



А.А. Соловьёва, Е.А. Ильичев, С.А. Соловьёв
Вологодский государственный университет

СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ИЗГИБАЕМОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ГЕНЕРАЦИИ ДАННЫХ

В статье представлена методика вероятностного проектирования изгибаемого железобетонного элемента на заданный уровень надежности, а также анализа дальнейшего уровня надежности с учетом деградации площади поперечного сечения арматуры. Учет фактора деградации свойств материалов конструкции позволяет спрогнозировать остаточный ресурс элемента до капитального ремонта или замены.

Надежность, вероятностное проектирование, стохастический анализ, вероятность отказа, железобетонная балка, генерация данных, неопределенность.

Надежность – свойство строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. Объективной и наиболее распространенной мерой надежности в инженерной практике является вероятность безотказной работы. Текущие нормы проектирования строительных конструкций основаны на полувероятностном подходе. Переход на полные вероятностные методы является актуальной научной задачей, требующей исследования различных аспектов моделирования конструкций, в том числе стохастический анализ во времени. Использование вероятностных методов уже допускается в нормативах по проектированию железобетонных конструкций: п. 4.6. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» гласит: «расчет бетонных и железобетонных конструкций можно производить по заданному значению надежности на основе полного вероятностного расчета при наличии достаточных данных об изменчивости основных факторов, входящих в расчетные зависимости».

В настоящей работе рассматривается методика вероятностного проектирования изгибаемого железобетонного элемента с учетом деградации свойств конструкции со временем.

Рассмотрим железобетонную шарнирно опертую балку, которая подвергается воздействию морской среды, с расчетной схемой, показанной на рисунке 1.

Попадание хлоридов в бетон может инициировать коррозию стальной арматуры, когда концентрация хлоридов на поверхности стали достигает заданного порога, и в дальнейшем привести к снижению несущей способности всей конструкции. Зависимость между потерями в площади поперечного сечения стали и временем t может быть описана законами электролиза Фарадея [1]:

$$\Delta A_s = k\psi_0 \cdot i_{cor} \cdot (t - t_i), \quad t \geq t_i, \quad (1)$$

где A_s – площадь поперечного сечения арматуры; ψ_0 – диаметр стержня; k – константа; i_{cor} – скорость коррозии; t_i – время начала коррозии, которое равно времени, когда концентрация хлоридов на поверхности стального стержня достигает порогового значения c_{cr} .

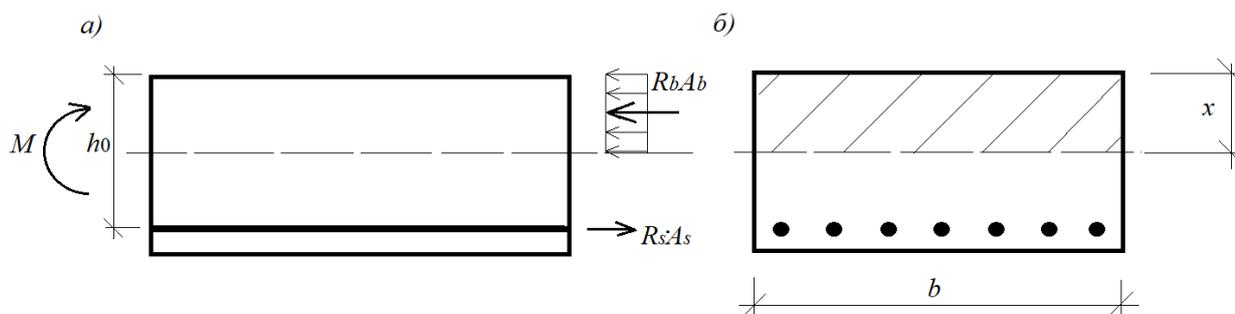


Рис. 1. Расчетная схема железобетонной плиты:

а) продольный фрагмент плиты перекрытия с односторонним армированием в растянутой зоне;
 б) поперечный фрагмент плиты перекрытия с односторонним армированием в растянутой зоне

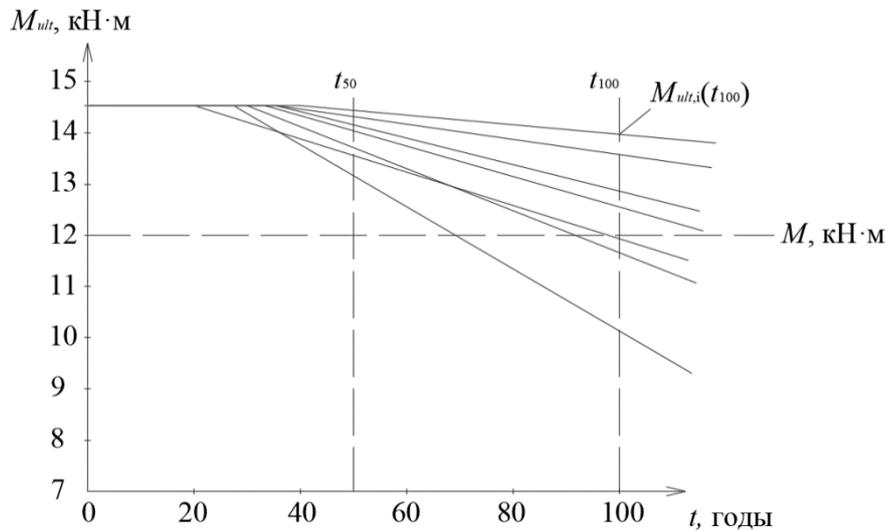


Рис. 2. Снижение несущей способности элемента со временем

В первом варианте анализа надежности пусть в снижении несущей способности по критерию прочности нормальных сечений доминирует потеря сечения площади поперечных сечений стальных стержней (отметим, что другие факторы также могут оказывать существенное влияние на снижение прочности). При этом изменяющаяся во времени несущая способность балки, $M_u(t)$, определяется следующим образом:

$$M_u(t) = R_s (A_{s0} - \Delta A_s(t)) \left[h_0 - \frac{R_s \cdot (A_{s0} - \Delta A_s(t))}{2R_b b} \right], \quad (2)$$

где A_{s0} – площадь поперечного сечения стержней в начале эксплуатации; остальные параметры соответствуют обозначениям СП 63.13330.2018.

Предположим, что в уравнении (1): $k = 0,0366$, а i_{cor} соответствует нормальному распределению со средним значением $0,67$ мкА/см² и коэффициентом вариации $0,58$, как указано в [2]. Время начала коррозии соответствует нормальному распределению со средним значением 30 лет и коэффициентом вариации $0,2$. Пусть четыре стержня арматуры диаметром 18 мм равномерно расположены в растянутой области балки. Прочность бетона на сжатие составляет 20 МПа, а прочность стальных стержней на растяжение – 335 МПа. С точки зрения геометрии сечения балки заданы параметры: $b = 250$ мм, $h_0 = 460$ мм и $x = 40$ мм.

При заданных условиях и $t=0$ предельный изгибающий момент составит по (2): $M_u(0) = 14,52$ кН·м.

Пусть пролет балки составляет $L=3$ м. Сосредоточенная нагрузка $P=16$ кН приложена в середине пролета балки. Необходимо определить вероятность разрушения балки через 50 лет и 100 лет соответственно. Отказом считается случай, когда изгибающий момент в середине пролета под действием P превышает предельную несущую способность по прочности нормальных сечений.

Используя метод статистической генерации [3], строятся примерные траектории изменения во времени несущей способности балки по изгибающему моменту следующим образом:

1. Генерируются две выборки для i_{cor} и t_i .

2. Для заданного времени t вычисляется $\Delta A_s(t)$ в соответствии с формулой: $\Delta A_s(t) = k\psi_0 \cdot i_{cor} \cdot \max(0, t - t_{i0})$.

3. Вычисляется значение остаточной несущей способности $M_u(t)$.

Выборочные кривые переменной во времени несущей способности $M_u(t)$ представлены на рисунке 2, из которых видно, что за контрольный период в 100 лет несущая способность снижается в среднем примерно на 10% .

Пусть M_p обозначен изгибающий момент в середине пролета, создаваемый сосредоточенной силой P . Поскольку балка шарнирно оперта, $M_p = 0,25 \cdot P \cdot L = 0,25 \cdot 16 \cdot 3 = 12$ кН·м. Вероятность отказа в момент времени t рассчитывается как вероятность того, что $M_u(t) < M_p$.

При $t = 50$ или 100 лет можно использовать моделирование Монте-Карло для приблизительного определения вероятности отказа. В данном примере было использовано 10^6 выборок для каждого периода отсчета. Результаты показывают, что в конце 50 лет вероятность отказа составляет $0,0010$; в конце 100 лет вероятность отказа составляет $0,1460$. Сравнение двух вероятностей отказа наглядно демонстрирует влияние снижения несущей способности на уровень структурной безопасности.

Представленным образом можно оценить уровень надежности объекта в различные периоды его эксплуатации.

Вероятностные методы расчета и проектирования строительных конструкций позволяют получить объективную количественную оценку уровня безопасности эксплуатации сооружения. Требуемое минимальное значение вероятности безотказной работы может быть установлено для каждого отдельного сооружения индивидуально в зависимости от величины риска отказа [4].

Литература

1. Li, Q. Surface deterioration analysis for probabilistic durability design of RC structures in marine environment / Q. Li, X. Ye // Structural Safety. – 2018. – Vol. 75. – P. 13–23.

2. Wang, C. Structural Reliability and Time-Dependent Reliability / Wang C. – Springer Cham, 2020. – 363 p.

3. Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов, работающих без трещин / В. П. Селяев, А. О. Колдин, Е. В. Сорокин [и др.] // Региональ-

ная архитектура и строительство. – 2011. – № 2. – С. 70–75.

4. Соловьев, С. А. Неклассические методы анализа надежности строительных конструкций / С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 135 с.

A.A. Solovyova, E.A. Ilichev, S.A. Solovyov
Vologda State University

STOCHASTIC ANALYSIS OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE ELEMENT RELIABILITY BASED ON DATA GENERATION

The article presents a methodology of probabilistic design of flexural reinforced concrete elements for reliability target and the analysis of the further reliability level taking into account the deterioration of the cross-sectional area of reinforcement. Residual life of the element before overhaul or replacement can be predicted by analyzing the deterioration factor of the materials and structure properties.

Reliability, probabilistic design, stochastic analysis, failure probability, reinforced concrete slab, data generation, uncertainty.