

多维地震作用下砖石古塔动力反应耦联分析*

卢俊龙, 韩鑫, 李传立, 马辉

(西安理工大学土木建筑工程学院 西安, 710048)

摘要 古塔砌体抗拉强度低, 在地震作用下结构极易开裂, 引起刚度沿横截面分布不均匀, 结构平面刚度中心偏离质量中心而发生运动耦联。为研究多维地震作用下古塔动力反应的耦联关系, 依据兴教寺玄奘塔结构模型振动台试验结果, 对比分析了古塔结构在双向及三向地震作用下加速度及位移反应的耦联效应随高度的变化规律, 参照结构破坏现象针对地震反应耦联机制进行分析。结果表明: 在多维地震作用下古塔结构开裂破坏后, 平面刚度发生变化, 引起动力反应耦联; 结构加速度及位移反应耦联效应系数随着测点高度的变化规律基本一致, 但沿不同方向动力反应的耦联特征略有变化, 多数加载工况下动力反应耦联系数的最大值为 1.2 左右。研究结果可为砖石古塔地震反应分析结果修正提供参考。

关键词 砖石古塔; 地震反应; 振动台试验; 振动耦联

中图分类号 TU362; TU352.1

引言

砖石古塔作为我国古代高层建筑的主要形式, 现存数量较多且多数位于地震区, 防震减灾是其预防性保护的必要工作。地震反应分析是古塔抗震研究的主要内容, 残损古塔在地震作用下损伤持续累积, 结构地震反应与其破坏状态密切相关, 需要深入分析砖石古塔遭受地震破坏后的动力学机制, 揭示砖石古塔地震响应的基本规律。陈平等^[1-3]根据震害调查结果计算古塔地震反应, 依据结构响应指标对小雁塔和崇文塔进行地震风险评估。袁建力等^[4-6]依据汶川地震中砖石古塔结构损伤状况, 研究震害程度与地震烈度的对应关系, 对结构自振周期和水平地震作用的计算方法进行了分析。李胜才等^[7]应用显式积分法进行砖塔弹塑性动力分析, 得到结构在地震作用下变形、开裂和压溃等动态过程和破坏形态。潘毅等^[8]通过对比罕遇地震作用下四川彭州镇国寺白塔隔震前后的动力反应, 分析采用不同隔震方案后古塔的动力性能。文献^[9-11]基于一致相似率和单参数畸变相似理论, 研发形状记忆合金复合悬摆减震系统, 设计制作西安小雁塔模型试件并进行振动台试验, 测试了设置与未设置形状记忆合金复合悬摆减震系统时小雁塔模型结构的地震响应, 对比分析减震效果, 并进行小雁塔原型结构分析, 表明变阻尼式调谐质量阻尼器能够显著降低

结构地震反应。黄襄云等^[12]计算了古塔结构的动力特性及地震反应, 并与振动台试验进行对比, 就形状记忆合金阻尼器对古塔结构振动的控制效果进行分析。赵祥等^[13]进行了 1:10 古塔模型结构振动台试验, 测试地震前后古塔动力特性以及地震波作用下的加速度与位移反应, 研究了古塔的抗震性能。

砖石古塔平面多为正多边形, 墙体布置与平面几何形状一致, 结构刚度中心与几何中心接近。受地震作用后, 结构开裂导致平面刚度重分布, 刚度中心与几何中心偏离, 在多维地震作用下, 结构平动将与水平平面内扭转、竖直向平面内转动发生耦合, 并且耦联运动受到地震激励方式和地震烈度等因素的影响。为深入研究多维地震作用下砖石古塔破坏及振动耦联的基本规律, 笔者依据古塔模型振动台试验结果, 针对双向及三向地震波激励下结构破坏与动力反应耦联关系进行研究, 为砖石古塔地震反应分析提供参考。

1 试验概况

1.1 试验模型与加载制度

以陕西省西安市兴教寺玄奘塔为原型, 设计制作 1:8 比例振动台模型试件。该塔为安葬唐代高僧玄奘法师的灵塔, 如图 1(a) 所示, 是全国首批重点文物保护单位之一。玄奘塔共 5 层高 21m, 平面

* 国家自然科学基金资助项目(51778527); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JM5111)
收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-06-03

为正方形,首层设有塔室,2层以上采用黏土实心砌筑,外包墙体以方砖与黄泥浆砌筑,结构尺寸详见文献[14]。按设计相似比制作试件如图1(b)所示。制作模型所用砖材来源于房龄约30年的拆迁民房,将旧砖表面残留灰迹清理干净,切割后作为模型砖,墙体厚为120mm,采用掺10%糯米胶的黏土灰浆砌筑,楼层间以平砖叠涩出檐,塔顶以砖包砌,未制作塔刹,模型总高为2.44m。以7度与8度El-Centro波(以下简称El波)及天津波(以下简称TJ波)为激励,分别进行单向、双向及三向加载,以原结构东西方向为 x 向,南北方向为 y 向,竖直方向为 z 向,双向加载时加速度峰值 $a_x^{\max} : a_y^{\max} = 1 : 0.85$,三向加载时 $a_x^{\max} : a_y^{\max} : a_z^{\max} = 1 : 0.85 : 0.65$,试验方案见文献[15]。



图1 玄奘塔

Fig. 1 Xuanzang Pagoda

1.2 典型破坏现象

观察试验现象发现,加载地震波后结构表现为沿拼接缝开裂破坏。当仅在水平地震作用下,结构水平横截面产生较高的拉应力,沿砌筑缝开裂形成水平通缝,裂缝平面内无错动,加载完成后裂缝闭合,如图2(a)及图2(b)所示;在三向地震作用下,结构同时发生弯曲及剪切变形,在水平开裂区域继续产生斜向裂缝,如图2(c)及图2(d)所示。当烈度较高时,裂缝宽度显著增加,最大宽度达2cm左右,如图2(e)所示,且裂缝沿平面内有明显错动,最大错动变形量约为1cm,如图2(f)所示。

可见,当结构开裂后,水平破裂面以上部分绕破裂面发生转动,结构顶部产生附加变形,接触面上下两部分的接触压力随地震波加载时间发生变化,导致接触面内沿水平向的剪切刚度分布不均匀,平面内刚度中心发生偏移。在结构破坏过程中,除破裂面外其余部分基本完好,仍保持平面及立面规则,质量中心基本保持不变。由于刚度中心变化后,导致结构在多维地震作用下沿不同方向的地震效应发生耦联。

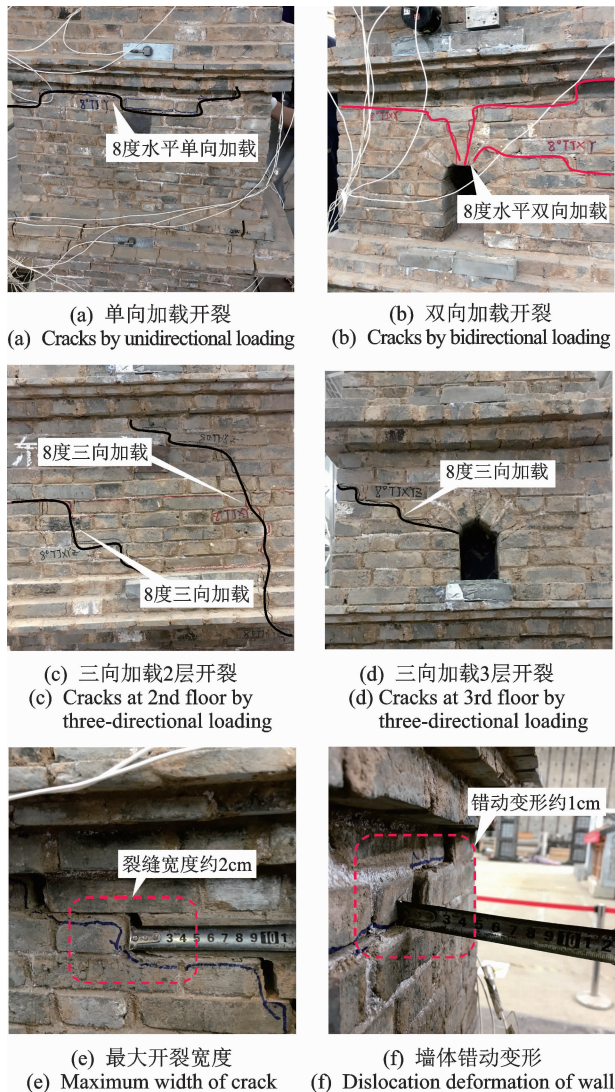


图2 结构开裂破坏

Fig. 2 Cracks in the structure

2 动力反应的耦联模式

开裂古塔受到地震波激励后,结构以破裂面为界被分为若干部分,各部分沿水平向及竖向的平动、绕水平面中心的转动及结构开裂变形均对动力反应有显著影响,其运动耦联的关系如图3所示。图中: R_1 为平动反应; R_t 为转动反应; R 为动力反应总和; F_1 为塔体结构裂缝; $ABCD, A_1B_1C_1D_1, A_2B_2C_2D_2$ 分别为塔体截面运动前、平动后、转动后的位置; O, O_1, O_2 分别为运动前、平动后和转动后的塔体水平截面中心点。由图3(a)可见,当塔体开裂后,受到水平地震的作用,裂缝上下部分的接触压力分布不均匀,引起沿接触面的剪切应力随之改变,导致剪切刚度沿平面内分布不均匀,剪切刚度中心与上部结构的质量中心偏离,在多维地震作用下发生平扭耦联运动。在竖直方向,如图3(b)所示塔体沿裂缝开展沿水平面基本贯通后,裂缝上下两部分

沿竖向仅存在接触压力,受到竖向地震作用的影响,裂缝以上的部分绕接触面发生转动,导致运动耦合。

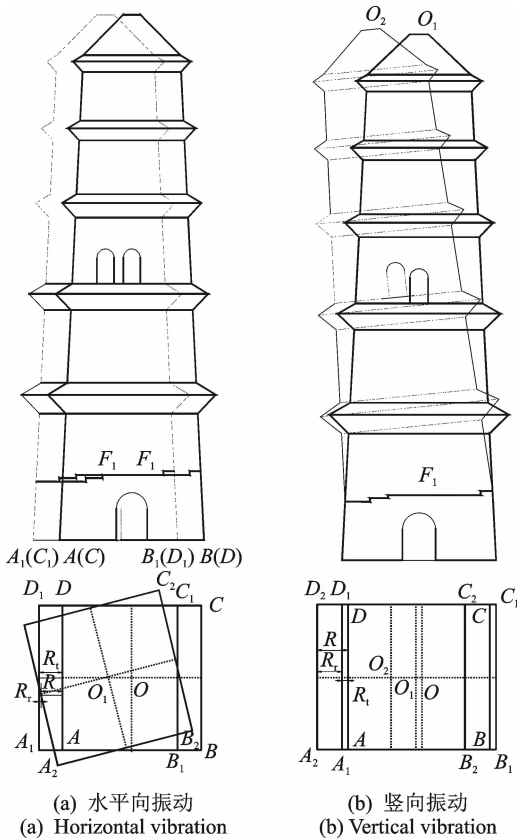


图 3 古塔地震反应耦合方式

Fig. 3 Couple relationship to dynamic response

耦合效应系数随偏心率的增大而增大,当偏心率一定时,耦合率随平扭刚度比而变化。由试验中古塔模型的破坏特征可知,随着加载烈度的提高,裂缝宽度随之增大并产生错动变形,引起接触面剪切刚度沿水平面分布更加不均匀,耦合效应更加显著。

通过将未耦合与耦合状态下结构动力反应进行比较,定义耦合效应系数

$$C = R_c / R_0 \quad (1)$$

其中: C 为动力效应的耦合效应系数; R_c 为耦合后的响应峰值; R_0 为未耦合时的响应峰值。

按式(1)分别计算双向及三向地震波作用下古塔模型动力反应的耦合效应系数, C_a, C_d 分别为加速度耦合效应系数及位移耦合效应系数,均为无量纲单位,比较不同烈度时耦合效应随高度的变化特征。

3 加速度耦合效应

3.1 El-Centro 波作用下的加速度

El-Centro 波加载后,古塔结构沿水平 x 向与 y 向的加速度耦合效应曲线如图 4 所示。 H_R 为测点

的相对高度,即测点高度与模型总高度之比为无量纲。可见,除 8 度 y 向加载外,其余工况下耦合效应系数随着测点高度的变化规律基本一致。7 度加载时,3 层及以上楼层双向加载时耦合效应系数数值略大于三向加载时的值,沿高度方向自 1 层顶发生较大变化后,变化不再明显。8 度加载时,随着高度增加,各测点间耦合效应系数变化较大,最大值位于 3 层至 5 层;其中双向及三向加载时 x 向加速度的耦合效应随高度变化规律较为接近,而三向加载时沿两个方向耦合效应的变化规律差异较大。

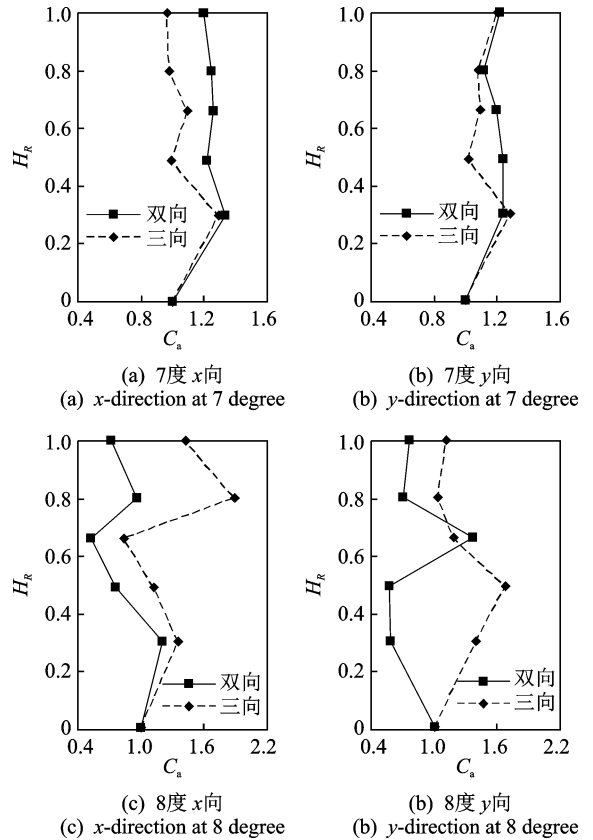


图 4 El-Centro 波激励下加速度耦合效应

Fig. 4 Acceleration couple effect affected by El-Centro wave

3.2 天津波作用的加速度

输入天津波加载后,结构加速度耦合效应曲线如图 5 所示,耦合效应系数随高度的变化规律与 El-Centro 加载时的对应工况一致,且双向加载与三向加载时顶层的耦合效应值均较为接近。可见,7 度加载时各测点耦合效应值略大于 8 度时的值,除 8 度时沿 y 向加速度外,其余各工况双向加载与三向加载时耦合效应值相邻楼层耦合效应的变化均一致。

对比两种地震波加载后加速度反应的耦合效应可见,除 8 度加载 y 向加速度外,其余工况当高度相同时,双向加载与三向加载时耦合效应的大小关系一致,且耦合效应随高度的变化规律较为接近,各工况耦合系数变化范围为 0.8~1.5。分析其原因:8

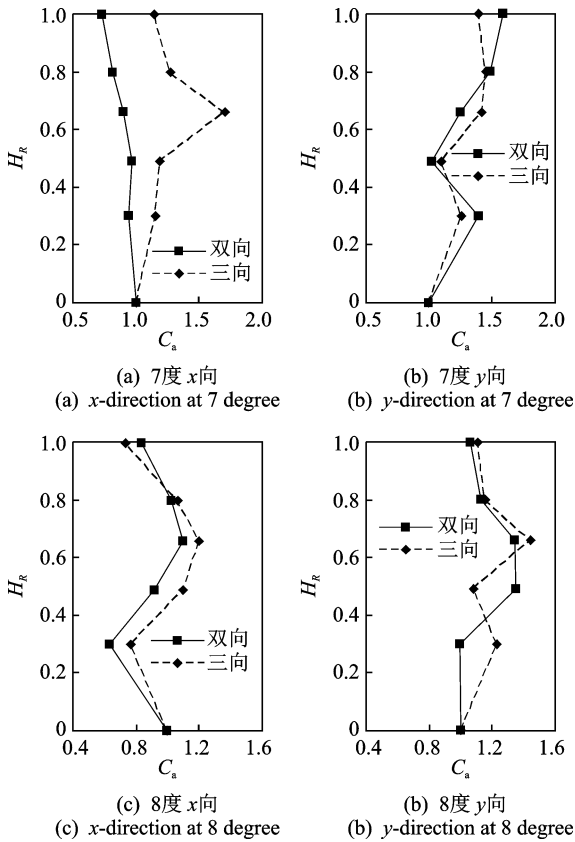


图5 天津波激励下加速度耦联效应

Fig. 5 Acceleration couple effect affected by Tianjin wave

度加载时塔体破坏严重,其中第1~3层均有破裂面出现,将结构分割成若干部分;同时塔体南立面在第1层与第3层均开设洞口,导致沿 y 向的刚度分布更加不均匀;在双向及三向地震作用下,各部分的振动沿破裂面发生多重耦合,导致耦联效应随高度的变化与其他工况不完全一致。可见,双向加载与三向加载时加速度反应耦联效应系数的变化规律基本一致,当烈度较低时则更为接近。

4 位移耦联效应

4.1 El-Centro 波作用下的位移

El-Centro 波激励下结构位移耦联效应如图6所示,不同加载工况下耦联效应系数随测点高度的变化规律不一致,7度加载 x 向时位移耦联效应随测点高度变化不明显, y 向位移耦联效应系数在第3层变化较大,最大值达到3.5,双向加载及三向加载下各测点耦联效应系数值较为接近,而8度加载时两种工况下同测点的值相差较大,其中1层顶最为显著。

4.2 天津波作用下的位移

天津波激励下楼层测点的耦联效应曲线如图7

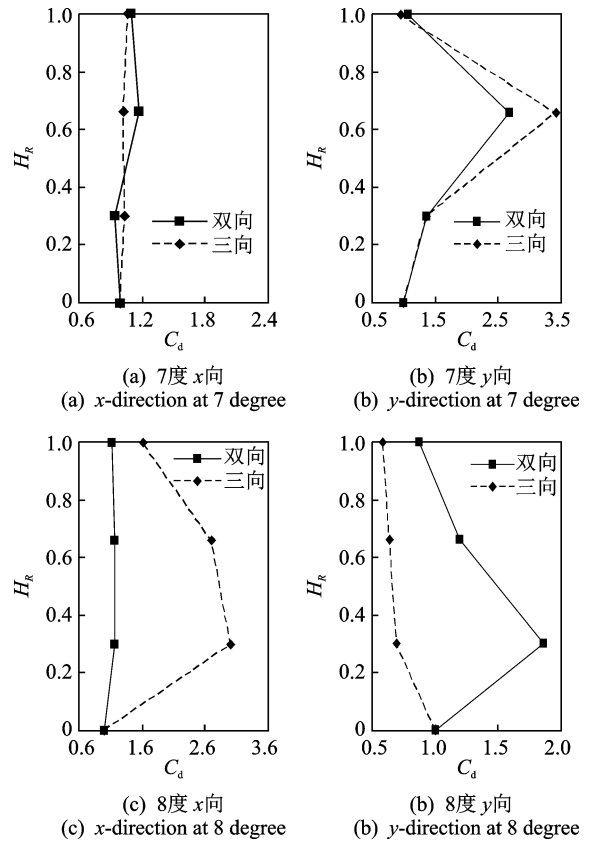


图6 El-Centro 波激励下位移耦联效应

Fig. 6 Displacement couple effect affected by El-Centro wave

所示,除8度加载时的 y 向位移外,其余工况下双向加载与三向加载时耦联效应值的大小关系以及随高度的变化关系均一致,最大耦联效应系数值为1.6,其中7度加载时沿 x 向位移反应耦联效应系数随测点高度增加时的变化率较小。

对比两条地震波激励下的耦联效应曲线可见,各工况下加速度耦联效应变化规律基本一致,除个别工况外,耦联效应值变化亦较小;不同工况下位移耦联效应随高度的变化规律不一致,除7度加载时 x 向位移外,其余工况对应的耦联效应曲线相差较大。各工况双向加载与三向加载时塔顶位移反应的耦联系数数值均较为接近。比较同一工况条件下的加速度与位移耦联效应系数发现,输入El-Centro波时,除7度加载沿 x 向两种反应的耦联效应值随高度变化的规律基本一致外,其余工况二者均相差较大;输入天津波时,各工况下加速度与位移耦联效应值及沿高度的变化规律均相差较大。分析其原因为,因结构在7度El-Centro波作用下随即开裂,开裂后继续加载沿裂缝变形较大,因而当结构加载前未开裂时,加速度与位移耦联效应基本一致,而结构一旦开裂,二者耦联效应相差随即增大。

5 古塔地震反应的耦联特性

试验结果表明,两条地震波作用下古塔结构模

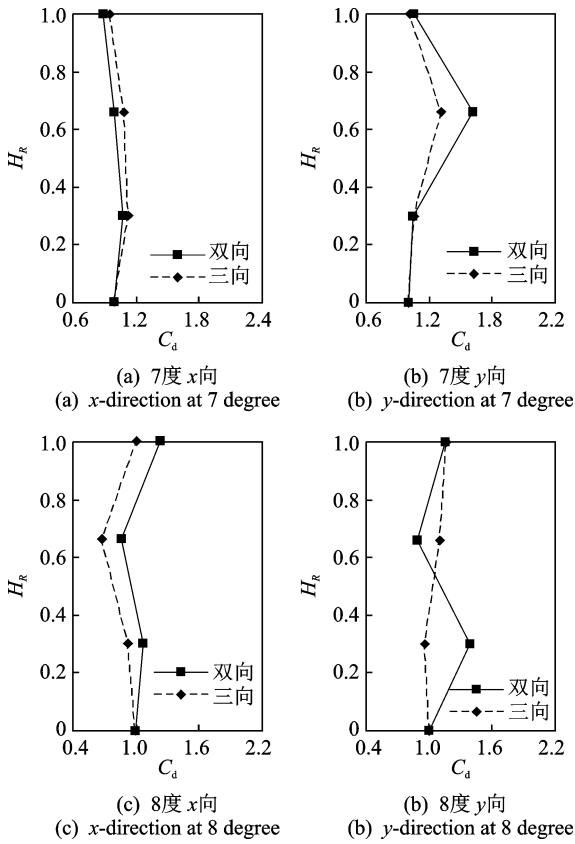


图 7 天津波激励下位移耦联效应

Fig. 7 Displacement couple effect affected by Tianjin wave

型的动力反应均存在一定的耦联效应,耦联效应与所输地震波、加载方向和测点高度等因素有关。参照试验加载古塔模型开裂破坏现象可见,在水平双向地震波作用下,结构开裂沿水平通缝延伸扩展,沿破裂面的水平方向剪切刚度受到粗糙程度、灰浆黏结强度和破裂形状等因素影响,平面刚度分布不均匀。结构平面沿破裂面局部刚度突变导致刚度中心偏离几何中心,受到多维地震作用后,破裂面上下两部分沿水平面发生相对平动与转动,并相互耦联;当输入三向地震波后,结构模型的破裂面以斜向为主,沿接触面切向与法向刚度均为连续变化,破裂面沿水平及竖向的剪切刚度中心位置继续偏移,在动力作用下接触面上部结构同时发生平面内扭转与竖向转动,与结构平动发生耦联。

古塔在多维地震激励下运动发生耦联后,动力反应耦联效应的最大值如图 8 所示,其中工况 7D2-x 表示 7 度双向加载沿 x 向的地震反应,其余工况表示方法相同。可见,个别工况位移反应的耦联系数数值较其他工况大 1 倍左右,而在后序工况中再无明显变化,其原因为结构快速破裂产生的冲击效应引起;此外,其余工况下加速度及位移反应耦联效应系数的最大值较为接近,其值均为 1.2 左右。

综合分析各工况古塔结构动力反应的耦联效应可见,古塔砌体在地震作用下开裂引起瞬态冲击,对结构动力反应的耦联效应有加剧作用,而当裂缝形

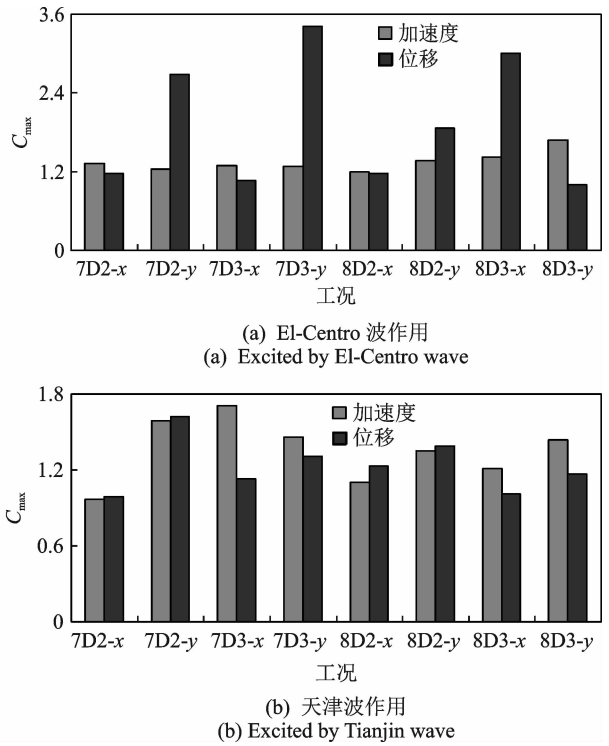


图 8 动力反应耦联系数最大值

Fig. 8 The maximum value of couple coefficient of dynamic response

成后,对多维地震作用下的耦联效应再无显著影响。因此在进行古塔抗震能力分析时,若不考虑砌体开裂影响,可将单向地震作用下的动力反应增大 20% 作为考虑多维地震耦联影响后的反应。

6 结 论

1) 古塔砌体抗拉强度低,在地震作用下极易开裂,裂缝界面形状不规则且刚度分布不均匀,导致结构平面刚度中心与几何中心偏离,在多维地震作用下发生平动-扭转耦联运动。

2) 在竖向地震作用下,开裂古塔破裂面以上的子结构绕破裂面转动,与结构水平运动发生耦联,破裂面的形状及位置对耦联效应有一定影响。

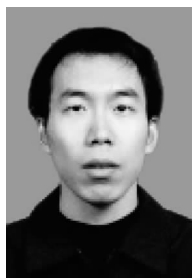
3) 两条地震波加载工况下古塔加速度耦联效应系数高度的变化规律基本一致,而位移耦联效应随高度的变化规律略有不同。

4) 古塔结构在多维地震作用下,考虑耦联效应影响后,可将不考虑耦联影响时的动力反应值增大 20%。

参 考 文 献

[1] 陈平, 负作义, 宋泽维, 等. 砖石古塔地震易损性评估 [J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(6): 59-63.

- CHEN Ping, YUN Zuoyi, SONG Zewei, et al. Seismic vulnerability assessment of ancient masonry tower [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(6): 59-63. (in Chinese)
- [2] 陈平, 俞作义, 宋泽维. 砖石古塔的地震风险评估[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 98-102.
- CHEN Ping, YUN Zuoyi, SONG Zewei. Earthquake risk assessment of ancient masonry tower [J]. Industrial Construction, 2015, 45(4): 98-102. (in Chinese)
- [3] 陈平, 郭琦, 张鹏丽. 崇文塔震害分析及安全性评估[J]. 工业建筑, 2015, 45(2): 65-69.
- CHEN Ping, GUO Qi, Zhang Pengli. Analysis of seismic damage and evaluation on the safety of Chongwen Pagoda [J]. Industrial Construction, 2015, 45(2): 65-69. (in Chinese)
- [4] 袁建力. 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, 2013, 33(2): 164-167.
- YUAN Jianli. Study on corresponding relation between seismic intensity and damage degree of ancient masonry pagodas [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 164-167. (in Chinese)
- [5] 袁建力. 砖石古塔基本周期的简化计算方法[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(2): 151-156.
- YUAN Jianli. A simplified method for calculating the fundamental period of ancient masonry pagodas [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(2): 151-156. (in Chinese)
- [6] 袁建力. 砖石古塔水平地震作用的分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(2): 18-27.
- YUAN Jianli. Analytical method on horizontal earthquake action of ancient masonry pagoda [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(2): 18-27. (in Chinese)
- [7] 李胜才, 赵有军, D'AYALA D, 等. 砖石古塔地震损伤演化的数值模拟[J]. 扬州大学学报, 2014, 17(4): 60-63.
- LI Shengcai, ZHAO Youjun, D'AYALA D, et al. Numerical simulation on the seismic damage evolution of masonry ancient pagodas [J]. Journal of Yangzhou University, 2014, 17(4): 60-63. (in Chinese)
- [8] 潘毅, 王子超, 尚枫, 等. 四川省某砖石古塔隔震加固方案研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 540-547.
- Pan Yi, WANG Zichao, SHANG Feng, et al. Study on isolated reinforcement scheme of ancient masonry pagoda in sichuan province [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 540-547. (in Chinese)
- [9] 李涛, 王社良, 杨涛. 砖石古塔结构振动台试验模型设计与试验验证[J]. 振动工程学报, 2018, 31(2): 314-322.
- LI Tao, WANG Sheliang, YANG Tao. Design and experimental verification of shaking table test model of brick masonry structure in ancient pagoda [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(2): 314-322. (in Chinese)
- [10] 王社良, 刘伟, 杨涛. 西安小雁塔结构振动控制试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 113-121.
- WANG Sheliang, LIU Wei, YANG Tao. Experimental study on vibration control of Xiaoyan pagoda in Xi'an [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 113-121. (in Chinese)
- [11] 赵祥, 刘忠华, 王社良, 等. 变阻尼式 TMD 对小雁塔减震控制研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 93-98.
- ZHAO Xiang, LIU Zhonghua, WANG Sheliang, et al. The seismic control research of the small wild goose pagoda with variable damping type TMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 93-98. (in Chinese)
- [12] 黄襄云, 王凤华. 安装新型形状记忆合金阻尼器的古塔结构地震反应有限元分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 38-45.
- HUANG Xiangyun, WANG Fenghua. Finite-element analysis for seismic response of an ancient pagoda with installed SMA damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 38-45. (in Chinese)
- [13] 赵祥, 王社良, 周福霖, 等. 基于 SMA 阻尼器的古塔模型结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 219-223.
- ZHAO Xiang, WANG Sheliang, ZHOU Fulin, et al. Shaking table tests for ancient pagoda model structure based on shape memory alloy actuating devices [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 219-223. (in Chinese)
- [14] 卢俊龙, 刘伯权, 张荫, 等. 某砖石古塔-地基相互作用系统地震反应分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(6): 102-105, 147.
- LU Junlong, LIU Boquan, ZHANG Yin, et al. Seismic response analysis of interaction system of masonry pagoda and subsoil [J]. Industrial Construction, 2012, 42(6): 102-105, 147. (in Chinese)
- [15] 卢俊龙, 李晓蕾. 内填粘土实心结构砖塔振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 154-162.
- LU Junlong, LI Xiaolei. Shaking table test on brick masonry pagoda with solid structure in-filled by clay [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(12): 154-162. (in Chinese)



第一作者简介: 卢俊龙, 男, 1978年11月生, 博士、副教授。主要研究方向为工程结构抗震与振动控制。曾发表《内填粘土实心结构砖塔振动台试验研究》(《建筑结构学报》2017年第38卷第12期)等论文。

E-mail: lujunlong@sohu.com