

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.083



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于模糊层次法的藏式砌体劣化风险 权重系数试验标定研究

白凡<sup>1</sup>, 杨娜<sup>1</sup>, 常鹏<sup>1</sup>, 旦增格桑<sup>2</sup>, 旦增卓嘎<sup>2</sup>, 滕东宇<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 布达拉宫管理处, 拉萨 850000;

3. 北京国文信文物保护有限公司, 北京 110000)

**摘要:**藏式砌体广泛应用于藏式建筑墙体中,在自然灾害、人为损坏等赋存环境影响作用下,出现了裂缝、倾斜及材料损伤等多种劣化形式。基于科学手段对劣化藏式墙体的健康状况进行合理评估一直是藏式古建筑砌体保护的难点。基于模糊评价法和层次分析法,对影响藏式砌体墙的几种主要损伤形式进行综合研究,通过参数分析迭代耦合,得到裂缝、倾斜及材料损伤等多种影响因素的权重系数及层次排序,并通过两个砖砌体试验模型进行验证。结合砌体结构安全评价规范,给出砌体结构墙体性能的量化评价标准,解决了利用模糊评价法评估藏式墙体时损伤形式权重系数难以客观确定的问题。

**关键词:**藏式砌体;模糊评价法;层次分析法;竖向通缝;斜裂缝;面外倾斜

**中图分类号:**TU362 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0158-07

## Experimental calibration of risk weight coefficient of Tibetan masonry based on fuzzy analytic hierarchy method

BAI Fan<sup>1</sup>, YANG Na<sup>1</sup>, CHANG Peng<sup>1</sup>, Tenzin Kelsang<sup>2</sup>, Tenzin Dolker<sup>2</sup>, TENG Dongyu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 2. Administrative Office of Potala Palace, Lhasa 850000, P. R. China; 3. Beijing Guowenxin Cultural Relics Protection Co., Ltd., Beijing 110000, P. R. China)

**Abstract:** Tibetan masonry is widely used in Tibetan building walls. Various forms of deterioration such as cracks, tilt and material damage have occurred under the influence of natural disasters, man-made damage and other environmental impacts. A reasonable assessment of the health of deteriorated Tibetan walls by using scientific methods has always been a difficult point for protection of ancient Tibetan masonry structures. This paper conducts a comprehensive study on several main damage forms that affect Tibetan

**收稿日期:**2020-12-28

**基金项目:**中央高校基本科研业务费(2020JBM039);国家自然科学基金(52008020、51178045);中国博士后基金(2020M680330);高等学校学科创新引智计划(B13002)

**作者简介:**白凡(1989-),男,博士(后),主要从事古建筑损伤识别及钢结构风致易损性研究, E-mail: baifan@bjtu.edu.cn.

**Received:**2020-12-28

**Foundation items:** Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2020JBM039); National Natural Science Foundation of China (No. 52008020, 51178045); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M680330); Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B13002)

**Author brief:**BAI Fan (1989-), postdoctor, main research interests: damage detection of ancient structure and wind-induced fragility of steel structures, E-mail: baifan@bjtu.edu.cn.

masonry walls relied on the fuzzy evaluation method and the analytic hierarchy process. The weight coefficients of various influencing factors such as cracks, tilt and material damage are obtained through the parameter iterative process and verified by two brick masonry test models. A quantitative evaluation standard for performance of the masonry structure wall is given. It also gives the weight coefficient that objectively determine using fuzzy evaluation method. The research results can be used for the rapid comprehensive evaluation of the damage state of the dual-purpose Tibetan masonry structure, and provide a reference for daily inspection and safety assessment of Tibetan building walls.

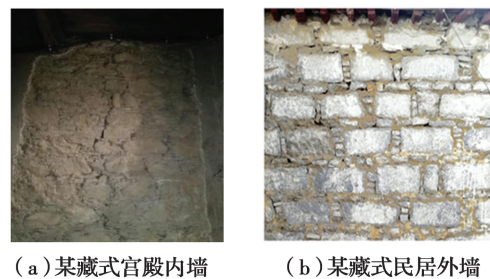
**Keywords:** Tibetan masonry; fuzzy evaluation method; analytic hierarchy process; vertical crack; oblique crack; out of plane inclination

藏式古建筑是中国古代建筑的重要组成部分,融合了中原古建筑及藏族文化的设计思想,具有极高的历史、艺术及科学价值。宫殿、寺庙楼宇等藏传官式建筑以及住宅、茶馆等藏区民居多采用砖石砌体作为其典型结构形式<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着经济的蓬勃发展,各地前往藏区旅游的游客日益增多,新增了大量交通振动及人群活动,也加快了藏式石砌体墙的损伤发展演化进程。目前,关于藏式古建筑石砌体劣化的研究多集中于静、动力性能研究,滕东宇等<sup>[3-5]</sup>利用试验手段研究了典型藏式石砌体的受压性能,并提出了石砌体的等效弹性模量计算方法;傅雷等<sup>[6]</sup>、吉喆等<sup>[7]</sup>利用试验方法研究了西藏民居毛石墙的抗压性能;刘伟兵等<sup>[8]</sup>利用试验及数值手段研究了藏族民居石砌体基本力学性能;蒋宇洪等<sup>[9]</sup>利用 RVE 单元理论研究了藏式古建石砌体均质化性能;常鹏等<sup>[10]</sup>、刘威等<sup>[11]</sup>基于动力测试方法建立、修正了某典型藏式山地建筑的数值模型并开展了动力可靠度研究;潘毅等<sup>[12-15]</sup>通过现场调研、试验,对类藏式砌体结构的力学性能在不同层次进行了详细分析。综上所述,目前对于墙体劣化后的状态评估研究较少,但该方面工作对于现存藏式古建筑石砌体结构的安全评估又尤为重要。所以,在掌握藏式古建石砌体结构基本性能的基础上,研究科学合理的藏式古建石砌体结构状态评估及参数取值方法是藏式古建保护领域亟待开展的工作。

笔者首先介绍了藏式古建砌体墙的一些典型损伤病害形式,进而提供了模糊评价法和层次分析法的基本定义和流程,给出了模糊评价法中影响藏式砌体墙劣化性能的裂缝、倾斜及材料损伤等多种主要损伤的风险评语。又将迭代算法与层次分析法融合,提出了基于迭代优化的模糊-层次分析法,得到了影响藏式砌体墙劣化性能的裂缝、倾斜及材料损伤的权重系数及层次排序,结合砌体结构安全评价规范给出了量化评价标准。最终,结合相关试验算例,对该方法的科学性及其适用性进行了验证。

## 1 典型藏式砌体墙模型损伤形式

图 1 所示为典型藏式官民两式砌体墙的典型形式,通常由“块石-片石”组合而成。

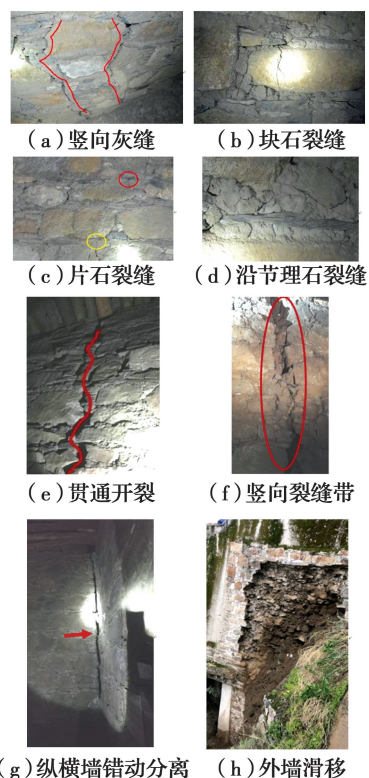


(a) 某藏式宫殿内墙 (b) 某藏式民居外墙

图 1 典型藏式官民两式石砌体墙

Fig. 1 Typical Tibetan official and civilian masonry walls

如图 2 所示,石砌体结构大多建造年代久远,在



(g) 纵横墙错动分离 (h) 外墙滑移

图 2 典型藏式墙体损伤劣化形式

Fig. 2 Typical damage and deterioration forms of Tibetan walls

地震、自然腐蚀等外界赋存环境影响及结构材料本构等性能劣化影响共同作用下,出现了各种影响藏式砌体墙安全稳定性能的既有损伤,包括竖向灰缝(图2(a))、块/片石裂缝(图2(b)、(c)、(d))、贯通性裂缝(图2(e))、竖向破碎(图2(f))、纵横墙分离(图2(g))、墙体滑移(图2(h))等,使其承载力和稳定性均有所下降,严重影响结构安全。

## 2 藏式砌体墙模糊评价法模型

藏式砌体墙模糊评价法模型包括风险评价指标集、风险评价评语集以及模糊评价算法模型3部分。

### 2.1 风险评价指标集

将藏式砌体墙劣化风险指标设定为裂缝、变形及材料状态,三者共同组成藏式砌体墙的风险评价指标集,评价指标集  $U$  的通式可记为<sup>[12]</sup>

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\} \quad (1)$$

式中: $U_i (i=1, 2, \dots, m)$ 代表每一层级的第  $i$  个评价指标。取  $m=3$ ,其中  $U_1, U_2, U_3$  分别代表裂缝、变形和材料状态。

### 2.2 风险评价评语集

在确定了裂缝、变形和材料状态等评价因素后,结合规范及文献资料,对上述3种评价等级指定评定标准。采用4个安全性等级 a、b、c、d 来描述藏式砌体裂缝、变形和材料状态风险评价评语,a、b、c、d 分别代表藏式砌体从轻到重的劣化风险程度。依据相关规范标准<sup>[16-17]</sup>,结合藏式砌体结构及材料特性,如表1所示,建立“4级”评语集  $V$  来描述藏式砌体墙的劣化风险,即

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{a, b, c, d\} \quad (2)$$

表1 藏式砌体墙劣化风险评价标准

Table 1 Deterioration risk assessment standard for Tibetan masonry walls

评定等级	裂缝	变形	材料状态	物理含义与管控措施
a	石块及石材无裂缝	墙体无显著变形	砌体表面无风化、粉化等劣化现象	满足 a 级要求,无需处理
b	单个石块存在随机性开裂,未延伸形成上下层通缝	墙体平面内侧向位移大于1/350、小于等于1/300 墙体高度	砌体表面存在轻度风化、粉化等劣化现象	相较 a 级要求低,对墙体承载力不构成显著影响,可不采取措施
c	墙体石块出现上下通缝,延伸长度大于石块平均高度,但不超过1/3 墙体高度	墙体平面内侧向位移大于1/300、小于等于1/150 墙体高度	砌体表面存在中度风化、粉化等劣化现象,有效削弱截面程度不超过15%	较不符合 a 级要求,对墙体承载力构成显著影响,应采取管控措施
d	存在多条贯通裂缝,且平均高度超过1/3 墙体高度的裂缝,或出现单条大于1/2 墙体高度的贯通裂缝	墙体平面内侧向位移大于1/150 墙体高度,或墙体局部倾斜度大于7%	砌体表面存在大面积风化、剥落等劣化现象,有效削弱截面程度超过15%	对墙体承载力构成严重影响,必须采取管控措施

### 2.3 模糊评价算法

模糊评价算法包括指标权重计算、模糊关系矩阵以及综合模糊计算理论。其中,指标权重表征影响藏式石砌体各种损伤指标的相对关系,模糊关系矩阵描述每个损伤指标的现存状态,将指标权重系数与模糊关系矩阵融合构成了综合模糊计算模型。

#### 1) 指标权重集

藏式砌体墙的裂缝、倾斜及材料损伤对应的权重系数为  $a_i$  时,指标权重集  $A$  可设置为

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad (3)$$

#### 2) 模糊关系矩阵

建立描述藏式砌体墙的裂缝、倾斜及材料损伤模糊关系的矩阵  $R$  可写为

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $R, r$  代表裂缝、倾斜及材料损伤指标评价的隶属向量,可根据现场调研,结合风险评价指标集及评语集中的分级标准对照确定。

#### 3) 综合模糊计算

根据综合模糊评价理论,评价结果向量集合  $B$  的最终得出需要对各评价指标的权重集合  $A$  与模糊关系矩阵  $R$  进行模糊计算,即

$$B = A \times R = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) \times$$



$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_l) \quad (5)$$

进而,对综合评判集  $B$  归一化处理,即可得

$$\bar{B} = \left( \frac{b_1}{\sum_{i=1}^l b_i}, \frac{b_2}{\sum_{i=1}^l b_i}, \frac{b_3}{\sum_{i=1}^l b_i} \right) = (\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_l) \quad (6)$$

根据最大单元隶属度原则,则有

$$\bar{b}_{i_0} = \max(\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_l) \quad (7)$$

因此,  $\bar{b}_{i_0}$  值所对应的风险等级即为藏式墙体劣化风险的综合评价结果。

综上所述,模糊评价法中的指标权重系数是确定藏式石砌体墙劣化风险的关键,笔者基于层次分析法原理,首先假设初始权重系数,进而利用迭代算法进行迭代,将最终评价结果与相关试验数据<sup>[3]</sup>进行对比,从而得到典型藏式石砌体墙关于裂缝、变形和材料状态的权重相对系数。

### 3 指标权重的确定

层次分析法通过每层形成的评价指标建立风险判断矩阵,最终得到每层指标的权重,其基本技术路线首先需要建立各层级评判矩阵,进行重要性排序计算,进而开展一致性检验分析。具体步骤为:

#### 1) 构建各层判断矩阵

基于风险因素判断矩阵,构建各层次中不同风险因素的相对重要性系数。随机选取每层次中两个风险因素进行比较,确定不同因素的相对重要程度,进而采用标度法进行标定赋值,见表 2。

表 2 重要性标度含义表

Table 2 Importance scale meaning table

标度	含义
1	因素 $u_i$ 与 $u_j$ 同等重要
3	因素 $u_i$ 比 $u_j$ 稍重要
5	因素 $u_i$ 比 $u_j$ 明显重要
7	因素 $u_i$ 比 $u_j$ 非常重要
9	因素 $u_i$ 比 $u_j$ 极端重要
2,4,6,8	1~3,3~5,5~7,7~9 的中值
倒数	元素 $u_i$ 与 $u_j$ 的比值为 $u_{ij}$ , 则元素 $u_j$ 与元素 $u_i$ 的比值为 $u_{ji} = 1/u_{ij}$

经 1~9 标度法赋值后,可得到层次因素的评判矩阵  $p$  可表示为

$$p = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $u$  为各因素的重要性标度。

#### 2) 重要性排序计算

首先,对评判矩阵中的列数据开展无量纲计算,即

$$\bar{u}_{ij} = \frac{u_{ij}}{\sum_{i=1}^n u_{ij}} \quad (9)$$

将归一化后的评判矩阵进行以行为标准的求和可得

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{u}_{ij} \quad (10)$$

并将向量  $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$  作正规化处理,即

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (11)$$

可得评判矩阵的特征向量  $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ , 其数值就是所对应的权重值。

#### 3) 一致性验证分析

一致性验证用于研究每个评判因素比例分配是否合适,验证公式为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (12)$$

式中:  $CR$  为评判矩阵一致性比例概率;  $RI$  为平均随机一致性检验指标,取值详见文献<sup>[3]</sup>中表 5、2;  $CI$  为评判矩阵指标,其值可由式(13)~式(15)得出,其中,  $\lambda_{\max}$  为评判矩阵中特征根的最大值,  $(PW)_i$  为向量  $PW$  的第  $i$  个元素。

$$CI = \frac{1}{n-1} (\lambda_{\max} - n) \quad (13)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{W_i} \quad (14)$$

$$PW = \begin{bmatrix} (PW)_1 \\ (PW)_2 \\ \vdots \\ (PW)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵满足要求;当  $CR \geq 0.1$  时,判断矩阵不满足要求,需要对上述判断矩阵进行必要的调整,直到满足要求为止。

#### 4) 确定权重

针对本文的两级层次评价体系,假定第 1 级中第  $i$  个评价指标的比例值为  $W_i$ ,第 2 级中第  $j$  个评价指标比例值为  $W_j$ ,则针对全局评价矩阵中指标  $a_{ij}$  的权重比例即为

$$a_{ij} = W_i \cdot W_j \quad (16)$$

综上所述,在层次分析法中,重要性标度是完成该方法评估的关键,但对于该类指标如何科学精确地取值,以往研究多采用主观判定方法解决,其优点是快速便捷,但也存在客观性差、科学性弱的缺点。基于文献[3]中的藏式砌体墙静力性能试验,对重要性标度的权重系数进行了迭代优化,确定了利用模糊评价法评估古建砌体墙时各损伤形式的权重系数取值区间,具体过程如图 3 所示,通过修正重要性标度中的因素权重,与试验现象进行耦合,从而科学地给出权重因素的合理取值。

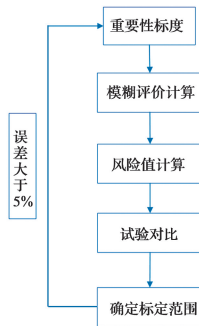


图 3 重要性标度迭代算法流程图

Fig. 3 Flow chart of importance scale iterative algorithm

## 4 藏式石砌体墙损伤状态评估算例

基于文献[3]中列出的两个典型藏式墙体受压试验,分别研究了足尺棱柱及足尺墙片试件状态评估问题。该试验中各类材料及尺寸的设计均与实际情况相符,详细过程详见文献[3]。通过提出的模糊评价技术对试验结束后已损墙体的安全性能进行评价和比较。

### 4.1 评估对象

如图 4 所示,采用的藏式石砌体墙研究算例为棱柱体(足尺)构件 W1 和墙片(足尺)构件 W2,均为静力破坏试验完成后的最后形式,其中 W1 的最终破坏形式为:片石出现损伤开裂,泥浆与石材的交接处出现竖向裂缝及灰缝;大部分片石出现粉碎破坏,块石分成多块;竖向灰缝的宽度在破坏过程中增大了 9 mm。墙片构件 W2 的最终破坏形式是部分小片石被压出且开裂,最终残余变形达到 6.31 mm。



(a) 足尺棱柱体试件 W1 (b) 足尺墙片试件 W2

图 4 评估对象最终状态图

Fig. 4 The final state diagram of the evaluation objects

### 4.2 评估流程

1) 建立评判矩阵,确定要素比例

评判矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/a & b \\ a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为“裂缝、变形、材料状态”三种因素的特征向量  $W$ ,可以通过求解得到“裂缝、变形、材料状态”三要素的特征向量  $W$ ,可以对  $a$ 、 $b$ 、 $c$  赋以初值进行求解。

2) 建立评判矩阵

以表 1 中的各个要素作为评价标准,通过检查和检测手段,记录两个试件的损伤现象和数量,获得相应的评判矩阵, W1 和 W2 试件的评判矩阵  $R_{W1}$  和  $R_{W2}$ 。

3) 评判等级向量  $X$

根据流程 1) 与 2) 得到的比例特征向量  $W$  与评判矩阵  $R_{W1}$  和  $R_{W2}$  确定藏式古建石砌体的风险等级

$$X_{W1} = W^T \cdot R_{W1}, X_{W2} = W^T \cdot R_{W2}$$

根据图 3 的迭代流程,最终得到适用于藏式古建砌体“裂缝、变形、材料状态”的比例系数取值是: $a=3, b=5, c=7$ ,其判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix}$$

代表“裂缝、变形、材料状态”三因素权重的特征向量  $W$  为

$$W = [0.28 \quad 0.65 \quad 0.07]^T$$

记录两个试件的损伤现象和数量,以比例分配和状态定性判断方法,确定各自的评判矩阵, W1 和 W2 试件的评判矩阵分别为

$$R_{W1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{W2} = \begin{bmatrix} 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其评定等级向量  $\mathbf{X}$  的计算为

$$\mathbf{X}_{W1} = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R}_{W1} = [0 \quad 0.155 \quad 6 \quad 0.195 \quad 3 \quad 0.649 \quad 1]$$

$$\mathbf{X}_{W2} = \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R}_{W2} = [0 \quad 0.944 \quad 2 \quad 0.055 \quad 8 \quad 0]$$

### 4.3 评估结果分析

对 W1 试件进行综合评定,其状态向量最大值落入 d 级位置,表示该试件的状态等级是 d 级,已经达到危险状态。评判结果与试验结果相对应,试验研究也同样表明该试件已达到力学极限状态,无法继续承载,卸载后的试件接近散体。

对 W2 试件进行综合评定,其状态向量最大值落入 b 级位置,表示该构件的状态等级是 b 级,对其评定结果为:现有损伤不显著影响承载能力,可不处理。评判结果与试验结果相对应,试验结果也同样表明构件出现了部分石块开裂现象,荷载-位移曲线中的位置仍属于线弹性。

## 5 结论

基于模糊评价法和层次分析法,对影响藏式砌体墙的几种主要损伤形式进行了综合研究,得到以下结论:

1)通过参数分析迭代耦合,得到适用于藏式古建筑砌体“裂缝、变形、材料状态”的权重向量系数取值为: $a=3$ 、 $b=5$ 、 $c=7$ ,并通过两个砖砌体试验模型进行了验证。

2)结合砌体结构安全评价规范,给出了砌体结构墙体性能的量化评价标准,解决了利用模糊评价法评估藏式墙体时损伤形式权重系数难以客观确定的问题。

### 参考文献:

- [1] 姜怀英. 布达拉宫一期工程维修理念和方法[J]. 中国文化遗产, 2009(6): 77-83.  
JIANG H Y. Ideas and methods of maintenance of the Potala Palace phase I project [J]. China Cultural Heritage, 2009(6): 77-83. (in Chinese)
- [2] 姜怀英. 从布达拉宫看西藏寺庙建筑演变中的几个问题[J]. 古建园林技术, 1994(4): 9-20.  
JIANG H Y. Viewing several issues in the evolution of Tibetan temple architecture from the Potala Palace [J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 1994 (4): 9-20. (in Chinese)
- [3] 滕东宇. 藏式石砌体静力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
TENG D Y. Study on static performance of Tibetan-style stone masonry [D]. Beijing: Beijing Jiaotong

University, 2019. (in Chinese)

- [4] 滕东宇, 杨娜. 藏式石砌体受压应力-应变全曲线特征研究[J]. 工程力学, 2018, 35(11): 172-180.  
TENG D Y, YANG N. Research on the features of complete stress-strain curves of Tibetan-style stone masonry under compressive load [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(11): 172-180. (in Chinese)
- [5] 滕东宇, 杨娜. 基于分层匀质化的砌体等效弹性模量的计算方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(2): 408-415.  
TENG D Y, YANG N. Equivalent elastic modulus method of masonry based on stratified homogenization [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49 (2): 408-415. (in Chinese)
- [6] 傅雷, 贾彬, 蒙乃庆, 等. 西藏民居毛石墙抗压性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(5): 119-122, 63.  
FU L, JIA B, MENG N Q, et al. Experimental study on compressive performance of the rubble masonry walls of Tibet folk dwelling [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(5): 119-122, 63. (in Chinese)
- [7] 吉喆, 王汝恒, 邓传力, 等. 藏式石墙抗压性能试验[J]. 西南科技大学学报, 2017, 32(2): 46-49.  
JI Z, WANG R H, DENG C L, et al. Experimental study on compressive performance of Tibet stone wall [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2017, 32(2): 46-49. (in Chinese)
- [8] 刘伟兵, 崔利富, 孙建刚, 等. 藏族民居石砌体基本力学性能试验与数值仿真[J]. 大连民族学院学报, 2015, 17(3): 252-256.  
LIU W B, CUI L F, SUN J G, et al. Tests and numerical simulation of basic mechanical properties of Tibetan dwellings stone masonry [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2015, 17(3): 252-256. (in Chinese)
- [9] 蒋宇洪, 杨娜, 白凡. 基于 RVE 单元的藏式古建石砌体均质化研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 110-124.  
JIANG Y H, YANG N, BAI F. Research on the homogenization of Tibetan ancient stone masonry based on RVE elements [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 110-124. (in Chinese)
- [10] 常鹏, 吴楠楠, 王钊, 等. 藏式山地结构有限元模型修正及动力可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 13-20, 41.  
CHANG P, WU N N, WANG Z, et al. Finite element model updating and dynamic reliability analysis of

- Tibetan structure on the slope [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(6): 13-20, 41. (in Chinese)
- [11] 刘威, 杨娜, 白凡, 等. 基于敏感性分析的协方差随机子空间方法参数优化[J]. *工程力学*, 2021, 38(2): 157-167, 178.
- LIU W, YANG N, BAI F, et al. Parameter optimization of covariance-driven stochastic subspace identification method based on sensitivity analysis [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(2): 157-167, 178. (in Chinese)
- [12] 潘毅, 李玲娇, 姚蕴艺, 等. 砖石结构古建筑震后破坏状态评估方法[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(4): 704-713.
- PAN Y, LI L J, YAO Y Y, et al. Evaluation methods for post-earthquake damage state of ancient masonry buildings [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(4): 704-713. (in Chinese)
- [13] 潘毅, 谢丹, 袁双, 等. 尼泊尔文化遗产建筑震害特征及加固对策: 以尼泊尔 Ms8.1 级地震中 3 个杜巴广场为例[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(12): 172-182.
- PAN Y, XIE D, YUAN S, et al. Seismic damages of Nepalese cultural heritage buildings and strengthening measures: Case studies on three Durbar Squares in Ms 8.1 Gorkha earthquake [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(12): 172-182. (in Chinese)
- [14] 魏智辉, 潘毅, 邱洪兴, 等. 勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 184-188.
- WEI Z H, PAN Y, QIU H X, et al. Experimental study on compressive behavior of masonry walls strengthened with pointing mortar [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 184-188. (in Chinese)
- [15] 魏智辉, 潘毅, 邱洪兴, 等. 安庆市某基督教堂加固改造设计方案[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(Sup1): 209-211.
- WEI Z H, PAN Y, QIU H X, et al. Reinforcement and reconstruction design of a Christ church in Anqing City [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(Sup1): 209-211. (in Chinese)
- [16] 危险房屋鉴定标准: JGJ 125—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Standard for dangerous building appraisal: JGJ 125-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [17] 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Standard for appraisal of reliability of civil buildings: GB 50292-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)

(编辑 黄廷)