

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Мурашко А.В. (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*)

В статье проведен анализ и синтез основных литературных источников связанных с механикой разрушения

Влияние трещин на прочность элементов конструкций является актуальным при их проектировании и эксплуатации. Это обусловлено невозможностью изготовления конструкций без различного рода дефектов и пороков. Возникает необходимость создания методов расчета, учитывающих начальные дефекты, а также их влияние на работу конструкций, т.к. решение этих вопросов с точки зрения классических расчетов по предельным состояниям невозможно. Решение вышеперечисленных задач возможно с применением аппарата механики.

Проблемы прочности, долговечности и трещиностойкости очень сложны и не поддаются описанию какой-либо "единой" теорией прочности или долговечности. Однако возможно построение частных моделей разрушения, справедливых в тех или иных узко ограниченных условиях работы конструкционного материала. Эти частные модели, естественно, упрощены и идеализированы, поскольку разрушение - это комплекс проблем, имеющих самые разнообразные стороны - физическую, химическую, механическую, технологическую и пр. Но механическая сторона разрушения в этом комплексе проблем играет существенную роль. Поэтому механика разрушения, несмотря на блочность ее строения, из-за наличия множества частных моделей разрушения, часто дает весьма ценную информацию, объясняет многие эффекты, позволяет правильно ставить научные и инженерные эксперименты и интерпретировать их результаты, прогнозировать поведение тел в процессе разрушения, протекающем в различных условиях воздействия на материал [3]. В [7] приводится общее решение для трещины в бесконечной однородно нагруженной пластине, далее на этой основе решается ряд задач уточняющих его (для полуограниченной пластины, для пластины конечных размеров, для пространственного случая, для неоднородного тела, для различных видов нагружения и т.д.).

На сегодняшний день сформированы подходы, учитывающие явления пластического деформирования твердых тел. Разработаны новые

математические методы решения двумерных и трехмерных задач теории трещин. Дальнейшее обоснование получили известные механические концепции распространения трещин в квазихрупких телах. Однако в связи с трудностями, возникающими при постановке и математической реализации, пространственные задачи теории трещин исследованы в значительно меньшем объеме.

В механике разрушения трещины в твердых телах рассматриваются, как поверхности разрыва вектора смещений. Трещину можно трактовать также как предельный случай внутренней или краевой полости с расстоянием между ее противоположными поверхностями, стремящуюся к нулю. При нагружении тела противоположные поверхности трещины некоторым образом смещаются по отношению друг к другу.

Решение задач теории трещин состоит в основном из двух этапов: определение локального поля напряжений в районе вершины трещины (трещин) в деформируемом теле; составление на основе сформированных механических или физических концепций распространения трещины в твердых телах, критериальных уравнений.

При этом в задачах механики разрушения физическое состояние свободных поверхностей трещины и их взаимодействие, как правило, не учитывается.

Основной объем теоретических и экспериментальных исследований относится к первому типу нагружения тел с трещинами, так как он охватывает подавляющее число случаев реально развивающихся трещин.

Основой для применения K_c (коэффициент интенсивности напряжений) при исследовании степени опасности трещин послужили критерии, утверждающие, что разрушение происходит тогда, когда уровень напряженно-деформированного состояния в определенной окрестности вершины трещины достигает или даже превышает критическую величину. Были рассмотрены расчетные модели локального разрушения твердых тел, сформирован новый критерий локального разрушения упругопластических тел с трещинами, в котором учитываются сингулярные и регулярные части компонентов тензора напряжений, а также некоторые структурные характеристики материала в окрестности вершины развивающейся трещины. Ответа на вопрос о том, что же подразумевать под определенной окрестностью вершины трещины не приведено. Выявление реальной картины процессов, происходящих в материалах, у вершины трещины требует понимания роли пластической деформации в этой области.

Предельная нагрузка для хрупкого тела с трещинами не всегда приводит к разрушению тела в целом. Это связано с тем, что предельное

подвижно-равновесное состояние наступает не во всех точках контура трещины одновременно. Для определения внешней разрушающей нагрузки необходимы дополнительные сведения по кинетике распространения трещины при монотонном возрастании нагружения, приложенного к телу. Для изотропного тела с изолированной трещиной нормального отрыва, имеющей в плане форму, близкую к круговой. Найдено решение разрушающего значения растягивающей нагрузки для неограниченного тела с внутренней эллиптической трещиной.

Весьма важным вопросом является определение напряженно-деформированного и предельного состояния в трехмерных телах с реально встречающимися конфигурациями трещин. Решение такого класса задач осуществляется в основном приближенно или численными методами из-за сложностей решения их аналитическим методом.

Известные решения для трещин в трехмерных телах получены из расчета, что трещина имеет форму окружности или эллипса, если она внутренняя, полукруга или полуэллипса - если поверхностная и четверти круга или четверти эллипса - если угловая.

Однако основное внимание уделяется поверхностным трещинам, т.к. более опасным (примерно в 2.5 раза) всегда будет появление именно их [7].

Число работ, посвященных решению этих важных задач, очень большое. Поэтому провести тщательный анализ всех решений вряд ли представится возможным. Остановимся на некоторых задачах и работах, получивших наибольшее распространение.

В последнее время при исследованиях K_c для несквозных трещин используется разработанный ранее для других задач метод весовых функций, что для любого плоского тела, имеющего произвольно расположенную в нем трещину, а также аналогичный дефект, выходящий на границу тела, плоскость которой несет симметричную нормальную нагрузку, может быть определена вспомогательная (весовая) функция, зависящая только от геометрии тела и дефекта и обладающая тем свойством, что взятый вдоль разреза интеграл от произведения этой функции на напряжение, действующее на плоскостях трещины, равен K_c у конца трещины. Используя принцип наложения, случай приложения нагрузки к границе тела легко и просто сводим к задаче, когда нагрузка приложена только на поверхностях трещины. Этот метод является весьма эффективным для приближенного решения сложных задач по определению K_c при неоднородной нагрузке.

Следует отметить, что хотя и существует огромное количество работ в которых решались задачи о напряженно-деформированном со-

стоянии вдоль контуров несквозных трещин, число удобных и тем более универсальных аналитических решений ограничено.

Расчетное направление включает в себя как разработку моделей развития трещин в структуре при разрушении бетона в зонах концентрации микротрещин и формировании макротрещин, так и собственно расчет бетонных элементов по образованию и раскрытию трещин при кратковременном, длительном и циклическом нагружении, а также экспериментальные исследования для проверки теоретических разработок.

Построить модель разрушения бетона возможно двояко: либо, базируясь на общепринятых в механике разрушения моделях, проверить их применимость к пористым композитам и бетонам, либо разработать модель разрушения специально для бетона.

Разработана модель хрупкого разрушения Гриффитса-Ирвина и сформулированы на ее основе энергетический и силовой критерии разрушения.

Обобщение силового критерия Ирвина для материалов, обладающих свойствами ползучести и старения, сделано на основе теории упруго—ползучего тела. Модель Гриффитса-Ирвина широко применяется для исследования процесса разрушения бетона в трудах как зарубежных, так и отечественных ученых. На базе концепции Гриффитса-Ирвина впервые сформулированной иерархической схемы структуры бетона, учитывающей характерные неоднородности, дефекты и анализируемой методами математического моделирования, заложены основы теории деформаций и прочности бетона, основанной на физической сущности процесса трещинообразования и разрушения. С привлечением аппарата теории ползучести разработано решение задачи о длительной прочности бетона. Выражение для относительного предела длительной прочности, полученное из сопоставления критической длины трещины при кратковременном и длительном нагружении имеет вид:

$$\frac{R(t, \tau_1)}{R(\tau_1)} = \eta(t, \tau_1) = \frac{m(t, \tau_1)R(t)}{R(\tau_1)} \sqrt{\frac{E(\tau_1)}{E(t)} \frac{1}{1 + E(\tau_1)C(t, \tau_1)}} \quad (1)$$

где $m(t, \tau_1)$ - множитель, учитывающий влияние предшествующего нагружения на изменение кратковременной прочности бетона; $C(t, \tau_1)$ - мера ползучести бетона; $E(\tau_1)$ и $R(\tau_1)$ - соответственно модуль упругости и кратковременная прочность в момент загрузки; $E(t)$ и $R(t)$ - то же в момент окончания действия длительной нагрузки; $R(t, \tau_1)$ - длительная прочность при действии нагрузки между моментами вре-

мени τ_1 , и t .

Одной из наиболее известных является также модель Леонова-Панасюка, согласно которой разрушение происходит в течение двух последовательных фаз: в первой из них элемент переходит в некоторое промежуточное состояние, во второй же фазе происходит окончательное разрушение. Критерием развития трещины является достижение раскрытия в ее вершине критической величины δ_k . Перед вершиной трещины вводится некоторая зона нарушенных связей, так как в процессе разрушения в этой локальной зоне могут образоваться субмикротрещины, пустоты и другие дефекты. Исследования показали возможность применения модели для описания развития трещин в бетоне, хотя между расчетными и опытными данными имелись расхождения.

Подход к прочности бетона с точки зрения технологической поврежденности [11] позволяет рассматривать структуру бетона до приложения нагрузки. Наличие технологических трещин в конструкциях в значительной степени определяет ее работу, деформации, трещинообразование и характер разрушения. По результатам исследований установлена зависимость между количеством начальных дефектов и прочностными и деформативными характеристиками материала. Эта связь не является количественно одинаковой, и зависит от структуры бетона.

Заслуживающим внимания также считается подход к разрушению с точки зрения теории катастроф в [10] сделана попытка объединить вероятностный энтропийный подход к накоплению повреждений, характеризующий степень развития и приближения к катастрофе, с детерминированным подходом по определению предельного состояния конструкции. Основные положения: процесс разрушения рассматривается, как катастрофа (скачкообразное изменение, возникшее в виде внезапного ответа на плавное изменение внешних условий); вершина трещины – аттрактор (очаг катастрофы, наиболее слабое место в массиве бетона); предвестником катастрофы служит процесс трещинообразования, который стохастически более надежен, чем деформативность или прочность.

Для трехступенчатой иерархии в трещинообразовании формула информационной энтропии имеет вид:

$$H_i = P_1 \log_2 P_1 \log_2 P_2 - P_3 \log_2 P_3 \text{ при } \Sigma P_i = 1 \quad (2)$$

Где $P_1 \dots P_3$ – вероятность разрушения соответственно микро-, мезо-, и макроструктуры бетона. H_i изменяется от 1,585 до 0. Максимальное значение существует при $P_1 = P_2 = P_3 = 0,333$, а минимальное $H_i = 0$ при $P_1 = P_2 = 0, P_3 = 1$, т.е. при 100% вероятности развития сквозных трещин.

Основные проблемы

Невзирая на достигнутые успехи в исследовании механики разрушения бетонов, существует ряд проблем, которые касаются попыток использования линейной или нелинейной механики разрушения для оценки прочности и трещиностойкости бетонных и железобетонных элементов. Простого и понятного инженерам расчета по критериям механики разрушения еще не предложено. Существующие предложения базируются на сложном математическом аппарате, который не повышает точности расчета, а отталкивает специалистов, которые занимаются расчетами прочности. Если нет особенных трудностей при расчете бетонных элементов с трещиной, то наличие арматуры, которая пересекает трещину, существенно усложняет задание.

Разрушение безопасного сечения от продвижения трещины считается локальным и зависит от напряженного состояния в вершине трещины, но при этом отмечается существенное влияние характера распределения напряжений по всей линии распространения трещины. Существующие теоретические решения, по которым можно построить распределение напряжений перед трещиной, очень сложные и громоздкие. В инженерной практике их использование связано с серьезными трудностями. Итак, необходимо искать простые, даже приближенные или модельные решения задачи, которые позволяют построить поле напряжений перед трещиной.

Одной из актуальных проблем теории железобетона является перераспределение напряжений в бетоне вследствие неупругих деформаций. Это явление особенно усиливается в конечной зоне трещины, где уровень напряжений достаточно высокий. Знание поля напряжений перед трещиной облегчает решение этой проблемы.

На практике при нагружении элементов трещины растут медленно. Их рост изменяется с увеличением нагружения. С ростом трещины меняется напряженное состояние в сечении, а как следствие, и оценка прочности элемента. Существующие методы расчета железобетонных элементов на прочность рассматривают граничное состояние, которое во время эксплуатации не должно достигаться. Принято, что трещина в элементе занимает всю растянутую зону. Существующие методы расчета не дают возможности определить глубину растущей трещины при каком угодно уровне нагружения, не учитываются локальные характеристики разрушения от распространения трещины; такие расчеты можно построить, руководствуясь методами механики разрушения.

Выводы

1. Учитывая неоднородность материала и его напряженность, в вершине трещины возникает конечная зона или зона предразрушения. Это приводит к критическому подрастанию трещины.
2. Разрушение материала всегда связано с накоплением повреждений начальной структуры бетона на разных уровнях и поглощением энергии деформации, с последующим выделением ее на поверхность вновь образованных трещин разрушения.
3. Из-за сложности исследования гетерогенного бетона целесообразно сочетание достижений микро- и макромеханики разрушения, что могло бы позволить объяснить явления разрушения структурированного материала.

Литература

1. Броек Д. Основы механики разрушения. Лейден, 1974. пер. с англ. – М.; Высш. Школа, 1980. – 368 с.
2. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. Пособие для строит. Вузов.-М.:Высш.шк., 1991.-288с.
3. Комохов П.Г., Попов В.П. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона. – Самара: Изд-во Самарского филиала секции «Строительство»РИА, 1999. – 111с.
4. Механика и физика разрушения строительных материалов и конструкций/ Под общ. ред. Андрейкова А.Е., Лучко И.И. – Львов: Каменяр, 2000.– 656 с.
5. Механика разрушения железобетона/Пирадов К.А., Гузеев Е.А.- М.:НИИЖБ, 1998.-187 с.
6. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. Пособие: В 4т./ Под общей редакцией Панасюка В.В.-Киев: Наук. думка, 1988.
7. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.-240 с.
8. Прочность, трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных конструкций на основе механики разрушения/НАН Украины; Физ.-мех. ин-т им.Г.В.Карпенка. – Львов: Каменяр, 1999 – 348 с.
9. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами// Панасюк В.В., Сушинский А.И., Кацов К.Б.; Отв. ред. Романив О.Н.; АН Украины. Физ.-мех. ин-т. – Киев: Наук. думка, 1991. – 172с.
10. Скоробагатов С.М. Основы Теории катастроф для расчета крупноразмерных конструкций. // Бетон и железобетон.-1993.№10 с.26-28
11. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций/В.С.Дорофеев, В.Н.Выровой.-О.:Місто майстрів, 1998. – 165 с.
12. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с японск. – М.: Мир, 1982. – 232 с.