К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ СХОДИМОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ КУПОЛОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Авдяков Д.В.
канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства
Курский государственный университет
(г. Курск, Россия)

Рябцева Н.А.
магистрант
Курский государственный университет
(г. Курск, Россия)

Аннотация: *в работе рассмотрены факторы, влияющие на сходимость экспериментальных и теоретических исследований поведения куполов под нагрузкой.*

Ключевые слова: *купола, стропильные строительные конструкции, сетчатые купола, теоретические исследования, экспериментальные исследования, неустойчивость, нелинейность*

TO THE QUESTION OF INCREASING THE CONVERGENCE OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE BEHAVIOR OF DOMES UNDER LOAD

Avdyakov D.V.

Kursk State University

(Kursk, Russia)

Ryabceva N.A.

(Kursk, Russia)

Abstract: *the paper examines factors influencing the convergence of experimental and theoretical studies of dome behavior under load.*

Keywords*: domes, rafter building structures, mesh domes, theoretical studies, experimental studies, instability, nonlinearity*

Kursk State University

Известно, что купола, основанные на правильном многоугольном расположении тонких прямолинейных элементов с ограждающими панелями, являются эффективным средством ограничения пространства или покрытия больших площадей, при котором обеспечивается оптимальное соотношение строительного объема здания к весу ограждающих конструкций. Данное обстоятельство обеспечивает значительное преимущество перед остальными видами несущих стропильных строительных конструкций и является наиболее экономически выгодным для зданий и сооружений с большими пролетами, например, стадионов, а также объектов среды космического обитания [1, 2]. По аналогии с пологими арками, кривая графика зависимости прогиба от нагрузки может показать неустойчивость элементов куполов, включая склонность к «проскакиванию» (или «прощёлкиванию»). Т.е. часть или вся конструкция купола под действием внешних нагрузок может вогнуться в обратную сторону геометрической выпуклости (инвертироваться) [3, 4, 5]. Ключевыми факторами, влияющими на неустойчивость таких конструкций, как отметил Джионку [1], являются: структурная геометрия, режимы неустойчивости, начальные дефекты, граничные условия,

жесткость соединений и т. д. Что касается структурной геометрии, поскольку свойства материала и отдельных элементов обычно могут изменяться в ограниченном диапазоне, ряд исследователей сосредоточились на влиянии коэффициента подъема пролета или пологости конструкций купола [2, 6, 7]. При различных геометрических условиях и распределении нагрузки, структура может демонстрировать различные формы неустойчивости: неустойчивость элемента, узла, неустойчивость геометрической формы, а также общую неустойчивость [6, 8]. Большинство проведенных исследователями численных анализов, особенно основанных на моделях ферм [2, 9, 10], показали хорошую сходимость при изучении общей неустойчивости сетчатых куполов. Однако было сделано лишь несколько попыток исследовать неустойчивость элемента и режимы отказа, связанные с неустойчивостью элемента (например, неустойчивость кручения). Ланза указал на такое поведение элемента по результатам проведенного эксперимента [11]. Тем не менее, это поведение не было зафиксировано ни в одном другом эксперименте, возможно, из-за их слишком больших моделей [1]. В 1992 году авторы Джионку и Балут подчеркнули опасность распространения локальной неустойчивости на большую площадь [12]. Это явление было из причин обрушения большепролетного павильона в Бухареста в 1963 году и затем было исследовано Абеди и Парком [6, 13]. Жесткость соединений, а также граничные условия, также привлекли внимание исследователей. Его значительное влияние на поведение сетчатых купольных конструкций было подчеркнуто Джионку и Балутом [12], Лопесом и др. [4], Шоном и др. [14] и т.д. Фактически, изменение жесткости соединения может не только изменить несущую способность и влиять на наличие прощелкиваний в реакции после потери устойчивости [4], но также вызвать последующую потерю устойчивости [15].

Несмотря на то, что большинство имитационных анализов производилось из предположения идеально шарнирных или жестких соединений, в реальности трудно создать такие идеальные соединения экспериментально. Некоторые исследования были сосредоточены на разработке численных моделей, включающих полужесткие соединения [4, 16, 17]. Их работа показала недостаточную сходимость между экспериментальными и численными результатами, поскольку для сетчатых куполов сложно отличить влияние жесткости соединения и других недостатков и искусственных ошибок в экспериментальных исследованиях, например, предварительного напряжения, возникающего в результате сборки купола. Как следствие, эти эксперименты с полужесткими соединениями не могут являться идеальной проверкой для численного анализа.

Большое количество теоретических подходов было выполнено для исследования нелинейного поведения сетчатых куполов. Нагрузка выпучивания была исследована Ямадой и др. [18] и Шоном и др. [2] с учетом различных геометрических дефектов и типов нагрузки. Поведение после выпучивания, которое содержит множество смежных путей равновесия (ветвей разветвления), также привлекло многих исследователей. Теоретико-групповая теория бифуркации, которая первоначально использовалась при анализе гексагональных сетчатых куполов Хили [19], является одним из основных подходов. Гатерманн и Хохманн [20], Мурота и Икеда [21] и Гатерманн [22] разработали метод отслеживания путей равновесия симметричных ферменных конструкций. Кавех и Никбахт [23] и Чен и Фэн [7] расширили алгоритм до каркасных моделей. Метод доказал свою достаточную точность и эффективность при анализе ферменных конструкций. Однако для жестко соединенных шестиугольных куполов для анализа выпучивания элементов и связанного поведения выпучивания модель каркаса обычно включает сотни степеней свободы и имеет большое количество равновесных ветвей. Это может занять много времени для всех численных методов.

В отличие от большого количества численных исследований, в научной литературе было описано мало экспериментов по сетчатым куполам, особенно для режима после выпучивания. Кани и Макконнел [24, 25], Като и др. [26] и Кани и Хейдан [27] получили локальные явления разрушения сетчатых куполов при кратковременной нагрузке экспериментально, но эксперимент завершили

сразу после предельной или выпучивающей нагрузки. Другими словами, их испытания просто представили поведение неустойчивости узла и они пренебрегли исследованиями поведения сетчатых куполов после выпучивания. Лопес и др.[4] и Ма и др.[28] продемонстрировали прочность после выпучивания своих экспериментальных сетчатых куполов. Тем не менее, в их результатах не было показано явного поведения проскока. Лопес и др.[4] и Фонг и др.[29] изучали сетчатые купола с полужесткими соединениями и получили более лучшую согласованность между численными и экспериментальными результатами, но в то же время, вводя новые неоднозначные факторы. Ограниченные точностью изготовления, все эти эксперименты имели проблему наличия неизбежных начальных дефектов и начального предварительного напряжения. До сих пор, хотя и имеется множество численных результатов, все еще отсутствует надежная экспериментальная проверка высоко нелинейных реакций после выпучивания гексагональных сетчатых куполов, особенно для типичного поведения проскока и множественных устойчивых путей равновесия.

Одним из выходов с целью устранения вышеописанных дефектов экспериментальных моделей сетчатых куполов является их изготовление с помощью 3D-печати, что позволит обеспечить необходимую жесткость узлов и может дать более лучшую сходимость численных и экспериментальных результатов исследований. Серия купольных конструкций высокой точности с идеально жесткими соединениями и зажатыми граничными условиями может быть выполнена с помощью 3D-печати. Эта новая технология показала свою надежность при создании сложных 3D-структур с наличием минимального предварительного напряжения [30, 31], что необходимо для повышения точности проводимых экспериментов и сравнения их с численным анализом.

Список литературы:

1. Gioncu V. Buckling of reticulated shells: state-of-the-art. Int. J. of Space Structures (May) 1995.

2. Shon S.D. , Lee S.J. , Lee K.G. ,. Characteristics of bifurcation and buckling load of space truss in consideration of initial imperfection and load mode. J. Zhejiang Univ.-Sci. A (Appl. Phys. and Eng.) 14, 2013 — pp 206–213 .

3. Chen X., Shen S.Z. Complete load-deflection response and initial imperfection analysis of single-layer lattice dome. Int. J. Space Struct. 8, 1993. — pp 271–278.

4. López A., Puente I., Serna M.J.A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints. Comput. Struct. 85, 2007 — pp 360–374.

5. Rothert H., Dickel T., Renner D. ,. Snap-through buckling of reticulated space trusses. J. Struct. Div. (ASCE) 107, 1981 — pp 129–143.

6. Abedi K., Parke G.A.R., Progressive Collapse of Single-Layer Braced Domes. International Journal of Space Structures Vol 11 (3), 1996 — pp 291–306.

7. Chen Y., Feng J. Group-theoretic method for efficient buckling analysis of prestressed space structures. Acta Mechanica 226 (3), 2015 — pp 957–973.

8. Su W.J., Hai X. Analysis on the stability of single layer spherical lattice shell. In: Xie L. (Ed.), Proceedings, Second International Conference on Civil Engineer- ing, Energy and Environment (CEEE 2015), 6, 2016 — pp. 70–76.

9. Tanaka K., Kondoh K., Atluri S.N. Instability analysis of space trusses using exact tangent-stiffness matrices. Finite Elem. Anal. Des. 1, 1985 — pp 291–311.

10. Koohestani K., Kaveh A. Efficient buckling and free vibration analysis of cyclically repeated space truss structures. Finite Elements in Analysis and Design 46 (10), 2010 — pp 943–948

11. Lanza P. Instability of Single Layer Doubly Curved Vaults. International Jour- nal of Space

Structures 7 (4), 1992 — pp 253–264.

12. Gioncu V., Balut N. Instability Behaviour of Single Layer Reticulated Shells. International Journal of Space Structures 7 (4), 1992 — pp 243–252.

13. Abedi B.K., Parke G. Experimental Study of Dynamic Propagation of Lo- cal Snap-through in Single-layer Braced Domes. International Journal of Space Structures 16 (2), 2001 — pp 125–136.

14. Shon S.D., Hwang K.J., Lee S.J. Numerical evaluation of buckling behavior in space structure considering geometrical parameters with joint rigidity. J. Central South Univ. 21, 2014 — pp 1115–1124.

15. Shan W., Oda K., Hangai Y., Kondoh K. Design and static behavior of a shallow lattice wooden dome. Engineering Structures 16 (8), 1994 — pp 602–608.

16. Ramalingam R., Jayachandran S.A. Postbuckling behavior of flexibly connected single layer steel domes. J. Construct. Steel Res. 114, 2015 — pp 136–145.

17. Zhao Z., Chen Z., Yan X., Xu H., Zhao B. Simplified numerical method for latticed shells that considers member geometric imperfection and semi-rigid joints. Adv. Struct. Eng. 19, 2016 — pp 689–702.

18. Yamada S., Takeuchi A., Tada Y., Tsutsumi K. Imperfection-sensitive overall buckling of single-layer lattice domes. J. Eng. Mech. 127, 2001 — pp 382–396.

19. Healey T.J. A group-theoretic approach to computational bifurcation problems with symmetry. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 67 (3), 1988 — pp 257–295.

20. Gatermann K., Hohmann A. Symbolic exploitation of symmetry in numerical pathfollowing. IMPACT of Computing in Science and Engineering 3 (4), 1991 — pp 330–365.

21. Murota K., Ikeda K. Computational use of group theory in bifurcation analysis of symmetric structures. SIAM journal on scientific and statistical computing 12 (2), 1991 — pp 273–297.

22. Gatermann K. Computation of Bifurcation Graphs. In: Exploiting Symmetry in Applied and Numerical Analysis, volume 29 of Lectures in Applied Mathematics. American Mathematical Society, 1993 — pp 187–-202 .

23. Kaveh A., Nikbakht M. Stability analysis of hyper symmetric skeletal structures using group theory. Acta Mechanica 200 (3-4), 2008 — pp 177–197.

24. Kani I.M., McConnel R.E. Collapse of shallow lattice domes. J. Struct. Eng. 113, 1987 — pp 1806–1819.

25. Kani I.M., Mcconnel R.E. Single Layer Shallow Lattice Domes: Analysis , Gen- eral Behaviour and Collapse. International Journal of Space Structures 3 (2), 1988 — pp 64–73.

26. Kato A., Mutoh I., Shomura M. Collapse of semi-rigidly jointed reticulated domes with initial geometric imperfections. J. Construct. Steel Res. 4 8, 1998 — pp 145–168.

27. Kani I.M., Heidan A. Automatic two-stage calculation of bifurcation path of perfect shallow reticulated domes. J. Struct. Eng. 133, 2007- pp 185–194.

28. Ma, H. , Ren, R. , Fan, F. Experimental and numerical research on a new semi—rigid joint for single-layer reticulated structures. Eng. Struct. 126, 2016 — 725–738.

29. Fong M., Liu Y.P., Chan S.L. Second-order analysis and experiments of semi—rigid and imperfect domes.. Adv. Struct. Eng. 15, 2012 — pp 1537–1546 .

30. Moon S.K., Tan Y.E., Hwang J., Yoon Y.-J. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 1 (3), 2014 — pp 223–228 .

31. Turner B., Strong R., Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal 20 (3), 2014 — pp. 192–204.