

УДК 624.012.35

Мирсаяпов Илизар Талгатович

Email: mirsayapov1@mail.ru

доктор технических наук, профессор

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Гарифуллин Динар Рафикович

главный инженер

Email: fszrkazan@mail.ru

НППФ Фундаментспецремонт

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

Метод расчета железобетонных изгибаемых элементов на выносливость по предельным усилиям

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – разработка упрощенной (инженерной) методики расчета выносливости железобетонных изгибаемых элементов на основе метода предельного равновесия. В железобетонных изгибаемых конструкциях при циклических нагружениях независимо от режима в сжатой зоне бетона развиваются связные неупругие деформации, которые приводят к изменению напряжений и коэффициентов асимметрии цикла напряжений в бетоне сжатой зоны и продольной рабочей арматуре. В связи с этим, деформирование бетона и арматуры происходит при нестационарных режимах. Точный расчет выносливости с учетом нестационарности режимов деформирования является сложным, трудным и трудоемким и приводит к затруднениям вычислительного характера.

Результаты. Проведены теоретические исследования выносливости железобетонных изгибаемых конструкций, при режимных нагружениях и разработаны практические методы расчета на выносливость по предельным условиям.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том что, разработан новый метод расчета на выносливость железобетонных конструкции по предельным усилиям при режимных циклических нагружениях. При этом в упрощенной подстановке рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния сжатого бетона и арматуры растянутой зоны в условиях перераспределения усилий от бетона сжатой зоны к растянутой арматуре.

Ключевые слова: железобетонная изгибаемая конструкция, сечение нормальное к продольной оси, напряжение при максимальной и минимальной нагрузке цикла, ползучести бетона, упругая работа арматуры.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т., Гарифуллин Д. И. Метод расчета железобетонных изгибаемых элементов на выносливость по предельным усилиям. // Известия КГАСУ. 2021. № 3 (57). С. 23–31. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_23.

1. Введение

Для оперативной оценки несущей способности железобетонных изгибаемых конструкций при циклических нагружениях и анализа правильности принятых проектных и технических решений необходима упрощенная методика расчета [1-5]. Эта методика должна на основе простых, прозрачных общеизвестных подходов, без выполнения сложных расчетов позволять получить приемлемые результаты для практических задач. В этом случае используется метод предельного равновесия, модернизированный, для случая многократно повторяющихся нагружений. При этом сохраняются основные условия предельного равновесия по продольным усилиям и по изгибающим моментам. Предельные усилия в бетоне сжатой зоны и продольной растянутой арматуре определяются с учетом изменения напряженного состояния силовых элементов нормального сечения в процессе циклического нагружения. На основе многих работ, экспериментальных и численных исследований созданы расчетные модели [6-10]. Имеющиеся модели разработаны с использованием численных методов и позволяют

выполнять расчеты конструкций, как при низкочастотных, так и при высокочастотных колебаниях [11-14]. Эти расчеты выносливости являются сложными, трудоемкими, непрозрачными и требуют значительных затрат времени.

В связи с этим целью исследования является разработка нового метода расчета усталостной прочности железобетонных изгибаемых конструкций по предельным усилиям.

Задачами исследования являются:

- 1) Выбор расчетной схемы и системы расчетных уравнений равновесия.
- 2) Модификации уравнений выносливости материалов.
- 3) Разработка методики расчета выносливости по предельным усилиям.
- 4) Аprobация полученной расчетной методики.

2. Материалы и методы

Рассматриваются железобетонные изгибаемые элементы прямоугольного сечения с одиночной арматурой в растянутой зоне. Классы бетона для изготовления конструкций В20 – В40. Класс арматурной стали – А300, А400. В расчетах принимается упругая стадия работы арматуры и допускается неупругое деформирование бетона сжатой зоны. При разработке методов расчета за основу принимается метод предельного равновесия, модифицированный для случая циклического нагружения.

Расчет предельной несущей способности нормальных сечений при многократно повторяющемся нагружении, выполняется с использованием следующих предпосылок и допущений:

- 1) Принимается условная прямоугольная эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны.
- 2) Принимается условие равенства плеча внутренней пары сил при условной прямоугольной эпюре и фактической эпюре напряжений в бетоне сжатой зоны.
- 3) Принимается гипотеза плоских сечений при средних значениях деформаций бетона сжатой зоны и продольной рабочей арматуры.
- 4) Принимается, что сечения, плоские до нагружения, остаются плоскими при нагружении для средних деформаций материалов.
- 5) Предельные сопротивления материалов по выносливости определяются по аналитическим зависимостям для выносливости при циклическом нагружении с учетом параметров нагружения.

Для оценки выносливости железобетонной изгибаемой конструкции рассматривается предельное равновесие внутренних и внешних усилий к расчетному времени нагружения $t=N_{рас}$.

Предельные внутренние усилия в бетоне и рабочей арматуре принимаются по предельным сопротивлениям и выносливости при изменяющихся соотношениях минимального и максимального значения напряжении и площади сжатой части бетона (рис. 1).

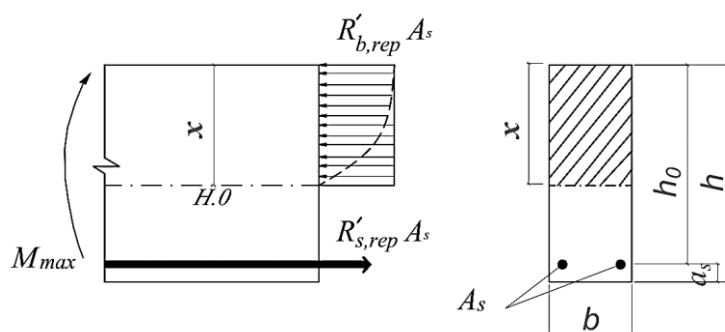


Рис. 1. Расчетная схема предельных усилий и эпюра напряжения в бетоне при расчете на выносливость по предельным усилиям (иллюстрация авторов)

Условие предельного равновесия по выносливости имеет вид:

$$M_{\max} \leq R'_{b,rep} \cdot x \cdot b \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (1)$$

$$M_{\max} \leq R'_{s,rep} \cdot x \cdot A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (2)$$

3. Результаты

Условная высота сжатой части бетона (x) при достижении предельного состояния по усталости при многократно повторяющейся нагрузке вычисляется из условия равенства продольных усилий в бетоне сжатой зоны и растянутой арматуре в стадии предельного равновесия:

$$R_{b,rep} \cdot b \cdot x - R_{s,rep} \cdot A_s = 0; \quad (3)$$

После упрощения:

$$x = \frac{R_{s,rep} \cdot A_s}{R_{b,rep}} \quad (4)$$

Для учета условности формы эпюры напряжений в бетоне сжатой зоны и влияния этого факта на величину внутренней пары сил и высоту сжатого бетона вводится коэффициент полноты эпюры напряжения, который рассчитывается по формуле:

$$\omega = \frac{1+\lambda}{2}; \quad (5)$$

где $\lambda = 1 - \nu$; $\nu = 0,45 - 0,5 \left(\frac{M_{\max}}{M_{\text{раз}}} - 0,5 \right)$; $M_{\text{раз}}$ – предельный изгибающий момент при статическом нагружении, принимаем $\omega = 0,85$.

Учитывая (5) выражение для вычисления высоты сжатой части бетона запишем в виде:

$$x = \frac{R'_{s,rep} \cdot A_s}{R'_{b,rep}} \quad (6)$$

Изменение напряжений и коэффициентов соотношения максимальных и минимальных напряжений в бетоне и арматуре в процессе циклического нагружения учитывается путем модификации предельного сопротивления по выносливости материалов, разработанных для случая сжатия и растяжения.

Модификация уравнений выносливости материалов выполняется путем использования функций изменения напряжений и фактических соотношений минимальных и максимальных напряжений при циклическом нагружении.

Тогда модифицированные предельные сопротивления материалов по выносливости имеют вид:

$$R'_{b,rep} = 0,85 \cdot R_{b,rep} \frac{1}{H_{\text{бб}} \cdot K_{\omega}}; \quad (7)$$

$$R'_{s,rep} = R_{s,rep} \frac{1}{H_{\text{бс}}} K_{\omega s}; \quad (8)$$

где $H_{\text{бб}}, H_{\text{бс}}$ – параметры, учитывающие изменения напряжения в бетоне сжатой зоны и арматуре соответственно;

$R_{b,rep}, R_{s,rep}$ предельные сопротивления бетона и арматуры по выносливости при центральном нагружении.

Фактические значения соотношении минимальных и максимальных напряжений при циклическом нагружении вычисляются по формулам:

в бетоне сжатой зоны:

$$\rho_{bt} = \frac{\rho_M M_{max} + \frac{A_s}{bh_0} \mu \cdot \Delta b \cdot H_\varepsilon}{1 + \frac{A_s}{bh_0} \cdot \Delta b \cdot H_\varepsilon}, \quad (8)$$

в продольной растянутой арматуре:

$$\rho_{st} = \frac{\rho_M M_{max} + \frac{A_s}{bh_0} \mu \cdot \Delta S \cdot H_\varepsilon}{1 + \frac{A_s}{bh_0} \cdot \Delta S \cdot H_\varepsilon}, \quad (9)$$

где M_{min}, M_{max} соответственно наименьшее и наибольшее значения изгибающего момента в расчетном сечении элемента в пределах цикла изменения нагрузки;

при $\mu \geq 0,01, K_{\omega s} = 1$;

при $\mu < 0,01, K_{\omega s} = 1,4 - 1,5$

В практических расчетах можно принимать:

$$Hb_b = 1 - 0,2(1 - \rho_M); Hb_s = 1 + 0,35(1 - \rho_M); \rho_{bt} = \rho_M - 0,1(1 - \rho_M); \rho_{st} = \rho_M + 0,2(1 - \rho_M);$$

при $\mu \leq 0,035, K_{\omega s} = 1$;

при $\mu > 0,035, K_{\omega s} = 1,4 \dots 1,5$.

Для оценки выносливости железобетонной изгибаемой конструкции рассматривается предельное равновесие внутренних и внешних усилий к расчетному времени нагружения $t=N_{pac}$ в каждом блоке нагружения.

Предельные внутренние усилия в бетоне и рабочей арматуре принимаются по предельным сопротивлениям по выносливости при изменяющихся соотношениях минимального и максимального значения напряжений и площади сжатой части бетона.

Условия предельного сопротивления по выносливости пишутся в виде:

$$M_{maxi} \leq R'_{b,rep} \cdot x_i \cdot b(h_0 - \frac{x_i}{2}) \quad (10)$$

$$M_{maxi} \leq R'_{s,rep} \cdot A_s(h_0 - \frac{x_i}{2}) \quad (11)$$

Высота сжатой зоны (x) определяется в пределе каждого блока из уравнения предельного равновесия продольных усилий по модифицированным предельным сопротивлениям по усталостной прочности материалов в конце каждого рассматриваемого блока циклического нагружения.

$$x_i = \frac{R'_{si,rep} \cdot A_s}{R'_{bi,rep}} \quad (12)$$

где $R'_{si,rep}, R'_{bi,rep}$ – модифицированные предельные сопротивления арматуры и бетона при расчете на выносливость при режимном циклическом нагружении.

Модифицированные предельные сопротивления материалов по усталости при режимном нагружении определяется по формулам:

$$R'_{bi,rep} = R_{bi,rep} \frac{1}{Hb_b \cdot K_{\omega}} \cdot 0,85; \quad (13)$$

$$R'_{si,rep} = R_{si,rep} \frac{1}{Hb_s} K_{\omega s}; \quad (14)$$

где Hb_b, Hb_s – параметры, учитывающие изменения напряжений в бетоне сжатой зоны и арматуре соответственно, в практических расчетах можно принимать $Hb_b = 1 - 0,2 \cdot (1 - \rho_M); Hb_s = 1 + 0,35 \cdot (1 - \rho_M);$

$R_{si,rep}, R_{bi,rep}$ – предельные сопротивления по усталости бетона и арматуры при блочных режимах циклического нагружения, соответственно в зависимости от режима нагружения и фактических значений соотношения минимальных и максимальных напряжений в материалах.

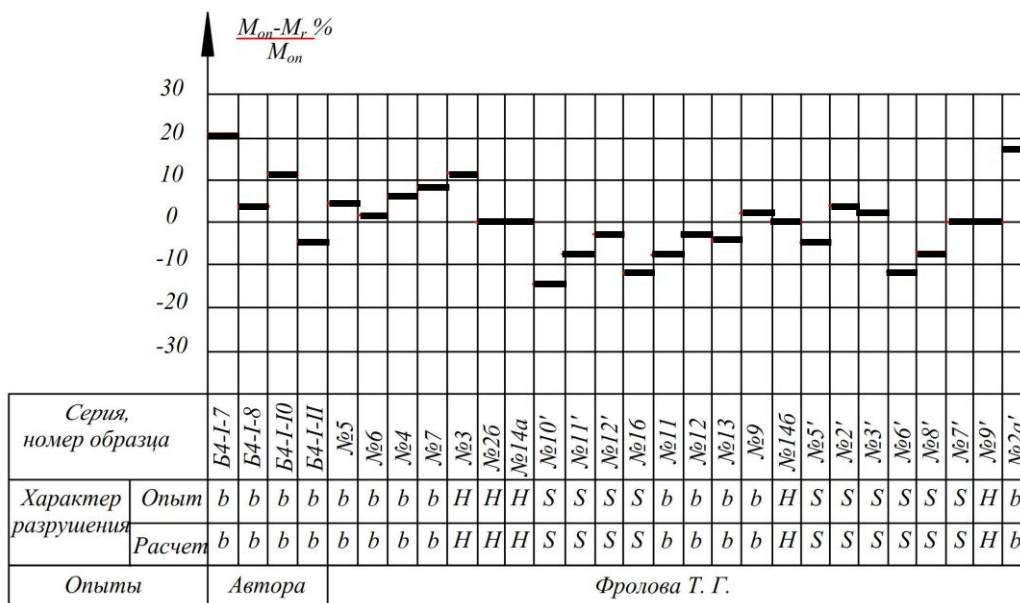


Рис. 3. Сопоставление опытных и расчетных значений выносливости железобетонных балок при расчете по методу предельных усилий, продолжение (иллюстрация авторов)

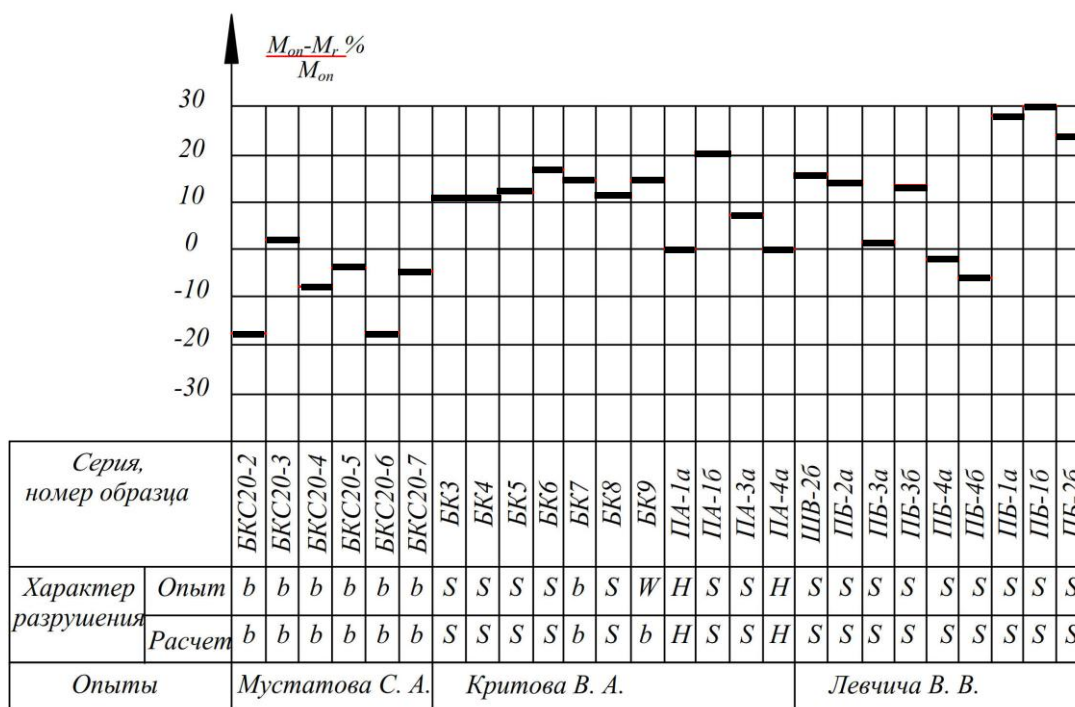


Рис. 4. Сопоставление опытных и расчетных значений выносливости железобетонных балок при расчете по методу предельных усилий, продолжение (иллюстрация авторов)

Для сравнительного анализа те же железобетонные балки были рассчитаны по методике СНиП 2.03.01-84 и по скорректированной методике СНиП 2.03.01-84*. Сопоставление результатов расчета и экспериментов показало, что отклонение между опытными и расчетными значениями выносливости существенны, что подтверждается результатами статистической обработки при расчете по методике СНиП 2.03.01-84:

Математическое ожидание $\left(\frac{M_{теор}}{M_{оп}}\right)=0,81;$
 Коэффициент вариации. $Cre = 0,124$

При расчете по скорректированной методике СНиП 2.03.01-84*:

Математическое ожидание $\left(\frac{M_{\text{теор}}}{M_{\text{оп}}}\right)=0,81;$

Коэффициент вариации $Cre = 0,124.$

5. Заключение

1. Разработан новый метод расчета на выносливость железобетонных конструкций по предельным усилиям при режимных циклических нагружениях. При этом в упрощенной постановке рассмотрено изменение напряжено-деформированного состояния бетона сжатой зоны и продольной растянутой арматуры с учетом перераспределения усилий между ними в процессе циклического нагружения.

2. Методика расчета по предельным усилиям позволяет выполнить расчеты с учетом изменения напряжений в материалах и соотношения минимальных и максимальных напряжений цикла в сжатой части бетона и в продольной рабочей арматуре в процессе циклического нагружения. Полученные параметры, учитывающие изменения напряжения в бетоне сжатой зоны и арматуре и соотношения минимальных и максимальных напряжений цикла напряжений в бетоне сжатой зоны и растянутой арматуре позволили разработать новый упрощенный метод расчета выносливости железобетонных конструкций.

3. Предложенный метод позволяет оценивать выносливость достаточно точно в упрощенной постановке (отклонение между расчетными и экспериментальными значениями не более 5%, математическое ожидание $\frac{M_{\text{теор}}}{M_{\text{оп}}} = 0,95$), и за счет этого снизить время и трудоемкость проектирования конструкций подверженных циклическим воздействием при обеспечении требуемой надежности и безопасности.

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. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111182.
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. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
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. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
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. DOI: 10.1016/j.job.2020.101241.
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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
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. DOI: 10.3103/S0025654410010164.
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). DOI: 10.1186/s40069-019-0340-5.
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. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112280.
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). DOI: 10.3390/app10051794.
11. Gambarelli S., Ozbolt 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. DOI: 10.1088/1757-899X/615/1/012013.
 12. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // Eng. Struct. 2020. № 210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.001
 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. DOI: 10.1155/2018/5451398/
 17. 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. DOI: 10.3139/120.111323.
 18. Tang S. W., Yao Y., Andrade C., Li Z. Recent durability studies on concrete structure // Cem Concr Res 2015. № 78. P. 143–154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
 19. Berrocal C. G., Fernandez I., Lundgren K., Lofgren I. Corrosion-induced cracking and bond behavior of corroded reinforcement bars in SFRC // Compos B Eng. 2017. № 113. P. 123–137. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.01.020.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

Doctor of technical sciences, professor

Email: mirsayapov1@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Garifullin Dinar Rafikovich

Chief Engineer

Email: fszrkazan@mail.ru

NPPF Fundamentalspetcremont

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

Method of calculation of reinforced concrete bendable elements for endurance by limiting forces

Abstract

Problem statement. In reinforced concrete bendable structures, under cyclic loads in the compressed zone of concrete, inelastic deformations of vibration creep are manifested and develop under connected conditions. This leads to non-stationary modes of deformation of concrete and reinforcement. Endurance calculation is a complex and difficult process. Therefore, it is necessary to develop a simplified methodology based on the well-known limit state method.

Results. Experimental and theoretical studies of the endurance of reinforced concrete structures, under stationary and non-stationary modes of repeatedly repeated cyclic loading, have been carried out and a simplified method for calculating endurance by limiting forces has been developed.

Conclusions. A new method has been developed for calculating the endurance of reinforced concrete structures by limiting forces under cyclic loads regime. In this simplified substitution, the change in the stress-strain state of the concrete of the compressed zone and the longitudinal stretched reinforcement is considered, taking into account the redistribution of forces between them in the process of cyclic loading.

Keywords: reinforced concrete bending element, normal cross-section, compressed zone concrete, maximum stresses, cyclic loading stress, cycle asymmetry coefficient, non-stationary and stationary loading

For citation: Mirsayapov Ilizar T., Garifullin D. R. Method of calculation of reinforced concrete bendable elements for endurance by limiting forces. *Izvestiya KGASU*. 2021. No. 3 (57). P. 23–31. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_23.

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. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111182.
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. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
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. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
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. DOI: 10.1016/j.job.2020.101241.
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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
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. DOI: 10.3103/S0025654410010164.
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). DOI: 10.1186/s40069-019-0340-5.
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. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112280.
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). DOI: 10.3390/app10051794.
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. DOI: 10.1088/1757-899X/615/1/012013.
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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.001
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. DOI: 10.1155/2018/5451398/

17. Barceley L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal*. 2019. № 3 (116). P. 53–61. DOI: 10.14359/51715583.
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. DOI: 10.3139/120.111323.
19. Tang S. W., Yao Y., Andrade C., Li Z. Recent durability studies on concrete structure // *Cem Concr Res* 2015. № 78. P. 143–154. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.