

ПРИЛОЖЕНИЕ К СВИДЕТЕЛЬСТВУ О ВЕРИФИКАЦИИ ПС № 02/ANSYS/2009

Возможности комплекса, подтвержденные верификацией

ANSYS Mechanical – универсальный программный комплекс для решения задач стационарных и нестационарных теории поля (теплопроводность и фильтрация), расчета статического, температурного и динамического напряженно-деформированного состояния и оптимизации пространственных комбинированных конструкций, зданий и сооружений с учетом эффектов физической, геометрической, структурной (контакты с трением) и генетической (история возведения и нагружения) нелинейностей на основе метода конечных элементов.

Виды моделируемых строительных конструкций, зданий и сооружений:

Произвольные пространственные комбинированные (массивно-оболочечно-плитно-стержневые из различных материалов-сред), включая:

- наземные и подземные, высотные и большепролетные, монолитные и панельные, вантовые;
- металлические (стальные, чугунные, сплавы), бетонные, железобетонные, сталежелезобетонные, каменные и кирпичные, деревянные, резиновые и резинометаллические, грунтовые;
- сложные конструктивные узлы.

Граничные (краевые) условия

Задачи теории поля

Заданные температуры (фильтрационное давление) в заданные моменты времени;

Задачи расчета НДС

Заданные перемещения и кинематические связи групп узлов

Нагрузки и воздействия

- заданные тепловые потоки (теория поля);
- статические объемные, поверхностные, линейные и узловые силы и моменты, включая температурные, весовые, снеговые, средние ветровые и др.;
- пульсационная (динамическая) составляющая ветровой нагрузки;
- сейсмические, заданные трехкомпонентными спектрами ответа и акселерограммами;
- силовые динамические, заданные временной реализацией;
- вибрационные, заданные амплитудами и частотами воздействия;
- случайные динамические, заданные спектрально (PSD).

Типы решаемых задач (виды расчетов)

- стационарные задачи теории поля (теплопроводность, фильтрация и т.п.);
- нестационарные задачи теории поля (теплопроводность, фильтрация и т.п.);
- линейные статические;
- собственные частоты и формы колебаний в энергетически значимом частотном диапазоне (частичная проблема собственных значений);
- линейная устойчивость (частичная проблема собственных значений);
- гармонический анализ (установившиеся колебания-вибрации);
- линейно-спектральная теория сейсмостойкости (на спектры ответа);
- спектральный динамический анализ (с разложением по собственным формам колебаний);
- переходные динамические процессы (прямое интегрирование уравнений движения);

- нелинейные статические и динамические (в том числе, “монтаж” и расчет на прогрессирующее обрушение);
- спектральный анализ случайных колебаний;
- оптимизация геометрической формы и структуры.

Нелинейные факторы:

- геометрические нелинейности;
- физическая нелинейность (пластичность, ползучесть, вязкопластичность, гиперупругость....);
- структурная нелинейность (контакты с трением);
- генетическая нелинейность (история возведения-нагружения).

Геометрические нелинейности

- большие деформации;
- большие перемещения;
- упрочнение при нагружении (stress-stiffening).

Модели поведения материалов (включая физическую нелинейность):

- упругие изотропные, трансверсально-изотропные, ортотропные;
- пластичность металлов (теория течения с различными упрочнениями);
- ползучесть металлов;
- вязкопластичность металлов;
- образование трещин в бетоне и железобетоне;
- нелинейная модель кирпичной кладки;
- деревянные клееные;
- гиперупругие (несжимаемые) резиноподобные;
- нелинейная модель грунта (Друкера-Прагера).

Методы решения (расчета)

Метод конечных элементов в перемещениях (для задач определения НДС) с представительной библиотекой КЭ, включающий эффективные “решатели” большеразмерных статических, нестационарных и динамических линейных и нелинейных задач:

- 1) результирующих систем линейных алгебраических уравнений равновесия и теории поля (прямой с учетом разреженности матриц и итерационный, реализующий метод сопряженных градиентов с предобуславливанием);
- 2) частичной проблемы собственных значений (метод итераций подпространства и варианты блочного метода Ланцоша);
- 3) неявные схемы интегрирования по времени редуцированных и исходных уравнений динамики (Ньюмарка, ННТ);
- 4) схема интегрирования по времени уравнений нестационарной теории поля (Хьюджеса);
- 5) Ньютона-Рафсона с автоматическим выбором шага и уравнивающими итерациями для физически и геометрически нелинейных задач;
- 6) “arc-length” (окаймляющих дуг) для задач с большой геометрической нелинейностью, включая учет закритического поведения;
- 7) методы штрафных функций, множителей Лагранжа и их комбинации-расширения для решения контактных задач;
- 8) прямые методы оптимизации «нулевого» и «первого» порядка;
- 9) статус «жизнь» и «смерть» КЭ для решения, в том числе, генетически нелинейных задач;
- 10) суперэлементные схемы произвольной иерархии (статика, переходные процессы, линейная устойчивость, модальный синтез).

Набор верифицированных конечных элементов

Из обширной библиотеки комплекса верифицированы более 50-и типов (подробнее см. в матрицах верификации – составной части верификационного отчета), включая одно-, двух- и трехмерные КЭ, а также их допустимые комбинации в одной КЭ-модели:

- 1) “элементарные” пружины, массы, демпферы и их комбинации;
- 2) стержневые (в т.ч., вантовые), работающие на растяжение и/или сжатие;
- 3) балочно-стержневые с различными гипотезами, учитывающие растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг, кручение, включая возможную деформацию сечения и эксцентриситет;
- 4) оболочечные с различными гипотезами (тонко-, средне- и толстостенные пластины и оболочки);
- 5) плоско-напряженного, плоско-деформированного и осесимметричного состояния теории упругости;
- 6) объемного НДС теории упругости;
- 7) контактные (узловые, линейные и поверхностные) с открытием-закрытием и трением;
- 8) 2-х и 3-х мерные теории поля (теплопроводность, фильтрация и др.);
- 9) матричные (в т.ч., суперэлементы).

Ограничения на размерность

“Подъемные” размерности КЭ-модели (узлов, элементов) и результирующих вычислительных задач (степеней свободы, собственных значений, шагов по времени и т.п.) ограничены доступной оперативной и дисковой памятью ЭВМ, разрядностью процессора и операционной системы, располагаемым временем счета (последнее ограничение может быть снято предоставляемыми возможностями рестартов).

На использовавшейся ПЭВМ (конфигурация WIN XP 64, ОП 8 Гб, задействовано два процессора) зафиксированы следующие показатели для задач «большой» размерности:

6 300 000 степеней свободы (уравнений) для статических задач – 3957с.;

2 099 400 степеней свободы для частичной проблемы собственных значений (определено 7 низших собственных частот/форм)– 5507с.

Возможно решение задач и существенно большей размерности (десятки миллионов неизвестных), особенно при использовании доступной многопроцессорной и кластерной технологии.

Результаты расчетов

Задачи теории поля

- узловые температуры (фильтрационное давление) в заданные моменты времени;
- тепловые потоки и градиенты в КЭ в заданные моменты времени

Задачи расчета НДС

- значимые компоненты узловых перемещений (статика), скоростей и ускорений (динамика);
- реакции в граничных узлах (опорах) и давление на винклеровское основание;
- внутренние усилия (силы и моменты) в точках интегрирования КЭ и узлах;
- компоненты деформаций, главные деформации и эквивалентные деформации (Мизеса, Треска) в точках интегрирования КЭ и узлах, с разделением на упругие, температурные, пластические и ползучие составляющие;
- компоненты напряжений, главные напряжения и эквивалентные напряжения (Мизеса, Треска) в точках интегрирования КЭ и узлах;
- собственные частоты и формы колебаний (требуемое количество или в заданном частотном диапазоне);
- критические нагрузки и формы потери устойчивости;
- амплитуды перемещений, усилий и напряжений для заданных частот вибровоздействия (АЧХ);

- «статус» контакта, длина/площадь, нагрузки на контактных поверхностях, линиях и узлах;
- коэффициенты интенсивности напряжений и J-интегралы (механика разрушения);
- оптимизированные параметры конструкции (форма, сечения,...);
- картины образования трещин в бетонных элементах;
- невязки по силам и перемещениям (нелинейные задачи).

Точность численных результатов

Зависит от класса (типа) задач, “качества” построенной КЭ-модели (сетки) и, в особенности для нелинейных задач, от выбранного метода (схемы) решения. Подробно – в матрицах верификации для решенных задач.

Для линейных задач при соблюдении известных и документированных требований к моделированию точность определения основных параметров поля, статического и динамического НДС составляет менее 1%. Для задач с «глубокой» нелинейностью и(или) при сложных моделях физической нелинейности расхождение с «эталонными» результатами может достигать 15-20%.

Возможность включения собственных конечных элементов, моделей поведения материалов, решателей и т.п.

Реализована с помощью прикомпилируемых пользовательских подпрограмм.

Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПК ANSYS

Встроенных в текст программы физических констант нет. Все физико-механические, геометрические, жесткостные, инерционные и диссипативные характеристики задаются явно в исходных данных.

Официальные эксперты

Начальник отдела расчетов мостов
ЗАО “Институт Гипростроймост Санкт-Петербург”
д.т.н., проф.

Сливкер В.И

Зав. Кафедрой строительной механики
и вычислительных технологий
Пермского государственного
технического университета
д.т.н., проф.

Кашеварова Г.Г.

Зав. кафедрой «Инженерная и компьютерная графика»
Южно-Российского государственного
технического университета
д.т.н., проф.

Гайджуров П.П.

Председатель Научного Совета РААСН
“Программные средства в строительстве
и архитектуре”, д.т.н., проф.

Сидоров В.Н.