

古砖塔子结构压剪复合受力性能分析

卢俊龙 范金鑫 王振山 作义

Analysis of the composite mechanical properties of the substructure of a masonry pagoda

LU Jun-long, FAN Jin-xin, WANG Zhen-shan, YUN Zuo-yi

引用本文:

卢俊龙, 范金鑫, 王振山, 作义. 古砖塔子结构压剪复合受力性能分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 277-288. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.12.004

LU Jun-long, FAN Jin-xin, WANG Zhen-shan, YUN Zuo-yi. Analysis of the composite mechanical properties of the substructure of a masonry pagoda[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 277–288. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2020.08.12.004

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.12.004

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锈蚀植筋下新老混凝土黏结面压剪试验研究

Experimental research on load-shear performance of interface between new and old concrete with corroded planting bar 工程科学学报. 2018, 40(1): 23 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.01.004

外加强环式H型钢梁-方钢管角柱节点抗震性能

Seismic performance of H-shaped steel beam-to-square steel corner column connection with external strengthened ring 工程科学学报. 2018, 40(8): 1005 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.08.015

金属薄板面内压剪变形的损伤断裂行为

Damage and fracture behavior of a metal sheet under in-plane compressionshear deformation 工程科学学报. 2021, 43(2): 263 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.09.23.002

设防烈度对框架-核心筒结构受力性能和材料用量的影响

Influence of fortification intensity on structural performance and material dosage of frame-tube structures 工程科学学报. 2017, 39(9): 1443 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.09.019

粉煤灰改性高水材料力学性能试验研究及机理分析

Experimental study and analysis of the mechanical properties of high-water-content materials modified with fly ash 工程科学学报. 2018, 40(10): 1187 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.10.005

薄铺层复合材料薄壁管轴压屈曲行为研究

Buckling of composite cylindrical shells fabricated using thin-ply under axial compression 工程科学学报. 2018, 40(7): 857 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.07.012 工程科学学报,第 44 卷,第 2 期: 277-288, 2022 年 2 月 Chinese Journal of Engineering, Vol. 44, No. 2: 277-288, February 2022 https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.12.004; http://cje.ustb.edu.cn

古砖塔子结构压剪复合受力性能分析

卢俊龙1)网,范金鑫1),王振山1),贠作义2)

1) 西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048 2) 陕西省建筑科学研究院有限公司, 西安 710082 ⊠通信作者, E-mail: lujunlong@sohu.com

摘 要 为研究古塔子结构的受力性能,设计制作了3件不同楼层的子结构缩尺模型试件,进行低周反复加载试验,观察试件的开裂、变形及破坏现象;建立数值模型进行计算,得到了试验荷载作用下各试件的等效塑性应变、荷载--位移曲线,将计算结果与试验结果进行对比,分析竖向压应力对古塔砌体抗震性能的影响.结果表明,特征荷载的计算值相对试验值的误差均小于21%,等效塑性应变的分布与试件开裂破坏区域一致;当竖向压力保持恒定时,随着水平荷载的增大,塔体沿砌筑缝逐渐开裂破坏,裂缝宽度亦随之增大,在塔体洞口周围的破坏更为明显,且试件残余变形增大;随着压剪比的增大,古塔砌体开裂破坏的范围减小,抗剪承载力、刚度以及耗能能力均有所提高,但延性和变形能力略有降低.研究结果为砖石古塔建筑结构损伤及抗震能力评定提供参考.

关键词 砖石古塔;古砌体;压剪比;拟静力试验;抗震性能 分类号 TU317;TU362

Analysis of the composite mechanical properties of the substructure of a masonry pagoda

LU Jun-long¹¹[∞], FAN Jin-xin¹, WANG Zhen-shan¹, YUN Zuo-yi²

School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
 Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710082, China
 Corresponding author, E-mail: lujunlong@sohu.com

ABSTRACT Brick wall tubes, a popular form of ancient masonry pagoda, can be seen as a spatial lateral force resistance system. The masonry of the ancient pagoda is a case of compression and shear developed due to earthquakes. This composite compression and shear behavior is one of the key issues in the seismic capacity of masonry tube structure. In order to study the mechanical properties of the substructure of masonry pagodas, three sub-structural models were designed and constructed. Low cyclic loadings tests were conducted on the models and the crack, deformation, and failure phenomena were surveyed during the loading process. Simulation models were then developed for calculation, and results were obtained about the equivalent strain and load-displacement curve. Comparing the calculated results with the experimental results, the effects of vertical compressive stress on the masonry in the ancient tower were analyzed. Results showed that the error was less than 21% for the calculated value of the characteristic load relative to the test value. The distribution of equivalent plastic strain was consistent with the crack failure area of the specimens. When the vertical pressure remained constant with increasing horizontal load, the tower body gradually cracked, damage occurred along the masonry joints, and the width of cracks also increased. The failures around the structure opening were more obvious, and the residual deformation of specimens increased. With the increase in the ratio of compression to shear, the range of cracking and damage to the masonry of the ancient tower

decreased, while shear bearing capacity, stiffness, and energy dissipation capacity were increased. However, ductility and deformation capacity slightly decreased. These results can provide references for the assessment to structural damage and seismic capability of ancient masonry pagodas.

KEY WORDS masonry pagoda; ancient masonry; ratio of compression to shear; pseudo-static test; seismic performance

砖石古塔是我国古建筑的主要形式之一,现 存数量较多且具有极高的科学与文化价值.由于 古塔结构自重较大,且大部分处于地震多发地区, 在长期保存过程中持续受到自然与人为的破坏, 导致结构存在不同程度的损伤,甚至发生倒塌.因 此,对现存砖石古塔抗震能力进行研究,是制定古 塔保护技术标准的重要基础,对古塔建筑保护具 有突出意义.

砖石古塔高宽比大,竖向压力对砌体抗剪强 度具有显著影响,在地震作用下,塔体内同时产生 竖向压力与水平剪力,沿着主拉应力方向开裂,而 后发生破坏,因而古塔砌体在压剪复合受力状态 下的力学性能是进行古塔抗震能力分析的重要基 础;同时,古塔结构平面多为筒体结构,地震时各 墙肢上的应力分布不均匀,墙体破坏模式受到多 种因素的影响,破坏规律复杂.因此,进行古塔结 构压剪复合受力性能研究,对砖石古塔抗震能力 评定具有重要意义.

历史震害表明,砖石古塔的典型震害有沿中 轴线劈裂、顶部掉落等形式,结构破坏状态与抗震 能力评估需要考虑多因素的影响[1-3],其中砌体的 力学性能是主要因素之一[4-5].针对砌体抗剪强度 与抗震能力问题完成了一系列的研究[6-7], 文献 [8~11] 对石砌体及其灰缝的力学性能进行试验研究,试 验结果分析竖向压应力对灰缝的抗剪强度有显著 提高. 王冬冬和彭斌^[12]、王毅红等^[13] 通过对砌体 试件进行压剪破坏试验研究,表明压应力水平对 砌体材料的压剪破坏影响显著. 蔡勇等[14]、杨娜和 滕东宇[15]、信任和姚继涛[16] 对砌体结构在压剪复 合受力下的抗剪强度研究,表明竖向压应力的大 小直接决定砌体的抗剪破坏形态. Haach 等^[17]、 Banting 和 El-Dakhakhni^[18] 对砌体结构进行抗震试 验,表明竖向压力是影响砌体结构抗震性能重要 因素之一. 陈伯望等^[19]、王秋维等^[20]、李忠献等^[21] 对砌体墙进行大量拟静力试验研究,结果表明竖 向压力提升对结构承载能力与刚度等抗震性能有 明显提升.张望喜等^[22]、付亚男等^[23]采用 ABAQUS 有限元软件对不同竖向压应力下的砌体墙进行模 拟,结果表明,增大竖向压力能够提高墙体峰值荷 载,但过高的竖向压应力会使结构的抗震能力严

重降低.

因古塔结构墙体较厚,水平截面内墙体相互 约束形成筒体而具有一定的空间效应.普通砌体 结构以墙体为受力单元,抗震机制与古塔区别较 大.古塔筒体在压剪复合受力状态下多发生剪切 破坏,且砌体抗剪强度与法向压力密切相关,故竖 向压应力对结构的破坏模式与极限承载力具有显 著影响.为此,本文结合古塔墙体材料力学性能试 验,确定其力学计算参数进行数值分析,并进行古 塔子结构在不同竖向压力下的低周反复加载试 验,将计算与试验结果对比,研究古塔子结构的受 力性能及压剪比(截面竖向压力与水平剪力的比 值)对其抗震能力的影响,为砖石古塔抗震能力评 定提供依据.

1 工程材料与方法

1.1 试件设计与制作

以西安兴教寺玄奘塔为原型,该塔为唐代高 僧玄奘法师的遗骨灵塔,为楼阁式砖塔,共5层, 通高21m,平面为正方形,底层边长5.6m,沿高度 方向塔体收分明显,楼层平面尺寸及层高逐层递 减,见图1.模型试件缩尺比例为1/8,采用模型砖 及糯米灰浆砌筑,选用龄期约40a的青砖作为块 体母材,按缩尺比例切割后制作模型砖.分别以塔 体底部、中部及顶部的3个楼层子结构为原型结 构,制作3个模型试件,具体尺寸见图2所示.



图 1 古塔原型及其子结构模型. (a)兴教寺玄奘塔; (b)子结构模型 Fig.1 Prototype of ancient pagoda and its substructure model: (a) Xuanzang Pagoda in Xingjiao Temple; (b) substructure model



图 2 子结构试件尺寸(单位:m).(a)顶部结构;(b)中部结构;(c)底 部结构

Fig.2 Dimensions of substructure specimens (Unit: m): (a) top structure; (b) central structure; (c) bottom structure

古塔属于高耸结构,不同楼层墙体承受的竖向压力沿高度方向变化较大.因竖向压力是影响 古塔砌体抗剪强度的主要因素之一,故不同压剪 比条件下塔体破坏的模式亦不同.考虑古塔平面 简体的构造特征及各楼层竖向压力的变化,并满 足试验加载要求,以塔体楼层子结构为对象,制作 塔体顶部(第3层至第5层)、中部(第2层至第 4层)、底部(第1层至第3层)的模型试件各1个, 分别记为T1、T2和T3,其中T1和T3采用糯米灰 浆砌筑,T2试件采用糯米灰土浆砌筑;T1、T2试 件为第1、3层开洞,T3试件为2层开洞.

1.2 试验方案

1.2.1 试验加载装置

采用 MTS 伺服作动器进行加载,如图 3 所示. 试件底部通过反力钢梁和地锚螺栓固定,试件顶 部安装加载连接件,与水平作动器之间通过螺栓 连接,并在顶部通过千斤顶施加竖向荷载,完成后 施加水平往复荷载.



1.2.2 测点布置

在东立面一层与二层布置竖向千分表(图中 测点7、8),量测竖向位移;在东立面底层布置横向 千分表 (图中测点 9), 量测横向位移; 在南立面与 北立面每层分别沿对角布置一个千分表 (图中测 点 1~6), 测量子结构的剪切变形.测点布置如图 4 所示.加载后采集水平、竖向荷载及位移,并记录千 分表的读数、试件的破坏情况以及裂缝发展状况.



图 4 测点布置示意图. (a)南立面; (b)东立面; (c)北立面 Fig.4 Loading test scheme: (a) south facade; (b) east facade; (c) west facade

1.2.3 加载制度

塔体不同楼层所受竖向荷载值不同,因竖向 压力对砌体抗剪强度影响显著,故竖向加载采用 10、20与30kN三个荷载值进行加载.将试件底 板、千斤顶、作动器与连接头可靠固定后,一次施 加到预先设定的竖向荷载值,并确保千斤顶与试 件居中对齐,保持加载全过程竖向荷载值恒定;而 后施加水平荷载,因古塔砌体脆性较强,故全程采 用位移加载方式,每级加载增量为1mm,加载至 结构开裂破坏后,增大竖向荷载,按位移重新进行 加载,直至结构最终破坏.

2 试验结果与分析

2.1 破坏现象

2.1.1 顶部结构 (T1 试件)

当竖向荷载为 10 kN 时, 施加水平荷载初期无 明显裂缝, 随着水平加载位移的增大, 首先在塔檐 附近沿灰缝开裂, 沿着塔体边角区逐渐扩展形成 少量斜裂缝, 见图 5(a). 位移加载至 11 mm 时, 北 立面出现较长的斜裂缝, 第一阶段加载结束. 当竖 向荷载增加至 20 kN 时, 压剪比随之增大, 塔体开 裂较作用 10 kN 竖向压力时略有滞后, 新增裂缝主 要分布于券洞附近, 而后逐渐形成细小的贯通裂 缝, 见图 5(b). 持续加载后砌筑灰浆亦持续掉落, 于北立面形成"X"型裂缝, 均沿砌筑缝开展, 同时 主裂缝周边出现数条细微裂缝. 裂缝的产生与扩 展伴随加载全过程, 呈明显的剪压破坏形态. 当水 平位移加载至 16 mm 时, 裂缝沿全截面贯通.



图 5 试件局部破坏. (a)加载初期开裂; (b)北立面 X 型裂缝; (c)砖块脱落; (d)交叉贯通裂缝; (e)X 型贯通裂缝; (f)南立面开裂错层 Fig.5 Local failure of substructure specimens: (a) cracking at initial loading stage; (b) X-type crack in north facade; (c) brick fell off; (d) cross through fracture; (e) X-type through fracture; (f) cracking and staggered floor of south facade

2.1.2 中部结构 (T2 试件)

当竖向荷载为 10 kN 时,试件在加载初期无裂 缝产生.当水平荷载增加至 5 kN 后,塔体灰缝处开 始出现裂缝,逐渐形成阶梯型裂缝;见图 5(c).随着 水平位移的增加,裂缝开展过程与 T1 试件相同.当 位移加载至 12 mm 时,北立面二层券洞砖块脱落, 随后南、北立面塔体裂缝逐渐完全贯通,加载结束. 当竖向荷载增加至 20 kN 而使试件的初始压剪比增 大,新裂缝的产生较竖向荷载为 10 kN 时略有延缓, 水平位移加载至 8 mm 时,南、北立面首先在灰缝处 出现新裂缝;随着位移的持续加载,塔体原有裂缝 逐渐扩展并延伸,见图 5(d).当加载位移达到 13 mm 后,北立面三层与一层券洞顶部砖块先后脱 落,但砖块均未出现断裂现象,塔体裂缝沿砌筑灰 缝逐渐贯通,位移加载至 20 mm 时,塔体完全破坏. 2.1.3 底部结构(T3 试件)

当竖向荷载为 20 kN 时, 在加载初期, T3 试件 与 T1、T2 试件的破坏现象相似.水平位移加载至 8 mm 时, 南立面中部塔檐附近开裂较为明显.随 着加载位移增大, 塔体券洞及塔檐附近裂缝产生 较频繁, 灰浆持续脱落, 裂缝延伸并逐渐形成贯通 裂缝; 位移加载至 13 mm 时, 北立面底部塔檐处砖 缝开裂较大, 南立面最终形成"X"型全截面贯通 裂缝, 见图 5(e), 加载完成.而当竖向荷载提高至 30 kN 时, 加载初期灰浆开始缓慢脱落, 未见明显 新裂缝产生.当加载位移达到 8 mm 后, 原有裂缝 开始扩展延伸并伴随有新裂缝不断出现.而后随 着继续加载,南立面中部塔檐处破坏严重,砖块外 突并出现错层现象,见图 5(f),北立面券洞砖块出 现裂缝,并扩展至断裂,先后有三块砖块脱落;加 载后期,试件既有裂缝不断延伸至全截面贯通.水 平位移加载至 18 mm 后,结构达到破坏.

对比3个试件的破坏过程可发现相同的现象: 加载初期,在塔檐与券洞附近灰缝出现裂缝,并逐 渐向塔体边角处呈阶梯状扩展延伸.随着水平加 载位移的增大,裂缝进一步扩展,斜裂缝逐渐贯穿 全截面;加载后期,裂缝宽度增大,砖块间有错位 现象,最终导致试件破坏.当竖向压力增大后,试 件的开裂略有滞后,承载能力有一定提高.其中底 部结构(T3试件)与T1、T2试件相比所受竖向压 力更大,T3试件抵抗变形能力提高,极限承载力显 著增大,在加载后期,沿裂缝错动现象更为明显, 呈典型的斜压破坏形态.

2.2 试验加载压剪比曲线

古塔砌体的抗剪切承载力受竖向压力的影响 较为显著,以下结合压剪比(竖向压力与剪力的比 值),并绘制压剪比曲线,由此作为砖石古塔结构 在压剪复合受力状态下发生破坏的依据,压剪比 曲线如图 6 所示,图中, *d*为加载位移, *d*_u为试件破 坏的极限位移值.

根据试验结果,绘制出三个试件的压剪比曲 线于图 6. 可以看出:



图 6 子结构试件压剪比曲线. (a)T1 试件; (b)T2 试件; (c)T3 试件

Fig.6 Compression-shear ratio curve of substructure specimen: (a) T1 specimen; (b) T2 specimen; (c) T3 specimen

(1)随着加载位移的增大,压剪比曲线呈逐渐 减小趋势,曲线可分为3段.在位移加载达到开裂 位移之前,压剪比大小迅速降低;在裂缝开展阶 段,压剪比曲线的减小较为平缓;位移加载达到极 限位移附近,压剪比大小有略微的增加.

(2)三组试件试验结果曲线的变化趋势一致, 即在塔体开裂之前,三组试件的压剪比曲线下降 迅速,塔体处于弹性状态,剪力增加较快;塔体开 裂后,压剪比曲线缓慢减小,塔体处于弹塑性阶 段;到达极限荷载后,承载力与刚度有明显的退 化,剪力作用变化较小,压剪比曲线较为平缓.

(3)同一组试件中,当试件受到的竖向压力较 大时,加载过程中压剪比明显大于受竖向压力较 小的试件,相应压剪比曲线中3个阶段均比压剪 比较小时有一定的滞后,可见,在塔体不发生受压 破坏时,压剪比的增大能够适当提高结构的开裂 及极限荷载.

2.3 滞回曲线

试验子结构试件水平荷载-位移滞回曲线如 图 7 所示,可以看出:



Fig.7 Hysteresis curve of substructure specimen: (a) T1 specimen; (b) T2 specimen; (c) T3 specimen

(1)在子结构试件开裂之前,荷载-位移基本呈 直线关系,此时压剪比变化较快,试件处于弹性阶 段,残余变形小,刚度未出现明显的退化.

(2)随着水平位移的加载,试件出现裂缝并逐渐扩展,塑性变形增大,滞回环面积增加,中部出现捏拢现象,耗能能力逐渐增强,结构刚度有明显退化,试件进入弹塑性阶段.加载到峰值荷载后,试件进入破坏阶段,承载力缓慢下降,残余变形增大,表现出脆性破坏特征.由于裂缝的增多以及受到塔体灰缝滑移的影响,结构刚度大幅下降,滞回曲线呈反 S 型,耗能能力减弱.

(3)分别对比图 7(a)、图 7(b)和图 7(c),可以 看出:试件处于弹性阶段时,每个试件在相同的位 移加载下,其变形程度接近,处于较大压剪比下的 试件变形略小:由于墙体开裂后,发生剪切变形和 滑移,当压剪比较小时,滞回曲线捏拢现象更为明 显,卸载后残余变形较大,而当竖向压力增大后, 在相同的水平荷载作用下,压剪比曲线还处于缓 慢下降状态,并未趋于平缓;不同压剪比下的试件 刚度也有明显差异,压剪比大的试件其变形小于 压剪比小的试件的相应变形值.

2.4 骨架曲线

将试件各特征荷载汇总于表 1, 骨架曲线见图 8. 通过对比可以发现, 虽然 3 个试件的承载能力不同, 但变化规律大致相同.

(1)骨架曲线在塔体开裂之前基本为直线,随着水平位移的增加试件产生大量裂缝时,骨架曲线开始弯曲,进入弹塑性阶段,加载至峰值荷载



后,骨架曲线出现下降段,试件进入破坏阶段.

(2) 当竖向压力增大后, T1 试件开裂、峰值、极 限荷载在推拉两个方向分别提高了 24.3% 和 59.3%、 19.4% 和 58.2%、10.9% 和 39.5%; T2 试件开裂、峰 值、极限荷载在推拉两个方向分别提高了73.7% 和 76.6%、24.5% 和 93.2%: T3 试件开裂、峰值、极

限荷载在推拉两个方向分别提高了47.8%和42.8%、 20.6% 和 16.4%、16% 和 3.8%. 可见, 增大压剪比 后结构水平承载力有明显提升.

工程科学学报,第44卷,第2期

(3)对比不同压剪比条件下的骨架曲线发现, 在加载初期,试件初始压剪比的增大,使骨架曲线 斜率增大,说明提升试件的压剪比可以增强试件 的初始刚度,且试件的水平承载力有所提高,但水 平荷载达到峰值荷载后,结构的承载力下降更快, 表明增大压剪比可提高结构的抗剪强度,同时对 结构的变形能力有一定限制作用,从而延缓塔体 的开裂,但试件到达峰值荷载后的承载力下降速 率更快.

2.5 延性

采用位移延性系数η表示试件的延性,表2中 列出各试件的开裂位移、峰值位移、极限位移. 延 性系数n表示为:

$$\eta = \frac{\Delta_{\rm u}}{\Delta_{\rm y}} \tag{1}$$

其中: Δu为试件极限位移; Δy为试件开裂位移.

Specimen number	Vertical pressure /kN	Loading mode	Critical load, P_y/kN	Peak load, $P_{\rm m}/{\rm kN}$	Limit load, P_u/kN
	10	Push(+)	3.82	4.32	3.96
		Pull(-)	2.36	2.61	2.28
T1	20	Push(+)	4.75	5.16	4.39
		Pull(-)	3.76	4.13	3.18
	10	Push(+)	4.52	7.32	7.26
		Pull(-)	2.22	2.19	1.89
T2	20	Push(+)	7.85	9.04	6.47
		Pull(-)	3.92	4.23	2.03
	20	Push(+)	5.13	7.37	6.43
		Pull(-)	4.91	6.40	5.47
13	30	Push(+)	7.58	8.89	7.46
		Pull(-)	7.01	7.45	5.68

表1 试件特征点荷载值

Table 1	Load value of characteristic point of specimen
---------	--

表2 试件特征点位移值与延性系数

Table 2	Displacement and	ductility (of specimen	characteristic (noints
I abic L	Displacement and	uucuiity v	or speciment	cilaracteristic	points

Specimen number	Vertical pressure /kN	Critical displacement, Δ_y/mm	Peak displacement, Δ_m/mm	Limit displacement, Δ_u/mm	Ductility coefficient, η
T1	10	5.02	7.99	11.02	2.20
	20	5.99	7.92	11.92	1.99
T2	10	4.91	10.80	12.80	2.61
	20	8.08	9.91	19.97	2.47
Т3	20	10.05	8.99	12.98	2.58
	30	7.05	10.02	17.94	2.54

对比表 2 中不同压剪比下试件的延性系数发现,各砌体试件的延性系数较小.随着压剪比的增大,试件的延性系数有所降低,其中 T1 试件降低了 9.5%, T2 试件降低了 5.4%, T3 试件降低了 1.6%. 结构在压剪复合受力状态下,竖向压力增大使压 剪比提高,有效延缓裂缝的开展,结构在弹塑性阶段的塑性变形能力受到一定影响,延性略有降低.

2.6 耗能分析

依据子结构试件在特征点处对应的滞回环的

面积,计算各试件的滞回耗能量W与等效黏滞阻尼 系数 η_e ,如表 3 所示.

可以看出,3个试件特征点的等效黏滞阻尼系数从开裂、峰值到极限点的值有不同程度的增大. T1试件极限阶段较开裂阶段的等效阻尼系数分别增加了15.6%和25%;T2试件分别增加了35.4%和3.5%;T3试件分别提高1.1%和11.5%.可见,虽然古塔砌体黏结强度较低,但在其开裂后仍表现出一定的延性能力.

	Table 3 Energy corr	sumption and e	quivalent visco	ous damping coef	ficient		
Specimen number	Vertical pressure/kN	W/(kN⋅mm)			$\eta_{ m e}$		
		Crack	Peak	Limit	Crack	Peak	Limit
	10	8.75	15.89	34.32	0.090	0.091	0.104
11	20	14.72	22.18	45.42	0.092	0.095	0.115
TO	10	6.85	23.42	59.48	0.065	0.071	0.088
12	20	24.75	41.34	85.00	0.084	0.090	0.081
TO	20	14.45	31.93	77.35	0.092	0.082	0.091
13	30	25.12	42.42	118.26	0.078	0.075	0.087

表3 耗能及等效黏滞阻尼系数

加载中古塔砌体主要通过砖块与灰缝间的摩 擦滑移进行耗能,摩擦力与竖向压力成正比关系. 对比不同压剪比下的试件可以看出:随着压剪比 的增大,对于子结构试件 T1 与 T2 在各特征点时 的等效黏滞阻尼系数分别有所提升,表明随着压 剪比的增大,结构的耗能能力有所提高.而 T3 试 件的等效黏滞阻尼系数却有所降低,表明当压剪 比过大时,结构的耗能能力会有一定的削弱.

2.7 刚度退化

古塔砌体的离散性较强,砌筑施工难以保证 其材料性能完全均匀,裂缝的产生具有随机性,因 而造成结构在正负两个方向的刚度不同,为了减 小随机因素引起的误差,以下分析取试件在同一 个循环荷载中,正、反两个方向的荷载绝对值之和 与位移绝对值之和的比值来计算割线刚度,具体 如下:

$$K_{i} = \frac{|P_{i}| + |-P_{i}|}{|\Delta_{i}| + |-\Delta_{i}|}$$
(2)

其中: K_i 为第 i 级加载时的刚度; P_i 、 – P_i 为第 i 级加载时峰值点荷载值; Δ_i 、 – Δ_i 为第 i 级加载时峰值点位移值.

按式(2)计算各试件的刚度退化曲线,如图 9 所示.



由图 9 可见,试验中每个试件的刚度退化趋势 大致相同.随着压剪比的减小,各试件刚度均逐渐 降低.当压剪比减小至 5 左右,刚度退化速率较 快;试件开裂后,刚度退化速率减缓,退化曲线斜 率越来越平缓,与压剪比曲线发展趋势一致.

对比分析不同竖向压力下试件的刚度退化曲 线发现,随着压剪比的增大,试件初始刚度明显增 强,其值均增加1.5倍左右,压剪比对试件初始刚 度具有提高作用;在试件开裂后,刚度退化速率均 较快,且当压剪比较大时刚度退化现象更加明显, 达到峰值荷载后,刚度退化均趋于平缓.

3 数值模拟及结果分析

3.1 数值模型

采用通用有限元软件 ABAQUS, 以整体式建 模方式, 计算单元为 8 节点六面体单元, 建立计算 模型, 见图 10. 加载制度为: 首先在塔体顶部施加 竖向荷载; 并在塔体顶部施加递增的往复水平位 移荷载.



图 10 有限元模型 Fig.10 Finite element model

3.2 材料力学参数

砖砌体的材料参数根据力学性能试验确定, 采用杨卫忠砌体结构受压本构模型^[24]以及修正后 的混凝土受拉本构模型^[25],并引入损伤因子^[26],依 据古塔砌体试块的单轴受压试验结果,确定材料 的弹性模量、强度及受拉损伤等计算参数,泊松比 取 0.15.

进行了砌筑灰浆试块及砖砌体试块轴心抗压 试验,其中灰浆试块尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm, 砌体试块尺寸为115 mm×115 mm×115 mm. 根据 试验结果绘制灰浆与砌体试块的应力-应变曲线, 见图 11, 其中, σ 、 ε 分别为试块的应力及应变. 依据试验结果确定古塔砌体的弹性模量如下[27]:

$$E = 370 f_{\rm m} \sqrt{f_{\rm m}} \tag{3}$$

$$f_{\rm m} = k_1 f_1^{\alpha} (1 + 0.07 f_2) k_2 \tag{4}$$

其中: f_m 为砌体抗压强度平均值, MPa; f_1 为块体抗 压强度等级或平均值, MPa; f_2 为砂浆抗压强度平 均值, MPa; α 为与块体高度及砌体类别相关的参 数, $\alpha = 0.5$; k_1 为砌体类别有关的参数, 对砖一般 $k_1 = 0.78$; k_2 为根据砂浆强度的高低对砌体抗压强 度的修正系数, 对砖 $f_2 < 1$ 时, $k_2 = 0.6 + 0.4f_2$; 当 $f_2 \ge 1$ 时, $k_2 = 1$.

取两组试块的平均值作为计算参数,根据上 式计算出,古塔砌体弹性模量为773 MPa,抗压强 度值为1.64 MPa. 损伤参数通过定义膨胀角、偏心 率、双轴与单轴极限抗压强度比值、拉压子午线 上第二应力不变量的比值和黏性参数,依次对五 个参数取值为30、0.1、1.16、0.6667、0.005.

3.3 计算结果

计算所得骨架曲线如图 12 所示,3 个子结构 模型的骨架曲线变化趋势大致相似. 在加载初期, 荷载-位移基本呈直线关系;进入弹塑性阶段,骨 架曲线斜率开始下降,拐点逐渐出现,达到峰值荷 载后,承载力开始下降. 对比 3 组曲线,随着初始 压剪比的增大,模型的初始刚度也随之增大;随着 水平位移的增加,骨架曲线的下降速率也随之增 大. 同时可见:子结构模型的承载能力随着压剪比 的增加有不同程度地提升;T1 试件在不同竖向压 力下的水平特征荷载分别提高了 33%、20.4%、 18%;T2 试件分别提高了 36%、15.5%、4.59%;T3 试件分别提高了 34.5%、29.2%、20.6%. 表明随着 压剪比增加,试件抵抗开裂能力及极限承载力均 有所提高.



图 11 应力-应变曲线. (a)灰浆试块; (b)砖砌体试块

Fig.11 Stress strain curve: (a) mortar test block; (b) brick masonry test block





计算得到3个试件在极限位移时的等效塑性 应变(PEEQ)如图13所示,将计算结果与试验裂缝 图对比发现:塔体塑性应变值较大的区域与试验 的破坏规律基本一致.在加载初期,塔檐及塔身边 角处塑性应力较大而首先开裂,随着位移的增大, 开裂区的塑性应变发展较快,裂缝分布较多,裂缝 扩展延伸,出现斜向交叉裂缝;在加载后期,洞口 附近的塑性应变较高且分布范围扩大,表明该阶 段裂缝发展较快,主要破坏区域与试验现象相符.

同时由图 13(a)、(c)、(e)可知,当压剪比较小时,等效塑性应变值较小,仅在券洞附近其值较为明显;当增大压剪比后,塔体开裂较之前有所滞后,极限位移下的等效塑性应变值增大,表明随压剪比的增大结构的破坏程度更为严重,破坏区域面积扩大,剪压破坏的特征更为明显,见图 13(b)、

(d)、(f).可见,压剪比的大小对古塔砌体的抗剪 强度以及破坏形态均有显著影响.

3.4 计算与试验结果对比

将模拟计算和试验所得荷载-位移曲线进行 对比,见图 14,在加载至开裂荷载之前,模拟与试 验曲线较为接近;随着施加位移的增大,数值模拟 所得荷载值开始大于试验数值,其原因在于,采用 整体式建模不能反映灰缝的影响,3个模型在荷 载达到峰值荷载后的骨架曲线与试验结果并不完 全一致,计算所得曲线下降幅度小于试验结果,但 基本受力特征与整体趋势基本一致.对试验和数 值模拟所得峰值荷载进行对比,见表4.虽然受砌 体材料的离散性、砌筑质量、模型与材料参数等 因素的影响,计算值与试验值有一定的误差,但误 差均在21%以内,能较好反映古塔子结构的受力过程.



图 13 极限位移下子结构等效塑性应变云图. (a)T1, 10 kN, 11 mm; (b)T1, 20 kN, 12 mm; (c)T2, 10 kN, 13 mm; (d)T2, 20 kN, 20 mm; (e)T3, 20 kN, 13 mm; (f)T3, 30 kN, 18 mm

Fig.13 Equivalent plastic strain nephogram of substructure at ultimate displacement: (a) T1, 10 kN, 11 mm; (b) T1, 20 kN, 12 mm; (c) T2, 10 kN, 13 mm; (d) T2, 20 kN, 20 mm; (e) T3, 20 kN, 13 mm; (f) T3, 30 kN, 18 mm



图 14 荷载-位移曲线对比. (a)T1, 10 kN; (b)T1, 20 kN; (c)T2, 10 kN; (d)T2, 20 kN; (e)T3, 20 kN; (f)T3, 30 kN Fig.14 Load-displacement curve comparison: (a) T1, 10 kN; (b) T1, 20 kN; (c) T2, 10 kN; (d) T2, 20 kN; (e) T3, 20 kN; (f) T3, 30 kN

表4 试验与模拟峰值荷载对比

Table 4	Comparison	of test and	simulated	peak	load
---------	------------	-------------	-----------	------	------

Specimen number	Vertical pressure / kN	Test value / kN	Simulated value / kN	Error / %
T1	10	4.32	4.66	7.9
	20	5.16	5.61	8.7
T2	10	7.32	6.94	5.5
	20	9.04	7.99	11.6
T3	20	7.37	8.33	13.0
	30	8.89	10.76	21.0

将试验与计算结果对比分析表明,在压剪复 合受力状态下,压剪比是影响古塔结构破坏模式 及承载能力的重要因素,可作为古塔砌体结构复 合受力下破坏状态的重要判断依据.当压剪比较 小时,水平承载力主要由水平灰缝的抗剪强度决 定,沿通缝剪切滑移发生剪摩破坏;随着竖向压力 的提高当压剪比增大后,结构产生阶梯型裂缝,砖 块与灰浆均发生破坏,呈现剪压破坏,且竖向压力 增大后相应的摩阻力能够抵抗剪切滑移,延缓塔 体开裂,提高古塔结构的极限承载能力、刚度及耗 能能力,但因结构变形受到一定约束,其延性降 低;当压剪比过大时因塔体发生压剪破坏,承载力 略有降低.

4 结论

通过进行古塔子结构试件在不同竖向压力下

的低周反复荷载试验及数值模拟,研究了其受力 性能,主要结论如下:

(1)古砖塔砌体结构在压剪复合受力状态下, 随着竖向压力的增大,试件破坏模式由剪摩破坏 转变为压剪破坏,压剪比对塔体破坏模式有显著 影响.

(2)在加载初期,增大压剪比可提高结构的初始刚度,延缓塔体的开裂;开裂后,提高压剪比可约束塔体变形,提高结构抗剪承载力及耗能能力, 但会降低结构的延性系数,加快刚度退化速率.

(3)数值计算所得特征荷载值略大于试验值, 等效塑性应变结果与试验结果具有一致性.

(4)当塔体结构压剪比在一定范围内,竖向压 力产生的摩擦力能够延缓塔体开裂,有利于塔体 抵抗水平剪力作用;而当压剪比过大,会使砖块压 碎、脱落,加速塔体的破坏.

参考文献

 Pan Y, Wang X Y, Guo R, et al. Seismic damage assessment of Nepalese cultural heritage building and seismic retrofit strategies: 25 April 2015 Gorkha (Nepal) earthquake. *Eng Fail Anal*, 2018, 87: 80

[2] Pan Y, Li L J, Yao Y Y, et al. Evaluation methods for postearthquake damage state of ancient masonry buildings. *J Southwest Jiaotong Univ*, 2016, 51(4): 704
(潘毅, 李玲娇, 姚蕴芝, 等. 砖石结构古建筑震后破坏状态评估 方法. 西南交通大学学报, 2016, 51(4): 704)

- [3] Pan Y, Wang Z C, Shang F, et al. Study on isolated reinforcement scheme of ancient masonry pagoda in Sichuan Province. J Southwest Jiaotong Univ, 2018, 53(3): 540
 (潘毅, 王子超, 尚枫, 等. 四川省某砖石古塔隔震加固方案研究. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 540)
- [4] Xu J, Liang J G, Shi L, et al. Discussion on some problems of development of masonry structures in China. *Build Struct*, 2016, 46(15): 91
 (徐建,梁建国, 石柳, 等. 我国砌体结构发展的若干问题探讨. 建筑结构, 2016, 46(15): 91)
- [5] Zhang Y, Liu P Y, Qin Y, et al. Analysis on static and dynamic mechanical properties of masonry panel under in-plane loading. *Chin J Appl Mech*, 2018, 35(6): 1273
 (张岩, 刘沛允, 秦宇, 等. 砌体单片墙结构的平面内静力与动力 性能分析. 应用力学学报, 2018, 35(6): 1273)
- [6] Zhang Y L, Wang Z X, Liu Z W, et al. Research on seismic performance assessment method and seismic strengthening measures for masonry Pagodas. World Earthquake Eng, 2019, 35(2):41 (张永亮, 汪振新, 刘尊稳, 等. 砖石古塔抗震性能评估方法及抗

震加固措施研究.世界地震工程,2019,35(2):41)

- [7] Minghini F, Milani G, Tralli A. Seismic risk assessment of a 50 m high masonry chimney using advanced analysis techniques. *Eng Struct*, 2014, 69: 255
- [8] Guo Z X, Chai Z L, Hu Y D, et al. Experimental study on seismic behavior and mortar joint detail of machine-sawing stone masonry wall. *J Build Struct*, 2011, 32(3): 64
 (第子雄, 柴振岭, 胡奕东, 等. 机器切割料石砌筑石墙灰缝构造 及抗震性能试验研究. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 64)
- [9] Zhuang S S, Guo Z X, Chai Z L. Experimental investigation of shear capacity of sawn stone masonry joint. *J Huaqiao Univ Nat Sci*, 2019, 40(4): 489
 (庄思思, 郭子雄, 柴振岭. 机锯条石砌筑灰缝的抗剪性能试验. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 489)
- [10] Jiang Y F, Guo Z X, Xu X L. Test on mechanical properties of large-size dry stone masonry joint. J Huaqiao Univ Nat Sci, 2020, 41(1): 1

(江云帆,郭子雄,许秀林.大尺寸条石无浆砌缝力学性能试验. 华侨大学学报(自然科学版),2020,41(1):1)

[11] Wang L, Guo Z X, Ye Y, et al. Experimental study on seismic and mechanical behavior of stone masonry joints. *China Civil Eng J*, 2018, 51(12): 63
(王兰, 郭子雄, 叶勇, 等. 石墙灰缝抗震性能与受力机理试验研

究. 土木工程学报, 2018, 51(12): 63)

[12] Wang D D, Peng B. Research on mechanical property of shearcompression for mortar material. *J Water Resour Water Eng*, 2016, 27(4): 184 (王冬冬,彭斌.砂浆材料压剪受力性能研究.水资源与水工程 学报,2016,27(4):184)

 Wang Y H, Lan G Q, Zeng G Y, et al. Study on shear test method of earthen based masonry along mortar joint. *Adv Eng Sci*, 2020, 52(5): 136

(王毅红,兰官奇,曾贵缘,等.生土基砌体沿通缝抗剪试验方法研究.工程科学与技术,2020,52(5):136)

- [14] Cai Y, Shi C X, Ma C L, et al. Study of the masonry shear strength under shear-compression action. *J Build Struct*, 2004, 25(5): 118 (蔡勇, 施楚贤, 马超林, 等. 砌体在剪-压作用下抗剪强度研究. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 118)
- [15] Yang N, Teng D Y. Shear performance of Tibetan stone masonry under shear-compression loading. *Eng Mech*, 2020, 37(2): 221
 (杨娜, 滕东宇. 藏式石砌体在剪-压复合作用下抗剪性能研究. 工程力学, 2020, 37(2): 221)
- [16] Xin R, Yao J T. Research on entire failure modes of multi-storey masonry walls. *World Earthquake Eng*, 2013, 29(1): 139
 (信任,姚继涛. 多层砌体结构墙体整体破坏模式研究. 世界地 震工程, 2013, 29(1): 139)
- [17] Haach V G, Vasconcelos G, Lourenço P B. Experimental analysis of reinforced concrete block masonry walls subjected to in-plane cyclic loading. *J Struct Eng*, 2010, 136(4): 452
- [18] Banting B R, El-Dakhakhni D D. Seismic design parameters for special masonry structural walls detailed with confined boundary elements. *J Struct Eng*, 2014, 140(10): 04014067
- [19] Chen B W, Tang C, Wu Y F, et al. Experimental studies on seismic behavior of autoclaved fly ash perforated brick walls with constructional columns. *Earthquake Eng Eng Vib*, 2016, 36(5): 116

(陈伯望, 唐楚, 邬逸夫, 等. 构造柱对蒸压粉煤灰多孔砖砌体抗 震性能影响的试验研究. 地震工程与工程振动, 2016, 36(5): 116)

- [20] Wang Q W, Shi Q X, He W W, et al. Experimental study on mechanical behavior of DP-type fired perforated brick walls under cyclic loading. *J Build Struct*, 2017, 38(12): 131
 (王秋维, 史庆轩, 何巍巍, 等. 反复荷载作用下DP型烧结多孔砖 墙体受力性能试验研究. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 131)
- [21] Li Z X, Zhou X J, Xia D T, et al. Experiment on seismic behavior of non-autoclaved and non-sintered fly-ash perforated brick walls. *Earthquake Eng Eng Vib*, 2012, 32(4): 125
 (李忠献, 周晓洁, 夏多田, 等. 免蒸免烧粉煤灰多孔砖墙体抗震 性能试验研究. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 125)
- [22] Zhang W X, Yue F H, Liu J, et al. Analysis on seismic performance of masonry walls under multiple influence parameters. *J Hunan Univ Nat Sci*, 2017, 44(3): 45 (张望喜, 岳风华, 刘杰, 等. 多参数影响下的砌体墙体抗震性能 分析. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 45)

- [23] Fu Y N, Xiong L Q, Yan L, et al. Elasto-plastic finite element analysis of unreinforced masonry farmhouse under earthquake. *World Earthquake Eng*, 2019, 35(4): 18
 (付亚男, 熊礼全, 闫磊, 等. 无筋砌体农居地震弹塑性有限元研 究. 世界地震工程, 2019, 35(4): 18)
- [24] Yang W Z, Fan J. A generic stress-strain equation for masonry materials in compression. *J Zhengzhou Univ Eng Sci*, 2007, 28(1): 47

(杨卫忠,樊濬. 砌体受压应力-应变关系. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(1): 47)

[25] Zheng N N, Li Y M, Liu F Q. Pseudo-static test study on seismic

behavior of masonry wall restrained by core-tie-columns. *China Civil Eng J*, 2013, 46(Suppl 1): 202

(郑妮娜,李英民,刘凤秋.芯柱式构造柱约束墙体抗震性能拟 静力试验研究.土木工程学报,2013,46(增刊1):202)

- [26] Yang W Z. Constitutive relationship model for masonry materials in compression. *Build Struct*, 2008, 38(10): 80 (杨卫忠. 砌体受压本构关系模型. 建筑结构, 2008, 38(10): 80)
- [27] Shi C X. Theory and Design of Masonry Structure. 2nd Ed.
 Beijing: China Architecture & Building Press, 2003
 (施楚贤. 砌体结构理论与设计. 2版. 北京: 中国建筑工业出版 社, 2003)