

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

О. Я. БЕРГ

К ВОПРОСУ О ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОНА

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 30 XI 1949)

Вид кривой диаграммы сжатия бетона в сильной степени зависит от скорости нагружения бетона, формы образца и условий испытания. Поэтому предел прочности бетона на сжатие не имеет единой характеристики. Различают ⁽¹⁾: а) кубиковую прочность R ; б) призмную прочность R_{np} , $R_{np} < R$; в) предел прочности бетона в сжатой зоне при изгибе или внецентренном сжатии R_u , $R_{np} < R_u < R$; г) предел прочности бетонных образцов при испытании их на сжатие с устраненным трением по опорным площадкам R_o , $R_o \cong 0,5R$.

Н. М. Беляев ⁽²⁾ высказал предположение о том, что прочность бетона при сжатии можно связывать не с величиной напряжения, а с наличием относительного поперечного расширения определенной величины, зависящей от степени деформации. Момент разрыва бетона от поперечного расширения Н. М. Беляев считал совпадающим с моментом разрушения образца.

Проведенные нами исследования позволили установить, что разрыв бетона от поперечного растяжения происходит задолго до его разрушения.

1. Микроскопическими исследованиями боковых поверхностей бетонных призм в процессе испытания их на центральное сжатие были обнаружены необратимые микрощели. Испытывались бетонные призмы высотой 80 см и сечением 20×20 см. Прочность бетона при испытании составляла $R = 250$ кг/см². Исследование велось микроскопами с увеличением до 185 раз.

Первые микрощели на призмах были обнаружены в микроскоп при нагрузках $P = (0,55 \div 0,60) R_{np}$ и имели раскрытие 10μ и протяженность $10 \div 20$ мм. В момент обнаружения микрощелей относительные поперечные деформации бетона составляют в среднем $\epsilon_y = 1,0 \cdot 10^{-4}$, что совпадает с величиной предельной деформации бетона при испытании на центральное растяжение ⁽¹⁾. Следовательно, начало разрушения бетона при сжатии имеет устойчивую характеристику, которая не зависит от вида испытания и формы образца. Этой характеристикой является величина предельной деформации бетона в поперечном к действию силы направлении.

Разрушение образца является следствием развития микрощелей и носит характер последовательного прорастания трещин, типичного для хрупкого разрыва ⁽³⁾. Различные пределы прочности бетонных образцов определяются характером препятствия, которое создается развитием микрощелей неоднородным напряженным состоянием концевых участков опытного образца. В бетонных кубиках возникают наибольшие препятствия развитию микрощелей. При испытании образцов с устраненным трением по опорным площадкам появившиеся микрощели быстро прорастают вдоль образца. Разрушение образцов происходит

при нагрузках, очень близких к величине нагрузки, при которой образуются микрощели.

На рис. 1 представлены диаграммы сжатия и диаграммы поперечного расширения бетона в призмах, испытанных при скорости роста напряжений $\dot{\nu} = 0,05 \text{ кг/см}^2 \text{ сек}$. При высоких нагрузках происходит значительное развитие пластических деформаций бетона и падение величины модуля деформации. Эти явления сопровождаются развитием ранее обнаруженных микрощелей и появлением новых. Как видно из опытов, основной причиной роста пластических деформаций на высоких ступенях нагрузки является развитие микрощелей, а не способность гелевой составляющей бетона к большим пластическим деформациям, как это предполагалось в теории структуры бетона (4).

Анализ диаграмм сжатия и диаграмм поперечного расширения бетона позволяет объяснить закономерности изменения коэффициента

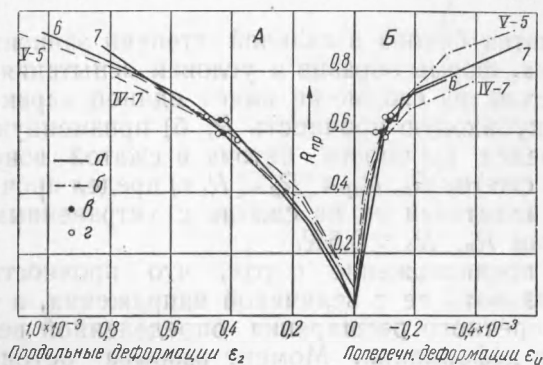


Рис. 1. А — диаграммы сжатия, Б — диаграммы поперечного расширения бетонных призм: а — по опытам автора, б — по данным Х. Иосида, в — момент обнаружения микрощелей, г — наступление состояния, характеризуемого условием $\nu \geq 0,5$

Пуассона ν для бетона. В опытах Х. Иосида (5), посвященных изучению коэффициента Пуассона для бетона, выявлен рост величины ν по мере повышения нагрузки. Х. Иосида наблюдал даже значения $\nu > 0,5$, но не приводит убедительных объяснений этого факта. Фрейсинэ (6) на основании предложенной им теории структуры бетона приходит к выводу о том, что в бетоне должно наступать состояние, характеризуемое условием $\nu > 0,5$.

В наших исследованиях установлено, что коэффициент Пуассона достигает величины $\nu = 0,5$ к моменту обнаружения микрощелей. Развитие микрощелей приводит к быстрому росту поперечных деформаций (рис. 1) образца, которые измеряются обычно на базе $10 \div 12 \text{ см}$. Величина коэффициента ν , вычисленная на основе этих измерений, превышает $\nu = 0,5$. Однако, если приборы для измерения поперечных деформаций установить с малой базой измерения ($1 \div 2 \text{ см}$) в промежутке между обнаруженными микрощелями, то величина ν в наших опытах не превосходила $\nu = 0,25$.

Анализ данных Х. Иосида по каждой ступени повышения нагрузки показывает, что кривая распределения измеренных им величин поперечных деформаций, соответствующих моменту наступления условия $\nu = 0,5$, характеризуется средней $\epsilon_y = 1,05 \cdot 10^{-4}$, т. е. соответствует наступлению предельной деформации растяжения. Кривая распределения величин напряжений сжатия, соответствующих моменту наступления условия $\nu = 0,5$, характеризуется средней $\sigma = 0,58 R_{np}$. Последняя величина также хорошо согласуется с нашими данными о величине нагрузки к моменту обнаружения микрощелей.

Следовательно, распространенный в литературе вывод об увеличении бетона в объеме при сжатии ($\nu > 0,5$) ошибочен. Выводы теории Фрейсинэ о величине коэффициента Пуассона опровергаются данными экспериментами.

2. Проводившиеся опыты (1) с повторным нагружением бетонных призм при однозначном цикле дают величину длительного сопротивления бетона сжатию $\sigma = (0,55 \div 0,60) R_{np}$. Указанному напряжению

в наших опытах соответствует момент обнаружения необратимых микрощелей.

Следовательно, разрушение бетона повторными нагрузками при однозначном цикле является результатом развития микрощелей, возникающих при первом нагружении бетонного образца. Постепенное развитие микрощелей происходит вследствие концентрации напряжений в их тупиковых частях.

3. Для исследования развития необратимых микрощелей при неоднородном напряженном состоянии было проведено микроскопическое исследование на серии балок и колонн. Испытывались на чистый изгиб балки сечением 10×45 см, пролетом 400 см и на внецентренное сжатие колонны сечением 25×40 см, высотой 200 см.

В балках и колоннах можно ожидать, что первые микрощели появятся на стороне $x = a$ (рис. 2). В момент образования микрощелей глубина их должна быть очень мала, в отличие от глубины микрощелей в призмах. Ввиду действия компоненты деформации ϵ_x следует ожидать наклонного развития трещин в соответствии с направлением главных поверхности деформаций.

Первые необратимые микрощели, обнаруженные в колоннах на поверхности $x = a$ (рис. 2), имели раскрытие $4-5 \mu$ и длину в несколько миллиметров. В колонне, армированной в сжатой зоне продольными стержнями, они появились при нагрузке $P = 0,375 P_p$, где P_p — разрушающая нагрузка на колонну. В колоннах, не имевших арматуры в сжатой зоне, микрощели обнаружены при $P = (0,65 \div 0,70) P_p$. К моменту обнаружения микрощелей деформации ϵ_y составляли $(1,0 \div 1,5) \cdot 10^{-4}$. Момент обнаружения необратимых микрощелей в колоннах несколько превосходил момент достижения условия $\nu = 0,5$.

Следует заметить, что обнаруженные микрощели по величине раскрытия в начальный момент соответствуют наибольшим микрощелям в металле, которые изучались в исследованиях П. А. Ребиндера (7). Наибольшая величина раскрытия микрощелей в металле, наблюдавшихся в электронный микроскоп, достигает также нескольких микрон (8).

Разрушение сжатой зоны колонн и балок происходит путем отрыва пластов бетона по наклонным поверхностям (рис. 2) и по поверхностям, примерно параллельным оси y .

При испытании балок были обнаружены выходы микрощелей на боковые поверхности бетона $y = \pm b$ задолго до момента разрушения ($P = 0,7 P_p$). Измеренные на уровне появившихся микрощелей деформации ϵ_x на поверхностях $y = \pm b$ на других участках балки оказались меньше $\epsilon_{pr} = 1,0 \cdot 10^{-4}$.

Разрушение сжатой зоны балки происходит при фибровых деформациях ϵ_z (на поверхности $x = a$), превышающих предельные деформации призм при центральном сжатии. Как показали опыты с призмами, для разрушения бетона необходимо достижение микротрещинами определенной пространственной протяженности. В балках и колоннах для развития трещин в сторону нейтральной плоскости необходимы дополнительные усилия. Линейные деформации крайних фибр бетона (на поверхности $x = a$) не могут характеризовать пространственного развития микрощелей.

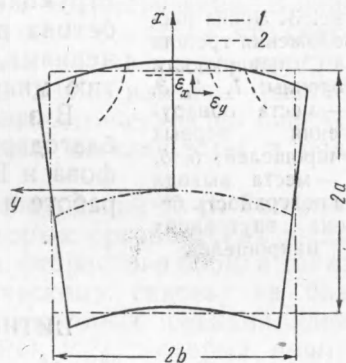


Рис. 2. Поперечное сечение балки или колонны после деформации: 1 — контур сечения до деформации, 2 — вероятное направление развития микрощелей

4. Повторение нагрузки, а также ее выдержка приводит к развитию микрощелей. Процесс развития микрощелей исследовался при повторных нагрузках величиной $0,7 P_p$ на серии балок и колонн. При повторении нагрузки 1000 ÷ 2000 раз уже образовывалась развитая система трещин с величиной раскрытия до $50 \div 100 \mu$ и длиной до 100 мм. Кривые распределения величин раскрытия и длин микрощелей по мере повторения нагрузки смещаются в сторону больших величин. На рис. 3 показан эскиз трещин в одной из испытанных колонн (грань $x = a$ по рис. 2), развившихся из микрощелей в результате повторения нагрузки. Разрушение колонны происходит путем постепенного откалывания слоев бетона по поверхностям развития трещин. Развитием микрощелей объясняется установленное опытами⁽⁹⁾ разрушение бетонных образцов при выдержке достаточно высокой нагрузки ($0,9 P_p$).

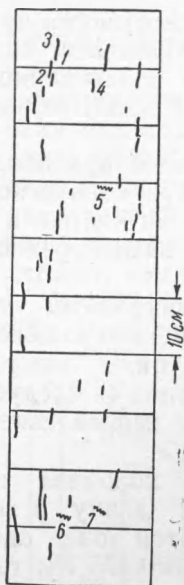


Рис. 3. Эскиз расположения трещин на поверхности колонны: 1, 2, 3, 4—места обнаружения первых микрощелей; 5, 6, 7—места выхода на поверхность бетона внутренних микрощелей

5. Данными опытами показано, что теория наибольших деформаций (растяжения) приложима к оценке предела прочности бетона. Улучшение деформативных свойств и прочности бетонной конструкции может быть достигнуто путем армирования бетона поперечными тонкими металлическими включениями, способными создавать препятствия развитию микрощелей.

В заключение автор считает своим долгом поблагодарить проф. Е. Л. Хлебникова, Г. К. Евграфова и В. А. Росновского за неизменный интерес к работе и за дискуссию результатов исследования.

Поступило
24 XI 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. В. Столяров, Введение в теорию железобетона, 1941. ² Н. М. Беляев, И. П. Александрин, Н. Г. Корсак и А. В. Сагалкин, Прочность, упругость и ползучесть бетона, 1941, стр. 4. ³ А. П. Александров, Вестн. АН СССР, № 7—8, 51 (1944). ⁴ А. Е. Шейкин, Изв. АН СССР, ОТН, № 3—4, 33 (1943). ⁵ Н. Yoshida, Über das elastische Verhalten von Beton, 1930. ⁶ Е. Фрейсинз, Переворот в технике бетона, 1938. ⁷ П. А. Ребиндер, Юбилейн. сборн. к 30-летию Октября, 1, 1947, стр. 533. ⁸ В. И. Лихтман, А. И. Фример и С. Л. Пупко, ДАН, 58, 5, 827 (1947). ⁹ I. R. Shank, Journ. Am. Concr. Inst., 20, 6, 493 (1949).