

УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены основные проблемы надежности и экономичности строительных конструкций. Проведен анализ целесообразности расчета железобетонных конструкций по деформационной модели, позволяющей выполнять расчет с учетом физической и геометрической нелинейности конструктивных железобетонных систем в целом и их отдельных элементов.

Ключевые слова: надежность железобетонных элементов, физическая нелинейность железобетона, эксплуатационная надежность, резервы снижения материалоемкости, косое внецентренное сжатие, нелинейные свойства реальных материалов, геометрическая нелинейность конструктивных железобетонных систем.

Надежность и экономичность строительных конструкций относится к числу основных вопросов, выдвинутых на первый план непрерывно увеличивающимся объемом строительства в нашей стране и возрастающими требованиями к его качеству.

Выполнить оценку надежности железобетонных элементов можно при наличии статистической информации об изменении прочностных и конструкционных параметров и параметров внешних воздействий, происходящих во времени. Наиболее важным показателем надежности является вероятность безотказной работы. Согласно [1] этот термин трактуется как вероятность непревышения предельного состояния (вероятность невыхода конструкций в пространстве состояний за выбранные предельные состояния параметров).

Фактическая надежность реальной конструкции зависит от значительного количества факторов, связанных с изменчивостью геометрических размеров; положением арматуры в сечении, прочностными параметрами бетона и арматуры и т.п. Чем выше изменчивость этих параметров, тем ниже надежность и наоборот.

Устанавливать статистические характеристики распределений свойств железобетонной конструкции следует с помощью методов теории вероятностей и математической статистики по изменчивости параметров, входящих в состав данной конструкции. Эти методы дают теоретическую основу для правильной постановки сбора и обработки статистических сведений, относящихся к видам воздействий на сооружения, характеристикам материалов и конструкций из них и другим расчетным параметрам. Полноценно решить проблему надежности можно лишь при комплексном осуществлении необходимых мероприятий на всех стадиях возведения и эксплуатации строительных конструкций. К числу таких мероприятий относятся:

- проектирование с учетом характеристик надежности;
- технологическое обеспечение установленных проектом характеристик качества, и прежде всего, надежности;
- поддержание требуемого уровня качества конструкций в течение всего срока их службы.

В процессе проектирования специалисты устанавливают научно-обоснованные показатели теоретической надежности элементов конструкций, а их действительную надежность обеспечивает комплекс технологических и организацион-

ных мероприятий, проводимых на заводах-изготовителях, монтажных и общестроительных площадках. Однако даже при наличии самых тщательно составленных нормативных документов, проектирование строительной конструкции становится процессом принятия решений в условиях неопределенности физических возможностей материалов, с одной стороны, и силовых воздействий — с другой.

Такая неопределенность поведения железобетонной конструкции обусловлена целым рядом условий:

- трудно контролируемой изменчивостью нагрузок, действующих на сооружение;
- применением в расчетах идеализированных и упрощенных моделей, в которых не могут быть учтены все действующие на конструкцию силовые факторы;
- вероятностным фактором физических процессов, протекающих в бетоне при изготовлении и эксплуатации конструкций;
- статистическим разнообразием (разбросом) прочностных и деформативных свойств материалов и нестабильностью технологических приемов при изготовлении и монтаже железобетонных конструкций.

В настоящее время расчет железобетонных конструкций осуществляется с учетом детерминированных зависимостей метода предельных состояний, заложенного в нормах проектирования (СНиП 2.03.01-84*). Расчет выполняется в два этапа:

- 1) по несущей способности (предельные состояния первой группы);
- 2) по пригодности к нормальной эксплуатации (предельные состояния второй группы), с использованием независимых математических аппаратов.

При расчетах по несущей способности основными расчетными параметрами являются прочность бетона и арматуры, ее площадь, геометрические характеристики сечения, а по пригодности к нормальной эксплуатации — модуль упругости бетона и арматуры, ее площадь, геометрические характеристики сечения, величина предварительного натяжения.

При проектировании все перечисленные параметры должны иметь детерминированные значения, и только прочностные свойства бетона и арматуры должны представлять собой нормативно-обеспеченные характеристики, которые опеределаются с учетом коэффициентов надежности.

Каждый из этих коэффициентов учитывает изменчивость лишь одной исходной величины, т.е.

если надежность конструкции представить как функцию многих исходных величин, то каждый коэффициент надежности будет зависеть от частной производной этой функции по соответствующей переменной [2]. Поэтому такие коэффициенты называют частными коэффициентами надежности [1].

Метод предельных состояний по форме является детерминированным, однако он может быть поставлен на вероятностную основу с любой степенью достоверности. Степень достоверности метода при этом зависит от степени достоверности процедур, используемых для выбора значений коэффициентов.

Суть расчета состоит в сравнении несущей способности с соответствующими внешними условиями, т.е. значения несущей способности конструкции должны быть больше или почти равны показателям, соответствующих внешних воздействий, т.е. при расчете конструкций по несущей способности

$$R \geq Q,$$

где Q — внешняя нагрузка; R — несущая способность.

Несоблюдение данного условия приводит к отказу конструкции.

Основное условие вероятностного расчета конструкций на надежность имеет вид:

$$P(R > Q) \geq P_T,$$

где P_T — требуемый уровень надежности;

$P(R > Q)$ — вероятность того, что несущая способность превысит данную расчетную нагрузку.

Необходимый уровень надежности обеспечивается расчетными требованиями норм проектирования, но при этом зависит и от методов расчета, принятой конструктивной схемы; вида соединений конструктивных элементов; правил конструирования; плана контрольных испытаний и условием приемки при изготовлении и монтаже.

При исследовании надежности конструкции важным показателем является ее начальная и эксплуатационная надежность. Начальная надежность конструкции учитывает изменчивость прочностных характеристик материалов и геометрических параметров сечения конструкции. Расчетная нагрузка при этом является неизменной детерминированной величиной.

Эксплуатационная надежность определяется с учетом изменчивости как прочностных характеристик материалов, так и действующей нагрузки. Такая надежность — понятие комплексное и многокомпонентное: конструкция должна противостоять воздействиям многочисленных эксплуатационных и строительных нагрузок, воздействиям среды в возможных (прогнозируемых) комбинациях и сохранять при этом расчетную работоспособность в течение расчетного срока службы.

Железобетон, как известно, обладает ярко выраженными свойствами физической нелинейности, связанными с образованием и развитием трещин в бетоне, явлениями ползучести и усадки, а также с

деструктивными процессами, происходящими в бетоне под нагрузкой, с неупругими и пластическими свойствами арматурной стали и с нарушением сцепления арматуры с бетоном. Поэтому для правильной оценки несущей способности железобетонных конструкций расчет должен проводиться с учетом физической нелинейности железобетона.

Согласно [3] уравнения линейной теории упругости и полученные на ее основе уравнения теории пластичности являются теоретической основой прочностного и деформационного расчета строительных конструкций, выполненных из того или иного материала.

Бетон не удовлетворяет ни одному из допущений линейной теории упругости. Следовательно, в основе расчета строительных конструкций, выполненных из бетона и железобетона, должна лежать общая (нелинейная) теория напряжений и деформаций.

При расчете конструкций различают физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности. Физическая нелинейность обусловлена учетом в расчете нелинейной зависимости между компонентами обобщенных напряжений и деформаций $\sigma_i = f(\xi_i)$ и характеризует работу материалов конструкции в упругопластической области.

Геометрическая нелинейность возникает, когда перемещения конструкции вызывают значительное изменение ее геометрии, вследствие этого уравнения равновесия приходится составлять с учетом изменения формы и размеров конструкции, т.е. по деформированной схеме.

Конструктивная нелинейность возникает из-за конструктивных особенностей системы, вызывающих изменение расчетной схемы в процессе ее деформирования (изменяются условия закрепления). Такая нелинейность присуща конструкции, находящейся в процессе монтажа, когда создаются новые связи; при разрушении, когда связи выключаются из работы, а также очень часто при изменении режима нагружения. Таким образом, следуя действующим нормам, основанным на приближенных принципах, невозможно достоверно описать напряженно-деформированное состояние конструкции. Неучтенными остаются нелинейные свойства реальных материалов.

Учет нелинейности в расчетах позволяет не только существенно приблизить теоретические прогнозы к фактическому состоянию конструкции, но и выявить резервы снижения материалоемкости. Нелинейность материалов рассматривается в расчетах с помощью диаграмм деформирования материалов. Поэтому при проведении исследований стеновых панелей необходимо учитывать нелинейные свойства бетона и арматуры посредством составления реальных диаграмм деформирования.

Например, при расчетах стеновых панелей, работающих на косой изгиб, т.е. одновременное действие горизонтальных и вертикальных нагрузок, целесообразно применять метод, основанный на использовании условий равновесия сечения в дискретном виде (дискретной модели). Такая методика расчета дает возможность учитывать влияние

эксцентриситетов относительно обеих осей (e_x, e_y), т.е. рассматривать косое внецентренное сжатие (косой изгиб).

Наиболее распространенные конструкции, работающие на косой изгиб, являются наружные стеновые панели. Расчет таких конструкций, отличающихся повышенной сложностью, производится на совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок.

Под косым изгибом понимается такой случай изгиба, при котором плоскость P действия изгибающих моментов и поперечных сил (рис. 1) не совпадает ни с одной из главных плоскостей инерции.

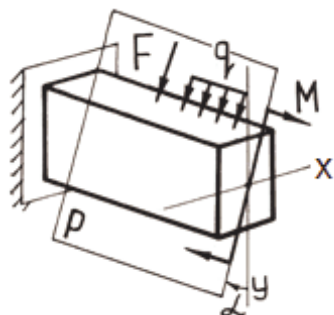


Рис. 1. – Сечение балки, испытывающей косой изгиб

Косой изгиб может быть представлен как совместное действие двух плоских изгибов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях инерции. В поперечных сечениях элемента возникают четыре компоненты внутренних усилий: поперечные (перерезывающие) силы - Q_x, Q_y , и изгибающие моменты - M_x, M_y (рис. 2).

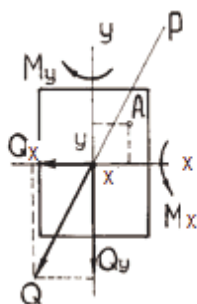


Рис. 2. – Внутренние усилия, возникающие в сечении балки при косом изгибе

Предлагаемый подход для расчета стеновых панелей позволяет рассчитывать конструкции по прочности и деформациям с учетом нелинейных свойств конструкционных материалов при любых

сочетаниях внешних усилий и осуществлять их оптимизацию. Таким образом, расчет за пределами упругой работы конструкций дает возможность выявить резервы снижения их материалоемкости, создаваемые расчетом по упругой стадии, обеспечив тем самым существенную экономию.

При полном анализе напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций следует учитывать все три вида нелинейностей, а это, как правило, значительно усложняет процесс расчета. Поэтому, как правило, рассматриваются частные случаи общей задачи. В настоящее время в нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций наметился переход к общей нелинейно-деформационной модели расчета нормальных сечений железобетонных элементов.

Принятая гипотеза плоских сечений для железобетонных элементов, особенно для элементов, имеющих трещины, не отражает в полной мере реальный физический характер деформирования сечений. Однако учет такого достаточно условного характера деформирования сечения позволяет создать расчетный аппарат, который в целом дает конечные результаты, близкие к экспериментальным данным, т.е. сблизить расчетную и физическую модели.

Применение деформационных моделей способствует повышению точности расчета, но одновременно резко увеличивает и его трудоемкость [4, 5], т.к. требует создания специальных компьютерных программ. Поэтому в новых нормативных документах приводятся также и упрощенные методы расчета железобетонных элементов по прочности и жесткости, основанные на методе предельного равновесия.

Литература

1. Райзер, В. Д. Теория надежности в строительном проектировании : моногр. / В. Д. Райзер. — М. : Изд-во АСВ, 1998. — 304 с.
2. Аугусти, Г. Вероятностные модели в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. — М. : Стройиздат, 1988. — 584 с.
3. Баклушев, Е. В. Влияние гибкости и эксцентриситета приложения нагрузки на надежность внецентренно сжатых элементов / Е. В. Баклушев // Бетон и железобетон. — 1992. — № 4. — С. 16 — 20.
4. А. с. № 2008610404 Программа по оценке напряженно-деформированного состояния однослойных стеновых панелей с учетом нелинейных свойств материалов (DIASTEN v. 1.00) / И. В. Дудина, С. А. Жердева, Е. Ю. Зарубин. — М. : Роспатент. — 2008.
5. А. с. № 2008611474 Программа по оценке надежности однослойных стеновых панелей с учетом нелинейных свойств материалов (NARSTEN v.1.00) / С. А. Жердева, Е. Ю. Зарубин. — М. : Роспатент. — 2008.