



С. С. МОРДОВСКИЙ
Н. А. ИЛЬИН
Д. А. ПАНФИЛОВ
В. Н. ТАЛАНОВА
Я. А. БУЗОВСКАЯ

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С ДВОЙНОЙ АРМАТУРОЙ ПО ПРОЧНОСТИ, ДЕФОРМАЦИИ И ОГНЕСТОЙКОСТИ

METHOD OF MODELING A REINFORCED CONCRETE BEAM WITH DOUBLE
REINFORCEMENT FOR STRENGTH, DEFORMATION AND FIRE RESISTANCE

В статье представлено новое техническое решение, которое относится к области строительства, в частности, к испытаниям изгибаемых железобетонных элементов – балок здания на прочность, деформацию и огнестойкость на масштабной модели. Новый метод решения подразумевает повышение информативности, визуальной наглядности и глубины экспериментальных исследований железобетонных балок в результате использования экономичного способа проектирования геометрического и силового подобия масштабной модели железобетонной балки по прочности, деформации и огнестойкости. Предложенный метод позволяет оценить предельные состояния железобетонной балки по прочности, деформации и огнестойкости; разработать аналитическую модель для расчета фактического предела огнестойкости; сэкономить на трудозатратах при изготовлении масштабной модели натурной конструкции для её испытания.

Ключевые слова: здания и сооружения, железобетонные конструкции, изгибаемые элементы, масштабные модели, железобетонные балки, напряженное состояние, испытание на моделях, геометрическое подобие, силовое подобие, предельное состояние по прочности, предел огнестойкости

Цель предлагаемого авторского метода моделирования изгибаемых железобетонных элементов – расширение диапазона исследований прочности и деформативных характеристик

The article presents a new technical solution, which relates to the field of construction, in particular, to the testing of bending reinforced concrete elements - building beams for strength, deformation and fire resistance on a scale model. The new method of solution implies an increase in the information content, visual clarity and depth of experimental studies of reinforced concrete beams as a result of using the cost-effective way of designing geometric and forceful similarity to the scale model of reinforced concrete beams for strength, deformation and fire resistance. The proposed method allows us to estimate the limiting states of a reinforced concrete beam by strength, deformation and fire resistance; develop an analytical model for calculating the actual fire resistance; save on labor costs in the manufacture of large-scale model of full-scale design for its testing.

Keywords: buildings and structures, reinforced concrete structures, bendable elements, scale models, reinforced concrete beams, stress state, model testing, geometric similarity, force similarity, ultimate strength state, fire resistance

железобетонных балок, повышение информативности, визуальной наглядности и глубины экспериментального исследования железобетонных балок, снижение экономических затрат

на проектирование геометрического и силового подобия масштабной модели железобетонной балки с двойной арматурой по прочности, деформации и огнестойкости, сокращение объема работ на испытание натурной железобетонной балки.

Выполняется модель, геометрически подобная конструкции прототипа. Это условие необходимо для обеспечения полного подобия режима, и оно гарантирует идентичность форм модели и прототипа [1].

Для проведения исследования режима работы любой конструкции на модели необходимо знать форму и материалы, из которых выполняется конструкция прототипа.

Выбор масштаба модели зависит от ряда следующих факторов [1]: материал модели, простота изготовления, метод нагружения, измерение необходимых деформаций, наличие измерительного оборудования, стоимость материала модели и ее в целом, время изготовления.

На примере конструктивного бетона по ГОСТ 10180-2018 «Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам» наглядно можно проследить, как размеры испытываемых образцов значительно влияют на прочность при сжатии и на вид разрушения, получаемый при испытаниях. В реальности невозможно изготовить бетонную смесь в уменьшенном масштабе из-за малых начальных размеров частиц песка и цемента. То есть варьироваться может только фракция крупного заполнителя. Эти требования соблюдения масштаба могут негативно сказаться на результатах испытаний модели.

Таким образом, предложенный способ моделирования методом геометрического подобия возможно применять к реально существующим линейным конструкциям (балкам, колоннам), для которых допустима константа подобия модели 0,25: длиной от 2,4 м с минимальным размером поперечного сечения 240 мм. Для испытаний конструкций прототипа с размерами менее указанных не требуется изготовление модели, так как возможно испытание конструкций в натуральную величину. Для конструкций модели необходимо применение бетона того же состава и компонентов тех же фракций, как и для прототипа. Фракции крупного заполнителя модели желателен принимать не более 5-20.

Основными особенностями предлагаемого моделирования железобетонной балки с двойной арматурой являются:

1. Проектирование и изготовление масштабной модели с заданной константой подобия, выявление геометрических характеристик масштабной модели и натурной балки, уста-

новление прочностных показателей арматуры и бетона, выявление показателя термодиффузии бетона, установление моделирующих усилий по оценке прочности и огнестойкости железобетонной балки с двойной арматурой, определение прочности расчетного сечения масштабной модели и натурной балки при нормальных условиях эксплуатации, определение разрушающего изгибающего момента в сечении масштабной модели и натурной балки в условиях огневого испытания, определение длительности сопротивления масштабной модели огневому воздействию и величины проектного предела огнестойкости натурной железобетонной балки.

2. Соблюдение геометрического подобия модели по отношению к натурной железобетонной балке выражают уравнением

$$\begin{aligned} b_m &= b \cdot m; & h_m &= h \cdot m; \\ h_{o,m} &= h_o \cdot m; & a_m &= a \cdot m, \end{aligned} \quad (1)$$

где b , h и h_o – ширина, высота и рабочая высота железобетонной балки, мм; a – глубина заложения арматуры, мм; m – константа подобия модели.

3. Площадь арматуры и прочностные показатели арматуры и бетона модели выражены уравнениями:

$$A_{s,m} = \hat{A}_{s,m} = A_s \cdot m^2 = \hat{A}_s \cdot m^2; \quad (2)$$

$$R_{sc,m} = R_{s,m} = R_{sc} = R_s; \quad R_{sn,m} = R_{sn}; \quad (3)$$

$$R_{b,m} = R_b; \quad R_{bn,m} = R_{bn}, \quad (4)$$

где A_s , \hat{A}_s – площадь арматуры в растянутой и соответственно сжатой зоне сечения железобетонной балки, мм²; R_{sc} , R_s – расчетное сопротивление арматуры сжатию и соответственно растяжению, МПа; R_{sn} – нормативное сопротивление арматуры растяжению, МПа; R_b , R_{bn} – расчетное и соответственно нормативное сопротивление бетона, МПа.

4. Силовое подобие модели при определении прочности натурной железобетонной балки выражает пропорциональность изгибающего момента ($M_{m'}$, кН·м) в виде уравнения

$$M_m = M \cdot m^3, \quad (5)$$

где M – изгибающий момент от всех нагрузок на натурную балку, кН·м; m – константа подобия модели.

5. Силовое подобие модели при определении огнестойкости натурной железобетонной балки выражает пропорциональность изгиба-

ющего момента ($M_{m, cou}$, кН·м) от постоянных и длительных нагрузок в виде уравнения

$$M_{m, cou} = M_v \cdot m^3, \quad (6)$$

где M_v – изгибающий момент от постоянных и длительных нагрузок, МПа; m – константа подобия модели.

6. «Если мелкие детали конструкции не могут быть точно воспроизведены в модели, то она не воспроизведет полную картину работы конструкции вплоть до ее разрушения, хотя общий режим будет имитироваться верно» [1, с. 121]. Поэтому расчет по прочности нормальных сечений будем производить не на основе нелинейной деформационной модели, позволяющей проследить поведение материалов и конструкции на любой стадии нагружения, а на основе метода предельных усилий, применяя который можно получить единичный результат, указывающий на разрушающую величину нагрузок.

Расчет прочности прямоугольного сечения железобетонной модели с двойной арматурой производят в зависимости от высоты сжатой зоны (x_m , мм) по уравнению

$$x_m = (R_{s,m} \cdot A_{s,m} - R_{sc,m} \cdot A'_{s,m}) / (b_m \cdot R_{b,m}), \quad (7)$$

где $R_{s,m}$, $R_{sc,m}$ – расчетное сопротивление арматуры растяжению и соответственно сжатию, МПа; $A_{s,m}$, $A'_{s,m}$ – площадь арматуры в растянутой и соответственно сжатой зоне сечения модели, мм²; b_m – ширина сечения модели, мм; $R_{b,m}$ – расчетное сопротивление бетона сжатию, МПа.

Затем вычисляют относительную высоту сжатой зоны бетона модели по уравнению

$$\xi_m = x_m / h_o \quad (8)$$

и граничную высоту сжатой зоны по уравнению

$$\xi_{R,m} = 0,6 / (1 + R_s / 700); \quad (9)$$

при $\xi_m \leq \xi_{R,m}$ прочность сечения модели вычисляют по уравнению

$$M_{cc} = R_b \cdot b_m \cdot x_m \cdot (h_{o,m} - 0,5 \cdot x_m) + R_{sc} \cdot A'_{s,m} \cdot (h_{o,m} - a'_m). \quad (10)$$

7. Максимальный прогиб свободно опертого железобетонного элемента масштабной модели с трещинами по изгибной деформации (f_m , мм) определяют по уравнению

$$f_m = s \cdot l_m^2 \cdot (r_m^{-1})_{max}, \quad (11)$$

где s – статический коэффициент схемы нагружения балочного элемента; l_m – расчетный пролет масштабной модели, мм; $(r_m^{-1})_{max}$ – полная кривизна в сечении с максимальным изгибающим моментом, определяется по уравнению

$$(r_m^{-1}) = (M_m - \varphi_2 \cdot b_m \cdot h_m^2 \cdot R_{bt,ser}) / (\varphi_1 \cdot E_s \cdot A_{s,m} \cdot h_{o,m}), \quad (12)$$

где M_m – изгибающий момент в сечении модели, кН·м; φ_1 и φ_2 – расчетные коэффициенты, принимаемые по табл. 4.5 и 4.6 [2].

Прогиб натурной железобетонной балки (f , мм) вычисляют по уравнению

$$f = f_m / (k_1 \cdot m), \quad (13)$$

где f_m – прогиб железобетонной балочной модели с трещинами, мм; $k_1 = 2$ – показатель при константе подобия $m = 0,25$.

Результат расчета натурной железобетонной балки по прогибам ($f_{расч}$) производят из условия

$$f_{расч} \leq f_{ult}, \quad (14)$$

где $f_{расч}$ и f_{ult} – расчетный прогиб и соответственно допустимый прогиб, мм.

8. Для оценки огнестойкости натурной железобетонной балки сначала вычисляют интенсивность силовых напряжений ($J_{\sigma} \leq 1$) в сечении масштабной модели, используя уравнение

$$J_{\sigma} = M_{cou,m} / M_{cc,m}, \quad (15)$$

где $M_{cou,m}$ и $M_{cc,m}$ – изгибающий момент от испытательной нагрузки на огнестойкость и соответственно разрушающий изгибающий момент в сечении модели, кН·м;

а) степень огнезащиты растянутой арматуры модели (C_m) определяют по уравнению из п. 2.5 [3]:

$$c_m = 1,44 \cdot k_2 \cdot a_m / D_{br}^{0,8}, \quad (16)$$

где k_2 – коэффициент условий обогрева арматуры в сечении модели; a_m – глубина заложения арматуры в сечении модели, мм;

б) продолжительность сопротивления модели термосиловому воздействию в условиях пожара ($\tau_{u(R),m}$ мин) вычисляют по уравнению из п. 2.5 [3]:

$$\tau_{ur} = (2,15 | \ln J_{\sigma s} |)^{6,6/n} \cdot (t_{cr} / 425)^{6,6} \cdot e^c, \quad (17)$$

где $J_{\sigma} \leq 1$ – интенсивность силовых напряжений в рабочей арматуре модели; t_{cr} – критическая температура нагрева стали, °С; n – степень термотекучести стали; c – степень огнезащиты рабочей арматуры, см; $e = 2,72$ – основание натурального логарифма (\ln);

в) предел огнестойкости натурной балки по признаку потери несущей способности ($F_{u(R)}$ мин) вычисляют по уравнению

$$F_{ur} = \tau_{ur} / m^k, \quad (18)$$

где m – константа подобия модели; $k = 1,35$ при $m = 0,25$.

9. Стандартное огневое испытание определяет рост температуры в тепловой камере – печи в пределах $t_{cm} = (200 \div 1200)^\circ\text{C}$ по степенной функции из [4]:

$$t_{cm} = 500 \cdot \tau_{cm}^{0,15}, \quad (19)$$

где t_{cm} и τ_{cm} – температура стандартного испытания, $^\circ\text{C}$, и длительность огневого воздействия, мин.

Связь между совокупностью признаков и техническим результатом заключена в следующем: проектирование и изготовление масштабной модели с заданной константой подобия приближает испытание масштабной модели к испытаниям натуральных железобетонных балок. Разработка аналитического моделирования для расчета фактической огнестойкости железобетонной балки позволяет свести к минимуму огневые испытания балок и их моделей, а проведение неразрушающих испытаний снижает трудоёмкость оценки её прочности, деформации и огнестойкости. Следовательно, условия испытания железобетонной балки на масштабной модели значительно упрощены. Применение аналитического описания процесса сопротивления модели железобетонной балки стандартному огневому испытанию и использование построенной математической модели повышает точность и экспрессивность оценки огнестойкости.

Способ выявления прочности, деформации и огнестойкости железобетонной балки на масштабной модели производят в следующей последовательности. Сначала проектируют, с учетом геометрического и силового подобия, масштабную модель железобетонной балки с заданной константой подобия, выявляют геометрические характеристики модели и натуре, прочностные показатели заданных классов по прочности арматуры и бетона, устанавливают моделирующие усилия по выявлению несущей способности и огнестойкости балки, выявляют показатели термодиффузии бетона, определяют прочность расчетного сечения масштабной модели и натуре при нормальных условиях эксплуатации и разрушающего усилия в сечении модели и натуре в условиях стандартного огневого испытания, выявляют длительность сопротивления модели стандартному огневому испытанию и величину предела огнестойкости железобетонной балки по признаку потери её несущей способности.

На рис. 1 изображена схема моделирования железобетонной балки: g, g_n, g_{or} – нагрузки: расчетная, нормативная, при оценке огнестойкости, кН·м; M и M_m – изгибающий момент, действующий на натурную балку и соответственно на модель, кН·м.

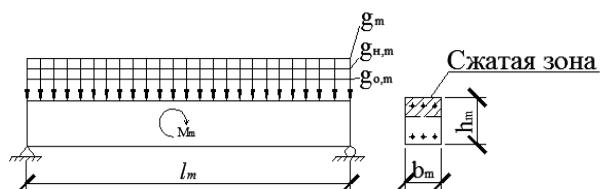


Рис. 1. Схема моделирования железобетонной балки

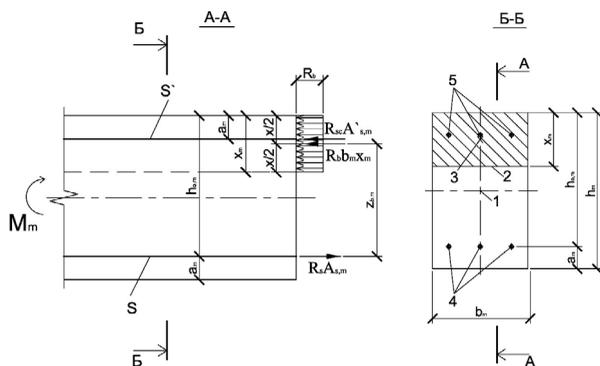


Рис. 2. Схема к расчету модели железобетонной балки на прочность и деформации

На рис. 2 изображена схема к расчету модели железобетонной балки на прочность и деформации: продольное сечение А-А, поперечное сечение Б-Б: 1 – ось симметрии сечения масштабной модели; 2 – граница сжатой зоны бетона; 3 – центр тяжести площади бетона сжатой зоны; 4 и 5 – продольная арматура в растянутой зоне (S) и соответственно в сжатой зоне (S'); b_m, x_m – ширина и высота поперечного сечения модели, мм; a_m и a'_m – глубина залегания арматуры S и S', мм; A и A' – площадь сечения арматуры S и S', мм²; h_{or} – рабочая высота сечения, мм; x_m – высота сжатой зоны сечения модели, мм; Z_m – плечо пары внутренних усилий, мм.

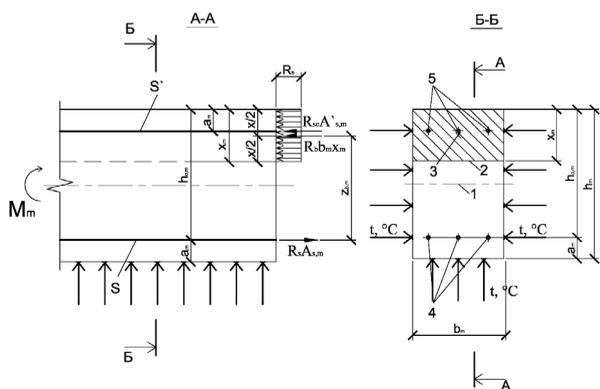


Рис. 3. Схема расчета на огнестойкость масштабной модели железобетонной балки прямоугольного сечения с двойной арматурой

На рис. 3 изображена схема расчета на огнестойкость масштабной модели железобетонной балки прямоугольного сечения с двойной арматурой: продольное сечение А-А, поперечное сечение Б-Б: 1 – ось симметрии сечения масштабной модели; 2 – граница сжатой зоны сечения; 3 – центр тяжести площади бетона сжатой зоны; 4 и 5 – продольная арматура в растянутой зоне (S) и соответственно в сжатой зоне (S'); $b_m x h_m$ – ширина и высота поперечного сечения модели, мм; a_m и a'_m – глубина залегания арматуры S и S', мм; A_{sm} и A'_{sm} – площадь сечения арматуры (S и S'), мм²; R_b и R_{bn} – нормативное сопротивление бетона и соответственно арматуры на растяжение/сжатие, МПа; $e_{o,m}$ – эксцентриситет продольной силы, мм; $h_{o,m}$ – рабочая высота сечения модели, мм; x_m – высота сжатой зоны сечения модели, мм; Z_m – плечо пары внутренних усилий, мм; t_{cm} , °C – температура теплового потока стандартного огневого испытания.

Предложенный метод выявления несущей способности и огнестойкости железобетонной балки на модели использован для экспериментальной оценки искомых характеристик изгибаемых элементов при проведении практических работ в отраслевой лаборатории железобетонных конструкций Академии строительства и архитектуры СамГТУ [5, 6].

Выводы. Предложенный авторами метод моделирования позволяет:

1. Определять количественные характеристики прочности, деформации и огнестойкости модели железобетонной балки.
2. Оценить предельное состояние железобетонной балки по прочности, деформации и огнестойкости.
3. Приблизить испытания масштабной модели к испытаниям натурной железобетонной балки здания.
4. Снизить трудозатраты на изготовление масштабной модели и ее испытание.

Об авторах:

МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. (846)339-56-35

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прис Б.В., Дэвис Д.Д. Моделирование железобетонных конструкций. Минск: Вышэйшая школа, 1974. 300 с.
2. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительно напряженной арматуры к СП 52-101-2003; (Расчет изгибаемых элементов на действие изгибающих моментов, пп. 3.15 – 3.19; табл.4.5; 4.6). М., 2005. 200 с.
3. Ильин Н.А., Панфилов Д.А. Оценка огнестойкости проектируемых железобетонных конструкций зданий: монография. Самара: СамГТУ, 2017. 186 с.
4. Ильин Н.А., Панфилов Д.А., Мордовский С.С. Сопротивление строительных конструкций зданий в условиях пожара. Самара: СамГТУ, 2018. 71 с.
5. Панфилов Д.А., Бородачев Н.А. Исследование влияния трещинообразования на прогибы изгибаемых железобетонных элементов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 70-й юбилейной Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР / СГАСУ. Самара, 2013. С. 314–316.
6. Panfilov D.A., Romanchikov V.V., Krupin K.N. Solving cross-disciplinary problems by mathematical modelling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 – Simulation and Automation of Production Engineering" 2018. С. 022080.

MORDOVSKY Sergey S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Building Structures Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194, tel. (846)339-56-35 E-mail: qaer1@yandex.ru

ИЛЬИН Николай Алексеевич

кандидат технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. (846)339-14-71

Ilyin Nikolay A.

PhD in Engineering Science, Professor of the Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194, tel. (846) 339-14-71

ПАНФИЛОВ Денис Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

PANFILOV Denis A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Building Structures Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194

ТАЛАНОВА Валерия Николаевна

магистрант Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

TALANOVA Valeriya N.

Master's Degree Student Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194

БУЗОВСКАЯ Яна Александровна

магистрант Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

BUZOVSKAYA Yana A.

Master's Degree Student Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194

Для цитирования: Мордовский С.С., Ильин Н.А., Панфилов Д.А., Таланова В.Н., Бузовская Я.И. Метод моделирования железобетонной балки с двойной арматурой по прочности, деформации и огнестойкости // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, №1. С. 4–9. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.1.

For citation: *Mordovsky S.S., Ilyin N.A., Panfilov D.A., Talanova V.N., Buzovskaya Y.I.* Method of modeling a reinforced concrete beam with double reinforcement for strength, deformation and fire resistance // Urban Construction and Architecture. 2019. V. 9, 1. Pp. 4–9. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.1.

Уважаемые читатели!

Центр инженерно-технических разработок СамГТУ (ЦИТР СамГТУ) приглашает к сотрудничеству. Основные направления деятельности Центра:

- выполнение полного цикла создания проектно-сметной документации для строительства объектов гражданского и промышленного назначения;
- выполнение работ по обследованию технического состояния объектов строительства;
- осуществление авторского, технического надзора, строительного контроля;
- выполнения работ по строительству и реконструкции объектов, научно-методическое руководство проектными и строительными работами;
- разработка и апробация новых технологий и методов в архитектуре и проектировании и строительстве зданий и сооружений;
- координация разработки и продвижения новых образовательных программ в области архитектуры, проектирования и строительства;
- предоставление консалтинговых услуг в сфере проектной и инженерно-технической деятельности.

Руководитель Романчиков Вячеслав Викторович

Контакты: 443110, Россия, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 18, оф. 3
тел. +7(937)070-19-02, E-mail: romanchikoff@mail.ru