



УДК 691; 691:620.1

Ильшат Т. Мирсаяпов, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры КГАСУ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА БЕТОНА НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Железобетон – один из немногих материалов, наличие трещин, в котором предопределено как самой природой формирования структуры бетона, так и сущностью работы композитного материала под нагрузкой. Подавляющее большинство железобетонных конструкций в стадии эксплуатации может работать с трещинами силового, несилового и технологического происхождения. Уникальность этого материала именно в том, что в нем всегда образуются трещины, зачастую достаточно большой длины и ширины раскрытия. Трещина в металлических конструкциях – катастрофа, а в железобетонных конструкциях (в бетоне, а не в арматуре) – обычное, всегда имеющее место явление, часто даже не неприятность. Так, например, в изгибаемых железобетонных элементах в зоне действия поперечных сил могут образоваться магистральные наклонные трещины длиной, близкой к высоте сечения, а железобетонный элемент, не разрушаясь, может выдержать неограниченное число циклов нагружений. После образования этих наклонных трещин долговечность и выносливость растянутой зоны определяется качеством продольной арматуры, а сжатой зоны и также анкеровки продольной арматуры (совместной работы бетона и арматуры) – качеством структуры бетона. Чтобы создать качественные железобетонные конструкции, необходимо выяснить, где могут образоваться дефекты в структуре бетона и какие из них являются опасными, а какие не угрожают надежности конструкции. Зная причины и характер разрушения бетона и железобетона, можно создать прочные и долговечные конструкции. Чисто эмпирический путь поиска новых составов бетона, позволяющий повысить усталостную прочность бетона и железобетона, весьма трудоемок и не всегда приводит к цели. Еще труднее чисто эмпирическим путем прогнозировать механические характеристики бетона и создание материала с заранее заданными свойствами. Вместе с тем большие возможности в области улучшения механических свойств бетона открывает использование методов механики разрушения. Поэтому наиболее эффективным путем прогнозирования качества, надежности, долговечности, объективной (остаточной) прочности и деформативности бетона и железобетона является привлечение аппарата механики разрушения – науки, изучающей как процесс формирования микродефектов в виде трещин, так и работу материала с имеющимися в нем трещинами. При этом образование и развитие трещин предопределяют соответствующие поля напряжений. Так, в изгибаемых элементах при малых пролетах среза

$c_0 < 1,2h_0$ происходит образование локальных полос напряжений, связанных с точками приложения сосредоточенных внешних усилий, в пределах которых происходит образование и развитие трещин и усталостное разрушение (рис.1). В изгибаемых элементах с средним пролетом среза $1,2h_0 < c_0 < 2h_0$ на характер образования и развития трещин в зоне действия поперечных сил и усталостного разрушения таких элементов оказывают влияние как внутренние силовые факторы, действующие в рассматриваемых по длине пролета среза элемента сечениях (моменты и поперечные силы), так и местные возмущения напряженного состояния и концентрации напряжений в определенных зонах, связанные с точками приложения сосредоточенных внешних сил. Образование, развитие и раскрытие критической трещины в растянутой зоне (участок OO_2) связаны с плоским поворотом и сдвигом наклонного сечения 2 – 2, а ее развитие и раскрытие в сжатой зоне (OO_1) – с образованием и развитием макротрещины отрыва по линии действия растягивающих напряжений S_{2t}^{\max} (рис.2) в зоне “растяжение-сжатие” внутри наклонного сжимающего силового потока, под действием силы N_{R3}^{\max} , а затем их слиянием в макротрещину и дальнейшим развитием и раскрытием этой макротрещины отрыва OO_1 . При больших пролетах среза ($c_0 > 2h_0$) усталостное разрушение изгибаемых элементов происходит с образованием критической наклонной трещины, положение которой связано не с точками приложения действующих на элемент внешних усилий и реакций опор (местное возмущение напряженного состояния ощутимо только вблизи этих точек), а с внутренними силовыми факторами, действующими в рассматриваемых по длине пролета среза сечениях (моментами и поперечными силами). Под воздействием равнодействующей N_{R2}^{\max} нормальных N_{b1}^{\max}

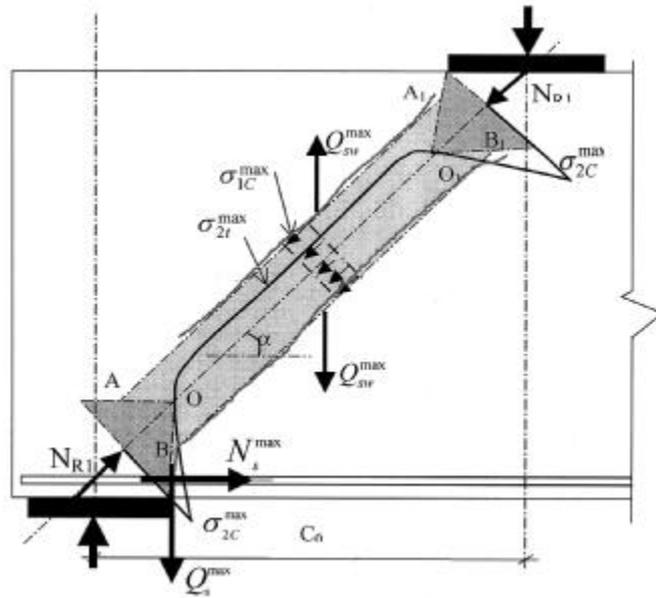


Рис.1. Физическая модель сопротивления элемента при малых пролетах среза

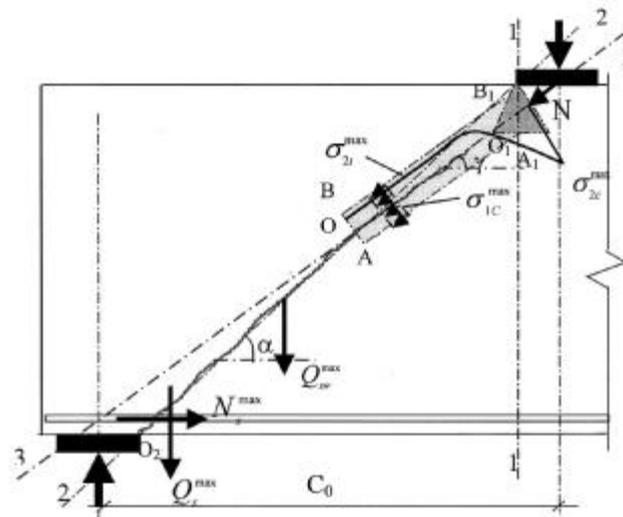


Рис.2. Физическая модель сопротивления элемента при средних пролетах среза

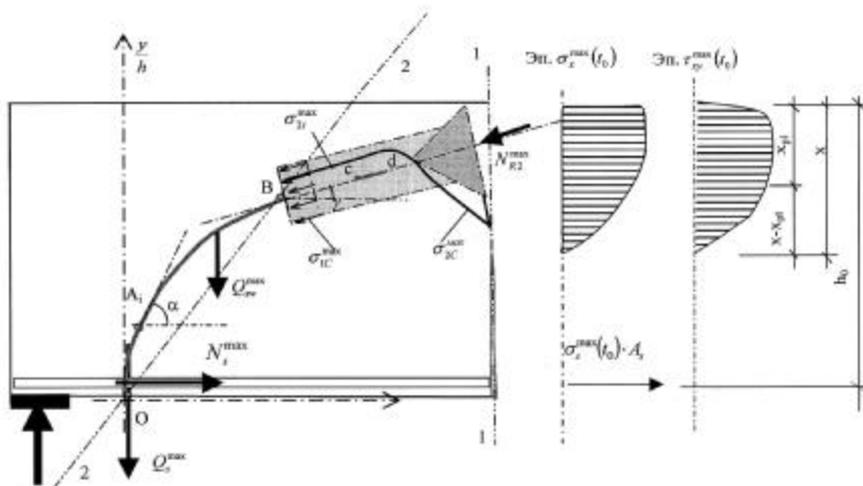


Рис.3. Физическая модель сопротивления элементов с большим пролетом среза



и касательных Q_{b1}^{\max} усилий в нормальном сечении в конце пролета среза, действующего в пределах ограниченной грузовой площадки $X_{pl}/\cos g$, в направлении действия этого усилия возникает наклонный сжимающий силовой поток (рис.3).

Таким образом, в элементах с малым пролетом среза между точками приложения опорных реакций и груза, а в элементах с средним и большим пролетами среза – над критической наклонной трещиной образуется наклонный сжимающий силовой поток. Как известно, при смятии, как и при местном сжатии, под грузовой площадкой небольшой ширины образуется клин уплотнения, который находится в условиях двухосного сжатия. Под воздействием клина уплотнения в средней части сжимающего силового потока возникает плоское напряженное состояние “растяжение-сжатие”.

Бетон имеет капиллярно-пористую структуру, образованную зернами заполнителей, связанными в монолитное тело цементным камнем. Микропоры и капилляры в бетоне наполнены химически несвязанной водой, водяными парами и воздухом. Структура бетона создается во время приготовления, укладки и уплотнения бетонной смеси, а затем видоизменяется в процессе длительного твердения бетона. Образование монолитной структуры происходит постепенно, в связи с чем наблюдается последовательный рост прочности цементного камня и изменение пористости системы. Избыточная вода заполняет многочисленные поры и капилляры в цементном камне и полостях между зернами крупного заполнителя и стальной арматурой и, постепенно испаряясь, освобождает их. При этом происходит также и усадка бетона. В результате усадки, на контакте между цементно-песчаным раствором (матрицей) и крупным заполнителем, еще до внешнего нагружения могут появиться усадочные микротрещины. Таким образом, в структуре бетона еще до внешнего нагружения существует большое количество различных дефектов, которые условно можно разделить на две группы: дефекты первого рода – округлые, гелевые поры типа полостей, и дефекты второго рода – остроконечные дефекты типа трещин. Вокруг дефектов первого рода – округлых отверстий случайной формы, хаотично расположенных во всем объеме бетона между зернами крупного заполнителя, происходит концентрация напряжений. Даже небольшая внешняя нагрузка приводит к тому, что на контуре этих пор, форма которых похожа на вытянутые эллипсы, из-за концентрации напряжений возникают высокие напряжения. Там и зарождаются и появляются первые микротрещины. Итак, начальные микротрещины могут появиться в бетоне либо еще до внешнего нагружения на контакте между матрицей и крупным заполнителем в результате усадки бетона, либо при малой внешней нагрузке из-за сильной концентрации напряжений около пор в матрице. Поэтому с момента, когда уровень сжимающих напряжений S_{1C}^{\max} , действующих в пределах наклонного сжимающего силового потока, становится больше, чем нижняя граница микротрещинообразования, от микропор в теле бетона или усадочных микротрещин по линии действия растягивающих напряжений S_{2t}^{\max} (рис.1 - рис.3), в средней зоне “растяжение-сжатие” образуются и развиваются микротрещины отрыва, которые с увеличением количества циклов нагружения объединяются в макротрещину отрыва вдоль оси силового потока. Таким образом, усталостное разрушение и нелинейное деформирование бетона при циклическом нагружении характеризуется образованием и развитием микро- и макротрещин, инициатором которых и являются указанные дефекты структуры бетона. При этом усталостная трещина проходит два периода: период зарождения трещины и период распространения трещины до критических размеров. Длительность периода зарождения трещины в бетоне, т.е. инкубационного периода, составляет в зависимости от качества бетона и уровня нагрузки 30-90 % общей долговечности. Усталостное разрушение в пределах наклонного сжимающего силового потока происходит в тот момент, когда трещины отрыва внутри потока достигают критической длины. Поэтому объективную усталостную прочность сжатой зоны необходимо определять в зависимости от длины макротрещины отрыва $l_1(t)$. В связи с этим предел выносливости бетона в наклонной сжатой полосе в элементах с малым пролетом среза можно представить в виде:

при $\frac{l_{sup}}{h_0} < 0,3$ развивается только одна макротрещина отрыва, вдоль оси сжимающего потока, т.е. раскалывание происходит только по одной плоскости и поэтому

$$R_{b1}(t) = \frac{K_{Icf}}{\sqrt{p \cdot l_1(t) \cdot Y_1(l)} \cdot \sin 2j} \left(\frac{\sqrt{c_0^2 + h_0^2}}{l_{sup} \cdot \sin a} - ctg a - tg j \right) + R_{sh,rep} \cdot tg j, \quad (1)$$



при $\frac{l_{sup}}{h_0} > 0,3$ развиваются две макротрещины отрыва вдоль границ ядра сжатия, т.е. раскалывание происходит

по двум плоскостям и поэтому

$$R_{b1}(t) = \frac{2K_{Icf}}{\sqrt{p \cdot l_I(t)} \cdot Y_I(l) \cdot \sin 2j} \left(\sqrt{c_0^2 + h_0^2} - ctg a - tg j \right) + R_{sh,rep} \cdot tg j, \quad (2)$$

где $K_{I,cf}$ – критический коэффициент интенсивности напряжений бетона при циклическом нагружении; $l_I(t)$ – текущая длина трещины отрыва в наклонном сжимающем силовом потоке; $Y_I(l)$ – функция, учитывающая геометрическую форму и схему нагружения; j – угол внутреннего трения бетона; l_{sup} – ширина грузовой и опорной пластин.

В элементах с средним пролета среза предел выносливости бетона сжатой зоны определяем как

$$R_{b3}(t) = \frac{2K_{Icf} \cdot H_c}{\sqrt{p \cdot l_I(t)} \cdot Y_I(l) \cdot \sin 2j \cdot l_{sup} \cdot \sin a} + (R_{sh,rep} - t) \cdot tg j. \quad (3)$$

В изгибаемых элементах без поперечной арматуры при больших пролетах среза пределы выносливости бетона сжатой зоны при сжатии $R_{b,rep}$ и при сдвиге $R_{sh,rep}$ для плоского напряженного состояния определяем как функцию от объективной (остаточной) прочности в направлении действия усилия N_{R2}^{max} (рис.3):

$$R_{b,rep} = R_{b2}(t) \cos g; \quad R_{sh,rep} = R_{b2}(t) \sin g \quad (4)$$

Объективную усталостную прочность бетона $R_{b2}(t)$ в элементах без поперечной арматуры определяем как

$$R_{b2}(t) = \frac{1,5 \cdot K_{I,cf}}{I \cdot x_1 \cdot Y_I(l) \cdot \sin 2f \cdot \sqrt{p \cdot l_I(t)}} + R_{sh,rep} \cdot tg j, \quad (5)$$

где I , x_1 – коэффициент пластичности бетона и относительная высота сжатой зоны бетона в нормальном сечении в конце пролета среза.

Наличие поперечной арматуры отражается на характере развития макротрещин отрыва в наклонном сжимающем силовом потоке, а, следовательно, и на величине объективной прочности, так как стержни, пересекающие макротрещины отрыва в наклонном сжимающем силовом потоке, оказывают сдерживающее влияние в их развитии. Влияние поперечной арматуры учитываем заменой K_{Icf} в (1) - (5) на $K_{Icf} + K_{IS}$, где K_{IS} – коэффициент интенсивности напряжений, характеризующий сдерживающее влияние поперечной арматуры на развитие трещины отрыва, т.е. коэффициент, учитывающий влияние усилий в поперечной арматуре на интенсивность напряжений в вершине трещины. Поэтому в элементах с поперечной арматурой развитие макротрещины отрыва в сжимающем силовом потоке является плавным.

После образования критической наклонной трещины под воздействием усилия $S_s^{max}(t) \cdot A_s$ в продольной арматуре в месте пересечения с критической наклонной трещиной происходит ее выдергивание из бетона. При этом опорную зону изгибаемого элемента за наклонной трещиной можно рассматривать как половину кососимметрично нагруженного элемента. При увеличении нагрузки на заделку, в определенный момент под выступами арматуры образуется система внутренних трещин с шагом, близким к шагу выступов S_f , инициатором которых являются также дефекты структуры бетона 1-го и 2-го рода. После появления системы несквозных трещин контактная зона разбивается на независимо работающие участки. При этом приращение перемещений данного выступа после возникновения внутренних несквозных трещин согласно [1] зависит не от того, как нагружены остальные выступы арматуры, а лишь от величины нагрузки, приходящейся на данный выступ. В связи с этим усталостную прочность анкеровки необходимо связать с образованием внутренних несквозных трещин. Образование этих конусообразных трещин связано с работой бетона под выступами арматуры на смятие. Поэтому объективную усталостную прочность бетона под выступами, а,



следовательно, и силы зацепления выступов арматуры о бетон нужно определить как функцию длины конусообразных трещин $l(t)$, которая постоянно увеличивается с увеличением количества циклов нагружения. С учетом этого объективную усталостную прочность анкеровки после приложения N циклов нагружения представим в виде:
для вертикальных выступов

$$R_{an}(t) = \frac{8K_{cf} \cdot s_r \cdot l_{an} \cdot ctgj}{\sqrt{p \cdot l(t)} \cdot d^2 \cdot \sin j_k} (d + 2c_r + s_r \cdot \cos j_k), \quad (6)$$

для наклонных выступов

$$R_{an}(t) = \frac{8K_{cf} \cdot c_r \cdot (d + c_r) \cdot A_t \cdot l_{an} \cdot ctgj}{\sqrt{p \cdot l(t)} \cdot d^2 \cdot A_c \cdot \sin a_r \cdot \sin^2 j_k}, \quad (7)$$

где d, c_r, s_r – геометрические характеристики арматуры периодического профиля; $K_{cf}, l(t)$ – критический коэффициент интенсивности напряжений бетона при циклическом нагружении и текущая длина трещины в бетоне под выступами арматуры; l_{an} – длина анкеровки продольной арматуры; j_k – угол клина; a_r – угол наклона выступов арматуры.

Как видно из (1) – (7), объективная прочность бетона сжатой зоны в приопорной зоне и анкеровки продольной арматуры за критической наклонной трещиной при циклическом нагружении имеют переменную величину в зависимости от длины трещин $l_I(t)$ и $l(t)$ в бетоне и коэффициента интенсивности напряжений бетона при циклическом нагружении $K_{cf}(t)$. В сжатой зоне железобетонного элемента и под выступами арматуры при $\{l_I(t)$ и $l(t)\} \rightarrow 0$ объективная прочность приближается к теоретической прочности. Но в структуре бетона еще до нагружения существует большое количество дефектов первого и второго рода. Поэтому $\{l_I(t)$ и $l(t)\} \neq 0$ и техническая прочность бетона и железобетонного элемента всегда меньше теоретической. Таким образом, $l_I(t)$ и $K_{cf}(t)$ являются показателями качества и долговечности бетона, а, следовательно, и железобетонного элемента. При $l_I(t) \rightarrow \min$ и $K_{cf}(t) \rightarrow \max$ имеем оптимальную структуру бетона. Влияние технологических факторов на качество бетона и надежность железобетонного элемента согласно можно охарактеризовать следующей зависимостью

$$K_{IC} = -0,015 + 0,001R_z + 0,133 \frac{C}{W} + 0,006R_c - 0,08W_1 - 0,583K_z,$$

где R_z, R_c, W_1, K_z – соответственно, прочность заполнителя, активность цемента, влажность бетона, количество крупного заполнителя в единице объема бетона.

Среди технологических факторов существенно важным фактором, влияющим на структуру и прочность бетона, является водоцементное отношение W/C . Для химического соединения с цементом достаточно $W/C \approx 0,2$. Однако при этом W/C бетон практически не укладываем. Поэтому для достижения достаточной подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси количество воды берут с некоторым избытком: подвижные бетонные смеси, заполняющие форму под влиянием текучести имеют $W/C \approx 0,5-0,6$, а жесткие бетонные смеси, заполняющие форму под влиянием механической виброобработки, – $W/C \approx 0,3-0,4$. Избыточная, химически несвязанная вода приводит к увеличению пористости цементного камня, а, следовательно, дефектов первого рода, а также к увеличению усадки, а, следовательно, повышает вероятность образования усадочных трещин. Поры занимают около трети объема цементного камня. С уменьшением W/C пористость бетона уменьшается, а, следовательно, количество и размеры дефектов первого рода; уменьшается усадка бетона, а, следовательно, понижается вероятность появления усадочных микротрещин, т.е. дефектов второго рода. Таким образом, повышается качество бетона, растет долговечность, прочность и модуль упругости бетона, а, следовательно, повышается надежность железобетонного элемента.

Литература

1. Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. – М.: Стройиздат, 1997. – 569 с.
2. Пирадов К.А., Бисенев К.А., Абдуллаев К.У. Механика разрушения бетона и железобетона. – Алматы, 2000. – 305 с.