



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.3.24-33

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Деформирование бетона при динамическом нагружении с учетом начальных напряжений и ползучести

С.Ю. Савин^{1*}, М.З. Шарипов¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

* suwin@yandex.ru

Ключевые слова: бетон, нелинейность, ползучесть, усадка, динамическое упрочнение, прогрессирующее обрушение

История статьи

Поступила в редакцию: 30.07.2024

Доработана: 05.09.2024

Принята к публикации: 07.09.2024

Для цитирования

Савин С.Ю., Шарипов М.З. Деформирование бетона при динамическом нагружении с учетом начальных напряжений и ползучести // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 7. № 3. С. 24–33.

Аннотация. В особых расчетных ситуациях режим нагружения железобетонных конструкций зданий и сооружений включает два характерных этапа: первый — длительное деформирование при постоянной или медленно меняющейся во времени нагрузке; второй — деформирование при быстро меняющейся нагрузке высокой интенсивности. Целью представленного исследования являлось выявление особенностей напряженно-деформированного состояния бетона при двухстадийном статико-динамическом нагружении, вызванном аварийной ситуацией. Для достижения указанной цели были выполнены экспериментальные исследования бетонных образцов в виде призм при различных режимах нагружения, включающих квазистатическое и динамическое нагружение. При этом также рассматривалось влияние наличия или отсутствия этапа нагружения длительной нагрузкой. Показано, что длительное нагружение при уровне напряжений 0,6 от предела прочности оказало положительное влияние на прочность бетона как при квазистатических испытаниях, так и при динамическом нагружении. Коэффициент упрочнения при квазистатических испытаниях составил 1,07 для образцов первой серии и 1,10 для образцов второй серии. Динамическое упрочнение составило 1,20 для образцов первой серии и 1,32 для образцов второй серии.

Dynamic Performance of Concrete Considering Initial Stresses and Creep

Sergei Yu. Savin^{1*}, Manonkhodja Z. Sharipov¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

* suwin@yandex.ru

Сергей Юрьевич Савин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388, E-mail: suwin@yandex.ru
Манонходжа Зарифходжаевич Шарипов, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; E-mail: manonkhoja.sh@bk.ru

© Савин С.Ю., Шарипов М.З., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: Concrete, nonlinearity, creep, shrinkage, dynamic strengthening, progressive collapse

Article history

Received: 30.07.2024

Revised: 05.09.2024

Accepted: 07.09.2024

For citation

Savin S.Yu., Sharipov M.Z. Dynamic Performance of Concrete Considering Initial Stresses and Creep. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 3(7):24-33.

Abstract. In accidental design situations, the loading mode of reinforced concrete structures includes two typical stages such as long-term deformation under constant or slowly varying load and dynamic impact. The purpose of the presented research was to reveal the peculiarities of stress-strain state of concrete under two-stage static-dynamic loading caused by an emergency situation. To achieve this purpose, the experimental investigations of concrete specimens in the form of prisms were carried out under different loading modes, including quasi-static and dynamic loading. The influence of the presence or absence of a long-term loading stage was also considered. It was shown that long-term loading at a stress level of 0.6 of the ultimate strength had a positive effect on the strength of concrete both in quasi-static tests and in dynamic loading. The hardening coefficient in quasi-static tests was 1.07 for the first series specimens and 1.10 for the second series specimens. The dynamic hardening was 1.20 for the first series specimens and 1.32 for the second series specimens.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон представляет собой сложный многокомпонентный композиционный материал, который в силу своей структуры обладает комбинацией упругих, хрупких и пластических свойств. Причем соотношение этих свойств может меняться во времени в зависимости от факторов силовых и средовых воздействий, режима нагружения конструкций. В последние годы к числу расчетных ситуаций, проверяемых при проектировании новых или реконструкции существующих зданий с железобетонными каркасами, добавились аварийные ситуации, вызванные внезапными отказами отдельных несущих элементов конструктивных систем. Такие аварийные ситуации представляют опасность для эксплуатируемых объектов, поскольку могут приводить к массовым жертвам в случае частичного или полного обрушения несущей системы здания [1].

Поэтому на этапе проектирования необходимо учесть влияние двухстадийного нагружения, включающего этап деформирования при действии постоянных и длительных эксплуатационных нагрузок, и динамическое догружение в результате структурной перестройки несущей системы сооружения после отказа одного из несущих элементов. Рассматриваемый режим нагружения оказывает влияние на количественные и качественные параметры деформирования железобетонных конструкций и диссипацию энергии. При таком режиме нагружения, как правило, оказывается превышенным уровень напряжений, определяющий границы применимости линейных вязкоупругих моделей бетона при расчете железобетонных конструкций.

В исследованиях сопротивления прогрессирующему обрушению железобетонного каркаса здания, подлежащего сносу [2], скорость деформаций по записям тензометрических датчиков на бетоне находилась в интервале от 10^{-3} до 10^{-2} с⁻¹ в зависимости от расстояния до удаляемой колонны. В испытании полномасштабной модели железобетонного каркаса [3] на внезапный отказ угловой колонны время полной разгрузки устройства, моделирующего угловую колонну, составило около 0,1 с по результатам обработки записей показаний тензометрических датчиков. Акселерометры, установленные на конструкциях полномасштабной модели над удаляемой угловой колонной, показали максимальное ускорение вертикальных колебаний 1,08 g ($g = 9,81$ м/с²). В горизонтальном направлении ускорения колебаний в уровне покрытия достигали 0,45 g.

Sergey Yu. Savin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1301-4838, Scopus: 57052453700, ResearcherID: M-8375-2016, ORCID: 0000-0002-6697-3388, E-mail: suwin@yandex.ru

Manonkhodja Z. Sharipov, postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; E-mail: manonkhoja.sh@bk.ru

Следуя классификации режимов деформирования бетона [4], режим деформирования при структурной перестройке несущей системы здания после отказа одного из элементов может быть отнесен к средним (intermediate) скоростям деформирования.

Исследования Баженова [5], Гениева [6], Nam et al. [7], Yang Y. et al. [8] и др. указывают, что прочность и предельные деформации бетона при сжатии и растяжении могут возрастать в зависимости от скорости деформации и времени выдержки под нагрузкой. При скорости 10^{-2} с⁻¹ наблюдается увеличение прочности примерно в 1,15 ... 1,3 раз. Также наблюдается увеличение предельных деформаций образцов.

Уместно заметить, что рассмотренные выше результаты исследований не учитывали особенности проявления реологических свойств бетона, связанных с длительной эксплуатацией сооружений. В то же время хорошо известно, что в бетоне железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений во времени развиваются деформации, вызванные усадкой и ползучестью. Также наблюдается рост прочности и начального модуля упругости в результате старения бетона. Levchitch et al. [9] исследовали бетонные образцы в возрасте 20–30 лет, извлеченные из балок и плит вблизи предполагаемых нейтральных осей изгибаемых элементов, а также из колонн, для которых средний уровень напряжений в течение срока эксплуатации оценивался как не более $0,27f_{ck}$ и не более $0,55 f_{ck}$ в условиях сейсмических воздействий. Авторами отмечено увеличение модуля деформаций и снижение деформативности. Таким образом, материал с течением времени стал более хрупким, уменьшился диапазон пластических деформаций.

В бетоне эксплуатируемых железобетонных конструкций во времени может наблюдаться релаксация напряжений [10–12] вследствие развития деформаций ползучести и перераспределения усилия на стержни продольной арматуры, а также другие конструкции в статически неопределимых системах. Отмеченное явление может сказаться на вязкостных свойствах бетона и величине удельной поглощаемой энергии при его динамическом нагружении с учетом наличия начальных напряжений от эксплуатационной нагрузки. При этом для описания сопротивления бетона при длительном нагружении используются схожие вязкоупругие, вязкоупругопластические или нелинейно вязкоупругие модели, построенные путем комбинирования элементов элементарных моделей Максвелла или Фойгта с учетом пластических свойств материала при высоких уровнях напряжений.

Целью представленного исследования являлось выявление особенностей напряженно-деформированного состояния бетона при двухстадийном статико-динамическом нагружении, вызванном аварийной ситуацией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для испытания были изготовлены две серии образцов в виде кубов $100 \times 100 \times 100$ мм и призмы $70 \times 70 \times 280$ мм. Материалы, принятые для образцов, приведены в табл. 1. Пропорции материалов были подобраны для получения бетона классов прочности по сжатию В30 для образцов первой серии и В40 для образцов второй серии.

После уплотнения бетонной смеси ее твердение происходило во влажных опилках в течение 28 дней, после чего образцы-призмы хранились до проведения эксперимента в нормальных условиях (температура воздуха $t = 20 \pm 2$ °С, влажность 60 ± 5 %) до достижения возраста 90 суток.

Для выявления особенностей напряженно-деформированного состояния бетона железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий при динамическом нагружении каждая из двух серий образцов включала по 21 образцу-призме $70 \times 70 \times 280$ мм и 9 образцов-кубов $100 \times 100 \times 100$ мм. Образцы в виде кубов служили для предварительной оценки прочности бетона при осевом сжатии в возрасте 28, 90 и 270 суток, а также для настройки оборудования при

проведении испытаний призм с учетом методики ГОСТ 10180–2012 и установки фиксированного уровня начальных напряжений $0,6f_{cm}$ для двухстадийных статико-динамических испытаний.

Уровень начальных напряжений в образцах, испытанных на двухстадийное нагружение, был принят $0,6f_{cm}$, основываясь на данных, полученных для образцов эксплуатируемых зданий в работе [9]. С учетом значений частных коэффициентов к нагрузкам и материалам, принимаемым при проектировании, фактические напряжения в конструкциях редко превосходят данный уровень. С другой стороны, учитывая влияние вязкостных свойств на сопротивление бетона при динамическом нагружении, такой уровень напряжений должен позволить нам выявить качественные различия между сопротивлением и диссипацией энергии бетоном при динамическом нагружении при наличии начальных напряжений и в условиях их отсутствия.

Для проведения испытаний на ползучесть образцы в возрасте 90 суток устанавливались в специальный испытательный стенд, конструкция которого представлена на рис. 1. После достижения заявленного уровня напряжений осуществлялась выдержка образцов на 182 суток согласно ГОСТ 24544–2020 [13].

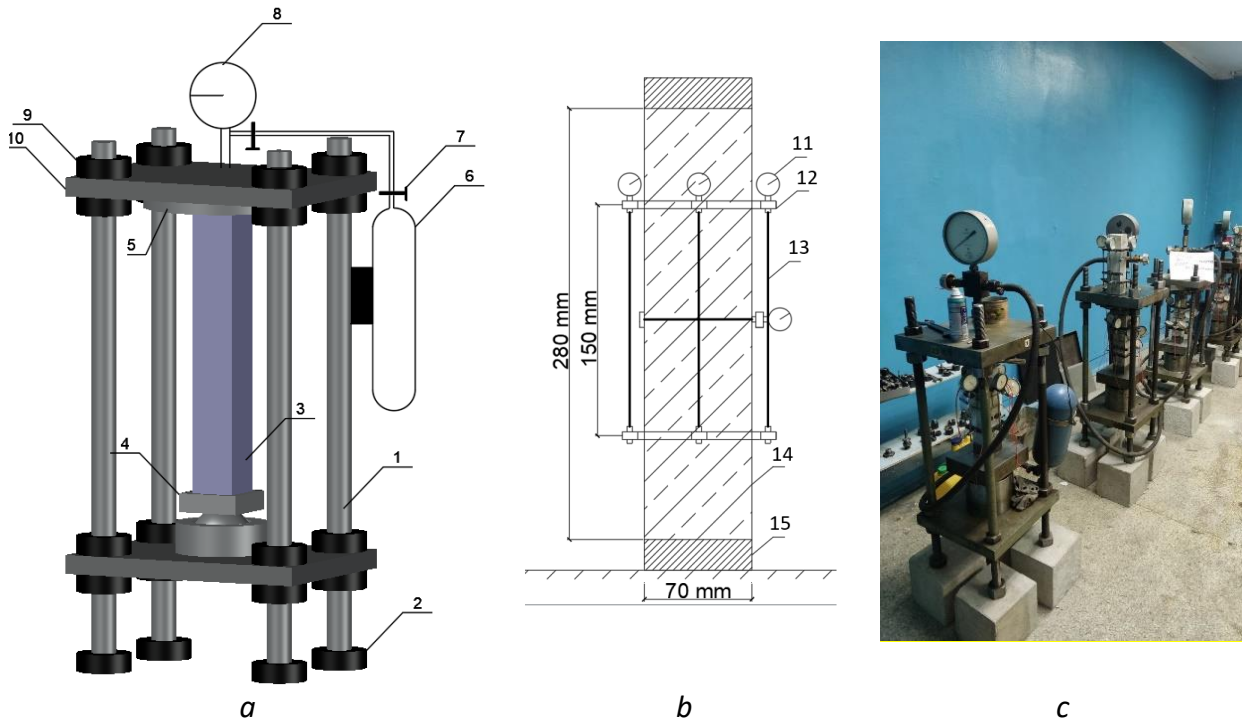


Рис. 1. Измерения ползучести: схема пневмогидравлического устройства для определения меры ползучести (а); схема расстановки измерительных приборов (б); общий вид образцов при испытаниях на ползучесть (с): 1 — стойки; 2 — регулирующие гайки, 3 — образец, 4 — шарнир, 5 — шарнирный гидравлический домкрат, 6 — баллон с инертным газом, 7 — вентиль баллона, 8 — манометр образцовый, 9 — фиксирующие traversу гайки, 10 — traversа, 11 — индикатор часового типа, 12 — рамка для крепления индикаторов, 13 — качающаяся штанга, 14 — образец $70 \times 70 \times 280$ мм, 15 — металлические пластинки

Fig. 1. Creep measurements: scheme of pneumohydraulic device for creep measure determination (a); scheme of measuring devices arrangement (b); general view of specimens during creep tests (c): 1 — stands, 2 — adjusting nuts, 3 — specimen, 4 — joint, 5 — joint hydraulic jack, 6 — balloon with inert gas, 7 — valve of the balloon, 8 — sample pressure gauge, 9 — fixing nuts, 10 — traverse, 11 — clock-type indicator, 12 — frame for fixing indicators, 13 — swinging rod, 14 — sample $70 \times 70 \times 280$ mm, 15 — steel plates

Измерения усадки выполнялись по методике ГОСТ 24544–2020 [13] на ненагруженных образцах в виде призм $70 \times 70 \times 280$ мм, начиная с возраста 90 суток. Образцы, испытываемые на усадку, находились в том же помещении, что и образцы, подверженные испытаниям на ползучесть. В помещении были созданы следующие условия: температура воздуха $t = 20 \pm 2$ °С, влажность — 60 ± 5 %.

Определение параметров диаграммы «напряжения – деформации» образцов в возрасте 270 суток при динамическом нагружении выполнялось на универсальной динамической испытательной машине LabTest 6.500H.5.01.1. Образцы нагружались от уровня условного нуля до разрушения со скоростью напряжений 300–900 МПа/с.

Статико-динамические испытания производились для образцов в возрасте 270 суток. При этом половина образцов предварительно выдерживалась под длительной статической нагрузкой при уровне напряжений $0,6f_{cm}$ в течение 182 суток по методике. Вторая группа образцов до возраста 270 суток не подвергалась действию внешних нагрузок. На первом этапе двухэтапного нагружения в образцах создавался уровень напряжений, равный $(60 \pm 5) \%$ от ожидаемого предела прочности на осевое сжатие. Этот уровень напряжений также соответствовал уровню напряжений в образцах при их испытаниях на ползучесть. После достижения указанного уровня напряжений осуществлялось непрерывное нагружение образца до разрушения при скорости напряжений 300–900 МПа/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 представлены графики изменения деформаций во времени по результатам испытаний при различных режимах нагружения.

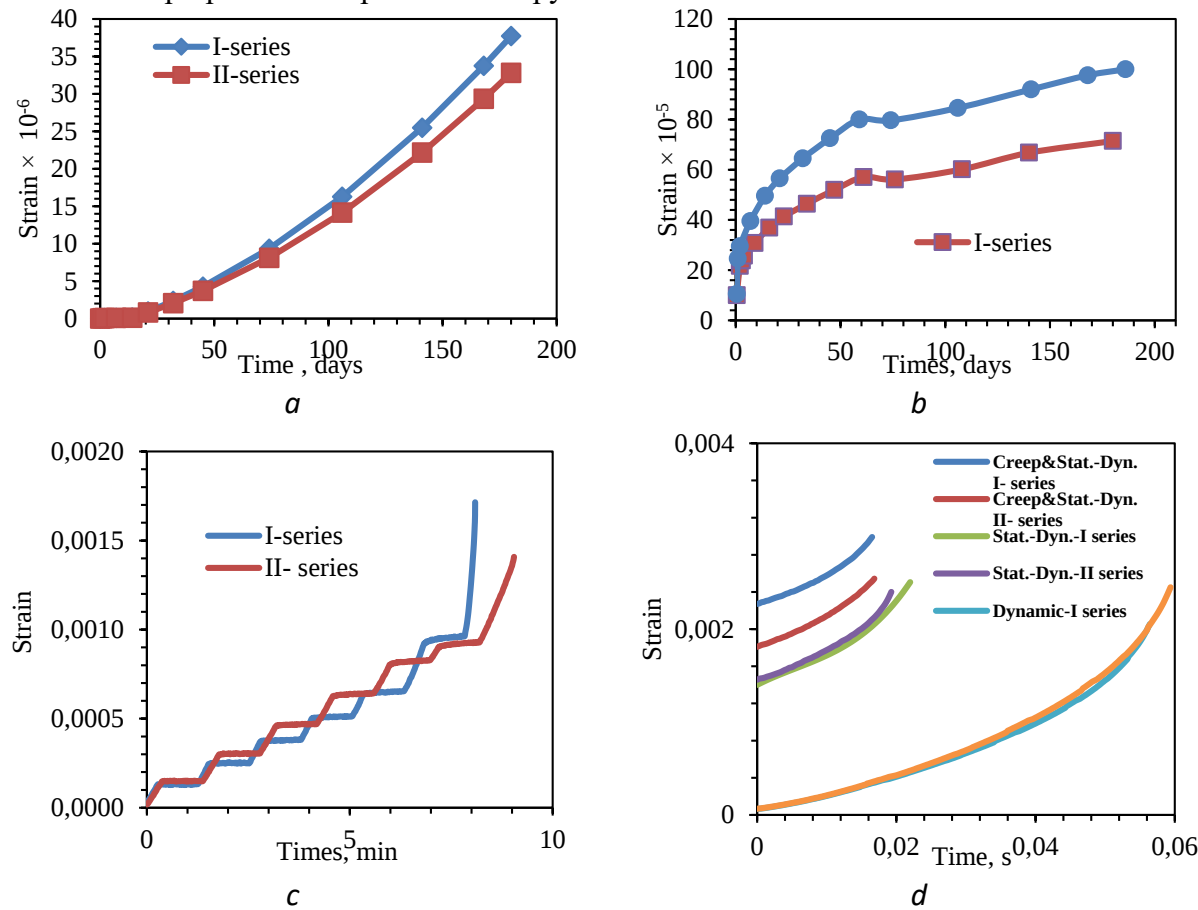
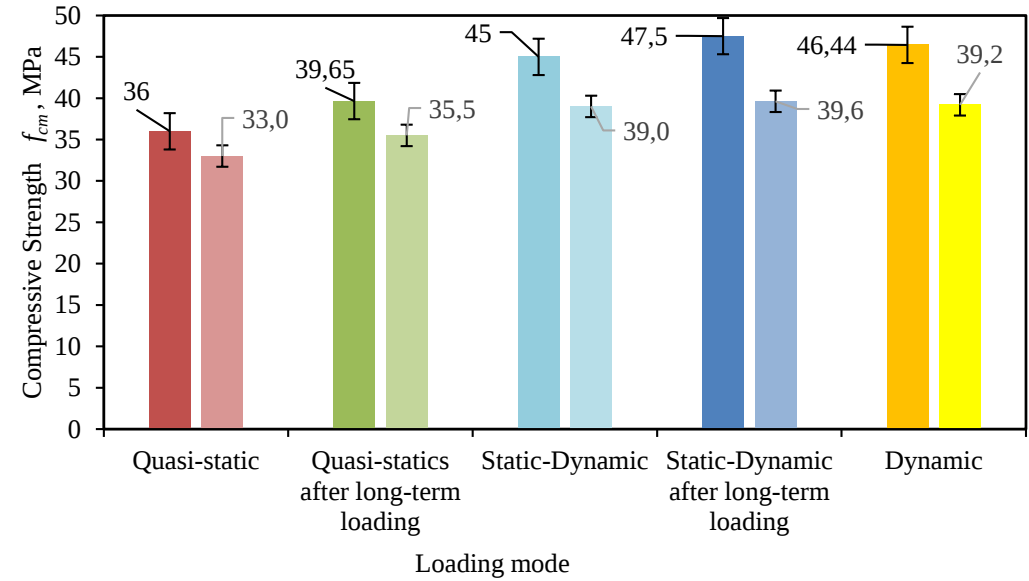


Рис. 2. Изменение деформаций во времени при различных режимах нагружения: деформации усадки (а); деформации ползучести (b); квазистатический режим нагружения (c); динамический режим нагружения (d)
Fig. 2. Change of deformations in time at different loading modes: shrinkage deformations (a); creep deformations (b); quasi-static loading mode (c); dynamic loading mode (d)

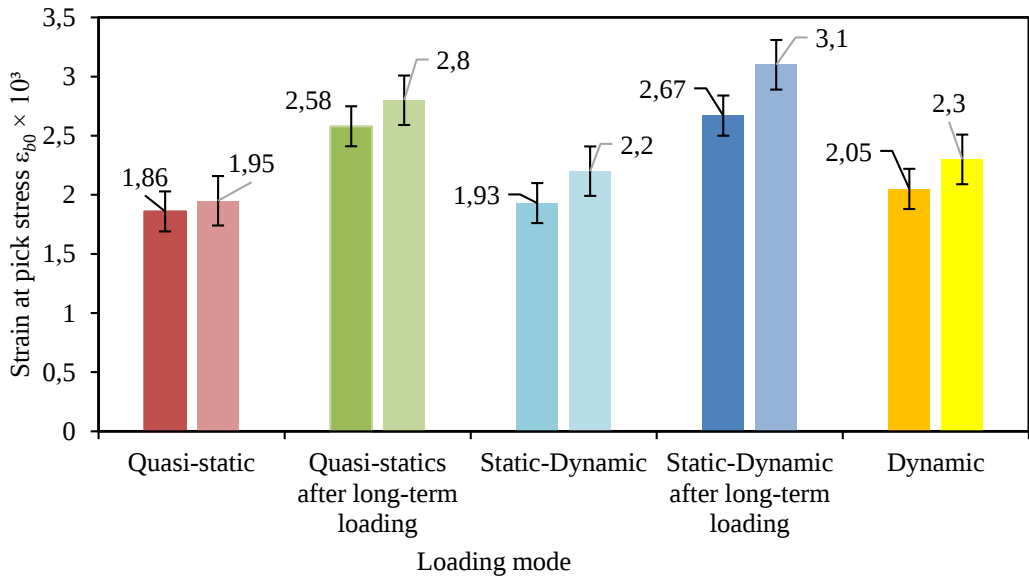
Скорость деформаций варьировалась от $1,17 \times 10^{-3}$ до $1,88 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ в начале динамического нагружения и возрастала по мере того, как напряжения приближались к пределу прочности материала. Средние скорости деформаций при этом попадали в интервал от 3×10^{-2} до $5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Полученные значения близки к интервалу скоростей деформаций от 10^{-3} до 10^{-2}

s^{-1} , зафиксированному в исследованиях отклика несущей системы здания отеля Сан-Диего [1], подлежащего сносу.

Средние значения результатов испытания кубов и призм в возрасте 28, 90 и 270 суток при различных режимах нагружения приведены на рис. 3.



a



b

Рис. 3. Влияние длительности выдержки при статической нагрузке: на прочность (a); на деформации при пределе прочности (b)

Fig. 3. Duration of holding time under static loading: on strength (a); on strains at ultimate strength (b)

На рис. 4 представлены диаграммы «напряжения – деформации» при динамическом режиме нагружения.

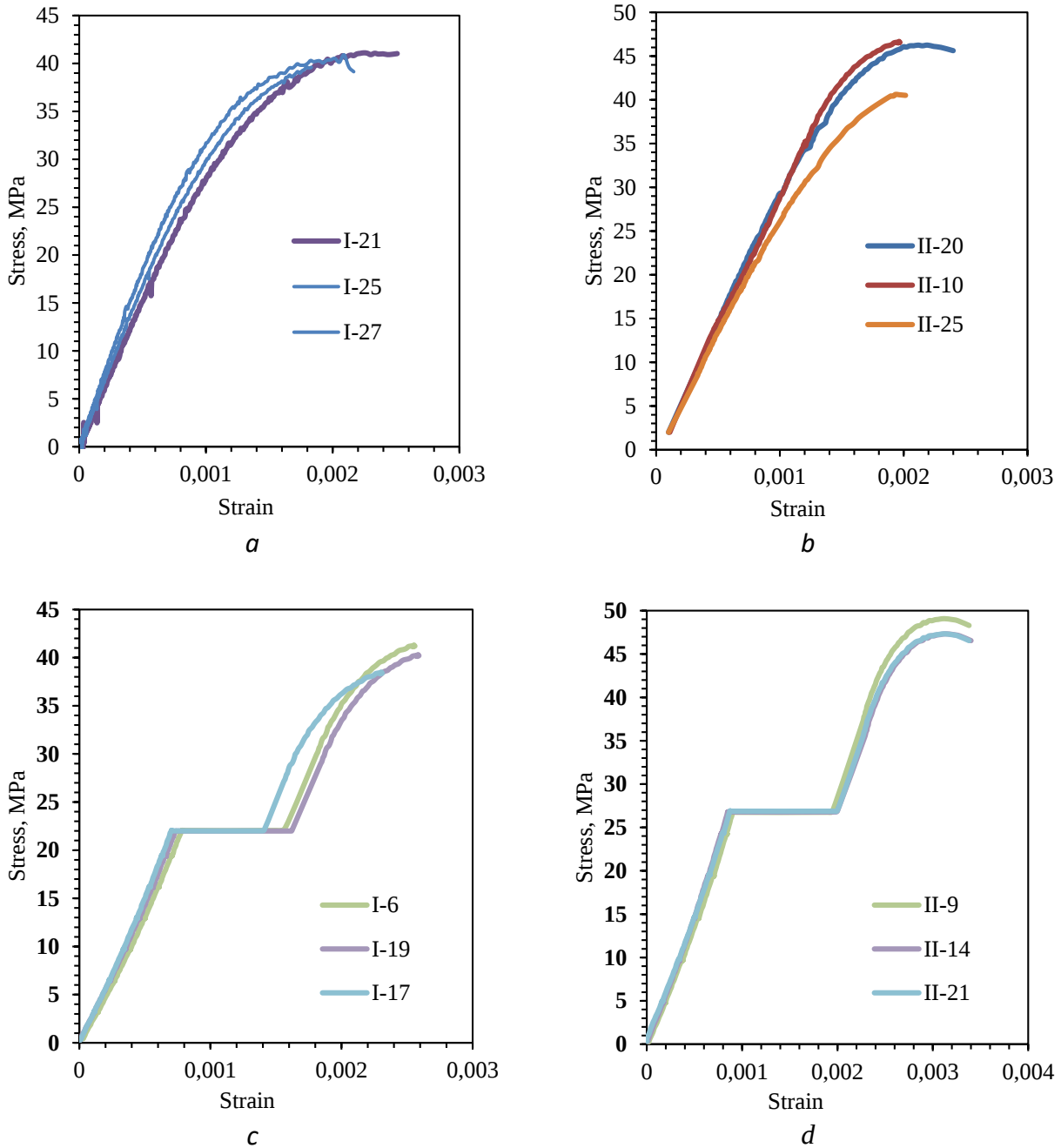


Рис. 4. Диаграммы состояния бетона при динамическом нагружении: *a* — серия I без учета начальных напряжений; *b* — серия II без учета начальных напряжений; *c* — серия I с учетом предварительной выдержки при уровне начальных напряжений $0,6 f_{cm}$; *d* — серия II с учетом предварительной выдержки при уровне начальных напряжений $0,6 f_{cm}$

Fig. 4. Concrete deformation diagrams under dynamic loading: *a* — series I without taking into account initial stresses; *b* — series II without taking into account initial stresses; *c* — series I with taking into account pre-conditioning at initial stress level of $0.6 f_{cm}$; *d* — series II with taking into account pre-conditioning at initial stress level of $0.6 f_{cm}$.

Как видно из данных на рис. 3, 4, ползучесть бетона оказывала положительное влияние на его динамическую прочность. Для образцов-призм серии I прочность в среднем увеличивалась в 1,32 раза с 33 до 39,6 МПа, а для образцов серии II — в среднем в 1,32 раза с 36 до 47,5 МПа. Наблюдаемый эффект имеет ту же природу, что и при статических испытаниях. Деформации при пределе динамической прочности за вычетом деформаций ползучести для

образцов серии I оказались в 1,18 раз больше, чем при квазистатических испытаниях без учета начальных напряжений. Для образцов серии II соответствующие значения уменьшились в 0,89 раз по сравнению с квазистатическими испытаниями, что может быть связано со старением материала.

При статико-динамических испытаниях образцов без длительной выдержки при фиксированном уровне напряжений, вызванных статическим этапом нагружения, прочность возросла в 1,18 и 1,25 раз по сравнению с результатами квазистатических испытаний для образцов серии I и II соответственно. При этом динамическая прочность образцов без учета влияния начальных напряжений была выше, чем по результатам статико-динамических испытаний, и превышала в 1,29 раз прочность при квазистатическом режиме нагружения. Схожий тренд наблюдался и для деформаций, соответствующих пределу прочности.

На рис. 5 приведено сопоставление результатов испытаний при динамическом и статико-динамическом режимах нагружения для образцов 1 и 2 серии, полученных авторами, и бетона различных классов прочности по сжатию, представленных в исследованиях [14–16].

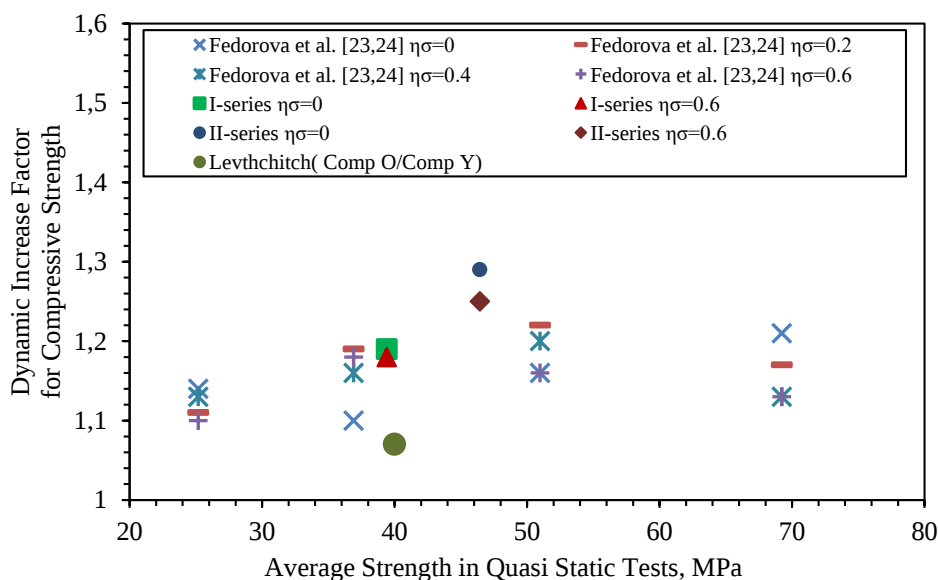


Рис. 5. Сопоставление результатов динамических и статико-динамических испытаний бетона различных классов прочности с данными квазистатических испытаний

Fig. 5. Comparison of the results of dynamic and static-dynamic tests of concrete of different strength classes with the data of quasi-static tests

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными в исследованиях [15, 17]. В частности, в [17] динамическое упрочнение образцов из фибробетона с учетом наличия начальных напряжений составило 1,19, в то время как при динамическом нагружении без учета начальных напряжений эта величина составляла 1,28. При этом необходимо отметить снижение коэффициента динамического упрочнения для бетона после длительной эксплуатации. Так, для бетонных образцов, извлеченных из железобетонных конструкций после 20–30 лет эксплуатации, коэффициент динамического упрочнения составил около 1,07 [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов выполненного исследования могут быть сформулированы следующие выводы. Длительное нагружение при уровне напряжений 0,6 от предела прочности оказало положительное влияние на прочность бетона как при квазистатических испытаниях, так и при динамическом нагружении. Коэффициент упрочнения при квазистатических

испытаниях составил 1,07 для образцов первой серии и 1,10 для образцов второй серии. Динамическое упрочнение составило 1,20 для образцов первой серии и 1,32 для образцов второй серии. Это было выше, чем показатели динамического упрочнения образцов без учета выдержки при длительной нагрузке. Выявленный эффект может быть объяснен релаксацией напряжений компонентов структуры бетона с меньшим модулем деформации и перераспределением нагрузки на компоненты с большим модулем, такие как крупный заполнитель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят НИУ МГСУ за поддержку в рамках конкурса грантов на проведение исследований аспирантами (Проект № 02-480/130, приказ 480/130 от 18.05.2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Caredda G. et al. Learning from the progressive collapse of buildings // *Developments in the Built Environment*. 2023. Vol. 15. P. 100194.
2. Sasani M., Sagioglu S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego // *Journal of Structural Engineering*. 2008. Vol. 134. No. 3. Pp. 478–488.
3. Adam J.M. et al. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 210. P. 110414.
4. Meng L. et al. Study on dynamic properties of lightweight ultra-high performance concrete (L-UHPC) // *Constr Build Mater*. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 399.
5. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М. : Стройиздат, 1970. 271 с.
6. Генуев Г.А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // *Бетон и железобетон*. 1998. № 1. С. 18–19.
7. Nam J.W. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. Vol. 18. No. 5. Pp. 461–490.
8. Yang Y., Wu C., Liu Z. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // *Compos Struct*. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 309.
9. Levitch V. et al. Seismic Performance Capacities of Old Concrete // *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada. 2004. Pp. 1–15.
10. Zhou Y. Concrete creep and thermal effects on the dynamic behavior of a concrete-filled steel tube arch bridge // *Journal of Vybriengineering*. 2014. Vol. 16. No. 4. Pp. 1735–1744.
11. Tosić N., Aidarov S., de la Fuente A. Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete // *Materials*. MDPI, 2020. Vol. 13. No. 22.
12. Тамразян А.Г. К устойчивости внецентренно сжатых железобетонных элементов с малым эксцентриситетом с учетом реологических свойств бетона // *Железобетонные конструкции*. 2023; № 2 (2). С. 48–57. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.48-57
13. Standard of RF GOST 24544–2020. Concretes. Methods of shrinkage and creep flow determination / ed. JSC Research and Development Center “Construction”. М. : Standardinform, 2021.
14. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental Determination of The Parameters of the Static-Dynamic Deformation of Concrete under Loading Modal // *Building and reconstruction*. 2020. Vol. 89. No. 3. Pp. 72–81.
15. Fedorova N. et al. Experimental and Theoretical Studies of the Concrete Static-Dynamic Stress–Strain Curves // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 170. Pp. 151–161.
16. Fedorova N. V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Determination of Static-Dynamic Deformation Parameters of Concrete // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020. No. 1. Pp. 4–11.
17. Savin S.Yu., Medyankin M.D., Sharipov M.Z. Deformation of Fiber Concrete Under a Single Dynamic Impact Taking into Account the Influence of Initial Stresses from the Static Load // *Building and reconstruction*. 2022. Vol. 99. No. 1. Pp. 76–88.

REFERENCES

1. Caredda G. et al. Learning from the progressive collapse of buildings. *Developments in the Built Environment*. 2023; 15:100194.
2. Sasani M., Sagioglu S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego. *Journal of Structural Engineering*. 2008; 134(3):478-488.
3. Adam J.M. et al. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020; 210:110414.

4. Meng L. et al. Study on dynamic properties of lightweight ultra-high performance concrete (L-UHPC). *Constr Build Mater.* Elsevier Ltd, 2023; 399.
5. Bazhenov Y.M. *Concrete under dynamic loading*. Moscow, Stroyizdat, 1970; 271. (in Russian).
6. Geniev G.A. Method of determination of dynamic limits of concrete strength. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1998; 1:18-19. (in Russian).
7. Nam J.W. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads. *International Journal of Damage Mechanics*. 2009; 18(5):461-490.
8. Yang Y., Wu C., Liu Z. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile. *Compos Struct.* Elsevier Ltd, 2023; 309.
9. Levitch V. et al. Seismic Performance Capacities of Old Concrete. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada, 2004; 1-15.
10. Zhou Y. Concrete creep and thermal effects on the dynamic behavior of a concrete-filled steel tube arch bridge. *Journal of Vibroengineering*. 2014; 16(4):1735-1744.
11. Tošić N., Aidarov S., de la Fuente A. Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*. MDPI, 2020; 13:22.
12. Tamrazyan A.G. On the Stability of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements with a Small Eccentricity. Taking into Account the Rheological Properties of Concrete. *Reinforced concrete structures*. 2023; 2(2):48-57. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.48-57 (in Russian).
13. Standard of RF GOST 24544–2020. Concretes. Methods of shrinkage and creep flow determination / ed. JSC Research and Development Center “Construction”. Moscow, Standardinform, 2021.
14. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental Determination of The Parameters of the Static-Dynamic Deformation of Concrete under Loading Modal. *Building and reconstruction*. 2020; 89(3):72-81.
15. Fedorova N. et al. Experimental and Theoretical Studies of the Concrete Static-Dynamic Stress–Strain Curves. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 170:151-161.
16. Fedorova N. V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Determination of Static-Dynamic Deformation Parameters of Concrete. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020; 1:4-11.
17. Savin S.Yu., Medyankin M.D., Sharipov M.Z. Deformation of Fiber Concrete Under a Single Dynamic Impact Taking into Account the Influence of Initial Stresses from the Static Load. *Building and reconstruction*. 2022; 99(1):76-88.