

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ ФИБРОБЕТОНЫ ПОВЫШЕННОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ, ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ И МОРОЗОСТОЙКОСТИ ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Гапоненко Е.А., Мишутин А.В.

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

В современном гидротехническом строительстве и железобетонном судостроении широко применяются тонкостенные конструкции [1]. Стенки каналов и конструкций водопропускных сооружений изготавливаются толщиной 8-12 см, а корпуса плавучих железобетонных сооружений - от 8 до 16 см при большом проценте насыщения стальной арматурой. Бетон таких сооружений подвергается одновременному и неравномерному влиянию различных эксплуатационно-климатических факторов: замораживание и оттаивание, увлажнение и высушивание, воздействие солей, обрастание водорослями и живыми организмами, а также давление и динамические воздействия жидкости и льда.

Определенное количество свободной воды содержится в бетоне всех конструкций, в том числе и не находящихся в контакте с влагой. Влагосодержание бетона в газовой среде определяется силами сорбционного увлажнения [2,31]. Для плавучих и гидротехнических сооружений помимо увлажнения в подводной части проявляется также действие гидростатического давления (рис.1.а). Схема величин градиентов увлажнения для типичной конструкции плавсооружения с учетом капиллярного подсоса показана на рис. 1.б.

Как известно [4], в структуре бетона присутствуют технологические трещины (ТТ), которые могут развиваться в эксплуатационные (ЭТ), внутренние поверхности раздела (ВПР) и поры. Под действием воды, как адсорбционно-активной жидкости, происходят изменения в геометрических характеристиках ТТ, ЭТ и ВПР, что вызывает общее изменение структуры и свойств бетона. Рассмотрим модель процессов, происходящих в клиновидных трещинах гидротехнических и плавучих сооружений, показанную на рис.2.

На рис.2.а, б и в показаны три трещины расположенные выше уровня воды, имеющие разную длину и разную степень заполнения водой. За счет образования менисков возникают силы, одной из составляющих которых является капиллярное давление P_k , которое зависит от радиуса мениска. То есть мениск жидкости давит на берега трещин, увеличивая ширину их раскрытия. В устье трещины при этом возникает «эффект Ребиндера», связанный с адсорбционным снижением прочности. Увеличение ширины раскрытия трещины может увеличивать и ее длину, т.е. вызывать рост трещины – на рис.2.а и рис.2.в. «новый» размер трещин пунктирной линией.

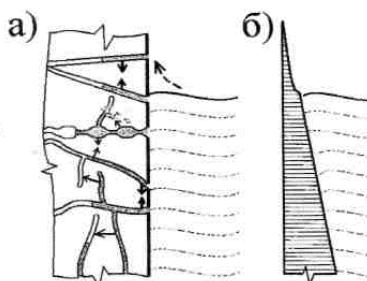


Рис. 1. Действие увлажнения и гидростатического давления на конструкции плавучих и гидротехнических сооружений (а) и схема величин градиентов

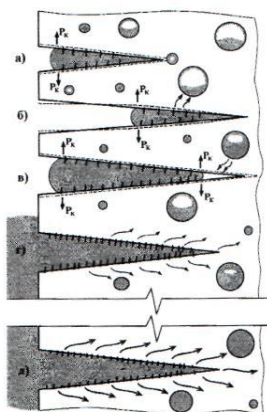


Рис. 2. Изменение параметров трещин при заполнении водой в

надводной части конструкции (а, б, в), а также в подводной при низком (г) и высоком (д) гидростатическом давлении

Однако ввиду того, что бетон имеет сложную капиллярно-поровую структуру устье трещины при прорастании может встретить пору, как показано на рис.2.а. В этом случае трещина теряет главный свой признак - устье, и превращается в ВПР, которая является практически безопасной для материала. Не исключена ситуация, при которой в устье трещины также возникнет мениск жидкости, как показано на рис.2.в. Это ведет к возникновению дополнительного капиллярного давления, способствующего увеличению ширины трещины.

В случае неполного насыщения водой следует также рассмотреть случай взаимодействия отдельных трещин, пример которого показан на рис.2.б. За счет действия капиллярных сил ближайших трещин (рис.2.а и рис.2.в) возникает градиент давления. Данный градиент, с одной стороны, способствует деструкции матрицы материала в кластере, ограниченном трещинами, с другой же стороны, препятствует увеличению ширины трещины.

В подводной части конструкции, которая исходя из условий эксплуатации плавучих и тонкостенных гидротехнических сооружений, обводнена лишь с одной стороны, в наружных трещинах не образуются мениски и, соответственно, отсутствуют силы капиллярного давления, увеличивающего трещину (рис.2.г и рис.2.д). Хотя наряду с этим сохраняется адсорбционным снижением прочности в устье трещины.

По нашему мнению, трансформаций начальных трещин в подводной части зависит от гидростатического давления, действующего на конструкцию, и от способности «самозалечивания» трещины. При низком гидростатическом давлении (рис.2.г) миграция воды в структуре бетона незначительна, соответственно не происходит интенсивного вымывания свободной извести из материала (коррозия 1-го вида по В.М. Москвину), а также практически не разрушаются новообразования реликтовых частей, прорастающие в тело трещин. Помимо того, в пласооружениях интенсивно проходят коррозионные процессы, которые можно отнести к третьему виду по классификации В.М. Москвина. Ведущим их признаком является накопление в трещинах, порах и других пустотах бетона кристаллов солей, образовавшихся за счет химических реакций взаимодействия агрессивной среды и составных частей новообразований цементного камня. То есть происходит кольматация трещин и пор также и продуктами коррозии, которые не вымываются при низком гидростатическом давлении. Суммарное действие новообразования реликтовых частей и продуктами коррозии можно рассматривать как самозалечивание [5] трещин или адаптацию [6] бетона. Следует отметить, что за счет применения специальных кольматирующих добавок (типа Пенетрон, Ксайпекс, Виатрон и пр.) можно добиться дополнительного эффекта в самозалечивании трещин, а также в уменьшении размера пор и кольматации капилляров.

Несколько по иному происходит трансформаций начальных трещин в подводной части при высоком гидростатическом давлении, т.е. на большой глубине - 10 м и более (рис.2.д). При недостаточной водонепроницаемости бетона происходит значительная миграция воды в структуре бетона, вызывающая вымывание как свободной извести, так и части новообразований. Это не способствует самозалечиванию трещин и пор, и деструкция бетона происходит достаточно активно. Однако при обеспечении достаточной водонепроницаемости бетона механизм трансформаций начальных трещин при высоком гидростатическом давлении не существенно отличается от механизма при низком давлении, т.е. возможна адаптация бетона.

Таким образом, для снижения градиентов локальных знакопеременных влажностных деформаций необходимо, при условии снижения общей пористости, создать условия для получения капилляров одного размера. Одним из способов снижения общей пористости, создания сети закрытых пор и получения равновеликих капилляров является применение специальных полифункциональных комплексных добавок. Это должно снизить влияние капиллярного давления на развитие деформаций сдвига в материале между рядом расположенными капиллярами.

Добиться такого эффекта позволяет введение комплексных модификаторов, состоящих из пластифицирующих и кольматирующих добавок, а также наполнителей. Для обеспечения целостности материала на уровне конструкции при развитии в ней интегральных знакопеременных деформаций материал должен содержать армирующие компоненты, способные воспринимать и перераспределять объемные деформации и быть стойкими в эксплуатационной среде.

Помимо того, применение фибры позволяет решить вопрос перераспределения напряжений и увеличивает трещиностойкость материала, что должно препятствовать росту технологических трещин за счет действия влаги и под эксплуатационными нагрузками.

В экспериментальных исследованиях изучались свойства фибробетонов с полимерной фиброй, как стойкой к коррозии, при этом в состав фибробетона вводились кольматирующая и пластифицирующая добавка и тонкодисперсный наполнитель. Сравнивалось влияние двух видов полипропиленой фибры и соответственно изготавливались две серии образцов. В серии А использовалась фибра Fibermesh диаметром 200 мкм и длиной 13 мм, в серии В - фибра Baukon с диаметром 19 мкм и длиной 12 мм.

Варьировались следующие факторы состава: X_1 - количества сульфатостойкого портландцемента, от 500 до 700 кг/м³; X_2 -соотношения щебень/песок, от 1.6 до 2.2; X_3 - количества наполнителя (молотого песка дисперсностью 300 м /кг), от 0 до 8% от массы цемента. В серии А: X_4 - дозировка фибры Fibermesh, то 0 до 5 кг/м³. В серии В: X_5 - дозировка фибры Baukon, от 0 до 1.2 кг/м³.

Во все смеси вводилась комплексная добавка Пенетрон А + С-3, соответственно 2% и 0.8% от массы цемента, что выбрано с учетом результатов предыдущих исследованиях нашего научного коллектива [7,8].

Эксперименты проводятся по 18-ти точечным планам. Нормализация факторов выполнена по типовой формуле [9]. Все смеси имели равную подвижность ОК от 16 до 18 см. Анализ водопотребности показал, что существенно на В/Ц смесей равной подвижности влияют количество цемента и в особенности полимерной фибры. Ввиду большой водопотребности смеси при высоких дозировках фибры Fibermesh, что повлияло на все свойства композита, в дальнейшем анализе будем рассматривать фибробетоны с количеством фибры до 2.4 кг/м³.

Анализ влияния варьируемых факторов состава на прочность фибробетона при сжатии в водонасыщенном состоянии показал, что введение молотого песка положительно сказывается на данном показателе качества. За счет введения 8% наполнителя прочность при сжатии увеличивается на 10-15 МПа независимо от вида фибры.

За счет введения около 1.2 кг фибры как Fibermesh, так и Baukon, на 0.5-1 МПа возрастает прочность на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии, что объясняется армирующим действием волокон. Применение наполнителя также способствует повышению прочности на растяжение.

Одной из основных задач нашей работы было изучение влияния состава модифицированного фибробетона на его водонепроницаемость (W) и морозостойкость (F). Все исследованные составы имели достаточно высокий уровень W, что обеспечивалось наличием в их составе комплексной добавки Пенетрон + С-3. Наиболее высокую водонепроницаемость, до W20, показали составы с максимальным количеством наполнителя и высоким Щ/П. За счет введения наполнителя водонепроницаемость бетона возрастает в среднем на одну марку (две атмосферы). Это может быть объяснено улучшением капиллярно-поровой структуры композита.

Для всех композитов была исследована морозостойкость согласно ДСТУ Б В.2.7-49-96. Влияние количества цемента, Щ/П, количества наполнителя и полимерной фибры на морозостойкость бетона серий А (фибра fibermesh) и В (фибра Baukon) описывается соответствующими экспериментально-статистическими (ЭС) моделями:

$$F_A \text{ (циклы)} = 598.9 + 26.1x_1 + 13.5x_1^2 - 22.0x_2^2 + 32.7x_3 - 21.8x_3^2 + 21.6x_4 - 54.5x_4^2 - 11.1x_2x_3 + 8.5x_2x_4 + 8.1x_3x_4 \quad (1)$$

$$F_B \text{ (циклы)} = 585.3 + 24.9x_1 + 6.2x_2 + 29.9x_3 - 25.9x_3^2 + 46.8x_5 - 19.0x_5^2 - 12.3x_2x_3 + 6.3x_2x_5 + 8.4x_3x_5 \quad (2)$$

Диаграммы, построенные по моделям (1) и (2) и отображающие влияние Щ/П отношения, количества фибры и наполнителя на морозостойкость бетона показаны на рис.3 (рис.3.а - составы с фиброй Fibermesh, рис.3.б - составы с фиброй Baukon). Дозировка цемента, зафиксирована на уровне 600 кг/м³ (x₁ = 0).

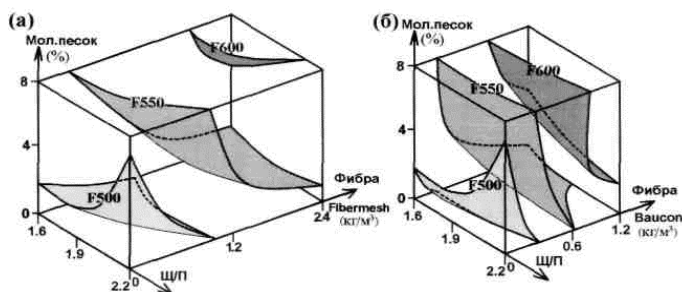


Рис.3. Влияние Щ/П отношения, количества наполнителя и фибры Fibermesh (а) и Baukon (б) на морозостойкость фибробетона, циклы

Анализ диаграмм позволяет отметить, что за счет введения наполнителя (молотого песка) морозостойкость композита увеличивается на 100 циклов практически не зависимо уровня других факторов. Наиболее же существенно, на 100-200 циклов, повышается морозостойкость за счет применения дисперсного армирования. Для составов с количеством фибры Fibermesh от 2 до 2.4 кг/м³, как и для составов с количеством фибры Baukon от 1 до 1.2 уровень морозостойкости достигает марки Р600 (при одновременном введении наполнителя). Положительное влияние фибры на морозостойкость композита объясняется армирующим эффектом ее волокон, воспринимающих напряжения в структуре при замораживании и оттаивании.

Трещиностойкость материала оценивалась методами механики разрушений по уровню критического коэффициента интенсивности напряжений [10], который определялся по трехточечной схеме испытаний образцов с надрезом. ЭС-модели, отражающие влияние варьируемых факторов состава модифицированного фибробетона на уровень критического коэффициента интенсивности напряжений соответственно при использовании фибр Fibermesh и Baukon имеют вид:

$$K_{I.C.A} (\text{МПа} \times \text{м}^{0.5}) = 0.620 + 0.015x_1 + 0.017x_1x_2 - 0.016x_1x_3 + 0.007x_2 - 0.022x_3x_4 + 0.036x_3 + 0.025x_4 - 0.055x_4^2 \quad (3)$$

$$K_{I.C.B} (\text{МПа} \times \text{м}^{0.5}) = 0.602 + 0.018x_1 + 0.011x_1x_2 - 0.016x_1x_3 + 0.007x_1x_5 + 0.008x_2 - 0.009x_2x_3 + 0.044x_3 + 0.039x_5 - 0.023x_5^2 - 0.014x_3x_5 \quad (4)$$

Анализ моделей позволяет скатать, что наиболее существенно на уровень критического коэффициента интенсивности напряжений влияет количество наполнителя и фибры. Поэтому на рис.4 показаны диаграммы в виде прямоугольников, отображающие влияние количества наполнителя и полимерной фибры на трещиностойкость бетона (рис.4.а - фибра Fibermesh, рис.4.б - Baukon). Факторы x_1 и x_2 , зафиксированы на средних значениях - портландцемента 600 кг/м^3 , Ц/П=1.9.

Анализ диаграммы позволяет сделать вывод, что за счет совместного введения наполнителя и фибры трещиностойкость бетона может быть увеличена примерно на 40% - от 0.48 до 0.67 $\text{МПа} \times \text{м}^{0.5}$. Важно отметить, что примерно равный эффект показывают как составы с $1.0 - 1.2 \text{ кг/м}^3$ фибры Baukon, так и с 2.4 кг/м^3 Fibermesh.

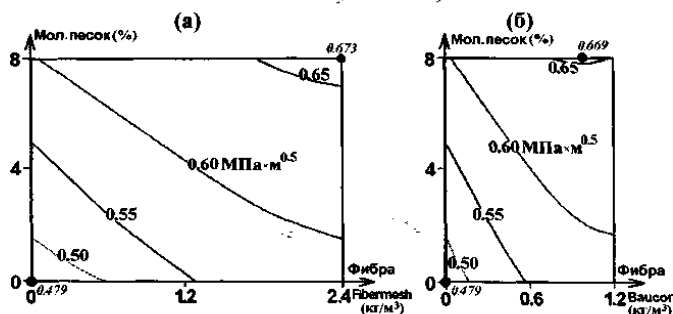


Рис.4. Влияние количества фибры и молотого песка на трещиностойкость (уровень критического коэффициента интенсивности напряжений) фибробетона, а - составы с фиброй Fibermesh, б - составы с фиброй Baukon ($\text{МПа} \times \text{м}^{0.5}$)

Важно отметить, что наполнитель показывает большую эффективность в повышении $K_{I.C}$ у составов минимальным количеством фибры. Данный эффект можно объяснить тем, что у фибробетонов, в которых значительную часть разрушающих нагрузок в момент трещинообразования воспринимают волокна, «востребованность» частиц наполнителя, также способствующих рассеиванию фронта трещины, ниже чем у бетонов без дисперсного армирования.

Повышение критического коэффициента интенсивности напряжений за счет применения дисперсного армирования бетона. Изучение совместного влияния данных видов модификации показало их эффективность при приготовлении бетона для тонкостенных конструкций гидротехнических и плавучих сооружений, испытывающих динамические воздействия.

Выводы

Таким образом, расширены основы получения модифицированных судостроительных фибробетонов с высокими эксплуатационными характеристиками и долговечностью за счет снижения капиллярной пористости и создания условий для получения капилляров одного размера, а также за счет повышения трещиностойкости при использовании комплексного модификатора [суперпластификатор + кольматирующая добавка + наполнитель] и объемного дисперсного армирования, которые позволили разработать технологический Регламент по их приготовлению и внедрению в производства.

SUMMARY

The possibility of obtaining high fracture toughness of concrete, water resistance and cold resistance for thin-walled hydraulic structures due to reinforcement of the polymer dispersion a fiber with the use of complex modifier comprising additives, a plasticizer and a filler of finely dispersed.

Литература

1. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов тонкостенных плавучих и портовых гидротехнических сооружений - Одесса: Одесский центр научно-технической и экономической информации, 2003-192 с.

2. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства / Б.В. Гусев, В.И. Клиндрщенко, Б.П. Маслов, А.С. Файвусович - М.: Научный мир, 2006. - 560 с.
3. Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, - 1968. - 472 с.
4. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. - Одесса: ИМК Город мастеров, 1998.- 168 с.
5. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. - М: Стройиздат, 1976. - 128 с.
6. Чернявский В.Л. Адаптация бетона. - Днепропетровск: Нова щеолога, 2002.-216 с.
7. Мшутш А.В., Кровяков СО., Романов О.А. Вплив комплексної добавки суперпластифікатор С-3 + Пенетрон на властивості дрібнозернистого бетону // Дороги і мости. Випуск 6: Збірка наукових статей - Київ, 2006. - С. 257-266.
8. Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Романов А.А. Бетонная смесь с добавками Пененторон А + С-3. Патент Украины № 19814, 2006.
9. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительнотехнологических задач на ЭВМ. - К., Выща школа, 1989. -328 с.
10. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. - М.: Высшая школа, 1991.-288 с