

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

З. А. Ацагорцян

Корреляционная связь прочности пористого материала со степенью и характером его пористости

(Представлено А. Г. Назаровым 16 IV 1953)

Известна связь между прочностью данной породы каменного материала и степенью его пористости. На основе обработки экспериментальных данных предложены эмпирические формулы и графики зависимости прочности некоторых распространенных пористых пород камня от их объемного веса или от их плотности, т. е. обратной величины пористости ($1-\mu$).

Однако результаты испытания реальных каменных пород показывают большую дисперсию по отношению к указанной зависимости. Это обстоятельство, очевидно, в значительной мере объясняется неоднородностью пористой структуры каменных пород.

Действительно, плотные нетрещиноватые породы обычно дают лучшую сходимость результатов испытания проб и образцов камня, чем пористые породы, даже при одной и той же степени их пористости. Следовательно, причиной разброса результатов испытания прочности пористого камня при данной степени пористости является, главным образом, неодинаковость пористой структуры или характера пористости камня. Под понятием характера пористости следует понимать весьма сложную геометрическую характеристику пор: размеры, конфигурацию, взаимное расположение, связанность пор и др.

Конечно, могут быть каменные породы с более или менее однородным характером пористости, и тогда их прочность будет зависеть в основном только от степени пористости. Но в большинстве случаев в пористых каменных породах наблюдается неоднородность пористости не только по суммарному объему пор в единице объема, но и по характеру пористости.

Влияние первого—количественного фактора—пористости обычно сильнее. Но и второй фактор—„качество“ пор, если так можно назвать, иногда играет весьма существенную роль. С таким случаем мы встретились, в частности, при изучении литоидной пемзы, нашедшей за последнее время большое применение в качестве заполнителя бетона в крупном гидротехническом строительстве в Армянской ССР.

Первые испытания литоидной пемзы в Институте строительных материалов и сооружений Академии наук Армянской ССР показали значительный разброс результатов (предел прочности при сжатии от 47 до 318 кг/см²) и отсутствие какой-либо закономерной связи между прочностью и объемным весом материала. Правда, при более тщательном изучении вопроса выяснилось существенное значение для литоидной пемзы направления раздавливающей силы, так как она обладает явно струистой (флюидальной) структурой. Но и в пределах результатов испытаний литоидной пемзы в одном и том же направлении по отношению к струистости (параллельно или перпендикулярно) наблюдается отсутствие четкой закономерной связи между прочностью и объемным весом.

Для исследования причин нарушений зависимости прочности каменного материала от его объемного веса или пористости нами были проведены особенно тщательные испытания 24 образцов литоидной пемзы (исполнитель Ф. Г. Арутюнян).

При этом, с целью выяснения различия в характере пористости, для каждого образца (кубика разм. около 10×10×10 см) было определено водопоглощение как в нормальных условиях, так и при кипячении в воде. Для точного установления величины пористости образцов по их объемному весу был определен удельный вес материала (в порошке) каждого образца в отдельности.

Испытания на сжатие были проведены в двух направлениях—перпендикулярно и параллельно направлению струистости—и в двух состояниях—в сухом и в водонасыщенном.

Результаты испытания указанных 24 образцов приведены в таблице 1.

Рассмотрение данных таблицы 1 показывает резкую разницу в прочности литоидной пемзы параллельно и перпендикулярно струистости. По этим данным, предел прочности на сжатие в параллельном направлении составляет в среднем $\bar{R}_{сж} = 247 \text{ кг/см}^2$ и в перпендикулярном направлении $\bar{R}'_{сж} = 135 \text{ кг/см}^2$.

Не является ли случайным такое расхождение средних величин прочности при испытании во взаимно-перпендикулярных направлениях?

Чтобы ответить на этот вопрос, пользуясь методами математической статистики (5), необходимо оценить величину

$$t = \frac{\bar{R}_{сж} - \bar{R}'_{сж}}{s_{\bar{R}}},$$

где

$$s_{\bar{R}} = s \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}},$$

при

$$s = \sqrt{\frac{\sum (R_{сж} - \bar{R}_{сж})^2 + \sum (R'_{сж} - \bar{R}'_{сж})^2}{n_1 + n_2 - 2}}.$$

Таблица 1

№№ п. п.	Объемный вес γ_0	Удельный вес γ_u	Пористость p проц.	Водопогл. по весу в проц.		Предел прочности при сжатии в $кг/см^2$			
				в нормальных условиях w_1	при кипячении w_2	Паралл. направл. струистости		Перпендик. направл. струистости	
						в сухом сост.	в водонасыщ. сост.	в сухом сост.	в водонасыщ. сост.
1	1,098	2,270	51,6	27,6	46,3	145	—	—	—
2	1,241	2,291	45,8	18,5	34,0	181	—	—	—
3	1,297	2,274	42,9	20,0	32,6	232	—	—	—
4	1,362	2,289	40,5	16,5	28,0	308	—	—	—
5	1,385	2,273	39,1	13,2	23,5	225*	—	—	—
6	1,465	2,307	36,5	15,1	20,6	344	—	—	—
7	1,164	2,300	49,3	24,6	38,8	—	164	—	—
8	1,237	2,273	45,6	11,2	16,5	—	292	—	—
9	1,270	2,265	43,9	12,9	19,8	—	274	—	—
10	1,433	2,311	38,0	15,1	24,0	—	216	—	—
11	1,498	2,300	34,9	13,1	21,2	—	290	—	—
12	1,530	2,316	34,0	12,1	18,7	—	297	—	—
13	0,962	2,254	57,3	18,2	37,0	—	—	77	—
14	1,183	2,275	48,0	17,6	33,2	—	—	98	—
15	1,283	2,261	43,3	16,8	32,8	—	—	115	—
16	1,345	2,270	40,7	15,1	26,3	—	—	155	—
17	1,373	2,266	39,4	12,6	22,4	—	—	151	—
18	1,508	2,304	34,6	9,4	17,2	—	—	214	—
19	1,073	2,250	52,2	15,8	27,9	—	—	—	96
20	1,129	2,252	49,5	26,8	42,4	—	—	—	51
21	1,343	2,269	40,8	15,7	28,9	—	—	—	111
22	1,357	2,287	40,6	13,6	23,7	—	—	—	150
23	1,493	2,283	34,6	12,2	20,0	—	—	—	202
24	1,566	2,294	31,7	9,6	13,2	—	—	—	205

В этих выражениях n_1, n_2 — число единичных результатов испытаний в сравниваемых рядах, $R_{сж}, R'_{сж}$ — соответственные единичные результаты испытаний, а $\bar{R}_{сж}$ и $\bar{R}'_{сж}$ — их средние арифметические значения.

Произведя вычисления для нашего случая, получаем $t = 4,8$. По таблице вероятностей при такой величине t вероятность случайных значений $|t| \geq 4,8$ весьма мала, следовательно, расхождения между $R_{сж}$ и $R'_{сж}$ не случайны. При этом мы принимаем, что прочность каменного материала следует нормальному закону распределения.

Сравнивая результаты испытаний литоидной пемзы в сухом состоянии и в насыщенном водой, мы обнаруживаем, что средний предел прочности испытанных нами образцов в сухом состоянии составляет $187 кг/см^2$, а в водонасыщенном — $196 кг/см^2$. Анализируя эти средние величины по указанной выше методике, мы нахо-

* Образец имел до испытания тонкую трещину.

дим $t=0,22$. По таблице вероятностей этому соответствует вероятность $\Phi(x)=0,174$, следовательно, разница между средними величинами прочности литоидной пемзы в сухом и водонасыщенном состояниях не существенна.

Теперь перейдем к вопросу о корреляции между прочностью материала, с одной стороны, и степенью и характером его пористости, с другой.

Степень пористости материала (p) определяется процентным отношением суммарного объема пор к общему объему материала и вычисляется достаточно точно по формуле:

$$p = \left(1 - \frac{\gamma_0}{\gamma_y}\right) 100,$$

где γ_0 — объемный вес материала,

γ_y — удельный вес.

Характер пористости трудно поддается точному и однозначному определению. В качестве показателя характера пористости могут быть приняты различные физические константы, связанные с пористой структурой материала. Для нашей цели мы считаем достаточным для первого приближения принять такой простой показатель, как водопоглощение материала, который при данной степени пористости характеризует степень сравнительной замкнутости пор. Действительно, если при одной и той же степени пористости камня в одном случае водопоглощение камня окажется больше, чем в другом, то это будет означать, что в первом случае поры более доступны воде, т. е. менее замкнуты, чем во втором случае. Можно полагать, что это обстоятельство, т. е. меньшая замкнутость пор, явится менее благоприятным для прочности камня и, наоборот, большая замкнутость пор повлечет за собой большую прочность камня при одной и той же степени пористости.

Беглый просмотр таблицы 1 подкрепляет это предположение. Так, например, образцы 9 и 10 обладают меньшей пористостью, чем образец 8, но у них прочность не только не выше прочности образца 8, но наоборот — ниже. Эта аномалия легко объясняется, если взглянуть на показатели водопоглощения (как в нормальных условиях, так и при кипячении). Для указанных обоих образцов водопоглощение выше предыдущего. Точно такая же картина наблюдается, если сравнить результаты испытания образцов 19 и 20. Но может быть эти результаты являются случайными? Для того, чтобы убедиться в правильности высказанной мысли о влиянии характера пористости камня на его прочность при одной и той же степени пористости и в правильности выбора водопоглощения в качестве показателя характера пористости, влияющего на прочность, необходимо проанализировать всю совокупность полученных результатов испытаний, пользуясь методами математической статистики.

По теории множественной корреляции, мерой силы линейной связи между тремя величинами x , y , z , где z зависит от x и y , является сводный коэффициент корреляции

$$R = \sqrt{\frac{r_{xz}^2 - 2r_{xy}r_{xz}r_{yz} + r_{yz}^2}{1 - r_{xy}^2}}$$

Здесь r_{xy} , r_{xz} и r_{yz} — коэффициенты корреляции между соответствующими двумя величинами, вычисляемые по формулам

$$r_{xy} = \frac{c_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}; \quad r_{xz} = \frac{c_{xz}}{\sigma_x \sigma_z}; \quad r_{yz} = \frac{c_{yz}}{\sigma_y \sigma_z}.$$

В этих формулах в числителе стоит так называемый коэффициент ковариации, представляющий собой частное от деления на общее число наблюдений суммы произведений отклонений значений двух взаимосвязанных величин от их средних; в знаменателе фигурирует произведение стандартов двух величин, определяемых как квадратный корень из разности суммы квадратов значений данной величины, деленное на число наблюдений и квадрата среднего значения той же величины, т. е., например,

$$c_{xy} = \frac{\sum xy}{n} - \bar{x}\bar{y} \text{ и т. д.},$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - \bar{x}^2} \text{ и т. д.}$$

Для выделения влияния отдельных факторов на исследуемую величину при множественной корреляции пользуются частными коэффициентами корреляции: $r_{xz(y)}$ — служащим мерой связи между x и z при постоянном значении y , и $r_{yz(x)}$ — служащим мерой связи между y и z при постоянном значении x .

В исследуемом нами вопросе мы должны установить меру связи между тремя величинами: пределом прочности литоидной пемзы при сжатии ($R_{сж}$), пористостью литоидной пемзы (p) и водопоглощением. При этом мы имеем возможность изучить два вида водопоглощения в нормальных условиях — w_1 и при кипячении — w_2 .

Принимая $R_{сж}$ за z , p — за x и w_1 или w_2 — за y , исследуем их корреляционную связь, пользуясь формулами множественной корреляции⁽⁵⁾. Поскольку прочность литоидной пемзы параллельно струистости резко отличается от ее прочности перпендикулярно струистости, то соответствующие результаты мы рассматриваем отдельно, разбивая данные таблицы 1 на две группы, объединяя при этом в каждой группе результаты испытания пемзы в сухом и водонасыщенном состояниях, так как разница их не существенна. Ввиду дефективности образца № 5, что сказалось на результате испытания, исключаем его из рассмотрения.



Опуская процесс вычислений, приведем сводную таблицу полученных коэффициентов корреляций (см. табл. 2).

Таблица 2

Группа результатов испытаний	Направление струистости литоидной пемзы при испытании	Коэффициенты корреляции					Доверительная вероятность R
		r_{xy}	r_{xz}	r_{yz}	$r_{xz(y)}$	$r_{yz(x)}$	

Коррелирование пористости (x), водопоглощения в нормальных условиях (y) и предела прочности при сжатии (z)

I	параллельно	0,732	-0,755	-0,816	-0,402	-0,591	0,848	> 0,99
II	перпендикул.	0,730	-0,912	-0,906	-0,867	-0,856	0,978	> 0,99

Коррелирование пористости (x), водопоглощения кипячением (y) и предела прочности при сжатии (z)

I	параллельно	0,707	-0,726	-0,850	-0,335	-0,693	0,868	> 0,99
II	перпендикул.	0,843	-0,912	-0,954	-0,670	-0,844	0,973	> 0,99

Рассмотрение данных таблицы 2 позволяет делать следующие выводы:

1. Значения сводного коэффициента корреляции (R) достаточно близки к единице, что указывает на реальность довольно тесной прямолинейной корреляционной связи между прочностью литоидной пемзы, пористостью и водопоглощением или, иначе говоря, корреляционной связи прочности со степенью и характером пористости.

2. Сравнение значений коэффициентов корреляции r_{xz} и r_{yz} с R показывает, что корреляционная связь прочности литоидной пемзы с пористостью или с водопоглощением в отдельности менее тесна, чем совместная связь трех величин.

3. Полученные значения частных коэффициентов корреляции свидетельствуют, что при постоянной пористости литоидной пемзы возможно изменение ее прочности в зависимости от водопоглощения и, наоборот, при постоянном водопоглощении возможно изменение прочности в зависимости от пористости. Следовательно, на прочность оказывают влияние, с одной стороны, суммарный объем пор, с другой — характер пор, проявляемый различной степенью водопоглощения.

В дальнейшем, накапливая большое количество экспериментальных данных и обрабатывая их методами математической статистики, можно дать формулу зависимости прочности литоидной пемзы от ее пористости и водопоглощения. Эта зависимость, возможно, при большем приближении окажется криволинейной.

Выводы настоящей статьи могут быть распространены и на другие пористые каменные материалы, если будут подтверждены экспериментальными данными.

В перспективе предстоит более детальное изучение характера пористости и его влияния на свойства каменного материала.

Институт строительных материалов и сооружений
Академии наук Армянской ССР

Չ. Ա. ՀԱՅԱԳՈՐԾՅԱՆ

Ծակոտկեն նյութի ամրության կորրելացիոն կապը նրա ծակոտկենության աստիճանի և բնույթի հետ

Հիտոլոգային պեմզայի ուսումնասիրության հիման վրա ցույց է տրված, որ ծակոտկեն նյութի ամրության վրա ազդում է ոչ միայն նյութի ծակոտկենության աստիճանը, այլև այդ ծակոտկենության բնույթը, որն արտահայտվում է նրա ջրակլանման տարբեր ունակությամբ: Էքսպերիմենտալ տվյալների մշակումը մաթեմատիկական վիճակագրության մեթոդներով ապացուցում է, որ ծակոտկեն նյութի, տվյալ դեպքում իտոլոգային պեմզայի, ամրության և նրա ծակոտկենության ու ջրակլանման միջև գոյություն ունի բազմականաչափ մոտիկ կորրելացիոն կապ:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ А. К. Бируля, Строит. материалы, № 8, 1934. ² М. Н. Ельчанинов, „Строит. промышл.“, № 11, 1940. ³ Справочник по строительным материалам Армянской ССР (Институт стройматериалов и сооружений АН Арм. ССР), Ереван, 1948; ⁴ М. Duriez, Traité de matériaux de construction, Paris, 1950. ⁵ В. И. Романовский, Применение математической статистики в опытном деле, М.—Л., 1947.