



Исследование влияния предыстории деформирования на усталостное сопротивление бетона и фибробетона

© И.Г. Корнеева, Б.И. Пинус

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель работы заключается в экспериментально-аналитической оценке влияния предыстории нагружения на деформационный отклик обычных и фиброармированных бетонов. Исследования включали монотонные квазистатические и динамические испытания двух серий образцов. Механическим испытаниям предшествовал ультразвуковой и весовой контроль однородности по массе. Испытания контрольных призматических образцов велись в режиме постоянства скорости деформирования (0,004 мм/с) на комплексе *Instron 5989* с автоматической записью деформаций, усилий, времени и энергии поглощения. Деформации в обоих направлениях измерялись на полной базе с помощью системных (*Instron*) экстензометров. В работе анализируются результаты экспериментальных исследований усталостного поведения обычного и фиброполипропилен армированного бетона, подвергнутого 2-этапным циклическим нагружениям различной амплитуды. В качестве контролируемых критериальных показателей малоциклового усталости приняты показатели линейной и объемной деформативности. Усталостная устойчивость бетона и фибробетона оценивалась сравнением соответствующих критериальных параметров деформирования образцов при различных режимах циклических воздействий. При сравнительном сходстве динамики контролируемых параметров малоциклового усталости имеются существенные отличия в количественных значениях. Установлено, что частота и последовательность умеренных ($\eta \leq R_{cr}^v$) воздействий не оказывают существенного влияния на усталостное сопротивление. Поведение композита при высоких уровнях циклических воздействий зависит от предыстории деформирования.

Ключевые слова: бетон, фибробетон, малоцикловая усталость, деформативность

Для цитирования: Корнеева И.Г., Пинус Б.И. Исследование влияния предыстории деформирования на усталостное сопротивление бетона и фибробетона. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 2. С. 284–289. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-284-289>

Impact of deformation history on the resistance of concrete and fibre-reinforced concrete to fatigue damage

Inna G. Korneeva, Boris I. Pinus

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: An experimental and analytical study into the impact of deformation history on the deformation response of conventional and fibre-reinforced concrete was conducted. Experiments included monotonic quasi-static and dynamic tests of two series of samples. Ultrasonic and gravimetric homogeneity control by mass was performed prior to mechanical tests. Prismatic reference samples were tested under uniform deformation velocity (0.004 mm/s) on an *Instron 5989* complex with automatic recording of deformations, loadings, time and absorption energy. Deformations were measured in both directions at the total base using system (*Instron*) extensometers. The paper analyses the experimental results on the fatigue behaviour of conventional and polypropylene fibre-reinforced concrete subjected to two-stage cyclic stress with various amplitudes. Parameters of linear and bulk deformability were used as a characteristic under control for low-cyclic fatigue. The fatigue resistance of concrete and fibre-reinforced concrete was assessed by comparing the corresponding characteristics of sample deformation under various modes of cyclic action. Relative similarities in the parameter dynamics of controlled low-cyclic fatigue show significant differences in quantitative values. It was established that the frequency and sequence of moderate ($\eta \leq R_{cr}^H$) actions have a limited effect on fatigue resistance. The composite behaviour at high-level cyclic stress depends on the deformation history.

Keywords: concrete, fibre concrete, low-cycle fatigue, deformability

For citation: Korneeva IG, Pinus BI. Impact of deformation history on the resistance of concrete and fibre-reinforced concrete to fatigue damage. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(2):284–289. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-284-289>

Введение

Одной из базовых предпосылок нормативного метода расчета строительных конструкций является принцип независимости действия сил. Априори предполагается, что потенциал внутреннего сопротивления не зависит от последовательности приложения внешних нагрузок.

Как следствие, исключается значимое влияние предистории предшествующего отклика на последующую работу конструкций под нагрузкой.

Многочисленные исследования малоцикловой усталости бетонов и фибробетонов [1–8] позволяют предполагать проблематичность такого подхода, не учитывающего временных кумулятивных процессов, интенсивность и последствия которых неоднозначны и зависят от уровня, амплитуды, частоты флуктуационных напряжений. Вызываемая ими трансформация структуры цементно-матричных композитов обусловлена локальными деформациями разрыва и сдвига в зонах концентрации напряжений. То есть, существуют объективные предпосылки для изменения внутреннего сопротивления при действии усилий, существенно ниже расчетных. Экспериментально-аналитическая оценка влияния предистории нагружения на деформационный отклик обычных и фиброармированных бетонов определяет основное содержание настоящей работы.

Методы

Программа исследований включала монотонные квазистатические и динамические испытания двух серий образцов:

– «ОБ», изготовленных из мелкозернистого бетона с соотношением компонентов Ц:П:Щ:В = 1:1,42:3,57:0,55 и расходом цемента М400 Д20 – 380 кг/м³;

– «ФПБ» – бетона аналогичного состава с 1,5% объемным содержанием полипропиленовых волокон диаметром 0,8 мм и длиной 40 мм. Механическим испытаниям предшествовал ультразвуковой и весовой контроль однородности по массе при соответствующем коэффициенте изменчивости 4 и 2%.

Испытания контрольных призматических образцов в возрасте более 60 суток велись в режиме постоянства скорости деформирования (0,004 мм/с) на комплексе *Instron 5989* с автоматической записью деформаций, усилий, времени и энергии поглощения. Деформации в обоих направлениях измерялись на полной базе с помощью системных (*Instron*) экстензометров и с точностью $1 \cdot 10^5$ е.о.д., крепление приборов не ограничивало перемещений и позволяло фиксировать деформации вплоть до разрушения образцов. Подвижность опорных механизмов испытательного комплекса исключала необходимость «ручного» центрирования образцов и позволяла контролировать начальные деформации уплотнения ε_0 . Средние значения исходных параметров прочности и деформативности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели монотонного статического сопротивления

Table 1. Indicators of monotonic static resistance

Параметры	Единицы измерения	Серия		Модель
		ОБ	ФПБ	
σ_u	МПа	43,4	35,8	
$E_b \times 10^3$		26,5	22,7	
ε_0	‰	0,15	0,63	
$\varepsilon_{\max}$		2,47	2,60	
$\varepsilon_{u,pl}$		0,78	0,50	
ε_e		1,65	1,63	
ε_{pl}		0,73	0,55	
$\varepsilon_{ult,0.8}$		3,13	3,18	
ν	—	0,112	0,148	

Здесь же представлена модель деформационного отклика в виде компонентов с различными физическими закономерностями

ми развития. Качественная картина монотонного деформирования образцов обеих серий представлена на рис. 1, 2.

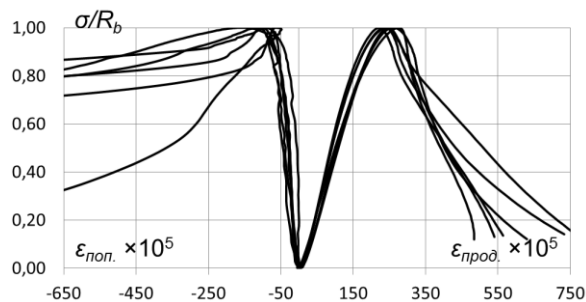


Рис. 1. Диаграммы сжатия бетонов серии ОБ
Fig. 1. Concrete compression diagrams of the OB series

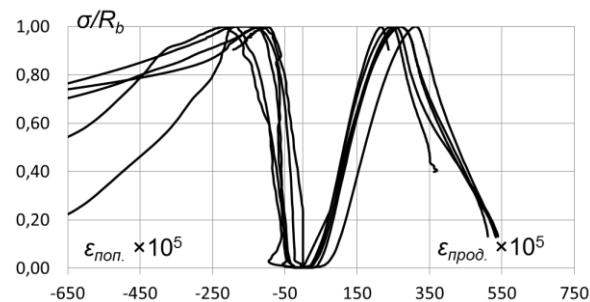


Рис. 2. Диаграммы сжатия бетонов серии ФПБ
Fig. 2. Concrete compression diagrams of the FPB series

Результаты и их обсуждение

При относительном сходстве деформационного отклика имеются существенные различия в количественных показателях компонентов, что свидетельствует об отличии их поведения в усталостных режимах.

Одна группа образцов обеих серий была подвергнута 100 циклам воздействий с параметрами $\eta = 0,6$; $\rho = 0$ и после месячного «отдыха» – аналогичным циклам подобной продолжительности. Вторая группа на начальном этапе испытала 100 циклов с $\eta = 0,7$; $\rho = 0$, и после месячного «отдыха»

была подвергнута циклическому нагружению $\sigma_{\max} = 0,9 R_b$ до момента разрушения (табл. 2). Усталостная устойчивость бетона и фибробетона оценивалась сравнением соответствующих критериальных параметров деформирования образцов при различных режимах циклических воздействий. С учетом ранее выполненных исследований [9] и статистической однородности опытных данных в качестве таковых рассматриваются продольные и объемные деформации, в том числе их чувствительные и значимые компоненты (начальные, остаточные и максимальные значения).

Таблица 2. К оценке влияния предыстории циклового нагружения
Table 2. To assess the influence of the prehistory of cyclic loading

Соотношение критериальных показателей	100 ($\eta = 0,6$) + 100 ($\eta = 0,6$)						100 ($\eta = 0,7$) + ... ($\eta = 0,9$)			
	ОБ-циклы			ФПБ-циклы			ОБ-циклы		ФПБ-циклы	
	1	50	100	1	50	100	1	10	1	10
а) продольные деформации										
$\varepsilon_0(N)/\varepsilon_0$	0,14	–	–	0,33	–	–	0,57	–	0,67	–
$\varepsilon_{res}(N)/\varepsilon_{res}$	–	0,18	0,21	–	0,32	0,34	–	0,82	–	0,93
$\varepsilon_{\max}(N)/\varepsilon_{\max}$	0,83	0,78	0,76	0,67	0,63	0,63	0,8	0,9	0,92	0,99
$\Delta\varepsilon_{\max}(N)/\Delta\varepsilon_{\max}$	–	0,27	0,27	–	0,35	0,38	–	1,5	–	1,64
$\Delta\varepsilon_{res}(N)/\Delta\varepsilon_{res}$	–	0,28	0,35	–	0,29	0,35	–	2,54	–	2,0
б) объемные показатели										
$\theta(N)/\theta_0$	0,23	–	–	–	–	–	0,78	–	0,73	–
$\theta_{res}(N)/\theta_{res}$	–	0,21	0,23	–	0,34	0,34	–	0,97	–	0,71
$\theta_{\max}(N)/\theta_{\max}$	0,84	0,78	0,77	0,72	0,6	0,61	0,91	1,05	0,95	0,94
$\Delta\theta_{\max}(N)/\Delta\theta_{\max}$	–	0,27	0,29	–	0,15	0,17	–	3,92	–	2,0
$\Delta\theta_{res}(N)/\Delta\theta_{res}$	–	0,15	0,21	–	0,13	0,15	–	2,69	–	0,92
Примечания:										
1. Показатели без индекса относятся к соответствующему однотонному циклу нагружения.										
2. Индекс «res» соответствует остаточному значению параметра, «max» – максимальному напряжению										

Прежде всего, обращает на себя внимание неоднозначность изменений контролируемых параметров малоциклового усталости (МУ) при неизменных воздействиях, что объясняется различием физических факторов, их определяющих. Причем указанные закономерности прослеживаются в кинетике продольных и объемных показателей деформативности.

На втором (после месячного отдыха образцов) этапе испытаний существенно снижается величина начальных деформаций $\varepsilon_0(N)$. Причем в обычном бетоне она больше, что является косвенным свидетельством необратимости накопленных структурных трансформаций на первых этапах умеренных воздействий. Это подтверждается также пониженной кинетикой прироста остаточных линейных и объемных изменений.

Повышенный (и практически предельный) уровень повторных нагружений характеризуется другим откликом на предшествующие воздействия. При незначительных отличиях абсолютных значений контролируемых параметров ($\epsilon_{\max}$, $\theta_{\max}$) наблюдается кратное увеличение прироста этих показателей на вторых этапах циклического нагружения. Можно предположить, что это связано с частичной обратимостью усталостных последствий начального уплотнения при действии нагрузок, превышающих верхнюю границу микроразрушения композитов R_{cr}^V . Кинетика объемных деформаций является дополнительным подтверждением этой гипотезы.

Представляет несомненный интерес сопоставление усталостного поведения обычных и фиброармированных цементно-матричных композитов. При сравнительном сходстве динамики контролируемых параметров МУ имеются существенные отличия в количественных значениях. В частности,

для умеренных нагружений вероятно повышенная чувствительность фибробетонов, а для повышенных – наоборот. Полагаем, что это связано с различием физических закономерностей усталостной деградации рассматриваемых композитов [10–14] и возможностью использования в испытаниях потенциала пластического деформирования.

Заключение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Последовательность и уровень циклических воздействий флуктуационного характера сказываются на усталостном поведении обычных и фибросодержащих композитов.

2. Частота и последовательность умеренных воздействий ($\eta \leq R_{cr}^V$) не оказывают существенного влияния на динамическую усталость цементно-матричных композитов.

3. Поведение композитов при высоких ($\eta > R_{cr}^V$) уровнях и амплитудах зависит от предистории деформирования и наличия дисперсного армирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография. М.: ACB, 2004. 563 с.
2. Барашиков А.Я., Шевченко Б.Н., Валовой А.И. Малоцикловая усталость при сжатии // Бетон и железобетон. 1985. № 4. С. 27–28.
3. Кузовчикова Е.А., Яшин А.В. Исследование влияния малоцикловых сжимающих воздействий на деформативность, прочность и структурные изменения бетона // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1986. № 10. С. 30–33.
4. Cachim P.B., Figueiras J.A., Pereira P.A.A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression // Cement and Concrete Composites. 2002. Vol. 24 (9). p. 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1)
5. Lee M.K., Barr B.I.G. An overview of the fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete // Cement and Concrete Composites. 2004. Vol. 26. p. 299–305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7)
6. Paskova T., Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete // Aci Materials Journal. 1997. Vol. 94 (4). p. 273–285.
7. Liu F., Zhou J. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete // Advances in Civil Engineering. 2017. Vol. 2017. p. 6272906. <https://doi.org/10.1155/2017/6272906>
8. Korneeva I.G. Cyclic testing of polypropylene fiber reinforced concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880. p. 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012006>
9. Wang H.L., Song Y.P. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress // Materials and Structures. 2011. Vol. 44. P. 253–262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>
10. Lubin Gao, Cheng-Tzu Thomas Hsu. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading // Aci Materials Journal. 1998. Vol. 95 (5). p. 575–581.
11. Huang B., Li Q., Xu S., Zhou B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression // 14th International Conference on Fracture (ICF 14). 18–23 June 2017, Rhodes. Rhodes: International Congress on Fracture, 2017.
12. Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression // Aci Materials Journal. 2017. Vol. 114 (2). P. 225–235. <https://doi.org/10.14359/51689477>
13. Von der Haar C., Marx S. A strain model for fatigue loaded concrete // Structural Concrete. 2017. Vol. 19 (2). P. 463–471. <https://doi.org/10.1002/suco.201700029>

14. Fangping Liu, Jianting Zhou. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fa-

tigue loading // Shock and Vibration. 2016. p. 3950140. <https://doi.org/10.1155/2016/3950140>

REFERENCES

1. Rabinovich FN. Composites based on dispersedly-reinforced concrete: questions on theory and design, technology, constructions: monograph. Moscow: ASV; 2004. 563 p. (In Russ.)
2. Barashikov AYa, Shevchenko BN, Valovoy AI. Low-cycle fatigue in compression. *Beton i zhelezobeton*. 1985;4:27–28 (In Russ).
3. Kuzovchikova EA, Yashin AV. Investigation of influence of low-cycle compression impact on deformability, strength and structural changes of concrete. *Izvestiia vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura = News of higher educational institutions. Construction*. 1986;10: 30–33 (In Russ).
4. Cachim PB, Figueiras JA, Pereira PAA. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression *Cement and Concrete Composites*. 2002;24(9):211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1)
5. Lee MK, Barr BIG. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004;26:299–305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7)
6. Paskova T, Meyer C. Low-cycle fatigue of plain and fiber reinforced concrete. *Aci Materials Journal*. 1997;94(4):273–285.
7. Liu F., Zhou J. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2017;2017:6272906. <https://doi.org/10.1155/2017/6272906>
8. Kokneeva IG. Cyclic testing of polypropylene fibre reinforced concrete. *IOP Conf. Series:*

- Materials Science and Engineering*. 2020;880:012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012006>
9. Wang HL, Song YP. Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress. *Materials and Structures*. 2011;44:253–262. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9624-6>
10. Lubin Gao, Cheng-Tzu Thomas Hsu. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. *Aci Materials Journal*. 1998;95(5):575–581.
11. Huang B, Li Q, Xu S, Zhou B. Effect of loading frequency on the fatigue behavior of ultra-high toughness cementitious composites in compression. *14th International Conference on Fracture (ICF 14)*. 18–23 June 2017, Rhodes. Rhodes: International Congress on Fracture; 2017.
12. Isojeh B, El-Zeghayar M, Vecchio FJ. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression. *Aci Materials Journal*. 2017;114(2):225–235. <https://doi.org/10.14359/51689477>
13. Von der Haar C, Marx S. A strain model for fatigue loaded concrete. *Structural Concrete*. 2017;19(2):463–471. <https://doi.org/10.1002/suco.201700029>
14. Fangping Liu, Jianting Zhou. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading. *Shock and Vibration*. 2016;2016:3950140. <https://doi.org/10.1155/2016/3950140>

Сведения об авторах

Корнеева Инна Геннадьевна,
старший преподаватель
кафедры строительного производства,
Иркутский национальный
исследовательский технический
университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
✉e-mail: kornee-inna@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Information about the authors

Inna G. Korneeva,
Senior Lecturer of the Department
of Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: kornee-inna@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6130-0195>

Пинус Борис Израилевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры строительного производства,
Иркутский национальный
исследовательский технический
университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: pinus@istu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Boris I. Pinus,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
of Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: pinus@istu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3067-9478>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 02.04.2021.
Одобрена после рецензирования 03.05.2021.
Принята к публикации 10.05.2021.

The article was submitted 02.04.2021.
Approved after reviewing 03.05.2021.
Accepted for publication 10.05.2021.