

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 624.012.46

**О ПРОЕКТИРОВАНИИ УЗЛОВ СОПРЯЖЕНИЯ
СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ КАК НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ**

РАК Н.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение

Здания и сооружения, возведенные из сборного железобетона, представляют собой пространственные системы, состоящие из отдельных элементов, взаимодействующих между собой в узлах сопряжения. Проектирование сборных железобетонных элементов зданий и сооружений необходимо производить по усилиям, полученным из статического расчета по схемам, соответствующим действительному характеру взаимодействия элементов в составе каркаса. Степень взаимного влияния элементов в большой мере определяется деформативными свойствами соединений элементов друг с другом. В связи с этим наряду с исследованием прочности соединений необходимо уделять особое внимание исследованию их деформаций на всех стадиях их напряженно-деформированного состояния.

Практика проектирования железобетонных конструкций настоятельно требует расширения научных исследований в направлении уточнения расчетных схем зданий и сооружений. При этом уточ-

ненные схемы должны быть ориентированы на возможности современной вычислительной техники, использовать соответствующий математический аппарат, в максимальной степени учитывать особенности деформирования соединений железобетонных элементов в составе здания или сооружения.

Здесь следует отметить, что на важность проведения исследований в данном направлении теории расчета железобетонных конструкций неоднократно обращалось внимание на конференциях по бетону и железобетону, проходивших в бывшем СССР. Еще в 1975 г. проф. А.А. Гвоздев [1] отмечал «...пожелания о совместном расчете надземных конструкций с фундаментами и основаниями, о широком учете пространственной работы конструкций и сооружений в целом, их геометрической и физической нелинейности, а также деформативности соединений своевременны и справедливы. Реализовать их, однако, не легко, и решение этих задач потребует немало времени и труда».

Несмотря на отмеченную А.А. Гвоздевым повышенную трудность решения указанных выше задач, исследования в этой области проводились в различных научных и учебных организациях бывшего СССР и позднее в государствах СНГ. Известны работы В.А. Клевцова [2], Ю.В. Краснощекова [3], Н.Н. Трекина [4], А.Н. Мамина [5] и др. В Беларуси различные аспекты взаимодействия сборных элементов железобетонных конструкций изучались в БНТУ А.Е. Шиловым [6], М.Х. Фархатом [7] и др. под руководством В.Г. Казачка, в Брестском государственном техническом университете под руководством В.В. Тура, в Полоцком государственном университете под руководством Д.Н. Лазовского и в других организациях.

Требования нормативных документов к проектированию узлов сопряжения сборных железобетонных элементов

Следует отметить, что ранее действующие нормы проектирования железобетонных конструкций СНиП 2.03.01-84 [8] в самом общем виде регламентировали только требования к прочности и долговечности соединений, оговаривая, что они должны обеспечиваться с помощью различных конструктивных и технологических мероприятий.

В отличие от указанных норм в СНБ 5.03.01-02 [9] в подразделе 12.1 установлены более конкретные указания, касающиеся расчета соединения и соединяемых элементов. В частности установлено, что «при расчете сборных элементов следует учитывать влияние действительной деформативности и прочности соединений между ними...».

В Европейских нормах проектирования железобетонных конструкций [10] в подпункте 10.5.1(1) главы 10 «Дополнительные правила для сборных железобетонных элементов и конструкций» установлено, что:

«Расчет конструкций должен учитывать:

– поведение конструктивных элементов на всех стадиях строительства с использованием соответствующей геометрии и свойств для каждой стадии, их взаимодействие с другими элементами (например, совместная работа с монолитным бетоном, другими сборными элементами);

– поведение конструктивной системы, на которое влияет поведение соединений между элементами, с особым учетом возможной деформации и прочности соединений;

– неопределенности, возникающие вследствие ограничений и передачи усилия между элементами вследствие отклонений в геометрии и в положении элементов и опор».

В связи с этим проблема расчета сборных железобетонных элементов с учетом действительных условий их взаимодействия является актуальной и требует своего решения.

Роль узлов сопряжения железобетонных элементов в конструктивной системе каркасного здания

Конструктивная система каркасного здания состоит, как правило, из линейных (колонны, ригели) или плоских (диафрагмы, плиты) сборных железобетонных элементов, соединенных определенным образом друг с другом в узлах сопряжения. Таким образом, узлы сопряжения играют важную роль в создании собственно конструктивной системы здания.

Основная роль узлов сопряжения заключается в обеспечении неизменяемости взаимного положения элементов, обеспечении передачи расчетных усилий между ними и обеспечении пространственной жесткости каркаса здания.

Узловые сопряжения могут быть классифицированы по следующим признакам:

- по типам стыкуемых элементов;
- по способу передачи усилия и связанным с ним конструктивными особенностями.

По типам стыкуемых элементов сопряжения разделяются на следующие виды:

- стык колонн с фундаментами;
- стыки колонн друг с другом (в многоэтажных зданиях);
- стыки ригелей с колоннами (в многоэтажных зданиях);
- узлы опирания стропильных и подстропильных конструкций на колонны (в одноэтажных зданиях);
- узлы опирания подкрановых балок на колонны (в одноэтажных зданиях).

По способу передачи усилия и связанным с ним конструктивными особенностями сопряжения разделяются на стыки стальные и железобетонные.

К первым относятся стыки, в которых передача усилия выполняется через специальные закладные изделия, приваренные к рабочей арматуре стыкуемых элементов. Эти закладные изделия соединяются между собой сваркой или болтами.

Ко вторым относятся стыки, в которых через специальные закладные изделия передают только растягивающие усилия, а сжимающие усилия передают через контактирующие бетоны элементов или через раствор, уложенный между ними.

В большинстве случаев в узлах сопряжения под действием усилий возникает сложное напряженное состояние, которое существенно сказывается на состоянии примыкающих частей сопрягаемых элементов. В связи с этим расчете и конструировании узлов сопряжения всегда сопровождается расчетом опорных частей элементов.

Цель и задачи проектирования узлов сопряжения

Целью проектирования узлов сопряжения является обеспечения с требуемым уровнем надежности несущей способности и эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций каркасного здания на всех стадиях их жизненного цикла (возведение, эксплуатация, реконструкция, демонтаж).

Достижение поставленной цели достигается последовательным решением ряда взаимосвязанных между собой задач:

1. Выбор конструктивной формы узлов сопряжения (с выбором материалов, назначением геометрических габаритов сопрягаемых элементов), обеспечивающей несущую способность конструктивной системы каркасного здания на всех циклах ее формообразования.

2. Выполнение статических расчетов несущих систем каркасного здания, последовательно создающихся в процессе их формообразования, на действие возникающих при этом нагрузок.

3. Выполнение проверок несущей способности узлов сопряжения и примыкающих к ним участков сборных элементов на всех этапах формообразования несущей системы.

Для достижения этих задач необходимо использовать научно обоснованную методику расчета узлов сопряжения, основанную на экспериментальных и теоретических исследованиях напряженно-деформированного состояния соединений различного типа между сборными железобетонными элементами.

При этом статический расчет должен выполняться по уточненным расчетным схемам каркаса здания и сооружения в целом, учитывающим условия взаимодействия сборных железобетонных элементов в соединениях между ними.

Принципы проектирования узлов сопряжения

При проектировании следует руководствоваться общими принципами формообразования строительных конструкций [11] и построения расчетных моделей систем [12], адаптированными применительно к узлам сопряжения.

Принцип безопасности. Узлы сопряжения должны разрабатываться с такими геометрическими параметрами элементов узла и физико-механическими характеристиками материалов, которые необходимы и достаточны для обеспечения безопасности несущей системы каркасного здания.

Принцип самосохранения. Узлы сопряжения должны обладать определенными ресурсами поглощения и рассеивания энергии в процессе своего необратимого деформирования, обеспечиваемыми достаточной пластичностью материалов, соответствующим подбо-

ром композиции материалов, специально создаваемой структурированностью элементов узла сопряжения и их дублированием.

Принцип управляемости. В структуру узла сопряжения на различных стадиях формообразования несущей системы здания должны включаться (при необходимости) дополнительные элементы, обеспечивающие управление напряженно-деформированным состоянием несущей системы, реакциями внутренних связей и т.п.

В связи с тем, что жесткостные параметры узлов сопряжения зависят от их конструкции, то целенаправленно изменяя конструктивное решение узлов можно регулировать усилия в каркасе здания и сооружения, что создает предпосылки для более рационального проектирования элементов каркаса

Принцип композиции материалов. В системе узла сопряжения для соответствующих элементов должны применяться материалы, которые с наибольшей степенью должны проявлять свои прочностные и деформативные свойства при том напряженно-деформированном состоянии, которое возникает в этих элементах.

Принцип технологичности. Элементы узла сопряжения должны проектироваться таким образом, чтобы при принятой геометрической форме, соотношении размеров и допусках обеспечивалась возможность применения наиболее эффективных технологий изготовления сопрягаемых в узле конструкций, их монтажа и эксплуатации.

Принцип структурирования. При решении перечисленных выше задач сборные элементы и соединения каждый на своем иерархическом уровне (по отношению к каркасу здания в целом) должны рассматриваться как механические модели различной сложности.

Одним из направлений совершенствования теории расчета конструкций является наиболее полный учет условий их взаимодействия. При этом термин "взаимодействие" применительно к теории расчета железобетона должен рассматриваться в рамках различных иерархических уровней:

1) уровень зданий и сооружений, т.е. систем конструктивных элементов — взаимодействие отдельных конструкций друг с другом по их контактам;

2) уровень отдельного конструктивного элемента (после образования трещин) — взаимодействие отдельных расчетных блоков по их контакту в сжатой и растянутой зонах;

3) уровень отдельного расчетного блока — взаимодействие бетона и стали по их контакту;

4) уровень бетона как композитного материала — взаимодействие компонентов структуры бетона (матрица в виде затвердевшего цементно-песчаного раствора и зерна крупного заполнителя).

Представленная иерархия уровней может быть еще расширена, например, в направлении структуры матрицы бетона, однако в целом отвечает задачам расчета железобетонных конструкций в современном понимании. Поскольку взаимодействие элементов нижнего уровня в рамках рассматриваемого иерархического уровня осуществляется по контактам, вполне обоснованно применение в рассматриваемом круге задач теории железобетона термина «контактное взаимодействие».

При контактном взаимодействии железобетонных конструкций передача усилия происходит по площади контакта, которая, как правило, имеет ограниченные размеры, занимает сравнительно небольшую часть нагружаемой плоскости конструкций. Усилие при контактном взаимодействии концентрируется только по небольшой части нагружаемой плоскости конструкций. В этой связи вполне правомерно использовать термин «концентрированное действие нагрузки».

Проведенные во многих странах экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций показали, что при концентрированном приложении нагрузки возможно несколько схем разрушения, характеризующихся доминирующим проявлением какого-либо компонента напряженно-деформированного состояния бетона.

Для стыковых соединений каркасных зданий в наибольшей степени характерна передача значительных по величине усилий сжатия от одного элемента к другому, что вызывает образование сложного напряженного состояния в бетоне, называемого местным сжатием. При этом размеры площади приложения нагрузки соизмеримы с размерами частиц крупного заполнителя, что способствует дополнительному увеличению уже имеющихся внутренних напряжений в

бетоне, обусловленных прочностными и деформативными свойствами составляющих бетона.

В связи с этим рассмотрение вопросов прочности и деформативности бетона при местном сжатии должно базироваться на структурном подходе к бетону как к сложной многокомпонентной системе.

Принцип адекватности. Исходя из принципа адекватности, расчетная модель узла сопряжения тем более совершенна, чем большим количеством свойств оригинала она наделена.

Принцип обсчитываемости. Принцип обсчитываемости предполагает, что расчетная модель узла сопряжения должна быть обсчитываемой, т.е. должен существовать соответствующий математический аппарат для ее решения.

Принцип соответствия. Суть принципа соответствия состоит в том, математический аппарат, описывающий свойства новой расчетной модели узла сопряжения, должен быть более общим по сравнению с тем, что применяется для старой расчетной модели.

Принцип рациональности модели. При разработке расчетной модели узла сопряжения или несущей системы каркасного здания следует принимать во внимание, что ее сложность, а, следовательно, и точность модели, не должна быть точнее исходных данных, используемых в расчете.

Особенности учета нелинейности деформирования узлов сопряжения в несущей системе каркасных зданий

По своей жесткости узлы сопряжения могут быть классифицированы как жесткие, упругоподатливые и шарнирные.

Как правило, в целях упрощения в расчетных схемах каркасных зданий стыки принимаются или жесткими, например, стык колонны с фундаментом или шарнирными, например, узел опирания стропильной конструкции на колонну.

В большинстве случаев стыки обладают определенной жесткостью и должны учитываться в расчетах как упругоподатливые. Причем податливость стыка может зависеть от уровня нагрузки, увеличиваясь с ее ростом. Кроме того, узлы сопряжения сами в свою очередь являются сложной системой переменной жесткости, зависящей не только от величины усилий, но от направления их

направления. В этом случае можно говорить о конструктивно-нелинейной работе узлов.

Нелинейность деформирования узлов сопряжений обусловлена в первую очередь физической нелинейностью деформирования материалов (бетона и арматуры).

Для большинства типов узлов сопряжения сборных железобетонных элементов характерно проявление конструктивной нелинейности, а именно изменения расчетной схемы узла сопряжения при увеличении нагрузки или изменении направления усилия.

Кроме того, когда по мере формообразования несущей системы изменяется сама конструкция узла (набор его элементов), проявляется так называемая генетическая нелинейность, при которой расчетная схема узла сопряжения изменяется не в связи с изменением нагрузки, а целенаправленно при проектировании.

В связи со сложностью работы узлов реальное их поведение под нагрузкой предсказать расчетом, как правило, не представляется возможным и в этом случае проводят специальные экспериментальные исследования опытных образцов. На основе анализа результатов этих исследований разрабатывается расчетная модель узла сопряжения, позволяющая адекватно оценить его несущую способность и деформативность.

Другим путем исследования деформирования узлов сопряжения является использование метода конечных элементов, когда узлы сопряжения моделируются системой объемных и линейных конечных элементов, упругих или неупругих связей и т.п.

Путем многократных расчетов при действии нагрузки определяют диаграмму деформирования узла сопряжения, с использованием которой осуществляют статический расчет несущей системы каркасного здания. При этом в качестве обобщенной характеристики материала следует использовать диаграмму его деформирования при сжатии и растяжении, определенную при средних значениях деформативных и прочностных его характеристик.

Заключение

1. Учет действительных условий взаимодействия сборных железобетонных элементов является важным направлением совершенствования теории и практики расчета железобетонных конструкций.

2. Рассмотрены требования различных нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций, касающиеся проектирования узлов сопряжения сборных железобетонных элементов.

3. Рассмотрена роль узлов сопряжения железобетонных элементов в конструктивной системе каркасного здания.

4. Сформулированы цель и задачи проектирования узлов сопряжения сборных железобетонных элементов каркасных зданий.

5. Представлены основные принципы проектирования узлов сопряжения, базирующиеся на общих принципах формообразования строительных конструкций и построения расчетных моделей систем.

6. Рассмотрены особенности учета нелинейности деформирования узлов сопряжения сборных железобетонных элементов в несущей системе каркасных зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздев, А.А. О нормах проектирования строительных конструкций / А.А. Гвоздев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – № 6. – С. 79.

2. Клевцов, В.А. Действительная работа предварительно напряженных железобетонных конструкций покрытий производственных зданий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / В.А. Клевцов; НИИЖБ. – М., 1978. – 48 с.

3. Краснощеков, Ю.В. Научные основы исследований взаимодействия элементов железобетонных конструкций: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01/ Ю.В. Краснощеков; СибАДИ. – Омск, 2001. – 38 с.

4. Трекин, Н.Н. Пространственная работа несущих элементов каркасной системы многоэтажных зданий с учетом нелинейности и податливости узловых соединений: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Н.Н. Трекин. – М., 2003. – 43 с.

5. Мамин, А.Н. Расчет железобетонных конструкций многоэтажных зданий с учетом нелинейности и изменяющейся податливости на основе многоуровневой дискретизации несущих систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / А.Н. Мамин. – М., 2004. – 221 л.

6. Шилов, А.Е. Железобетонные центрифугированные двухветвевые колонны одноэтажных производственных зданий: Авто-

реф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.Н. Шилов; БГПА. – Минск, 1994. – 24 с.

7. Фархат, М.Х. Крановые центрифугированные одноветвевые колонны одноэтажных производственных зданий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М.Х. Фархат; БГПА. – Минск, 1994. – 24 с.

8. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М: ЦИТП Госстроя ССС, 1989. – 80 с.

9. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Мн.: РУП «Минсктиппроект», 2003. – 140 с.

10. ТКП EN 1992-1-1-2009. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1: Общие правила проектирования и правила проектирования зданий/ Минск: Минстройархитектуры РБ, 2010. – 191 с.

11. Фридкин, В.М. Формообразование строительных конструкций: монография / В.М. Фридкин. – М.: МГСУ, 2011. – 171 с.

12. Волков, С.Д. Статистическая механика композитных систем. / С.Д. Волков, В.П. Ставров. – Мн.: Изд-во БГУ, 1978. – 208 с.