

С. С. АНТОНОВ, А. В. КАРАВАЕВ, К. А. МАЛЬЦОВ, Л. А. ШИРЯЕВА

ВЛИЯНИЕ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА И МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 1 II 1971)

За последние десятилетия вскрыты основные физические причины влияния воды на прочность искусственных и естественных камней ⁽¹⁻⁴⁾. Исследования, выполненные в нашем институте, показали ⁽⁵⁻⁷⁾, что с увеличением водосодержания бетона его прочность при всех видах нагружения образцов линейно снижается и это снижение зависит от скорости нагружения. Так, прочность мокрого бетона ($\omega = 6\%$) при скорости нагружения 1 $\mu\text{к}/60$ мин., 1 $\mu\text{к}/30$ мин. 1 $\mu\text{к}/2$ мин. составляет 57, 70 и 100% от прочности сухого бетона ($\omega = 1,5\%$).

Использована простейшая зависимость прочности бетона от его влажности ω

$$R_{\omega} = R_0 \left(1 - \frac{\omega - \omega_0}{a} \right). \quad (1)$$

Здесь R_{ω} и R_0 — прочность материала при его весовой влажности (в процентах) соответственно ω и ω_0 (ω_0 — наименьшая влажность, соответствующая влажности воздуха); a — коэффициент, зависящий от состава материала, вида деформации, пористости и ряда других факторов. Если известен коэффициент размягчения бетона $\eta = R_{\omega}/R_0$ при данном виде деформации, то

$$a = (\omega - \omega_0) / (1 - \eta). \quad (2)$$

Для материалов с высокой пористостью, например для гипсо-песчаных растворов, применяемых при прочностном моделировании бетонных гидротехнических сооружений, зависимость прочности от влажности является более сложной (см. табл. 1). С известным приближением ее можно принимать линейной лишь при значениях влажности до 12—14% по весу. При дальнейшем увеличении влажности величина снижения прочности постепенно уменьшается и увеличение влажности свыше 18—20% практически не сопровождается уменьшением прочности.

Подобие кривых зависимости прочности и усадочных деформаций от водонасыщения (см. табл. 1) показывает на взаимную связь этих двух закономерностей, определяемую влиянием воды на структуру материала. Очевидно, что для возможности существования указанных выше зависимостей материал должен обладать развитой внутренней поверхностью, с многочисленными дефектами структуры («зонами предразрушения») ⁽⁴⁾, представляющими собой по большей части клиновидные микротрещины ⁽⁴⁾. При высыхании материала силы молекулярного притяжения в концах трещин выталкивают воду, причем микротрещины, частично закрываются ⁽⁴⁾, что и обуславливает усадку. Чем меньше остается воды в микротрещинах, тем в большей степени они могут закрываться, а следовательно, с каждой последующей порцией удаленной воды усадка становится интенсивнее. Сказанное полностью подтверждается нашими опытами (см. табл. 1).

Прочность же материала увеличивается с уменьшением его влажности потому, что при этом уменьшается количество воды, которое способно снизить поверхностную энергию пористого тела в микротрещинах при дополнительном их раскрытии. С уменьшением влажности раскрывающиеся при деформировании хрупкого тела микротрещины, если они практически изолированы от окружающей среды, снабжаются водой все в меньшем количестве, и материал становится все более упругим, что видно из того, что при снятии нагрузки доля упругой деформации возрастает.

Таблица 1

	Пределы изменения влажности, %			
	20—16	16—10	10—4	4—2
Относительная величина усадки материала	1,0	2,9	5,0	3,0
Интенсивность усадки	1,0	1,3	3,3	6,0
Величина призмной прочности, кг/см ²	12,0	14,5	19,0	27,0

Для материалов с высокой пористостью существует такое критическое водонасыщение, при котором все концы микротрещин можно считать заполненными водой. При увеличении влажности до указанной величины отмечается разбухание материала, что является в основном следствием падения поверхностной энергии тела до возможного минимума. Увеличение влажности сверх критической практически не приводит к дальнейше-

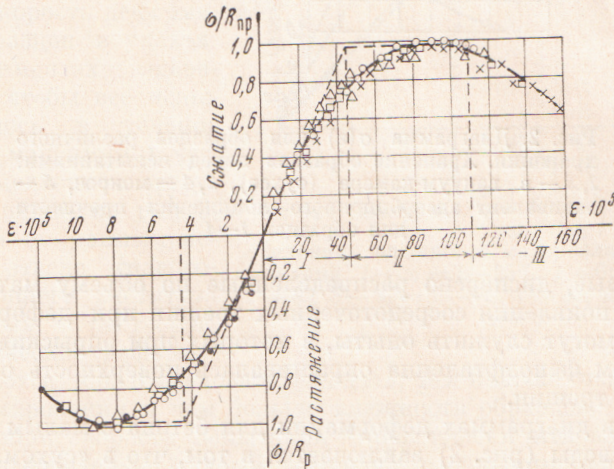


Рис. 1. Диаграмма $\sigma/\sigma_{\max}(\epsilon)$ для образцов, хранившихся под водой в вакуум-камере. (Влажность $\approx 6\%$). 1—6 — номера образцов, 7 — средние значения. Диаграмма построена по средним данным для 3 образцов. Величины деформаций — среднее из показаний 2 приборов. Бетон лабораторного состава марки 300. Возраст образцов 40 дней. $\sigma_{\max \text{ сж}} = 130 \text{ кг/см}^2$, $\sigma_{\max \text{ р}} = 13,8 \text{ кг/см}^2$

му снижению его прочности. В рассмотренном нами примере гипсо-песчаного раствора (см. табл. 1) критическим водонасыщением следует, по видимому, считать величину 18—20%.

Сходное поведение обнаруживают тяжелые цементные растворы и бетоны. Однако их пористость значительно меньше, чем у материалов, применяемых при моделировании, поэтому по существу невозможно создать такие высокие влажности, при которых их изменение не сказывалось бы на прочности.

Заметим, что, задавая постоянную скорость деформирования образцов из цементного раствора или бетона как с малым содержанием воды, так и водонасыщенных, можно получить диаграмму деформаций с ниспадающей ветвью, когда рост деформаций сопровождается снижением напряжений. Типичная диаграмма такого рода, полученная при испытании бетонных образцов с влажностью 6%, показана на рис. 1. На этой диаграмме намечаются три характерных участка или зоны: 1) зона линейной зависимости между деформациями и напряжениями, названная нами условно зо-

ной упругих деформаций; 2) зона криволинейной зависимости, переходящая в участок, параллельной оси деформаций. Эту зону можно назвать зоной дисперсного микротрещинообразования; 3) зона локального, сосредоточенного, первоначального микро-, а затем и макротрещинообразования.

В зоне дисперсного микротрещинообразования в бетоне с нарастающей интенсивностью увеличиваются начальные микротрещины, а также появ-

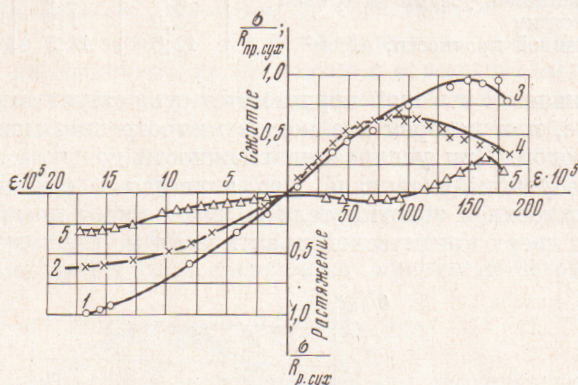


Рис. 2. Диаграмма $\sigma(\epsilon)$ для образцов различного хранения. Хранение образцов перед испытаниями: 1, 3 — в вакуум-камере (сухое), 2, 4 — мокрое, 5 — эквивалент адсорбционного понижения прочности для образцов 1—4

ляются и новые, дисперсно распределенные по объему материала. Подтверждением появления сосредоточенных трещин при деформировании в третьей зоне могут служить опыты, в которых при опрыскивании спиртовым раствором фенолфталеина окрашивалась поверхность образовавшихся локальных трещин.

Различие в диаграммах деформации для бетона с малым и с большим содержанием воды (рис. 2) заключается в том, что в «сухом» бетоне зона дисперсного микротрещинообразования сравнительно невелика и при быстром нагружении составляет 30% от $\epsilon_{упр}$, а в водонасыщенном она составляет 56% от $\epsilon_{упр}$ при той же скорости нагружения. Иными словами, «сухой» бетон ведет себя как более хрупкий материал, чем бетон влажный. Чем более водонасыщен бетон, тем в большей мере проявляется его псевдопластичность. Имея полные диаграммы $\sigma(\epsilon)$ для сухого и водонасыщенного бетона и используя предложенное П. А. Ребиндером понятие механического эквивалента понижения прочности (м.э.п.), можно легко проследить, как меняется сплошность сухого бетона при его деформировании. Под м.э.п. понимается та механическая нагрузка, которую нужно приложить к «сухому» образцу, чтобы получить величину деформации водонасыщенного.

При растяжении с самого начала деформирования м.э.п. растет (рис. 2), причем на участке, названном зоной дисперсного микротрещинообразования, его величина достигает максимального значения. Это свидетельствует о том, что в этой зоне интенсивно растет внутренняя поверхность материала, т. е. увеличивается общая поверхность пор и микротрещин, доступных смачиванию (рис. 2).

При сжатии на начальном участке деформирования вследствие закрытия части внутренних трещин м.э.п. приобретает отрицательное значение. По мере того как деструктивные факторы начинают преобладать, м.э.п. меняет знак, и в зоне, соответствующей дисперсному микротрещинообразованию, нарастая более интенсивно, чем растут деформации, достигает своего максимума.

Интересно заметить, что при переходе в зону локального трещинообразования м.э.п.п. перестает нарастать, а зачастую (при сжатии, изгибе и т. д.) при дальнейшем росте деформаций уменьшается за счет частичного смыкания микротрещины вблизи раскрывающейся локальной макротрещины.

Ранее этот процесс был прослежен при фильтрации воды через бетон и по его воздухопроводности. В последнее время З. Н. Цилосани и его сотрудниками этот процесс был исследован для цементного камня с помощью рентгеновской скоростной киносъемки. Скорость деформирования образцов в указанных экспериментах задавалась такая, чтобы все испытание длилось в течение 10—30 мин. максимум 1 час. При более медленном нагружении, как видно из рис. 3, построенного по данным испытаний в отделе гидросооружений нашего института гипсо-песчаных растворов, псевдопластические деформации оказываются, как и следовало ожидать, тем больше, чем меньше скорость деформирования и чем больше влажность образцов.

При большой скорости испытания (практически мгновенные испытания) даже относительно слабый материал с большим водонасыщением дает линейную зависимость напряжений от деформаций, вплоть до начала участка локального трещинообразования. Практически начало локального трещинообразования совпадает с исчерпанием долговременной прочности для образцов с малой влажностью. Однако с уменьшением скорости деформирования уменьшается не только предел долговременной прочности, но и растут псевдопластические деформации, являющиеся основной причиной ползучести. Рост этих деформаций при прочих равных условиях с увеличением влажности образцов ясно показывает их физическую природу. Чем больше влажность образцов и чем медленнее нарастает нагрузка, тем полнее происходит смачивание увеличивающейся при деформировании внутренней поверхности образца, причем поры, заполненные водой, являются при этом резервуарами, снабжающими влагой развивающуюся внутреннюю поверхность.

Научно-исследовательский институт гидротехники
им. Б. Е. Веденеева
Ленинград

Поступило
20 XI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ П. А. Ребиндер, Юбилейн. сборн., посвящен. 30-летию Великой Октябрьской Социалистической Революции, 1, Изд. АН СССР, 1947. ² З. Н. Цилосани, Усадка и ползучесть бетона, Тбилиси, 1963. ³ З. Н. Цилосани, Исследование процесса разрушения цементного камня, 1967. ⁴ Г. Д. Вишневецкий, Изв. Всесоюз. н.-и. инст. гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 82 (1966). ⁵ К. А. Мальцов, А. М. Архипов и др., ДАН, 125, № 2 (1959). ⁶ К. А. Мальцов, И. Б. Соколов, Изв. Всесоюз. н.-и. инст. гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 64 (1960). ⁷ К. А. Мальцов, там же, 75 (1964).

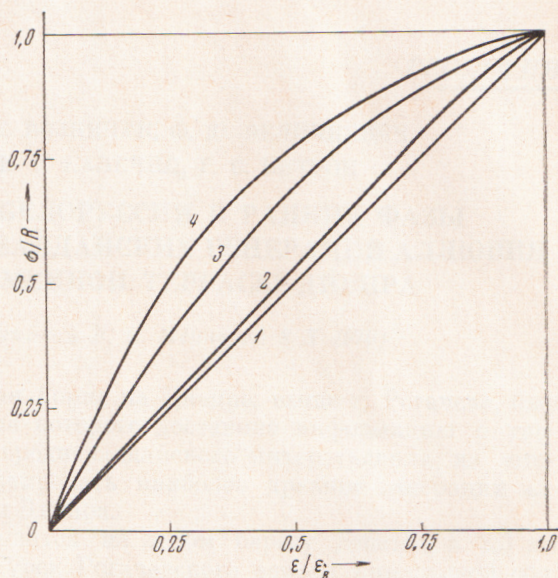


Рис. 3. Диаграммы $\frac{\sigma}{R} = f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{пр}}\right)$ при различных значениях влажности материала и времени испытания. 1 — $\omega = 0-25\%$, $t \rightarrow 0$; 2 — $\omega = 0-3\%$, $t \rightarrow \infty$; 3 — $\omega = 5-8\%$, $t \rightarrow \infty$; 4 — $\omega = 10-25\%$, $t \rightarrow \infty$