

Заключение. Разработанный метод, основанный на положениях энергетического подхода, позволяет производить адекватную оценку живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях без необходимости привлечения трудоемких и обладающих рядом неопределенностей моделей.

Как показали проверочные расчеты модифицированной конструктивной системы в особой расчетной ситуации с использованием нелинейного квазистатического и нелинейного динамического анализа, живучесть конструктивной системы в особой расчетной ситуации обеспечена в соответствии с требованиями ТКП EN 1991-1-7 [2] и ТКП 45-3.02-108-2008 [3].

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур, А. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01/ А.В. Тур. – Брест, 2012. – 228 с.
2. General Actions – Accidental Actions (ТКП EN 1991-1-7 – Общие воздействия. Часть 7. – Особые воздействия): EN 1991-1-7.
3. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108-2008. – Минск, 2008. – 178 с.
4. Eurocode 0. Basic of Structural Design: EN 1990:2001. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001.
5. UFC – 023 – 03 (Unified Facilities Criteria) – Design of Buildings to Resist to Progressive Collapse, Jan., 2005-215 p.
6. Vlassis, G. Progressive collapse assessment of tall buildings/ G. Vlassis. - London, 2009. - 416 p.
7. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency (FEMA) 356, November, 2000. – 561 p.
8. Тур, А. В. К построению трансформированных диаграмм деформирования бетона и арматуры с учетом скорости изменения относительных деформаций при нагружении/ А. В. Тур// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сборник трудов XVII Междунар. научно-методического семинара, Гродно, 17-19 сентября 2010 г.; редкол.: Т.М. Пецольд (отв. ред.), Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2010. – С. 184-189.
9. Ngo T., Mendis P. Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview// EJSE Special Issue: Loading on Structure – 2007 – P. 76-91.
10. Tian Y., Chen J., Said A. Nonlinear modeling of flat-plate structures using grid beam elements/ Computers and Concrete, Vol. 10, No. 5, 2012. - P. 491-507.
11. Тур, А.В. К расчету повышающих динамических коэффициентов, применяемых при нелинейных расчетах железобетонных элементов в условиях внезапного приложения нагрузки / А.В. Тур, В.В. Тур // Ресурсоэкономни матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. н. пр / Под ред. Бабица Е.М. – Рівне, 2012. – №24. - С. 282–290.

УДК 624.074.28

Тур В.И., Тур А.В.

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЕТЧАТОГО КУПОЛА

Сетчатые купола – это перспективные конструкции, обладающие хорошими технико-экономическими показателями и высокой архитектурной выразительностью.

Узловые соединения сетчатых куполов оказывают значительное влияние на их характеристики. Именно от конструкции узловых соединений в значительной мере зависит трудоемкость возведения купола. Известно также, что масса узлов купола может достигать величины в 40% от массы его стержневых элементов.

Одним из путей повышения технико-экономических показателей куполов является применение в их конструкции тонкостенных холодногнутых профилей.

Вместе с тем, использование легких холодногнутых профилей, имеющих увеличенные поперечные сечения (по сравнению с горячекатаными), в сетчатых куполах затруднено вследствие необходимости стыковки в узле множества стержней с различной взаимной ориентацией в пространстве. Кроме того, при стыковке таких стержней невозможно использовать сварку.

Коллективом авторов было разработано узловое соединение тонкостенных стержней сетчатого купола (патент №24671333 от 20.11.2012 г. [1,2], обеспечивающее возможность соединения стержневых элементов купола из тонкостенных холодногнутых профилей при различных взаимных углах ориентации стержней купола, без применения сварки и индивидуального изготовления узловых соединений).

Основной элемент узлового соединения выполняется в виде полого цилиндра. Радиус кривизны и высота цилиндра определяются из условий взаимной стыковки необходимого числа стержневых элементов. На цилиндр наносится разметка под крепежные элементы.

Крепление стержневых элементов к цилиндру осуществляется при помощи уголков с одной развальцованной полкой. Радиус отгиба полки уголка равен радиусу кривизны цилиндра. Высота развальцованных уголков подбирается таким образом, чтобы после сборки узлового соединения они не выступали над полкой стержневых элементов и не затрудняли установку покрытия купола. На развальцованные уголки также наносится разметка под крепежные элементы. Развальцованные уголки прямой полкой крепятся к стенкам стержневых элементов, а развальцованной полкой примыкают к цилиндру и закрепляются. Размеры полок подбираются исходя из условий установки крепежных элементов.

Для численного исследования напряженно-деформированного состояния узлового соединения была создана его конечно-элементная расчетная модель с применением вычислительного комплекса NX Nastran с препроцессором Femap 10.1.1 [3].

Конечно-элементная модель узла, показанная на рис. 1, формировалась в виде так называемой пространственной фермы Мизеса и представляла собой фрагмент купола с одним центральным шарнирным узлом и стержнями реальной длины с шарнирными закреплениями. Отличие исследуемой расчетной модели от традиционной пространственной фермы Мизеса состоит в том, что центральный узел представляет собой конечно-элементную модель реального узла купола, состоящего из стального цилиндра и развальцованных уголков.

Нагрузка прикладывалась ступенчато, с шагом в 50 Н в каждый узел, находящийся на верхней кромке цилиндра (всего 96 узлов на верхней кромке, таким образом, шаг нагрузки 4,8 кН) и действовала вертикально вниз, расчет велся с учетом геометрической нелинейности.

Было выявлено, что максимальные эквивалентные напряжения развиваются в цилиндрическом элементе узлового соединения. При этом зоны высоких напряжений концентрируются в местах установки крепежных элементов, соединяющих цилиндр и развальцованные уголки, а также на наиболее удаленных от стержней участках цилиндра.

Возникновение первой группы зон высоких напряжений объясняется прежде всего тем, что крепеж играет роль концентратора напряжений. Возникновение второй зоны высоких напряжений объясняется тем, что стенка цилиндра между стержнями испытывает изгиб, и в ее середине развиваются максимальные напряжения.

Также следует отметить, что зоны высоких напряжений расположены не равномерно по высоте цилиндра, а смещены к верхнему краю. В развальцованных уголках зоны высоких напряжений развивались в местах расположения кре-

пежных элементов, соединяющих уголки с цилиндром, также со смещением к верхнему краю. Следует отметить, что при равной толщине цилиндра и развальцованных уголков, максимальные напряжения, развивающиеся в цилиндре выше максимальных напряжений в уголках, на 20–25%.

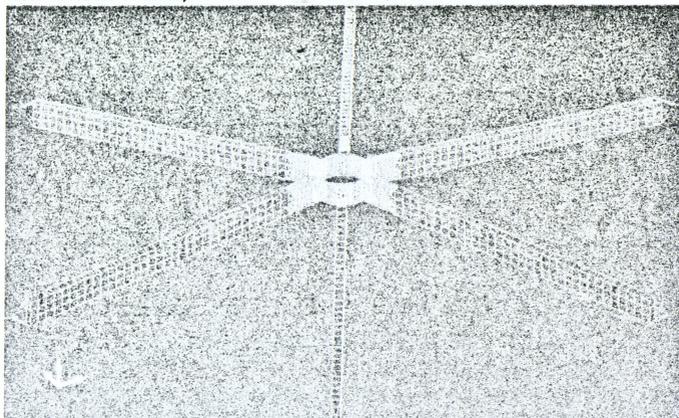


Рисунок 1 – Общий вид конечно-элементной модели узлового соединения

Проведенное численное моделирование узлового соединения показало, что для придания узлу достаточной жесткости необходима значительная толщина цилиндрического элемента или введение подкрепляющих элементов. Для снижения напряжений в стенке цилиндра были разработаны варианты подкрепления стенки цилиндра ребрами жесткости, так как увеличение толщины стенок цилиндра приводит к большей массе узла.

Рассматривалось несколько вариантов установки подкрепляющих элементов, но расчеты выявили, что наибольший эффект достигается при установке двух кольцевых ребер по торцам цилиндра.

Для подтверждения теоретических расчетов были проведены натурные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния разработанного узлового соединения.



Рисунок 2 – Узловое соединение и испытательная установка

В ходе подготовки экспериментального исследования разработана и изготовлена испытательная установка (рис. 2) и изготовлены два фрагмента купола в виде узлового соединения с прикрепленными тонкостенными холодногнутыми стержнями. Каждый стержень собирался из двух холодногнутых швеллеров, объединенных в прямоугольное коробчатое сечение самосверлящими самонарезающими винтами. В одном из фрагментов купола для крепления тонкостенных стержней к узлу использовались самосверлящие самонарезающие винты, в другом болты. Контроль напряженно-деформированного состояния осуществлялся методами электротензометрии и с помощью индикаторов часового типа, была проведена калибровка тензометрического оборудования.

Программа экспериментального исследования узлового соединения была разделена на два этапа:

1. Испытания узлового соединения при работе материала в упругой стадии. Испытания проводили циклично, с постепенным нарастанием нагрузки от 0 до 6 кН до тех пор, пока прогибы узлового соединения полностью не стабилизировались и оно не стало работать абсолютно упруго. Нагрузка на узловое соединение прикладывалась ступенчато, с шагом 1 кН. Снятие показаний индикаторов и тензорезисторов осуществлялось после прекращения приращения деформаций узлового соединения от приложенной нагрузки.

2. Испытания узлового соединения при работе материала в упруго-пластической стадии. Нагрузка на узловое соединение прикладывалась ступенчато, с шагом 500 Н. Испытания продолжались до момента разрушения или отказа узлового соединения.

Перед началом испытаний для «выборки» все зазоров в узловых соединениях была дана пробная нагрузка в 2 кН, выдержана до стабилизации узлового соединения, после чего нагрузка убрана.

Анализируя результаты экспериментального исследования, можно сделать следующие выводы:

- Результаты экспериментальных испытаний узловых соединений достаточно хорошо коррелируют с результатами конечно-элементного моделирования, что подтверждает объективность разработанной расчетной модели.

- Разрушающая нагрузка и прогибы узлового соединения зависят от типа использованных крепежных элементов (самонарезающие винты или болты). Тем не менее, работа под нагрузкой узловых соединений весьма схожа. В обоих случаях, в диапазоне рабочей нагрузки (до 6 кН) после обмятия элементов и выработки всех начальных зазоров наблюдается линейная работа конструкции. Почти линейная работа конструкции наблюдается до нагрузки в 9-9,5 кН, что позволяет сделать вывод о высокой приспособляемости конструкции и возможности расширения зоны рабочей нагрузки до 7-8 кН. При увеличении нагрузки свыше 9-9,5 кН наблюдается значительная нелинейность прогиба узловых соединений, что свидетельствует о нарастании пластических деформаций в местах соединения элементов узлового соединения.

- Узловое соединение на болтах обладает значительно большей податливостью вследствие наличия зазоров между элементами узлового соединения и крепежом.

- При работе в линейной стадии прогиб узловых соединений практически линеен. Разница прогибов узлового соединения на самонарезающих винтах, конструктивно наиболее близкого к конечно-элементной расчетной схеме, с теоретическим значением, при работе в линейной стадии, составляет около 12-14%, при увеличении нагрузки разница возрастает.

- Наибольшие напряжения в цилиндре развиваются в стенке цилиндра в верхней части, между стержнями, при этом на внутренней стороне цилиндра напряжения больше в 1,8-2,5 раза. Напряжения на внутренней стороне цилиндра в горизонтальном направлении значительно больше (в 5-5,2 раза), чем в вертикальном, причем горизонтальные напряжения сжимающие, а вертикальные растягивающие.

- Напряжения в развальцованных уголках (на прямой полке) в горизонтальном направлении значительно выше, чем в вертикальном (в 2-2,3 раза). В верхней части уголка горизонтальные напряжения сжимающие, в нижней растягивающие.

- Напряжения в стенках тонкостенных стержней в верхней части сжимающие, в нижней части растягивающие, практически равные по величине (разница не более 10-12%). Относительно напряжений в стенке цилиндра и уголках напряжения в стержнях невелики.

- Отказ узлового соединения на самонарезающих винтах произошел при приложении нагрузки в 16,5 кН и сопровождался продергиванием винта по резьбе в одном из крайних рядов крепления.

- Отказ узлового соединения на болтах произошел при нагрузке в 13 кН и сопровождался срезом болта в крайнем верхнем ряду.

- Характер разрушения обоих узловых соединений одинаков и заключается в разрушении крепежных элементов в одном из крайних рядов (срез крепежа, соединяющего тонкостенные стержни и развальцованные уголки и значительное удлинение или продергивание по резьбе крепежа, соединяющего цилиндр и развальцованные уголки). Отметим, что разрушение крепежных элементов не происходит одновременно и не ведет к мгновенному разрушению узлового соединения в целом, и можно предполагать перераспределение усилий между элементами крепежа, судя по работе конструкции в заключительной стадии.

В целом, узловое соединение с креплением на самонарезающих винтах имеет достаточную несущую способность и может применяться в конструкции сетчатых куполов со стержнями из холодногнутых тонкостенных профилей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Узловое соединение тонкостенных стержней пространственной конструкции: патент РФ №2467133 МПК E04B1/58. / А.В. Тур, В.И. Тур, И.С. Холопов – RU 24671333C2; заявл. 25.02.2011, опубл. 20.11.2012. – Бюл. № 32.
2. Холопов, И.С. Сетчатый купол с новыми узловыми соединениями / И.С. Холопов, В.И. Тур, А.В. Тур // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 10. – С. 60–62.
3. Холопов, И.С. Исследование напряженно-деформированного состояния узлового соединения сетчатого купола / И.С. Холопов, В.И. Тур, А.В. Тур // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – № 4. – С. 104–111.

УДК 624.046/624.014

Тур В.В., Надольский В.В.

НЕСОВЕРШЕНСТВА КОНЦЕПЦИИ НАДЕЖНОСТИ, ПРИНЯТОЙ В ЕВРОПЕЙСКИХ НОРМАХ (ЕВРОКОДАХ)

1 ВВЕДЕНИЕ

В недавнем времени на территории Республики Беларусь вступили в действие нормативные документы ISO 2394 и EN 1990. Согласно концепции надёжности строительных конструкций, сформулированной в этих документах, проектирование конструктивных элементов следует выполнять, опираясь на нормируемые целевые показатели надёжности. Это условие, с одной стороны, по-