

К. С. КАРАПЕТЯН, Р. А. КОТИКЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНОМОДУЛЬНОСТИ БЕТОНА

Как известно, сопротивляемость бетона растяжению в 10—20 раз ниже, чем сжатию. Существенно отличаются и модули упругости при растяжении и сжатии, однако этот вопрос еще совершенно мало исследован [4].

Настоящая работа посвящена исследованию разномодульности тяжелого и легкого бетонов в зависимости от размеров поперечного сечения бетонного элемента и некоторых других факторов. В работе рассматриваются результаты двух больших серий опытов авторов, из коих данные по тяжелому бетону частично опубликованы в работе [1], а по легкому бетону — полностью в работе [2]. Отметим, что в этих работах результаты указанных опытов с точки зрения разномодульности бетона не рассматривались.

В опытах над тяжелым бетоном испытывались призмы и восьмерки сечением 7×7 , 10×10 , 15×15 и 20×20 см. Для приготовления бетона применялись: базальтовый щебень, кварцевый песок и портланд-цемент Араратского завода (Ереван) марки 500. Состав бетона (по массе) 1:2.07:2.63: ВЦ — 0.575; расход цемента 355 кг на 1 м^3 бетона.

Призмы и восьмерки бетонировались в горизонтальном положении, освобождались от форм через 2 сут, после чего часть их изолировалась от влагопотери парафином. До момента испытания в возрастах 28 и 700 сут все образцы хранились в обычных лабораторных условиях. При кратковременных испытаниях определяли: призмную прочность, прочность на растяжение и модуль деформации при сжатии и растяжении.

Вторая серия опытов была поставлена одним из авторов данной статьи с целью изучения анизотропии прочности, модуля деформации и деформаций ползучести легкого бетона на литондной пемзе при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора [2]. Хотя методика этих опытов подробно описана автором, все же отметим, что и в этом случае испытывались призмы и восьмерки сечением 7×7 , 10×10 , 15×15 и 20×20 см. Бетон был приготовлен на песке и щебне из литондной пемзы и на пуцолановом портланд-цементе Араратского завода активностью 471 кг/см². Состав бетона (по массе) 1:1.85:3.00: ВЦ = 1; расход цемента 252 кг на 1 м^3 бетона. Образцы испытывались в возрастах 28 сут и 1 год как перпендикулярно (образцы, изготовленные в вертикальных формах), так и параллельно (образцы, изготовленные в горизонтальных формах) слоям бетонирования.

Все экспериментальные данные подвергались статистической обработке по методике [5]. Показатель точности корреляционного уравнения в большинстве случаев не превышает 7%. Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации прочности бетона только в отдельных случаях соот-

ственно превышают: при сжатии 10—15 кгс/см² и 5%, а при растяжении — 1—1.2 кгс/см² и 7%.

Экспериментальные кривые деформаций как призм, так и восьмерок описывались корреляционным уравнением

$$\varepsilon = \frac{a \frac{\sigma}{R}}{1 - b \frac{\sigma}{R}} \quad (1.1)$$

где a и b — опытные параметры.

Касательные модули деформации при растяжении и сжатии определяли при одинаковых уровнях напряжений по зависимости

$$E = E_0 \left(1 - b \frac{\sigma}{R} \right)^2 \quad (1.2)$$

где E_0 представляет начальный модуль деформации ($E_0 = R/a$).

Данные о прочности и касательном модуле деформации исследованного тяжелого бетона при растяжении и сжатии приведены в табл. 1. Отметим, что из этих данных в работе [1] были опубликованы только прочности неизолированных восьмерок и призм, прочности изолированных призм. В таблице также модули деформации по хорде при относительном напряжении 0.5.

Как видно из табл. 1, при неизолированных образцах масштабный фактор оказывает существенное влияние на прочность тяжелого бетона как при растяжении, так и при сжатии. Независимо от возраста к моменту испытания с увеличением размеров поперечного сечения образца прочность бетона как на растяжение, так и на сжатие (призменная прочность) возрастает. Отношение прочности восьмерок сечением 20×20 см к прочности восьмерок сечением 7×7 см при возрасте бетона 28 и 700 сут соответственно составляет 1.31 и 1.40. Отношение же прочностей призм аналогичных сечений в тех же возрастах составляет 1.50 и 1.24.

При изолированных образцах, испытанных в возрасте 28 сут, прочность образцов разных сечений как при сжатии, так и при растяжении отличаются незначительно и поэтому можно заключить, что в этом случае масштабный фактор практически не оказывает влияния на прочность бетона. Однако, со старением бетона влияние масштабного фактора вновь начинает проявляться и в возрасте 700 сут призменная прочность так же, как и прочность бетона на растяжение, с увеличением размера сечения образца возрастает. Изменение характера влияния масштабного фактора на прочность бетона при сжатии и растяжении является следствием частичного испарения, которое имело место из-за ненадежной изоляции образцов парафином [1]. Отрицательное влияние испарения тем больше, чем меньше сечение образца и больше возраст бетона к моменту испытания.

По данным табл. 1 прочности изолированных призм сечением 7×7; 10×10, 15×15 и 20×20 см в возрасте 700 сут соответственно составляют 373, 319, 548 и 483 кгс/см². Наблюдаемое некоторое отступление прочности призм сечением 10×10 и 20×20 см от общей закономерности является

Таблица 1

Влияние масштабного фактора на прочность, модуль деформации и разномодульность тяжелого бетона

Условия хранения образцов	Возраст бетона в сут	Размеры сечения образцов в см	Прочность в кгс/см ²		$E_p \times 10^{-3}$ и кгс/см ² при уровне напряжения			$E_{сж} \times 10^{-4}$ и кгс/см ² при уровне напряжения			Коэффициент разномодульности ($E_p/E_{сж}$) при уровне напряжения		
			R_p	$R_{пр}$	0	0,25	0,50	0	0,25	0,50	0	0,25	0,50
Обычное без изоляции	28	7×7	11.7	150	300	235	178	198	161	126	1.51	1.46	1.39
		10×10	15.7	201	294	238	188	229	190	154	1.28	1.25	1.22
		15×15	15.5	229	340	271	210	233	198	166	1.46	1.37	1.27
		20×20	15.3	225	348	282	223	244	208	174	1.42	1.35	1.28
	700	7×7	13.5	212	354	262	186	195	168	143	1.82	1.56	1.30
		10×10	15.0	183	409	295	200	235	186	143	1.74	1.59	1.40
		15×15	17.5	225	324	252	190	215	187	163	1.51	1.35	1.17
		20×20	18.9	262	304	238	180	228	189	153	1.33	1.26	1.18
Обычное с изоляцией	28	7×7	19.9	341	538	424	323	334	271	214	1.61	1.56	1.51
		10×10	17.9	367	442	364	294	328	289	254	1.35	1.26	1.16
		15×15	23.0	333	488	404	328	354	273	202	1.38	1.48	1.62
		20×20	22.8	327	456	390	329	337	261	195	1.35	1.49	1.69
	700	7×7	19.2	373	467	339	232	280	265	250	1.67	1.28	0.93
		10×10	23.5	319	520	398	292	295	278	269	1.76	1.43	1.09
		15×15	26.3	548	473	389	314	375	333	294	1.26	1.17	1.07
		20×20	29.0	483	419	362	310	347	298	254	1.21	1.21	1.22

следствием как неодинаковой степени надежности наружной изоляции образцов, так и того, что ввиду необходимости в большом количестве образцов последние изготавливались группами из разных замесов исследуемого бетона. Как правило, призмы сечениями 7×7 , 10×10 и 15×15 см бетонировались из одного замеса, а призмы сечением 20×20 см — из другого замеса. По такой же методике изготавливались и восьмерки таких сечений.

По данным табл. 1 в случае неизолированных образцов, испытанных в возрасте 28 сут. во влиянии масштабного фактора на модуль деформации тяжелого бетона как при растяжении, так и при сжатии наблюдается четкая закономерность — с увеличением размеров поперечного сечения образца модуль деформации возрастает. При возрасте же бетона 700 сут масштабный фактор уже практически не оказывает влияния на модуль деформации бетона как при растяжении, так и при сжатии. Следует обратить внимание и на то, что после 28 сут возраста модуль деформации бетона во времени возрос незначительно, а в некоторых случаях наблюдается даже его спад.

По данным испытаний изолированных образцов в возрасте 28 сут модуль деформации бетона как при растяжении, так и при сжатии практически не зависит от размеров поперечного сечения образца. Однако, со старением бетона влияние масштабного фактора начинает вновь проявляться и модуль деформации тем больше, чем больше сечение образца. Наблюдаемое некоторое отступление модулей деформаций изолированных восьмерок и призм сечением 20×20 см от указанной закономерности, несомненно, является следствием того, что эти образцы изготовлены не из тех замесов бетона, из которых были изготовлены восьмерки и призмы сечениями 7×7 , 10×10 и 15×15 см.

Рассмотрим опытные данные коэффициента разномодульности тяжелого бетона (k_1), который представляет отношение модуля деформации при растяжении (E_p) к модулю деформации при сжатии (E_{cm}). На основании этих данных, независимо от масштабного фактора, уровня напряжения, возраста бетона к моменту испытания и от того испытываются неизолированные или изолированные образцы, коэффициент разномодульности тяжелого бетона k_1 почти во всех случаях больше единицы и изменяется в довольно широких пределах (от 1.07 до 1.82).

Масштабный фактор оказывает существенное влияние на коэффициент разномодульности тяжелого бетона (табл. 1). При неизолированных образцах, независимо от уровня напряжения и возраста бетона к моменту испытания, с увеличением размеров поперечного сечения образца k_1 имеет тенденцию уменьшаться, причем в некоторых случаях существенно. Что касается изолированных образцов, испытанных в возрасте 28 и 700 сут, то в этом случае указанная закономерность иногда ни только не сохраняется, но даже в отдельных случаях наблюдается обратная картина, то есть с увеличением сечения образца коэффициент разномодульности возрастает.

Разномодульность тяжелого бетона существенно зависит и от уровня напряжения. Независимо от размеров поперечного сечения образца, возраста бетона к моменту испытания и от того, испытываются неизолированные

или изолированные образцы, по данным табл. 1 в большинстве случаев с увеличением уровня напряжения степень разномодульности тяжелого бетона уменьшается.

Старение бетона также оказывает существенное влияние на разномодульность тяжелого бетона, однако это влияние тесно связано с масштабным фактором. По данным табл. 1 можно заключить, что в случае как неизолированных, так и изолированных образцов существует некоторое оптимальное сечение образца, меньше и больше которого влияние старения качественно различно. При сечении образцов меньше оптимального со старением бетона коэффициент разномодульности k_2 возрастает, а при сечении образцов больше оптимального — уменьшается. В данном случае оптимальное сечение $> 10 \times 10$ см и $< 15 \times 15$ см.

Как известно, легкие бетоны своими специфическими свойствами отличаются от тяжелых бетонов и поэтому изучение их разномодульности имеет важное как научное, так и практическое значение. Для анализа разномодульности бетона на литондной пемзе модули деформации при растяжении и сжатии были рассчитаны по формуле (1.2) при различных уровнях напряжений (табл. 2), где одновременно приводятся и прочностные показатели бетона. Подробный анализ влияния масштабного фактора на прочность бетона по этим опытам дан в работе [2] и поэтому здесь этот вопрос не рассматривается.

При анализе данных табл. 1 было показано, что коэффициент разномодульности тяжелого бетона больше единицы и изменяется в довольно широких пределах. С увеличением размеров поперечного сечения образца и уровня напряжения степень разномодульности в большинстве случаев уменьшается.

Рассматривая данные табл. 2, следует заметить, что с увеличением сечения образца коэффициент разномодульности легкого бетона на литондной пемзе уменьшается только в случае испытания образцов перпендикулярно слоям бетонирования. В остальных случаях при сечении образцов $\geq 10 \times 10$ см наблюдается обратная картина. Кроме этого, с увеличением уровня напряжения степень разномодульности легкого бетона, как правило, не уменьшается, как это мы наблюдали при тяжелом бетоне, а, наоборот, в большинстве случаев увеличивается.

Другой особенностью легкого бетона на литондной пемзе является то, что его коэффициент разномодульности не всегда больше единицы, он может быть меньше, равен и больше единицы. С увеличением возраста бетона к моменту испытания степень разномодульности легкого бетона до уровня напряжения 0.25 уменьшается. Из сравнения данных табл. 1 и 2 можно также заключить, что степень разномодульности тяжелого бетона более существенна, чем легкого бетона на литондной пемзе.

Рассмотрим наконец, последние три графы табл. 2, где приведены значения коэффициента анизотропии разномодульности легкого бетона на литондной пемзе (k), который представляет отношение коэффициента разномодульности образцов, испытанных перпендикулярно слоям (k_1) к коэффициенту разномодульности образцов, испытанных параллельно слоям (k_2). По этим данным коэффициент k , который характеризует анизотропию раз-

Таблица 2

Влияние масштабногo фактора на прочность, модуль деформации и разномодульность бетона

Возраст бетона	Размеры сечений образцов в см	Направление нагрузки по отношению к слоям бетона	Прочность в кг/см ²		$E_p \times 10^{-3}$ в кг/см ² при уровне напряжения			$E_{cm} \times 10^{-3}$ в кг/см ² при уровне напряжения			Коэффициент разномодульности (E_p/E_{cm}) при уровне напряжения			Коэффициент анизотропии разномодульности при уровне напряжения		
			R_p	R_{np}	0	0.25	0.50	0	0.25	0.50	0	0.25	0.50	0	0.25	0.50
			28 сут	7x7	перпенд. парал.	9.5	84	122	100	81	111	82	57	1.10	1.22	1.42
парал.	12.5	135			134	121	108	155	115	82	0.86	1.05	1.32			
10x10	перпенд. парал.	9.4		114	157	114	77	125	100	78	1.27	1.14	0.99	1.19	1.09	0.94
	парал.	10.4		125	173	138	107	162	131	102	1.07	1.05	1.05			
15x15	перпенд. парал.	7.9		132	152	102	61	134	102	72	1.13	1.00	0.85	0.84	0.76	0.65
	парал.	8.3		138	214	162	117	160	123	90	1.34	1.32	1.30			
20x20	перпенд. парал.	8.1	134	154	120	87	149	114	84	1.07	1.05	1.03	0.98	0.83	0.67	
	парал.	9.2	128	175	155	136	160	122	89	1.09	1.27	1.53				
1 год	7x7	перпенд. парал.	—	87	—	—	—	96	80	66	—	—	—	—	—	—
		парал.	13.9	146	129	110	96	135	102	73	0.91	1.08	1.36			
	10x10	перпенд. парал.	10.0	148	115	94	75	128	100	76	0.90	0.94	0.99	1.07	0.98	0.89
		парал.	15.2	151	119	105	91	141	109	81	0.84	0.96	1.12			
	15x15	перпенд. парал.	13.3	143	106	88	72	121	93	68	0.88	0.95	1.06	0.91	0.91	0.91
		парал.	17.3	173	130	114	98	131	109	87	0.97	1.01	1.13			
20x20	перпенд. парал.	11.7	175	106	99	93	140	113	88	0.76	0.88	1.05	0.85	0.83	0.82	
	парал.	15.2	169	121	110	99	136	104	77	0.89	1.06	1.28				

номодульности бетона, в большой мере зависит от масштабного фактора, возраста бетона к моменту испытания и уровня напряжения. При всех приведенных уровнях напряжений, независимо от возраста бетона, с увеличением размеров поперечного сечения образца k уменьшается и по своей величине может быть больше, равно и меньше единицы. При сечении образцов 7×7 см коэффициент анизотропии разномодульности больше единицы, а при сечении образцов $> 10 \times 10$ см уже меньше единицы.

Коэффициент анизотропии разномодульности легкого бетона на литой пемзе существенно зависит и от уровня напряжения, однако ее влияние тесно связано с возрастом бетона к моменту испытания. При возрасте бетона 28 сут, независимо от размеров поперечного сечения образца, с увеличением уровня напряжения k уменьшается, а при возрасте 1 год сказанное сохраняется, если сечение образца $\leq 10 \times 10$ см. При сечении образцов 15×15 и 20×20 см коэффициент анизотропии разномодульности уже практически не зависит от уровня напряжения.

Основные выводы

1. При одинаковых уровнях напряжений модули деформации бетона при растяжении и сжатии могут существенно отличаться. Степень разномодульности бетона зависит от большого количества факторов: размеров поперечного сечения образца, уровня напряжения, рода заполнителя, направления растягивающей и сжимающей нагрузок по отношению к слоям бетонирования, влажности образца и др.

2. До уровня напряжения 0.5 независимо от масштабного фактора, возраста бетона к моменту испытания и влажности образца коэффициент разномодульности тяжелого бетона ($k_2 = E_p/E_n$) больше единицы и изменяется в довольно широких пределах (от 1.07 до 1.82). Коэффициент разномодульности легкого бетона на литой пемзе может быть больше, равен и меньше единицы.

3. Масштабный фактор оказывает существенное влияние на разномодульность тяжелого бетона. При неизолированных образцах независимо от уровня напряжений и возраста бетона к моменту испытания с увеличением размеров поперечного сечения образца коэффициенты разномодульности тяжелого бетона уменьшаются. При изолированных образцах эта закономерность сохраняется только в отношении начального коэффициента разномодульности (при $\sigma = 0$), а при уровне напряжения ≥ 0.25 наблюдается обратная картина.

4. Независимо от размеров поперечного сечения образца и возраста бетона к моменту испытания, как правило, с увеличением уровня напряжения степень разномодульности тяжелого бетона уменьшается, а легкого бетона на литой пемзе — увеличивается.

5. Возраст бетона к моменту испытания оказывает существенное влияние на степень разномодульности как тяжелого, так и легкого бетонов и это влияние тесно связано с масштабным фактором. Независимо от того, испытываются неизолированные или изолированные образцы, существует некоторое оптимальное сечение образца, меньше и больше которого влияние

старения на коэффициент разномодульности тяжелого бетона качественно различно. При сечении образцов меньше оптимального со старением степень разномодульности тяжелого бетона возрастает, а при сечении образцов больше оптимального — уменьшается. Коэффициент разномодульности легкого бетона независимо от размеров поперечного сечения образца до уровня напряжения 0.25 с увеличением возраста бетона уменьшается.

6. На коэффициент разномодульности легкого бетона оказывает существенное влияние и направление растягивающей и сжимающей нагрузок по отношению к слоям бетонирования. Независимо от уровня напряжения, возраста бетона к моменту испытания с увеличением размеров поперечного сечения образца коэффициент анизотропии разномодульности легкого бетона на литондной пемзе уменьшается и по своей величине может быть больше, равен и меньше единицы.

7. Независимо от размеров поперечного сечения образца и возраста бетона к моменту испытания с увеличением уровня напряжения коэффициент анизотропии разномодульности легкого бетона на литондной пемзе уменьшается.

Институт механики
АН Армянской ССР

Поступила 8 VII 1976

Կ. Ս. ԿՈՐԱԳԵՏՏԱՆ, Ռ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ ՏԱՐԱՄՈԴՈՒԼՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Աշխատանքը նվիրված է ծանր և թեթև բետոնների տարամոդուլյունի էրսպերիմենտալ հետազոտմանը կախված մասշտաբի և մի քանի այլ գործոններից: Փորձարկվող նմուշների լայնական չափերը եղել են 7×7 , 10×10 , 15×15 և 20×20 սմ²:

Հետազոտությունները պարզել են, որ միևնույն հարաբերական լարումների դեպքում բետոնի ղեֆորմացիաների մոդուլները ձգման և սեղմման ժամանակ կարող են միմյանցից հապես տարբեր լինել: Մինչև 0.5 մակարդակով լարումները, անկախ մասշտաբի գործոնից, բետոնի հասակից և նմուշի խոնավությունից, ծանր բետոնի տարամոդուլյունի գործակիցը ($k = E_1/E_2$) միշտ մեծ է մեկից և փոփոխվում է բազմականաչափ մեծ սահմաններում (1.07-ից մինչև 1.82):

Թեթև բետոնի տարամոդուլյունի գործակիցը կարող է լինել 1-ից մեծ, հավասար և վերջուպես փոքր:

Մասշտաբի գործոնը հապես ազդում է ծանր և թեթև բետոնների տարամոդուլյունի վրա: Ոչ մեկուսացված նմուշների համար, անկախ լարումների մեծություններից և բետոնի հասակից, նմուշների լայնական չափերի մեծացման հետ ծանր և թեթև բետոնների տարամոդուլյունի գործակիցները փոքրանում են: Սակայն բետոնի մեկուսացված նմուշների համար այդ օրինաչափությունը պահպանվում է մինչև 0.25 մակարդակի լարումները, որից

հետո՝ լարումների մակարդակի մեծացման հետ նկատվում է հակառակ երկ-
վույթը:

Կատարված փորձերը ցույց են տվել, որ ծանր և թեթև բետոնների տա-
րամոդուլության վրա կապես ազդում են բետոնի հասակը և լարումների մե-
ծությունները:

Թեթև բետոնի համար տարամոդուլությունը մեծ չափով կախված է բե-
տոնի անիզոտրոպիայից: Անկախ նմուշների չափերից և բետոնի հասակից,
լարումների մակարդակի մեծացման հետ տարամոդուլության անիզոտրո-
պիայի գործակիցը փոքրանում է:

INVESTIGATION OF HETEROMODULUS CONCRETE DEPENDING ON THE SCALE FACTOR

K. S. KARAPETIAN, R. A. KOTIKIAN

S u m m a r y

Results of investigation of heteromodulus heavy and light concrete depending on the scale factor are presented.

The investigation show that of the same levels of stresses the strain moduli of concrete on tension and compression may differ essentially. Up to the stress level 0.5, independent of the scale factor and concrete age by the moment of test, the heteromodulus coefficient of heavy concrete, $k_2 = E_{\text{тен}}/E_{\text{сж}}$, is greater than unity and it varies over a rather wide range (from 1.07 to 1.82). The heteromodulus coefficient of light concrete on litoid pumice may be greater, equal or less than unity.

The scale factor exerts an essential effect on the heteromodulus coefficient of concrete. For non-insulated specimen, independent of stress and age of concrete, the larger the specimen's cross-section, the less the heteromodulus coefficients of heavy and light concrete. For insulated specimen of heavy concrete the above-mentioned regularity holds only for the initial heteromodulus coefficient ($\sigma = 0$) while with stress > 0.25 the opposite occurs.

The heteromodulus of concrete depends significantly on the concrete age by the moment of test as well, on the stress values and the direction of tension and compression loads with respect to the layers of concreting.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карапетян К. С., Котикян Р. А. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона. Тр. Второго Всесоюзного совещания по проблемам ползучести и усадки бетона, подготовленные к печати Центральным управлением НТО стройиндустрии, М., 1974.
2. Карапетян К. С. Влияние анизотропии на ползучесть бетона при сжатии и растяжении в зависимости от масштабного фактора. Изв. АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, 1964, т. 17, № 4.

3. *Карапетян К. С.* Влияние фактора времени на прочность и деформативность бетона на литондной пемзе и некоторые другие его свойства. «Гидротехнический бетон из литондной пемзе». Ереван, изд. АН АрмССР, 1958.
4. *Карапетян К. С., Котикян Р. А.* Исследование прочности и деформаций цилиндрических бетонных оболочек при кручении с последующим сжатием. Теория оболочек и пластины. Тр. IX Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. Ленинград, 1975.
5. *Митропольский А. К.* Техника статистических вычислений. М., Физматгиз, 1961.