

К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами

С.В. Георгиев¹, З.А. Меретуков², А. И. Соловьева¹

¹Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону.

²Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп

Аннотация: На основании экспериментальных данных было установлено, что при расчёте гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами в поперечном направлении, недооценивается норма прочности элементов. Влияние композитного усиления не учитывается при расчете жесткости D , условной критической силы $N_{кр}$ и коэффициента гибкости η . Опытные данные проведенных экспериментов показали, что прогибы усиленных стоек были меньше аналогичных, не усиленных образцов, следовательно влияние имеет место. На основе анализа результатов экспериментов, в методику норм при вычислении D внесены предложения, которые учитывают шаг поперечного усиления при разных эксцентриситетах приложения нагрузки.

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

Эффективность использования композитных материалов в области усиления железобетонных конструкций, в последние годы все больше подтверждается в научных исследованиях [1,2]. Высокие прочностные свойства и схожий с металлом модуль упругости композитных материалов на основе углепластика [3-5], а также простота методики выполнения работ по усилению [6], делают этот метод таким же эффективным, как и традиционные варианты усиления с применением бетона и металла, а в ряде случаев, применение композитов является более эффективным или даже единственным [7,8].

В области усиления сжатых элементов открывается целый ряд конструкций, в которых применение композитных материалов было бы наиболее экономичным и эффективным [9;10]. К таким конструкциям можно отнести железобетонные колонны мостов, эстакад, путепроводов, промышленных зданий, где использование композитных материалов дает ряд преимуществ [11-13]. Из которых можно выделить следующие: повышенное сопротивление к агрессивному воздействию окружающей среды; удобную

технологии выполнения работ по усилению, с минимальным набором инструментов, что является особенно актуальным для удаленных от городов объектов; существенный прирост прочности усиливаемых конструкций.

Расположение композитных материалов в поперечном направлении увеличивает прочность бетона на сжатие и наряду с высокопрочными [14], увеличивают рациональность использования бетона в строительстве.

Однако до сих пор не решен ряд вопросов в нормативной литературе, по теоретической оценке работы элементов, усиленных композитными материалами. Так, согласно расчетным методикам СП164.1325800.2014 в области усиления сжатых элементов имеется ряд допущений. К одному из таких можно отнести определение условной критической силы N_{cr} для железобетонных гибких стоек, усиленных композитными материалами в поперечном направлении, без учёта влияния усиления, то есть условная критическая сила находится как для обычных железобетонных образцов без усиления.

Полученные прогибы железобетонных колонн разной гибкости, в результате проведенных экспериментальных исследований [15-17], опровергли это. В работе [15] было установлено, что чем меньше расстояние в свету между хомутами, тем меньше прогибы, что говорит о влиянии усиления на жесткость железобетонных стоек, при этом образцы имели одинаковые характеристики и методику испытаний.

В работе по совершенствованию методики расчета гибких железобетонных стоек учитывались результаты исследований [18] по определению относительной деформации бетона ε_{b3} .

Ниже приведены формулы из СП164.1325800.2014 для определения понижающего коэффициента η , учитывающего влияние гибкости. Важными характеристиками, влияющими на величину коэффициента η являются

жёсткость D и условная критическая сила N_{cr} . Как видно из формул (2,3,4), влияние композитного усиления, на изменение величин жёсткости и условной критической силы отсутствует, а как было установлено ранее его необходимо в формулах учесть.

$$\eta = \frac{1}{1 - N/N_{cr}} \quad (1)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2} \quad (2)$$

$$D = k_b E_b I + k_s E_s I_s, \quad (3)$$

$$\text{где } k_b = \frac{0,15}{\varphi_l (0,3 + \delta_e)} \quad (4)$$

Учитывая результаты ранее выполненных исследований [15,16] и анализ нормативных формул СП164.1325800.2014, было установлено, что композитное поперечное усиление влияет на прочностные свойства бетона железобетонных сжатых элементов. Логично считать, что влияние на жесткость D образцов от поперечного усиления, также зависит от уровня обжатия композитными материалами. Следовательно, было принято решение ввести в формулу (4) поправочный коэффициент, который будет выведен через полученные экспериментальные прогибы [15], значения которых приведены в табл. 1. Формула 3 примет следующий вид:

$$k_b = k_{f2} \frac{0,15}{\varphi_l (0,3 + \delta_e)} \quad (4)$$

Было установлено, что коэффициент k_{f2} зависит от гибкости железобетонных образцов, эксцентриситета приложения нагрузки и шага композитных хомутов, выражаемого через нормативный коэффициент k_e .

При выводе формулы для определения коэффициента k_{f2} была использована зависимость (6) значений экспериментальных прогибов f^{exp} и коэффициента гибкости η .

$$e_0 \eta = e_0 + f^{exp}, \quad (6)$$

Используя заданные значения e_0 и экспериментальные прогибы f^{exp} всех образцов, были найдены экспериментальное значение η^{exp} .

Для определения экспериментальных значений коэффициентов k_{f2}^{exp} , была построена блок схема, которая представлена на рис.1. Слева приведены нормативные формулы, справа – формулы вычисления экспериментальных промежуточных характеристик, позволяющих определить k_{f2}^{exp} . Численные значения всех характеристик опытных образцов приведены в табл. 1. Используя эти значения была выведена формула (7) определения теоретических значений коэффициентов k_{f2} .

$$\begin{array}{l}
 e_0 \eta = e_0 + f \longrightarrow \eta^{exp} = \frac{e_0 + f^{exp}}{e_0} \\
 \eta = \frac{1}{1 - N / N_{cr}} \longrightarrow N_{cr}^{exp} = \frac{N^{exp}}{1 - 1/\eta^{exp}} \\
 N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2} \longrightarrow D^{exp} = \frac{N_{cr}^{exp} \cdot l_0^2}{\pi^2} \\
 D = k_b E_b I + k_s E I_s \longrightarrow k_b^{exp} = \frac{D^{exp} - k_s \cdot E_s \cdot I_s}{E_b \cdot I} \\
 k_b^{exp} = k_{f2}^{exp} \cdot k_b = k_{f2}^{exp} \cdot \frac{0,15}{\varphi_1(0,3 + \delta_e)} \longrightarrow k_{f2}^{exp} = \frac{k_b^{exp} \cdot \varphi_1(0,3 + \delta_e)}{0,15}
 \end{array}$$

Рис. 1. Вывод формулы определения экспериментального коэффициента k_{f2}^{exp}

Таблица 1

Экспериментальные значения промежуточных характеристик, позволяющих определить k_{f2}^{exp}

Шифр	N^{exp} , кН	e_0 , мм	f^{exp} , мм	η^{exp}	N_{cr}^{exp} , кН	D^{exp} , кН·м ²	k_b^{exp}	k_{f2}^{exp}	k_{f2}^{theor}	$\frac{k_{f2}^{theor}}{k_{f2}^{exp}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АК	1150	2	0,85	1,43	3855,9	563153,7	0,333	-	1,00	-
АКУ-Х ₁	1190,5	2	0,6	1,30	5158,8	753450,4	0,474	1,43	1,42	1.01
АКУ-Х ₆	1600	2	0,5	1,25	8000,0	1168404	0,710	2,12	2,13	1.00
АКУ-Х ₅	1625	2	0,4	1,20	9750,0	1423993	0,937	2,81	2,81	1.00
БК	592,5	22	4,35	1,20	3589,1	524183	0,315	-	1,00	-
БКУ-Х ₁	778,9	22	4,9	1,22	4276,0	624512,4	0,385	1,24	1,22	1.02
БКУ-Х ₂	794,7	22	4,7	1,21	4514,6	659355,8	0,408	1,27	1,30	0.98
БКУ-Х ₅	844	22	4,8	1,22	4712,3	688238,9	0,420	1,34	1,33	1.01

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ВК	422,2	42	7	1,17	2870,0	419165,1	0,236	-	1,00	-
ВКУ-Х ₁	482,5	42	7,5	1,18	3184,5	465098	0,267	1,13	1,13	1.00
АГ	803	4	7,4	2,85	1237,1	722689,7	0,451	-	1,00	-
АГУ-Х ₁	873,2	4	3,5	2,17	1621,7	947375,7	0,609	1,32	1,31	1.01
АГУ-Х ₃	900	4	4,5	2,13	1700,0	993143,7	0,658	1,32	1,46	0.90
АГУ-Х ₅	1080	4	2	1,50	3240,0	1892815	1,297	2,87	2,87	1.00
БГ	410	24	21,3	1,89	872,0	509407,9	0,305	-	1,00	-
БГУ-Х ₁	400	24	20,5	1,85	868,3	507258,5	0,304	1,00	1,00	1.00
БГУ-Х ₃	450	24	20	1,83	990,0	578360,2	0,349	1,00	1,14	0.88
БГУ-Х ₅	597,5	24	15,3	1,64	1534,8	896607,2	0,549	1,80	1,80	1.00
ВГ	242,5	44	23,3	1,53	700,4	409198,5	0,231	-	1,00	-
ВГУ-Х ₃	290	44	28,5	1,65	737,7	430977,2	0,245	1,00	1,07	0.93
ВГУ-Х ₅	270	44	25,3	1,58	739,6	432055,6	0,252	1,10	1,10	1.00

$$k_{f2} = k_e \cdot \left[(91,8 - 4,681\lambda_h) \cdot \left(\frac{e_0}{h}\right)^2 + (1,581\lambda_h - 40,115) \cdot \left(\frac{e_0}{h}\right) + 0,0269\lambda_h + 2,87 \right] + (2,809\lambda_h - 48,686) \cdot \left(\frac{e_0}{h}\right)^2 + (20,312 - 0,982\lambda_h) \cdot \left(\frac{e_0}{h}\right) - 0,0168\lambda_h + 0,0663 \quad (7)$$

Учитывая сложность формулы вычисления коэффициента k_{f2} для инженерных целей для удобства, была разработана таблица 2 численных значений коэффициентов k_{f2} .

Таблица 2

Определение коэффициента k_{f2}

k_e	λ_h	e_0/h			
		0,01	0,1	0,2	0,3
0,5	10	1,45	1,32	1,21	1,14
	20	1,4	1,14	0,98	1,95
0,6	10	1,74	1,44	1,22	1,13
	20	1,73	1,4	1,15	1,0
0,7	10	2,03	1,55	1,23	1,12
	20	2,06	1,65	1,31	1,09
0,8	10	2,23	1,67	1,23	1,11
	20	2,4	1,9	1,47	1,16
0,9	10	2,61	1,78	1,24	1,1
	20	2,73	2,16	1,64	1,23
1	10	2,9	1,9	1,25	1,09
	20	3,06	2,41	1,8	1,3

Результаты расчёта по прочности стоек, с учетом коэффициента k_{f2} приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение экспериментальных и теоретических значений прочности стоек нормативного расчета и с учетом предложений авторов

Шифр образца	Параметры расчета		Результаты эксперимента		Результаты нормативного расчета		Результаты расчета с учетом предложений авторов			
	λ_h	e_0	$R_{b,n}^{exp}$, МПа	N^{exp} , кН	N^{theor} , кН	$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$	N_{cr} , кН	η^{theor}	N^{theor} , кН	$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$
1	2	3	4	5	6	14	9	10	11	12
АКУ-Х ₁	10	0,2	282,3	1190,5	1188,0	1,00	518800	1,28	1156	0,97
АКУ-Х ₆	10	0,2	363,7	1600	1191,0	0,74	797093	1,22	1462	0,91
АКУ-Х ₅	10	0,2	283,0	1625	1298,0	0,80	976040	1,15	1275	0,78
БКУ-Х ₁	10	2,2	282,3	778,9	667,0	0,86	433565	1,18	676	0,87
БКУ-Х ₂	10	2,2	284,5	794,7	686,0	0,86	443950	1,18	699	0,88
БКУ-Х ₅	10	2,2	302,9	844	754,0	0,89	473548	1,19	777	0,92
ВКУ-Х ₁	10	4,2	309,9	482,5	442,0	0,92	318305	1,16	450	0,93
АГУ-Х ₁	20	0,4	280,9	873,2	760,0	0,87	120515	3,7	876	1,00
АГУ-Х ₃	20	0,4	259,3	900	733,0	0,81	117570	3,5	838	0,93
АГУ-Х ₅	20	0,4	259,3	1080	756,0	0,70	242142	1,8	1077	1,00
БГУ-Х ₁	20	2,2	280,9	400	438,0	1,10	86960	2,0	431	1,08
БГУ-Х ₃	20	2,2	291,3	450	442,0	0,98	80865	2,0	439	0,98
БГУ-Х ₅	20	2,2	331,7	597,5	489,0	0,82	153637	1,66	610	1,02
ВГУ-Х ₃	20	4,4	315,6	290	266,0	0,92	70000	1,62	269	0,93
ВГУ-Х ₅	20	4,4	283,0	270	275,0	1,02	74270	1,6	277	1,03
					$\sum \Delta^2 = 0,355$				$\sum \Delta^2 = 0,118$	

После введения коэффициента k_{f2} сумма среднеквадратических отклонений прочностей уменьшилась от нормативного расчета в 3 раза, с 0,355 до 0,118.

Литература

1. Мухамедиев Т.А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композиционными материалами // Бетон и железобетон. № 3 2013. С. 6-8.

2. Чернявский, В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 15-16.
 3. Устинов Б.В., Устинов В.П. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) // Известия вузов. Строительство. 2009. № 11-12. С.118-125.
 4. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. CSA S806-12. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association (CSA); 2012.
 5. 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
 6. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // М: Стройиздат. 2004. 144с.
 7. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2001. №6 С. 17-20.
 8. Пинаджян, В.В. К вопросу усиления железобетонных конструкций // Строительная промышленность. - 1948. - № 3 - С. 14-17.
 9. 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
 10. 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.
-

11. Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле и стекловолокном. Автореферат. дисс. канд. техн. Наук. Москва. 2010. 26с.
 12. Поднебесов, П. Г. Результаты исследований прочности и деформативности железобетонных колонн, усиленных обоями // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья. 2015. С. 42-47.
 13. Онуфриев, Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. – Москва: Стройиздат - 1965. 342с.
 14. 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
 15. Польской П.П., Георгиев С.В. Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов // Инженерный вестник Дона, 2017, № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826
 16. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах // Научное обозрение. 2014. № 12-2. С. 496-499.
 17. Польской П.П., Георгиев С.В. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика // Научное обозрение. 2014. № 10-3. С. 662-666.
 18. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Кремененко А.Г. К определению относительной деформации усиленного бетона ϵ_{b3} сжатых железобетонных гибких стоек, усиленных композитными материалами, расположенными в поперечном направлении // Инженерный вестник Дона, 2020, № 10. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6649
-

References

1. Muhamediev T.A. Beton i zhelezobeton. № 3. 2013. pp. 6-8.
2. Chernjavskij, V.A., Aksel'rod E.Z. Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2003. № 3. pp. 15-16.
3. Ustinov B.V., Ustinov V.P. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2009. № 11-12. pp.118-125.
4. CSA S806-12. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association (CSA); 2012.
5. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P. Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 2 (25). S. 98.
6. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. M: Strojizdat. 2004. 144p.
7. Hajutin Ju.G., Chernjavskij V.L., Aksel'rod E.Z. Beton i zhelezobeton. 2001. №6 pp. 17-20.
8. Pinadzhjan, V.V. Stroitel'naja promyshlennost'. -1948. № 3. pp. 14-17.
9. Terjanik V.V., Birjukov A.Ju. Vestnik JuUrGU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2009. №35 (168). URL:clck.ru/QgtxD
10. 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.
11. Kostenko A.N. Prochnost' i deformativnost' central'no i vnecentrenno szhatyh kirpichnyh i zhelezobetonnyh kolonn, usilennyh ugle 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.
12. Podnebesov, P. G. Gradostroitel'stvo, rekonstrukcija i inzhenernoje obespechenie ustojchivogo razvitija gorodov Povolzh'ja. 2015. pp. 42-47.



13. Onufriev, N.M. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij promyshlennyh zdaniy i sooruzhenij [Strengthening of reinforced concrete structures of industrial buildings and structures] Moskva: Strojizdat. 1965. 34P.
14. Mkrtchjan A.M., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1817
15. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826
16. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12-2. S. 496-499.
17. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-3. S. 662-666.
18. Georgiev S.V., Meretukov Z.A., Kremenenko A.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 10. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6649