祝叶,罗凡.中强震下砌体结构损伤检测方法研究[J].地震工程学报,2018,40(5):976-982.doi:10.3969/j.issn.1000-0844. 2018.05.976

ZHU Ye,LUO Fan.A Damage Detection Method for Masonry Structures under Moderate-Strong Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):976-982.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.976

# 中强震下砌体结构损伤检测方法研究

### 祝叶1,罗凡2

(1. 武汉职业技术学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要:当前地震记录法检测中强震下砌体结构损伤时,基于已知砌体结构地震动记录实施损伤检测 存在较高的局限性。提出新的中强震下砌体结构损伤检测方法,利用 DASP 动态测试分析仪和 891 型的压电式位移传感器,检测拟静力试验后的砌体结构模型,采用参数互补校正方法得到受损 砌体结构的自振频率和振型检测,通过有限元分析获取砌体结构位移,依据频率和位移采用信号匹 配方法检测砌体结构损伤情况,根据墙体刚度变化检测中强震下砌体结构的损伤程度。实验证明 所提方法可对中强震下砌体结构损伤情况进行准确检测。

## A Damage Detection Method for Masonry Structures under Moderate-Strong Earthquakes

ZHU Ye<sup>1</sup>, LUO Fan<sup>2</sup>

(1. Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, Hubei, China;2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: When detecting the damage of masonry structures under moderate-strong earthquakes, there are high limitations with the current seismic record method, as it is based on the known ground motion records of masonry structures. A new method for detecting damage of masonry structures under medium-strong earthquakes is proposed. A double-arm spectrometric (DASP) dynamic test analyzer and an 891-type piezoelectric displacement sensor were used to detect the masonry structure model after quasi-static testing, and the parameters inter-revising method was used to obtain the natural frequency and vibration mode of the structure. The displacement of the masonry structure was obtained by finite element analysis. The damage of the masonry structure was detected by the signal matching method according to the frequency and displacement. The experiment proved that the proposed method can accurately detect the damage of masonry structures under medium and strong earthquakes.

收稿日期:2017-08-20

**基金项目:**国家自然科学基金(51629801)

第一作者简介:祝 叶(1976-),女,湖北武汉人,副教授,研究方向:结构工程。E-mail:zhuyewh123@yeah.ne。

#### 0 引言

我国陆内地震活动强烈,是世界上地震灾害最 严重的国家之一。当发生中强震灾害时,房屋建筑 的结构必然会出现损伤状况,而这种损伤的砌体结 构是可以通过修复继续使用的。建筑所用的砌体结 构具御寒隔热、隔音以及方便动工等特点,但重量值 高以及强度弱等因素也导致了其抗震能力较弱。中 强震是震级大于4.5级、小于6级的地震,属于可造 成损坏或破坏的地震,其破坏程度与震源深度、震中 距等多种因素有关。因此对中强震下砌体结构质量 与安全的检测显得尤为重要。

以往国内外相关研究人员针对地震状态砌体结构的分析研究有:文献[1]基于汶川地震中砌体结构房屋震害情况,将不同地震强度下结构受到损害的指标与结构损害程度间的具体关系作为损伤程度判断值,该方法是建立在已受到损害后的结构特征得到的检测砌体结构抗震能力上的,应用到实际情况中可能会存在差异性。文献[2]提出一次二阶矩法对地震下砌体结构进行损伤检测,这种方法仅对地震损伤结构汇总中的线性因素进行计算,没有考虑到非线性因素,因此检测结果的误差比较大。文献[3]描述的是 Ben 在上世纪九十年代提出的一种地震引起建筑结构损伤的可靠性预测方法,主要是将

结构不失效概率模型所对应的参数作为判断砌体结构损伤指标,但其得到的判断结构损伤的指标在复杂建筑结构上并不适用。文献[4]提出应用 SFEM 法对地震下砌体结构损伤进行检测,主要采用分块 化处理受到损伤的砌体结构,针对某一块结构进行分析,存在分析效率偏低的缺点。

目前已逐渐开始发展通过砌体结构的动力测试 数据实现对砌体结构参数的调整<sup>[5]</sup>,针对不同工程 领域和结构形式,可选择动态测试数据或静态测试 数据对中强震下的砌体结构进行损伤检测。基于 此,本文提出新的中强震下砌体结构损伤检测方法, 以期实现砌体结构损伤的准确检测。

#### 1 中强震下砌体试件结构损伤的检测

#### 1.1 设置拟静力砌体结构实验

共设置三层砌体试件,为防止预应力砌体装配 式试件底部早期破坏,对其进行拟静力实验。试件 在载荷控制过程初期时响应的荷载-变形曲线为直 线<sup>[6]</sup>,卸荷时也不存在变形,当荷载升高,侧向抗力 增强。初期不会出现裂缝,此时的曲线斜率有变动, 当趋向于水平时,三层和一层的洞口发生严重的裂 缝现象。用相反的推力进行实验,当发生裂缝的荷 载值和推力一样时,一层出现裂缝现象。三层试件 的滞回曲线如图1所示。





从图 1 可见,试件发生位移变化过程中,随着 轴压的增加,砌体结构受损时有洞口的墙体发生交 叉裂缝,刚度衰减严重;没有洞口的墙体发生裂缝 时相匹配的强度峰值明显减小,因为此时已完成刚 度衰减<sup>[7]</sup>。当有拉力作用时,滞回曲线的滞回环变 得很小,砌体有脆性破坏特征,后期裂缝很难恢复。 试件受到推力作用时则正好与之相反,砌体结构呈 现出优秀的延性变形能力,后期裂缝能够变成闭合 状态。

#### 1.2 检测受损砌体试件结构自振频率和振型

利用 DASP 动态测试分析仪和 891 型的压电 式位移传感器,检测拟静力试验后的砌体结构模型。 检测时间是 400 s,将 891 型的压电式位移传感器与 试件对称轴水平方向上保持一致,竖向的所有层也 保持一致<sup>[8]</sup>。通过参数互补校正的方法对受损的砌 体结构进行自振频率 ω 和振型检测<sup>[9]</sup>。其大致过 程为:主频值通过自谱曲线确定后,峰值频带宽度通 过主频周围的具体条件以及保证初定频率左右峰值 点数一样而定,这是在实施三阶频率检测前的准备 工作。假设第一频率在拟静力实验后其值为 3.356 Hz,研究所有测点间传递函数,互功率谱密度在测 点对应峰值频带的值用表 1 描述。

表1 互功率谱密度在第一峰值频带的值

Table 1	Value of cross pow	er spectral density at	the first peak frequenc	y band
初定主频数/Hz	地面(×100)	一层(×100)	二层(×100)	三层(×100)
3.111	2.115-1.445i	2.070-7.350i	0.516-9.340i	7.115
3.306	1.245-6.786i	-0.327 - 2.845i	-3.515 - 3.415i	13.212
3.356	8.687-1.445i	-8.111-1.545i	5.031-4.145i	6.445
3.405	3.307-3.076i	6.551-1.776i	9.102-1.457i	12.004

-3.631 - 1.431i

表1中除主频率值非电信号能量值外,其余均 表示电信号能量值,通过整理表1中的数据,第一频 率选取为互功率谱密度比值与实际振型误差最小的 频率点,第一阶模态振型就是这时的振型<sup>[10]</sup>,得到 3.405 Hz为受损砌体结构的第一频率,根据顶层顺序 归一化操作对应的振型,得到[0.250 0.507 0.702];同 理可得,10.338 Hz是第二频率值,[-0.072 -0.106 0.138]是其相匹配的振型;14.856 Hz是第三频率值, [0.008 -0.078 0.086]是其相匹配的振型。

4.347-3.638i

#### 1.3 基于有限元分析砌体结构的位移

3.455

将砌体中的砂浆和砖按照规则砌筑,并将砌体 均质化为连续性介质,构成砌体单元,从而构建砌体 结构有限元模型。当前建模方法多数采用等效体积 单元法,该方法中砌体集合及其组成信息结构相对 完善,适用于大规模砌体结构的力学现象研究。等 效体积单元在建模时需满足砌体完整构成部分(砂 浆和砖)的周期性分布和连续性分布规律。据此,砌 体采用等效体积单元的均质化建模过程见图 2。

等效体积单元应力应变值用单元中各组成部分 的应力应变平均值。特性材料、连续性的介质材料 以及在连续和分散模型中提供单元划分模式是砌体 结构等效体积元的三大特点<sup>[11]</sup>。将砌体材料等效 成一个所有向异性的匀质连续单元体,用这种不间 断的模型来衡量砂浆以及块体属性,避免陷入离散 模型所需面对的单元建模问题<sup>[12]</sup>。砌体等效体积 单元的弹性应变在平面应力情况下产生的位移变化 值 Δu 用式(1) 来描述:

$$\Delta u = \begin{cases} u_{xx} \\ u_{yy} \\ u_{xy} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & \frac{E_{11}\mu_{21}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & 0 \\ \frac{E_{22}\mu_{12}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & \frac{E_{22}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{cases}$$
(1)



图 2 砌体等效体积单元均质化过程

Fig.2 Homogenization process of the masonry equivalent volume unit

砌体结构在不同位移情况下的弹性模量的应变 关系分为三种情况,一是 $\epsilon_{xx} \neq 0$ , $\epsilon_{yy} = \epsilon_{xy} = 0$ ;二是  $\epsilon_{yy} \neq 0$ , $\epsilon_{xx} = \epsilon_{xy} = 0$ ;三是 $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{xy} = 0$ 。再通 过式(2)~(4)求出等效体积单元的弹性模量和剪 切模量:

$$\mu_{21} = \delta_{xx}^{(2)} / \delta_{yy}^{(2)}, \mu_{12} = \delta_{yy}^{(2)} / \delta_{xx}^{(1)}$$
(2)

$$E_{11} = \delta_{xx}^{(1)} (1 - \mu_{12} \mu_{21}) / \varepsilon_{xx}^{(1)}$$
(3)

$$E_{22} = \delta_{yy}^{(1)} (1 - \mu_{12} \mu_{21}) / \varepsilon_{yy}^{(2)}$$

$$G = \delta_{12}^{(3)} / \varepsilon_{12}^{(3)} \tag{4}$$

微观水平上检测弹性模量时较为复杂,受环境 影响容易出现误差<sup>[13]</sup>,因此,在实际情况下,对砌体 结构荷载以及变形可以通过直接测量进而得到弹性 模量。本文基于砌体结构材料的特性考量,对有限 元损伤前后砌体结构模型进行静力计算分析,并且 在砌体结构完整和损伤状态分别进行分析。

#### 1.4 通过信号匹配方法检测砌体结构的损伤

在上两小节获取的砌体结构自振频率以及位移的基础上,运用信号匹配方法基于砌体结构自振频 率以及位移对砌体结构损伤进行检测,利用自振频 率改变值和静态位移值确定损伤信号为:

$$DS = \frac{\Delta u}{\Delta \,\omega^2} \tag{5}$$

式中: $\Delta \omega$  与 $\Delta u$  分别代表砌体结构中一阶圆频率改 变值以及位移值。损伤位置通过现实测量的损伤信 号(MDS) 和预测的损伤信号(PDS) 间的差别来判 断<sup>[14]</sup>,MDS 在 *i* 荷载工况下描述为:

$$MDS = \frac{\Delta u}{\Delta \omega^2} \bigg|_{m}$$
(6)

在式(6)中,现实测量数据用脚标中的 *m* 描述。在 *i* 荷载工况下,若 *k* 层受到损害,预测的损伤信号描述为:

$$PDS = \frac{(\Delta u_{jk})}{(\Delta \omega^2)_k} \bigg|_p \tag{7}$$

在式(7)中,预测的数据用脚标 p 描述,现实情况中第一阶结构的圆频率变化率准确度高,其应用 性强。

以信号匹配方法为核心,逐层对全部荷载工况 下的误差范数进行研究,主要通过插值范数和的方 法实现<sup>[8]</sup>。根据工况下的误差范数和来检测 *k* 层的 损伤情况:

$$E_{k} = \sum_{i=1}^{NL} \| \{PDS_{ik}\} - \{MDS_{i}\} \|$$
(8)

式(8)中砌体结构荷载工况的总数用 NL 来描述,当 $E_k = 0$ 时,说明砌体结构的损伤发生在 $k \in$ , 但当多层同时发生损伤且根据试验实施检测时, $E_k$ 值低即代表着k 层有可能产生了损伤。为更直接地 检测砌体结构的k 层是否存在损坏:

$$D_{ek} = \frac{1}{E_k} \tag{9}$$

式(9)中的 $D_{ak}$ 值越高时,k层发生损坏的几率更大。

#### 1.5 检测中强震下砌体结构的损伤程度

设置砌体结构的各项参数,表达式如下:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}; E = 370 f_m \sqrt{f_m}$$

$$K = \frac{E_t}{2\eta (1+\nu) \left(\frac{H}{B}\right) + \left(\frac{H}{B}\right)^3}; f = \frac{\omega}{2\pi}$$
(10)

式中:*E*、*K*和*f*<sup>m</sup>分别描述砌体的弹性模量、刚度以 及平均抗压强度值;ω和*f*分别代表自振圆频率和 自振频率;墙体的高、宽、厚度值分别用*H*、*B*以及*t* 描述;剪应力不均匀系数用η描述;矩形截面取值为 1.2;砖砌体的泊松比ν值选取为 0.15。

根据墙体刚度变化实现在中强震下对砌体结构 的损伤程度检测<sup>[15]</sup>,用 $\alpha = \frac{K - K_s}{K}$ 来描述砌体结构 的刚度变化, $K_s = \omega^2 m = (2\pi f)^2 m$ 是墙体受损后的 刚度值,墙体的初始刚度值则用 K 描述,砌体结构 损害程度与刚度变化关系用表 2 描述。

表 2 砌体结构损害程度与刚度变化关系

 Table 2
 Relationship between the damage degree of masonry structure and the change of stiffness

structure and the change of startiness					
损坏程度	频率变化/%	刚度变化/%			
大体完整	0~8	0~18			
局部损坏	8~24	18~40.7			
大部分损坏	$24 \sim 38$	$40.7 \sim 52$			
损坏严重	≥38	≥52			

#### 2 实验分析

#### 2.1 砌体结构变化情况分析

采用本文方法对完整无损的砌体和模拟中强震 下砌体损伤的情况进行分析,统计其与实际测量结 果间的差异性,结果用表 3 和表 4 描述。

#### 表 3 本文方法和实际测量的固有频率 Table 3 Natural frequencies with finite element analysis

#### and actual measurement

措利提佐桂刈	频率	/Hz
候型预切消沉 -	本文方法	实际测量
完整状态	4.198	4.280
损伤状态	3.388	3.405

分析表 3 和表 4 能够看出,本文方法对实验完 整砌体结构以及中强震下损伤砌体结构的固有频率 和各层位移检测结果同实际测量结果间相差不大, 说明本文方法可对建筑砌体结构振动状态和位移变 化情况进行有效分析,能准确描述砌体结构的波动 情况。

#### 2.2 中强震下砌体结构损伤检测结果分析

实验通过插值范数和方法对各工况下的误差范

表4 本文方法和实际测量的位移

数实施逐层整理研究,洗用拟静力荷载值分别为 50 kN、70 kN 及 90 kN 三种工况,通过本文方法中 的式(8)和(9)进行砌体结构的损伤鉴别,结果用图 3 描述。

Table 4Displacement with finite element analysis and actual measurement							
告♯/l-N	模型状态	一层的位移/mm		二层的位移/mm		三 层的位移/mm	
1円 年X / K1N		本文方法	实际测量	本文方法	实际测量	本文方法	实际测量
50	测验前	0.37	0.40	0.65	0.70	1.67	1.70
	测验后	1.45	1.50	2.66	2.80	4.60	4.60
70	测验前	0.63	0.70	0.97	1.00	1.89	2.00
	测验后	1.67	1.70	2.89	3.10	5.00	5.10
90	测验前	0.88	0.90	1.23	1.30	2.00	2.10
	测验后	1.87	1.90	3.34	3.40	5.49	5.60



10

8

6

4

2

0

1

损伤检测





2

楼层

3

Fig.3 Test results under different loads

通过图 3 可以看出,第一层以及第三层的砌体 结构损伤程度远远高于第二层,这与实际结果基本 一致,日其刚度衰减严重,说明提出的损伤检测标准 具有一定的可信性,证明本文方法对砌体结构损伤 的检测具有可行性。

中强震下砌体结构的前三阶频率检测的对比结 2.3

实验选用理论计方法、本文方法以及 ERA 方 法对砌体结构的墙体实施前三阶频率检测,检测到 的数据用表 5 统计,再通过图 4 进行直观描述。

通过表 5 和图 4 可以看出,实验通过三种不同 方法对中强震下砌体结构的损伤实施检测时,本文 方法在一阶、二阶以及三阶检测结果的误差最小,证 明本文方法对中强震下砌体结构的频率检测能力突 出,检测结果更精确。

表 5 不同方法下砌体结构前三阶频率结果对比

Table 5 Comparison between the first three frequencies obtained by different methods

obtained by unreferr methods					
频率 阶数	理论方法 /Hz	本文方法 /Hz	ERA 方法 /Hz	实际结果 /Hz	
1	40.41	41.73	43.82	41.60	
2	160.21	164.80	160.80	162.71	
3	179.00	177.42	174.23	176.35	





Fig.4 Comparison between the frequency results obtained by different methods

#### 中强震下砌体结构损伤程度对比 2.4

实验通过 DASP 系统测得模拟中强震下砌体 结构中墙体受损后的频率平均值为 10.87 Hz,受损 后的刚度是 K<sub>s</sub>=3 080 210.674 N/mm,初始刚度 值  $K = 45 \ 243 \ 800.64 \ \text{N/mm}$ ,刚度变化  $\alpha = \frac{K - K_s}{K}$ ×100%=93.19%。实验采用本文方法计算墙体刚

12

10

8

6

4

2

0

1

2

楼层

(a) 荷载值为50 kN工况下的检测结果

3

损伤检测

度变化与 DASP 动态测试分析仪识别的刚度变化 结果对比用图 5 来描述。





通过图 5 中砌体结构刚度变化情况能够得出, 随着位移值升高墙体刚度明显降低,墙体刚度随着 墙体的开裂而明显降低,这种降低变化只有到达极 限荷载后才减弱。本文方法对中强震下砌体结构损 伤检测与 DASP 动态测试分析仪检测结果一致,说 明本文方法是一种准确的砌体结构损伤检测方法。

#### 3 结论

本文方法检测中强震下砌体结构的损伤情况 时,设置了砌体结构的拟静力有限元模型,模拟并分 析在载荷控制和发生位移变化时模型的实际变化情况,对拟静力试验后的模型进行参数互补校正,从而 检测受损砌体结构的自振频率和振型,并据此分析 得到砌体结构位移,根据其频率改变值和位移值确 定检测砌体结构损伤的信号,通过现实测量的损伤 信号和预测的损伤信号间的差别来判断损伤位置。 采用信号匹配方法逐层对全部荷载工况下的误差范数和 来检测该位置是否受到损伤。最后根据墙体刚度和 弹性模量的变化值检测中强震下砌体结构的损伤程 度。实验证明,本文方法能够判断砌体结构发生损 伤的位置,具有较高的准确性。

#### 参考文献(References)

- [1] 苏启旺,赵世春,叶列平.砌体结构抗震评估研究[J].建筑结构 学报,2014,35(1):111-116.
   SU Qiwang,ZHAO Shichun,YE Lieping,Research on Seismic Evaluation of Masonry Structures [J]. Journal of Building Structures,2014,35(1):111-116.
- [2] 吴宏磊,丁洁民,崔剑桥,等.超高层建筑结构加强层耗能减震

技术及连接节点设计研究[J].建筑结构学报,2014,35(3):8-15.

WU Honglei, DING Jiemin, CUI Jianqiao, et al. Study on Energy Dissipation Technology and Connection Design for Outriggers and Belt Members of Super High-rise Buildings[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3):8-15.

- [3] 杨繁,陈波,王干军.建筑结构安全评估模型修正方法研究[J].
   中国安全科学学报,2014,24(5):104-108.
   YANG Fan, CHEN Bo, WANG Ganjun. Model Updating of Building Structures for Safety Assessment [J]. China Safety Science Journal,2014,24(5):104-108.
- [4] 韩璐.基于 CS 模式的建筑工程造价控制系统的设计[J].电子 设计工程,2015,23(13):55-57.
  HAN Lu. CS Pattern Design Application Construction Cost Control System [J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23 (13):55-57.
- [5] 华建兵,吴韬,蒋敏,等.大震下村镇建筑砌体结构的抗震性能数值分析[J].地震工程学报,2017,39(1):52-57.
  HUA Jianbing,WU Tao,JIANG Min,et al.Numerical Analysis of Seismic Behaviors of Masonry Structures in Village Buildings During Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,39(1):52-57.
- [5] 廖明进,钟冬望,磨季云,等.整体隐形钢框架体系在砌体结构 加固改造中的应用[J].工业建筑,2014,44(11):182-185. LIAO Mingjin,ZHONG Dongwang,MO Jiyun,et al.Applications of Holistic Hidden Steel Frame System in Reinforcement of Brick-Concrete Buildings[J].Industrial Construction,2014, 44(11):182-185.
- [6] 夏倩,屈文俊.地铁振动对既有砌体结构影响规律及因素数值 分析[J].振动与冲击,2014,33(6):189-194.
  XIA Qian,QU Wenjun.Numerical Analysis on Metro Train-induced Vibrations and Their Influences and Affecting Factors on Existing Masonry Building[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(6):189-194.
- [7] ZHOU W, LI H, MAO C, et al. Seismic Damage Detection for a Masonry Building Using Aftershock Monitoring Data[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 16(4):605-618.
- [8] 鲁江,秦健,潘磊,等.南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J].电力工程技术,2015,34(6):1-5.
  LU Jiang,QIN Jian,PAN Lei,et al.Study on Architecture and Configuration for Control and Protection System of Nanjing UPFC Project[J].Jiangsu Electrical Engineering,2015,34(6): 1-5.
- [9] 管晓明,傅洪贤,王梦恕,等.基于 OMA 试验模态参数的砌体 结构有限元建模及修正[J].振动与冲击,2014,33(14):181-187.

GUAN Xiaoming, FU Hongxian, WANG Mengshu, et al. Finite Element Modeling and Model Updating of Brick Masonry Structure Based on Modal Parameters Obtained from Operational Modal Analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14):181-187.

[10] 王毅红,张又超,樊琨,等.村镇砌体结构叠层橡胶支座隔震试

验研究[J].工程抗震与加固改造,2014,36(2):15-20.

WANG Yihong, ZHANG Youchao, FAN Kun, et al. Isolation Performance Test of Laminated Rubber Isolator for Rural Masonry Structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(2):15-20.

[11] 张敏强,刘保东,李玉忠,等.农村典型砌体结构房屋安全及抗 震检测与鉴定[J].工程抗震与加固改造,2016,38(3):124-129.

> ZHANG Minqiang, LIU Baodong, LI Yuzhong, et al. Safety and Seismic Performance Detection and Identification of Typical Masonry Structure Building in Rural Areas[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3):124-129.

[12] 曹江涛,张庆斌,李志钱.砌体结构破坏分析及抗震设计措施 研究[J].建筑技术,2016,47(11).

> CAO Jiangtao, ZHANG Qingbin, LI Zhiqian. Analysis on Damage and Aseismic Design Measures of Masonry Structure

[J]. Architecture Technology, 2016, 47(11).

[13] FENG S,QIANG Z,SONG G, et al.Review on Seismic Damage Prediction Methods of Single Masonry Structures [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(6); 58-68.

[14] 刘科元,李海滨,地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J]. 计算机仿真,2017,34(1):423-426.
LIU Keyuan,LI Haibin.Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake[J].
Computer Simulation,2017,34(1):423-426.

[15] 焦建华,曹大富,秦晓川,等.利用宽柱双梁框架结构改造加固 砌体结构[J].排灌机械工程学报,2015,33(1):43-49.
JIAO Jianhua, CAO Dafu, QIN Xiaochuan, et al. Masonry Structure Reforming and Strengthening by Means of Frame Structure with Double-beam Wide Column [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2015,33(1): 43-49.