

Закключение эксперта по верификации программы ANSYS

В соответствии с поручением руководства Научного совета РААСН “Программные средства в строительстве и архитектуре” (по договоренности с председателем совета В.Н. Сидоровым) настоящая экспертиза верификационных тестовых примеров относится исключительно к задачам расчета конструкций на устойчивость равновесия и не касается остальных разделов процедуры верификации.

Представленные первоначально на рассмотрение экспертизы верификационные примеры расчетов конструкций практически не содержали тестов, позволяющих установить корректность результатов расчетов конструкций на устойчивость равновесия. Исключение составляет тест 4, в котором рассматривается классическая задача Прандтля – устойчивость равновесия высокой балки при действии поперечной силы. В связи с этим экспертом были предложены дополнительно 12 тестовых примеров, формулировка которых приводится ниже.

Предлагаются следующие 12 тестовых примеров по расчету на устойчивость:

1-ая группа примеров

5 тестовых примеров S1,S2,S3,S4,S5 – устойчивость закручиваемого прямого стержня. Эти примеры приведены в книге [1] на стр. 552 рис. 8.9. Там же даны теоретические результаты для критической нагрузки.

2-ая группа примеров

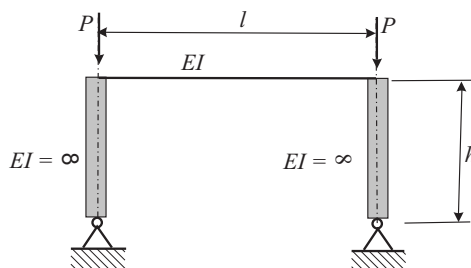
5 тестовых примеров S6,S7,S8,S9,S10 – устойчивость плоской формы изгиба консольного стержня. Эти примеры приведены в книге [1] на стр. 573 рис. 8.14. Там же даны теоретические результаты для критической нагрузки.

Пример S11

Устойчивость плоской формы изгиба шарнирно опертого стержня под действием равномерно распределенной моментной нагрузки – см. [1] стр. 582 рис. 8.17. В выводе окончательной формулы (5.62) стр. 584 в [1] вкралась ошибка, которая будет исправлена во втором издании этой книги. Правильная формула такая

$$m_{cr} = \pm \frac{v_{cr}^2}{l^2} \sqrt{EI_z GI_x} = \pm \frac{22,3}{l^2} \sqrt{EI_z GI_x}.$$

Пример S12



Пример S.12. Тестовая задача для расчета на устойчивость

Стойки рамы считаются абсолютно жесткими. В расчетной схеме эту раму предлагается рассматривать состоящей из единственного стержня (ригеля), но такого, который снабжен жесткими вставками на своих концах (мне кажется, что в терминологии ANSYS такие жесткие вставки и моделируют недеформируемые стойки. Если попытаться выполнить расчет на устойчивость такой рамы, то многие распространенные программы (если не большинство!) спотыкаются на этой простой задаче, выдавая ошибочный ответ об абсолютной устойчивости рамы. На самом же деле эта задача имеет вполне элементарное решение, которое дается формулой:

$$P_{cr} = \frac{6EI}{lh}.$$

1. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Том 1. –М.: Изд-во “СКАД СОФТ”, 2007.

Результаты верификационных расчетов

При решении всех предложенных примеров были использованы несколько механических моделей, как стержневые, так и более изощренные, составленные из объемных КЭ, хотя по замыслу эксперта имелось в виду применение именно стержневых моделей.

Для подавляющего большинства задач точность полученных решений как при использовании стержневых моделей, так и при применении в расчетной схеме объемных КЭ вполне достаточна.

Однако, для задачи S4 (устойчивость консоли при закручивании ее полутангенциальным моментом) стержневая модель не привела к выдаче корректного результата, хотя с моделью, содержащей объемные КЭ для этой же задачи, ANSYS успешно справился. Эксперта порадовало то неожиданное для него обстоятельство, что ANSYS не споткнулся на более коварной задаче S5, в которой консоль подвержена воздействию двух взаимно гасящих крутящих моментов.

Задачи S6–S10 близки по смыслу задачам S1-S5. Отличие в том, что теперь речь идет об устойчивости плоской формы изгиба стержня при внешнем воздействии, вызывающем напряженное состояние консоли в виде чистого изгиба. Любопытно (и даже несколько странно), что ANSYS корректно обработал задачу S9, хотя со своим аналогом задачей S4 в стержневой модели решение получить не удалось. Особенностью этих двух задач (S4 и S9) является то, что в данном случае мы имеем дело с кратными критическими нагрузками. На этом основании я предполагаю, что специфика задач устойчивости с кратными критическими нагрузками не полностью учтена в алгоритмах, применяемых в ANSYS, так что результаты расчетов в таких задачах не вполне надежны. Хотя, справедливости ради, стоит отметить, что на практике подобные задачи это редкость.

В задаче S11 никаких проблем не возникло, хотя эта задача также содержит подводные камни – начальное напряженное состояние отсутствует в том смысле, что эпюра моментов в балке нулевая.

Целью задачи S12 была проверка корректности учета жестких вставок на концах стержневых элементов. Решение же этой задачи с численно большой жесткостью жестких вставок интереса не представляет. К сожалению, ANSYS, как и подавляющее большинство действующих программных комплексов, не умеет правильно работать со стержневыми моделями, содержащими жесткие вставки. Это обстоятельство должно быть доведено до сведения пользователей, поскольку на практике жесткие вставки в расчетных моделях встречаются весьма часто. По опыту своей личной работы я не припоминаю ни одной практически важной задачи за последние годы, где подобного рода элементы не включались бы в состав расчетной схемы. Кстати говоря, эта же ошибка должна проявляться не только в задачах устойчивости, но и при решении геометрически нелинейных задач, так как источник ошибки (он известен и опубликован, например, в [1]) один и тот же.

Выводы

Настоящим рекомендую программу ANSYS к использованию в прикладных расчетах строительных конструкций применительно к задачам устойчивости равновесия. В документации к использованию программы целесообразно отметить, что применения жестких вставок в стержневых конечных элементах при расчетах на устойчивость следует

избегать. Возможное решение (хотя и не лучшее) это замена жестких вставок отдельными стержневыми элементами с высокой жесткостью.

Рекомендация к верификационному отчету

Я полагаю, что проверку предложенных тестовых задач с помощью трехмерных конечных элементов можно не включать в окончательный отчет. Суть и смысл этих тестов заключены в проверке именно стержневых моделей и только.

Эксперт

начальник отдела расчетов мостов

ЗАО “Институт Гипростроймост Санкт-Петербург”

д.т.н., проф. Сливкер В.И.