

ФЕДОРОВА Н.В.¹, МЕДЯНКИН М.Д.¹, БУШОВА О.Б.²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

² ООО «ПИК-Проект», г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ РЕЖИМНОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. Приведена методика экспериментальных исследований бетонных и железобетонных элементов с целью определения параметров деформирования бетона при его статическом нагружении до заданного уровня, с последующим однократным динамическим высокоскоростным докружжением ударной нагрузкой. Испытания образцов проводятся посредством режимного статико-динамического нагружения, которое осуществляется с использованием специально разработанного устройства, позволяющего фиксировать заданный уровень статического нагружения опытного образца и додгружать его с этого уровня ударной нагрузкой с заданными динамическими параметрами. Разработанная методика статико-динамических испытаний, приоритет которой защищен патентом РФ, позволяет экспериментально определять параметры диаграмм деформирования бетона такие как динамический модуль деформаций, динамическую прочность бетона, предельные деформации бетона при различных режимах рассматриваемого статико-динамического нагружения, а также изменение коэффициента динамической прочности бетона при различном уровне начальной статической нагрузки. Дан анализ результатов испытаний первой серии бетонных призм и приведены прочностные, деформативные и временные параметры для испытанных образцов, а также полученные с помощью ультразвукового прибора ПУЛЬСАР 2.1 изменения напряжений и объемных деформаций бетона при рассматриваемых режимах нагружений.

Ключевые слова: статико-динамическая прочность бетона, предельные деформации, экспериментальные исследования, методика, статико — динамическое нагружение.

N.V. FEDOROVA¹, M.D. MEDYANKIN¹, O.B. BUSHOVA²

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia

² LLC "PIK-Project", Moscow, Russia

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE STATIC-DYNAMIC DEFORMATION OF CONCRETE UNDER LOADING MODAL

Abstracts. The method of experimental analysis of concrete and reinforced concrete elements is given in order to determine the parameters of concrete deformation under static loading to a given level, followed by a single dynamic high-speed loading by a shock load. Tests of samples are carried out by means of mode static-dynamic loading, which is carried out using a specially designed device that allows you to fix a given level of static loading of the test specimen and load it from this level by a shock load with the specified dynamic parameters. The developed method static-dynamic tests, the priority of which is protected by a patent of the Russian Federation, allows to experimentally determine the parameters for diagrams of deformation of concrete such as dynamic modulus of deformation, dynamic strength of concrete, the ultimate strain of concrete at different conditions considering static and dynamic loading, and the change of the coefficient of dynamic strength of concrete under different levels of initial static load. The analysis of test results the first series of concrete prisms and deformation the strength and time parameters for tested samples and also obtained using ultrasonic PULSAR 2.1 of stress changes and volume deformation of concrete under these modes of loading.

Keywords: static-dynamic strength of concrete, ultimate deformations, experimental studies, method, static-dynamic loading.

Введение

Известен ряд исследований [1-5], посвященных решению задач деформирования бетона при кратковременном, длительном и динамическом нагружениях. Эти и другие исследования определяют и уточняют критериальные параметры предельного состояния первой и второй групп для бетонных и железобетонных конструкций. Введение в практику проектирования нормативных требований по защите зданий и сооружений от особых аварийных воздействий [6,7] открывает необходимость анализа процесса деформирования бетонных и железобетонных конструкций, связанного с такими воздействиями, новыми их видами и режимами. Одним из возможных сценариев особого воздействия на конструктивную систему является случай, когда к конструкции, уже нагруженной эксплуатационной нагрузкой добавляется высокоскоростное динамическое догружение, вызванное гипотетическим удалением одной из несущих конструкций. Такой сценарий предполагает возможность наступления критериев, определенных требованиями [6]. При этом анализ названного и других сценариев недопущения возможного локального разрушения конструктивных систем [8-17], показывает, что динамика структурного видоизменение системы зависит от целого ряда факторов (топология конструктивной системы, материал конструкции, вид напряженно – деформированного состояния, время и режим воздействия и др.). В настоящее время установлено [18-19], что напряженно-деформированное состояние бетона при динамических догружениях зависит не только от времени воздействия, но и от вида напряженного состояния и уровня микротрещиообразования в нем. Оценка этих и других параметров статико-динамического деформирования бетона, в том числе и выдвинутой авторами в развитие теории Г.А. Гениева и авторов гипотезы о том о том, что предельная деформация бетона зависит не только от вида напряженного состояния, но и от начального уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое догружение [1], требует глубокой экспериментальной проверки. Расширение области физического эксперимента, в продолжение ранее проведенных экспериментальных исследований исследований [20-25], посвященных оценкам влияния динамических эффектов на двухкомпонентный материал типа железобетон в части экспериментального определения опытных характеристик режимного высокоскоростного однократного догружения бетона динамической нагрузкой после приложения статической нагрузки заданного уровня, представляется актуальной задачей [26-27].

В настоящей статье приводится авторская методика проведения экспериментальных исследований для определения параметров статико – динамического деформирования бетона, в частности, динамического модуля деформаций бетона, динамической прочности и предельных деформаций при бетона при различных режимах его нагружения, приоритет которой защищен патентом РФ [28], а также некоторые результаты апробации этой методики выполнеными экспериментальными исследованиями.

Методика исследования

Целью исследований явилось получение новых экспериментальных данных по определению параметров объемной деформации тяжелого бетона при одноосном кратковременном сжатии, а также определение опытных характеристик объемных деформаций, предельной деформативности динамической прочности бетона при его динамическом догружении. Согласно плана экспериментальных исследований объектом исследования являлись бетонные образцы призм, выполненные согласно требованиям ГОСТ 10180-2012. Предметом исследования являлись экспериментально полученные параметры диаграммы статико-динамического деформирования бетона при его динамическом догружении с заданного уровня статической нагрузки.

Методика испытаний образцов бетонных призм заключалась в следующем. До начала нагружения опытных образцов в них создается начальное усилие обжатия не более 2% от ожидаемой разрушающей нагрузки, принимаемое далее за условный нуль. Образец центри-

руется с выполнением условия максимального отклонения деформаций по каждой грани (образующей) 15% их среднего арифметического значения при нагружении от условного нуля до нагрузки, равной (40+5%) от разрушающей. Нагружение первого образца – близнеца осуществляется в два этапа. На первом этапе – низкоскоростное статическое нагружение производится под прессом непрерывно со скоростью $0,6 \pm 0,2$ Мпа/сек до заданного уровня нагрузки, не превышающего заданного волях от разрушающей нагрузки. В связи с отсутствием стандартного оборудования, позволяющего проводить статическое испытание с динамическим высокоскоростным догружением образца на одной установке, фиксация требуемого уровня статического нагружения производилась с помощью специально разработанного устройства, описание и принцип работы которого подробно приведен в [28]. Затем опытный образец призмы догружается высокоскоростным нагружением (ударом) до его разрушения. Второй образец – близнец нагружается с той же скоростью что и первый на первом этапе нагружения до заданного уровня нагружения.

Описанная методика экспериментальных исследований опытных образцов – призм при статико – динамическом нагружении режиме нагружения реализуется с использованием испытательного оборудования лаборатории НИУ МГСУ. Для проведения экспериментальных исследований используется комбинация стандартного оборудования в виде гидравлического пресса MEGA 6-3000-100, (рисунок 1, а), универсальной динамической испытательной машины LabTest 6.500Н.5.01.1 (рисунок 1, б) и специально разработанной установки для фиксации статической нагрузки. Данное испытательное оборудование оснащено системой автоматического управления и регистрации показаний. Максимальная испытательная нагрузка пресса составляет 3000кН, универсальной испытательной машины – 500 кН, максимальная частота регистрации данных – 5 кГц. Опытные значения продольных и поперечных деформаций бетонных образцов призмы фиксируется с помощью тензорезисторов на полимерной подложке PLF-30. Измерительная база датчиков составляет 30 мм. Регистрация показаний тензорезисторов осуществляется при помощи комплекса оборудования NI PXIe-1082 (рисунок 1, в). Данное оборудование позволяет осуществлять регистрацию показаний с частотой дискретизации до 10 кГц.

Помимо датчика силы, встроенного в испытательную машину LabTest, использовался дублирующий датчик силы DYLF-102 (рисунок 1, г), синхронизированный при помощи комплекса NI PXIe-1082 с тензорезисторами, установленными на образцы. Для анализа структурных изменений в опытных образцах при статико-динамическом нагружении используется прибор ПУЛЬСАР 2.1 с датчиками сквозного прозвучивания. Регистрация изменения скорости прохождения ультразвука через образец при статическом нагружении позволяет определять влияние уровня микротрещинообразования на прочностные и деформационные характеристики при динамическом догружении.

Методика проведения испытаний включает следующие этапы:

- определения фактического класса прочности бетонных образцов по ГОСТ 10180-2012;
- производятся статические испытания бетонных призм для определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона по методике согласно ГОСТ 24452-80;
- производится нагружение образцов статической нагрузкой до заданного уровня напряжений в конкретном образце (в описываемой методике было принято три уровня начальной статической нагрузки, соответствующей: $0,2 R_b$, $0,4 R_b$, $0,6 R_b$), которая на заданном уровне фиксируется с помощью специальной установки зажимающей опытный образец между нижней и верхней пластинами, создавая тем самым создавая заданный уровень нагружения статической нагрузкой (рисунок 2);

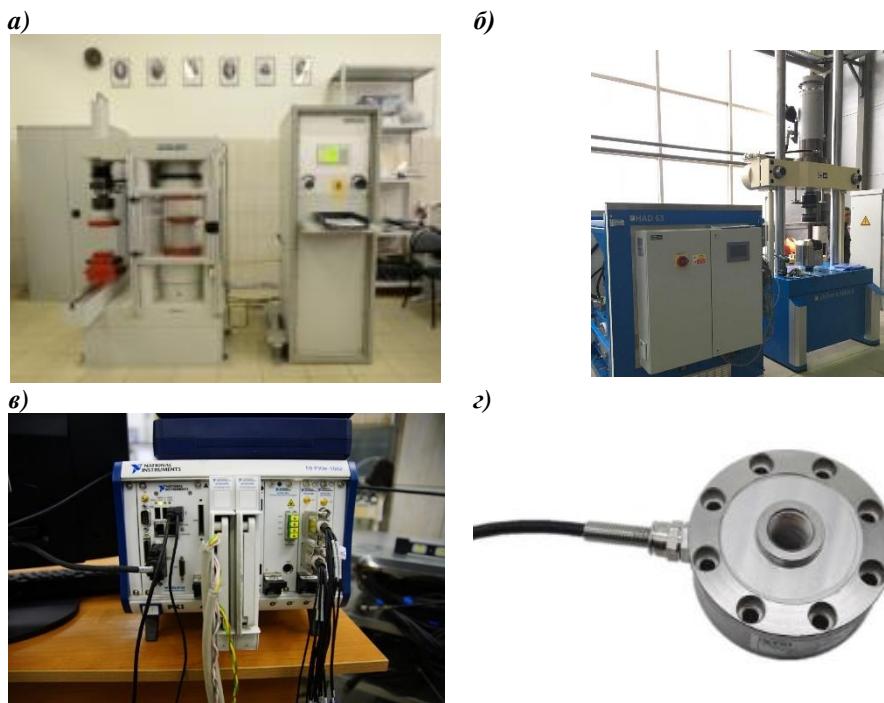
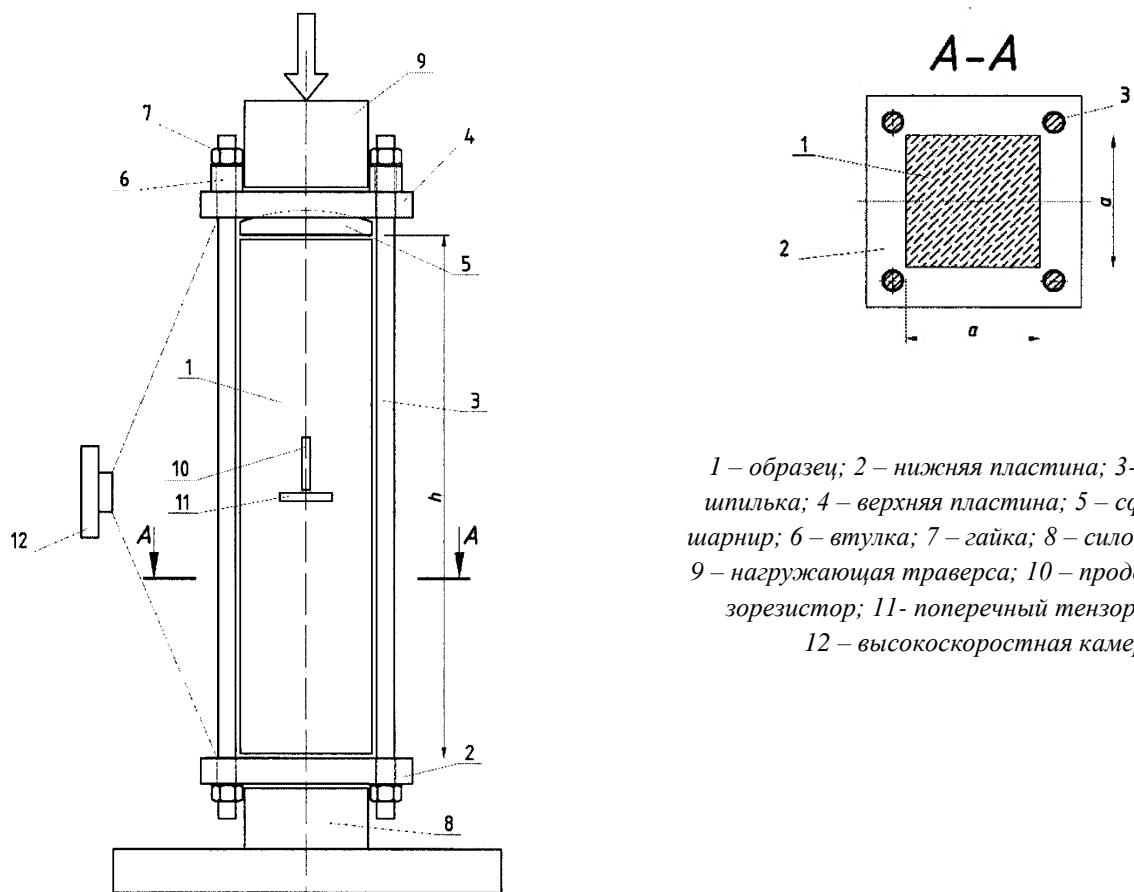


Рисунок 1 – Общий вид испытательного оборудования: а – пресс гидравлический MEGA 6-3000-100; б – универсальная динамическая испытательная машина LabTest 6.500H.5.01.1; в – комплекс оборудования NI PXIe-1082; г – датчик силы DYLF-102



1 – образец; 2 – нижняя пластина; 3 – резьбовая шпилька; 4 – верхняя пластина; 5 – сферический шарнир; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – силоизмеритель; 9 – нагружающая траверса; 10 – продольный тензорезистор; 11 – поперечный тензорезистор; 12 – высокоскоростная камера

Рисунок 2 – Установка для экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона

- для проведения динамического высокоскоростного догружения в комбинированную схему испытательной установки дополнительно вводится силоизмерительный датчик тензорезисторного типа, который синхронизирован по времени с показаниями тензорезисторов;
- производится высокоскоростное приложение нагрузки, которая позволяет реализовать в образце скорость приращения напряжений 500-800 МПа/с (рисунок 3).



Рисунок 3 – Общий вид высокоскоростного нагружения опытных образцов на оборудовании LabTest

Важной особенностью высокоскоростного нагружения является то, что в процессе испытаний испытаний образцов разных классов бетона, додгружаемых с разных уровней статической нагрузки, обеспечивается возможность определения времени разрушения опытных образцов от начала соприкосновения ударника с поверхностью образца до его разрушения, увязывая его с динамической прочностью бетона. Тем самым появляется возможность прямого опытного определения одного из важнейших используемых в теории динамических параметров материала- модуля вязкости бетона [1]. При данных скоростях нагружения удается обеспечить разрушение опытных образцов в диапазоне времени $0,075 \pm 0,015$ с. Регистрация данных осуществляется с частотой 5 кГц.

Результаты и обсуждение

Апробация разработанной методики экспериментальных исследований проводилась на серии образцов бетонных призм размерами $10 \times 10 \times 40$ см и кубов класса прочности В25. Первый этап испытаний включал нагружение испытываемой призмы статической нагрузкой до уровня $0,2 R_b$. Второй этап испытаний включал высокоскоростное додружение образца до разрушения динамической нагрузкой (однократным ударом) с уровня $0,2 R_b$. Для образцов бетонных призм этой же серии проводились статические и динамические испытания.

По результатам испытаний статической, динамической и статико-динамическим нагружением построены диаграммы «напряжения – объемная деформации» бетона при обозначенных режимах нагружения (рисунок 4), а также опытная зависимость изменения скорости ультразвука от напряженного состояния на этапе нагружения до первого параметрического уровня (рисунок5).

Сопоставляя полученные графики можно видеть заметное влияние режима нагружения на объемные деформации бетона и их дилатационную составляющую, что подтверждает принятую в [1] гипотезу о наличии однопараметрической зависимости предельных деформаций бетона не только от вида напряженного состояния, но и от начального уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое додружение.

В рамках рассматриваемых задач представляет интерес и график зависимости изменения скорости ультразвука от уровня напряженного состояния напряжения, построенный по опытным данным графоаналитическим методом. Параметрические уровни определялись по производным к аналитическим зависимостям исследуемых величин. Параметрическими яв-

ляются точки, которым соответствуют: перегиб на графике функции, излом – на графике первой производной и разрыв непрерывности первого рода на второй.

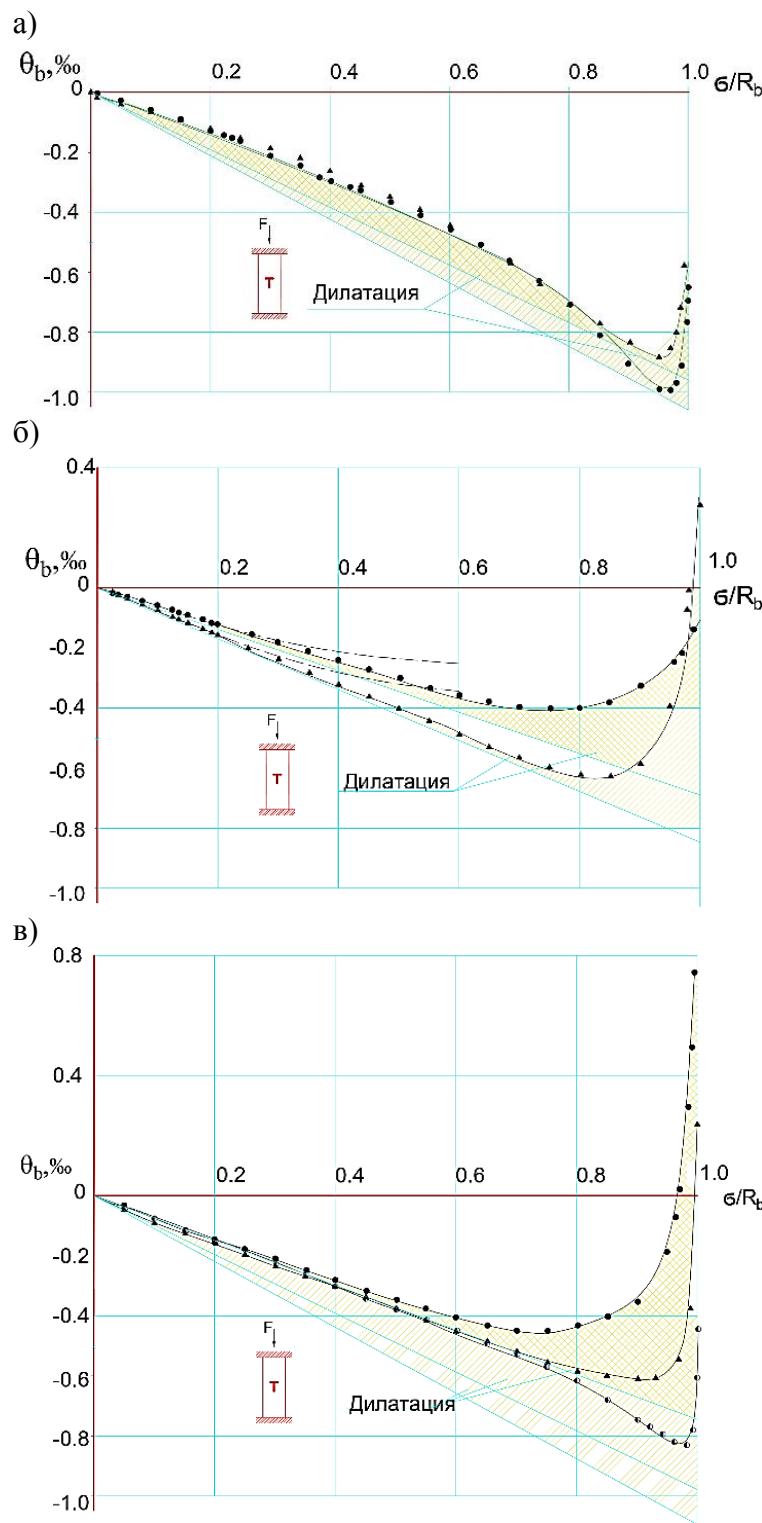


Рисунок 4 – Зависимость объемной деформации от напряжений в бетоне при разных режимах нагружения: а- статическом; б - статико-динамическом; в – динамическом

Полученные опытные параметры деформирования и прочности бетонных призм при рассматриваемых режимах нагружения приведены в таблице 1.

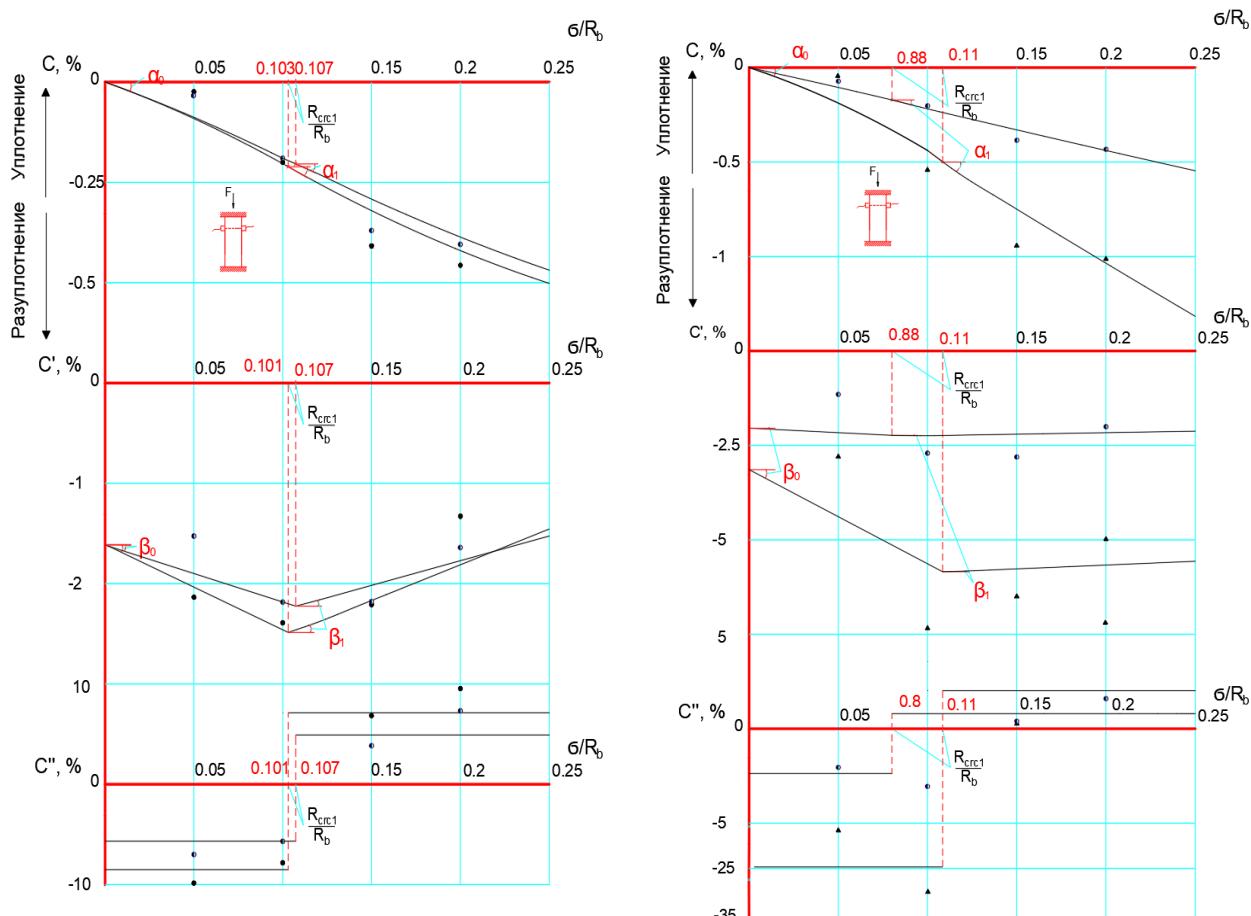


Рисунок 5 – Зависимости изменения скорости (C) прохождения ультразвуковых импульсов, а также ее первой (C') и второй (C'') производной от напряжений в бетоне опытного образца

Таблица 1 - Опытные параметры деформирования и прочности бетонных призм при разных режимах загружения

Параметр	Статическое нагружение		Динамическое нагружение			Статико-динамическое нагружение	
	404-1С	404-2С	504-1ЧД	404-1ЧД	404-2ЧД	404-1Д20	404-2Д20
R_b , МПа	25,58	24,81	30,07	28,34	30,26	28,23	27,54
$\varepsilon_{ub} \cdot 10^{-3}$	2,60	2,61	2,47	2,47	2,51	2,49	2,48
t , сек	-		0,095	0,085	0,098	0,082	0,081

Анализ этих данных показывает, что предельная относительная деформация бетона при динамическом и статико-динамическом деформировании незначительно, порядка 4%, отличается друг от друга при заданном относительном нагружении статического нагружения опытных образцов до уровня $0,2 R_b$. Более заметные различия относительных предельных деформаций (до 10%) наблюдаются в образцах при статическом и динамическом режимах нагружения. Из этого следует, что необходимо расширить диапазон варьирования опытных параметров и получить данные и для других уровней статической нагрузки при статико-динамическом нагружении опытных образцов.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить эффективность предложенной методики экспериментального определения параметров статико-динамического деформирования бетона для решения рассматриваемых задач его режимного нагружения. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований первой серии образ-

цов призм с уровнем нагружения статической нагрузкой до условно первого параметрического уровня микротрецинообразования бетона $0,2R_b$ позволил получить диаграмму статико-динамического деформирования и определить требуемые параметры для оценки напряженно-деформированного состояния материала при рассматриваемом режиме нагружения. Уже на этом этапе принятая в [1] гипотеза о наличии однопараметрической зависимости предельных деформаций от уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое догружение, в частности с первого параметрического уровня микротрецинообразования бетона $0,2R_b$ получила экспериментальное подтверждение.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90060.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорова Н.В., Медянкин М.Д. Бушова О.Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона// Промышленное и гражданское строительство. 2020. №1– С. 4-11.
2. Травуш В.И., Гордон В.А., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Динамическое деформирование балки при внезапном структурном изменении упругого основания//Инженерно-строительный журнал. 2019. № 7 (91). С. 129-144.
3. Kolchunov V., Savin S., Androsova N. Cross section structure influence to deformation of construction at accidental impacts// MATEC Web of Conferences. 2018. С. 02029.
4. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974.–316 с.
5. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении//Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 19-26.
6. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 33с.
7. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия. Минстрой России. М., 2017. 23 с.
8. Колчунов В.И., Савин С.Ю. Критерии живучести железобетонной рамы при потере устойчивости// Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4 (80). С. 73-80.
9. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance, revision 1, January 28, 2016
10. 53 UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 14 july 2009, change 3, 1 november 2016
11. Min Liu. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse. Engineering Structures Volume 48. 2013. Pp. 666-673.
12. Livingston E., Sasani M., Bazan M., Sagiroglu S. Progressive collapse resistance of RC beams. Engineering Structures Volume 95. 2015, Pp. 61-70.
13. Masoero E., Daro P., Chiaia B.M. Progressive collapse of 2D framed structures: An analytical model. Engineering Structures Volume 54. 2013. Pp. 94-102.
14. Dat P.X., Hai T.K., Yu Jun. A simplified approach to assess progressive collapse resistance of reinforced concrete framed structures. Engineering Structures Volume 101. 2015., Pp. 45-57.
15. Травуш В.И., Федорова Н.В. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях // Инженерно-строительный журнал. 2018. №5. С. 73-80.
16. Brunesi E., Nascimbene R., Parisi F., Augenti N. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. Engineering Structures Volume 104. 2015. Pp. 65-79.
17. 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.
18. Истомин А.Д., Беликов Н.А. Зависимость границ микротрецинообразования бетона от его прочности и вида напряжённого состояния//Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 159-162.
19. Зиновьев В.Н., Лизогуб А.А., Ляхова Н.Г., Ляхов Г.Г., Цыганкова А.М. Разрушение бетона// Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2019. № 1. С. 81-89.
20. Ahmadi R. Experimental and Numerical Evaluation of Progressive Collapse Behavior in Scaled RC Beam-Column Subassemblage / R. Я_Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia, F. M. Nav, N. Usefi // Shock Vib. – 2016.
21. Pham A.T. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading / A. T. Я_Phạm, K. H. Tan // Eng. Struct. – 2017. – № 139 – 31–45c.
22. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / J. Я_Yu, K. H. Tan // Eng. Struct. – 2013. – № 55 – 90–106c.

23. Lew H.S., B. Yihai, S. Fahim, J. Main, S. Pujol, M.A. Sozen. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. Boulder: Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1720, 2011. – 104 p.
24. Fedorova, N. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions / N. Fedorova, Vu Ngoc Tuyen // IOP Journal of Physics: Conference Series (JPCS). Volume 1425, 1, 012033
25. Федорова, Н.В. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях/Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т./Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 42-52.
26. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018 № 10 С. 95-101
27. Трекин, Н.Н. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин, Д.А. Чесноков // Промышленное и гражданское строительство. – 2016 – №6. С.8-13.
28. Федорова Н.В., Медянкин М.Д. Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона Патент на изобретение №2696815. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) Заявка № 2019101336 Приоритет изобретения 17 января 2019 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 06 августа 2019 г

REFERENCES

1. Fedorova N. V., Medyankin M. D. Bushova O. B. Opredelenie parametrov statico-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of parameters of static and dynamic deformation of concrete]. *Industrial and Civil Construction*. 2020. No. 1. Pp. 4-11.(rus).
2. Travush V. I., Gordon V. A., Kolchunov V. I., Leontiev E. V. Dinamicheskoe deformirovaniye balki pri vnezapnom strukturnom izmenenii uprugogo osnovaniya [Dynamic deformation of a beam in the event of a sudden structural change in the elastic base]. *Engineering and Construction Magazine*. 2019. No. 7 (91). Pp. 129-144. (rus).
3. Kolchunov V., Savin S., Androsova N. Cross section structure influence to deformation of construction at accidental impacts. *MATEC Web of Conferences*. 2018. p. 02029.
4. Geniev G. A., Kissyuk V. N., Tyupin G. A. Teori'ya plastchnosti betona i zhelezobetona [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. *Moscow: Stroizdat*, 1974. 316 p. (rus).
5. Tamrazyan A. G., Popov D. S. Napryazhonnno-deformirovannoe sostoyanie korroziyonno-povrezhdennyh zhelezobetonnyh elementov pri dinamicheskom nagruzhenii [Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading]. *Industrial and Civil Construction*. 2019. No. 2. Pp. 19-26.
6. SP 385.1325800.2018 Zashita zdaniy I sooruzheniy ot progressivnykh obrusheniy. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. The rules of design. Main provisions]. M: *Minstroy of Russia*. 2018. 33 p. (rus).
7. SP 296.1325800.2017 Zdaniya sooruzheniya. Osobyye vozdeystviya. [Buildings and structures. Special effects]. M: *Minstroy of Russia*. 2017. 23 p. (rus).
8. Kolchunov V. I., Savin S. Yu. Kriterii zhivuchesti zhelezobetonnoy ramy pri potere ustoychivosti [Criteria of survivability of reinforced concrete frame at loss of stability]. *Engineering and Construction Magazine*. 2018. No. 4 (80). Pp. 73-80.
9. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance. Revision 1. January 28. 2016.
10. 53 UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse. 14 july 2009, change 3, 1 november 2016
11. Min Liu. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse. *Engineering Structures*. Vol. 48. 2013. Pp. 666-673.
12. Livingston E., Sasani M., Bazan M., Sagiroglu S. Progressive collapse resistance of RC beams. *Engineering Structures*. Vol. 95. 2015. Pp. 61-70.
13. Masoero E., Daro P., Chiaia B.M. Progressive collapse of 2D framed structures: An analytical model. *Engineering Structures*. Vol. 54. 2013. Pp. 94-102.
14. Dat P.X., Hai T.K., Yu Jun. A simplified approach to assess progressive collapse resistance of reinforced concrete framed structures. *Engineering Structures*. Vol. 101. 2015. Pp. 45-57.
15. Travush V. I., Fedorova N. V. Zhivuchest' konstruktivnyh system sooruzheniy pri osobyh vozdeystviyah [Survivability of structural systems of structures under special influences]. *Engineering and Construction Magazine*. 2018. No. 5. Pp. 73-80. (rus).
16. Brunesi E., Nascimbene R., Parisi F., Augenti N. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. *Engineering Structures*. Vol. 104. 2015. Pp. 65-79.
17. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Uchet izmeneniy raschetnoy skhemy pri analize raboty konstruktsii [Accounting for changes in the design scheme when analyzing the design work]. *Engineering and Construction Magazine*. 2014. No. 5(49). Pp. 15-26. DOI: 10.5862/MCE. 49. 2. (rus).
18. Istomin A. D., Belikov H. A. Zavisimost' granits microtreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti I vida napryazhonnogo sostoyaniya [Dependence of the boundaries of microcracking of concrete on its strength and type of stress state]. *MSU Bulletin*. 2011. No 2-1. Pp. 159-162. (rus).

19. Zinoviev V. N., Lizogub A. A., Lyakhova N. G., Lyakhov G. G., Tsygankova A.M. Razzrushenie betona [Destruction of concrete]. *Bulletin of the Kant Baltic Federal University. Series: Physical, mathematical and technical Sciences.* 2019. No. 1. Pp. 81-89. (rus).
20. Ahmadi R. Experimental and Numerical Evaluation of Progressive Collapse Behavior in Scaled RC Beam-Column Subassemblage / R. Я_Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia, F. M. Nav, N. Usefi. *Shock Vib.* 2016.
21. Pham A.T. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading / A. T. Я_Phạm, K. H. Tan // *Eng. Struct.* 2017. No 139. Pp. 31–45.
22. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / J. Я_Yu, K. H. Tan // *Eng. Struct.* 2013. No 55. Pp. 90–106.
23. Lew H.S., B. Yihai, S. Fahim, J. Main, S. Pujol, M.A. Sozen. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. *Boulder: Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1720.* 2011. 104 p.
24. Fedorova, N. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions / N. Fedorova, Vu Ngoc Tuyen // *IOP Journal of Physics: Conference Series (JPCS).* Vol. 1425. 1. 012033
25. Fedorova N. V. Metodika eksperimental'nyh issledovanij deforirovaniya monolitnyh zhelezobetonnyh kar-kasov zhdaniy pri avariynyh vozdeystviyah [Method of experimental research of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts] /Fedorova, N. V., Korenkov, P. A., vu, N. T. / *Construction and Reconstruction.* 2018. No. 4 (78). Pp. 42-52.(rus).
26. Kodysh E. N. Proektirovanie zashchity zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya s uchotom voznikshego osobogo predel'nogo sostoyaniya [Design of protection of buildings and structures from progressive collapse taking into account the occurrence of a special limit state]. *Industrial and Civil Construction.* 2018 No 10 Pp. 95-101. (rus).
27. Trekin, N. N. Zashita mnogoetazhnyh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Protection of multi-storey buildings from progressive collapse] / E. N. Kodysh, N. N. Trekin, D. A. Chesnokov /. *Industrial and Civil Construction.* 2016. No. 6. Pp 8-13. (rus).
28. Fedorova N. V., Medyankin M. D. Sposob eksperimental'nogo opredeleniya statiko-dinamicheskikh harakteristik betona [Method for experimental determination of static-dynamic characteristics of concrete]. Patent for invention No. 2696815. *Patent holder: Federal state budgetary educational institution of higher education "national research Moscow state University of civil engineering" (NIU MGSU) Application No. 2019101336 Priority of the invention January 17. 2019. Date of state registration in the State register of inventions of the Russian Federation 06 August 2019. (rus).*

Информация об авторах

Федорова Наталья Витальевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, директор филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи
E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Медянкин Михаил Дмитриевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций
E-mail: 412125453@mail.ru

Бушова Олеся Борисовна

ООО «ПИК-Проект» г. Москва, Россия, конструктор-проектировщик
E-mail: bushova96@mail.ru

Information about authors

Fedorova Natalia Vitalyevna

Federal State Budgetary Educational Institution of the Higher Education "National research Moscow state construction university" (NIU MGSU), Moscow, Russia, Doctor of Engineering, professor, director of the branch of NIU MGSU in Mytishchi
E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Medyankin Mihail Dmitrievich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State Construction University" (NIU MGSU), Moscow, Russia, postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures
E-mail: 412125453@mail.ru

Bushova Olesya Borisovna

PIK-Proekt LLC, Moscow, Russia, engineer
E-mail: bushova96@mail.ru