

文章编号 1000-5013(2005)03-0267-04

大跨度石穹顶空间结构受力行为数值模拟

杨 勇 郭子雄

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 大跨度石穹顶空间结构受力行为分析比较复杂, 结构整体受力行为分析具有较大难度. 结合工程实例, 基于 ANSYS 程序对大跨度石穹顶空间结构进行数值模拟分析. 结合结构实际受力情况及闽南地区石砌体施工工艺特点, 确定结构荷载取值和材料强度取值. 采用 ANSYS 程序中的 Solid 65 单元和 DP 材料模型, 并以“自上而下”和布尔操作的建模方法, 建立石穹顶空间结构在施工阶段、整体成型阶段和最不利状态三维有限元分析模型. 根据石穹顶空间结构在 3 个主要受力阶段的数值分析结果, 全面研究石穹顶空间结构在各阶段的变形和应力分布等受力行为; 据此分析结果, 进一步对原设计方案提出相关设计和施工建议. 该工程实例中石穹顶空间结构满足强度和变形要求, 基于 ANSYS 程序的石穹顶空间结构数值模拟技术可行.

关键词 石穹顶, 受力行为, 数值模拟, ANSYS 程序

中图分类号 TU 363.01; TU 311.41

文献标识码 A

1 工程概况

该工程为一新建佛教殿堂(图 1). 整个建筑底部(±0.000 mm 标高以下)全部采用花岗岩砌体结构, 上部为 5 层古建筑风格木结构殿堂. 主要承重结构为花岗岩细料石砌体球形穹顶结构. 穹顶跨度为 17 200 mm, 矢高 4 200 mm, 穹顶厚度 800 mm. 采用传统的计算理论计算穹顶的变形和受力情况难度较大, 因此本文运用大型有限元软件 ANSYS 对穹顶结构进行数值模拟, 以准确把握结构的受力和变形, 并借助丰富的图形显示软件对计算得到的大量数字信息进行可视化处理.

2 材料强度及荷载取值

大跨度石穹顶结构的数值模拟首先需要建立准确的穹顶空间有限单元模型. 在数值模拟计算模型的建立过程中要考虑如下主要原则: (1) 结构形状和几何尺寸的准确模拟; (2) 材料特性的准确模拟; (3) 荷载作用的准确模拟; (4) 全部最不利状态的考虑.

2.1 砌体强度取值

文[1]指出对于形状较大、修琢良好并且用比较薄的灰缝砌筑的天然石料砌体, 其抗压强度与石料本身的强度很接近. 对重型石料砌体可以允许使用超出规范规定的最大工作应力, 但前提是石料的力学性能良好且具备良好的施工工艺. 该工程采用无垫片砌筑技术, 灰缝采用传统的特殊工艺. 结合福建泉州石结构长期以来积累的实践经验和试验资料, 花岗岩细料石砌体材料的抗压强度 f 、弯曲抗拉强度 f_{tm} 、单轴抗拉强度 f_t 和弹性模量 E 等参数, 按表 1 取值.

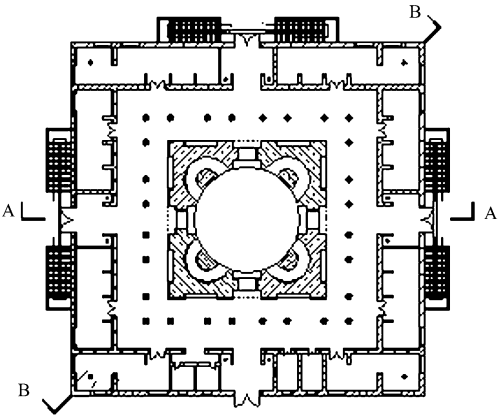


图 1 大跨度石穹顶殿堂
- 10.500 mm 标高处平面图

收稿日期 2004-09-07

作者简介 杨 勇(1976), 男, 讲师, 博士, 主要从事结构工程和防震减灾工程的研究. E-mail: yyhph2004@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 材料特性汇总表

材料特性	f /MPa	f_m /MPa	f_t /MPa	E /GPa	ρ /N·mm ⁻³	v	备 注
花岗岩体	191.0	22.93	7.65~ 11.45	50~ 100	2.62	0.25	惠安产花岗岩, 强度试验值由厂家
计算模型	34.0	—	3.40	25	2.62	0.25	提供并按无垫片细料石砌体考虑

根据本工程的实际情况(采用特殊的连接工艺和连接材料,由专门的石材工匠和专家控制),石穹顶的强度设计值按无垫片细料石砌体考虑,并根据有关试验资料 and 实践经验取值.表中 ρ 为密度, v 为泊松比

2.2 荷载取值

考虑到该建筑的文化影响以及业主要求,将该结构按 100 a 使用年限设计,结构的重要性系数取为 $\gamma_0 = 1.1$.同时考虑到该建筑常年有大型宗教活动、人员聚集和旅游参观,根据《GB 50009- 2002 建筑结构荷载规范》^[2],大跨度石穹顶空间结构上部均布活荷载按 4.0 kPa 取值,恒载考虑石穹顶结构自重和施工阶段的堆料.同时结构上部木结构殿堂的荷载(包括恒荷载和活荷载)均由柱子直接传递到石穹顶结构,并传递到基础.保证结构承载能力的可靠度,按照《GB 50010- 2002 混凝土结构设计规范》^[3]条文说明的 5.3.4 节,对恒荷载和活荷载设计值均乘以 1.9 的放大系数.

3 ANSYS 模型建立

3.1 单元类型

采用 ANSYS 程序单元库中的 Solid 65 单元.以考虑岩石材料的非线性性质,诸如岩石的开裂、压碎.由于本空间结构为球形穹顶, Solid 65 单元均退化为四面体单元.

3.2 材料模型

为考虑岩石砌体的抗拉、抗压强度不同,采用 Drucker Prager(DP)材料模型对岩石砌体进行模拟.对 DP 材料,其受压时的屈服强度大于受拉时的屈服强度.根据以下公式,可以得到 DP 材料需要输入的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 分别为

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{3\sqrt{3}\beta}{2 + \sqrt{3}\beta} \right], \quad C = \frac{\sigma_y \sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}{6 \cos \varphi}, \tag{1}$$

其中 β 和 σ_y 由受压强度 f 和受拉强度 f_t 求得,可根据以下公式计算.即

$$\beta = \frac{f - f_t}{\sqrt{3}(f + f_t)}, \quad \sigma_y = \frac{2ff_t}{\sqrt{3}(f + f_t)}. \tag{2}$$

3.3 建模方法

根据对称性原理建立石穹顶结构 1/2 模型并对进行数值模拟.模型采用“自上至下”的建模方法,即首先建立各个块体,然后采用 ANSYS 程序布尔运算实现各个块体的拼接.根据石穹顶结构的受力特点,本文分别建立施工阶段、整体受力阶段和最不利受力状态的 3 种不利情况的模型,并分别进行数值模拟.

4 不同受力状态模型

4.1 穹顶施工阶段

在整体结构未全部形成之前,球壳已经形成.此时球壳作为主要的承重结构,承受周围堆料及施工人员的全部重量.该阶段虽未曾考虑上部结构传递的荷载,较实用阶段的荷载值小,但是由于没有周围砌体对穹顶约束的有利作用,施工阶段也可能是一种不利状态.考虑结构为对称结构、对称荷载及对称施工,因此取原型的 1/2 为计算模型.不考虑石穹顶周围砌体的作用,穹顶表面荷载按照完全堆料考虑(偏于保守).

4.2 整体受力阶段

整体受力阶段是指当整个结构完全竣工并投入使用后的极限状态验算.此时由上部木结构传递的荷载作用到穹顶的各个承重柱,按照实际受力情况可以建立相应整体结构计算模型.根据结构对称性,取原型结构的 1/2 建立模型.在整体结构计算模型中,将石穹顶和周围砌体考虑成具有良好的整体连

接. 这与实际情况相比将周围砌体对穹顶约束产生的有利作用考虑过多, 稍偏于不安全. 但是, 前文在材料强度取值时已进行了相应强度折减, 因此计算结果仍可用于实际的设计.

4.3 最不利受力阶段

穹顶的最不利受力情况是指将球壳周围的岩石砌体与球壳考虑为完全不连接, 周围岩石砌体仅作为填充层将其自身自重荷载和上部柱子承受荷载传递到穹顶, 并且柱子直接连接到穹顶的平面对应位置. 根据结构对称性, 取原型结构的 1/2 建立模型. 由于完全不考虑周围砌体的有利约束作用, 这种情况相对实际的球壳受力情况较为保守. 同时柱子直接位于穹顶上, 无法考虑柱子底座对荷载传递扩散的有利作用. 因此, 此阶段仅作为最不利受力情况分析计算, 以考察结构在最危险状态下的安全性.

5 计算结果分析

对上述 3 个不利阶段对应模型的受力性能进行了全面计算分析, 同时对穹顶结构的各个关键部位(柱脚、穹顶顶面和穹顶边梁)的进行了局部分析.

5.1 施工阶段

图 2 为施工阶段模型的应力等势图, 竖向(Y 方向)最大变形为 0.425 mm, 横向(X, Z 方向)最大变形为 0.134 mm, 变形都很小, 这符合石结构的特点. 图中竖向(Y 方向)最大压应力为 8.833 MPa, 横向(X, Z 方向)最大拉应力为 0.742 MPa.

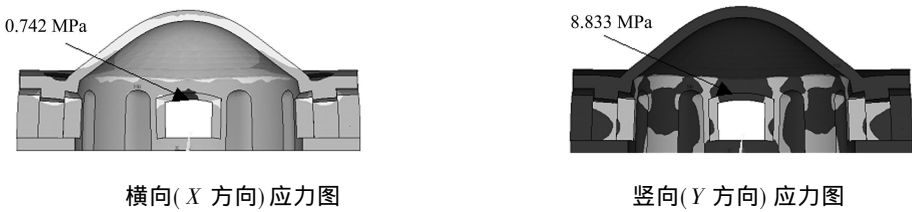


图 2 施工阶段应力验算结果

5.2 整体受力阶段

图 3 为整体受力阶段模型的应力等势图, 竖向(Y 方向)最大变形为 0.682 mm, 横向(X, Z 方向)最大变形为 0.220 mm, 变形都很小. 图中竖向(Y 方向)最大压应力为 6.56 MPa, 横向(X, Z 方向)最大拉应力为 0.636 MPa.



图 3 整体受力应力验算结果

5.3 最不利受力阶段

图 4 为最不利受力阶段模型的应力等势图, 竖向(Y 方向)最大变形为 0.992 mm, 横向(X, Z 方向)最大变形为 0.240 mm, 变形都很小. 图中竖向(Y 方向)最大压应力为 11.553 MPa, 横向(X, Z 方向)最

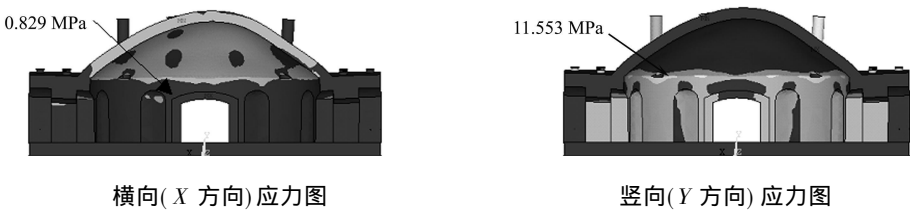


图 4 最不利受力阶段应力验算结果

大拉应力为 0.829 MPa. 从图 2~ 4 的计算结果可以看出, 在 3 个不同受力阶段石穹顶结构的应力均能够满足要求, 而且变形很小. 结构中较大的压应力主要产生在柱脚及其周围, 结构其他部位的压应力、拉应力值均较小. 在整体受力阶段和最不利受力阶段中由于上部木结构的局部抽柱, 导致变形的不对称并

产生附加的拉应力,在设计中尽量避免.

6 结论和设计建议

ANSYS 数值模拟技术可以很直观的实现复杂结构的受力分析,为石拱穹顶等复杂空间结构的受力性能分析提供有力帮助. 根据对大跨度石拱穹顶空间结构的在施工阶段、整体受力阶段和最不利受力阶段 3 个阶段的 ANSYS 数值模拟,并进行结果分析后发现,在构造措施能够得到保证的前提下,施工阶段、整体受力阶段和最不利受力阶段石穹顶空间结构均能满足强度要求. 因此在该类型结构设计中,最重要的是控制材料性能和料石石块之间的相互连接作用,即石砌体结构的施工工艺和施工技术、构造方法以及特殊工艺. 同时根据数值模拟结果的分析,对原方案提出几点建议. (1) 球形穹顶与圆柱形墙体连接处是关键部位,应采取加强措施,保证均匀过渡,对穹顶的拱座和拱脚进行设计校核和严格的施工控制. (2) 应采用对称施工,严格控制施工顺序和施工荷载,尽量避免不对称施工和堆料,以保证结构的受力合理和传力路线明确. (3) 计算中石穹顶结构按照细料石无垫片砌体考虑,砌体强度和材料性能均按有关规程和资料取值. 在实际工程中须进行相关的试验研究,进一步确保和验证材料强度和相关性能参数. (4) 岩石砌块之间的工艺构造必须制作合理、准确,以确保合理传力,避免非结构受力和薄弱面的出现. 在砌筑的施工过程中,应采取合理的施工工艺和工艺流程,尽量保证可以达到更大的安全度. (5) 柱脚处可以采用适当放坡的方法,以增加柱础截面面积,减小柱脚对穹顶的冲切作用.

参 考 文 献

- 1 朱君道著. 砖石结构设计师手册[J]. 成源华译: 上海: 同济大学出版社, 1989. 15~ 50
- 2 中华人民共和国标准委员会编. GB 50009- 2001 建筑结构荷载规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 1~ 15
- 3 中华人民共和国标准委员会编. GB 50010- 2002 混凝土结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 1~ 25

Numerical Simulation on Mechanical Behavior of Large Span Spatial Structure with Stone Vault

Yang Yong Guo Zixiong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract It is fairly complicated to analyse mechanical behavior of large span spatial structure with stone vault. Based on ANSYS program, the authors carry out analysis of numerical simulation on large span structure with stone vault by combining with engineering example. The sampling of structural load and material strength are determined at first by combining with actual load carrying situation of the structure and technological characteristic of stonework construction in south of Fujian Province. Corresponding to the spatial structure with stone vault in construction stage, stage of forming in entirety, and most detrimental state, three dimensional models of finite element analysis are then setup. They are set up by adopting Solid 65 element and DP material model in ANSYS program and by using modelling methods of “top to bottom” and boolean operation. The mechanical behavior of spatial structure with stone vault including deformation and stress distribution in each stage is studied all round according to numerical analysis results in 3 main load carrying stages. Suggestions about design and construction are put forward on the basis of analytical results for further improving original design scheme. As shown by the results, the spatial structure with stone vault in this engineering example meets the need of strength and deformation; the ANSYS program based technology of numerical simulation for spatial structure with stone vault is feasible.

Keywords stone vault, mechanical behavior, numerical simulation, ANSYS program