

летах среза $a/d = 1.0; 1.85; 2.0; 2.5$. Сопоставление опытных и расчетных предельных поперечных сил показано на рис. 10.

На наш взгляд показательным является рис. 11, на котором представлено изменение главных растягивающих (ϵ_1) и главных сжимающих (ϵ_2) деформаций, установленных экспериментальным путем и рассчитанных в соответствии с методом заменяющей балки по формулам (39)..(44). Как видно, до нагрузки $2V_{Sd} = 176.8$ кН наблюдается достаточно хорошее совпадение опытных и расчетных значений главных деформаций. Этой нагрузке соответствует наступление предельного состояния опытной балки, хотя по расчету разрушение должно происходить при нагрузке $2V_{Sd} = 226$ кН. Это несоответствие связано с тем, что для рассматриваемой балки без поперечного армирования стыка при нагрузке, большей $2V_{Sd} = 176.8$ кН, в плоскости контакта имеет место растяжение ($\sigma_y = 3.02$ Н/мм²), что приводит к появлению горизонтальной трещины. В этом случае при наличии растягивающих напряжений σ_y следует в формуле (35) принять $\mu = 0$, что ведет к резкому снижению сопротивления сжатой составной полосы. Таким образом, отсутствие поперечной арматуры в стыке, либо ее постановка с шагом, отличающимся от шага поперечной арматуры в сборном элементе, приводит к неравновесным растягивающим напряжениям, действующим перпендикулярно к плоскости контакта, и появлению горизонтальной трещины, что и наблюдали в опытах. Учет этого явления в алгоритме расчета позволил существенно уточнить величину предельной перерезывающей силы.

ВЫВОДЫ

1. Применение деформационных методов, базирующихся на положениях модифицированной теории полей сжатия [1, 2], позволяет производить расчет приопорной зоны сборно-монолитной конструкции, отказавшись от целого ряда условностей, присущих методу сечений [9].
2. Для инженерных расчетов может быть использован метод заменяющей балки, основанный на идеализации составной конструкции путем описания прочности при сжатии диагональной полосы через предельные напряжения, воспринимаемые составной призмой. Предложенный метод имеет удовлетворительную для практики точность ($\lambda = 1.36$, $V_x = 16.1$ %) и может быть применен для расчета сборно-монолитных конструкций для случаев, когда стыковое соединение располагается в пределах эффективной высоты зоны среза.

УДК 624.012.45

Павлова И.П.

О ВЛИЯНИИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

Прочность бетона является одним из наиболее важных его свойств. Взаимосвязь между структурой бетона и его прочностью уже довольно длительный период представляет интерес для исследователей. Однако до сих пор не существует единой универсальной теории, описывающей эту взаимосвязь, кроме теории, рассматривающей зависимость прочности бетона от водоцементного отношения. Abrams [1] был одним из первых,

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур В.В. Кондратчик А.А. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил.– Изд. БГТУ, Брест, 2000 – 400 с.
2. Coolins M.P., Mitchell D., Adebear P., Vecchio F.J. General Shear Design Method/ ACI Structural Journal, v. 93, N 1, January–February, 1996 – p.p. 36–45.
3. Eyre J.R., Campos E.S. Upper bounds in the slant shear testing of perfectly plastic joints in concrete/ Magazine of Concrete Research, 1996, 48, N 176, Sept.– p.p. 181–188.
4. Jensen B.C. Lines of discontinuity for displacement in the theory of plasticity of plain and reinforced concrete/ Mag. Concr. Res., 1975, 27, N 92, Sept.– p.p. 143–150.
5. Nelsen M.P. Limit analysis and concrete plasticity.– Prent. Hall., Englewood Cliffs., NJ., 1984.
6. Robins P.J., Austin S.A. A united failure envelope from the evaluation of concrete repair bond test/ Mag. Concr. Res., 1995, 47, N 170, March.– p.p. 57–68.
7. Кондратчик А.А., Кондратчик Н.И., Круль М., Грабяс М. Прочность наклонных сечений самонапряженных сборно-монолитных балок/ Mat. Междунар. Конф. «Напрягающий цемент, бетон и самонапряженные конструкции», 19–20 декабря, Брест, 2000.– в печати).
8. Пособие по проектированию сборно-монолитных конструкций (к СНиП 2.03.01–84*).– М.: Стройиздат, 1986.– 53 с.
9. СНиП 2.03.01–84*. Конструкции бетонные и железобетонные. Нормы проектирования.
10. ACI 319–85. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, Farmington Hills, Mich., 369 p.
11. DIN 1045–1. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1.
12. CSA A.23.3–94. Design of Concrete Structures.
13. NS 3473. Norwegian Council for Building Standardization.
14. Eurocode N 2. Design of Concrete Structures.
15. Тур В.В., Кондратчик А.А., Кондратчик Н.И. Применение метода ферменной аналогии при расчете на срез сборно-монолитных изгибаемых элементов/ Сб. трудов «Эффективные архитектурно-строительные системы зданий и сооружений», Мн., 1998.– с. 28–31.
16. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластины.– К.: Будівельник, 1987.– 273 с.
17. Ржаницын А.Р., Захаров В.М. Расчет составных стержней из неупругого материала с неупругими связями сдвига// Строительная механика и расчет сооружений.– 1984.– № 1.– с. 17–19.
18. Шалобыта Т.П. Прочность и деформативность контактов самонапряженных сборно-монолитных железобетонных конструкций.– Дисс. ... канд. техн. наук. 05.23.01– Минск, 2000 – 160 с.

кто определил водоцементное отношение как ключевую характеристику, от которой зависит прочность бетона, в то время, как двумя десятилетиями ранее Feret [2] описывал прочность в зависимости от объемной концентрации цемента γ в растворе:

Павлова Инесса Павловна. Инженер, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета. Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267

$$\gamma = \frac{Ц}{Ц + В + Воз} \quad (1)$$

где: Ц, В, Воз – объемы цемента, воды и вовлеченного воздуха соответственно.

Feret считал, что прочность f_c пропорциональна γ^2 , в то время как $f_{c,t}$ пропорциональна γ . Необходимо заметить, что если пренебречь объемом вовлеченного воздуха, то возникает прямая связь между γ и В/Ц в виде:

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{В + Воз}{Ц}} = \frac{1}{1 + \rho_c \frac{В}{Ц}} \quad (2)$$

Каким бы не являлся выбранный параметр, в основе методов лежали схожие представления о том, что прочность бетона в первую очередь зависит от природы цементного камня, а вид и объемная концентрация заполнителя играют всего лишь второстепенную роль. Поэтому, несмотря на то, что теория водоцементного отношения несомненно является одним из столпов технологии бетона, при прогнозировании прочности бетона с достаточной степенью точности возникает необходимость в определении дополнительных параметров. Тем более, что ограниченность концепции водоцементного отношения стала более существенной с появлением высокопрочных бетонов (НРС), в которых заполнитель играет более значительную роль.

Сведения о зависимости прочности бетона от granulometрии и объемной концентрации заполнителей весьма противоречивы. Ю. М. Баженов [3] считает, что прочность бетонов растет с увеличением концентрации цементного камня, при этом наибольшую прочность имеет непосредственно цементный камень. Г. М. Соболев [4] приводит результаты исследований, которые показывают, что с увеличением объемной концентрации цементного камня от 0,15 до 0,5 при постоянном В/Ц прочность бетона на различных видах заполнителя повышается. В работе И. М. Френкеля [5] отмечается, что цементный камень на поверхности заполнителя прочен, чем в слое отдаленного заполнителя. По его мнению уменьшение крупности заполнителей приводит к увеличению числа дефектов структуры и снижению прочности.

С другой стороны, Н.В. Михайлов [6] отмечает, что вода в пленке цементного теста на поверхности заполнителей распределена неравномерно: её содержание увеличивается от поверхности заполнителя к периферии оболочки. Поэтому, чем ближе зерна заполнителя, тем больше площадь контак-

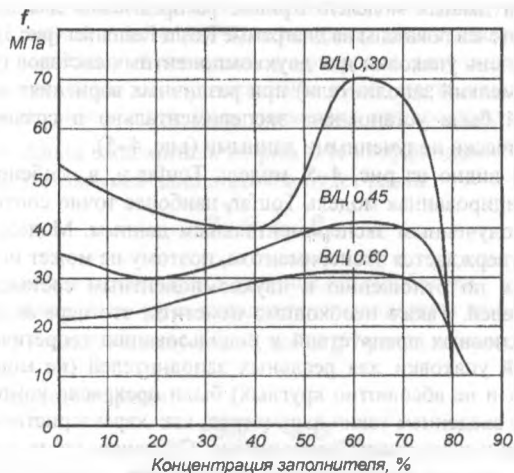


Рисунок 1. Зависимость прочности бетона от объемной концентрации заполнителя при различных водоцементных отношениях согласно [7]

тов, ниже водоцементное отношение в контактной зоне и выше прочность и плотность бетона. В работе А.Р. Алик и В.В. Несмияновой [7] также исследовались свойства тяжелого бетона при различной концентрации заполнителя. Результаты испытаний при различных В/Ц показали (рис. 1), что при введении в бетон до 20.40 % заполнителя, прочность бетона снижается либо остается неизменной. Снижение прочности обусловлено неоднородностью структуры бетона с плавающим расположением зерен заполнителя. При дальнейшем увеличении концентрации заполнителя прочность бетона возрастает и достигает максимального значения при концентрации цементного камня 23.30%.

Необходимо отметить, что при концентрации цементного камня ниже 23.30 % прочность бетона резко падает, г.к. в этом случае при неизбежной обмозке зерен цементным тестом его не хватает для заполнения пустот между зёрнами заполнителя.

Stock и др. [8] на основании собственных исследований пришел к выводу о том, что влияние концентрации заполнителя неоднозначно и снижается при увеличении объема вовлеченного воздуха. Исследования Walker и Bloem [9] показывают, что при постоянном В/Ц увеличение максимального размера заполнителя (MSA) отрицательно сказывается на прочности бетона, т.к. для данного количества цемента увеличение максимального размера заполнителя (MSA) приводит к увеличению расхода воды, и, следовательно, к снижению прочности. В тоже время Т. Kazuo и А. Iasutomo [7] считают, что для бетона, приготовленного на цементе с пониженным водоотделением, характерно монотонное возрастание прочности при увеличении крупности заполнителя от 10 до 40 мм. Противоречивость этих данных указывает на необходимость определения оптимального размера заполнителя. De Larrard и Belloc [2] определяют объемную концентрацию заполнителя и максимальный размер заполнителя (MSA) как составляющие одного параметра, определяющего топологию заполнителя.

Рассмотрим рыхлую упаковку заполнителя (рис. 2), частицы которого подвергнуты сжимающему усилию. Максимальные напряжения воспринимают частицы крупного заполнителя, которые действуют как т. н. жесткие контакты в податливой среде, образованной порами и заполняющими их частицами мелкого заполнителя.

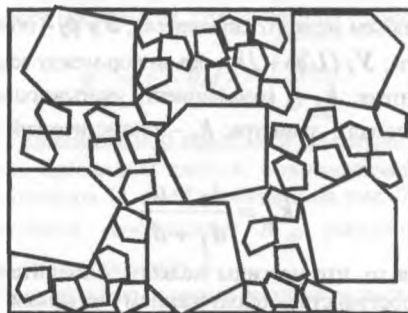


Рисунок 2. Рыхлая упаковка заполнителя, подвергнутого одноосному нагружению согласно [2]

Степень упаковки заполнителя в единице объема в данном случае может быть определена по формуле:

$$\Phi = \frac{\rho_b}{\rho_g} \quad (3)$$

где: ρ_b – насыпная плотность заполнителя; ρ_g – плотность зерен заполнителя.

В 1892 г. Feret опубликовал одну из первых статей, посвященную проблеме упаковки [10]. Первые исследования идеализированной упаковки шаров различных размеров были представлены Furnas [10] в 1929 г. и Westmann и Hugill [10] в 1930 г. Golterman, Johansen и Palbol [10] в своих исследованиях рассматривают различные модели упаковок (модель Aim и модель Toufar) и их применимость к реальному наполнителю.

Модель Aim

Модель предложена для следующих вариантов:

1. Количество мелкого заполнителя значительно меньше, чем количество крупного
2. Количество мелкого заполнителя значительно больше, чем количество крупного

В первом случае мелкие частицы должны заполнить пространство между зернами крупного заполнителя, а в другом – частицы крупного заполнителя окружены мелкими.

Максимальная степень упаковок смеси:

$$y^* = \frac{p}{1+p} \tag{4}$$

$$p = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \left(1 + 0.9 \frac{d_1}{d_2} \right) \cdot \Phi_1 \tag{5}$$

где: y_1, y_2 – объем зерен мелкого и крупного заполнителей, соответственно; ϕ_1, ϕ_2 – пустотность мелкого и крупного заполнителей, соответственно; d_1, d_2 – характеристический диаметр мелкого и крупного заполнителей, соответственно. Степень упаковки:

$$\Phi = \frac{\Phi_2}{1 - y_1} \text{ при } y_1 < y^* \tag{6}$$

$$\Phi = \frac{1}{\frac{y_1}{\Phi_1} + (1 - y_1) \left(1 + 0.9 \cdot \frac{d_1}{d_2} \right)} \text{ при } y_1 \geq y^* \tag{7}$$

Модель Toufar

Степень упаковки:

$$\Phi = \frac{1}{\frac{y_1}{\Phi_1} + \frac{y_2}{\Phi_2} - y_2 \left(\frac{1}{\Phi_2} - 1 \right) \cdot k_d \cdot k_s} \tag{8}$$

где: Y_1/ϕ_1 – объем мелкого заполнителя; Y_2/ϕ_2 – объем крупного заполнителя; $Y_2 \cdot (1/\phi_2 - 1)$ – объем пор между зернами крупного заполнителя; k_d – коэффициент, учитывающий влияние характеристического диаметра; k_s – статистический коэффициент.

$$k_d = \frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \tag{9}$$

Учитывая то, что частицы мелкого заполнителя располагаются в пространстве, образованном четырьмя гранулами крупного заполнителя, имеем:

$$k_s = 1 - \frac{1 + 4x}{(1 + x)^4} \tag{10}$$

где x – объем мелкого заполнителя отнесенный к пустотности крупного заполнителя и равный:

$$x = \frac{y_1 \cdot \Phi_2}{y_2 \cdot \Phi_1 \cdot (1 - \Phi_2)} \tag{11}$$

Сравнения результатов расчетов по формулам (8)..(11) с экспериментальными данными показали, что при введении дополнительного небольшого количества мелкого заполните-



Рисунок 3. Диаграмма Rosin-Raimmler распределения зернового состава для заполнителей согласно [10]

ля степень упаковки не изменяется в связи с предположением о заполнении мелким заполнителем пространства, образованным четырьмя гранулами крупного заполнителя. Поэтому появилась необходимость в корректировке коэффициента k_s .

$$k_s = \frac{x}{x_0} \cdot k_0 \text{ при } x < x_0 \tag{12}$$

$$k_s = 1 - \frac{1 + 4x}{(1 + x)^4} \text{ при } x \geq x_0 \tag{13}$$

где: $x_0 = 0,4753$; $k_0 = 0,381$

Данные модели базируются на ряде следующих допущений:

- в роли заполнителя выступают шары
- заполнители моноразмерны
- мелкий и крупный заполнители имеют различные размеры

Первые два допущения могут быть компенсированы введением таких параметров, как характеристический диаметр (т.е. диаметр фракции заполнителя, полный остаток на ситах которой соответствует либо 50 %, либо 36,8 %) и пустотность заполнителя. Третье предположение может вступить в противоречие с ситуацией, когда определенная часть фракции мелкого заполнителя совпадает с фракцией крупного заполнителя, в то время, как первые два допущения могут быть компенсированы введением таких параметров, как характеристические диаметры значительно отличаются.

Golterman, Johansen и Palbol [10] предлагают учитывать определенное количество заполнителей, отличающихся гранулометрическим составом, прочностью и формой зерен, для верификации данных моделей. Кривые распределения для данных заполнителей показаны на диаграмме Rosin-Raimmler (рис.3).

Степень упаковки для двухкомпонентных составов (крупный + мелкий заполнители) при различных вариациях заполнителей была установлена экспериментально и сравнена с теоретически полученными данными (рис. 4–5).

Как видно из рис. 4–5, модель Toufar и, в особенности, модифицированная модель Toufar, наиболее точно соответствуют полученным экспериментальным данным. Модель Aim не подтверждается экспериментом, поэтому не может использоваться по отношению к двухкомпонентным составам заполнителей. Также необходимо отметить, что первые два из трех основных препятствий к использованию теоретических моделей упаковки для реальных заполнителей (не моноразмерных и не абсолютно круглых) были прекрасно компенсированы введением таких параметров, как характеристический диаметр и пустотность заполнителя. Ситуация, когда определенная часть фракции мелкого заполнителя совпадает с фракцией крупного заполнителя при условии, что характеристические диаметры отличаются незначительно, наглядно проил-

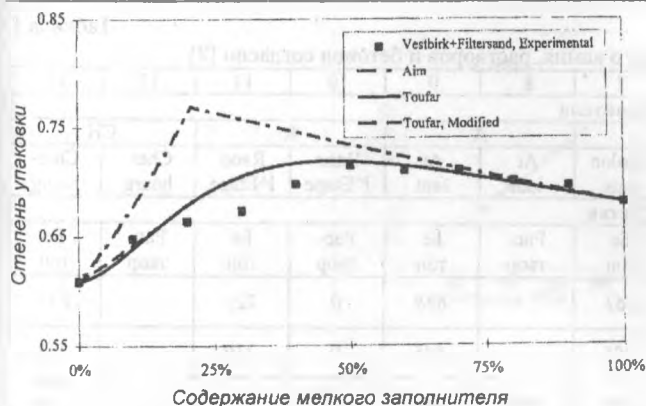


Рисунок 4. Экспериментальные и теоретические значения степени упаковки заполнителей Vestbirk 0/2 и Filtersand в зависимости от содержания мелкого заполнителя согласно [10]

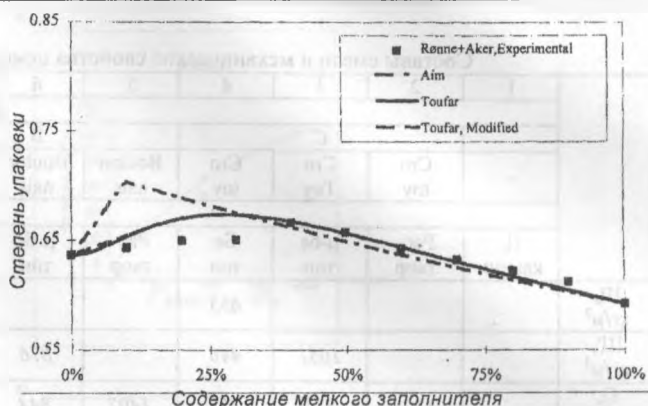


Рисунок 5. Экспериментальные и теоретические значения степени упаковки заполнителей Ronne 2/8 и Aker 8/16 в зависимости от содержания мелкого заполнителя согласно [10]

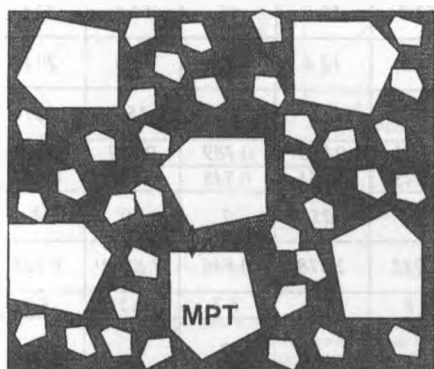


Рисунок 6. Бетон как матрица цементного камня с включениями крупного заполнителя согласно [2]

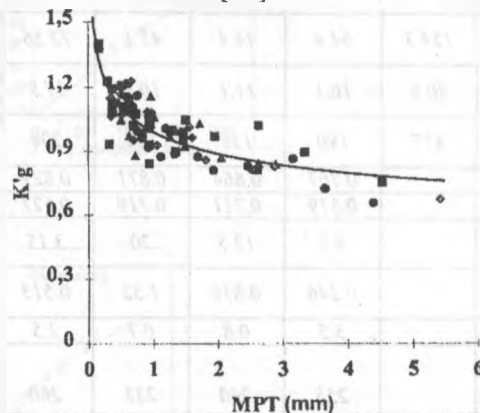


Рисунок 7. Зависимость между MPT и прочностью бетона для четырех независимых серий данных согласно [2]

иллюстрировано на рис. 4 и 5. Как видно из рис.4 и 5, экспериментальные данные располагаются несколько ниже теоретических, хотя этот эффект почти не наблюдается по мере приближения к максимальной степени упаковки или при больших количествах мелкого заполнителя.

Если теперь в смесь заполнителей ввести цементный гель, объем которого больше, чем межзерновая пустотность (что необходимо из условия обеспечения необходимой удобоукладываемости), то цементный гель между зернами крупного заполнителя будет испытывать высокие напряжения (рис. 6). В данном случае расстояние между соседними частицами крупного заполнителя определяется максимальной прослойкой цементного теста (MPT), т.к. между заполнителями возникает наибольший интервал, в котором в результате нарушения сцепления между частицами имеет место однородное объемное расширение. Если применить однородную дилатацию к зернам заполнителя на рис. 6 (с коэффициентом λ), то объем, занимаемый заполнителем будет равен:

$$g^* = \lambda^3 \cdot g \quad (14)$$

где g – объем заполнителя в единице объема бетона.

В случае, если зерна заполнителя находятся в непосредственном контакте между собой, тогда g^* равен плотности упаковки.

С другой стороны:

$$\lambda = \frac{MPT + D_{max}}{D_{max}} \quad (15)$$

где D_{max} – максимальный размер заполнителя (MSA)

Тогда уравнение для расчета MPT будет иметь следующий вид:

$$MPT = D_{max} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad (16)$$

Значения D_{max} и g определяются опытным путем, а g^* рассчитывается по формуле, предложенной Саquot [2]:

$$g^* = 1 - 0.47 \cdot \sqrt[5]{\frac{D_{min}}{D_{max}}} \quad (17)$$

Влияние максимальной прослойки цементного теста MPT на прочность бетона для данных, позаимствованных из различных источников [2, 8, 9], показано на рис. 7, где по оси ординат отложен коэффициент K'_g , равный отношению прочности бетона к квадрату λ .

Экспериментальные данные подтверждают следующее уравнение:

$$f'_c \cong MPT^p \quad (18)$$

где p находится в пределах 0.13 ± 0.16 . Как видно из рис. 8 основная ошибка, допускаемая формулой Feret при прогнозировании прочности, снижается при введении MPT.

Непосредственное сравнение между прочностью цементного камня и бетона (см. табл. 1.) позволяет сделать следующий вывод:

В данном возрасте и для данных видов заполнителя увеличение максимального размера заполнителя наряду с увеличением толщины прослойки цементного теста приводит к

Составы смеси и механические свойства цементного камня, растворов и бетонов согласно [2]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Заполнители												
	С			В			А		R		СН		
	Сго toy	Сго Toy	Сго toy	Boulon nais	Boulon nais	Boulon nais	Ar laut	Ar laut	Raon l'Etape	Raon l'Etape	Cherbourg	Cherbourg	
	Состав												
Ц. камень	Рас-твор	μ-бе тон	Бе тон	Рас-твор	μ-бе тон	Бе тон	Рас-твор	Бе тон	Рас-твор	Бе тон	Рас-твор	Бе тон	
Щ, кг/м ³			653			661		638	0	725		627	
Щ', кг/м ³		1051	446		876	285		345	0	210		163	
П, кг/м ³	1528	771	753	1407	844	789	1401	683	674	187	1193	774	
П', кг/м ³									854	701			
Ц, кг/м ³	1543	644	444	431	717	539	525	670	500	673	513	826	612
МК, кг/м ³	154.3	64.4	44.4	43.1	72.56	53.9	52.5	67.0	50.0	67	51.3	82.6	61.2
СП, кг/м ³	30.9	16.1	11.1	10.8	17.9	13.5	13.1	16.8	12.4	16.9	12.8	20.6	15.2
В, кг/м ³	417	190	136	134	204	156	153	215	173	201	158	231	174
g*		0.767	0.864	0.871	0.829	0.885	0.89	0.755	0.855	0.789	0.852	0.813	0.869
G		0.579	0.711	0.719	0.527	0.645	0.649	0.543	0.651	0.548	0.651	0.457	0.598
Dmax, мм		2.5	12.5	20	3.15	12.5	20	2	25	5	20	2	20
MPT, мм		0.246	0.839	1.32	0.513	1.39	2.22	0.232	2.378	0.646	1.8768	0.423	2.654
Воз, %		3.5	0.8	0.7	2.5	1.1	0.8	3.8	0.8	1.7	0.5	3.1	1.4
Подвижность, мм		255	240	235	260	250	250	250	220	260	230	220	215
f'с1, МПа	(80)	56.9	45.9	47.5	72.0	72.4	61.8	56.3	53.4	61.4	46.3	71.8	61.9
f'с3, МПа	109.2	76.4	64.9	62.7	94.9	90.7	82.6	79.2	71	76.9	64.2	87	76.7
f'с28, МПа	152.3	106.3	90.5	86.8	112.2	109.5	107.7	101.9	89	104.9	90.9	108.4	101.8

Примечание: f'с1, f'с3, f'с28 - прочность образцов в возрасте 1сут, 3 сут и 28 сут соответственно.

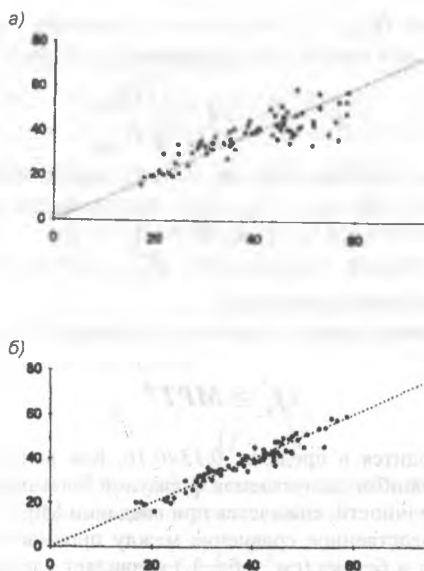


Рисунок 8. Сравнение между экспериментально полученными и теоретическими прочностями а - для формулы Feret, б - для формулы с параметром MPT

снижению прочности, что можно объяснить увеличением количества микродефектов в контактной зоне.

Прочность матрицы f'_{cm} определяется как прочность цементного камня f'_{cp} , умноженная на коэффициент, учитывающий эффект MPT:

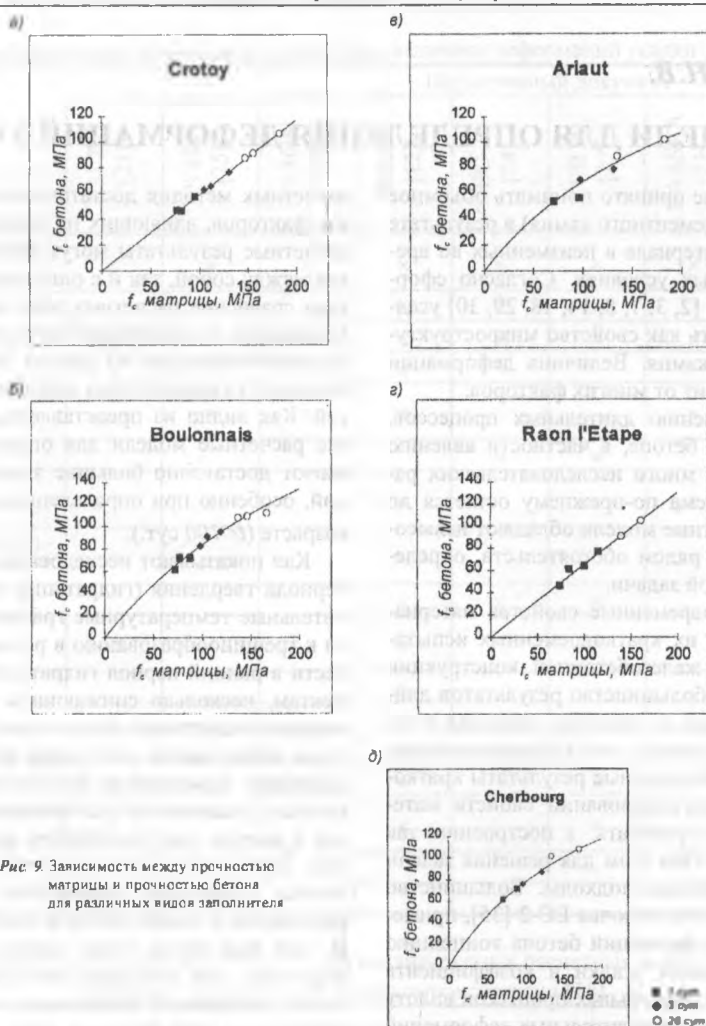
$$f'_{cm} = f'_{cp} \cdot MPT^{0.13} \tag{19}$$

Как видно из рис. 9, для одних заполнителей (рис.9,а,г) прочность бетона прямо пропорциональна прочности матрицы, в то время как для других заполнителей (рис. 9,б,в,д) зависимость нелинейна из-за ограничивающего эффекта заполнителя.

На основании обобщения результатов исследований [2] прочность бетона предложено рассчитывать по эмпирической формуле следующего вида:

$$f'_{cc} = \frac{a \cdot f'_{cm}}{b \cdot f'_{cm} + 1} \tag{20}$$

где: f'_{cc} - прочность бетона; f'_{cm} - прочность цементного камня; a и b - эмпирические константы, зависящие от вида заполнителя.



ВЫВОДЫ

Влияние заполнителя на прочность бетона может быть определено следующим образом:

1. Бетон является композитом, состоящим из цементного камня с включением в него заполнителя - отсюда изменение прочности вследствие эффекта раздвижки зерен заполнителя (максимального расстояния между двумя соседними зернами крупного заполнителя МРТ). И только при достижении оптимального значения толщины прослойки цементного теста можно получить высокопрочные бетоны (НРС).
2. Для обычных бетонов прочность равна прочности матрицы, умноженной на коэффициент, определяющий сцепление между цементным камнем и заполнителем (коэффициент α в уравнении (20)).
3. Для высокопрочных бетонов (НРС) следует учитывать дополнительное влияние на прочность бетона прочности заполнителей. Однако понятие используемой прочности заполнителя приобретает несколько иное значение: ее максимум будет соответствовать не собственной прочности, а прочности сцепления цементного камня с поверхностью его зерен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abrams, L. D., 1919, cited by Neville, A. M., "Properties of Concrete," 3rd ed., Pitman, 1981.

2. De Larrard, F., and Belloc, A., "The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete", ACI Materials Journal, V 94, No 5, Sept.-Oct. 1997.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона. - М.: Высш. шк., 1987.
4. Соболев Г. М. Влияние и физико-механические свойства бетонов на различных видах заполнителей. - М., 1974.
5. Френкель И. М. Технологические основы и расчет состава бетона. - М., 1961.
6. Михайлов Н. В. Физико-химическая теория бетона и основные положения технологии бетона и железобетона. - М., 1985.
7. Аллик А. Р., Несмиянова В. В. О влиянии заполнителей на прочность тяжелого бетона. - Л.: ЛИСИ, 1983.
8. Stock, A. F.; Hannant, D. J.; and Williams, R. T., "The Effect of Aggregate Concentration upon the Strength and Modulus of Elasticity of Concrete", Magazine of Concrete Research, V. 31, No 109, 1979.
9. Walker, S., and Bloem, D. L., "Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete", ACI Materials Journal, Sept. 1960.
10. Golterman, P., Johansen, V., and Palbol, L., "Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix", ACI Materials Journal, V 94, No 5, Sept.-Oct. 1997.