УДК 624.012.25

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-66-71

© Н. С. Воронцова, инженер
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: vorontsova.ns@gmail.com

© N. S. Vorontsova, engineer
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: vorontsova.ns@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСОИЗГИБАЕМЫХ ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF FIBER REINFORCED CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO BIAXIAL BENDING

Актуальность проведения экспериментальных исследований косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов обусловлена широким распространением сложнодеформируемых элементов, а также отсутствием в научной литературе решения поставленной задачи. В процессе экспериментальных исследований в условиях косоугольного изгиба были испытаны фиброжелезобетонные балки, дисперсно армированные стальной фиброй марки ФСВ-А-0,30/30, с регулярной арматурой из мягкой стали и высокопрочными арматурными стержнями без предварительного напряжения. Приведены результаты исследования, сопоставленные с данными теоретического расчета, а также сравнение с контрольными железобетонными образцами.

Ключевые слова: фиброжелезобетон, стальная фибра, косоугольный изгиб, экспериментальные исследования.

The urgency of carrying out experimental investigations of fiber reinforced concrete members under biaxial bending is attributable to the extensive use of complex-deformed members, as well as the lack of solution of the task in the scientific literature. In the course of experimental investigations under biaxial bending, there were tested fiber reinforced concrete beams which had been reinforced with FSV-A-0,30/30 grade steel fiber, with regular reinforcement made of low-carbon steel and high-strength reinforcing bars without pre-stressing. The article presents the investigation results compared with the data of the theoretical calculation, as well as a comparison analysis of these results with data on the test reinforced concrete samples.

Keywords: fiber reinforced concrete, steel fiber, biaxial bending, experimental investigations.

В современной строительной практике все чаще встречаются элементы конструкций, работающие в условиях сложного напряженного состояния, в том числе косоугольного изгиба. Неучет косых воздействий может привести к переоценке несущей способности элемента, и как следствие — к преждевременному разрушению. К настоящему времени накоплена экспериментальная база исследований косоизгибаемых элементов [1, 4, 6, 8, 9, 11, 13], охватывающая различные формы поперечных сечений (двутавровые, тавровые, прямоугольные и пр.), типы бетона (тяжелый бетон, керамзитобетон и пр.), расположения центра тяжести арматурных стержней и др. Анализ научной литературы показал, что задача экспериментального исследования косоизгибаемых элементов из фиброжелезобетона ранее не рассматривалась.

С целью исследования напряженно-деформированного состояния и прочности косоизгибаемых элементов при кратковременном нагружении были изготовлены фиброжелезобетонные образцы-балки, а также контрольные образцы из железобетона.

Фибровое армирование. Дисперсное армирование фиброжелезобетонных образцов осуществлялось стальной фиброй марки ФСВ-А-0,30/30, что означает «фибра из стальной высокоуглеродистой проволоки (ФСВ), анкерного профиля (А), номинальным диаметром 0,30 мм и длиной 30 мм». Данная фибра производится ОАО «Белорусский металлургический завод» (ОАО «БМЗ») по ТУ 14-1-5564–2008 [12]. Общий вид фибры представлен на рис. 1.

Параметры армирующего волокна приняты согласно рекомендуемой во многих исследова-

Рис. 1. Общий вид фибры ФСВ-А-0,30/30 производства ОАО «БМЗ»

ниях величине отношения длины и диаметра фибры l_f/d_f равной 100 [7, 10]. Изогнутые концы армирующих волокон — анкеры способствуют лучшему сцеплению с бетоном-матрицей. Процент фибрового армирования принят равным 2 % от объема бетонной смеси во всех фиброжелезобетонных образцах, согласно рекомендациям в работе [10] для изгибаемых элементов.

Характеристика экспериментальных образцов-балок. Всего было изготовлено 14 балок — семь серий, в каждой из которых по две балки-близнеца размером $2460 \times 220 \times 120$ ($l \times h \times b$) мм. Общая характеристика серий образцов-балок представлена в табл. 1.

В качестве бетона-матрицы применялся мелкозернистый бетон. Балки сконструированы в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации — воздействием косоугольного изгиба. Арматурные стержни распределены таким образом, что центр тяжести рабочей продольной арматуры располагается в силовой плоскости. Экспериментальные исследования проводились при углах наклона силовой плоскости 10 и 20°.

Традиционное армирование железобетонных и фиброжелезобетонных балок выполнялось четырьмя арматурными стержнями $\varnothing 10$ мм класса А500С. Также были изготовлены фиброжелезобетонные балки с высокопрочным арматурным стержнем $\varnothing 14$ мм класса Ат800 без предварительного напряжения. Для формирования пространственного каркаса установлена конструктивная арматура $\varnothing 6$ мм класса А240. Поперечное армирование выполнено замкнутыми хомутами $\varnothing 5$ мм класса В500 с шагом 150–200 мм в зоне действия постоянного момента (кроме серии ФЖБ1.3) и с шагом 50 мм в приопорных зонах для предотвращения разрушения по наклонному сечению. Схема армирования поперечных сечений косоизгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов в зоне действия постоянного момента представлена на рис. 2.

Для определения механических характеристик материалов в лабораториях кафедры строительных конструкций СПбГАСУ были проведены испытания бетонных и фибробетонных образцов-призм на сжатие и растяжение, а также арматурных стержней на растяжение. Величины призмочной прочности бетона и фибробетона на сжатие составили 16,0 и 29,1 МПа, на растяжение — 0,75 и 2,57 МПа соответственно. Величины физического и условного пределов текучести для арматурной стали классов А500С и Ат800 составили 583,9 и 1091,6 МПа соответственно.

Методика экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования косоизгибаемых элементов проводились в лаборатории кафедры строительных конструкций СПбГАСУ. Для испытаний образцов-балок при воздействии косоугольного изгиба была сконструирована и изготовлена оригинальная экспериментальная установка

Таблица 1

Общая характеристика изготовленных образцов-балок

Номер серии	Шифр балки	Материалы	Угол наклона силовой плоскости, град	Количество, шт.
1	ЖБ1	Железобетон, продольная рабочая арматура 4 $\varnothing 10$ класса А500С	10	2
2	ЖБ2		20	2
3	ФЖБ1.1	Фиброжелезобетон, продольная рабочая арматура 4 $\varnothing 10$ класса А500С	10	2
4	ФЖБ1.2		20	2
5	ФЖБ1.3		20	2
6	ФЖБ2.1	Фиброжелезобетон, продольная рабочая арматура 1 $\varnothing 14$ класса Ат800	10	2
7	ФЖБ2.2		20	2

Рис. 2. Схема армирования поперечных сечений косоизгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов

ка, позволяющая изменять угол наклона силовой плоскости к поперечному сечению элемента от 0 до 90°. Балка в третьих пролетах устанавливалась на шарнирные опоры, нагружение выполнялось посредством сосредоточенных сил, приложенных в торцевых частях образца. Таким образом, элемент был повернут на 180° относительно рабочего положения, что обусловлено удобством и безопасностью наблюдения за процессами трещинообразования и разрушения образцов-балок. Схема испытания косоизгибаемых элементов представлена на рис. 3.

Нагружение выполнялось ступенями, равными 0,1 от ожидаемой разрушающей нагрузки, при помощи двух гидравлических домкратов модели ДГ20П150Г грузоподъемностью 20 т. Величина приложенного усилия фиксировалась при помощи кольцевых динамометров с индикаторами с ценой деления 1000 мкм. При достижении величины нагрузки, равной 0,7 от разрушающей, ступени уменьшались до 0,05 от ожидаемой разрушающей нагрузки.

В процессе испытаний фиксировались момент трещинообразования, принятый равным

моменту образования «ацетоновой трещины», показания измерительных приборов, процесс развития и ширина раскрытия трещин, а также расстояние между ними. Нагружение выполнялось вплоть до момента, когда процесс дальнейшего увеличения нагрузки становился невозможным — наблюдалось падение нагрузки, сопровождаемое раздроблением сжатой зоны бетона (фибробетона).

Результаты экспериментальных исследований. По результатам испытаний косоизгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных балок установлены величины предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечными сечениями элементов, соответствующих предельной стадии напряженно-деформированного состояния, характеризуемой исчерпанием прочности сжатой зоны бетона (фибробетона) или достижением в арматурных стержнях напряжений, соответствующих физическому или условному пределу текучести.

В процессе экспериментальных исследований установлено, что косоизгибаемые фиброжелезобетонные элементы обладают повышенной

Рис. 3. Схема испытания образцов-балок и расстановки измерительных приборов: Т1–Т10 — электромеханические тензометры Н. Н. Аистова ТА-2; П1–П8 — прогибомеры системы Н. Н. Аистова 6ПАО; P — сосредоточенная сила, прикладываемая в процессе испытания; M — изгибающий момент, возникающий в зоне чистого косоуго изгиба; β — угол наклона силовой плоскости

трещиностойкостью. Появление первых трещин отмечено при величине изгибающего момента, равного 0,19–0,21 и 0,22–0,24 от предельного для железобетонных и фиброжелезобетонных балок соответственно.

В фиброжелезобетонных балках по сравнению с железобетонными зафиксировано большее количество трещин меньшей ширины раскрытия при одинаковой величине нагрузки. Установлено снижение среднего расстояния между трещинами в фиброжелезобетонных балках:

- с арматурой класса А500С — в 1,7 раза;
- арматурой класса Ат800 — в 1,4–1,7 раза по сравнению с контрольными железобетонными образцами.

Результаты экспериментальных исследований косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов обеспечили возможность сопоставления с теоретическими данными, вычисленными по разработанной ранее методике [2, 3]. В табл. 2 приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований несущей способности косоизгибаемых элементов, свидетельствующие, по мнению автора, об адекватности теоретической модели и возможности ее уточнения и применения в практике проектирования. Величины предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечными сечениями же-

Таблица 2

Величины предельных изгибающих моментов, установленных по результатам экспериментальных и теоретических исследований

Номер серии	Шифр балки	Экспериментальный предельный изгибающий момент $M_э$, кН · м	Теоретический предельный изгибающий момент $M_т$, кН · м	$\Delta = \frac{M_э - M_т}{M_э} 100, \%$
1	ЖБ1-1	28,57	25,28	+11,5
	ЖБ1-2	26,53		+4,7
2	ЖБ2-1	25,09	21,47	+14,4
	ЖБ2-2	24,58		+12,6
3	ФЖБ1.1-1	30,84	30,95	–0,4
	ФЖБ1.1-2	34,30		+9,8
4	ФЖБ1.2-1	29,64	26,83	+9,5
	ФЖБ1.2-2	32,23		+16,8
5	ФЖБ1.3-1	33,38	26,83	+19,6
	ФЖБ1.3-2	31,94		+16,0
6	ФЖБ2.1-1	30,98	30,55	+1,4
	ФЖБ2.1-2	31,23		+2,2
7	ФЖБ2.2-1	30,57	30,03	+1,8
	ФЖБ2.2-2	30,86		+2,7

лезобетонных образцов-балок, найдены по методике [5].

Анализ результатов экспериментального исследования косоизгибаемых элементов показал, что с увеличением угла наклона силовой плоскости от 10 до 20° происходит снижение величины предельного изгибающего момента до 16 %, что обусловлено уменьшением плеча внутренней пары сил. В балках с регулярной арматурой из высокопрочных сталей предельные изгибающие моменты оказались близки по значению, поскольку с увеличением угла наклона силовой плоскости центр тяжести рабочей арматуры существенно переместился, таким образом, плечо внутренней пары сил практически не изменилось по величине, но повернулось.

Установлено увеличение предельного изгибающего момента, воспринимаемого поперечным сечением фиброжелезобетонных образцов:

- с регулярным армированием мягкой сталью — в среднем на 18–32 %;
- использованием высокопрочной арматуры — в среднем на 13–24 % по сравнению с контрольными образцами из железобетона.

Экспериментальные исследования показали, что наступление предельного состояния в железобетонных образцах обусловлено деструкцией бетона сжатой зоны, фиброжелезобетонных — достижением в регулярной арматуре напряжений, соответствующих физическому или условному пределу текучести арматурной стали. Более того, разрушение железобетонных образцов происходило внезапно, с выколом значительной части бетона сжатой зоны. Разрушение фиброжелезобетонных образцов носило вязкий характер, сопровождаемый деформированием многочисленных, пронизывающих тело бетона фибр.

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют об эффективности применения фибрового армирования в косоизгибаемых элементах, в том числе в сочетании с регулярным армированием высокопрочной сталью без предварительного напряжения, что подтверждается увеличением несущей способности, момента трещинообразования, а также снижением ширины раскрытия трещин. Очевидно, что при увеличении угла наклона силовой плоскости до 30° и более влияние косоугольного изгиба возрастает, следовательно, на стадии проектирования

необходимо учитывать снижение несущей способности с увеличением угла наклона силовой плоскости.

Библиографический список

1. Ажидинов А. С. Расчет на косоугольный изгиб элементов прямоугольного и двутаврового сечений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 23 с.
2. Воронцова Н. С. Расчет несущей способности косоизгибаемого фиброжелезобетонного элемента с треугольным очертанием сжатой зоны // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 5 (46). С. 24–26.
3. Воронцова Н. С. Расчет прочности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 77–85.
4. Вилков К. И. Конструкционный керамзитожелезобетон при обычных и сложных деформациях. М.: Стройиздат, 1984. 241 с.
5. Глазер С. И. Расчет косоизгибаемых железобетонных элементов. Киев: Будівельник, 1973. 212 с.
6. Жэнь Бэй-Юй. Косоугольный изгиб железобетонных элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1958. 15 с.
7. Курбатов Л. Г., Рабинович Ф. Н. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами // Бетон и железобетон. 1980. № 3. С. 6–8.
8. Левадный Я. М. Жесткость косоизгибаемых железобетонных элементов. Киев: НИИ строит. производства, 1968. 46 с.
9. Павликов А. Н. Экспериментально-теоретические исследования параметров напряженно-деформированного состояния косоизгибаемых керамзитожелезобетонных элементов // Тезисы докл. республиканской конф. «Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций и их внедрение в сельскохозяйственное строительство». Полтава: Б. и., 1982. С. 95–96.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: АСВ, 2011. 642 с.
11. Сердюк Л. И. Экспериментально-теоретические исследования прочности обычных и предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного, таврового и Г-образного сечений со стержневой арматурой при косоугольном изгибе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 1967. 17 с.
12. ТУ 14-1-5564–2008. Изменение № 1. Фибра из стальной проволоки для дисперсного армирования бетона. М.: НИИЖБ, 2010. 8 с.
13. Чуприна Б. С. Прочность, граничное армирование, трещиностойкость и деформативность косо-

изгибаемых керамзитобетонных элементов прямо-угольного сечения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 1988. 26 с.

References

1. Azhidinov A. S. *Raschet na kosoy izgib ehlementov pryamougol'nogo i dvutavrovogo secheniy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Calculation of fiber reinforced concrete beams of rectangular sections and I-beams subjected to biaxial bending. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1991, 23 p.
2. Vorontsova N. S. *Raschet nesushchey sposobnosti kosoizgibaemogo fibrozhelezobetonного ehlementa s treugol'nyim ochertaniem szhatoy zony* [Calculation of load-bearing capacity of fiber reinforced concrete member under biaxial bending with triangle shaped compression zone]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 5 (46), pp. 24–26.
3. Vorontsova N. S. *Raschet prochnosti kosoizgibaemykh fibrozhelezobetonnykh ehlementov* [Strength calculation of fiber reinforced concrete members under biaxial bending]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 3 (44), pp. 77–85.
4. Vil'kov K. I. *Konstruktsionnyy keramzitozhelezobeton pri obychnykh i slozhnykh deformatsiyakh* [Constructional lightweight reinforced concrete at usual and complex deformations]. Moscow, Stroyizdat, 1984, 241 p.
5. Glazer S. I. *Raschet kosoizgibaemykh zhelezobetonnykh ehlementov* [Calculation of fiber reinforced concrete members subjected to biaxial bending]. Kiev, Budivelnik Publ., 1973, 212 p.
6. Zhehn' Behy-Yuy. *Kosoy izgib zhelezobetonnykh ehlementov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Biaxial bending of reinforced concrete members. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Kiev, 1958, 15 p.
7. Kurbatov L. G., Rabinovich F. N. *Ob ehffektivnosti betonov, armirovannykh stal'nymi fibrami* [About efficiency of concrete reinforced with steel fiber]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1980, no. 3, pp. 6–8.
8. Levadnyy Ya. M. *Zhestkost' kosoizgibaemykh zhelezobetonnykh ehlementov* [Rigidity of reinforced concrete members subjected to biaxial bending]. Kiev, NII stroitel'nogo proizvodstva Publ., 1968, 46 p.
9. Pavlikov A. N. *Ehksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kosoizgibaemykh keramzitozhelezobetonnykh ehlementov* [Experimental and theoretical research of the parameters of the intensely deformed state of biaxially bent lightweight reinforced concrete members]. *Tezisy dokl. respublikanskoy konf. «Sovershenstvovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy, rabotayushchikh na slozhnye vidy deformatsiy. i ikh vnedrenie v sel'skokhozyaystvennoe stroitel'stvo»* [Author's thesis of the report made at the republic conf. "Improvement of the reinforced concrete designs intended to be used with complex types of deformations and their introduction into agricultural construction"]. Poltava, 1982, pp. 95–96.
10. Rabinovich F. N. *Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktsii* [Composites on the basis of dispersion reinforced concrete. Issues of the theory and design, technology, constructions]. Moscow, ASV Publ., 2011, 642 p.
11. Serdyuk L. I. *Ehksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya prochnosti obychnykh i predvaritel'no-napryazhennykh zhelezobetonnykh ehlementov pryamougol'nogo, tavrovogo i G-obraznogo secheniy so sterzhnevoy armaturoy pri kosom izgibe. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Experimental and theoretical research of durability of usual and pre-stressed intense reinforced concrete members of rectangular, I-beam, and inverted L shaped sections with rod fittings subjected to biaxial bending. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Novocherkassk, 1967, 17 p.
12. TU 14-1-5564–2008. *Izmenenie № 1. Fibra iz stal'noy provoloki dlya dispersnogo armirovaniya betona* [Fiber from steel wire for disperse reinforcing of concrete]. Moscow, NIIZhB Publ., 2010, 8 p.
13. Chuprina B. S. *Prochnost', granichnoe armirovanie, treshchinostoykost' i deformativnost' kosoizgibaemykh keramzitobetonnykh ehlementov pryamougol'nogo secheniya. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Durability, boundary reinforcing, crack resistance, and deformability of light-weight concrete elements of rectangular section subjected to biaxial bending. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Kiev, 1988, 26 p.