

МАСШТАБНЫЙ ФАКТОР ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ КУБИКОВОЙ ПРОЧНОСТИ КЕРАМЗИТОФИБРОБЕТОНА

В. А. РЖЕВУЦКАЯ¹, Ю. Г. МОСКАЛЬКОВА²

¹ст. преподаватель кафедры «Промышленное и гражданское строительство»,
²к.т.н., доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
Белорусско-Российский университет
г. Могилев, Республика Беларусь

Аннотация. В соответствии с аналитическим обзором в статье представлен краткий очерк, касающийся влияния фибрового армирования на прочность легких бетонов, и установлено, что исследователи не уделяли внимания масштабному фактору при выборе размеров образцов-кубов, в результате чего было получено большое количество противоречивых данных.

Целью настоящего исследования являлась оценка влияния масштабного фактора на получаемые эмпирические значения средней кубиковой прочности керамзитобетона при осевом кратковременном сжатии.

В статье представлены опытные данные керамзитобетонных и керамзитобетонных образцов-кубов с номинальным размером ребра 100 мм и 150 мм, на основании анализа которых установлено, что для получения корректных значений средней кубиковой прочности на сжатие для керамзитобетона, армированного полипропиленовой фиброй, рекомендуется использовать стандартные образцы-кубы с размером ребра 150 мм и более.

Ключевые слова: легкий бетон, керамзитобетон, фибробетон, фибра, полипропиленовая фибра, дисперсное армирование, прочность на сжатие, кубиковая прочность, масштабный фактор, размер ребра куба.

SIZE EFFECT FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF COMPRESSIVE CUBE STRENGTH OF EXPANDED CLAY CONCRETE WITH FIBER REINFORCEMENT

V. A. RZHEVUTSKAYA¹, YU. G. MASKALKOVA²

¹Senior lecturer, Department "Industrial and Civil Construction",
²PhD in engineering, associate professor, Department "Industrial and Civil Construction"
Belarusian-Russian University
Mogilev, Republic of Belarus

Abstract. In accordance with the analytical review, the article presents a brief essay on the fiber reinforcement effect on the lightweight concrete strength. It was found that the researchers did not pay attention to the size effect when choosing the sample size of cubes; as a result, the researchers obtained a large number of conflicting data.

The purpose of this study was to evaluate the influence of the size effect on the obtained mean values of compressive cube strength of expanded clay fiber-reinforced concrete under axial short-term compression.

The article presents experimental data of cube specimens with a nominal edge size of 100 mm and 150 mm of expanded clay concrete and expanded clay fiber-reinforced concrete. Based on the obtained data analysis it is recommended to use standard cube specimens with the edge size of 150 mm or more to obtain the correct values of the mean value of compressive cube strength of expanded clay concrete reinforced with polypropylene fibers.

Keywords: lightweight concrete, expanded clay concrete, fiber-reinforced concrete, fibers, polypropylene fibers, dispersed reinforcement, compressive strength, compressive cube strength, size effect, cube size.

Введение.

Применение легких бетонов (включая керамзитобетон) позволяет в значительной степени уменьшить собственный вес строительных конструкций. Легким бетонам, армированным полимерными волокнами, посвящены работы многих исследователей, при этом полученные

ими результаты зачастую противоречивы. При изучении влияния полипропиленовой фибры (ПП-фибры) на прочностные характеристики легких бетонов выводы, сделанные исследователями (например, в работах [1–4]), можно условно разделить на несколько групп: в результате введения фибры прочность легкого бетона не изменяется, прочность изменяется неравномерно, прочность уменьшается, прочность увеличивается. Нами было сделано предположение, что подобная неоднозначная оценка изменения прочностных свойств в результате добавления полимерных волокон в бетонную смесь с пористым крупным заполнителем может быть связана с масштабным фактором, т. е. с размерами опытных образцов, используемых для эмпирической оценки прочности.

В ранее опубликованных работах [1; 5–12] недостаточно освещен вопрос о влиянии размеров поперечного сечения опытных керамзитобетонных образцов на получаемые значения кубиковой прочности, поскольку большинство исследователей для каждой опытной серии используют образцы-близнецы одинаковых размеров. В большинстве случаев сделанные исследователями выводы опираются на результаты испытаний кубов с размером ребра 100 мм, поскольку данный размер является общепринятым, и получаемые результаты испытаний априори считаются корректными. Однако в [13] на основе выполненного аналитического обзора научной литературы отмечено, что если для фибробетонов на плотных заполнителях (бетон нормального веса) размер образца-куба не влияет на результаты испытаний, то для легких фибробетонов результаты испытания кубов с ребром 100 мм и с ребром 150 мм существенно различаются.

Таким образом, цель настоящего исследования – оценить влияние масштабного фактора (размеров поперечного сечения образцов-кубов) на кубиковую прочность керамзитобетона при осевом кратковременном сжатии.

В соответствии с поставленной целью задача исследования – получить достаточное количество результатов испытаний кубов с размерами 100 × 100 × 100 мм и 150 × 150 × 150 мм для установления влияния масштабного фактора на величину средней кубиковой прочности керамзитобетона при содержании полипропиленового волокна 0,36 % по объему.

Основные материалы для приготовления опытных образцов-кубов.

В табл. 1 представлены основные характеристики материалов, использованные для приготовления керамзитобетонных и керамзитобетонных образцов-кубов.

Таблица 1 – Основные характеристики материалов для приготовления опытных образцов-кубов

Показатель	Характеристика
Крупный заполнитель	Керамзитовый гравий фракции 4–10 мм прочностью в цилиндре 1,03 МПа
Мелкий заполнитель	Речной песок с модулем крупности $M_k = 2,13$
Вяжущее	Портландцемент активностью 48 МПа
Состав керамзитобетонной смеси	$C : K : П = 1 : 1,84 : 0,79$ (C – цемент, K – керамзитовый гравий, $П$ – песок)
Водоцементное отношение	$B/C = 0,52$
Дисперсное армирование	Полипропиленовая фибра диаметром 50 мкм, длиной 12 мм
Проценты дисперсного армирования ПП-фиброй	$\rho_{PPf} = 0 \%$
	$\rho_{PPf} = 0,36 \%$ по объему бетона
Технологический процесс приготовления керамзитобетонной смеси	<pre> graph LR Water[Вода] --> Cement[Цемент] Fiber[Фибра] --> Cement Cement --> Sand[Песок] Sand --> Ceramic[Kерамзит] </pre>

Основные результаты исследований керамзитобетонных и керамзитофибробетонных образцов-кубов.

В табл. 2 и 3 приведены результаты испытаний опытных керамзитобетонных и керамзитофибробетонных кубов с номинальным размером ребра 100 мм и 150 мм (без учета результатов испытаний, отбракованных в процессе обработки) [13].

Таблица 2 – Результаты испытаний опытных образцов-кубов

Объемное содержание ПП-фибры, %	Порядковый номер образца	Размеры опытных кубов в мм			Разрушающая нагрузка, кН	Кубиковая прочность, $f_{lc,cube,i}$ МПа
		a	b	h		
1	2	3	4	5	6	7
<i>Керамзитобетон, кубы с номинальным размером ребра 100 мм</i>						
0	1	100	99	100	127,3	12,22
0	2	100	99	100	142,3	13,66
0	3	100	100	101	146,6	13,93
0	4	98	100	100	126,3	12,24
0	5	99	100	100	167,7	16,09
0	6	97	100	100	121,6	11,91
0	7	97	99	100	135,8	13,43
0	8	99	100	100	147,8	14,18
0	9	95,5	100	99	124,9	12,42
0	10	99	100	100	150,3	14,42
0	11	101	100,7	99,7	133,4	12,46
0	12	101	99	100	134,2	12,75
0	13	100	100	100	122,8	11,67
0	14	101	100	100	155,2	14,60
0	15	100	100	101	129,4	12,29
0	16	100,7	100	101,3	145,8	13,75
0	17	102	99	100	139,7	13,14
0	18	103	100	100	127,0	11,71
0	19	99	100	100	152,2	14,61
0	20	100	100	99	144,8	13,76
0	21	100	100	102	118,4	11,25
0	22	98	100	100	115,1	11,16
0	23	101	99	100	140,5	13,35
0	24	98	102	100	157,1	14,93
0	25	100	103	102	118,6	10,94
0	26	99	97	102	143,3	14,18
0	27	100	100	99	119,4	11,34
0	28	100	100	100	115,2	10,94
0	29	100	100	100	151,3	14,37
0	30	100	97	100	139,4	13,65
0	31	97	99	100	138,9	13,74
<i>Керамзитобетон, кубы с номинальным размером ребра 150 мм</i>						
0	32	148	150	149	299,8	13,50
0	33	146	150	150	300,2	13,71
0	34	144	150	150	278,8	12,91
0	35	149	149	147	303,3	13,66
0	36	148,5	150	150	295,2	13,25
0	37	148	149	150	285,8	12,96
0	38	151	152	150	299,9	13,07
0	39	148	149	149	271,3	12,30
0	40	150	149	149	272,7	12,20
0	41	147	151	151	303,9	13,69

1	2	3	4	5	6	7
<i>Керамзитобетон, кубы с номинальным размером ребра 100 мм</i>						
0,36	42	99	100	100	100,1	9,61
0,36	43	99	100	100	122,3	11,74
0,36	44	100	100	101	117,6	11,17
0,36	45	101	100	101	101,8	9,58
0,36	46	100	100	100	131,8	12,52
0,36	47	99	101	101	124,0	11,78
0,36	48	101	100	101	150,2	14,13
0,36	49	100	99	100	138,3	13,27
0,36	50	100	101	100	113,1	10,64
0,36	51	100	100	101	96,1	9,13
0,36	52	100	100	100	128,8	12,24
0,36	53	100	100	100	108,4	10,30
0,36	54	100	100	102	111,8	10,62
0,36	55	101	99	100	122,8	11,67
0,36	56	98	100	99	125,4	12,16
0,36	57	100	100	102	148,3	14,09
0,36	58	101	100	100	122,5	11,52
0,36	59	100	100	99	130,3	12,38
0,36	60	101	100	99	156,6	14,73
0,36	61	100	99	99	143,6	13,78
0,36	62	100	97	100	124,2	12,16
0,36	63	99	100	100	102,0	9,79
0,36	64	100	100	101	87,7	8,33
0,36	65	100	100	103	120,0	11,40
0,36	66	100	99	101	115,5	11,08
0,36	67	100	100	100	103,3	9,81
0,36	68	101	100	103	125,4	11,80
0,36	69	100	101	100	79,63	7,49
0,36	70	100	101	100	118,5	11,15
0,36	71	100	100	103	111,4	10,58
0,36	72	100	101	100	126,9	11,94
0,36	73	99	101	98	100,4	9,54
0,36	74	99	101	99	89,9	8,54
0,36	75	100	100	100	103,8	9,86
0,36	76	100	100	100	80,9	7,69
0,36	77	100	100	99	130,9	12,44
0,36	78	100	100	100	112,9	10,73
0,36	79	99	99	99	106,3	10,30
0,36	80	100	100	100	104,4	9,92
0,36	81	99	99	99	92,3	8,95
0,36	82	99	100	100	113,9	10,93
0,36	83	100	99	99	101,8	9,77
<i>Керамзитобетон, кубы с номинальным размером ребра 150 мм</i>						
0,36	84	147,5	149	150	280,2	12,75
0,36	85	148,5	152	150	270,0	11,96
0,36	86	148	150	150	299,8	13,50
0,36	87	150	148,5	150	302,2	13,57
0,36	88	150	147,5	149,5	306,4	13,85
0,36	89	149	150	151	323,8	14,49
0,36	90	151	147	149	253,9	11,44
0,36	91	151	151	149	353,2	15,49
0,36	92	150	150	151	336,6	14,96
0,36	93	152	150	153	370,5	16,25
0,36	94	150	151	150	284,4	12,56
0,36	95	150	151	151	331,9	14,65
0,36	96	149	150	153	360,1	16,11

1	2	3	4	5	6	7
0,36	97	149	150	150	330,6	14,79
0,36	98	148	150	150	338,6	15,25
0,36	99	147	150	151	335,8	15,23
0,36	100	149	150	150	363,3	16,26
0,36	101	150	150	151	354,2	15,74
0,36	102	149	151	150	312,0	13,87
0,36	103	148	151	150	259,5	11,61
0,36	104	148	150	150	360,2	16,23
0,36	105	147	150	150	278,4	12,63
0,36	106	148	150	150	281,7	12,69
0,36	107	150	150	152	287,0	12,76
0,36	108	148	152	150	287,0	12,76
0,36	109	150	150	151	305,8	13,59
0,36	110	150	151	152	308,1	13,60
0,36	111	150	150	150	292,8	13,01
0,36	112	150	151	151	251,3	11,09
0,36	113	149	150	152	296,8	13,28
0,36	114	149	150	151	309,5	13,85
0,36	115	150	150	151	276,8	12,30
0,36	116	150	152	153	295,5	12,96
0,36	117	150	150	152	354,3	15,75
0,36	118	148	152	150	313,0	13,91
0,36	119	151	150	150	387,7	17,12
0,36	120	151	150	150	275,0	12,14
0,36	121	150	151	150	329,0	14,53
0,36	122	151	148	150	297,5	13,31
0,36	123	150	150	153	348,8	15,50
0,36	124	150	151	151	255,7	11,29

Таблица 3 – Результаты обработки опытных данных образцов-кубов

Показатель	Номинальный размер ребра куба, мм					
	100		150		100, 150	
Объемное содержание ПП-фибры ρ_{PPf} , %	0	0,36	0	0,36	0	0,36
Средняя кубиковая прочность $f_{cm,cube}$, МПа	13,07	10,98	13,13	13,87	13,08	12,41
Стандартное отклонение s , МПа	1,33	1,83	0,55	1,56	1,18	2,18
Коэффициент вариации V , %	10,21	15,50	4,18	11,26	9,06	17,56
Сопоставление с допустимым значением коэффициента вариации 13,5 % согласно ГОСТ 10180	$V < 13,5 \%$	$V > 13,5 \%$; превышает допустимое значение	$V < 13,5 \%$	$V < 13,5 \%$	$V < 13,5 \%$	$V > 13,5 \%$; превышает допустимое значение

Источник: [13, табл. 8].

Таким образом, на основании опытных данных (табл. 2 и 3) выявлено различие в средних значениях кубиковой прочности керамзитофибробетона, полученных по результатам испытаний образцов-кубов с размерами ребра 100 мм и 150 мм. В связи с этим можно сделать вывод, что для получения корректных значений средней кубиковой прочности на сжатие для керамзитофибробетона, дисперсно-армированного полипропиленовой фиброй, рекомендуется использовать стандартные образцы-кубы с размером ребра 150 мм и более [13; 14].

Выводы.

1. При аналитическом обзоре исследований, посвященных прочности фибробетонов на легких заполнителях, выявлено, что среди исследователей нет единого мнения по поводу влияния фибрового армирования на прочность легких бетонов.
2. Сделано предположение, что масштабный фактор является значимым при определении значений кубиковой прочности на сжатие керамзитофибробетона.
3. Для получения значений средней кубиковой прочности на сжатие для керамзитофибробетона, армированного полипропиленовой фиброй, рекомендуется использовать стандартные образцы-кубы с размером ребра 150 мм и более, поскольку испытание кубов с размером ребра 100 мм не гарантирует получение корректных результатов.

Литература:

1. Fantilli, A. P. Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates / A. P. Fantilli, B. Chiaia, A. Gorino // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 127. – P. 692–701. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.020.
2. Karamloo, M. Impact of using different amounts of polyolefin macro fibers on fracture behavior, size effect, and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete / M. Karamloo, O. Afzali-Naniz, A. Doostmohamadi // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 250. – P. 118856. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118856.
3. Yahaghi, J. Impact resistance of oil palm shells concrete reinforced with polypropylene fiber / J. Yahaghi, Z. C. Muda, S. B. Beddu // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 123. – P. 394–403. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.026.
4. Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete / J. J. Li [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 157. – P. 729–736. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.149.
5. Ramujee, K. Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete / K. Ramujee // *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 2, No. 8. – P. 3409–3413.
6. Nkem Ede, A. Optimal polypropylene fiber content for improved compressive and flexural strength of concrete / A. Nkem Ede, A. Oluwabambi Ige // *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. – 2014. – Vol. 11, No. 3. – P. 129–135.
7. Pothisiri, T. Effects of mixing sequence of polypropylene fibers on spalling resistance of normal strength concrete / T. Pothisiri, C. Soklin // *Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 18, No. 3. – P. 55–64. – DOI: 10.4186/ej.2014.18.3.55.
8. Fallah, S. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume / S. Fallah, M. Nematzadeh // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 132. – P. 170–187. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100.
9. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete / H. Mazaheripour [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol. 25, No. 1. – P. 351–358. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018.
10. Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H. Experimental study effect of silica fume and hybrid fiber on mechanical properties lightweight concrete / S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad, Y. G. Shemshad Sara // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 43, No. 2. – P. 263–271. – DOI: 10.1007/s40996-018-0137-9.
11. Micro-pore structure characteristics and macro-mechanical properties of PP fibre reinforced coal gangue ceramsite concrete J. Qiu [et al.] // *Journal of engineering*. – 2020. – Vol. 2020, No. 12. – P. 1192–1197. – DOI: 10.1049/joe.2019.1296.
12. Altalabani, D. Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete / D. Altalabani, D. K. H. Bzeni, St. Linsel // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 252. – P. 119084.
13. Maskalkova, Yu. G. Size effect of cube specimen on strength of expanded clay fiber-reinforced concrete / Yu. G. Maskalkova, V. A. Rzhvutskaya // *Magazine of Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 116, No. 8. – 18 p. – DOI: 10.34910/MCE.116.12.

14. Maskalkova, Yu. G. Compressive strength of expanded clay fiber-reinforced concrete / Yu. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // AlfaBuild. – 2021. – Vol. 19, No. 4. – 9 p. – DOI: 10.34910/ALF.19.4.

References:

1. Fantilli, A. P. Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates / A. P. Fantilli, B. Chiaia, A. Gorino // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 127. – P. 692–701. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.020.

2. Karamloo, M. Impact of using different amounts of polyolefin macro fibers on fracture behavior, size effect, and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete / M. Karamloo, O. Afzali-Naniz, A. Doostmohamadi // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 250. – P. 118856. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118856.

3. Yahaghi, J. Impact resistance of oil palm shells concrete reinforced with polypropylene fiber / J. Yahaghi, Z. C. Muda, S. B. Beddu // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 123. – P. 394–403. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.026.

4. Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete / J. J. Li [et al.] // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 157. – P. 729–736. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.149.

5. Ramujee, K. Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete / K. Ramujee // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2, No. 8. – P. 3409–3413.

6. Nkem Ede, A. Optimal polypropylene fiber content for improved compressive and flexural strength of concrete / A. Nkem Ede, A. Oluwabambi Ige // Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2014. – Vol. 11, No. 3. – P. 129–135.

7. Pothisiri, T. Effects of mixing sequence of polypropylene fibers on spalling resistance of normal strength concrete / T. Pothisiri, C. Soklin // Engineering Journal. – 2014. – Vol. 18, No. 3. – P. 55–64. – DOI: 10.4186/ej.2014.18.3.55.

8. Fallah, S. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume / S. Fallah, M. Nematzadeh // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 132. – P. 170–187. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100.

9. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete / H. Mazaheripour [et al.] // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25, No. 1. – P. 351–358. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018.

10. Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H. Experimental study effect of silica fume and hybrid fiber on mechanical properties lightweight concrete / S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad, Y. G. Shemshad Sara // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 43, No. 2. – P. 263–271. – DOI: 10.1007/s40996-018-0137-9.

11. Micro-pore structure characteristics and macro-mechanical properties of PP fibre reinforced coal gangue ceramsite concrete J. Qiu [et al.] // Journal of engineering. – 2020. – Vol. 2020, No. 12. – P. 1192–1197. – DOI: 10.1049/joe.2019.1296.

12. Altalabani, D. Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete / D. Altalabani, D. K. H. Bzeni, St. Linsel // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 252. – P. 119084.

13. Maskalkova, Yu. G. Size effect of cube specimen on strength of expanded clay fiber-reinforced concrete / Yu. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – Vol. 116, No. 8. – 18 p. – DOI: 10.34910/MCE.116.12.

14. Maskalkova, Yu. G. Compressive strength of expanded clay fiber-reinforced concrete / Yu. G. Maskalkova, V. A. Rzhevutskaya // AlfaBuild. – 2021. – Vol. 19, No. 4. – 9 p. – DOI: 10.34910/ALF.19.4.