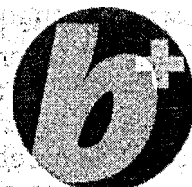




АС'05



АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО – 2005

ARCHITEKTUR UND BAUWESEN – 2005

I Международный научно-практический семинар
I Internationales wissenschaftlich-praktisches Seminar

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПРЕДЫСТОРИИ ИХ РАБОТЫ

Лазовский Д.Н.¹, Глухов Д.О.²

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Вопросу учета предыстории нагружения моделируемых железобетонных конструкций посвящено множество научных публикаций. Эта тема рассматривается под разными углами. Мы хотим получить модель более адекватную изучаемому объекту, чем модели, которыми мы располагаем на сегодняшний день.

В идеальном варианте хотелось бы выполнять расчет железобетонной конструкции с учетом физической и геометрической нелинейности, детально рассматривая каждое возможное нагружение, проверяя все возможные комбинации усилий, прилагаемые в различных последовательностях, моделируя нелинейную нагрузку, учитывая реологические свойства материалов конструкции, ее фундамента, грунта, учитывая температурные нагрузки и сезонные колебания температуры и влажности на стадии возведения, моделировать контакт разнородных материалов и при этом выполнить подбор оптимального армирования конструкции, обеспечивающий прочность и эксплуатационные свойства при минимальном расходе арматуры.

Однако такая модель на сегодняшний день лишена смысла, поскольку даже производительность современных суперкомпьютеров не позволит выполнить анализ за конечное время. Помимо этого мы никогда не будем располагать точной информацией о реальных свойствах материалов на каждом этапе, в каждой точке конструкции.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поэтому наука идет по пути идеализации и упрощения модели с применением теории математической статистики. Но ряд факторов мы можем моделировать уже сейчас. Такими факторами являются:

1. Изменение расчетной схемы конструкции по этапам ее возведения под действием постоянных и технологических нагрузок на каждом этапе возведения с учетом геометрически изменяемой расчетной схемы;

¹ Лазовский Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Полоцкий государственный университет (ПГУ)

² Глухов Дмитрий Олегович, кандидат технических наук, доцент, Полоцкий государственный технический университет (ПГУ)

2. Изменение расчетной схемы конструкции по этапам ее возведения под действием постоянных и технологических нагрузок на каждом этапе возведения с учетом физически изменяемой расчетной схемы;

3. Учет реологических изменений свойств материалов, включающихся в работу на ранних этапах возведения здания.

Наша задача заключается в том, чтобы предложить методику расчета с учетом поэтапного изменения расчетной схемы, свойств материалов и жесткостей элементов, сходящегося к устойчивому результату за конечное число вычислительных операций

Работы по реализации возможности расчета с моделированием поэтапного возведения здания ведутся практически всеми разработчиками строительных САПР. Однако проведение нелинейных споров вызывает вполне обоснованные возражения. Можно сказать, что учет любой нелинейности разрушает принцип суперпозиции и, тем самым, ставит крест на автоматическом определении расчетных сочетаний РСУ. Однако нелинейный расчет для заданной статической комбинации длительной нагрузки показывает существенные, по нашим экспериментальным данным до 30 %, отличия в распределении усилий, что, в принципе, нельзя игнорировать. На рис. 1, 2 представлены опытные прогибы ригелей и стоек испытанной нами рамы (кривые Exp 1 и Exp 2), а также данные, полученные на основе расчета по предлагаемой методике (кривая Calc) и линейного расчета (кривая Linear).

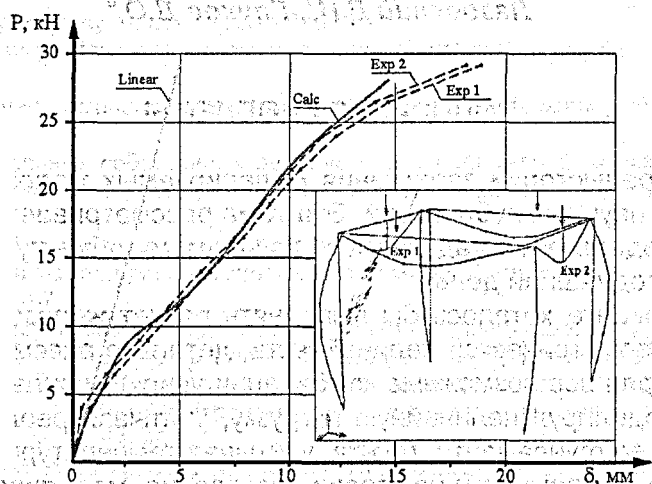


Рисунок 1 – Зависимость прогиба наиболее загруженного ригеля от сосредоточенной нагрузки на раму

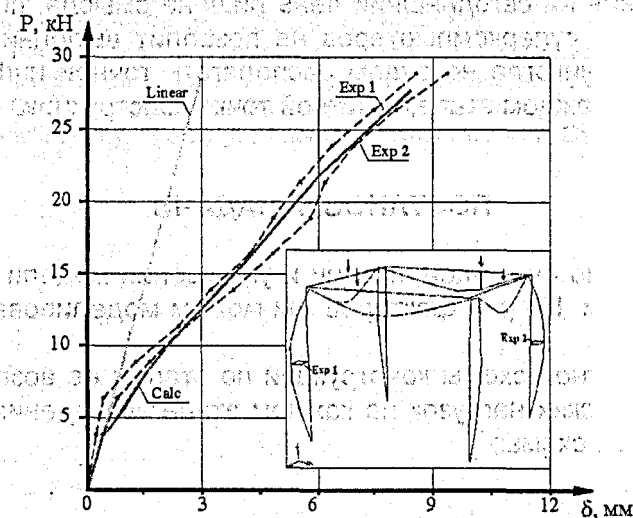


Рисунок 2 – Зависимость прогиба наиболее загруженной стойки от сосредоточенной нагрузки на раму

Отдельные программы способны учитывать отдельные особенности, например, влияние сезонных колебаний температуры на процесс возведения здания (Etap), поэтапно геометрически изменяемую расчетную схему (SCAD 7.31 R5; NASTRAN), изменение жесткостей элементов и перераспределение усилий (RADUGA 2.0.11e).

Пришло время комплексного системного подхода к учету факторов, влияние которых на результат расчета существенно.

Разработчики программного комплекса SCAD предложили способ моделирования поэтапного возведения конструкции, а именно метод подмены модели. Нами ведутся работы в направлении совместной реализации усовершенствованного метода подмены модели с использованием комбинирования деформационной модели сечений, реализованной в программе БЕТА, с конечно-элементной моделью пространственной статически неопределимой конструкции.

Такая стыковка выполнена с программой конечно-элементного анализа стержневых статически неопределимых конструкций RADUGA, ограничением последней является невозможность учета различных комбинаций при моделировании поэтапного возведения здания. Расчет выполняется только для заданной статической нагрузки.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Деформационная модель напряженно-деформированного состояния нормального сечения железобетонного элемента, работающего с учетом истории нагружения, представляет собой систему трёх сингулярных нелинейных уравнений интегрального вида [1] [6]:

$$\begin{cases} M_y = - \iint_C \sigma(\varepsilon(x, y))(y - y_0) dx dy + N(y_{0e} - y_0) \\ M_x = - \iint_C \sigma(\varepsilon(x, y))(x - x_0) dx dy + N(x_{0e} - x_0) \\ N = \iint_C \sigma(\varepsilon(x, y)) dx dy \\ \varepsilon(x, y) = \varepsilon_z - \frac{1}{r_x}(x - x_0) - \frac{1}{r_y}(y - y_0) + q_{\text{остаточное}} \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma(\varepsilon(x, y))$ – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры; $\varepsilon(x, y)$ – продольные деформации элементарной площадки бетона или арматуры; x_0 и y_0 – расстояние от центра изгиба сечения, нейтральной точки, до соответственно оси x и y ; x_{0e} и y_{0e} – расстояние от места приложения продольного усилия до соответственно оси x и y ; N – продольная сила от действия внешней нагрузки; $\frac{1}{r_x}$ и $\frac{1}{r_y}$ – кривизна продольной оси элемента относительно соответственно оси x и y ; $q_{\text{остаточное}}$ – остаточные деформации от предварительного напряжения элемента до усиления, добавочные деформации от нагрузки до рассматриваемого этапа нагружения.

При расчете по данной модели принимается гипотеза плоских сечений в постановке В.И. Мурашева - Я.М. Немировского для средних продольных деформаций растянутой и сжатой зоны, которая, по сути, справедлива только для центральных по длине элемента нормальных сечений при деформировании на изгиб. Однако, принимая во внимание малость искажений распределения основных деформаций от линейного, можно экстраполировать модель на более широкий класс нормальных сечений. А именно на сечения по всей длине элемента и для различных способов нагружений элемента. [1, 2, 3]

Сама модель лишена предположений относительно способа расчета напряженно-деформированного состояния. Из деформационной модели следует формулировка задачи расчета, как задачи поиска такого расположения плоскости распределения деформаций в 3-х мерном пространстве $\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z\}$; которое бы соответствовало действию на элемент вектора нагрузки, заданного в трехмерном пространстве нагрузок $F = \{M_z, M_y, N\}$. Таким образом, решение задачи ищется в 3-х мерном пространстве.

Вычисление жесткостей элементов пространственной стержневой конструкции при действующих в них внутренних усилиях необходимо для определения напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции по методу конечных элементов. Основное уравнение метода конечных элементов для вычисления перемещений имеет вид:

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F\}, \quad (2)$$

где $\{F\}$ – вектор внешней нагрузки; $[K]$ – матрица жесткости системы.

При выполнении вычислений данный классический вид обычно подвергают процедуре факторизации, что повышает обусловленность задачи и точность найденного решения соответственно при заданных невязках по уравнениям.

Коэффициенты матрицы жесткости $[K]$ вычисляются на основе деформационной модели сечения из выражений (1) при текущей комбинации внутренних усилий следующим образом:

$$\begin{cases} B_x = \iint_C E(x, y) (x - x_0)^2 dx dy \\ B_y = \iint_C E(x, y) (y - y_0)^2 dx dy \end{cases} \quad (4)$$

В общем случае нагружения при действии в железобетонном стержне изгибающих моментов и продольной силы элементарные площадки сечения находятся в различном напряженно-деформированном состоянии. Их деформационные характеристики различны, в связи с этим физическая ось элемента отклоняется от своего первоначального положения. Компоненты отклонения физической оси от действия продольной силы вычисляются при текущей комбинации внутренних усилий на основании касательных модулей деформации каждой элементарной площадки бетона и арматуры $E(x, y)$, определяемый с учетом остаточной деформации:

$$\begin{cases} \Delta_x = \frac{\iint_C E(x, y) (y - y_0) dx dy}{\iint_C E(x, y) dx dy} \\ \Delta_y = \frac{\iint_C E(x, y) (x - x_0) dx dy}{\iint_C E(x, y) dx dy} \end{cases} \quad (3)$$

где x_0, y_0 – расстояния от выбранной оси до центра изгиба сечения.

Корректировка координат узлов расчетной схемы на каждом этапе расчета производится путем суммирования перемещений узлов системы, полученных из уравнения (2), и отклонений физической оси конечных элементов, полученных из выражения (3).

Для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии статически неопределимых нелинейно деформируемых конструкций усовершенствовано предложение В.М. Бондаренко [2] о двухуровневом итерационном алгоритме, суть которого в сочетании процессов внутренних и внешних итераций и решении задачи с помощью последовательных приближений. Данный алгоритм расчета пространственных рам не всегда обеспечивает гарантированную сходимость вследствие возможной "раскачки" искомых величины на соседних итерациях, т.е. расхождения численных значений внутренних усилий в ряде последовательных внешних итераций. Это явление наиболее сильно проявляется в общем случае нагружения. С тем чтобы уменьшить "раскачку" и получить решение с минимальным объемом вычислений, необходима организация итерационного процесса с плавно изменяющейся расчетной жесткостью элементов. Для того чтобы доверять полученному решению нелинейной задачи, необходимо повторить расчет с иным количеством шагов нагружения. Для этого введено понятие "макроитерационный процесс". Выполнение макроитераций подразумевает повторное (двух- или многократное) решение задачи с последующим сравнением полученных результатов. Операция осуществляется до получения решения с заданной точностью.

Таким образом, предлагаемый метод расчета статически неопределимых систем с учетом нелинейности деформирования включает в себя три итерационных процесса:

1) во внутренних итерациях – расчет по деформационной модели коэффициентов матрицы жесткости конечных элементов при заданных внутренних усилиях, полученных в результате выполнения одной внешней итерации;

2) во внешних итерациях – статический расчет системы при заданных жесткостях элементов системы по методу конечных элементов, на каждой последующей итерации нагрузка ступенчато увеличивается;

3) полностью выполненный внешний итерационный процесс составляет одну макроитерацию. Переход на более высокий уровень происходит после выполнения всех необходимых итераций на нижележащем уровне. Обратный переход осуществляется после одного шага итерации на вышележащем уровне.

На первой внешней итерации матрица жесткости $[K]_{(1)}$ определяется из соотношений (1) при нулевом значении внутренних усилий. Далее из решения системы уравнений (2) определяется первое приближение поля узловых перемещений $\{\Delta\delta\}_{(1)}$ от действия нагрузки $\{F\}$. Вычисляются внутренние усилия $\{\bar{F}\}_{(1)}$ элементов системы, на основании которых формируется матрица жесткости $[K]_{(2)}$ для второй внешней итерации и т.д. В дальнейшем на j -той итерации матрица $[K]_{(j)}$ строится на основе $\{\bar{F}\}_{(j-1)}$, из решения (2) определяется $\{\delta\}_{(j)}$, на основе которого снова вычисляется $\{\bar{F}\}_{(j)}$ и т.д. Внешний итерационный процесс считается законченным, когда поэтапно приложена вся внешняя нагрузка $\{F\}$. Корректировка геометрии расчетной схемы, необходимая для учета перемещения узлов и отклонения физической оси элементов системы, осуществляется на каждой внешней итерации. Для этого на основе известных усилий в конечных элементах вычисляется поле отклонений физической оси (3) и суммируется с учетом направления с полем узловых перемещений (2) на предыдущей итерации.

Количество макроитераций, соответствующее решению с требуемой точностью, предлагается определять следующим образом:

1) первоначально осуществляется внешний итерационный расчет с минимальным количеством шагов нагружения;

2) осуществляется новый внешний итерационный расчет, количество этапов нагружения увеличивается;

3) сравниваются два предыдущих результата на соответствие последнего заданной точности. Если точность не обеспечивается, осуществляется новый внешний итерационный расчет с большим количеством этапов нагружения до тех пор, пока не выполнится условие требуемой точности. Проверка сходимости и оценка результатов по ожидаемой точности производится по всем сечениям и элементам.

Расчет считается законченным, когда на текущей и предыдущей макроитерации значения жесткостей, усилий в элементах и перемещений узлов конструкции соответствуют заданной точности.

В рамках представленной методики предложен способ улучшения сходимости итерационного процесса путем усовершенствования известного метода "закрепления минимальных жесткостей". Данный метод модифицирован таким образом, чтобы стало возможным применение его в отношении пространственных конструкций, имеющих в своем составе элементы в общем случае нагружения.

Полученная таким образом модель обладает рядом важных свойств:

4. Модель требует дополнительных ограничений, накладываемых на итерационный процесс последовательного приближения к результату вычисления, в виде малости шага наращивания нагрузки, учета перераспределения усилий и изменения других свойств модели;

5. Модель требует системы идентификации расчетных ситуаций, таких как циклические колебания модели, разрушение по причине потери устойчивости, контроля невязок;

6. Модель требует большого количества вычислительных операций.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована и экспериментально апробирована методика расчета статически неопределимых пространственных стержневых железобетонных конструкций, позволяющая учитывать произвольный вид напряженно-деформированного состояния поперечного сечения, армирование, свойства материалов, геометрические размеры конструкции, условия закрепления и т.д. Кроме того, методика предоставляет возможность установить фактическое распределение усилий по длине элементов, а также получить на единой методической основе информацию о напряженно-деформированном состоянии элементарных площадок поперечных сечений на всех этапах загрузки. Представленная методика позволяет выполнять как физически нелинейный расчет, за счет поэтапной корректировки физических параметров системы, так и геометрически нелинейный, за счет учета перемещения узлов конструкции и отклонения физической оси ее элементов. Методика позволяет фиксировать на каждом этапе возведения конструкции системы остаточных деформаций, изменение расчетной схемы для заданной статической нагрузки.

2. Выполнены экспериментальные исследования, получены новые данные о характере деформирования, образования и развития трещин в статически неопределимых пространственных железобетонных рамах, свидетельствующие о непрерывном изменении жесткости и перераспределении внутренних усилий в элементах конструкции на всех этапах ее загрузки. Эксперимент продемонстрировал пространственный характер работы стержневых конструкций, состоящих из плоских рам, жестко объединенных между собой.

3. Сформулирована система соотношений для определения жесткости элементов в виде, позволяющем выполнять физически нелинейный расчет статически неопределимых пространственных стержневых железобетонных конструкций по методу конечных элементов. На основании численных экспериментов установлено влияние внутренних усилий на компоненты жесткости железобетонного элемента в нормальном сечении.

4. Для обеспечения необходимой точности расчета предложен способ оптимального разбиения расчетной схемы на конечные элементы, учитывающий фактическое напряженно-деформированное состояние конструкции. На основе численных исследований установлена минимально необходимая степень дискретизации одного стержня расчетной схемы для получения решения с заданной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский Д.Н., Глухов Д.О. Алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния нормального сечения усиленного железобетонного элемента / Сборник научных трудов «Повышение качества строительных работ, материалов и проектных решений. Вып. 2» / Под ред. В.И.Микрина, М.А.Сенюченкова, А.В.Городкова, В.М.Кожухара. — Брянск: БГИТА, 2000.
2. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. — М.: Стройиздат, 1982. — 287с.
3. Сидорович Е.М. Нелинейное деформирование, статическая и динамическая устойчивость пространственных систем. — Мн.: БГПА, 1999. — 200с.
4. Альхарари Ваэль Ахмад. Напряженно-деформированное состояние и расчет изгибаемых железобетонных элементов с учетом предыстории загрузки: Дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Полтавский гос. технический ун-т им. Юрия Кондратюка. — Полтава, 1999. — 131л. — Библиогр.: л. 103-113.
5. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. — М.: Стройиздат, 1982. — 287с.
6. Ernst G.C., Smith G.M., Riveland A.R., Pierce D.N. Basic reinforced concrete frame performance under vertical and lateral loads // *ACI Journal*, 70(28) — 1973. — P. 261 — 269.
7. Benmokrane B., Chaallal O., Masmoudi R. Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FPR Reinforcing Bars // *ACI Structural Journal*, January-February, 1996. — P. 46 — 55.
8. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. — Новополоцк: Изд-во Полоцкого гос. ун-та, 1998. — 280с.: ил. — ISBN 985-418-039-5