

Отличия расчёта колонн из высокопрочного бетона по нормам

А.М. Мкртчян, В.Н. Аксенов

В российских нормах для расчёта железобетонных колонн используют недеформированный метод расчёта.

Известно, что в новом СП для расчёта колонн по недеформированной схеме формула критической силы выглядит следующим образом:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}, \quad (1)$$

где $D = \omega k_b E_b I + k_s E_s I_s. \quad (2)$

Расчет колонн по недеформированной схеме велся в соответствии с нормами [1 – 3]. Для расчёта использовались экспериментальные данные о работе колонн из высокопрочных бетонов классов В87 и В109. Гибкости колонн были приняты 8,33; 16,67; 20; 25; 30 [4 – 9]. Относительный эксцентриситет был принят равным 0; 0,2 и 0,5. Так же было изучено влияние коэффициента армирования, который был принят 1,5 % , 2,26 % и 3,4 %. Влияние прогиба на несущую способность стоек учитывалось умножением значения осевого эксцентриситета продольного усилия e_0 на коэффициент η . Принятая в нормах зависимость для определения условной критической силы железобетонного элемента содержит в себе некоторые коэффициенты, снижающие итоговое значение N_{cr} . Для обсчёта же экспериментальных образцов, формула условной критической силы была принята по данным [1].

Случайный эксцентриситет определялся в соответствии с требованиями нормативных документов и для центрально сжатых элементов был принят равным 4 мм. Значение 10 мм не принималось в расчет, так как технология изготовления и испытания колонн исключала столь значительную ошибку. Для расчёта внецентренно сжатых элементов значение e_0 принималось равным фактическому эксцентриситету e_0 .

Таблица 1

Результаты расчета колонн по недеформированной схеме по СНиП [1]

По эксперименту				Расчет по недеформированной схеме			
Шифр колонн	Шифр колонн	Несущая способность, N, кН	f, мм	Несущая способность, N, кН	$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$	f, см	$\frac{f^{theor}}{f^{exp}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
К-1	К-8,33-1,5-0	2190	0,2	2364,1	1,079	0,002	0,100
К-2	К-16,67-1,5-0	2080	9,4	2358,37	1,134	0,016	0,017
К-3	К-25-1,5-0	1850	12,8	2364,83	1,278	2,5	1,953
К-4	К-8,33-1,5-0,2	1500	2,2	1152,63	0,768	0,484	2,200
К-5	К-16,67-1,5-0,2	1320	16,5	783,7	0,594	2,012	1,219
К-6	К-25-1,5-0,2	1050	46,4	1331	1,268	0	0,000
К-7	К-8,33-1,5-0,5	610	5,1	528,13	0,866	0,744	1,459
К-8	К-16,67-1,5-0,5	500	21,3	366,41	0,733	2,647	1,243
К-9	К-25-1,5-0,5	380	55,5	588,56	1,549	6,9	1,243
К-10	КЛ-30-3,4-0	1600	20,1	2397,36	1,498	3,1	1,542
К-11	КЛ-30-3,4-0,2	780	48	1267,32	1,625	5,8	1,208
К-12	КЛ-30-3,4-0,5	330	56,8	571,17	1,731	8,6	1,514
К-13	КЛ-30-2,26-0	1220	21	2176,41	1,784	3,32	1,581
К-14	КЛ-30-2,26-0,2	720	55,3	1187	1,649	6,82	1,233
К-15	КЛ-30-2,26-0,5	280	50,2	492,87	1,760	6,99	1,392
К-16	КЛ-20-2,26-0	1640	0,5	2671,41	1,629	1,1	22,000
К-17	КЛ-20-2,26-0,2	1000	18	1187	1,187	2,4	1,333
К-18	КЛ-20-2,26-0,5	380	21,4	249,82	0,657	3,457	1,615
Среднеквадратическое отклонение по N, кН						494,28	

Из таблицы, очевидно, что формула для определения N_{cr} , используемая в СНиП [1] даёт сильно отклонение от экспериментальных данных для высокопрочных бетонов. Во многих случаях вычисленная критическая сила оказалась меньше реальной несущей способности стойки.

Для решения этой проблемы В.Н. Аксёнов давал предложение по корректировке указанной формулы, добавив поправочный коэффициент k (3),

который характеризует работу высокопрочных бетонов, как при наличии предварительной арматуры, так и без [4].

$$N_{cr} = \frac{8 \cdot E_b}{\ell_0^2} \left[\frac{I}{\varphi_\ell} \left(\frac{0,11 \cdot k}{0,1 + \frac{\delta_e}{\varphi_p}} + 0,1 \right) + \alpha \cdot I_s \right], \quad (3)$$

где $k = 2,48 + 0,0004 \cdot \sigma_{sp} - 0,0625 \cdot \lambda_h + 4,33 \cdot \delta_e$. (4)

В таблице 2 проведены расчёты с использованием формулы (3) и коэффициента k по формуле (4).

Таблица 2

Результаты расчета колонн по недеформированной схеме по СНиП [1] с учетом предложенных корректировок

По эксперименту				Расчёт по недеформированной схеме с учетом (3) и (4)			
Шифр колонн	Шифр колонн	Несущая способность, N, кН	$f, \text{мм}$	Несущая способность, N, кН	$\frac{N^{\text{theor}}}{N^{\text{exp}}}$	$f, \text{см}$	$\frac{f^{\text{theor}}}{f^{\text{exp}}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
К-1	К-8,33-1,5-0	2190	0,2	2289,21	1,045	0,002	0,100
К-2	К-16,67-1,5-0	2080	9,4	2199,21	1,057	0,021	0,022
К-3	К-25-1,5-0	1850	12,8	2243,37	1,213	1,8	1,406
К-4	К-8,33-1,5-0,2	1500	2,2	1512,34	1,008	0,32	1,455
К-5	К-16,67-1,5-0,2	1320	16,5	1337,88	1,014	2,02	1,224
К-6	К-25-1,5-0,2	1050	46,4	1102,31	1,050	5,5	1,185
К-7	К-8,33-1,5-0,5	610	5,1	608,36	0,997	0,7	1,373
К-8	К-16,67-1,5-0,5	500	21,3	503,99	1,008	2,4	1,127
К-9	К-25-1,5-0,5	380	55,5	402,56	1,059	6,12	1,103
К-10	КЛ-30-3,4-0	1600	20,1	1591,62	0,995	2,87	1,428
К-11	КЛ-30-3,4-0,2	780	48	800,32	1,026	5,22	1,088
К-12	КЛ-30-3,4-0,5	330	56,8	376,91	1,142	4,98	0,877
К-13	КЛ-30-2,26-0	1220	21	1302,41	1,068	1,76	0,838
К-14	КЛ-30-2,26-0,2	720	55,3	735,2	1,021	5,79	1,047
К-15	КЛ-30-2,26-0,5	280	50,2	300,59	1,074	5,09	1,014

К-16	КЛ-20-2,26-0	1640	0,5	1682,4	1,026	0,9	18,000
К-17	КЛ-20-2,26-0,2	1000	18	997,17	0,997	1,44	0,800
К-18	КЛ-20-2,26-0,5	380	21,4	372,95	0,981	3,457	1,615
Среднеквадратическое отклонение по N, кН						101.31	

Сопоставление данных таблиц 1 и 2 свидетельствует о том, что предложенная корректировка формулы (3) при расчете колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме позволяет значительно сократить разницу между фактической несущей способностью стойки и расчетной. Так, среднеквадратическое отклонение N снизилось в 4,9 раза.

Результаты расчета колонн по недеформированной схеме по новым нормам [2, 3] с учетом фактических прочностных характеристик бетона и арматуры приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета колонн по недеформированной схеме по нормативной методике

Шифр образ-ца	Параметры расчета			Результаты эксперимента		Результаты расчета по нормам [3]			$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$
	$\mu, \%$	λ_h	e_0/h	$N^{exp},$ кН	$R_b,$ МПа	$N^{theor},$ кН	$N_{cr},$ кН	η	
К-1	1,5	8,33	0	2190	78,0	2328,2	7210,9	1,477	1,06
К-2	1,5	16,7	0	2080	78,0	2412,2	1802,7	—	1,16
К-3	1,5	25	0	1850	78,0	2412,2	801,2	—	1,30
К-4	1,5	8,33	0,2	1500	78,0	1225,5	5107,8	1,316	0,82
К-5	1,5	16,7	0,2	1320	78,0	1530,3	1277,0	—	1,16
К-6	1,5	25	0,2	1050	78,0	1530,3	567,6	—	1,46
К-7	1,5	8,33	0,5	610	78,0	456,2	3530,5	1,148	0,75
К-8	1,5	16,7	0,5	500	78,0	279,2	882,6	1,463	0,56
К-9	1,5	25	0,5	380	78,0	576,4	392,3	—	1,52
К-10	3,4	30	0	1600	105,0	2304,7	457,5	—	1,44
К-11	3,4	30	0,2	780	105,0	1432,5	331,9	—	1,84
К-12	3,4	30	0,5	330	105,0	593,2	238,1	—	1,80
К-13	2,26	30	0	1220	105,0	1689,8	2234,4	4,103	1,39
К-14	2,26	30	0,2	720	105,0	1374,2	304,7	—	1,91
К-15	2,26	30	0,5	280	105,0	504,2	210,9	—	1,80
К-16	2,26	20	0	1640	105,0	2190,4	968,1	—	1,34
К-17	2,26	20	0,2	1000	105,0	1374,2	685,6	—	1,37
К-18	2,26	20	0,5	380	105,0	504,2	474,4	—	1,33

Шифр образ- ца	Параметры расчета			Результаты эксперимента		Результаты расчета по нормам [3]			$\frac{N^{theor}}{N^{exp}}$
	$\mu, \%$	λ_h	e_0/h	$N^{exp},$ кН	$R_b,$ МПа	$N^{theor},$ кН	$N_{cr},$ кН	η	
Среднеквадратическое отклонение по N, кН						414,1			

При анализе данных табл. 3 прежде всего обращает на себя внимание тот факт, что для большей части внецентренно сжатых колонн, а также для «центрально» сжатых стоек большой гибкости получена несущая способность, превышающая величину условной критической силы, поэтому воспользоваться формулой вычисления коэффициента продольного изгиба, η , не представляется возможным. Делаем вывод о том, что значения условной критической силы, полученные по формуле (1), занижены. Так как условная критическая сила в новых нормах вычисляется по классической формуле Эйлера [10], то корректировку необходимо вносить в формулу (2) для определения жесткости железобетонного элемента.

Для учета особенностей работы железобетонных колонн из высокопрочного бетона введем поправку к первому слагаемому в формуле (2), определяющему жесткость бетонного сечения элемента. Тогда формула D, предлагаемая автором, будет иметь следующий вид:

$$D = \omega k_b E_b I + k_s E_s I_s. \quad (5)$$

Рекомендуемые значения эмпирического коэффициента ω были определены из сопоставления экспериментальных данных и вычислений, проводимых при помощи программы «Колонна 2014» [11]:

$$\omega = \left| 27 + \frac{(B-87)}{0,1 \cdot \frac{\lambda}{\mu} + \delta_e + 0,033} - 20 \cdot \mu + 0,3 \cdot \lambda + \frac{\delta_e}{1,5 - \delta_e} \right|. \quad (6)$$

Результаты расчета экспериментальных стоек из высокопрочного бетона с использованием предложенной формулы (5), где коэффициент ω , учитывающий особенности высокопрочных бетонов при определении условной критической силы, определялся по зависимости (6), приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета колонн и определение значений коэффициента ω

Но- мер образ- ца	Параметры расчета			Результаты эксперимен- та		Результаты расчета и подобранные значения коэффициента ω				
	μ , %	λ_h	e_0/h	N^{exp} , кН	R_b , МПа	N^{theor} , кН	ω	N_{cr} , кН	η	$\frac{N^{\text{theor}}}{N^{\text{exp}}}$
К-1	1,5	8,33	0	2190	78,0	2202,0	0,5	4056,3	2,188	1,01
К-2	1,5	16,7	0	2080	78,0	2116,0	2	3222,3	2,913	1,02
К-3	1,5	25	0	1850	78,0	2093,0	4,5	3254,7	2,802	1,13
К-4	1,5	8,33	0,2	1500	78,0	1343,2	1,8	8472,7	1,188	0,90
К-5	1,5	16,7	0,2	1320	78,0	1204,2	4,3	4747	1,340	0,91
К-6	1,5	25	0,2	1050	78,0	1079,5	6,8	3278,1	1,491	1,03
К-7	1,5	8,33	0,5	610	78,0	550,1	7	19303	1,029	0,90
К-8	1,5	16,7	0,5	500	78,0	503,7	9,5	6468,9	1,084	1,01
К-9	1,5	25	0,5	380	78,0	458,5	12	3605,3	1,146	1,21
К-10	3,4	30	0	1600	105,0	1780,0	6,08	2366,8	4,033	1,11
К-11	3,4	30	0,2	780	105,0	904,3	8,72	2264,4	1,665	1,16
К-12	3,4	30	0,5	330	105,0	373,2	8,19	1362,9	1,377	1,13
К-13	2,26	30	0	1220	105,0	1228,5	7,79	2982,4	1,700	1,01
К-14	2,26	30	0,2	720	105,0	825,53	7,83	2014,4	1,694	1,15
К-15	2,26	30	0,5	280	105,0	343,48	10,56	1706,5	1,252	1,23
К-16	2,26	20	0	1640	105,0	1665,34	13,63	11649	1,167	1,02
К-17	2,26	20	0,2	1000	105,0	1109,8	11,02	4909,8	1,292	1,11
К-18	2,26	20	0,5	380	105,0	422,44	11,57	4195,3	1,112	1,11
Среднеквадратическое отклонение по N , кН						105,3				

Предложенная автором корректировка расчета по недеформированной схеме позволяет использовать указанный метод для расчета колонн из высокопрочного бетона. При этом среднеквадратическое отклонение экспериментальной несущей способности от расчетной с учетом предложений автора снизилось в 3,9 раза по сравнению с расчетом по нормам.

Литература:

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции.– М.: Госстрой СССР, 1985. – 78 с.

2. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 156 с.

3. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.– М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 24 с.

4. Аксенов В.Н. К расчету колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме // Бетон и железобетон.– 2009.– № 1. – С. 24-26.

5. Аксенов В.Н., Маилян Д.Р. Работа железобетонных колонн из высокопрочного бетона // Бетон и железобетон.– 2008.– № 6. – С. 5-8.

6. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

7. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. О коэффициенте призмочной прочности высокопрочных бетонов [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1817> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Mkrtchyan A.M., Mailyan D.R., Aksenov V.N. Experimental study of reinforced concrete columns of high-strength concrete // Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings: Papers of the 2nd International Scientific Conference (September 9–10, 2013). Cibunet Publishing. New York, USA. 2013. P.130-134.

9. Mkrtchyan A.M., Mailyan D.R., Aksenov V.N. Experimental study of the structural properties of high-strength concrete // 5th International Scientific Conference “European Applied Sciences: modern approaches in scientific researches”:

Papers of the 5th International Scientific Conference. August 26–27, 2013, Stuttgart, Germany. 2013. P.81-87.

10. Sheikh S.A., Uzumcri S.M. Analytic Model for Concrete Confinement in Tied Columns. - Journal of the Structural Division. ASCE. Vol. 108, №12, 1982. P. 2703-2722.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661224 «Колонна 2014». Аксенов В.Н., Мкртчян А.М. © РГСУ

Замечания: Отличия расчёта колонн из высокопрочного бетона по нормам

Кусок из отчета или диссертации, даже нумерацию формул и таблиц 1.1, 1.2,... не поменяли. Кстати формулы 1.1 просто нет.

1. Поменять нумерацию таблиц - убрать двойную нумерацию (Табл. 1, Табл. 2, и т.д.) и привести в соответствие ссылки на них.

2. Поменять нумерацию формул, начать с 1, и убрать двойную нумерацию, т.е. (1), (2), (3) и т.д. и привести в соответствие ссылки на них.

3. Поменять нумерацию ссылок. Ссылки нумеровать в порядке упоминания: 1, 2, 3 и т.д. Естественно в квадратных скобках. К примеру вместо [1, 2, 4,5,9,10] надо [1 - 6]. В ссылках, при перечислении, после запятой ставить пробел. Если перечисление подряд, то через тире: первый источник, пробел, тире, пробел, последний источник. Привести в соответствие список литературы.