

УДК 624.012.45

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ
СЖАТОЙ ЗОНЫ ПОПЕРЕЧНЫМИ СВАРНЫМИ СЕТКАМИ**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH CONJUGATE REINFORCEMENT
OF A COMPRESSED AREA BY TRANSVERSE WELDING GRIDS**

И.К. МАНАЕНКОВ
I.K. MANAENKOV

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

В статье представлены результаты испытаний трех серий балок с косвенным армированием сжатой зоны. Показано повышение несущей способности и появление продолжительной стадии пластического деформирования при установке поперечных сварных сеток в сжатую зону балок. Произведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных на основании нелинейной деформационной модели с учетом предложенной диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием.

The article presents the results of testing three series of beams with indirect reinforcement of the compressed zone. An increase in the bearing capacity and the appearance of a prolonged stage of plastic deformation during the installation of transverse welded meshes in the compressed zone of the beams are shown. The experimental data are compared with the results of calculations performed on the basis of a nonlinear deformation model, taking into account the proposed diagram of compressed concrete with indirect reinforcement.

Ключевые слова: косвенное армирование, сварные сетки, нелинейная деформационная модель, пластические деформации.

Keywords: indirect reinforcement, welded mesh, compression diagram, confined concrete, ultimate compressibility, nonlinear deformation model, inelastic deformations.

Косвенное армирование является одним из способов повышения прочностных и деформационных характеристик бетона за счет ограничения поперечных деформаций и создания объемного напряженного состояния [1...5]. И если для центрально и внецентренно сжатых элементов с косвенным армированием существует большое число экспериментальных и теоретических исследований [6...10], то для изгибаемых элементов объем исследований относительно невелик, опубликованные данные носят фрагментарный характер и не позволяют полностью описать механизм работы и разрушения [10...13].

Эффективным вариантом косвенного армирования железобетонных балок является применение поперечных сварных сеток. Благодаря относительно малому размеру ячейки сетки имеется возможность проектировать конструкции с различной

формой поперечного сечения и экономить сталь, размещая косвенное армирование только в зонах возникновения сжимающих усилий. Для лучшего понимания характера работы и разрушения таких конструкций и разработки единой методики расчета авторами были изготовлены и испытаны три серии железобетонных балок с габаритами поперечного сечения 15×20 см [14]. Серии состояли из двух образцов с сетками в сжатой зоне, расположенными с различным шагом, и эталонного образца без косвенного армирования и отличались между собой диаметром продольного армирования. Параметры опытных образцов представлены в табл. 1. Схема испытания – четырехточечный изгиб. Нагрузка P распределялась посредством траверсы и прикладывалась в третях рабочего пролета. Нагружение производилось ступенями (10 ступеней по $0,1P_u$) с десятиминутными выдержками.

Т а б л и ц а 1

Шифр образца	R_b , МПа	R_{b3} , МПа	A_{s3} , см ²	R_{s3} , МПа	μ_{xy}	$R_{s,xy}$, МПа
БС-I-0	28,4	-	7,33	439	0	-
БС-I-1	28,4	48,2	7,33	439	0,025	492
БС-I-2	28,4	59,1	7,33	439	0,05	492
БС-II-0	30,1	-	9,43	437	0	-
БС-II-1	30,1	50,3	9,43	437	0,025	492
БС-II-2	30,1	61,5	9,43	437	0,05	492
БС-III-0	28,6	-	12,4	411	0	-
БС-III-1	28,6	48,5	12,4	411	0,025	492
БС-III-2	28,6	59,4	12,4	411	0,05	492

Разрушение эталонных балок началось при значениях изгибающего момента M_{ult} , либо при достижении арматурой деформаций текучести (Б-I-0), либо при достижении бетоном сжатой грани предельных деформаций (Б-II-0, Б-III-0). В обоих случаях окончательная потеря несущей способности происходила после хрупкого раздробления бетона сжатой зоны.

У образцов с сетками характер разрушения принципиально отличался (рис. 1...3).

На рис. 1 представлена зависимость прогибов f от приложенной нагрузки P для образцов серии I; на рис. 2 – то же самое для образцов серии II; на рис. 3 – то же самое для образцов серии III.

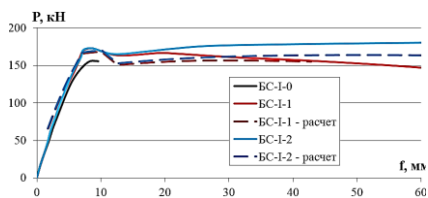


Рис. 1

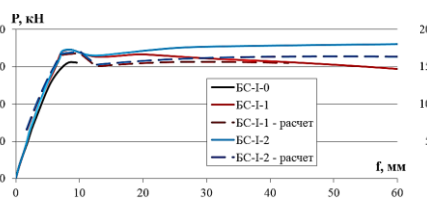


Рис. 2

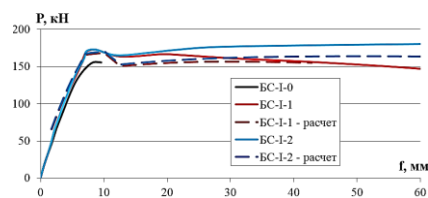


Рис. 3

На первом этапе при достижении $M_{p,3}$ отслаивался бетон защитного слоя, что сопровождалось некоторым падением несущей способности. При дальнейшем нагружении наблюдался рост несущей способности, а далее, в зависимости от шага сеток, происходило: в образцах с $\mu_{xy}=0,05$ плавный рост несущей способности, и только при больших значениях прогибов f начиналось ее плавное падение; в образцах с $\mu_{xy}=0,025$ – плавное падение несущей способности. Коэффициент косвенного армирования μ_{xy} вычислялся в соответствии с требованиями [15]. Падение несущей способности можно объяснить более интенсивным выкрашиванием бетона в промежутках между сетками при расположении сеток с большим шагом. Нагружение завершалось при исчерпании запаса хода гидроцилиндра

и невозможности дальнейшего корректного приложения нагрузки. Вплоть до конца испытания несущая способность падала плавно, без существенных скачков. Таким образом, получены данные, свидетельствующие о том, что предельная деформативность образцов с сетками косвенного армирования в сжатой зоне повышается как минимум на порядок и при этом сохраняется достаточно высокая остаточная несущая способность. Это объясняется тем, что арматура находится в стадии текучести, а у бетона сжатой зоны, усиленного сетками, имеется большой запас по деформациям. Остаточная несущая способность образцов $M_{ост,80}$ при прогибе 80 мм и характерные значения изгибающих моментов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Шифр образца	M_{ult} , кН·м	$M_{p,3}$, кН·м	$M_{ост,80}/M_{p,3}$	$M_{p,3}/M_{ult}$
BC-I-0	38,9	-	-	-
BC-I-1	-	43,2	0,76	1,11
BC-I-2	-	43,1	1,06	1,11
BC-II-0	45,2	-	-	-
BC-II-1	-	53,2	0,83	1,18
BC-II-2	-	56,4	1,07	1,25
BC-III-0	39,6	-	-	-
BC-III-1	-	48,1	0,89	1,21
BC-III-2	-	52,5	1,11	1,33

Как видно из таблицы, с ростом площади продольного армирования возрастает влияние сеток косвенного армирования на работу сжатой зоны, и повышение значения изгибающего момента, соответствующего разрушению защитного слоя $M_{p,3}$ (то есть окончанию стадии нормальной эксплуатации) относительно эталонных образцов без косвенного армирования, составило 11...33% в зависимости от коэффициента косвенного армирования и площади продольного армирования.

Для аналитического описания работы таких балок была разработана диаграмма сжатого бетона с косвенным армированием сварными сетками [16], и в среде Matlab была написана программа, позволяющая проводить расчеты балок по нелинейной деформационной модели. При этом для бетона в зоне размещения сеток задавалась диаграмма сжатого бетона с косвенным армированием сварными сетками (рис. 4), для бетона защитного слоя – диаграмма Н.И. Карпенко [17], для растянутой арматуры – двухлинейная диаграмма [15].

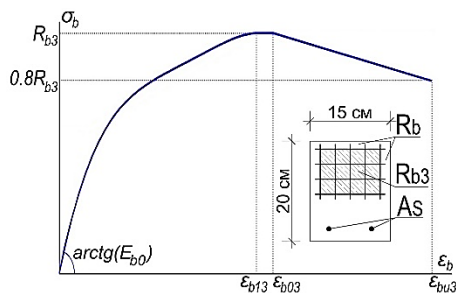


Рис. 4

Расчет проводили на всех этапах работы конструкции, включая стадию после разрушения защитного слоя, и завершился он по всем образцам при достижении деформациями сжатой зоны значения ε_{bu3} . Результаты расчетов приведены пунктиром на рис. 1...3. Как видно из графиков, характер деформирования образцов по результатам расчетов хорошо (с некоторым запасом) соотносится с результатами эксперимента. При этом плавное деформирование опытных образцов продолжалось и при значениях прогибов, превышающих теоретический максимальный прогиб. Данный факт свидетельствует о том, что в изгибаемых железобетонных элементах имеется существенный запас по нисходящей ветви диаграммы сжатия для бетона с косвенным сетчатым армированием и предельные деформации превышают значение ε_{bu3} , принятое по рекомендациям [15].

ВЫВОДЫ

1. По результатам проведенного эксперимента повышение несущей способности образцов с сетками составило 11...33% в зависимости от коэффициента косвенного армирования и площади продольного армирования.

2. Предложенная аналитическая диаграмма сжатого бетона с косвенным армированием позволяет проводить расчеты балок с сетками в сжатой зоне, что подтверждается удовлетворительной сходимостью с экспериментальными данными.

3. Проведенные эксперименты и расчеты свидетельствуют об изменении характера разрушения железобетонных балок с сетками в сжатой зоне и наличии продол-

жительной стадии пластического деформирования после разрушения защитного слоя с сохранением высокой несущей способности. Данное обстоятельство позволяет применять такие элементы в зданиях со статически неопределимой конструктивной схемой. В случае запроектных или аварийных воздействий на элемент (например, прогрессирующего обрушения) наличие запасов по деформациям и отсутствие хрупкого разрушения позволят перераспределить усилия на другие менее нагруженные элементы здания и избежать обрушения. Данный вопрос представляет интерес для дальнейших исследований и требует выбора рациональной конструктивной схемы, разработки узлов и определения зон для размещения сеток косвенного армирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sfer D., Gettu R., Etse G. Study of the behavior of concrete under triaxial compression // J. Eng. Mech. – № 128, 2002. P.156...163.
2. Binici B. An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete // Eng. Struct. – № 27, 2005. P. 1040...1051.
3. Lu X., Hsu C. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression // J. Mater. Civil. Eng. – № 19(3), 2007. P. 261...268.
4. Attard M., Samani A.K. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression // Eng. Struct. – № 41, 2012. P. 335...349.
5. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 7. С. 51...54.
6. Расторгуев Б.С., Ванус Д.С. Расчет железобетонных элементов с поперечным сетчатым армированием // Промышленное и гражданское строительство. – 2009, № 10. С. 53...54.
7. Long Y., Cai J. Stress-strain relationship of concrete confined by rectangular steel tubes with binding bars // Journal of Constructional Steel Research. – № 88, 2013. P.1...14.
8. Krishan A.L., Troshkina E.A., Rimshin V.I., Rahmanov V.A., Kurbatov V.L. Load-bearing capacity of short concrete-filled steel tube columns of circular cross section // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – V.7, № 3, 2016. P.2518...2529.
9. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475...476, 2014. P.1563...1566.
10. Hadi M., Elbasha N. Displacement ductility of helically confined HSC beams // The Open Construction

and Building Technology Journal. – № 2, 2008. P. 270...279.

11. Ванус Д.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок с косвенным сетчатым армированием сжатой зоны // Промышленное и гражданское строительство. – 2011, № 5. С. 56...57.

12. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. № 7. С. 41...44.

13. Тамразян А.Г., Орлова М.А. К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами // Жилищное строительство. – 2011, № 6. С.32...34.

14. Манаенков И.К., Тамразян А.Г. Напряженное состояние изгибаемых железобетонных элементов с учетом деформативности сжатой зоны, усиленной косвенным армированием // В сб.: Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР). – БрГТУ, 2018. С. 90...98.

15. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-101-2003.

16. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // Строительство и реконструкция. – 2018, №2(76). С. 41...50.

17. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996.

REFERENCES

1. Sfer D., Gettu R., Etse G. Study of the behavior of concrete under triaxial compression // J. Eng. Mech. – № 128, 2002. P.156...163.

2. Binici B. An analytical model for stress-strain behavior of confined concrete // Eng. Struct. – № 27, 2005. P. 1040...1051.

3. Lu X., Hsu C. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression // J. Mater. Civil. Eng. – № 19(3), 2007. P. 261...268.

4. Attard M., Samani A.K. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression // Eng. Struct. – № 41, 2012. P. 335...349.

5. Tamrazjan A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014, № 7. S. 51...54.

6. Rastorguev B.S., Vanus D.S. Raschet zhelezobetonnyh jelementov s poperechnym setchatym armi-

rovaniem // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2009, № 10. S. 53...54.

7. Long Y., Cai J. Stress-strain relationship of concrete confined by rectangular steel tubes with binding bars // Journal of Constructional Steel Research. – № 88, 2013. P.1...14.

8. Krishan A.L., Troshkina E.A., Rimshin V.I., Rahmanov V.A., Kurbatov V.L. Load-bearing capacity of short concrete-filled steel tube columns of circular cross section // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – V.7, № 3, 2016. P.2518...2529.

9. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475...476, 2014. P.1563...1566.

10. Hadi M., Elbasha N. Displacement ductility of helically confined HSC beams // The Open Construction and Building Technology Journal. – № 2, 2008. P.270...279.

11. Vanus D.S. Jekspierimental'nye issledovanija zhelezobetonnyh balok s kosvennym setchatym armirovaniem szhatoj zony // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2011, № 5. S. 56...57.

12. Tamrazjan A.G., Manaenkov I.K. K raschetu izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov s kosvennym armirovaniem szhatoj zony // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2016. № 7. S. 41...44.

13. Tamrazjan A.G., Orlova M.A. K ostatochnoj nesushhej sposobnosti zhelezobetonnyh balok s treshhinami // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2011, № 6. S.32...34.

14. Манаенков И.К., Тамразян А.Г. Naprjazhennoe sostojanie izgibaemyh zhelezobetonnyh jelementov s uchetom deformativnosti szhatoj zony, usilenoj kosvennym armirovaniem // V sb.: Teorija i praktika issledovanij i proektirovanija v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovanija (SAPR). – BrGTU, 2018. S. 90...98.

15. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-101-2003.

16. Манаенков И.К. K sovershenstvovaniju diagrammy szhatogo betona c kosvennym armirovaniem // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2018, №2(76). S. 41...50.

17. Карпенко Н.И. Obshhie modeli mehaniki zhelezobetona. – М.: Strojizdat, 1996.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Поступила 17.10.18.