

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.025

# 尼泊尔文化遗产建筑震害特征及加固对策

——以尼泊尔 Ms 8.1 级地震中 3 个杜巴广场为例

潘毅<sup>1,2</sup>, 谢丹<sup>1</sup>, 袁双<sup>1</sup>, 王晓玥<sup>1</sup>

(1.西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2.抗震工程技术四川省重点实验室(西南交通大学), 成都 610031)

**摘要:**为研究尼泊尔地区加德满都谷地文化遗产建筑的结构特点和抗震性能,在 Ms8.1 级地震后进行了大量震害调查.砖木结构和砖石结构是谷地内加德满都、帕坦和巴德岗等 3 个杜巴广场文化遗产建筑的主要结构形式,介绍了两种结构的组成和特点,总结了砖墙破坏、木构件破坏、倾斜和倒塌等典型震害特征,并对其震害原因进行了分析,提出了文化遗产建筑震害等级划分标准,根据该标准,对文化遗产建筑的震害进行了分类和统计,得到两种结构震害等级所占的比例.结果表明,在 52 处砖木结构和 16 处砖石结构中,基本完好或轻微破坏的砖木结构比例仅为 28.8%,而砖石结构仅为 18.8%,其余为中等破坏、严重破坏或毁坏,砖木结构的抗震性能比砖石结构稍好.最后,结合文化遗产建筑的震害特征和保护原则,对其加固提出了几点对策.

**关键词:**尼泊尔地震;文化遗产建筑;震害特征;砖木结构;砖石结构;加固

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)12-0172-11

## Seismic damages of Nepalese cultural heritage buildings and strengthening measures: Case studies on three Durbar Squares in Ms 8.1 Gorkha earthquake

PAN Yi<sup>1,2</sup>, XIE Dan<sup>1</sup>, YUAN Shuang<sup>1</sup>, WANG Xiaoyue<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province (Southwest Jiaotong University), Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To study the structural characteristics and seismic performance of cultural heritage buildings in Kathmandu Valley, an extensive investigation was carried out after Ms8.1 Gorkha earthquake. Brick-timber structures and masonry structures are the two major structural types in Kathmandu, Patan and Bhaktapur Durbar Squares. The structural compositions and characteristics of brick-timber structures and masonry structures were described, and analysis was done for the typical seismic damage such as wall destruction, wooden components destruction, tilt and collapse, and reasons were studied. The seismic damage degree of cultural heritage buildings was defined, the classification and statistics of damage to the cultural heritage buildings were carried out, and different proportions of damage levels of the two structure types were obtained. The results show that in the total 52 brick-timber structures and 16 masonry structures, the proportion of basically intact or slightly damaged of brick-timber structures is merely 28.8%, and yet the masonry structure is 18.8%, others belong to partially damaged, heavily damaged and collapse, and the seismic performance of brick-timber structures are better than masonry structures. Based on the results of the seismic damage investigations, and compared with the protective principle of cultural heritage buildings, some recommendations on the reinforcement measures of cultural heritage buildings were put forward.

**Keywords:** Gorkha earthquake; cultural heritage buildings; characteristics of seismic damage; brick-timber structure; masonry structure; strengthening

2015 年 4 月 25 日当地时间 11 点 56 分,加德满都西北方向约 80 km 处郭尔克(Gorkha)发生 Ms 8.1 级地震,随后又发生多次余震.此次地震不仅造成尼泊尔、中国、印度和孟加拉等国家较大的财产损失和

人员伤亡,也是世界文化遗产建筑的一场浩劫,加德满都谷地内的七处世界文化遗产建筑群和遗址均遭到了较大破坏,包括 3 个杜巴广场建筑群(Kathmandu、Patan、Bhaktapur),两个佛教建筑(Swayambunath、Boudha Stupa)和两个印度教建筑(Pashupatinath、Changu Narayan).地震发生后,笔者三度受邀赶赴灾区,与尼泊尔方面的人员一道对灾区内世界文化遗产建筑进了全面调查.其中,重点调查了

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2010-ZD-4)

作者简介: 潘毅(1977—),男,副教授,博士生导师

通信作者: 潘毅,panyi@home.swjtu.edu.cn

世界文化遗产建筑比较集中的 3 个杜巴广场的震害情况.根据美国地质勘探局(United States Geological Survey,简称 USGS)的地震数据<sup>[1]</sup>,加德满都杜巴广

场(Kathmandu Durbar Square)和帕坦杜巴广场(Patan Durbar Square)位于 VIII 度区,巴德岗杜巴广场(Bhaktapur Durbar Square)位于 VII 度区,见图 1.

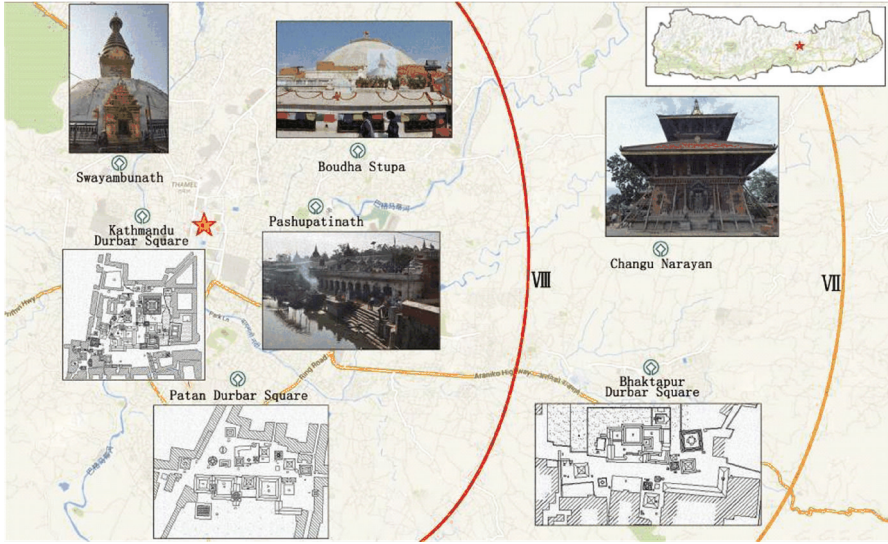


图 1 文化遗产建筑震害调查点及烈度分布

Fig.1 Investigation sites and intensity of cultural heritage buildings

3 个杜巴广场的文化遗产建筑以砖木结构和砖石结构为主.二者都未采取抗震措施,其建造主要依赖当地工匠的个人经验、历史传承及宗教需要.因此,地震造成的损伤和毁坏也主要集中于这两种结构形式.近年来,国内外学者对尼泊尔文化遗产建筑的研究,主要集中在建筑艺术、历史文化等方面<sup>[2-4]</sup>,而对其结构抗震性能和安全的研 究则比较少.文献<sup>[5]</sup>总结了多檐式塔庙抗震性能的影响因素,建立有限元模型进行了线弹性计算,分析了结构构件的破坏或者失效对塔庙整体刚度的影响,并试图确定影响塔庙地震易损性的关键构件.文献<sup>[6]</sup>对尼泊尔 3 座多檐式塔庙做环境动力测试,获得了塔庙的自振频率、振型和阻尼比等动力参数,并建立有限元模型,采用反应谱法对典型的塔庙进行了动力分析.文献<sup>[7]</sup>将 1934 年尼泊尔-比哈尔(Nepal-Bihar)Ms 8.4 级地震中多檐式塔庙的破坏归纳为局部破坏和完全倒塌,总结了地震中塔庙的薄弱部位,并指出了塔庙维修和加固中存在的问题.需要注意的是,上述研究对象主要针对砖木结构的多檐式塔庙,没有涉及砖石结构的建筑,且研究方法基本都是采用有限元建模进行计算,没有对实际震害进行详细调查和统计,也鲜有对震害特征做全面分析.

本文在对 3 个杜巴广场内文化遗产建筑做了详细震害调查的基础上,分析了砖木结构和砖石结构的典型震害特征和破坏机理,定义了这两种结构震害等级的划分标准,并对其震害等级进行了统计,最后对尼泊尔文化遗产建筑提出了加固对策,以期为其抗震防灾的研究与保护提供一些参考.

## 1 砖木结构的震害特征

### 1.1 结构特点

3 个杜巴广场中,乔克(Chowk)宫院和多檐式塔庙为砖木结构,其平面布局大致分为 3 类:封闭宫院式、一般式和内壁外廊柱式.其中,乔克(Chowk)宫院一般为 2 或 3 层,是典型的封闭宫院式结构.多檐式塔庙一般为 2、3、4 或 5 层,其平面布局包括一般式和内壁外廊柱式,一般式又包括单壁单门式、单壁三门式和双壁四门式,见图 2.例如,纳拉杨庙(Narayan Temple)建筑群多为单壁单门式和双壁四门式,迦内莎德嘎庙(Ganesh Dega Temple)建筑群多为单壁三门式,湿婆庙(Shiva Temple)建筑群多为内壁外廊柱式<sup>[8]</sup>.

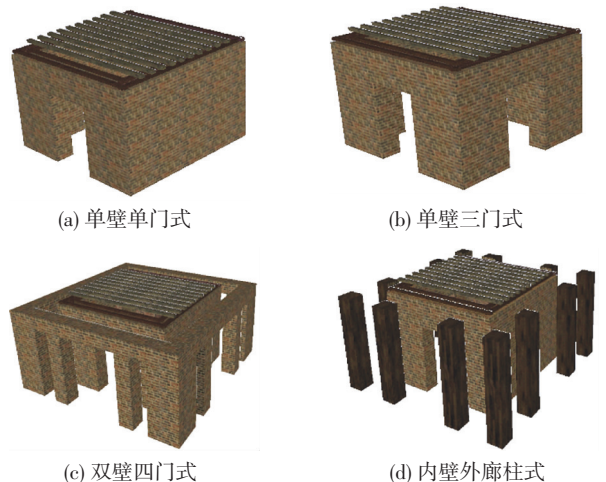


图 2 塔庙底层的墙体结构形式

Fig.2 Wall system in ground floor of temples

砖木结构由砖墙和木构架组成.砖墙是主要的抗侧力和承重构件,但尼泊尔的砖墙有分层现象,即内侧为土坯,外侧为锥形烧砖,中间为碎砖块和泥土<sup>[9]</sup>,三层之间的连接较弱,故砖墙的整体性较差.此外,砖木结构的内部结构形式为套筒式,层间束腰收分,墙体截面由下向上逐渐递减,且顶层墙体一般直接落于下层木楼板上,与下层墙体断开,导致竖向荷载传递路径不连续,下层墙体偏心受压,见图 3.

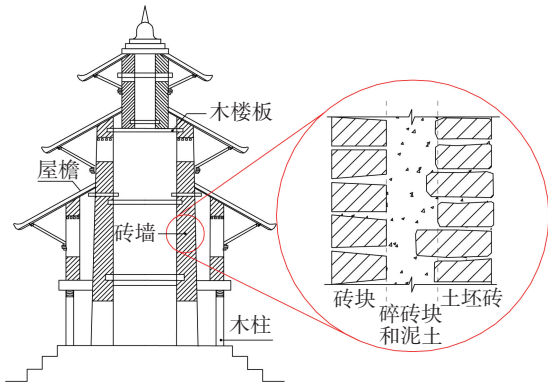


图 3 砖木结构的墙体特点

Fig.3 Characteristic of brick-timber structure wall

木构架中,梁柱节点的连接方式与中国藏式传统建筑中木梁柱节点类似,其上端附有细木销钉直接穿过木支架和木梁,承托上方砖墙重量,柱下端附有细木销钉插入础石中央<sup>[2]</sup>,见图 4.尼泊尔塔庙的一个显著特点就是宽大的屋檐,见图 3.屋檐的重量主要由斜撑承担.斜撑上端卡到檩条下方,下端搁置于檐口上方.平时斜撑仅受静力作用,一旦遭遇强震,斜撑被破坏,屋檐就会发生坠落.

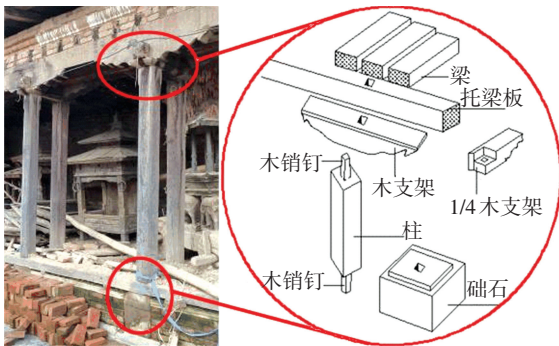


图 4 木柱连接方式

Fig.4 Connection type of timber columns

## 1.2 震害特征

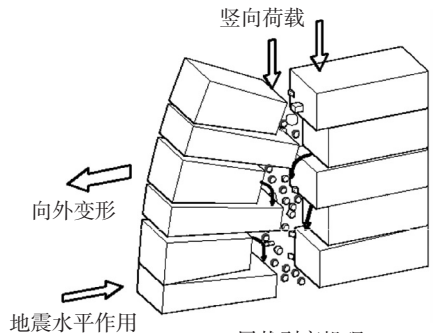
### 1.2.1 砖墙破坏

砖墙的震害特征主要包括层状剥离破坏和剪切破坏.例如,加德满都杜巴广场的莫汉乔克 (Mohan Chowk) 宫院共 3 层,属封闭宫院式结构,其西侧墙体外部发生剥离破坏,见图 5(a).由于受环境湿度变化的影响,外层墙体的锥形砖块易发生膨胀,在无处不在的微小震动下,砖墙中部粘结层土壤颗粒落

入裂缝,阻止外层墙体复位.竖向荷载下,强烈地震动数据的输入加速了砖墙的剥离破坏,其破坏机理见图 5(b).



(a) 莫汉乔克(Mohan Chowk)宫院墙体的层状剥离



(b) 层状剥离机理

图 5 砖墙的层状剥离破坏

Fig.5 Delamination of brick walls

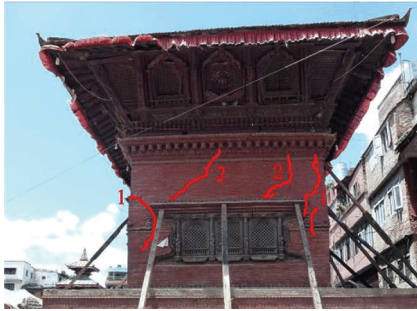
砖墙剪切破坏常见的现象为墙体斜裂缝.例如,加德满都杜巴广场的湿婆帕拉瓦提 (Shiva Parvati) 神庙属一般式结构,其门窗洞口处发生 45°斜裂缝,见图 6(a).由于塔庙门窗的开洞面积一般较大,且洞口角部如同一个楔子,形成一个锐角,导致门窗角部容易形成应力集中,产生剪切斜裂缝,见图 6(a)中的裂缝 1.同时,墙体受自重  $G$  和水平地震作用  $V$ ,加上砖墙的抗拉强度较低,墙体易沿洞口角部形成阶梯型斜裂缝,见图 6(a)中的裂缝 2.剪切破坏的机理见图 6(b).

除了层状剥离破坏和剪切破坏,砖墙还可能由于相互碰撞而产生破坏.例如,加德满都杜巴广场的拿梭乔克 (Nasal Chowk) 宫院共 4 层,属封闭宫院式结构,其西南侧转角处的墙体破坏,见图 7.由于乔克宫院的院落式布局,转角处相邻的两栋建筑之间的间隔较小,两侧墙体在地震时发生相互碰撞,导致墙体破坏.

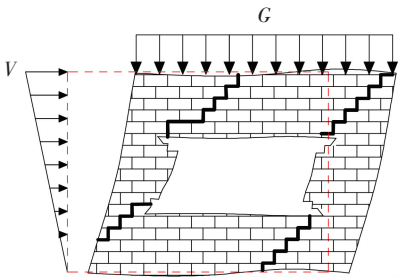
### 1.2.2 木构件破坏

在砖木结构中,细木销钉是木柱与梁及础石之间的连接方式,在强烈地震中可能发生剪切破坏,见图 8.木柱的破坏原因是木柱上下端的细木销钉横截

面积小且应力集中,不能抵抗过大的水平剪力,柱础间的过量滑移和梁柱节点处的相对错动使得木柱歪斜,丧失承担上部荷载的能力.



(a) 窗户四角出现剪切裂缝



(b) 剪切破坏机理

图 6 砖墙剪切破坏

Fig.6 Shear failure of brick walls



图 7 拿梭乔克宫院转角处的墙体碰撞

Fig.7 The corner crack of Nasal Chowk



图 8 木柱破坏

Fig.8 Destruction of timber column

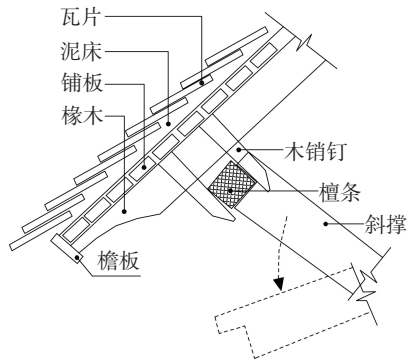
斜撑破坏见图 9(a),斜撑上下端与相邻构件的连接不固结,只约束了竖向位移和扭转位移,未约束水平位移,且整个屋檐连接不牢固,各构件在强烈地震下的位移幅值较大,导致斜撑坠落或橡木滑脱,见图 9(b).

此外,木楼板中的内外托梁板通过销钉固定,木

梁直接插入砖墙中,搁置长度不足,且与楼板周边锚固不够,强烈地震作用下,木梁拔榫.



(a) 柯提普塔(Kirtipur Tower)斜撑坠落



(b) 破坏机理

图 9 斜撑破坏

Fig.9 Destruction of struts

### 1.2.3 倾斜

此次尼泊尔地震后,部分砖木结构出现倾斜现象.其中,砖木结构的乔克宫院多在纵向发生比较明显的整体倾斜,见图 10.由于加德满都谷地的地质由松软的沉积物构成,部分建筑的地基没有经过处理与加固,砖木结构易受基础不均匀沉降的影响,导致在强烈地震作用下结构发生倾斜.



图 10 砖木结构的倾斜

Fig.10 Tilt of brick-timber structures

### 1.2.4 倒塌

帕坦杜巴广场上的查尔纳拉扬神庙(Char Narayan Temple)共 3 层,属一般式结构,在此次地震中完全倒塌,见图 11.由于砖墙的分层,内墙与外墙之间、砖墙与木构架之间、木构架之间的连接较弱,且传统建筑材料性能退化,砖木结构整体稳定性较

差.当结构薄弱截面的抗倾覆力矩小于地震作用产生的倾覆力矩时,结构发生整体或局部倒塌.此外,砖木结构屋檐面积宽大,屋檐上的厚重瓦片和覆土等增加了砖木结构的自重,地震作用也随之增大,进一步加大了文化遗产建筑倒塌的概率.



图 11 查尔纳拉扬神庙的倒塌

Fig.11 Collapse of Char Narayan Temple

## 2 砖石结构的震害特征

### 2.1 结构特点

除了砖木结构,3 个杜巴广场中另外一种重要的结构形式为砖石结构.砖石结构主要是由砖块或石块砌筑成的锥形塔庙,并由周围有几处外观相似,但规模较小的副塔环绕,如巴德岗杜巴广场中砖砌结构的湿婆神庙(Shiva Temple)和石砌结构的瓦特萨拉杜迦神庙(Vatsala Durga Temple),见图 12~13.

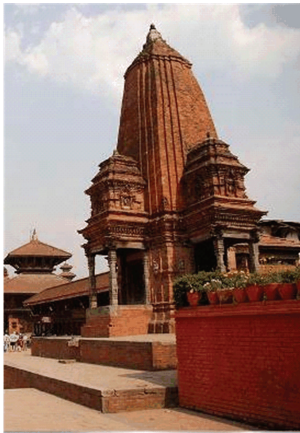


图 12 湿婆神庙

Fig.12 Shiva Temple



图 13 瓦特萨拉杜迦神庙

Fig.13 Vatsala Durga Temple

类似中国的砖石古塔,尼泊尔砖石结构的截面由下到上逐渐减小,在塔刹部分最小.但与中国砖石古塔不同的是,尼泊尔砖石结构的底层一般设有走廊,由砖(石)柱承托上部结构的重量.由于年代久远,砖石材料性能的劣化较严重,且砌块之间粘结较弱,结构的整体性较差.此外,尼泊尔砖石结构经历过多次维修,每次都把散落的材料收集起来,以使用于原位修复,这导致材料强度的离散性较大.

### 2.2 震害特征

#### 2.2.1 墙体开裂

查辛德嘎神庙(Chyasin Dega Temple)属内壁画外廊柱式结构,在地震中发生了墙体开裂,见图 14.由于砖石结构自重和刚度比较大,且砖石砌块之间的粘结材料抗拉强度较低,在强烈地震作用下,外墙易开裂.



图 14 查辛德嘎神庙的墙体开裂

Fig.14 Wall cracking of Chyasin Dega Temple

#### 2.2.2 倾斜

砖石结构多为高耸的塔,其结构的高宽比一般都较大,导致地震作用下的倾覆力矩较大.尼泊尔砖石结构一般没有高台基,部分结构的地基未处理,对基础沉降敏感,加上年代久远,材料的风化腐蚀严重,塔本身就有一定程度的偏心.在地震作用下,塔的偏心作用进一步加大,重力二阶效应明显,导致塔发生倾斜,见图 15.



图 15 砖石结构的倾斜

Fig.15 Tilt of masonry structures

### 2.2.3 倒塌

巴德岗杜巴广场的法希德噶神庙 (Fasidaga temple) 在地震中倒塌,见图 16。砖石结构发生倒塌的原因主要有两个:强烈的地震作用产生较大倾覆力矩;砖石砌块为脆性材料,其延性较差,砌块之间没有有效的约束构件,砖石结构的稳定性和整体性不够好。当结构开裂后,裂缝扩展较快,当发展为通缝时,结构倒塌。



图 16 法希德噶神庙的倒塌

Fig.16 Collapse of Fasidaga Temple

## 3 震害等级划分与震害统计

### 3.1 震害等级划分标准

由于中国和尼泊尔都没有制定针对文化遗产建筑的震害等级划分标准,一定程度上制约了震害调

查的有效进行,影响了对震害统计结果的深入分析。根据各构件对结构整体抗震性能的重要性,并结合 GB/T 24335—2009《建(构)筑物地震破坏等级划分》和现场调查情况,本文提出了尼泊尔砖木结构和砖石结构的震害等级划分标准。

基于笔者的前期研究基础<sup>[10-13]</sup>,在砖木结构中,墙体和木楼板为结构构件,承担主要的竖向荷载和水平荷载;其他木构架(如斜撑、门窗及屋檐等)为非结构构件,其破坏不会导致主体结构的严重破坏或倒塌。因此,在划分砖木结构的震害等级时,以砖墙和木楼板的破坏为主,并适当考虑斜撑等其他木构架的破坏。在砖石结构中,砖石墙体是主要的抗侧力和承重构件,故在划分砖石结构的震害等级时,以砖石墙体和周围副塔的破坏为主,并适当考虑走廊、塔刹等附属构件的破坏。

需要注意的是,由于时代久远,地震前文化遗产建筑本身存在一些裂缝或轻微破坏,故不严格区分基本完好或轻微破坏。因此,本文将文化遗产建筑的震害等级划分为四类:基本完好或轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏,具体划分标准见表 1。

根据上述评定标准,表 2 给出了不同震害等级的砖木结构和砖石结构的实例。

表 1 文化遗产建筑震害等级的划分标准

Tab.1 Classification of earthquake damage degree for cultural heritage buildings

震害等级	砖木结构	砖石结构
基本完好或轻微破坏	承重砖墙完好,墙体表面抹灰出现细小裂缝或小块脱落,木楼板无破损,其他木构架完好或个别斜撑震歪、屋檐溜瓦落瓦等,简单维修即可继续使用。	砖石结构主体完好,墙体表面局部出现细微裂缝,周围副塔完好,饰物完好或出现少量损伤如塔刹震歪,整体结构不影响继续使用。
中等破坏	承重砖墙出现多条裂缝或原有裂缝加宽,木楼板与砖墙连接处出现错动,柱子滑移,斜撑部分震落,屋檐部分破损或震落,地震中所受影响较大,修理后可使用。	砖石结构主体出现明显损伤,如较宽裂缝或者原有裂缝加宽以及整体出现较小的水平位移、倾斜,周围副塔严重裂缝或者局部倾斜,装饰物部分震落,修理后可使用。
严重破坏	承重砖墙层状剥离或局部倒塌,木楼板拔榫或塌陷,柱子闪歪甚至倒塌,斜撑等木构架大部分震落,屋檐震散、严重变形,地震中所受影响非常大,难以修复。	砖石结构主体出现较为严重的损伤,如通缝、塔体严重倾斜及较大的水平位移,周围副塔基本全部倒塌,装饰物基本完全震落,难以修复。
毁坏	仅存无抗侧能力的部分砖墙或承重砖墙全部倒塌,木楼板完全毁坏,其他木构件全部震坏,屋檐系统塌落,只能重建。	砖石结构主体垮塌,或者出现无法修复的整体倒塌,只能重建。

### 3.2 震害统计

3 个杜巴广场共计调查了 68 处文化遗产建筑,其中 52 处砖木结构和 16 处砖石结构。根据表 1,将 3 个杜巴广场的砖木结构和砖石结构的建筑震害进行了分类和统计。限于篇幅,仅以位于地震 VIII 度区的加德满都杜巴广场为例说明。该广场共调查文化遗

产建筑 30 处。其中,砖木结构 27 处,砖石结构 3 处,其震害等级分布见图 17,3 个杜巴广场文化遗产建筑的震害情况,见表 3。

3 个杜巴广场上砖木结构和砖石结构不同震害等级的文化遗产建筑数量和相应的比例,见图 18,可以看出:

1) 3 个杜巴广场的文化遗产建筑以砖木结构为主,因此砖木结构震害的数量也较砖石结构多。

2) 基本完好或轻微破坏的砖木结构比例仅为 28.8%,砖石结构则仅为 18.8%,其余为中等破

坏、严重破坏,甚至毁坏。这说明两种结构的抗震性能都不足,在强烈地震作用下易发生破坏。从震害比例上看,砖木结构的抗震性能比砖石结构稍好。

表 2 砖木结构和砖石结构震害等级分类的典型实例

Tab.2 Examples of brick-timber structures and masonry structures sustaining different seismic damage degrees

震害等级	砖木结构	砖石结构	
基本完好或轻微破坏	 <p data-bbox="172 758 525 835">上图为巴德岗杜巴广场的 55 窗宫殿,共 3 层,属封闭宫院式结构,墙体基本完好。</p>	 <p data-bbox="555 758 908 861">上图为加德满都杜巴广场的 Jagannath 神庙主体结构,共 3 层,属一般式结构,顶层墙体有斜裂缝,木构架基本完好,不影响继续使用。</p>	 <p data-bbox="935 758 1288 861">上图为帕坦杜巴广场的 Narasimha 塔,属内壁外廊柱式结构,主塔塔身完好,塔刹轻微歪斜,周边小塔有细微裂缝。</p>
中等破坏	 <p data-bbox="172 1147 525 1224">上图为加德满都杜巴广场的 Vasantapur 塔,共 6 层,属一般式结构,结构小角度倾斜,底层墙角有细微裂缝。</p>	 <p data-bbox="555 1147 908 1224">上图为巴德岗杜巴广场的 Mul Chowk,共 3 层,属封闭宫院式结构,上下层连接处砖块破坏,窗户周边的砖块损坏。</p>	 <p data-bbox="935 1147 1288 1251">上图为巴德岗杜巴广场的 Siddhi Lakshmi 塔,属内壁外廊柱式结构,结构小角度倾斜,佛龛转角处出现较宽裂缝,塔刹倒塌。</p>
严重破坏	 <p data-bbox="172 1524 525 1601">上图为帕坦杜巴广场的 Vishvanath 神庙,共 3 层,属内壁外廊柱式结构,结构大角度倾斜,底层墙体四角处全部剥离。</p>	 <p data-bbox="555 1524 908 1601">上图为帕坦杜巴广场的 Taleju 神庙,共 5 层,属一般式结构,塔顶震毁,木构架大部分坠落,屋顶溜瓦。</p>	 <p data-bbox="935 1524 1288 1601">上图为巴德岗杜巴广场的 Narayan 神庙,属一般式结构,上部整体倒塌,底层墙体及门前木柱基本完好。</p>
毁坏	 <p data-bbox="172 1893 525 1970">上图为加德满都杜巴广场的 Narayan 神庙,共 4 层,属内壁外廊柱式结构,结构整体倒塌,台基出现破坏。</p>	 <p data-bbox="555 1893 908 1970">上图为加德满都杜巴广场的 Maju 神庙,共 4 层,属内壁外廊柱式,结构整体倒塌。</p>	 <p data-bbox="935 1893 1288 1970">上图为巴德岗杜巴广场的 Vatsaladurga 神庙,属内壁外廊柱式,结构整体倒塌。</p>

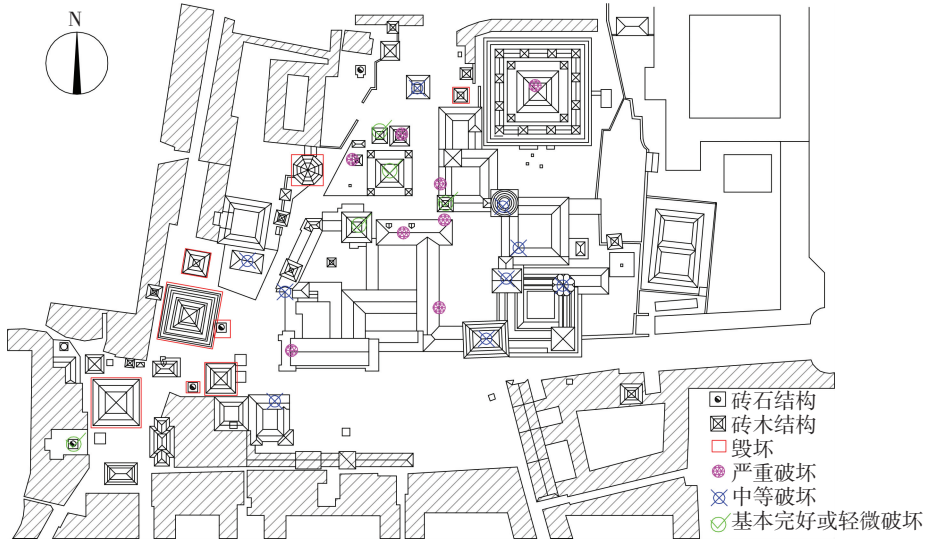


图 17 加德满都杜巴广场震害调查

Fig.17 Seismic damage investigation of Kathmandu Durbar Square

表 3 3 个杜巴广场的震害等级统计

Tab.3 Statistics of seismic damage degrees of three Durbar Squares

调查地点	震害等级	砖木结构			砖石结构		
		总数	数量	比例/%	总数	数量	比例/%
加德满都 杜巴广场	基本完好或轻微破坏	27	4	14.8	3	1	33.3
	中等破坏		9	33.3		0	0
	严重破坏		8	29.6		0	0
	毁坏		6	22.3		2	66.7
巴德岗 杜巴广场	基本完好或轻微破坏	10	6	60.0	8	1	12.5
	中等破坏		3	30.0		1	12.5
	严重破坏		1	10.0		2	25.0
	毁坏		0	0		4	50.0
帕坦 杜巴广场	基本完好或轻微破坏	15	5	33.3	5	1	20.0
	中等破坏		2	13.3		2	40.0
	严重破坏		3	20.0		2	40.0
	毁坏		5	33.3		0	0

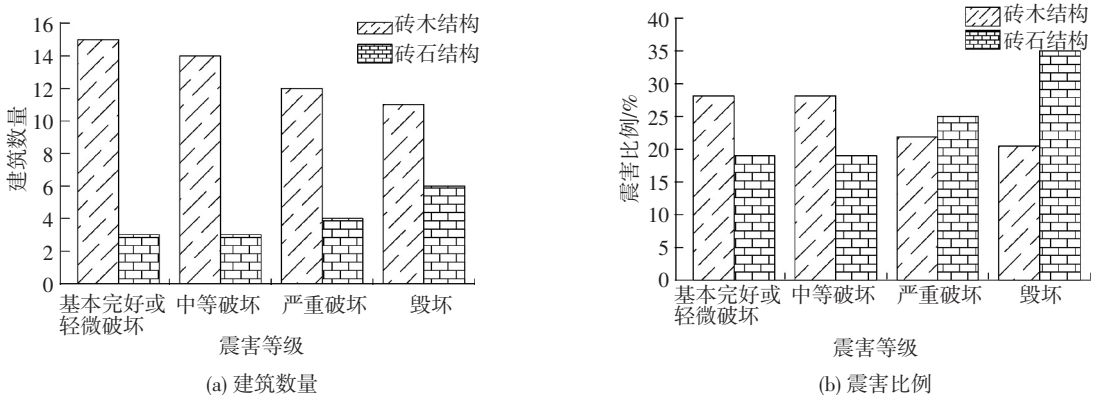


图 18 砖木结构和砖石结构的震害情况

Fig.18 Seismic damage of brick-timber structures and masonry structures

## 4 加固对策

《实施保护世界文化与自然遗产公约的操作指南》中 II.D 条和 II.E 条规定,世界文化遗产须具有原真性和完整性的特征.原真性和完整性包括外形、材料、用途、精神和其他内外因素等.基于上述规定,

并结合当地实际情况,本文对尼泊尔文化遗产建筑的加固提出几点对策.

### 4.1 整体的加固

砖木结构和砖石结构在地震中都存在局部倒塌或整体倒塌,例如,帕坦杜巴广场的孙达里乔克(Sundari Chowk)宫院,转角处缺乏必要的抗震构

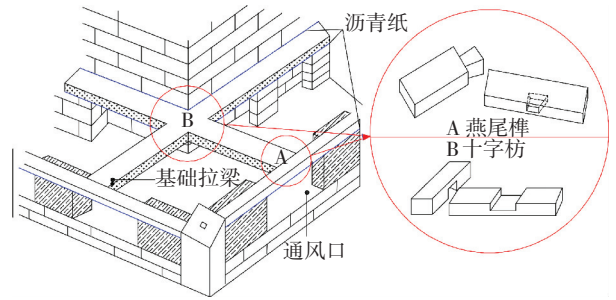
造,东侧墙体在此次地震中倒塌,见图 19.



图 19 孙达里乔克宫院的局部倒塌

Fig.19 Partial collapse of Sundari Chowk

因此,加强结构的整体性是提高建筑综合抗震能力的重要途径.例如,在结构中增设木柱和木梁<sup>[14-15]</sup>. 1934 年尼泊尔-比哈尔地震后,五十五窗宫殿(The Palace of fifty-five Windows)的墙体采用木梁和木柱进行加固,见图 20(a).在此次地震中,该建筑基本完好,其墙体见图 20(b).这也验证了该方法的有效性.



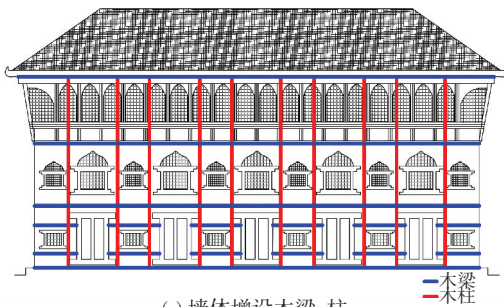
(a) 基础拉梁的连接



(b) 纳拉杨庙基础拉梁加固

图 21 基础拉梁的加固

Fig.21 Strengthening of ground beams



(a) 墙体增设木梁、柱



(b) 震后的墙体

图 20 五十五窗宫殿的整体加固

Fig.20 Overall strengthening of the 55 Windows Palace

### 4.2 基础拉梁的加固

尼泊尔文化遗产建筑的基础拉梁多采用木梁,因此其防潮防腐就比较重要.第一,设置通风口,尽量保持地下空间的干燥;第二,用沥青纸包裹木梁,避免木梁与砖、石等的直接接触,减少木梁的腐蚀;第三,基础拉梁的连接节点可以采取中国的榫卯连接,如图 21(a)中的 A 节点采用燕尾榫,B 节点处使用十字枋.图 21(b)为 Kathmandu Valley Preservation Trust (以下简称 KVPT) 尼泊尔项目主管 Ranjitkar R K 提供的帕坦杜巴广场内的纳拉杨庙基础拉梁的加固情况.

### 4.3 墙体的加固

砖(石)墙体是砖木结构和砖石结构的主要承重系统.大部分结构的震害特征都有层状剥离,故需加强砖墙自身的整体性.在不改变内外层砖块的前提下,选取合适距离,在砖块缝隙处打孔,向墙内注入适量水泥砂浆,增强砌块之间的粘结,减少层状剥离破坏,见图 22.

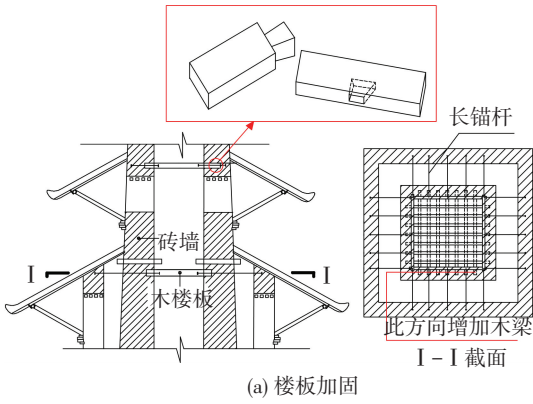


图 22 纳拉杨庙墙体采用了水泥砂浆(KVPT Ranjitkar R K 摄)

Fig.22 Adobe bricks with lime mortar of Narayan Temple

### 4.4 木楼板的加固

传统塔庙的楼板仅设单方向木梁,且木梁端部与周边墙体连接不牢固<sup>[16]</sup>.在地震作用下,木梁可能发生拔榫,导致楼盖塌落.因此,有必要加强木楼板与周边墙体的连接.加固时,可将木梁端部的直榫连接改为燕尾榫,并在另一方向铺设木梁,加强楼盖的整体性和刚度,或者将木梁用长锚杆与墙体进行拉结,见图 23.



(b) 蛇尾隐藏了加固楼板的锚杆(KVPT Ranjitkar R K 摄)

图 23 木楼板的加固

Fig.23 Strengthening of wood floors

#### 4.5 屋檐的加固

尼泊尔砖木结构的屋檐由椽木、铺板、泥床和瓦片组成,见图 9(b)。泥床厚一般为 1~2 ft,不仅导致屋檐的自重较大,且泥床长年遭受雨水侵蚀,屋檐上植被生长,见图 24(a)。



(a) 屋檐上的植被



(b) 镀铜的金属屋檐

图 24 屋檐的加固

Fig.24 Strengthening of roofs

植被不仅进一步增加了屋檐的自重,而且对木构件有腐蚀作用,这对文化遗产建筑的保护非常不利。因此,减轻屋檐重量,避免植被生长,就比较重要。建议在震后修复中,减少泥床厚度或将厚重瓦片改为镀铜的金属屋檐,见图 24(b),并加强日常的维护。

## 5 结 论

1) 尼泊尔文化遗产建筑的震害特征主要为墙体的层状剥离和剪切破坏、木柱和斜撑的破坏、倾斜和倒塌,根据各构件对结构整体抗震性能的重要性,本文提出了尼泊尔砖木结构和砖石结构文化遗产建筑的震害等级划分标准,并据此标准对震害进行了分类和统计。

2) 调查和统计结果表明,尼泊尔文化遗产建筑以砖木结构为主,因此砖木结构建筑受到地震破坏的数量也较多,但震害程度总体上轻于砖石结构。针对其震害,本文提出整体、基础拉梁、墙体、木楼板和屋檐等加固对策。但为了更好的应对下一次强震,有必要通过深入研究,探索一些既符合现代抗震要求,又符合文化遗产保护原则的新加固方法。

致谢:感谢特里布汶大学工学院(Tribhuvan University)Sudarshan Raj Tiwari 教授、陆地交通地震灾害防治技术国家工程实验室和西南交通大学建筑与设计学院对本研究项目的支持和帮助。

## 参考文献

- [1] USGS. M7.8-36km E of Khudi, Nepal[EB/OL]. [2015-11-27] [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general\\_map](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926#general_map).
- [2] DANGOL P. Elements of Nepalese temple architecture[M].2nd ed. New Delhi: Adroit Publishers, 2011:43-117.
- [3] HUTT M. A guide to the art and architecture of the Kathmandu Valley[M]. New Delhi: Adroit Publishers, 2010:13-71.
- [4] 邵继中,胡振宇. 尼泊尔加德满都杜巴广场建筑之美学特征及哲学精神研究[J]. 中外建筑,2015(10):84-88.  
SHAO Jizhong, HU Zhenyu. A study of aesthetics and philosophy of the Durbar Square Architecture in Kathmandu of Nepal[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2015(10):84-88.
- [5] SHAKYA M, VARUM H, VICENTE R, et al. Seismic sensitivity analysis of the common structural components of Nepalese Pagoda temples[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(4): 1679-1703.
- [6] JAISHI B, REN Weixin, ZONG Zhouhong, et al. Dynamic and seismic performance of old multi-tiered temples in Nepal [J]. Engineering Structures. 2003, 25(14):1827-1839.
- [7] RANJITKAR R K. Seismic strengthening of the Nepalese Pagoda [R]. Kathmandu: ICOMOS International Wood Committee (IWC), 2000.
- [8] KORN W. The traditional architecture of the Kathmandu Valley

[M]. Kathmandu: Ratna Pustak Bhandar, 2007: 99-123.

[9] RANJITKAR R K, NIENHUYS S. Options for reconstruction and retrofitting of historic Pagoda temples [R]. Kathmandu: Kathmandu Valley Preservation Trust (KVPT), 2003.

[10] 潘毅, 唐丽娜, 王慧琴, 等. 芦山 7.0 级地震古建筑震害调查分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 140-146.  
PAN Yi, TANG Lina, WANG Huiqin, et al. Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 140-146.

[11] 潘毅, 王超, 季晨龙, 等. 汶川地震中砖石结构古塔的震害调查与分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(6): 156-159.  
PAN Yi, WANG Chao, JI Chenlong, et al. Seismic damage investigation and analysis of chinese ancient masonry buildings in Wenchuan earthquake [J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(6): 156-159.

[12] 潘毅, 谢丹, 袁双, 等. 尼泊尔 8.1 级地震文化遗产建筑震害调查与分析 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 1039-1046.  
PAN Yi, XIE Dan, YUAN Shuang, et al. Investigation and analysis of seismic damage to cultural heritage buildings induced by Gorkha Earthquake, Nepal [J]. Journal Of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 1039-1046.

[13] 潘毅, 王超, 季晨龙, 等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析 [J]. 建筑科学, 2012, 28(7): 103-106.  
PAN Yi, WANG Chao, JI Chenlong, et al. Investigation and analysis of seismic damage for chinese ancient timber buildings in wenchuan earthquake [J]. Building science, 2012, 28(7): 103-106.

[14] 古川愛子, 清野純史, 土岐憲三, 等. ネパールの歴史的組積造建造物の地震時挙動について [J]. 歴史都市防災論文集, 2010, 4(1): 141-148.

[15] PARAJULI H R, KIYONO J, TANIGUCHI H, et al. Parametric study and dynamic analysis of a historical masonry building of Kathmandu [J]. Disaster Mitigation of Cultural Heritage and Historic Cities, 2010, 4(1): 149-156.

[16] 梅村恒, 谷口仁士, 神谷太啓. ネパール・パタン市における煉瓦造建物の振動特性調査(組積造文化遺産の防災) [J]. 歴史都市防災論文集, 2010, 4(1): 135-140.

(编辑 赵丽莹)

### 封面图片说明

封面图片来自论文“尼泊尔文化遗产建筑震害特征及加固对策——以尼泊尔 Ms 8.1 级地震中 3 个杜巴广场为例”，是西南交通大学土木工程学院调查加德满都世界文化遗产建筑群在尼泊尔 8.1 级地震中的震害特征示意图。

基于加德满都谷地文化遗产建筑大量和细致的震害调查工作，以 3 个杜巴广场的建筑群为例，将尼泊尔文化遗产建筑的结构形式分为砖木结构和砖石结构，总结了两种结构的基本组成和震害特征。如图中所示，砖木结构震害特征包括砖墙破坏、木构架破坏、结构倾斜和局部或整体倒塌等；砖石结构震害特征包括墙体开裂、倾斜和倒塌。结合建筑材料和结构平面及竖向布局的特点，分析破坏建筑的震害原因，提出了文化遗产建筑震害等级划分标准，并根据两种结构形式的震害特征，给出抗震加固对策。

(图文提供:潘毅,谢丹,袁双,王晓玥. 西南交通大学土木工程学院)