



УДК624.012.35

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Гарифуллин Динар Рафикович

главный инженер

E-mail: fszrkazan@mail.ru

НППФ Фундаментспецремонт

Адрес организации: 420087, Россия, г. Казань, ул. Гвардейская, д. 56

Оценка выносливости бетона сжатой зоны железобетонных изгибаемых элементов при стационарных режимах циклического нагружения

Аннотация

Постановка задачи. В железобетонных изгибаемых конструкциях при многократно повторяющихся циклических нагружениях стационарного режима в бетоне сжатой зоны проявляются и развиваются неупругие деформации виброползучести в связных условиях. По этой причине условия деформирования бетона сжатой зоны нестационарные даже при стационарном режиме внешней нагрузки.

Результаты. Проведены экспериментальные и теоретические исследования поведения железобетонного изгибаемого элемента, при стационарном режиме многократно повторяющегося циклического нагружения, установлен режим деформирования бетона сжатой зоны в составе изгибаемого элемента. Для оценки выносливости бетона сжатой зоны при таких режимах деформирования проведены исследования с использованием методов механики разрушения упругопластических материалов и получены уравнения выносливости бетона сжатой зоны для нестационарного режима деформирования. На основании проведенных исследований разработано уравнение выносливости бетона сжатой зоны для практических расчетов железобетонных изгибаемых элементов при стационарных режимах многократно повторяющейся циклической нагрузки.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что предложенная методика позволяет наиболее точно оценить напряженно-деформированное состояние бетона сжатой зоны и процессы изменения бетона с позиции механики разрушения, что является существенным вкладом в теорию усталостной прочности и обеспечивает экономию бетона до 25 % по сравнению существующими методами.

Ключевые слова: железобетон, бетон сжатой зоны, выносливость, циклическая нагрузка, стационарное нагружение, механика разрушения, виброползучесть, неупругие деформации.

Введение

Под действием многократно повторяющихся циклических нагрузок стационарного режима в бетоне сжатой зоны железобетонных изгибаемых элементов проявляются и развиваются неупругие деформации виброползучести. В связи с тем, что деформации виброползучести развиваются в связных условиях, в бетоне сжатой зоны и продольной растянутой арматуре появляются дополнительные напряжения по мере увеличения количества циклов нагружения. При этом, одновременно с изменением напряжений в бетоне сжатой зоны изгибаемого элемента, происходит изменение и коэффициента асимметрии цикла нагружений [1-6]. В процессе циклического нагружения в бетоне сжатой зоны изгибаемого элемента напряжения уменьшаются, а коэффициенты асимметрии цикла нагружений увеличиваются при увеличении количества циклов нагружения [7-14]. В связи с этим, назрела необходимость в разработке новой методики расчета усталостной прочности бетона сжатой зоны изгибаемых железобетонных элементов при стационарных режимах циклического нагружения [15-21].

Изменение напряжений в бетоне сжатой зоны при циклическом нагружении

При многократно повторяющемся приложении нагрузки изменение во времени напряженно-деформированного состояния железобетонного изгибаемого стержня может привести к тому, что предельное состояние наступит в результате исчерпания ресурса бетона или арматуры. В этих условиях для оценки выносливости железобетонного элемента в целом необходимо уметь оценивать несущую способность бетона сжатой зоны.

Текущие напряжения в бетоне сжатой зоны представляются в виде суммы начальных и дополнительных напряжений:

$$\sigma_b^{max}(t, \tau) = \sigma_b^{max}(t_0) + \sigma_b^{gon}(t), \quad (1)$$

где $\sigma_b^{max}(t_0)$ – начальные напряжения в бетоне сжатой зоны при первом цикле нагружения до максимальной нагрузки цикла, определяются для статического нагружения по формуле:

$$\sigma_b^{max}(t_0) = \frac{M_{max}}{\omega \cdot b \cdot x(h_0 - \gamma \cdot x)} = \frac{2M_{max}}{\xi[(1 + \lambda) - 0.33\xi(\lambda^2 + \lambda + 1)]bh_0^2}. \quad (2)$$

Относительная высота сжатой зоны $\xi = \frac{-\mu\alpha \pm \sqrt{(\mu\alpha)^2 + 2\mu\alpha(1-\lambda^2)}}{1-\lambda^2}$, $\mu = \frac{A_s}{bh_0}$; $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$; $\sigma_b^{gon}(t)$ – дополнительные напряжения в бетоне сжатой зоны вследствие виброползучести бетона в связанных условиях, исходя из (1) и (3) следует, что, при увеличении количества циклов нагружения, напряжения в бетоне сжатой зоны уменьшаются.

Дополнительные напряжения в бетоне сжатой зоны переставляется в виде:

$$\sigma_b^{gon}(t) = \left\{ -\frac{h_0}{x} \cdot E_s \int_{t_0}^t \sigma_b^{max}(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] dt \right\} \cdot A_s \left[\frac{1}{A_{red}} - \frac{e_0(h - x_p)}{J_{red}} \right]. \quad (3)$$

В начальной стадии нагружения коэффициент асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны равен коэффициенту асимметрии цикла внешней нагрузки, т.е. $\mathcal{P}_{bt_0} = \mathcal{P}_M$. При действии циклических нагрузок, вследствие проявления виброползучести бетона в связанных условиях, происходит непрерывное изменение \mathcal{P}_{bt} . В произвольный момент времени (t) коэффициент асимметрии цикла напряжений бетона сжатой зоны можно представить в виде:

$$\mathcal{P}_{bt}(t) = \frac{\sigma_b^{max}(t)\mathcal{P}_M - \frac{h_0}{h} E_s A_s \left[\frac{1}{A_{red}} - \frac{e_0(h - x_p)}{J_{red}} \right] \cdot \int_{t_0}^t \sigma_b^{max}(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E_b(\tau)} + C(t, \tau) \right] dt}{\sigma_b^{max}(t_0) - \frac{h_0}{h} E_s A_s \left[\frac{1}{A_{red}} - \frac{e_0(h_0 - x_p)}{J_{red}} \right] \cdot \int_{t_0}^t \sigma_b^{max}(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E_b(\tau)} + C(t, \tau) \right] dt}. \quad (4)$$

Из (2) следует, что, при увеличении количества циклов нагружения, уменьшается коэффициент асимметрии цикла напряжений бетона сжатой зоны.

Изменение прочности бетона сжатой зоны при циклическом нагружении

Известно, что объективная прочность бетона, находящегося в условиях действия многократно повторяющихся циклических нагрузок, меньше кратковременной.

В расчетах это обстоятельство учитывается путем введения к кратковременной прочности, соответствующей моменту приложения нагрузки τ , коэффициента:

$$k_{bP} = \frac{R'_b(t)}{R_b(\tau_1)}, \quad (5)$$

где $R'_b(t)$ – предел выносливости бетона в рассматриваемый момент времени (τ); $R_b(\tau_1)$ – кратковременная прочность бетона в момент приложения многократно повторяющейся нагрузки (τ_1).

Результаты предыдущей главы показывают, что в элементах железобетонных конструкций процесс снижения прочности проявляется в более сложной форме. Связано это с тем, что в бетоне сжатой зоны изгибаемых элементов происходит изменение во времени уровня максимальных напряжений цикла, коэффициента асимметрии цикла напряжений \mathcal{P}_{bt} .

Кривые выносливости бетона бетонных или железобетонных стержней можно построить экспериментально. Опытным путем получить кривую выносливости бетона сжатой зоны в железобетонных изгибаемых элементах практически невозможно, поскольку до настоящего времени не существует апробированных способов определения

напряжений в бетоне путем прямого эксперимента. Построение такой кривой связано с необходимостью использования тех или иных дополнительных предпосылок.

Данные об усталостной прочности бетона в сжатой зоне железобетонных изгибаемых элементов и, в частности, в переармированных элементах, можно получить на основе опытной кривой усталостного сопротивления железобетонного стержня и расчетных значений напряжений в бетоне. Сравнивая напряжения в бетоне стержней, разрушаемых кратковременной статической нагрузкой, в возрасте τ_l и после многократно повторного нагружения можно получить данные о влиянии предшествующих переменных напряжений на кратковременную прочность бетона сжатой зоны.

Даже при стационарных нагружениях в условиях действия напряжений, переменных по максимальному уровню и по амплитуде, необходимо установить понятие выносливости в этих условиях. При этом возможны два подхода. Под величиной предела выносливости бетона сжатой зоны в условиях заданного режима изменения напряжений и коэффициента асимметрии цикла напряжений можно понимать, во-первых, значение напряжения в момент времени t , непосредственно предшествующее разрушению (в дальнейшем – момент разрушения) – $\sigma_b^{max}(t, \tau_1)$. Во-вторых, значение напряжения в момент приложения максимальной нагрузки цикла τ_l , при котором усталостное разрушение произойдет в момент времени t – $\sigma_b^{max}(t, \tau_1)$. Режим изменения напряжений связывает величины $\sigma_b^{max}(t, \tau_1)$ и $y_b^{max}(t, \tau_1)$.

Совокупность значений $\sigma_b^{max}(t, \tau_1)$ и $\sigma_b^{max}(t, \tau_1)$ составляют кривые $R_b^*(t, \tau_l)$ и $R_b(t, \tau_l)$, характеризующие выносливость бетона при нестационарных режимах изменения напряжений. Представляется, что определение выносливости через $R_b^*(t, \tau_l)$ более корректно с физической точки зрения, поскольку связано с напряжениями в момент разрушения.

Понятие $R_b(t, \tau_l)$ несколько условно, так как связано с напряжениями, действовавшими ранее, т.е. в момент приложения максимальной нагрузки первого цикла, приводящей к разрушению.

Однако, при выполнении практических расчетов на выносливость, использование кривой $R_b(t, \tau_l)$ более предпочтительно, поскольку не требует определения напряжений, сформировавшихся к моменту разрушения. При $t \rightarrow \approx N=2,10^6$ циклов значения $R_b^*(t, \tau_l)$ и $R_b(t, \tau_l)$, характеризуют предел выносливости бетона сжатой зоны железобетонной конструкции. Переходя к относительным величинам, получаем:

$$\eta_{\sigma_b}^*(t, \tau_1) = \frac{R_b^*(t, \tau_1)}{R_b(\tau_1)}, \quad (6)$$

$$\eta_{\sigma_b}(t, \tau_1) = \frac{R_b(t, \tau_1)}{R_b(\tau_1)}. \quad (7)$$

При $t \rightarrow \infty (N=2,10^6 \text{ цикл.})$ коэффициенты $\eta_{\sigma}^*(t, \tau_l)$ и $\eta_{\sigma}(t, \tau_l)$ характеризуют относительный предел выносливости бетона сжатой зоны.

В связи с тем, что коэффициент $\eta^*(t, \tau)$ связан с напряжениями, сформировавшимися к моменту разрушения, уменьшение во времени его значений в условиях циклического действия нагрузки связано с тремя факторами: накоплением повреждений, падением напряжений и уменьшением коэффициента асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны. Для практического применения коэффициента $\eta_{\sigma}^*(t, \tau_l)$ необходимо определить напряжения в момент разрушения, что связано с определенными трудностями вычислительного характера.

При выполнении практических расчетов удобнее использование коэффициента $\eta_{\sigma}(t, \tau_l)$ поскольку он связан с напряжениями в момент приложения нагрузки. Кроме того, уменьшение во времени значений $\eta_{\sigma}(t, \tau_l)$ обусловлено только снижением усталостной прочности бетона сжатой зоны в условиях переменных напряжений.

В этом плане коэффициент $\eta_{\sigma}(t, \tau_l)$ подобен коэффициенту условий работы γ_l , имеющемуся в (СНиП 2.03.01.84) СП 63.13330.2012. Из равенства (3) видно, что $\eta_{\sigma}(t, \tau_l)$ показывает какую долю от кратковременной прочности должно составлять напряжение в бетоне сжатой зоны к окончанию нагружения конструкции $\sigma_b(t, \tau)$ при условии, что усталостное разрушение произойдет в момент времени $t \approx N=2,10^6$ циклов.

Используя известное соотношение:

$$\begin{aligned} \sigma_b^*(t, \tau_1) &= \sigma_b(t, \tau_0) \cdot H_{\sigma}(t, \tau), \\ \mathcal{P}_b(t, \tau) &= \mathcal{P}_b(t, \phi_0) \cdot H_{\mathcal{P}_b}(t, \tau), \end{aligned} \quad (8)$$

где $H_\sigma(t, \tau)$ – функция накопления напряжений; $H_{P_b}(t, \tau)$ – функция изменения коэффициента асимметрии цикла напряжений; и, учитывая, что в момент разрушения элемента по бетону сжатой зоны выполняется равенство:

$$\sigma_b^*(t, \tau_1) = R_b^*(t, \tau). \quad (9)$$

Получаем выражение для определения относительного предела выносливости бетона сжатой зоны:

$$\eta_\sigma(t, \tau) = \frac{R_b^*(t, \tau) \cdot H_{P_b}(t, \tau)}{R(\tau) \cdot H_\sigma(t, \tau)}. \quad (10)$$

В формуле (6) показывает изменение объективной прочности бетона сжатой зоны вследствие уменьшения коэффициента асимметрии цикла напряжений.

Оценка выносливости бетона сжатой зоны

Сравнивая выражения (5) и (10), и учитывая, что $H_\sigma(t, \tau) < 1$ и $H_{P_b}(t, \tau) < 1$, получаем:

$$\eta_\sigma(t, \tau) \neq k_{P_b}. \quad (11)$$

Относительный предел выносливости бетона сжатой зоны в железобетонных элементах не совпадает с относительным пределом выносливости бетонных призм при постоянном уровне максимальных напряжений цикла, коэффициента асимметрии цикла напряжений.

Для аналитического анализа усталостной прочности бетона сжатой зоны необходимо определять прочность бетона на сжатие при переменных значениях максимальных напряжений и коэффициента асимметрии цикла напряжений.

Для определения усталостной прочности бетона сжатой зоны изгибаемого железобетонного элемента при вышеописанных условиях воспользуемся уравнением объективной прочности при нестационарных режимах. Для упрощения процесса вычислений оценка выносливости производится на конечной стадии работы конструкции, непосредственно предшествующей исчерпанию несущей способности.

Вычисляем значения $\sigma_b^{max}(t_0)$, $\sigma_b^{max}(t)$, P_{bt} , $H_{\sigma_b}(t, \tau)$. Затем, исходя из того, что уменьшение P_{bt} и $\sigma_b^{max}(t)$ зависит от виброползучести бетона сжатой зоны, изменение разбиваем на n этапов (ступеней). В общем случае разбивка на этапы может быть совершенно произвольно.

В данном случае для большей наглядности принимаем, что напряжения при переходе от одного блока к другому меняются на одну и ту же величину $\Delta\sigma_{bi}(t)$. Для определения $\Delta\sigma_b(t)$ величину $H_{\sigma_b}(t, \tau)$ делим на n (где n – количество этапов нагружения в блоке), а затем начальные напряжения умножаем на эту же величину, т.е.

$$\Delta\sigma_b(t) = \frac{H_{\sigma_b}(t, \tau)}{n} \cdot \sigma_b^{max}(t_0). \quad (12)$$

При этом необходимо иметь введу, что с увеличением номера этапа (i) приращение $\Delta\sigma_{bi}(t)$, (4) достигается за разное количество циклов нагружения.

Рассмотрим следующую последовательность изменения напряжений в бетоне сжатой зоны (рис. 1).

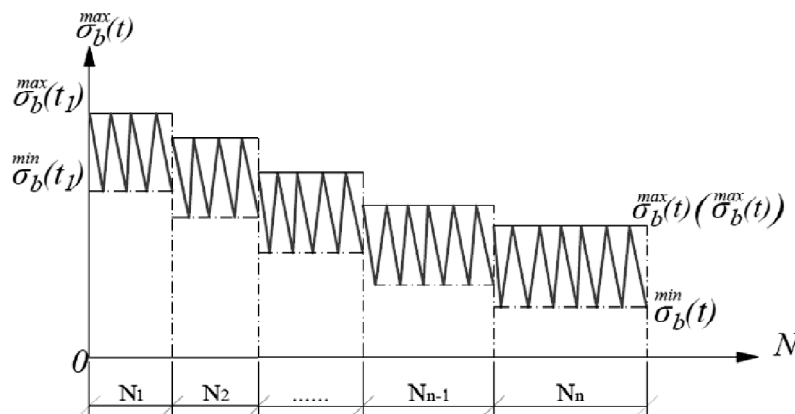


Рис. 1. Схема изменения напряжений в бетоне сжатой зоны при многократно повторяющемся нагружении с $M^{max} = const$ и $P_M = const$ (иллюстрация авторов)

На рис. 1 $\sigma_{b1}^{max} = \sigma_b^{max}(t_0) - \Delta\sigma_b$ – при количестве циклов нагружения N_1 и коэффициенте асимметрии цикла напряжений \mathcal{P}_{b1} ;

$\sigma_{b2}^{max} = \sigma_b^{max}(t_0) - 2\Delta\sigma_b$ – при количестве циклов нагружения N_2 и коэффициенте асимметрии цикла напряжений \mathcal{P}_{b2} ;

$\sigma_{b3}^{max} = \sigma_b^{max}(t_0) - 3\Delta\sigma_b$ – при количестве циклов нагружения N_3 и коэффициенте асимметрии цикла напряжений \mathcal{P}_{b3} ;

$\sigma_{b_{n-1}}^{max} = \sigma_b^{max}(t_0) - (n-1)\Delta\sigma_b$ – при количестве циклов нагружения N_{n-1} и коэффициенте асимметрии цикла напряжений $\mathcal{P}_{b(n-1)}$;

$\sigma_{bn}^{max} = \sigma_b^{max}(t) - n\Delta\sigma_b$ – при количестве циклов нагружения N_n и коэффициенте асимметрии цикла напряжений \mathcal{P}_{bn} .

При таком распределении напряжений количество циклов нагружения в каждом блоке будет подчиняться неравенству $N_1 < N_2 < N_3 < \dots < N_n$. Коэффициенты асимметрии цикла напряжений уменьшаются от блока к блоку, т.е. $\mathcal{P}_{bt_0} > \mathcal{P}_{b1} > \mathcal{P}_{b2} > \dots > \mathcal{P}_{bn}$.

Объективная прочность бетона сжатой зоны к моменту окончания нагружения при выше принятой схеме изменения циклических напряжений вычисляется по формуле:

$$R_b(t, \tau) = \frac{2}{b} \cdot \frac{k_{cf}(t)}{\sqrt{\pi \cdot l(t, \tau) \cdot \gamma(l)}} (l_a + 4l_{sh} \cdot tg\alpha \cdot \sin \delta) =$$

$$= \left(2E_{bt} \int_0^{\varepsilon_R} \left\{ \left[\sigma_{ti} + \sum_1^3 \min(\varepsilon_R - \varepsilon_{ti})^n \right] d\varepsilon - \sum_1^n \sum_1^{Ni} \left(\left(C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k \alpha \psi_{v1i} \sigma_{bt1}^2 + \varepsilon_{xi+1}^{nc} \cdot \sigma_{bt1}^{max} (1 - \mathcal{P}_{i+1}) - \left(C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k \right)_i^1 \cdot \alpha \psi_{vij} (\sigma_{bti}^{max})^2 (1 - \mathcal{P}_i)^2 * \right) * [1 + (1 - \alpha \psi_{vij})^{Ni-1}] \right) + \sum_{i=1}^n \sum_1^{Ni} \left(C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k \right)_i^1 \alpha \psi_{vij} (\sigma_{bti}^{max})^2 (1 - \mathcal{P}_i)^2 * [1 + (1 - \alpha \psi_{vij})^{Ni-1}] + \sum_{i=1}^n \mathcal{P}_i^2 (\sigma_{bti}^{max})^2 C_\infty(t, \tau) \cdot f_i(t, \tau) - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{xi}^{nc} \cdot \sigma_{bti}^{max} (1 - \mathcal{P}_i) - \sum_1^{k=1} \Delta W_{npj(j-1)} + \Delta W_c \right) * k_0^2 \cdot R_{bt,su} \cdot k_{fs} \cdot ds \right) * \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot d_i \gamma(l)} \cdot (l_{cl} + 4l_{sh} \cdot tg\alpha \cdot \sin \alpha) * \left. \left\{ \begin{aligned} & l(t, \tau) + \sum_{i=1}^h l_{MHK} + \\ & \frac{\langle \langle [k_j \varphi_{11}(\sigma_i) + k_j \varphi_{12}(\sigma_i)] \left[\frac{k_{ji} \varphi_1(\sigma_i)}{E_{bt}} + \frac{k_{ji} \varphi_2(\sigma_i)}{E_{bt}} \right] - \int_{t_0}^t [k_{ji} \varphi_{11}(\sigma_i) + k_j \varphi_{21}(\sigma_i)] \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau \rangle \rangle^2}{2\pi (k_{pb} R_{bt,\tau})^4 m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{bt}} C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k \alpha \psi_{0ij} \right]^2} \cdot \Delta N_i \\ & \frac{\int_0^{\varepsilon_R} [\sigma_{ti} + \sum_1^3 \min(\varepsilon_R - \varepsilon_{ti})^2] d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_{ti} \varepsilon_{ti} - \sum_1^n \sum_1^{Ni} \Delta W_{npj(j-1)} + \sum_2^n \Delta W_c}{[k_{zi}(t) \varphi_{11}(\sigma_i) + k_{zi}(t) \varphi_{21}(\sigma_i)] \left\{ \left[\frac{k_{ji} \varphi_1(\sigma_i)}{E_{bt}} + \frac{k_{ji} \varphi_2(\sigma_i)}{E_{bt}} \right] - \int_{t_0}^t [k_{ji} \varphi_{11}(\sigma_i) + k_j \varphi_{21}(\sigma_i)] \frac{\partial}{\partial \tau} C(t, \tau) d\tau - A^* \right\}} \right\} \right)^{-95} \end{aligned} \right\} \cdot \Delta N_i$$

где $A^* = (k_{pb} R_{bt,\tau})^2 m_j^2(t, \tau) \left[\frac{1}{E_{bt}} + C_\partial \prod_{k=1}^{k=g} k_k \alpha \psi_{vi} \right]$ и $\Delta N_i = N_i - \int_0^{\alpha_D} \frac{dl(t, \tau)}{dv_i^n}$; σ_{bti}^{max} – максимальные растягивающие напряжения цикла в вершине трещины.

Выносливость конструкций по бетону сжатой зоны оценивают, исходя из условия:

$$\sigma_b^{max}(t, t_0) \leq R_b(t, \tau). \tag{14}$$

Заключение

1. Проведенные исследования позволили установить, что режим деформирования бетона сжатой зоны в составе железобетонной изгибаемой конструкции нестационарный даже при стационарном режиме многократно повторяющейся циклической нагрузки.

2. Разработано уравнение механического состояния бетона сжатой зоны железобетонной изгибаемой конструкции при стационарных многократно повторяющихся циклических нагружениях на основе теории виброползучести бетона и механики разрушения упругопластических материалов.

3. Полученное уравнение адекватно и достаточно точно, с позиции требования практических расчетов, позволяет оценить выносливость бетона сжатой зоны при стационарных режимах циклического нагружения и получить надежные и одновременно экономичные решения.

Список библиографических ссылок

1. Atutis E., Valivonis J., Atutis M. Deflection determination method for bfrp prestressed concrete beams under fatigue loading // *Compos. Struct.* 2019. № 226. P. 111182.
2. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // *Ultrasonics*. 2018. № 88. P. 64–71.
3. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2019. № 3 (34). P. 622–629.
4. Chen P., Zhou X., Zheng W., Wang Y., Bao B. Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams // *J. Build. Eng.* 2020. № 30.
5. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // *Eng. Struct.* 2020. № 204. P. 109908.
6. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mech. Solids*. 2010. № 1(45). P. 133–139.
7. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 2019. № 1 (13).
8. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. P. 12–23.
9. Tang H., Chen Z., Avinesh O., Guo H., Meng Z., Engler-Pinto C., Kang H. Notch Insensitivity in Fatigue Failure of Chopped Carbon Fiber Chip-Reinforced Composites Using Experimental and Computational Analysis // *Compos. Struct.* 2020. № 10 (16). P. 112280.
10. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // *Appl. Sci.* 2020. № 5 (10).
11. Gambarelli S., Ožbolt J. Interaction between damage and time-dependent deformation of mortar in concrete: 3D FE study at meso-scale // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. № 615. P. 012013.
12. Augéard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Eng. Struct.* 2020. № 210. P. 110289.
13. Trekin N. N., Kodysh E. N., Mamin A. N., Trekin D. N., Onana J. Improving methods of evaluating the crack resistance of concrete structures // *American Concrete Institute, ACI Special Publication*. 2018. № 326. P. 93.1–93.6.
14. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // *Eng. Struct.* 2017. № 150. P. 25–38.
15. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. P. 1–5.

16. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 1.
17. Barcley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal*. 2019. № 3 (116). P. 53–61.
18. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbonded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // *Mater. Test*. 2019. № 4 (61). P. 323–328.
19. Tang S. W., Yao Y., Andrade C., Li Z. Recent durability studies on concrete structure // *Cem Concr Res* 2015. 78. P. 143–154.
20. Berrocal C. G., Fernandez I., Lundgren K., Lofgren I. Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC // *Compos B Eng*. 2017. 113. P. 123–137.
21. Chen E., Berrocal C. G., Löfgren I., Lundgren K. Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams // *Mater. Struct. Constr*. 2020. № 2 (53).

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Garifullin Dinar Rafikovich

chief engineer

E-mail: fszrkazan@mail.ru

NPPF Fundamentspetermont

The organization address: 420087, Russia, Kazan, Gvardeyskaya st., 56

**Evaluation of the concrete endurance of the compressed zone
of reinforced concrete bending elements under stationary cyclic loading conditions**

Abstract

Problem statement. In reinforced concrete bending structures with repeated cyclic loads of stationary mode in the concrete of the compressed zone are manifested and inelastic creep deformations develop under connected conditions. For this reason, the conditions for deforming concrete in the compressed zone are non-stationary even when the external load is stationary.

Results. Experimental and theoretical studies of the behavior of a reinforced concrete bending element have been carried out in the stationary mode of repeated cyclic loading, the mode of deformation of concrete in the compressed zone as part of the bending element is established. To assess the endurance of compressed zone concrete under such deformation modes, studies were conducted using methods of fracture mechanics of elastic-plastic materials and the equations of endurance of compressed zone concrete for non-stationary deformation mode were obtained. On the basis of the conducted research, the equation of endurance of compressed zone concrete was developed for practical calculations of reinforced concrete bending elements under stationary conditions of repeated cyclic loading.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that the proposed method allows the most accurate assessment of the stress-strain state of concrete in the compressed zone and the processes of concrete change from the point of view of fracture mechanics, which is a significant contribution to the theory of fatigue strength and provides concrete savings of up to 25 % compared to existing methods.

Keywords: reinforced concrete, compressed zone concrete, endurance, cyclic loading, stationary loading, fracture mechanics, vibration creep, inelastic deformations.

References

1. Atutis E., Valivonis J., Atutis M. Deflection determination method for bfrp prestressed concrete beams under fatigue loading // *Compos. Struct.* 2019. № 226. P. 111182.
2. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // *Ultrasonics.* 2018. № 88. P. 64–71.
3. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2019. № 3 (34). P. 622–629.
4. Chen P., Zhou X., Zheng W., Wang Y., Bao B. Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams // *J. Build. Eng.* 2020. № 30.
5. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // *Eng. Struct.* 2020. № 204. P. 109908.
6. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mech. Solids.* 2010. № 1 (45). P. 133–139.
7. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 2019. № 1 (13).
8. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // *Magazine of Civil Engineering.* 2018. P. 12–23.
9. Tang H., Chen Z., Avinesh O., Guo H., Meng Z., Engler-Pinto C., Kang H. Notch Insensitivity in Fatigue Failure of Chopped Carbon Fiber Chip-Reinforced Composites Using Experimental and Computational Analysis // *Compos. Struct.* 2020. № 10 (16). P. 112280.
10. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // *Appl. Sci.* 2020. № 5 (10).
11. Gambarelli S., Ožbolt J. Interaction between damage and time-dependent deformation of mortar in concrete: 3D FE study at meso-scale // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. № 615. P. 012013.
12. Augéard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Eng. Struct.* 2020. № 210. P. 110289.
13. Trekin N. N., Kodysh E. N., Mamin A. N., Trekin D. N., Onana J. Improving methods of evaluating the crack resistance of concrete structures // *American Concrete Institute, ACI Special Publication.* 2018. № 326. P. 93.1–93.6.
14. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // *Eng. Struct.* 2017. № 150. P. 25–38.
15. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2018. P. 1–5.
16. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering.* 2018. № 1.
17. Barcley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal.* 2019. № 3 (116). P. 53–61.
18. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbonded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // *Mater. Test.* 2019. № 4 (61). P. 323–328.
19. Tang S. W., Yao Y., Andrade C., Li Z. Recent durability studies on concrete structure // *Cem Concr Res* 2015. 78. P. 143–154.
20. Berrocal C. G., Fernandez I., Lundgren K., Lofgren I. Corrosion-induced cracking and bond behaviour of corroded reinforcement bars in SFRC // *Compos B Eng.* 2017. 113. P. 123–137.
21. Chen E., Berrocal C. G., Löfgren I., Lundgren K. Correlation between concrete cracks and corrosion characteristics of steel reinforcement in pre-cracked plain and fibre-reinforced concrete beams // *Mater. Struct. Constr.* 2020. № 2 (53).