

Определение параметров статико-динамического деформирования бетона

Наталья Витальевна ФЕДОРОВА, советник РААСН, доктор технических наук, профессор,
e-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Михаил Дмитриевич МЕДЯНКИН, аспирант, e-mail: gbk@mgsu.ru

Олеся Борисовна БУШОВА, магистр, e-mail: gbk@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),
129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Предложен вариант деформационной модели статико-динамического деформирования бетона при варьировании уровня начального статического нагружения. На основе теории пластичности бетона и железобетона Г. А. Гениева построены аналитические зависимости для определения параметров диаграммы статико-динамического деформирования бетона при различных режимах нагружения и сформулированы деформационные критерии прочности в предположении однопараметрической связи «предельные деформации—предельные напряжения» не только от вида, но и от уровня напряженного состояния. Численными исследованиями на примере одноосного нагружения показано, что предельные динамическая прочность и деформативность бетона, предельно допустимое время динамического воздействия при динамическом догружении зависят от уровня начального напряженного состояния при статическом нагружении бетона, с которого производится динамическое догружение до предельного состояния. Проведенный с использованием рассматриваемой модели численный анализ статико-динамического деформирования сжатых железобетонных элементов при различных режимах нагружения подтвердил также результаты экспериментальных исследований о том, что микротрещинообразование в бетоне при статическом нагружении начинается не с некоторого уровня значения напряжений, а практически с момента начала нагружения бетона. Полученные результаты представляют интерес для решения прикладных задач, связанных с проблемой живучести, защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, в частности при определении критериев прочности бетона при особом напряженном состоянии.

Ключевые слова: бетон, статико-динамическое деформирование, критерии прочности, предельные деформации, модуль деформации.

DETERMINATION OF STATIC-DYNAMIC DEFORMATION PARAMETERS OF CONCRETE

Nataliya V. FEDOROVA, e-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Mikhail D. MEDYANKIN, e-mail: gbk@mgsu.ru

Olesya B. BUSHOVA, e-mail: gbk@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. A variant of the deformation model of static-dynamic deformation of concrete, when varying the level of initial static loading, is proposed. On the basis of the theory of plasticity of concrete and reinforced concrete by G.A. Geniev, analytical dependencies have been built to determine the parameters of the diagram of static-dynamic deformation of concrete under different loading modes, and deformation criteria of strength have been formulated in the assumption of a single-parameter connection "limit strains-limit stresses" not only from the type, but also from the level of stress state. Numerical studies on the example of uniaxial loading show that the maximum dynamic strength, the maximum deformability of concrete and the maximum permissible time of dynamic impact in case of dynamic loading depend on the level of initial stress state in case of static loading of concrete, from which dynamic loading to the limit state is performed. The numerical analysis of static-dynamic deformation of compressed reinforced concrete elements under different loading modes carried out using the considered model also confirmed the results of experimental studies that microcracking in concrete under the static loading starts not with some level value of stresses, but practically from the moment of concrete loading beginning. The obtained results are of interest for solving applied problems related to the problem of survival and protection of buildings and structures from progressive collapse, in particular when determining criteria of concrete strength under a particularly tense state.

Key words: concrete, static-dynamic deformation, strength criteria, deformation limits, modulus of deformation.

Введение

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций последних двух десятилетий показал, что в связи с всевозрастающим количеством и различными видами воздействий техногенного, при-

родного и даже террористического характера проблеме защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения уделяется все большее внимание [1–7]. Результаты этих и ряда других исследований нашли отражение в нормативных документах

США, ЕС, России, Украины, Беларуси и других стран. В то же время используемые в научных публикациях и нормативных документах критерии особого предельного состояния не учитывают специфику аварийных воздействий и, соответственно, недостаточно полно отражают параметры статико-динамического деформирования бетона и железобетона при таком режиме нагружения.

Определению параметров статического и динамического деформирования бетона при различных видах напряженного состояния посвящено значительное количество исследований (например, работы [8–11]). На их основе получены параметры такого деформирования, в том числе с использованием ультразвукового оборудования [12–16], и разработаны различные модели деформирования при кратковременном, длительном и динамическом нагружениях бетона. Между тем, появление новых задач, связанных с проблемой живучести, защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения [2, 9, 10, 17–20], требует использования более строгих параметров диаграмм деформирования бетона при его режимном статико-динамическом нагружении. Режим такого нагружения и, следовательно, параметры диаграмм деформирования бетона при данном режиме будут существенно отличаться от ранее изученных.

Цель настоящего исследования — получение расчетных параметров диаграммы статико-динамического деформирования бетона при различных режимах нагружения.

Метод

Решение поставленной задачи выполним на основе общей теории пластичности бетона и железобетона Г. А. Гениева [8]. Вариант деформационных зависимостей для бетона при рассматриваемом режиме нагружения построим исходя из общей теории Г. А. Гениева с использованием двух дополнительных гипотез.

Зависимость предельной деформации бетона от вида напряженного состояния была выявлена в опытах ряда исследователей и внесена в деформационную теорию пластичности бетона и железобетона Г. А. Гениевым как одна из важнейших предпосылок. В обобщение этого на вариант простого статико-динамического нагружения бетона логично предположить наличие однопараметрической зависимости предельных деформаций бетона не только от вида напряженного состояния, но и от начального уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое догружение (*гипотеза 1*).

Будем полагать также, что в основной физической зависимости деформационной теории пластичности «интенсивность напряжений T — интенсив-

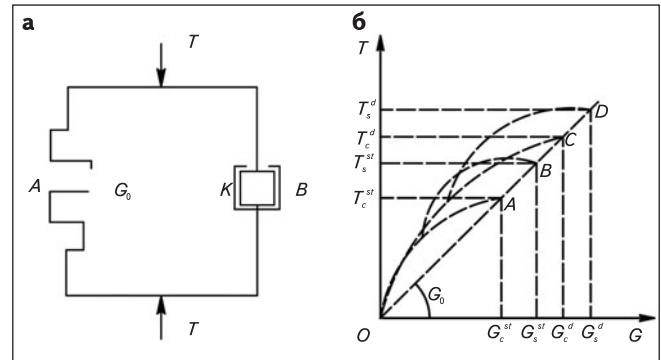


Рис. 1. Интерпретация деформационной модели (а) и семейство деформационных физических зависимостей для бетона при рассматриваемом режиме нагружения (б)

ность деформаций $G \gg T = G(Q)Q$ представляет собой линейную функцию как на участке кратковременного (статического) нагружения, так и на участке динамического догружения (*гипотеза 2*).

Примем за расчетные параметры бетона величины R_b , R_{bt} , R_{sh} . Предельная поверхность (общее условие прочности бетона в соответствии с теорией Г. А. Гениева) в компактной форме может быть представлена в виде [8, 9]:

$$T^2 = T_{sh}(T_{sh} + \lambda T)(1 + \delta), \quad (1)$$

где T_{sh} — предельное значение T при обобщенном чистом сдвиге ($\sigma = 0$), вычисляемое по значениям прочности бетона на сжатие и растяжение по формуле

$$T_{sh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{R_b R_{bt}}; \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{6} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (3)$$

$$\delta = e(S/T)^2. \quad (4)$$

Здесь

$$S = \sqrt{3} \left[\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma)(\sigma_2 - \sigma)(\sigma_3 - \sigma) \right]^{1/3} \quad (5)$$

инвариантная величина, третья степень которой с точностью до постоянного коэффициента совпадает с третьим инвариантом девиатора напряжений; e — безразмерный коэффициент, определяемый выражением:

$$e = \frac{R_{sh} R_{bt}}{3T_{sh}^2}. \quad (6)$$

Тогда при конкретизации основной физической зависимости «интенсивность напряжений T — интенсивность деформаций $G \gg$ для обоих участков деформирования бетона, построенной в координатах T и Q , следуя [9], может быть принята зависимость:

$$T = G(Q)Q, \quad (7)$$

а с учетом принятой второй гипотезы:

$$T = G_0 \left(1 - \frac{Q}{2Q_s}\right) Q. \quad (8)$$

Семейство кривых однопараметрической зависимости « $T - Q$ », построенных для различных режимов двухэтапного простого нагружения, приведено на рис. 1. Функция $G(Q)$ представляет собой секущий модуль сдвига диаграмм T от Q . Прямые $O-B$ и $C-D$, проведенные под углом 45° к оси Q на участках статического (st) и динамического (d) деформирования бетона, соответствуют значениям предельных интенсивностей сдвига для различных видов напряженного состояния при простом нагружении бетона.

Для моделирования статико-динамического деформирования бетона, как и в работе [9], используем математическую модель параллельно соединенных элементов A и B . Первый из них описывается деформационной теорией пластичности бетона [8], а второй, чисто вязкий (ньютоновский), элемент B характеризуется константой K – модулем вязкого сопротивления бетона.

Константы этой модели представляют собой значения интенсивностей касательных напряжений T и деформаций сдвига Q , а также величину начального модуля сдвига G_0 при $T \rightarrow 0$.

При воздействии на бетонный элемент интенсивности напряжений $T = \text{const}$ эффективная работа элемента B заканчивается при весьма малых значениях времени t , отсчитываемого с момента приложения динамического воздействия. Однако за этот отрезок времени вязкий элемент B способствует торможению развития деформаций, инициируемых в элементе A . В соответствии с этим связь между интенсивностью деформаций сдвига Q и интенсивностью напряжений T для моделируемого описанным образом бетонного элемента может быть представлена в виде:

$$Q_A = Q_B = Q, \quad T = T_A + T_B. \quad (9)$$

На рис. 1б представлено семейство зависимости « $T-Q$ », отвечающее различным значениям некоторого параметра $\lambda = f\sigma/T$, где $f = \frac{3T_{sh}(R_b R_{bt})}{R_b R_{bt}}$ –

безразмерный коэффициент; $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – среднее напряжение в бетонном элементе, совпадающее с точностью до постоянного коэффициента с первым девиатором напряжений. При этом при простом нагружении λ и δ – постоянные величины.

Решая уравнение (1) относительно T , находим $T = T_s = T_{sh} k(\lambda)$, где $k(\lambda) = \lambda/2 + [(\lambda^2/4) + 1]^{0.5}$. Здесь T_s – предельное значение T , соответствующее

данному виду напряженного состояния бетона. По физическому смыслу величина $k(\lambda, \delta)$ представляет собой коэффициент изменения предельных значений интенсивности касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния по сравнению с предельным значением T при чистом сдвиге T_{sh} .

Следуя [9], для элемента A связь между интенсивностью касательных напряжений и «мгновенной» интенсивностью деформаций сдвига можно записать:

$$T_A = T(Q) = 2T_s \left[1 - \left(\frac{Q}{2Q_s}\right)\right] \frac{Q}{Q_s}, \quad (10)$$

где предельные значения интенсивности касательных напряжений и интенсивности деформаций сдвига связаны между собой соотношением:

$$Q_s = 2T_s/G_0. \quad (11)$$

Зависимости (8)–(10) при переходе к относительным координатам: $\varphi = T/T_s$, $\gamma = Q/Q_s$, $\omega = G_0/K$, $\xi = \omega t$ определяют собой нелинейное дифференциальное уравнение Риккати вида:

$$\frac{d\gamma}{d\xi} + \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)\gamma = \frac{\varphi'}{2}, \quad (12)$$

где φ – относительная интенсивность напряжений; γ – относительная интенсивность деформаций; ω – параметр, зависящий от коэффициента вязкости бетона при сдвиге; $T_s = 1/2 G_0 Q_s$, а G_0 – начальный модуль сдвига.

Полагая, что при динамическом догружении нагруженного бетона с начальным уровнем нагружения $Q/Q_s = 0,5$ относительная интенсивность напряжений $\varphi > 1$, можно получить аналитическое решение нелинейного дифференциального уравнения второго порядка. При начальных условиях $\xi = 0$ и $\gamma = 0,5$ решение уравнения (12) может быть записано в форме:

$$\frac{2}{\sqrt{\varphi-1}} \arctg \frac{-0,5}{\sqrt{\varphi-1}} = \xi + C_1. \quad (13)$$

Постоянную C_1 определяем из граничного условия $\gamma_0 = 0,5$:

$$C_1 = \frac{2}{\sqrt{\varphi-1}} \arctg \frac{-0,5}{\sqrt{\varphi-1}}. \quad (14)$$

Из этой зависимости не сложно найти связь между динамическим пределом прочности $T = T_d$ и предельно допустимым временем этого воздействия

$$t = t_d = \xi_d/\omega. \quad (15)$$

Решая (13) относительно $\xi = \xi_d$ с использованием деформационного критерия предельного состояния $\gamma = 1$, т. е. $Q = Q_s$, можно записать выражение для определения t_d .

Таким образом, зависимость (13) позволяет решать прямую или обратную задачу: по заданной величине t_d определять динамический предел прочности бетона R_b^d или по R_b^d вычислять t_d .

Уместно заметить, что при решении исходного уравнения (12) уровень статического нагружения бетона (до приложения динамической нагрузки) был принят равным 0,5. Аналогичным образом может быть получено решение (13) и для других соотношений Q/Q_s .

Учитывая, что условие прочности и характер деформирования бетона существенно отличаются от других материалов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию, для решения рассматриваемой задачи статико-динамического деформирования бетона, динамически догружаемого с различных уровней статического нагружения, необходимы дополнительные экспериментальные данные при таком режиме нагружения. Константы рассматриваемого варианта деформационной модели при исследуемом режиме нагружения могут быть определены из ограниченного числа одноосных статико-динамических испытаний образцов бетонных призм с изучением процессов микротрещинообразования по специально разработанной и запатентованной методике [21].

В общем случае при нагружении бетона его объемная деформация $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ устанавливается следующим соотношением:

$$\theta = \frac{\sigma}{KQ} - g_0 Q^2, \quad (16)$$

где g_0 — модуль дилатации, определяемый по значению предельной объемной деформации при чистом сдвиге θ_{sh} ,

$$g_0 = -\theta_{sh}/Q_{sh}^2. \quad (17)$$

Первое выражение в формуле (16) показывает уменьшение объема бетона, вызванное действием напряжений $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, второе — учитывает непосредственное увеличение объема бетона в результате увеличения объема трещин.

Известные публикации (например работы [13–15, 21–23]) по экспериментальному определению изменения объема нагружаемого бетона от начала нагружения до предельной сопротивляемости рассматривают режимы кратковременного статического или динамического нагружения. В то же время, как показано в этих и других испытаниях по установлению структурно-механических характеристик бетона, выполненных в последние годы, структурные изменения при нагружении начинаются не с некоторого уровня нагружения R_{crc}^0 , а сразу после начала нагружения и затем изменяются в зависимости от i -го параметрического уровня микротрещинообразования $\sigma_{crc,i}/T_s$.

Связь между напряжением и деформациями в рассматриваемом варианте в деформационной теории пластичности бетона имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E(Q)} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] - \frac{g_0 Q^2}{3} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E(Q)} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] - \frac{g_0 Q^2}{3} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E(Q)} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] - \frac{g_0 Q^2}{3} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

или представим уравнение (18) относительно напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2G(Q) \left[\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \frac{1+\nu}{3(1-2\nu)} g_0 Q^2 \right] \\ \sigma_{yx} &= 2G(Q) \left[\varepsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \frac{1+\nu}{3(1-2\nu)} g_0 Q^2 \right] \\ \sigma_z &= 2G(Q) \left[\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} \theta + \frac{1+\nu}{3(1-2\nu)} g_0 Q^2 \right] \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

где

$$E(Q) = 3G(Q) \left/ 1 + \frac{G_0}{3K_0} \right., \quad (20)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2G_0}{3K_0} \right) \left/ 1 + \frac{2G_0}{3K_0} \right). \quad (21)$$

В первом приближении (до проведения специальных испытаний) соотношение между начальным модулем сдвига G_0 и модулем вязкости K_0 в начале координат или в любой другой точке обобщенной деформационной зависимости « $Q-T$ » (см. рис. 1) можно найти по полученным экспериментально значениям коэффициента поперечных деформаций ν .

Численный анализ

Проведем некоторый численный анализ определения предельной деформативности бетона, используя результаты испытаний бетонных призм на одноосное сжатие, выполненных в Калининградском государственном университете [13–15, 22, 23]. Анализ этих опытных данных показал, что структурно-механические характеристики бетона изменяются уже с первых ступеней приложения нагрузки. Отсюда следует, что модули сдвига, вязкости и, соответственно, динамическая прочность бетона при статико-динамическом нагружении будут зависеть не только от вида напряженного состояния, но и от режима нагружения (см. гипотезу 1).

В связи с отсутствием в настоящее время экспериментальных данных о значениях коэффициента поперечной деформации ν для рассматриваемого режима нагружения приведем сравнительную оценку предельной деформативности и модулей G и K бетона по результатам испытаний бетонных

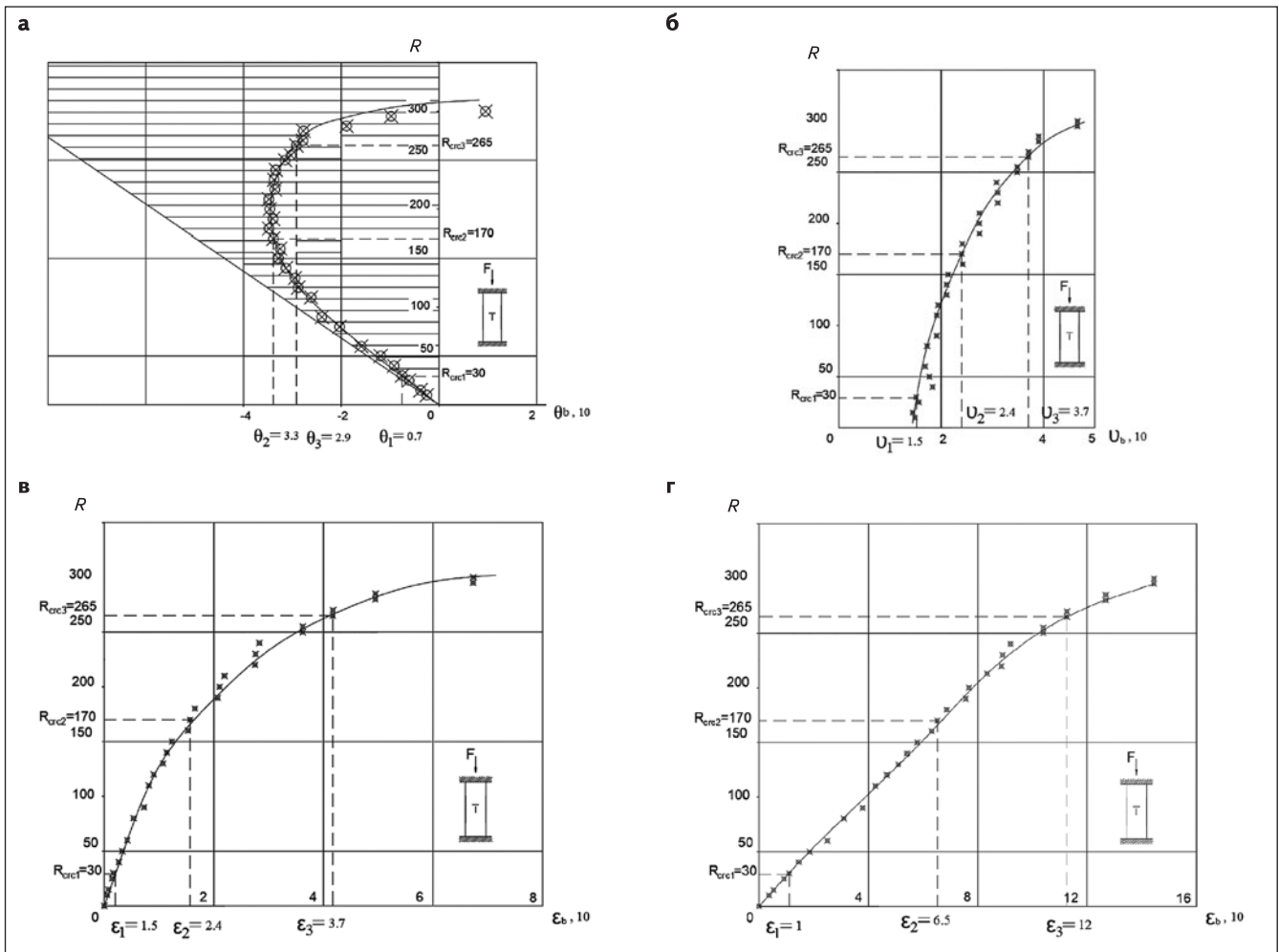


Рис. 2. Экспериментальные значения объемной деформации (а), коэффициента Пуассона (б), поперечных и продольных деформаций бетона (в, г)

призм [14, 15, 22, 23] и полученным в этих опытах значениям коэффициента поперечной деформации бетона на разных уровнях нагружения.

Примем значения поперечных деформаций $\nu = 0,2$ при низком уровне относительных напряжений σ/R_b (рис. 2). Тогда из формулы (21) следует:

$$K_0 = \frac{4}{3} G_0, \quad (22)$$

а по формуле (20) получим:

$$E(Q) = \frac{3G(Q)}{1 + \frac{G_0}{3K_0}} = \frac{3G(Q)}{1 + \frac{1}{4}} = \frac{12}{5} G(Q) = E_0 \left(1 - \frac{Q}{2Q_s}\right); \quad (23)$$

$$E_0 = \frac{12}{5} G_0; \quad E_s = \frac{1}{2} E_0; \quad \nu = 0,2. \quad (24)$$

Используя приведенные зависимости, вычислим предельную деформативность бетона при различных уровнях его начального статического нагружения при простейшем напряженном состоянии — одноосном сжатии. Рассмотрим бетон с прочностью

$R_b = 20$ МПа, $R_{bt} = 1,9$ МПа. Предельная прочность такого бетона при чистом сдвиге составит:

$$T_{sh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{R_b R_{bt}} = 3,4 \text{ МПа.}$$

Секущий модуль сдвига бетона в начале координат зависимостей T от Q при $Q = 0$ равен $G(Q) = G_0 = 12\,000$ МПа.

Это соответствует следующим значениям параметров:

$$f = \frac{3T_{sh}R_b - R_{bt}}{R_b R_{bt}} = \frac{3 \cdot 3,4/4(20 - 1,9)}{20 \cdot 1,9} = 4,86;$$

$$e = \frac{R_{sh} R_{bt}}{3T_{sh}^2} = \frac{20 \cdot 1,9}{3 \cdot 3,4^2} = 0,09.$$

Предельная интенсивность сдвига бетона при $\epsilon_2 = 0$, $\epsilon_3 = 0$ и значении предельных деформаций бетона при одноосном сжатии $\epsilon_1 = 10^{-3}$ (для бетона с отношением $R_b/R_{bt} \sim 10$) составит:

$$Q_{sh} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{2\epsilon_1^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{2 \cdot (10^{-3})^2} = 0,583 \cdot 10^{-3}.$$

Соотношение между начальным модулем сдвига G_0 и модулем вязкости бетона K_0 найдем из условия (20), при котором значение коэффициента поперечных деформаций ν в начале нагружения бетона равнялось бы 0,15 (см. рис. 2б):

$$0,15 = \frac{1 - \frac{2 \cdot 12\,000}{3K_0}}{2 + \frac{2 \cdot 12\,000}{3K_0}}$$

отсюда

$$K_0 = \frac{2,6}{2,1} G_0 = 14\,850 \text{ МПа.}$$

Модуль дилатации бетона вычисляют по формуле (17):

$$g_0 - \frac{Q_{sh}}{T_{sh}^2} = -\frac{10^{-4}}{0,583} = 294.$$

Предельная деформация бетона при его нагружении с уровня нулевого напряженного состояния, определяемая по формуле (18), равна:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{14\,850} \cdot 20 - \frac{294 \cdot (1,92 \cdot 10^{-3})^2}{3} = 1,09 \cdot 10^{-3}.$$

Выполнив аналогичные вычисления при нагружении бетона с уровня $\sigma_x/R_b = 0,3$ и, соответственно, $\nu = 0,2$, определена предельная деформация бетона $\varepsilon_x = 0,82 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, увеличение коэффициента поперечной деформации ведет к уменьшению модуля вязкости бетона, что связано с уменьшением сопротивляемости бетона действию σ вследствие прогрессирующего трещинообразования.

Результаты

Введение в теорию пластичности бетона Г. А. Гензиева двух дополнительных гипотез позволило построить вариант деформационной модели статико-динамического деформирования при простом режимном нагружении статической и однократной высокоскоростной (удар) нагрузках.

Проведенный с использованием этой модели численный анализ статико-динамического деформирования сжатых железобетонных элементов при различных режимах нагружения подтвердил данные экспериментальных исследований о том, что микротрещинообразование в бетоне при статическом нагружении начинается не с некоторого уровня значения напряжений, а практически с момента начала нагружения бетона. При этом установлено, что уровень начального статического нагружения опытного образца бетона оказывает влияние на его предельную деформативность. Так, при принятом в рассмотренном примере диапазоне изменения относительного уровня динамического на-

гружения от $\sigma/R_b = 0,06$ ($\nu = 0,15$) до $\sigma/R_b = 0,3$ ($\nu = 0,2$) изменение продельных деформаций составило 17 %. Принимая во внимание имеющиеся для разных материалов экспериментальные данные о значительной изменчивости значения модуля вязкого сопротивления бетона (коэффициент ω) в зависимости от времени действия ударной нагрузки t_d , можно предположить, что процент изменения предельных деформаций при учете фактора времени будет еще большим.

По результатам проведенного теоретического исследования авторы данной статьи в настоящее время испытывают опытные образцы бетонных призм на одноосное сжатие при двухэтапном статико-динамическом режиме их нагружения по специально разработанной методике [21]. На первом этапе образцы нагружают квазистатической нагрузкой до заданного уровня, на втором – высокоскоростной нагрузкой до разрушения. В ходе испытаний будут получены количественные значения модуля вязкости, динамического предела прочности бетона в зависимости от начального уровня напряженного состояния бетона и других факторов.

Выводы

1. Полученные аналитические зависимости связи «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» дают возможность определять параметры диаграммы статико-динамического деформирования бетона, в частности предельную деформативность бетона и динамический предел его прочности при режимном статико-динамическом нагружении.

2. Численным анализом предельных деформаций бетона при его статическом нагружении до заданного уровня относительных напряжений (на первом этапе нагрузки) и динамическом высокоскоростном догружении до разрушения (на втором этапе) показано, что предельная деформативность бетона при таком режиме нагружения существенно зависит от уровня начальных относительных напряжений в бетоне.

3. Установленную закономерность об изменении предельной деформативности бетона при его режимном статико-динамическом нагружении рекомендуется учитывать при формулировке критериев особого предельного состояния в процессе расчетного анализа по защите железобетонных конструктивных систем зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, когда при внезапном гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и последующей за этим структурной перестройкой системы, оставшиеся неразрушенными конструктивные элементы получают динамические догружения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 19-38-90060, грант Б. 107-19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Экспозиция живучести железобетона // Известия вузов. Строительство. 2007. № 5. С. 4–8.
2. Travush V. I., Fedorova N. V. Survivability of structural systems of buildings with special effects [Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях] // Magazine of Civil Engineering, 2018, vol. 81(5), pp. 73–80.
3. Федоров В. С., Меднов Е. А. Влияние исходного напряженно-деформированного состояния и уровня нагружения на возникающий динамический эффект при аварийном разрушении опоры в неразрезных стальных балках // Строительство и реконструкция. 2010. № 6. С. 48–52.
4. Кабанцев О. В., Тамразян А. Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5(49). С. 15–26. DOI: 10.5862/MCE.49.2.
5. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column loss scenario [Особенности динамических догрузений железобетонных элементов конструктивных систем при гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и трещинообразовании] // Construction and Building Materials. 2017. No. 142. Pp. 552–571.
6. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures [Оценка коэффициента динамичности для прогрессирующего обрушения] // Engineering Failure Analysis. 2018. No. 84. Pp. 300–310. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.011>.
7. Колчунов В. И., Колчунов Вл. И., Федорова Н. В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 54–60.
8. Гениев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
9. Гениев Г. А., Колчунов В. И., Клюева Н. В. [и др.]. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2004. 216 с.
10. Гениев Г. А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19.
11. Плевков В. С., Белов В. В., Балдин И. В., Невский А. В. Модели нелинейного деформирования углеородофибробетона при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3(56). С. 72–82.
12. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Динамический расчет железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.
13. Зиновьев В. Н. Эффект дилатации и диаграмма состояний бетона при одноосном и трехосном сжатии. Ч. 2 // Бетон и железобетон. 2015. № 2. С. 27–31.
14. Зиновьев В. Н., Смолягов О. О., Григорьев А. А. Методы исследования микротрещинообразования бетона при одноосном сжатии // Бетон и железобетон. 2014. № 1. С. 27–31.
15. Зиновьев В. Н. Объединенная диаграмма состояний и параметрические уровни микротрещинообразования бетона. Ч. 3 // Бетон и железобетон. 2015. № 3. С. 28–31.
16. Bascoul A. State of the art report – Part 2: Mechanical microcracking of concrete [Доклад о состоянии конструкций: Ч. 2. Механическое микротрещинообразование бетона] // Materials and Structures. 1996. Vol. 29. Pp. 67–78.
17. Almusallam T., Al-Salloum Yo., Tuan Ngo Priyan Mendis, Abbas H. Experimental investigation of progressive collapse potential of ordinary and special moment-resisting reinforced concrete frames [Экспериментальное исследование потенциала прогрессирующего обрушения обычных и специальных моментостойчивых железобетонных каркасов] // Materials and Structures. 2017. No. 50:137. Pp. 1–16.
18. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Nav F. M., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly [Экспериментальная и численная оценка прогрессирующего обрушения в масштабируемом узле] // Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration. 2016. Pp. 1–17.
19. Hou Jian, Yang Zheng. Simplified models of progressive collapse response and progressive collapse-resisting capacity curve of RC beam-column substructures [Упрощение моделей прогрессирующего обрушения и сопротивление прогрессирующему обрушению] // American Society of Civil Engineers. 2014. Pp. 1–7.
20. Клюева Н. В., Кореньков П. В. Методика экспериментального определения параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 44–48.
21. Патент 2696815 РФ. Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона / Федорова Н. В., Медянкин М. Д., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». Заявл. 17.01.2019. Опубл. 06.08.2019.
22. Бушова О. Б., Зиновьев В. Н. Классификация кривых зависимости изменения скорости ультразвука от напряжений в бетоне при сжатии // Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со дня рождения А. Ф. Лопейта, «Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям». М., МГСУ, 2018. С. 68–75.
23. Зиновьев В. Н. Определение границ микротрещинообразования бетона при сжатии ультразвуковым импульсным методом // Бетон и железобетон. 2011. № 1. С. 2–6.

REFERENCES

1. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Exposure of the survivability of reinforced concrete. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*, 2007, no. 5, pp. 4–8. (In Russian).
2. Travush V. I., Fedorova N. V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 81(5), pp. 73–80.
3. Fedorov V. S., Mednov E. A. The effect of the initial stress-strain state and the load level on the dynamic effect that occurs when the support collapses in continuous steel beams. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija*, 2010, no. 6, pp. 48–52. (In Russian).
4. Kabancev O. V., Tamrazjan A. G. Accounting for changes in the design scheme when analyzing the operation of the structure. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2014, no. 5(49), pp. 15–26. DOI: 10.5862/MCE.49.2. (In Russian).
5. Elsanadedy H. M., Almusallam T. H., Al-Salloum Y. A., Abbas H. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column loss scenario. *Construction and Building Materials*, 2017, no. 142, pp. 552–571.
6. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Failure Analysis*, 2018, no. 84, pp. 300–310. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.011>.
7. Kolchunov V. I., Kolchunov V. I., Fedorova N. V. Deformation models of reinforced concrete under special impacts. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 8, pp. 54–60. (In Russian).
8. Geniev G. A., Kissjuk V. N., Tjupin G. A. *Teorija plastichnosti betona i zhelezobetona* [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Strojizdat Publ., 1974. 316 p. (In Russian).
9. Geniev G. A., Kolchunov V. I., Kljueva N. V. et al. *Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstrukcij pri zaproektnykh vozdeystvijah* [Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond design impacts]. Moscow, ASV Publ., 2004. 216 p. (In Russian).
10. Geniev G. A. Method for determining the dynamic strength limits of concrete. *Beton i zhelezobeton*, 1998, no. 1, pp. 18–19. (In Russian).
11. Plevkov V. S., Belov V. V., Baldin I. V., Nevskij A. V. Models of nonlinear deformation of carbon fiber concrete under static and short-term dynamic effects. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2016, no. 3(56), pp. 72–82. (In Russian).
12. Popov N. N., Rastorguev B. S. *Dinamicheskij raschet zhelezobetonnykh konstrukcij* [Dynamic calculation of reinforced concrete structures]. Moscow, Strojizdat Publ., 1974. 207 p. (In Russian).
13. Zinov'ev V. N. The effect of dilation and state diagram of concrete under uniaxial and triaxial compression. Part 2. *Beton i zhelezobeton*, 2015, no. 2, pp. 27–31. (In Russian).
14. Zinov'ev V. N., Smoljagov O. O., Grigor'ev A. A. Methods of investigation of concrete microcrack formation under uniaxial compression. *Beton i zhelezobeton*, 2014, no. 1, pp. 27–31. (In Russian).
15. Zinov'ev V. N. Combined state diagram and parametric levels of concrete microcrack formation. *Beton i zhelezobeton*, 2015, no. 3, pp. 28–31. (In Russian).
16. Bascoul A. State of the art report. Part 2: Mechanical microcracking of concrete. *Materials and Structures*, 1996, vol. 29, March, pp. 67–78.
17. Almusallam T., Al-Salloum Yo., Tuan Ngo Priyan Mendis, Abbas H. Experimental investigation of progressive collapse potential of ordinary and special moment-resisting reinforced concrete frames. *Materials and Structures*, 2017, no. 50:137, pp. 1–16.
18. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R, Nav F. M., Usefi N. *Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassembly*. Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration, 2016, pp. 1–17.
19. Hou Jian, Yang Zheng. Simplified models of progressive collapse response and progressive collapse-resisting capacity curve of RC beam-column substructures. *American Society of Civil Engineers*, 2014, pp. 1–7.
20. Klyueva N. V., Koren'kov P. V. Method of experimental determination of parameters of survivability of reinforced concrete frame-rod structural systems. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2016, no. 2, pp. 44–48. (In Russian).
21. Patent 2696815 RF. *Sposob jeksperimental'nogo opredelenija statiko-dinamicheskikh harakteristik betona* [Method for experimental determination of static-dynamic characteristics of concrete]. Fedorova N. V., Medjankin M. D., zajavitel' i patentoobladatel' FGBOU VO "NIU MGSU". Zajavleno 17.01.2019, opublikovano 06.08.2019. (In Russian).
22. Bushova O. B., Zinov'ev V. N. Classification of curves for the dependence of ultrasound velocity changes on stresses in concrete during compression. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 150-letiju so dnja rozhdenija A. F. Lolejta "Sovremennye metody rascheta zhelezobetonnykh i kamennykh konstrukcij po predel'nyh sostojanijam"* [Proc. International. sci.-prakt. conf. dedicated to the 150th anniversary of the birth of A. F. Loleyt "Modern methods for calculating reinforced concrete and stone structures by limit states"]. Moscow, MGSU Publ., 2018, pp. 68–75. (In Russian).
23. Zinov'ev V. N. Determination of the boundaries of microcrack formation of concrete during compression by ultrasonic pulse method. *Beton i zhelezobeton*, 2011, no. 1, pp. 2–6. (In Russian).

Для цитирования: Федорова Н. В., Медянкин М. Д., Бушова О. Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 1. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.01.04-11.

For citation: Fedorova N. V., Medjankin M. D., Bushova O. B. Determination of Static-Dynamic Deformation Parameters of Concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 1, pp. 4–11. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.01.04-11. ■