



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.08

УДК 691.32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАТИВНОСТИ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ФОРМУЛАМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Б.А. Бондарев¹, Н.Н. Черноусов², В.А. Стурова¹

¹Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

²ООО «НТО» ЭКСПЕРТ», Липецк, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 ноября 2019
Принята: 20 января 2020
Опубликована: 30 июня 2020

Ключевые слова:

аналитическая зависимость, деформативность, осевое растяжение, сжатие, фибра, диаграмма, трехточечный изгиб.

АННОТАЦИЯ

Для определения параметров деформативности бетонных образцов по формулам механики разрушения были проведены равновесные испытания на стадии локального деформирования образца, которые показали соответствие изменения внешних сил внутренним усилиям сопротивляемости материала с соответствующим статическим развитием магистральной трещины. С этой же целью испытывают образцы на изгиб с начальным надрезом и записывают диаграмму «нагрузка – прогиб». В статье приведена схема испытания образца с надрезом (трещиной) и построена диаграмма деформирования образца при изгибе «нагрузка – прогиб». На основании нее можно спрогнозировать разрушение материала, т.е. определить значение нагрузки, при которой можно принять за момент потери ресурса материала предельное значение прогиба или перемещение внешних граней надреза (раскрытие зева трещины на нижней поверхности образца).

Также рассмотрено деформирование бетонного образца при трехточечном изгибе и приведена схема деформирования бетонного образца в пределах пластической зоны. Выведены зависимости для определения предельных относительных деформаций при растяжении и при изгибе. На основании полученных результатов построены диаграммы состояния растянутого бетона и схема деформирования нормального сечения бетонного образца. В заключение сделаны выводы о сходимости результатов.

© ПНИПУ

© Бондарев Борис Александрович – доктор технических наук, профессор, e-mail: LNSP-48@mail.ru.

Черноусов Николай Николаевич – кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: nto_tezis@mail.ru.

Стурова Виктория Андреевна – аспирант, e-mail: v-livenceva@mail.ru.

Boris A. Bondarev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: LNSP-48@mail.ru.

Nikolai N. Chernousov – Ph.D. in Technical Sciences, General Director, e-mail: nto_tezis@mail.ru.

Victoria A. Sturova – Postgraduate Student, e-mail: v-livenceva@mail.ru.

DETERMINATION OF DEFORMABILITY PARAMETERS OF CONCRETE SAMPLES BY THE FORMULAS OF FRACTURE MECHANICS

B.A. Bondarev¹, N.N. Chernousov², V.A. Sturova¹

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

²LLC NTO "EXPERT", Lipetsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 November 2019

Accepted: 20 January 2020

Published: 30 June 2020

Keywords:

analytical dependence, deformability, axial tension, compression, fiber, diagram, three-point bending.

ABSTRACT

To determine the deformability parameters of concrete samples by the formulas of fracture mechanics, equilibrium tests were carried out at the stage of local deformation of the sample, which showed the correspondence of the change in external forces to the internal forces of the material resistance with the corresponding static development of the main crack.

For the same purpose, the samples are tested for bending with an initial notch and the "load-deflection" diagram is recorded. In this work, we presented a test scheme for a specimen with a notch (crack) and constructed a diagram of the deformation of a specimen under bending "load-deflection".

Based on it, it is possible to predict the destruction of the material, that is, to determine the value of the load at which the limit value of deflection or the displacement of the outer edges of the notch (opening the throat of the crack on the lower surface of the specimen) can be taken as the moment of loss of the resource of the material.

Also, we examined the deformation of a concrete sample during three-point bending and presented a diagram of the deformation of a concrete sample within the plastic zone. Dependencies were derived for determining the ultimate relative strains under tension and bending. Based on the results obtained, the state diagrams of the stretched concrete and the deformation scheme of the normal section of the concrete sample were constructed. As a result, the conclusion and convergence of the results.

© PNRPU

Равновесные испытания на стадии локального деформирования образца характеризуются обеспечением адекватности изменения внешних сил внутренним усилиям сопротивляемости материала с соответствующим статическим развитием магистральной трещины [1–13]. С этой целью испытывают образцы на изгиб с начальным надрезом и записывают диаграмму «нагрузка – прогиб». Схема испытания образца с надрезом (трещиной) приведена на рис. 1.

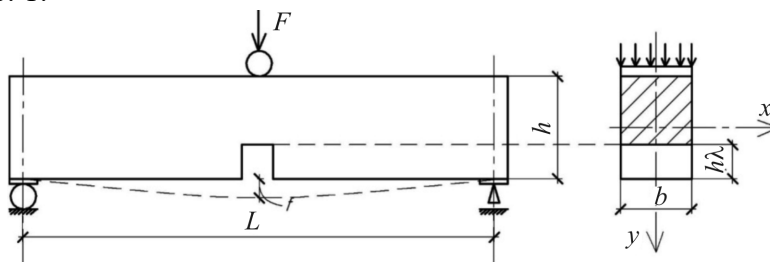


Рис. 1. Схема испытания

Fig. 1. Test scheme

В данной статье приводится определение параметров механики разрушения бетона по восходящей ветви диаграммы деформирования (рис. 2).

По восходящей ветви диаграммы «нагрузка – прогиб» определяются следующие характеристики трещиностойкости:

◆ критическое напряжение σ_{nc} (номинальное разрушающее напряжение по сечению, ослабленному начальным надрезом);

◆ критический условный коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} по ГОСТ 29167–91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при

статическом нагружении», т.е. определяемый для критической нагрузки и исходной длины (l) начальной трещины;

♦ критическое значение J -интеграла по ГОСТ 29167–91, вычисляемого по значениям работы деформирования на восходящем участке диаграммы «нагрузка – прогиб».

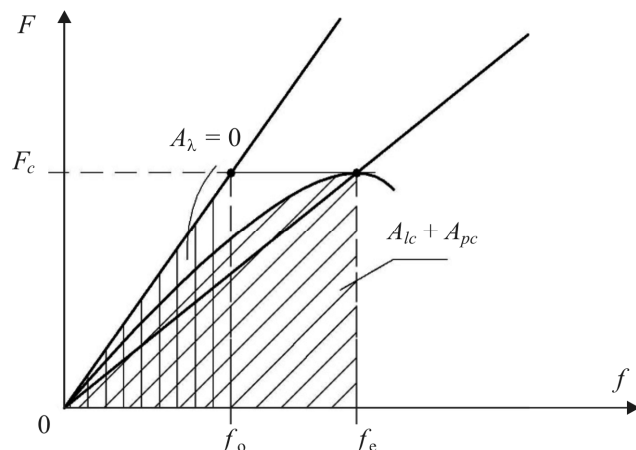


Рис. 2. Диаграмма деформирования образца при изгибе «нагрузка – прогиб»
 Fig. 2. Diagram of deformation of the sample during bending “load-deflection”

Для расчетов используются следующие зависимости:

$$\sigma_{nc} = \frac{3F_c \cdot L}{2bh^2(1-\lambda)^2}; \quad (1)$$

$$K_{IC}^* = \sigma_{nc} \sqrt{h} \cdot Z(\lambda); \quad (2)$$

$$J_{IC} = \frac{K_{IC}^{*2}}{E} = \frac{2(A_{lc} - A_{\lambda=0})}{bh(1-\lambda)}; \quad (3)$$

$$J_{IC} = \frac{2(A_{lc} + A_{pc} - A_{\lambda=0})}{bh \cdot (1-\lambda)}; \quad (4)$$

где b и h – ширина и высота образца; L – пролет балки; $Z(\lambda)$ – поправочная функция относительной длины трещины, равная $(1,93 - 3,07 \cdot \lambda + 14,53 \cdot \lambda^2 - 25,11 \cdot \lambda^3 + 25,8 \cdot \lambda^4) \cdot \sqrt{\lambda} \cdot (1-\lambda)^2$; F_c – максимальная нагрузка; A_{lc} и A_{pc} – упругая и пластическая части площади под восходящей ветвью диаграммы деформирования; $A_{\lambda=0}$ – площадь под восходящей ветвью диаграммы деформирования аналогичного образца, но без трещины, ограниченная прямой $f = f(F = F_c)$.

Определение модуля упругости

При оценке J -интеграла по формуле (3) чаще всего приходится использовать значения модуля упругости, полученные в опытах на сжатие или на изгиб образца без трещины, либо динамического модуля упругости на измерении скорости ультразвука в материале. Однако представляется более корректным получать значения E по тангенсу угла наклона начального участка восходящей ветви диаграммы «нагрузка – прогиб» ($F - f$) на том же образце с трещиной, который испытывается на трещиностойкость.

Значение модуля упругости, как известно, может быть определено из эксперимента разными способами. Так, из сопротивления материалов для изгибаемой балки

$$E = k \cdot \frac{dF}{df}, \quad (5)$$

где k – коэффициент «упругости» для балки без начального надреза, $k = \frac{L^3}{48J}$; J – момент инерции сечения, равный для прямоугольника $\frac{bh^3}{12}$, определим коэффициент «упругости» для балки с начальным надрезом.

Прогиб образца без надреза (трещины) определяется по формуле

$$f_0 = \frac{F_c \cdot L^3}{48 \cdot E_b \cdot I_0} = \frac{F_c}{E_b} \cdot k_0. \quad (6)$$

Прогиб образца с надрезом определим по формуле

$$f_e = \frac{F_c}{E_b} \cdot k_1, \quad (7)$$

где k_1 – коэффициент «упругости» для образца с надрезом.

Тогда площади $A_{\lambda=0}$, A_{lc} и A_{pc} под диаграммой (рис. 2)

$$A_0 = \frac{1}{2} \cdot F_c \cdot f_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_c^2}{E_b} \cdot k_0, \quad (8)$$

$$A_e = A_{ec} + A_{pc} = \frac{1}{2} \cdot F_c \cdot f_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_c^2}{E_b} \cdot k_1. \quad (9)$$

Используя формулу (3) и выражения (8) и (9), определяем J -интеграл:

$$J_k = \frac{F_c^2 \cdot (k_1 - k_0)}{E_b \cdot bh \cdot (1 - \lambda)}, \quad (10)$$

где E_b – модуль упругости материала.

Используя формулы (2), (3), определим модуль упругости:

$$E_b = \frac{k_{lc}^2}{I_{lc}} \quad (11)$$

Подставив в формулу (11) выражение (2) и (10), получим:

$$\begin{aligned} E_b = \frac{k_{lc}^2}{I_{lc}} &= \frac{\left[\frac{3F_c \cdot L}{2bh^2 \cdot (1-\lambda)^2} \cdot \sqrt{h} \cdot Z(\lambda) \right]^2}{\left[\frac{F_c^2 \cdot (k_1 - k_0)}{E_b \cdot bh \cdot (1-\lambda)} \right]} = \frac{9 \cdot F_c^2 \cdot L^2}{4 \cdot b^2 \cdot h^4 \cdot (1-\lambda)^4} \cdot h \cdot Z^2(\lambda) \cdot \frac{E_b \cdot bh \cdot (1-\lambda)}{F_c^2 \cdot (k_1 - k_0)} = \\ &= \frac{9}{4} \cdot \frac{L^2}{bh^2 \cdot (1-\lambda)^3} \cdot Z^2(\lambda) \cdot \frac{1}{(k_1 - k_0)} \cdot E_b, \end{aligned} \quad (12)$$

$$k_1 - k_0 = \frac{9}{4} \cdot \frac{L^2}{bh^2 \cdot (1-\lambda)^3} \cdot Z^2(\lambda). \quad (13)$$

Тогда коэффициент «упругости» для образца с надрезом

$$\begin{aligned} k_1 &= k_0 + \frac{9}{4} \cdot \frac{L^2}{bh^2 \cdot (1-\lambda)^3} \cdot Z^2(\lambda) = \frac{L^3}{48I} \cdot \left[1 + \frac{9}{4} \cdot \frac{L^2}{bh^2 \cdot (1-\lambda)^3} \cdot Z^2(\lambda) \cdot \frac{48I}{L^3} \right] = \\ &= \frac{L^3}{48I} \cdot \left[1 + \frac{9}{4} \cdot \frac{1}{(1-\lambda)^3} \cdot Z^2(\lambda) \cdot \frac{1}{bh^2} \cdot \frac{48bh^3}{12L} \right] = \frac{L^3}{48I} \cdot \left[1 + \frac{9h}{L} \cdot \frac{Z^2(\lambda)}{(1-\lambda)^3} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

При определении модуля упругости по зависимости, рекомендованной ГОСТ 29167–91, коэффициент «упругости»

$$k = \frac{L^3}{48J} \cdot \left\{ \frac{3\lambda(4\lambda^2 - 5\lambda + 2)}{(1-\lambda)^2} + (1-2\lambda)^3 - 12[\lambda^2 + 2\lambda + 2\ln(1-\lambda)] \right\}. \quad (15)$$

Определение перемещений внешних граней надреза

На основании построенной диаграммы деформирования можно прогнозировать разрушение материала, т.е. определить значение нагрузки, при которой можно принять за момент потери ресурса материала предельное значение прогиба или перемещение внешних граней надреза (раскрытие зева трещины на нижней поверхности образца).

Для определения коэффициента раскрытия трещины COD [14, 15] используют понятие центра поворота (рис. 3). Под центром поворота понимается точка, расположенная на пересечении сторон трещины, которые при деформации остаются прямолинейными. Поворот относительно этой точки представляет собой поворот половинок образца как твердых тел.

На рис. 3 h_{sp} – остаточная длина сечения, которая равна $h-a$, где a – глубина первоначального надреза, h – высота образца. Расстояние от вершины трещины до центра поворота можно представить как $r \cdot h_{sp} = r(h-a)$, где r – коэффициент поворота.

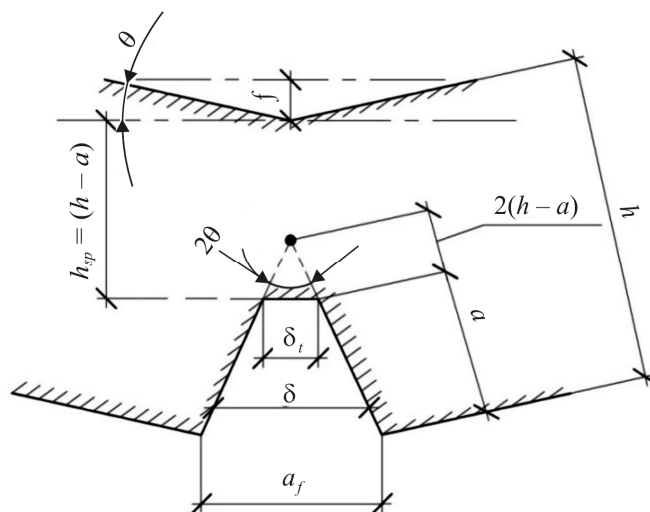


Рис. 3. Центр поворота при трехточном изгибе
 Fig. 3. Center of rotation in three-point bending

В результате численного решения системы уравнений равновесия установлено, что трехточечный изгиб отличается от чистого изгиба [14].

Существенным отличием является то, что коэффициент поворота r при трехточечном изгибе зависит от отношения остаточной длины сечения h_{sp} к расстоянию между опорами h_{sp}/L и находится в интервале 0,432–0,451.

Например, коэффициент поворота для пластмассы, армированной стекломатом, составляет в среднем $r = 0,3$ [14].

Раскрытие зева трещины на поверхности образца равно a_F и определяется датчиками раскрытия. Исходя из простых геометрических соображений можно найти раскрытие трещины в вершине:

$$\delta_t = a_F / \left[\frac{a}{r(h-a)} + 1 \right]. \quad (16)$$

Проведенные исследования [9] показали, что понятием центра поворота удобно пользоваться для металлов. Целесообразность использования такого понятия для композитов окончательно еще не установилась. Однако этим понятием пользуются [14, 15].

Вместе с тем деформирование бетонного образца при изгибе отличается от деформирования аналогичного образца из металла.

Рассмотрим деформирование бетонного образца при трехточечном изгибе. Схема деформирования бетонного образца в пределах пластической зоны (L_{pl}) приведена на рис. 4.

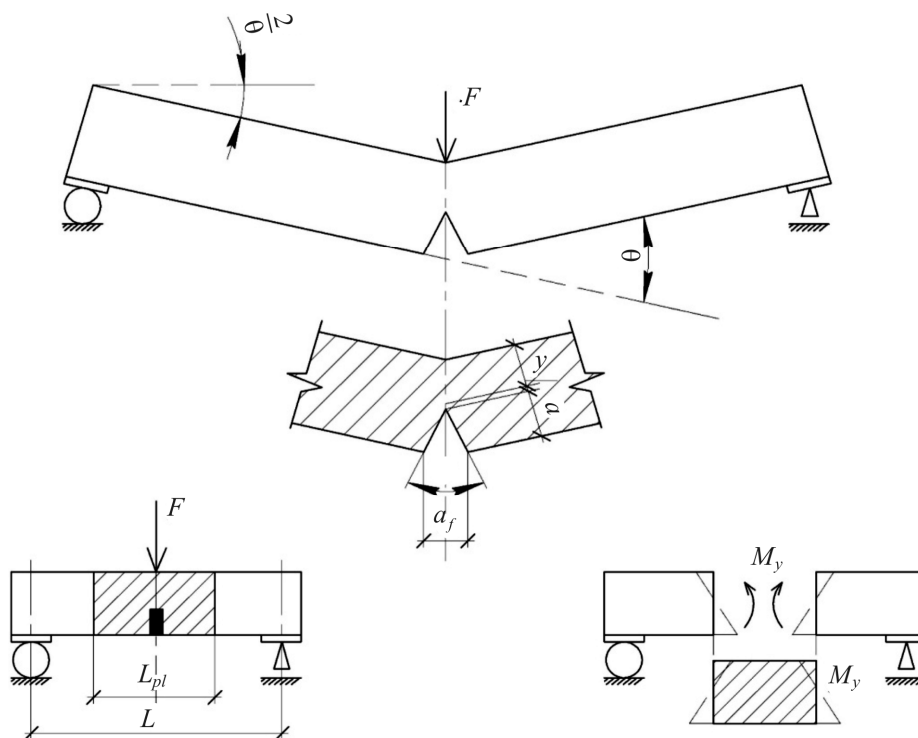


Рис. 4. Схема деформирования элемента: L_{pl} – длина пластической зоны ($L_{pl} = 1/3 L$);

M_y – изгибающий момент в начале пластической зоны, $M_y = \frac{F}{4} \cdot (L - L_{pl})$

Fig. 4. Element deformation scheme: L_{pl} – length of the plastic zone ($L_{pl} = 1/3 L$);

M_y – bending moment at the beginning of the plastic zone $M_y = \frac{F}{4} \cdot (L - L_{pl})$

При изгибе нижние крайние волокна, диаграмма состояния которых приведена на рис. 5, будут подвержены растяжению.

Значения предельных относительных деформаций бетона при осевом растяжении принимаются согласно СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» равными:

– для трехлинейной диаграммы (рис. 4, а)

$$\varepsilon_{bt0} = 0,0001; \varepsilon_{bt1} = \sigma_{bt1}/E_{bt} = 0,6 R_{bt}/E_{bt}; \varepsilon_{bt2} = 0,00015.$$

– для двухлинейной диаграммы (рис. 4, б)

$$\varepsilon_{bt1,red} = 0,00008; E_{bt,red} = R_{bt}/\varepsilon_{bt1,red}.$$

При изгибе предельные относительные деформации при растяжении приняты:
 $\varepsilon_{bt2}^* = 2\varepsilon_{bt0} = 0,0002.$

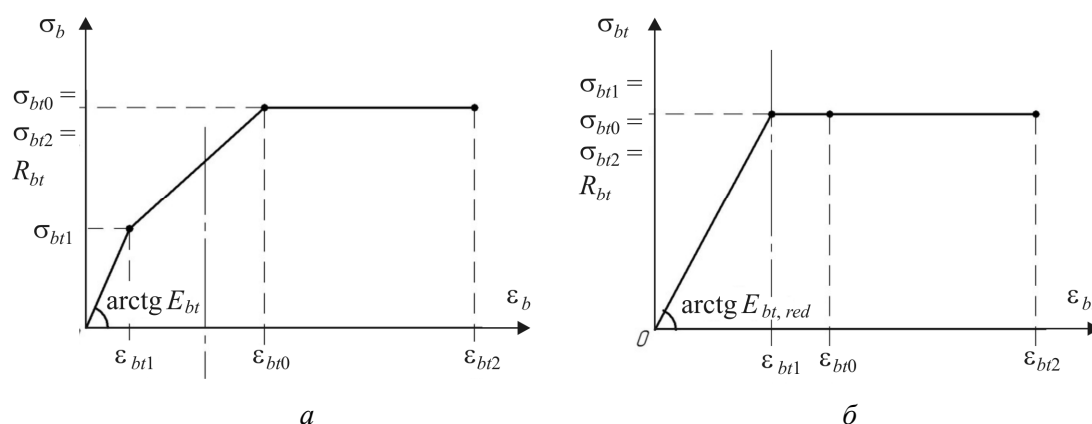


Рис. 5. Диаграммы состояния растянутого бетона: а – трехлинейная диаграмма состояния растянутого бетона; б – двухлинейная диаграмма состояния растянутого бетона
 Fig. 5. State diagrams of stretched concrete: a – three-line diagram of the state of stretched concrete; b – two-line diagram of the state of stretched concrete

Из геометрических соображений угол поворота θ сечений (см. рис. 3, 4) определяется по формуле (17):

$$\frac{f}{L/2} = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{\theta}{2} \Rightarrow \theta = \frac{4f}{L}. \quad (17)$$

Раскрытие зева трещины a_F определяем по формуле

$$a_F = \theta \cdot (h - y) - L_{pl} \cdot \left(\frac{\sigma_{\max}}{E} \right) = \theta \cdot (h - y) - L_{pl} \cdot \varepsilon_{bt}, \quad (18)$$

где L_{pl} – длина пластической зоны ($L_{pl} = 1/3 L$); ε_{bt} – предельная относительная деформация бетона при осевом растяжении (см. рис. 5).

Подставляя (17) в (18), получаем зависимость между прогибом f и раскрытием зева трещины a_F :

$$a_F = \frac{4f}{L} \cdot (h - y) - \frac{L}{3} \cdot \varepsilon_{bt}. \quad (19)$$

Этапы деформирования образца при изгибе приведены на рис. 6.

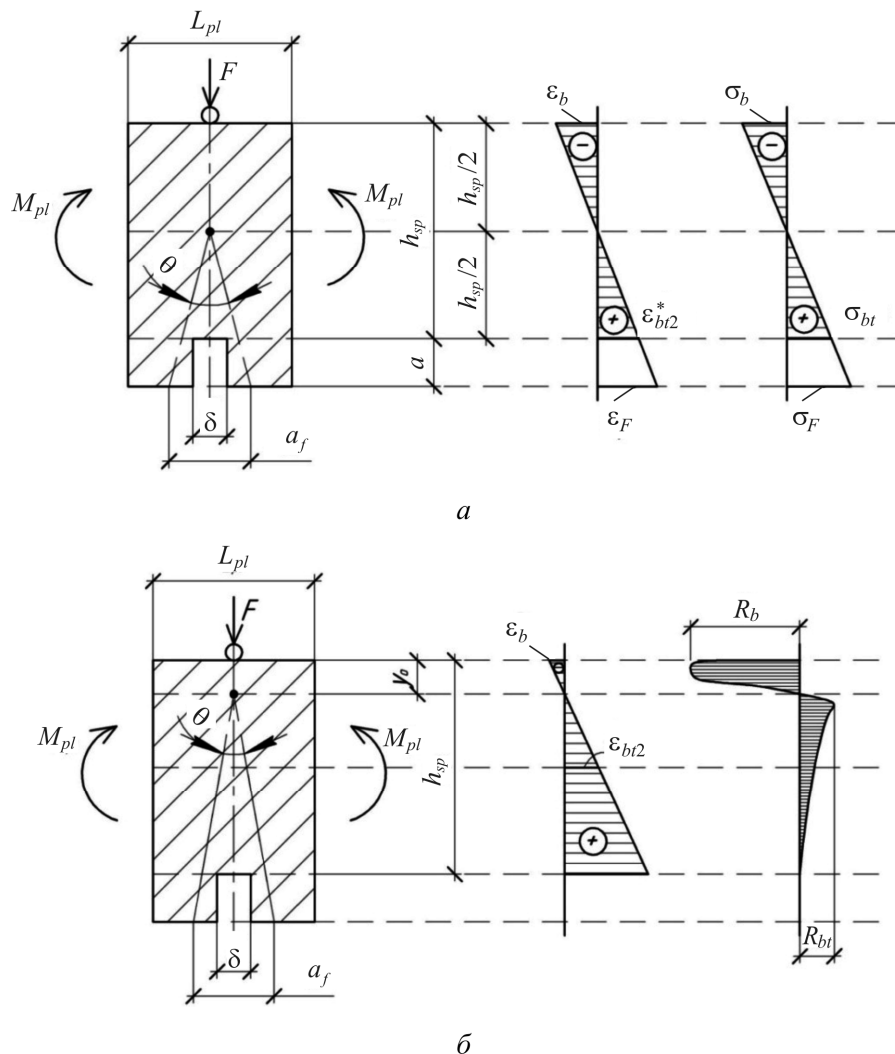


Рис. 6. Схема деформирования нормального сечения бетонного образца:
 а – стадия начала развития трещины; б – стадия предельного равновесия
 Fig. 6. Scheme of deformation of the normal section of a concrete sample:
 a – stage of the beginning of the crack development; b – stage of ultimate equilibrium

Перед началом старта трещины (раскрытие зева начального надреза δ) деформации на уровне нижней грани образца ε_F (рис. 6, а) определяются из геометрических соображений:

$$\frac{\varepsilon_{bt2}^*}{\left(\frac{h_{sp}}{2}\right)} = \frac{\varepsilon_F}{\left(h - \frac{h_{sp}}{2}\right)}, \quad (20)$$

отсюда

$$\varepsilon_F = \frac{2 \cdot \varepsilon_{bt2}^*}{h_{sp}} \cdot (h - h_{sp}/2). \quad (21)$$

Пример 1. Для образца со следующими характеристиками ($h = 150$ мм, $h_{sp} = 125$ мм, $\varepsilon_{bt2}^* = 2 \cdot 10^{-4}$) получаем: $\varepsilon_F = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{125} \cdot (150 - 62,5) = 2,8 \cdot 10^{-4}$. Определим центр поворота бетонного образца (y_0).

Составим уравнение равновесия в предельном состоянии (рис. 6, б):

$$R_b \cdot b \cdot y_0 = R_{bt} \cdot b \cdot \frac{(h_{sp} - y_0)}{2} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{b2} \cdot y_0 = \frac{\varepsilon_{bt2}}{2} \cdot (h_{sp} - y_0).$$

Отсюда

$$y_0 = \frac{0,5 \cdot \varepsilon_{bt2} \cdot h_{sp}}{\varepsilon_b + 0,5 \cdot \varepsilon_{bt2}}. \quad (22)$$

Пример 2. Для образца со следующими характеристиками: $h = 150$ мм, $h_{sp} = 125$ мм, $\varepsilon_{b2} = 35 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon_{bt2} = 1,5 \cdot 10^{-4}$.

$$y_0 = \frac{0,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 125}{35 \cdot 10^{-4} + 0,75 \cdot 10^{-4}} = \frac{0,75 \cdot 125}{35,75} = 2,62 \text{ мм.}$$

Определим связь между перемещениями внешних граней надреза a_F и прогибом f . Используя формулу (19), получаем:

$$a_F = \frac{4f}{L} \cdot (h - y_0) - L_{pl} \cdot \varepsilon_f = \frac{4}{500} \cdot f \cdot (150 - 2,62) - \frac{500}{3} \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} = 1,179 \cdot f - 0,047.$$

Таким образом, перевод графиков «нагрузка F – прогиб f » в график «нагрузка F – перемещение внешних граней a_F » и наоборот производится путем преобразования осей f и a_F , выполняемого с применением значений, определяемых по формулам (23) и (24):

$$a_F = 1,179 \cdot f - 0,047, \quad (23)$$

отсюда

$$f = 0,85 \cdot a_F - 0,04. \quad (24)$$

Аналогичная зависимость связи a_F и f (24) приведена в СТО НОСТРОЙ 2.27.125–2013 «Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ».

Библиографический список

1. Бондарев Б.А., Черноусов Н.Н., Стурова В.А. Исследование деформативных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 18–31.
2. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В. Исследование механики работы мелкозернистого шлакобетона при осевом растяжении и сжатии // Строительные материалы. – 2014. – № 12. – С. 59–63.
3. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н. Изгибаемые сталефиброшлакобетонные элементы // Бетон и железобетон. – 2010. – № 4. – С. 7–11.
4. Кравинскис В.К. Исследование прочности и деформативности бетона при статическом нагружении: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Рига, 1974. – 14 с.
5. Способ испытания образцов строительных материалов на растяжение: пат. Рос. Федерация / Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., А.В. Суханов, А.Н. Прокофьев. – № 2544299, заявл. 23.07.2013; опубл. 20.03.15, Бюл. № 8. – 5 с.

6. Влияние возраста мелкозернистого шлакобетона на его прочностные характеристики / Б.А. Бондарев, Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1 (37). – С. 41–50.
7. Эджингтон Дж., Ханнант Д.Дж., Уильямс Р.И.Т. Бетон, армированный стальной проволокой // *Материалы, армированные волокном*. – М.: Стройиздат, 1982. – С. 135–150.
8. Sujivorakul C. Model of hooked steel fibers reinforced concrete under tension // *High performance fiber reinforced cement composites 6*. – Springer Dordrecht Heidelberg. – London; New York, RILEM, 2012. – 559 p.
9. Shah S.P., Rangan B.V. Fiber reinforced concrete properties // *ACI Journal*. – 1971. – Vol. 68, № 2. – P. 126–134.
10. Моделирование анкеровки гладкой фибровой арматуры в цементно-песчаном растворе / Н.Н. Черноусов, Р.Н. Черноусов, А.В. Суханов, Б.А. Бондарев // Научный вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 35 (54). – С. 126–134.
11. Черноусов Н.Н., Черноусов Р.Н., Суханов А.В. Исследование анкеровки стальной фибры в цементно-песчаном бетоне // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. – 2014. – № 2. – С. 96–103.
12. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 412 с.
13. 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.
14. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения: пер. с япон. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
15. Фудзии Т., Дзакко М. Механика разрушения композиционных материалов: пер. с япон. – М.: Мир, 1982. – 232 с.

References

1. Bondarev B.A., Chernousov N.N., Sturova V.A. Issledovanie deformativnykh svoystv stale-fibroshlakobetona pri osevom rastiashenii i szhatii s uchetom ego vozrasta [Investigation of the deformative properties of steel-fiber slag concrete under axial tension and compression, taking into account its age]. *Vestnik permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 18-31.
2. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V., Issledovanie mekhaniki raboty melkozernistogo shlakobetona pri osevom rastiashenii i szhatii [The study of mechanics work fine slag concrete under axial tension and compression]. *Stroitel'nye materialy*, 2014, no 12, pp. 59–63.
3. Chernousov. N.N., Chernousov R.N., Izhibaemye stalefibroshlakobetonnye element [Bendings stalefibros slag concrete elements]. *Beton i zhelezobeton*, 2010, no 4, pp. 7–11.
4. Kravinskis V.K. Issledovanie prochnosti i deformativnosti betona pri staticheskom nagruzhении. [The study of strength and deformability of concrete under static loading]. Ph.D. thesis. Riga, 1974, 14 p.
5. Chernousov N.N., Chernousov R.N., A.V. Sukhanov, A.N. Prokof'ev. Sposob ispytaniia obraztsov stroitel'nykh materialov na rastiashenie [Construction Materials Test Method Tensile specimens]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2544299 (2015).

6. Bondarev B.A. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V. Vliianie vozrasta melkozernistogo shlakobetona na ego prochnostnye kharakteristiki [Influence of age on his fine cinder strength characteristics]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no 1 (37), pp. 41–50.

7. Edzhington Dzh., Khannant D. Dzh., Uil'iams R.I. T. Beton, armirovannyi stal'noi provolokoi [Concrete reinforced with steel wire]. In *Materialy, armirovannyye voloknom*. Moscow, Stroiizdat, 1982, pp. 135-150.

8. Sujivorakul C. Model of hooked steel fibers reinforced concrete under tension. *High performance fiber reinforced cement composites 6*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, RILEM, 2012, 559 p.

9. Shah S.P., Rangan B.V. Fiber reinforced concrete properties. *ACI Journal*, 1971, vol. 68, no. 2, pp. 126-134.

10. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V., Bondarev B.A. Modelirovanie ankerovki gladkoi fibrovoi armatury v tsementno-peschanom rastvore [Modeling anchoring smooth fiber reinforcement in cement-sand mortar]. *Nauchnyi vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no 35 (54), pp. 126–134.

11. Chernousov N.N., Chernousov R.N., Sukhanov A.V., Issledovanie ankerovki stal'noi fibry v tsementno-peschanom betone [The study anchorage steel fibers in concrete, cement-sand]. *Izvestiia vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no 2, pp. 96–103

12. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General mechanics model of concrete]. Moscow, Stroiizdat, 1996. 412 p.

13. Karpenko N.I., Radaikin O.V. K sovershenstvovaniuu diagramm deformirovaniia betona dlia opredeleniia momenta treshchinoobrazovaniia i razrushaiushchego momenta v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementakh [To improve the concrete stress-strain diagram for determining the moment of cracking and damaging moment in flexural concrete elements]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiia*, 2012, no 3, pp. 10-16.

14. Shiratori M., Miyoshi T., Matsushita H. Vychislitel'naia mekhanika razrusheniia [Computational mechanics of destruction]. Moscow, Mir, 1986, 334 p.

15. Fuji T., Dzako M. Mekhanika razrusheniia kompozitsionnykh materialov [Mechanics of the destruction of composite materials]. Moscow, Mir, 1982, 232 p.