ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ БЕЗБАЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

THE RULES FOR THE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAM-FREE FLOOR SLABS

М. М. КОЗЕЛКОВ, канд. техн. наук
А. В. ЛУГОВОЙ
Д. Д. КОЛОСОВ

В статье приведены результаты краткого анализа отечественной нормативной базы, систематизация правовых, технических и методических документов, сводов правил, стандартов, относящихся к области проектирования плоских безбалочных железобетонных перекрытий. Предложена методика интерпретации результатов расчета моделей зданий, выполненных с использованием программных комплексов в линейной и нелинейной постановках задачи. Учен положительный опыт проектирования и экспертизы проектных решений и строительства промышленных и гражданских зданий из железобетона. По итогам работы разработана методика расчета безбалочных перекрытий.

The article presents the results of a brief analysis of the domestic regulatory framework, the systematization of legal, technical and methodological documents, codes of rules, standards related to the design of reinforced concrete beam-free floor slabs. A method for interpreting the results of calculation of building models performed using software systems in linear and nonlinear formulations of the problem proposed.

The positive experience of the design and expertise of design solutions and construction of industrial and civil buildings made of reinforced concrete is taken into account. According to the results of work, a methodology for calculating beam-free floor slabs has been developed.

Ключевые слова:

Безбалочное перекрытие, железобетонные конструкции, капитель, относительная высота сжатой зоны, расчетная схема

Key words:

Beam-free floor slabs, capital, design scheme, reinforced concrete structure, relative height of compressive zone

В настоящее время основным материалом для возведения зданий и сооружений в промышленном и гражданском строительстве является железобетон. Материала-аналога или конкурента, несмотря на всевозможные научные разработки и исследования, в обозримом будущем вряд ли стоит ожидать. А значит, хотим мы этого или не хотим, но разработке нормативов по применению железобетона следует уделять повышенное внимание, ибо это основной, если даже не главный материал, используемый в строительной отрасли. Базовым, краеугольным документом, регламентирующим нормы проектирования железобетонных конструкций, в настоящее время является СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями N 1, 2, 3)». Этот документ в силу своей чрезвычайной актуальности постоянно дорабатывается, в него вносятся всё новые и новые необходимые изменения. Степень важности этого документа определяется и его статусом: документ входит в перечень из постановления Правительства РФ от 26 декабря 2014 года № 1521 и относится к документам, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

СП 63.13330.2012 — это документ особо широкого спектра охвата, т.е. документ укрупненного действия, в развитие которого на сегодняшний день Минстроем РФ выпущено несколько других нормативных документов, имеющих справочный статус (документы не входят в перечень из Постановления №1521). К таким документам следует отнести пособия «Расчет железобетонных конструкций без предварительного напряженной арматуры», «Методическое пособие по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций» и др. Работы по выпуску пособий в развитие СП 63.13330.2012 безусловно необходимо продолжать и далее по причине появления новых исследований и разработок в области железобетона.

В связи с развитием и повсеместным внедрением программных комплексов по расчёту пространственных моделей зданий и сооружений остро встал вопрос интерпретации результатов расчёта моделей зданий, выполненных с использованием программных комплексов. Для решения поставленных задач в НИИЖБ им. А.А.Гвоздева была выполнена разработка пособия «Плоские безбалочные железобетонные перекрытия. Правила проектирования». При составлении Пособия учтен положительный опыт проектирования, экспертизы проектных решений и строительства промышленных и гражданских зданий из монолитного железобетона, а также недостатки проектирования, выявленные в процессе проектной и экспертной деятельности сотрудниками НИИЖБ им. А.А.Гвоздева.

Методическое пособие по проектированию безбалочных железобетонных перекрытий разработано в развитие СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003» в части применения при проектировании зданий и сооружений плоских безбалочных железобетонных перекрытий. Пособие не распространяется на конструкции зданий, возводимых на просадочных грунтах и горных выработках, в районах с сейсмичностью свыше 6 баллов и в районах Крайнего Севера, а также на конструкции зданий, возводимых методом подъема этажей.

Методика расчетов безбалочных перекрытий в целом основывается на действующей системе нормативных документов, в том числе СП 63.13330.2012, СП 28.13330.2017,

СП 20.13330.2016, ГОСТ 34.602-89, ГОСТ 27751-2014 и др. В современном проектировании расчеты пространственных схем зданий выполняются с применением различных компьютерных программ, использующих численные методы, в частности, метод конечных элементов.

При разработке расчетной схемы здания следует учитывать, что каждая из схем имеет ограниченную область применения, определяемую положенными в её основу допущениями. Чем меньше допущений, тем более модель соответствует реальной работе конструкции. Понятно, что тождества модели и реальной конструкции добиться на сегодняшнем этапе развития вычислительных технологий невозможно. Однако добиться учета в пространственной модели здания основных определяющих напряженно-деформированное состояние конструкций характеристик и особенностей реального каркаса необходимо.

Усилия в модели следует определять, используя расчетные схемы и предпосылки, наиболее полно отвечающие условиям действительной работы конструкции. В зависимости от уровня и характера нагрузок и воздействий, конструктивных особенностей и других факторов, расчет может выполняться с разной степенью детализации, допущений и упрощений. Принимаемые упрощения не должны приводить к уменьшению усилий (напряжений) в модели здания, а также завышать жесткость здания.

Нагрузки, действующие на конструкции, должны быть приведены к эквивалентным равномерно распределенным, линейным или сосредоточенным нагрузкам. Кроме общего расчета модели объекта на все возможные виды статических нагрузок, температурных, деформационных и динамических воздействий (ветер с учетом пульсации, сейсмические воздействия и т.п.), расчетные комплексы автоматизируют ряд процессов проектирования: определение расчетных сочетаний нагрузок и усилий, назначение конструктивных элементов, подбор и проверка сечений.

Как правило, библиотеки конечных элементов расчетных комплексов САПР содержат следующие типы конструктивных элементов (КЭ): стержень (колонна, балка), пластина (стена, балка-стенка, плита, оболочка), объёмные КЭ, численные КЭ. Пластинчатые элементы имеют унифицированную плоскостную триангуляцию – треугольные КЭ или четырехугольные КЭ. Конечный элемент, кроме всего прочего, характеризуется числом узлов и степенями свободы каждого узла.

В результате расчета напряженно-деформированного состояния конструкций с помощью МКЭ пользователь получает данные по полям перемещений и напряжений, по эпюрам усилий и прогибов, по мозаикам разрушения элементов, по главным и эквивалентным напряжениям и другим параметрам, зависящим от внешних воздействий.

Моделирование объектов может осуществляться в линейной (упругой) и нелинейной (неупругой) постановках задачи.

Модель в линейной постановке выполняется для решения задач, характеризующих работу материала несущих конструкций до достижения предела упругости (величина напряжений, при которых не возникают остаточные деформации), а также в качестве первой стадии расчета для получения данных для дальнейшего нелинейного расчета. Неупругую работу (физическую нелинейность) рекомендуется здесь учитывать косвенно, с помощью пониженных значений модуля упругости материалов в соответствии с СП 52-103-2007. Модуль упругости для КЭ-плит принимается пониженным с коэффициентом 0,3 (0,2 при

учете длительности действия нагрузки), учитывающим ползучесть бетона и наличие трещин. Модуль упругости для вертикальных элементов принимается с коэффициентом 0,6, учитывающим только ползучесть бетона.

Моделирование зон опирания плиты перекрытия на колонны и стены рекомендуется выполнять с помощью так называемых «Абсолютно жестких тел» (АЖТ). Это необходимо для учета в модели здания физического размера пятна контакта вертикальной несущей конструкции и плиты перекрытия. В противном случае в горизонтальной несущей конструкции будут получены неадекватные усилия, не отражающие реальное напряженно-деформированное состояние перекрытия. В первом, оценочном расчёте, когда необходимо определить только геометрические параметры сечений несущих конструкций, допустимо вместо АЖТ применять конечные элементы с повышенной на порядок жесткостью. Однако в дальнейшем, при разработке пространственной расчётной схемы для определения усилий в элементах каркаса здания необходимо вернуться к введению АЖТ в модель.

Изгибающие моменты и поперечные силы необходимо определять по грани опор, т. е. по грани стен и колонн. Для этого можно прибегнуть к достаточно густой конечно-элементной сетке, так, чтобы размеры конечных элементов были соизмеримы с размерами поперечного сечения колонн. В этом случае сечения колонн можно «вписать» в конечно-элементную сетку, используя абсолютно жесткое тело, размер которого соответствует сечению колонны.

При автоматической триангуляции модели несущей конструкции в опорных зонах могут образовываться так называемые вырожденные конечные элементы (треугольные и четырехугольные элементы с большим разбросом размеров сторон). Определенные в них моменты и поперечные силы могут иметь значительные отклонения от значений в соседних конечных элементах, которые не могут быть ориентиром для определения напряженно-деформированного состояния несущей конструкции. Особенно это касается поперечных сил, точность определения которых в методе конечных элементов в перемещениях значительно ниже точности определения изгибающих моментов. Разрешающей функцией метода конечных элементов является функция перемещений. Изгибающие моменты определяются как вторые производные от перемещений, а поперечные силы – как третьи производные. При этом следует учитывать, что каждая последующая производная ухудшает точность определения параметра. В общем случае рекомендуется ориентироваться на изополя усилий, которые сглаживают возможные отклонения триангуляции.

Расчет с учетом нелинейной работы материалов необходимо проводить только для расчетных моделей с известными параметрами армирования и фактическими дефектами конструкций (при их наличии). В соответствии с классами прочности бетона и арматуры вводят данные по диаграммам деформирования материалов. Диаграммы работы материалов задаются в соответствии с проектными классами материалов согласно нормативным документам, а при проверке существующих конструкций задаются данные о фактической прочности материалов, подтвержденные результатами обследования конструкций прямыми и косвенными методами.

Нелинейный расчёт – процесс итерационный. В соответствии с информацией по армированию, полученной из расчета упругой модели, вводят данные по армированию элементов конструкций для первой итерации при проведении нелинейного расчета. По ре-

зультатам первой итерации расчета получают уточненные значения внутренних усилий, уточняется армирование и выполняется следующая итерация. Следует особо отметить, что применение модулей армирования, интегрированных в расчетные комплексы, допустимо только на первой итерации расчета при создании нелинейной модели. На последующих этапах создания нелинейной модели категорически не допускается использовать данные модулей армирования. Необходимо определить усилия в несущих конструкциях модели, и по усилиям подобрать армирование с применением методологии СП 63.13330.2012.

В настоящий момент многие проектные коллективы пренебрегают тем, что в СП 63.13330.2012 нет разрешения на армирование несущих конструкций специализированными модулями или процессорами расчетных программ. Поэтому несущие конструкции, спроектированные с применением на первый взгляд удобных средств программных комплексов, могут не в полной мере удовлетворять требованиям ФЗ-384, что недопустимо.

Важным фактором, который необходимо учитывать при моделировании зданий и сооружений, является возможная неравномерная осадка опор плиты, особенно для верхних этажей, обусловленная не столько нагрузкой собственно на плиту рассматриваемого перекрытия, сколько неравномерными укорочениями вертикальных элементов в общей схеме здания. При этом следует учитывать, что в результате возведения здания неравномерная осадка опор по мере возведения здания происходит от собственного веса (это 50-70% всей нагрузки), и к моменту замоноличивания верхних этажей эта осадка в значительной степени уже состоялась. В течение эксплуатации этот эффект может усугубиться за счет деформаций ползучести, которые в наиболее нагруженных вертикальных несущих элементах (колонны и пилоны по сравнению с диафрагмами) будут протекать более интенсивно, и посредством плит перекрытий нагрузка будет перераспределяться в пользу элементов с большей жесткостью, т.е. стен и диафрагм.

Если не удастся отследить эти процессы на основе компьютерного моделирования процесса возведения здания, а затем эксплуатационных стадий, на которых отслеживаются деформации ползучести, необходимо примерно оценить возможную действительную неравномерность осадки опор и на них провести расчет плиты перекрытия. Можно рекомендовать следующий приближенный подход: необходимо определить перемещения опор из расчета общей схемы здания, а затем рассчитать плиту на местную нагрузку и на величины осадок, составляющих 15-20% осадки, определенных из рассмотрения общей схемы.

При моделировании следует учитывать, что многочисленные коммуникационные отверстия изменяют расчетную схему плиты. Отверстия существенно изменяют изгибную жесткость плиты перекрытия.

При проектировании горизонтальных несущих конструкций необходимо соблюдать требование об ограничении значения относительной высоты сжатой зоны бетона ξ . Величины пластических деформаций арматуры должны быть ограничены, с одной стороны, предельными деформациями, исключающими её разрыв, и, с другой, деформациями растяжения арматуры в расчетном сечении, предотвращающими преждевременное разрушение бетона сжатой зоны и назначаемыми в соответствии с требованиями по обеспечению возможности перераспределения усилий в статически неопределимых системах, или же диссипации энергии внешнего динамического воздействия. Очевидно, что при значениях $\xi \approx \xi_R$, т. е. при наиболее высоких жесткостях (EI) расчетных сечений в предельной стадии

их сопротивления внешней нагрузке, а, следовательно, при минимальном раскрытии шарниров пластичности, практически отсутствуют предпосылки для перераспределения усилий в статически неопределимой конструктивной системе безбалочных перекрытий, что снижает их безопасность при, например, аварийном нагружении. Наиболее рациональным путем снижения ξ для безригельного перекрытия является увеличение плеча внутренней пары сил расчетных сечений в приопорных зонах (расстояние между центрами тяжести растянутой арматуры и сжатого бетона) путем использования капителей колонн.

Таким образом, при проектировании горизонтальных несущих конструкций необходимо выбирать рациональные конструктивные решения, и критерием рациональности является величина ξ . Завышение этой величины приводит к нежелательным последствиям, в частности, в случае возникновения аварийных воздействий, вызывающих усилия в расчетных сечениях, превышающих предусмотренные расчетом. В этом случае несущая способность сечений обеспечивается резервами по прочности, назначаемыми при проектировании, а также определяется их способностью к пластическому деформированию. В статически определимых конструктивных элементах перекрытий способность расчетных сечений к пластическому деформированию может обеспечить безопасность конструкций только в случае кратковременного динамического аварийного воздействия исключительно за счет диссипации (рассеяния) энергии. В статически неопределимых системах при статическом нагружении или при аварийном нагружении способность расчетных сечений к пластическому деформированию может обеспечить безопасность конструкций за счет как перераспределения усилий, так и диссипации энергии.

В соответствии с требованиями ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и основных нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций для повышения их безопасности при различных видах внешних воздействий, необходимо обеспечить возможность пластического деформирования расчетных сечений основных несущих частей здания и, в первую очередь, горизонтально расположенных конструктивных элементов (балок, плит).

Таким образом, при проектировании железобетонных конструкций безбалочных перекрытий в соответствии с [9] следует выполнять условие

$$\xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max} \quad (1)$$

где ξ – относительная высота сжатой зоны бетона, определяемая по СП 63.13330.2012; $\xi_{\max}$ – максимально допустимая высота сжатой зоны бетона, обеспечивающая достаточное для перераспределения усилий пластическое деформирование арматуры без разрушения сжатого бетона для выполнения требований I и II групп предельных состояний по СП 63.13330.2012 и предотвращения прогрессирующего обрушения конструкций от аварийных нагрузок;

$\xi_{\min}$ – в соответствии с [9] минимальная допустимая высота сжатой зоны бетона, предотвращающая разрыв арматуры:

$$\xi_{\min} = \frac{0,78 \varepsilon_{bm} \omega E_s}{K_{pl} R_s + E_s (0,002 K_{pl} + \varepsilon_{bm} \omega)} \quad (2)$$

$$\text{Здесь } \varepsilon_{bm} = \frac{0,02}{1 - \frac{\omega}{1,1}};$$

$$\omega = 0,85 - 0,006R_b;$$

$$K_{pl} = \frac{\varepsilon_{s2} E_s}{R_s + 0,002 E_s};$$

$R_b, R_s, E_s, \varepsilon_{s2}$ – в соответствии с СП 63.13330.2012.

Из требований, определяемых СП 63.13330.2012 по I и II группам предельных состояний, ограничивающих критические размеры сетки колонн в оптимальных для архитектурно-планировочных решений размерах 6×6м, 6,6×6,6м, 7×7м, а также для выполнения условий по обеспечению способности пластического деформирования расчетных сечений безбалочных бескапитальных плитных перекрытий при их проектировании следует выполнять условие

$$\xi_{\max} = 0,7\xi_R. \quad (3)$$

Выводы

Таким образом, рациональное принятие геометрии безбалочных плит перекрытий выглядит следующим образом:

1. По результатам статического расчета выбираются сечения безбалочного перекрытия с полученными из расчета максимальными изгибающими моментами.

2. Для выделенных сечений по заданным механическим характеристикам бетона и арматуры, а также геометрическим характеристикам определяется армирование и вычисляется относительная высота сжатой зоны бетона ξ .

3. Проверяется выполнение условия (1).

При $\xi \leq \xi_{\min}$ увеличивается количество растянутой арматуры до выполнения условия $\xi > \xi_{\min}$.

При $\xi > \xi_{\max}$ прежде всего изменяются геометрические характеристики расчетного сечения путем увеличения его высоты до выполнения условий $\xi \leq \xi_{\max}$ и $\xi \geq 2a'$. Возможно также добавление арматуры в сжатую зону элемента.

4. Последующее конструирование армирования безбалочных перекрытий выполняется в соответствии с общими рекомендациями.

Библиографический список

1. СП 20.13330.2011 СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия.
2. СП 63.13330.2012 СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
3. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
4. СП 52-103-2007 Железобетонные монолитные конструкции зданий.

5. ГОСТ Р 52544-2006 Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.

6. ГОСТ 10922-2012 Арматурные и закладные изделия сварные, соединения арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия.

7. ГОСТ 14098-2014 «Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры. СНиП 31-09-2006».

8. ГОСТ Р 21.1101-2013 СПДС. Основные требования к проектной и рабочей документации.

9. *Тихонов И.Н.* Армирование элементов монолитных железобетонных конструкций. Пособие по проектированию. М.: ФГУП ЦПП, 2007.

Авторы:

Михаил Михайлович КОЗЕЛКОВ, канд. техн. наук, руководитель Центра проектирования и экспертизы №22 НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Mikhail KOZELKOV, Ph.D. (Engineering), Head of Design and Engineering Department of NIIZHВ named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: centr22@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-75-65

Антон Васильевич ЛУГОВОЙ, заместитель руководителя Центра проектирования и экспертизы №22 НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Anton LUGOVOJ, Deputy Head of Design and Engineering Department of NIIZHВ named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: centr22@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-75-65

Дмитрий Дмитриевич КОЛОСОВ, начальник отдела комплексного надзора за строительством Центра проектирования и экспертизы №22 НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitriy KOLOSOV, Head of the Department of complex construction supervision of NIIZHВ named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: centr22@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-75-65