

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОСЕВОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

Н. Н. Шалобыта¹, Е. С. Матвеевко², Т. П. Шалобыта³, Н. В. Матвеевко⁴

¹ К. т. н., доцент кафедры строительных конструкций, проректор по научной работе

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru

² М. т. н., аспирант кафедры строительных конструкций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: elizabeth.brenkovich@yandex.by

³ К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: t_shalobyta@mail.ru

⁴ М. т. н., научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nikifarych@yandex.by

Реферат

Проведен анализ различных методов по оценке прочностных и деформационных характеристик на осевое растяжение бетонов нормального веса.

Ключевые слова: бетон, прочность на растяжение, испытания, напряженно-деформированное состояние.

EVALUATION OF METHODS FOR DETERMINING THE STRENGTH OF CONCRETE UNDER AXIAL EXTENSION

N. N. Shalobyta, E. S. Matveenko, T. P. Shalobyta, N. V. Matveenko

Abstract

The analysis of various methods for assessing the strength and deformation characteristics in axial tension of concrete of normal weight has been carried out.

Keywords: concrete, tensile strength, testing, stress-strain state.

Введение

Теоретическое решение вопроса о механической прочности бетона и о причинах его разрушения под действием внешних усилий встречает значительные трудности. Обычные теории прочности построены для материалов однородных и сплошных, между тем как в бетоне мы имеем пример материала с ярко выраженной неоднородностью строения. Поэтому многие теории можно применять к решению вопросов о прочности бетонных конструкций лишь с известным приближением, приписывая самому бетону, образующему конструкцию, некоторые средние свойства.

Прочностные характеристики бетона на растяжение значительно ниже прочности бетона на сжатие, поэтому в практике проектирования железобетонных конструкций данная характеристика в расчетах используется, как правило, в условиях для проверки предельных состояний эксплуатационной пригодности. Однако следует отметить, что бетон над трещиной и между трещинами (с учетом совместной работы с арматурой) способен оказывать значительное сопротивление растяжению, что дает возможность увеличить несущую способность конструкции в целом благодаря его прочностным характеристикам на растяжение. Для целого ряда конструкций, подвергающимся в процессе эксплуатации целиком либо частично воздействию растягивающих усилий, прочность бетона на растяжение является одной из основных характеристик. Следует заметить, что не столько сама величина показателя прочности бетона на растяжение является причиной пренебрежения ею при расчётах предельных состояний, сколько в большей степени сложности, связанные с точностью ее определения.

Прочностные характеристики бетона являются характеристиками собственной прочности материала при условии их постоянства в различных точках, что, как правило, в бетоне и не наблюдается. Данные величины различны для частиц цементного камня, для частиц заполнителя и в зоне контакта цементного камня с зернами заполнителя могут весьма сильно отличаться от таких же величин внутри каждого из этих компонентов в отдельности. Таким образом, неоднородность структуры бетона создает большое разнообразие в количественных значениях характеристик для одного и того же бетона.

Механические свойства бетона, которыми определяется применение данного материала в конструкциях зданий и сооружений, зависят от весьма большого числа факторов, характеризующих состав бетона и технологию его производства (рисунок 1). Одновременное воздействие факторов делает задачу исследования и установления механических свойств бетона весьма сложной. Необходимо определить

влияние каждого из факторов, установить интенсивность и пределы этого влияния, выяснить взаимодействие отдельных параметров; все это требует большого количества экспериментов, тщательной их постановки и обработки и умелого анализа результатов, что в конечном итоге накладывает свои ограничения в использовании полученных экспериментальных данных.

Рассматривая влияние структуры бетона на его прочностные свойства, следует отметить, что сопротивление бетона растяжению имеет значительно меньшую величину, чем сопротивление сжатию. Данная величина связана непосредственно с наименьшей из характеристик собственной прочности бетона, а именно с нормальным сцеплением, что совместно с нарушением сплошности бетона способствуют развитию концентрации напряжений, особенно при действии растягивающей нагрузки. Эти обстоятельства и обуславливают малую прочность бетона на растяжение. С другой стороны, неоднородность строения бетона, которая вообще является одной из главных причин большого рассеяния результатов механических испытаний этого материала, должна сказываться при экспериментальном определении величины сопротивления бетона на растяжение гораздо сильнее, чем при определении прочности на сжатие. Отношение между средним значением прочности на осевое растяжение бетона f_{ctm} и средним значением прочности на осевое сжатие $f_{cm,cube}$ бетона нормального веса колеблется в весьма широких пределах. Еще в начале прошлого века в описанных профессором Залигером опытах [1] установлены следующие границы данного коэффициента $k = f_{ctm} / f_{cm,cube} = 0,167 - 0,042$, в опытах Дютрона (Dutron) [2] коэффициент $k = 0,10 - 0,05$, а если сопротивление растяжению относить к призмочной прочности бетона, то $k = 0,13 - 0,08$ [2]. Любопытные данные получились в венских опытах Ханиш и Шпицер (Hanisch и Spitzer) [2], которые производились с бетонными плитами с целью установления прочности бетона на изгиб. Из краев разрушенных при испытании плит были осторожно вырезаны образцы для определения прочности бетона на чистое осевое растяжение; плиты испытывались в возрасте 258 дней, и, хотя бетон в них имел постоянный состав, сопротивление разрыву вырезанных образцов колебалось в пределах 2,0–2,9 МПа (т. е. на 45 % от наименьшего значения), а сопротивление сжатию контрольных кубиков – от 25,6 до 35,2 МПа (т. е. на 38 % от наименьшего значения). Данный пример, как и многие другие, показывает, с какой осмотрительностью следует относиться к результатам экспериментов с бетоном при определении его механических свойств, особенно на растяжение.



Рисунок 1 – Факторы, влияющие на прочность бетона на растяжение

Методы и результаты исследований

В настоящее время все больше количество исследований посвящено поиску оптимальной методики испытания, позволяющей дать наиболее точное значение прочности бетона на растяжение. Следует отметить, что прочность бетона на растяжение может определяться как прямым методом, путем испытаний бетонного образца в условиях осевого растяжения, так и косвенными – например, испытанием цилиндров, призм или кубов на растяжение при раскалывании или призм на растяжение при изгибе [4].

1 Осевое растяжение

Первоначально определение значение прочности бетона на растяжение устанавливали из непосредственного испытания образцов в виде «восьмерок» с квадратным поперечным сечением на осевое растяжение. Образец принимали с призматическим участком значительной длины для того, чтобы обеспечить равномерное распределение внутренних усилий в его средней части [2].

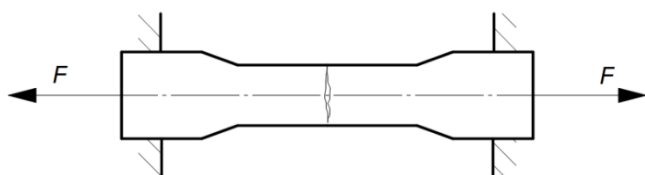


Рисунок 2 – Схема испытания образцов для определения прочности бетона на осевое растяжение [2]

Однако, как показали многочисленные экспериментальные исследования, применение образцов в виде «восьмерок» при испытании бетона на осевое растяжение, также, как это было принято и при испытании цементных растворных образцов, показывали весьма значительную неравномерность в распределении напряжений в сечении разрыва [2]. В свое время Кокер [10] изучал данный вопрос оптическим методом на прозрачных моделях. В цементных растворных образцах формой в виде английской восьмерки (рисунок 3) растягивающие напряжения σ_x в опасном сечении распределялись по кривой, причем наибольшая величина их у наружного контура в 1,74 раза превышала среднее напряжение, получающееся делением растягивающей силы на площадь сечения [2, 10]. Кроме напряжений σ_x , возникающих в направлении действующего усилия растяжения, наблюдались и напряжения в перпендикулярном направлении – σ_y , которые увеличивались от нуля на контуре до максимального значения в середине образца, где они достигали величины 0,47 от среднего значения напряжений σ_x . Данные результаты, конечно, в полной мере нельзя переносить на опыты с бетонными «восьмерками», но следует предполагать, что получаемые в результате испытаний последних результаты дают все же преуменьшенное значение для сопротивления на растяжение [2].

В настоящее время нормы [4], впрочем как и большинство других норм, только лишь **допускают** выполнять испытания бетона растягивающей нагрузкой, приложенной по оси испытательного образца в виде призмы с галтелями (рисунок 4), цилиндров или призм без галтелей (рисунок 5).

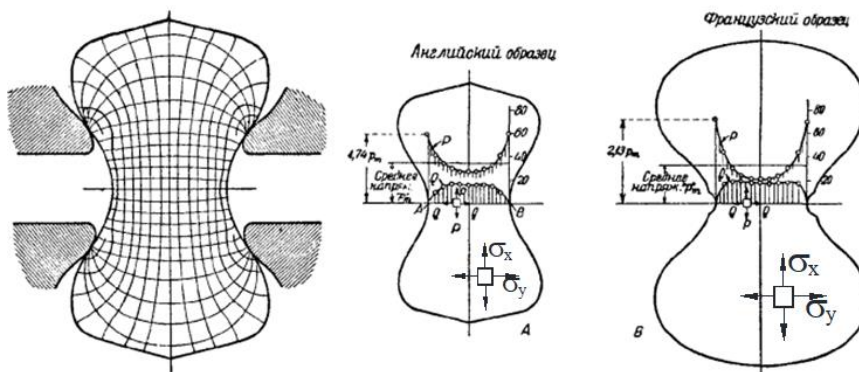
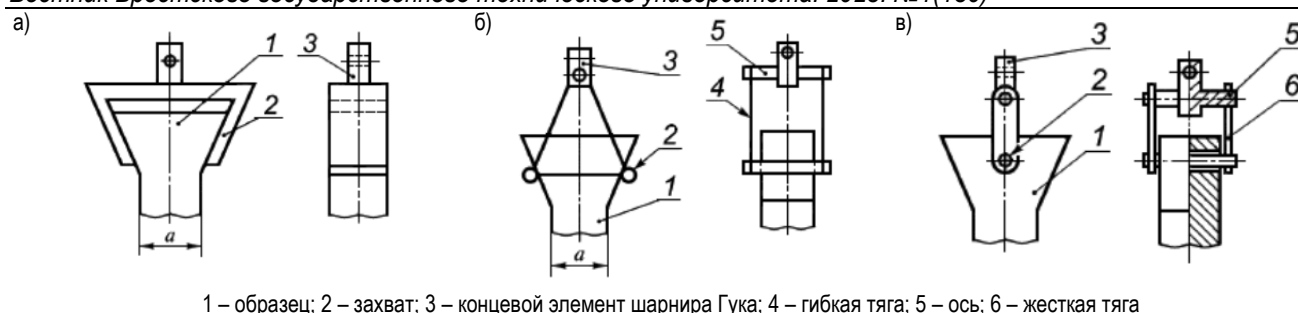
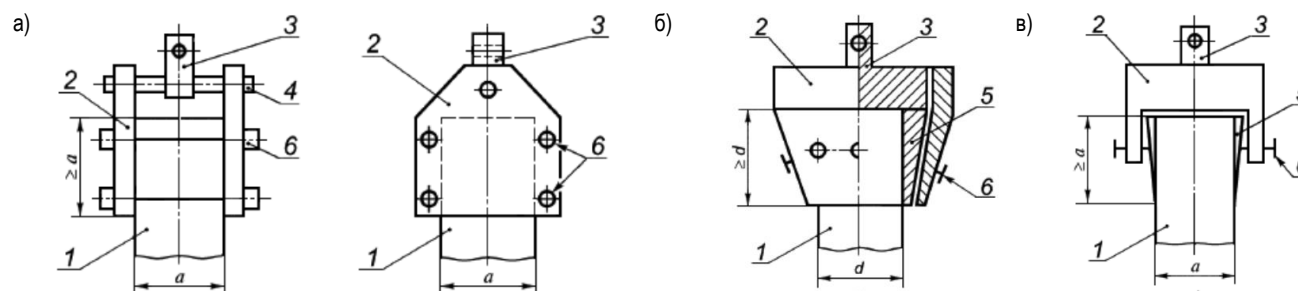


Рисунок 3 – Испытания образцов для определения прочности бетона на осевое растяжение [10, с. 496]



1 – образец; 2 – захват; 3 – концевой элемент шарнира Гука; 4 – гибкая тяга; 5 – ось; 6 – жесткая тяга

Рисунок 4 – Схемы захватов для крепления образца с галтелями [4]



1 – образец; 2 – захват; 3 – концевой элемент шарнира Гука; 4 – ось; 5 – цапга; 6 – стягивающие винты

Рисунок 5 – Схемы зажимных захватов [4]

При этом следует заметить, что только прямые испытания на осевое растяжение позволяют получить полную диаграмму деформирования бетона на растяжение. В то же время, рекомендуемые нормами косвенные методы для определения прочности бетона на осевое растяжение возможно объяснить в основном редким использованием полностью деформационных методов расчета железобетонных конструкций, а также тем, что результаты, получаемые при испытаниях на осевое растяжение, сильно зависят от правильности геометрической формы образца, точности его установки в машине и вида захватов и т. д. Так, например, захват образца в разрывной машине может создать условия, препятствующие равномерному распределению усилия по сечению образца, т. е. приведет к возникновению вторичных напряжений [6, с. 31–32]. Поэтому, на наш взгляд, при испытании на осевое растяжение важное значение имеет измерение деформации по граням образца, что дает возможность найти его физическую ось и получить более равномерное поле напряжений по всем сечениям [7].

2 Испытание трубчатого образца

Учитывая трудности безупречного проведения опыта с бетоном на осевое растяжение, Погани (Pogany) [2] предлагал определять величину прочности бетона на растяжение путем испытания полых цилиндрических образцов давлением воды. В его опытах длина образца принималась 100 мм, внешний диаметр – 54 мм, внутренний – 32 мм. Образец устанавливается, с одной стороны, в стальную трубу с запаянным дном, а с другой стороны – в трубу, соединенную с насосом и манометром. В местах соединения образца с трубами вводилась изолирующая прокладка. Пренебрегая напряжениями сжатия, возникающими по направлению оси образца, Погани вычислял прочность бетона на растяжение как кольцевое растягивающее напряжение, пользуясь формулой Ламе (Lame) для цилиндрической трубы с толстыми стенками, подверженной внутреннему давлению:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

где p – давление воды;

r_1 и r_2 – соответственно внешний и внутренний радиусы поперечного сечения образца;

r – радиус того кольца, в котором определяется напряжение σ_t .

Принимая $r = r_1$ для наружной поверхности образца, получаем:

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot p \cdot r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \cdot \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right). \quad (2)$$

С учетом размеров образца имеем, что $\sigma_t = 1.08 \cdot p$.

Сопоставляя результаты своих опытов с параллельными испытаниями нормальных «восьмерок», Погани [2] получил для образцов из цементно-песчаного раствора результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов определения прочности бетона на растяжение

Возраст образцов при испытании	Среднее значение прочности бетона на растяжение (разрыв), МПа	
	образцы «восьмерки» на осевое растяжение	образцы цилиндры на кручение
3 суток	1,21	1,295
7 суток	1,81	2,21

При этом, однако, следует заметить, что примененная для вычисления прочности бетона на растяжение формула относится к наименьшему из кольцевых напряжений, тогда как наибольшая величина его возникает, как это следует из формулы Ламе, на внутренней поверхности цилиндра, т. е. при $r = r_0$, что для рассматриваемых образцов дает почти вдвое большую величину против указанной автором предложения [2].

3 Определение прочности бетона на растяжение при испытании на кручение

Величину прочности бетона на растяжение пытались определять также из опыта с кручением цилиндрического образца [2]. У поверхности такого образца (рисунок 6) в каждой точке возникают касательные напряжения τ , из которых одно направлено по образующей цилиндра, а другое – к нему перпендикулярно по касательной к окружности поперечного сечения, проходящего через рассматриваемую точку. Из формулы (3) для определения главных напряжений, лежащих в касательной к цилиндру плоскости следует, что оба главных напряжения направлены под углом 45° к оси цилиндра и одному из них – растягивающему – отвечают трещины разрыва, которые можно наблюдать при скручивании бетонных образцов. Действительно, сопротивление бетона растяжению значительно меньше его сопротивления сдвигу, поэтому в данном случае критическим для прочности образца является не касательное напряжение τ , а главное растягивающее напряжение σ_t той же величины.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau^2}. \quad (3)$$

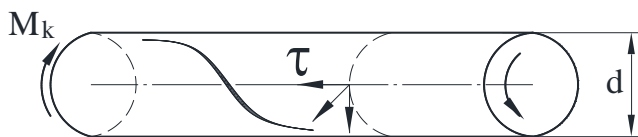


Рисунок 6 – Испытания образцов для определения прочности бетона на растяжение при кручении [1–2]

Допуская справедливость законов упругости до момента разрушения бетона, можно вычислить напряжение τ по известной формуле (4) и принять его равным среднему значению прочности бетона при растяжении f_{ctm} :

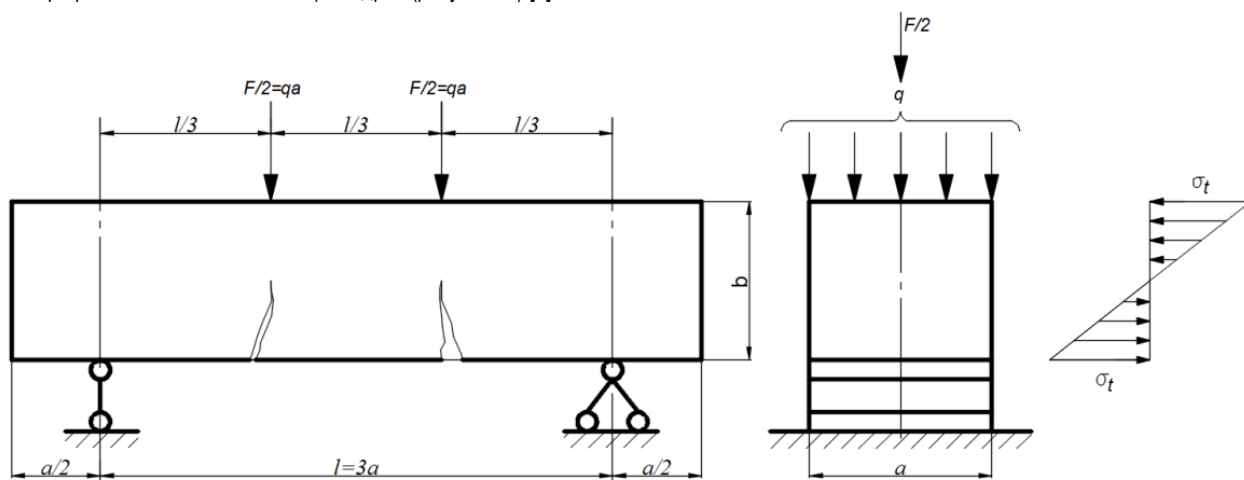
$$f_{ctm} = \tau = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d^3} \quad (4)$$

Данную методику использовали Руделлоф, Бах (Rudeloff, Bach) и другие в своих опытах [2]. Так, в опытах Баха [2] с бетоном кубиковая прочность на осевое сжатие образцов, которого равнялась 29,4 МПа, среднее сопротивление скручиванию (или разрыву) получилось равным 2,56 МПа, т. е. $k = \frac{2,56}{29,4} \approx 0,09$.

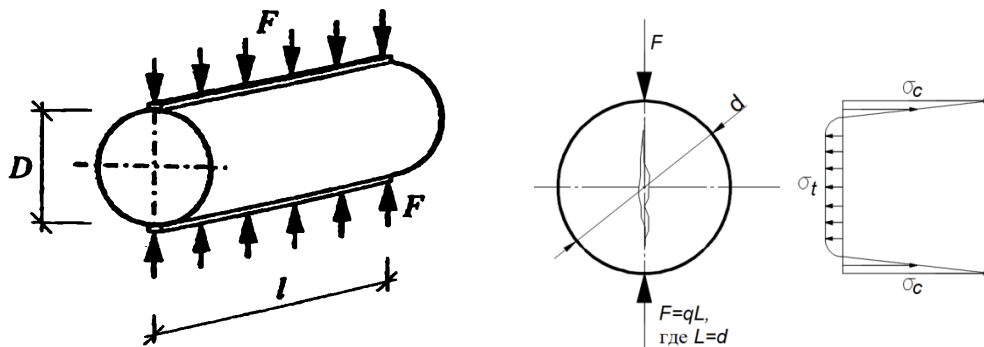
Кроме описанных выше методов экспериментального определения прочности бетона на растяжение, учитывая все сложности, возникающие при испытании образцов, в практике последних десятилетий в нормативные документы многих странах, как уже отмечалось выше, внесены и нашли наибольшее распространение косвенные методы.

Косвенные методы определения прочности бетона на растяжение возникли как альтернатива методу прямого (осевого) растяжения ввиду сложности его реализации. Суть косвенных методов заключается в создании вторичных растягивающих полей напряжения в отдельных участках опытного образца в результате приложения к нему внешней сжимающей нагрузки. Косвенные методы включают в себя: испытание на изгиб бетонных балок (рисунок 7а), испытание на растяжение при раскалывании бетонных цилиндров (рисунок 7б) [4].

а)



б)



а) испытание на растяжение при изгибе бетонных балок;

б) испытание на растяжение при раскалывании бетонных цилиндров

Рисунок 7 – Схема испытания образцов для определения прочности бетона косвенными методами [4]

4 Испытание бетонных балок на изгиб

Бетонная балка, подверженная действию изгибающей нагрузки, доходит до разрушения вследствие потери бетоном прочности в крайних растянутых волокнах. Первая трещина разрыва, появившаяся в растянутой зоне балки, немедленно влечет за собой разрушение, так как в поперечном сечении, соответствующем этой трещине, рабочая высота и момент сопротивления уменьшаются, а это вызывает дальнейший рост напряжений.

Отсюда, естественно, возникает мысль определять прочность бетона на растяжение $f_{ct,fe}$ из испытаний на изгиб бетонных балок. Однако вычисление величины $f_{ct,fe}$ по результатам экспериментальных исследований образцов-балок на изгиб представляет значительные трудности. Если балка имеет прямоугольное поперечное сечение $b \times h$, а изгибающий момент в балке равен M , то, допуская справедливость формулы Навье до момента разрушения бетона, имеем:

$$f_{ct,fe} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

Однако, как показывает сопоставление результатов, полученных данным условным путем, с результатами непосредственного испытания бетона нормального веса на осевое растяжение, первые всегда больше вторых в среднем в 2 раза [2]. Объяснить данное различие возможно только с точки зрения не совсем корректного применения формулы Навье, учитывающей упругий (линейный) закон распределения напряжений в сжатой и растянутой зонах, что применительно к такому материалу, как бетон, не совсем корректно. Поэтому наиболее правильный подход для определения прочности бетона на растяжение $f_{ct,fe}$ из испытаний на изгиб заключается, прежде всего, в установлении действительной эпюры напряжений.

Определения прочности бетона на растяжение при раскалывании, включающей изготовление бетонного образца (цилиндра или куба) и испытание его на сжатие путем приложения разрушающей нагрузки к его боковой поверхности образца с двух диаметрально расположенных сторон, до раскалывания, с последующим расчетом прочности по формулам:

– при испытании цилиндров
$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot l}; \quad (6)$$

– при испытании кубов
$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot a^2}. \quad (7)$$

Косвенные испытания не создают условий для равномерного распределения напряжений на поверхности образца, в первую очередь, осевых. Часто напряжения на поверхности разрушения не являются одноосными. Следовательно, определение прочности на растяжение становится приблизительным, и, кроме того, построение полной диаграммы деформирования «напряжение – деформация» по вышеупомянутым косвенным испытаниям невозможно.

5 Новые подходы к определению прочности бетона на растяжение

В настоящее время все больше экспериментальных исследований посвящено попыткам преодоления недостатков существующих методов и методик определения прочности бетона на растяжение.

J. Kim и M. R. Taha [5], исследуя метод прямого осевого растяжения бетона и столкнувшись с проблемой неравномерного приложения растягивающей осевой нагрузки, предложили усовершенствовать методику испытаний на осевое растяжение.

В качестве образцов для испытаний были выбраны цилиндры диаметром 101,6 мм и высотой 203,2 мм. К торцевым граням цилиндров на эпоксидной смоле приклеивались стальные пластины, имеющие отверстие с резьбой под болты определенного диаметра. Образец с помощью болтов крепился к пластинам специальных захватов испытательной установки (рисунок 6). Особенностью данных захватов является наличие в них подшипников качения, что позволяет в процессе нагружения максимально совместить оси приложения растягивающего усилия и центра тяжести образца.

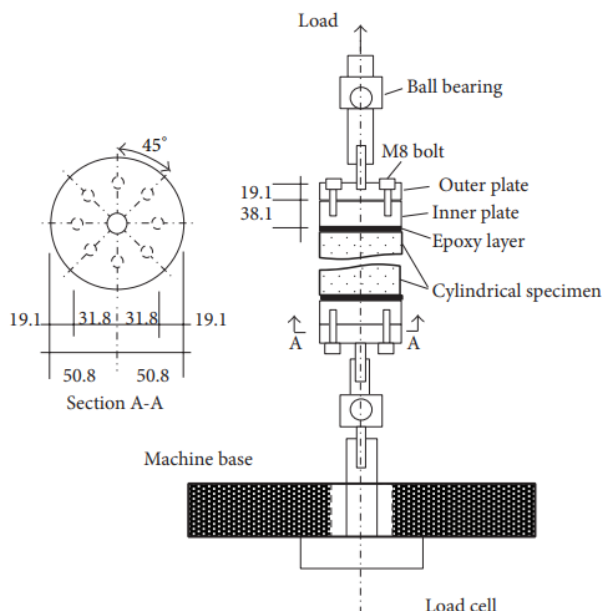
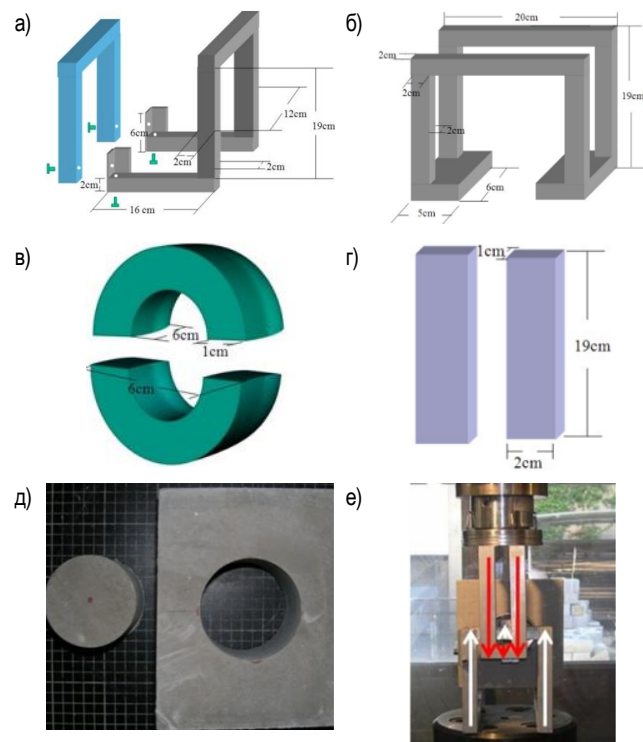


Рисунок 6 – Схема испытательной установки, предложенной J. Kim и M. R. Taha [5]

По результатам выполненных экспериментальных исследований 12 образцов, авторами [5] установлено, что прочность бетона на осевое растяжение в среднем в 2,5 раза ниже, чем прочность бетона на растяжение при изгибе образцов призм, выполненных из того же состава бетона и в 1,42 раза ниже прочности бетона на растяжение при раскалывании образцов цилиндров.

Определению прочности бетона методом прямого растяжения с использованием нового устройства нагружения посвящено исследование группы учёных под руководством V. Sarfarazi [8]. Перед авторами стояла задача разработать устройство, позволяющее преобразовывать сжимающее усилие, которое возможно создать при помощи любого промышленного прессы, в растягивающее. Предложенное устройство состоит из нескольких отдельных деталей, выполненных из металла (рисунок 7 а-г). Деталь № 1 разделена на две отдельные части: «U»-образную и такую же с двумя присоединенными к ней «L»-образными частями (рисунок 7а). Деталь № 2 неразделима и состоит из двух «U»-образных элементов, которые соединяются между собой двумя пластинами (рисунок 7б). Деталь № 3 представляет собой две полуцилиндрические пластины размером 75×60×10 мм (рисунок 7в). Деталь № 4 состоит из двух отдельных пластин с размерами 190×20×10 мм (рисунок 7г).

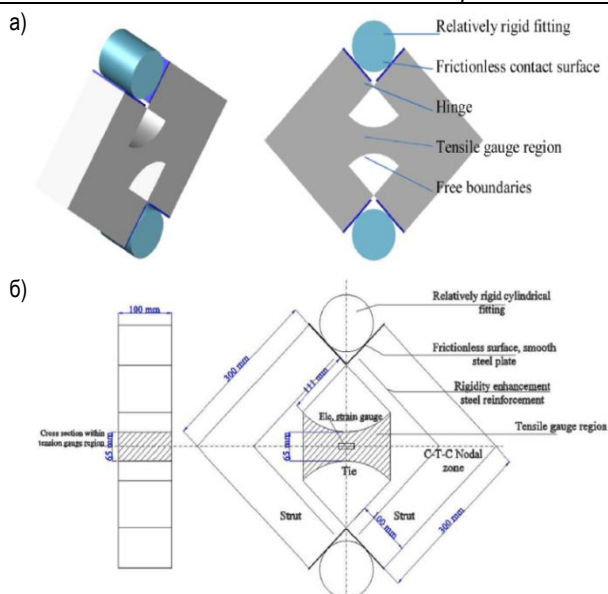


а), б), в) и г) – детали № 1, № 2, № 3 и № 4 устройства нагружения соответственно; д) – опытный образец; е) – испытание бетонного образца на растяжение
Рисунок 7 – Испытаний бетона на осевое растяжение V. Sarfarazi [8]

В качестве опытных образцов были использованы бетонные призмы размером 150×190×6 мм с внутренним отверстием диаметром в 75 мм (рисунок 7д). Полуцилиндрические пластины детали № 3 устанавливаются в отверстие образца, затем в это отверстие вставляются металлические пластины детали № 4. Вертикальное сжимающее усилие прессы через «U»-образные элементы деталей № 1 и № 2 передается соответственно на нижнюю и верхнюю пластины детали № 4. (рисунок 7е). Таки образом, участки бетонного образца призмы, расположенные по горизонтальной оси в обе стороны от отверстия, испытывают растягивающее воздействие.

Прочность бетона на осевое растяжение, полученная при испытании образца с использованием установки преобразования сжимающей нагрузки в растягивающую, была значительно ниже прочности бетона того же состава при испытании на раскалывание с разницей в 33 %.

Достаточно инновационный подход к определению характеристик прочности бетона на растяжение предложили ученые из Ирака [9]. Определение прочности бетона на растяжение авторами предлагается путем приложения равнодействующей усилий от внешней нагрузки к расчетному участку опытного образца (рисунок 8а). В бетонной перемычке образца в этом случае создается состояние чистого осевого растяжения и практически равномерных растягивающих напряжений в установленной области измерения (рисунок 8б).



а – геометрическая форма образцов;
 б – схема распределение напряжений
 в рассматриваемой зоне опытного образца
Рисунок 8 – Модель определения прочности
 бетона на осевое растяжение [9]

Сжимающая нагрузка прикладывается с помощью пресса через жесткую цилиндрическую опору на гладкие стальные пластины, закрепленные на образце. Размеры цилиндрической опоры выбраны таким образом, чтобы избежать неточностей в передаче нагрузки. Геометрия образцов симметрична относительно осей *x* и *y*, что исключает случайные отклонения в передаче сжимающей нагрузки.

Анализ распределения напряжений в пределах рассматриваемой области опытного образца показал, что нагруженное состояние в области переключки является чистым растягивающим напряжением, так как развитие дополнительных напряжений сжатия в ближайшей области не наблюдается.

Для оценки надежности предложенного метода определения прочности бетона на растяжение авторами [9] была подготовлена экспериментальная программа. С этой целью были изготовлены бетонные образцы с различной величиной крупного заполнителя и испытаны в возрасте 7 и 28 суток тремя методами: на изгиб, на раскалывание и по предложенной методике испытаний [9].

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что прочность на осевое растяжение, определенная с использованием предложенной модели, выше, чем значение прочности на растяжение при раскалывании, и ниже, чем полученное значение прочности на растяжение при изгибе. Результаты испытаний показывают, что образцы с высокой прочностью на осевое сжатие имеют более низкое отношение прочности на осевое растяжение к прочности на осевое сжатие. Среднее значение прочности на осевое растяжение составляет приблизительно 8 % и 6,8 % от среднего значения прочности кубов базового размера на осевое сжатие через 7 и 28 суток соответственно; в то время как для образцов с низкой прочностью на осевое сжатие соответствующие значения, как правило, составляют 11 % и 8 % соответственно.

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований в работах [4], [8] и [9], содержат информацию о значениях прочности бетона на осевое растяжение рассмотренными полученную по предложенные методикам испытаний, а также значения прочности бетона на растяжение при изгибе и раскалывании для образцов с аналогичными характеристиками.

Прочностные характеристики бетона на осевое растяжение по результатам испытания опытных образцов согласно ISO 1920-4:2020 определяются:

- при раскалывании – $f_{ct,ax} = 0.9 \cdot f_{ct,sp}$; (6)
- при изгибе – $f_{ct,ax} = 0.5 \cdot f_{ct,fe}$; (7)

где $f_{ct,ax}$ – прочность бетона на осевое растяжение;
 $f_{ct,sp}$ – прочность бетона на растяжение при раскалывании;
 $f_{ct,fe}$ – прочность бетона на растяжение при изгибе.

Основываясь на выражениях (6) и (7), определяем соотношение прочности бетона на растяжение, полученное в результате реализации предложенных методик (таблица 2).

Таблица 2 – Оценка результатов определения прочности бетона на растяжение

Метод	Прочность бетона на растяжение при раскалывании ($f_{ct,sp}$), МПа	Прочность бетона на растяжение при изгибе ($f_{ct,fe}$), МПа	Прочность бетона при осевом растяжении			Коэффициент вариации
			($f_{ct,ax}$), МПа	$f_{iso_{ct,ax}} = 0.9 \cdot f_{ct,sp}$, МПа	$f_{iso_{ct,ax}} = 0.5 \cdot f_{ct,fe}$, МПа	
Kim J. и Taha M.R. [5]	2,28	3,75	1,55	2,052	1,875	0,133
	2,33	3,93	1,77	2,097	1,965	
	1,82	4,48	1,52	1,638	2,24	
	3,02	5,07	2,13	2,718	2,535	
	3,01	5	2,13	2,709	2,5	
	3,03	5,24	2,25	2,727	2,62	
	3,84	6,07	2,44	3,456	3,035	
	3,8	6,73	2,53	3,42	3,365	
	3,84	6,78	2,5	3,456	3,39	
$f_{ct,ax,m}$			2,091	2,697	2,614	
Sarfazai V. [8]	4,5	–	3,1	4,05	–	0,208
	4,7	–	3,1	4,23	–	
	4,4	–	2,9	3,96	–	
$f_{ct,ax,m}$			3,03	4,08		
Sa'ad Fahad Resan [9]	1,33	2,5	1,75	1,197	1,25	0,163
	1,5	2,59	2,11	1,35	1,295	
	1,5	2,69	2,46	1,35	1,345	
	2	4,08	2,27	1,8	2,04	
	2	4,27	2,39	1,8	2,135	
	2,4	4,47	2,56	2,16	2,235	
	1,51	2,38	1,67	1,359	1,19	
	1,67	2,57	1,9	1,503	1,285	
	1,82	2,78	2,14	1,638	1,39	
	1,82	3,37	1,92	1,638	1,685	
	1,92	3,41	2,08	1,728	1,705	
	2,01	3,97	2,23	1,809	1,985	
$f_{ct,ax,m}$			2,123	1,611	1,628	

Заключение

По результатам оценки методов определения прочности бетона при осевом растяжении следует, что весьма малая прочность бетона на растяжение по сравнению с его прочностью на сжатие представляет один из наиболее существенных дефектов данного материала. Использование различных методов, установок и образцов различных конфигураций, форм и размеров не позволили нейтрализовать вторичные напряжения, наличие которых приводят к неравномерному приложению напряжений к бетонным образцам. Поэтому большая неопределенность в точном установлении прочности на растяжение заставила «железобетонщиков» в своих расчетах использовать различные значения $f_{ctk,0.05}$, $f_{ctk,0.95}$ и f_{ctm} для учета сопротивления бетона в растянутых зонах армированных элементов.

Список цитированных источников

1. Залигер, Р. Железобетон. Его расчет и проектирование : пособие для высших технических учебных заведений / под редакцией проф. П. Я. Камenceва. – 5-е изд., стереотипное. – М. : ГНТИ, 1931. – 671 с.
2. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона / Я. В. Столяров. – М. : Стройиздат Наркомстроя, 1941. – 448 с.
3. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции : Общий курс: Учебник для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.
4. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-2012. – Введ. 01.02.2016. – Минск : Госстандарт, 2016. – 29 с.
5. Kim, J. Experimental and numerical evaluation of direct tension test for cylindrical concrete specimens / J. Kim, M. R. Taha // *Advances in Civil Engineering*. – 2014. – 1–8 pp.
6. Бушков, В. А. Железобетонные конструкции : в 2-х ч. / В. А. Бушков. – М. : Всесоюзная промышленная академия, 1940. – Ч. 1. – 158 с.
7. Безгодов, И. П. О повышении предела прочности и деформативности бетона при растяжении / И. П. Безгодов // *Бетон и железобетон*. – 2012. – № 1. – С. 5–7.
8. A new approach for measurement of tensile strength of concrete / V. Sarfarazi [et. al.] // *Period. Polytech. Civ. Eng.* – 2016. – №60 (2). – 199–203 pp.
9. Resan, S. F. New approach of concrete tensile strength test / S. F. Resan [et. al.] // *Case Studies in Construction Materials* – 2020. – Vol. 12.
10. Кокер, Э. Оптический метод исследований напряжений / Э. Кокер, Л. Файлон. – М. : ОНТИ-Л, 1936. – 645 с.
11. Испытания бетона. Часть 4. Прочность затвердевшего бетона : ISO 1920-4:2020. – Введ. 07.01.2020. – Минск : Госстандарт, 2020. – 36 с.

References

1. Zaliger, R. ZHelezobeton. Ego raschet i proektirovanie : posobie dlya vysshih tekhnicheskikh uchebnyh zavedenij / pod redakciej prof. P. Ya. Kamenceva. – 5-e izd., stereotipnoe. – M. : GNTI, 1931. – 671 s.
2. Stolyarov, Ya. V. Vvedenie v teoriyu zhelezobetona / Ya. V. Stolyarov. – M. : Strojizdat Narkomstroya, 1941. – 448 s.
3. Bajkov, V. N. ZHelezobetonnye konstrukcii : Obshchij kurs: Uchebnik dlya vuzov / V. N. Bajkov, E. E. Sigalov. – 5-e izd., pererab. i dop. – M. : Strojizdat, 1991. – 767 s.
4. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam : GOST 10180-2012. – Vved. 01.02.2016. – Minsk : Gosstandart, 2016. – 29 s.
5. Kim, J. Experimental and numerical evaluation of direct tension test for cylindrical concrete specimens / J. Kim, M. R. Taha // *Advances in Civil Engineering*. – 2014. – 1–8 pp.
6. Bushkov, V. A. ZHelezobetonnye konstrukcii : v 2-h ch. / V. A. Bushkov. – M. : Vsesoyuznaya promyshlennaya akademiya, 1940. – CH. 1. – 158 s.
7. Bezgodov, I. P. O povyshenii predela prochnosti i deformativnosti betona pri rastyazhenii / I. P. Bezgodov // *Beton i zhelezobeton*. – 2012. – № 1. – S. 5–7.
8. A new approach for measurement of tensile strength of concrete / V. Sarfarazi [et. al.] // *Period. Polytech. Civ. Eng.* – 2016. – №60 (2). – 199–203 pp.
9. Resan, S. F. New approach of concrete tensile strength test / S. F. Resan [et. al.] // *Case Studies in Construction Materials* – 2020. – Vol. 12.
10. Koker, E. Opticheskij metod issledovanij napryazhenij / E. Koker, L. Fajlon. – M. : ONTI-L, 1936. – 645 s.
11. Ispytaniya betona. CHast' 4. Prochnost' zatverdevshego betona : ISO 1920-4:2020. – Vved. 07.01.2020. – Minsk : Gosstandart, 2020. – 36 s.

Материал поступил 02.02.2023, одобрен 07.02.2023, принят к публикации 19.02.2023