

Деграционные повреждения железобетонной рамы в условиях длительной эксплуатации

УДК 624-2/-9

Берлинов Михаил Васильевич

Профессор, д-р техн. наук, почетный работник высшего профессионального образования РФ, профессор кафедры «Жилищно-коммунальный комплекс», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия; e-mail: BerlinovMV@mgsu.ru

Берлинова Марина Николаевна

Доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры «Жилищно-коммунальный комплекс», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия; e-mail: BerlinovaMN@mgsu.ru

Король Роман Анатольевич

Доцент, канд. техн. наук., доцент кафедры «Технология, организация, экономика строительства и управления недвижимостью», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия; e-mail: Romankoroll@mail.ru

Творогов Александр Владимирович

Инженер 1 категории отдела «Обследование строительных конструкций» АО «КТБ Железобетон», Москва, Россия; e-mail: Alextvor@yandex.ru

Аннотация. Предложена методика расчета железобетонной рамы в условиях реологического деформирования с учетом деграционных повреждений в результате коррозии при длительной эксплуатации, отражающая их реальную работу при совместном действии нагрузки и агрессивной среды на основе современной феноменологической теории деформирования упругоползучего тела. Показана возможность рассмотрения

процессов длительного деформирования железобетона в условиях длительной эксплуатации. Приведены аналитические зависимости и расчетный пример при рассматриваемом сроке эксплуатации.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, трещины, коррозионные повреждения, напряжения, деформации, нелинейность, реология

DEGRADATION DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE FRAME IN LONG-TERM EXPLOITATION

Berlinov Mikhail Vasilyevich

Professor, Doctor of Technical Sciences, Honored Worker of Higher Professional Education, Professor of the department «Housing and Communal Complex», Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: BerlinovMV@mgsu.ru

Berlinova Marina Nikolaevna

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Housing and Communal Complex» Housing and Communal Complex, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: BerlinovaMN@mgsu.ru

Korol Roman Anatolyevich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences Associate Professor of the department «Technology, Organization, Economics of Construction and Real Estate Management», Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia; e-mail: Romankoroll@mail.ru

Tvorogov Alexander Vladimirovich

Engineer of the 1st category of the department «Inspection of building structures» of JSC «КТБ Reinforced Concrete», Moscow, Russia; e-mail: Alextvor@yandex.ru

Abstract:

A method for calculating a reinforced concrete frame under rheological deformation conditions is proposed, taking into account degradation damage as a result of corrosion during long-term operation, reflecting their real work under the combined action of a load and an aggressive environment based on the modern phenomenological theory of deformation of an elastic-creeping body. The possibility of considering the processes of long-term deformation of reinforced concrete in conditions of long-term exploitation is shown. Analytical dependencies and a calculated example are given for the considered service life.

Keywords: reinforced concrete structures, cracks, corrosion damage, stresses, deformations, nonlinearity, rheology.

Введение

В условиях длительной эксплуатации [1 - 7] железобетонных конструкций в агрессивной среде при различных нагрузках необходимо оценить их напряженно-деформированное состояние в результате повреждения коррозией, учитывая уменьшение площади поперечного сечения бетона и арматуры.

Коррозионные повреждения железобетонных элементов могут повлиять на прочность материала, изменить схемы расчетов, перераспределить усилия в сечениях конструкции и нарушить совместную работу бетона с арматурой, а также привести к другим последствиям, которые снижают проектные сроки функционирования сооружений и другие эксплуатационные характеристики [5-12]. Самый неблагоприятный результат развития процесса коррозии железобетонных конструкций – это снижение их несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации, что приводит к несоблюдению требований по безопасности и предельным состояниям при действующих нагрузках в течение всего периода эксплуатации [13-15].

Исходные зависимости для расчёта

Исходя из общепринятой практики, усилие в поперечном сечении ж/б элемента до образования трещин представляет собой сумму усилий воспринимаемых арматурой и бетоном, тогда очевидно, что можно получить следующую формулу с учетом коррозионных повреждений в бетоне и арматуре:

$$\sigma_x(t)A_x = \sigma_{b,x}(t)K_b^*(z,t)A_{b,x} + \sigma_{s,x}(t)\omega_s(t)A_{s,x} \quad (1)$$

здесь: $x(t)$, среднее напряжение в сечении ж/б элемента; $s_{,x}(t)$ и $b_{,x}(t)$ – осредненные напряжения в арматуре и бетоне; $A_{b,x}$ и $A_{s,x}$ – соответствуют значениям площади арматуры и бетона;

$K_{b,x}(t)$ – коэффициент, учитывающий степень коррозионных повреждений бетона, изменяющийся с течением времени наблюдения; $s_{,x}(t)$ – аналогичный коэффициент для учета коррозионных повреждений арматуры.

Коэффициент, учитывающий степень коррозионных повреждений бетона определяется в виде:

$$K_b^*(z,t) = \left\{ 1 - \left[\frac{P}{\beta(t,t_0)} \right] \right\} = \frac{2P}{\beta^2(t,t_0)}z - \frac{1}{\beta^2(t,t_0)}z^2 \quad (2)$$

(t, t_0) - значение величины повреждения (рис. 1);

Для арматуры, подвергшейся коррозионному повреждению ее площадь необходимо рассматривать с учетом уменьшения с течением времени:

$$A_s = \omega_s(t)A_{s0} \quad (3)$$

где A_{s0} – площадь неповрежденной арматуры, $\omega_s(t)$ – коэффициент, учитывающий уменьшение площади арматуры в результате коррозии, определяемый по формуле:

$$\omega_s(t) = \left[1 - \frac{2\theta(t,t_0)}{D} + \frac{16\theta^2(t,t_0)}{\pi D^2} \right] \quad (4)$$

где: D – диаметр арматуры;

$$\theta(t, t_0) = \frac{k}{\sqrt{a}} t^n \quad (5)$$

k и n – эмпирические коэффициенты, a – величина защитного слоя бетона, мм. t – время

В случае появления трещины, можно воспользоваться общеизвестным допущением В.И. Мурашева [16]:

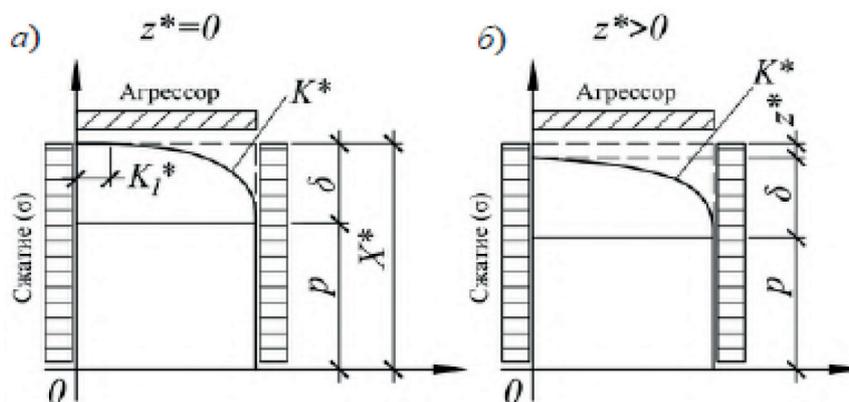


Рис. 1. только Одностороннее коррозионное это м повреждение бетонного простейшем образца

$$\sigma_s = \psi_{s,m} \mu_s \omega_s (t, t_0) \sigma_{s,m} (t, t_0); \quad (6)$$

$$\sigma_s = \psi_{s,m} \mu_s \omega_s (t, t_0) \sigma_{s,m} (t, t_0);$$

в котором: s – среднее напряжение, возникающее в арматуре в зоне между трещинами; s, m – коэффициент, который учитывающий влияние сцепления арматуры и растянутого бетона; μ_s – коэффициент армирования в этом направлении; s, m – напряжение в арматуре на участке с появившимися трещинами; s – относительные средние деформации на участках арматуры между появившимися трещинами; $E\sigma_s$ – модуль упругости арматуры.

Известно, что в железобетонных конструкциях в условиях длительного действия нагрузки важную роль играют неупругие деформации бетона. Сейчас большое распространение получила феноменологическая теория деформирования, которая оценивает напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций на основе использования уравнений механического состояния материалов. Среди большого количества существующих теорий ползучести бетона наибольшее распространение получила модель упруго-ползучего тела.

Нелинейность, неравновесность и анизотропия деформирования железобетона лишь частично учитываются существующими нормами. В инженерной практике допустима интегральная оценка вышеперечисленных факторов, поскольку дифференцированные методы расчета приводят к достаточно сложным системам дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, решение которых возможно только для частных задач.

Интегральный подход предусматривает зависимость жесткостных характеристик конструкций от уровня напряженного состояния, а интегральный модуль является функцией напряжений и параметров ползучести:

$$E^{in}(v, t) = \frac{\int_q^p [\sigma z^m b]^2 dz}{\int_q^p \varepsilon \sigma [bz^m]^2 dz} \quad (7)$$

Где: b – ширина поперечного сечения; m – показатель m -моментности отклонения, определяемый из дополнительных условий; p и q – пределы интегральной минимизации.

$$\varepsilon = \frac{S_M \left[\frac{\sigma(t)}{R(t)} \right]}{E_M^0(t)} - \int_{t_0}^t S_n \left[\frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right] \frac{\partial}{\partial \tau} C * (t, \tau) d\tau$$

– реологическое уравнение деформаций бетона.

$$\text{Здесь: } S \left[\frac{\sigma(\tau)}{R(\tau)} \right] = \left[1 + \eta \left(\frac{\sigma}{R} \right)^m \right] - \text{функции не}$$

линейности.

При расчете статически неопределимых конструкций методом сил, канонические уравнения имеют вид:

$$\sum_{i=1}^n \delta_{iK} x_K + \Delta_{iP} = 0, \quad (8)$$

$$\delta_{iK} = \sum \int \frac{M_i M_K}{E^{in}(v, t) J} dv. \quad (9)$$

В обычной упруго-линейной постановке единичные перемещения не зависят от уровня действующих сил, и решение уравнений (8) не встречает существенных затруднений. Для нелинейно и неравновесно деформируемого материала с учетом коррозионных повреждений, единичные перемещения теряют независимость от уровня действующих сил, уравнения (8) становятся нелинейными. Метод интегрального модуля деформаций позволяет сводить нелинейные задачи к линейному расчетному аппарату с помощью метода последовательных приближений, сущность которого заключается в следующем.

Рассчитываемая конструкция разбивается на определенное количество участков (определяемое требуемой точностью расчета), в первом приближении задача решается в упруго-линейной постановке. Затем по усилиям первого приближения для каждого участка осредненно вычисляются сжимающие напряжения в крайней (фибровой) точке поперечного сечения рамы, а также высота его сжатой зоны железобетонного элемента. Для того чтобы получить указанные величины, необходимо совместное рассмотрение разрешающих уравнений, вытекающих из условий равновесия, гипотезы плоских сечений и условий совместности деформаций. После чего вычисляется интегральный модуль деформаций и жесткости всех участков рамы:

$$D(t) = E^{in}(v, t) \left[\frac{K_b(t) b x^3}{12} + b x \left(q_0 - \frac{x}{2} \right)^2 \right] + E'_s \omega_s(t) A'_a (q_0 - a')^2 + \frac{E_s \omega_s(t) A_a}{\psi_a} (h_0 - q_0)^2; \quad (10)$$

где: x – высота сжатой зоны железобетонного элемента; q_0 – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до сжатой грани; E'_a и E_a – соответственно модуль упругости и площадь сжатой арматуры; ψ_a – линеаризованный коэффициент, учитывающий неравномерность работы растянутой арматуры.

После определения жесткости каждого участка рамы вновь решаются уравнения (8) и в новом реше-

нии уточняются усилия и изгибающие моменты. Затем в аналогичной последовательности расчет проводится и для каждого последующего момента времени до тех пор, пока разница между двумя последовательными шагами не достигнет точности, требуемой по расчету.

В некоторых случаях в зависимости от статической схемы и вида действующей нагрузки наблюдается так называемая «раскачка» результатов, в этом случае могут применяться известные математические методы улучшения сходимости решений.

Обычно количество итераций не превышает 4–5. Такой подход при решении нелинейных и неравновесных задач позволяет с помощью относительно несложного математического аппарата, легко поддающегося программированию на современных ЭВМ, получать приемлемые с инженерной точки зрения решения.

Результаты исследования

Для иллюстрации приведем пример расчета статически неопределимой рамы из монолитного

железобетона на действие равномерно распределенной нагрузки интенсивностью 37,7 кН/м (рис. 2,а). Пролет рамы – 12 м, высота – 6 м. Основная система показана на рис. «б». Материал рамы - бетон класса В30, арматуры - класса А400. Значения необходимых для расчета физико-механических характеристик и параметров ползучести приведены в [8]. Параметры нелинейности определялись по формулам, опубликованным в [17]. Возраст бетона $t_0 = 28$ суток, момент наблюдения $t = 10$ лет. Параметры коррозионных повреждений арматуры $k = 1,62$, $n = 0,68$,

В нелинейной постановке рама разбивалась на 12 участков, и единичные перемещения определялись по обычным правилам перемножения эпюр с учетом ступенчатого изменения жесткости по оси конструкции. Эпюры моментов, полученные при упругой и нелинейной постановке задачи, показаны на рис. 2.в.

Из рисунка «в» видно, что максимальная ордината эпюры моментов (точка б), получения при упругой постановке, уменьшилась в результате нелинейности деформирования, длительности эксплуатации и кор-

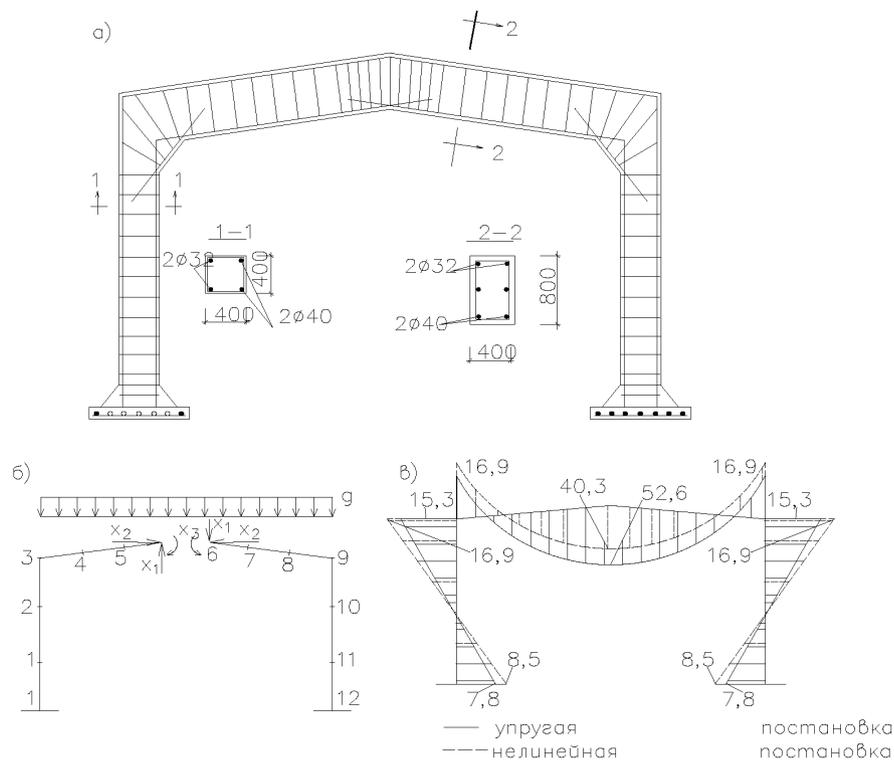


Рис. 2. Изгибающие моменты в раме (кНм): а-схема рамы; б-основная система; в-трансформация эпюры

позионных повреждений на 23,3%, а минимальные ординаты (точки 3, 1) увеличились соответственно на 10,4% и 8,9%.

Выводы

Анализ полученных результатов показал, что эпюры моментов, полученные при расчете рам по методу интегрального модуля деформаций с учетом длительной эксплуатации и коррозионных повреждений, отличаются от эпюр моментов, по-

лученных при так называемой упругой постановке. В нелинейной постановке наблюдается трансформация эпюр изгибающих моментов в сторону выравнивания усилий, т.е. уменьшение максимальных ординат эпюры моментов и увеличение минимальных, что объясняется характерным для железобетонных конструкций явлением перераспределения усиления с более нагруженных участков рамы на менее нагруженные, а также длительным сроком эксплуатации при наличии коррозионных повреждений.

Литература

- Berlinov M.V. Strength resistance of reinforced concrete elements of high-rise buildings under dynamic loads. E3S Web of Conferences. 2018. Volum 33. С.02049.
- Berlinov M.V., Berlinova M.N. Durability of reinforced concrete constructions in conditions of prolonged operation//Bulletin of construction equipment. 2019. No. 1 (1013). С. 60-61.
- Berlinov M.V., Berlinova M.N., Gregorian A.G.. Operational durability of reinforced concrete structures // E3S Web of Conferences. 2019. Volum 91. С.02012.
- Бондаренко В.М., Римшин В.И. Теория диссипативного силового сопротивления железобетона, Монография. 2015. 287 с.
- Крахмальний Т.А., Евтушенко С.И. Дефекты и повреждения столбчатых фундаментов производственных зданий // Строительство и архитектура (2019). Том 7. Выпуск 4 (25) 2019. – С.36-40. DOI: 10.29039/2308-0191-2019-7-4-36-40
- Крахмальний Т.А., Евтушенко С.И. Дефекты и повреждения железобетонных колонн производственных зданий // Строительство и архитектура (2020). Том 8. Выпуск 2 (27) 2020. – С.5-10. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-5-10
- Крахмальний Т.А., Евтушенко С.И. Повреждения железобетонных панелей производственных зданий // Строительство и архитектура (2021). Том 9. Выпуск 2 (31) 2021. – С. 66-70. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-2-66-70
- Бондаренко В.М. Феноменологии кинетики повреждений бетона и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде. // Бетон и железобетон, №2, Москва, 2008. С. 56–61.
- Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона, Монография. 2004. 112 с.
- Тамразян А.Г. Расчет конструктивных элементов с заданным нормальным распределением и надежностью и несущей способностью//Вестник МГСУ. 2012. № 10. С.109-115.
- New system of monitoring of a condition of cracks small reinforced concrete bridge constructions Krakhmalny T.A., Evtushenko S.I., Krakhmalnaya M.P. В сборнике: Procedia Engineering. 2016. С. 2369-2374.
- Информационные технологии при обследовании промышленных зданий Евтушенко С.И., Крахмальний Т.А., Крахмальная М.П., Чутченко И.А. Строительство и архитектура. 2017. Т. 5. № 1 (14). С. 65-71. DOI: 10.12737/article_592eb1694d6262.73142749
- К вопросу об остаточном ресурсе длительно эксплуатируемых мостов через водопроводящие каналы Евтушенко С.И., Крахмальная М.П., Крахмальний Т.А. Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 35 (54). С. 166-170.
- Система мониторинга состояния трещин и стыков зданий и сооружений Евтушенко С.И., Крахмальний Т.А., Крахмальная М.П. Патент на изобретение RU 2448225 С1, 20.04.2012. Заявка № 2010140257/03 от 01.10.2010
- Совершенствование методов обследования фасадов промышленных зданий /Евтушенко С.И., Крахмальная М.П., Шапка В.Е., Бабец Н.Н. // Строительство и архитектура. 2017. Т. 5. № 2 (15). С. 140-144. DOI: 10.12737/article_5950d228c2ae96.86803061
- Берлинов М.В., Берлинова М.Н., Творогов А.В., Печкина Е.К. Учет коррозионных повреждений эксплуатируемых железобетонных конструкций в условиях трехосного напряженно-деформированного состояния. Строительство и архитектура. 2020. Т.8. №3. С.40-46.
- СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Обновленная редакция СНиП 52-01-2003.