

К определению относительной деформации усиленного бетона ϵ_{b3}

С.В. Георгиев¹, З.А. Меретуков², А. Г. Кремененко¹

¹ *Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.*

² *Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп*

Аннотация: Рассмотрены гибкие стойки, усиленные композитными материалами, расположенными в поперечном направлении. Установлено, что деформации бетона на сжатие зависят от внешнего композитного армирования. Теоретические значения ϵ_{b3} , рассчитанные по действующим нормам, имеют значительные расхождения с опытными. На основе анализа результатов экспериментов, в методику норм при расчете предельных деформаций бетона на сжатие ϵ_{b3} внесены предложения, которые учитывают вид и процент композитного армирования и обеспечивают хорошее совпадение опытных и теоретических значений.

Ключевые слова: бетон, железобетон, композитный материал, углепластик, внешнее армирование, деформации, сжатые элементы.

В последние годы композитные материалы всё больше используются в современном строительстве, особенно в области усиления несущих конструкций по результатам обследования [1]. Высокая прочность на растяжение и схожий модуль упругости с металлом [2;3], делает этот вид усиления перспективным и популярным, а упрощенная методика выполнения работ, вкупе с минимальными трудозатратами и используемом оборудовании, а также отсутствием необходимости в воде и электричестве, существенно улучшают конкурентность нового вида усиления по сравнению с традиционными, с использованием металла и железобетона.

В России исследованиями композитных материалов при усилении железобетонных конструкций [4-7] занимались такие учёные как: Шилин, Хаютин, Чернявский, Аксельрод, Клевцов, Фаткуллин, Польской, Маилян, Костенко и др. Из зарубежных исследований данный вопрос нашёл наибольшее отражение в работах [8-10].

Композитные материалы, используемые при усилении железобетонных сжатых элементов, увеличивают прочность бетона на сжатие и сдерживают деформации монолитного бетона и, тем самым, наряду с высокопрочными

бетонами [11,12], увеличивают рациональность использования бетона в строительстве, при этом максимально используются работа бетона на сжатие.

Для сжатых железобетонных элементов наиболее эффективный метод усиления — это устройство композитной обоймы [13], с расположением материала усиления в поперечном направлении, при этом обойма сдерживает деформации бетона, оказывая эффект обжатия, что приводит к увеличению предельных деформаций бетона на сжатие. Это подтверждается нормативной формулой (1) СП 164.1325800.2014.

$$\varepsilon_{b3} = \varepsilon_{b2} + 2 \cdot \mu_f \cdot \frac{R_{f,n}}{E_b} \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что влияние композитного усиления выражается в виде прибавки (второго слагаемого) к относительной деформации не усиленного бетона ε_{b2} .

В свою очередь, второе слагаемое зависит от следующих параметров: нормативного сопротивления композитных материалов растяжению $R_{f,n}$, площади поперечного сечения материалов усиления и усиливаемой конструкции, которое выражается через процент армирования μ_f и модуль упругости бетона E_b . Стоит отметить, что в формуле не учитывается влияние шага композитных хомутов S_w и эксцентриситета приложения нагрузки e_0 .

Процент композитного армирования μ_f действительно учитывает количество используемых материалов усиления, которое выражается через число слоев углеткани и толщину одного слоя. Однако, от величины шага композитных хомутов S_w зависит площадь усиливаемой поверхности и количество используемых композитных материалов. Другими словами, чем больше шаг хомутов, тем более экономичное, но и менее эффективное

усиление. Это должно быть отражено при вычислении относительной деформации бетона ε_{b3} .

Влияние эксцентриситета приложения нагрузки в формуле (1) не учитывается, в основном потому, что в СП 164.1325800.2014 введены ограничения для использования композитных материалов в поперечном направлении в качестве материалов усиления при эксцентриситете приложения нагрузки, превышающего $0,1h$. На сегодняшний день нет исследований влияния эксцентриситета приложения нагрузки на значения относительной деформации бетона ε_{b3} гибких железобетонных стоек.

С учетом поставленных вопросов на кафедре железобетонных и каменных конструкций были изготовлены и испытаны, в рамках диссертационной работы, ряд железобетонных стоек с гибкостью $\lambda_h=10$, испытанных при 3-х осевых эксцентриситетах приложения нагрузки ($e_0=0$; $e_0=0,16h$; $e_0=0,32h$).

Методика усиления и испытания образцов приведены в работе [14].

Для анализа и определения влияния шага композитных хомутов и эксцентриситета приложения нагрузки на изменение относительных деформаций усиленного бетона были взяты результаты испытаний стоек с шифрами, представленными в ст. 2 табл. 1.

На всех образцах, в центре по длине стоек, с 4-х сторон при испытании были установлены индикаторы часового типа с ценой деления $0,01\text{мм}$ и базой 30 см , для определения относительных деформаций бетона в процессе испытания. Эти значения, при уровне нагрузки, равной $0,95N_{ult}$, приведены в ст. 4, табл.1.

Теоретические значения относительных деформаций бетона рассчитаны для всех опытных образцов по формуле (1), приведены в ст. 5, табл. 1.

Сравнение значений ст. 4 и 5 табл. 1 показало, что нормативные (теоретических) деформации превышают опытные на 20-30 %, при этом, чем больше шаг композитных хомутов, тем разница увеличивается.

Таблица № 1

Сравнение теоретических и экспериментальных значений
относительных деформаций бетона ε_{b3} .

П/П №	Шифр образца	e_{0+}	$\varepsilon_{h3}^{exp} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{b3}^{theor} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{b3}^{theor} \cdot 10^3$	$\frac{\varepsilon_{b3}^{exp}}{\varepsilon_{h3}^{theor}}$	k_{f1}^{exp}	k_{f1}^{theor}	$\frac{k_{f1}^{exp}}{k_{f1}^{theor}}$	$\varepsilon_{b3}^{theor} \cdot 10^3$	$\frac{\varepsilon_{b3}^{exp}}{\varepsilon_{h3}^{theor}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	АКУ-Х ₁	0,2	3,7	5,31	3,71	0,70	0,11	0,12	0,92	3,71	1,00
2	АКУ-Х ₆	0,2	4,3	5,19	4,23	0,83	0,48	0,43	1,12	4,23	1,02
3	АКУ-Х ₅	0,2	4,7	5,31	4,85	0,89	0,67	0,75	0,89	4,85	0,97
4	БКУ-Х ₁	2,2	3,7	5,31	3,71	0,70	0,11	0,12	0,92	3,71	1,00
5	БКУ-Х ₂	2,2	4	5,3	4,03	0,75	0,28	0,30	0,93	4,03	0,99
6	БКУ-Х ₅	2,2	4,75	5,3	4,82	0,90	0,71	0,75	0,95	4,82	0,99
7	ВКУ-Х ₁	4,2	3,7	5,3	3,71	0,70	0,11	0,12	0,92	3,71	1,00

Опытные значения относительных деформаций усиленного бетона ε_{b3}^{exp} для образцов с одинаковым видом усиления, но испытанных при разных эксцентриситетах приложения нагрузки примерно равны друг другу. Это видно при сравнении образцов с вариантом усиления У-Х₁ (шаг хомутов и его ширина равны 140 мм и 50мм соответственно). Для образцов, усиленных обоймой (У-Х₅), наблюдается разность относительных деформаций бетона на сжатие в пределах 5%. Это говорит о том, что эксцентриситет приложения нагрузки не влияет на изменение относительных деформаций бетона, усиленного композитными материалами.

Экспериментальные значения относительных деформаций бетона ε_{b3}^{exp} для образцов, внутри одной серии, объединённой эксцентриситетом приложения нагрузки, существенно отличаются друг от друга. Из таблицы видно, что шаг композитных хомутов влияет на изменение относительных

деформаций бетона, при этом наблюдается закономерность, что при уменьшении шага композитных хомутов относительная деформация бетона увеличивается.

Для стоек, усиленных обоймой, теоретические и экспериментальные значения относительной деформации бетона ε_{b3} примерно равны друг другу.

Из этого можно сделать вывод, что нормативная формула разработана для варианта усиления – обойма.

Используя экспериментальные численные значения относительных деформаций усиленного бетона ε_{b3} , предлагается разработать и ввести в формулу (1) поправочный коэффициент, который будет учитывать влияние шага композитных хомутов, но вместо значения величины шага хомутов S_w , использовать нормативный коэффициент k_e (3), который, в свою очередь, зависит от шага хомутов, а также от размеров поперечного сечения элемента и радиуса скругления углов бетонного сечения.

Вывод формулы коэффициента k_{f1} выполнялся через экспериментальные значения относительных деформаций бетона ε_{b3}^{exp} . Экспериментальные значения k_{f1}^{exp} подбирались в компьютерной программе таким образом, чтобы теоретические значения относительных деформаций бетона ε_{b3}^{theor} были равны экспериментальным ε_{b3}^{exp} . Затем, согласно полученным значениям k_{f1}^{exp} , была разработана формула (2) для определения k_{f1}^{theor} , значения которых приведены в ст. 9. табл.1.

Анализ показал, что влияние шага хомутов, соответственно и коэффициента k_e , на изменение относительных деформаций бетона ε_{b3} имеет линейную зависимость. Разработанная формула коэффициента k_{f1} :

$$k_{f1} = 1,25 \cdot k_e - 0,5, \quad (2)$$

где

$$k_e = \left(1 - \frac{S_w}{2 \cdot (\sqrt{h^2 + b^2} - 2 \cdot r)} \right)^2 \quad (3)$$

Значения относительных деформаций усиленного бетона ε_{b3}^{theor} с учётом предложенного коэффициента k_{f1} представлены в ст. 11. в табл. 1.

После введения коэффициента разница значений ε_{b3}^{exp} и ε_{b3}^{theor} в пределах 5% (ст. 12 табл. 1).

Литература

1. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2001. №6 С. 17-20.
2. Устинов Б.В., Устинов В.П. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) // Известия вузов. Строительство. 2009. № 11-12. С.118-125.
3. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Свойства материалов, используемых при исследовании работы усиленных железобетонных конструкций. Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673
4. Мухамедиев Т.А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композиционными материалами // Бетон и железобетон. 2013. № 3. С. 6-8.
5. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // М: Стройиздат. 2004. 144с.
6. Чернявский, В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 15-16.

7. Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов реконструируемых зданий // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2009. №35 (168). URL:clck.ru/QgtxD
 8. Benzaid R., Mesbah H.A., Amel B. Experimental investigation of concrete externally confined by CFRP composites // 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure (IRF). Inegiinst engenharia mecanica e gestao industrial, 2016. pp. 595-602.
 9. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. CSA S806-12. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association (CSA); 2012.
 10. El-Refaie S.A. Repair and strengthening of continuous reinforced concrete beams // Ph.D. thesis, department of civil and environmental engineering. University of Bradford, UK, 2001. P.207.
 11. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. О коэффициенте призмочной прочности высокопрочных бетонов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1817
 12. Радченков А.В., Аксенов В.Н. Методы расчета каркасных зданий из монолитного железобетона на прогрессирующее обрушение на примере 17-этажного жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879
 13. Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных углем и стекловолокном. // Автореферат. дисс. канд. техн. наук. Москва. 2010. 26с.
 14. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение. 2014. № 10-2. С. 415-418.
-

References

1. Hajutin Ju.G., Chernjavskij V.L., Aksel'rod E.Z. Beton i zhelezobeton. 2001. №6 pp. 17-20.
2. Ustinov B.V., Ustinov V.P. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2009. № 11-12. pp.118-125.
3. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673
4. Muhamediev T.A. Beton i zhelezobeton. 2013, № 3. pp. 6-8.
5. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials]. M: Strojizdat. 2004. 144p.
6. Chernjavskij, V.A., Aksel'rod E.Z. Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2003. № 3. pp. 15-16.
7. Terjanik V.V., Birjukov A.Ju. Vestnik JuUrGU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2009. №35 (168). URL: clck.ru/QgtxD
8. Benzaid R., Mesbah H.A., Amel B. 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure (IRF). Inegiinst engenharia mecanica e gestao industrial, 2016. pp. 595-602.
9. CSA S806-12. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association (CSA); 2012.
10. El-Refaire S.A. Ph.D. thesis, department of civil and environmental engineering. University of Bradford; UK, 2001. P. 207.
11. Mkrтчjan A.M., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1817



12. Radchenkov A.V., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879

13. Kostenko A.N. Prochnost' i deformativnost' central'no i vnecentrenno szhatyh kirpichnyh i zhelezobetonnyh kolonn, usilennyh ugl'em i steklovoloknom. [Strength and deformability of centrally and eccentrically compressed brick and reinforced concrete columns reinforced with carbon and fiberglass]. Avtoreferat. diss. kand. tehn. Nauk. Moskva. 2010. 26p.

14. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-2. pp. 415-418.