

И.К. МАНАЕНКОВ¹, С.О. КУРНАВИНА¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СЖАТИЯ ДЛЯ БЕТОНА С КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ В РАМКАХ ТЕОРИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Аннотация. При построении диаграммы работы на сжатия для бетона с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний необходимо назначать прочность материалов с требуемой обеспеченностью. Для этого выполняют переход от средних значений прочности, полученных по результатам экспериментов, к уменьшенным нормативным и расчетным значениям прочности. Ввиду этого возникает противоречие, связанное с тем, что изначально зависимости для определения деформаций, соответствующих вершине диаграммы сжатия, получены для экспериментальных значений прочности, а при расчетах конструкций предлагается использовать уменьшенные нормативные и расчетные значения, что может привести к некорректным результатам. В статье произведено сравнение вычисленных значений относительных деформаций с экспериментальными данными и отмечено существенное завышение значений при расчетах относительно нормативной и расчетной прочностей бетона.

Ключевые слова: косвенное армирование, диаграмма сжатия, сварные сетки, предельная сжимаемость

I.K. MANAENKOV¹, S.O. KURNAVINA¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

PLOTTING A STRESS-STRAIN DIAGRAM FOR CONCRETE WITH INDIRECT REINFORCEMENT ACCORDING TO LIMIT STATE DESIGN

Abstract. When constructing a stress-strain compression diagram for concrete with indirect reinforcement within the framework of the theory of limit state design, it is necessary to assign the strength values of materials with the required security. To do this, a transition is made from average strength value obtained from the results of experiments to reduced characteristic compressive strength and the design value of strength. In view of this, a contradiction arises due to the fact that initially the formulas for determining the deformations corresponding to the top of the compression diagram were obtained for experimental value of strength, and in the calculations of structures it is proposed to use reduced characteristic compressive strength and the design value of strength, which can lead to incorrect results. The article compares the calculated values of strains with experimental data and notes a significant overestimation when calculating by the characteristic compressive strength and the design value of strength.

Keywords: indirect reinforcement, compression diagram, welded mesh, ultimate compressibility.

Введение

Одним из способов повышения прочностных и деформационных характеристик бетона является применение косвенного армирования. Такое армирование ограничивает поперечное расширение бетона и, тем самым, создается объемное напряженное состояние, в рамках которого развитие внутренних трещин в структуре бетона происходит при больших

© Манаенков И.К., Курнавина С.О., 2022

нагрузках и возрастает предел прочности на сжатие (рисунок 1). Данный факт подтверждается большим числом экспериментальных исследований проведенных в России и за рубежом [1-5]. Учеными предлагаются различные конструктивные решения косвенного армирования: трубобетонные элементы [6-9], спиральное армирование [10-12], стеклопластиковые хомуты [13,14], поперечные сварные сетки [15-18] и др. Каждый из вариантов имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от конкретных условий применения. В частности поперечные сварные сетки из-за относительно малого размера ячейки включаются в работу на том участке сечения элемента, на котором возникают сжимающие усилия, благодаря чему эффективно работают как в центрально и внецентренно сжатых [15,16], так и в изгибаемых элементах [17,18].

Так как прочностные и деформационные характеристики бетона в таких конструкциях неоднородны в пределах сечения (рисунок 2), то наиболее универсальным и достаточно простым в использовании методом расчета является нелинейная деформационная модель (НДМ) [19,20]. В основе метода лежит выбор диаграммы деформирования наиболее точно описывающей действительную работу материала. При этом при необходимости выполнения практических расчетов конструкций с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний [21] и назначении нормативных и расчетных характеристик бетона возникает ряд сложностей, которые не имеют должного освещения в российских нормах проектирования [22].

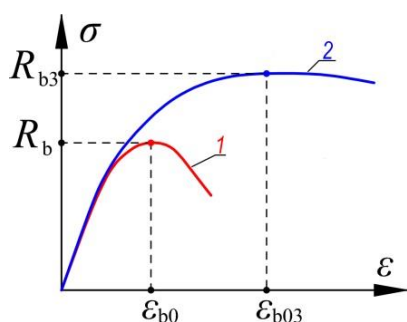


Рисунок 1 – Диаграмма работы бетона на сжатие в условиях бокового обжатия (2) и без (1)

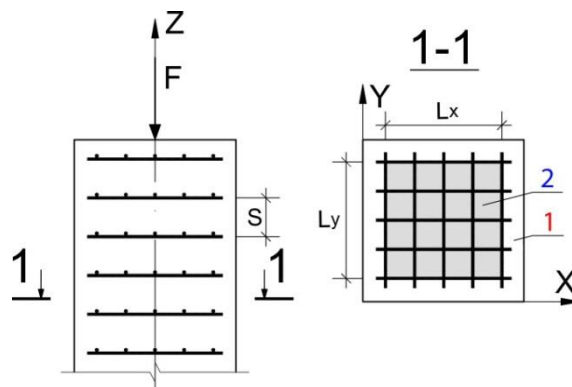


Рисунок 2 – Распределение бетона с различными прочностными и деформативными свойствами в пределах сечения элемента с косвенным армированием сварными сетками

Метод

Для построения диаграммы сжатия бетона с косвенным армированием необходимо определить параметрические точки, наиболее важными из которых являются напряжение R_{b3} и относительные деформации ε_{b03} в вершине диаграммы. Эти величины обычно определяются на основе эмпирических формул, полученных по результатам обработки большой выборки экспериментальных данных. Такой подход связан с тем, что теоретическая оценка прочности бетона, работающего в условиях трехосного сжатия, является весьма сложной задачей и общепринятая универсальная теории прочности отсутствует.

В российских нормах проектирования [22] предложены зависимости:

$$\left. \begin{aligned} R_{b3} &= R_b + \varphi \cdot \mu_{xy} \cdot R_{s,xy}; \\ \varepsilon_{b03} &= \varepsilon_{b0} + 0,02 \cdot \alpha_{red}; \\ \varphi &= 1 / (0,23 + \alpha_{red}); \\ \alpha_{red} &= \mu_{s,xy} \cdot R_{s,xy} / (R_b + 10) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где R_b – призменная прочности бетона на сжатие; $R_{s,xy}$ – прочность стержней косвенного армирования на растяжение; ε_{b0} – относительные деформации, соответствующие вершине

диаграммы сжатия неармированного бетона.; $\mu_{s,xy}$ – коэффициент косвенного армирования, определяемый по формуле (2).

$$\mu_{s,xy} = \frac{A_{sx}L_x + A_{sy}L_y}{L_xL_yS}. \quad (2)$$

В работе [17] предложено определять параметрические точки по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_{b3} &= \left[\frac{1-\rho_{xy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{1-\rho_{xy}}{2} \right)^2 + 9\rho_{xy}} \right] R_b; \\ \rho_{xy} &= \psi_b \mu_{s,xy} R_{s,xy} / R_b; \\ \varepsilon_{bo3} &= e^n \varepsilon_{bo} \\ n &= (2,9224 - 0,00408R_b) \left(0,9\sigma_{b,xy} / R_b \right)^{(0,3124+0,0022R_b)}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\psi_b = 0,375$ – коэффициент неравномерности бокового обжатия для случая применения сварных сеток; $\sigma_{b,xy}$ – усилие бокового обжатия. Выражение для ε_{bo3} получено на основании данных из исследования [2], в котором была произведена обработка большого объема экспериментальных данных для бетонных образцов прочностью 20-110 МПа. Выражение для R_{b3} принято на основании работы [7].

По результатам анализа опытных данных [17,23] установлено, что с ростом прочности бетона на сжатие, установка косвенного армирования менее эффективно повышает прочные характеристики R_{b3} и предельную сжимаемость ε_{bo3} . Этот факт проиллюстрирован на рисунке 3. Аналогичные результаты получены при анализе результатов расчета как по формулам (1), так и по формулам (3) [24].

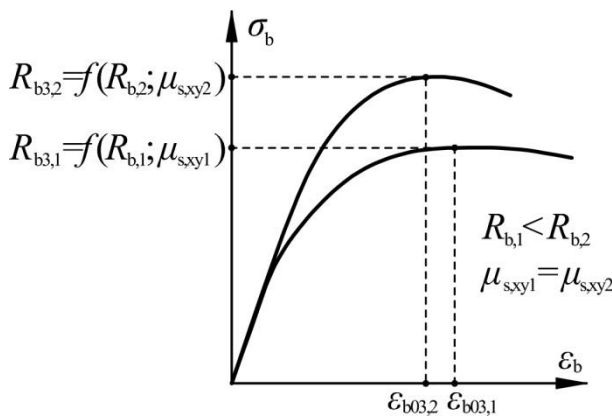


Рисунок 3 - Диаграмма σ - ε для бетона с различной прочностью и одинаковым коэффициентом косвенного армирования

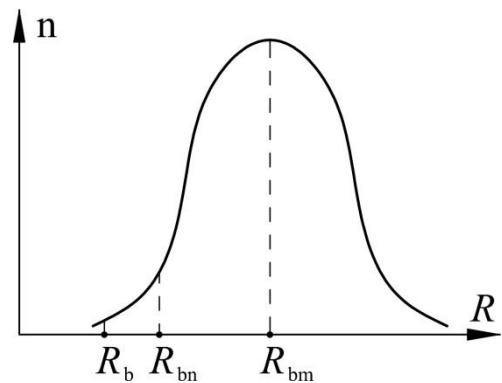


Рисунок 4 - Кривая распределения прочности бетона

При выполнении инженерных расчетов строительных конструкций в рамках теории предельных состояний необходимо назначать прочность материалов с требуемой обеспеченностью. Для этих целей выполняют переход от средних значений прочности R_{bm} , полученных по результатам экспериментов, к уменьшенным нормативным R_{bn} и расчетным значениям прочности R_b (рисунок 4). Переход к нормативному значению прочности производят через коэффициент вариаций v , который можно принять равным 13,5% (по результатам статистической обработки результатов контроля качества на заводах ЖБИ):

$$R_{bn} = R_{bm} (1 - 1,64v). \quad (4)$$

Расчетное значение прочности получается из нормативного в результате деления на коэффициент надежности по материалу:

$$R_b = R_{bn} / \gamma_m \quad (5)$$

Ввиду вышесказанного возникает противоречие, связанное с тем, что изначально зависимости для определения предельной сжимаемости получены для экспериментальных значений прочности, а при расчетах конструкций предлагается использовать уменьшенные нормативные и расчетные значения, что может привести к некорректному определению деформативности ε_{b03} .

Несмотря на то, что основным фактором, повышающим предельную сжимаемость бетона, является процент косвенного армирования в исследованиях [15] отмечено также влияние продольного высокопрочного армирования. Принимая это во внимание для сравнения с результатами расчетов по формулам (1) и (3) были выбраны экспериментальные данные для центрально сжатых образцов с косвенным армированием в виде поперечных сварных сеток и продольным армированием класса А-III и ниже (либо без продольного армирования), обработанные в [17]. Параметры опытных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры образцов, испытанных различными авторами

№ п/п	Автор	Продольное армирование	R_{bm} , МПа	R_{bn} , МПа	R_b , МПа	Косвенное армирование	μ_{xy}	$\varepsilon_{b03}^{экс.}$
1	Я. Хензел	-	30,9	24,1	18,5	St,IVb	0,045	0,0058
2		-	23,8	18,5	14,3	St,IVb	0,045	0,0087
3		-	13,1	10,2	7,8	St,IVb	0,045	0,0130
4		-	30,9	24,1	18,5	St,IVb	0,040	0,0068
5		-	23,8	18,5	14,3	St,IVb	0,040	0,0089
6		-	13,1	10,2	7,8	St,IVb	0,040	0,0134
7	Б.П. Филиппов	А-III	49,2	38,3	29,5	А-III	0,049	0,0095
8		А-III	49,2	38,3	29,5	А-III	0,049	0,0090
9		А-III	49,2	38,3	29,5	А-III	0,016	0,0037
10		А-III	49,0	38,2	29,3	А-III	0,016	0,0035
11		А-III	34,5	26,9	20,7	А-III	0,049	0,0140
12		А-III	31,5	24,5	18,9	А-III	0,049	0,0130
13		А-III	30,0	23,4	18,0	А-III	0,016	0,0060
14		А-III	30,0	23,4	18,0	А-III	0,016	0,0050
15	М. Шериф	А-III	58,0	45,2	34,7	А-III	0,075	0,0081
16		А-III	58,0	45,2	34,7	А-III	0,102	0,0080
17		А-III	58,0	45,2	34,7	А-III	0,052	0,0060
18		А-III	58,0	45,2	34,7	А-III	0,020	0,0044
19		А-III	42,7	33,2	25,6	А-III	0,021	0,0043
20	Н.Г. Матков	А-I	22,3	17,4	13,4	А-III	0,054	0,0080
21	К.К. Бакиров	-	42,2	32,9	25,3	А-III	0,042	0,0055
22		-	41,2	32,1	24,7	А-III	0,019	0,0043
23		А-III	42,0	32,7	25,2	А-III	0,019	0,0045
24		А-III	42,0	32,7	25,2	А-III	0,019	0,0043
25	Ю.Н. Карнет	А-I	58,1	45,2	34,8	А-I	0,052	0,0053
26		А-I	57,2	44,5	34,3	А-I	0,052	0,0053
27		А-I	46,0	35,8	27,6	А-I	0,052	0,0052
28		А-I	58,5	45,5	35,0	А-I	0,026	0,0037
29		А-I	53,4	41,6	32,0	А-I	0,026	0,0042
30		А-I	56,3	43,8	33,7	А-I	0,026	0,0042

Результаты исследования и их анализ

Результаты расчета предельной сжимаемости по формулам (1) и (3) и сравнение с экспериментальными данными приведены в таблице 2. Деформации вычислялись как для определенных по результатам экспериментов средних значений прочности, так и для вычисленных по формулам (4) и (5) нормативных и расчетных значений.

Таблица 2 – Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

№ п/п	По формулам (1)			По формулам (3)		
	$\varepsilon_{b03} = f(R_{bm});$ ($\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$)	$\varepsilon_{b03} = f(R_{bn});$ ($\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$)	$\varepsilon_{b03} = f(R_b);$ ($\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$)	$\varepsilon_{b03} = f(R_{bm});$ ($\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$)	$\varepsilon_{b03} = f(R_{bn});$ ($\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$)	$\varepsilon_{b03} = f(R_b);$ ($\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$)
1	0,0174; (0,50)	0,0202; (0,43)	0,0234; (0,37)	0,0110; (0,79)	0,0121; (0,72)	0,0133; (0,65)
2	0,0245; (0,53)	0,0277; (0,47)	0,0311; (0,42)	0,0137; (0,95)	0,0147; (0,88)	0,0157; (0,83)
3	0,0133; (0,51)	0,0156; (0,44)	0,0182; (0,37)	0,0091; (0,75)	0,0103; (0,66)	0,0114; (0,59)
4	0,0157; (0,57)	0,0182; (0,49)	0,0211; (0,42)	0,0103; (0,86)	0,0114; (0,78)	0,0126; (0,71)
5	0,0220; (0,61)	0,0249; (0,54)	0,0279; (0,48)	0,0129; (1,04)	0,0140; (0,96)	0,0150; (0,89)
6	0,0147; (0,39)	0,0173; (0,34)	0,0202; (0,29)	0,0097; (0,59)	0,0109; (0,53)	0,0122; (0,48)
7	0,0091; (1,05)	0,0107; (0,89)	0,0126; (0,75)	0,0065; (1,46)	0,0076; (1,25)	0,0088; (1,08)
8	0,0091; (0,99)	0,0107; (0,84)	0,0126; (0,71)	0,0065; (1,38)	0,0076; (1,18)	0,0088; (1,02)
9	0,0046; (0,81)	0,0051; (0,72)	0,0059; (0,63)	0,0042; (0,87)	0,0049; (0,76)	0,0056; (0,66)
10	0,0046; (0,76)	0,0052; (0,68)	0,0059; (0,60)	0,0042; (0,82)	0,0049; (0,72)	0,0056; (0,63)
11	0,0114; (1,23)	0,0134; (1,05)	0,0156; (0,89)	0,0081; (1,73)	0,0092; (1,52)	0,0104; (1,35)
12	0,0121; (1,08)	0,0141; (0,92)	0,0165; (0,79)	0,0085; (1,53)	0,0096; (1,35)	0,0108; (1,20)
13	0,0058; (1,03)	0,0066; (0,92)	0,0074; (0,81)	0,0055; (1,09)	0,0062; (0,96)	0,0070; (0,85)
14	0,0058; (0,86)	0,0066; (0,76)	0,0074; (0,67)	0,0055; (0,91)	0,0062; (0,80)	0,0070; (0,71)
15	0,0122; (0,67)	0,0145; (0,56)	0,0174; (0,46)	0,0085; (0,95)	0,0098; (0,82)	0,0112; (0,73)
16	0,0152; (0,53)	0,0183; (0,44)	0,0221; (0,36)	0,0113; (0,71)	0,0142; (0,56)	0,0140; (0,57)
17	0,0090; (0,67)	0,0106; (0,57)	0,0126; (0,48)	0,0063; (0,96)	0,0074; (0,81)	0,0087; (0,69)
18	0,0046; (0,95)	0,0053; (0,84)	0,0060; (0,73)	0,0041; (1,08)	0,0047; (0,93)	0,0054; (0,81)
19	0,0055; (0,79)	0,0062; (0,69)	0,0072; (0,60)	0,0049; (0,88)	0,0056; (0,77)	0,0064; (0,67)
20	0,0154; (0,52)	0,0178; (0,45)	0,0205; (0,39)	0,0102; (0,78)	0,0113; (0,71)	0,0125; (0,64)
21	0,0084; (0,65)	0,0098; (0,56)	0,0115; (0,48)	0,0064; (0,86)	0,0074; (0,74)	0,0085; (0,65)
22	0,0049; (0,88)	0,0055; (0,78)	0,0063; (0,68)	0,0046; (0,93)	0,0053; (0,81)	0,0060; (0,71)
23	0,0049; (0,93)	0,0055; (0,82)	0,0062; (0,72)	0,0046; (0,98)	0,0052; (0,86)	0,0060; (0,75)
24	0,0049; (0,88)	0,0055; (0,78)	0,0062; (0,69)	0,0046; (0,94)	0,0052; (0,82)	0,0060; (0,72)
25	0,0066; (0,80)	0,0076; (0,69)	0,0090; (0,59)	0,0050; (1,05)	0,0059; (0,89)	0,0069; (0,76)
26	0,0066; (0,79)	0,0077; (0,68)	0,0090; (0,58)	0,0051; (1,04)	0,0060; (0,88)	0,0070; (0,75)
27	0,0076; (0,69)	0,0088; (0,59)	0,0103; (0,51)	0,0058; (0,90)	0,0068; (0,77)	0,0078; (0,67)
28	0,0043; (0,85)	0,0048; (0,76)	0,0055; (0,67)	0,0039; (0,94)	0,0045; (0,82)	0,0051; (0,71)
29	0,0045; (0,93)	0,0050; (0,83)	0,0057; (0,73)	0,0041; (1,02)	0,0047; (0,88)	0,0054; (0,77)
30	0,0044; (0,96)	0,0049; (0,85)	0,0056; (0,75)	0,0040; (1,05)	0,0046; (0,91)	0,0052; (0,79)
M_e	0,78	0,68	0,59	0,99	0,87	0,77
$\bar{\Delta}$	24,5%	32,4%	41,2%	16,9%	21,7%	27,5%

Также вычислены медианные значения $\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$ для обработанной выборки из 30 образцов по формуле (6):

$$M_e = \sum_{i=1}^{30} \frac{\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03,i}}{30}, \quad (6)$$

и средние отклонения результатов расчета от экспериментальных данных по формуле (7):

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \left| \varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03,i} - 1 \right| \cdot 100\% \quad (7)$$

Как видно из таблицы 2 по формулам (3) получено лучшее соответствие расчетных значений деформаций опытным. Формулы (1) для большинства опытных образцов переоценивают предельную сжимаемость и среднее отклонение составило от 25% для средних значений прочности бетона, полученных по результатам испытаний, до 41% для расчетных значений прочности. По формулам (3) среднее отклонение составило от 17% до 28%, а медианное значение $\varepsilon_{b03}^{экс.} / \varepsilon_{b03}$ при расчетах по средней прочности стремится к 1. Возможно, разница связана с тем, что при выводе формул (1) не было принято во внимание влияние продольного армирования, повышающего деформативность, в то время как

формулы (3) изначально получены для неармированного бетона в условиях бокового обжатия.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что при практических расчетах железобетонных конструкций с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний подстановка в расчетные зависимости нормативных и расчетных значений прочности бетона может привести к получению завышенных значений деформативности ε_{b03} , что подтверждается экспериментальными данными. В этой связи для корректного определения параметров бетона с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний необходимо выполнять расчеты относительно средних экспериментальных значений прочности и уже следующим этапом уорректировать диаграмму с учетом коэффициентов вариации v и надежности по материалу γ_m . В этой связи рекомендуется дополнить СП 63.13330.2018 средними значениями прочности бетона, либо методикой их расчета. Так, например, EN 1992 Eurocode 2 [25] содержит такие данные.

Формулы (3) обеспечивают лучшее соответствие вычисленных значений деформативности экспериментальным данным по сравнению с формулами из СП 63.13330.2018. При использовании в расчетах средних значений прочности бетона среднее отклонение от результатов экспериментов находится в пределах 17%, а медианное значение $\varepsilon_{b03}^{exp} / \varepsilon_{b03}$ для обработанных образцов стремится к 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu X., Hsu C. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression // J. Mater. Civil Eng. 2007. № 19(3). Pp.261-268.
2. Attard M., Samani A.K. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression // Eng. Struct. 2012. № 41. Pp. 335-349.
3. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Chernyshov V.E. Research of Concrete Durability in Compressed Elements with Different Types of Confinement Reinforcements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 652(1):012037.
4. Zingg L., Briffaut M., Baroth J., Malecot Y. Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete // Cement. Concrete. Res. 2016. Vol. 80. Pp 52-59.
5. Mohammadi M., Wu Y.F. Triaxial test for concrete under non-uniform passive confinement // Constr. Build. Mater. 2017. Vol. 138. Pp. 455-468.
6. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования // Строительство и реконструкция. 2017. №4 (72). С.57-62.
7. Ouyang Y., Kwan A.K.H. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load 2018 *Eng. Struct.* Vol. 156. Pp. 443-459.
8. Wang Y.Y., Yang L.G., Yang H., Liu C.Y. Behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under axial compression // Eng. Struct. 2019. Vol. 183. Pp. 475-495.
9. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 138. Pp. 105-116.
10. Hadi M., Elbasha N. Displacement ductility of helically confined HSC beams // The Open Construction and Building Technology Journal. 2008. 2(1):270-279.
11. Chang W, Hao M J; Zheng W Z Behaviour of high-strength concrete circular columns confined by high-strength spirals under concentric compression // Construction and Building Materials. 2020. 230:117007.
12. Munir M J et al. Development of a unified model to predict the axial stress-strain behavior of recycled aggregate concrete confined through spiral reinforcement // Eng. Struct. 2020. 218:110851.
13. Лапшинов А.Е., Тамразян А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 20-30.
14. Тамразян А.Г., Черник В.И. Диаграмма деформирования бетона, ограниченного дискретной композитной облойкой // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 43-53.
15. Попов Н.Н., Трекин Н.Н., Матков Н.Г. Влияние косвенного армирования на деформации бетона // Бетон и железобетон. 1988. №11. С. 33-36.

16. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Compressed and bending concrete elements with confinement reinforcement meshes // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. 753:022052.
17. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 41-50.
18. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K., Koroteev D.D. Study of Reinforced Concrete Beams with Indirect Reinforcement of Compressed Zone in the Form of Cross Welded Mesh // J.Mech.Cont.& Math. Sci. 2019. No. 1S. Pp. 621-631.
19. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К., Соседов К.Е. Практические методы и примеры расчета железобетонных конструкций из тяжелого бетона по СП 63.13330. М.: ООО «Бумажник», 2017. 496 с.
20. Манаенков И.К. К расчету железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. №5(383). С. 238-242.
21. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичутин С.Ф. Основы метода расчетных предельных состояний. М: Издательство АСВ, 2019. 240 с.
22. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018.
23. Кришан А.Л., Сабиров Р.Р., Кришан М.А. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием сетками // Архитектура. Строительство. Образование. 2014. №1(3). С.215-224.
24. Manaenkov I.K., Savin S.U. Numerical analysis of the ultimate compressibility of concrete with indirect reinforcement for plotting a stress-strain diagram // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. 1030:012090.
25. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures.

REFERENCES

1. Lu X., Hsu C. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression // J. Mater. Civil Eng. 2007. № 19(3). Pp.261-268.
2. Attard M., Samani A.K. A stress-strain model for uniaxial and confined concrete under compression // Eng. Struct. 2012. № 41. Pp. 335-349.
3. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Chernyshov V.E. Research of Concrete Durability in Compressed Elements with Different Types of Confinement Reinforcements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 652(1):012037.
4. Zingg L., Briffaut M., Baroth J., Malecot Y. Influence of cement matrix porosity on the triaxial behaviour of concrete // Cement. Concrete. Res. 2016. Vol. 80. Pp 52-59.
5. Mohammadi M., Wu Y.F. Triaxial test for concrete under non-uniform passive confinement // Constr. Build. Mater. 2017. Vol. 138. Pp. 455-468.
6. Tamrazyan A G, Manaenkov I K Testing of small-diameter pipe-concrete samples with a high reinforcement factor. *Building and Reconstruction*. 2017. No. 4(72). Pp 57-62. (rus)
7. Ouyang Y., Kwan A.K.H. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load 2018 *Eng. Struct.* Vol. 156. Pp. 443-459.
8. Wang Y.Y., Yang L.G., Yang H., Liu C.Y. Behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under axial compression // Eng. Struct. 2019. Vol. 183. Pp. 475-495.
9. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 138. Pp. 105-116.
10. Hadi M., Elbasha N. Displacement ductility of helically confined HSC beams // The Open Construction and Building Technology Journal. 2008. 2(1):270-279.
11. Chang W, Hao M J; Zheng W Z Behaviour of high-strength concrete circular columns confined by high-strength spirals under concentric compression // Construction and Building Materials. 2020. 230:117007.
12. Munir M J et al. Development of a unified model to predict the axial stress-strain behavior of recycled aggregate concrete confined through spiral reinforcement // Eng. Struct. 2020. 218:110851.
13. Lapshinov A.E., Tamrazjan A.G. To The Influence Of Transverse Reinforcement To Strength And Deformability Of Concrete Compressive Members Reinforced With Frp Reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2018. No 4(78). Pp. 20-30. (rus)
14. Tamrazjan A.G., Chernik V.I. Stress-Strain Model For Concrete Confined By a Discrete FRP-jackets. *Industrial And Civil Construction*. 2020. No 8. Pp. 43-53. (rus)
15. Popov N.N., Trekin N.N., Matkov N.G. The effect of indirect reinforcement on concrete deformation. *Concrete and reinforced concrete*. 1988. No 11. Pp. 33-36. (rus)
16. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Compressed and bending concrete elements with confinement reinforcement meshes // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. 753:022052.
17. Manaenkov I.K. Perfection Of The Concrete Compression Diagram With Indirect Reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2018. No 2 (76). Pp. 41-50. (rus)

18. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K., Koroteev D.D. Study of Reinforced Concrete Beams with Indirect Reinforcement of Compressed Zone in the Form of Cross Welded Mesh // J.Mech.Cont.& Math. Sci. 2019. No. 1S. Pp. 621-631.
19. Kodysh Je.N., Trekin N.N., Nikitin I.K., Sosedov K.E. Practical methods and examples of calculating reinforced concrete structures of heavy concrete according to SP 63.13330. Moscow: LLC «Bumazhnik», 2017. 496 p. (rus)
20. Manaenkov I.K. To the calculation of reinforced concrete elements according to the nonlinear deformation model. *The News of Higher Educational Institutions Technology of Textile Industry*. 2019. No 5(383). Pp. 238-242. (rus)
21. Perelmuter A.V., Kabancev O.V., Pichugin S.F. Basis of the method of limit state design (Moscow: ASV Press), 2019 240 p. (rus)
22. Russian Building Code SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. (rus)
23. Krishan A.L., Sabirov R.R., Krishan M.A. Durability calculation of compressed reinforced concrete elements with confinement reinforcement made by fabrics. *Architecture. Construction. Education*. 2014. No 1 (3). Pp. 215-224. (rus)
24. Manaenkov I.K., Savin S.U. Numerical analysis of the ultimate compressibility of concrete with indirect reinforcement for plotting a stress-strain diagram // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. 1030:012090.
25. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures.

Информация об авторах:

Манаенков Иван Константинович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».
E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

Куравина Софья Олеговна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».
E-mail: sofyk@yandex.ru

Information about authors:

Manaenkov Ivan K.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

Kurnavina Sofiya O.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, , associate professor, associate professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: sofyk@yandex.ru