

文章编号: 1000-5013(2009)05-0568-04

# 闽南地区农村石结构房屋的爆破振动损伤特点

魏荣丰, 郭子雄, 黄群贤

( 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021 )

**摘要:** 在对台地平整爆破作业造成周边村落民房损伤的实地踏勘基础上, 对闽南农村石结构房屋在爆破地震影响下的损伤特征进行描述, 并对损伤程度进行分级. 基于爆破地震效应和当地石结构的砌筑特点, 分析造成震害的主要原因. 损伤等级分布统计分析表明, 闽南地区石结构房屋抗震能力差是造成爆破震害的主要因素. 最后, 提出减轻爆破地震对闽南石结构房屋影响, 以及增强闽南农村房屋防灾能力的建议.

**关键词:** 农村住宅; 爆破振动; 石结构; 损伤特征; 闽南地区

**中图分类号:** TU 746.5; TU 363(257); TU 312+.3

**文献标识码:** A

爆破振动是岩土爆破工程和城市拆除爆破中无法避免的公害. 爆破工程中, 因爆破地震造成建筑结构失稳、开裂和变形等工程危害时有发生<sup>[1]</sup>. 然而, 在针对城市建筑开展大量相关研究的同时, 农村房屋在爆破振动中可能受到的损伤却始终处于被忽视的地位. 福建省为多山丘陵地貌, 城郊大规模的开发和基础设施建设中的台地平整和管道挖掘常常采用爆破手段. 在农村地区进行爆破之前, 需要对爆破点邻近村落受到影响的程度进行初步判断. 这就涉及到爆破地震作用下, 农村典型建筑结构安全判据的研究, 以便采取有效的防范措施, 包括爆炸地点振动参数测试和爆破方案的优化等. 爆破工程完成后, 邻近的村落由于距离远近、房屋结构类型差别等因素可能会存在不同程度的损伤, 因此, 尚需要对受到影响的这些农村建筑的损伤程度进行评定. 本文分析了闽南地区农村石结构民宅在爆破振动下的损伤特点和分布特征, 并提出相关防灾建议.

## 1 工程背景

以福建泉州出口加工区东南方向的笑口村的 232 栋民房为研究对象, 内台地平整石方爆破时, 紧邻的民房受到不同程度影响. 爆破点与笑口村民房最近的房屋距离约为 100 m, 与中心部分房屋的距离约为 300 m, 与最远房屋的距离约为 500 m.

根据结构特点, 笑口村房屋可分为砖混结构、石砌体结构、石加砖混结构、石砖木结构、钢筋混凝土框架结构和其他类型结构等. 各结构类型房屋分布柱状图, 如图 1 所示.

石砌体房屋主要建造于 20 世纪的 60 年代至 90 年代, 房屋的全部或大部分构件, 包括基础、墙体、梁、柱、楼板及楼梯等均为石材. 该类结构房屋总数为 50 栋, 占总数的 21.55%. 石加砖混结构房屋大多建于 2000 年以后, 房屋底层为纯石结构, 上部加建砖混结构. 该类结构房屋总数为 49 栋, 占总数的 21.12%. 此种结构本身存在材料、结构体系和传力路径不合理等问题. 石砖木结构房屋是指屋盖为木结构而墙体由石材、

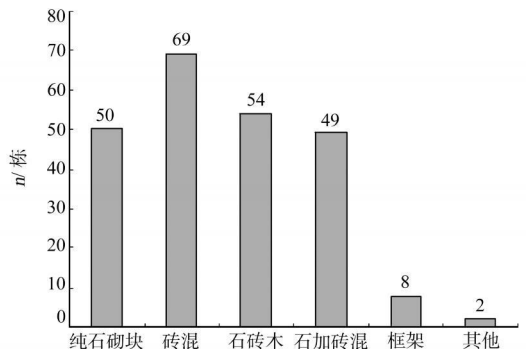


图 1 房屋类型分布柱状图

Fig. 1 Histogram of different structural types

收稿日期: 2008-12-17

通信作者: 郭子雄 (1967-), 男, 教授, 主要从事工程结构抗震防灾的研究. E-mail: guozxey@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (E0810021); 国务院侨办科研基金资助项目 (06QZR04)

粘土砖或砖石混合砌筑而成的房屋。此类房屋是闽南地区古老传统的房屋类型, 早期遍布福建全省, 其中包括保存最完整的, 具有非常浓郁的文化特色的闽南著名的红砖大厝建筑。笑口村石砖木结构房屋总数为 54 栋, 占总数的 23.28%。此外, 砖混结构房屋总数为 69 栋, 占笑口村房屋总数的 29.74%。其他结构类型包括简易搭建的临时房屋和少数轻钢屋盖厂房等。

## 2 房屋损伤特征及原因分析

笑口村石结构和石加砖混结构所占的比例之和约为 43% (不含石木结构), 可见, 石结构是闽南地区农村的最主要结构形式。石结构对地基沉降和振动特别敏感, 且农村住宅大部分未经专门设计, 存在许多结构性缺陷<sup>[2]</sup>, 因而, 在爆破前就普遍存在墙体裂缝和渗落等破损现象。由于爆破前房屋的损伤情况无任何调查记录, 且在爆破过程中没有检测爆破振动及其衰减规律, 造成对爆破损伤判断上的困难。在评判房屋损伤程度时, 以典型振动破坏特征为主, 对于爆破前已经存在, 爆破作业可能加重的房屋损伤, 则作为评定损伤程度的参考依据。

### 2.1 爆破振动后房屋的损伤特征

由于石砖木结构大部分年代久远, 且爆破前已存在不同程度的损坏, 虽然爆破振动有加重损伤的现象, 但爆破损伤特征不明显, 主要有瓦片脱落和墙体裂缝加宽等现象。砖混结构遭受结构性的损伤较轻, 主要振损现象为较窄窗间墙出现水平裂缝, 为灰缝滑移破坏所致。

爆破振动对石砌体结构的影响最明显, 造成的损伤也较严重。典型损伤特征包括以下 5 种情况。(1) 墙体砌筑薄弱部位或角部出现阶梯形裂缝, 主要出现在门窗洞角和砌筑时条石相互咬槎较短的部位, 如图 2(a) 所示。(2) 石梁、门斗支座、柱帽和柱础局部受压开裂或崩角, 如图 2(b) 所示。(3) 石梁端部在柱支撑处滑移错动。(3) 石梁或梁下斗拱开裂, 如图 2(c), (d) 所示。(5) 较窄窗间墙、门窗间墙处出现水平裂缝。



(a) 石墙阶梯型裂缝



(b) 柱帽局部受压崩裂



(c) 梁下斗拱开裂



(d) 石梁断裂

图 2 石结构的典型损伤特征

Fig. 2 Typical damage characteristics of stone structures

### 2.2 各种结构类型房屋损伤程度及分布

根据损伤构件或部位的重要性、损伤程度和损伤点数量, 综合评定房屋损伤等级。损伤部位的重要性考虑损伤为结构性损伤或构造性损伤, 该损伤是否会危及房屋安全, 可能造成房屋局部或整体倒塌等因素。损伤等级分为 A (未损伤)、B (可能损伤)、C (轻微损伤)、D (损伤) 和 E (严重损伤) 5 个等级。根据

现场踏勘结果的分析和统计结果, 可得各种结构类型各损伤等级所占比例, 如表 1 所示.

由表 1 的结果可得, 大多数新建的砖混结构表现出较好的抵抗爆破振动影响的能力, 明显遭受爆破影响的比例为 15.9% (D 级和 E 级损伤的和), 且多数为构造性损伤. 虽然老旧的石砖木民宅遭受较为普遍的影响 (D 级和 E 级损伤之和约 76%), 但从踏勘结果看, 多数为既有损伤的扩展. 纯石结构对爆破振动较为敏感, 遭受爆破振动损伤最为严重, 且多数为结构性损伤. 石加砖混结构的下部楼层损伤比纯石结构更为明显, 其 D 级和 E 级损伤之和约占 61.2%.

2.3 损伤原因分析

笑口村房屋损伤的原因有外因和内因两方面. 外因是平整台地爆破施工的影响. 施工单位爆破方案中的最大单孔药量和孔深不合理, 使得这种外因的作用更加明显. 内因是笑口村大量石结构房屋存在结构体系、材料和施工缺陷, 使得该村房屋在爆破影响下的损伤程度显著增加.

2.3.1 爆破地震效应的影响 一般爆破地震效应强度, 可以通过测量介质质点速度加以评定. 在制订爆破方案时, 可参考现行国家标准 GB 6722- 2003《爆破安全规程》(以下简称《规程》)<sup>[3]</sup> 建议的爆破振动速度估计公式, 并根据爆破场地的地质条件、村庄中部至爆源中心距离等参数, 优化爆破间距、排距、炮孔深度、单孔药量, 对爆破造成质点振动速度幅值进行计算.

由于施工前未在爆破现场测定反映场地工程条件的介质系数和衰减系数等参数, 爆破过程中也未测量场地振动参数及衰减规律, 仅利用经验值计算得到的振动速度未能及时得到修正. 同时, 由于工程进度较紧, 爆破施工并未严格按照爆破方案执行. 另外, 由于闽南地区石结构固有结构和施工特点, 《规程》规定的安全振速并不适用于闽南地区石砌体结构房屋, 仍有待研究和完善.

被保护的结构物的破坏程度, 是爆破地震引起的质点振动速度、加速度、位移, 以及地震波的频率和持续时间等多种因素综合作用的结果. 因此, 只用振动速度峰值的单一参数法, 没有考虑到建筑物结构的动力特性和材料性能, 所给出的指标往往具有较大局限性<sup>[1]</sup>.

对于场地平整、路堑开挖等作业, 常采用的深孔大区微差爆破, 所产生的爆破地震强度大、传播范围大, 主振频率一般为 10~ 40 Hz, 持续时间接近数秒, 一般引起建筑物动力反应较大, 在距爆心数百米到 1 km 范围内的建筑物都可能遭到破坏<sup>[4]</sup>. 笑口村房屋多为石砌体结构, 主频为 10~ 20 Hz, 此频率段位于深孔大区微差爆破的主频率当中, 从而增加石结构房屋的振动放大效应, 加剧房屋的损伤. 另外, 由于笑口村房屋多建造在与爆破区域同一山脉的基岩上, 使得爆破地震的能量衰减缓慢, 该因素在现有的爆破质点振动速度的理论计算公式中尚未能够给予充分考虑.

2.3.2 闽南农村石结构的抗震缺陷 根据现场踏勘结果, 严重的房屋损伤主要集中在石结构房屋. 这些损伤除了与石结构的振动特性有关, 还与石结构民宅的结构布置、施工质量、房屋层数和爆破前的完好程度等密切相关. 如(1) 石结构房屋自重大、刚度大, 爆破地震较大; (2) 该地区石结构墙体多数采用有垫片干砌的施工方法, 墙体的抗震抗剪能力极差<sup>[4]</sup>; (3) 存在明显的门窗洞口削弱环节, 窗间墙过小, 削弱部位未有效拉结或咬槎; (4) 由于石材抗拉能力相对较差, 且存在天然裂隙或节理, 使得石材受弯构件的抗弯能力往往不足, 地震下容易出现断裂; (5) 石柱、柱帽和梁之间未采用任何拉结措施, 属简单的重力式结构, 整体性较差. 上述问题使得石砌体结构对爆破振动非常敏感.

3 减小农村石结构房屋爆破振动损伤的建议

从以上分析可知, 爆破振动对爆破点附近较大范围的农村房屋的安全性存在不利影响, 尤其是对以石砌体结构为主的闽南农村, 影响更加明显. 为减小爆破振动对农村石结构房屋的损伤, 保障爆破点附近的广大农民的生命及财产安全, 建议采取以下 6 点措施<sup>[5]</sup>.

(1) 采用更严格的爆破安全标准. 现行《规程》规定的安全振速, 对闽南地区石砌体结构房屋和局

部特殊地质条件存在一定的局限性。因此,应进一步研究合适的安全振速。如果影响区域范围内的建筑以石结构为主,在没有试验研究结论前,应采用比《规程》规定的安全振速更小的限值。

(2) 爆破前和爆破过程应采取必要防护措施。在目前条件下,爆破前应进行小药量的试爆,以测定反映场地工程条件的介质系数和衰减系数,为制订合适的爆破方案提供基础数据。同时,应在爆破过程中密切跟踪周边村落房屋的损伤情况,存在过大振动效应时,应及时调整爆破方案。对一些明显存在安全隐患的危险民宅,应进行必要的人员转移安置。

(3) 降低爆破振动的强度或截断地震波传播路径。降低爆破强度从而降低地面质点的振动速度,是减轻或避免爆破附近房屋受损的常用方法。主要有如下 3 种降低爆破强度的措施:(a) 微差爆破降低地震效应;(b) 预裂爆破成缝式开挖减震措施;(c) 限制爆破装药量及爆破孔深度。另外,在爆破源与周围村落间采取必要的工程措施(如挖堑沟)来切断地震波的传播路径,也是减小爆破振动的有效方法。

(4) 提高房屋的抗震能力。损伤原因分析可知,闽南地区石结构民宅抗震能力较差是造成严重震害的主要原因。为改善这种状况,应对农村石结构住宅的安全隐患进行排查,对存在薄弱环节的结构采取有效的抗震加固措施,从根本上提高农村石结构房屋的抗震防灾能力。

(5) 重视石结构房屋抗震加固方法研究。石结构房屋是闽南农村量大面广的建筑物形式,但由于对其抗震性能和加固方法缺少研究,目前尚无有效的抗震加固方法。加固内容包括承重石墙、石梁板的承载力和整体性加固。因此,迫切需要开展既有石结构房屋抗震加固方法研究,以推进福建省石结构的抗震加固和改造工作。

(6) 重视对农村民宅建设的引导。从爆破地震对石结构民宅造成的严重损伤可以看出,闽南地区的石结构民宅的抗震性能普遍较差,存在“小震大灾”的危险。这将是今后该地区地震灾害的主体,应引起政府各级部门和地震工程界的高度重视。同时,政府应加强防灾宣传和对民宅建设的引导的力度,以避免随着经济水平提高而出现防灾形势更严峻的状况。

#### 参考文献:

- [1] 刘满堂,陈庆寿. 建筑结构对爆破地震的动力响应特性研究[J]. 爆破, 2005, 22(4): 23-28.
- [2] 刘阳,郭子雄,杨勇,等. 闽南地区农村住宅安全性现状及防灾建议[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2007, 28(1): 63-67.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. GB 6722-2003 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2003.
- [4] 李永梅,孙国富. 砌体房屋的爆破地震破坏机理和模型[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 61-63.
- [5] 姜彦忠. 爆破技术基础[M]. 北京:中国铁道出版社, 1994.

## Damage Characteristics of Rural Houses Due to Blasting Vibration in Southern Fujian

WEI Rong-feng, GUO Zi-xiong, HUANG Qun-xian

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

**Abstract:** The damage characteristics of rural houses, especially stone masonry houses in Southern Fujian under blasting vibration are described in detail based on the field investigation on the damage of the rural houses due to the site blasting operations, and the statistics analysis of the damage degree to different blasting distance and different structural type of rural houses is conducted. It is indicated that the vulnerability of stone masonry house to blasting vibration is the main reason of severe damage. Some recommendations to mitigate the blasting vibration damage and to enhance the disaster prevention ability to rural houses are proposed.

**Keywords:** rural house; blasting vibration; stone masonry structure; damage characteristic; Southern Fujian

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)