

Опыт использования программного комплекса ABAQUS для расчета строительных сооружений

Александр Голубятников, Генеральный директор ООО «ХЕКСА»,
Сергей Рыжов, канд. физ-мат. наук, начальник отдела систем проектирования и инженерного
анализа ООО «ТЕСИС».

Краткая характеристика программного комплекса ABAQUS
Опыт использования ABAQUS в компании «ХЕКСА» для расчета уникальных строительных сооружений

Уровень развития производства, науки и вычислительной техники диктует требования к проектированию и эксплуатации строительных сооружений. Так, в связи с произошедшими в последнее время обрушениями строительных сооружений существенно возрос уровень ответственности к расчетам объектов. При этом потребовалось не только производить расчеты на нормативные нагрузки, но и моделировать возможные аварийные ситуации с целью их прогнозирования и предотвращения. Огромную роль в обеспечении безопасности и экономически обоснованного автоматизированного проектирования играют программные комплексы, значительно повышающие качество проектов и сокращающие время проектирования.

Программный комплекс ABAQUS является мощным инструментом для решения проблем строительной механики. С его помощью можно провести детальный анализ строительных конструкций с учетом их реального нелинейного поведения при воздействии различных типов нагружения (статика, динамика, сейсмика, прогрессирующее разрушение и т.п.) с одновременным рассмотрением свойств геотехнической среды.

Решения, получаемые с использованием ABAQUS, отличаются достоверностью, точностью и возможностью рассматривать любые сложные объекты на всех стадиях проектирования, возведения и эксплуатации.

В статье дается краткая характеристика ABAQUS, а также рассматривается опыт использования ABAQUS в компании ХЕКСА для расчета уникальных строительных сооружений.

Краткая характеристика программного комплекса ABAQUS

Программный конечно-элементный комплекс ABAQUS — это универсальная программа общего назначения для проведения многоцелевого инженерного прочностного анализа.

ABAQUS позволяет рассчитывать сложное нелинейное напряженно-деформированное состояние строительных сооружений и оценивать их прочность и устойчивость с учетом многофакторного нагружения, в том числе сейсмического, теплового и взрывного. Сооружения могут моделироваться с учетом влияния предварительно нагруженной арматуры с одновременным расчетом оснований и сочетаний нагрузок, с контактными взаимодействиями и моделированием разрушений.

К преимуществам данного программного комплекса относится также наличие большого количества нелинейных моделей материалов, в частности материалов металлической арматуры, бетонов, грунтов, пористых материалов и т.п., что позволяет эффективно и с большой точностью решать задачи, содержащие данные типы материалов, с учетом их реологических свойств.

Среди решаемых с помощью ABAQUS задач следует отметить:

- расчет усталостной прочности и долговечности конструкций под воздействием произвольного по времени нагружения с учетом пластичного состояния;
- оптимизацию конструкций к изменению параметров — можно, например, оптимизировать геометрию конструкции по напряжениям, возникающим в конструкции при заданных нагрузках;
- расчет конструкций на статические, динамические, сейсмические и ветровые нагрузки, а также на сочетание комбинаций нагрузок (многофакторность нагружения);
- расчет трещинообразования и концентраторов напряжений;
- задачи по прогрессирующему разрушению.

Отличительной особенностью ABAQUS является возможность использования собственных подпрограмм, что позволяет создавать свои модели поведения различных материалов, конечные элементы и типы нагрузок.

ABAQUS является надежным, качественным кодом с удобным интерфейсом. Наличие встроенного языка программирования PYTHON позволяет создавать собственные графические оболочки, адаптированные для решения конкретных типов задач.

Программный комплекс ABAQUS представляет собой полностью параллельный код и может использоваться на всех вычислительных платформах, включая многоядерные вычислительные системы и кластеры.

ABAQUS имеет коммерческую, исследовательскую и учебную версии. Для ознакомления со всеми возможностями ABAQUS можно использовать демо-версию ABAQUS Student Edition, свободно распространяемую компанией «ТЕСИС» (www.tesis.com.ru) вместе с методическим пособием на русском языке.

Опыт использования ABAQUS в компании «ХЕКСА» (www.hexa.ru) для расчета уникальных строительных сооружений

Проектирование уникальных сооружений в строительстве всегда сопряжено с большим количеством технических задач, близких по своей природе к задачам, решаемым в смежных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая промышленность и машиностроение. Это задачи прочности, надежности, аэродинамики и устойчивости.

Одной из ключевых проблем при проведении поверочных расчетов в любой отрасли промышленности является выбор адекватной расчетной модели. Результаты этих расчетов не должны сильно зависеть от дальнейшего уточнения исходной модели. Данные расчеты должны обеспечивать гарантируемую инженерную точность.

При наличии таких расчетных моделей в проектировании строительных конструкций можно успешно моделировать нетипичные условия эксплуатации того или иного уникального сооружения. Использование виртуального (электронного) прототипа конструкции позволяет при достаточной экономии средств проводить верификацию численного эксперимента.

На примере трех уникальных сооружений мы покажем, как при помощи электронного прототипа и поверочных расчетов были выявлены некоторые ошибки и недоработки в проектировании этих конструкций. А также рассмотрим пример, в котором применение виртуального прототипа конструкции позволило выполнить динамический анализ Ледового дворца спорта в г.Ангарске на сейсмические воздействия в 8 баллов по шкале Рихтера.

Нелинейный расчет оценки несущей способности кровли Ледового дворца в г.Коломне Московской области

Компанией ООО «ХЕКСА» было проведено исследование и выполнен поверочный расчет конструкции покрытия конькобежного стадиона в г.Коломне на заданные нагрузки и воздействия.

Исходной составляющей нагрузки являлось нагружение сооружения собственным весом. При этом учитывался вес несущих элементов конструкции, дополнительный вес технологического оборудования, а также полностью был учтен и промоделирован последний этап монтажа тросов на поверхности мембранной оболочки.

Целью расчета являлся анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при воздействии на нее нормативных вариантов снеговой нагрузки, а также проведение численного эксперимента (с использованием электронного прототипа конструкции) по натяжению тросов на поверхности мембранного покрытия на запроектированные нагрузки.

Ввиду сложности решаемой задачи, характеризуемой большой геометрической и физической нелинейностью, потерей местной устойчивости, а также контактными взаимодействиями несущих элементов, для проведения нелинейных расчетов использовался программный комплекс ABAQUS.

Описание конструкции

Конструкция покрытия представляет собой висячую мембранную оболочку с отрицательной гауссовой кривизной, связанную по периметру с замкнутым железобетонным опорным контуром. Опорный контур овальной формы опирается вдоль продольных сторон на две арки, жестко связанные с опорным контуром. Каждая арка двумя шарнирными узлами связана с основанием сооружения. Кроме арок, опорный контур поддерживается 24 стальными колоннами, установленными по периметру с заданным шагом. Мембранная оболочка выполнена из стального листа толщиной 4 мм. По периметру толщина мембраны увеличивается двумя ступенями: сначала до 6 мм, а по границе соединения с опорным контуром — до 10 мм. Технологически мембрана монтируется на продольной постели, представляющей собой установленные с заданным шагом продольные стальные полосы толщиной 6 мм. Продольная постель работает совместно с мембраной.

Сверху на мембрану в продольном направлении укладываются тросы, ограничивающие продольную деформацию мембраны. Концы тросов крепятся в специальных узлах на балке опорного контура, после чего производится натяжение тросов с заданными проектировщиком усилиями.

На основании изучения рабочей документации и чертежей конструкции сооружения была принята схема решения задачи, заключающаяся в создании *полной* конечно-элементной модели конструкции покрытия для расчетов на нагружение собственным весом и заданными вариантами распределения снеговой нагрузки.

Полная конечно-элементная модель конструкции покрытия и распределение толщин в элементах мембраны показаны на рис. 1. В модели число узлов составило 280 508, число элементов — 240 734.

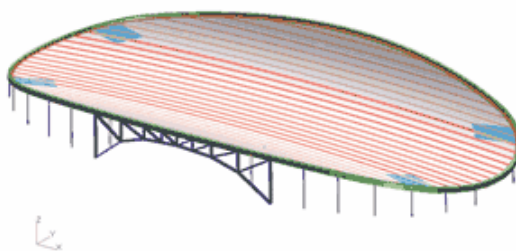


Рис. 1. Общий вид модели конструкции покрытия и распределение толщин в элементах мембран

С использованием описанной выше конечно-элементной модели было проведено девять расчетов: пять — с учетом различных вариантов снеговых нагрузок и четыре — по монтажу и натяжению канатов. Наиболее интересной частью работы являются расчеты, связанные с этапами монтажа канатов:

- 1) нагружение конструкции без тросов собственным весом;
- 2) укладка на мембрану тросов, то есть нагружение конструкции весом тросов;
- 3) натяжение тросов заданным усилием в 125 т;
- 4) нагружение крыши снеговой нагрузкой (равномерный снег).

Анализ результатов расчета

На основании расчетов был выполнен анализ значений внутренних силовых факторов в опорном контуре (рис. 2). В таблице приведены максимальные величины действующих в балке опорного контура силовых факторов согласно расчетным этапам.

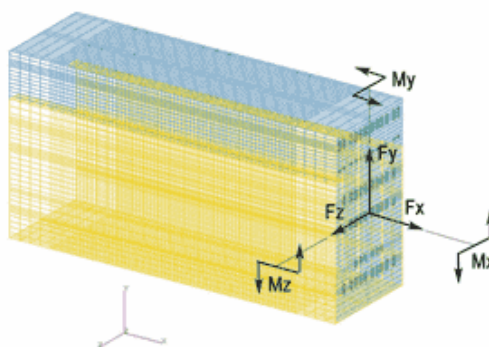


Рис. 2. Силовые факторы, действующие на элемент балки опорного контура

Максимальные величины действующих в балке опорного контура силовых факторов согласно расчетным этапам

| Этапы нагружения | $F_x, \text{т}$ | $F_y, \text{т}$ | $F_z, \text{т}$ | $M_x, \text{т}\cdot\text{м}$ | $M_y, \text{т}\cdot\text{м}$ | $M_z, \text{т}\cdot\text{м}$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1-й | 2873,0 | 261,7 | 159,9 | 327,3 | 306,8 | 1196,4 |
| 2-й | 3202,2 | 285,9 | 180,2 | 364,2 | 349,0 | 1313,4 |
| 3-й | 4053,1 | 352,9 | 375,8 | 241,0 | 1286,9 | 1618,3 |
| 4-й | 7195,0 | 560,1 | 518,7 | 586,9 | 1075,6 | 2405,0 |
| 5-й (без тросов) | 6310,0 | 507,4 | 369,8 | 670,6 | 654,5 | 2330,0 |

При проведении расчетов были определены перечисленные далее важные факты. Во-первых, из таблицы видно, что при натяжении канатов на заданные проектировщиком усилия в 125 т на один канат происходит увеличение всех, кроме момента кручения M_x , силовых факторов, действующих в опорном контуре. Особенно неприятным было то, что изгибающий момент M_y увеличил свое значение в 4,2 раза по сравнению с начальным состоянием и стал равным 1286,9 т.м. при допустимом значении в 600 т.м. Такая величина изгибающего момента могла привести к повреждению опорного контура, а затем и к обрушению конструкции.

Во-вторых, при проведении расчетов было определено, что равномерная эпюра натяжения тросов не является оптимальной. Правильным было бы проводить натяжение тросов неравномерной эпюрой усилий в тросах. Крайние тросы должны были натягиваться с большим усилием, чем тросы, расположенные в центре. При неравномерном способе натяжения изгибающий момент M_y увеличился бы не в 4,2, а всего в 1,6 раза. К сожалению, проектировщики не прислушались к рекомендациям по использованию неравномерной эпюры.

В-третьих, негативным моментом при натяжении тросов на заданные усилия явилось то, что на краях продольной оси в поперечном направлении образовались волны с большими значениями напряжений в зонах перегибов.

Остановка этапа натяжения была связана с обнаружением момента зарождения поперечных волн, которые были получены расчетным путем.

Статический расчет купола покрытия волейбольного центра в г.Одинцове (с учетом геометрической и физической нелинейности) на различные сочетания расчетных нагрузок

Данный объект (рис. 3) вызвал интерес из-за необычного подхода к проектированию довольно сложных узлов конструкции. Некоторые образцы этих узлов представлены на рис. 4.

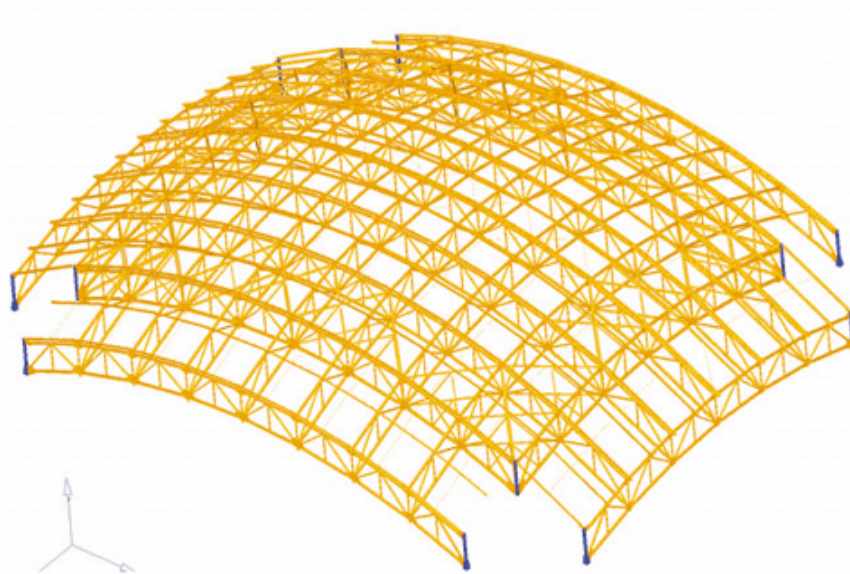


Рис. 3. Конструкция купола покрытия волейбольного центра

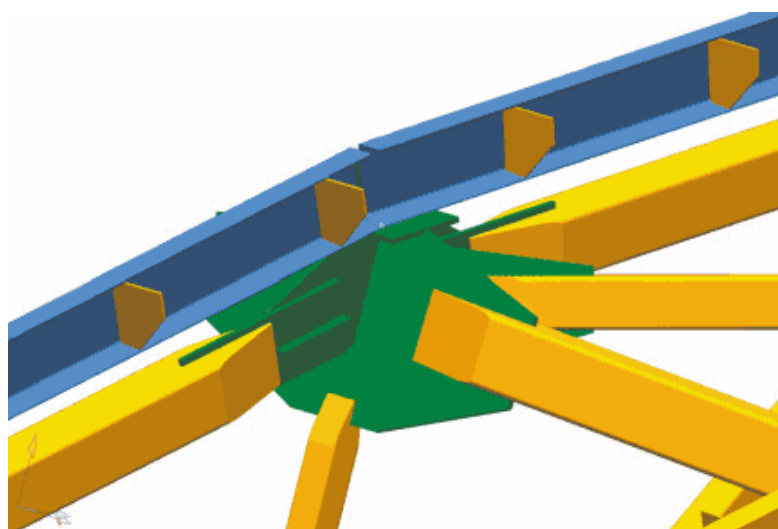
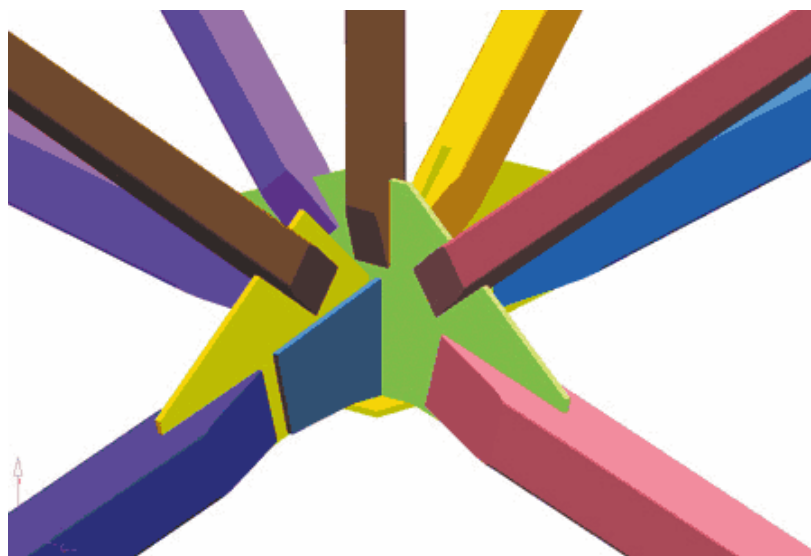


Рис. 4. Примеры узлов конструкции купола

Компанией ООО «ХЕКСА» был проведен нелинейный расчет с учетом геометрической и физической нелинейности полной конструкции покрытия на запроектированные нагрузки.

Для исследуемого объекта также был построен электронный прототип несущей конструкции крыши. Конечно-элементная модель сформирована с использованием двумерных изгибных элементов. При этом весьма

подробно прорабатывалась пространственная геометрия профилей и конструктивные особенности узлов соединения.

Результаты расчетов показали, что в узлах данной конструкции возникает достаточное количество пластических зон, которые большей своей частью приходятся на области сварных швов и болтовых соединений. Расчеты, проведенные ранее при проектировании данной конструкции, содержали анализ стержневой шарнирно закрепленной модели, без подробного анализа прочности узловых соединений.

Определение предельной несущей способности колонн в зависимости от соотношения вертикальной силы и вынужденного смещения верхних опор

Имеется ряд колонн, являющихся несущим опорным контуром большепролетного покрытия. Колонны расположены с шагом в 5° (около 6 м) по окружности радиусом 69,9 м. Высота колонн — 7,7 м. Сечение колонны — круглая труба 426х9. В верхней и нижней точках колонны находятся шарниры. Между колоннами через три панели предусмотрены вертикальные крестовые связи, а в каждой панели — распорки, образующие пояс на высоте 4,4 м.

В верхней точке каждой колонны приложена вертикальная сила от веса покрытия, кроме того, верхняя точка каждой колонны подвержена вынужденному радиальному перемещению от деформации конструкции покрытия.

Порядок приложения нагрузки следующий:

- 1) постоянная вертикальная сила в верхней точке;
- 2) вынужденное горизонтальное смещение верха колонны до потери ею несущей способности. В верхних и нижних опорах реализован контакт, позволяющий учесть конструктивный эксцентриситет при повороте колонны вокруг горизонтальной оси.

Учет в расчетной модели податливости оболочки (рис. 5) позволил определить реальные усилия в боковых связях (рис. 6 и 7).

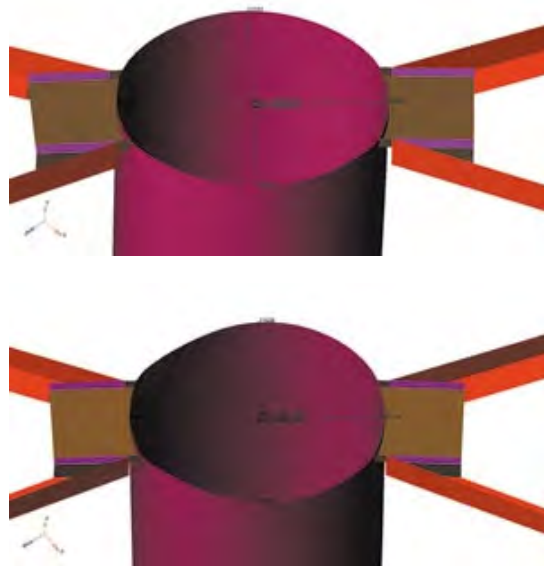


Рис. 5. Деформация сечений колонн (масштабный фактор 1)

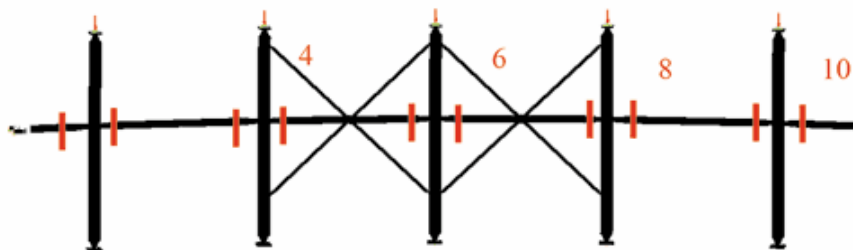


Рис. 6. Расположение сечений

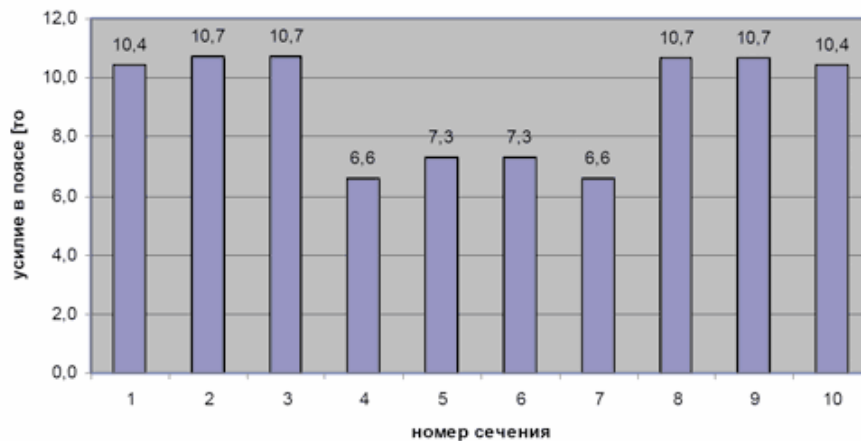


Рис. 7. Усилия в сечениях пояса

Поверочный расчет по статическому анализу Ледового дворца спорта «Ермак» в г.Ангарске на заданные нагрузки и воздействие

Компанией ООО «ХЕКСА» был проведен нелинейный расчет с учетом геометрической и физической нелинейности полной конструкции Ледового дворца спорта «Ермак» в г.Ангарске на заданные нагрузки и воздействия. Полная модель представлена на рис. 8.

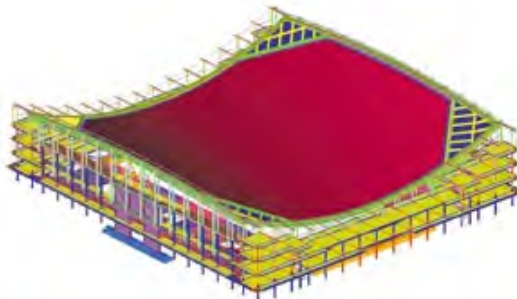


Рис. 8. Расчетная конструкция Ледового дворца спорта

Железобетонные колонны и ригели каркаса обстройки, а также ростверки диафрагм и диафрагмы обстройки заданы трехмерными элементами, учитывающими наличие в них арматуры (рис. 9).

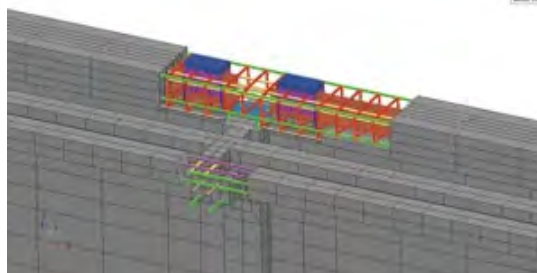


Рис. 9. Модель железобетонных конструкций

Интересным в этой работе является расчет на сейсмическую нагрузку в 8 баллов по шкале Рихтера. Компанией ООО «ХЕКСА» был выполнен динамический расчет при воздействии на конструкцию сейсмической нагрузки. Перед началом действия сейсмической нагрузки в течение 0,5 с выполнялось нагружение конструкции весовой и временной полезной нагрузками, после чего в течение 8,83 с воспроизводилось действие переменных ускорений на основание сооружения (акселерограммы — рис. 10).

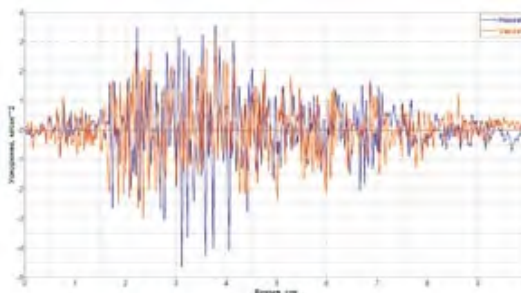


Рис. 10. Акселерограммы сейсмической нагрузки

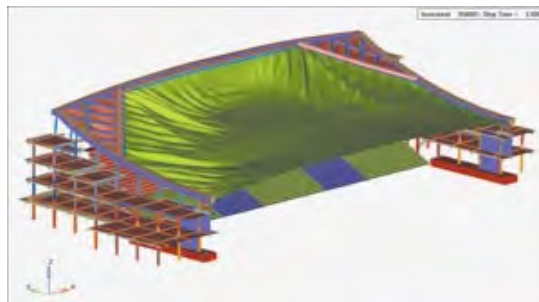


Рис. 11. Деформированное состояние конструкции, соответствующее моменту 3,5 с от начала сейсмического воздействия

Задавалось горизонтальное возбуждение (вдоль оси X) и одновременно вертикальное возбуждение. Предполагалось, что основание ведет себя как жесткое целое. Напряженно-деформированное состояние конструкции определялось с учетом физической (нелинейное поведение бетона и металла) и геометрической нелинейностей. Деформированное состояние конструкции, соответствующее моменту 3,5 с от начала действия сейсмической нагрузки, показано на рис. 11. Для всех результатов расчета указывается время от начала действия сейсмической нагрузки. Значения напряжений в элементах расчетной модели изменяются по времени в связи со сложным динамическим воздействием, поэтому для каждого элемента выбиралось максимальное (минимальное) по времени значение соответствующего напряжения.

В настоящее время компанией ведутся поверочные расчеты Ледового дворца спорта на территории Ходынского Поля (САО г.Москвы) на заданные нагрузки и воздействия.