

ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ОДНООСНО СЖАТОГО БЕТОНА

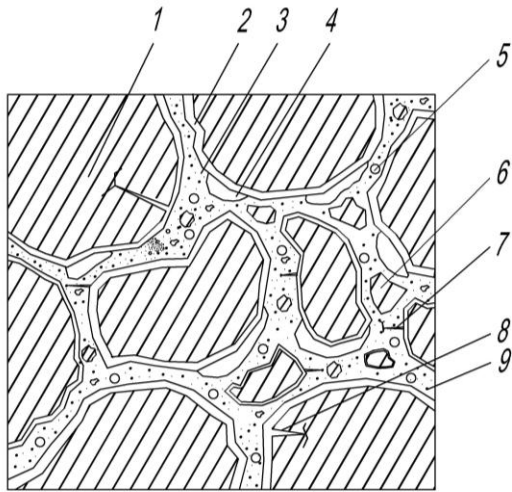
Мишутин А.В., Кобринец В.М., Совгира В.В.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
г. Одесса, Украина*

Обеспечение надежной, длительной и безопасной эксплуатации железобетонных конструкций зданий и сооружений в условиях влияния различных факторов на стадии исследований, проектирования и их эксплуатации сводится к решению систем аналитических уравнений, с использованием механических и физико-химических характеристик материалов нормированных только по прочности на одноосное сжатие и растяжение. Однако структура бетона с его реологическими свойствами неоднородна и ее изменение при заданной прочности на сжатие - существенно влияет на прочность, деформативность, трещиностойкость и другие свойства, которые изучены недостаточно.

Свойства бетона в значительной мере зависят от его структуры. Бетон состоит из твердой фазы - цементно-песчаного раствора, крупного заполнителя (щебня) и пор (рис. 1; 2 и 3) различных размеров и происхождения. Размер неоднородностей для твердой фазы колеблется от 0,001...0,2 мкм (иглообразные гидросиликаты кальция группы тоберморита) до 40 мм и более (крупный заполнитель – галька, щебень). Размеры порового пространства: от капиллярно-гелевых пор цементного камня (0,0001...0,2 мкм), заключенных между кристаллами игольчатого этрингита, до пор воздухововлечения размерами 0,2...5 мм (рис. 2).

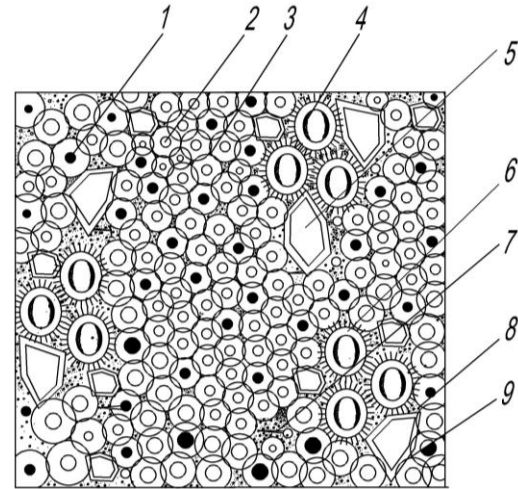
Исследователи [1-9,11 и др.] рассматривают несколько уровней структуры бетона: нано- микро- макроструктуру. Каждый уровень структуры предполагает наличие двух-трех компонентов. Для нано-размерной структуры (*наноструктуры*) – это зёрна (50 нм и менее; (1нм=10⁻⁹ м)) гидратированного и негидратированного цемента и поры (0,0001...0,1 мкм); для *микроструктуры* - зёрна песка и прослойки цементного камня, включающего зёрна (100 нм и более) гидратированного цемента и поры (0,01...0,2 мкм). *Макроструктура*, включает зерна песка, крупного заполнителя (щебня), прослойки цементно-песчаного камня, и поры (0,2...5 мм).



а)

Рис.1. Структура крупнозернистого (а) бетона:

1 - зерна крупного заполнителя (щебня); 2 - контактная зона; 3 - растворная матрица; 4 - воздушные пузырьки; 5 - крупные седиментационные поры; 6 - зона уплотненной структуры; 7 - развитие трещин в растворной матрице; 8 - трещины в крупном заполнителе; 9 - мелкий заполнитель (песок) в матрице



б)

Рис. 2. Структура цементного камня (б):

1 - негидратированные зерна цемента; 2; 4 - гидратированные зерна цементного камня; 3; 6; 9 - образование гелевой оболочки на цементных зернах; 5 - образование волокнистых и столбчатых структур на поверхности зерен и в порах цементного камня; 7 - развитие трещин в кристаллах новообразований; 8 - поры и капилляры в кристаллах новообразований

Анализ выполненных исследований [1-12; 13 и др.] и опыты авторов, связанные с оценкой деформирования и трещинообразования тяжелого и мелкозернистого бетона, показывает, что образование пор и развитие трещин, приводящих к разрушению бетона, происходит на каждом из уровней наномикро- макроструктуры преимущественно на контактной зоне геля

и зёрен гидратированного и негидратированного

цемента, а также прослойки цементного камня, зерен песка (рис.3) и щебня, что позволяет говорить о необходимости учета этих фактов при оценке результатов поведения одноосного сжатого бетона в процессе разрушения при механическом воздействии на него. Процесс разрушения бетона и подобных композиционных материалов объясняется рядом теорий, из которых можно выделить следующие направления: феноменологическое, статистическое, структурное и др.

Теории феноменологического направления [3; 4; 8 и др.] рассматривают разрушение как мгновенный процесс нарушения сплошности композиционного материала при достижении предельного значения прочности f_c . Феноменологические теории с их аналитическими моделями имеют наибольшее практическое значение, в которых основные параметры вычисляются по результатам опытов на элементах, работающих в сложном напряженном состоянии, показывают удовлетворительное согласование с экспериментом, отражающим аналогичные условия. Следует отметить, что физические причины, приводящие к деформированию и разрушению бетона на разных уровнях его структуры, не установлены и недостаточно изучены.

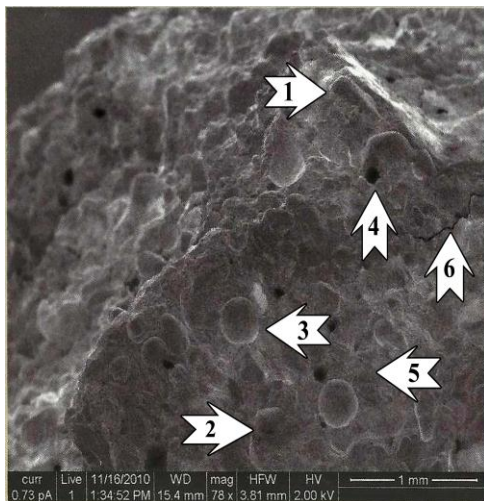


Рис.3. Микроструктура растворной матрицы без крупного заполнителя, 1- мелкий заполнитель; 2 – след-раковина от зерна мелкого заполнителя; 3 – излом воздушной поры; 4 – капилляр; 5 – цементный камень; 6 – трещина.

(В.А.Никишкин, к.т.н., ОАО «Институт «УралНИИАС»)

Теории статистического направления [6] характеризуют зависимость механических свойств бетона от форм и размеров образцов (масштабный фактор) где проявляется влияние структуры бетона, наличие и распределения дефектов в ней, технологии изготовления, конструкции образцов и методики их испытания.

Статистические теории не рассматривают реальной структуры бетона и особенностей распределения прочности по элементам структуры и связанного с этим напряженного состояния: концентрации напряженного состояния около дислокаций, пор, зёрен негидратированного цемента, песка и крупного заполнителя, а также нарушения контакта между цементным камнем и заполнителем.

Статистические теории обычно исходят из того, что прочность образца (конструкции) определяется прочностью наиболее слабого первичного элемента структуры, то есть не учитывается взаимодействие и взаимовлияние дефектов. Применимость статистической теории к бетону в существующем виде ограничена, хотя отдельные ее направления (разрушение материала, как случайного процесса накопления повреждений в сочетании с методами механики разрушения) требуют изучения.

Теории структурного направления [1-4; 7; 10-13 и др.] глубже рассматривают структуру бетона, включая: зависимость прочности от пористости цементного камня; связь составляющих цементного камня с его прочностью и трещиностойкостью; механизм деформирования и разрушения бетона. Детально изучается влияние включений (зёрен заполнителя) на образование первых микроразрушений методами теории упругости.

Структурные (физические) теории достаточно глубоко изучают физическую сущность поведения бетона под нагрузкой, однако не учитывают наличие в нем изолированных пор (включений) и эффекта взаимодействия между ними, что существенно отражается на изменении концентрации напряжений и, следовательно, напряженно-деформированном состоянии.

Таким образом, структурные теории ограничиваются определением напряжений, вызывающих образование первых трещин, а весь процесс разрушения бетона, включающий повреждение, накопление и развитие трещин не рассматривается.

Литературные источники о состоянии вопроса теории деформирования и прочности бетона показывают, что интенсивно развиваются новые направления исследований механики разрушения бетона, о чем свидетельствуют международные конференции [20; 21] по механике разрушения бетона.

Исследование механики разрушения такого неоднородного композита как бетон требует разностороннего экспериментального и теоретического подхода.

В аккредитованной лаборатории кафедры ПСК и лаборатории кафедры строительной механики автором выполнены экспериментальные исследования напряженно деформированного состояния одноосно и внецентренно сжатых коротких бетонных и железобетонных колонн (288 образцов), включая вопросы деформирования и разрушения бетона, которые частично опубликованы в работах [14; 15].

В процессе исследования напряженно-деформированного состояния одноосно сжатого бетона ($f_c = 10; 30; 70$ МПа) осуществлялось изучение изменения его структуры на различных уровнях нагружения с использованием критериев [3-5] $\varepsilon_{cy}; \varepsilon_{cx}; \theta_c; v; \Delta t; R'_{crc}; R''_{crc}$ отражающих: характер изменения поперечных, продольных и объемных деформаций; коэффициента Пуассона; скорости прохождения ультразвука.

Исследуемый тяжелый бетон по своей макроструктуре неоднородный материал, состоящий из матрицы (цементного камня, песка, воздушных пор, начальных трещин) и крупного заполнителя (щебня) с порами и полостями различного происхождения и усадочными трещинами. Конструкционная прочность материалов, к которым относится бетон, является структурно-чувствительной характеристикой, следовательно, макроскопические механические свойства многофазного материала не соответствуют усредненным значениям свойств, присущих микроскопическим структурным фазам.

В исследованиях [1-14 и др.] по определению сопротивления цементных систем механическому разрушению достигнут определенный прогресс благодаря разработке методов механики разрушения - научному направлению, лежащему на стыке механики деформируемого твердого тела, материаловедения и физики разрушения. В направлении этих исследований [1-4; 10; 13; 16 и др.] заложены основы теории деформации и прочности цементного камня и бетона, исходящей из физического существа процесса трещинообразования и разрушения. Исследования этого направления базируются на концепции Гриффитса – Орована – Ирвина [17; 19].

В основе всех видов разрушения лежит небольшое число близких физических микроскопических процессов. Исследователи [10-13; 16 и др.] полагают, что разрушение материалов происходит при разрыве материалов в хрупком состоянии и сдвиге в пластичном состоянии. Любой из этих видов разрушений включает процесс зарождения и роста дефектов, вызывающих хрупкое или вязкое разрушение, усталость, разрушение в процессе ползучести. При этом морфология и кинетика

разрушения обусловлена, прежде всего, внутренней структурой цементного камня.

Анализ микроструктуры цементного камня [1; 2; 5; 10; 16 и др.] свидетельствует, что его структуру также необходимо рассматривать на ряде уровней:

- уровень наноразмерных структур (нанокластеры; нанокристаллы), представляющий собой наноразмерные комплексы атомов и молекул (атомно-молекулярный уровень). Основное различие между нанокластерами и нанокристаллами заключается в расположении образующих их атомов или молекул, а также физических и химических связей между ними. По размерной шкале материалы, имеющие размер зерна от 0,3 до 0,04 мкм, относятся к субмикроструктурным, а материалы, состоящие из структурных единиц менее – относятся к наноматериалам.

Нанокластеры по степени упорядоченности структуры подразделяются на упорядоченные и неупорядоченные. В упорядоченных нанокластерах атомы или молекулы расположены в определенном порядке и сильно связаны между собой.

Неупорядоченные нанокластеры характеризуются отсутствием порядка в расположении атомов или молекул и слабыми химическими связями. Вместе с тем неупорядоченные нанокластеры играют особую роль в процессах образования нанокристаллов и представляют собой неустойчивые формования тонкодисперсного вещества, аналогичных по структуре так называемым Ван-дер-Ваальсовым молекулам – скоплениям небольшого числа молекул (атомов), образуя сильно пересыщенный раствор гидратированного продукта, возникающего за счет слабого взаимодействия и обусловленного Ван-дер-Ваальсовыми силами. Из сильно перенасыщенного раствора выделяется множество кристаллических зародышей гидратированных продуктов коллоидных размеров, которые приобретают свойства геля. Огромная поверхность этих начальных кристаллических продуктов гидратации обуславливает силы Ван-дер-Ваальса и образование коагуляционных структур. В этих структурах частички продуктов гидратации образуют сплетения, внутри которых располагаются очень тонкие капилляры, в тоже время сами сплетения образуют относительно большие поры. Неорганические нанокристаллы распространены в виде порошка простых, двойных и тройных оксидов. Кристаллические наночастицы реализуются в виде суспензий, где они играют роль дисперсной фазы:

- первый надмолекулярный уровень: кристалл в хорошо закристаллизованных или кристаллит в плохо закристаллизованных системах; даже в почти аморфных, так называемых коллоидных образцах всегда обнаруживается в какой-то самой минимальной степени элементы, присутствие кристаллической упорядоченности;

- второй надмолекулярный уровень: зерно, гранулы сферолитов, непрореагировавшая часть зерен цемента с оболочкой новообразований в виде системы глобул с постепенно убывающей к их поверхности плотностью, контактной зоны между глобулами, состоящей из различных новообразований, а также включает поры, неплотности и дефекты структуры.

При определенных условиях происходит срастание контактов между частицами (молекул в кристаллиты и кристаллы, кристаллов и кристаллитов в зерна, зерен в макроскопический образец камня) с образованием пространственной надмолекулярной дисперсно-кристаллической структуры, строение которой также с дефектами разного уровня: вакансии, дислокации и субмикropоры внутри кристаллитов, макropоры между кристаллитами и зернами, а также микро- и макродефекты (воздушные поры, усадочные трещины) технологического происхождения.

Образование надмолекулярной структуры в результате взаимодействия частиц на различных уровнях дисперсно-кристаллической фазы сопровождается возникновением дефектов и порового пространства в цементном камне.

Наблюдаемое развитие собственных деформаций и напряжений в неоднородной структуре цементного камня без внешней нагрузки обусловлено локальным расклинивающим капиллярным давлением адсорбированной воды, объемным кристаллизационным давлением, вызвавшим в структуре уравновешенное напряженное состояние и др. факторами.

Таким образом, собственные напряжения, возникающие в процессе схватывания и твердения цементного камня и бетона, существенно отражаются на его физико-механических свойствах и, складываясь с напряжениями от внешней нагрузки, изменяют реальную прочность и трещиностойкость бетона.

В экспериментальных и теоретических исследованиях [2-7; 10-13; 17-19 и др.] анализировалась концентрация напряжений вокруг пор и зерен заполнителя, между заполнителем и цементным камнем и, сопротивлением структуры цементных систем воздействию внешним нагрузкам. Определялись напряжения, вызывающие первые трещины и использовались методики, рассматривающие процесс деформирования бетона от постепенного накопления повреждений и дефектов структуры. Согласно современным теоретическим представлениям [7] проведение механических испытаний материалов, обеспечивающих их равновесный процесс разрушения, возможно при получении полной с ниспадающей ветвью диаграммы деформирования бетона.

Выявление закономерностей микро- и макроразрушений в центрально сжатом бетоне и цементном камне с реализацией полных равновесных диаграмм деформирования, характеризующих свойства материала и корректно отображающих реальные физические процессы его разрушения, автором осуществлялось с использованием критериев [3], отражающих характер изменения поперечных (ϵ_{cy}), продольных (ϵ_{cx}) и объемных (θ_c) деформаций, коэффициента Пуассона (ν), скорости прохождения ультразвука (Δt ; R_{crc}^o ; R_{crc}^v) на различных уровнях механических испытаний призм (100 x 100 x 400 мм) в возрасте 180 дней из тяжелого и мелкозернистого бетона прочностью 100 МПа (рис. 4).

Для получения стабильного характера разрушения разработан и реализован упругий кондуктор (принцип динамометра), устанавливаемый в стандартную испытательную машину ПСУ-250, который снижает ее способность накапливать потенциальную энергию, увеличивает жесткость системы "испытательная машина - образец" и способствует перераспределению нагрузки N , подаваемой машиной, между плитами кондуктора N_k и образцом N_0 . Образцы испытывали кратковременной статической нагрузкой до разрушения с использованием индивидуальной оснастки крепления приборов (индикаторов часового типа, ультразвуковых щупов) на поверхности образцов и кондукторе. Давление на образец передавалось через жесткие металлические плиты кондуктора с ножевыми шарнирами. Испытания производились по стандартной методике путем постепенного (ступенями) нагружения призм осевой сжимающей нагрузкой с 5-минутной выдержкой на каждой ступени. Величину нагрузки на каждой ступени принимали примерно $0,1f_c$, в уровнях до $0,2f_c$ и после $0,8f_c$ ее уменьшали вдвое. Измерение продольных деформаций осуществляли индикаторами часового типа с ценой деления $0,01$ мм и базой измерения 200 мм (точность измерения $5 \cdot 10^{-5}$), поперечных деформаций – индикаторами часового типа с ценой деления $0,002$ и базой измерения 100 мм (точность измерения $1 \cdot 10^{-5}$). Кроме того деформации замерялись при помощи тензорезисторов с базой 20 мм и электронного измерителя деформаций (точностью измерения $1 \cdot 10^{-5}$).

Характер процесса трещинообразования структуры бетона в образцах контролировался по изменению времени распространения ультразвуковых колебаний через бетон в поперечном направлении, для чего производили сквозное прозвучивание ультразвуком с помощью прибора УКБ-1М. Ультразвуковые щупы (преобразователи) крепились по диагонали в средней части образца с базой 290 мм. Для улучшения передачи акустической энергии и качественного присоединения преобразователей к бетону (до момента разрушения) в качестве связующей среды исполь-

зовался состав из воска и канифоли. Усредненные продольные ε_{cx} и поперечные ε_{cy} относительные деформации, а также время распространения ультразвуковых колебаний через бетон на каждой ступени нагрузки измеряли до и после выдержки. Предельные величины сжатого ε_{clx} ; ε_{culx} и ε_{cly} ; ε_{culy} растянутого бетона образцов фиксировали индикаторами и тензодатчиками сопротивления.

Анализ графиков равновесных диаграмм (рис.4) деформирования одноосно нагруженного крупнозернистого и мелкозернистого бетонов характеризующих изменение поперечных (ε_{cy}), продольных (ε_{cx}) и объемных (θ_c) деформаций, коэффициента Пуассона (ν), скорости прохождения ультразвука (Δt ; R_{crc}^o ; R_{crc}^v) на различных уровнях обнаружил ряд принципиальных особенностей:

а) при нагружении бетонных образцов до уровня $0,4f_c$ (нижняя параметрическая точка R_{crc}^o [3]) в крупнозернистом (а) и мелкозернистом (б) бетоне наблюдается процесс уплотнения образовавшихся вакансий, дислокаций, субмикропор внутри кристаллов, а также микро- макропор цементного камня, включая микро- и макродефекты (воздушные поры и усадочные трещины) структуры бетона. Сравнивая графики зависимости $\sigma_c/f_c - \Delta t$ скорости распространения ультразвуковых колебаний через бетон на этом уровне нагружения можно отметить, что в тяжелом бетоне микро- и макродефектов несколько больше, чем в мелкозернистом, в цементном камне которого размер микро- макропор и объем пор геля уменьшается, по видимому, за счет кристаллических новообразований в ходе продолжающейся гидратации зерен негидратированного цемента;

б) в тяжелом бетоне в уровнях $0,4 \dots 0,8f_c$ нагружения образцов и, до уровня $0,9f_c$ - в мелкозернистом бетоне (верхние параметрические точки R_{crc}^v [3]) графиков зависимости $\sigma_c/f_c - \Delta t$ наблюдаются диссипативные процессы развития микро- макротрещин в цементном камне и бетоне и слияние их в начальные участки формирующихся магистральных трещин. Увеличение интенсивности образования, развития микро- и макротрещин в цементном камне и бетоне обуславливает рост относительных псевдодеформаций на этом участке диаграмм $\sigma_c/f_c - \varepsilon_{cx}$ (ε_{cy});

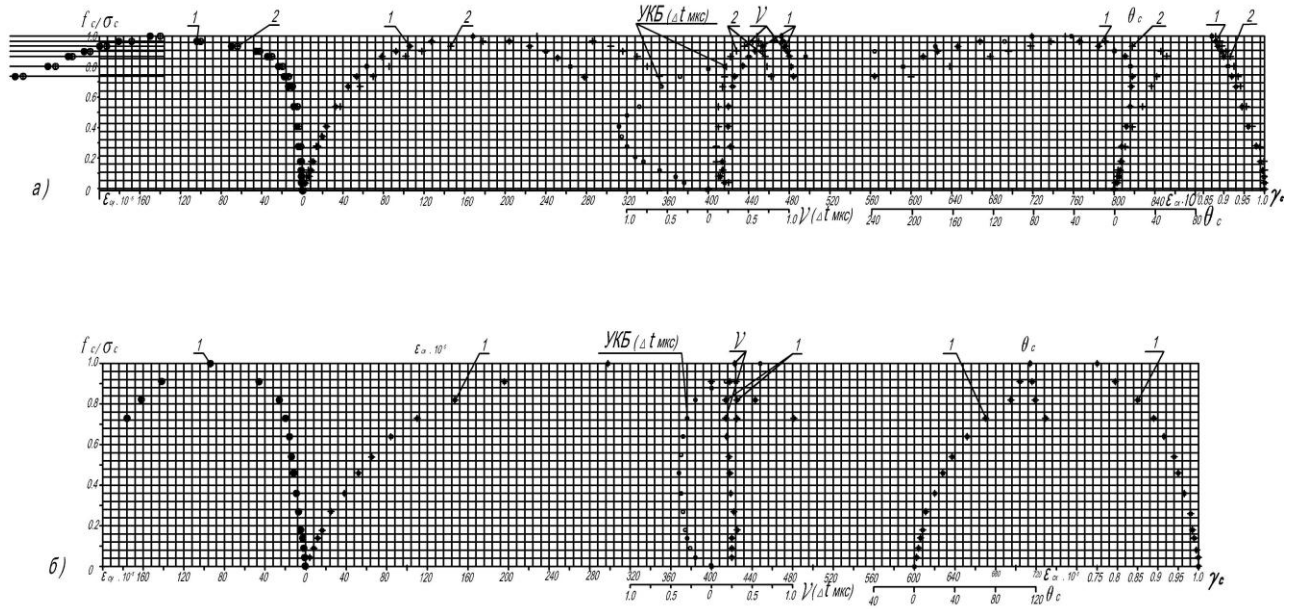


Рис. 4. Графики равновесных диаграмм деформирования одноосно нагруженного крупнозернистого (а) и мелкозернистого (б) бетона, изменения поперечных (ϵ_{cy}), продольных (ϵ_{cx}) и объемных (θ_c) деформаций, коэффициента Пуассона (ν) и коэффициента упругости (γ_c), скорости прохождения ультразвука (Δt); *; ⊕ - продольные (ϵ_{cx}) и поперечные (ϵ_{cy}) деформации контролируемые тензодатчиками; +; ⊕ - продольные (ϵ_{cx}) и поперечные (ϵ_{cy}) деформации контролируемые индикаторами; ○ ⊗ - скорость прохождения ультразвука (Δt), параметрические точки (R_{rc})

в) с уровня нагружения образцов $0,75 \dots 0,8f_c$ в тяжелом и мелкозернистом одноосно сжатом бетоне (чаще прочностью $f_c = 30; 70$ МПа и выше) наблюдается интенсивное трещинообразование, которое с уровня $0,6 f_c$ до $0,75f_c$ при подаче нагрузки отражается на экране прибора УКБ-1М резкими сдвигами (колебаниями) синусоиды. В процессе выдержки нагрузки на ступени очередного уровня синусоида стабилизируется до и после съема показаний. С уровня $0,75 f_c \dots f_c = \sigma_c$ и $f_c = \sigma_c \dots 0,75 f_c$ процесс нагружения образцов дополнительной нагрузкой и время выдержки сопровождается резкими сдвигами синусоиды, с увеличением интенсивности. Процесс разрушения бетона и образцов сопровождается интенсивным колебанием и изменением формы синусоиды. Этот эффект, кроме показаний прибора и использование кондуктора позволили контролировать процесс разрушения образцов до полного разрушения.

Неисправность прибора исключена. Манипуляции с незагруженным образцом и под нагрузкой показали, что резкие сдвиги синусоиды возможны при разрывах (взрывах) в теле образца. Использование более современных ультразвуковых приборов и дефектоскопов показало, что их технические характеристики, не столь чувствительны к процессам механического разрушения бетона в образце, как УКБ-1М.

Таким образом, процесс деформирования и разрушения цементного камня, тяжелого и мелкозернистого бетона в уровнях $0,75 f_c \dots f_c = \sigma_c$ с использованием кондуктора сопровождается интенсивным развитием псевдопластических деформаций (раскрытием, ростом и слиянием в участки формирующихся магистральных трещин);

г) уровень ниспадающей ветви ($f_c = \sigma_c \dots 0,75 f_c$) полных равновесных диаграмм (рис. 4) деформирования одноосно нагруженного крупнозернистого и мелкозернистого бетонов характеризует процессы роста и слияния фрагментов магистральных трещин с развитием их концевых участков. После формирования магистральных макротрещин наблюдается непрерывный динамический их рост при отсутствии видимых пластических деформаций у вершины развивающейся трещины. Во многих случаях траектория ветвления магистральных трещин имеет 2; 3 и более направления. Процесс формирования и развития магистральных трещин сопровождается постепенным исчерпанием сопротивляемости бетона вследствие изменения его физико-механических характеристик.

Полные равновесные диаграммы (рис. 4) деформирования одноосно нагруженного крупнозернистого и мелкозернистого бетона и изменение поперечных (ϵ_{cy}), продольных (ϵ_{cx}) и объемных (θ_c) деформаций, коэффициента Пуассона (ν), скорости прохождения ультразвука (Δt ;

$R_{cre}^o; R_{cre}^v$) на различных уровнях позволяют наблюдать процессы образования, страгивания и интенсивного роста трещин и, следовательно, учитывать при прогнозировании обеспечения надежной, длительной и безопасной эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций в зданиях и сооружениях на стадии их исследований, проектирования и эксплуатации.

Выводы

Получены результаты исследований процесса образования, страгивания и интенсивного роста трещин одноосно нагруженного крупнозернистого и мелкозернистого бетона с использованием полных равновесных диаграмм деформирования.

Summary

The results of research on education, unstable and intensive growth of cracks uniaxially loaded with coarse and fine concrete using the full equilibrium deformation diagrams.

Литература

1. Ахвердов И.Н. Механизм деформирования и разрушения бетона в свете новых исследований по структурообразованию цементного камня / VI конф. по бетону и железобетону. Материалы секций, подготовленные Белорусским республиканским правлением НТО стройиндустрии // Минск. 1966. С 3-12.
2. Баженов Ю.М. и др. Зависимость трещиностойкости бетона от его структуры//Энергетическое строительство. 1977.С 39-50.
3. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона.- М.: Стройиздат, 1962. – 96 С.
4. Берг О. Я., Хубова Н.Г., Щербаков Е.Н. Разрушение контакта между заполнителем и раствором при сжатии / Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1972. - № 8.-.13-17.
5. Беккер В.А., Кичигина Г.И. О методике исследования состояния макроструктуры бетона при кратковременном сжатии// Изв. вузов. Строительство и архитектура .1987. - №7. – С5-9.
6. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат. 1961. - 201С.
7. Волков С.Д. Проблема прочности и механика разрушения / Проблемы прочности. 1978. № 7. С 3-10.

8. Гвоздев А.А., Яшин А.В. и др. Прочность, структурные изменения и деформации бетона. – М. : Стройиздат. 1976. - 400С.
9. Довжик В.Г. Учет эксплуатационной влажности бетонов при расчете и нормировании их теплопроводности // Бетон и железобетон. 2008. - № 3.-С 6-10.
10. Зайцев Ю.В., Ковлер К.Л. и др. Трещиностойкость бетонов с различной степенью неоднородности структуры // Бетон и железобетон. 1989 - № 11. С.25-27.
11. Ицкович С.М. Варианты моделирования микробетона / Изв. вузов. - 1986. № 8. С 50-54.
12. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – Москва. : Стройиздат, 1996. -411С.
13. Скрамтаев Б.Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси. – М.: ЦНИИПС и ВИА РККА. 1936.-320С.
14. Совгира В. Н., Совгира В. В. О упруго - пластических характеристиках бетона при одноосном и внецентренном сжатии// Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 31 – Одеса: ОДАБА, 2008. С.337-347.
15. Совгира В. Н., Кобринец В. М., Совгира В. В. К вопросу об аналитическом описании диаграммы деформирования бетона // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 32 – Одеса: ОДАБА, 2008. С.289-297.
16. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. – М.: Стройиздат. 1974. 192 С.
17. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids –Phil. Trans. Roy. Soc., sec. A., 1921, 221. -p. 163-173.
18. Irvin G. R. Fracture: Handbuch der Physik, v. 6. Berlin: Springer Verlag, 1958. 551 p.
19. Orawan E. Energy criteria of fracture. Wel. Res. Suppl., v. 20, 1955. Pp. 157-172.
20. Wittmann F.H. (Ed) Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete. Elsevier Science Publisher B.V./ Amsterdam, 1986.
21. Slowik V., de Barros Leite J.P., Zaytsev Yu. V. Meso-Level Modeling of Concrete Fracture by Using Particle and Truss Models. Materials Week, Proceedings (Munich, September 2000). Munich, 2000.