

О НЕКОТОРЫХ ПУТЯХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАСЧЕТОВ ПОЛЗУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ

Рассматриваются состояние и направления совершенствования расчетов железобетонных мостов с учетом длительных процессов. Определяются основные предпосылки построения нелинейной теории ползучести бетона с учетом сложной истории нагружения и трещинообразования.

Совершенствование методов расчета мостовых железобетонных конструкций является одной из актуальных задач современного мостостроения, решение которой позволяет находить более эффективные проектные решения, снижать материалоемкость сооружений при повышении их долговечности, точнее устанавливать причины обнаруженных неисправностей эксплуатируемых конструкций.

Одним из направлений в рамках решения указанной задачи является совершенствование методов учета ползучести бетона. В настоящее время в инженерной практике проектирования мостовых конструкций применяются зависимости, полученные на базе одной из линейных теорий ползучести — наследственной теории старения [1].

Как и все линейные теории ползучести, теория старения в качестве основных гипотез предполагает следующее:

- а) бетон является изотропным материалом;
- б) между полными деформациями и напряжениями существует линейная зависимость;
- в) для деформаций ползучести справедлив закон наложения, т.е. суммарная деформация ползучести при переменном нагружении является суммой отдельных деформаций ползучести при соответствующих напряжениях;
- г) деформации ползучести не зависят от знака напряжения, т.е. мера ползучести принимается одинаковой при растяжении и сжатии;
- д) предполагается параллельность кривых деформаций ползучести, нагруженных в разном возрасте.

Естественно, сделанные допущения приемлемы не полностью. В частности, основное ограничение применимости линейных теорий ползучести — нагрузки, оказывающие влияние на ползучесть материала. Они не должны вызывать в бетоне напряжения больше $0,3-0,5R_b$ (R_b — прочность бетона на сжатие). До указанного уровня напряжений деформации ползучести связываются в основном с перемещениями воды в порах геля и деформациями кристаллического сростка. При этом предполагается, что нарушения структуры материала не происходит, деформации ползучести, вызванные силовым воздействием, считаются обратимыми и пропорциональными действующим напряжениям. Однако известно, что граница области линейного деформирования является достаточно условной и зависит от многих факторов (состава бетона, величины армирования и т.д.) [2]. Поэтому физическая нелинейность бетона может проявляться и при достаточно малых уровнях нагружения.

К нелинейному деформированию при малых длительных нагрузках может также привести и возникновение макротрещин в конструкции. Такие трещины могут образовываться в материале, например, при мгновенном нагружении кратковременными нагрузками. В этом случае в бетоне в зоне трещин реализу-

ется сложное непропорциональное нагружение, которое практически не учитывается в расчетах, основанных на современных теориях ползучести бетона. В частности, для них характерно принятие положения о подобии девиаторов напряжения и деформаций, т.е. равенства углов вида напряженного и деформированного состояний

$$\omega = \xi - \psi = 0, \quad (1)$$

где ω — фаза подобия девиаторов; ξ и ψ — углы вида напряженного и деформированного состояний, определяемые через параметры Лоде

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctg \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3;$$

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{3}} \arctg \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}, \quad \varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3.$$

Равенство нулю фазы подобия девиаторов справедливо только для случаев пропорциональных нагружений, а непропорциональное нагружение характеризуется отличием от нуля указанной величины.

Очевидно, что соответствующую роль в перераспределении внутренних усилий при постоянных нагрузках должна играть неоднородность напряженного состояния, которая возникает даже в конструкциях балочных пролетных строений, например, в приопорных зонах балок (стенки и пояса), в зонах сопряжения стенок и консолей балок коробчатого сечения, в местах расположения анкеров напрягаемой арматуры и т.д.

Нелинейное деформирование бетона ведет к перераспределению усилий как между составляющими композитного материала (бетоном и арматурой), так и по длине конструкции, а следовательно, в целом к переменному нагружению даже при внешней неменяющейся нагрузке.

Следует также отметить, что определение деформаций ползучести материала для случаев переменного нагружения длительно действующими нагрузками, основанное на законе наложения (суперпозиции), в рамках линейной теории старения позволяет более или менее корректно учитывать эффект переменного приложения нагрузок только при условии их постоянного возрастания.

По всей видимости, именно эффекты нелинейной ползучести, не принятые во внимание при проектировании, привели к непрерывному нарастанию прогибов пролетных строений железобетонных автодорожных мостов рамно-консольных систем (так называемых птичек) в течение более чем 20 лет их эксплуатации. Это, например, мосты через р. Иртыш в Усть-Каменогорске, через р. Волгу у поселка Кимры, мост Александра Невского в Петербурге и т.д. Пробные расчеты с учетом указанных явлений, выполненные в СГУПСе (В.М. Круглов, А.Н. Донец) и СПбГАСУ (В.Д. Харлаб), подтверждают высказанные предположения.

Так же обстоит дело и с соблюдением гипотезы о бетоне как об изотропном материале. В большинстве современных теорий о мгновенном деформировании бетона соблюдение принципа изотропии предполагается только в ненагруженном (исходном) состоянии материала. Соответственно, с ростом нагружения бетон становится все более и более анизотропным, что связано с возникновением и развитием в нем микротрещин. Поэтому в расчетах на мгновенное нагружение большинством исследователей принимается, как минимум, ортотропная модель

сопротивления материала [3–5]. Поскольку такой же характер развития несут повреждения и при длительном силовом деформировании [2, 6], то очевидно, что в расчетах на ползучесть определяющие соотношения также следует строить как для анизотропной (ортотропной) среды.

Таким образом, представляется целесообразным рассмотреть возможность построения нелинейной модели длительного деформирования бетона с учетом сложного непропорционального переменного нагружения и анизотропии свойств материала, находящегося в условиях неодноосного напряженного состояния.

Полную деформацию в нелинейных теориях ползучести бетона принято разделять на следующие компоненты [6, 7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{\text{пол}}^{\text{обр}} + \varepsilon_{\text{пол}}^{\text{I}} + \varepsilon_{\text{пол}}^{\text{II}}, \quad (2)$$

где ε_y — упруго-мгновенная деформация от постоянных нагрузок; $\varepsilon_{\text{пол}}^{\text{обр}}$ — обратимая часть деформации ползучести, проявляющаяся при снятии нагрузки; $\varepsilon_{\text{пол}}^{\text{I}}$ — необратимая деформация первого рода, связанная с силовым воздействием длительных нагрузок; $\varepsilon_{\text{пол}}^{\text{II}}$ — необратимая деформация второго рода, связанная со старением материала. Деформации ползучести второго рода проявляются в стареющем (упрочняющемся) бетоне (от 28 до 360 сут), и практически отсутствуют в бетоне зрелого возраста (более 360 сут).

Известно, что нелинейные деформации пластичности при мгновенном нагружении и деформации ползучести, не связанные со старением (деформации первого рода), имеют, по сути, одну природу и определяются структурными повреждениями материала [2, 6].

Мерой накопления повреждений в процессе ползучести и показателем интенсивности протекания этого процесса в металлах ряд исследователей считают диссипируемую работу, поскольку она характеризует эквивалентные состояния материала независимо от действующих напряжений и температуры с момента приложения нагрузки вплоть до начала разрушения [8]:

$$A = \int_0^t W d\tau, \quad (3)$$

где $W = \sigma_{ij} \frac{\partial \varepsilon_{\text{пол},ij}^{\text{I}}}{\partial t}$ — удельная диссипируемая энергия, t — время с момента нагружения.

В работе [8] для металлов доказывалось существование поверхности ползучести — геометрического места точек напряженных состояний как совокупности путей нагружения, для которого характерны

- а) равные значения интенсивности ползучести по некоторому параметру;
- б) ортогональность векторов скорости деформаций ползучести к указанной поверхности в соответствующей точке нагружения.

Такое определение поверхности ползучести практически полностью совпадает с понятием поверхности течения (мгновенной поверхности нагружения), широко применяемым для металлов. Существование поверхности течения для бетона доказано и успешно использовано при моделировании нелинейного поведения этого конструкционного материала в работе [5]. Следовательно, учитывая одинаковую природу нелинейных деформаций при мгновенном и

длительном силовом нагружении, с большой долей вероятности можно полагать существование поверхности ползучести и для бетона.

Скорость деформации ползучести по аналогии со скоростью мгновенных пластических деформаций в теории течения записывается в соответствии с постулатом Друккера следующим образом:

$$\frac{\partial \varepsilon_{\text{пол},ij}^I}{\partial t} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \quad (4)$$

где $F(\xi, t)$ — уравнение поверхности ползучести как функция вида напряженного состояния и времени; $\lambda = f(W)$ — скалярный множитель, определяющий интенсивность процесса ползучести и, соответственно, связанный с величиной диссипируемой энергии.

Использование поверхности ползучести для моделирования длительных процессов, вызванных силовым воздействием, позволяет естественным путем учитывать изменение вида напряженного состояния в процессе нагружения.

Кроме того, в моделях мгновенного деформирования как металла, так и бетона, построенных на базе теории течения, с успехом использовалась предпосылка о подобии мгновенных поверхностей нагружения предельной поверхности — поверхности прочности материала. Эта предпосылка использована в работе [8] для оценки длительной прочности металлов. Поэтому не исключено, что применение понятия поверхности ползучести сможет привести к построению некоторой поверхности длительной прочности и для бетона.

Таким образом, поверхность ползучести для бетона должна разыскиваться как функция инвариантов напряженного состояния, времени и температуры. Также целесообразно изучить возможность построения такой поверхности геометрически подобной поверхности длительной прочности.

Важным является вопрос о ползучести бетона при повторно-переменных нагружениях, в том числе и обратного знака. Использование в целом математического аппарата теории течения позволяет применить принцип кинематического упрочнения, при котором поверхность течения (или в нашем случае — ползучести) не является фиксированной в пространстве главных напряжений относительно оси всестороннего сжатия (гидростатической оси), а может перемещаться в зависимости от направления деформирования в девиаторной плоскости. А это, в свою очередь, позволяет с единых позиций моделировать любые процессы повторно-переменных нагружений, в том числе и ступенчатое изменение постоянных нагрузок.

Безусловно, получаемые зависимости не могут быть простыми и поэтому должны быть реализованы в вычислительных комплексах. Тем более что любое моделирование нелинейных процессов требует проведения сложных итерационных расчетов.

Однако инженерные методы часто строятся как упрощение более фундаментальных теорий [6, 9], что определяет общий порядок исследований.

Библиографический список

1. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы / Госстрой СССР. М., 1985. 200 с.
2. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М., Стройиздат, 1971. 208 с.

3. *Балан Т.А.* Инкрементальная модель деформирования бетона и железобетона в условиях многоосного нагружения и ее реализация в численных методах расчета железобетонных конструкций на статические и динамические воздействия: Автореф. ... д-ра техн. наук. М., 1988. 50 с.
4. *Карпенко Н.И.* Общие модели механики железобетона. М., 1996. 416 с.
5. *Карпенко Н.И., Круглов В.М., Соловьев Л.Ю.* Нелинейное деформирование бетона и железобетона. Новосибирск, 2001. 276 с.
6. *Галустов К.З.* Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2006. 248 с.
7. *Харлаб В.Д.* Энергетическая теория нелинейной ползучести и длительной прочности нестареющего бетона при сжатии // Механика стержневых систем и сплошных сред: Межвуз. темат. сб. тр. Вып. 13. Л.: ЛИСИ, 1980. С. 137–148.
8. *Никитенко А.Ф.* Ползучесть и длительная прочность металлических материалов. Новосибирск: НГАСУ, 1997. 278 с.
9. *Бондаренко В.М., Бондаренко С.В.* Инженерные методы нелинейности теории железобетона. М.: Стройиздат, 1982. 285 с.