УДК 624.04:539.3

А.А. Чупрынин, Н.В. Середа

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

ПОЛЗУЧЕСТЬ И 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 железобетонной цилиндрической панели. Дана рекомендация по рациональному очертанию конструкции.

Ключевые слова: *ползучесть, длительная прочность, железобетонная конструкция, цилиндрическая панель, метод конечных элементов.*

Постановка проблемы

Широкое практическое использование бетона и железобетона в строительстве приводит к многочисленным теоретическим моделям. При этом имеющиеся экспериментальные данные, как правило, ограничиваются определением механических характеристик материала при одноосном сжатии.

Бетон, который используется в строительстве, состоит из заполнителей, цемента и воды. Хрупкое разрушение бетона существенно зависит от характера нагрузки. Так предел упругости и разрушающая сила составляет не менее, чем в 12 раз больше на сжатие, чем на растяжение. Что обуславливает использование бетона в основном на сжатие. Нагрузка, порядка предела упругости, вызывает рост микротрещин в связи между цементной пастой и большими элементами наполнителя. При распространении это приводит к росту остаточных деформаций в сочетании с упругими. На этом завершается процесс скрытого разрушения [1].

Модели, которые основаны на классических теориях пластичности, не в состоянии учесть многие особенности деформирования бетона и железобетона [2-3]. Для адекватного описания процесса ползучести бетонных и железобетонных конструкций, необходимо привлечение более общих методов механики деформирования твердого тела, многоосного нагружения, теорий пластичности и ползучести [4-6]. Чтобы преодолеть недостатки таких теоретических моделей, разработана и верифицирована модель для анализа тонкостенных конструкций, построенная с учетом основных положений термодинамики (законах сохранения, к которым относятся уравнения сохранения массы, количества движения, и энергии) [1].

Пример численного моделирования ползучести железобетонных элементов приведен для иллюстрации эффективности предложенной модели.

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 ультазвуковом исследовании, что характеризует процесс упрочнения бетона. Что связанно 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.

Моделирование образования и распространения трещины является одним из наиболее важных аспектов в анализе повреждений бетонных и железобетонных конструкций. Процесс разрушения в бетоне отличается от разрушения других конструкционных материалов, таких как металлы и сплавы, в том, что он не является внезапным возникновением новых свободных поверхностей, но непрерывное формирование, развитие и объединение микротрещин. Образование микротрещин можно макроскопически представить, как смягчающее поведение материала, которое приводит к локализации и перераспределения напряжений в структуре. Это феноменологическое поведение на макроскопическом уровне может быть смоделировано с помощью классической пластичности.

Несмотря на значительный успех многих из этих моделей пластичности, существенным его недостатком является, то, что такие модели не рассматривают деградацию жесткости материала из-за микротрещин. Это приводит к необходимости рассмотрения модели механики повреждения, где деградация жесткости может быть смоделирована путем использования концепции эффективных напряжений [2], которая основывается на работах Качанова [8] и Работнова [9], которые рассматривали длительную прочность материалов при одноосном нагружении.

Использование модели механики повреждения в бетоне началось в 1980-х годах. Модели повреждения были использованы для описания поведение бетона, в которых учитываются нарушение сплошности. С тех пор исследователи разрабатывали различные модели повреждений, однако, конкретный материал тоже испытывает необратимые деформации при разгрузке. Такие, при которых теории разрушения не могут быть использованы самостоятельно.

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 [10]. При этом опытные данные реализуется и в традиционных - интегральных, и в сетевых методах расчета.

Формулировка цели статьи

С учетом вышеизложенного подходящим подходом можно считать сочетание пластической модели с механикой разрушения, чтобы имитировать поведение бетона согласно его характеристикам, включая не только неупругие деформации, но и деградацию его жесткости. В интегральном подходе, сочетающем пластическую модель с механикой разрушения, деградация жесткость заложена в пластичности модели. Преимущество этой модели заключается в том, что деградация жесткости естественным путем сочетается с соотношениями, которые могут быть отделены от пластической деформации путем линеаризации уравнений состояния.

Функция повреждаемости, используемая в большинстве исследований длительной прочности бетона, была получена в результате обработки кривых при одноосном напряженно–деформированном состоянии. В основном в этих работах рассматриваются скалярное представление повреждения. Однако некоторые из них, используют тензор второго ранга для описания переменной повреждений. При рассмотрении бетонных конструкций, в частности тонкостенных – пластин и оболочек, а также пространственных структур, надо иметь в виду, что они обычно работают при многоосном напряженно-деформированном состоянии с воздействием гидростатического давления.

Изложение основного материала

Исходя из того, что метод конечных элементов относится к прямым вариационным методам решения краевых задач математической физики, при рассмотрении задачи ползучести такой подход требует формулировки специального вариационного принципа. Вариационное равенство, следующее из этого принципа может быть преобразовано в вариационное равенство типа Лагранжа для функционала заданного на скоростях перемещений и включающего скорости дополнительных напряжений. При этом в произвольный момент времени дополнительные скорости деформаций принимают известными, то есть их вариации равны нулю. С учетом этого решением вариационного равенства оказываются функции скоростей перемещений точек тела в рассматриваемый момент времени, а также соответствующие принятым скоростям дополнительные диссипативные напряжения. Используя методику подсчета скорости дополнительных диссипативных напряжений на каждом шаге времени и способ решения вариационного равенства определяют на шаге времени скорости перемещений. Для восстановления непосредственно перемещений необходимо дополнительно воспользоваться одним из методов интегрирования найденных скоростей перемещений по времени, согласовано с уравнениями состояния.

Таким образом, полученная система уравнений [11] должна решаться совместно с уравнениями состояния [12], к которым необходимо добавить граничные условия на всей поверхности тела. Кроме того, при решении начальной задачи, к которой относится моделирование ползучести, необходимо сформулировать и начальные условия. При этом можно считать, что в момент времени $t = 0$ напряженно-деформированное состояние определяется решением задачи теории упругости.

В произвольный момент времени деформации в бетоне можно описать зависимостью вида [13-14]:

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

где t – момент времени, в который определяется деформация; $\sigma(t)$ - текущая величина напряжений; $E(t)$ - мгновенная величина модуля упругости; 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:

$$\begin{gathered} C_0^*(t,\tau) = \xi \cdot \theta(\tau) \cdot \left(1 - e^{-\phi(t-\tau)}\right), \\ \xi = \left[1.3 - 0.79 \cdot e^{-0.404 m_0}\right] \cdot \\ \cdot \left[1.27 - 0.01334 \cdot (\Phi - 40)\right] \cdot \left[1 + 0.0482 \cdot e^{(T-20)}\right], \end{gathered} \qquad (2)$$

где ξ - 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 [10,12]); ϕ - коэффициент, позволяющий в явном виде выделить время в уравнениях состояния, и который для бетона класса В 40 равен $2.297\ \left[\text{сут}^{-1}\right]$.

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

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

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

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

где $c(t)$ - необратимые деформации ползучести; $\omega(t)$ - параметр поврежденности, который в начальный момент времени (t=0) нулевой ($\omega(0) = 0$), а в момент окончания процесса скрытого накопления повреждений ($t=t_*$), равен ω_* ($\omega(t_*) = \omega_*$); B, D, n, k, r, l – константы, описывающие поведение изотропного материала при длительном нагружении, определяются путем численного эксперимента при обработке кривых ползучести, полученных из 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:

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

где σ_0 - гидростатическое давление; σ_i, ε_i - интенсивности напряжений и деформаций соответственно.

Пример расчета

Рассмотрим особенности применения цилиндрических оболочек как элементов строительных конструкций. В качестве примера рассмотрено напряженное состояние железобетонной цилиндрической панели, которая является открытой оболочкой, деформирующейся под действием собственного веса. В расчетах варьировалась высота подъема f.

На рис. 1 приведена рассматриваемая цилиндрическая панель, с разбиением на конечные элементы – 20 по длине и 20 по окружности. Расчеты были проведены в соответствии с приведенной выше моделью необратимого деформирования с повреждаемостью, реализованной в конечноєлементной постановке [15].

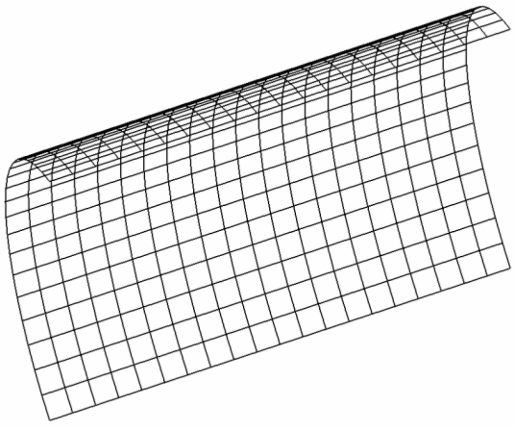

Рис. 1. Конечноэлементная модель панели

Для такой панели радиус кривизны в окружном направлении равен:

$$R = \frac{f}{2} + \frac{b^2}{8f}, \qquad (6)$$

где f - стрела подъема, b - размер в плане в поперечном направлении. Это соответствует углу раскрытия панели, который определяется по формуле:

$$\alpha = 2\arccos\left(1 - \frac{f}{R}\right). \qquad (7)$$

Рассмотрим цилиндрическую панель, квадратную в плане с размерами 10x10 м (ℓ=10 м и b=10 м), и стандартной толщиной h=50 см (1/20 от размеров в плоскости), выполненную из армированного бетона B 40. Механические характеристики бетона: модуль упругости $E=3.6\cdot10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\upsilon=0.16$, массовая плотность $\rho=1.9\cdot10^3$ кг/м^3. Панель жестко защемлена по опертым краям и свободна от закрепления на торцах. Рассмотрим ее нагружение собственным весом.

В табл. 1 приведено начальное значение максимальной интенсивности напряжений σ_i в панели в зависимости от относительной стрелы подъёма $\hat{f}$. С течением времени их величине не существенно уменьшается.

Установлено, что наименьшая интенсивность напряжений в начальный момент времени будет в панели, приведенная высота которой равняется $\hat{f}=0.276$ ($\hat{f}=f/b$). Это соответствует наименьшему значению накопленной повреждаемости за рассмотренный период эксплуатации (100 лет). Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод, что тонкостенное покрытие рационально конструировать в виде выпуклой пологой оболочки, в которой стрела подъема значительно меньше размеров пролета.

Ввиду пологости оболочки изгибающие моменты в ней появляются лишь в той области оболочки, которая контактирует с опорами. Большая же часть площади оболочки обычно подвергается лишь действию продольных сжимающих усилий, и их величине не существенно зависит от геометрии панели. В углах оболочки сдвигающие силы достигают наибольших значений, что вызывает появление в этих местах значительных главных растягивающих напряжений. Для восприятия этих напряжений угловые зоны оболочек больших пролетов целесообразно армировать диагональной напрягаемой арматурой.

Таблица 1

Интенсивность напряжений в зависимости от стрелы подъёма

$\hat{f}$	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
σ_i, МПа	4.950	4.294	4.127	4.063	3.876	3.435	3.455	3.789	4.078

Выводы

Построенная теоретическая модель ползучести тонкостенных элементов с учетом повреждаемости позволяет проводить анализ для различных марок бетона и разнообразных условий эксплуатации железобетонных конструкций. Это дает возможность проводить адекватный анализ надежности и долговечности строительных конструкций, выбирать рациональное очертание железобетонных элементов.

Литература

1. *Lemaitre, J. & Chaboche, J.-L. (2000). Mechanics of solid materials. Cambridge University Press, 556.*
2. *Xinhua, X. & Xingguo, Y. (2014). A damage model for concrete. International Journal of Damage Mechanics 2014, Vol. 23(2), 155–177.*
3. *Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона [Текст] / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.*
4. *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, 71-145.*
5. *Basista, M. (1993). On micromechanical modeling of deformation of compact rock in compression. Eng Transactions 41, 395-417.*
6. *Shpachuk, V. P. (2016). Effect of mutually amplifying action two coordinate shock loading in problems of dynamics of knots of machines. Scientific Bulletin of National Mining University. Scientific and technical journal. No.6 (156), 89-94.*
7. *Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона [Текст] / О. Я. Берг. - М. : Госстройиздат, 1961. – 96 с.*
8. *Качанов, Л. М. Теория ползучести [Текст] / Л. М. Качанов. - М.: Физматгиз, 1960. - 455 с.*
9. *Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю. Н. Работнов. - М. : Наука, 1966. - 752 с.*
10. *Шмуклер, В. С. Новый метод натурных испытаний [Текст] / В. С. Шмуклер А. А. Чупрынин, Рамин Аббаси Хафшджани. // Бетон и железобетон в Украине. – 2010. - №5. – С. 13-24.*
11. *Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] : пер. с англ. - М. : Мир, 1975. – 238 с.*
12. *Чупрынин, А. А. Долговечность железобетонных элементов конструкций [Текст] / А.А. Чупрынин // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – № 128. – С. 5-9.*
13. *Ильюшин, А. А. Пластичность [Текст] / А. А. Ильюшин - М. : АнСССР, 1963. - 424 с.*
14. *Prandtl, L. (1924). Spannungsverteilung in Plastichen Korpern. Proc. of 1 st Int. Congr. of Appl. Mech., 43-54.*

15. А. с. 64661 від 24.03.2016 Україна, Комп'ютерна програма "Shell Creep Calculations ("SCC v 4.8")" [Текст]. / Бреславський Д. В., Морачковський О. К., Татарінова О. А., Чупринін О. О., Золотько Є. В.; заявл. 02.02.16 № 65156. – 2 с.

References

1. Lemaitre, J. & Chaboche, J.-L. (2000). Mechanics of solid materials. Cambridge University Press, 556 p.
2. Xinhua, X. & Xingguo, Y. (2014). A damage model for concrete. International Journal of Damage Mechanics 2014, Vol. 23(2), 155–177.
3. Ahveradov, I. N. (1981). Fundamentals of physics concrete. Moscow, Russia: Stroyizdat, 464.
4. 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, 71-145.
5. Basista, M. (1993). On micromechanical modeling of deformation of compact rock in compression. Eng Transactions 41, 395-417.
6. Shpachuk, V. P. (2016). Effect of mutually amplifying action two coordinate shock loading in problems of dynamics of knots of machines. Scientific Bulletin of National Mining University. Scientific and technical journal. No.6 (156), 89-94.
7. Berg, O.Y. (1961). Physical foundations of the strength theory of concrete and reinforced concrete. Moscow, Russia: Gosstroyizdat, 96.
8. Kachanov, L. M. (1960). The theory of creep. Moscow, Russia: Phizmatgiz, 455.
9. Rabotnov, Y. N. (1966). The creep of structural elements. Moscow, Russia: Science, 752.
10. 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.
11. Zenkevitch, O. (1975). Finite element method in engineering. Moscow, Russia: Mir, 238.
12. Chuprynin, A. (2016).The durability of reinforced concrete structural elements / Utilities cities. Series: Technical Sciences and architecture. Kharkiv, Ukraine:128, 5-9.
13. Ilyushin, A. A. (1963). Plasticity. Moscow, Russia: AnUSSR, 424
14. Prandtl, L. (1924). Spannungsverteilung in Plastichen Korpern. Proc. of 1 st Int. Congr. of Appl. Mech., 43-54.
15. The certificate of registration of copyright in a work № 64661. A computer program "Shell Creep Calculations ("SCC v 4.8")"(2016). Breslavsky D., Morachkovski O., Tatarinova O., Chuprynin A., Zolotko Ye., Ukraine, 2.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Шпачук, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова, Харьков.

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

Автор: СЕРЕДА Наталья Васильевна
Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.М. Бекетова, Харьков, кандидат технических наук, доцент.
E-mail – natalisereda@mail.ru

ПОВЗУЧІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

О.О. Чупринін, Н.В. Середа
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Україна

У статті розглянуто мету 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 короткочасному та довготривалому навантаженні. Наведено приклад розрахунку залізобетонної циліндричної панелі. Дана рекомендація щодо раціонального обрису конструкції.

***Ключові слова**: повзучість, тривала міцність, залізобетонна конструкція, циліндрична панель, метод скінчених елементів.*

THE CREEP AND DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS

A. Chuprynin, N. Sereda
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkov, Ukraine

One of the basic problems, which is solved on the stage design of elements of building structures design, is the analysis of stress-strain state as well as determining of lifetime. 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 reinforced concrete cylindrical panels. The recommendation for the rational shape design. The conclusions about the adequacy of the analysis of the reliability and durability of reinforced concrete structures.

***Keywords:** creep, long-term strength, reinforced construction, cylindrical panel, finite element method.*