ОСОБЕННОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ СЛОЖНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ – КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

ДЕМЬЯНОВ А.И.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация. Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований и дан анализ полученных опытных данных об особенностях трещинообразования и раскрытия трещин в опытных конструкциях балок сплошного и полого сечений из высокопрочного железобетона при сложном напряженном состоянии – кручении с изгибом. Установлено, что при количественно сопоставимых отношениях крутящего и изгибающего моментов в рассматриваемых конструкциях в зоне кручения с изгибом возможно образование одной или нескольких пространственных трещин. Полученные опытные значения ширины раскрытия трещин для балок сплошного и полого сечения существенно отличаются между собой. Максимальное раскрытие прогрессирующих трещин, по которым происходило разрушение опытных конструкций наблюдалось не по оси растянутой арматуры, а на расстоянии порядка двух диаметров от этой оси. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют выполнить проверку и сопоставительный анализ расчетных моделей предложенных для расчета трещиностойкости стержневых железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

Ключевые слова: железобетон, кручение с изгибом, трещиностойкость, деформации, прочность, сплошное и полое сечение.

CRACK FORMATION IN HIGH-STRENGTH REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AT COMPLEX RESISTANCE - TORSION WITH BENDING

DEMYANOV A.I.

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract. The paper presents experimental results and an analysis on the features of crack formation and crack opening in beams of solid and hollow cross sections made of high-strength reinforced concrete at a complex stress state - torsion with bending. It has been established that one or more spatial cracks can form at quantitatively comparable ratios of torque and bending moments in the considered structures in the zone of torsion with bending. The obtained experimental values of the crack opening width for beams of solid and hollow sections significantly differ from each other. The maximum opening of progressing cracks along which the destruction of the experimental structures occurred was observed not along the axis of the tensile reinforcement, but at a distance of about two diameters from this axis. The obtained results of experimental studies make it possible verification and comparative analysis of the calculation models proposed for calculating the crack resistance of rod reinforced concrete structures under torsion with bending.

Keywords: reinforced concrete, bending with torsion, crack resistance, deformation, strength, solid and hollow section.

Введение

Расчет железобетонных конструкций при сложном сопротивлении – кручении с изгибом остается одним из малоисследованных направлений современной теории железобетона. Известные результаты теоретических и экспериментальных исследований носят фрагментарный характер и далеко не отражают все важные особенности деформирования, трещинообразования и разрушения железобетонных конструкций при таком напряженном состоянии, в особенности для новых видов бетона и фибробетона, широкого диапазона соотношений изгибающего и крутящего моментов, форм и структуры поперечных сечений, граничных условий и других факторов. В проведенных в последние годы экспериментальных исследованиях (см., например, работы [1-7]) рассматривались в большинстве случаев конструкции из традиционных бетонов и фиброжелезобетона относительно невысокой прочности. В связи с этим интерес представляет экспериментальное исследование железобетонных конструкций из высокопрочного бетона, причем не только прямоугольного, но и коробчатого, круглого и кольцевого сечений. Такие формы сечений все чаще используются при проектировании конструкций ядер жесткости высотных зданий и инженерных сооружений. Проведенные, с участием автора экспериментальные исследования железобетонных балок из высокопрочного железобетона при совместном действии изгибающего и крутящего моментов [8,9] позволили не только выявить ряд важных особенностей деформирования и разрушения таких конструкций для проверки предложенной для их расчета новой расчетной модели [10-12], но и установить принципиальные особенности трещинообразования и деформирования таких конструкций при рассматриваемом напряженном состоянии до и после образования трещин.

Особенности образования, развития и раскрытия трещин

Объектом исследований явились железобетонные конструкции балок прямоугольного, коробчатого, круглого и кольцевого поперечного сечения длиной 1200 мм с размерами поперечного сечения $b=h=200$ мм – для квадратных сечений балок и диаметром 200 мм – для круглого и кольцевого сечений. Кубиковая прочность бетона R к моменту испытаний (в возрасте 60 сут.) составляла 109,5 МПа – для балок квадратного и коробчатого сечений и 130 МПа – для балок круглого и кольцевого сечений.

Конструкции опытных балок прямоугольного и коробчатого сечения армировались сварными пространственными каркасами с продольными стержнями диаметром 6 мм из арматуры класса А - 240С (рис. 1 а, б). В качестве поперечной арматуры приняты стержни диаметром 6 мм Класса А-240С установленные с шагом 70 мм. Для обеспечения надежной передачи крутящего момента от нагрузочных устройств на конструкции балки в торцах опытных конструкций устанавливались металлические пластины толщиной 8 мм с отверстиями диаметром 14 мм под анкера в виде арматурных стержней диаметром 10 мм выпускаемые из конструкции.

Конструкции опытных балок круглого и кольцевого сечений армировались также пространственным каркасом, но круглого сечения (рис. 1 в, г). Торцовые пластины выполнялись в виде восьмигранника, вписанного в круглое поперечное сечение опытного образца с аналогичными анкерами в виде арматурных стержней диаметром 10 мм. До начала испытаний опытных конструкций по ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» и ГОСТ 12004-81 «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение (с Изменениями № 1, 2)» были определены физико-механические характеристики высокопрочного бетона и арматурной стали.

Испытание опытных конструкций проводилось с помощью пресса и специально сконструированных нагрузочных устройств. Каждый образец опытных конструкций испытывался в горизонтальном положении по перевернутой двухконсольной схеме, со свободным доступом к растянутой зоне конструкции (рис. 2).

Рисунок 1 – Конструкции опытных образцов балок: а – опалубочная схема для железобетонных конструкций квадратного и коробчатого сечений; б – то же, для конструкций круглого и кольцевого сечений; в, г, д, е – форма поперечного сечения, соответственно

Все балки испытаны с доведением до разрушения. Приложение нагрузки осуществлялось через специальную траверсу ступенями равными 0,1 от нагрузки трещинообразования с выдержкой на каждой ступени. При этом показания приборов (индикаторы прогибомеров) снималось на каждой ступени дважды до и после выдержки. Ширина раскрытия трещин измерялась с помощью микроскопа МПБ-3М. Фиксировалось развитие и раскрытие трещин на всех этапах нагрузки, отмечалось также появление новых трещин, развитие уже имевшихся. Измерялась ширина раскрытия трещин на боковых гранях в разных уровнях вдоль оси продольной и поперечной арматуры, а также на расстоянии двух диаметров от оси арматуры в характерных точках вдоль всего профиля трещин.

Результаты проведенных испытаний и проведенный анализ позволяют отметить следующее.

В конструкциях из высокопрочного бетона сплошного сечения образовывалась как правило лишь одна магистральная пространственная трещина, в которой по мере увеличения нагрузки увеличивалось ее раскрытие и по которой происходило разрушение конструкции (рис. 3 а).

Рисунок 2 - Схемы (а, б) и общий вид испытаний (в) конструкций балок из высокопрочного железобетона

¹⁾Шифр конструкции включает: БВ – балка высокопрочная; КВ – квадратное сечение; КО – круглое полое; I, II, III, IV – номер серии; 410-520 – значение эксцентриситета; (2) – номер опытного образца

Рисунок 3 - Схемы трещинообразования и ширина раскрытия трещин в опытных конструкциях балок прямоугольного сплошного (а) и круглого полого (б) поперечного сечения; 1, 2, 3, ...9 – оси рабочих арматурных стержней

№ этапа	а _{ср} , мм на уровне оси арматуры / на расстоянии 2-х диаметров от оси							
	1	2	3	4	5	6	7	8
IV				0,2/ 0,5	0,2/ 0,5	0,2/ 0,5		
V		0,4/ 0,9	0,15/ 0,39	0,8/ 1,5	0,8/ 1,5	0,7/ 1,7	0,8/ 1,4	0,3/ 0,7
VI	0,8/ 1,6	1,5/ 3,1	2,0/ 4,2	2,0/ 4,1	3,5/ 7,2	2,0/ 4,1	2,3/ 5,2	1,9/ 4,0
VII	1,0/ 2,0	3,0/ 5,9	3,0/ 6,1	4,0/ 8	4,0/ 2 6,9	4,0/ 7,9	3,0/ 5,8	3,0/ 6,2
VIII	1,5/ 2,9	4,5/ 9,2	4,9/ 9,9	9,0/ 17	9,2/ 20,1	9,3/ 18,0	4,6/ 9,2	4,0/ 8,2

№ этапа	а _{ср} , мм на уровне оси арматуры / на расстоянии 2-х диаметров от оси						
	1	2	3	4	5	6	7
VIII			0,2/ 0,42	0,18/ 0,4	0,2/ 0,5	0,2/ 0,38	0,1/ 0,2
IX			0,6/ 1,1	0,56/ 1,1	0,67/ 1,5	0,55/ 1,2	0,6/ 1,3
X	0,1/ 0,2	0,8/ 1,7	2,7/ 5,9	2,7/ 6,1	3,3/ 6,8	3,2/ 7,0	1,7/ 3,4
XI	0,4/ 0,9	1,1/ 2,1	3,2/ 6,5	3,3/ 6,5	4,0/ 8,2	3,9/ 8,1	4,5/ 9,1

Рисунок 4 – Графики прогибов (а) и углов поворота (б) опытной конструкции IV-BB-KO-410 (2), вычисленные по показаниям индикаторов И2 - И3

Рисунок 5 – Графики прогибов (а) и углов поворота (б) опытной конструкции III-BB-KOP-410-(2), вычисленные по показаниям индикаторов И2 - И3

В опытных конструкциях коробчатого и кольцевого сечений характерно образование нескольких трещин по траектории пространственной поверхности (рис. 3б). По мере увеличения нагрузки из этих трещин выделяется одна, с прогрессирующим ее раскрытием, по которой и происходит разрушение конструкции. Количественный анализ ширины раскрытия трещин в опытных конструкциях прямоугольного и круглого сплошного сечения, а также в №5 (85) 2019 (сентябрь-октябрь)

конструкциях коробчатого и кольцевого сечения показал (см. таблицы рис. 3), что ширина раскрытия трещин, измеренная вдоль осей 1, 2, 3 ... 9 рабочей арматуры в два и более раз меньше ширины раскрытия трещин в этом же направлении на удалении двух диаметров от этих осей.

Такие различия в ширине раскрытия трещин на уровне рабочей арматуры и на удалении двух диаметров от оси арматуры свидетельствует о деформации пространственной поверхности трещины вызванной реакцией в арматурных стержнях. Из этого следует, что традиционно используемая модель теории железобетона для расчета ширины раскрытия трещин, когда ширина раскрытия трещин определяется на уровне оси рабочей арматуры и требует корректировки, например, в рамках модели предложенной в работах [10-13]. Сказанное подтверждает количественный анализ и сопоставление значений ширины раскрытия трещин в конструкциях из высокопрочного железобетона сплошного сечения - первой и третьей серии, и полого сечения - второй и четвертой серии (см. рис. 3).

Уместно отметить, что деформативность конструкций из высокопрочных бетонов существенно меньше, чем конструкций из обычных бетонов, что подтверждается и существенно большим модулем деформации таких бетонов. Для испытанных конструкций модуль деформаций высокопрочного бетона класса 110 -130 составлял 4,6 – 4,8 МПа. Это качественно меняет характер трещинообразования в таких конструкциях, когда как уже отмечалось образуется одна или несколько пространственных трещин, в отличие от трещинообразования в конструкциях из обычного бетона – когда при рассматриваемом напряженном состоянии образуется целая сеть трещин в зоне совместного действия крутящего и изгибающего моментов (см., например, опыты [4,7]).

Специфика такого деформирования конструкции из высокопрочного бетона подтверждается и характером диаграмм «нагрузка-прогиб» и «нагрузка-угол поворота» (рис 4.).

Силовое сопротивление конструкции до образования трещин имеет характер близкий к линейному, а уровень нагрузки трещинообразования составлял 0,75-0,85 от разрушающей - в конструкциях сплошного сечения и 0,6-0,7 от разрушающей – в конструкциях коробчатого и кольцевого сечения (см. рис. 4 и рис. 5). Это свидетельствует о том, что стадия II работы железобетонных конструкций из высокопрочного бетона значительно короче, чем в конструкциях из обычных бетонов и, следовательно, критерии несущей способности конструкций из высокопрочного бетона требуют соответствующей корректировки. Анализируя полученные опытные диаграммы «нагрузка-прогиб» и «нагрузка-угол поворота» до уровня трещинообразования ($T_{cre} + M_{cre}$) происходит незначительно так, в опытных конструкциях сплошного квадратного и круглого сечения снижение начальной жесткости составляло - 20-24%, а в конструкциях коробчатого и кольцевого сечений – 35-40%. Образование пространственной трещины в опытных конструкциях балок вызывает резкий рост раскрытия трещин, деформации в арматуре в сечении с трещиной, нарастание прогибов и углов поворота. Из этого следует вывод о том, что в конструкциях из высокопрочного железобетона пластические деформации до образования трещин значительно меньше, чем в конструкциях из обычного железобетона. Образование практически единичной или прогрессирующей трещины вызывает резкий рост деформаций в растянутой арматуре и поперечных стержнях при незначительном увеличении нагрузки после образования трещин свидетельствует о необходимости корректировки традиционной модели расчета жесткости сечений с трещинами и соответственно параметров расчетной модели ψ_s и ψ_b .

Выводы

1. Приведенные результаты испытаний и анализ трещиностойкости и ширины раскрытия трещин в опытных конструкциях из высокопрочного железобетона позволили выявить особенности сопротивления таких конструкций при кручении с изгибом.

2. Экспериментально установлено, что в конструкциях из высокопрочного железобетона сплошного и полого сечений при кручении с изгибом образуется одна или несколько

трещин, развивающихся по пространственной поверхности. В случае образования нескольких трещин, в одной из них по мере увеличения нагрузки происходит прогрессирующее раскрытие по которой происходит затем разрушение.

3. Используемые для конструкции из обычного бетона расчетные модели по определению ширины раскрытия трещин при кручении с изгибом, в случае конструкций из высокопрочного бетона требует корректировки основных расчетных параметров теории железобетона, в их числе ψ_s , ψ_b и $l_{сгс}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов Вл. И., Сальников А.С. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 3(65). С. 24–32.
2. Salnikov A., Kolchunov Vl., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending // *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 725–726 (2015), pp 784–789.
3. Iakovenko I., Kolchunov Vl. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 3. Pp. 366–375.
4. Морозов В.И., Бахотский И.В. К расчету фиброжелезобетонных конструкций, подверженных совместному воздействию кручения с изгибом // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10408>.
5. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants // *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. No 4. Pp. 402–411.
6. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
7. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // *Жилищное строительство*. 2014. №10. С. 15-18.
8. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. №6. С. 32-43.
9. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. №15(1). С.51-61.
10. Колчунов В.И., Демьянов А.И. Неординарная задача о раскрытии трещин в железобетоне // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 4(88). С. 60–69. DOI: 10.18720/MCE.88.6.
11. Колчунов Вл.И., Демьянов А.И., Наумов Н.В. Теория "растворения" и "конденсации" физико-геометрических характеристик поперечного сечения произвольной формы при кручении стержней // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. №15(4), С.261-270.
12. Колчунов В.И., Колчунов Вл.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. №8. С.54-60.

REFERENCES

1. Kolchunov VL. I., Salnikov A. S. Eksperimental'nyye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom [Experimental studies of crack formation of reinforced concrete structures under torsion with bending]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 3 (65). Pp. 24-32.
2. Salnikov A., Kolchunov Vl., Yakovenko I. the computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 725-726 (2015). Pp. 784-789.
3. Iakovenko I., Kolchunov Vl. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 3. Pp. 366-375.
4. Morozov V. I., Bakhotsky I. V. To the calculation of fiber-reinforced concrete structures exposed to the joint effect of torsion with bending. *Modern problems of science and education*. 2013. No. 5. <http://www.science-education.ru/111-10408>.
5. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. *ACI Structural Journal*. 2007. Vol. 104. No 4. Pp. 402-411.

6. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282-289.
7. Rodevich V. V., Arzamastsev S. A. Eksperimental'nyye issledovaniya zhelezobetonnykh elementov, rabotayushchikh na izgib s krucheniyem, pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskim vozdeystviyakh [Experimental studies of reinforced concrete elements working on bending with torsion, under static and short-term dynamic effects]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2014. No. 10. Pp. 15-18.
8. Travush V. I., Karpenko N. I., Kolchunov VL.I., Kaprielov S. S., Demyanov A. I., Konorev A.V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy konstruktsey kvadratnogo i korobchatogo secheniy iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom [Results of experimental studies of square and box-section structures made of high-strength concrete under torsion with bending]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 6. Pp. 32-43.
9. Travush V. I., Karpenko N. I., Kolchunov VL.I., Kaprielov S. S., Demyanov A. I., Konorev A.V. Osnovnyye rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy zhelezobetonnykh konstruktsey iz vysokoprochnogo betona B100 kruglogo i kol'tseвого secheniy pri kruchenii s izgibom [Main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete in the form of round and ring sections during torsion with bending]. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2019. No. 15(1). Pp. 51-61.
10. V. I. Kolchunov, A. I. Dem'yanov The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2019, 88(4), Pp.60-69. DOI: 10.18720/MCE.88.6.
11. Kolchunov VL.I., Demyanov A. I., Naumov N. V. Teoriya "rastvoreniya" i "kondensatsii" fiziko-geometricheskikh kharakteristik poperechnogo secheniya proizvol'noy formy pri kruchenii sterzhney [Theory of "dissolution" and "condensation" of physical and geometric characteristics of the cross-section of an arbitrary shape during torsion of rods]. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2019. No. 15(4). Pp. 261-270.
12. Kolchunov V. I., Kolchunov VL.I., Fedorova N. V. Deformatsionnyye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdeystviyakh [Deformation models of reinforced concrete under special influences]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. No. 8. Pp. 54-60.

Информация об авторах:

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
канд. техн. наук, доцент кафедры уникальных зданий и сооружений
E-mail: speccompany@gmail.com

Information about authors:

Demianov Alexey I.

Southwest State University, Kursk, Russia,
Candidate of tech. science, associated professor of the department of unique buildings and structures,
E-mail: speccompany@gmail.com