

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А. А. АРАКЕЛЯН

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА, КАК КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

В течение последних десятилетий теорией прочности бетонов занимались многие ученые [1—7] и, насколько нам известно, ни один из них не рассматривал бетон как капиллярно-пористый материал с целью установления непосредственной зависимости между его физико-механическими свойствами (прочность, водонепроницаемость—фильтрация, морозостойкость, теплопроводность и т. д.) и структурой его пор. В настоящей статье делается попытка установить подобную зависимость для прочности бетонов.

Структуру пор капиллярно-пористого материала следует характеризовать количественными и качественными показателями, без которых нельзя выявить закономерности, существующие между структурой и физико-механическими показателями капиллярно-пористых материалов.

Количественный показатель структуры пор (суммарная пористость) материалов устанавливается достаточно точно по удельному и объемному весам. При постоянном удельном весе материала этот показатель (пористость) можно заменить обратной величиной его плотности (объемного веса).

Качественный показатель структуры пор, т. е. характер пористости материала, выражается коэффициентом скорости капиллярной всасываемости (K), методика определения которого приведена в работе [8].

Приведенные нами предварительные опыты показали, что прочность капиллярно-пористого материала (R) можно выразить достаточно точно через количественные и качественные показатели структуры его пор формулой:

$$R = A \frac{\gamma}{K}, \quad (1)$$

где R — предел прочности капиллярно-пористого материала при сжатии $кг/см^2$;

γ — объемный вес в $т/м^3$,

K — коэффициент скорости капиллярной всасываемости, в $см. мин^{-1/2}$, установленный по направлению испытания материала на сжатие, по методике, приведенной в работе [8];

A — опытный коэффициент, характеризующий породу, в частности сила сцепления между ее частицами.

Опыт показал, что формула (1) дает хорошие результаты в отношении туфовых, пемзовых [8] и других капиллярно-пористых камней. Известно, что бетоны и растворы являются сочетанием цементного камня и заполнителей. Растворы и бетоны, а также цементный камень в отдельности, представляют собой капиллярно-пористые материалы, поэтому к ним можно применить формулу (1).

Структура цементного камня такова, что подъем воды при одностороннем подсосе в атмосферной среде в зависимости от квадратного корня времени, как показал опыт [9], выражается прямой линией, между тем для растворов и бетонов указанная зависимость выражается криволинейно.

Это обстоятельство говорит о том, что имеется качественное отличие в структурах пор цементного камня и раствора, взятых в отдельности.

Такая разница в структурах цементного камня и раствора логична, так как в растворах, при наличии песка с большим количеством песчинок и суммарной их поверхности, капилляры цементного камня пересекаются песчинками во многих точках и вокруг песчинок создается много новых капиллярных ходов. В итоге все это резко меняет качество структуры цементного камня и раствора, сделав ее более извилистой. Между тем структура пор раствора, при переходе к бетону, путем добавления к нему крупного заполнителя—щебня, существенных качественных изменений не претерпевает по той причине, что количество щебенки и их суммарная поверхность настолько малы, что не могут внести качественные изменения в структуру раствора. Поэтому практически можно считать, что структуры раствора и бетона будут иметь почти одинаковый характер.

Из выражения (1) для расчета прочности цементного камня (R_k) после соответствующего преобразования [9], получена формула:

$$R_k = R_u \frac{\left(\frac{1}{\gamma_u} + K_{н.г.}\right) K_{н.г.}}{\left[\frac{1}{\gamma_u} + \left(\frac{B}{U}\right)_{yz}\right] \left(\frac{B}{U}\right)_{yz}} \quad (2)$$

где R_u — активность цемента, установленная в жестких цементно-песчаных растворах в кг/см²;

$K_{н.г.}$ — водоцементное отношение, соответствующее нормальной густоте цементного теста;

$\left(\frac{B}{U}\right)_{yz}$ — отношение количества воды, удерживаемой цементным тестом, к количеству цемента.

На основании опытов [9] $\left(\frac{B}{U}\right)_{yz}$ отношение можно определить формулой (3).

$$\left(\frac{B}{L}\right)_{уд} = K_{н.г.} + \alpha \frac{\frac{B}{L} - K_{н.г.}}{1 - K_{н.г.}}, \quad (3)$$

где α — коэффициент водоудержания; для чисто цементного теста можно взять — 0,47 [9], а для цементного теста в растворах или бетонах по опытам, проведенным по методике [9], — 0,58.

Однако формулы (2) и (3) для вычисления прочности цементного камня несколько сложны, так как в формулу (2) величина $\left(\frac{B}{L}\right)_{уд}$, определяемая формулой (3), входит во второй степени.

С целью упрощения формул (2) и (3) были вычислены прочности цементного камня при нижеследующих значениях параметров формул (2) и (3).

Коэффициент нормальной плотности цемента:

$$K_{н.г.} = 0,2; 0,25; 0,30 \text{ и } 0,35.$$

Удельные веса цемента: $\gamma_{ц} = 2,8$ и $3,1$. Коэффициент водоудержания цемента: $\alpha = 0,47$ и $0,58$, истинное водоцементное отношение: $\frac{B}{L} = 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1; 1,25$ и $1,67$.

Подсчеты показали, что прочность цементного камня (R_k) меняется очень мало при значениях удельных весов от $3,1$ до $2,8$. Между тем прочность цементного камня чувствительно меняется в зависимости от величины коэффициента нормальной густоты ($K_{н.г.}$) и коэффициента водоудержания (α) цемента.

На основании полученных данных построены графики зависимости $\frac{R_k}{R_n}$ от $\frac{L}{B}$ для каждого значения коэффициентов нормальной густоты ($K_{н.г.}$) и водоудержания (α) в отдельности.

На рис. 1а и 1б приводятся графики зависимости $\left(\frac{R_k}{R_n} \cdot \frac{L}{B}\right)$ только для двух крайних значений коэффициентов нормальной густоты цемента $0,2$ и $0,35$.

На основании графического выражения зависимости $\left(\frac{R_k}{R_n} \cdot \frac{L}{B}\right)$ прочность цементного камня можно выразить следующими линейными зависимостями:

Для чистого цементного камня — $\alpha = 0,47$

$$R_k = \frac{R_n}{\frac{1}{K_{н.г.}} - K_{н.г.}} \left(\frac{L}{B} - K_{н.г.} \right), \quad (4)$$

для цементного камня в растворе — $\alpha = 0,58$

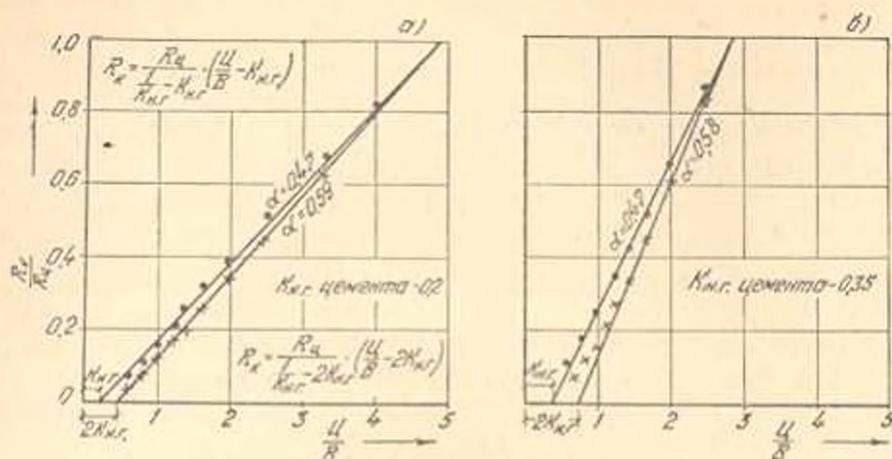


Рис. 1а и 1б—Зависимость прочности цементного камня (R_k) от истинного цементно-водного отношения $\frac{U}{B}$.

$$R_k = \frac{R_{k,г}}{K_{н.г.}} \left(\frac{U}{B} - 2K_{н.г.} \right), \quad (5)$$

где $\frac{U}{B}$ — цементно-водное отношение, причем в растворах и бетонах учитывается вода, идущая на смачивание заполнителей.

Точность полученных формул (4) и (5) для вычисления прочности цементного камня, как видно из рис. 1а и 2а, вполне достаточна в пределах практически применяемых значений $\frac{U}{B}$.

Для применения формулы (1) к растворам необходимо было установить значения их коэффициентов скорости капиллярной всасываемости (K_p). Результаты наших опытов по установлению зависимости (R_k , K_p) для растворов месячного возраста с применением кварцевого и легких песков приведены на рис. 2а и 2б.

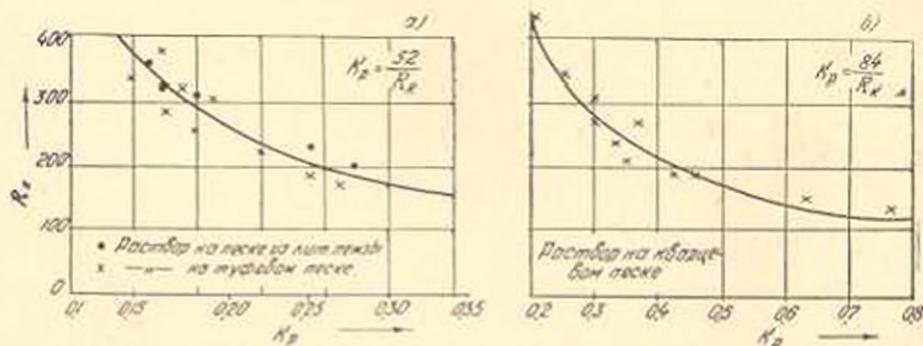


Рис. 2а и 2б — Зависимость коэффициента скорости капиллярной всасываемости раствора (K_p) от прочности цементного камня (R_k).

Из рис. 2а и 2б наглядно видно, что значение коэффициента скорости капиллярной всасываемости (K_p) для растворов можно выразить формулой

$$K_p = \frac{a}{R_k}, \quad (6)$$

где a — опытный коэффициент зависящий от характера песка: для раствора на кварцевом песке $a=48$; для раствора на туфовом и литоидно-пемзовом песках $a=52$.

Подставляя значение K_p в формулу (1), получим формулу прочности раствора

$$R_p = A_0 \gamma_p R_k, \quad (7)$$

где A_0 — опытный коэффициент, зависящий от вида песка;

γ_p — объемный вес раствора;

R_k — прочность цементного камня, определяемая формулой (5).

Для применения же формулы (1) к бетонам необходимо установить значения коэффициента скорости капиллярной всасываемости бетона (K_6).

Выше было отмечено, что в качестве структуры бетона и раствора нет существенной разницы, поэтому можем написать следующее выражение для коэффициента скорости капиллярной всасываемости бетона K_6 :

$$F_6 K_6 = F_p K_p + F_3 K_3; \quad (8)$$

$$F_6 = F_p + F_3 = 1,$$

где K_6 , K_p , K_3 — коэффициенты скорости капиллярной всасываемости бетона, раствора и заполнителя, отнесенные к единице площади;

F_p , F_3 — величина площадей раствора и заполнителя в бетоне в долях единицы.

Из формулы (1) K_p и K_3 будут иметь значения:

$$K_p = \frac{A_p \gamma_p}{R_p};$$

$$K_3 = \frac{A_3 \gamma_3}{R_3};$$

В силу (8) получим:

$$K_6 = F_p \frac{A_p \gamma_p}{R_p} + F_3 \frac{A_3 \gamma_3}{R_3}. \quad (9)$$

или при $K_p = \frac{a}{R_k}$ из формулы (6) получим:

$$K_6 = F_p \frac{a}{R_k} + F_3 \frac{\gamma_3 A_3}{R_3}. \quad (10)$$

Подставляя значения (9) и (10) в формулу (1), после преобразований получим:

$$R_6 = \frac{A_0 \frac{\gamma_6}{F_p} R_x}{B_0 + \gamma_3 \frac{F_3}{F_p} \frac{R_x}{R_3}} \quad (11)$$

или

$$R_6 = \frac{A_0 \frac{\gamma_6}{\gamma_p F_p} R_p}{B'_0 + \frac{\gamma_3}{\gamma_p} \frac{F_3}{F_p} \frac{R_x}{R_3}} \quad (12)$$

где γ_6 , γ_p и γ_3 — объемные веса бетона, раствора и заполнителя в $т/м^3$;

R_3 — прочность применяемого в бетоне заполнителя в $кг/см^2$;

R_x — прочность цементного камня в бетоне по формуле (5) в $кг/см^2$;

R_p — прочность раствора в бетоне по формуле (7) в $кг/см^2$;

F_3 , F_p — площадь заполнителя и раствора в бетоне в долях единицы;

A_0 , B_0 , B'_0 — опытные коэффициенты, зависящие от возраста и вида бетона.

Как нетрудно заметить, формулы (11) и (12) получаются в зависимости от 8—9 переменных параметров бетона (γ_6 , γ_p , F_p , F_3 , γ_3 , $K_{н.г.}$, $\frac{II}{B}$, R_x , R_3).

Опытная проверка формул (11) и (12) в отношении легких бетонов на туфах Ереванского [10] и Арктического месторождения, на анигской и литондской пемзах [11], керамзите [12] и т. д. показала хорошие результаты. На рис. 3 приведена зависимость прочности туфобетона месячного возраста [10] от прочности цементного камня по формуле (11).

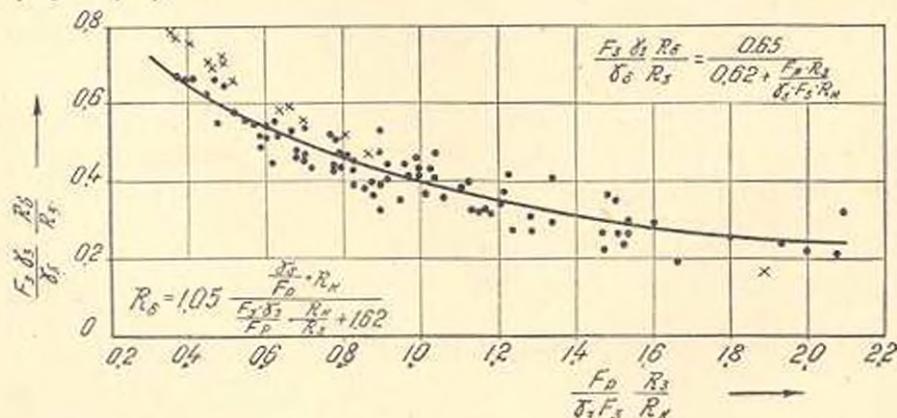


Рис. 3.—Зависимость прочности туфобетона (R_6) от прочности цементного камня (R_x) и других параметров бетона.

Предварительные значения коэффициентов A_0 , B_0 , и B'_0 в зависимости от вида бетона месячного возраста приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Значение опытных коэффициентов A_0 , B_0 , и B'_0 для бетонов месячного возраста [формулы (11) и (12)]

Заполнитель	Для формулы (11)		Для формулы (12)	
	A_0	B_0	A_0	B_0
Тuff Ереванского месторождения	1,05	1,62	1,05	1,10
Лазовская пемза	0,86	1,0	0,86	0,56
Артыкский туф	1,10	—	1,10	2,22
Авийская пемза	0,97	—	0,97	1,43
Керамзитовый щебень и кварцевый песок	1,15	3,0	1,15	1,43

Опытные коэффициенты формул (11) и (12)—переменные величины, зависящие от возраста бетона и свойств заполнителей. Эти вопросы подлежат дополнительному изучению.

Среднеквадратичные и среднеарифметические отклонения опытных данных от расчетных, вычисленных по формулам (11) и (12) для бетонов месячного возраста, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Отклонения фактических прочностей легких бетонов месячного возраста от расчетных по формулам (11) и (12)

Формула	Вид бетона	Отклонение в %	
		среднеквадратичное	среднеарифметическое
11	Тuffобетон [10]	$\pm 8,5$	+ 8,0; —7,5
	Керамзитобетон на кварцевом песке [12]	$\pm 11,5$	+11,0; —8,0
12	Тuffобетон [10]	$\pm 12,0$	+12,0; —9,0
	Керамзитобетон на кварцевом песке [12]	$\pm 9,0$	+ 7,5; —8,0

Для плотных заполнителей (базальт, гранит и т. д.) коэффициент скорости капиллярной всасываемости будет равен нулю ($K_3=0$), поэтому из формулы (8) будем иметь

$$K_k = F_p K_p.$$

а из формулы (11) и (12) получим общие расчетные формулы прочности обычного бетона

$$R_0 = A_1 \frac{F_p}{F_p} R_k \quad (13)$$

или

$$R_b = A_s \frac{\gamma_0}{\gamma_p F_p} R_p. \quad (14)$$

Формулы (13) и (14) получаются в зависимости от переменных параметров бетона (γ_0 , F_p , $\frac{U}{B}$, $K_{и.г}$, $R_{и.г}$, γ_p).

Предварительная проверка этих формул показала также хорошие результаты.

Из полученных формул (13) и (14) для расчета прочности обычного бетона вытекает, что насыщение бетонной смеси прочным крупным заполнителем приводит к повышению предела прочности при сжатии. Это вполне логично. При малом количестве раствора (F_p) толщина прослойки более слабого компонента (раствора) между крупными заполнителями уменьшается и тем самым увеличивается сопротивляемость прослойки, и усилия при сжатии передаются через скелет из прочных заполнителей, что ведет к повышению прочности бетона.

При этом повышение прочности хорошо уплотненного вибрированием бетона может дойти до 35%, а в отдельных случаях до 80% [13].

Полагаем, что учет количества раствора в бетоне по формулам (13) и (14) является одним из важных факторов, который может внести существенные поправки в расчет прочности бетона. Представляется, что при учете параметра F_p расхождение результатов прочности бетонов, рассчитанных по формулам Гипроцемента и НИИ цемента, отмеченные А. Е. Десовым [14], заметно уменьшится.

Армянский НИИ строительных материалов и сооружений

Поступило 10.VII 1959

Հ. Ա. ԱՐԱԿԵԼՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ՝ ՈՐՊԵՍ ԿԱՊԻԼՅԱՐ-ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՆՅՈՒԹԻ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա մ փ ո փ ո ս ս

Բետոնի ամրութիւն տեսութիւնով շատերն են դրողովել, բայց բետոնը մինչև այժմ չի դիտվել որպէս կապիլլար-ծակոտկեն նյութ, նրա հատկութիւնները և ծակոտիւնների սարուկոտրայի միջև կապ հաշտանարերն չուպատկուի:

Հողածուժ բերված են Հայկական ՍՍԻ Շինանյութերի և կառուցվածքների ինստիտուտում կատարված գիտահետազոտական աշխատանքների արդյունքները բետոնի, որպէս կապիլլար-ծակոտկեն նյութի ամրութիւն և նրա ծակոտիւնների սարուկոտրայի միջև եղած կապի վերաբերյալ:

Հետազոտութիւնները ցույց են տալիս, որ դեմենտարը, շաղախը և բետոնը գիտելով որպէս կապիլլար-ծակոտկեն նյութ, նրանց ամրութիւն նը-

կամ մար կարելի է կիրառել (1) բանաձևը և ստանալ ամրությունը հաշվարկող համաստատարան բանաձևեր: Ստացված են ամրություն հաշվման համար հետևյալ բանաձևերը, ցեմենտաքարի համար՝ (4) և (5), շագախի համար՝ (6), բետոնի համար՝ (10) և (11)։

Ստացված (10) (11) բանաձևերը ընդհանուր են բոլոր տեսակի բետոնների ամրությունները հաշվելու համար: Եթե այդ բանաձևերի մեջ գրանդուրի, բազալտի և այլ տեսակի խիտ խճերի համար կապիլյար ձեռնարկման արագության գործակիցը ընդունենք հավասար զերոյի ($K_3=0$), ապա կստանանք (13) և (14) բանաձևերը, սովորական բետոնի ամրությունը հաշվելու համար:

Փորձերը ցույց են տալիս, որ բետոնների ամրությունը հաշվելու համար բանաձևերի նշտությունը միանդամայն բաղադրար է ստացվում: Փորձնական և բանաձևերի միջոցով հաշված տվյալների միջին-քառակուսային տատանումները ստացվում են՝ $\delta=12\%$ ։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ахвердов И. Н., Годзиев Н. С., Овадовский И. М. Легкий бетон. М., 1955.
2. Вагаков А. М. Керамзитобетон. Л., 1954.
3. Скрамтаев Б. Г. Исследование прочности и пластичности бетонной смеси. Диссертация. М., 1936.
4. Симонов М. З. Вопросы расчета прочности бетона. „Известия АН Армянской ССР“, сер. ФМЕТ, VI, № 5—6, 1953.
5. Свечин И. В. К вопросу о наименьшей прочности заполнителей бетона. Сб. „Исследование по технологии бетона“, ЦНИПС, М., 1950.
6. Фридман Я. Б. Единая теория прочности материалов. Оборонгиз, 1934.
7. Штаерман Ю. Я. Критические замечания к обобщенной теории прочности бетона. Тбилиси, 1934.
8. Аракелян А. А. О зависимости прочности пористого камня от структуры его пор. „Известия АН Армянской ССР“, сер. технических наук, т. XI, № 1, 1958.
9. Аракелян А. А. О прочности цементного камня. „Известия АН Армянской ССР“, сер. технических наук, т. XII, № 3, 1959.
10. Худавердян В. М. Метод проектирования составов туфобетона. Ереван, 1950.
11. Аракелян А. А. Основные свойства гидротехнического бетона на литондой пемзе. Сб. „Гидротехнический бетон на литондой пемзе“, Ереван, 1959.
12. Корнилович Ю. Е., Вержбицкая М. Г. Керамзитобетон—прогрессивный строительный материал. Киев, 1955.
13. Десов А. Е. Вибрированный бетон. М., 1956.
14. Десов А. Е. Структурная вязкость цементного раствора и бетонной смеси. „Тр. совещания по теории технологии бетонов“, Ереван, 1956.