

瓜斯塔维诺式砖石质穹顶受力性能研究

王倩

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2021年12月25日; 录用日期: 2022年1月11日; 发布日期: 2022年1月25日

摘要

瓜斯塔维诺式砖石质穹顶结构在宗教历史文化遗产建筑中应用广泛, 穹顶矢高与跨度之比是决定该类结构受力性能的核心指标。文章以始建于东察合台汗国末期米尔兹·阿巴克汗时期的新疆阿孜那古建筑为研究对象, 首先, 对建筑穹顶的几何参数进行三维激光扫描, 得到51个穹顶的矢跨比。其次, 优选6个小穹顶采用Origin进行拟合, 拟合得到6种函数曲线。然后, 进行材料力学性能试验, 得到砖的抗压强度为8.3 Mpa, 胶凝材料的抗压强度为0.5 Mpa。最后, 根据拟合曲线建立砖石穹顶在不同矢跨比下的有限元模型, 分析砖石质穹顶在静力荷载工况下的受力性能, 发现当矢跨比为1:1.85时, 砖石质穹顶的受力性能最好, 并且分析了穹顶厚度对穹顶的受力性能影响。此研究成果可为该类形建筑的修建提供理论依据。

关键词

砌体结构, 砖石质穹顶, 矢跨比, 受力性能

Research on Mechanical Properties of Guastavino-Style Masonry Domes

Qian Wang

Department of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Dec. 25th, 2021; accepted: Jan. 11th, 2022; published: Jan. 25th, 2022

Abstract

Guastavino-style domes are widely used in religious, historical and cultural heritage buildings, the ratio of dome height to span is the key index to determine the mechanical performance of such structures. This paper takes Azina ancient buildings in Xinjiang, which were built in the period of Mirz Abakhan at the end of the Eastern Chagatai Khanate, as the research object. Firstly, the geometric parameters of building domes are scanned by 3D laser, and the height-span ratios of 51

domes are obtained. Secondly, six small domes were selected to fit with Origin, and six function curves were obtained by fitting. Then, the mechanical properties of the material were tested, and the compressive strength of the brick was 8.3 Mpa, and that of the cementitious material was 0.5 Mpa. Finally, according to the fitting curve, the finite element model of masonry dome under different ratio of span was established to analyze the mechanical behavior of masonry dome under static load, it is found that the mechanical performance of masonry dome is the best when the span ratio is 1:1.85, and the influence of dome thickness on the mechanical properties of the dome is analyzed. The research results can provide a theoretical basis for the construction of this kind of buildings.

Keywords

Masonry Structure, Brick Dome, Height-Span Ratio, Mechanical Performance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

瓜斯塔维诺式砖石质穹顶建筑[1]在我国历史长河中扮演着十分重要的角色,由于其较大的使用空间、特有的几何外形以及良好的受力性能,被世界各地的建筑师们广泛采用[2],例如:土耳其的圣索菲亚大教堂、罗马万神庙、印度泰姬陵和英国的圣保罗大教堂等。

针对砌体穹顶的结构行为,研究主要集中在3个方面,在试验方法方面, Gianni Bartoli [3]在1996年为意大利佛罗伦萨圣玛利亚大教堂圆顶安装了数字监控系统来观察该建筑上边的裂缝。Takayoshi Aok [4]采用无损检测技术,对维科福特避难所的损坏情况进行诊断检查。Atamturktur [5]、Andrew D. Sorensen [6]构建了薄砖石圆顶的缩尺模型,并进行了非破坏性和破坏性测试。在抗震性能研究方面, Atamturktur [7]对美国两座瓜斯塔维诺式砌体穹顶结构的非线性抗震性能进行了分析, Mehrdad Hejazi [8]对波斯砖砌体不连续双壳圆顶的抗震性能进行了研究。在有限元分析方面, Atamturktur [9]采用 ANSYS 对砌体穹顶进行了详细的微建模、简化的微建模和宏观建模, 郑晓清[10]采用了 MIDAS Gen 中的壳单元对砖穹顶和墙裙进行了受力性能分析, Mohd Aamir Khan [11]采用均质法研究了伊格巴尔遗产建筑群砖石拱的横向阻力, Angjeliu [12]采用 Autodesk Revit 软件对 BIM 环境进行调研, 运用 Abaqus 软件建立结构模型。

中国的砖石质穹顶建筑主要应用于伊斯兰建筑中, 这些建筑都具有十分重要的保护价值, 而我国对砖石质穹顶的研究比较少。近年来, 随着无数次的修缮, 穹顶的建筑更多是为了满足建筑形象的要求, 因而对决定穹顶受力性能的核心指标矢跨比并没有一个理论范围。因此, 文章以位于新疆维吾尔自治区喀什莎车县的阿孜那古建筑为工程背景, 采用有限元软件 ANSYS 进行参数化分析砖石质穹顶在静力荷载工况下的受力性能, 得到该建筑的函数曲线及最优矢跨比。

2. 工程概括

阿孜那古建筑位于莎车县铁木尔胡加库力社区6组154号, 始建于东察合台汗国末期米尔兹·阿巴克汗时期(1468~1514), 至今已有500多年的历史。该建筑主体部分由多个方形房间连接而成, 屋顶由51个小穹顶和1个大穹顶组成, 如图1所示。整个建筑全部采用砖砌体结构, 主要承重结构为砖石穹顶结构。



Figure 1. Dome pictures
图 1. 穹顶照片

3. 拟合曲线

根据现场调查及资料显示, 莎车老城文物保护建筑自建成到至今, 由墙体及穹顶的不同砖规格和不同的砌筑方式判断, 在不同时期经过修缮加固, 穹顶大小不一, 因此文章选取 6 种不同矢跨比的穹顶, 运用 Origin 对 6 个穹顶函数曲线进行拟合, 拟合函数曲线如图 2 所示。

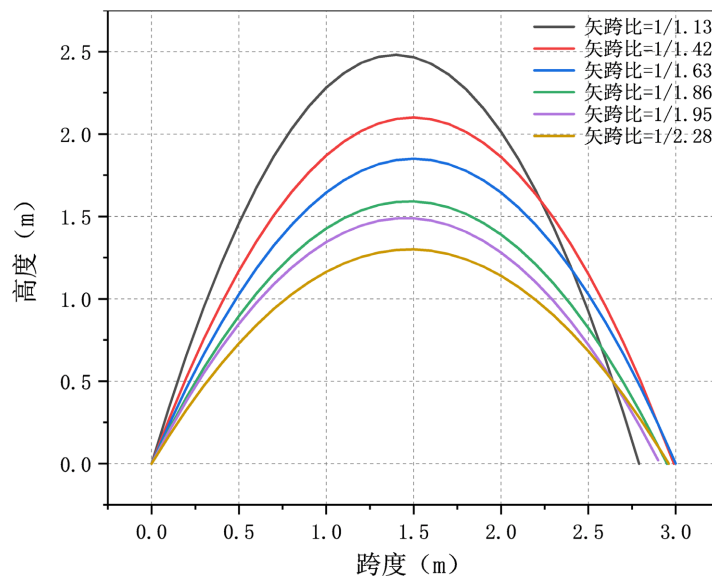


Figure 2. Fitted Curve
图 2. 拟合曲线

4. 材料力学性能试验

4.1. 砌块抗压强度测试试验

用现场带回的土样、砖样等材料, 根据调查所知的工艺拌制草泥, 将砌块经过打磨、切割、泡水等处理的砖样粘在一起, 经过养护等处理测定砌块的抗压强度。采用抗折抗压试验机、砌体试件, 压力机最大量程 200 kN, 加载精度为 0.01 kN, 加载速度为 1.0 kN/s, 最终得到砌块抗压抗压强度为 8.3 Mpa (见表 1, 图 3)。



试样1抗压试验 试样2抗压试验 试样3抗压试验

Figure 3. Compression test of brick masonry

图 3. 砌块抗压试验

Table 1. Results of block compressive strength

表 1. 砌块抗压强度试验结果

| 名称 | 受压面尺寸(mm) | 破坏荷载(kN) | 抗压强度(MPa) |
|------|-----------|----------|-----------|
| 试样 1 | 120 × 150 | 150.10 | 8.30 |
| 试样 2 | 120 × 150 | 155.10 | 8.35 |
| 试样 3 | 120 × 150 | 144.90 | 8.25 |
| 平均值 | - | - | 8.3 |

4.2. 胶凝材料抗压强度

胶凝材料的抗压强度采用贯入法。贯入法的检测原理是根据测钉贯入胶凝材料的深度和胶凝材料之间的相关关系，采用压缩工作弹簧加荷，把一测钉贯入砂浆中，由测钉放入贯入深度通过测强度来换算胶凝材料抗压强度的方法。根据《建筑工程质量检验评定标准 GBJ 301》规定，测区选择不少于 6 组，具体计算结果详见表 2。

Table 2. Penetration test strength of cementitious materials

表 2. 胶凝材料贯入试验强度

| 测区 | 贯入深度 d_i (mm) | | | | | | | | | | | | | | | | 平均贯入深度 d_m | 胶凝材料抗压强度换算值 f_i |
|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------------------|
| | d1 | d2 | d3 | d4 | d5 | d6 | d7 | d8 | d9 | d10 | d11 | d12 | d13 | d14 | d15 | d16 | | |
| 1 | 14.07 | 13.98 | 14.50 | 14.01 | 15.24 | 13.11 | 14.14 | 14.03 | 14.52 | 11.07 | 14.04 | 13.05 | 13.67 | 13.02 | 14.75 | 14.32 | 13.99 | 0.52 |
| 2 | 14.23 | 11.75 | 13.96 | 14.73 | 14.52 | 14.08 | 14.11 | 14.27 | 13.87 | 12.06 | 14.17 | 14.02 | 12.78 | 14.65 | 14.22 | 13.98 | 14.09 | 0.50 |
| 3 | 14.11 | 15.11 | 13.28 | 14.10 | 15.11 | 13.98 | 14.08 | 13.85 | 12.06 | 13.97 | 14.19 | 13.67 | 11.98 | 14.52 | 14.00 | 14.23 | 14.02 | 0.51 |
| 4 | 11.98 | 14.73 | 14.14 | 13.85 | 12.76 | 15.04 | 13.86 | 12.07 | 13.89 | 14.12 | 13.92 | 14.12 | 13.87 | 14.04 | 14.37 | 14.09 | 13.99 | 0.52 |
| 5 | 13.28 | 13.98 | 14.08 | 13.50 | 11.06 | 14.03 | 13.97 | 13.67 | 14.75 | 13.89 | 15.32 | 13.50 | 13.50 | 12.18 | 14.24 | 14.27 | 13.84 | 0.55 |
| 6 | 14.73 | 14.47 | 14.50 | 12.08 | 14.12 | 14.87 | 11.13 | 14.08 | 14.13 | 13.97 | 14.50 | 13.67 | 11.52 | 14.14 | 13.68 | 12.98 | 13.97 | 0.52 |
| 7 | 14.26 | 14.11 | 14.27 | 14.10 | 13.82 | 15.66 | 11.98 | 14.32 | 14.28 | 12.15 | 12.87 | 11.68 | 14.52 | 13.98 | 14.08 | 13.89 | 13.97 | 0.52 |
| 8 | 13.65 | 14.32 | 14.85 | 14.81 | 14.02 | 14.14 | 14.08 | 13.79 | 14.21 | 13.56 | 13.99 | 14.08 | 13.76 | 15.26 | 14.06 | 11.06 | 14.05 | 0.51 |
| 9 | 11.75 | 12.08 | 12.08 | 14.10 | 13.28 | 11.98 | 14.27 | 13.85 | 14.52 | 13.05 | 14.14 | 14.23 | 13.67 | 15.32 | 13.98 | 13.67 | 13.61 | 0.59 |
| 10 | 13.28 | 13.98 | 11.06 | 13.50 | 14.12 | 14.27 | 14.14 | 13.85 | 13.67 | 13.99 | 14.03 | 14.25 | 13.58 | 15.41 | 11.23 | 12.08 | 13.81 | 0.55 |

由此得到胶凝材料抗压强度取 0.5 Mpa。

5. 有限元模型的建立

5.1. 模型参数

根据砖砌体抗压强度、胶凝材料抗压强度的实测数据和《砌体结构设计规范》(GB5003-2011), 进行参数取值: 砖砌体弹性模量取 2.58 GPa, 密度为 1800 kg/m^3 , 泊松比为 0.15, 抗压强度设计值为 1.86 MPa, 抗拉强度设计值为 0.141 MPa。砖石质穹顶建筑的有限元几何尺寸是根据三维激光扫描仪获得, 如图 4 所示。

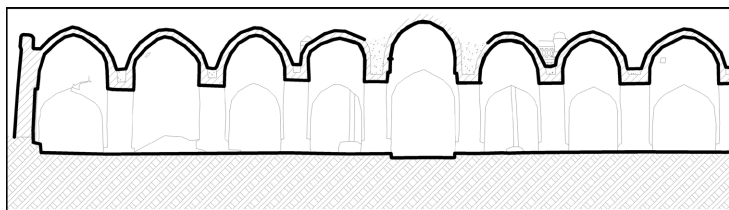


Figure 4. Laser scan of the masonry dome
图 4. 小穹顶激光扫描图

5.2. 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS (18.0 版本)建立砖石质穹顶的三维有限元模型, 如图 5 所示。穹顶模型采用实体单元模拟分析, 建立模型时, 将砌块和砌筑泥浆看作均质连续体, 不考虑砌块与砌筑泥浆间的相互作用, 单元为各向同性的连续体。模型采用 `solide65` 单元, 为了模拟穹顶的边界条件, 穹顶的底部在各个方向上都受到了约束, 穹顶的径向开口分别被限制在 x 方向和 y 方向上。小穹顶根据尺寸统计结果分别取 6 种代表性的矢跨比(1/1.13、1/1.42、1/1.63、1/1.85、1/1.95、1/2.28)和 6 种穹顶厚度(0.25 m、0.26 m、0.27 m、0.28 m、0.29 m、0.30 m)共计 36 个模型进行分析。

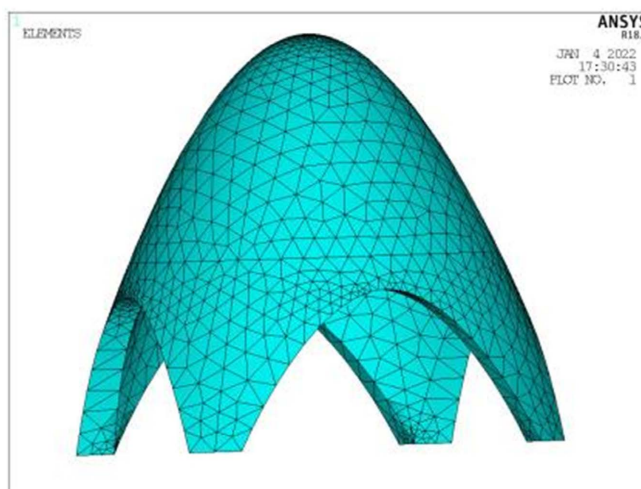


Figure 5. Finite element model
图 5. 有限元模型

5.3. 合理矢跨比的确定

矢跨比是砖石质穹顶建筑分析的基本结构参数之一, 拱墩处的水平推力、结构的附加内力都与矢跨比有关, 矢跨比的取值对结构特性也有着较大影响。得到合理矢跨比, 以 5.2 节所建的计算模型为基础, 保持材料参数不变, 选取不同的矢跨比, 分别建立三维模型进行计算。

静力荷载组合作用下结构的有限元分析

考虑到该建筑常年有宗教活动，人员聚集和旅游参观，结合《建筑结构荷载规范-GB50009-2012》，砖石质穹顶建筑上部雪荷载 0.9 kN/m^2 ，风荷载为 0.764 kN/m^2 。恒载考虑结构自重及抹灰，在无地震作用下，对恒荷载和活荷载分别取不同的设计组合系数，重力荷载取 1.3，雪荷载取 1.5，风荷载取 1.5，对砖石质穹顶进行荷载组合分析。

根据拟合所得的函数曲线，建立有限元模型，通过分析各个模型在静力荷载组合下的变形及应力，得到如下数据，如图 6~8 所示。

根据分析可以看出，该穹顶的设计均满足强度要求，当矢跨比为 1:1.85 且厚度为 0.26 m 时，砖石质穹顶产生的拉应力最小为 0.030 Mpa，压应力也相对较小。为了确保准确性，采用二分法对该模型进行调整，得到模型 37 (矢跨比为 1/1.75)、模型 38 (矢跨比为 1/1.80) 和模型 39 (矢跨比为 1/1.90)。拉应力和压应力分别如图 9，图 10 所示。

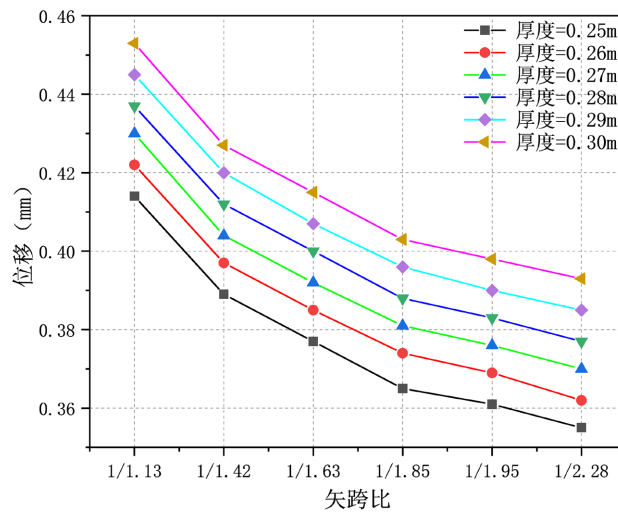


Figure 6. Change of dome displacement under different height-span ratios

图 6. 不同矢跨比下穹顶位移变化图

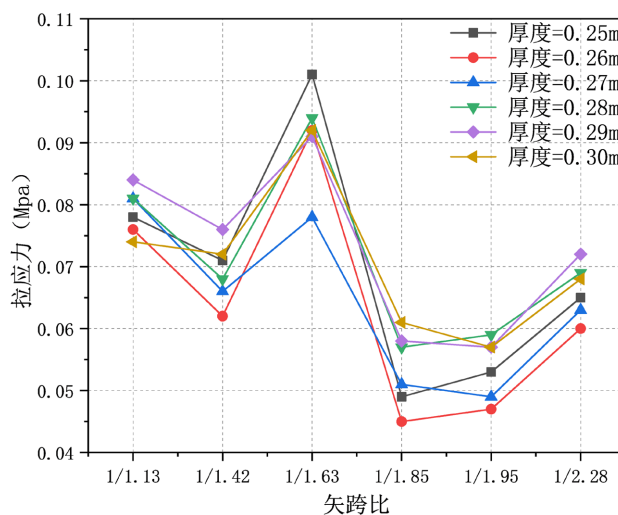


Figure 7. Tensile stress variation diagram of masonry domes

图 7. 穹顶拉应力变化图

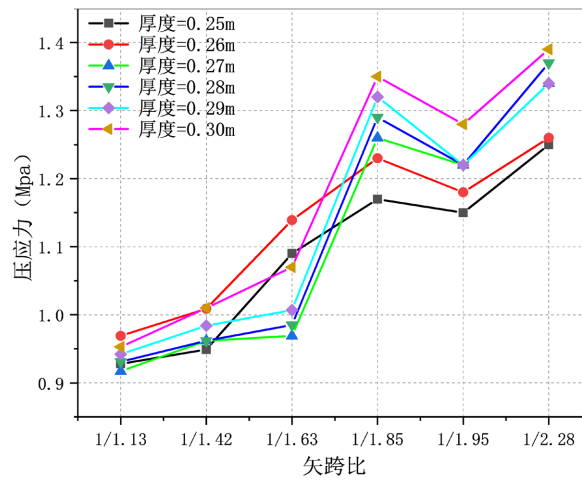


Figure 8. Compressive stress variation diagram of masonry domes
图 8. 穹顶压应力变化图

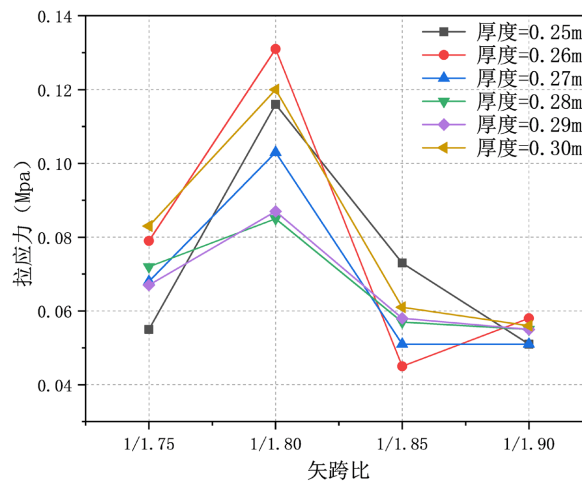


Figure 9. Tensile stress variation diagram
图 9. 拉应力变化图

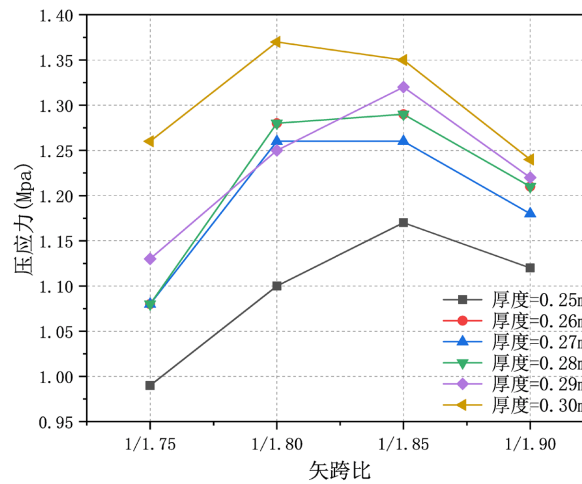


Figure 10. Compressive stress variation diagram
图 10. 压应力变化图

通过对比分析可知，当矢跨比为 1:1.85 且厚度为 0.26 m 时，穹顶产生的拉应力最小，压应力也相对较小，应力云图如图 11、图 12 所示。由此得出，该建筑的矢跨比为 1:1.85 时，即函数曲线为 $y = -0.732x^2 + 2.158x$ 时，它的受力状况最好，为最优函数曲线。

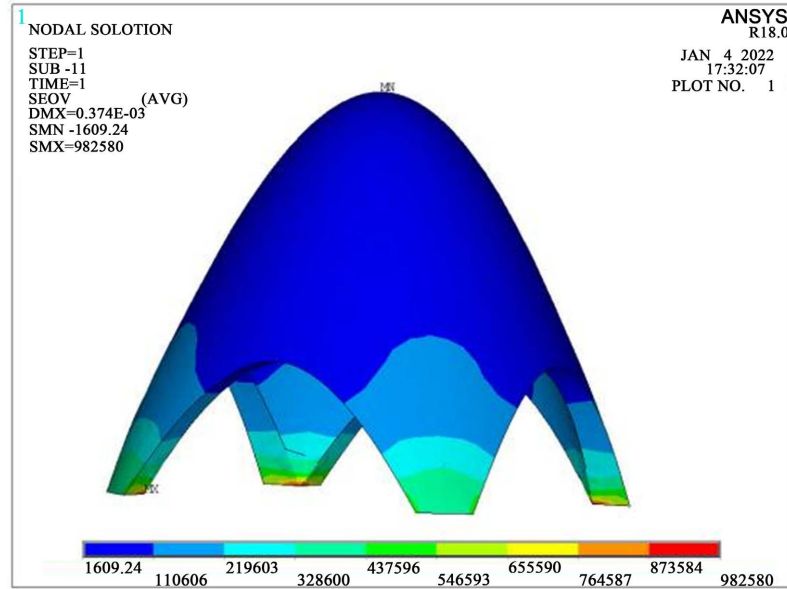


Figure 11. Von Mises stress diagram

图 11. Von Mises 应力云图

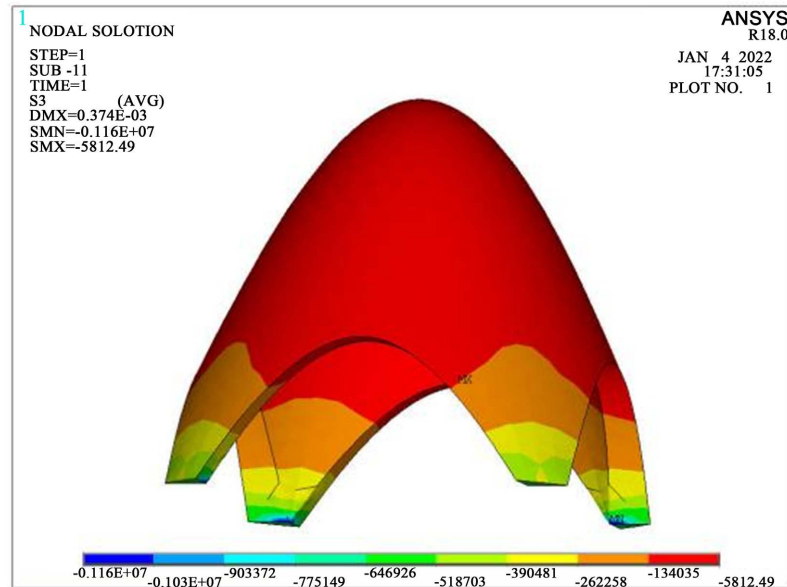


Figure 12. Third principal stress diagram

图 12. 第三主应力云图

5.4. 穹顶厚度对砖石质穹顶力学性能影响

为了探究穹顶厚度对此类穹顶的力学性能的影响，在确保材料参数、边界条件等均相同的条件下，调整穹顶的厚度，得到 6 种穹顶厚度受力性能有限元分析结果，如图 13，图 14 所示。

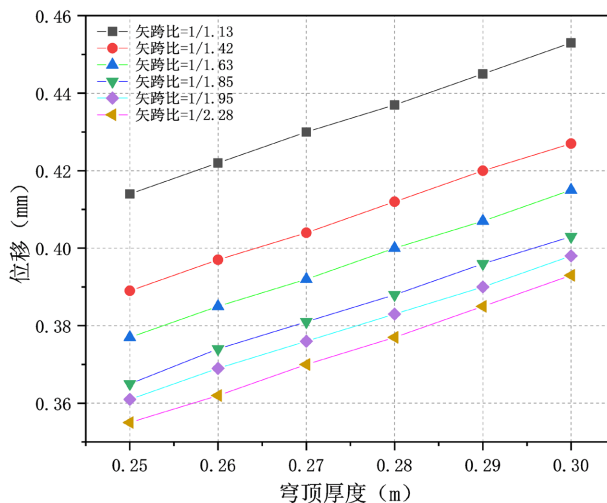


Figure 13. Displacement changes of different dome thicknesses
图 13. 不同穹顶厚度位移变化图

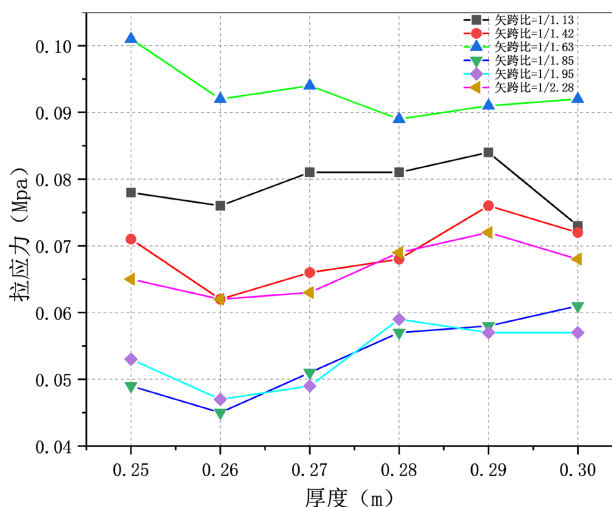


Figure 14. Diagram of tensile stress variation with different dome thickness
图 14. 不同穹顶厚度拉应力变化图

6. 结束语

通过对砖石质穹顶的受力性能进行研究，得到以下结论：

1) 通过材料的力学性能试验，得到砖砌体的抗压强度为 8.3 Mpa，胶凝材料的抗压强度为 0.5 Mpa，进而推导出砌体的抗压强度为 1.86 MPa。

2) 通过对比六种不同的矢跨比分析得到：当矢跨比为 1:1.85 时，砖石质穹顶的受力性能最好，即最优矢跨比为 1:1.85，此时，对应函数曲线为 $y = -0.732x^2 + 2.158x$ 。

分析了穹顶厚度对穹顶的影响：随着穹顶厚度的增加，穹顶的变形逐渐增大，穹顶厚度为 0.26 m 时比较适宜。

参考文献

[1] Collins, G.R. (1968) The Transfer of Thin Masonry Vaulting from Spain to America. *Journal of the Society of Archi-*

-
- tectural Historians*, **27**, 176-201. <https://doi.org/10.2307/988501>
- [2] 汪永平. 印度伊斯兰时期城市与建筑[M]. 南京: 东南大学出版社, 2017.
- [3] Bartoli, G., Chiarugi, A. and Gusella V. (1996) Monitoring Systems on Historic Buildings: The Brunelleschi Dome. *Journal of Structural Engineering*, **122**, 663-673. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:6\(663\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:6(663))
- [4] Aoki, T., Komiyama, T., Tanigawa, Y., *et al.* (2004) Non-Destructive Testing of the Sanctuary of Vicoforte. *13th International Brick and Block Masonry Conference*, Amsterdam, 4-7 July 2004, 1-10.
- [5] Atamturktur, S., Li, T., Ramage, M.H. and Farajpoura, I. (2012) Load Carrying Capacity Assessment of a Scaled Masonry Dome: Simulations Validated with Non-Destructive and Destructive Measurements. *Construction and Building Materials*, **34**, 418-429. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.031>
- [6] Sorensen, A.D. and Erdogmus, E. (2015) Horizontal Support Displacement of a Thin-Tile Masonry Dome: Experiments and Analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **29**, Article ID: 04014051. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000495](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000495)
- [7] Atamturktur, S. and Sevim, B. (2012) Seismic Performance Assessment of Masonry Tile Domes through Nonlinear Finite-Element Analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **26**, 410-423. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000243](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000243)
- [8] Hejazi, M. and Pourabedin, M. (2021) Performance of Persian Brick Masonry Discontinuous Double-Shell Domes against Earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, **119**, Article ID: 104994. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104994>
- [9] Li, T. and Atamturktur, S. (2014) Fidelity and Robustness of Detailed Micromodeling, Simplified Micromodeling, and Macromodeling Techniques for a Masonry Dome. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **28**, 480-490. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000440](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000440)
- [10] 郑晓清, 董丹申, 董石麟, 等. 矩形平面带墙裙的叉筒式砖穹顶结构受力性能及参数化建造技术研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(S2): 158-162.
- [11] Khan, M.A. and Paul, D.K. (2017) Seismic Performance of Masonry Arches and Vaults. *International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"*, Springer, Cham, 23-41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61914-9_3
- [12] Angjeliu, G., Cardani, G. and Coronelli, D. (2019) Digital Modelling and Analysis of Masonry Vaults. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XLII-2/W11**, 83-89. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-83-2019>