

УДК 624.04:539.3

А.А. Чупрынин

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, Харьков

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассмотрены цели и задачи исследований ползучести и длительной прочности, показана их актуальность. Описана методика проведения расчетов, позволяющая определять несущую способность и длительную прочность различных железобетонных конструкций при кратковременном и длительном нагружении. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: ползучесть, длительная прочность, железобетонная конструкция.

Постановка проблемы

Широкое практическое использование бетона и железобетона приводит к многочисленному экспериментальному анализу механического поведения хрупких материалов и большому количеству теоретических моделей. Однако имеющиеся экспериментальные данные, в основном ограничиваются определением основных механических характеристик при одноосном сжатии. Технические проблемы, с которыми сталкиваются при испытании хрупких материалов в условиях сложного напряженного состояния выливаются в довольно ограниченном объеме соответствующих экспериментальных данных на механическое поведение бетона и железобетона.

Модели, которые основаны на классических теориях пластичности, не в состоянии учесть многие особенности деформирования бетона и железобетона [1-2]. Ни теория повреждаемости, ни модели механики упругопластических деформаций не могут адекватно описать поведение бетона при длительном нагружении, и, как следствие, механику его разрушение. Чтобы преодолеть недостатки теорий, основанных на классических теориях пластичности, разработана и проверена модель для анализа железобетонных конструкций, которая подходит для универсальных двух- или трехмерных приложений. Численный пример моделирования долговременного деформирования бетона приведен чтобы продемонстрировать эффективность предложенного в работе подхода.

Для адекватного описания процесса деформирования железобетонных конструкций, необходимо привлечение более общих методов механики деформирования твердого тела и теорий пластичности и ползучести [3-4]. Первые исследования деформирования железобетона в условиях накопления необратимых деформаций при сложноподвижном состоянии рассматривались в работах А.А. Ильюшина [5] и Прандтля [6]. Однако,

как отмечено выше, для исследования ползучести бетона классические теории мало эффективны, так как бетон по-разному сопротивляется растяжению и сжатию, также в нем проявляется деформационная анизотропия. Кроме того, в нем отмечается увеличение объема при трехосном сжатии, которое вызвано нарушением его структуры.

Анализ последних исследований и публикаций

Большинство теорий деформирования и разрушения бетона и железобетона основаны на предположении, что изменение различных областей диаграмм состояний при нагружении бетона соответствует появлению новых особенностей деформирования или изменением прочности материала. На первом этапе до появления микроразрушений рассматривается, как правило, упругая деформация. Деформация ползучести вызвана длительностью воздействия нагрузки, и ее скоростью, при этом не учитывается деформации первого этапа. Для линейной ползучести характерно небольшое искривление диаграммы сжатия бетона. При последующем нагружении проявляется развитие микроразрушений бетона и железобетона и нарушение его целостности.

Проявление нелинейности ползучести можно описать как наложение на деформации ползучести, вызванной разуплотнением структуры компонентов бетона. Затем этот процесс останавливается, и можно наблюдать значительное уменьшение времени распространения импульса при ультразвуковом исследовании, что характеризует процесс упрочнения бетона. Этот процесс связан с увеличением гидратации в камне в тех зонах, где до того наблюдалось нарушение структуры материала. Эти явления первыми в своих работах описали Ю.Н. Хромц и О.Я. Берг [7]. При этом можно наблюдать остановку развития нелинейной ползучести.

Остаточные напряжения, которые развиваются при монотонном увеличении нагрузки и не связаны непосредственно с деформациями ползучести, рассматриваются как пластические деформации 2-го рода. Они соответствуют процессам накопления микроразрушений структуры бетона и железобетона и приводят к ярко выраженной нелинейной ползучести. При этом отмечается существенные нарушения структуры материала, и, следовательно, можно утверждать об остаточных деформациях на этом этапе как о псевдопластических. При этом, можно отметить еще одну важную особенность диаграммы деформирования бетона - на образце, который до этого не нагружался, при первом приложении нагрузки фиксируется значительная остаточная деформация, которая связана с низкими величинами модуля деформаций [8].

Расчет на ползучесть большинства конструктивных материалов основывается на результатах испытаний стандартных образцов на одноосное растяжение. В отличие от стали и сплавов, базовыми испытаниями бетона и железобетона являются опыты на сжатие. При нагружении образца деформация увеличивается до определенной величины, которая возрастает с течением времени. Обычно результаты исследований приводят в виде графиков, представляющих рост деформаций в зависимости от времени воздействия. Такие графики называются кривые ползучести и их строят для определенного материала при различных напряжениях и температурах. В технической теории ползучести устанавливается аналитическая зависимость между определенными параметрами напряженно-деформированного состояния, для этого можно использовать различные связи между переменными.

Среди отличительных особенностей деформирования железобетона и совместного функционирования его компонентов можно выделить анизотропию, необратимость и режимно-наследственную специфику нелинейного деформирования. Модели, которые не учитывают эти факторы, могут приводить к расчетам, в которых качественные оценки не соответствуют опытным данным, а количественные результаты - натурным испытаниям. Одновременно с этим известно, что имеющиеся решения не позволяют применительно к бетону и железобетону количественно удовлетворительно прогнозировать его деформирование. Учитывая это, современные исследования основываются на фундаментальных положениях механики и термодинамики [9]. При этом опытные данные реализуются и в традиционных - интегральных, и в сетевых методах расчета.

Изложение основного материала

Рассмотрим диаграмму кратковременного деформирования бетона [10]. При $t=0$ диаграмма-изохрона представляет собой обычную диаграмму кратковременного деформирования. Приведены ключевые характеристики деформирования: R_b - призмная прочность бетона; R_{bt} - прочность бетона на растяжение; E_b - начальный модуль упругости бетона, который определяется при $\sigma_b=0.3 \cdot R_b$; ϵ_{bR} - относительные деформации при сжатии бетона, соответствующие напряжениям $\sigma_b=R_b$; $\sigma_{bU}=\beta_{bU}R_b$ - напряжения в бетоне в момент его разрушения при сжатии; ϵ_{bU} - предельные относительные деформации сжатия бетона; ϵ_{btU} - предельные относительные деформации растяжения.

В тех случаях, когда состав бетона и характеристики исходных материалов известны, ожидаемые среднеопытные значения с точностью более 90%, можно определить следующим образом:

$$R_b[\text{МПа}] = 28.384 + 6.861 \cdot \text{Ц} - 1.706 \cdot \text{В} + 4.189 \cdot R_{\text{ц}} + 1.983 \cdot \text{П} \cdot \text{Ш} + 3.083 \cdot \text{Ц}^2 - 2.58 \cdot \text{В}^2 - 8.13 \cdot R_{\text{ц}}^2 + 1.075 \cdot \text{Ц} \cdot R_{\text{ц}} + 1.405 \cdot R_{\text{ц}} \cdot \text{П} \cdot \text{Ш};$$

$$E_b[\text{МПа}] = 32580 + 4069.44 \cdot \text{Ц} - 2286.11 \cdot \text{В} + 883.3 \cdot M_{\text{кр}} - 2279.44 \cdot R_{\text{ц}} + 1227.78 \cdot \text{П} \cdot \text{Ш} - 1813.88 \cdot R_{\text{ц}}^2 - 1043.12 \cdot \text{Ц} \cdot M_{\text{кр}} + 954.37 \cdot \text{В} \cdot R_{\text{ц}} + 594.37 \cdot \text{В} \cdot \text{П} \cdot \text{Ш} + 610.62 \cdot M_{\text{кр}} \cdot R_{\text{ц}} + 782.62 \cdot R_{\text{ц}} \cdot \text{П} \cdot \text{Ш};$$

$$\epsilon_{bx} \cdot 10^5 = 179.528 + 2.167 \cdot \text{Ц} + 4.167 \cdot \text{В} + M_{\text{кр}} - 4.389 R_{\text{ц}} - 1.5 \cdot \text{П} \cdot \text{Ш} + 4.774 \text{Ц}^2 - 12.226 \text{В}^2 + 8.274 M_{\text{кр}}^2 - 6.226 \cdot R_{\text{ц}}^2 - 8.226 \cdot (\text{П} \cdot \text{Ш})^2 + 4.125 \text{Ц} \cdot M_{\text{кр}} + 4.75 \cdot \text{В} \cdot M_{\text{кр}} - 2.625 \cdot R_{\text{ц}} \cdot (\text{П} \cdot \text{Ш});$$

$$\epsilon_{bt} = 414.601 - 57.722 \cdot \text{Ц} + 32.278 \cdot \text{В} - 33.722 \cdot M_{\text{кр}} - 69.056 \text{Ц} - 25.667 \text{П} \cdot \text{Ш} - 94.603 \cdot \text{Ц}^2 + 70.397 \cdot M_{\text{кр}}^2 + 63.397 \cdot R_{\text{ц}}^2 - 40.103 \cdot (\text{П} \cdot \text{Ш})^2 - 7.437 \cdot \text{Ц} \cdot \text{В} + 15.812 \text{Ц} \cdot M_{\text{кр}} - 24.06 \cdot R_{\text{ц}} + 10.562 \cdot \text{Ц} \cdot (\text{П} \cdot \text{Ш}) + 22.187 \cdot \text{В} \cdot M_{\text{кр}} + 8.062 \cdot \text{В} \cdot R_{\text{ц}} - 26.187 \cdot R_{\text{ц}} \cdot (\text{П} \cdot \text{Ш});$$

$$\beta = 0.48321 + 0.10356 \cdot \text{Ц} + 0.02394 \cdot M_{\text{кр}} + 0.08406 \cdot R_{\text{ц}} + 0.05106 \cdot \text{П} \cdot \text{Ш} + 0.24636 \cdot \text{Ц}^2 - 0.13814 \cdot M_{\text{кр}}^2 - 0.03188 \text{Ц} \cdot M_{\text{кр}} + 0.06412 \text{Ц} \cdot R_{\text{ц}} - 0.0255 \cdot \text{Ц} \cdot (\text{П} \cdot \text{Ш});$$

$$R_{bt} = 0.65 \sqrt[3]{R_b^2}.$$

В этих формулах значения всех параметров вычисляются следующим образом:

$$\text{П} = \frac{\text{П}^{\text{факт}} - \text{П}^0}{\Delta \text{П}},$$

где $\text{П}^{\text{факт}}$ - фактическое значение параметра; П^0 - значение параметра на нулевом уровне; $\Delta \text{П}$ - интервал варьирования. Значения параметров на нулевом уровне и интервалов варьирования приведены в [10].

Значение R_b и E_b , вычисленные по приведенным зависимостям, могут быть уточнены по результатам стандартных испытаний. Если при этом разница в вычисленных и полученных опытным путем значениях R_b и E_b не превышает $\pm 5\%$, остальные параметры применяются без изменения. Продольная растяжимость бетона устанавливается непосредственно по опытным данным. При отсутствии таких данных допускается

принимать: $\varepsilon_{btu} = 2 \frac{R_{bt}}{E_b}$. При отсутствии

необходимых данных о составе бетонной смеси, средне опытные значения параметров диаграммы « σ - ε » бетона принимаются в зависимости от его прочности на сжатие R_b , что определяет параметры диаграммы [10]. Для промежуточных значений R_b параметры диаграммы могут быть определены по линейной интерполяции. Нормативные значения параметров диаграммы « σ - ε » и их расчетные значения для предельных состояний второй группы принимаются в зависимости от класса бетона на прочность сжатию [10].

В произвольный момент времени деформации в бетоне можно описать зависимостью вида [5-6]:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} \left(1 + C_0^*(t, \tau) \right), \quad (1)$$

где t – момент времени, в который определяется деформация; τ – момент времени, в который была приложена нагрузка; $C_0^*(t, \tau)$ – мера ползучести, которая является деформацией ползучести в момент времени t от действия единичного напряжения, приложенного в момент времени τ .

Меру ползучести можно определить следующим соотношением:

$$C_0^*(t, \tau) = \xi \cdot \theta(\tau) \cdot \left(1 - e^{-\phi(t-\tau)} \right), \quad (2)$$

где $\xi = \left[1.3 - 0.79 \cdot e^{-0.404 m_0} \right] \cdot \left[1.27 - 0.01334 \cdot (\Phi - 40) \right] \cdot \left[1 + 0.0482 \cdot e^{(T-20)} \right]^{-1}$ параметр, который описывает условный возраст бетона (m_0 – часть конструкции (в %), которая контактирует с воздухом, Φ – относительная влажность воздуха, T – средняя температура эксплуатации);

$\theta(\tau) = A_1/\tau + C_0$ – функция, характеризующая процесс старения бетона ($A_1 = 0.7$ сут., $C_0 = 0.5$ – постоянные, определяемые из опыта [9, 11-12]);

$\phi \left[\text{сут}^{-1} \right]$ – коэффициент, позволяющий в явном виде выделить время в уравнениях состояния, и который для бетонов различных классов равен: В10 – 2.423, В15 – 2.346, В20 – 2.323, В25 – 2.306, В30 –

2.302, В35 – 2.299, В40 – 2.297, В45 – 2.296, В50 – 2.295.

Предложенные здесь функции построены из условия минимизации количества аппроксимирующих констант, которые определяются из базовых стандартных экспериментов.

Выражения (1)-(2) можно преобразовать согласно инкрементальной теории Качанова-Работнова с учетом накопленной повреждаемости, что для одноосного напряженного состояния будет выглядеть:

$$\dot{\sigma} = B \frac{(\sigma)^n}{(1-\omega)^k}; \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{(\sigma)^r}{(1-\omega)^l}, \quad (4)$$

при $\omega(0) = 0$, $\omega(t_*) = \omega_*$, где $c(t)$ – необратимые деформации ползучести;

$\alpha(t)$ – параметр поврежденности;

ω_* – значение параметра повреждения в момент окончания скрытого процесса накопления повреждений t_* ;

B, D, n, k, r, l – константы, описывающие поведение изотропного материала при длительном нагружении, определяются путем численного эксперимента при обработке кривых ползучести, полученных и соотношений (1-2).

При сложном напряженном состоянии в расчетах используется зависимость, полученная на основании гипотезы о несжимаемости материала при ползучести и предположения, что направления главных нормальных напряжений и главных линейных деформаций совпадают:

$$\varepsilon_1 = \frac{3\varepsilon_i}{2\sigma_i} (\sigma_1 - \sigma_0); \varepsilon_2 = \frac{3\varepsilon_i}{2\sigma_i} (\sigma_2 - \sigma_0); \gamma = \frac{3\varepsilon_i}{2\sigma_i} \tau, \quad (5)$$

где σ_0 – гидростатическое давление;

σ_i, ε_i – интенсивность напряжений и деформаций соответственно.

Пример расчета

Приведенные зависимости использованы при исследовании деформирования железобетонной плиты перекрытия размером 6х6 м, толщиной 0.2 м, опертой на четыре угловые колонны сечения 0.4х0.4 м. Материал плиты – армированный бетон класса В25. Суммарная равномерно распределенная нагрузка принята $q=1 \text{ т/м}^2$ (собственный вес плиты и нагрузка на нее).

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния пластины основано на методе конечных элементов.

Решение геометрически и физически нелинейных задач сводятся к линеаризации исходных уравнений - рекуррентной последовательности линейных задач [8]. Расчеты проводились согласно предложенной модели

напряженно-деформированного состояния при длительном нагружении железобетонных изделий (3-5).

На рис. 1-2 показаны поля перемещений в начальный момент времени и через 10 лет эксплуатации, из которых можно отследить увеличение прогибов на 23%.

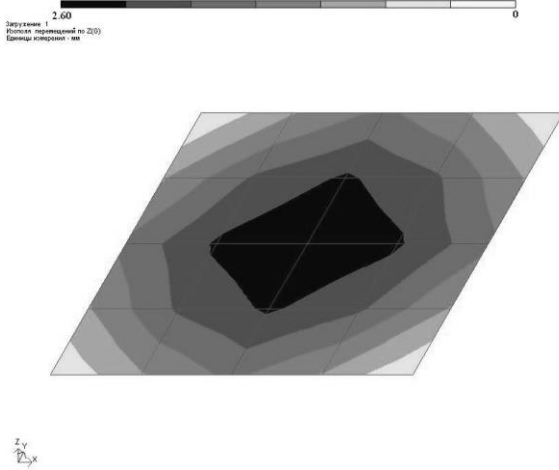


Рис. 1. Прогиб в исследуемой плите при t=0

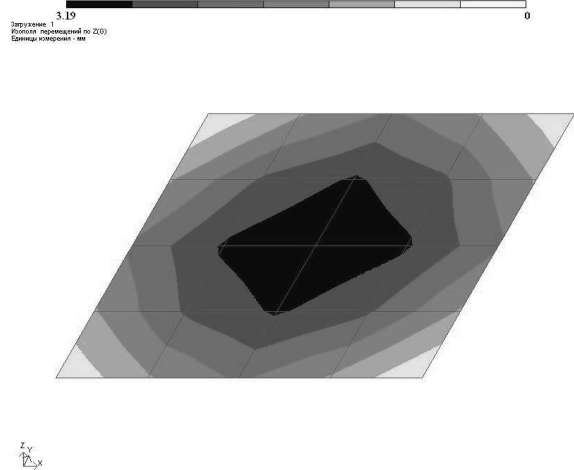


Рис. 2. Прогиб в исследуемой плите при t=10 лет

Выводы

Построенная теоретическая модель длительного деформирования железобетонных элементов конструкций позволяет проводить анализ для различных марок бетона и разнообразных условий эксплуатации конструкций. Что в итоге позволяет проводить адекватный анализ надежности и долговечности железобетонных конструкций.

Литература

1. Xinhua Xue and Xingguo Yang. A damage model for concrete. *International Journal of Damage Mechanics* 2014, Vol. 23(2) 155-177.
2. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона / Ахвердов И.Н. - М.: Стройиздат, 1981. - 464 с.
3. Babut R (1983) Load capacity and deformability of structures subjected to bending made of concrete with dispersed steel Fibers (in Polish). In: *Mechanics of concrete-like composites*. Ossolineum, Wroclaw, pp 71-145.
4. Basista M (1993) On micromechanical modeling of deformation of compact rock in compression. *Eng Transactions* 41: 395-417.
5. Ильюшин А.А. Пластичность / Ильюшин А.А. - М.: АнСССР, 1963. - 424 с.
6. Prandtl L. (1924). *Spannungsverteilung in Plastischen Korpern // Proc. of 1 st Int. Congr. of Appl. Mech.* P. 43-54.
7. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / Берг О.Я. - М.: Госстройиздат, 1961. - 96 с.
8. Брєславський Д.В. Ползучість железобетонних елементів конструкцій / Д.В. Брєславський, А.А. Чупрынин, Н.В. Серєда // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Динаміка і міцність машин. - Харків: НТУ «ХПІ», 2015. - № 55 (1164). - С. 22-25.

9. В.С. Шмуклер, А.А. Чупрынин, Рамин Аббаси Хафиджани. Новый метод натуральных испытаний // *Бетон и железобетон в Украине*. - 2010. - №5. - С. 13-24.
10. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона. НИИСК Госстроя СССР. Киев, 1987. - 25 с.
11. Васильев П.И. Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учетом влияния времени / Васильев П.И. // *Изв. ВНИИГиоротехники*. - 1951. - №45. - С. 78-92.
12. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейной механике железобетона / Клованич С.Ф. - Запорожье: ИПО Запорожье, 2009. - 400 с.

References

1. Xinhua Xue and Xingguo Yang. A damage model for concrete. *International Journal of Damage Mechanics* 2014, Vol. 23(2) 155-177.
2. Ahveradov I.N. (1981). *Fundamentals of physics concrete*. Moscow, Russia: Stroyizdat, 464.
3. Babut R (1983) Load capacity and deformability of structures subjected to bending made of concrete with dispersed steel Fibers (in Polish). In: *Mechanics of concrete-like composites*. Ossolineum, Wroclaw, pp 71-145.
4. Basista M (1993) On micromechanical modeling of deformation of compact rock in compression. *Eng Transactions* 41: 395-417.
5. Ilyushin A.A. (1963). *Plasticity*. Moscow, Russia: AnUSSR, 424.
6. Prandtl L. (1924). *Spannungsverteilung in Plastischen Korpern // Proc. of 1 st Int. Congr. of Appl. Mech.* P. 43-54.
7. Berg O.Y. (1961). *Physical foundations of the strength theory of concrete and reinforced concrete / Берг О.Я.* - М.: Госстройиздат, 1961. - 96 с.
8. Breslavsky D., Chuprynin A. & Sereda. N. (2015). The creep of reinforced concrete structural elements // *Bulletin of*

NTU "KHPI". Series: Dynamics and strength of machines

Kharkiv, Ukraine:55(1154), 22-25.

9. Shmukler, V.S., Chuprynin, A.A. & Abbasi, R.H. (2010).

New method of full-scale tests. Concrete and reinforced concrete in Ukraine: 5, 13-24.

10. Methodical recommendations on the updated calculation of reinforced concrete elements taking into account the full chart of the compression concrete (1987). Scientific-investigational center of Gosstroy of the USSR, Kiev, 25.

11. Vasilev, P.I. (1951). The relationship between stresses and strains in the concrete in compression taking into account the influence of time. Proceedings VNII Of Hydraulic Engineering, , Moscow, Russia: 45, 78-92.

12. Klovanih, S.F. (2009). Finite element method in nonlinear mechanics of reinforced concrete. Ukraine, Zaporozhye: IPO Zaporozhye, 400.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.В. Бреславский, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

Автор: ЧУПРЬНИН Александр Алексеевич Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова, Харьков, кандидат технических наук, доцент.
E-mail – sasha.chupr@gmail.com

ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

О.О. Чупринін

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків

У статті розглянуто мета та завдання досліджень повзучості і тривалої міцності, показана їх актуальність. Описана методика проведення розрахунків, що дозволяє визначати несучу здатність і тривалу міцність різноманітних залізобетонних конструкцій при короточасному та довготривалому навантаженні. Наведено приклад розрахунку.

Ключові слова: повзучість, тривала міцність, залізобетонна конструкція.

THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS

A. Chuprynin

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov

The paper is devoted to the simulation of nonlinear creep of concrete structural elements by different actions. High priority of the research theme is justified, the aim and goals are formulated. The mathematical problem statement of creep of concrete structural elements is presented. The creep problems of thin-walled structural members, which are deformities under the action of different actions varying load were solved by use of developed software. Presents a calculation example of thin slabs on creep. The conclusions about the adequacy of the analysis of the reliability and durability of reinforced concrete structures.

Keywords: creep, long-term strength, reinforced construction.