

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, Й.А.К. САЙЕД¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ

Аннотация. В данной статье исследуется коэффициент перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках через экспериментальный и аналитический подход. Были испытаны на изгиб двухпролетные статически неопределимые железобетонные балки. Было проведено обсуждение результатов определения схемы разрушения, диаграммы прогиб-нагрузка, деформация-нагрузка и коэффициентов перераспределения моментов. Экспериментальные результаты были сравнены с аналитическими расчетами существующих моделей, включая нормы ACI 318-19 и CSA A23.3-19, и другие. Результаты показывают, что коэффициент перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках зависит от коэффициента армирования (μ_{s1}) и может быть более точно предсказан комплексным анализом. Результаты экспериментов также показывают, что коэффициенты перераспределения моментов испытанных балок превышают значения, предсказанные другими существующими моделями.

Ключевые слова: статически неопределимые железобетонные балки, перераспределение моментов, экспериментальное исследование, теоретические модели, коэффициент армирования.

A.G. TAMRAZYAN¹, Y.A.K. SAYED¹¹Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF THE COEFFICIENT OF MOMENT REDISTRIBUTION IN STATICALLY INDETERMINATE RC BEAMS

Abstract. This article investigates the coefficient of moments redistribution in statically indeterminate RC beams through an experimental and analytical approach. Two-span statically indeterminate RC beams were tested under bending moment. A discussion of the results of the mode of failure, load-deformation, load-strain, and the coefficient of the moments redistribution were conducted. Moreover, the experimental results were compared to the analytical predictions of the related existing models, including the ACI 318-19 and CSA A23.3-19 codes, and others. The results show that the coefficient of moment redistribution is affected by the reinforcement ratio (μ_{s1}) and can be accurately predicted by a recent mathematical analysis. The experimental results also reveal that the moment redistribution capacity of the beams exceeds the values predicted by the other existing models.

Keywords: statically indeterminate RC beams, moment redistribution, experimental investigation, theoretical existing models, reinforcement ratio.

Введение

Статически неопределимые железобетонные балки широко используются в строительстве благодаря их способности выдерживать большие нагрузки и иметь более длинные пролеты, чем их определяемые аналоги. Однако расчет коэффициента перераспределения моментов, который необходим для проектирования этих балок, остается сложной задачей. Существующие модели для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов

© Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К., 2023

имеют свои ограничения, и требуются новые экспериментальные исследования для дальнейшего улучшения точности этих моделей [1-5]. В данном исследовании проведено экспериментальное исследование статически неопределимых железобетонных балок для получения новых результатов коэффициента перераспределения моментов. Цель данной работы - оценить существующие модели и сравнить их с новыми экспериментальными результатами. Результаты этого исследования внесут свой вклад в разработку более точных моделей для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов в железобетонных балках, и в конечном итоге повысят безопасность и эффективность проектирования железобетонных балок.

Коэффициент перераспределения моментов является важным параметром в проектировании статически неопределимых железобетонных балок. Он представляет собой степень возможности балки передавать моменты от переармированных сечений к недостаточно армированным сечениям, что увеличивает несущую способность и пластичность конструкции. Несколько исследователей изучали коэффициент перераспределения моментов в железобетонных балках [2-8]. Некоторые из часто используемых моделей для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов включают нормы ACI 318, Еврокод и модельный стандарт *fib*, а также работы [12-19]. Однако большинство из этих моделей имеют ограничения, особенно при применении к балкам с разной геометрией или не призматическими поперечными сечениями [20]. В таблице 1 приведены некоторые из существующих моделей в стандартах проектирования и модели, а также данные исследователей. Все сокращения указаны в [20].

В последние годы несколько исследователей провели экспериментальные исследования коэффициента перераспределения моментов в железобетонных балках [6-11]. Например, Scott and Whittle (2005) [7] провели экспериментальное исследование железобетонных балок для изучения влияния соотношения поперечной арматуры к продольной на коэффициент перераспределения моментов. Результаты показали, что увеличение соотношения (A_{s1}/A_{s2}) изменяет жесткость вдоль балки и, следовательно, перераспределение моментов уменьшается. Аналогично, Li et al. (2019) [11] провели экспериментальное исследование железобетонных балок и рам с различными классами бетона, количеством и свойствами арматурной стали и обнаружили, что существующие модели в стандартах недооценивают коэффициент перераспределения моментов.

Эти исследования подчеркивают необходимость дальнейших экспериментальных исследований для повышения точности существующих моделей, для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов в железобетонных балках. В данной статье сделана попытка внести свой вклад в это усилие, проведя экспериментальное исследование на статически неопределимых железобетонных балках и сравнив полученные результаты с существующими моделями.

Таблица 1 – Коэффициенты перераспределения моментов

Стандарты проектирования или исследование	Определение коэффициентов перераспределения моментов	Ограничения
----	$\beta_{\text{эксп.}} = \frac{M_E - M_{\text{act}}}{M_E}$	$0,00 \leq \beta_{\text{эксп.}} \leq 1,00$
ACI 318-19 [12]	$\beta_{\text{расч.}} (\%) \leq 1000 \varepsilon_t$	$\varepsilon_t \leq 0,0075$ $\beta_{\text{расч.}} \leq 20\%$
CSA A23.3-19 [13]	$\beta_{\text{расч.}} (\%) \leq 30 - 50 (x/h_o)$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 20\%$

AS 3600-2018 [14]	$\beta_{\text{рассч.}} = \begin{cases} 30\% & x/h_o \leq 0,2 \\ (30 - 75 x/h_o)\% & 0,2 < x/h_o \leq 0,4 \\ 0 & x/h_o > 0,4 \end{cases}$		
BS 8110:1997 [15]	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,6 - (x/h_o)$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,3$	
DIN 1045-1 [16]	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,36 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \geq 50 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,3$	Высокая пластичность
	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,28 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 55 \text{ МПа и легкийбетон}$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,2$	
	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,36 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \geq 55 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,15$	Нормальная пластичность
	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,28 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 55 \text{ МПа и легкийбетон}$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,00$	
	Высокая пластичность: $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,08; \varepsilon_{uk} \geq 5,0\%$ Нормальная пластичность: $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,05; \varepsilon_{uk} \geq 2,5\%$		
fib Model Code 2010 & Eurocode 2 [17,18]	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,56 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 50 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,3$	Для класса В, С или D
	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,46 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c > 50 \text{ МПа}$		
	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,56 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 50 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,2$	Класс А
	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 0,46 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c > 50 \text{ МПа}$		
Класс А: $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,05; \varepsilon_{uk} \geq 2,0\%$; Класс В: $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,08; \varepsilon_{uk} \geq 5,0\%$; Класс С: $1,15 \leq (R_{su}/R_{sy})_k \leq 1,35; \varepsilon_{uk} \geq 7,5\%$; Класс D: $1,25 \leq (R_{su}/R_{sy})_k \leq 1,45; \varepsilon_{uk} \geq 8,0\%$			
$\varepsilon_{uc2} = 0,0035 \text{ когда } f'_c \leq 50 \text{ МПа}$ $\varepsilon_{uc2} / 1000 = 2,6 + 35 [((90 - f'_c)/100)]^4 \text{ когда } f'_c > 50 \text{ МПа}$			
do Carmo and Lopes (2005) [6]	$\beta_{\text{рассч.}} (\%) = 47 - 114 x/h_o$		
Tamrazyan and Sayed (2022) [5]	$\beta_{\text{рассч.}} = \left(0,001 \frac{R_{sy}}{f'_c} + 0,05(\omega_w \%) + 0,0035 L/h \right) - \left(0,74 x/h_o + 0,13 \frac{\mu_{s1}}{\mu_{s2}} \right) + 0,4612$		
Aydogan et al. (2023) [19]	$\beta_{\text{рассч.}} (\%) = \left(\frac{\mu_{s1} \%}{x/h_o} - (x/h_o) - 6,45 \right) \left(\frac{\mu_{s1} \% (x/h_o)}{0,34 - (\mu_{s1}/\mu_{s2})} \right) - \left(\frac{(\mu_{s1} \%)}{1,21(\mu_{s1} \% - (\mu_{s1}/\mu_{s2}))^2} \right) + \left(\frac{0,81 - x/h_o + 2,81\mu_{s1} \%}{\mu_{s1} \% \left(\frac{\mu_{s1}/\mu_{s2}}{0,85f'_c} \right)^{\frac{1}{2}}} \right)$		

Экспериментальная программа

Для экспериментальной программы были изготовлены две двухпролетные железобетонные балки с размерами 120 x 150 x 2150 мм. Бетон, класса В20. Геометрия и армирование балок, а также конструкция опор и нагрузки показаны на рисунке 1. Балки были симметрично армированы двумя стержнями диаметром 12 мм сверху и снизу, а также закрытыми хомутами диаметром 6 мм, расположенными на расстоянии 75 мм и 150 мм друг от друга, чтобы предотвратить разрушение железобетонных балок при сдвиге.

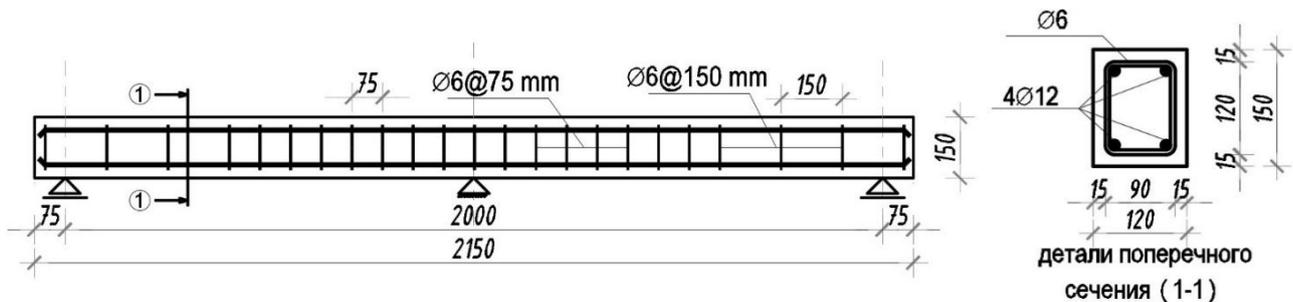


Рисунок 1 – Детали экспериментальной балки

Свойства материала

Были проведены испытания на одноосное сжатие бетонных кубов (100 x 100 x 100 мм). Средняя прочность бетонного куба на 28-й день испытаний (F_{cu}) составила 24,6 МПа. Кроме того, были проведены испытания на одноосное сжатие бетонных призм размером 100 x 100 x 400 мм. На каждую грань каждого образца-призмы были установлены два электрических деформационных датчика, чтобы измерить вертикальные и горизонтальные деформации во время испытаний на сжатие. Средняя прочность испытанного бетона (R_b) составила 18,5 МПа с предельными деформациями (ϵ_u) = 0,0024, модулем упругости бетона (E_c) = 20887 МПа и коэффициентом Пуассона, равным 0,16. Предполагаемое соотношение между прочностью цилиндра (f'_c) и прочностью призмы составляет ($f'_c = 1,067 R_b$). Таким образом, средняя прочность цилиндра на сжатие (f'_c) составила 19,75 МПа. Во время формования балок было изготовлено шесть бетонных кубов и три призмы, которые хранились вместе с балками во время выдержки. Свойства использованной стали: предел текучести (R_{sy}) - 551 МПа, максимальная прочность на растяжение R_{su} =6 МПа. Модуль упругости (E_s) стальных стержней составлял 201 ГПа для стержней диаметром 12 мм, предел текучести - 379 МПа, максимальная прочность на растяжение - 511 МПа. Модуль упругости стальных хомутов диаметром 6 мм составлял 200 ГПа. Балки были размещены на испытательной машине в соответствии с необходимыми параметрами для проведения испытаний. При нагрузке на балки была применена сосредоточенная нагрузка в центре каждого пролета (см. рисунок 2).

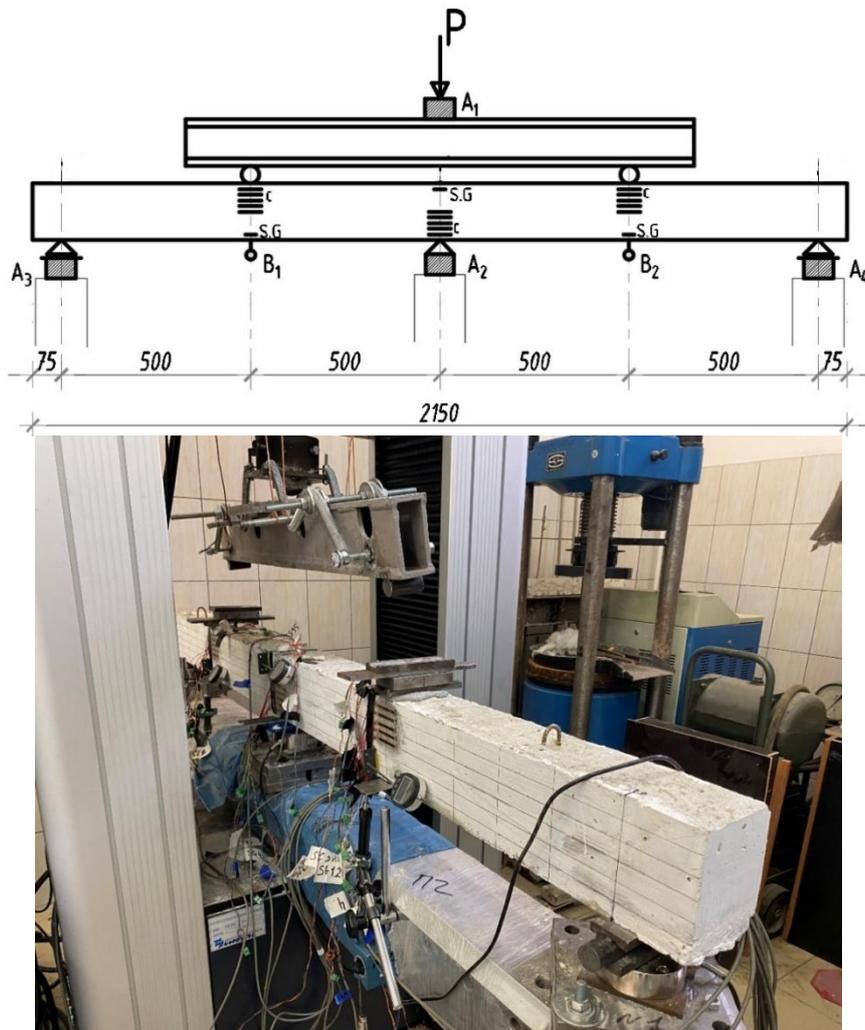


Рисунок 2 – Схема испытания железобетонной балки:

A - измерение сил тензодатчиком; *B* - LVDT; *S.G.* = Тензометрический датчик на продольном стержне;
C = Тензометрические датчики на бетоне.

Результаты исследования и их анализ

Статически неопределимые железобетонные балки были нагружены сосредоточенной нагрузкой в середине каждого пролета. Полученные экспериментальные результаты, включая режим разрушения, зависимость прогиба от нагрузки, деформации от нагрузки и перераспределения моментов, представлены ниже и обсуждаются. Кроме того, в данном разделе будут сравниваться средние значения экспериментальных результатов с расчетами по существующим моделям для перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках. Для оценки их точности использованы 10 наиболее распространенных моделей.

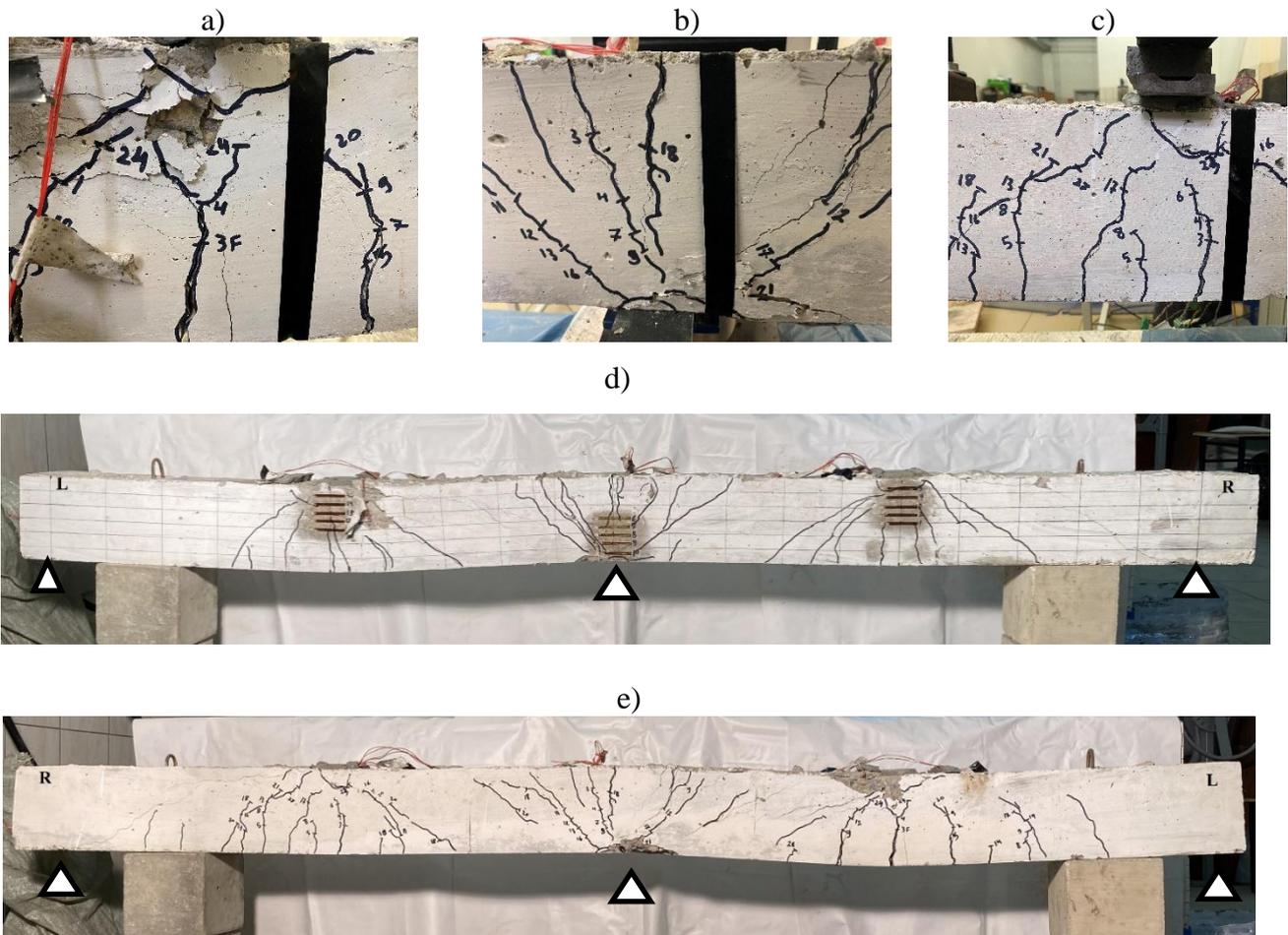


Рисунок 3 – Разрушение железобетонной балки при изгибе обозначается разрушением бетона в центральной опоре (b), а также на левом и правом промежуточных пролетах (a и c, соответственно). Кроме того, представлены полные изображения балки с лицевой и обратной стороны (d и e).

Первая растягивающая арматура сильно деформировалась на срединной опоре ($P_y = 134$ кН) и на промежуточных пролетах ($P_y = 175$ кН), прежде чем произошло деформирование бетона в обоих сечениях: на центральной опоре ($P_u = 185$ кН) и на промежуточных пролетах, как показано на рисунке 3. Кроме того, на промежуточных пролетах и на центральной опоре образовались широкие трещины, которые проникали в области сжатия. Балки также проявили трехступенчатую реакцию до разрушения, которую можно разделить на стадию предварительного раскрытия трещин бетона, стадию пост-раскрытия трещин бетона до предела прочности растягивающей арматуры, и стадию пост-предела прочности растягивающей арматуры до разрушения, как показано на рисунке 4.

Кроме того, на рисунке 5 представлена зависимость деформации от нагрузки на серединной опоре и на обоих промежуточных пролетах, что дает представление о деформационном поведении балок. На рисунке 6 и 7 показаны изменения распределения моментов, которые происходят по мере деформации балок и приближения к стадии разрушению. Фактический коэффициент перераспределения моментов на средней опоре составляет 0,146, а на промежуточных пролетах равен 0,088. Эти значения, а также все другие данные, полученные в ходе экспериментов, представлены в таблице 2. Экспериментальные данные далее будут использоваться для оценки точности существующих моделей прогнозирования перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках.

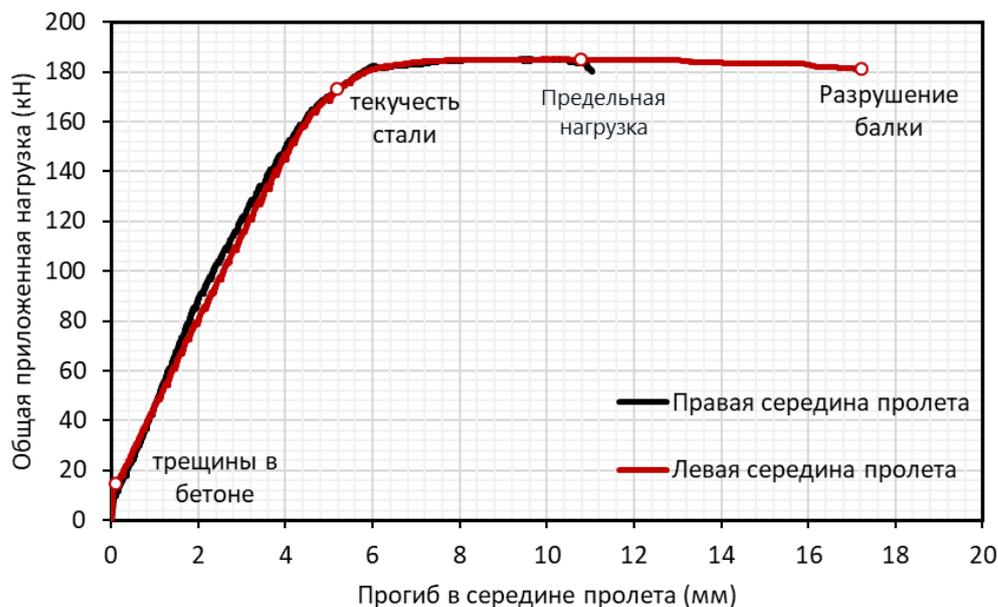


Рисунок 4 – Реакция балки прогиб - нагрузка

Таблица 2 – Параметры экспериментального образца

Переменные параметров	Значение	Переменные параметров	Значение
h_0 (мм) - рабочая высота сечения	135	h (мм) - высота сечения	150
f'_c (МПа) - прочность бетона на сжатие	19,75	L (мм) - длина пролета	1000
$\xi = x/h_0$ - относительная высота сжатой зоны бетона	0,35	L/h - гибкость балки	6,67
R_{sy} (МПа) - предел текучести арматуры	551	$\epsilon_s = \epsilon_t$ - максимальное значение деформации в растянутой арматуре, достигнутое в данном сечении	0,0054
R_{su} (МПа) - предел прочности арматуры	646	ϵ_{uk} - предельная деформация в арматуре	0,118
ω_w (%) - коэффициент армирования хомутов в средней опорной зоне	0,31	μ_{s1} - коэффициент армирования на средней опоре	0,014
$\frac{\mu_{s1}}{\mu_{s2}} = \frac{A_{s1}}{A_{s2}}$ - отношение коэффициентов армирования между средней опорой и средним пролетом	1,00	$\beta_{\text{экс}}$	0,146

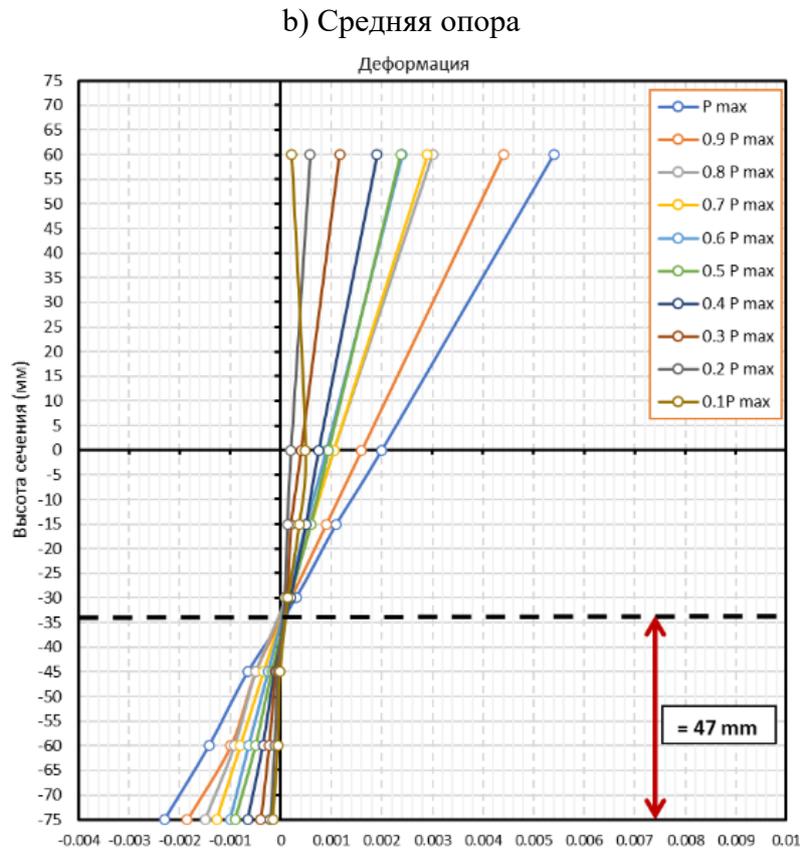
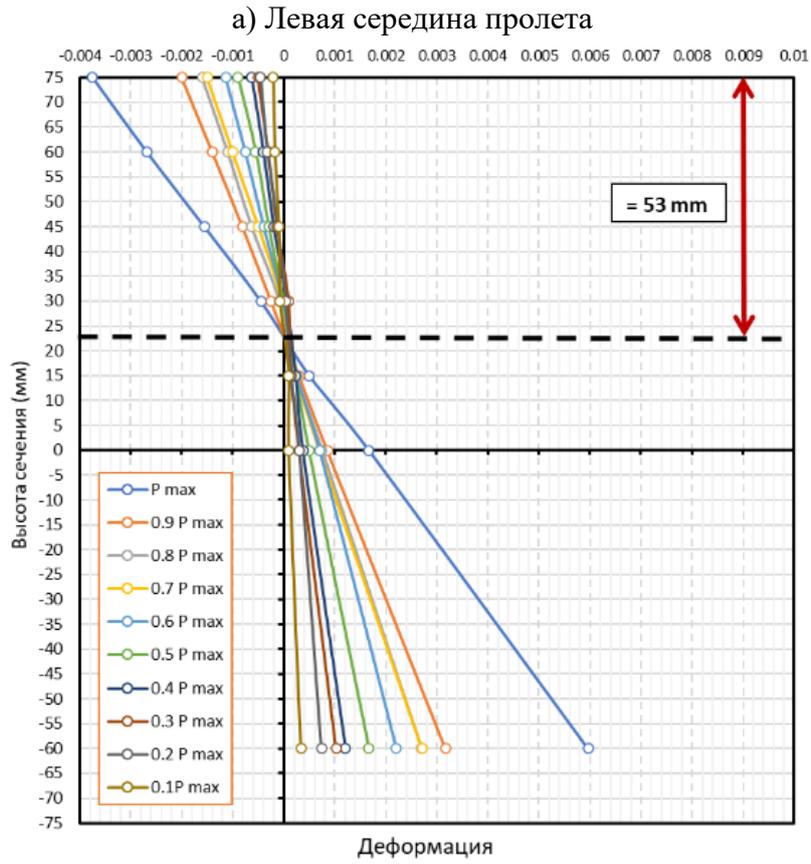


Рисунок 5 – График зависимости деформаций от нагрузки для стали и бетона:
(б) на центральной опоре и (а, с) на промежуточных пролетах

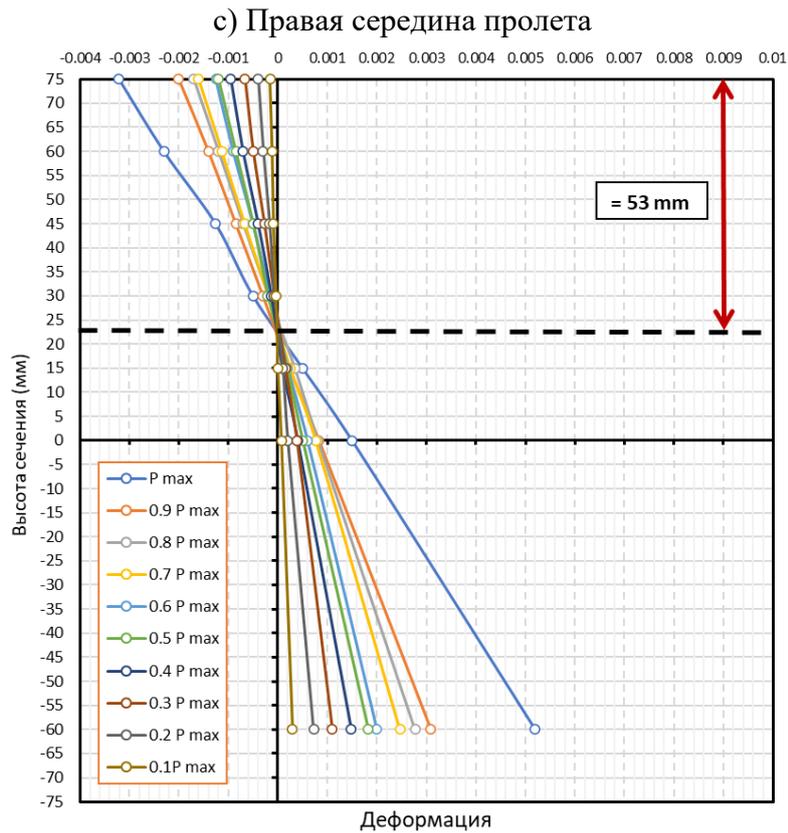


Рисунок 6 (продолжение) – График зависимости деформаций от нагрузки для стали и бетона: (b) на центральной опоре и (a, c) на промежуточных пролетах

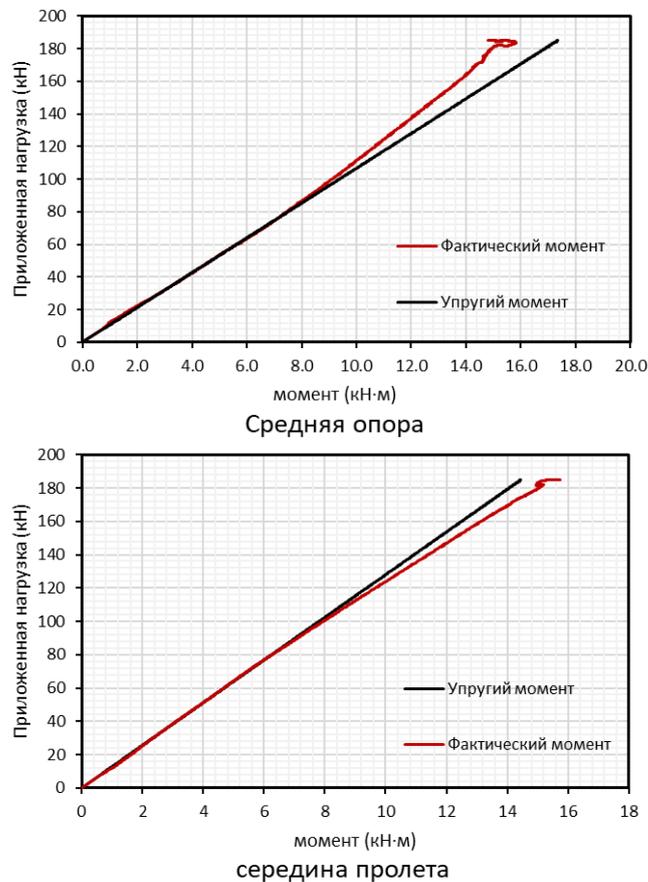


Рисунок 7 – Ответная реакция моментов под полной нагрузкой

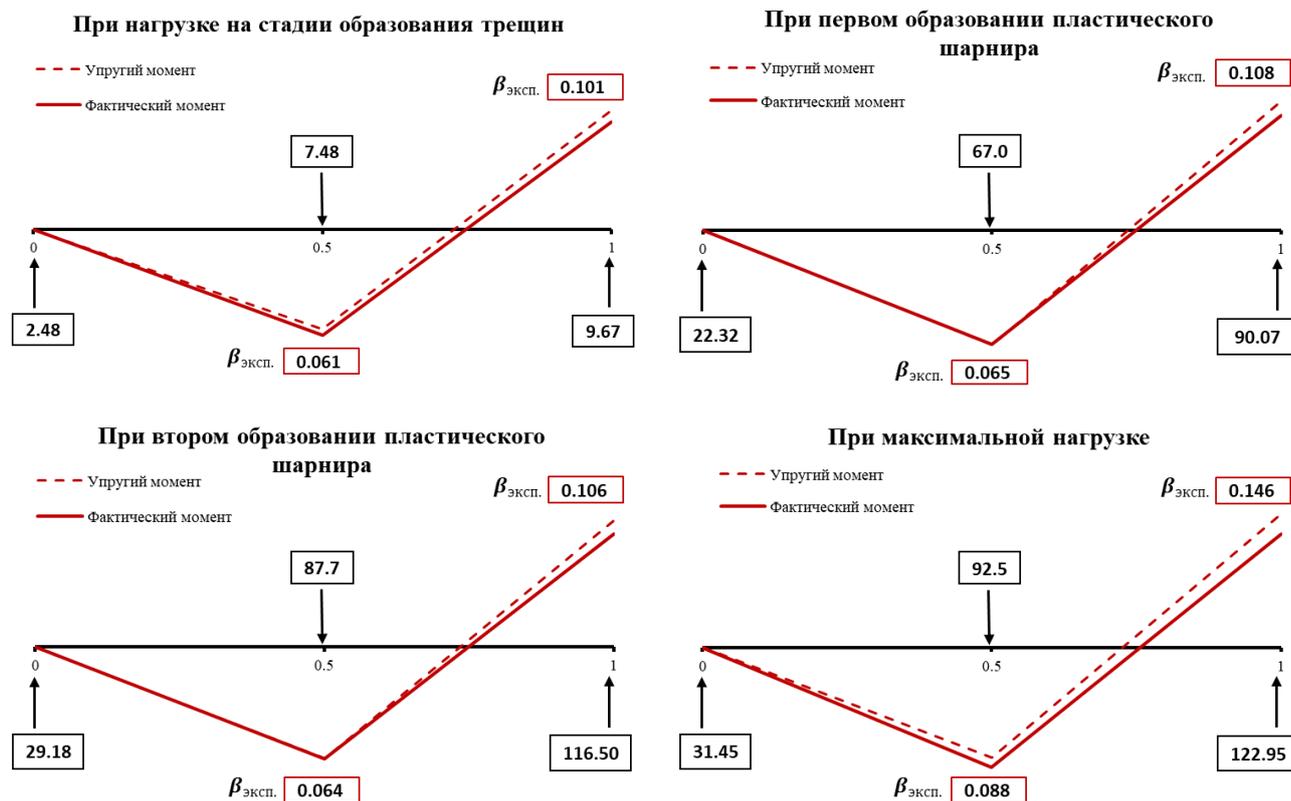


Рисунок 8 – Экспериментальный и упругий изгибающий момент испытуемых балок на различных стадиях нагрузки

Оценка существующих моделей для прогнозирования перераспределения моментов в железобетонных балках была проведена с использованием данных, полученных в экспериментах, как показано в таблице 3 и на рисунке 8. Среди предыдущих моделей Tamrazyan and Sayed (2022) [5] достигли наиболее точного прогнозирования коэффициентов перераспределения моментов ($\beta_{\text{расч.}}$), который находился в пределах 5% от экспериментального значения ($\beta_{\text{эксп.}}$), и абсолютной ошибкой 0,05. Aydogan et al. (2023) [14] также показали хорошую точность прогнозирования коэффициента перераспределения моментов, который был в пределах 12% от экспериментального значения, и абсолютной ошибкой 0,12.

Из моделей, используемых в нормативных документах, наиболее высокую точность прогнозирования показали Канадские стандарты [13], *fib Model Code 2010* и *Eurocode 2* [17,18], с коэффициентами перераспределения моментов, которые находились в пределах 15-16% от экспериментальных значений. В частности, у Канадских стандартов предсказанные коэффициенты перераспределения моментов находились в пределах 15% от экспериментальных значений, а у *fib Model Code 2010* и *Eurocode 2* - в пределах 16% от экспериментальных значений. Британские стандарты [15], напротив, склонны переоценивать коэффициент перераспределения моментов, в то время как остальные существующие модели склонны его недооценивать. В целом, результаты свидетельствуют о том, что модель Tamrazyan and Sayed [5], рассмотренная в данном исследовании, обеспечивает наиболее точные прогнозы перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках.

Таблица 3 – Эффективность различных существующих моделей

Литературы	$\beta_{\text{эксп.}}$	$\beta_{\text{рассч.}}$	$\beta_{\text{рассч.}}/\beta_{\text{эксп.}}$	Погрешность δ %
CSA A23.3-19	0,146	0,125	0,85	15
BS 8100-1 1997		0,250	1,71	71
AS 3600-2018		0,038	0,26	74
do Carmo and Lopes (2005)		0,071	0,49	51
Tamrazyan and Sayed (2022)		0,139	0,95	5
ACI 318-19		0,075	0,51	49
Aydogan et al. (2023)		0,129	0,88	12
DIN 1045-1		0,080	0,55	45
fib Model Code 2010 и Eurocode 2		0,123	0,84	16

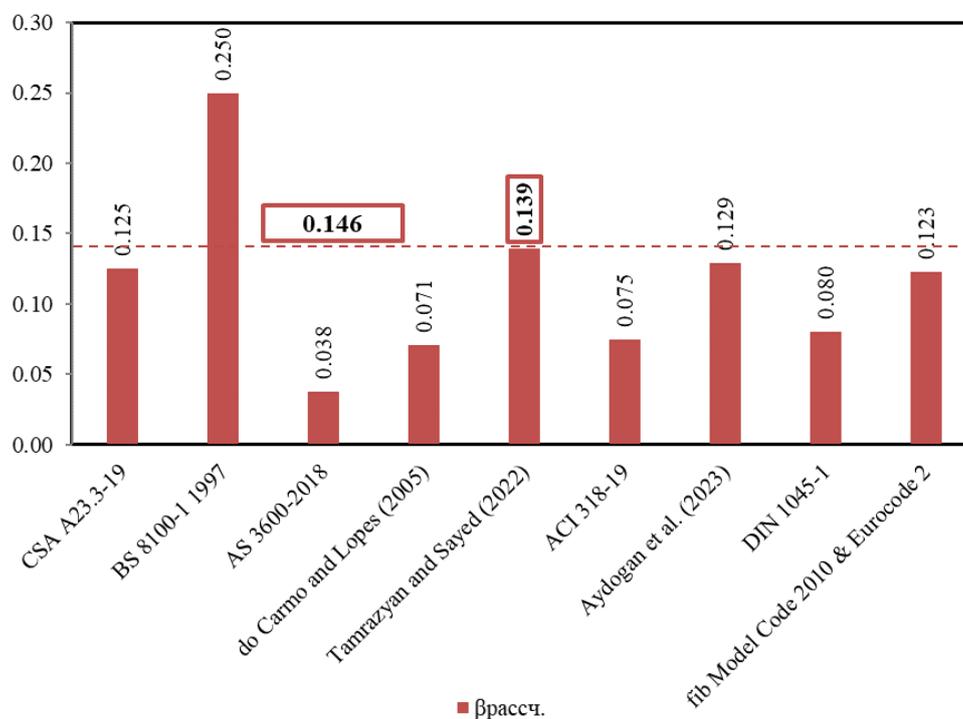


Рисунок 8 – Сравнение расчетного и экспериментального коэффициентов перераспределения моментов

Вывод

Коэффициент перераспределения моментов оказался зависим от различных параметров, таких как армирование балки μ_{s1} , относительная высота сжатой зоны бетона ξ , соотношение предела текучести арматуры на промежуточной опоре к прочности бетона f_y/f'_c и соотношения процентов армирования μ_{s1}/μ_{s2} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальницкий А.А. Расчёт статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий. М., 1970. 168 с.
2. Черняева Р.П. К определению границ перераспределения усилий при расчете статически неопределимых железобетонных балок по методу предельного равновесия // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 41-45.

3. Тамразян А.Г., Рашидов Б. О влиянии некоторых факторов на уровни перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // "Лолейтовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям. 2018. С. 447-454.
4. Тамразян А.Г., Рашидов Б.Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. № 6 (80). С. 14-21.
5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2023. Т. 27. № 4. С. 1503-1511.
6. Do Carmo R. N. F., Lopes S. M.R. Ductility and linear analysis with moment redistribution in reinforced high-strength concrete beams // Canadian Journal of Civil Engineering. 2005. Т. 32. № 1. С. 194-203.
7. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams // Magazine of Concrete Research. 2005. Т. 57. № 1. С. 9-20.
8. Bagge N., O'Connor A., Elfgren L., Pedersen C. Moment redistribution in RC beams—A study of the influence of longitudinal and transverse reinforcement ratios and concrete strength // Engineering structures. 2014. Т. 80. С. 11-23.
9. Шалобыта Н.Н., Царук О.Г., Полонский М.Ч., Демчук И.Е. Численное исследование перераспределения усилий в железобетонных элементах с комбинированным армированием // Вестник Брестского государственного технического университета. 2016. № 1(97). С. 86-92.
10. Истомин А. Д., Кудрявцев А. В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 51-55.
11. Li L., Zheng W., Wang Y. Prediction of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete structures using artificial neural network and support vector regression // Applied Sciences. 2018. Т. 9. № 1. С. 28.
12. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary // American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2019.
13. CSA, A-19. Design of concrete structures. Toronto, Ontario, Canada, 2019.
14. AS 3600-2018. Concrete structures. Sydney, Australia, 2018.
15. BS 8110-1. Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction // British Standards Institution. London, UK. 1997.
16. DIN, 1045-1. Concrete reinforced and prestressed concrete structures // German Institute of Standard Berlin, Germany. 2008.
17. FIB Model Code 2010. For Concrete Structures 2010 // International Federation for Structural Concrete. Ernst Sohn Publ, House, Lausanne. Switzerland. 2010.
18. BS., EN. 1992-1-1. Eurocode2. Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings // British Standards Institution, London, UK. 2004.
19. Aydogan M. S., Alacali S., Arslan G. Prediction of moment redistribution capacity in reinforced concrete beams using gene expression programming // Structures. Elsevier. 2023. Т. 47. С. 2209-2219.
20. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Параметры, влияющие на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 6. С. 4-11. doi:10.33622/0869-7019.2022.06.04-11

REFERENCES

1. Kal'nitskiy A.A. Raschot staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruksiy s uchotom pereraspredeleniya usily [Calculation of statically indefinable reinforced concrete structures, taking into account the redistribution of forces]. Moscow, 1970. 168 p. (rus)
2. Chernyayeva R.P. K opredeleniyu granits pereraspredeleniya usily pri raschete staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balok po metodu predel'nogo ravnovesiya [To determine the limits of redistribution of efforts in the calculation of statically non-selectable reinforced concrete beams using the method of limiting equilibrium]. Building and Reconstruction. 2014. No. 1 (51). Pp. 41-45. (rus)
3. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. O vliyaniy nekotorykh faktorov na urovni pereraspredeleniya momentov v staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balkakh [On the influence of certain factors on the levels of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams] // "Loleytovskie chteniya-150". Sovremennyye metody rascheta zhelezobetonnykh i kamennykh konstruksiy po predel'nykh sostoyaniyam. 2018. Pp. 447-454. (rus)
4. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. K urovnyu pereraspredeleniya momentov v staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balkakh [To the level of redistribution of moments in statically uncertain reinforced concrete beams] // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. No. 6 (80). Pp. 14-21. (rus)
5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2023. Т. 27. No. 4. Pp. 1503-1511.
6. Do Carmo R.N.F., Lopes S.M.R. Ductility and linear analysis with moment redistribution in reinforced high-strength concrete beams // Canadian Journal of Civil Engineering. 2005. Т. 32. No. 1. Pp. 194-203.

7. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams // Magazine of Concrete Research. 2005. T. 57. No. 1. Pp. 9-20.
8. Bagge N., O'Connor A., Elfgrén L., Pedersen C. Moment redistribution in RC beams—A study of the influence of longitudinal and transverse reinforcement ratios and concrete strength // Engineering structures. 2014. T. 80. Pp. 11-23.
9. Shalobyta N.N., Tsaruk O.G., Polonskii M.Ch., Demchuk I.E. Chislennoe issledovanie pereraspredeleniya usilii v zhelezobetonnykh elementakh s kombinirovannym armirovaniem [Numerical study of redistribution of the internal force in reinforced concrete elements with combined reinforcement] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. No. 1(97). Pp. 86-92. (rus)
10. Istomin A.D., Kudryavtsev A.V. Rabota staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh elementov v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Behavior of statically indeterminate reinforced concrete elements under negative temperature conditions] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. No. 7. Pp. 51-55. (rus)
11. Li L., Zheng W., Wang Y. Prediction of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete structures using artificial neural network and support vector regression // Applied Sciences. 2018. T. 9. No. 1. Pp. 28.
12. ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary // American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2019.
13. CSA, A-19: Design of concrete structures. Toronto, Ontario, Canada, 2019.
14. AS 3600-2018: Concrete structures. Sydney, Australia, 2018.
15. BS8110-1: Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction // British Standards Institution. London, UK, 1997.
16. DIN, 1045-1: Concrete reinforced and prestressed concrete structures // German Institute of Standard Berlin, Germany, 2008.
17. FIB Model Code 2010: for Concrete Structures 2010 // International Federation for Structural Concrete. Ernst Sohn Publ, House, Lausanne. Switzerland, 2010.
18. BS., EN. 1992-1-1. Eurocode2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings // British Standards Institution, London, UK, 2004.
19. Aydogan M. S., Alacali S., Arslan G. Prediction of moment redistribution capacity in reinforced concrete beams using gene expression programming // Structures. Elsevier. 2023. T. 47. Pp. 2209-2219.
20. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Parameters Affected the Moment Redistribution in Statically Indeterminate Reinforced Concrete Beams // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. No. 6. Pp. 4-11. doi:10.33622/0869-7019.2022.06.04-11

Информация об авторах:

Тамразян Ашот Георгиевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: tamrazian@mail.ru

Сайед Йехия Ахмед Котп

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: engyehia250@gmail.com

Information about authors:

Tamrazyan Ashot G.

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russia,
doctor of technical science, professor, and the head of reinforced concrete and masonry structures department.
E-mail: tamrazian@mail.ru

Sayed Yehia Ahmed Kotp

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russia,
PhD, student at the reinforced concrete and masonry structures department.
E-mail: engyehia250@gmail.com