

УДК 691.32:539.4

Б.И. ПИНУС, И.Г. КОРНЕЕВА, П.К. ХАРДАЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА
ПОЛИПРОПИЛЕНФИБРОБЕТОНА**

В работе представлен анализ динамической устойчивости обычных и полипропилен-фиброармированных цементно-матричных композитов. Обобщены результаты циклических нагружений призматических образцов с амплитудой 0,6–0,8 и нулевой асимметрией в течение 100 циклов. В качестве критерия потенциала внутреннего сопротивления принят показатель относительных затрат энергии, расходуемой на неупругое деформирование. Установлены специфические особенности усталостной деградации фиброкомпозитов и их повышенная динамическая сопротивляемость.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полипропиленфибробетон, динамическое нагружение, усталость.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-748-4-41-47

Поведение строительных конструкций зданий и сооружений при динамических воздействиях определяется их способностью к демпфированию инициируемых ими колебательных процессов. Предполагается [1–3], что при циклических деформациях (колебаниях) часть энергии необратимо поглощается и рассеивается вследствие внутреннего трения в материале, взаимного сдвига структурных компонентов, трения проскальзывания в сопряжениях элементов и других факторов. Физические закономерности подобных процессов и их последствий неоднозначны, что подтверждается отсутствием нормируемых показателей диссипативных свойств строительных материалов. Предлагается [4–6] использовать в качестве интегральной характеристики энергопоглощающей способности («внутреннего сопротивления») показатель ψ , определяемый отношением энергии неупругого деформирования к полной энергии колебательного цикла. При этом потеря энергии на каждом цикле согласно гипотезе В. Фойгта [7–9], оценивается отношением площади петли гистерезиса к эквивалентной упругой работе

$$\psi = \frac{W_i - W_i^p}{W_{e,i}}, \quad (1)$$

где ψ – относительная (удельная потеря энергии);

W_i – полная энергия деформирования на i -м цикле, Ра · мм/мм;

W_i^p – упругая энергия разгрузки на i -м цикле, Ра · мм/мм;

$W_{e,i}$ – энергия эквивалентного i -му упругого цикла деформирования, Ра · мм/мм.

При некоторой проблематичности принимаемых предпосылок [10–12] гипотеза В. Фойгта позволяет оценить влияние амплитуды и количества внешних воздействий на диссипативные свойства цементно-матричных композитов, что является целевой задачей настоящей работы.



Рис. 1. Общий вид испытания

Методика экспериментальных исследований. Уровень, частота и продолжительность многократных повторных нагружений приняты по результатам численного моделирования отклика железобетонных конструкций каркасных зданий на фоновые сейсмические воздействия умеренной (5–6 баллов) интенсивности. При этом диапазон их изменений позволяет учесть ожидаемую вероятность трансформаций физических закономерностей усталостных последствий и соответствующую чувствительность показателей внутреннего сопротивления композитов.

Рассматриваются последствия трех режимов циклических испытаний с постоянной амплитудой напряжений $\eta = 0,6; 0,7$ и $0,8$ и нулевой асимметрией при разгрузке. На всех этапах испытаний изменение нагрузки автоматически обеспечивало постоянство скорости деформирования призматических образцов $0,04$ мм/с. Испытательный комплекс Instron 5989 позволяет осуществлять контроль усилий с точностью до 1 кН, запись деформаций на полной базе испытаний с точностью $1 \cdot 10^5$ е.о.д. и непрерывные измерения напряжений, модуля упругости, объема и затрачиваемой энергии (рис. 1).

Исследуемые составы опытных серий приведены в табл. 1, а их выборочные контролируемые в испытаниях показатели конструктивных свойств – в табл. 2.

Результаты и обсуждение. Сравнительный анализ и кинетика демпфирующей способности ведутся с использованием приведенной выше гипотезы В. Фойгта, преобразованной применительно к экспериментально контролируемым и информационно-чувствительным параметрам внутреннего сопротивления. При этом изменение энергии поглощения в i -м цикле нагружения оценивалось как

$$W_i - W_i^p = 0,5\sigma_{\max} \varepsilon_{e,i} + (\varepsilon_{\max,i} - \varepsilon_{e,i}) \sigma_{\max} + 0,5\sigma_{\max} (\varepsilon_{\max,i} - \varepsilon_{res,i}), \quad (2)$$

а упругий эквивалент энергии деформирования

$$W_{e,i} = 0,5\sigma_{\max} \varepsilon_{\max,i}. \quad (3)$$

Таблица 1. Составы бетона (ОБ) и фибробетона (ПФБ)

Показатель	Серия	
	ОБ	ПФБ
Щебень 5–10 мм, кг/м ³	1357	1357
Песок $M_k = 2,03$, кг/м ³	540	540
Цемент, кг/м ³	380	380
Вода, л/м ³	210	210
Волокна 1,5 %, кг/м ³	–	13,85

Таблица 2. Исходные значения параметров прочности и деформативности

Показатель	Серия	
	ОБ	ПФБ
Призменная прочность R_b , МПа	34,7	33,6
Плотность ρ , кг/м ³	2325	2298
Модуль упругости E_b , ГПа	27,5	21,4
Уровень границы микроразрушений		
R_{crc}^o	0,47	0,32
R_{crc}^v	0,87	0,74
Деформации $\varepsilon \cdot 10^5$		
ε_0	24	40
ε_{max}^*	247	260
ε_{ult}^{**}	620	497

* Соответствует максимуму нагрузки.

** Соответствует моменту физического обрушения.

В представленных моделях $\varepsilon_{max,i}$, $\varepsilon_{res,i}$, $\varepsilon_{e,i}$ соответствуют максимальным, остаточным и упругим деформациям i -го цикла воздействия.

При подобном подходе коэффициент удельного поглощения определится соотношением

$$\Psi_i = \frac{\varepsilon_{max,i} - \varepsilon_{e,i} + \varepsilon_{res,i}}{\varepsilon_{max,i}} \quad (4)$$

Выборочные значения компонентов деформаций на различных этапах повторных нагружений приведены в табл. 3. Их изменчивость и динамика

Таблица 3. Оценка циклического потенциала поглощения энергии

η	Цикл	Серия ОБ					Серия ПФБ				
		ε_{max}	ε_e	ε_{res}	$\Sigma\varepsilon$	Ψ	ε_{max}	ε_e	ε_{res}	$\Sigma\varepsilon$	Ψ
0,6	1	115	76	24	63	0,55	166	94	40	112	0,67
	10	121	60	29	90	0,74	175	71	49	154	0,88
	50	126	58	34	102	0,81	189	69	59	179	0,95
	100	130	58	36	108	0,83	191	70	60	181	0,95
0,7	1	143	68	37	112	0,78	148	107	34	70	0,49
	10	152	62	46	136	0,89	159	86	41	114	0,72
	50	157	64	49	142	0,90	167	87	47	127	0,76
	100	165	64	56	157	0,95	171	85	51	137	0,80
0,8	1	178	80	48	146	0,82	165	83	39	121	0,73
	10	187	89	58	156	0,83	174	80	45	139	0,80
	50	200	85	69	184	0,92	180	79	48	143	0,79

Примечание. Значения деформаций увеличены в 10^5 раз, а $\Sigma\varepsilon$ соответствует числителю формулы (4).

Таблица 4. Поглощение энергии при циклических воздействиях

Показатель	Серия	
	ОБ	ПФБ
Потенциал упругого деформирования W_e	42854	43680
$\eta = 0,6$		
$\Sigma \varepsilon_{m,i} \cdot 10^5$	100	171
ΔW	1040	1724
$\frac{\Delta W}{W_e}, \%$	2,4	3,9
$\eta = 0,7$		
$\Sigma \varepsilon_{m,i} \cdot 10^5$	130	126
ΔW	1580	1470
$\frac{\Delta W}{W_e}, \%$	3,7	3,4
$\eta = 0,8$		
$\Sigma \varepsilon_{m,i} \cdot 10^5$	170	141
ΔW	2363	1903
$\frac{\Delta W}{W_e}, \%$	5,5	4,4

тов, включенных в аналитические модели (2), (3). Одновременно была определена энергия, поглощенная опытными образцами в течение циклических нагрузений (табл. 4).

Установлено, что в обычном бетоне с увеличением амплитуды циклического нагружения происходит неуклонное, с тенденцией к ускорению, возрастание энергии, расходуемой на необратимые последствия. Это является косвенным подтверждением неизменности физической природы деградационных процессов, предположительно связанных с трещинообразованием и развитием магистральных трещин [13–16].

Экстремальный характер (рис. 2) динамики соответствующих параметров наблюдается у фиброармированных бетонов. Большие, в сравнении с ОБ, затраты энергии при умеренных амплитудах циклических напряжений объяснимы их повышенной неоднородностью (структурной и жесткостной) и, как следствие, преимущественным развитием деформаций сдвига (внутреннего трения). Это вызывает формирование более плотных структур и рост потенциала упругого внутреннего сопротивления. При высо-

представляют предмет самостоятельного анализа. Поэтому ниже рассматриваются вопросы сравнительной малоциклового усталости обычных и фиброармированных бетонов, оцениваемой по интегральному критерию энергопоглощения ψ .

Во временном аспекте, характеризуемом количеством циклов заданной амплитуды, наблюдается сопоставимая тождественность кинетики внутреннего сопротивления ОБ и ПФБ в направлении стабилизации. При этом количественные показатели подобных преобразований существенно зависят от уровня напряжений. При «умеренных» ($\eta = 0,6$) циклических воздействиях поглощение энергии фибробетоном ощутимо выше, а при «высоких» ($\eta > R^{v}_{crc}$) – наоборот. Диверсификация поведения композитов, вероятно, связана с различием физических процессов и структурных трансформаций композитов в процессе усталостной деградации.

Для проверки подобных предположений, опираясь на электронную базу экспериментальных данных, были выполнены расчеты осредненных (за период динамических воздействий) значений компонен-

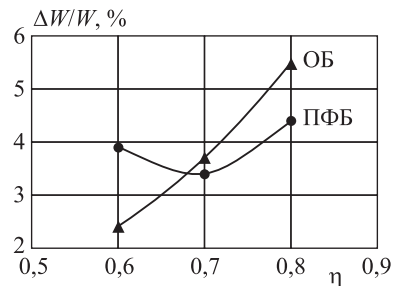


Рис. 2. Динамика относительных энергетических затрат на усталостную деструкцию

ких уровнях воздействий ($\eta = 0,8$) возникают новые механизмы усталостной деградации, тождественные обычным матричным структурам, что ведет к росту энергии, затрачиваемой на разрушение.

Выводы. 1. Полипропиленфиброармированные бетоны обладают повышенным потенциалом динамического сопротивления, обусловленного специфическими закономерностями механизма усталостной деградации. Целесообразны дополнительные исследования, позволяющие установить влияние матричной структуры, параметров фибр и их объема на диссипативную способность рассматриваемых композитов.

2. Полипропиленфиброкомпозиты характеризуются экстремальной зависимостью динамической долговечности от амплитуды циклических воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, 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. 1976. № 10. С. 30–35.
4. Li C.Y., Song Y.P. Study of residual strain of concrete under fatigue loading // Journal of Dalian University of Technology. 2001. Vol. 41, No. 3. P. 355–358.
5. 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, No. 9. P. 211–217.
6. Castillo E., Fernandez-Cantelli A., Ruiz-Ripoll M.L. A general model for fatigue damage due to any stress history // Int. Journal Fatigue. 2008. Vol. 30. P. 150–164.
7. Ghosni N., Samali B., Vessalas K. Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading // 23rd Australasian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) 9–12 December 2014. Byron Bay: Australia, 2014.
8. 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) June 18–23, 2017. Rhodes, Greece, 2017.
9. Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F.J. Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression // ACI Materials Journal. 2017. Vol. 114. No. 2. P. 225–235.
10. Lee M.K., Barr B.I.G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete // Cement and Concrete Composites. 2004. Vol. 26. P. 299–305.
11. Liu F., Zhou J. Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading // Shock and Vibration. 2016.
12. Liu F., Zhou J. Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete // Advances in Civil Engineering. 2017.
13. Von der Haar C., Marx S. A strain model for fatigue loaded concrete // Structural Concrete. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 463–471.
14. 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.

15. Zhang J., Stang H., Li V.C. Experimental study on crack bridging in FRC under uniaxial fatigue tension // J. Mater. Civil Eng. 2000. Vol. 12. P. 66–73.
16. Korneeva I.G. Cyclic testing of polypropylene fibre reinforced concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 880.

Пинус Борис Израилевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: pinus@istu.edu

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Корнеева Инна Геннадьевна, ст. препод.; E-mail: kornee-inna@yandex.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Хардаев Петр Казакович, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе;

E-mail: pinus@istu.edu

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
г. Улан-Удэ

Получено после доработки 15.03.2021

Pinus Boris Izrailevich, DSc, Professor; E-mail: pinus@istu.edu

Irkutsk National Research Technical University, Russia

Korneeva Inna Gennadievna, Senior Lecturer; E-mail: kornee-inna@yandex.ru

Irkutsk National Research Technical University, Russia

Hardaev Petr Kazakovich, DSc, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs; E-mail:

pinus@istu.edu

East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

INVESTIGATION OF THE DAMPING POTENTIAL OF POLYPROPYLENE FIBER CONCRETE

The paper presents an analysis of the dynamic stability of conventional and polypropylene-fiber-reinforced cement-matrix composites. The results of cyclic loading of prismatic samples with an amplitude of 0,6–0,8 and zero asymmetry for 100 cycles are generalized. As a criterion of the internal resistance potential, the indicator of the relative energy consumption spent on inelastic deformation is adopted. Specific features of fatigue degradation of fibrocomposites and their increased dynamic resistance are established.

Key words: polypropylene fiber reinforced concrete, dynamic loading, fatigue.

REFERENCES

1. *Rabinovich F.N.* Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov [Composites based on dispersedly-reinforced concrete]. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktivnykh [Questions on theory and design, technology, constructions]. Moscow, 2004. 563 p. (in Russian)
2. *Barashikov A.Ya., Shevchenko B.N., Valovoy A.I.* Malotsiklovaya ustalost' pri szhatii [Low-cycle fatigue in compression]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1985. No. 4. Pp. 27–28. (in Russian)
3. *Kuzovchikova E.A., Yashin A.V.* Issledovaniye vliyaniya malotsiklovyykh szhimayushchikh vozdeystviy na deformativnost', prochnost' i strukturnye izmeneniya betona [Investigation of influence of low-cycle compression impact on deformability, strength and structural changes of concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1976. No. 10. Pp. 30–35. (in Russian)
4. *Li C.Y., Song Y.P.* Study of residual strain of concrete under fatigue loading. Journal of Dalian University of Technology. 2001. Vol. 41, No. 3. Pp. 355–358.

5. *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, No. 9. Pp. 211–217.
 6. *Castillo E., Fernandez-Cantelli A., Ruiz-Ripoll M.L.* A general model for fatigue damage due to any stress history. *Int. Journal Fatigue*. 2008. Vol. 30. Pp. 150–164.
 7. *Ghosni N., Samali B., Vessalas K.* Evaluation of structural behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete beam under cyclic loading. 23rd Australasian Conf. on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23) 9–12 December 2014. Byron Bay, Australia, 2014.
 8. *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) June 18–23, 2017. Rhodes, Greece, 2017.
 9. *Isojeh B., El-Zeghayar M., Vecchio F.J.* Concrete damage under fatigue loading in uniaxial compression. *ACI Materials Journal*. 2017. Vol. 114, No. 2. Pp. 225–235.
 10. *Lee M.K., Barr B.I.G.* An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004. Vol. 26. Pp. 299–305.
 11. *Liu F., Zhou J.* Fatigue strain and damage analysis of concrete in reinforced concrete beams under constant amplitude fatigue loading. *Shock and Vibration*. 2016.
 12. *Liu F., Zhou J.* Research on fatigue strain and fatigue modulus of concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2017.
 13. *Von der Haar C., Marx S.* A strain model for fatigue loaded concrete. *Structural Concrete*. 2017. Vol. 19, No. 2. Pp. 463–471.
 14. *Wang H.L., Song Y.P.* Fatigue capacity of plain concrete under fatigue loading with constant confined stress. *Materials and Structures*. 2011. Vol. 44. Pp. 253–262.
 15. *Zhang J., Stang H., Li V.C.* Experimental study on crack bridging in FRC under uniaxial fatigue tension. *J. Mater. Civil Eng.* 2000. Vol. 12. Pp. 66–73.
 16. *Korneeva I.G.* Cyclic testing of polypropylene fibre reinforced concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 880.
-