

ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА

Якимович В.Д.

Ползучесть является, на наш взгляд, одним из важнейших показателей бетона, позволяющим прямым или косвенным образом прогнозировать как долгосрочное поведение нагруженной конструкции во время ее эксплуатации в здании или сооружении, так и коррозионную устойчивость бетона этой конструкции.

В настоящее время существует большое количество теорий, так или иначе объясняющих возникновение и развитие ползучести.

Так, многие разделяют точку зрения Базанта, который считает [1], что ползучесть обусловлена выдавливанием воды из промежутков между частицами цементного камня под влиянием внешней силы.

Безусловно, ползучесть очень чувствительна к влажности. В то же время, хотелось бы заметить, что при относительной влажности воздуха 45...50%, а именно при такой минимальной влажности уже развивается ползучесть [1], влага остается лишь в порах бетона с радиусом менее 16 А. В порах с таким радиусом за счет мениска сконденсированной влаги развивается усилие стягивания стенок порядка 70 Мпа, что значительно превышает усилия, возникающие в бетоне конструкций при эксплуатации и при которых наблюдается и развивается ползучесть.

Более того, замечено [1], что высушенные образцы цементного камня, увлажняемые при нагружении, не отдавали, а поглощали воду, и ползучесть при этом развивалась с высокой скоростью.

Фельдман предположил [1], что при увлажнении за счет увеличения радиуса мениска сконденсированной в межслоевом пространстве влаги происходит набухание бетона. При высушивании же за счет уменьшения радиуса мениска воды возникает сила, стремящаяся сблизить поверхности слоев, что вызывает ползучесть бетона.

На это хотелось бы возразить, что, по закону сохранения, насколько бетон набухал при увлажнении, настолько же он должен был бы и уменьшиться в объеме при высушивании. Поэтому процесс, описанный таким образом, скорее можно было бы назвать усадкой при высыхании.

Кроме того, при такой схеме описания механизма ползучести не может быть увеличения удельной поверхности цементного камня. А ведь известно [1], что удельная поверхность цементного камня, измеренная методом адсорбции азота после нагружения, больше первоначальной на 10...20%. Естественно, что при этом нагружение сопровождалось ползучестью.

Виттман [1] предположил, что «при высокой влажности среды (>40%) давление набухания превосходит другие силы связи, удерживающие вместе частицы цементного камня, что и вызывает ползучесть».

Рассмотрим схему на рис. 1.

На ней изображен капилляр, в котором находится влага, сконденсированная при относительной влажности 40 (участок а) и 50 (участок в) процентов.

Как мы уже упоминали, радиус капилляра «в» будет не более 16 А, и при этом в нем будет развиваться усилие сжатия не менее 70 МПа. И это при допущении, что значение поверхностного натяжения воды мы приняли как близкое к воде свободной, а не капиллярной. А ведь в такой близости от поверхности (расстояние от центра около 5 мономолекулярных слоев), которая структурирует адсорбированную воду, можно и нужно ожидать изменения значения поверхностного натяжения воды, причем, мы уверены, в сторону его увеличения.

Радиус капилляра зоны «а» будет меньше, чем в зоне «в». Значительно будет отличаться и поверхностное натяжение воды в нем, и, соответственно, будет больше сила взаимодействия стенок. Появление воды в зоне «в» снизит усилие взаимодействия стенок за счет появления новой условной границы раздела фаз а-в, но снижение это, на наш взгляд, будет незначительным. И уж тем более невозможно предположить и объяснить возможность проникновения воды в зону «а» с последующей раздвижкой стенок капилляра. Это невозможно по той причине, что степень структурированности воды в этой зоне соответствует структуре практически твердого тела.

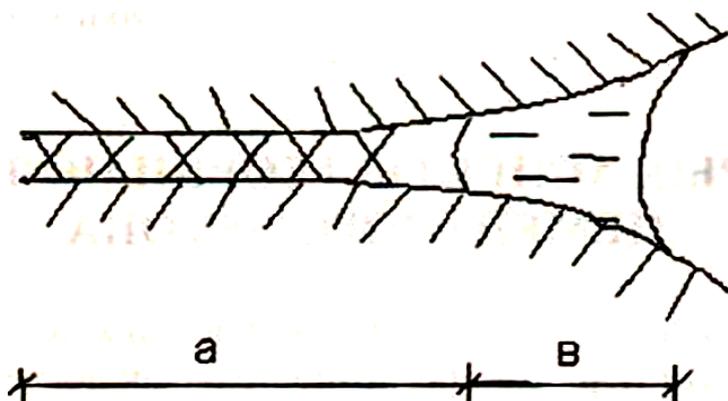


Рисунок 1

Поясним, что имеется в виду, на примере. Ребенок, который лепит «бабу» или «пирожки» в форме в песочнице из увлажненного песка, имеет дело с тем же явлением. Однако отличие состоит в том,

что радиус капилляров смоченных песчаных частичек, который скрепляет их, настолько велик, что при приливании воды изменение поверхностного натяжения столь значительно, что частицы песка под действием силы тяжести распадаются.

Как видим, у приведенных гипотез имеются недостатки. Однако их объединяет одно важное обстоятельство: все авторы при выдвигании гипотез опирались на необходимость наличия в цементном камне слоев, поведение которых так или иначе обуславливало ползучесть.

Наличие слоев в цементном камне, соединенных между собой водными прослойками, предполагают многие другие исследователи. Причем следует отметить, что делали они эти выводы или предположения, изучая самые различные стороны поведения камня. Однако обнаружить в печати убедительное объяснение появления этих слоев при твердении цемента нам не удалось. Тем не менее, мы также убеждены, что ползучесть в кристаллическом по своей природе материале без наличия слоистой структуры невозможна.

Основываясь на этом и не вдаваясь в подробности нашего представления об образовании слоистости в цементном камне, попробуем с этих позиций проследить за возникновением и развитием ползучести. Но перед этим зададимся постулатом, что не вся гидратированная структура цементного камня, а лишь ее часть, пусть даже ничтожно малая по отношению ко всей прогидратировавшей массе, состоит из слоев. Это положение может быть подтверждено относительно низкими значениями удельной поверхности цементного камня, определенными по адсорбции азота на образцах, высушенных при нулевой влажности и глубоком вакууме $1/1$, а также высказываемой там же некоторыми исследователями предположении о существовании зон или участков ползучести, коими мы и считаем вышеназванные слои.

На рис.2 показано поведение слоев гидратированной части цементного камня, соединенных прослойкой воды, при сдвиговом усилии. Возникновение сдвигового, а не только сжимающего, усилия объясняется изначальным расположением цементных зерен при твердении. Их хаотичное расположение в последующем и приводит при сжимающих усилиях к возникновению усилий сдвига.

Вариант а представляет собой последствия попытки смещения слоев друг относительно друга. В этом случае радиус капилляра изменяется от r до R . Площадь границы раздела фаз воздух-межслоевая вода возрастает, что неизбежно вызовет возникновение силы, стремящейся к возвращению системы в исходное положение. При снятии внешнего сдвигового усилия это и происходит.

Поведение слоев цементного камня при напряжениях сдвига.

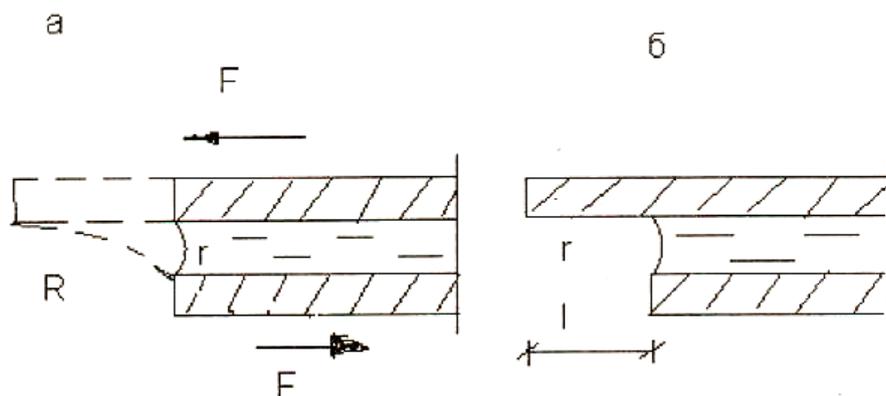


Рисунок 2

Таким образом, этот вариант модели описывает работу цементного камня в упругой зоне.

Однако все это будет происходить до тех пор, пока усилие сдвига не превысит силу взаимодействия межслоевой воды и поверхности слоя цементного камня. Как только усилие сдвига окажется выше силы смачивания, произойдет «ресмачивание», и водный мениск вернется к радиусу r , что и изображено в варианте б. Но, в отличие от предыдущего случая, после снятия внешней нагрузки система останется в положении, когда два слоя будут смещены друг относительно друга на расстояние l . Таким образом, вариант б описывает работу модели в зоне пластических деформаций, которая, собственно, и является ответственной за ползучесть.

Следует отметить, что здесь подразумевается не обычное смачивание или «ресмачивание» свободной водой любой гидрофильной поверхности, а скорее перераспределение молекул воды по новой поверхности под действием внешней силы, поскольку молекулы воды в межслоевом пространстве ориентированы относительно поверхностей скрепляемых слоев. С точки зрения усилий, требуемых на преодоление силы смачивания, не стоит уповать на тот факт, что с одной стороны слоя будет происходить «ресмачивание», а с другой смачивание, на основании чего затраты энергии с одной стороны компенсируются выделением ее с другой. Эти процессы происходят на расстоянии, вследствие чего выделяемая энергия в одном конце слоя не перейдет в другой, а будет потрачена на разогрев системы. Аналогию можно провести с ходьбой по болоту, когда, казалось бы, человек не должен был бы почти тратить энергию на передвижение, поскольку одну ногу он с усилием достает из болота, но зато другую с легкостью опускает.

Поскольку на «ресмачивание», как и на смачивание, требуется время, то поэтому и ползучесть развивается достаточно медленно. Скорость ее будет в первую очередь определяться величиной внешнего усилия, скоростью приложения нагрузки и температурой, которая, в свою очередь, будет влиять на значение поверхностного натяжения водной прослойки.

Как мы видим из рис. 2, во время проявления ползучести (вариант б) происходит увеличение площади поверхности. Усилие при этом пропорционально величине вновь образованной поверхности и скорости нагружения. Последнее связано со способностью, в зависимости от скорости нагружения, в той или иной мере релаксировать, перераспределять напряжения в цементном камне, либо концентрировать их, не успевая перераспределить. Это, на наш взгляд, является причиной разрушения одного и того же бетона при разных усилиях в зависимости от скорости нагружения.

Величина вновь образованной поверхности напрямую связана со значением свободной энергии (поверхностным натяжением) поры цементного камня. Поверхность поры состоит из образованных при гидратации кристаллов и воды, скрепляющей слои некоторых из этих кристаллов. Но свободной энергией поверхности поры, в приложении к развитию напряжений и деформаций, будет некое среднее значение их поверхностных натяжений, а/меньшее из них. Аналогично слабому звену в цепи, определяющему его общую прочность. На наш взгляд, таковым будет поверхностное натяжение межслоевой воды.

Общее увеличение (а в некоторых случаях уменьшение) поверхности поры будет состоять из суммы дискретных увеличений (уменьшений) поверхностей слоев кристаллов, рис.3.

Изменение общей поверхности поры при ползучести

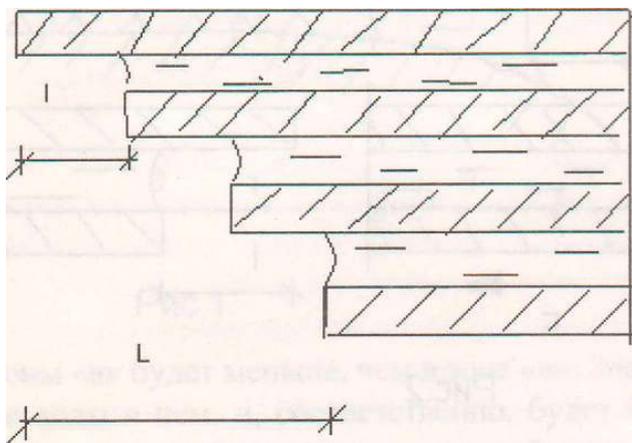


Рисунок 3

Логично предположить, что чем больше будет слоев, и чем больше будет места в поре для развития суммарных деформаций, тем больше будет развиваться ползучесть. Но зато при медленном нагружении, в случае исчерпания деформаций в одном слое, процесс будет развиваться без разрушений в следующем слое. При быстром же приложении нагрузки - трещина и разрушение.

Ползучесть при высушивании можно объяснить, рассмотрев рис.4.

Как видно из рисунка, потеря воды при высушивании в широкой части устья приводит к перемещению мениска воды в узкую часть, в результате чего резко возрастает усилие сжатия стенок А поскольку одна из стенок прямая (плоская), а другая изогнутая (либо обе изогнуты, но с различной кривизной), то появляется результирующая сила F , стремящаяся сдвинуть верхний слой относительно нижнего. Кроме ползучести, это может развивать растягивающие напряжения.

Напрашивается аналогия, что подобные причины и механизм лежат в основе усадочных явлений. Тем более, что Паррот [1] нашел линейную зависимость между усадкой и ползучестью цементного камня, проходящей при различных температурах в интервале 20...95 градусов.

Конфигурация образовавшейся после отверждения цементного камня поры определяет центры наиболее активной ползучести при повышении влажности среды (рис.5), поскольку в этих местах конденсируется влага и снижается поверхностное натяжение в слое.

Развитие ползучести при высушивании

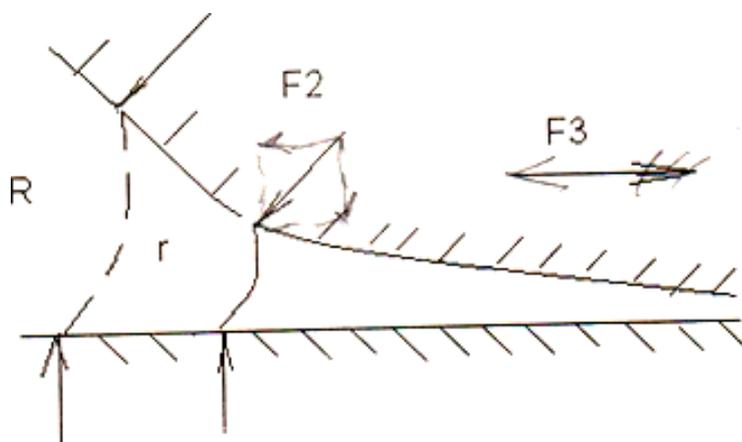
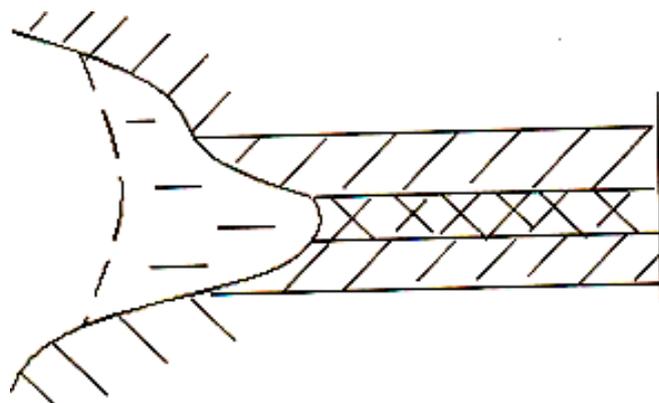


Рисунок 4

Т.к. граница раздела «межслоевая вода-воздух» заменяется на «межслоевая вода - свободная вода».

Активизация ползучести при повышении влажности среды

Рисунок 5



Список источников

1. В. Рамачандран и др. Наука о бетоне,- М., Стройиздат, 1986.