

УДК 624.012.46
ББК 38.53
М-14

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ЖБК Ростовского государственного строительного университета;

Таржиманов Марат Альбертович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры ИГОФ Ростовского государственного строительного университета;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительных и общепрофессиональных дисциплин Майкопского государственного технологического университета, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru;

Хутыз Абрек Махмудович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин Майкопского государственного технологического университета.

РАБОТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО БЕТОНА ПРИ ПОВТОРНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАПРЯЖЕНИИ (рецензирована)

В статье приводятся результаты исследований изменения свойств бетона после повторного динамического нагружения. Разработаны регрессионные зависимости, учитывающие изменения соответствующих свойств бетона в зависимости от уровня предварительного обжатия и количества циклов динамического нагружения.

Ключевые слова: предварительно напряженный бетон, повторное нагружение, динамические усилия.

Mailyan Dmitry Rafaelovich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures of Rostov State University of Civil Engineering;

Tarzhimanov Marat Albertovich, Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of EGBF of RSUCE;

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the department of Construction and General Professional Disciplines of Maikop State Technological University, tel.: 89184205021, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru.

Khoutyz Abrek Makhmudovich, Candidate of Technical Sciences, professor of the Department of Con-struction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University.

OPERATING OF PRESTRESSED CONCRETE WITH REPEATED DYNAMIC TENSION (Reviewed)

In the article the investigation results of changes in the properties of concrete after repeated dynamic loading have been presented. Regression dependences, taking into account the variations of the corresponding properties of the concrete, depending on the level of pre-compression and the number of cycles of dynamic loading have been developed.

Keywords: pre-stressed concrete, reloading, dynamic effort.

Влияние предварительных напряжений на свойства бетона при последующих статических нагружениях изучено достаточно подробно.

Вместе с тем поведение таких бетонов при импульсных динамических воздействиях, особенно повторных, не исследовано вовсе, поэтому в данной работе была поставлена цель восполнить существующий пробел.

Коэффициент динамического упрочнения предварительно обжатого бетона обозначим

$$K_d^p = R_{bd}^p / R_b^p,$$

где R_{bd}^p – динамическая прочность предварительно обжатого бетона, а R_b^p – статическая прочность такого же бетона. Аналогично для необжатого бетона $K_d = R_{bd} / R_b$.

Обозначим через α_{Rb}^p отношение коэффициентов динамического упрочнения предварительно нагруженного K_d^p и необжатого бетона K_d , т.е.

$$\alpha_{Rb}^p = K_d^p / K_d = R_{bd}^p / K_d \gamma_{Rb} R_b^p, \quad (1)$$

где $\gamma_{Rb} = R_b^p / R_b$ – коэффициент условия работы, учитывающий влияние преднапряжения на свойства бетона при статическом нагружении.

В этом случае призмная прочность, предельная деформативность и модуль упругости

предварительно напряженного бетона при импульсном воздействии равны:

$$R_{bd}^p = R_b K_d \alpha_{Rb}^p \gamma_{Rb}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{bRd}^p = \varepsilon_{bR} K_{d\varepsilon} \alpha_{\varepsilon b}^p \gamma_{\varepsilon b}, \quad (3)$$

$$E_{bd}^p = E_b K_{dEb} \alpha_{Eb}^p \gamma_{Eb}, \quad (4)$$

Таким образом, для определения динамической прочности и полной диаграммы деформирования бетона, подвергнутого предварительному обжатию, необходимо определить опытным путем значения указанных коэффициентов.

Нашей основной задачей было установление параметров диаграммы деформирования бетона подвергнутого предварительному сжатию ($R_{bd}^p, \varepsilon_{bRd}^p, E_{bd}^p$) при динамических повторных импульсных воздействиях.

При проведении экспериментов сперва определялась степень изменения параметров диаграмм " $\sigma_b - \varepsilon_b$ " бетона, не подвергнутого предварительному нагружению, при динамических воздействиях (коэффициенты $K_d, K_{d\varepsilon}, K_{dEb}$). Затем, используя полученные данные, была определена степень изменения диаграмм " $\sigma_b - \varepsilon_b$ " предварительно нагруженного бетона при динамических повторных воздействиях (коэффициенты $\alpha_{Rb}^p, \alpha_{\varepsilon b}^p, \alpha_{Eb}^p$).

Объектом испытания были выбраны бетонные призмы размерами 100x100x400 мм.

Опытные бетонные образцы изготавливались из тяжелого бетона проектной прочностью 25 МПа.

Испытания бетонных образцов на динамические импульсные повторные нагрузки производились на модернизированной нами установке, разработанной в РГСУ (а.с. СССР №1201709). Указанная установка была рассчитана авторами на небольшие нагрузки для испытания изгибаемых элементов и, кроме того, имела ряд недостатков (ненадежность механизма сброса масла из подпоршневое пространство (слабое запорное устройство и др.). В модернизированной установке эти недостатки были устранены, а также введено ряд существенных новшеств, в частности, в механизме сброса масла вместо пробкового крана предусмотрено новое устройство, состоящее из полый трубки-бойка, пробивающего в момент сброса давления пакет из нескольких слоев полиэтиленэрафтолатной пленки и др.

Модernизированная установка позволяет создавать импульсные нагрузки до 1000 кН и регулировать скорость нагружения в широких пределах – от 0,001 сек до нескольких секунд.

Обжатие группы образцов в установках осуществлялось до запланированных начальных уровней $\eta_\tau = \sigma_{b\tau} / R_{b\tau}$, где $R_{b\tau}$ – кубиковая прочность необжатого бетона в возрасте τ . В течение всего периода обжатия $T = t - \tau$ с помощью деформометров, установленных на тросах, осуществлялся регулярный контроль за изменением уровня обжатия, вызванных релаксацией стальных тросов из канатов, имитирующих арматуру конструкций, а также потерями от усадки и ползучести бетона.

Анализ опытных данных подтвердил, что длительное убывающее во времени обжатие бетона при начальном уровне обжатия $\eta_\tau \leq 0,55$ может привести к повышению кубиковой прочности до 16%, а при измененной – до 22%.

Степень изменения кубиковой прочности зависит от начального уровня обжатия η_τ и возраста бетона при обжатии τ . Эта зависимость может быть выражена уравнением, предложенным в РГСУ:

$$\gamma_R = R^p / R = 1,094 + 0,2125 \eta_\tau (2,19 - \eta_\tau) + + 1,1 \cdot 10^{-4} \pi (\tau - 70,73) - 4,52 \cdot 10^{-3} \eta_\tau \tau, \quad (5)$$

Уравнение (5) получено с помощью методики планирования эксперимента. Расчетное значение коэффициента Фишера $F_p = 1,07 < F_t = 19,2$, а коэффициент корреляции равен 0,993, что говорит о высокой тесноте корреляционной связи.

Предложенное уравнение с достаточной точностью описывает наблюдаемые явления в пределах изменения η_τ от 0,1 до 0,55. При таких уровнях обжатия происходит уплотнение структуры бетона и повышение его прочности. При более высоких уровнях обжатия в бетоне преобладают деструктивные процессы, связанные с образованием микротрещин. Это может привести к снижению прочности бетона вследствие влияния длительного обжатия высокого уровня. Вследствие этого, уравнение (5) может быть использовано до уровня обжатия, не превышающих 0,55. При этом в уравнении следует подставлять $\tau \leq 50$ сут., т.к. при $\tau > 50$ сут. влиянием возраста бетона при обжатии можно пренебречь.

Регрессионное уравнение зависимости коэффициента призмной прочности γ_{Rb} от начального уровня обжатия η_τ и возраста бетона τ было получено в РГСУ:

$$\gamma_{R_b} = R_b^p / R_b = 1,0684 + 0,95 \eta_\tau (1,106 - \eta_\tau) - 1,066 \cdot 10^{-4} \tau (71 - \tau) - 8,57 \cdot 10^{-3} \eta_\tau^2, \quad (6)$$

Для данного уравнения получено:

$$f_{ag} = 3; \quad f_y = 2; \quad F_T = 19,2 > F_p = 2,3,$$

что свидетельствует об адекватности математического описания и изучаемого явления. Коэффициент множественной корреляции уравнения регрессии (6) составил 0,992, что указывает на большую тесноту связи.

С увеличением интенсивности обжатия η_τ приращение коэффициента γ_{R_b} уменьшается. Рост коэффициента γ_{R_b} наблюдается до уровня $\eta_\tau = 0,4 \dots 0,6$ в зависимости от возраста при обжатии. При превышении указанного уровня обжатия значения γ_{R_b} начинают снижаться, их приращение становится отрицательным.

При очень высоких уровнях обжатия как кубиковая, так и призмная прочность снижаются и их значения могут оказаться ниже прочности необжатых образцов.

Полученные нами опытные данные хорошо описываются уравнением (6).

Коэффициент призмной прочности бетона $K = R_b / R$ с повышением уровня обжатия η_τ примерно до 0,4 увеличивается на 5-6%, а при более высоком уровне обжатия его значения по сравнению с максимальным снижаются.

Нами были использованы полученные в РГСУ зависимости для определения степени изменения деформативных свойств бетона после предварительного обжатия:

$$\gamma_{E_b} = E_b^p / E_b = 1,123 + 0,4808 \eta_\tau (0,806 - \eta_\tau) - 1,013 \cdot 10^{-4} \tau (79,5 - \tau) - 1,25 \cdot 10^{-3} \eta_\tau^2, \quad (7)$$

$$\gamma_{\nu_b} = \nu_b^p / \nu_b = 1,021 + 0,285 \eta_\tau (3,5 - \eta_\tau) - 1,17 \cdot 10^{-4} \tau (49,86 - \tau) - 1,512 \cdot 10^{-3} \eta_\tau^2, \quad (8)$$

Эти уравнения достаточно хорошо описывают наши опытные данные.

Анализ опытных осциллограмм показал незначительное различие в усилиях, фиксируемых на верхнем и нижнем динамометре (до 3...5%). Развитие деформации носило плавный характер, волновые процессы деформирования зафиксированы не были.

Опыты показали, что коэффициент динамичности для обычных (не подвергнутых предварительному обжатию и растяжению) призм составил 1,3. Эти данные при принятой в опытах скорости нагружения соответствуют зависимости Kd-г, предложенной Ю.М. Баженовым.

При предварительном обжатии призм отношение $\alpha_{R_b}^p = K_d^p / K_d$ в зависимости от начального уровня обжатия η_τ и относительной прочности бетона к началу предварительного обжатия $\beta = R_\tau / R_{28}$ возрастает в 1...1,12 раз.

С увеличением уровня обжатия η_τ и увеличением циклов динамических воздействий отношение α_{R_b} повышается.

Предельные деформации, соответствующие максимальным напряжениям при динамическом нагружении, оказались в среднем на 10% ниже, а модули упругости на 15...20% выше, чем при статическом, т.е. $K_{eb} = \varepsilon_{bd} / \varepsilon_b \approx 0,9$, а

$$K_{Eb} = E_{bd} / E_b = 1,15 \dots 1,20.$$

Отношение предельной сжимаемости и модулей упругости бетона при динамическом нагружении к аналогичным характеристикам при статическом в предварительно обжатом бетоне ($\alpha_{\varepsilon_b}^p, \alpha_{E_b}^p$) выше, чем в необжатом в зависимости от указанных факторов в 1...1,11 раз и в 1...1,15 раз.

При математическом планировании экспериментов в качестве основных варьируемых факторов выбраны (табл. 1) начальный уровень предварительного обжатия $\eta_\tau = \sigma_{bt(bt\tau)} / R_{bt(bt\tau)} = 0,25; 0,35; 0,55$; количество циклов динамического импульсного нагружения $n = 25, 15, 5$.

Таблица 1 - Значение факторов и интервалы их варьирования

Код	Значение кода	Значение факторов в натуральных единицах	
		$\bar{x}_1 = \eta_\tau$	$\bar{x}_2 = n$
Основной интервал	0	0,35	15
Интервал варьирования		0,2	10
Верхний интервал	+	0,55	5
Нижний интервал	-	0,15	25

Средний уровень $\eta_\tau = 0,35$, как правило, соответствует средним уровням предварительного обжатия в конструкциях. Большой уровень $\eta_\tau = 0,55$ соответствует верхней границе применения предварительного напряжения в железобетоне. Таким образом, исследуются все возможные случаи влияния предварительного напряжения на свойства бетона.

Применение математического планирования эксперимента позволило получить регрессионные зависимости коэффициентов, учитывающих влияние указанных факторов на свойства бетона при динамическом повторном воздействии.

В общем виде искомые зависимости при трехуровневых и двухфакторных планах имеют вид:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (9)$$

На основании выполненных нами экспериментов были получены опытные значения коэффициентов, отражающих влияние предварительного обжатия на механические свойства бетона при импульсных воздействиях (табл. 2). По этим данным по известным формулам математической статистики были вычислены свободные члены и коэффициенты уравнения (9), приведенные в табл. 3.

Таблица 2 - Опытные значения коэффициентов, отражающие влияние предварительного обжатия бетона на прочность и деформативность при динамических импульсных воздействиях

n	α_{Rb}^p			$\alpha_{\square b}^p$			α_{Eb}^p		
	η_τ								
	0,15	0,35	0,55	0,15	0,35	0,55	0,15	0,35	0,55
25	1,06	1,09	1,012	1,04	1,08	1,11	1,05	1,15	1,1
15	1,03	1,06	1,09	1,01	1,05	1,08	1,02	1,11	1,08
5	1	1,02	1,05	1	1,03	1,06	1	1,05	1,05

Таблица 3 - Коэффициенты уравнения (9) для определения степени изменения свойств предварительно нагруженного бетона при импульсивных динамических повторных воздействиях

Показатель свойств бетона	Значения коэффициентов к регрессионным уравнениям					
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
α_{Rb}^p	1,0599	0,0283	-0,0333	0,0008	-0,004	-0,0025
$\alpha_{\square b}^p$	1,0499	0,0333	-0,0233	-0,0042	0,0058	-0,0025
α_{Eb}^p	1,1083	0,0267	0,0333	-0,0553	-0,0053	0

В качестве функций y_i уравнения (9) приняты параметры

$$y_1 = \alpha_{Rb}^p; y_2 = \alpha_{Eb}^p; y_3 = \alpha_{\square b}^p, \quad (10)$$

а аргументы $x_1 = \bar{n}_{b(bt)} = (\bar{n}_{b(bt)} - 0,35)/0,2$;

$$x_2 = \bar{n} = (n-15)/5 \quad (11)$$

Сопоставление опытных и теоретических значений параметров $\alpha_{Rb}^p, \alpha_{Eb}^p, \alpha_{\square b}^p$ (рис. 1 и 2) показало их близкую сходимость.

Проверка адекватности предложенных зависимостей показала их пригодность для оценки изменения параметров диаграммы деформирования предварительно нагруженного бетона при импульсных воздействиях. Так, расчетное значение критерия Фишера (0,01...0,09) оказалось значительно меньше теоретического, а коэффициенты множественной корреляции были весьма высокие (0,97...0,99).

Анализ полученных данных показывает, что повышение уровня предварительного обжатия бетона до определенного предела ведет к повышению коэффициента динамического упрочнения бетона (до 13%) в сравнении с аналогичным коэффициентом для необжатого бетона.

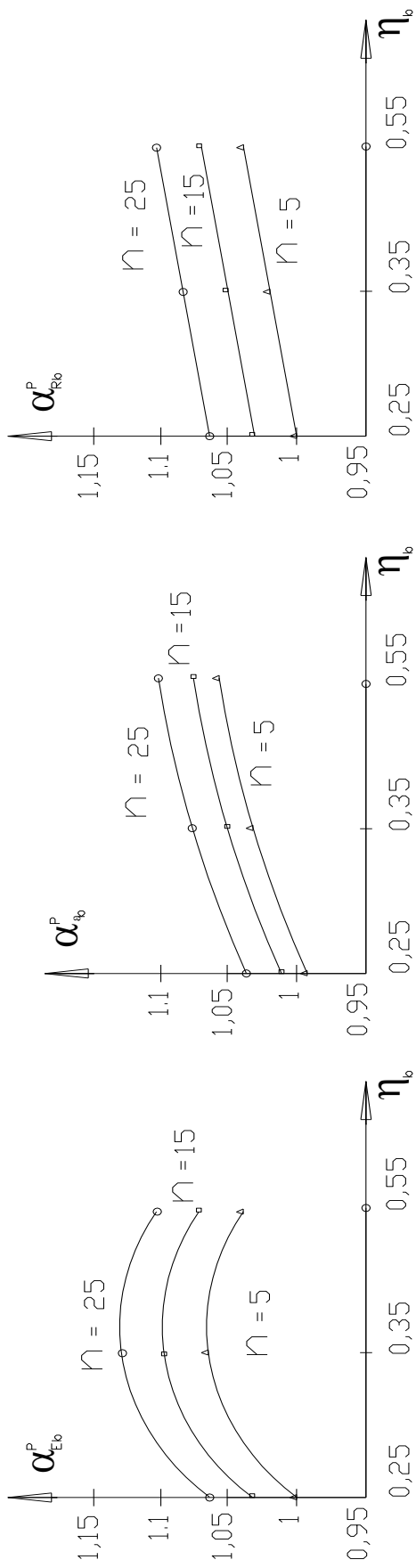


Рис. 1. Влияние уровня предварительного сжатия бетона на изменение параметров диаграмм $\sigma_b - \epsilon_b$ при повторном импульсном нагружении

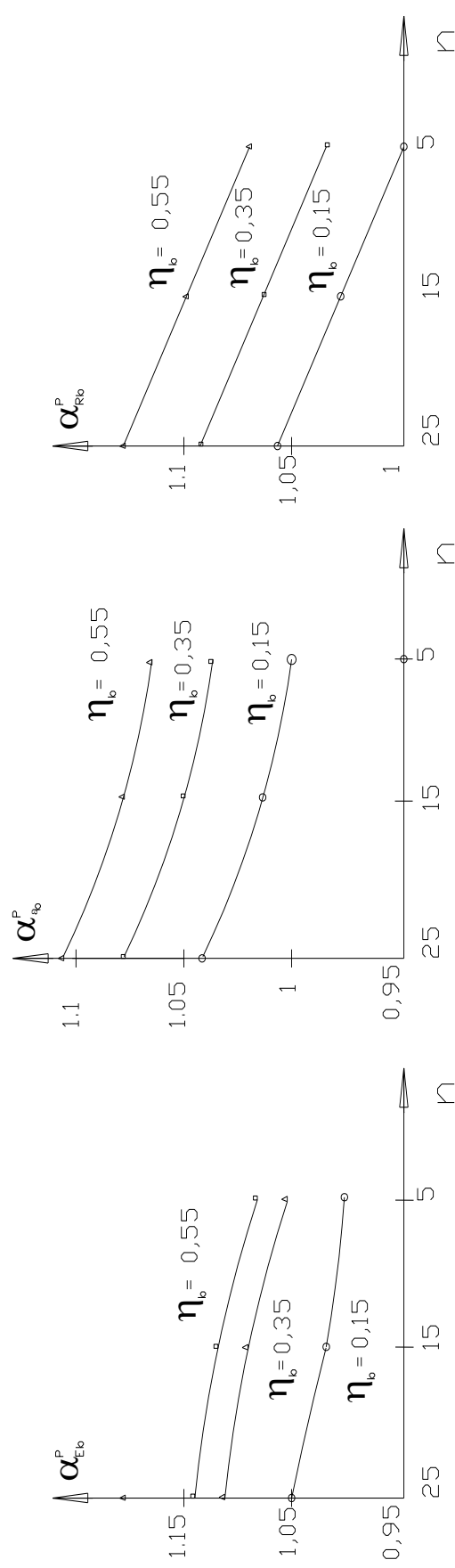


Рис. 2. Влияние количества динамических импульсных воздействий на изменение параметров диаграмм $\sigma_b - \epsilon_b$ при повторном импульсном нагружении

С увеличением количества циклов динамического импульсного нагружения влияние

последнего на коэффициент динамического упрочнения повышается.

Литература:

1. Кургин К.В. Работа керамзитобетонных колонн при повторных нагрузках / К.В. Кургин, Д.Р. Маилян // Инженерный вестник Дона.- 2012.- Янв.
2. Таржиманов М.А. Свойства бетона предварительно напряженных шпунтовых устройств / М.А. Таржиманов, Д.Р. Маилян // Инженерный вестник Дона.- 2011.- Дек.

References:

1. *Kurgin K.V. Operating of ceramzit fibroconcrete columns with repeated loads/ Kurgin K.V., Mailyan D.R.// Engineering Journal of the Don. 2012. January.*
2. *Tarzhimanov M.A. Properties of concrete of prestressed sheet devices/ Tarzhimanov M.A., Mailyan D.R.// Engineering Journal of the Don. 2011. December.*