

пределенных по определенному закону), то теперь строитель должен уже знать, как произвести современными методами такой расчет.

Литература

1. Лашенко, М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции / М.Н. Лашенко. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с.
2. Техника безопасности в строительстве: СНиП III-4-80 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 352 с.
3. Стальные конструкции: СНиП II-23-81* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 96 с.
4. Металлические конструкции: в 3 т. Справочник проектировщика / под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ., 1998. – Т. 1. Общ. ч. – 576 с.; Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений, 1998. – 512 с.; Т. 3: Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций, 1999. – 528 с.
5. Металлические конструкции / под ред. Н.П. Мельникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с. – (Справочник проектировщика).

УДК 624.012

Тур В.В., д-р техн. наук, проф.
(БрГТУ, г. Брест)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ РАСЧЕТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В соответствии с требованиями ТКП EN 1990 [1] проверки предельных состояний следует выполнять применяя:

- (1) полностью вероятностный метод;
- (2) полувероятностный метод частных коэффициентов;
- (3) расчеты, подкрепляемые результатами испытаний.

Практически все нормы, применяемые для проектирования железобетонных конструкций, используют метод частных коэффициентов.

Как утверждается в п. 6.1 (1) Р [1], «метод частных коэффициентов следует использовать для подтверждения того, что во всех соответствующих расчетных ситуациях ни одно из значимых предельных состояний не будет превышено, если в расчетных моделях воздействий и в моделях сопротивлений приняты расчетные значения».

При проверках предельных состояний несущей способности (ULS) это условие выражается критерием:

$$E_d \leq R_d; \quad (1)$$

$$E_d = E\{\gamma_{F,i} F_{rep,i}; a_d\}; i \geq 1; \quad (2)$$

$$R_d = R\left\{\eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}}; a_d\right\}; i \geq 1; \quad (3)$$

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{Ed} \cdot \gamma_{f,i} \quad (4)$$

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd} \cdot \gamma_{m,i} \quad (5)$$

В выражениях (1) – (5) E_d , R_d – соответственно расчетные значения эффекта воздействия и сопротивления; $F_{rep,i}$ – репрезентативное значение воздействия ($\psi_i F_{k,i}$); γ_{Ed} – частный коэффициент, учитывающий погрешности: а) расчетной модели определения эффекта воздействия; б) моделирования собственно воздействия; $\gamma_{f,i}$ – частный коэффициент, учитывающий отклонение воздействия от его репрезентативного значения; γ_{Rd} – частный коэффициент, учитывающий погрешности расчетной модели воздействия; $\gamma_{m,i}$ – частный коэффициент, учитывающий отклонение свойств материалов от характеристических значений.

Значение частных коэффициентов $\gamma_{F,i}$ и $\gamma_{M,i}$ калибруют в соответствии с правилами, изложенными в Приложении С ТКП EN 1990 [1] для установленного уровня надежности (индекса надежности β или вероятности отказа p_f).

В последние годы при проектировании железобетонных конструкций активно применяют нелинейные расчеты, нередко не задумываясь о том, каким образом в рамках метода частных коэффициентов следует обеспечивать требования концепции надежности в соответствии с ТКП EN 1990 [1]. Очевидно, в связи с этим обстоятельством в разделе 6.2 «Ограничения метода частных коэффициентов» в ТКП EN 1990 [1] содержится запись: «для нелинейных расчетов и расчетов на усталость следует применять подроб-

ные правила, изложенные в расчетных частях EN 1991- EN 1999». Следует отметить, что в окончательной версии EN 1992 [3] (ЕС-2) после ряда изменений так и не были сформулированы окончательно названные правила.

Так, с одной стороны, в п. 3.1.5 (1) [3] приведено описание полной диаграммы деформирования « $\sigma_c - \epsilon_c$ » [3], которую следует применять при выполнении *нелинейного расчета конструкций*, что является вполне обоснованным исходя из п. 5.7.4 (P) [3]: «*при выполнении нелинейных расчетов следует использовать характеристики материалов, которые позволяют наиболее реально отображать жесткость конструкции, но учитывают несовершенство (погрешности) расчетной модели, описывающей разрушение*».

Такое требование вполне обосновано, в частности, когда речь идет о критериях метода предельных состояний, основанных на перемещениях (углах поворота). С другой стороны, по-существу, такое требование приводит к оцениванию средних сопротивлений для конструкции, в то время как эффекты воздействий представлены расчетными значениями (в рамках метода частных коэффициентов).

Следует подчеркнуть, что в ряде версий EN 1992-1 [3] условия метода частных коэффициентов были записаны отдельно при проверках сечений и конструкций, выполняемых с использованием нелинейных расчетов. К сожалению, окончательная версия EN 1992-1 [3] содержит только общие фразы, относящиеся к проверке предельных состояний с использованием нелинейных расчетных методов. Ниже рассмотрим подходы к выполнению нелинейных расчетов в рамках концепции надежности, принятой в ТКП EN 1990 [1].

1. Нелинейные расчеты железобетонных конструкций в действующих нормах

В соответствии с ТКП EN 1992-1-1 [3] применительно к проектированию железобетонных конструкций, нелинейный расчет представляет собой расчет, использующий нелинейные физические законы или нелинейные зависимости, связывающие напряжения и относительные деформации для материалов, а следовательно, и зависимости «момент – кривизна» для сечений. Физические законы для железобетона являются в значительной степени нелинейными (и не только в силу нелинейных зависимостей для характеристик свойств материалов, наличия трещин и т.д.), в связи с чем следует ожидать возрастающего интереса к такому типу расчетов при проектировании железобетонных и предварительно напряженных конструкций. Нелинейные расчеты особенно важны при проектировании статически неопределенных конструктивных систем как в постоянных, переходных, так и в особых расчетных ситуациях.

Кроме того, источником нелинейности в расчетах конструкций могут быть геометрические нелинейные зависимости (эффекты второго рода), с помощью которых учитывают влияние развивающихся перемещений на перераспределение эффектов воздействий (внутренних усилий) в конструктивном элементе.

Эффекты второго рода учитывают, как правило, при проектировании гибких элементов конструкции, а также не раскрепленных связями конструкций или раскрепленных податливыми связями. При длительном действии нагрузок учитывается влияние ползучести. В соответствии с ТКП EN 1992-1 [3] эффекты второго рода, обусловленные геометрической нелинейностью, при определенных условиях допускается не учитывать, либо учитывать упрощенными методами. При этом рекомендуется производить как физические нелинейные расчеты, так и линейно-упругие расчеты. В зависимости от вида конструкции и условий нагружения в соответствии с [5] возможна следующая комбинация расчетных методов: (L1) – линейно-упругий расчет первого рода; (L2) – линейно-упругий расчет второго рода; (NL1) – нелинейный расчет первого рода; (NL2) – нелинейный расчет второго рода. Принципы суперпозиции эффектов воздействий применимы только для методов группы (L1). Нелинейные расчеты позволяют получать распределения внутренних усилий и перемещений в элементах конструкций ближе к фактическим и более обоснованно оценить безопасность конструктивной системы [4], чем это дают линейно-упругие расчеты. Безусловно, такие расчеты более трудоемки. Интересное сравнение различных расчетных методов приведено в работе [5]. Как было показано ранее, рекомендации ТКП EN 1992-1 [3], касающиеся нелинейных расчетов, существенно изменялись в различных версиях проектов норм EC2. Это свидетельствует о том, что уровень знания и вычислительные возможности применительно к нелинейным расчетам постоянно изменяются [4].

Следует подчеркнуть, что методы нелинейного расчета железобетонных конструкций можно применять как для проверок предельных состояний несущей способности (ULS), так и для предельных состояний эксплуатационной пригодности (SLS). В нелинейных расчетных моделях, применяемых для проверок предельных состояний, используют уравнения равновесия, уравнения совместности деформаций, физические уравнения, в виде обобщенных диаграмм деформирования материалов.

Необходимо обратить внимание на одно важное обстоятельство, о котором в силу сложившейся инженерной традиции забывают как при проведении диссертационных исследований, так и при разработке нормативных документов (например, российских норм по проектированию железобетонных конструкций).

бетонных конструкций СНиП, СП и т.д.). При проверках предельных состояний несущей способности (ULS) в качестве проверочных критериев следует принимать *предельные значения относительных деформаций для материалов*, а как следствие, например, предельные значения кривизн для локальных сечений. При этом общее требование к нелинейным расчетным моделям заключается в том, что параметры модели (в частности, характеристики свойств материалов, геометрические параметры) должны быть приняты таким образом, чтобы результаты расчета по возможности наиболее реалистично отображали жесткостные характеристики элемента с учетом неопределенностей расчетной модели.

В связи с этим трудно объяснимым является внесение в 2002 году в проект EN 1992-1 [3] требования проверки угла поворота в пластическом шарнире с использованием расчетных (а не средних, как это было в ранних версиях) характеристик свойств материалов.

Нелинейный анализ допускается применять к расчету конструкций как при действии статических (NLS) и динамических (NLD) воздействий, так и при вынужденных деформациях, вызванных осадкой опор, температурно-усадочными явлениями и т.д.

В расчетах конструкций, для которых доминирующую роль играют статические нагрузки, согласно [4], допускается не учитывать влияние предварительно приложенных и удаляемых в процессе эксплуатации нагрузок, а рассматривать монотонное пошаговое возрастание нагрузки до установленного уровня. Необходимо отметить, что данный подход дает существенное упрощение, так как в общем случае при выполнении упруго-пластических нелинейных расчетов следовало бы учитывать полную историю нагружения.

Как показывает анализ, нелинейные расчетные методы в практическом проектировании используются крайне ограниченно. Это обусловлено следующими обстоятельствами:

1) расчет является достаточно сложным, требует применения специальных программных комплексов, в которых качественно реализованы нелинейные расчетные процедуры (например, SAP2000);

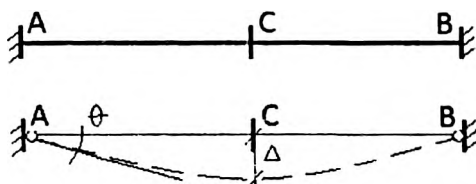
2) требуется специальный подход нормированию требуемого уровня надежности в рамках метода предельных состояний согласно ТКП EN 1990 [1].

Нелинейный расчетный метод может быть наиболее эффективно использован при проверках предельных состояний существующих конструкций, в частности, при оценке живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, либо при проектировании элементов конструктивных систем, имеющих большую повторяемость (например, конструктив-

ные элементы сборных рамных каркасов). Метод основывается, как правило, на анализе образования пластических шарниров и оценивании углов поворота в пластических шарнирах.

В рамках этого метода «разрушение» идентифицируется: 1) в случае, когда угол поворота в пластическом шарнире превышает допустимый (предельный угол поворота из диаграммы «момент – угол поворота» для пластического шарнира); или 2) когда образуется такое количество пластических шарниров, что конструктивная система превращается в механизм. При этом следует рассматривать возможность достижения любого из этих условий (по принципу – что достигается ранее).

В соответствии со сложившимися представлениями [4] проверку предельных состояний несущей способности при выполнении нелинейных расчетов производят по некоторому наиболее общему алгоритму, который может быть рассмотрен на примере прочностей простейшей однопролетной балки, имеющей защемление по концам (рисунок).



К нелинейному расчету балки

Расчетные этапы, как правило, выглядят следующим образом:

(1) При известном армировании, геометрических характеристиках сечения, классе бетона по прочности бетона на сжатие производят расчет момента $M_{y,k}$ для сечений A и C (здесь $M_{y,k}$ – изгибающий момент, соответствующий достижению относительных деформаций, определяющих начало текучести (развитие пластических деформаций) в растянутой арматуре). Кроме того, определяют расчётное сопротивление $M_{y,d}$ с использованием частных коэффициентов γ_m для материалов.

(2) Рассчитывают нагрузку, вызывающую в сечениях A и B изгибающие моменты $M_{y,k}$.

(3) Пошагово повышают нагрузку. На каждом этапе нагружения рассчитывают: а) углы поворота в шарнирах A и B интегрированием кривизны по длине балки между шарнирами (в первом приближении производится разбиение балки на конечное число сечений). В каждом сечении кривизну

рекомендуется определять по формуле (7.18) ТКП EN 1992-1-1 [3]; в) изгибающий момент в сечении C ; с) относительные деформации бетона и арматуры в сечениях A , B , C .

(4) Сравнивают рассчитанные значения углов поворота в сечениях A и B с допустимыми значениями (например, по рис. 5.6 N EN 1992-1-1 [3]).

(5) В качестве критериев разрушения приняты: а) превышение рассчитанных углов поворота в пластических шарнирах A и B допустимых значений; б) образование пластического шарнира в сечении C .

(6) Рассчитывают значение нагрузки, соответствующей разрушению при реализации критериев, приведенных в пункте 5.

Следует отметить, что приведенный алгоритм создает лишь общее представление и содержит значительное число упрощений (например, вычисление кривизн по сечениям, а не блокам, выделенными трещинами и т.д.), создающих неопределенности собственно расчетной модели, которые необходимо учитывать соответствующим частным коэффициентом. Кроме того, дополнительные методологические проблемы возникают в связи с некоторым двойственным подходом при решении задачи: углы поворотов рекомендуется вычислять, опираясь на средние значения базисных переменных (в первую очередь характеристик свойств материалов), а сопротивления – используя расчетные характеристики свойств при применении частных коэффициентов γ_{rr} .

2. Форматы безопасности при нелинейных расчетах железобетонных конструкций

Как было показано ранее, при выполнении нелинейных расчетов осуществляется попытка симулировать как можно более точно с физической точки зрения, реальное поведение конструкции при нагружении и оценить репрезентативные значения сопротивления (см. п. 4.6.2.1 [2]). Эта задача может также формулироваться как прогнозирование наиболее вероятного сопротивления конструктивного элемента, которое, по существу, может быть представлено его средним значением.

В связи с этим в рамках существующих подходов среднее сопротивление определяют как базовое (или эталонное) значение для оценивания безопасности нелинейных расчетов. Неопределенности, вызванные случайными вариациями свойств материалов (как, возможно, и других параметров, входящих в модель сопротивления) описывают через случайную вариацию сопротивления.

В общем случае, условия для проверки предельных состояний конструкции в рамках метода частных коэффициентов согласно ТКП EN 1990 [1] можно представить в виде:

$$E_d \leq R_d, \quad (6)$$

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_R \cdot \gamma_{Rd}}, \quad (7)$$

где E_d – расчетное значение воздействия (эффекта воздействия); R_d – расчетное значение сопротивления; R_m – среднее значение сопротивления; γ_R, γ_{Rd} – соответственно глобальный коэффициент безопасности для сопротивления и частный коэффициент, учитывающий неопределённости расчетной модели сопротивления.

В рамках метода предельных состояний в соответствии с ТКП EN 1990 [1] и МС2010 [2] расчетное сопротивление для элемента может быть определено различными методами в зависимости от уровня применяемого вероятностного оценивания:

(1) Вероятностным методом: исходя из заданного (нормируемого) индекса надежности β_{tag} или связанной с ним вероятности отказа;

(2) Методом так называемого глобального сопротивления;

(3) Методом частных коэффициентов.

При использовании вероятностных методов расчетное сопротивление элемента оценивают в явном виде для требуемой (нормируемой) вероятности отказа или индекса надежности.

В методе *глобального сопротивления* расчетное сопротивление определяют, используя упрощенный вероятностный подход, допуская существенные аппроксимации (например, FORM).

В методе частных коэффициентов безопасности расчетное сопротивление также определяют напрямую, применяя в расчетных моделях сопротивление расчетных значений базисных переменных без дополнительного оценивания глобальной (общей) безопасности.

Метод частных коэффициентов безопасности, по сути, сравним с методом частных коэффициентов, применяемым к оценкам глобального сопротивления.

Выбор подходящего метода оценивания расчетного сопротивления зависит от инженерного подхода, принятой модели сопротивления и возможных неопределенностей, в том числе и собственно расчетных моделей. При этом в соответствии с рекомендациями МС 2010 при практическом проектировании с использованием нелинейных расчетных моделей, следует использовать как минимум два метода, позволяющих выполнять независимую проверку предельного состояния.

Вероятностный метод

Расчетное сопротивление R_d может быть оценено с использованием вероятностного подхода в соответствии с общим форматом безопасности, согласно [2]. В рамках вероятностного подхода функция сопротивления $r(r)$

выражается с использованием нелинейного расчета конструкции. Безопасность следует оценивать с помощью индекса надежности β или альтернативно – посредством вероятности отказа («разрушения») p_f . В расчетах учитываются все несовершенства, обусловленные вариациями характеристик свойств материалов, геометрических размеров и другие случайные эффекты.

Глобальное расчетное сопротивление может быть выражено:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R(\alpha\beta), \quad (8)$$

где $R(\alpha\beta)$ – сопротивление, соответствующее требуемому индексу надежности β с учетом понижающего коэффициента α , принимаемого при одностороннем оценивании сопротивления (раздельная оценка безопасности согласно ТКП EN 1990[1]); γ_{Rd} – коэффициент, учитывающий несовершенство расчетной модели сопротивления;

Вероятностный анализ базируется на численной симуляции случайных выборок и в краткой форме может быть представлен следующими этапами:

(1) Формулирование нелинейной численной модели сопротивления. Такая модель описывается, как правило, функцией сопротивления $r(\mathbf{r})$ и позволяет выполнять детерминистический расчет сопротивления для данного набора входных переменных;

(2) Рандомизация или случайный выбор входных переменных расчетной модели сопротивления (характеристики свойств материалов, геометрические размеры, граничные условия и т.д.). Кроме того, во входные данные могут быть включены некоторые эффекты, которые не входят в функцию воздействий $e(\mathbf{e})$ (например, предварительное напряжение, постоянная нагрузка и т.д.).

Базисные переменные задают соответствующим типом функции распределения вероятности со своими базовыми статистическими параметрами (среднее значение, стандартное отклонение и т.д.). Рандомизация может быть выполнена двумя способами:

(1) случайными переменными, когда входные параметры являются константами в пределах одной пробы (конструкции), но изменяются от одного образца к другому;

(2) случайными полями, когда параметр случайным образом изменяется в пределах образца. При этом требуется рассмотрение соответствующей корреляции переменных. Например, можно считать, что прочность бетона изменчива, но одинакова во всех сечениях конструкции (способ 1) или прочность бетона изменчива, кроме того, и во всех локальных сечениях конструкции (способ 2).

(3) Выполняется вероятностный анализ. Выборка дискретных данных может быть выполнена, например, численным методом с использованием симуляции Monte-Carlo-type. Результаты выборки исходных данных обеспечивают случайные параметры сопротивления, такие как средние значения, стандартные отклонения и т.д., а также как функция распределения вероятностей для сопротивления.

(4) Оценивание расчетного сопротивления по заданному индексу надежности β или вероятности отказа («разрушения»).

Для оценивания расчетного сопротивления, т.е. когда рассматривается только первая часть условия (6), согласно ТКП EN 1990 [1] индекс надежности может рассматриваться как произведение $\alpha \cdot \beta$. При отсутствии более точных и обоснованных данных $\alpha = 0,8$, а произведение $\alpha \cdot \beta = 0,8 \times 3,8 = 3,04$. Это соответствует вероятности отказа $p_f \cong 10^{-3}$.

Методы глобального сопротивления

В рамках метода глобального коэффициента сопротивления расчетное сопротивление R_d в общем случае рассчитывают из выражения:

$$R_d = \frac{r(f_{m, \dots})}{\gamma_r \gamma_{Rd}} \quad (9)$$

Функция r представляет нелинейную расчетную модель со средними входными параметрами (характеристиками свойств материалов), определяемыми согласно [2]:

$$f_{ym} = 1,1 f_{yk}, \quad (10)$$

$$f_{cmd} = 1,1 f_{ck} \frac{\gamma_s}{\gamma_c}, \quad (11)$$

где f_{ym} – среднее значение сопротивления арматуры; f_{cmd} – пониженное среднее значение прочности бетона при сжатии.

Принимая согласно ТКП EN 1992-1-1 [3] значения частных коэффициентов $\gamma_s = 1,15$ и $\gamma_c = 1,5$, получаем для бетона:

$$f_{cmd} = 0,85 f_{ck} \quad (12)$$

Понижающий коэффициент 0,85 следует применять и для понижения значения других свойств материалов, таких как прочность бетона при растяжении, прочность сцепления и др.

В данном методе в расчетной модели сопротивления рассматриваются средние значения свойств материалов с учетом возможных вариаций характеристик прочности стали и бетона. При этом рассматривают возможность достижения предельного состояния отдельно по арматуре и бетону.

Частный коэффициент безопасности для среднего в случае разрушения по арматуре может быть выражен:

$$f_{yd} \cdot \gamma_{GL,Steel} = f_{yd} \cdot 1,1 \cdot \gamma_s = f_{ym},$$

$$\gamma_{GL,Steel} = 1,1 \times 1,15 = 1,27.$$

Частный коэффициент безопасности для среднего в случае разрушения по бетону может быть выражен следующим образом:

$$f_{cd} \cdot \gamma_{GL,Conc} = f_{cd} \cdot 1,1 \cdot \gamma_c = f_{cm},$$

$$\gamma_{GL,Conc} = 1,1 \times 1,5 = 1,65.$$

Учитывая то обстоятельство, что частные коэффициенты безопасности калибруются для одной и той же вероятности разрушения (индекса надежности), они дают различные значения глобальных коэффициентов безопасности γ_{GL} для материалов. Для исключения различий в значении глобальных коэффициентов безопасности $\gamma_{GL,Steel}$ и $\gamma_{GL,Conc}$ в работе [2] рекомендуется модифицировать среднюю прочность бетона. Тогда новое пониженное значение средней прочности бетона определяют:

$$f_{cm} = \frac{1,1\gamma_s}{\gamma_c} \cdot f_{ck} = 0,85f_{ck}. \quad (13)$$

В результате новый глобальный коэффициент безопасности для бетона составит:

$$\gamma_{GL,Conc} = \frac{f_{cm}}{f_{cd}} = \frac{0,85f_{ck}}{(f_{ck}/1,5)} = 1,27. \quad (14)$$

Таким образом, принимая пониженное в безопасную сторону среднее значение прочности бетона, получаем одинаковый коэффициент безопасности $\gamma_{GL} = 1,27$ для средних прочностей стали и бетона.

Метод оценки коэффициента вариаций сопротивления

Средние и характеристические значения сопротивления могут быть рассчитаны с использованием соответствующих значений базисных переменных (характеристических свойств материалов):

$$R_m = r(f_m, \dots), \quad (15)$$

$$R_k = r(f_k, \dots), \quad (16)$$

где r – нелинейная расчетная модель сопротивления; f_m, f_k – средние и характеристические значения входных параметров материалов, соответственно.

В соответствии с [2] коэффициент вариаций сопротивления V_R следует определять по формуле:

$$V_R = \frac{1}{1.65} \ln\left(\frac{R_m}{R_k}\right). \quad (17)$$

Тогда глобальный коэффициент сопротивления γ_R для среднего сопротивления может быть определен:

$$\gamma_R = \exp(\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R), \quad (18)$$

где α_R – коэффициент чувствительности (весовой коэффициент); β – индекс надежности.

В таком случае расчетное сопротивление определяют по формуле:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_{Rd} \gamma_R}. \quad (19)$$

Таким образом, глобальный коэффициент сопротивления γ_R связан с вариацией сопротивления V_R . Как показывает вероятностный анализ, случайное распределение сопротивления для железобетонного элемента может быть описано двухпараметрическим логнормальным распределением [2], которое идентифицируется следующими статистическими параметрами: R_m – средним значением и V_R – коэффициентом вариации. Характеристическое значение сопротивления может быть получено из установленной функции распределения:

$$R_k = R_m \exp(1,65V_R). \quad (20)$$

Принимая для характеристических значений обеспеченность 0,95, коэффициент вариаций может быть рассчитан по формуле (17), а коэффициент $\gamma_R = \frac{R_m}{R_d}$ – по формуле (18).

С учетом $\alpha_R = 0,8$ и $\beta = 3,8$ ($p_f \equiv 10^{-3}$), глобальный коэффициент определяют:

$$\gamma_{R.m} = \exp(3,04V_R). \quad (21)$$

Несложно заметить, что метод требует обоснованных значений характеристических и средних прочностей материалов, используемых в качестве входных параметров в моделях сопротивления.

Метод частных коэффициентов

Метод частных коэффициентов может применяться в тех случаях, когда расчетное сопротивление напрямую определяют при использовании расчетных прочностей материалов f_d в нелинейных расчетных моделях:

$$R_d = r(f_d, \dots), \quad (22)$$

где $r(f_d, \dots)$ – нелинейная расчетная модель сопротивления.

Необходимо отметить, что в данном случае расчеты конструкции базируются на экстремально низких значениях прочностей материалов во всех сечениях, что не коррелируется с вероятностными подходами. Такой консервативный, с одной стороны, подход, может привести не только к неадекватному оцениванию реакции конструкции, но и к изменению формы разрушения. Вместе с тем параметрические исследования показывают, что метод частных коэффициентов вполне применим в практическом проектировании.

Как показано в ТКП EN 1990 [1], в стандартной расчетной ситуации неопределенность расчетной модели включают в частный коэффициент для материалов $\gamma_M = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd}$ и, соответственно, в расчетные значения базовых параметров $f_d = f_m / \gamma_M$. В этом случае к расчетному сопротивлению R_d не применяют коэффициент γ_{Rd} .

Заключение

При выполнении нелинейных расчетов конструкций требования безопасности в соответствии с ТКП EN 1990 следует обеспечивать системой частных коэффициентов, вводимых к расчетным моделям сопротивлений, значения которых в общем случае следует калибровать на базе полностью вероятностного подхода. Условия метода предельных состояний при выполнении нелинейных расчетов следует записывать в виде:

$$E_d \cdot \gamma_{R.m} = R_m. \quad (23)$$

Литература

1. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990 (IDT:EN 1990:2002 Basis of Structural Design) – Минск: ЦИТП, 2012. – 126 с.
2. Model Code 2010, First Complete Draft, Vol. 1, Vol. 2. – Draft Model Code – fib, 2010-CH-1015. – Lausanne, Switzerland – 293 p.
3. Проектирование конструкций из бетона. Общие правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1 (EC2) (IDT: EN 1992-1-1 (EC2): Design of concrete structures. General rules and rules for buildings). – 276 p.
4. Beeby W., Narayanan R.S. Designer's guide to EN 1992-1-1 Thomas Telford, 2005. – 201 p.
5. Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych wg Eurokodu 2. – Wrocław, 2006 – 976 p.