

УДК 624.012

**О.В. Радайкин** – аспирант, ассистент**Ф.Х. Ахметзянов** – кандидат технических наук, доцент

Кафедра железобетонных и каменных конструкций

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**К ОЦЕНКЕ ЗОНЫ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИН  
В ПОВРЕЖДАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЯХ**

Средствами программного комплекса ANSYS моделируется квазистатический рост макро- и магистральных трещин в стеновых железобетонных панелях. Определяются параметры механики разрушения в процессе развития трещин. Дается оценка остаточной несущей способности панели в зависимости от величины повреждения. Вычисляется длина зоны предразрушения. Дается оценка остаточной несущей способности с учетом псевдопластичности бетона.

Целью работы является конечно-элементное (КЭ) исследование квазистатического распространения трещин в железобетонных стеновых панелях с использованием программной системы КЭ анализа ANSYS, определение зоны предразрушения в вершине макротрещины, а также оценка остаточной несущей способности (ОНС) повреждаемой стеновой панели [1, 2].

Моделирование строится на следующих предпосылках:

- балка-стенка, моделирующая стеновую панель, рассматривается в постановке задачи плосконапряженного состояния (ПНС):  $\sigma_z = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0$ ;

- расчет ведется на действие однократного простого кратковременного нагружения вертикальной равномерно распределенной нагрузкой (расчет на горизонтальную, например, ветровую нагрузку не ведется, т.е. можно принять, что рассматривается внутренняя несущая стеновая панель);

- бетон панелей считается однородным (рассматриваемые макрообъемы материала превышают размеры заполнителя и других неоднородных включений) без учета влияния конструктивного армирования по контуру панелей;

- материал стеновых панелей является изначально упругим, изотропным и характеризуется двумя параметрами: модулем упругости  $E_b$ , в зависимости от класса бетона, и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,2$ ;

- считаем, что бетон является квазихрупким материалом (полагая, что зона псевдопластичности в вершине трещины несоизмеримо мала в сравнении с размерами панели), поэтому применяем расчетный аппарат линейной механики хрупкого разрушения;

- процесс разрушения складывается из двух этапов:

а) зарождения сквозной макротрещины; б) её распространения.

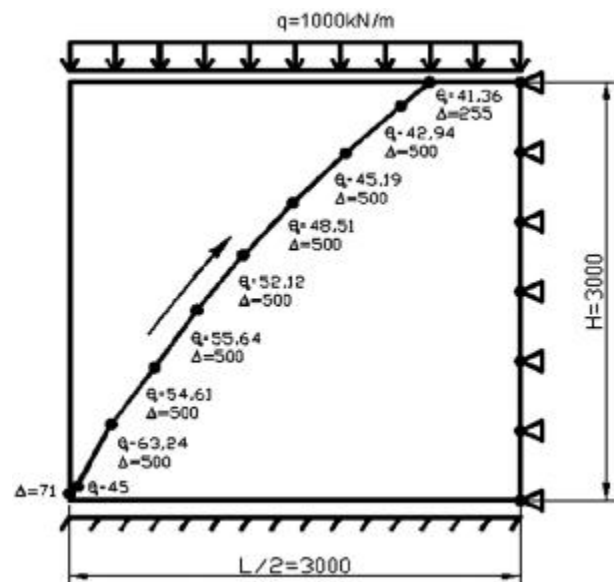


Рис. 1. Расчетная схема половины симметричной стеновой панели и модель траектории магистральной трещины (стрелкой указано направление роста трещины)

Модель траектории макротрещины (магистральной) изображена на рис. 1 и описывает на плоскости ветвь некоторой параболы.

Для определения ОНС рассматривался энергетический критерий начала безостановочного распространения трещины Гриффитса для сложного плосконапряженного состояния:

$$G = G_I + G_{II} = \frac{K_I^2}{E} + \frac{K_{II}^2}{E} \leq G_c, \quad (1)$$

где  $G$  – интенсивность высвобождения энергии упругого деформирования при сложном

напряженном состоянии;  $G_I = \frac{K_I^2}{E}$ ,  $G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E}$  –

интенсивность высвобождения энергии соответственно при нормальном отрыве и поперечном сдвиге;  $G_c = 2g$  – критическое значение



интенсивности высвобождения энергии,  $g$  – эффективная поверхностная энергия разрушения.

Таким образом, в силу линейной зависимости КИН от нагрузки получаем критическое значение граничных напряжений  $q$ :

$$q_c = \sqrt{\frac{2Eg}{k_I^2 + k_{II}^2}}, \quad (2)$$

где  $k_I, k_{II}$  – коэффициенты интенсивности напряжений при пробной нагрузке  $q=1000\text{кН/м}=1\text{МН/м}$  (при этом  $K_I = q_c k_I, K_{II} = q_c k_{II}$ ). В формуле (2) все величины берутся при одинаковых размерностях силы – МН и длины – м.

Зависимость критической нагрузки от длины трещины, вычисленную по формуле (2), для данного класса бетона можно представить в виде графиков на рисунке 2.

Из рисунка 2 можно определить либо критическую нагрузку (в этом случае она будет соответствовать ОНС стеновой панели) при данной длине трещины и сравнить ее с заданной, либо при данном уровне нагружения определить предельно допустимую длину трещины. Эти результаты имеют практический интерес при оценке ОНС по наблюдаемым дефектам.

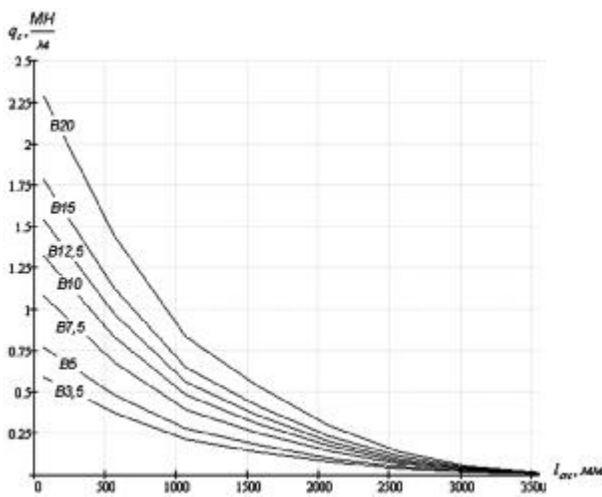


Рис. 2. Зависимость критической нагрузки  $q_c$  от длины трещины  $l_{crc}$

Заметим, что формула (2) справедлива для идеально упругого разрушения (линейная механика разрушения). В действительности для большинства реальных материалов, в том числе и для бетона, хотя и в меньшей степени, чем для металлов, в малой области конца трещины из-за больших напряжений возникает зона проявления нелинейных свойств материала, в которой распределения напряжений и смещений отличаются от упругого.

Бетон претерпевает локальные псевдопластические деформации, связанные с процессом

микротрещинообразования в вершинах трещин. Согласно Г.П. Карзову [3] старт хрупкой трещины происходит по встречному механизму: за счет непрерывного зарождения у ее вершины микротрещин, которые, развиваясь, объединяются с макротрещиной. Но развитие хрупкого разрушения не происходит по встречному механизму, а связано с непосредственным ростом магистральной трещины (макротрещины). Такой факт дает возможность напрямую использовать концепцию механики разрушения, сводящуюся к решению уравнения, в левой части которого стоят параметры  $K, G$ , зависящие от режима нагружения конструкции, а в правой – их критические значения, характеризующие свойства материала, т.е. справедлива формула (2).

В [4] дано общее решение для распределения напряжений в вершине трещины. На продолжении траектории трещины, т.е. при  $q=0$  будем иметь объемное симметричное напряженное состояние:

$$s_x = s_y = \frac{K_I}{\sqrt{2pr}} \quad (3)$$

В работе [2] определён уровень номинальных растягивающих напряжений (т.е. без учета дефектности) при появлении трещины нормального отрыва. Решение найдено из кинетического уравнения накопления повреждений для бетона с нормальным законом распределения прочности. Так, при величине коэффициента вариации  $V_m \approx 0,165$  номинальные напряжения трещинообразования равны  $s_0^{crc} = 0,838R_{mt} = 0,7R_{bt,ser}$  ( $R_{mt}, R_{bt,ser}$  – соответственно марочная и классовая прочность бетона при растяжении).

Предположим, что условием микрорастрескивания или псевдотекучести по аналогии с металлами в вершине трещины является выражение  $s_x = s_y = s_0^{crc} = 0,7R_{bt,ser}$  (условие псевдотекучести), тогда из формулы (3) можно определить размер зоны предразрушения:

$$r_c = \frac{K_I^2}{0,98pR_{bt,ser}^2} \quad (4)$$

Параметр  $r_c$ , по сути, аналогичен поправке Ирвина на пластичность для металлов. Этой поправкой можно пользоваться лишь в случае, если характерный линейный размер зоны предразрушения менее чем на 20% превышает длину трещины. В противном случае определение КИН-ов теряет смысл.

Получаем, что для учета псевдопластичности при определении КИН-ов необходимо длину трещины  $l_{crc}$  заменить на  $l_{crc} + r_c$ .



В продолжение результатов работ [1,2] нами было установлено, что учет поправки на псевдопластичность актуален в стеновых панелях для трещин длиной не более чем  $0,56 l_{crc}^{max}$  (от длины магистральной трещины)

для класса бетона В3,5 и  $0,86 l_{crc}^{max}$  для В20. При дальнейшем развитии макротрещины характерный размер зоны предразрушения становится больше длины трещины более чем на 20%. Этому моменту соответствует значение  $r_c = 97,2 мм$  для класса бетона В3,5 и  $r_c = 44,2 мм$  для класса бетона В20. В работах С. Ша, Лота, Кеслера [5] опытным путем установлена длина зоны предразрушения  $r_c = 75 мм$ , что примерно совпадает с вышеуказанными значениями величины  $r_c$ .

Кроме того, установлено, что размер зоны предразрушения уменьшается с ростом прочности бетона при фиксированной длине трещины (рис. 3).

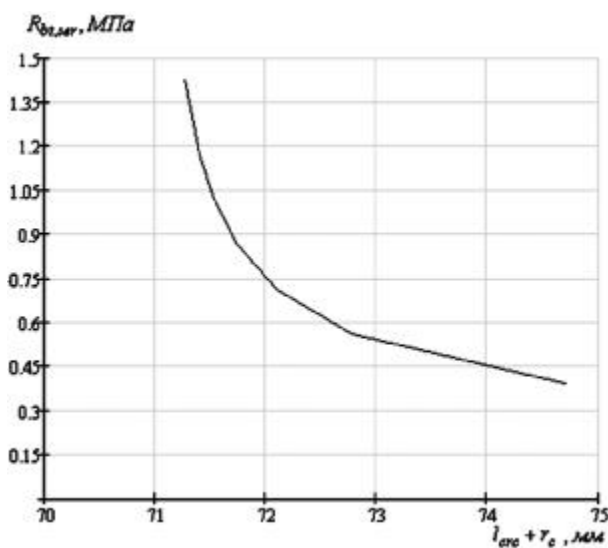


Рис. 3. Зависимость длины условной трещины  $l_{crc} + r_c$  в стеновой панели от прочности бетона на растяжение (при фиксированной длине фактической трещины  $l_{crc} = 71 мм$ )

Построены графики зависимости для определения критической нагрузки в зависимости от длины условной трещины. Кривые сходны с графиками на рисунке 2. Качественная картина не меняется.

Из таких графиков установлено, что начальная несущая способность в бездефектной панели осталась прежней, что и очевидно. А сами кривые стали более пологими, т.е. кривизна уменьшилась, что говорит о меньшей степени зависимости остаточной несущей способности панели от величины дефекта (длины трещины). Другими словами, можно говорить о том, что наличие зоны предразрушения проявляется в снижении сингулярности напряжений в вершине трещины.

### Литература

1. Радайкин О.В. К оценке остаточной несущей способности стеновых железобетонных стеновых панелей методами механики разрушения // Материалы 58-ой республ. науч. конф. – Казань, 2006.
2. Радайкин О.В. Оценка остаточной несущей способности повреждаемых бетонных и железобетонных стеновых панелей: Дис. магист. техн. и технолог. Науч. рук. Ф.Х. Ахметзянов. – Казань, 2006. – 118 с.
3. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
4. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.2. – М.: Наука, 1970. – 586 с.
5. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.