

На рис. 6 представлен план покрытия с указанием последовательности наступления предельного состояния структурной плиты. Из схемы видно, что из 30 стержней, которые постепенно выключаются из расчетной модели, 25 стержней находятся в верхней части плиты, практически все стержни являются элементами верхнего пояса.

Таким образом, при составлении расчетной модели было сделано:

- составлена расчетная модель адекватно описывающая действительную работу системы;
- определен действительный запас несущей способности (3 раза);
- выявлены слабые места системы;
- определен теоретический сценарий наступления предельного состояния конструкции;
- доказана ее живучесть и стойкость системы к прогрессирующему обрушению;
- установлено, что разрушение данной системы (и подобных) – не мгновенный процесс, не прогрессирующее обрушение, а процесс происходящий во времени с последовательным увеличением нагрузки, при прекращении увеличения нагрузки процесс разрушения прекращается;
- физический смысл предельного состояния расчетной модели – образование пластических шарниров в структуре. Структура изменяет систему работы, начинает работать как анизотропный материал. Для дальнейшего анализа необходима разработка другой математической модели.

Заключение. При помощи компьютерного моделирования были определены схемы разрушения структурных систем и величина разрушающей нагрузки. Разработанная математическая модель позволяет вскрыть резервы несущей способности структурных систем, проследить пути распределения усилий, а также дает возможность достоверно увеличивать несущую способность структурных конструкций путем увеличения несущей способности критических стержней системы.

Создана новая расчетная модель наиболее достоверно описывающая действительную работу структурной системы «БрГТУ» которая дает возможность определять напряженно-деформированное состояние конструкции на любом из этапов работы системы вплоть до момента разрушения и является наиболее оптимальной для расчета металлических пространственных систем.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – К.: Издательство «Факт», 2005. – 344с.
2. Провести теоретические и экспериментальные исследования работы стальных конструкций покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске: отчет о НИР/ Брестский государственный технический университет; руководитель В.И. Драган. – Брест, 2007. – 189с. – №ГР2007457.

Материал поступил в редакцию 09.02.11

DRAGAN V.I., MORILOVA N.L. Calculation of structural designs of system "BSTU" in physically nonlinear statement

In article the example of calculation of structural system "BSTU" in physically nonlinear statement is resulted. The settlement model has been approved on a fragment tested earlier, and on a canopy design in city park of Hojniki. Comparison of the experimental and theoretical data has yielded good results. For the resulted structural systems sizes of ultimate loads, destruction ways, reserves of bearing ability have been defined.

Comparison settlement and experimental data, definition of ways of destruction of system, ultimate load definition allow to speak about possibility of application of the developed mathematical model further for designing of structural systems of the wide-span combined designs of coverings for buildings of any appointments.

УДК 691.544

Протасевич А.А., Филимонова Н.В.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРУКТУРЕ БЕТОНА С ПОЗИЦИЙ ЕГО ПРОНИЦАЕМОСТИ

Введение. Интенсивность процессов массопереноса, протекающих в бетоне строительных конструкций, эксплуатируемых в условиях непосредственного контакта с влагой, зависит коренным образом от структуры самого материала. Внутреннее строение бетонного композита определяет, таким образом, основные его свойства: плотность, пористость, проницаемость и, как следствие, стойкость при воздействии внешних факторов. А с появлением бетонов нового поколения вопросы долговечности встали особенно остро. Данная проблема требует изначально обращения к детальному рассмотрению элементов структуры цементных систем с целью выявления возможных путей фильтрации.

Уровни структуры бетона. В зависимости от масштаба решаемых задач, связанных с определением свойств, состава, области применения тех или иных строительных материалов, их структуру принято рассматривать на различных масштабных уровнях. Существуют четкие представления о макро-, мезо- и микроструктурах бетона, весьма схожих по строению, но отличающихся масштабом и вещественным составом. Таким образом, главной особенностью бетона, которую отмечают, анализируя его структуру, является иерархичность и подобие строения на всех уровнях. Каждому масштабному уровню свойственны определенные процессы и внутренние взаимодействия, благодаря которым формируются совершенно определенные характеристики бетона в це-

лом. Иерархичность и самоподобие структуры бетона иллюстрирует рисунок 1 [1]. На всех масштабных уровнях бетон остается композитным материалом, и его структуре в наибольшей степени соответствуют модели типа «матрица – включение».

В таких моделях в качестве включений рассматриваются зерна крупного или мелкого заполнителя, а также частицы негидратированного цемента (в зависимости от уровня), а в качестве матрицы – цементно-песчаный раствор, цементный камень или гидратные фазы (чаще всего это гель C-S-H). Необходимо отметить, что модели типа «матрица – включение» приобрели большую популярность при оценке эффективных жесткостных и деформативных характеристик бетона как композиционного материала. При анализе структуры бетона с точки зрения его проницаемости и долговечности, положения о подобии и иерархичности отходят на второй план и, более того – теряют всякий смысл, когда речь заходит о пористости.

Проницаемость традиционных бетонов на плотных заполнителях зависит в первую очередь от пористости цементного камня. С требуемой точностью параметры пористости могут быть рассмотрены только на микроуровне. Причем аналогов на мезо- или макроуровнях поры цементного камня не имеют. Вместе с тем некоторые макроуровневые параметры бетона (концентрация, форма, размеры включений, качество контакта) также важны для проницаемости и характерны исключительно для макроструктуры бетона.

Протасевич Анна Александровна, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

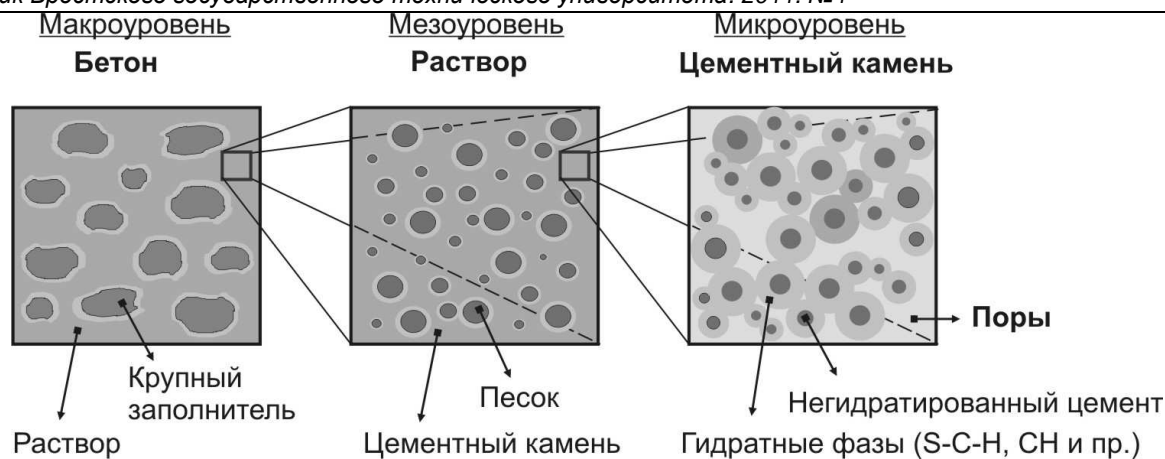


Рис. 1. Многоуровневая модель структуры бетона [1]

Микроструктура бетона. Цементное тесто некорректно рассматривать как механическую смесь вяжущего вещества с водой. Образовавшаяся в процессе твердения и гидратации цементная матрица представляет собой микроскопически неоднородную дисперсную систему, образно названную В.Н. Юнгом «микробетоном». Изначально пластично-вязкое тесто преобразуется в прочный цементный камень, являющийся трехфазной системой и характеризующийся капиллярно-пористым строением. К элементам структуры цементного камня относятся [2–4]:

Твердая составляющая: включения в виде непрореагировавших остатков зерен цемента, выполняющие роль заполняющей части в «микробетоне» и продукты гидратации в качестве вяжущего.

Поровое пространство, представляющее собой совокупность воздушных ячеек, пустот, полостей, каналов. Первоначально занятое водой впоследствии оно частично заполняется продуктами гидратации.

Вода – активный элемент структуры, участвующий в образовании гидратных соединений и формировании пор. Кроме того, в воде, находящейся в капиллярах и крупных порах, содержатся в растворенном состоянии различные вещества и в первую очередь гидроксиды кальция, натрия, калия и др., что обуславливает высокую щелочность среды, обеспечивающую защиту арматуры от коррозии.

Очевидно, что с позиций проницаемости особый интерес среди всех перечисленных компонентов микроструктуры представляет пористость цементного камня. Возникновение пор в бетоне связано с физико-химическими процессами структурообразования в результате гидратации цемента и испарения влаги, не связываемой в новообразования. Поэтому часть объема цементного камня (иногда до 25–35%) приходится на поры и капилляры, оставленные водой, что негативно сказывается на проницаемости и связанных с ней эксплуатационных свойствах бетона.

Общий объем пор можно разделить на отдельные группы в зависимости от их размера, формы, происхождения и местоположения в структуре цементного камня [2, 3]:

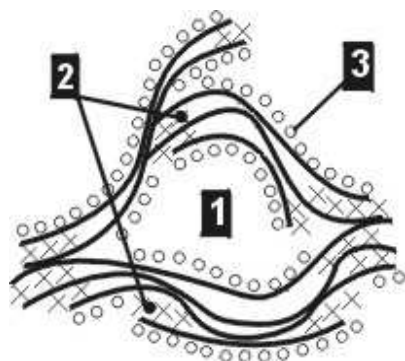
- по размеру:
 - микропоры – диаметром менее 100Å,
 - мезопоры – 100...1000 Å,
 - макропоры – более 1000 Å;
- по конфигурации: сферические, цилиндрические и щелевидные, а также замкнутые и сообщающиеся;
- по происхождению: гелевые; контракционные; капиллярные; седиментационные; технологические.

Гелевые поры (менее 100Å) представляют собой пространство (мельчайшие зазоры) между отдельными лепестками кристаллов гидросиликатов и других новообразований, имеющих слоистое строение (рис. 2). Поры геля заполнены адсорбционно связанной водой, для проникновения влаги извне недоступны. Их объем равен объему

находящейся в них воды и составляет, согласно Т. Пауэрсу, около 28% общего объема цементного геля. При твердении цемента при повышенных температурах под давлением объем гелевых пор, по данным Д.Роу, может быть снижен до 22% [4]. Гелевые поры не оказывают влияние на эксплуатационные свойства бетона, – например, на проницаемость или морозостойкость, – так как заполняющая их жидкость находится под влиянием силового поля частиц и теряет свои обычные физические свойства. Такая вода, например, не замерзает при температуре выше -78°C .

Контракционные поры¹ (100..1000Å) образуются в результате объемных изменений, обусловленных физико-химическими процессами взаимодействия цемента с водой. Кристаллизация новообразований протекает с уменьшением суммарного объема реагентов. При этом часть пространства, ранее занятого реагентами, освобождается с образованием мелких замкнутых пор. Эти поры положительно сказываются на морозостойкости бетона, так как при нормальном атмосферном давлении они не заполняются водой. Вода мигрирует в них под давлением, возникающим при ее замерзании. При этом контракционные поры являются резервным объемом для вытесняемой воды, снижая разрушительные растягивающие напряжения.

¹ Молекулярная контракция – уменьшение абсолютного объема продуктов гидратации клинкерных минералов по сравнению с суммарным объемом исходных компонентов. Такое стяжение объема свойственно всем минералам цемента. Контракция развивается на протяжении всего периода твердения, пока в структуре происходят реакции. Она приводит к уменьшению общего объема цементного теста до тех пор, пока не произойдет его схватывание, после чего между частицами структуры формируются жесткие кристаллические связи и уменьшение внешнего объема структуры, прежде свободное, становится ограниченным. Но контракция внутри структуры продолжается, при этом происходит внутреннее стяжение объема с появлением незаполненного пространства – контракционных пор. Т.о. внешние размеры материала после схватывания изменяются незначительно. Исследования А.В. Волженского позволили установить, что под влиянием контракции объем цементного камня должен бы уменьшиться, однако этого не происходит. В начале взаимодействия цемента с водой, когда тесто еще достаточно пластично и могло бы уменьшиться в объеме, контракция незначительна. С увеличением степени гидратации контракция возрастает, но объем затвердевшей системы не уменьшается. Результатом контракции является лишь увеличение пористости цементного камня, которая через 28 суток твердения составляет обычно 4–7 % его объема. При образовании пор в системе возникает вакуум, под влиянием которого они заполняются водой или воздухом в зависимости от условий твердения [4].



- 1- гелевые микрокапилляры,
- 2- гелевые межслоевые поры с адсорбированной водой,
- 3- вода, адсорбированная поверхностью слоистых кристаллов C-S-H.



а)

б)

Рис. 2. Слоистая структура цементного геля:

а) модель геля C-S-H, *Feldmann R.F., Sereda P.J.* [5, 6], б) изображение СЭМ слоистых кристаллов цементного камня

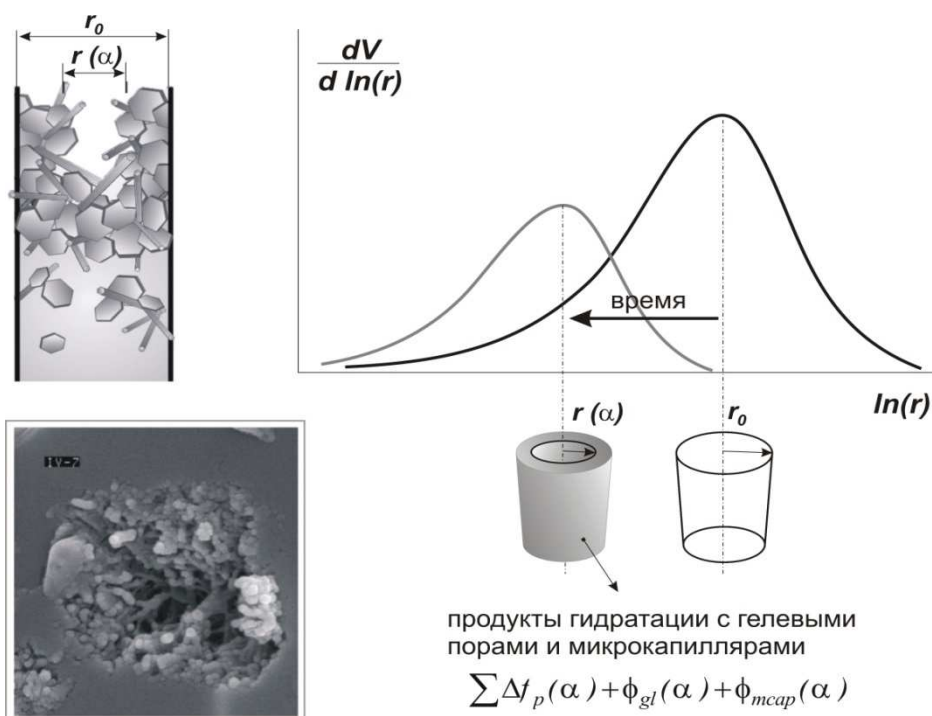


Рис. 3. Преобразование характеристик пористости (дифференциальных кривых распределения) в процессе твердения. Заполнение капилляров продуктами реакции

Капиллярные поры - макропоры, которые расположены между агрегатами частиц геля и имеют сравнительно большой диаметр – более 1000Å. Образуются при испарении избыточной воды затворения. В обычных условиях насыщения заполняются водой, которая может переходить в лед с соответствующим увеличением объема при температурах, мало отличающихся от нуля. Объем капиллярных пор сокращается по мере увеличения степени гидратации цемента за счет заполнения гидратными новообразованиями, рис.3. В зависимости от количества введенной в тесто воды затворения и продолжительности твердения объем капиллярных пор в цементном камне колеблется в пределах 0-40%. Вода в них удерживается силами поверхностного натяжения, причем поверхность мениска имеет

вогнутую форму. Сквозные капилляры диаметром меньше 0,2 мкм могут заполняться водой вследствие сорбции и конденсации паров. Капилляры диаметром более 0,2 мкм заполняются только при непосредственном соприкосновении с водой.

К дефектам структуры бетона не относятся поры, образующиеся за счет введения специальных воздухововлекающих добавок. Благодаря замкнутой форме и оптимальным размерам такие поры не влияют на проницаемость и способствуют повышению морозостойкости бетона.

На формирование системы пор оказывают влияние водоцементное отношение, тонкость помола и гранулометрический состав цемента.

Роль водоцементного отношения на раннем этапе твердения сводится к формированию начальной капиллярной пористости цементного камня. Как было сказано ранее, постепенно пространство, ранее занимаемое водой, заполняется продуктами гидратации, рис. 3. Однако, при высоких значениях В/Ц этого недостаточно для формирования плотной непроницаемой структуры даже при полной гидратации цемента, т.к. образующихся продуктов реакций не хватает, чтобы заполнить все капилляры цементного камня. При малых В/Ц складывается изначально более плотная структура, объем капиллярных пор в процессе гидратации быстро заполняется продуктами реакций, при этом значительная часть воды переходит в адсорбционно связанное состояние. Она формирует в структуре гелевую межслоевую и микрокапиллярную пористость. Заполнение микрокапилляров посредством продолжающейся гидратации затрудняется низкой растворяющей способностью адсорбированной воды. Без доступа свободной воды последующее преобразование пористости такой структуры при определенных условиях прекращается. С течением времени в условиях продолжающейся гидратации цемента уменьшается общая и интегральная пористость и увеличивается объем пор цементного геля, рис. 4.

Седиментационные поры возникают при недостаточном уплотнении бетонной смеси, ее расслоении, скоплении под зернами заполнителя влаги и последующем ее высыхании. Они имеют большие размеры (относятся к макропорам) и сильно снижают прочность контакта между заполнителем и цементным камнем. Седиментационные поры являются дефектами структуры и ухудшают как прочностные, так и эксплуатационные характеристики бетона.

К числу крупных пор относят также **технологические пустоты**. Они имеют сферическую форму, размеры от 50-100 мкм до 2 мм, являются замкнутыми либо сообщающимися с капиллярами, расчленяя которые препятствуют перемещению по ним воды. Образуются вследствие недоуплотнения бетона при формировании (дефекты), или путем вовлечения воздуха в процессе перемешивания. Объем вовлеченного воздуха может достигать 2 %.

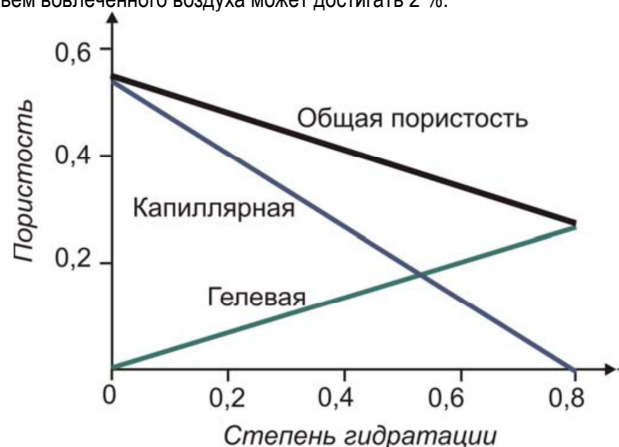


Рис. 4. Зависимость общей, капиллярной и гелевой пористости от степени гидратации цемента [7]

При увеличении удельной поверхности цемента при постоянном В/Ц уменьшается толщина водных прослоек вокруг цементных зе-

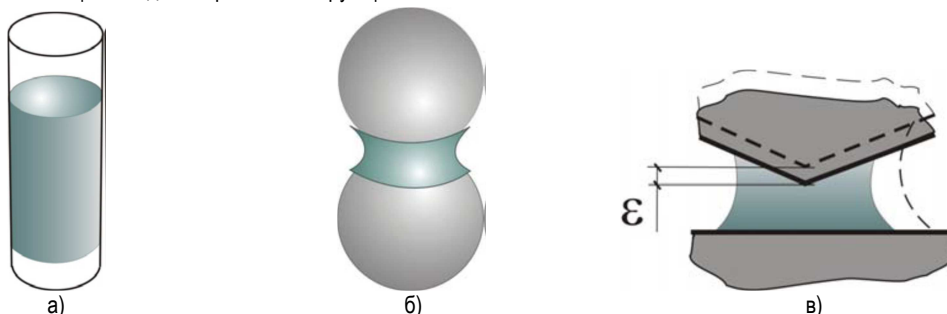


Рис. 5. Модели капилляров (а - [8]) и капиллярных контактов (б, в - [9])

рен, и как следствие – начальный средний радиус капилляров. На строение порового пространства также влияет механизм заполнения пор продуктами гидратации цемента. При взаимодействии с водой грубомолотых цементов с минимальным содержанием зерен мелких фракций (менее 5мкм) на поверхности цементных зерен образуются экранирующие оболочки. В этом случае капиллярное пространство заполняется продуктами гидратации путем их растворения и кристаллизации в приповерхностной зоне цементных частиц. В результате в цементном камне формируются преимущественно гелевые поры и макрокапилляры. Повышенное содержание в тонкомолотых цементах зерен мелких фракций (менее 5мкм) существенно изменяет механизм заполнения капиллярного пространства. Мелкие цементные зерна практически полностью растворяются в начальный период формирования цементного камня и кристаллизуются из пересыщенной жидкой фазы в капиллярном пространстве, заполняя значительную его часть (кристаллизационный механизм). Возникновение и рост кристаллогидратов при этом наблюдается не только вокруг поверхности зерен гидратирующихся цементных зерен, но и вокруг мельчайших твердых частиц. Заполнение внутреннего пространства цементного камня по такой схеме сопровождается образованием микрокапилляров при одновременном уменьшении его пористости.

Авторы некоторых работ [7, 8] рассматривают цементный камень как тело, во всех направлениях пронизанное цилиндрическими капиллярами различного диаметра (рис. 5а). Михайлов В.В. и др. [9] считают его дисперсной системой с множеством капиллярных контактов (рис. 5б, в). Очевидно, в цементном камне присутствуют и те и другие формы пор. Причем на ранних этапах твердения преобладают капиллярные контакты, а со временем, по мере преобразования структуры из состояния дисперсной системы в единый кристаллический сросток, капиллярные контакты уступают место капиллярным порам.

В результате анализа основных характеристик различных видов пор бетонного композита возможно предположить, что именно капилляры и седиментационные поры имеют самое непосредственное отношение к транспортным процессам, происходящим в сформированной структуре бетона при его увлажнении, т.к. пронизывая цементный камень, они способствуют росту проницаемости, плохому сопротивлению химической коррозии, низкой морозостойкости, потере защитных свойств по отношению к арматуре. Не случайно именно капиллярным, а в последнее время и седиментационным порам, уделяют особое внимание при исследовании проницаемости цементных систем.

Макроструктура бетона. Бетон является характерным представителем материалов конгломератного типа, включающий в себя заведомо разнородные компоненты. Длительное время бетон рассматривался, как двухфазный композитный материал, состоящий из заполнителей, представляющих дискретные элементы различных размеров, формы и объемного содержания, расположенных в континууме цементной матрицы. Такая идеализация структуры позволяла прогнозировать прочностные характеристики бетона. С появлением высококачественных бетонов большое значение наряду с прочностью приобрели параметры долговечности бетона. В связи с этим вопросы пористости цементного камня, морфология новообразований стали рассматриваться не только с точки зрения синтеза прочности бетона, но и с позиций управления такими свойствами бетона как проницаемость, морозостойкость и пр. В результате многочис-

ленных независимых исследований в этом направлении структура бетона, рассматриваемого ранее с точки зрения механики композита как двухкомпонентный материал, пополнилась новой структурной единицей – контактной зоной. На сегодняшний день при прогнозировании прочности и долговечности бетона рассматривают уже не контакт между двумя компонентами, единственной характеристикой которого была прочность, а приконтактную зону в цементном камне, характеризующуюся также специфической пористостью и составом гидратных фаз. Эти параметры контактной зоны существенно отличаются от аналогичных свойств цементного камня в остальном объеме бетона. Однако отличия эти убывают по мере удаления от поверхности заполнителя.

Контактную зону называют также «транзитной зоной» и, как уже было сказано, придают ей статус третьего компонента в макроструктуре бетона, обладающего собственными свойствами и играющего определенную роль в формировании прочностных и эксплуатационных характеристик бетона.

Таким образом, в макроструктуре бетона можно выделить следующие основные элементы:

- заполнитель,
- цементный камень,
- транзитную зону.

Заполнитель, считающийся инертной составляющей, на самом деле играет активную роль в формировании структуры цементной системы и обретении ею определенных свойств, в частности – проницаемости. При внутреннем водоотделении влага может скапливаться под зернами крупного заполнителя, ослабляя связь между ними и растворной частью. Вдоль слабой зоны развиваются внутренние усадочные трещины, нарушается монолитность, однородность, что приводит к анизотропии механических свойств и способствует росту проницаемости бетонного композита. Состояние контакта между зернами заполнителя и цементным камнем влияет на совместную работу камневидной составляющей и минерального клея под нагрузкой, а также на целостность конгломератной структуры и стойкость бетона. Некоторые заполнители способны к химическому взаимодействию с продуктами гидратации цемента, что приводит к усилению сцепления и росту непроницаемости в этой области. Физико-механическое сцепление обусловлено в основном миграцией к поверхности включений гидроксида кальция, образующегося при твердении портландцемента. В результате на поверхности зерен заполнителя появляются кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 . Прочность сцепления зависит от природы заполнителя, его пористости, шероховатости и чистоты поверхности, а также от вида и активности цемента, водоцементного отношения и условий твердения бетона [2, 3].

В зависимости от концентрации заполнителя в бетоне различают несколько типов структур. При больших расходах цемента зерна заполнителя находятся на большом расстоянии друг от друга – образуется структура с плавающим расположением зерен заполнителя. В такой смеси минимизировано трение между зернами заполнителя, поэтому ей свойственна высокая подвижность. Если объемная доля цементного теста относительно мала, то бетон характеризуется контактным расположением зерен. Такой бетон долгое время считался более эффективным с точки зрения экономии цемента и прочности, так как крупный заполнитель образует жесткий каркас и может воспринимать значительные нагрузки. Однако, постоянно растущие требования к долговечности бетонов способствовали пересмотру критериев эффективности структур. Так, известно, что бетоны с контактной структурой характеризуются, как правило, низкими марками по водонепроницаемости и морозостойкости, рис. 6.

Сегодня хорошо известно, что высокая концентрация заполнителя повышает вероятность перколяции² транзитных зон в структуре композита. А это пагубно сказывается на его проницаемости. Поясним этот тезис, рассмотрев основные особенности транзитной зоны бетона.

² От лат. «percolation» – просачивание, перетекание. Главной концепцией теории перколяции является идея связности. Порог перколяции определяется относительным объемом структуры в занимаемом пространстве, при котором наблюдается контактное объединение элементов рассматриваемой системы, что соответствует их переходу в состояние континуума, либо теряется её неразрывность.

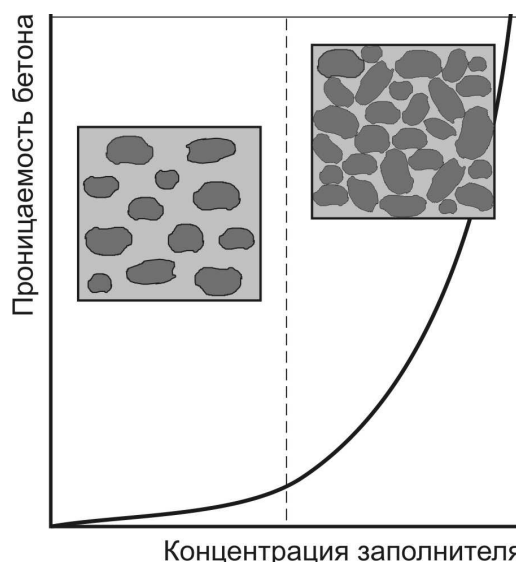


Рис. 6. Зависимость проницаемости бетона от типа структуры

Напомним, транзитная зона – это область цементного камня у поверхности заполнителя (толщиной 35–50 мкм), которая по своим свойствам заметно отличается от цементного камня в остальном объеме бетона. Формирование транзитной зоны в бетоне обусловлено следующими причинами [10–12]:

Менее плотная упаковка цементных частиц у поверхности заполнителя, что свойственно поведению любой дисперсной фазы вблизи плоской поверхности, рис. 7. Это явление называют *эффектом стенок*. Кроме того, в силу полифракционности цемента упаковка цементных частиц вблизи поверхности заполнителя отличается повышенной концентрацией мелких фракций, что приводит к увеличению пористости цементного камня у поверхности контакта.

Адсорбция воды на поверхности заполнителя. Пленки адсорбированной воды, отличающейся более высокой плотностью и упорядоченностью, способны вытеснять частицы цемента с поверхности заполнителя. В результате водоцементное отношение и, как следствие, пористость у поверхности заполнителя также существенно увеличиваются, рис. 7. По результатам экспериментальных данных в возрасте 28 суток пористость транзитной зоны в бетонах на плотном заполнителе составляет в среднем 35%, оставшейся матрицы – 7%.

Седиментационные явления в бетонной смеси. В процессе укладки бетонной смеси часто происходит расслоение. Причем внешне это не всегда заметно, не смотря на то, что практически всегда имеет место внутри структуры. Вода, как самый легкий компонент в бетонной смеси, поднимаясь вверх, задерживается под крупными зернами заполнителя, и в результате образуются седиментационные поры, рис.7. При малых водоцементных отношениях внутреннее расслоение менее заметно, однако структура контакта под зернами крупного заполнителя всегда формируется более рыхлой.

Транзитная зона имеет относительно стабильные особенности структуры. Многие авторы выделяют в ней несколько слоев, имеющих более или менее постоянную морфологию, рис. 8:

Контактный слой (2–3 мкм). Состоит преимущественно из кристаллов гидроксида кальция, направленных перпендикулярно к поверхности заполнителя.

Промежуточный слой (5–15 мкм). Наряду с кристаллами гидроксида кальция преобладают также кристаллы этtringита. Позднее в незначительном количестве образуются высокоосновные гидросиликаты кальция.

Переходный слой (5–20 мкм). Наиболее плотный. В этом слое уже встречаются цементные частицы, многие из которых гидратируют полностью, о чем свидетельствуют пустые оболочки гидросиликатов кальция.

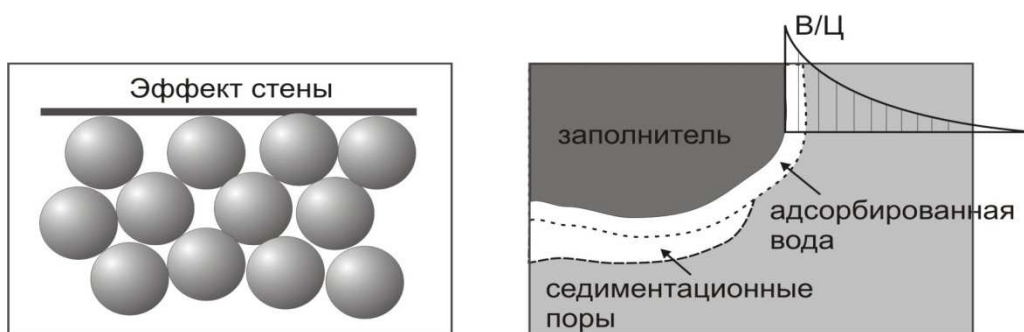


Рис. 7. Причины формирования транзитной зоны в процессе седиментации бетонной смеси [12]

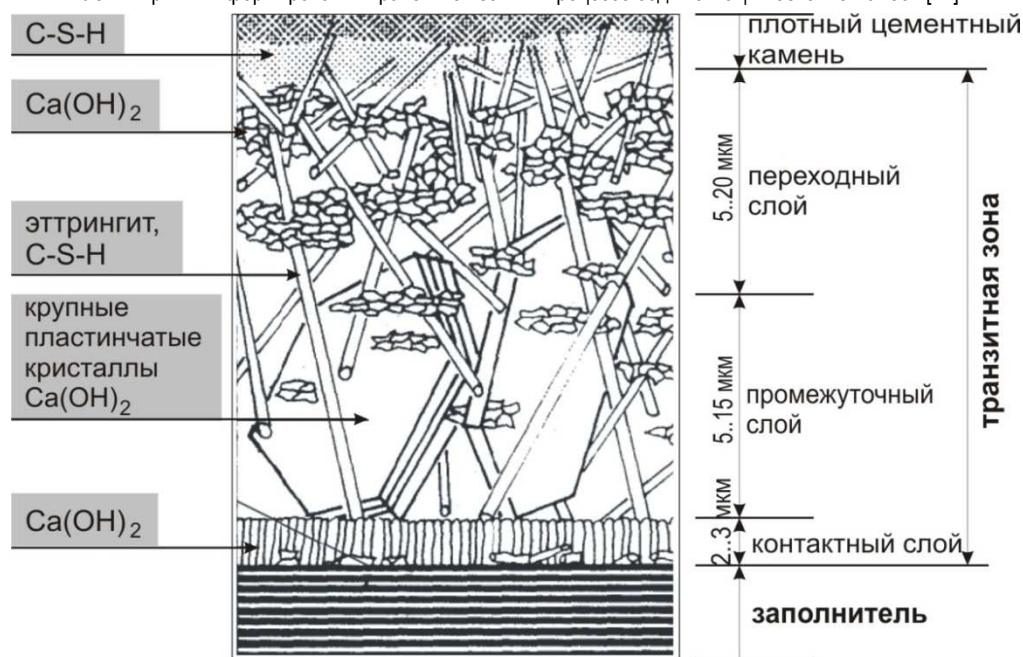


Рис. 8. Структура транзитной зоны [12]

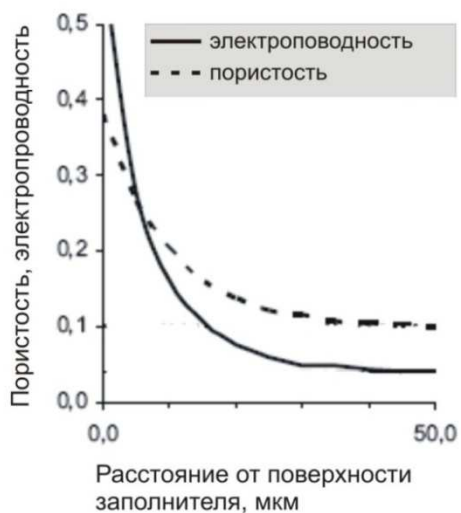


Рис. 9. Пористость и электрическая проницаемость цементного камня в транзитной зоне [12]



Важно также отметить, что химический состав транзитной зоны зависит от того, склонен ли заполнитель вступать в химические реакции с цементным камнем. Если для бетонов с инертными заполнителями, не реагирующими с цементным камнем, транзитная зона преимущественно состоит из гексагональных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$, этtringита, и небольшого количества геля C-S-H, то в случае с реакционно-способным заполнителем образуется дополнительный слой высокоосновных гидросиликатов кальция. Однако, в любом случае тенденция к увеличению пористости и повышенному содержанию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ сохраняется.

Таким образом, транзитная зона отличается от цементного камня в остальном объеме бетона в основном высокой пористостью и менее выгодным с точки зрения прочности и долговечности составом гидратных фаз. В связи с этим очень важно проектировать состав бетона таким образом, чтобы транзитные зоны не перекрывались, поскольку в противном случае значительно увеличивается проницаемость бетона и, соответственно, снижается стойкость и долговечность, рис. 9.

Заключение. Из выше изложенных сведений вытекает вывод о том, что проницаемость бетона напрямую зависит от следующих факторов:

- типа структуры на макроуровне (контактная либо плавающая);
- концентрации крупного заполнителя;
- качества сцепления зерен заполнителя с цементной матрицей;
- перколяции зон контакта;
- характера сформировавшейся пористости в микроструктуре цементного камня (как в транзитной зоне, так и в остальном объеме).

С целью прогнозирования проницаемости бетонного композита поровое пространство цементного камня, соответствующие расчетные параметры, а также разновидности моделей пор и способы их идеализации подлежат более детальному анализу в дальнейшем.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Powers, T.C. Physical Properties of Cement Paste. Proc. 4. Int. Symposium on the Chemistries of Cement. – Washington. – Vol. II. – 1960. – S. 577.
2. Горчаков, Г.И. Строительные материалы. – М.: Высш. школа, 1981. – 412 с.
3. Домокеев, А.Г. Строительные материалы. – М.: Высш. школа, 1989. – 495 с.

4. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
5. Красильников, К.Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская – Москва: Стройиздат, 1980. – 255 с.
6. Feldmann, R.F., Sereda, P.J. A Model for Hydrated Portland Cement Paste as deduced from Sorption length Change and mechanical Properties (1968), Materials and Structures 1, 509.
7. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер – М., 1979. – 344 с., ил.
8. Bentz D.P., Lura P., Roberts J.W.. Mixture Proportioning for Internal Curing. Reprinted from the Concrete International, Vol. 27, No. 2, pp. 35-40, February 2005.
9. Михайлов, В.В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер – М.: Стройиздат, 1974.– 389 с.
10. Michael A. Caldarone. High-Strength Concrete. A practical guide. - USA, 2009. – 273 p.
11. Павлова, И.П. Параметрические исследования процесса расширения напрягающего бетона с использованием структурной модели расширяющегося композита / И.П. Павлова, В.В. Тур – Вестник БрГТУ. – 2004. – № 1.
12. Lars Meyer, Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton: Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation/D 82 (Diss. RWTH Aachen), 2007.

Материал поступил в редакцию 28.02.11

PROTASEVICH A.A., FILIMONOVA N.V. The analysis of modern representations about structure concrete from positions of his permeability

Are considered micro- and macrostructure of a concrete composite. The various kinds por are described. The characteristic of a zone of contact of grains заполнителя with цементной by a matrix is given. The possible ways of a filtration of a moisture in concrete marked.

УДК 691.544

Филимонова Н.В., Протасевич А.А.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНА

Введение. Опыт применения современных высокоэффективных бетонов показал: какими бы выдающимися ни были технологические или физико-механические свойства бетона, истинную ценность они приобретают только тогда, когда одновременно обеспечена высокая долговечность материала. В этой связи прогноз долговечности бетона, особенно на стадии проектирования, имеет большое значение.

В большинстве случаев решающей характеристикой долговечности бетона является его проницаемость. Традиционно способность бетона длительно сохранять заданные свойства на требуемом уровне связывают с его плотностью, а точнее, с параметрами пористости и транспортными процессами, способствующими, например, распространению коррозии в структуре бетона или его морозной деструкции.

Долгое время пористость бетона оценивали преимущественно экспериментальными методами. Постепенно процесс исследования и оптимизации свойств бетона сместился к поиску общих или частных аналитических решений. Для этого структура бетона схематизировалась и упрощалась сообразно с требованиями решаемой задачи. Причем моделированию подвергались не только геометрические или физико-механические параметры бетона как композитного материала, но и процессы, сопровождающие его твердение или имеющие место в уже сформировавшейся структуре. А в последнее время моделирование структуры бетона становится одним из наиболее популярных методов исследования, поскольку именно модели позволяют разрабатывать научно обоснованные методы расчета и прогнозирования свойств материала. Поэтому в данной работе, кратко рассмотрев основные показатели пористости реальной структуры бетона, особое внимание уделим современным методам моделирования пористости.

Особенности проектирования состава бетона с требуемой проницаемостью. Водонепроницаемость бетона – способность не пропускать воду под давлением - зависит от следующих факторов:

- в/ц (при его снижении уменьшается макропористость);
- вида вяжущего (более высокую непроницаемость имеют бетоны на глиноземистом, расширяющемся, напрягающем, высокопрочном цементах, которые при гидратации присоединяют большее количество воды и образуют более плотный цементный камень);
- содержания добавок: уплотняющих, пластифицирующих, воздухововлекающих;
- температурно-влажностных условий твердения;
- способов уплотнения: вибрирования, центрифугирования, пресования, вакуумирования;
- характера пористости: размера, формы, замкнутости;
- возраста бетона: с течением времени растет количество гидратных новообразований, заполняющих поры.

Водонепроницаемость бетона функционально связана с его фильтрационной способностью. В учебных пособиях проницаемость бетона предлагается оценивать с помощью коэффициента фильтрации [1]:

$$K_{\phi} = \eta \cdot Q \cdot \delta / (S \cdot t \cdot p), \quad (1)$$

где η – коэффициент, учитывающий вязкость воды при различной температуре; Q – вес фильтрата, Н; δ – толщина образца, см; S – площадь образца, см²; t – время испытания образца, в течение которого измеряют вес фильтрата, с; p – избыточное давление, МПа.

Водопроницаемость бетона зависит от одноименных характеристик цементного камня, заполнителя, а также зоны контакта между ними. Основными путями фильтрации воды через бетон могут быть транзитная зона, микротрещины в цементном камне, дефекты в обла-