

文章编号:1005-1538(2010)01-0037-09

# 汶川地震导致的古建筑震害

周乾<sup>1,2</sup>, 闫维明<sup>1</sup>, 杨小森<sup>1</sup>, 纪金豹<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 故宫博物院, 北京 100009)

**摘要:** 为了解汶川地震造成的古建筑震害及对古建筑的保护,根据古建筑震害资料,通过归纳方法,获得了古建筑不同的震害症状;对木结构而言,主要有地基破坏、柱底侧移、柱身倾斜、节点拔榫、装修开裂、梁架歪闪、瓦件掉落、填充墙破坏等;而砖石及砖木结构由于承重材料的抗拉、压、剪强度相对较差,容易产生倒塌等严重震害。在此基础上,通过勘查分析方法,获得了古建筑产生震害的主要原因:地震力过大、古建筑缺乏及时保养与加固、施工原因及砖石材料本身强度差的原因等。针对不同的震害原因,提出了相应的抗震加固建议。在上述工作基础上,得出如下结论:为提高古建筑的抗震性能,应加强对古建筑的维护与加固,及时清除各种隐患,将地震产生的破坏减小到最轻的程度。

**关键词:** 汶川地震;古建筑;震害分析;抗震加固

**中图分类号:** TU366.2      **文献标识码:** A

## 0 引言

2008年5月12日下午2点28分,在我国四川省汶川映秀镇发生了里氏8.0级特大地震,震中最大烈度达11度,影响了包括震中50km范围内的县城和200km范围内的大中城市,造成了大量的人员及财产损失,是新中国成立以来在我国大陆发生的破坏性最为严重的地震。汶川地震烈度分布见图1所示<sup>[1]</sup>。

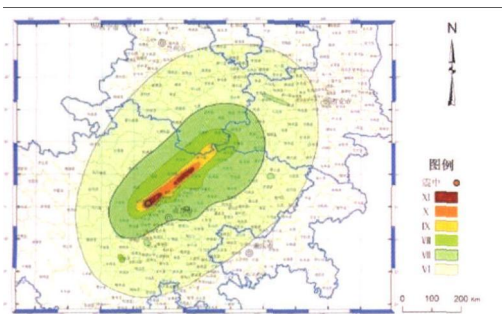


图1 汶川地震烈度分布

Fig. 1 Intensity distribution of Wenchuan earthquake

我国的古建筑以木结构为主,其它还有砖石及砖木结构等结构形式。此次汶川地震对我国的古建筑也造成了巨大的破坏。据初步统计,仅四川省就有83处全国重点文物保护单位和174

处省级文物保护单位遭受不同程度损失。其中,全国重点文物保护单位彭州报修院垮塌;二王庙片区山体滑坡,秦堰楼下沉,戏楼、厢房、52级梯步、照壁、三官殿、观澜亭、疏江亭、前山门等建筑和围墙全部垮塌;伏龙观所有古建筑屋脊、屋瓦全部损坏,木结构断裂,建筑严重倾斜,地面开裂下沉。其它省市如山西、甘肃、陕西、云南、湖北、重庆等地的古建筑也都遭受了一定程度的破坏。汶川地震造成我国古建筑损坏具体损失见表1所示<sup>[2]</sup>,部分国家级文保单位震害状况见表2所示。

表1 汶川地震各地古建筑受损情况分布  
Table 1 Damage distribution of ancient buildings  
(截至日期:2008年6月5日)

| 省份 | 国家级文保单位 | 省级文保单位 | 市、县级文保单位 |
|----|---------|--------|----------|
| 四川 | 83处     | 174处   | 803处     |
| 甘肃 | 20处     | 17处    | 16处      |
| 陕西 | 29处     | 17处    | 10处      |
| 重庆 | 13处     |        | 60处      |
| 云南 | 2处      | 4处     | 37处      |
| 山西 | 1处      | 1处     |          |
| 湖北 | 21处     | 18处    |          |

收稿日期:2008-12-01;修回日期:2009-03-09  
基金项目:故宫博物院科研基金资助(KT2007-4)  
作者简介:周乾(1975—),男,博士生,高级工程师,E-mail:zy\_7225@yahoo.com.cn

表 2 部分国家级文保单位震害状况

Table 2 Damage status of some National Cultural Heritage Conservation Units

| 单位名称   | 所属市(县)  | 结构类型 | 初建年代    | 震害烈度   | 主要损坏状况       |
|--------|---------|------|---------|--------|--------------|
| 二王庙    | 都江堰市    | 木结构  | 南北朝     | 11     | 倒塌           |
| 领报修院   | 彭州市     | 砖木结构 | 1908    | 8      | 倒塌           |
| 平武报恩寺  | 绵阳市     | 木结构  | 1440    | 7      | 墙体破坏         |
| 云岩寺    | 江油市     | 木结构  | 唐代      | 8      | 倒塌           |
| 姜维城遗址  | 汶川县     | 砖土结构 | 247     | 9      | 城墙倒塌         |
| 庞统祠    | 德阳      | 木结构  | 214     | 7      | 屋顶破坏、墙体开裂    |
| 瘟祖殿    | 绵阳      | 木结构  | 明代初期    | 7      | 整体倾斜         |
| 平阳府君阙  | 绵阳      | 砖石结构 | 2 世纪后期  | 7      | 变形           |
| 丹巴古碉群  | 甘孜藏族自治州 | 砖石结构 | 汉代      | 7      | 碉身开裂         |
| 文庙     | 德阳市     | 木结构  | 1206    | 7      | 屋顶破坏、墙体开裂    |
| 武侯祠    | 成都市     | 木结构  | 223     | 7      | 屋顶及墙体破坏、节点拔榫 |
| 杜甫草堂   | 成都市     | 砖木结构 | 759     | 7      | 屋顶破坏、墙体开裂、倒塌 |
| 石塔寺    | 邛崃市     | 砖石结构 | 1169    | 7      | 开裂           |
| 西秦会馆   | 自贡市     | 木结构  | 1736    | 6      | 屋顶垮塌、梁架开裂    |
| 三苏祠    | 眉山市     | 木结构  | 1316    | 6      | 屋顶破坏、墙体开裂    |
| 鹫峰寺塔   | 遂宁市     | 砖石结构 | 1204    | 6      | 塔身倾斜、开裂      |
| 荣县大佛   | 自贡市     | 砖石结构 | 1085    | 6      | 屋顶破坏、墙体开裂    |
| 富顺文庙   | 自贡市     | 木结构  | 567     | 6      | 屋脊倾斜、墙体开裂    |
| 陈毅故居   | 资阳市     | 木结构  | 乾隆初年    | 6      | 屋顶破坏、墙体开裂    |
| 圣德寺塔   | 资阳市     | 砖石结构 | 1197    | 6      | 塔顶脱落、塔身震烈    |
| 朱德故居   | 南充市     | 砖木结构 | 1820    | 6      | 墙体开裂、瓦面脱落    |
| 郭沫若故居  | 乐山市     | 木结构  | 嘉庆年间    | 6      | 屋面变形、瓦件掉落    |
| 犍为文庙   | 乐山市     | 木结构  | 北宋      | 6      | 柱子错位、墙体开裂    |
| 大庙飞来殿  | 乐山市     | 木结构  | 宋代      | 6      | 屋顶破坏、墙体开裂    |
| 张桓侯祠   | 南充市     | 木结构  | 约 307 年 | 6      | 整体倾斜、墙体开裂    |
| 五龙庙文昌阁 | 南充市     | 木结构  | 唐代      | 6      | 墙体开裂         |
| 皇泽寺    | 广元市     | 木结构  | 北魏      | 7      | 墙体开裂、瓦件掉落    |
| 平襄楼    | 雅安市     | 木结构  | 北宋      | 7      | 墙体开裂         |
| 陈子昂读书台 | 遂宁市     | 木结构  | 502     | 6      | 柱子错位、墙体开裂    |
| 宝梵寺    | 遂宁市     | 木结构  | 1064    | 6      | 墙体开裂、瓦面掉落    |
| 广德寺    | 遂宁市     | 木结构  | 618     | 6      | 墙体开裂、瓦面掉落    |
| 觉苑寺    | 广元市     | 木结构  | 806     | 7      | 整体倾斜、节点拔榫    |
| 宝光寺    | 成都市     | 木结构  | 不详      | 7      | 墙体开裂、塔身开裂    |
| 瑞光塔    | 成都市     | 砖石结构 | 1148    | 7      | 塔身开裂、塔体倾斜    |
| 资中文武庙  | 内江市     | 木结构  | 1829    | 6      | 建筑倾斜、墙体开裂    |
| 直波碉楼   | 阿坝藏族自治州 | 砖石结构 | 清代中叶    | 6      | 顶部坍塌         |
| 真武山古建筑 | 宜宾市     | 木结构  | 1574    | 低于 6 度 | 墙体开裂         |
| 石笋寺    | 邛崃市     | 木结构  | 唐代      | 7      | 瓦件掉落         |
| 玉台山石塔  | 南充市     | 砖石结构 | 唐初      | 6      | 塔刹震落         |
| 青龙寺大殿  | 雅安市     | 木结构  | 元代      | 7      | 瓦件掉落、墙体开裂    |
| 开善寺    | 雅安市     | 木结构  | 1481    | 7      | 瓦件掉落、梁架松动    |
| 新津观音寺  | 成都市     | 木结构  | 1181    | 7      | 屋顶破坏         |
| 醴峰观    | 南充市     | 木结构  | 1307    | 6      | 城墙开裂         |

为保护古建筑,本工作将对汶川地震造成的古建筑损坏状况进行了统计分析,研究以木结构为主的不同类型的古建筑的典型震害症状,分析震害原因,提出抗震加固建议,结果将为我国古建筑的保

护、修缮及加固提供有效思路。

1 典型震害

1.1 震害分类

古建筑根据破坏的程度,可分为如下四种震害状况<sup>[5-6]</sup>:(1)扰动:受震时,古建筑柱脚侧移小,墙壁出现细小裂缝或小块剥落,梁柱节点仅个别松动或拔榫,梁架完好,瓦面基本没有掉落现象,结构不需修复或仅需稍作修复即可正常使用,如图2(a)所示。(2)损坏:地震作用下,古建筑的薄弱部分有损坏,柱脚产生侧移,墙体出现明显裂缝,个别砌体局部崩塌,部分梁柱节点产生拔榫、断榫,梁架出现轻微歪闪,屋面瓦面、脊件有明显

掉落现象,需要进行局部修复,但主体结构的性能仍能满足正常使用要求,如图2(b)所示。(3)破坏:地震作用下,古建筑柱脚移动,墙体有明显开裂或倒塌现象,梁柱节点拔榫、断榫现象严重,部分梁架产生歪闪,瓦面大部分掉落,主体结构力学性能受到严重影响,需要进行落架大修,如图2(c)所示。(4)倒塌:这种情况下,古建筑出现墙体大部分倒塌,梁架显著倾斜或倒塌,瓦面基本掉落,主体结构完全不能满足正常使用要求且无法修复,需要复建,如图2(d)所示。

对不同类型古建筑进行震害评估时,可参考《古建筑木结构维护与加固技术规范》及《建筑抗震设计规范》等相关规定进行<sup>[7-8]</sup>。

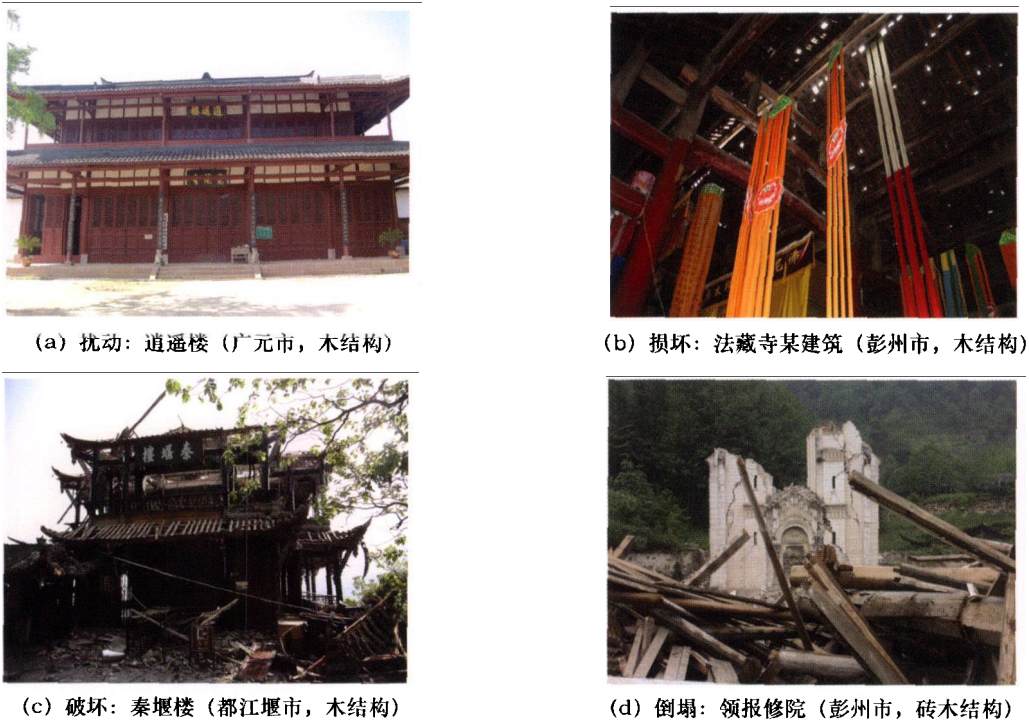


图2 古建筑震害分类  
Fig.2 Damage classification of ancient buildings

1.2 典型震害症状

1.2.1 木结构 木结构古建筑具有良好的抗震性能,在中、低烈度的地震作用下具有易损坏性,大多表现为屋面系统构件或围护墙、山墙的破坏,震害相对较轻,而在9度及以上的强震作用下,其主体构架大多也能保持不致倒塌。汶川地震对木结构古建筑造成的典型震害有:地基破坏、柱底侧移、柱身倾斜、节点拔榫、装修开裂、梁架歪闪、瓦件掉落、填充墙破坏等症状。

1) 地基破坏。当古建筑选址在河道、粉砂土层或潜在滑坡地带,施工时却又未做好基底处理时,

在地震作用下,很有可能因山体滑坡或地基不均匀沉降而导致地基破坏。图3(a)为都江堰市二王庙某古建筑因山体滑坡而产生的地基破坏照片;图3(b)为彭州市法藏寺某古建筑因地基未作加固处理而产生的局部倒塌照片。地基破坏是导致古建筑破坏的一个重要因素。

2) 柱底侧移。古建筑木柱柱底一般浮搁于柱顶石上,可产生滑移减震的效果。但是在地震作用下,柱底剪力小于水平地震力时,柱底往往会产生侧移现象。尺寸过大的侧移使柱顶石偏心受压,使柱顶石处于不利的受力状态,同时对结构整

体稳定性也有不利影响。图 4(a)为广元市觉苑寺西厢房某柱底侧移照片,地震作用下,该柱底侧移尺寸已达 13cm,需要进行加固。图 4(b)为彭州市

法藏寺某古建筑柱底侧移照片,水平地震力将部分柱子推离柱顶石,使建筑物的整体稳定性受到了不利的影响。



图 3 地基破坏  
Fig.3 Basement damage

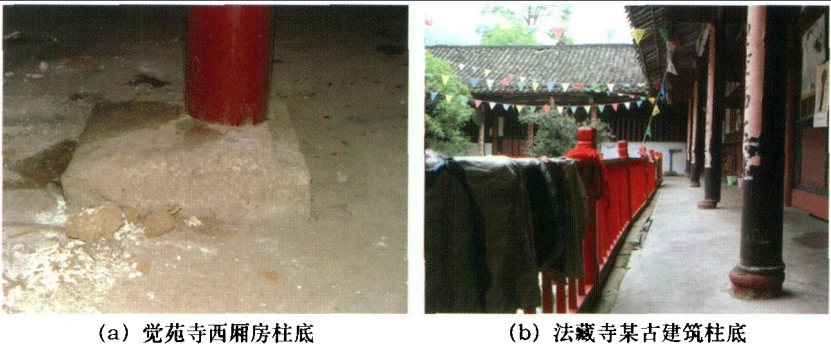


图 4 柱底侧移  
Fig.4 Displacement of column roots

3) 柱身倾斜。柱身倾斜也是木结构古建筑的主要震害之一。地震作用下,当柱底产生侧移或梁柱节点松动时,柱身会产生侧移。图 5(a)为广元市觉苑寺观音殿某柱身倾斜照片,地震作用下该柱头

向东产生倾斜 18cm;图 5(b)为广元市觉苑寺大雄宝殿某柱身倾斜照片,地震作用下该柱头向南倾斜 22cm,向东倾斜 8cm。柱身倾斜尺寸过大将导致屋顶倾覆,因此需要进行加固。



图 5 柱身倾斜  
Fig.5 Column incline

4) 节点拔榫。古建筑木结构梁柱大都以榫卯形式连接。榫卯连接的优点在于:在地震荷载作用下,榫和卯通过摩擦滑移与挤压变形进行耗

能,减小结构的地震响应;然而榫卯节点的拔拉造成节点自身刚度退化,使梁柱节点形式由刚接向铰接过渡,在这种情况下,拔榫很可能造成结构

局部失稳,影响构架的整体稳定性。图 6(a)为广元市觉苑寺观音殿某穿插枋拔榫照片,地震作用下,该节点拔榫尺寸达 8cm;图 6(b)为都江堰

市青城山黄帝殿某穿插枋节点脱榫照片,脱榫使得檐柱与金柱的联系中断,对结构抗震产生不利影响。

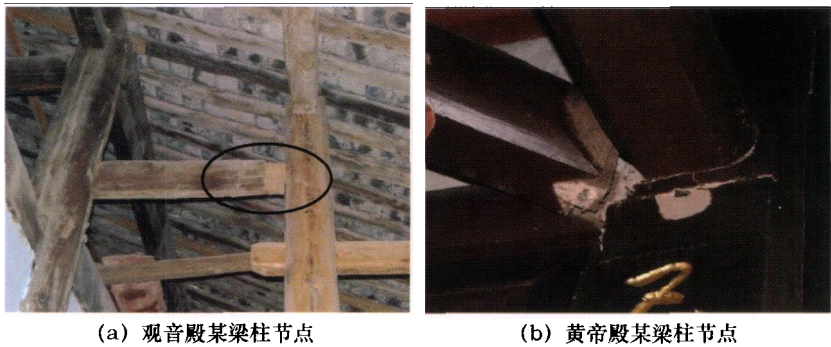


图 6 节点拔榫  
Fig. 6 Tenon pulled out from mortise

5) 装修破坏。古建筑的装修构件主要指门、窗、隔板等部位的非承重构件。由于这些构件尺寸相对较薄,地震作用下容易产生脱离主体结构而破坏。图 7(a)为广元市觉苑寺逍遥楼二层某窗台震

害照片,该场地的震害烈度为 6 度,由图可知窗台板及门板仅产生轻微开裂;图 7(b)为彭州法藏寺某古建筑隔板破坏情况,该场地的震害烈度约为 8 度,地震作用下部分隔板已产生破坏。

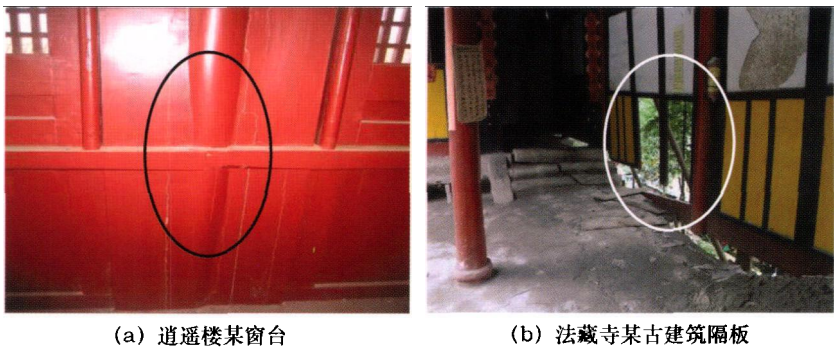


图 7 装修破坏  
Fig. 7 Damage of decoration members

6) 梁架歪闪。木结构古建筑梁架搁置在柱顶或斗拱顶上,地震作用下,梁架随着柱身侧移容易产生歪闪现象。图 8(a)所示为广元市觉苑寺逍遥楼某梁架歪闪局部照片,经勘察,该位置梁架由于童柱

的倾斜而南闪 4cm;图 8(b)为广元市觉苑寺观音殿某梁架震后照片,在地震作用下,该梁架向东歪闪 12cm。梁架歪闪对结构的整体稳定将产生不利影响,需要进行加固。

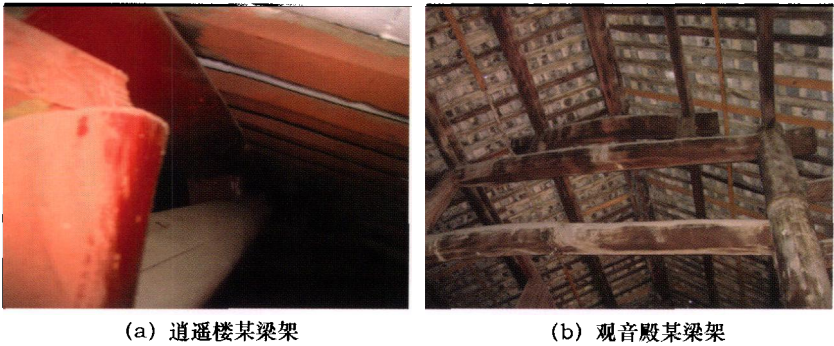


图 8 梁架歪闪  
Fig. 8 Incline of roof system

7) 瓦件脱落。由于地震波在建筑物屋顶具有放大作用,缺乏牢固连接屋面的瓦件、脊饰在地震作用下,很容易产生掉落现象。图 9(a)为甘肃天水市玉泉关某古建筑屋顶震害局部照片,该地区距震中

200 公里,在地震作用下吻兽与垂脊之间已产生裂缝,吻兽出现歪闪。图 9(b)为距震中 20 公里的江堰市都江堰离堆北端的伏龙观,地震作用下,瓦面掉落严重,屋顶震中的脊饰构件已被震落。

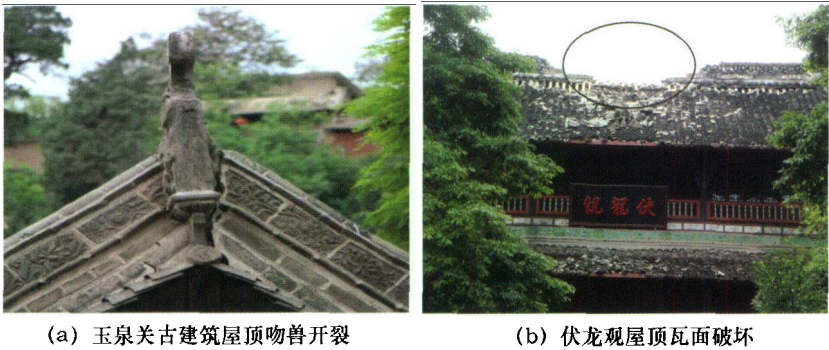


图 9 瓦件掉落  
Fig. 9 Tile damage

8) 填充墙破坏。古建筑木结构的维护墙砌筑在木构件之间,属非承重构件。填充墙主要采用砖石、砖土等砌体材料堆砌而成。由于这些建筑材料本身的抗拉、压、剪的强度差,加上墙体本身缺乏与

木构架的拉接,因此在地震作用下很容易产生开裂、倒塌等破坏现象。图 10(a)(b)分别为江油市云岩寺某檐墙及平武报恩寺某山墙破坏照片。由图可知,在地震作用下,砌体填充墙均已产生局部倒塌。

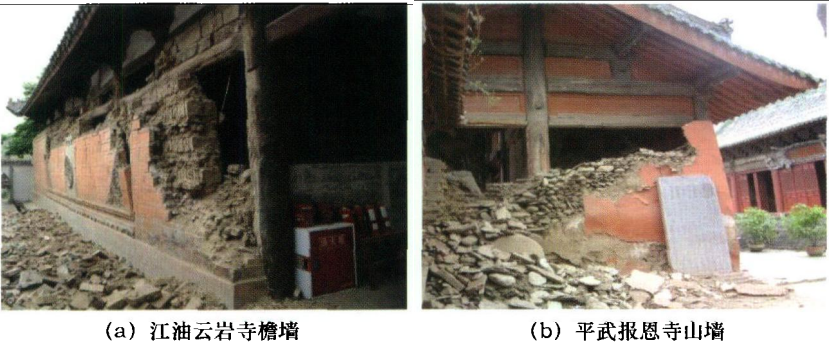


图 10 填充墙破坏  
Fig. 10 Damage of filler walls

1.2.2 其他结构 古建筑除了木结构外,还有砖木、砖石类等结构类型。其中,砖木结构主要以砖土材料作为承重构件,屋顶采用木构架。与木结构相比,砖土承重材料的抗拉、压、剪强度相对较差,在地震中很容易出现倒塌现象。图 2(d)所示的领报修院,位于彭州市白鹿镇以北 2.5 公里回水村,建于 1905 年,属中西结合砖木结构,在汶川地震作用数秒后即产生倒塌。

砖石结构主要以塔类形式表现为主,典型震害特征有<sup>[9]</sup>:(1)塔体倾斜:砖石古塔的自重重大,对地基的变形敏感。当塔的地基薄厚不均时,地基在地震作用下易产生不均匀沉降而导致塔身

倾斜,如图 11(a)所示的广汉市字库。(2)塔身震断:塔高远大于塔身宽度且结构整体性较差的古塔,在水平地震作用下,因水平侧移较大而产生导致塔体局部折断或整体垮塌,如图 11(b)所示的绵阳市盐亭笔塔。(3)塔体震裂:砖石古塔的因砌体抗拉强度低,在地震作用下产生的拉力作用下易产生开裂,如图 11(c)所示的都江堰市奎光塔。

当然,砖石结构也有抗震性能良好的例子。如分布于汶川、茂县、理县等地数座具有千年历史的藏羌碉楼,在汶川地震中仅仅表现为局部受损<sup>[10]</sup>,其抗震机理值得我们学习和研究。

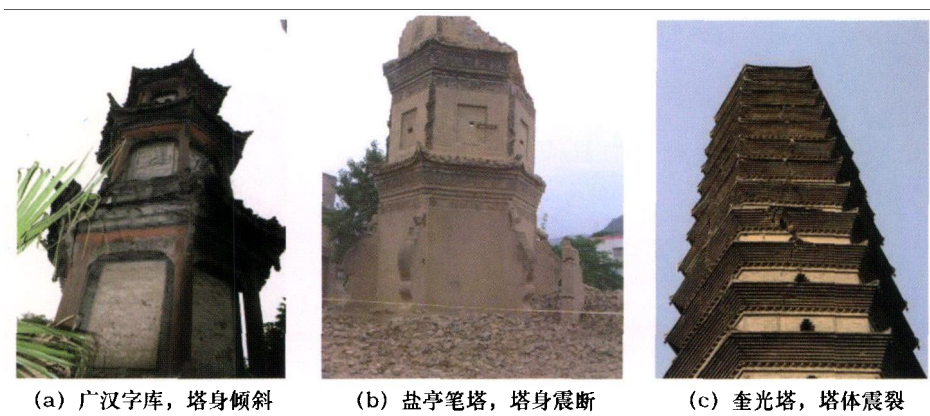


图 11 砖石古塔典型震害  
Fig. 11 Typical damages of masonry ancient towers

2 震害分析

2.1 木结构

经勘查分析,可得古建筑木结构产生震害的主要原因有以下几个方面:

(1) 地震烈度过大。汶川地震的震中烈度达 11 度,具有极强的破坏力。地震时强烈的竖向和水平地震作用是木结构破坏的一个主要原因。由于古建筑承重木料选取时一般未作抗震计算,大部分由工匠凭经验选料,部分木构件截面尺寸过小,导致地震作用下产生折断或过大变形,或榫卯节点的连接无法承受如此大的地震力导致拔榫、断榫,使得古建筑产生破坏。

(2) 木结构缺乏及时的修缮。部分木结构建筑年久失修,曾因糟朽、虫蛀、挠度等原因已经产生了柱底侧移、梁柱节点拔榫、柱身侧移、开裂、梁架歪闪等问题,使得木构架强度及稳定性降低,但是由于缺乏及时的修缮与加固,此次地震导致破坏加剧。

(3) 施工问题。当古建筑选址在不良地基上时,如果未对地基进行加固处理,地震作用下,古建筑将因地基不均匀变形而破坏;立柱放在柱顶石上而缺乏与柱基础的牢固连接时,柱底摩擦力小于水平地震剪力使得柱根错位或滑移脱落柱顶石,导致木柱支撑失效引起主体构架倒塌<sup>[11]</sup>;装修构件及维护墙属非承重构件,在施工时往往在主体构架安装完成后进行,因此缺乏与主体构架的拉接而导致震害;此外,由于墙体与木构架的自振特性不同,在地震中产生的位移也不相同,因此会引起墙体开裂、错位甚至倒塌;当榫卯节点安装不严密时,地震作用下,很容易产生拉榫、折榫现象,导致木构架局部破坏或全部塌落<sup>[12]</sup>。墙体、瓦面与基层粘结不牢时,地震作用下将产生掉落现象。

2.2 其它结构

砖木结构古建筑采用砖砌体承重,而屋顶采用三角形木屋架,檩条上直接干铺小青瓦或大机瓦。由于纵横墙之间没有可靠拉接,屋架直接搁置在纵横墙上,屋架端部支座没有设置支柱或垫梁,也没有设置保证屋架平面外整体稳定的支撑,因此这类结构的整体稳定性与牢固性差<sup>[13-15]</sup>。砖木结构在自重作用下结构不会产生破坏,但是,在水平地震作用下,这类结构易发生承重墙体平面外闪,导致局部倒塌或整体倒塌等严重震害。

砖石古塔建筑缺乏抵抗水平地震作用的拉结构件,耗散变形能量的能力较低,此类古建筑很多采用上砌,外包砖石,结构性差,在地震作用下,外包砖石易开裂、脱落,而内部土体并无抗震能力,导致在低烈度区即产生开裂、酥散以至坍塌的震害。砌筑砖石所采用的砂浆、砌体强度标号低,使结构也易产生受拉、受剪破坏。此外,古塔建造地基选址不当而未作地基加固处理时,也容易产生震害<sup>[9]</sup>。

3 抗震加固建议

研究表明:保养得当的木结构古建筑能抵抗 9 度地震作用<sup>[16]</sup>。因此,对木结构古建筑来说,日常保养和修缮极为重要。对于已经发现的基底变形问题,可采用木桩或换土法进行加固<sup>[17]</sup>;对于柱底侧移问题,可增设与基底连接的铁件进行加固。对于已经糟朽的梁、柱构件,应及时进行更换;对于已松动的榫卯节点可采用铁件加固;已产生变形的梁柱构件,可采用支顶方法进行加固<sup>[18]</sup>;另从施工角度考虑,为减小装修构件的破坏,施工时可采用暗销与承重木构架进行拉接;为减小地震作用下产生的墙体、屋面瓦件的破坏,修缮时可增加泥浆的粘结强度,墙体与木柱间可设置铁件拉接<sup>[19]</sup>,而对于吻兽

等屋顶构件可增设铁链与屋面板固定。

为提高砖木结构古建筑的抗震性能,其墙体不能太高,以减轻墙体的振动幅度,外墙四角及内外墙交接处,宜增设构造柱或圈梁进行加固<sup>[8]</sup>;木屋架与砖墙顶间应设置木梁垫,使墙体受力均匀;木屋架与墙顶间应设置铁件进行拉接以提高砖木结构的整体刚度。

对于砖石古塔类古建筑,在保证修旧如旧的原则下,为提高砖石砌体的延性,可外加钢筋混凝土柱;为提高结构的稳定性和减少不均匀沉降,可在适当部位增设暗圈梁<sup>[18]</sup>;对于受力薄弱部位,应增设水平拉接构件进行局部加固;对于已破坏的砌体部位,可采用锚固、补砌、灌浆等措施进行加固,加固选用高强度砂浆进行补砌,也可设置钢拉杆进行加固<sup>[20]</sup>;古塔顶部为防止鞭梢效应,应与塔体牢固连接<sup>[21]</sup>。

## 4 结 论

本文主要讨论了汶川地震古建筑的典型震害,分析了破坏原因并提出了加固建议,得出如下结论:

1) 汶川地震中木结构古建筑的主要震害表现为地基破坏、柱底侧移、柱身倾斜、节点拔榫、装修开裂、梁架歪闪、瓦件掉落、填充墙破坏等。

2) 与木结构相比,大部分砖木、砖石结构古建筑抗震性能相对较差,在汶川地震中破坏严重。

3) 汶川地震古建筑震害的主要原因除了地震力因素外,古建筑本身缺乏及时有效地抗震加固措施是一个重要原因。

4) 为提高古建筑的抗震性能,应加强对古建筑的维护、监测与保养,及时消除各种隐患,将地震破坏减小到最小程度。

致谢:本文部分图片引用自国家文物局网站,特表示感谢。

## 参考文献:

- [1] [http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/\\_content/08\\_09/01/1220238314350.html](http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/08_09/01/1220238314350.html)
- [2] [http://news.youth.cn/yw/200806/t20080606\\_732754.htm](http://news.youth.cn/yw/200806/t20080606_732754.htm)
- [3] <http://cul.sohu.com/20080604/n257272362.shtml>
- [4] <http://www.cftmedia.com/upload/www/4/2008-10/678.html>
- [5] 杨焕成.地震前后古代建筑的检查方法和加固维修措施[J].中原文物,1985,2:96-98.  
YANG Huan-cheng. Inspecting methods and strengthening measures of ancient buildings before and after earthquake [J]. Cultural Relics of Central China, 1985,2:96-98.
- [6] 李桂荣,郭恩栋,朱敏.中国古建筑抗震性能分析[J].地震工程与工程振动,2004,24(6):68-72.  
LI Gui-rong, GUO En-dong, Zhu Min. Analysis of seismic characteristics of chinese ancient buildings [J]. Earthquake Eng Eng Vibr, 2004,24(6):68-72.
- [7] GB50165-92,古建筑木结构维护与加固技术规范[S].  
GB50165-92, Technical Code for Maintenance and Strengthening of Ancient Timber Buildings [S].
- [8] GB50011-2001,建筑抗震设计规范[S].  
GB50011-2001, Code for Seismic Design of Buildings [S].
- [9] 袁建力.砖石古塔的震害特征与抗震鉴定方法[C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告.北京:中国建筑工业出版社,2008:396-403.  
YAN Jian-li. Seismic damage symptoms as well as appraisal methods of Chinese ancient masonry pagodas [C]// Reports on damage inspection as well as rebuilding analysis after Wenchuan earthquake for buildings. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:396-403.
- [10] 唐飞.羌族碉楼与震后调查[J].中国文化遗产,2008,04:36-39.  
TANG Fei. Suvey on Qiang-minority after Wenchuan earthquake [J]. China Cult Herit, 2008,04:36-39.
- [11] 薛建阳,张鹏程,赵鸿铁.古建筑木结构抗震机理的探讨[J].西安建筑科技大学学报,2000,32(1):8-11.  
XUE Jian-yang, ZHANG Peng-cheng, ZHAO Hong-tie. Study on the aseismic mechanism of historic timber structural building [J]. J Xi'an Univ Archit Technol, 2000,32(1):8-11.
- [12] 何玲,潘文,杨正海.村镇木结构房屋震害及抗震技术措施[J].工程抗震与加固改造,2006,28(6):94-101.  
HE Ling, PAN Wen, YANG Zheng-hai. Seismic damage of rural wooden constitutions and their aseismic methods [J]. Earthquake Resist Eng Retrofit. 2006,28(6):94-101.
- [13] 赵作周,钱稼茹,方东平.汶川地震村镇住宅的震害分析与重建建议[C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告.北京:中国建筑工业出版社:142-150.  
ZHAO ZUO-zhou, QIAN Jia-ru, FANG Dong-ping. Damage analysis and rebuilding suggestion on rural houses destroyed by Wenchuan earthquake [C]// Reports on damage inspection as well as rebuilding analysis after Wenchuan earthquake for buildings. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:142-150.
- [14] 宋波,钟珉,于咏妍.汶川地震中甘肃陇南市村镇房屋考察与震害分析[C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告.北京:中国建筑工业出版社:156-163.  
SONG Bo, ZHONG Min, YU Yong-yan. Damage inspection and analysis of rural buildings in Longnan district, Gansu province caused by Wenchuan earthquake [C]// Reports on damage inspection as well as rebuilding analysis after Wenchuan earthquake for buildings. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008:156-163.
- [15] 周绪红,王瑞成,李颖.宝鸡地区村镇建筑震害分析[C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告.北京:中国建筑工业出版社:176-181.  
ZHOU Xu-hong, WANG Rui-cheng, LI Yin. Damage analysis of rural buildings in Baoji district caused by Wenchuan earthquake [C]// Reports on damage inspection as well as rebuilding analysis after Wenchuan earthquake for buildings. Beijing: China Architec-

- ture & Building Press, 2008:176-181.
- [16] 李小伟. 清代大式殿堂体系弹塑性分析及基于性能的抗震性能评估[D]. 西安:长安大学,2006:31-49.
- LI Xiao-wei. Elastic-plastic analysis and aseismatic behaviors evaluation based on performance for wooden frame palace with dougong in Qing Dynasty [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006: 31-49.
- [17] 白丽娟. 浅谈故宫的基础[J]. 故宫博物院院刊, 1993, 3: 26-33.
- BAI Li-juan. Discussion on basement of the Forbidden City[J]. J Palace Mus, 1993, 3: 26-33.
- [18] 柯吉鹏. 古建筑的抗震性能与加固方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2004:66-71.
- KE Ji-peng. Study on the seismic capacity and the reinforced method of ancient buildings [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004:70-71.
- [19] 谷军明, 缪升, 杨海名. 云南地区穿斗木结构抗震研究[J]. 工程抗震与加固改造. 2005, 27(增): 205-210.
- GU Jun-ming, MIAO Sheng, YANG Hai-ming. Study on seismic performance of through type timber frame in Yunnan [J]. Earthquake Resis Eng Retrofit. 2005, 27(S): 205-210.
- [20] 袁建力, 李胜才, 刘大齐. 砖石古塔抗震鉴定方法的研究与应用[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 1999, 2(3): 54-58.
- YUAN Jian-li, LI Sheng-cai, LIU Da-qi. Research and application of seismic appraisal method for ancient masonry pagodas [J]. J Yang Zhou Univ (Nat Sci Ed), 1999, 2(3): 54-58.
- [21] 苏刚, 苏力华, 王赣萍. 砖石古塔的地震修复及动力学特征初探[J]. 山西地震, 2002, 2: 35-38.
- SU Gang, SU Li-hua, WANG Gan-ping. Discussion of the earthquake renovation and the dynamic characteristic of ancient brick and rock pagoda [J]. Earthquake Res Shanxi, 2002, 2: 35-38.

## Damage of ancient Chinese architecture caused by the Wenchuan Earthquake

ZHOU Qian<sup>1,2</sup>, YAN Wei-ming<sup>1</sup>, YANG Xiao-sen<sup>1</sup>, JI Jin-bao<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Imperial Palace Museum, Beijing 100009, China)

**Abstract:** The different types of damage caused to ancient Chinese architecture by the Wenchuan earthquake were summarized as a basis for protecting such ancient structures in the future. For wooden structures, destruction of foundations, shift of column bases, incline of columns, separation of tenons from mortises, cracks in the decoration, incline of the roof system, loss of tiles, collapse of filler walls, etc were found. Masonry and brick-wooden structures, because the materials' anti-dragging, anti-pressure and anti-shearing force strengths are relatively weak, tended to collapse during the earthquake. Conclusion was drawn that the main reasons for damage to ancient structures are the extremely strong seismic force, the lack of timely maintenance and reinforcement of the ancient structures, poor construction, the natural weakness of masonry materials, etc. Possible aseismic reinforcement remedies for each damage type were recommended. Based on the above work, it is concluded that to improve the aseismic capability of ancient Chinese structures and to minimize earthquake damage, more effort should be put into maintenance and reinforcement and timely removal of latent problems.

**Key words:** Wenchuan earthquake; Ancient Chinese architecture; Damage analysis; Aseismic reinforcement

(责任编辑 潘小伦)