ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
LVII 1973 3

УДК—666.972.017 : 539.4

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К. С. Карапетян

О вторичном твердении и изменении анизотропных свойств бетона при его водонасыщении

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Н. З. Симоновым 6/II 1973)

В опытах А. З. Басевича ([1]), К. А. Малыпова ([2]), Н. Л. Мощанского ([3]) и др. при водонасыщении наблюдалось понижение прочности растворов и бетонов. Снижение прочности при обводнении объясняется раздвигающим действием адсорбционных пленок воды, проникающих в микрощели твердого тела ([4,5]).

В 1953 г. нами была поставлена серия опытов и при этом было обнаружено существенное повышение прочности и модуля деформации туфобетона при его водонасыщении. Цилиндрические образцы $d=14$ *см*, $h=28$ *см* (состав бетона 1 : 1, 76 : 2,77, В/Ц=1,63) до погружения в воду в четырехлетнем возрасте хранились в обычных лабораторных условиях при влажности среды 40—60%. После 150-суточного водного хранения прочность водонасыщенных образцов составляла 147 *кГ/см*^{2}, а контрольных сухих образцов 97 *кГ/см*^{2}.

На рис. 1 показаны для влажных и сухих образцов зависимости $\varepsilon=f(\sigma)$ и $E=f(\sigma)$, на основании которых отношение модуля деформации влажных образцов к модулю деформации сухих образцов при $\sigma=50$ *кГ/см*^{2} также составляет 1,5.

Таким образом, водонасыщение привело к существенному росту как прочности, так и модуля деформации туфобетона.

Тогда мы высказывали мнение ([6]), что столь существенное упрочнение бетона не может быть объяснено только восстановлением процесса гидратации ранее неполностью гидратизированных цементных зерен (т. е. вторичным твердением).

Впоследствии В. М. Худавердян, анализируя аналогичные свои опытные данные и данные наших вышеописанных опытов, наблюдаемое упрочнение бетона при водонасыщении целиком относил к эффекту вторичного твердения ([6]), как им было названо это явление. Однако, как будет показано, упрочнение бетона при водонасыщении имеет и другую причину.

Как известно бетон является существенно анизотропным материалом ([7,9]). Благодаря анизотропии, при хранении бетона в воздушно-сухих условиях прочность бетона по испытаниям призм параллельно слоям бетонирования больше, а деформации меньше, чем по испытаниям призм перпендикулярно слоям бетонирования. Причиной анизотропии бетона являются те водные прослойки, которые образуются под частицами заполнителя в результате внутреннего расслаивания бетона при его укладке и уплотнении. При испарении всех этих прослоек на их местах остаются пустоты (дефекты), которые ослабляют сечение бетонного элемента и снижают его прочность, увеличивают деформации. Отрицательное влияние дефектов на прочность бетона более существенно в том случае, когда призмы испытываются перпендикулярно слоям бетонирования, так как в этом случае ослабление сечения образцов дефектами получается наибольшее ([7–11]).

Все сказанное относилось к случаю, когда бетон хранится в воздушно-сухих условиях и, благодаря этому, вода из указанных прослоек испаряется.

При высокой же влажности среды и особенно при изолированных

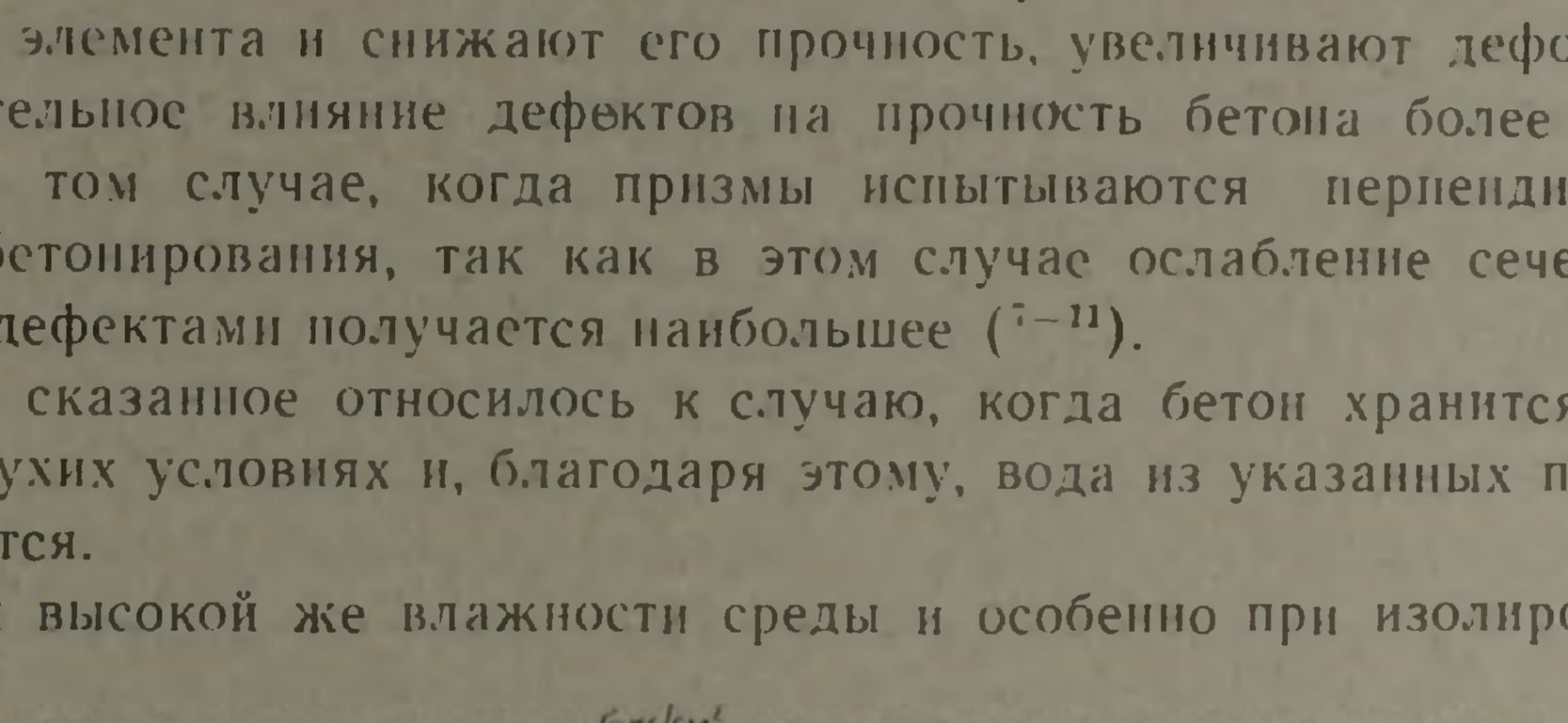

Рис. 1. Влияние водонасыщения на деформации бетона. *1*—образцы насыщенные водой; *2*—образцы сухие

образцах, когда испарение не имеет места и водные прослойки сохраняются, последние играют положительную роль. Водные прослойки принимают участие в восприятии внешней нагрузки, способствуя работе всего сечения бетонного элемента ([10]).

Для удобства дальнейшего изложения говоря—водные прослойки, мы будем иметь в виду те водные прослойки, которые образуются под частицами заполнителя в результате внутреннего расслаивания при укладке и уплотнении бетона, а пустоты или дефекты—места этих водных прослоек после испарения воды.

В дальнейшем возникла идея постановки обратных опытов. При этом мы считали, что если испарение приводит к снижению прочности и модуля деформаций, то водонасыщение сухого бетона логически должно привести к заполнению пустот водой и, благодаря восстановле-

нию водных прослоек, к росту прочности и модуля деформаций, а вместе с этим и к уменьшению степени анизотропии бетона. При повторном высыхании должно наблюдаться обратное явление.

В последующих опытах испытывались призмы сечением 10×10 *см*, высотой 40 *см*, изготовленные в вертикальных и горизонтальных формах из шлакобетона состава 1 :2,37 : 2,84 (по весу), В/Ц=1,2. Образцы до 2-х годичного возраста хранились в воздушных условиях, после чего были погружены в воду, где большая их часть оставалась 50 суток, а остальные 230 суток. После водного хранения образцы вместе с сухими образцами (эталон) были испытаны до разрушения. Из числа образцов, которые оставались в воде 50 суток часть была испытана после 10 и 27 суток высыхания в воздушных условиях. Результаты испытания приведены в табл. 1. Как видим, водонасыщение привело к заметному росту прочности бетона. При этом чем дольше оставались образцы в воде, тем больше прочность и упрочнение призм, испытанных перпендикулярно слоям бетонирования, намного больше, чем призм, испытанных параллельно слоям бетонирования. Водонасыщение привело также к уменьшению степени анизотропии бетона. Если отношение $R_{пр}/R_{пр}$ для сухих образцов составляет 1,49, то после 50 суток водного хранения оно снизилось до значения 1,24 и далее практически осталось без изменения.

Упрочнение бетона является следствием вторичного твердения, а также восстановления водных прослоек под частицами заполнителя и их положительной роли.

Как уже говорилось, при высыхании водонасыщенных образцов исчезновение водных прослоек должно привести к отрицательному явлению, т. е. к снижению прочности и модуля деформации бетона. Однако, в данных опытах (табл. 1) прочности образцов, которые после 50 суток водного хранения 10 суток высыхали, не уменьшились. Правда, прочность призм, которые были испытаны перпендикулярно слоям бетонирования, возросла на 7%. Дальнейшее высыхание образцов (до 27 сут.) привело к некоторому повышению прочности.

Увеличение, а не снижение прочности бетона при высыхании объясняется тем, что отрицательное влияние пустот (дефектов) было компенсировано продолжавшимся процессом вторичного твердения и исчезновением адсорбционных воздействий. Конечно, при высыхании водонасыщенного бетона процесс вторичного твердения замедляется и рост прочности стабилизируется. Повторное обводнение вновь может возобновить процесс твердения бетона.

Адсорбционное понижение прочности в данных опытах не наблюдалось, так как 50 суток водного хранения было достаточно, чтобы упрочнение бетона за счет эффектов вторичного твердения и восстановления водных прослоек с избытком компенсировало бы адсорбционное понижение прочности. Чтобы обнаружить адсорбционное понижение прочности, необходимо было испытать образцы после более короткого времени хранения бетона в воде. Результаты таких опытов будут приведены несколько позже.

Поскольку в наших опытах при высыхании образцов упрочнение бетона за счет вторичного твердения и обратимости адсорбционного понижения прочности с незначительным избытком компенсировало отрицательное влияние пустот (дефектов), то это дает основание для

Таблица 1

Влияние водонасыщения на призменную прочность шлакобетона

Условия хранения	Призменная прочность бетона в $кГ/см^2$, когда направление сжимающей силы при испытании по отношению к слоям бетона		$\frac{R'_{пр}}{R_{пр}}$	Отношение прочности водонасыщенных образцов к прочности сухих образцов при испытании	
	перпендикулярно $R_{пр}$	параллельно $R'_{пр}$		перпендикулярно слоям	параллельно слоям
Образцы сухие	80	119	1,49	1,00	1,00
50 суток в воде	123	152	1,24	1 54	1,28
230 суток в воде	175	215	1,23	2,19	1,81
50 суток в воде, далее 10 суток высыхание	132	153	1,16	1,65	1,29
50 суток в воде, далее 27 суток высыхание	137	177	1,29	1,71	1,49

вывода, что отрицательное влияние дефектов на прочность существенно. При водонасыщении же, когда пустоты заполняются водой и восстанавливаются водные прослойки, их положительная роль также становится существенной в упрочнении бетона.

Рассмотрим результаты исследования влияния водонасыщения и высыхания на деформации шлакобетона (рис. 2 и 3). Как видно из рис. 2, водонасыщение привело к заметному уменьшению деформаций бетона и чем больше продолжительность водного хранения, тем меньше деформации. С увеличением продолжительности водного хранения кривые деформаций образцов, испытанных перпендикулярно и параллельно слоям бетонирования, все больше сближаются. Уменьшение степени анизотропии связано с тем, что при водонасыщении деформации призм испытанных перпендикулярно слоям бетонирования, уменьшаются более чувствительнее, нежели деформации призм, испытанных параллельно слоям бетонирования. При высыхании бетона имеет место обратное явление. Более ясное качественное и количественное представление о влиянии водонасыщения и высыхания на деформации бетона можно получить из данных табл. 2, где приведеы модули деформации бетона по касательной при различных напряжениях. Как видим, качественное влияние водонасыщения на модули деформации такое же, как и на прочность бетона, что касается количественного влияния, то при водонасыщении модуль деформации возрастает более чувствительнее, чем прочность бетона.

Сравнение данных табл. 1 и 2 показывает, что в качественном

Таблица 2

Влияние водонасыщения и высыхания на модуль деформации шлакобетона

Условия хранения образцов	Направление сжимающей силы по отношению к слоям бетона при испытании	Модуль деформации бетона по касательной в $m/см^2$ при напряжении ($кГ/см^2$)					Отношение модуля деформации водонасыщенных образцов к модулю деформации сухих образцов при напряжении ($кГ/см^2$)				Отношение модуля деформации образцов, испытанных параллельно слоям, к модулю деформации образцов, испытанных перпендикулярно слоям при напряжении ($кГ/см^2$)				
		0	30	60	90	120	0	30	60	90	0	30	60	90	120
Образцы сухие	перпендикулярно	129	69	27	—	—	1,00	1,00	1,00	—	1,26	1,68	2,85	—	—
	параллельно	163	116	77	46	—	1,00	1,00	1,00	1,00					
Образцы 50 суток хранились в воде	перпендикулярно	219	147	88	45	16	1,70	2,13	3,26	—					
	параллельно	230	173	125	85	51	1,41	1,49	1,62	1,85	1,05	1,18	1,42	1,88	3,19
Образцы 230 суток хранились в воде	перпендикулярно	236	187	144	106	74	1,83	2,71	5,33	—					
	параллельно	248	211	179	147	119	1,52	1,82	2,32	3,20	1,05	1,13	1,24	1,38	1,61
50 суток в воде, далее 10 суток высыхание	перпендикулярно	152	116	85	58	36	1,18	1,68	3,15	—					
	параллельно	196	157	122	91	65	1,20	1,35	1,58	1,98	1,29	1,35	1,43	1,57	1,80
50 суток в воде, далее 27 суток высыхание	перпендикулярно	159	120	85	57	33	1,23	1,73	3,15	—					
	параллельно	161	135	112	91	72	0,99	1,16	1,46	1,98	1,01	1,12	1,32	1,60	2,18

отношении есть различие во влиянии высыхания на прочность и модуль деформации бетона. Если высыхание приводит к некоторому повышению прочности бетона, то модуль деформации чувствительно падает. Конечно, за короткое время высыхания (27 суток) процесс твердения не мог приостановиться и привести к спаду модуля деформации. Одновременно модуль деформации бетона должен был возрасти за счет исчезновения адсорбционных воздействий. Все это указывает на то, что спад модуля деформации в основном является следствием пустот (дефектов), которые остаются в местах водных прослоек после испарения воды.

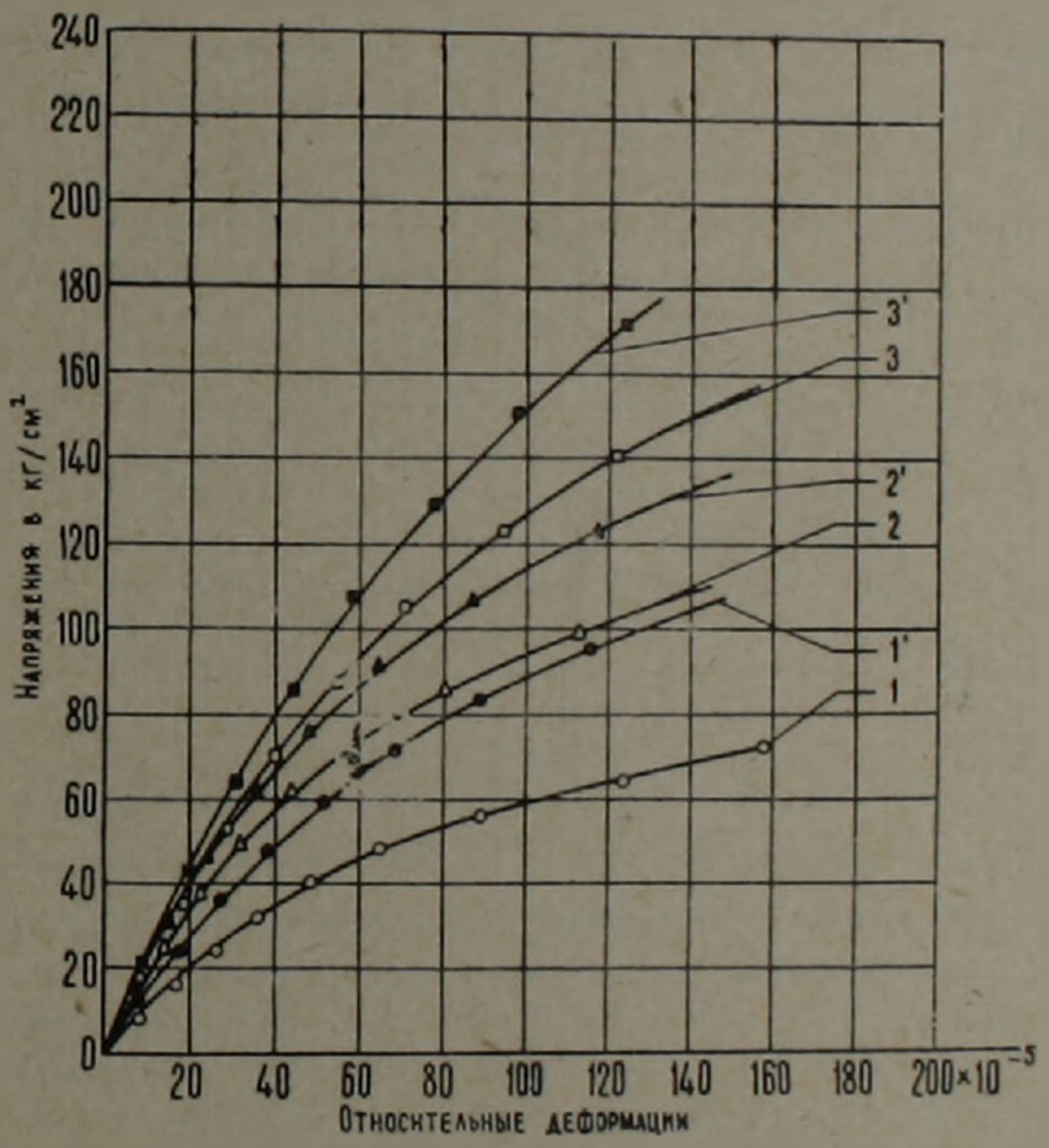

Рис. 2. Влияние водонасыщения на деформации бетона. *1—3*—образцы, испытанные перпендикулярно слоям бетонирования; *1'—3'*—образцы, испытанные параллельно слоям бетонирования (*1* и *1'*—образцы сухие; *2* и *2'*—образцы 50 суток хранились в воде; *3* и *3'*—образцы 230 суток хранились в воде)

Проведенные исследования приводят к выводу, что при водонасыщении роль водных прослоек в увеличении модуля деформации гораздо чувствительнее, чем в увеличении прочности бетона, а при высыхании отрицательное влияние пустот (дефектов) на модуль деформации гораздо больше, чем на прочность бетона.

Для исследования адсорбционного понижения прочности бетона испытывались призмы сечением 7×7 *см*, высотой 28 *см* из тяжелого бетона состава 1 : 1,78 : 2,18 (по весу), В/Ц=0,48, которые до погружения в воду в 2-х летнем возрасте также хранились в обычных условиях.

В этих опытах результаты, полученные по испытаниям образцов перпендикулярно и параллельно слоям бетонирования, качественно не отличались. Прочности призм, испытанных перпендикулярно слоям бетонирования после водного хранения 4; 9; 20; 41 сутки и 3; 6; 12; 18 месяцев, соответственно составили 177; 186; 188; 211; 226; 255; 318; 433

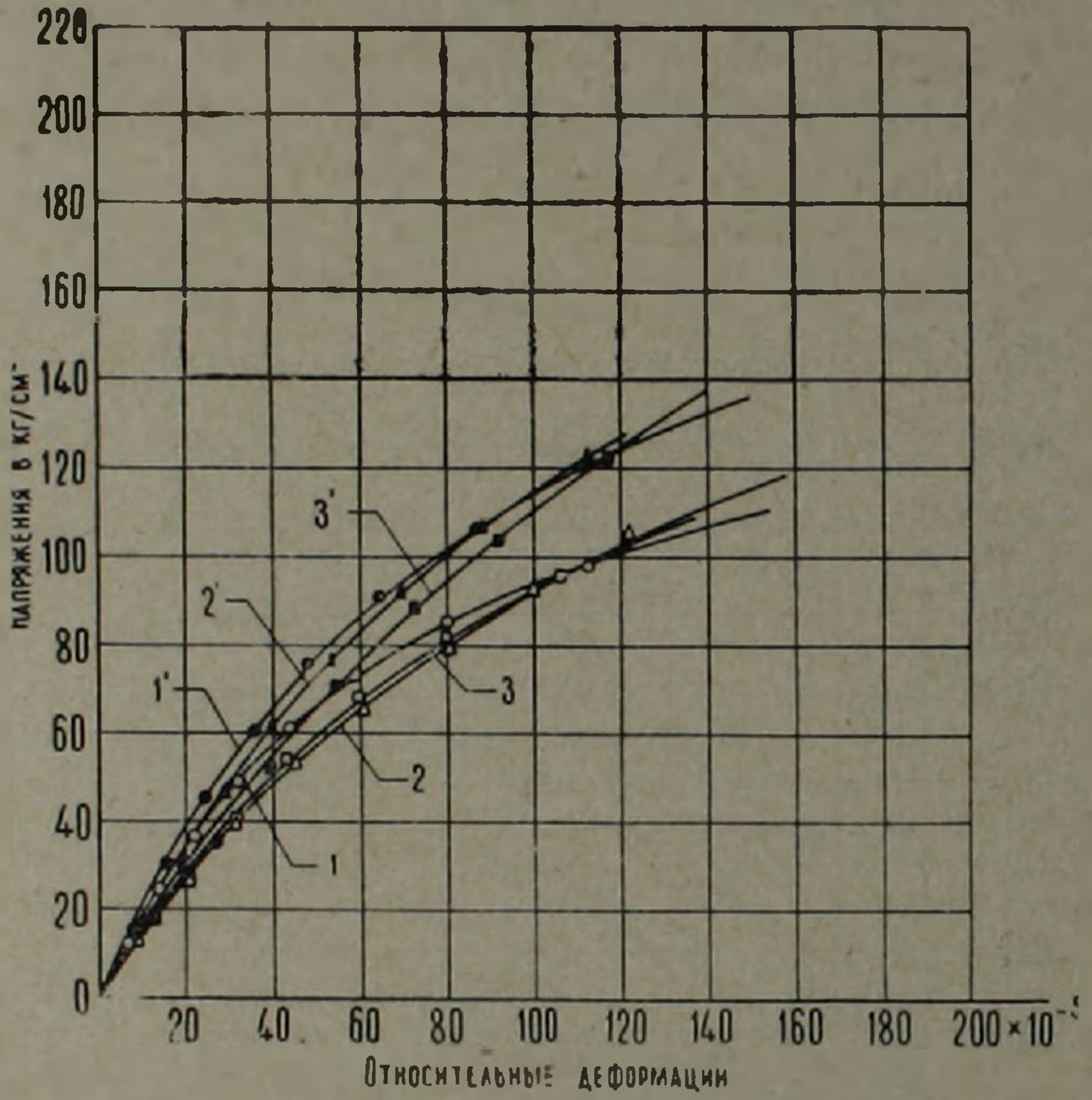

Рис. 3. Влияние водонасыщения и высыхания на деформации бетона. *1—3*—образцы испытанные перпендикулярно слоям бетонирования; *1'—3'*—образцы испытанные параллельно слоям бетонирования (*1* и *1'*—образцы 50 суток хранились в воде; *2* и *2'*—образцы 50 суток хранились в воде и 10 суток высыхали; *3* и *3'*—образцы 50 суток хранились в воде и 27 суток высыхали)

и 498 *кГ/см²*, а контрольных сухих призм 255 *кГ/см²*. По этим данным четко вырисовывается закономерность влияния водонасыщения на прочность бетона. Уже на четвертые сутки адсорбционное понижение прочности составило 30%, а затем наблюдается постепенное упрочнение бетона с нарастающей интенсивностью, которая продолжается до конца опытов. В результате 18 месячного водного хранения прочность бетона возросла в 2 раза, не считая то, что упрочнение полностью покрыло и адсорбционное понижение прочности. Весьма возможно, что адсорбционное понижение прочности было еще больше, и, чтобы убедиться в этом, надо было испытать образцы после более короткого времени водного хранения, т. е. меньше 4-х суток.

Согласно исследованиям ([11]), степень анизотропии бетона в большой мере зависит от расхода цемента, и с увеличением расхода цемен-

та влияние анизотропии на прочность и деформации бетона уменьшается. При небольших расходах цемента прочность призм, испытанных параллельно слоям бетонирования, больше, чем прочность призм, испытанных перпендикулярно слоям бетонирования, а при больших расходах цемента имеет место обратное явление.

В последних описанных опытах из-за высокого расхода цемента (434 *кг* на 1 $м^3$) прочность сухих призм, испытанных перпендикулярно слоям, на 19% превышала прочность призм, испытанных параллельно слоям. Однако, на 9-ые сутки водного хранения эта разница исчезла и далее до конца опытов бетон в отношении прочности оставался квазиизотропным. Поэтому наблюдаемый в этих опытах существенный рост прочности бетона в основном является следствием эффекта вторичного твердения. Роль эффекта водных прослоек в упрочнении бетона, из-за высокого расхода цемента, в данном случае была незначительной, он в основном проявился в первые 10 суток водного хранения.

Проведенные исследования, которые дали возможность обнаружить новое явление—эффект водных прослоек, вносят ясность в сложный механизм влияния водонасыщения и высыхания на физико-механические свойства бетона.

Институт механики
Академии наук Армянской ССР

Կ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

Բետոնի երկրորդ ամրացումը և անիզոտրոպ հատկությունների փոփոխությունը ջրահագեցման դեպքում

1953 թվականին հեղինակի կողմից դրվել են փորձեր և հայտնաբերվել են բետոնի ամրության և դեֆորմացիաների մոդուլի էական մեծացում ջրահագեցման դեպքում։ Քանի որ ստացված արդյունքները հակասում էին մինչև այդ հայտնի փորձերի արդյունքներին, որոնց մեջ ջրահագեցումը բերում էր բետոնի ամրության անկման, հեղինակը կատարել է դրված հարցի բազմակողմանի հետազոտություն, որոնց արդյունքները բերվում են ներկա աշխատանքում։

Գտնված է նոր երևույթ՝ ջրային շերտերի էֆեկտ, որը կարևոր դեր է կատարում բետոնի ֆիզիկա-մեխանիկական հատկությունների փոփոխման մեջ։ Այդ էֆեկտը գոյանում է այն պատճառով, որ չոր բետոնի լցիչների տակ եղած դատարկությունների ջրով լցվելը վերականգնում է ջրային շերտերը և դա բերում է բետոնի ամրապնդման և դեֆորմացիաների մոդուլի մեծացմանը։ Ջրային շերտերի էֆեկտը պրիզմաների շերտերին ուղղահայաց փորձարկումների դեպքում ավելի էական է, քան շերտերին զուգահեռ փորձարկումների ժամանակ և դրա համար էլ անիզոտրոպիան փոքրանում է։ Երկրորդ չորացման ժամանակ, երբ գոլորշացման պատճառով ջրային շերտերը վերանում են, տեղի ունի հակառակ երևույթը։

Կատարված հետազոտությունները հնարավորություն են տվել բացատրելու

բետոնի ջրահագնեցման ժամանակ տեղի ունեցող բարդ ֆիզիկա-մեխանիկա-
կան երևույթները։

Ջրի մեջ պահելու առաջին օրերին տեղի է ունենում բետոնի ամրության
սդսորբցիոն անկում և վերջնական ամրությունը կախված է այն բանից, թե
ինչքանով բետոնի ամրացումը ի հաշիվ երկրորդային ամրացման և ջրային
շերտերի էֆեկտի, կկոնպենսացվի ամրության ադսորբցիոն անկման կողմից։

Մանր բետոնի վրա դրված փորձերում նշված էֆեկտների հետևանքով
ջրի մեջ 18 ամիս պահված բետոնի ամրությունը կրկնապատկվել է, հաշ-
ված այն, որ լրիվ կոնպենսացված է եղել բետոնի ամրության ադսորբցիոն
իջեցումը 4 օր ջրի մեջ պահելուց հետո, որը կազմել է ստուգողական նմուշ-
ների ամրության 30%։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *А. З. Басевич*, Известия ВНИИГ, т. 41, 1949. [2] *К. А. Мальцов*, «Гидротехническое строительство», № 8, 1954. [3] *Н. А. Мощанский*, «Гидротехническое строительство» № 10, 1956. [4] *П. А. Ребиндер*, Физико-механические исследования процессов деформаций твердых тел. Юбилейный сборник АН СССР, 1947. [5] *Б. В. Дерягин*, «Природа», № 2, 1943. [6] *В. М. Худавердян*, «Известия АН Арм. ССР» (серия техн. наук) т. 10, № 2 (1957). [7] *К. С. Карапетян*, ДАН АрмССР, т. 24, № 4, 1957. [8] *К. С. Карапетян*, «Известия АН АрмССР», серия физ-мат. наук», т. 10, № 6 (1957). [9] *К. С. Карапетян*, «Известия АН АрмССР», серия физ-мат. наук, т. 17, № 4 (1964). [10] *К. С. Карапетян*, «Известия АН АрмССР», серия физ-мат. наук, т. 18, № 2 (1965). [11] *К. С. Карапетян* «Известия АН АрмССР», серия физ-мат. наук, т. 18, № 5 (1965).