

## ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА ВЫСОТНЫХ МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ

У статті представлені результати досліджень деформативних характеристик бетону на активованій в'язучій речовині для монолітних висотних будівель. Показано, що при зведенні висотних монолітних будівель у літній період року слід враховувати характер зміни пружності й пластичності бетону в часі, що відрізняється від тих же показників бетону нормального тверднення

В статье представлены результаты исследований деформативных характеристик бетона на активированном вяжущем для монолитных высотных зданий. Показано, что при возведении высотных монолитных зданий в летний период года следует учитывать характер изменения упругости и пластичности бетона во времени, который отличается от тех же показателей бетона нормального твердения.

In the article results of studies of deformation features of concrete on activate cement for monolithic high-altitude buildings are presented. It is shown that in construction of the high-altitude monolithic buildings in a summer period of a year one should take into account the character of changing the concrete elasticity and plasticity in time, which differs from the same indices for the concrete of normal hardening.

При возведении высотных монолитных зданий большое внимание должно уделяться деформативным характеристикам бетона, причем следует учитывать влияние климатических условий на формирование пространственной структуры цементной матрицы бетона. Как показали проведенные исследования, характер изменения упругости и пластичности бетона во времени при укладке бетонной смеси в летний период года отличается от тех же показателей бетона нормального твердения. Кроме того, в литературе сведения по этому вопросу противоречивы. По одним данным следует ожидать увеличения во времени величины модуля упругости бетона; по другим – в условиях повышенных температур наступает стабилизация деформативных свойств или даже возможно падение величины модуля упругости [1, 2].

Изменение деформативных свойств во времени наиболее полно характеризует величина модуля упругости бетона в различном возрасте при переменном относительном напряжении.

Совершенно отличен характер изменения модуля упругости бетона в условиях повышенных температур. В раннем возрасте быстро растет величина начальной упругости бетона. Модуль упругости бетона естественного твердения в 7-суточном возрасте почти равен модулю упругости бетона нормального твердения. Упругость бетона увеличивается до 14-суточного возраста, в котором обычно  $E$  принимает максимальное значение. В этот период величина модуля упругости бетона при  $R_{np} = 45$  МПа составляет, как правило,  $50 \cdot 10^3$  МПа. При про-

должении хранения бетона в естественных летних условиях к 28-суточному возрасту происходит снижение величины модуля упругости на 13...16 %. Более того, изменяется и характер деформативности бетона – появляется участок повышенной деформативности. Участок повышенной деформативности равен примерно  $\sigma = 0,2R_{np}$ .

Уменьшение модуля упругости бетона летней укладки, твердевшего без ухода, продолжается вплоть до 90-суточного возраста. Максимальная величина его снижения равна 30 %. Столь значительное падение упругости бетона при повышенных температурах можно объяснить внутренним микротрещинообразованием.

Аналогично изменяется модуль упругости бетона при различном напряженном состоянии образцов. С увеличением относительных напряжений  $\sigma/R_{np}$  кривые во времени приобретают большую плавность, падение модуля упругости при повышенных температурах уменьшается.

Характерно, что образцы естественного летнего твердения, перенесенные в 14-суточном возрасте в условия, близкие к нормальным, не имеют участка понижения модуля упругости бетона.

Упругость образцов летнего твердения возрастает при применении ухода за бетоном на 18...22 % в зависимости от метода ухода, при этом деформативные характеристики бетона стабилизируются.

В годичном возрасте начальный модуль упругости бетона естественного твердения дости-

гает  $50 \cdot 10^3$  МПа, т.е. почти выравнивается с максимальным (разница 9 %). В этом возрасте модуль упругости бетона естественного твердения на 57 % меньше аналогичной величины бетона с применением ухода.

В условиях повышенных температур упругость бетона выше упругости бетона нормального твердения. Однако изменение этих величин при различном напряженном состоянии неодинаково. При эксплуатационных величинах напряжения (0,4...0,6) модуль упругости бетона естественного твердения ниже аналогичной характеристики бетона нормального твердения. Например, при  $\sigma = 0,6R_{пр}$  в 90-суточном возрасте модуль упругости бетона при твердении в условиях повышенных температур примерно на 10 % ниже. Еще больше это понижение при увеличении напряжения.

Ползучесть бетона в условиях повышенных температур имеет свои особенности. Основные факторы, влияющие на характер протекания и величину деформаций ползучести, могут быть разделены на следующие группы:

- 1) состав бетона, технология укладки и уплотнения бетонной смеси;
- 2) размеры элемента;
- 3) температурно-влажностный режим окружающей среды;
- 4) величина и направление нагружения;
- 5) длительность действия нагрузки и возраст бетона в момент ее приложения.

Экспериментальные данные показали, что ползучесть бетона зависит от температуры окружающей среды и относительной влажности воздуха. Несомненно, периодические изменения влажности и температуры воздуха, а также периодическое увлажнение элементов железобетонных конструкций должны существенно отражаться на характере развития ползучести и ее конечной величине.

Наблюдения за ползучестью бетона непосредственно в конструкциях сооружений подтверждают существенное влияние периодических температурных изменений и влажности на ползучесть бетона, причем процесс интенсифицируется в летний период года [3].

Деформации ползучести бетона на модифицированной цементной системе исследовались в специальных установках, обеспечивающих возможность нагружения образцов при сжатии, растяжении и изгибе. Перед началом испытания гигрометрическое состояние образцов-призм было различным и зависело от условий их твердения.

Во время нагружения все образцы естественного твердения имели относительные водопотери от  $1,42 \cdot 10^{-2}$  до  $2,82 \cdot 10^{-2}$  г/г, в то время как образцы нормального твердения имели прирост массы на  $(0,13...0,91) \cdot 10^{-2}$  г/г.

При нагрузке  $\sigma = 0,4R_{пр}$  характер и величина ползучести зависят от режима хранения образцов до нагружения, прочностных свойств бетона к моменту загрузки в возрасте 28 сут, а также от дальнейших водопотерь бетона.

Наименьшая ползучесть, как и ожидалось, обнаружена у образцов модифицированного бетона. Это тем более характерно, что абсолютные напряжения бетона на модифицированной цементной системе выше, так как прочность их также была выше.

Ползучесть бетона при сжатии резко интенсифицируется у образцов обычного бетона по сравнению с образцами модифицированного бетона при твердении в естественных условиях летнего периода года. Например, в 60-суточном возрасте ползучесть обычного бетона более чем в три раза выше ползучести модифицированного бетона, составляя  $3 \cdot 10^{-3}$  мм/мм, т.е. примерно 50% упругой деформации в момент нагружения. В это время величина деформации ползучести модифицированного бетона равна менее 30 % начальной упругой деформации.

При сравнении величин ползучести обнаружено явление цикличности в ее протекании. При увеличении температуры окружающей среды до  $45^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха до 90 % интенсифицируется процесс ползучести бетона. Это влияние сказалось на всех образцах обычного бетона. Ползучесть модифицированного бетона практически не увеличилась. Например, за 20-суточный период деформации ползучести образцов обычного бетона увеличивались в 1,3...1,5 раза.

Очевидно, что столь значительная интенсификация ползучести – результат деструктивных процессов в обычном бетоне летнего твердения. Особенно это заметно на образцах с открытой поверхностью, у которых усадочные деформации суммируются с деформациями ползучести. При снижении температуры воздуха ползучесть стабилизируется иногда вплоть до полного затухания или даже некоторого восстановления длины образца. Новый период интенсификации наступает с повышением температуры воздуха. Как правило, периоды интенсификации ползучести связаны с температурно-влажностными изменениями окружающей среды.

Изоляция поверхности конструкций для уменьшения водопотерь во всех случаях снижала их деформативность в 1,3...1,8 раза. Следует ожидать, что в среднем изоляция поверхности бетона снижает его ползучесть в 1,5 раза, хотя этот эффект требует проверки с учетом масштабности элементов. Вероятно, с ростом массивности элементов эффект изоляции поверхности уменьшается.

При исследовании влияния возраста нагружения на ползучесть бетона к образцам возраста 7, 14, 28, 60 сут прикладывалась нагрузка, соответствующая  $\sigma = 0,4R_{пр}$  (табл. 1). Для исследований использован состав бетона 1:1,5:3,8, В/Ц=0,45; призмы  $10 \times 10 \times 40$  см не изолировались.

Таблица 1

**Изменение деформаций и характеристик ползучести бетона в зависимости от возраста нагружения образцов**

Показатели		Вид бетона				
		обычный	модифицированный	обычный	модифицированный	
						Возраст нагружения, сут
		14		28		
$\epsilon_v \cdot 10^{-5}$		26,0	16,9	26,5	17,3	
E, $10^3$ МПа		40,0	56,5	38,7	56,0	
$\sigma$ , МПа		8,0	8,0	8,2	9,6	
Возраст бетона, сут	14	$\epsilon_{п1}$	35	12,5	27	11
		$\varphi$	1,3	0,7	1,0	0,6
	28	$\epsilon_{п1}$	46	17,5	34	13,5
		$\varphi$	1,8	1,0	1,3	0,8
	90	$\epsilon_{п1}$	57	23,5	40	15
		$\varphi$	2,2	1,4	1,9	0,5
	180	$\epsilon_{п1}$	60	27,5	44	6,5
		$\varphi$	2,3	1,6	1,7	1,0

Соотношение  $\varphi_e/\varphi_n$  для различных сроков наблюдения ползучести бетона увеличивается с возрастом, хотя это увеличение носит затухающий характер, а при малых деформациях ползучести – даже обратный характер уменьшения. Данные о влиянии возраста нагружения и некоторая экстраполяция кривых соотношения  $\varphi_e/\varphi_n$  ниже и выше экспериментальной области позволяют предсказать ползучесть бетона летнего твердения при любом режиме нагружения.

Исследованиями установлено существенное увеличение ползучести обычного бетона при

сжатии, твердеющего в естественных условиях повышенных температур. Следовало также ожидать повышенную ползучесть бетона и при растяжении. В опытах на растяжение бетонных восьмерок использовались точные методы замера деформаций с помощью индикаторов часового типа (цена деления 0,001 мм). Наряду с деформациями ползучести замерялись деформации усадки бетона. Это особенно важно при растяжении, т.к. в этом случае знаки деформаций усадки и ползучести не совпадают.

Ползучесть при растяжении исследовалась в широком диапазоне нагрузок от  $0,2R_p$  до  $0,8R_p$ .

Эксперименты показали, что с увеличением влажности бетонных образцов при разных величинах напряжения увеличивается их ползучесть. Следовательно, ползучесть обычного бетона естественного твердения в условиях повышенных температур не только не выше, чем у модифицированного бетона, но даже ниже, что и является одной из причин низкой трещиностойкости элементов из обычного бетона, твердевших в условиях повышенных температур. К 90-суточному возрасту при всех величинах  $\sigma/R_{пр}$  деформации ползучести практически стабилизируются.

Очевидно, что учет усадки бетона после его нагружения при определении ползучести модифицированного бетона, твердевшего в условиях повышенных температур, не является строго необходимым, т.к. основная величина усадки фиксируется до начала опытов по измерению ползучести. В первый месяц твердения бетона до нагружения величина усадки бетона находится в пределах до  $6 \cdot 10^{-5}$ , а в последующий опытный период она увеличивается лишь на  $4,5 \cdot 10^{-5}$  у образцов с открытой поверхностью и немногим более  $1 \cdot 10^{-5}$  у образцов с изолированной поверхностью. Опыты некоторых исследователей [4] подтвердили, что усадка возрастает лишь на 30...40 % при нагружении образца, а т.к. величина усадки модифицированного бетона очень мала по сравнению с величиной общей деформации, то и это увеличение  $\epsilon_y$  существенно не отразится на определении величины ползучести.

О границах длительной прочности бетона в условиях повышенных температур можно сделать следующие выводы.

Скачкообразный прирост деформаций ползучести растяжения бетона, обнаруженный при  $\sigma = 0,6R_p$ , показывает, что предел длительного сопротивления модифицированного бетона находится у границы этой величины напряжения. Анализ кривых ползучести при  $\sigma/R_p$  показал,

что они имеют затухающий характер. Следовательно, эта величина напряжений может быть допущена для длительной эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов, К. В. Бетон и железобетон в строительстве [Текст] / К. В. Михайлов, Ю. С. Волков. – М.: Стройиздат, 1997. – 104 с.
2. Прочность, структурные изменения и деформации бетона [Текст] / под ред. А. А. Гвоздева // НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1987. – 299 с.
3. Чоговадзе, Д. В. Исследование процесса разрушения цементного камня и раствора методом рентгенокино съемки [Текст] / Д. В. Чоговадзе // Бетон и железобетон. – 1994. – № 7. – С. 26-29.
4. Трифонов, И. А. Исследование обычных и предварительно напряженных конструкций из мелкозернистого бетона [Текст] / И. А. Трифонов, М. И. Додонов, М. С. Кузнецов // Исследование и применение мелкозернистых бетонов. – 1998. – Вып. 35. – М.: НИИЖБ. – С. 56-58.

Поступила в редколлегию 25.03.2009.