загрузки. При образовании трещины сразу получали большое раскрытие (около 1 мм). Одновременно с этим воспринимаемый колонной крутящий момент резко падал, в тоже время несколько снижалось воспринимаемое продольное усилие. При попытке поддержания величины крутящего момента (путем увеличения угла закручивания) трещины еще более раскрывались и происходило быстрое, но плавное падение воспринимаемого образцом продольного сжимающего усилия. Угол наклона трещин к продольной оси образца составил от  $25^\circ$  до  $36^\circ$ .

Образцы серии IV разрушались по разным схемам. Образец IV-1 разрушился по второй схеме с образованием трещин непосредственно перед разрушением. Угол наклона трещин к продольной оси составил от  $26^\circ$  до  $40^\circ$ . Образец IV-2 из бетона более высокой прочности разрушился по первой схеме. Во всех образцах прослеживается влияние случайного эксцентриситета. Процессы разрушения образцов серий V и IV по второй схеме в целом сходны, но характер разрушения образца серии IV был более хрупким, падение воспринимаемого образцом продольного усилия при разрушении было более быстрым.

Первая схема характерна для преобладающего действия продольной силы, вторая схема – для преобладающего действия крутящего момента.



а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Развертка сторон испытанных образцов: а – образец I-1; б – образец I-2; в – образец IV-1; г – образец IV-2.

Пограничное соотношение силовых факторов (продольной силы и крутящего момента) между двумя схемами разрушений еще предстоит уточнить, но оно явно отличается от значений в [1, 3]. Кроме того, оно зависит от класса бетона (при одинаковом армировании). Развертки сторон испытанных образцов серий I и IV представлены на рис. 3. Результаты испытаний образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний образцов

Образец	Относительные деформации, $\epsilon_{0D} \cdot 10^5$			Напряжения в арматуре, МПа		Угол закручив. градус/м	Разрушающие усилия		Схема разрушения	Угол наклона поверхности разрушения, градус
	Бетон		Арматура	А400	Вр-I		$N_u$ , тс	$T_u$ , кгс·м		
	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	А400							
I-1	+90	-165	+75	-313,5	+123,8	0,73	76	630	I	0...30
I-2	+125	-195	+90	-342	+148,5	0,93	75	625	I	0...23,5
IV-1	+135	-125	+75	-161,5	+123,8	0,86	60	670	II	26...40
IV-2	+80	-150	+50	-266	+82,5	0,94	74	820	I	0...25
V-1	+75	-100	+11	-76	+18,2	0,62	27	549	II	28...36
V-2	+40	-55	+15	-66,5	+24,8	0,44	26	528	II	25...34

В табл. 2 представлены осредненные деформации, определенные по показаниям тензодатчиков на этапе загрузки, предшествовавшем разрушению. Полученные значения деформаций арматуры, главных деформаций бетона в целом согласуются с характером изменения несущей способности образцов и видом схемы разрушения. Для первой схемы разрушения (образцы серии I и IV-2) главные сжимающие

деформации бетона в стадии разрушения достигают предельных значений, и происходит хрупкое раздробление сжатого бетона. Для второй схемы разрушения (образцы серии V и IV-1) предельных значений достигают только главные растягивающие деформации бетона и происходит образование и раскрытие спиральных трещин. Растягивающие напряжения в поперечной арматуре, на этапе загрузки предшествующем

разрушению, далеки от предела текучести. Резкий переход образца из стадии работы без трещин в стадию разрушения (через практически мгновенное образование и чрезмерное раскрытие трещин с одновременным резким падением воспринимаемого крутящего момента), возможно, объясняется тем, что при образовании спиральных трещин происходит расслоение и потеря устойчивости сжатых бетонных полос. При этом образец разрушается, а растягивающие напряжения в поперечной арматуре могут не достигать предела текучести. В продольной арматуре напряжения остаются сжимающими и, очевидно, значения предела текучести не достигают.

После образования спиральных трещин образец сразу теряет несущую способность на кручение, но еще воспринимает продольное сжимающее усилие. Эта картина согласуется с расчетной схемой железобетонного элемента квадратного сечения на сжатие с кручением (при преобладании крутящего момента), принятой в [2]. Согласно данной схеме, бетонное сечение образца разделяется на две зоны: центральное ядро, воспринимающее, в основном, сжимающее усилие и приконтурную зону, воспринимающую,

в основном, крутящий момент. После образования трещин приконтурная зона разрушается, а внутреннее ядро продолжает воспринимать сжимающую силу, (если это ядро не разрушилось проникающими в его глубь трещинами). Если при этом не поддерживать воспринимаемый образцом крутящий момент путем увеличения угла закручивания, продолжая нагружать колонну только сжимающей силой, то воспринимаемое продольное усилие можно значительно увеличить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Борцов, В.О.* Особенности работы колонн в зданиях со скрытым каркасом. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Самара, 1999. 113 с.
2. *Камолов, Х.Ш.* Прочность и жесткость железобетонных призматических стержней, подверженных сжатию с кручением. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – М., 1998. 215 с.
3. *Bishara, A.* Reinforced concrete rectangular columns in torsion / *A. Bishara, J.-C. Peir* // Journal of the structural division. ASCE № ST12, Proc. Paper. 6305, Dec. 1968. P. 2913-2933.

## RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MODELS OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS ON COMPRESSION AND TORSION

© 2013 R.V. Gruzdev

Samara State Architectural and Building University

The article presents the results of tests of reinforced concrete columns in compression and torsion as part of research of work of reinforced concrete elements of eccentric compression and torsion. Tests of model columns of square cross section. The analysis identified two patterns of destruction.

Key words: *compression and torsion, reinforced concrete column, spiral crack, concrete failure*