

Исследования прочности и деформативности тяжелого бетона при раннем нагружении

А.Х. Байбурун

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск

Аннотация: На основе экспериментальных данных получены зависимости, описывающие прочностные и деформативные свойства тяжелого бетона при раннем нагружении в условиях отрицательных температур. Предложены эмпирические коэффициенты для описания меры ползучести бетона через температурную функцию. Подтвержден существенный прирост прочности бетона, твердеющего под нагрузкой при замораживании и оттаивании. Результаты могут быть использованы при назначении параметров раннего нагружения и расчета монолитных зданий в стадии их возведения.

Ключевые слова: монолитные здания, строительные конструкции, тяжелый бетон, прочность, деформация, ползучесть, мера ползучести, раннее нагружение, интенсивность нагружения.

Впервые эксперименты по раннему нагружению бетона были проведены в 1932 году А.В. Саталкиным [1]. Исследования показали, что упрочнение бетона связано с его пластическим деформированием под нагрузкой, которое приводит к структурным изменениям и уплотнению материала. Последующие исследования выявили положительное влияние давления на различных этапах фазового состояния бетона [2–4] при естественном твердении [5–7], зимнем бетонировании [8, 9], автоклавной обработке, прессвакуумировании [4, 5]. Установлено, что при отрицательных температурах раннее нагружение помогает бетону противостоять деструктивному воздействию образующегося льда и приводит к благоприятному изменению соотношения пор в бетоне [8, 9]. Изучались также прочностные и деформативные характеристики бетона и фибробетона в раннем возрасте [10, 11].

Назначение параметров раннего нагружения требует решения комплекса исследовательских задач по изучению механических и реологических свойств тяжелого бетона в раннем возрасте, в том числе при отрицательных температурах. При этом нужно учитывать параметрические

точки микротрещинообразования по О.Я. Бергу и влияние ползучести бетона, исследованное в работах С.В. Александровского, Н.Х. Арутюняна, В.М. Бондаренко, П.И. Васильева, К.З. Галустова, А.А. Гвоздева, К.С. Карапетяна, И.И. Улицкого, Е.Н. Щербакова, А.В. Яшина и др.

Работа бетона в монолитных стенах и колоннах моделировалась центрально и внецентренно сжатыми бетонными призмами. Размеры бетонных призм $100 \times 100 \times 400(300)$ мм и величина эксцентриситета подбирались из условия гибкости $\lambda > 14$ и ограничения минимального значения сжимающих напряжений $\sigma_b > 1,0$ МПа. Размеры образцов и условия их изоляции от высыхания соответствовали немассивным (тонкостенным) конструкциям. Опытные образцы замораживались в камере низких температур КНТ-1М (полезным объемом 16 м^3) до температуры минус $15 \dots 30$ °С и загружались в пружинных установках.

Для условий отрицательных температур $T(t)$ полные деформации бетона в момент времени t равны:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t;T)} - \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau;T)} + C(\tau;t;T) \right] d\tau + \alpha_{bT} T(t), \quad (1)$$

где $\sigma(t)$, $E(t;T)$ – напряжения и модуль деформации бетона; $C(\tau;t;T)$ – мера ползучести тяжелого бетона; α_{bT} – коэффициент линейной температурной деформации бетона.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить значения упругой и пластической составляющих $\varepsilon(t)$ в формуле (1), используемых в расчетах монолитных зданий. Учет ползучести бетона и влияния податливости горизонтальных швов бетонирования и перемычек производится введением временного модуля деформаций:

$$E(t;T) = \frac{K_{lin} E(t_0;T)}{(1 + C(t_0;t;T)E(t_0;T))(1 + \lambda_m(1 + C(t_0;t;T)E(t_0;T) / H_{et}))}, \quad (2)$$

где K_{lin} – коэффициент уменьшения модуля деформаций с учетом фактической жесткости перемычек на каждом этаже до и после образования трещин; λ_m – коэффициент податливости горизонтальных швов бетонирования; H_{et} – высота этажа; $C(t_0; t; T)$ – мера ползучести бетона при отрицательных температурах, определяемая по формулам (4) и (5).

Исследования ползучести бетона показали, что влияние отрицательных температур на деформации ползучести может быть учтено температурной функцией, уменьшающей величину стандартной меры ползучести:

$$K(T) = a \cdot \exp[b(T - 20)], \quad (3)$$

где a, b – опытные коэффициенты; T – температура замораживания, °С.

Среднее значение температурной функции $K(T)$, найденное опытным путем, равно 0,20 и 0,12 соответственно при температуре минус 15 и 30 °С.

Установлено, что кривые продольных деформаций ползучести при замораживании изменяют свою форму на более пологую и могут быть аппроксимированы по формуле

$$C(t_0; t; T) = K(T)C(t_0; t) \left(1 - k_T \cdot e^{-\gamma_T(t-t_0)}\right), \quad (4)$$

где $C(t_0; t)$ – стандартная предельная мера ползучести бетона, загруженного в возрасте t_0 ; k_T, γ_T – коэффициенты при функции нарастания деформаций ползучести во времени, величина которых для условий отрицательных температур устанавливается по формулам:

$$k_T = k[1 - 0,012(T - 20)], \quad (5)$$

$$\gamma_T = \gamma(0,71 + 0,014 \cdot T),$$

где k, γ – значения коэффициентов при испытаниях в нормальных условиях.

Предельная мера ползучести после оттаивания в среднем на 30 % меньше значений, полученных в нормальных условиях: при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности (60 ± 5) %. Это происходит вследствие влияния начального замораживания на процессы деформирования, микро-

трещинообразования и модификации структуры бетона под длительной нагрузкой. При снижении прочности бетона с 60...80 до 20...40 % проектной предельная мера ползучести увеличивается в 1,5...2 раза (при рабочем уровне напряжений 0,30...0,75), что необходимо учитывать при расчете монолитных зданий в стадии возведения.

Рабочие образцы, загруженные уровнем нагрузки 0,30...0,75 от разрушающей при прочности бетона $(0,2...0,8)R_{28}$, на 90...180 сутки показали прирост прочности по сравнению с ненагруженными образцами нормального твердения в среднем на 28 и 22 % и модуля упругости на 19 и 15 % соответственно для случая внецентренного и осевого сжатия. Эти данные были подтверждены результатами ультразвуковых исследований, показавшими увеличение плотности цементного камня.

Установлено, что параметрические точки микротрещинообразования, определенные ультразвуковыми исследованиями и измерением поперечных деформаций, подвижны и смещаются в сторону увеличения с ростом прочности бетона в момент нагружения. Это подтверждается анализом регрессионных уравнений, полученных при реализации плана эксперимента, в котором в качестве факторов варьировались прочность при нагружении R_0 и интенсивность нагрузки η , а откликом служила величина упрочнения после оттаивания и последующего твердения. Для одного из составов бетона:

$$\Delta R = 103,00 + 4,39R_0 - 2,67\eta + 0,50R_0^2.$$

На основании полученных уравнений были определены значения коэффициента допустимой интенсивности нагружения η .

Как известно, температурные деформации и изменения структуры бетона при замерзании зависят от результирующего действия двух групп взаимно противоположных сил – сил смерзания на границах раздела фаз и сил внутреннего давления образующегося льда, нарушающих внутреннюю связь компонентов бетона. Для количественной оценки влияния этих

процессов исследовались деформации и увеличение прочности и модуля упругости бетона, замороженного при достижении им прочности $(0,2...1,0)R_{28}$ до температуры минус $5...25$ °С. По результатам исследований построены следующие регрессионные модели увеличения прочности ΔR и модуля упругости ΔE при замораживании до температуры T :

$$\Delta R = 145,36 - 15,37 \cdot R_0 - 58,11 \cdot T + 19,92 \cdot R_0 T - 73,09 \cdot R_0^2 + 83,06 \cdot T^2,$$

$$\Delta E = 112,83 - 9,75 \cdot R_0 - 30,00 \cdot T + 14,43 \cdot R_0 T - 24,05 \cdot R_0^2 + 37,21 \cdot T^2.$$

По опытным и расчетным данным были построены кривые прироста прочности и модуля упругости бетона для вышеуказанных условий, которые удовлетворительно (с точностью до 15 %) аппроксимируются выражениями:

$$\Delta R(T) = (881 / R_0 - 0,078 R_0) e^{-0,10T},$$

$$\Delta E(T) = (133 / R_0 - 0,017 R_0) e^{-0,15T}.$$

Оценка надежности и достоверности экспериментальных данных показала, что значения коэффициента вариации при измерении деформаций находились в допустимых пределах $4,8...9,4$ %, при этом показатель точности составил $1,7...3,3$ %, что говорит о достаточной надежности экспериментальных данных. Полученные данные о приросте прочности образцов также обладают малой изменчивостью $V < 4,9$ % и надежны $p < 2,3$ %. Построенные математические модели, оцененные по критерию Фишера и отклонению расчетных величин от опытных, адекватно описывают экспериментальные зависимости.

Полученные результаты могут быть использованы при назначении параметров раннего нагружения тяжелого бетона и расчете монолитных и сборно-монолитных зданий в стадии возведения.

Литература

1. Саталкин А.В., Сенченко Б.А. Раннее нагружение бетона и железобетона в мостостроении. М.: Автотрансиздат, 1956. 214 с.
 2. Мурашкин Г.В. К вопросу о роли длительного приложения давления в физико-химических процессах твердения бетона // Железобетонные конструкции. Куйбышев: КГУ, 1984. С. 5-19.
 3. Алабугин А.Н. Технологические особенности возведения монолитных фундаментов в зимних условиях с обеспечением их ускоренного ступенчатого нагружения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Л., 1989. 22 с.
 4. Бурчу В.И. Ползучесть бетона в раннем возрасте при ступенчато-возрастающих напряжениях сжатия и предложения по ее учету при расчете несущих конструкций монолитных и сборно-монолитных конструкций многоэтажных зданий: Дисс. ... канд. техн. наук. Кишинев, 1985. 261 с.
 5. Бурчу В.И. Новая методика исследования свойств бетона, загруженного в раннем возрасте // Бетон и железобетон. 1997. №6. С. 11-14.
 6. Бобров В.В. Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 2015. 128 с.
 7. Яшин А.В. Некоторые данные о деформациях и структурных изменениях бетона при осевом сжатии // Новое о прочности железобетона. М., Стройиздат, 1977. С. 17-30.
 8. Головнев С.Г., Алабугин А.Н., Юнусов Н.В. Раннее нагружение уложенного в зимнее время бетона // Бетон и железобетон. 1985. №12. С. 12-14.
 9. Baiburin A.Kh. Technology of early age concrete loading // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Procedia Engineering 150. 2016. Pp. 2157-2162. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.257.
-

10. Obayes O., Gad E., Pokharel T., Lee J. et al. Evaluation of Concrete Material Properties at Early Age // Civil Engineering. 2020. Vol. 1. Pp. 326-350. doi:10.3390/civileng1030021.

11. Маилян Л.Р., Маилян А.Л., Айвазян Э.С. Расчетная оценка прочностных и деформативных характеристик и диаграмм деформирования фибробетонов с агрегированным распределением волокон // Инженерный вестник Дона. 2013. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1760.

References

1. Satalkin A.V., Senchenko B.A. Ranee nagruzhenie betona i zhelezobetona v mostostroenii [Early loading of concrete and reinforced concrete in bridge construction]. Moskva, 1956. 214 p.

2. Murashkin G.V. K voprosu o roli dlitel'nogo prilozhenija davlenija v fiziko-himicheskikh processah tverdenija betona. Zhelezobetonnye konstrukcii [On the role of long-term pressure application in the physicochemical processes of concrete hardening. Reinforced concrete structures]. Kuibyshev. 1984. Pp. 5-19.

3. Alabugin A.N. Tehnologicheskie osobennosti vozvedenija monolitnyh fundamentov v zimnih uslovijah s obespecheniem ih uskorenogo stupenchatogo nagruzhenija: Avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk [Technological features of the construction of monolithic foundations in winter conditions with the provision of their accelerated step loading]. Leningrad, 1989. 22 p.

4. Burchu V.I. Polzuchest' betona v rannem vozraste pri stupenchatovozrastajushhij naprjazhenijah szhatija i predlozhenija po ee uchetu pri raschete ne-sushhij konstrukcij monolitnyh i sborno-monolitnyh konstrukcij mnogo-jetazhnyh zdaniy: Diss. ... kand. tehn. nauk [Creep of concrete at an early age with stepwise increasing compression stresses and suggestions for its accounting in the calculation of load-bearing structures of monolithic and prefabricated monolithic structures of multi-storey buildings]. Kishinev, 1985. 261 p.

5. Burchu V.I. Beton i zhelezobeton. 1997. №6. Pp. 11-14.

6. Bobrov V.V. Metody ocenki vlijanija razlichnyh faktorov na process mikrorazrushenij betona pod nagruzkoj: Diss. ... kand. tehn. nauk [Methods for assessing the influence of various factors on the process of micro destruction of concrete under load]. Moskva, 2015. 128 p.
7. Jashin A.B. Nekotorye dannye o deformatsijah i strukturnyh izmenenijah betona pri osevom szhatii. Novoe o prochnosti zhelezobetona [Some data on deformations and structural changes of concrete during axial compression]. Moskva, 1977. Pp. 17-30.
8. Golovnev S.G., Alabugin A.N., Junusov N.V. Beton i zhelezobeton. 1985. №12. Pp. 12-14.
9. Baiburin A.Kh. Technology of early age concrete loading. 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Procedia Engineering 150. 2016. Pp. 2157-2162. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.257.
10. Obayes O., Gad E., Pokharel T., Lee J. et al. Evaluation of Concrete Material Properties at Early Age. Civil Engineering. 2020. Vol. 1. Pp. 326-350. doi:10.3390/civileng1030021.
11. Mailjan L.R., Mailjan A.L., Ajvazjan Je.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1760.