

大理市结构地震反应观测台阵在2021年云南漾濞 M_s 6.4地震中的响应研究^{*}

林国良^{1,2}, 傅磊¹, 崔建文^{2*}, 赵昆², 杨黎薇², 王帮治²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 对建筑结构地震反应观测台阵在结构抗震设计中的意义进行了简要论述, 介绍了大理经济技术开发区管理委员会框架剪力墙大楼内的地震观测台阵测点布设, 概述了该台阵在2021年云南漾濞 M_s 6.4地震中获取的强震记录情况, 并从峰值加速度和频谱等方面对主震及5.0级以上地震的观测记录进行了分析。结果表明: 水平和竖向峰值加速度随着楼层的增加均存在放大现象, 震级越大, 楼层的水平振动放大效果越明显; 该结构的第一振型和第二振型的自振频率分别为0.48 Hz和1.86 Hz。

关键词: 漾濞地震; 结构反应台阵; 反应谱; 地震震害

中图分类号: P315.914

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)03-0446-06

0 引言

强震动观测是利用仪器记录地震发生时产生的强地面运动和工程结构地震反应情况, 是认识强地震动特性(强度、频谱和持时等)和工程结构的地震反应特性的主要手段(谢礼立, 于双久, 1982)。我国自1962年在广东新丰江大坝上布设第一个强震动观测结构台阵以来, 强震动观测事业飞速发展, 自由场地强震动台站密度也越来越高。

随着我国经济快速发展, 在地震活动性较高的地区, 高层、超高层建筑也如雨后春笋般涌现。虽然这些建筑都经过了严格的抗震设计, 但因我国出现高层、超高层建筑的时间不长, 都未经历过强烈地震的冲击, 其抗震性能并未得到检验, 大震或远震作用下的地震反应观测数据相当匮乏。另一方面, 仅仅依靠理论分析和结构的振动台试验很难圆满完成对于工程结构合理的抗震设计, 特别是一些新型、大型或复杂结构在建立

理论分析计算模型时都做了一些假设, 这些假设和计算模型是否合理也需要实际结构地震反应来进行验证和改进(周雍年, 2011)。故需在地震多发区高层、超高层建筑上布设地震反应观测台阵, 获取地震时真实的结构地震反应数据, 这就相当于对结构进行一次原型结构振动试验, 记录数据中包含着大量结构特性和结构抗震性能方面的信息(Mehmet *et al*, 1987; 李鸿晶等, 2003)。近些年, 广州虎门大桥出现抖动和深圳华强北赛格大厦出现晃动等事件让结构地震反应观测台阵建设显得尤为必要。

目前国内针对高层和超高层建筑物的结构地震反应观测台阵尚不多, 仅在北京、上海等地布设了一些强震动观测台阵(周宝峰等, 2017; 赵鹏等, 2018), 由于这些地区地处地震低发区, 至今未获取较为丰富有效的地震反应观测数据。云南省现有昆明同德广场悦中心(Todoravska *et al*, 2020)和大理经济技术开发区管理委员会(以下简称“大理经开区管委会”)大楼地震反应观测台阵。2021年5月21日, 云南省大理州漾濞县发生

^{*} 收稿日期: 2021-06-30.

基金项目: 云南省地震局科技专项(2019ZX02)和中国地震局地球物理研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(DQJB21Y42)联合资助.

第一作者简介: 林国良(1986-), 高级工程师, 主要从事强震动观测、历史地震等方面的研究.

E-mail: linguoliang1986@126.com.

♣通讯作者简介: 崔建文(1961-), 研究员, 博士, 主要从事强震动观测与研究. E-mail: 273514873@qq.com.

$M_s6.4$ 地震,震中位于(25.67°N, 99.87°E),震源深度8 km。对此次地震的前震、主震和余震,距震中约41 km的大理经开区管委会大楼地震反应观测台阵获取了大量的建筑地震反应观测数据,本文对该结构地震反应观测台阵获取的强震动记录进行分析。

1 建筑结构特征

大理市结构地震反应观测台阵(以下简称“结构台阵”)位于大理经开区管委会大楼内,地理坐标为(25.618°N, 100.279°E)。该地区位于

红河断裂带上,其西侧为苍山山前断裂,东侧为洱源—弥渡断裂,40 km范围内曾发生多次破坏性地震(图1)。1925年大理7级地震就发生在洱源—弥渡断裂北段的风仪—定西岭断裂上,震中距离结构台阵不到5 km。

大理经开区管委会大楼是由A座和B座二幢连廊的双子楼组成,结构台阵位于B座(图2)。大楼建筑形式为框架剪力墙结构,地下1层、地上26层,建筑高度99 m,标准层平面布局为近似矩形(图3),平面尺寸为长61.6 m、宽18.6 m。

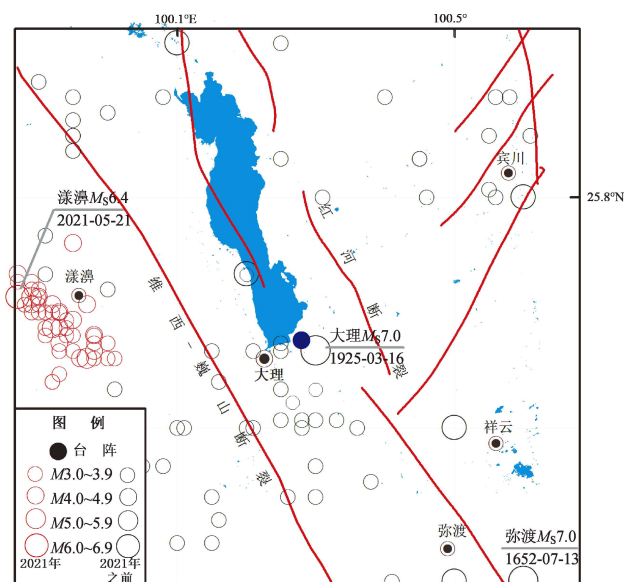


图1 大理市结构地震反应观测台阵近场历史地震分布

Fig. 1 Historical - earthquake distribution around the structural seismic response array in Dali City



图2 大理经开区管委会大楼外观

Fig. 2 Architectural appearance of the building of the Management Committee of Dali Economic and Technological Development Zone

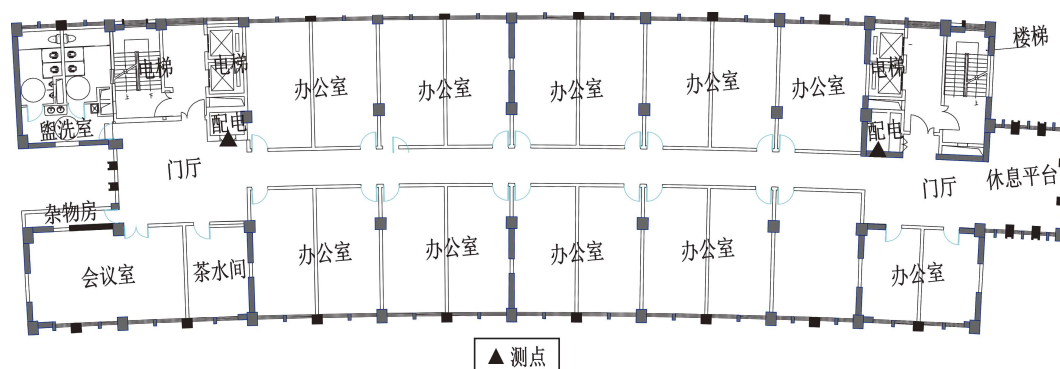


图3 大楼平面布局和测点位置分布

Fig. 3 The plane of the building and location of measuring points

2 结构地震反应观测台阵布设

在布设结构台阵时主要根据建筑结构的特点,并在经济合理的条件下,尽量将测点布设在能够反应主体结构振动特性的位置上(王飞等,2006)。我们选择在-1、3、6、9、12、15、18、21、24及26层共10个平面20个测点进行观测。每层在东侧的弱电井和西侧的强电井各布设1个测点(图3)。除26、15和-1层采用三分量的一体化强震仪外(6个三分量加速度测点),其它测点仅有2个相互正交的水平分量(14个水平分量加速度测点),共计46通道(图4),传感器X轴与建筑的长轴方向平行、Y轴与建筑的短轴方向(北偏东22°)平行。

为进行建筑结构地震反应分析提供地震动输入,需在建筑物附近布设自由场地测点。为防止土-结构相互作用,自由场地测点与建筑物的距离通常应为结构高度的1.5~2倍(周正华等,

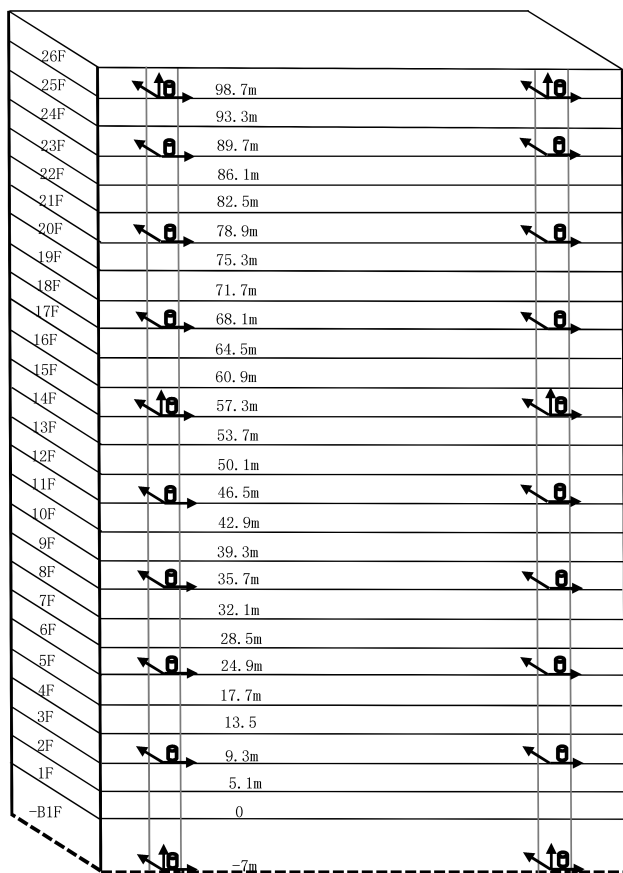


图4 传感器位置示意图

Fig. 4 The layout of the sensors

2004;王卫争,2007)。受经费限制,该结构台阵未布设自由场地测点,但在台阵周边1.3 km范围内有大理州政府强震台可作为参考。

3 观测数据分析

2021年5月21日21时48分,大理州漾濞县发生 $M_s6.4$ 地震。漾濞地震序列包含多次前震和余震,其中5.0~5.9级地震3次,4.0~4.9级地震13次,3.0~3.9级地震33次。受震级、震源深度和地震破裂方向的影响,33次3.0~3.9级地震中仅获取其中22次地震的强震动记录,4.0~4.9级和5.0~5.9级地震均计强震动记录,共计605组、1374条加速度记录(表1)。

表1 台阵获取的漾濞地震序列加速度记录

Tab. 1 The acceleration recordings of the Yangbi earthquake sequence by the array

| 震级范围 | 地震次数 | 记录组数 | 记录条数 |
|---------|------|------|------|
| 6.0~6.9 | 1 | 15 | 34 |
| 5.0~5.9 | 3 | 45 | 102 |
| 4.0~4.9 | 13 | 200 | 454 |
| 3.0~3.9 | 22 | 345 | 784 |
| 合计 | 39 | 605 | 1374 |

3.1 峰值加速度

表2为漾濞地震序列中4次5级以上地震时各楼层记录的峰值加速度,其中最大峰值加速度为 $M_s6.4$ 主震时在26层获取的,其值为长轴向 82.74 cm/s^2 、短轴向 -91.41 cm/s^2 、竖向 -36.4 cm/s^2 。 $M_s6.4$ 主震时地下一层长轴向和短轴向峰值加速度分别为 -34.1 cm/s^2 和 32.46 cm/s^2 ,与距台阵1.3 km的大理州政府强震动台站的峰值加速度(东西向 -39.3 cm/s^2 、南北向 25.7 cm/s^2)较为相近。

图5为 $M_s6.4$ 主震时各楼层记录的长轴向和短轴向的加速度时程曲线。从图中可看出波形记录质量较好,不同楼层的波形形状高度一致。图6为4次5.0级以上地震时各楼层强震动记录峰值加速度。从图中可见,伴随楼层的增加,无论长轴向还是短轴向,总体呈现结构振动变大的趋势。但也存在伴随楼层的增加振动减弱的现象,如 $M_s6.4$ 和 $M_s5.2$ 地震时12~18层、 $M_s5.6$ 地震时6~18层,这些现

象与地震时的结构振型密切相关。

漾濞 $M_s6.4$ 主震时，大楼结构的中间层12层的峰值加速度约为地下一层的2倍，26层的峰值加速度约为地下一层的3倍； $M_s5.6$ 和 $M_s5.2$ 地震时，顶层的峰值加速度约为地下一层的1.5~2倍；

$M_s5.0$ 地震时，各楼层的峰值加速度较为接近，放大效果不明显。整个台阵仅在地下一层、15层和26层有竖向通道，总体幅值约为水平向的一半，但也存在伴随楼层的增加峰值加速度变大的现象（表2）。

表2 漾濞地震序列5.0级以上地震记录的各楼层峰值加速度
Tab.2 The peak ground accelerations of the $M_s \geq 5.0$ earthquakes of Yangbi earthquake sequence (单位: cm/s^2)

| M_s | 通道 | 楼层 | | | | | | | | | |
|-------|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | -1层 | 3层 | 6层 | 9层 | 12层 | 15层 | 18层 | 21层 | 24层 | 26层 |
| 6.4 | 长轴 | -34.10 | -49.33 | -63.38 | -68.21 | -63.80 | 51.11 | -62.74 | -69.13 | 71.62 | 82.74 |
| | 短轴 | 32.46 | 39.07 | 53.56 | -65.60 | -69.50 | -64.31 | 58.08 | -69.17 | -82.34 | -91.41 |
| | 竖向 | 20.33 | — | — | — | — | 29.38 | — | — | — | -36.40 |
| 5.6 | 长轴 | 19.10 | 20.88 | 35.63 | 31.82 | 28.06 | 24.67 | 20.57 | 21.07 | 27.35 | 41.36 |
| | 短轴 | 16.07 | -29.80 | -45.22 | -41.43 | 36.48 | 41.87 | 37.15 | -21.01 | 30.31 | -42.28 |
| | 竖向 | -7.84 | — | — | — | — | 13.26 | — | — | — | 15.67 |
| 5.2 | 长轴 | 18.58 | -15.33 | -28.09 | -34.37 | -35.38 | -26.05 | 20.53 | -21.73 | -29.22 | -33.54 |
| | 短轴 | -19.3 | 21.18 | 25.52 | -24.66 | -25.58 | -21.12 | 21.60 | -13.54 | 18.60 | 29.83 |
| | 竖向 | -7.09 | — | — | — | — | -10.21 | — | — | — | -17.93 |
| 5.0 | 长轴 | 3.23 | -4.56 | 4.05 | -4.05 | -3.95 | -3.37 | 3.07 | -3.63 | -3.53 | -5.19 |
| | 短轴 | 4.64 | 5.31 | 6.56 | 7.49 | -7.80 | -6.13 | -4.36 | 3.35 | 5.98 | 8.48 |
| | 竖向 | 2.82 | — | — | — | — | -3.04 | — | — | — | -4.09 |

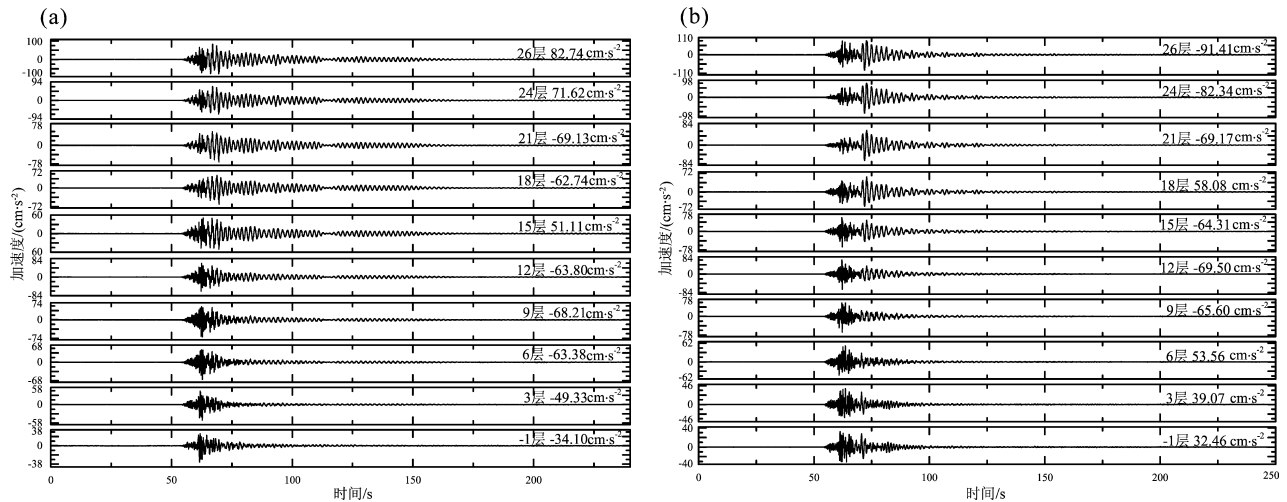


图5 漾濞 $M_s6.4$ 主震的长轴向 (a)、短轴向 (b) 加速度时程曲线
Fig.5 The time history of acceleration of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake in major axis (a) and minor axis (b) of the structure

3.2 频谱特性

经傅立叶变换后，得到 $M_s6.4$ 主震时的各楼层长、短轴向傅立叶幅值谱（图7）。从图7中可以看出，长轴向傅立叶幅值谱在0.54 Hz、1.86 Hz

处出现明显峰值；短轴向傅立叶幅值谱在0.48 Hz处出现峰值，在更高频未见明显峰值。长、短轴向有傅立叶幅值谱分别在0.54 Hz和0.48 Hz处出现峰值，这是由受长、短轴的不同刚度影响所致。

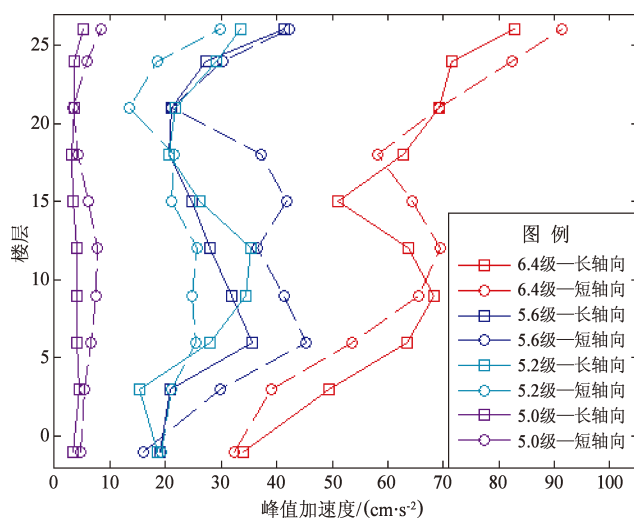


图6 各楼层强震动记录的5.0级以上地震的峰值加速度

Fig. 6 PGA of strong motion recordings of $M > 5.0$ earthquakes on each floor of the building

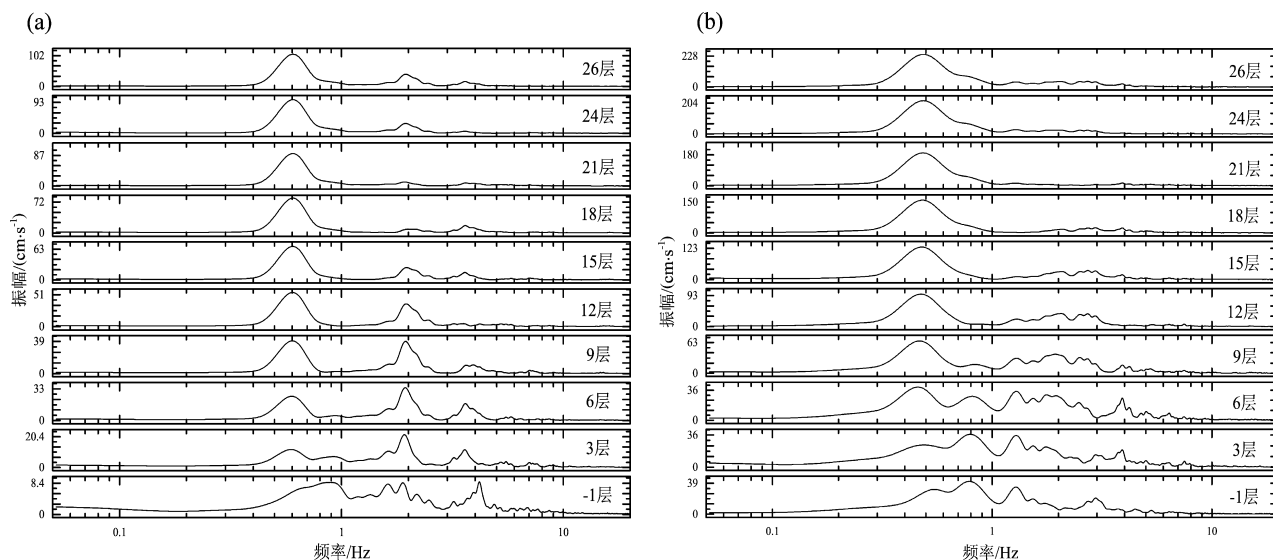


图7 漾濞 $M_s 6.4$ 主震长轴向 (a) 和短轴向 (b) 傅立叶幅值谱

Fig. 7 Fourier spectrum in major axis (a) and minor axis (b) direction

4 结论

在2021年云南大理漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列中,大理经开区结构地震反应观测台阵获取到多次该地震序列的前震、主震和余震的加速度时程。通过对观测数据的分析处理,得到以下结论:

(1) 随着楼层的增加,水平和竖向峰值加速度均存在放大现象,震级越大、楼层的振动水平

由于结构第一振型所需能量低,频率较低,但振动幅度大,故0.48 Hz对应结构的第一振型频率,1.86 Hz对应结构第二振型频率。

3.3 震害情况

震后现场调查发现,大理经开区管委会大楼从顶层往下,多数楼层的填充墙中出现细微裂缝。尤其是5层以下,在填充墙与梁柱接触部位出现水平和竖向贯通裂缝。图8a为2~3层楼梯间墙面出现水平和竖向的裂缝,图8b为3层靠近连廊处的地面瓷砖开裂。此外,大楼还出现多处低楼层走廊墙面瓷砖掉落的震害现象。振动幅值更高的高楼层反而未见明显的破坏,主要是因为高层建筑受到地震作用时最大剪力和弯矩都发生在底层,故产生的破坏更为严重。另外由于大楼振动时可能有多个振型,不同的振型导致产生破坏的位置不同,这就解释了为什么某些楼层未见裂缝。

放大效应越明显。 $M_s 6.4$ 主震时楼顶的峰值加速度约为地下一层的3倍。但因受结构振型的影响,随着楼层的增加,振动水平减弱。

(2) 该结构的第一振型和第二振型的自振频率分别为0.48 Hz和1.86 Hz。

(3) 现场震害调查显示低楼层的破坏较高楼层更为严重,这与地震时结构的最大剪力和弯矩都发生在底层的理论相吻合。

(4) 该台阵缺少自由场地观测点,将1.3 km

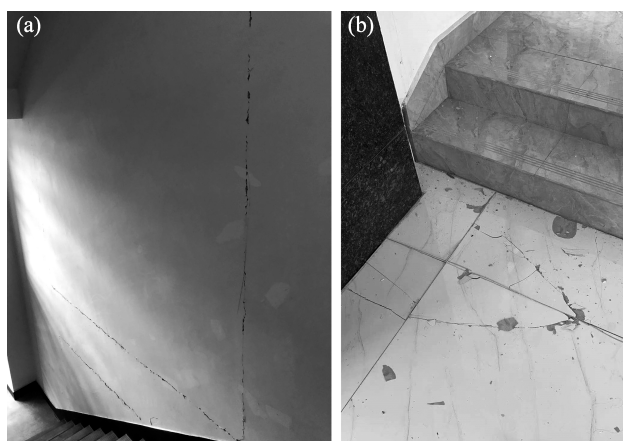


图8 墙面水平向和竖向裂缝 (a) 及
地面瓷砖开裂 (b)

Fig. 8 The horizontal and vertical cracks on the wall
(a) and cracking of ceramic tile on the floor (b)

外的强震台或地下一层测点的观测记录作为结构地震动输入，在今后的研究中，选择建筑物外合适距离布设自由场地测点对结构抗震分析十分必要。

参考文献：

- 李鸿晶,朱士云,Mehmet C. 2003. 强震观测建筑结构的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动,23(6):31-36.
- 王飞,胡平,王湘南,等. 2006. 北京市人大办公楼的结构地震反应观测台阵研究[J]. 地震地磁观测与研究,27(2):68-73.
- 王卫争. 2007. 高层建筑结构地震反应观测台阵优化布设方法研究[D]. 大连:大连理工大学.
- 谢礼立,于双久. 1982. 强震观测与分析原理[M]. 北京:地震出版社.
- 赵鹏,胡峻,徐永林,等. 2018. 上海市环球金融中心结构地震反应台阵[J]. 地震地磁观测与研究,39(3):143-149.
- 周宝峰,樊圆,温瑞智,等. 2017. 建筑结构地震反应观测台阵的发展现状及展望[J]. 地震工程与工程振动,37(3):57-66.
- 周雍年. 2011. 强震动观测技术[M]. 北京:地震出版社.
- 周正华,李铁,代志勇,等. 2004. 建筑结构地震反应观测系统[J]. 地球物理学进展,19(4):868-872.
- Mehmet C, Erdal S, Gerald B, et al. 1987. Integrated instrumentation plan for assessing the seismic response of structures - A review of the current USGS program[M]. Reston, VA: US Geological Survey.
- Todorovska M, Niu B, Lin G L, et al. 2020. A new full-scale testbed for structural health monitoring and soil-structure interaction studies: Kunming 48-story office building in Yunnan province, China[J]. Struct Control Health Monit, 20(7). DOI:10.1002/stc.2545.

Study on the Response of the Structural Seismic Response Array in Dali City to the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake

LIN Guoliang^{1,2}, FU Lei¹, CUI Jianwen², ZHAO Kun², YANG Liwei², WANG Bangzhi²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

(2. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, the significance of the structural seismic response array for the earthquake-resistant design of structure is briefly discussed, and the layout of the measuring points of the structural seismic response array in the building of the Management Committee of Dali Economic and Technological Development Zone is introduced. In addition, the strong-motion records obtained in the $M_s6.4$ Yangbi earthquake event on May 21, 2021 is summarized. The peak ground acceleration and the frequency spectrum of the strong motion records of the main shock and the $M_s \geq 5.0$ after shocks are processed and analysed. The results show that the motions are amplified both in the horizontal and the vertical direction with the ascending of the building's floor. And as the magnitude increases, the amplification of the motions is more obvious. Meanwhile the natural frequency of the first vibration mode and the second vibration mode is respectively 0.48 Hz and 1.86 Hz.

Keywords: the Yangbi Earthquake; the structural seismic response array; response spectrum; earthquake damage