

ГЛАВА 11. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ

Общие положения

Нелинейный процессор предназначен для решения физически и геометрически нелинейных задач, а также задач с наличием конструктивной нелинейности и предварительного напряжения.

В линейных задачах существует линейная зависимость между нагрузками и перемещениями вследствие малости перемещений. Напряжения (усилия) и деформациями связаны также линейным законом Гука. Поэтому для линейных задач справедлив принцип суперпозиции и независимости действия сил.

В физически нелинейных задачах отсутствует линейная зависимость между напряжениями и деформациями. Материал конструкции подчиняется нелинейному закону деформирования (нелинейная упругость). Закон деформирования может быть симметричным и несимметричным – с различными пределами сопротивления растяжению и сжатию. Решение этих задач производится шаговым методом.

В геометрически нелинейных задачах отсутствует линейная зависимость между деформациями и перемещениями. На практике наибольшее распространение имеет случай больших перемещений при малых деформациях. Решение этих задач производится шаговым методом, причем шаг выбирается автоматически.

В задачах конструктивной нелинейности имеет место изменение расчетной схемы по мере деформирования конструкции. Так, например, в контактных задачах при достижении некоторой точкой конструкции определенной величины перемещения возникает контакт этой точки с опорой.

При решении задач конструктивной нелинейности, а также при решении задач с односторонними связями и задач, учитывающих наличие трения, применяется шагово-итерационный метод.

При решении задач, моделирующих упруго-пластическую работу материала, описываемую диаграммой Прандтля, также применяется шагово-итерационный метод.

Для решения нелинейных задач процессор организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения. В работе [16.13] приведены геометрическая и физическая интерпретации, доказательство сходимости и оценка погрешности для наиболее распространенных методов решения нелинейных задач.

Для решения физически нелинейных задач шаговым методом необходимо задавать информацию о количестве шагов и коэффициентах к нагрузке. Схема может содержать несколько нагружений, из которых допускается формировать последовательность (историю) нагружений.

11.1 ФИЗИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Моделирование физической нелинейности (нелинейной упругости) материалов конструкций производится с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию из развитой библиотеки законов деформирования материалов (зависимо-

стей $\sigma - \varepsilon$). Библиотека законов деформирования позволяет учитывать практически любые нелинейные свойства материала. Эта библиотека законов деформирования материала является библиотекой открытого типа и может пополняться новыми законами.

Нелинейный процессор позволяет получить напряженно-деформированное состояние с учетом нелинейных эффектов как для мономатериальных, так и для биматериальных конструкций. Для последних предлагается определенный набор характеристик второго материала (армирующих включений).

Библиотека физически нелинейных конечных элементов содержит также элементы, позволяющие моделировать одностороннюю работу твердого тела и сыпучей среды – грунта на сжатие, с учетом сдвига в соответствии с законом Кулона.

Матрица жесткости линейризованной физически нелинейной системы формируется на основании переменных интегральных жесткостей, вычисляемых в точках интегрирования конечного элемента при решении упругой задачи на конкретном шаге. Схема численного интегрирования по области конечного элемента и набор используемых жесткостей определяются типом конечного элемента. Чтобы получить соответствующий набор интегральных жесткостей, сечение конечного элемента в точках интегрирования дробится на ряд элементарных подобластей. В центрах этих подобластей определяются новые значения физико-механических характеристик материала в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом шаге решается линейризованная задача с формированием векторов перемещений, усилий и новых интегральных жесткостей по касательному модулю для последующего шага. Количество шагов и коэффициенты к нагрузке задаются пользователем. Геометрическая интерпретация шагового метода для случая одноосного растяжения (сжатия) представлена на рисунке 11.1.

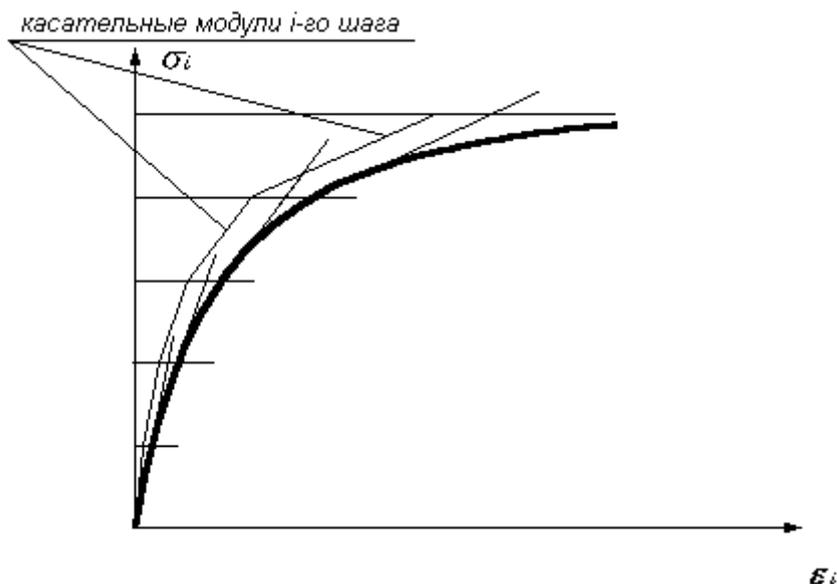


Рисунок 11.1 Геометрическая интерпретация шагового метода для случая одноосного растяжения (сжатия)

Шаговый процессор позволяет комбинировать линейные и нелинейные конечные элементы.

На каждом шаге производится оценка напряженно-деформированного состояния. В разделе результатов расчета «Сведения о состоянии материалов» приводятся сообщения о развитии или достижении предельных состояний, появлении пластических шарниров или состояний разрушения.

Для стержневых конечных элементов анализируется напряженно-деформированное состояние поперечных сечений стержня в точках дробления. Напряженно-деформированное состояние в плоских и объемных конечных элементах анализируется в центральной точке элемента.

В результате расчета физически нелинейных задач, кроме перемещений узлов и напряжений (усилий) в элементах, вырабатывается информация о состоянии материала в элементах конструкции. Эта информация размещается в таблице сведений о состоянии материала и содержит сообщения о поведении физически нелинейного материала в процессе пошагового приложения нагрузки. Причем таблица формируется в том случае, если в процессе решения задачи материал сечения был частично или полностью разрушен, а также, если в процессе шагового расчета в каком-либо сечении образовался пластический шарнир. В противном случае таблица остается пустой. В сообщениях указывается процент разрушения сечений элементов, как по основному, так и по армирующему материалу. Процент разрушения материала вычисляется на основании заданной величины дробления. При образовании в сечении пластического шарнира печатается соответствующий текст и величина предельного момента.

Более подробная информация о конечных элементах, учитывающих физическую нелинейность, содержится в Главе 16.

11.2 ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Моделирование геометрической нелинейности производится с помощью соответствующих нелинейных конечных элементов. Для геометрически нелинейных задач применяется шаговый метод с автоматическим выбором шага.

Более подробная информация о конечных элементах, учитывающих геометрическую нелинейность, содержится в Главе 16.

11.3 ФИЗИЧЕСКАЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Более подробная информация о конечных элементах, учитывающих геометрическую нелинейность, а также одновременно физическую и геометрическую, содержится в Главе 16.

11.4 КОНСТРУКТИВНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ

Для решения задач конструктивной нелинейности используется шагово-итерационный метод.

Моделирование конструктивной нелинейности обеспечивается специальными конечными элементами односторонних связей, работающими только на сжатие (растяжение). Такие задачи решаются итерационными методами. Если на какой-либо из итераций усилие в связи стало больше (меньше) предельного, то на последующей итерации связь выключается из работы. В разряд специальных конечных элементов отнесен также и физически нелинейный стержень, моделирующий предварительное натяжение.

Подробный обзор существующих методов расчета нелинейных задач приведен в работе [16.13]. Там же приводятся доказательства их сходимости и оценка даваемой ими погрешности.

11.5 МОНТАЖ

Расчетно-графическая система **МОНТАЖ** предназначена для компьютерного моделирования процесса возведения сооружений, в том числе и высотных зданий с монолитными железобетонными конструкциями каркаса. В процессе компьютерного моделирования сооружений из железобетона могут быть учтены климатические условия, при которых происходит замораживание или оттаивание уложенной бетонной смеси. Такой учет реализуется с помощью задания коэффициентов понижения или повышения прочности и модуля деформации бетона на различных стадиях возведения.

На каждой стадии возведения производится расчет соответствующей конструктивной схемы здания, содержащей элементы, смонтированные (или демонтированные) к этому моменту. При этом производится учет текущих прочности и модуля деформации бетона, а также наличия временных стоек опалубки. На каждой стадии такого расчета определяется количество арматуры во всех сечениях железобетонных элементов (колонн, плит перекрытий, диафрагм жесткости). Если проектной арматуры или проектного железобетонного сечения оказывается недостаточно, то выдается информация о необходимости корректировки проектных решений.

В графической системе создается расчетная схема законченного сооружения. Она должна содержать все элементы сооружения – как монтируемые, так и демонтируемые. Однако монтаж элементов может быть выполнен только один раз.

После того как схема со всеми ее атрибутами создана, необходимо сформировать монтажную таблицу.

Монтажная таблица содержит три набора данных:

1. Стадии. Для каждой стадии возведения указываются элементы, которые будут смонтированы и демонтированы. Допускаются пустые стадии. Обозначим общее количество стадий возведения m .

 *Пустая стадия имеет состав элементов, соответствующих предшествующей стадии. Используется только для задания нагрузки.*

Каждой стадии возведения должно соответствовать свое монтажное нагружение. Таким образом, количество стадий и количество монтажных нагружений одинаково и равно m . При этом допускаются пустые монтажные нагружения.

2. Группы. Для каждой группы элементов схемы задаются поправочные коэффициенты – к модулю деформации и к прочности бетона в соответствии с номерами стадий возведения.

 *Поправочные коэффициенты не могут от стадии к стадии принимать убывающие значения.*

Если информация о группах не указана, то характеристики материала остаются неизменными на всех стадиях.

3. Дополнительные загрузки. Для каждой **стадии** задаются номера дополнительных загрузок и коэффициенты (в том числе нулевые и отрицательные), с которыми эти загрузки должны учитываться при возведении.

Под дополнительными загрузками подразумеваются такие загрузки, которые присутствуют только при возведении. Это, например, загрузки от складирования строительных материалов, от их перемещения в пределах этажа или с этажа на этаж, и т.п. Эти загрузки задаются под номерами, большими, чем m . Обозначим количество дополнительных загрузок d .

Эксплуатационные нагрузки на завершённое сооружение задаются на послестадийных загрузках.

В результате работы расчетного процессора системы **МОНТАЖ** для элементов вычисляются усилия и напряжения, накапливаемые в процессе возведения.

По умолчанию перемещения узлов в процессе счета не накапливаются, а вычисляются заново для каждой стадии.

При определении армирования в элементах производится отслеживание количества необходимой арматуры по каждой монтажной стадии. Результаты армирования для каждой стадии представлены в виде таблиц, по которым легко оценить, является ли проектное армирование элементов достаточным.