

УДК 624.012.35

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА В РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ ИЗГИБАЕМОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА

Никулин А.И.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», Белгород, Россия (308012, Белгород, ул. Костюкова, 46), e-mail: nikulin137@yandex.ru

На основе энергетических соотношений разработана методика трансформирования диаграмм центрального растяжения бетона в диаграммы деформирования при изгибе. Эталонная и трансформированная диаграммы приняты без ниспадающей ветви, что объясняется невозможностью снижения величин нагрузок гравитационного характера, действующих на изгибаемые железобетонные конструкции. С помощью составленного алгоритма и соответствующей программы расчёта получены параметры трансформированных диаграмм растяжения тяжёлого бетона при кратковременном нагружении, в том числе величины предельных относительных деформаций бетона в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов. В качестве примера приведены значения параметров трансформированных диаграмм для бетонов различных классов. Установлено, что с повышением класса бетона возрастает его предельная растяжимость при изгибе. Выполненные расчеты показали, что принятое в действующих нормах постоянное значение предельной относительной деформации бетона при растяжении 0,00015 соответствует только одному классу тяжелого бетона В20. Поскольку предлагаемая методика определения величин предельных относительных деформаций бетона в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов построена без привлечения эмпирических зависимостей, то возможно её применение для любых классов и видов конструктивных бетонов.

Ключевые слова: диаграмма, центральное растяжение, бетон, трансформированная диаграмма, энергетические соотношения, изгибаемый элемент, предельная относительная деформация бетона при растяжении.

FOR CALCULATIONSTHE LIMITING RELATIVE STRAINSOFCONCRETE IN THE TENSIONAREA OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENT

Nikulin A.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia (308012, Belgorod, Kostyukov str., 46), e-mail: nikulin137@yandex.ru

A method of transformation diagrams of the central tension concrete to diagrams of deformation in bending has been developed on the basis of energy ratios. Standard and transformed diagrams has been accepted without falling branches, that explained by the inability to reduce the loads quantities of gravitational character acting on the flexural reinforced concrete structures. With the help of the compiled algorithm and the corresponding program for calculating the parameters for the transformed diagrams of heavy concrete tensionwith short-time loading, including the limiting values of relative deformations of concrete in the tensionzone of bent reinforced concrete elements, were obtained. As an example, values of transformed diagrams for various classes of concrete were shown. There is found that with an increasing of class of concrete its limit of tensibility in bending is raised. Since the proposed method of determining the limit values of relative deformations of concrete in the tension zone of flexural reinforced concrete elements built without the involvement of empirical relationships, it is possible to use it for all classes and types of structural concrete.

Keywords: diagram, the central tension, concrete, transformed diagram, energy relations, bending element, the limiting relative strainof tensileconcrete.

В соответствии с действующими нормами (СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») одним из обязательных этапов проектирования изгибаемых железобетонных конструкций является расчет по образованию нормальных трещин, который рекомендуется выполнять по предельным усилиям или по нелинейной деформационной модели. Проведенные в последние годы исследования [3, 5, 9] показывают, что предпочтение следует отдавать деформационной

расчетной модели, хорошо отражающей фактический характер работы железобетона на всех этапах вплоть до его разрушения. Это позволяет с единых позиций выполнять расчеты железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и по деформациям.

В частности, для определения усилия трещинообразования в нормальном сечении изгибаемого железобетонного элемента необходимо знать параметры диаграмм механического состояния бетона [2, 3, 8] и арматуры [4]. При этом основные прочностные и деформативные характеристики материалов при сжатии и растяжении получают на стандартных образцах сравнительно небольших размеров, испытываемых при равномерном (однородном) распределении деформаций и напряжений в их поперечном сечении. Полученная в процессе таких испытаний равновесная диаграмма арматуры практически полностью соответствует условиям её работы в сечении железобетонного элемента [4]. Что касается диаграмм сжатия и растяжения бетона, то в изгибаемых железобетонных конструкциях условия работы бетона в сжатой и растянутой зонах существенно отличаются от соответствующих условий испытаний стандартных образцов, так как бетон работает в условиях неравномерного распределения деформаций и напряжений, т.е. при неоднородном деформировании [3, 8]. В первую очередь эта неравномерность отражается в существенном увеличении (в среднем в 1,75 раза) предельных величин относительных деформаций ε_{bu} и ε_{btu} . Ранее в статье [7] на основе энергетического подхода автором представлена методика определения величин предельных относительных деформаций бетона ε_{bu} применительно к сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов при исчерпании прочности по нормальному сечению.

Представляется, что для начального этапа трещинообразования изгибаемого железобетонного элемента необходимо также применить энергетический подход [1, 8], позволяющий из эталонной диаграммы центрального растяжения бетона получить её трансформированный аналог (рис. 1), который и определяет вид эпюры напряжений в растянутой зоне нормального сечения.

При этом обе диаграммы растяжения бетона в виде криволинейных зависимостей приняты без ниспадающей ветви, что объясняется невозможностью снижения величин нагрузок гравитационного характера, действующих на изгибаемые железобетонные конструкции.

В качестве эталонной диаграммы при осевом растяжении принимаем нелинейную кривую с начальным модулем упругости E_{bt1} , проходящую через предельную точку с координатами R_{bt} и ε_{btR} (см. кривую 1 на рис. 1).

Для аналитического описания диаграммы растяжения бетона при центральном нагружении используем дробно-рациональную функцию вида [8]:

$$\sigma_{bt} = \frac{E_{bt1} \varepsilon_{bt} (1 + D_{bt1} \varepsilon_{bt})}{1 + C_{bt1} \varepsilon_{bt}}, \quad (1)$$

где E_{bt1} , D_{bt1} , C_{bt1} – начальный модуль упругости и параметры нелинейности деформирования бетона, получаемые экспериментально-теоретическим путем; σ_{bt} , ε_{bt} – текущие значения напряжений и деформаций при растяжении.

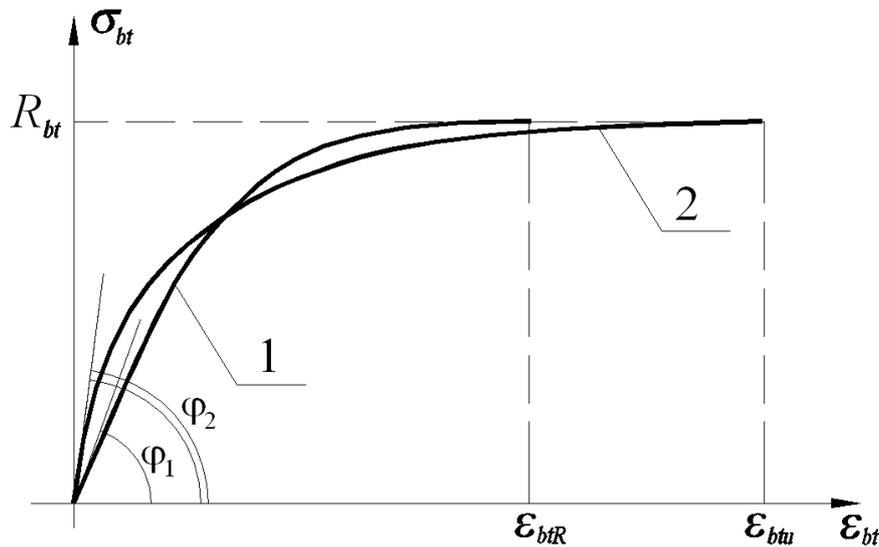


Рис. 1. Диаграммы деформирования бетона при центральном и неоднородном растяжении (кривые 1 и 2): $\varphi_1 = \arctg(E_{bt1})$; $\varphi_2 = \arctg(E_{bt2})$

Для нахождения указанных параметров диаграмм центрального растяжения бетона используются как экспериментальные (нормированные) данные [СП 63.13330.2012], так и общепринятые теоретические предпосылки [2, 3, 5].

К нормируемым параметрам относятся:

- предельное сопротивление бетона центральному растяжению R_{bt} ;
- предельная относительная деформация бетона при центральном растяжении ε_{btR} ;
- нормативный модуль упругости бетона E_{bn} , величина которого должна устанавливаться при напряжении $\sigma_b = 0,3R_b$.

На основании обобщения данных, представленных в работах [2, 3, 6, 9], для определения величины ε_{btR} применительно к тяжелому бетону классов от В10 до В100 можно рекомендовать следующую эмпирическую зависимость:

$$\varepsilon_{btR} = \frac{1}{15} \sqrt[3]{\left(\frac{R_{bt}}{E_{bn}}\right)^2}. \quad (2)$$

Что касается двух других параметров (R_{bt} , E_{bn}) то нормативная база их значений для широкого диапазона используемых в настоящее время бетонов достаточно хорошо разработана и постоянно пополняется.

Входящий в формулу (1) начальный модуль упругости E_{bt1} отличается от нормативного модуля E_{bn} , который по существу является секущим модулем деформаций бетона при сжатии. Кроме того, согласно экспериментальным данным [6] начальные модули упругости бетона при сжатии и растяжении не равны между собой ($E_{bt1} \neq E_{bt2}$). В этой же работе приводится эмпирическая зависимость, показывающая соотношение между этими величинами:

$$E_{bt1} = 0,0064E_{bn}(R_b + 94), \quad (3)$$

где E_{bn} – начальный модуль упругости бетона при сжатии, МПа, определяемый по формулам из работы [7]:

$$E_{bn} = \frac{E_{bn}}{0,7} \left(1 - \frac{0,3R_b}{E_{bn} \varepsilon_{bR}} \left(2 - \frac{R_b}{E_{bn} \varepsilon_{bR}} \right) \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{bR} = 0,022 \sqrt[3]{R_b/E_{bn}}. \quad (5)$$

Параметры нелинейности D_{bt1} , C_{bt1} для уравнения (1), принятого для описания диаграммы центрального растяжения бетона, определяются исходя из следующих двух условий:

- конечная точка диаграммы центрального растяжения бетона имеет координаты $\sigma_{bt} = R_{bt}$ и $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{btR}$;
- касательный модуль деформаций в предельной точке диаграммы центрального растяжения равен нулю $\frac{\partial \sigma_{bt}}{\partial \varepsilon_{bt}} = 0$.

Указанные условия после соответствующих преобразований представлены следующими зависимостями:

$$D_{bt1} = -\frac{R_{bt}}{E_{bt1} \varepsilon_{btR}^2}, \quad (6)$$

$$C_{bt1} = \frac{E_{bt1}}{R_{bt}} - \frac{2}{\varepsilon_{btR}}. \quad (7)$$

Диаграмму деформирования бетона при неоднородном растяжении (см. кривую 2 на рис. 1) получаем путем трансформирования исходной (эталонной) диаграммы на основе использования энергетических соотношений [1, 8]. Для аналитического описания искомой диаграммы принимается функция, аналогичная (1) с учетом замены индексов при неизвестных параметрах (вместо 1 подставляется индекс 2). Для определения этих параметров (E_{bt2} , D_{bt2} , C_{bt2}) и искомой величины предельной относительной деформации (ε_{bt2}) приняты следующие гипотезы и допущения:

- предельное значение удельной энергии деформирования бетона при неоднородном

растяжении (что соответствует растянутой зоне сечения изгибаемого элемента на этапе образования первой трещины) равно удельной энергии разрушения центрально растянутого бетонного образца;

– для предельной стадии деформирования бетона при неоднородном растяжении деформация волокна, проходящего через центр тяжести эпюры растягивающих напряжений, равна предельной деформации бетона при центральном растяжении ε_{btR} ;

– критерием начала процесса трещинообразования в нормальном сечении изгибаемого железобетонного элемента является достижение фибровым волокном растянутой зоны этого элемента предельной величины относительной деформации ε_{btu} с одновременным исчерпанием сопротивления бетона растяжению R_{bt} ;

– диаграмма неоднородного растяжения бетона имеет экстремум в точке с координатами $\sigma_{bt} = R_{bt}$ и $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{btu}$.

Аналитическое отображение принятых гипотез приводит к следующей системе уравнений:

$$D_{bt2} = -\frac{R_{bt}}{E_{bt2} \varepsilon_{btu}^2}, \quad (8)$$

$$C_{bt2} = \frac{E_{bt2}}{R_{bt}} - \frac{2}{\varepsilon_{btu}}. \quad (9)$$

$$\frac{\varepsilon_{btR}}{\varepsilon_{btu}} = \frac{\int_0^{x_t} \sigma_{btz} z dz}{x_t \int_0^{x_t} \sigma_{btz} dz}, \quad (10)$$

$$\int_0^{\varepsilon_{btR}} \sigma_{bt} d\varepsilon = \frac{1}{x_t} \int_0^{x_t} \int_0^{\varepsilon_{btz}} \sigma_{btz} d\varepsilon_{bt} dz, \quad (11)$$

где D_{bt2}, C_{bt2} – параметры нелинейности диаграммы неоднородного растяжения бетона; x_t – высота растянутой зоны бетона в сечении изгибаемого железобетонного элемента; z – текущее расстояние от нейтральной оси сечения до рассматриваемого волокна эпюры напряжений в растянутой зоне бетона; σ_{btz} – текущее напряжение в рассматриваемом волокне эпюры напряжений; ε_{btz} – текущая относительная деформация в рассматриваемом волокне эпюры деформаций в растянутой зоне бетона.

Зависимости (10) и (11) после интегрирования применительно к прямоугольному сечению изгибаемого железобетонного элемента будут иметь следующий вид:

$$\frac{\varepsilon_{btR}}{\varepsilon_{btu}} = \frac{\frac{D_{bt2}\varepsilon_{btu}}{3} + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}}\right) \times \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \cdot \left(1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{bt2}\varepsilon_{btu})}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}}\right) \right]}{\frac{D_{bt2}\varepsilon_{btu}}{2} + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}}\right) \times \left[1 - \frac{\text{Ln}(1 + C_{bt2}\varepsilon_{btu})}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \right]}, \quad (12)$$

$$\frac{E_{bt1}\varepsilon_{btR}}{C_{bt1}} \left\{ \frac{D_{bt1}\varepsilon_{btR}}{2} + \left(1 - \frac{D_{bt1}}{C_{bt1}} \right) \left(1 - \frac{\ln(1 + C_{bt1}\varepsilon_{btR})}{C_{bt1}\varepsilon_{btR}} \right) \right\} = \frac{E_{bt2}\varepsilon_{btu}}{C_{bt2}} \left\{ \frac{D_{bt2}\varepsilon_{btu}}{6} + \left(1 - \frac{D_{bt2}}{C_{bt2}} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \left[1 - \left(1 + \frac{1}{C_{bt2}\varepsilon_{btu}} \right) \cdot \ln(1 + C_{bt2}\varepsilon_{btu}) \right] \right) \right\}. \quad (13)$$

Пояснения к этим формулам были даны выше. Учитывая, что все полученные уравнения имеют нелинейный характер, то для их совместного решения применяется стандартная итерационная процедура, которая позволяет найти искомые характеристики диаграммы неоднородного растяжения бетона ($E_{bt2}, C_{bt2}, D_{bt2}, \varepsilon_{btu}$).

Для получения количественных значений указанных параметров применительно к тяжёлому бетону были разработаны общий алгоритм и программа расчета "ВЕТОН_Т", написанная для персонального компьютера на языке программирования «Pascal». Некоторые результаты расчетов, выполненных с помощью этой программы, представлены в следующей таблице 1.

Таблица 1

Параметры эталонной и трансформированной диаграмм растяжения тяжёлого бетона при кратковременном нагружении

Параметры	Класс бетона					
	B10	B20	B40	B60	B80	B100
R_{bt} , МПа	0,85	1,35	2,10	2,75	3,30	3,80
E_{bn} , МПа	19000	27500	36000	39500	42000	43000
E_{bt1} , МПа	15360	23170	32810	38630	44000	48000
C_{bt1}	-5733,95	-5211,02	-4323,34	-3679,01	-3020,24	-2489,14
D_{bt1}	-7839,70	-7292,30	-6366,31	-5592,33	-5014,48	-4525,14
ε_{btR}	0,0000840	0,0000894	0,0001002	0,0001128	0,0001223	0,0001322
E_{bt2} , МПа	38269	57827	82114	96847	110689	121068
C_{bt2}	31439,62	30077,55	27748,85	25135,69	24261,35	23293,90
D_{bt2}	-1024,47	-949,82	-824,07	-721,47	-641,96	-575,78
ε_{btu}	0,0001472	0,0001568	0,0001762	0,0001984	0,0002155	0,0002335

В частности, величины предельных относительных деформаций при осевом растяжении ε_{btR} , найденные по предложенной формуле (2), возрастают от 0,000084 для бетона класса В10 до 0,0001322 для бетона В100. То есть принятое в СП 63.13330.2012 постоянное значение $\varepsilon_{btR} = 0,0001$ примерно соответствует классу бетона В40, а для максимальной нормируемой прочности бетона (В100) этот параметр увеличивается на 32,2 %. Значения предельных относительных деформаций бетона при неоднородном растяжении ε_{btu} также возрастают с ростом прочности бетона и укладываются в диапазон от 0,0001472 до 0,0002335. Отношение анализируемых параметров ($\varepsilon_{btu} / \varepsilon_{btR}$) не является постоянной величиной, которая увеличивается от 1,752 для бетона класса В10 до 1,766 для В100. Таким образом, согласно приведенным в таблице 1 данным, нормируемая предельная относительная деформация бетона

при растяжении $\varepsilon_{btu} = 0,00015$ в наибольшей степени соответствует только одному классу бетона (B20).

В заключение уместно отметить, что поскольку представленная методика определения величин предельных относительных деформаций бетона в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов построена без привлечения эмпирических зависимостей, то можно говорить о возможности её применения для любых классов и видов конструктивных бетонов.

Список литературы

1. Адищев В.В., Митасов В.М. Энергетический подход к моделированию процесса образования трещин в изгибаемых железобетонных элементах // Известия высших учебных заведений. Строительство.– 2005.– № 4.– С. 26-31.
2. Алмазов В.О. Проектирование железобетонных конструкций по Еuronормам: научное издание.– М.: Изд-во АСВ, 2011.– 216 с.
3. Карпенко Н.И., Радайкин О.В. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Строительство и реконструкция.– 2012.– № 3.– С. 10-16.
4. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций.– М.: Воентехлит, 2000.– 256 с.
5. Меркулов С.И., Татаренков А.И. Оценка резерва несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.– 2013.– № 6.– С. 66-69.
6. Несветаев Г.В. К созданию нормативной базы деформаций бетона при осевом нагружении // Известия вузов. Строительство.– 1996.– № 8.– С. 122-124.
7. Никулин А.И. К уточнению величин предельных относительных деформаций бетона в сжатой зоне изгибаемых железобетонных элементов // Промышленное и гражданское строительство.– 2014.– № 8.– С. 12-15.
8. Никулин А.И. Энергетический подход к трансформированию эталонных диаграмм сжатия бетона // Бетон и железобетон.– 2013.– № 5.– С. 12-14.
9. Смоляго Г.А. К вопросу о предельной растяжимости бетона // Бетон и железобетон.– 2002.– № 6.– С. 6-9.
10. Смоляго Г.А., Луценко А.Н., Дрокин С.В. К оценке живучести каркасных конструктивных систем из монолитного железобетона с учетом дефектов изготовления и монтажа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.– 2010.– № 2.– С. 80-83.

Рецензенты:

Меркулов С.И., д.т.н., проф., зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, ФГБОУВПО «Курский государственный университет», г. Курск;

Лесовик Р.В., д.т.н., проф., проректор по международной деятельности, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, ФГБОУВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород.