

## Расчет железобетонных балок с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний

*И.К. Манаенков*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Косвенное армирование позволяет существенно повысить прочностные и деформационные характеристики бетона. Для сжатой зоны железобетонных балок одним из наиболее эффективных вариантов косвенного армирования является установка поперечных сварных сеток. При этом действующие нормативные документы до сих пор имеют ряд пробелов в методике расчета таких конструкций. В статье приведены экспериментальные данные и результаты расчета для трех серий железобетонных балок с косвенным армированием сжатой зоны. На основании результатов расчета показаны недостатки нормативной методики при выполнении расчетов в рамках теории предельных состояний и назначении расчетных значений прочности бетона с косвенным армированием. Сделаны выводы о необходимости последовательности вычисления расчетных прочностных и деформационных характеристик бетона с косвенным армированием.

**Ключевые слова:** косвенное армирование, балка, сварные сетки, объемное напряженное состояние, нелинейная деформационная модель, диаграмма состояния.

### Введение

Современное промышленное и гражданское строительство невозможно представить без железобетона. Этот конструкционный материал в той или иной степени применяется на большинстве строительных объектов и может являться несущей основой практически для всех основных конструкций: фундаментов, стен, колонн, балок, ферм, перекрытий и др. Повысить предельную сжимаемость и прочность бетона возможно посредством установки косвенного армирования. Эффективность его применения для сжатого бетона отмечена в большом количестве исследований [1-3] и др. Предложено множество вариантов применения такого армирования: трубобетон [4,5], спиральное армирование [6,7], сварные сетки [8,9] и др. В сжатых зонах балок наиболее часто применяются именно сварные сетки, так как, благодаря относительно малому размеру ячейки, удается создать

---

эффективное обжатие бетона именно в зоне возникновения продольных сжимающих напряжений [10].

В настоящее время строительные конструкции рассчитываются в рамках теории предельных состояний, что позволяет обеспечить требуемую надежность при приемлемом уровне риска [11,12]. Для этой цели при назначении прочностных характеристик материала выполняют переход от средних значений к расчетным [13]. И именно для железобетонных элементов с косвенным армированием возникает ряд сложностей с использованием в формулах расчетных значений прочности, что уже отмечалось автором в исследованиях [14,15] для железобетонных призм. Данная статья посвящена расчетам железобетонных балок с косвенным армированием сжатой зоны поперечными сварными сетками при разных принятых значениях прочности бетона (средней прочности и расчетной прочности), а также сравнению полученных результатов с учетом экспериментальных данных.

### Материалы и методы

В статье [16] автором были представлены результаты испытаний трех серий балок с косвенным армированием сжатой зоны поперечными сварными сетками. Балки имели поперечное сечение размерами 150 x 200 мм. Отличие серий друг от друга заключалось в разном диаметре продольной растянутой арматуры. В рамках серии балки имели разный коэффициент армирования  $\mu_{s,xy}$ . Схема испытания балок представлена на рисунке 1. Основные параметры бетона и арматуры представлены в таблице 1.

Для балок были выполнены расчеты несущей способности  $M_{ult}$  до отслоения защитного слоя бетона сжатой зоны (соответствует окончанию стадии эксплуатации), а также прогибов  $f$  на различных этапах нагружения. Расчеты выполнялись на основе нелинейной деформационной модели (НДМ). Для бетона в зоне размещения косвенного армирования принималась

диаграмма, построенная по методике [17]. Основные параметрические точки диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  вычислялись на основании формул (1)–(2):

$$R_{b3} = \left[ \frac{1 - \rho_{xy}}{2} + \sqrt{\left( \frac{1 - \rho_{xy}}{2} \right)^2 + 9\rho_{xy}} \right] R_b; \quad (1)$$

$$\rho_{xy} = 0,375 \mu_{s,xy} R_{s,xy} / R_b$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{b03} &= e^n \varepsilon_{b0}; \quad \varepsilon_{bu3} = e^n \varepsilon_{bu}; \\ n &= (2,9224 - 0,00408 R_b) \left( 0,9 \frac{\sigma_{b,xy}}{R_b} \right)^{(0,3124 + 0,0022 R_b)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $R_b$  – призменная прочность бетона при сжатии,  $R_{s,xy}$  – прочность стержней косвенного армирования при растяжении (по условному пределу текучести),  $\sigma_{b,xy}$  – усилие бокового обжатия бетона.

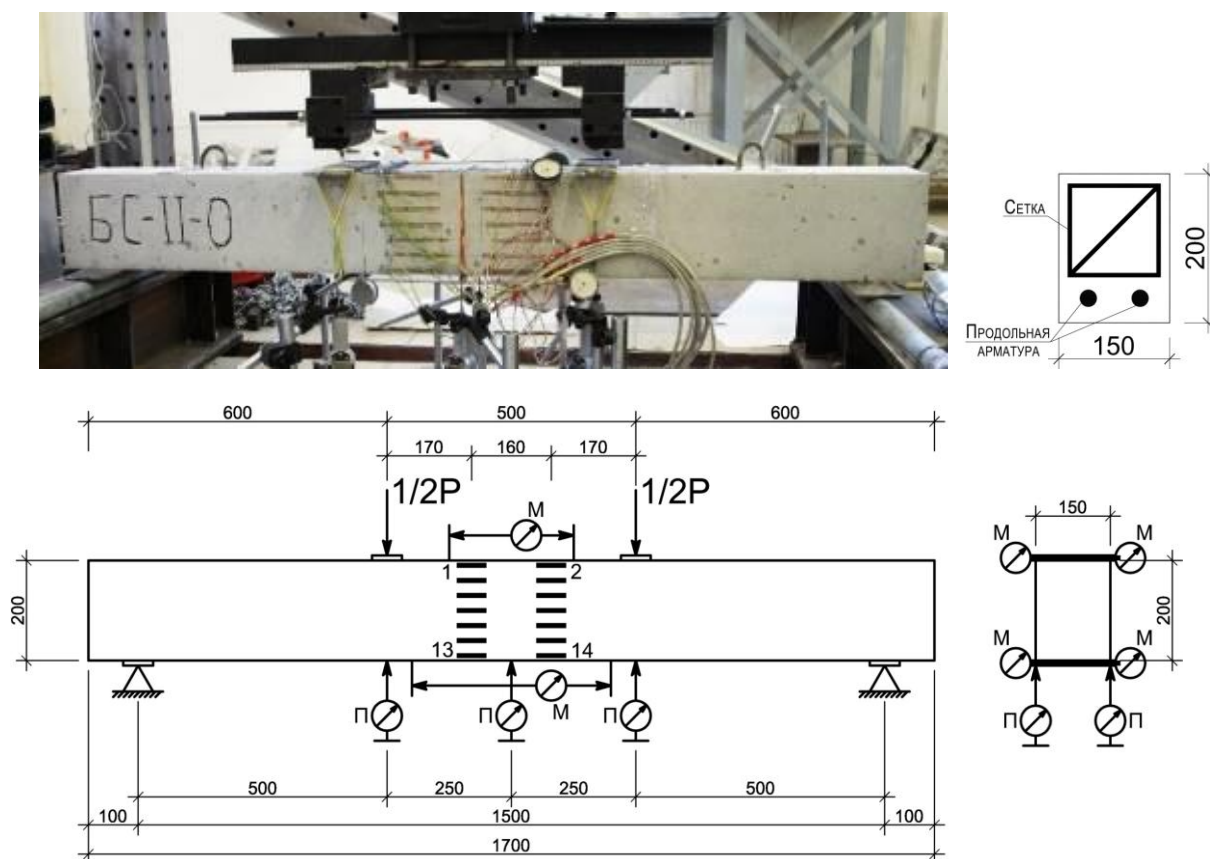


Рис. 1. – Схема испытания балок

Таблица № 1

## Параметры опытных образцов

Марка образца	$R_{sm}$ , МПа	$A_s$ , см <sup>2</sup>	$R_{sm,xy}$ , МПа	$\mu_{xy}$	$R_{bm}$ , МПа	$E_{b0}$ , МПа·10 <sup>3</sup>
Б-I-1	439	7,33	492	0,025	28,4	30,9
Б-I-2	439	7,33	492	0,05	28,4	30,9
Б-II-1	437	9,43	492	0,025	30,1	31,4
Б-II-2	437	9,43	492	0,05	30,1	31,4
Б-III-1	411	12,4	492	0,025	28,6	30,9
Б-III-2	411	12,4	492	0,05	28,6	30,9

Ранее в исследованиях [14,15] было выявлено что прочность и предельная сжимаемость, вычисленные на основании выражений (1) и (2) (также как и по другим рассмотренным формулам из нормативных документов) оказывались завышенными при подстановке в них расчетных значений прочности арматуры и бетона. Можно отметить, что даже для неармированного бетона предельная сжимаемость несколько выше для более низких классов, а косвенное армирование, влияя в большей степени на менее прочный бетон, увеличивает эту разницу на несколько порядков (см. рисунок 2).

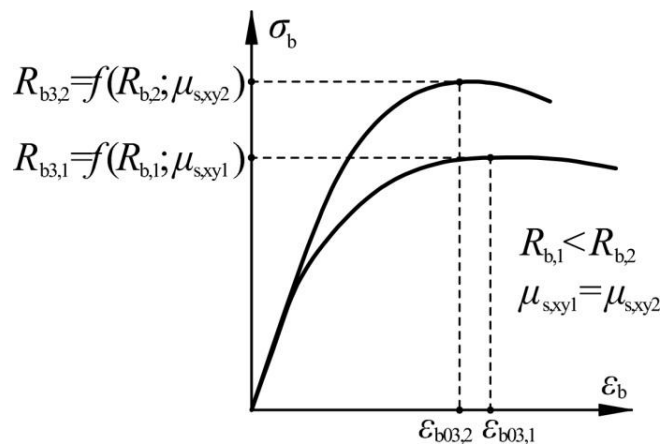


Рис. 2. – Диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$  для бетона с косвенным армированием при разной прочности исходного бетона и одинаковых параметрах косвенного армирования

Как итог, имеем, что формулы, полученные исследователями для экспериментальных средних значений, при подстановке в них расчетных

значений прочности бетона (которые значительно меньше) приводят к вычислению сильно завышенных деформаций  $\varepsilon_{b03}$  и  $\varepsilon_{bu3}$ . Чтобы этого избежать предлагается при выполнении инженерных расчетов для построения диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  вычислять характерные точки на основании значений средней прочности бетона и арматуры, после чего выполнять корректировку диаграмм переходя от  $R_{b3m}$  к  $R_{b3}$ . Последовательность перехода к расчетным значениям прочности  $R_{b3}$  изложена в работе [15].

Для того, чтобы оценить, в какой степени описанное выше завышение предельной сжимаемости бетона с косвенным армированием может сказаться на результатах расчетов балок, был выполнен набор расчетов балок по методике нелинейной деформационной модели (НДМ). При этом диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  для бетона с косвенным армированием строились тремя различными способами:

**Тип 1.** Диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  строились на основе экспериментальных средних значений прочности бетона и арматуры ( $R_{bm}$  и  $R_{sm,xy}$ );

**Тип 2.** Диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  строились на основе средних значений прочности бетона и арматуры ( $R_{bm}$  и  $R_{sm,xy}$ ) в формулы (1) и (2), после чего прочность бетона с косвенным армированием  $R_{b3m}$  пересчитывалась и уменьшалась до расчетного значения  $R_{b3}$ ;

**Тип 3.** Аналогично методике СП 63.13330.2018 диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  строились на основе расчетных значений прочности бетона и арматуры ( $R_b$  и  $R_{s,xy}$ ) в формулы (1) и (2).

### Результаты и анализ

Полученные зависимости прогиба  $f$  от нагрузки  $P$  представлены на рисунках 3-4: — — — экспериментальные данные; — — — данные, полученные по диаграммам Тип 1; — — — данные, полученные по диаграммам Тип 2; — — — данные, полученные по диаграммам Тип 3.

Участок с падением нагрузки на графиках связан с отслоением бетона защитного слоя.

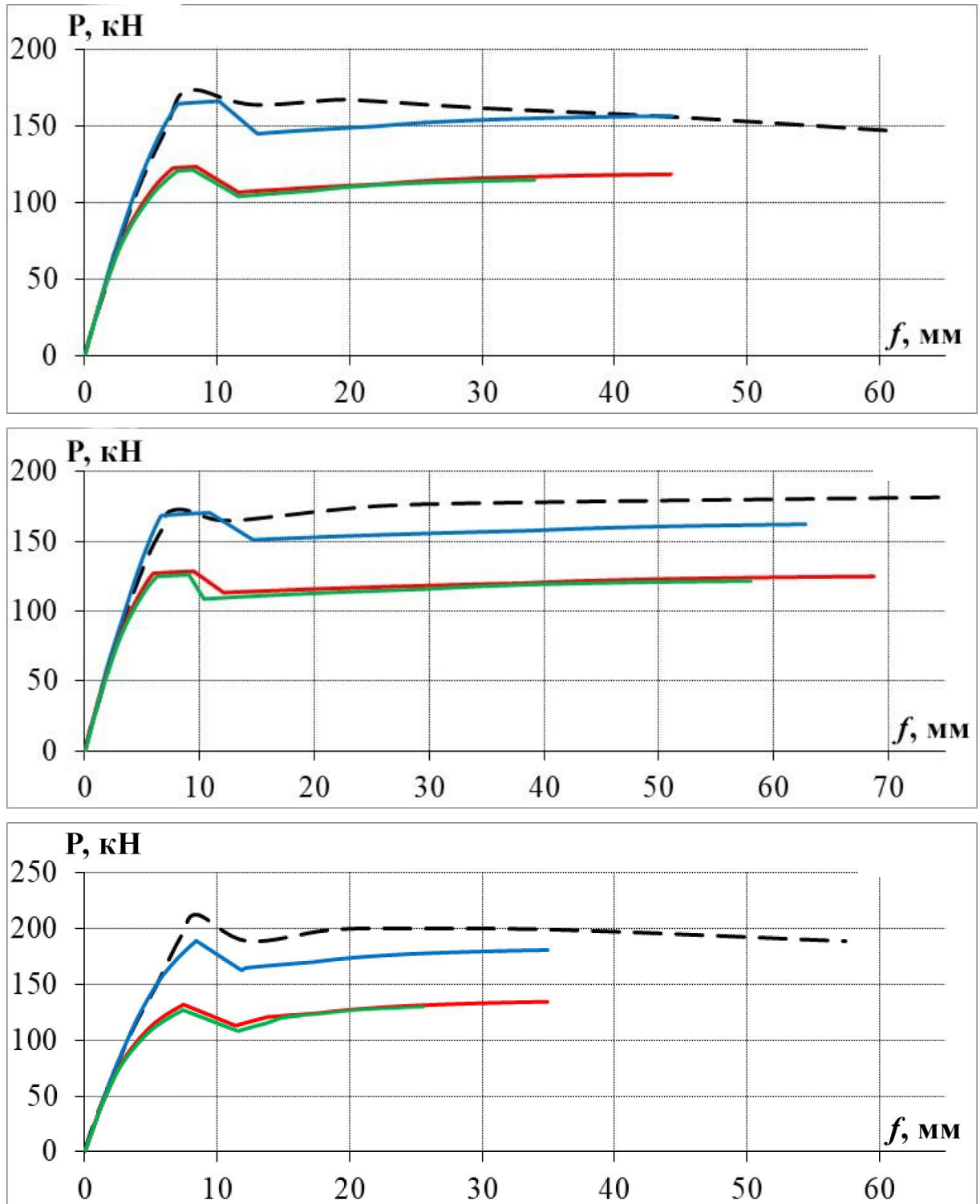


Рис. 3. – Зависимость прогиба  $f$  от нагрузки  $P$ . Образцы Б-I-1; Б-I-2; Б-II-1

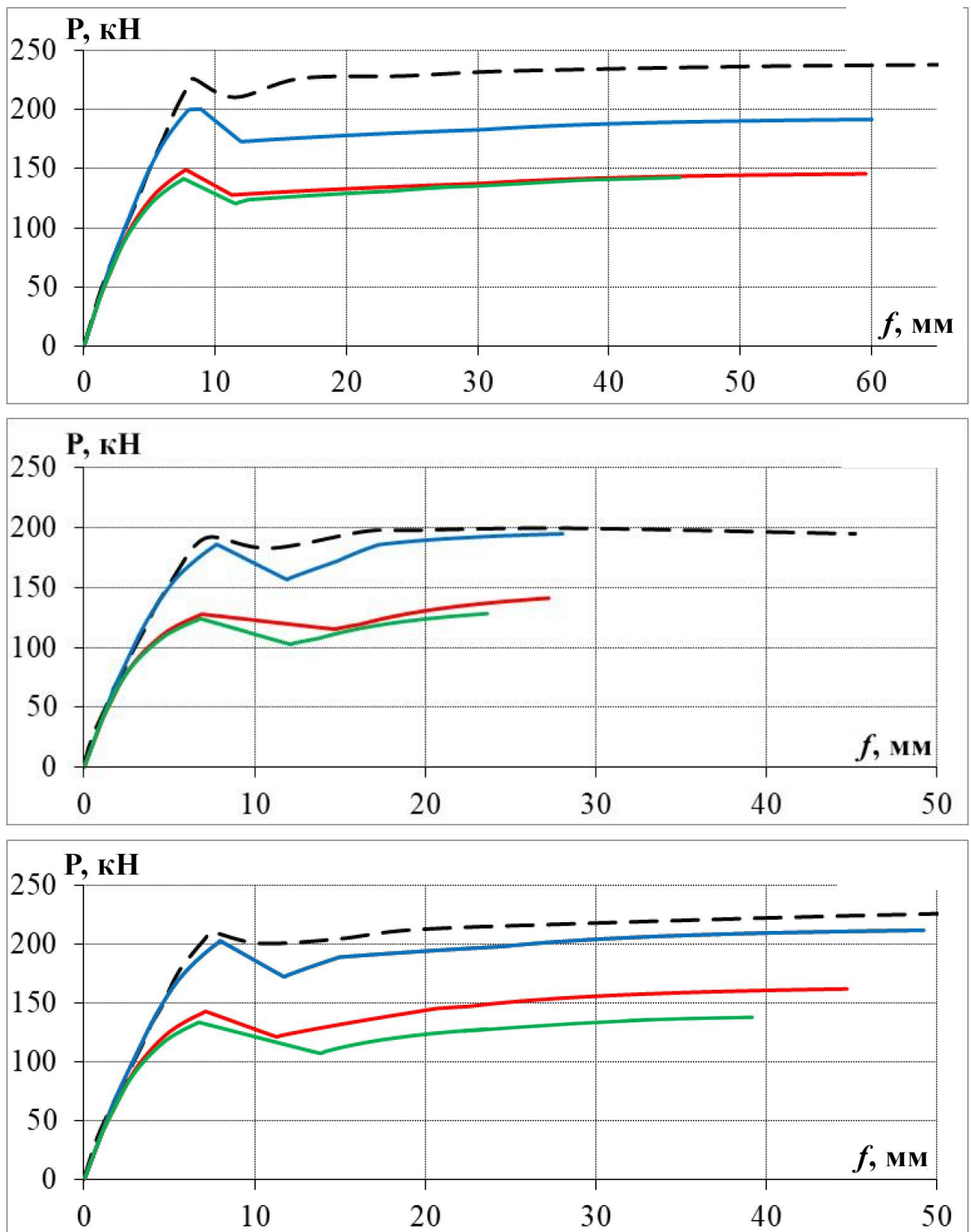


Рис. 3. – Зависимость прогиба  $f$  от нагрузки  $P$ . Образцы Б-II-2; Б-III-1; Б- III-2

В Таблице 2 приведены максимальные прогибы, вычисленные по расчетной прочности материалов  $F_{\max} = f(R_b)$  и по средней прочности  $s$

последующим переходом к расчетным значениям  $F_{\max} = f(R_{bm})$ . Выполнено сравнение с максимальными прогибами, вычисленными без перехода к расчетной прочности  $F_{\max}^m = f(R_{bm})$ . Аналогичные данные для значений изгибающего момента до отслоения защитного слоя бетона сжатой зоны приведены в таблице 3.

Таблица № 2

## Результаты расчета максимальных

Марка образца	$F_{\max}^m = f(R_{bm})$ , мм (—)	$F_{\max} = f(R_{bm})$ , мм (—)	$\Delta$ , %	$F_{\max} = f(R_b)$ , мм (—)	$\Delta$ , %
Б-I-1	44,33	33,93	-23,46	44,25	-0,18
Б-I-2	62,78	58,00	-7,61	68,72	9,46
Б-II-1	34,95	26,68	-4,95	34,92	-0,09
Б-II-2	60,02	46,63	-22,31	59,56	-0,77
Б-III-1	28,05	26,68	-4,88	27,24	-2,89
Б-III-2	49,20	38,70	-21,22	44,71	-9,13

Таблица № 3

## Результаты расчета значений изгибающих моментов до отслоения защитного слоя

Марка образца	$M_{ult}^m = f(R_{bm})$ , кНм (—)	$M_{ult} = f(R_{bm})$ , кНм (—)	$\Delta$ , %	$M_{ult} = f(R_b)$ , кНм (—)	$\Delta$ , %	$M_{ult}^{exp}$ , кНм
Б-I-1	41,11	30,14	-26,68	30,59	-25,59	43,2
Б-I-2	42,22	31,33	-25,79	31,85	-24,56	43,1
Б-II-1	47,09	31,60	-32,89	33,78	-28,27	53,2
Б-II-2	49,56	35,37	-28,63	37,21	-24,92	56,4
Б-III-1	46,48	30,99	-33,33	35,75	-23,09	48,1
Б-III-2	50,72	33,45	-34,05	35,75	-29,51	52,5

Как видно из рисунков 3–4, характер деформирования образцов качественно повторяет экспериментальные данные. Все основные этапы работы балок имеются и на графиках, построенных по данным расчетов. В стадии эксплуатации исчерпание несущей способности образцов Б-I-1 и Б-I-2 началось в момент достижения продольной растянутой арматурой деформаций текучести, после чего через некоторое время происходило отслоение бетона защитного слоя. Для остальных образцов сначала



происходило отслоение бетона защитного слоя вследствие достижения неармированным бетоном предельных деформаций сжатия.

Для расчетных диаграмм (Тип 2 и Тип 3) по всем образцам имеется запас несущей способности (23,1-29,6% и 25,8-35,1% соответственно). Но, рассматривая полученные значения прогибов, можно заметить, что максимальный прогиб, вычисленный по расчетным значениям прочности, существенно превышает вычисленный по экспериментальным средним (с последующим переходом к расчетной прочности  $R_{b3}$ ). Более того, для образца Б-1-2 максимальный прогиб, вычисленный по расчетным значениям прочности превышает прогиб, вычисленный по экспериментальным значениям прочности (синий график), что противоречит здравому смыслу.

### Заключение

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

- 1) При расчете по экспериментальным средним значениям прочности получено хорошее соответствие экспериментальным данным. Характер разрушения для всех образцов соответствует экспериментальным данным.
- 2) При расчете по экспериментальным средним значениям прочности (Тип 1) разница несущей способности относительно эксперимента составила от 2,1 % до 11,2 %, что является приемлемой точностью. Полученная разница идет в запас несущей способности.
- 3) Для расчетных диаграмм  $\sigma$ - $\varepsilon$  (Тип 2 и Тип 3) получен необходимый запас несущей способности: 23,1-29,6 % и 25,8-34,1 %, соответственно, в зависимости от выбранного метода построения диаграммы.
- 4) При рассмотрении полученных значений прогибов видно, что при вычислениях по расчетным значениям прочности материала (Тип 3) предельные прогибы существенно выше, чем в расчете по средним значениям прочности с последующим учетом коэффициентов надежности

(Тип 2). При этом, для образца Б-I-2 предельные прогибы, вычисленные на основе расчетных значений прочности (Тип 3), превышают вычисленные на основе средних экспериментальных значений (Тип 1), что противоречит здравому смыслу. При этом для расчетов Тип 2 такого завышения нет. Полученный результат наглядно демонстрирует то, что нормативную методику построения диаграммы бетона с косвенным армированием для инженерных расчетов конструкций необходимо корректировать.

### Литература

1. Yu Z., Huang Q., Shan Y., Ren Z. Failure criterion of ordinary concrete subjected to triaxial compression of full section and local loadings. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. Vol. 30. P. 04018239.
2. Mohammadi M., Wu Y.F. Triaxial test for concrete under non-uniform passive confinement. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 138. Pp. 455-468.
3. Резван И.В., Маилян Д.Р., Резван А.В. Построение диаграммы "напряжения-деформации" бетона в условиях пассивного бокового обжатия // *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127)
4. Han L.H., Xu C.Y., Tao Z. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSST) columns and joints: Summary of recent research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 152. Pp. 117–131.
5. Ouyang Y., Kwan A.K.H. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 156. Pp. 443-459.
6. Тонких Г.П., Аверин И.А. Повышение сейсмостойкости зданий за счет спирального армирования изгибаемых железобетонных конструкций // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 3. С. 31-39.

7. Munir M.J., Kazmi S.M.S., Wu Y.-F., Patnaikuni I., Wang J., Wang Q. Development of a unified model to predict the axial stress–strain behavior of recycled aggregate concrete confined through spiral reinforcement. *Eng. Struct.* 2020. Vol. 218. P. 110851.

8. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Likhidko M.A., Zakieva L.R. Mechanical properties of compressed concrete with confinement mesh reinforcement. *Construction of Unique Buildings and Structures.* 2020. Vol. 91. P. 9103.

9. Колчунов В.И., Кореньков П.А., Фан Д.Г. Особое предельное состояние в железобетонных каркасах узлами, усиленными косвенным армированием при аварийных воздействиях // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 11. С. 1462-1472.

10. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Compressed and bending concrete elements with confinement reinforcement meshes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 753. P. 022052.

11. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5-18.

12. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences.* 2019. Vol. 97. No. 2. P. 04005.

13. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф. Основы метода расчетных предельных состояний. М: Издательство АСВ, 2019. 240 с.

14. Манаенков И.К., Курнавина С.О. Построение диаграммы сжатия для бетона с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 40-47.

15. Манаенков И.К. Совершенствование методики построения расчетной диаграммы сжатия для бетона с косвенным армированием сварными сетками

---



// Инженерный вестник Дона. 2021. № 3 (75).

URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6856](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6856)

16. Манаенков И.К. Экспериментальные исследования железобетонных балок с косвенным армированием сжатой зоны поперечными сварными сетками // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 5 (377). С. 243-247.

17. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 41-50.

### References

1. Yu Z., Huang Q., Shan Y., Ren Z. Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30. P. 04018239.
2. Mohammadi M., Wu Y.F. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 138. Pp. 455-468.
3. Rezvan I.V., Mailjan D.R., Rezvan A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127)
4. Han L.H., Xu C.Y., Tao Z. Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 152. Pp. 117–131.
5. Ouyang Y., Kwan A.K.H. Engineering Structures. 2018. Vol. 156. Pp. 443-459.
6. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2022. № 3. Pp. 31-39.
7. Munir M.J., Kazmi S.M.S., Wu Y.-F., Patnaikuni I., Wang J., Wang Q. Eng. Struct. 2020. Vol. 218. P. 110851.
8. Krishan A.L., Chernyshova E.P., Likhidko M.A., Zakieva L.R. Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 91. P. 9103.
9. Kolchunov V.I., Koren'kov P.A., Fan D.G. Vestnik MGSU. 2021. Vol. 16. № 11. Pp. 1462-1472.



10. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. P. 022052.
11. Tamrazjan A.G. Zhelezobetonnye konstrukcii. 2023. Vol. 1. № 1. Pp. 5-18.
12. Tamrazyan A., Alekseytsev A. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. No. 2. P. 04005.
13. Perel'muter A.V., Kabancev O.V., Pichugin S.F. Osnovy metoda raschetnyh predel'nyh sostojanij. [Basis of the method of limit state design]. M: Izdatel'stvovo ASV, 2019. 240 p.
14. Manaenkov I.K., Kurnavina S.O. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2022. № 1(99). Pp. 40-47.
15. Manaenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6856](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6856)
16. Manaenkov I.K. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. 2018. № 5 (377). Pp. 243-247.
17. Manaenkov I.K. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2018. № 2 (76). Pp. 41-50.

**Дата поступления: 30.06.2024**

**Дата публикации: 5.08.2024**