



АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПО ШИРИНЕ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН НА ОСНОВЕ АСИ 224R-01

В работе рассматривается проблема анализа надежности железобетонной балки по ширине раскрытия трещин на основе американского стандарта АСИ 224R-01 вероятностно-статистическим методом расчета. Графически проанализировано влияние коэффициентов вариации параметров в расчетной математической модели предельного состояния на вероятность безотказной работы железобетонной балки. Представлен метод расчета надежности эксплуатируемой железобетонной балки по критерию ширины раскрытия нормальной трещины в вероятностно-статистической постановке задачи.

Железобетонная балка, надежность, вероятность безотказной работы, АСИ, ширина раскрытия трещин, безопасность.

Железобетонные балки зачастую применяются в качестве различных несущих элементов сооружений. В практике обследований и выявлений категории технического состояния несущих элементов сооружений зачастую требуется оценивать безопасность эксплуатации изгибаемых железобетонных элементов, в частности железобетонных балок. Объективным количественным показателем и мерой безопасности эксплуатации железобетонных балок может служить их надежность. В качестве количественной меры значений показателей надежности в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» можно принять гамма-процентную наработку между отказами, вероятность безотказной работы, вероятность восстановления, среднее время между отказами, интенсивность отказов и др. В данной работе будем придерживаться показателя надежности в виде вероятности безотказной работы как наиболее распространенного показателя надежности в академической среде [1, 2, 3 и др.]. Межгосударственным стандартом ГОСТ 27751-2014 рекомендовано применять вероятностно-статистические методы расчетов надежности при наличии полной статистической информации об изменчивости исходных данных.

Оценка безопасности эксплуатации несущих элементов, в том числе железобетонных балок, на данный момент является актуальной задачей. Это обусловлено авариями железобетонных балок: обрушение железобетонной балки в 2014 году во Флориде стоило жизни рабочему; а при обрушении железобетонной балки в Индии в 2018 году погибло 16 человек. Своевременная количественная оценка и контроль безопасности эксплуатации железобетонных балок позволит предупреждать и предотвращать их аварии.

Согласно статистическим данным отчетов «European Ready Mixed Concrete Organization» (ERMCO) [4], лидирующую позицию по производству бетона занимают США, производя более 200 млн. м³ бетона в год (в данную статистику не включены Ин-

дия и Китай), что в 2 раза больше Японии и в 4 раза больше России. Повышенное производство конструкционного бетона требует повышенных мер контроля его безопасности при эксплуатации сооружений.

Нормальные трещины в железобетонных балках – распространенная неисправность элемента. Доктор технических наук, профессор К.А. Пирадов отмечает, что «железобетона без трещин не бывает» [5]. Нормальные трещины в растянутой зоне бетона балки снижают ее жесткость, увеличивают напряжения в рабочей арматуре балки, уменьшают высоту сжатой зоны бетона балки, а также являются причиной коррозии арматуры. В связи с этим в данной работе предлагается рассмотреть надежность железобетонной балки на основе американского стандарта АСИ 224R-01 «Control of cracking».

В России ширина раскрытия трещин ограничивается по СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» и СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии». В практических целях обычно принимается предельное значение ширины раскрытия трещины 0,3 мм при продолжительном раскрытии и 0,4 мм – при непродолжительном раскрытии. В американском стандарте АСИ 224R-01 приведены похожие ограничения (табл. 1).

Таблица 1

Предельная (рациональная) ширина раскрытия трещин по АСИ 224R-01

| Условия эксплуатации | Предельная (рациональная) ширина раскрытия, мм |
|--|--|
| Сухой воздух/Защитная мембрана | 0,41 |
| Влажный воздух, контакт с грунтом | 0,30 |
| При использовании антигололедных химикатов | 0,18 |
| Контакт с морской водой | 0,15 |
| Влагоудерживающие конструкции | 0,10 |

Ширина раскрытия трещины по ACI 224R-01 определяется по формуле (в обозначениях СП 63.13330.2012):

$$a_{crc} = 2,2 \frac{h-x}{h_0-x} \frac{R_s}{E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}, \quad (1)$$

где n – количество стержней рабочей арматуры в балке.

Рассмотрим вариант, предложенный в [6], когда напряжение в рабочей арматуре балки в (1) заменяется предельным напряжением стали арматуры $\sigma_{s,ult}$, и полученная ширина раскрытия трещины считается предельной. В таком подходе ширина раскрытия нормальных трещин ограничивается исходя из достижения рабочей арматурой предела текучести, а не исходя из эстетико-психологических требований и требований коррозионной стойкости. Тогда математическую модель предельного состояния для расчета надежности можно записать в виде:

$$\tilde{a}_{crc} \leq 2,2 \frac{h-x}{h_0-x} \frac{\sigma_{s,ult}}{E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}, \quad (2)$$

где \tilde{a}_{crc} – измеряемая ширина раскрытия трещины (случайная величина, что отмечено волнистой линией над символом).

Рассмотрим влияние коэффициента вариации ширины раскрытия трещины на вероятность безотказной работы балки. Математическую модель предельного состояния (2) запишем в виде:

$$\tilde{a}_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (3)$$

$$\text{где } a_{crc,ult} = 2,2 \frac{h-x}{h_0-x} \frac{\sigma_{s,ult}}{E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}.$$

Основные положения расчета надежности вероятностно-статистическими методами расчета можно найти в [1]. Надежность железобетонной балки по математической модели (3) можно определить по формуле:

$$P = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{a_{crc,ult} - m_{a,crc}}{S_{a,crc}}\right), \quad (4)$$

где $\Phi(\beta)$ – табличное значение функции Лапласа; $m_{a,crc}$ – математическое ожидание ширины раскрытия трещины, в качестве оценки которого можно использовать среднее арифметическое значение; $S_{a,crc}$ – среднее квадратическое отклонение ширины раскрытия трещины по результатам измерений.

Пример 1. Пусть условно известны значения: $h=0,5$ м, $b=0,2$ м, $h_0=0,47$ м, $a=0,03$ м, $n=4$, $E_s=2*10^{11}$ Па, $\sigma_{s,ult}=400$ МПа. Тогда $a_{crc,ult}=0,232$ мм. Пусть измеряемая ширина раскрытия трещины характеризуется параметрами (при нормальном законе распределения): $m_{a,crc}=0,17$ мм; $S_{a,crc}=0,03$ мм (коэффициент вариации $v_{a,crc}=0,176$). В этом случае надежность по (4) составит 0,981.

На рис. 1 приведен график функции зависимости надежности (вероятности безотказной работы) от коэффициента вариации ширины раскрытия трещины.

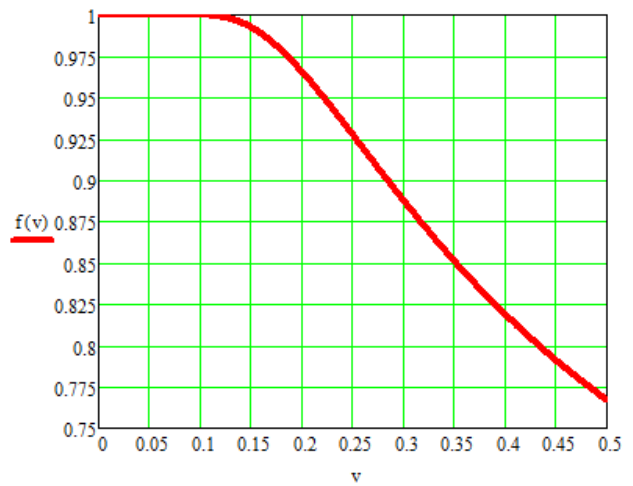


Рис. 1. Зависимость вероятности безотказной работы от коэффициента вариации ширины раскрытия трещины по исходным данным примера 1

Как видно на рис. 1, после превышения коэффициента вариации значения 0,15 значение надежности (вероятности безотказной работы) начинает резко снижаться.

Рассмотрим вариант, когда предельное напряжение стали арматуры (предел текучести) определяется по результатам испытаний и также является случайной величиной. В этом случае надежность можно рассчитать по формуле:

$$P = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{m_{a,crc,ult} - m_{a,crc}}{\sqrt{S_{a,crc}^2 + S_{a,crc,ult}^2}}\right), \quad (5)$$

где $m_{a,crc,ult} = m_{\sigma,s,ult} \cdot k$; $S_{a,crc,ult} = S_{\sigma,s,ult} \cdot k$;

$$k = 2,2 \frac{h-x}{(h_0-x)E_s} \sqrt[3]{2a^2 \frac{b}{n}}.$$

Пример 2. Воспользуемся данными примера 1. Пусть про предел текучести стали получена следующая статистическая информация: $m_{\sigma,s,ult}=400$ МПа; $S_{\sigma,s,ult}=30$ МПа. При этих данных надежность по (5) составит $P = \Phi(1,79) = 0,963$.

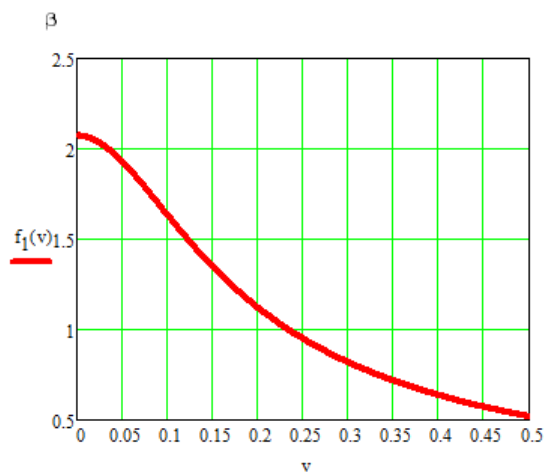


Рис. 2. Зависимость индекса надежности β от коэффициента вариации предела текучести стали арматуры балки

Как следует из примера 2, введение еще одной случайной величины снижает надежность железобетонной балки, т. к. в математическую модель предельного состояния добавляется некоторая неопределенность. Проанализируем влияние коэффициента вариации предела текучести стали арматуры на надежность железобетонной балки по примеру 2 (рис. 2).

Как видно на рис. 2, рост коэффициента вариации предела текучести стали арматуры оказывает серьезное влияние на индекс надежности β , что свидетельствует о необходимости статистического контроля производства и приемки стальной арматуры для железобетонных балок.

Можно сделать вывод, что с увеличением количества случайных величин в расчетных математических моделях предельных состояний снижается надежность элемента, т. к. вносится дополнительная неопределенность.

В работе представлены вероятностно-статистические методы расчета вероятности безотказной работы железобетонной балки по критерию ширины раскрытия нормальных трещин на основе стандарта ACI 224R-01.

Рассмотренный подход можно использовать для оценки влияния коэффициентов вариации параметров в математических моделях на надежность элементов, а также для расчетов надежности других несущих элементов сооружений.

Литература

1. Райзер, В. Д. Теория надежности сооружений / В. Д. Райзер. – Москва: АСВ, 2010. – 384 с.
2. Utkin, V. S. Reliability analysis of existing reinforced concrete beams on normal crack length criterion / V.S. Utkin, S. A. Solovyev // International journal for computational civil and structural engineering – 2017. – No. 2. – P. 56–63.
3. Соловьев, С. А. Расчет надежности железобетонной балки по критерию прочности бетона на стадии эксплуатации / С. А. Соловьев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2018. – № 3. – С. 17–22.
4. STATISTICS 2003-2006-ERMCO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ermco.eu/new/statistics-2003-2016/>.
5. Пирадов, К. А. Механика разрушения и теория железобетона / К. А. Пирадов, Н. В. Савицкий // Бетон и железобетон. – 2014. – № 4. – С. 23–25.
6. Уткин, В. С. Расчет надежности железобетонных балок по раскрытию трещин в бетоне при аварийных воздействиях / В. С. Уткин, С. А. Соловьев // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия: сб. докладов Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию кафедры желез. и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н. Н. Попова (Москва, 19-20 апр. 2016 г.). – Москва: НИУ МГСУ. – 2016. – С. 472–477.

S.A. Solovyev, L.S. Shevcov
Vologda State University

RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAM ON CRACK WIDTH BASED ON ACI 224R-01

The article describes the problem of reliability analysis of reinforced concrete beams on crack width based on the American Standard ACI 224R-01 by probabilistic and statistical method. Influence of variation coefficients of the parameters on failure probability were analyzed in the design mathematical model of limit state for reinforced concrete beam. The method of reliability analysis was offered for existing RC beams according to the criterion of normal crack width in probabilistic and statistical formulation of the problem.

Reinforced concrete beam, reliability, probability of failure, ACI, crack width, safety.