

姜治军,钟荣强,张磊,等. 2025. 山地地形下中江南塔地震响应特征试验[J]. 地震研究, 48(1): 159–169, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0017.

Jiang Z J, Zhong R Q, Zhang L, et al. 2025. Experimental study on seismic response of the Zhongjiang South Pagoda in mountainous terrain[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(1): 159–169, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0017.

山地地形下中江南塔地震响应特征试验^{*}

姜治军^{1,2}, 钟荣强¹, 张磊^{1,3♣}, 李胜才¹, 张锋¹, 魏春明²

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225100; 2. 江苏省华建建设股份有限公司, 江苏 扬州 225000;

3. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为研究山地地形对砖石古塔地震响应的影响, 以位于四川中江县铜鱼山顶的中江南塔作为原型, 选取了汶川地震发生时自贡台阵的加速度记录为基底输入, 通过小型振动台试验研究了山底、山顶古塔自振频率随地震动幅值的变化趋势, 分析了地形效应对古塔地震响应的影响及古塔破坏特征。结果表明: 在低幅值地震动作用下古塔自振频率不变, 当自由地表地震动峰值分别达到 100 Gal 和 150 Gal 时, 山顶和山底古塔发生破坏; 在古塔自振特性、输入地震动的频谱特征以及结构构造特点影响下, 古塔发生了“上轻下重”的破坏特征; 与山底古塔相较, 山顶古塔地震反应明显更大, 相同工况下山顶古塔各楼层峰值加速度、最大相对位移、最大层间位移角分别为山底古塔的 2~3 倍、1.5~4.5 倍、1.5~4.5 倍, 其中最大相对位移和最大层间位移角的放大倍数与地震动幅值相关, 因此需重视山顶古塔的地震安全性。

关键词: 山地地形; 中江南塔; 地震响应; 振动台试验

中图分类号: P315.923

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)01-0159-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0017

0 引言

砖石古塔作为古代高层建筑种类之一, 是人类宝贵的文化遗产。其建造年代久远、材料老化严重、自重较大, 在地震时极易损坏(袁建力, 2013)。袁建力(2018)调查表明位于山顶或坡地场地的多座古塔在震后受损严重, 如中江南塔、内江三元塔、云居院塔等。山体、单薄的山脊或局部地形具有显著的地震动放大效应(徐光兴等, 2008a, b; 赵凤仙等, 2016; 周港圣等, 2022), 会导致山顶的结构发生更为严重的破坏,

而且结构震害程度与场地高程呈现正相关关系(迟明杰等, 2015)。由于砖石古塔常建于山地, 因此研究山地场地砖石古塔抗震性能具有重要意义。

针对山地地形对工程结构的影响, 众多学者开展了广泛研究, 如李永华等(2018)利用数值模拟方法研究了山地场地砌体结构抗震性能, 并提出了结构抗震鉴定的方法; 李英民等(2020)通过振动台试验研究了山地场地 RC 框架结构的动力特性及动力响应特征, 进一步给出了结构典型破坏模型; 潘毅等(2022)以青城山灵官殿为原型, 结合原位动力特性测试与数值模拟方法, 研

^{*} 收稿日期: 2023-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478409); 江苏省产学研合作项目(BY20221086); 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放课题(2023B05); 教育部供需对接就业育人项目(2023122959765).

第一作者简介: 姜治军(1984-), 博士, 主要从事古建筑保护与地震工程领域研究. E-mail: jiangzj@yzu.edu.cn.

♣通信作者简介: 张磊(1986-), 博士, 主要从事古建保护和损伤评估等方面的研究.

E-mail: zhangleihebut@126.com.

究了山地木结构的动力特性及地震反应规律,重点分析了墙体对结构地震反应及受力特征的影响,Farghaly (2015) 利用数值模拟方法,研究了位于山坡上不同部位的 RC 框架结构的内力特征、地震反应及破坏条件;Shabani 和 Ghanbari (2020)、Shabani 等 (2021) 以不同层数的钢框架结构为对象,研究获得了山顶与山底结构的地震反应特征及地形效应影响范围。

以往研究大多是关于山地场地的 RC 框架、钢框架、砌体、木结构等建筑的抗震性能、地震响应、内力特征、破坏模式等,并取得丰富成果,但是鲜有涉及山地场地砖石古塔的相关研究。本文以中江南塔为原型,选取 2008 年四川汶川 $M_s8.0$ 地震发生时自贡台阵的加速度记录为基底输入,利用小型振动台开展砖石古塔地震破坏试验,定量获得山体地形对古塔地震响应的影响规律,以期为其保护工作提供参考。

1 试验概况

1.1 砖石古塔试验模型及测点布置

中江南塔位于四川省中江县铜鱼山的山顶,是典型的山地场地楼阁式砖石古塔。中江南塔平面形式为正八边形,共 9 层,坐南朝北,塔高 30.2 m,塔基为金刚底座,塔基以上逐层收分,各层塔檐外挑,并设有心室。受 2008 年四川汶川 $M_s8.0$ 地震的影响,塔身受损严重(袁建力,2018)。

本次试验研究的设备主要包括小型振动台和加速度传感器。振动台为北京波谱公司研发的型号为 WS-Z30-50 小型振动台,包括控制仪、传感器、功率放大器、激振器、振动台面等,振动台设备的主要技术参数见刘晓莉(2014)的研究结果。

试验的首要工作是设计试验模型的相似比。相似比一般包括几何相似比、弹性模量相似比、密度相似比及加速度相似比等。通常情况下,可以根据几何、材料及弹性模量相似比来确定其他物理量相似比(周颖,吕西林,2016)。根据振动

台台面几何尺寸及台面负载确定试验模型高度为 90 cm,再依据中江南塔原型结构塔高确定几何相似比 S_l 为 1/33.5。

试验材料的选用是决定能否达到预期的关键。利用摩尔-库伦强度理论表征砌体材料强度,由相似比关系可知,试验砌体材料的黏结力应很小(刘晓莉,2014)。课题组最初选择石膏、烧结黏土砖及黏土与砂土混合烧结的砖块作为砌块,但是试验时无法使其发生与实际震害相似的破坏。其主要原因为模型材料的强度过大,无法满足相似比要求,致使模型在振动过程中难以破坏。而且对于同种材料,在一定范围内构件尺寸减小会导致材料强度增加,如果采用与原结构强度相近的材料,试验模型将更难破坏。因此在缩尺比较小的条件下,本文选用强度较低的替代材料,以期模型的破坏特征与实际震害相似。经多次尝试确定砌块的材料采用纯黏土,砂浆由滑石粉、腻子粉、水按照 10:10:9 的比例制作而成。课题组对试验所用砖块材性进行力学性能测试,结果见表 1。依据材性试验和胡跃祥(2012)实测结果可确定弹性模量相似比为 1/26。试验塔体材料密度测量值为 2.4 g/cm^3 ,中江南塔塔身材料密度测量值为 1.8 g/cm^3 ,由此确定密度相似比为 1.33。基于上述 3 类物理量的相似比确定加速度相似比为 0.965,进一步可获得其他物理量相似比,见表 2。依据几何相似比和原型结构墙厚确定试验模型墙厚度见表 3。

表 1 黏土砌体砖和砂浆抗压强度试验数据

Tab. 1 Test data of the compressive strength of clay masonry bricks and mortar

材料类型	试件	宽 × 长 × 高/ (m × m × m)	面积/ mm ²	最大压 力/N	抗压强 度/MPa	均值/ MPa
黏土砌体砖	1	20.2 × 60.4 × 60.2	1 220	3 123	2.56	
	2	19.8 × 60.2 × 60.1	1 191	3 109	2.61	2.58
	3	20.1 × 60.1 × 60.2	1 208	3 117	2.58	
砖砂浆	1	40.1 × 40.3 × 44.9	1 616	451.3	0.279	
	2	19.8 × 60.2 × 60.1	1 591	442.7	0.278	0.276
	3	20.1 × 60.1 × 60.2	1 611	437.6	0.272	

表 2 试验模型各物理量的相似比

Tab. 2 Similarity ratio of various physical quantities of the test model

物理参数	相似比
弹性模量	1/26
长度	1/33.5
密度	1.33
频率	5.788
加速度	0.965
重力加速度	1

表 3 试验模型墙体厚度

Tab. 3 Wall thickness of the test model

层数	原型墙厚/m	试验墙厚/mm
1	1.04	30
2	0.98	30
3	0.95	25
4	0.76	25
5	0.71	20
6	0.82	25
7	0.71	20
8	0.71	20
9	0.71	20

依据传统砖石古塔砌筑工艺，制作 2 个一致的中江南塔试验模型分别代表位于山顶和山底的古塔，如图 1a 所示。为了获得古塔结构在地震作用下的层间变形特征，将加速度计布设在楼板位置处。受限于模型洞口尺寸，无法将加速度传感器置入楼板形心处。考虑到楼板水平向平面内刚度较大，因此将加速度计设置于楼板侧面。为了确定试验模型的加载方向，建立了中江南塔数值结构模型，通过模态分析方法获得了模型的自振频率，得出的 EW 方向前 3 阶自振频率分别为 1.52、5.98、12.39 Hz，NS 方向前 3 阶自振频率分别为 1.52、5.93、12.25 Hz。结果表明，模型结构 2 个水平方向的自振特征极为接近，因此选择在结构 EW 方向进行加载，如图 1a 所示。由于原型结构的八、九层无楼板，所以将七、八、九层视为同一层，共布设 7 个加速度计于结构上，另外 1 个加速度计布置在振动台面上，如图 1b 所示。

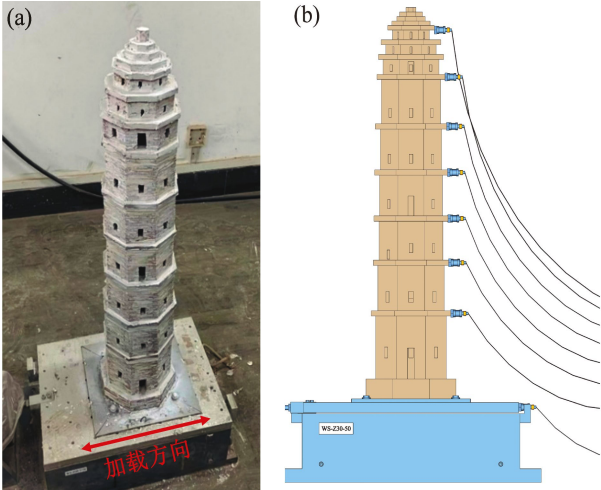


图 1 中江南塔试验模型 (a) 及加速度传感器布设方式 (b)

Fig. 1 Test model of the Zhongjiang South Pogado (a) and its acceleration sensor deployment (b)

1.2 试验工况

本文旨在研究山体地形对砖石古塔地震反应的影响规律，因此输入地震动应来自山地场地强震动台站。为了能与自由地表结构地震反应进行比较，还需要临近山体的自然地表台站记录。通过筛选，选取了汶川 $M_s8.0$ 地震发生时位于四川省自贡市西山公园内的地形台阵加速度记录作为地震动输入。该地形台阵包含 8 个位于不同位置的台站，其位置基本沿山脊分布（图 2），其中 S1 和 S6 分别为山底和山顶的基岩台站。选取同一次地震发生时 S1 和 S6 两个台站的记录作为试验研究的基底输入，可以排除由输入地震动场地条件差异引起的结构反应差别，便于通过比较获得地形效应对古塔地震反应的影响规律。S1 和 S6 台站基本信息见表 4。

表 4 采用台站的基本信息（据杨宇等，2011）

Tab. 4 The basic information of the stations used in this study (according to Yang *et al.*, 2011)

台站名称	高程/m	与 S1 台站水平距离/m	与 S1 台站高程差/m	PGA/Gal		场地类型
				EW 向	NS 向	
S1	345.0	0.00	0.00	23.036	26.489	基岩场地
S6	417.0	304.55	72.00	40.735	42.244	基岩场地

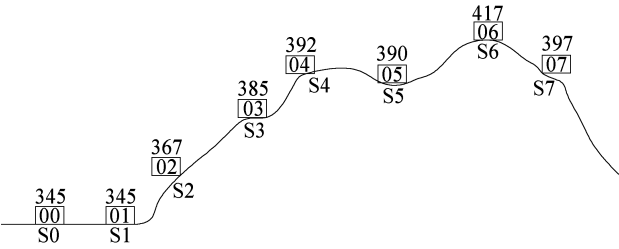


图2 自贡地形台阵地形剖面示意 (据杨宇等, 2011)
Fig. 2 Schematic profile of station arrangement
(according to Yang *et al.*, 2011)

由于本文研究的振动台为水平向单向输入, 选用了2个台站EW向分量为输入地震动, 其加速度时程及其反应谱如图3所示。由图3及表4可知, 2条地震动的卓越周期介于0.2~0.7 s, S6与S1两台站EW向分量的PGA比值为1.768。

为研究地震作用下古塔的损伤演化过程, 需开展不同强度的基底输入下的振动台试验。

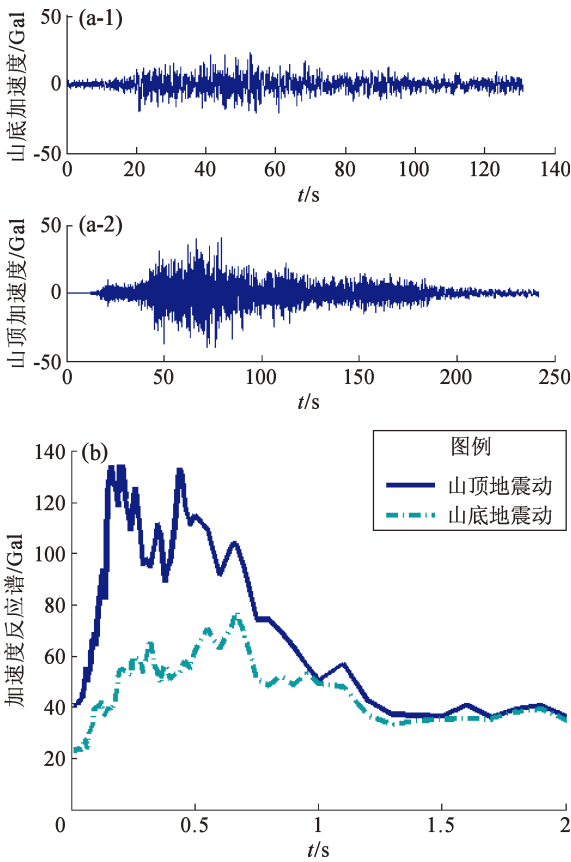


图3 输入地震动加速度时程 (a) 及其反应谱 (b)
Fig. 3 The time history of acceleration (a)
and the response spectrum (b)

本次试验采用的基底输入为一组汶川地震的真实记录, 需要通过调幅得到不同强度的输入地震动。张江伟等 (2017) 通过有限元法建立边坡数值模型, 定义了山顶与山底地震动的峰值加速度的比值为放大系数, 研究输入地震动峰值对放大系数的影响。结果表明输入地震动峰值为100和200 Gal时的放大系数仅相差约9%, 因此本文试验暂不考虑输入地震动幅值对地震动放大系数的影响。保持S6、S1台站记录之间的幅值比不变, 对其进行调幅, 以获得11个幅值的水平向输入地震动。具体为使S1台站记录的峰值加速度分别为20、30、40、50、100、200、300、350、400和450 Gal, 分别将S1和S6台站的调幅地震动输入山底古塔和山顶古塔作为地震激励, 形成了本试验的11个工况, 具体加载制度见表5。

表5 加载制度

Tab. 5 The test program

工况	输入地震动峰值/Gal	
	山底古塔 (S1 处)	山顶古塔 (S6 处)
1	20	35.36
2	30	53.04
3	40	70.72
4	50	88.4
5	100	176.8
6	150	265.2
7	200	353.6
8	300	530.4
9	350	618.8
10	400	707.2
11	450	795.6

1.3 试验模型动力特性

模型动力特性是分析结构地震反应特征的基础。为了获得试验模型动力特性, 在各工况之间利用振动台为结构输入白噪声, 对结构进行模态分析获得结构的自振频率及模态振型 (表6、图4)。同时给出了对中江南塔现场动测得出的自振频率 (胡跃祥, 2012)。

由图4和表6可知，山底与山顶古塔的前三阶自振频率接近，前三阶振型曲线几乎重合，即两塔的动力特性极为一致，因此结构地震反应的差别可归因于输入地震动的差别。考虑到山顶与山底记录来自同一地震的基岩场地，因此地震动的差别主要源于地形效应。值得注意的是，2座试验模型的自振频率经相似比转化后与原型结构的自振频率十分接近，尤其是基本频率与原结构相差仅为3.88%。

表6 山底和山顶古塔的自振频率
Tab.6 The natural frequencies of the pagodas
at the bottom and on top of the mountain

阶数	试验模型测		经相似比		原塔 实测	误差	
	试值/Hz		转化/Hz			(%)	
	山底 古塔	山顶 古塔	山底 古塔	山顶 古塔	值/ Hz	山底 古塔	山顶 古塔
1	8. 82	8. 82	1. 499	1. 499	1. 56	3. 88	3. 88
2	35. 77	35. 78	6. 081	6. 083	5. 67	7. 25	7. 28
3	81. 23	81. 29	13. 809	13. 819	12. 61	9. 51	9. 59

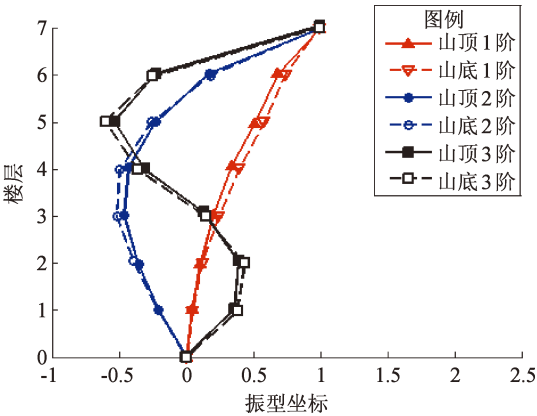


图4 山底和山顶古塔的前三阶振型曲线
Fig.4 The first three frequencies of the pagodas
at the bottom and on top of the mountain

2 试验现象

通过比较同一工况下2座古塔的破坏现象，可以直观地获得山体对古塔破坏的影响。在工况1到工况4下，两个结构均未见破坏。当加载到

工况5、山底地震动为100 Gal时，山底古塔未破坏，但是山顶古塔的东立面一层底部产生明显裂缝，其同侧窗下也伴有细小横向裂缝，如图5a所示。当加载到工况6、山底地震动为150 Gal时，山底古塔仍无明显破坏，山顶古塔东侧底部裂缝继续发展，其上裂缝也延伸至东立面与东南立面转角处，如图5b所示。当加载到工况7、山底地震动为200 Gal时，山底古塔西立面一层与底座连接处新增裂缝，如图5c所示。当加载到工况7时，山顶古塔塔身下部各立面产生大量裂缝，且部分裂缝已水平贯通，此时山顶古塔底层接近倒塌，如图5d~f所示。考虑到已经无法进一步开展2座古塔破坏及地震响应的比较研究，因此停止本次加载。

通过比较试验现象可知，当山顶古塔发生较为严重的破坏时，山底古塔仅发生较轻微的破坏，即在地震作用下山顶古塔更易发生破坏，而且结构破坏呈现“上轻下重”特征。

3 试验结果及分析

3.1 自振频率的变化趋势

结构自振频率可表征结构的整体损伤。图6给出了古塔结构在各工况下的前三阶自振频率变化趋势。由图6可知，当从工况1加载到工况4时，2座古塔的自振频率均未发生明显变化，表明2古塔未发生明显破坏。当加载至工况5、山底地震动幅值为100 Gal时，山底古塔自振频率仅表现出微小变化，但是山顶古塔的自振频率明显减小，其前三阶频率分别减小10%、9%和8%，表明此时山顶古塔结构发生了整体破坏。当加载至工况6、山底地震动幅值为150 Gal时，山底古塔前三阶自振频率均减小6%，山顶古塔的前三阶频率减小幅度约为20%，表明此时2座古塔均发生了明显破坏，尤其山顶古塔的破坏更为严重。当加载至工况7、山底地震动幅值为200 Gal时，山底古塔前三阶自振频率减小约10%，山顶古塔的前三阶频率分别减小33%、29%和28%，此时山顶古塔底部出现贯通裂缝，结构接近倒塌。

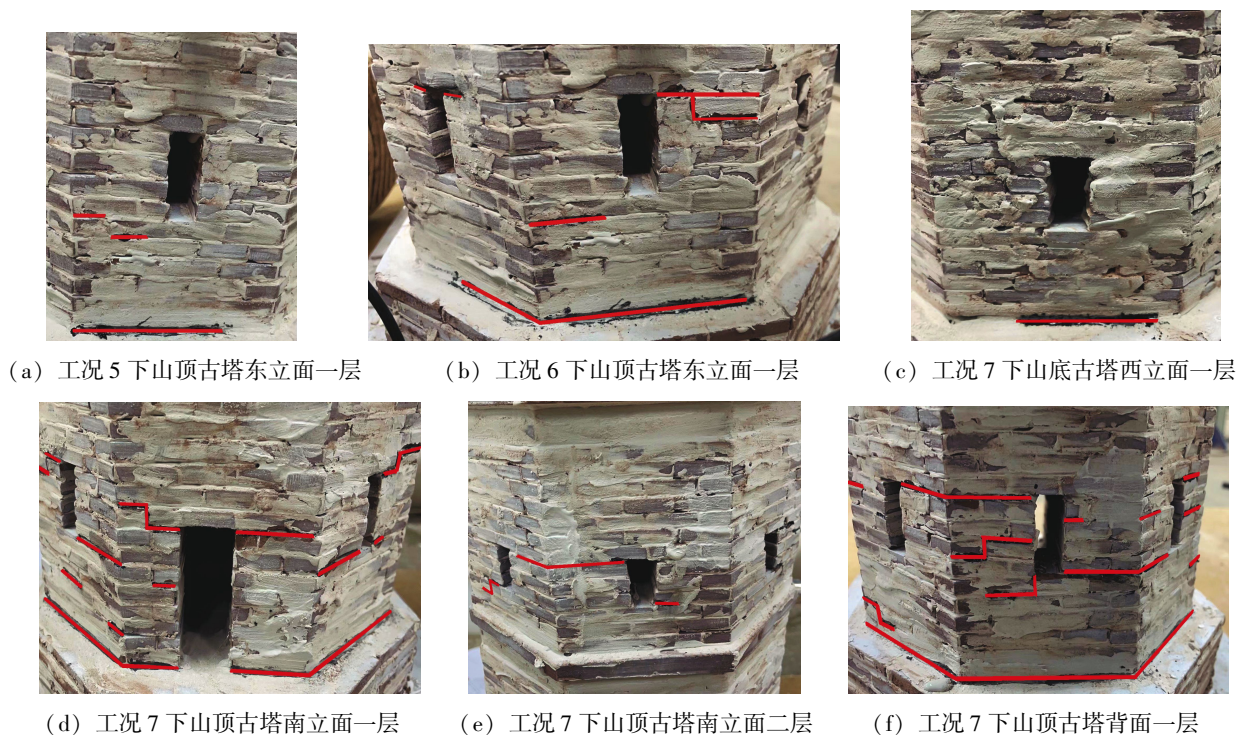


图5 各工况下山底及山顶古塔试验现象

Fig. 5 Damage to the ancient pagodas at the bottom and on top of the mountain on various working conditions

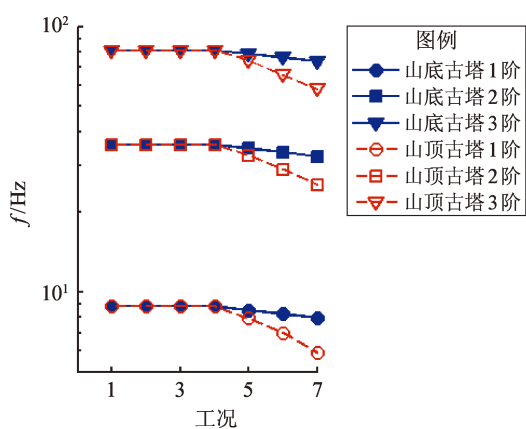


图6 各工况下山底和山顶古塔结构的前三阶自振频率变化趋势

Fig. 6 The variation trend of natural frequencies of the ancient pagodas at the bottom and on top of the mountain on various conditions

3.2 古塔各层加速度的变化趋势

为了研究山体地形对砖石古塔地震加速度响应的规律，比较了2座古塔各层峰值加速度随楼层的变化趋势，计算了同一测点山顶与山底古塔峰值加速度的比值，如图7所示。结果表明，在

各工况下随着结构层数的增加，各层加速度峰值均呈现增加的趋势，且山顶古塔的加速度峰值明显大于山底古塔。峰值加速度的比值表明，山顶古塔峰值加速度为山底古塔的2~3倍，反映了地形效应对结构地震加速度响应的影响，尤其对于砖石古塔结构上部而言，地形效应对结构动力响应的放大影响更加明显。需注意的是，虽然地震动的幅值发生了变化，但是楼层峰值加速度放大倍数几乎不变。

3.3 相对位移的变化趋势

相对位移是指古塔各层与底座的绝对位移之差。为了研究山体地形对砖石古塔的相对位移反应的影响规律，图8给出了山底与山顶古塔最大相对位移随加载工况的变化趋势。由图可知，随着输入地震动峰值加速度的增加，最大相对位移也增加。2座古塔各层最大相对位移随着楼层的增加均呈现增加趋势，其原因为输入地震动卓越频率与结构基本频率比较接近，致使结构发生了以基本振型为主的振动时，模型各层间的最大剪力随高度的减小而增加，使得底层层间剪力最大。

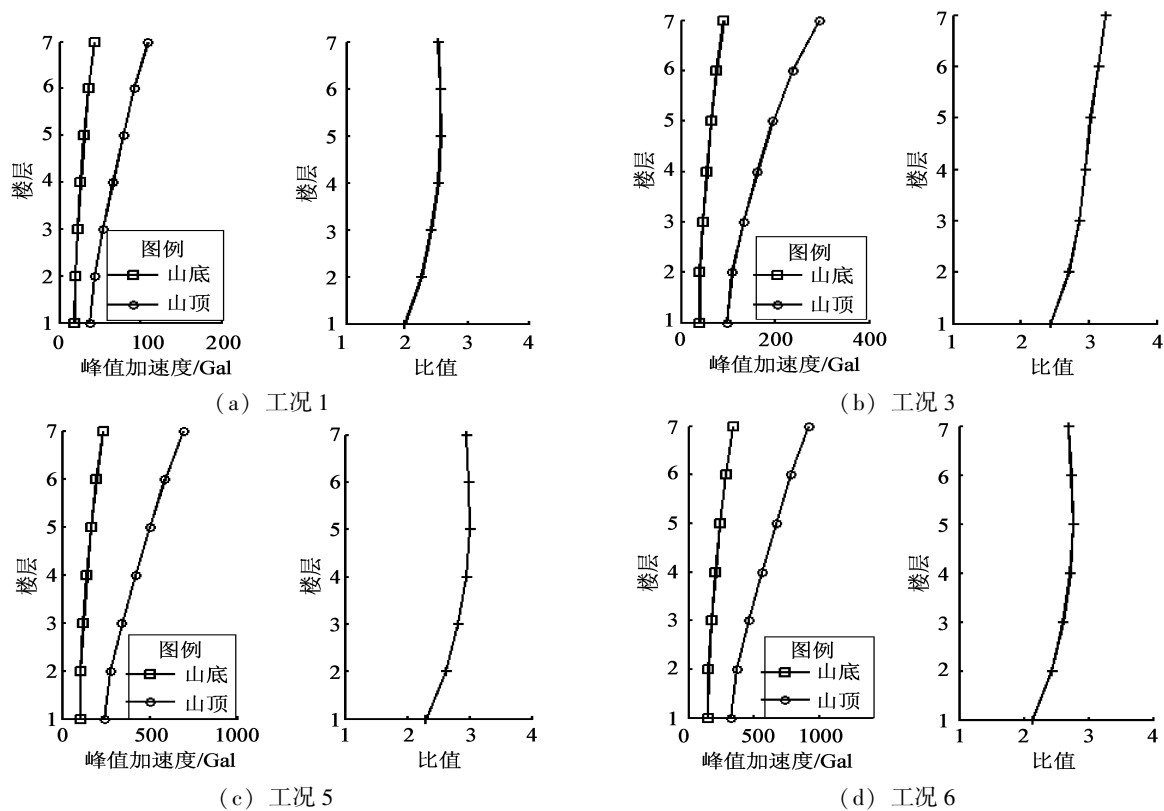


图7 各工况下山底和山顶古塔峰值加速度分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of the peak acceleration of the pagodas at the bottom and on top of the mountain on various conditions

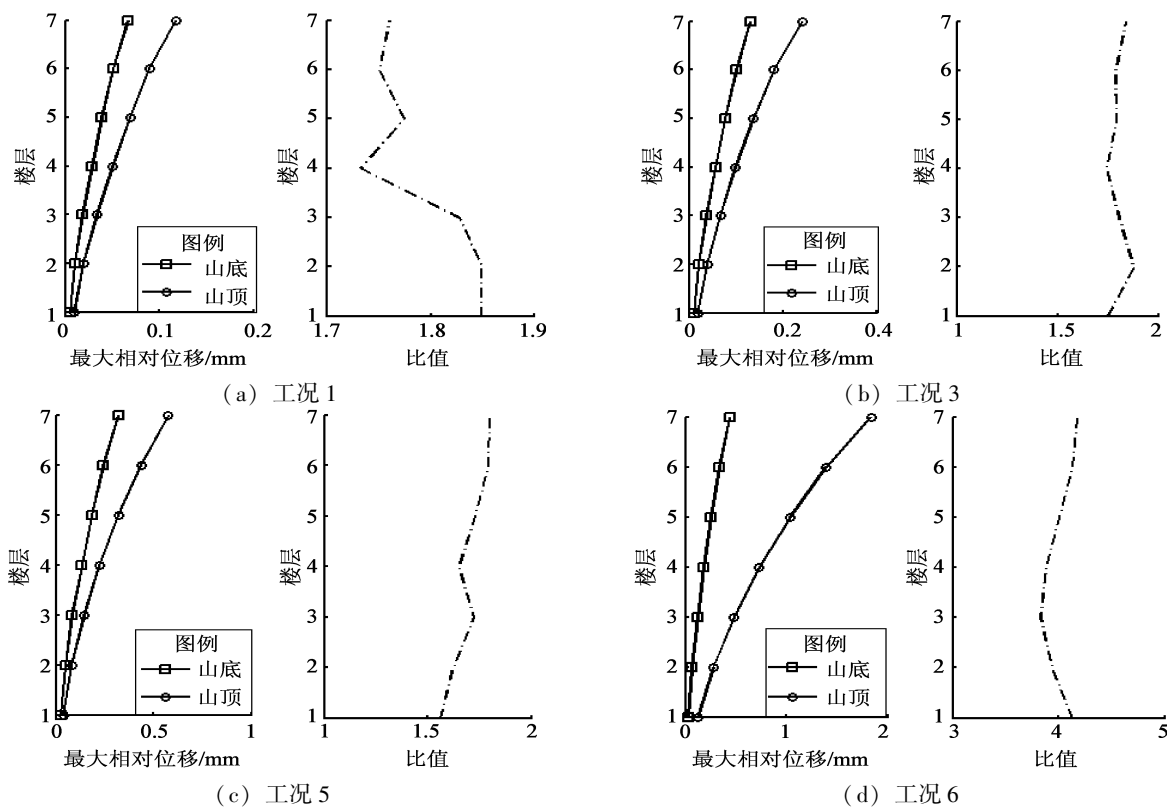


图8 各工况下山底和山顶古塔最大相对位移的变化趋势

Fig. 8 Trend of the maximum relative displacement of the pagodas at the bottom and on top of the mountain on various conditions

由于模型底层门、窗洞口面积较大,对抗剪能力削弱显著,最终导致其底层发生明显破坏,与试验现象一致。也就是说,试验模型的破坏形式由其自振特性、地震动输入的频谱特征以及结构构造特点共同决定。

为了进一步对比同一工况下2座古塔的最大相对位移关系,本文计算了山顶古塔与山底古塔在同一位置处的最大相对位移比值,如图8所示。从图中可以看出,相同工况下,山顶古塔的最大相对位移明显大于山底古塔,其相差倍数为1.4~4.5。值得注意的是,当山脚地震动幅值为150 Gal时,相对位移的放大倍数显著增加,即此时2座古塔相对位移的差别尤为显著,其原因此时山顶古塔底部产生水平向贯通裂缝,引起上部结构各层均发生较大的相对位移。

3.4 层间位移角的变化趋势

为了分析山体地形对砖石古塔的层间位移角的影响规律,图9给出了2座古塔最大层间位移角

随楼层的变化趋势。由图可知,随着古塔高度的增加,最大层间位移角也逐渐增加。为了更加直观地分析地形效应对结构层间位移角的影响,本文计算了同一工况下山顶古塔与山底古塔的各层最大层间位移角的比值,结果显示当山底地震动幅值小于150 Gal时,该比值基本小于2,且数值相近,但是当山底地震动幅值为150 Gal时,该比值接近于4。这表明当结构发生明显的破坏时,层间位移角将显著增加。

图10给出了山顶与山底古塔地震响应比值随加载工况(自由地表地震动幅值)的变化趋势。由图可进一步看出,对于楼层加速度而言,山顶与山底古塔的加速度峰值比值与自由地表地震动幅值相关性较弱。但是对于楼层最大相对位移和最大层间位移角而言,该比值与自由地表地震动幅值具有显著相关性,即古塔结构楼层相对位移和层间位移角的地形放大效应与地震动强度具有一定相关性。

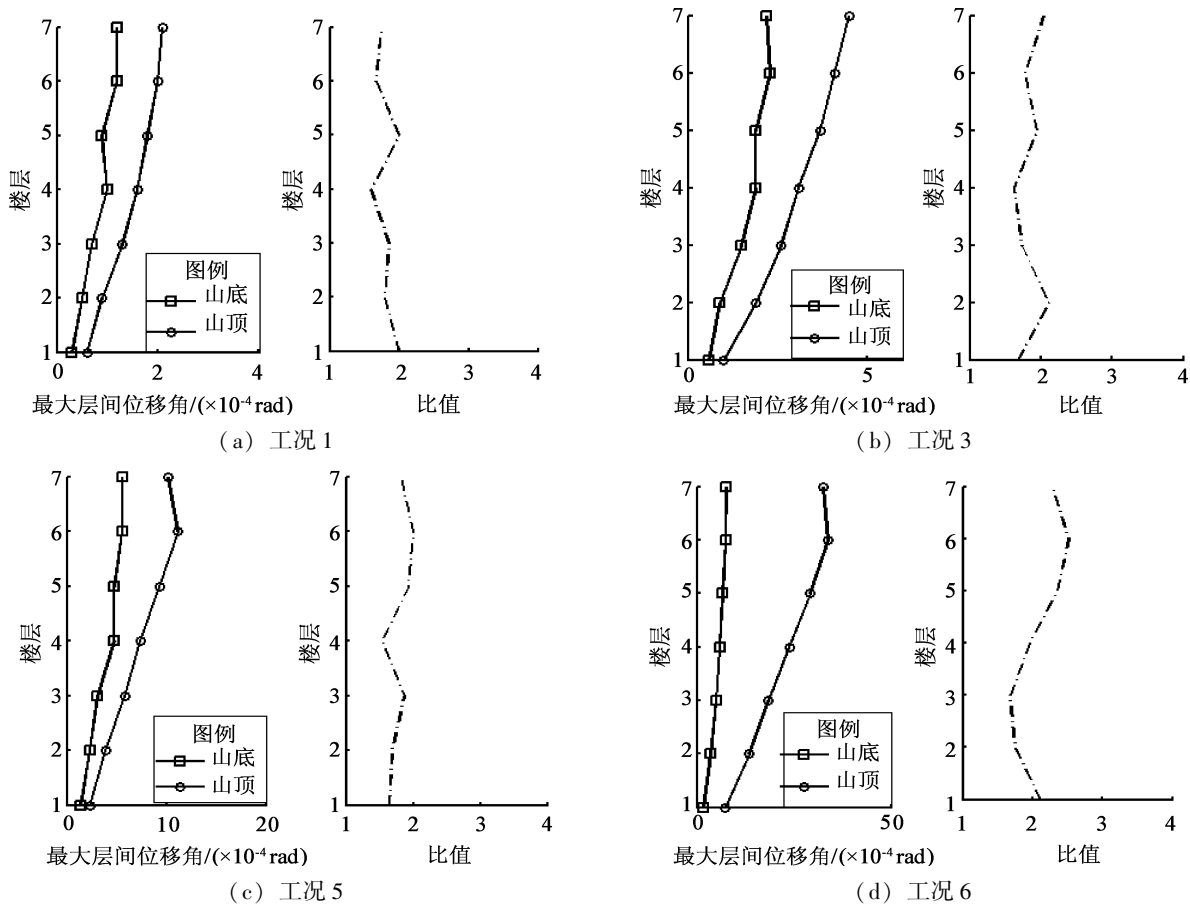


图9 各工况下山底与山顶古塔最大层间位移角的变化趋势

Fig. 9 Trend of maximum story drift of the pagodas on top and at the bottom of the mountain on various conditions

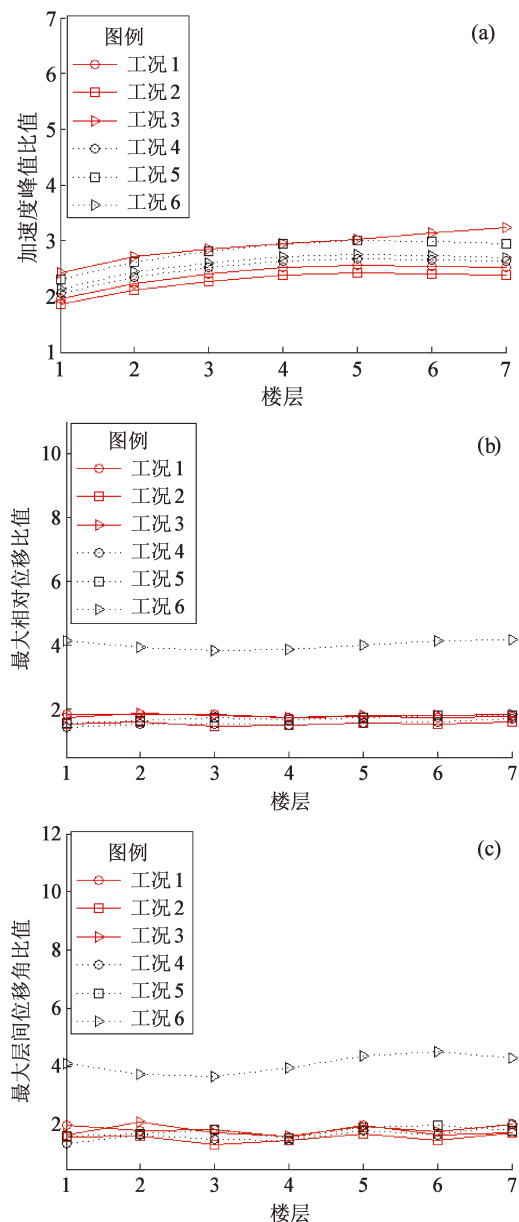


图10 山顶与山底古塔地震响应比值
随工况的变化趋势

Fig. 10 The variation trend of the ratio of
seismic response along with the variation
of the input amplitude

4 结论

本文以位于四川中江县铜鱼山顶的中江南塔作为原型,选取汶川 $M_s 8.0$ 地震时自贡台阵获取的加速度记录为基底输入,通过小型振动台开展试验研究,定量获得地形效应对古塔地震反应的影响,得出的主要结论如下:

(1) 在低幅值地震动作用下,古塔自振频率不变,当地震动峰值分别达到 100 和 150 Gal 时,山顶和山底古塔自振频率明显减小,表明其已破坏,且山顶古塔更易破坏。

(2) 古塔结构的破坏呈现“上轻下重”的特征,主要由结构自振特性、输入地震动频谱特征以及结构构造特点共同决定。

(3) 与山底古塔相较,山顶古塔地震响应明显更大。山顶古塔各楼层峰值加速度、最大相对位移、最大层间位移角分别为山底古塔的 2~3 倍、1.5~4.5 倍、1.5~4.5 倍,其中最大相对位移和最大层间位移角的放大倍数与地震动强度相关。

综上,地震发生时山体地形使得山顶古塔的地震响应明显偏大,致使山顶古塔在较弱的自由地表地面运动下即可发生破坏,因此应特别重视对位于山顶的古建筑的保护工作。

参考文献:

- 迟明杰,李小军,陈波,等. 2015. 2014 年“524”、“530”盈江地震中地形及土层条件对房屋震害影响分析[J]. 地震工程与工程震动, 35(2): 54-55.
- Chi M J, Li X J, Chen B, *et al.* 2015. The effects of topographical and soil conditions on housing damage during the Yingjiang earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 35(2): 54-55. (in Chinese)
- 胡跃祥. 2012. 基于环境动力试验的砖石古塔模态参数识别研究[D]. 扬州:扬州大学.
- Hu Y X. 2012. Research on modal parameter identification of masonry pagoda based on environmental dynamic test[D]. Yangzhou: Yangzhou University. (in Chinese)
- 李英民,唐洋洋,姜宝龙,等. 2020. 山地掉层 RC 框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 41(8): 68-78.
- Li Y M, Tang Y Y, Jiang B L, *et al.* 2020. Shaking table test of RC frame structure on a slope and supported by foundations with different elevations[J]. Journal of Building Structures, 41(8): 68-78. (in Chinese)
- 李永华,江志海,叶美娇,等. 2018. 典型砌体结构山地建筑抗震鉴定及加固[J]. 工程抗震与加固改造, 40(1): 122-129.
- Li Y H, Jiang Z H, Ye M J, *et al.* 2018. Seismic identification and reinforcement of a typical mountain masonry structure building with wooden floor[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 40(1): 122-129. (in Chinese)
- 刘晓莉. 2014. 砖塔模型的振动台试验研究[D]. 扬州:扬州大学.
- Liu X L. 2014. Shaking table test on reduced scale model simulated ancient masonry pagoda [D]. Yangzhou: Yangzhou University. (in Chinese)

- 潘毅,易督航,陈建,等. 2022. 考虑墙体影响的青城山灵官殿动力特性及地震响应分析[J]. 建筑结构学报,43(1):95-104.
- Pan Y, Yi D H, Chen J, *et al.* 2022. Analysis on dynamic characteristics and seismic response of Lingguan deity hall in Qingcheng Mountain by considering effects of wall[J]. Journal of Building Structures, 43(1):95-104. (in Chinese)
- 徐光兴,姚令侃,高召宁,等. 2008a. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,27(3):624-632.
- Xu G X, Yao L K, Gao Z N, *et al.* 2008a. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(3):624-632. (in Chinese)
- 徐光兴,姚令侃,李朝红,等. 2008b. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报,30(6):918-923.
- Xu G X, Yao L K, Li Z H, *et al.* 2008b. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 30(6):918-923. (in Chinese)
- 杨宇,李小军,贺秋梅. 2011. 自贡西山公园山脊场地地形和土层效应数值模拟[J]. 震灾防御技术,6(4):436-447.
- Yang Y, Li X J, He Q M. 2011. Numerical simulation for site effect of ridge terrain and overlaying soil in Zigong Xishan Park[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 6(4):436-447. (in Chinese)
- 袁建力. 2013. 砖石古塔震害程度与地震烈度的对应关系研究[J]. 地震工程与工程振动,33(2):163-167.
- Yuan J L. 2013. Study on corresponding relation between seismic intensity and damage degree of ancient masonry pagodas[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 33(2):163-167. (in Chinese)
- 袁建力. 2018. 古塔抗震性能研究[M]. 北京:科学出版社.
- Yuan J L. 2018. Study on seismic performance of ancient pagoda[M]. Beijing:Science Press. (in Chinese)
- 张江伟,李小军,袁颖,等. 2017. 地震动参数对边坡地震响应的影响规律[J]. 地震学报,39(5):798-805.
- Zhang J W, Li X J, Yuan Y, *et al.* 2017. Influence law of ground motion parameters on soil slope seismic response[J]. Acta Seismologica Sinica, 39(5):798-805. (in Chinese)
- 赵凤仙,郭明珠,胡海芹,等. 2016. 基于数字高程模型的山谷地形效应分析[J]. 地震研究,39(4):598-604.
- Zhao F X, Guo M Z, Hu H Q, *et al.* 2016. Research on terrain effect of valley based on digital elevation model[J]. Journal of seismological research, 39(4):598-604. (in Chinese)
- 周港圣,周游,周正华,等. 2022. 山脊地形效应的强震动观测研究[J]. 地震工程学报,44(5):1110-1116.
- Zhou G S, Zhou Y, Zhou Z H, *et al.* 2022. Topographic effect of ridge terrains based on strong motion observation data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(5):1110-1116. (in Chinese)
- 周颖,吕西林. 2016. 建筑结构振动台模型试验方法与技术[M]. 北京:科学出版社.
- Zhou Y, Lyu X L. 2016. Shaking table model test method and technology of building structure[M]. Beijing:Science Press. (in Chinese)
- Farghaly A A. 2015. Evaluation of seismic performance of buildings constructed on hillside slope of Dronka village - Egypt[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 9(2):176-189.
- Shabani M J, Ghanbari A. 2020. Comparison of seismic behavior of steel building adjacent to slope topography by considering fixedbase, SSI and TSSI[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 21(4):1151-1169.
- Shabani M J, Shamsi M, Ghanbari A. 2021. Slope topography effect on the seismic response of mid-rise buildings considering topography-soil-structure interaction[J]. Earthquakes and Structures, 20(2):187-200.

Experimental Study on Seismic Response of The Zhongjiang South Pagoda in Mountainous Terrain

JIANG Zhijun^{1,2}, ZHONG Rongqiang¹, ZHANG Lei^{1,3}, LI Shengcai¹, ZHANG Feng¹, WEI Chunming²

(1. College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, Jiangsu, China)

(2. Jiangsu Huajian Construction Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu, China)

(3. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

In order to study the influence of mountainous topography on the seismic response of the ancient masonry pagoda, we took the Zhongjiang South Pagoda located on top of the Tongyu Mountain in Zhongjiang County, Sichuan Province as a prototype, and selected the acceleration recordings by the stations of the Zigong Array during the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake as the input, and studied through a small shaking table test the variation trend of the natural vibration frequency of the structure at the bottom and on top of the mountain with the amplitude of input ground motion. We further analyzed the influence of the topographic effect on the seismic response of the ancient pagoda and the failure mode of the pagoda. The results show that the natural frequency of the ancient pagoda remains unchanged under the action of low-amplitude ground motion, and when the peak of free surface ground motion reaches 100 Gal and 150 Gal respectively, the ancient pagodas on top and at the bottom of the mountain is damaged. Under the influence of the natural vibration characteristics of the ancient pagoda, the spectral characteristics of the input ground motion and the building constitution, the ancient pagoda has undergone a failure mode of "slight on top and severe at the bottom". The peak acceleration, maximum relative displacement and maximum inter-story drift of each floor of the ancient pagoda at the top of the mountain are 2 – 3 times, 1.5 – 4.5 times and 1.5 – 4.5 times of those at the bottom of the mountain under the same working conditions, and the amplification factor of maximum relative displacement and maximum inter-story drift is related to the amplitude of input seismic motion. Thus, it is necessary to pay attention to the seismic safety of the ancient pagoda on the mountain.

Keywords: mountainous topography; the Zhongjiang South Pagoda; seismic response; shaking table test