

聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞 抗震性能评估方法研究*

周庚敏^{1,2}, 韩路平^{1,2}, 刘生煜^{1,2}, 张 伟³, 田冲冲^{1,2}, 李明隽^{1,2}, 王炯文^{1,2}, 李 东^{1,2}

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 陕西省建筑工程质量检测中心有限公司, 陕西 西安 710082; 3. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

[摘要] 为研究残损砖箍窑洞加固后的抗震性能, 采用聚丙烯打包带网水泥砂浆面层对一缩尺比例为1:4的典型传统民居砖箍窑洞残损试验模型进行抗震加固, 并对加固后的模型结构进行振动台试验。试验中选取2条自然波和1条人工波作为地震动输入, 分析了结构模型的破损形态、拱券收敛变形及窑腿侧移角。结果表明, 地震作用下聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞的薄弱点在拱券和窑腿位置; 随着输入峰值加速度的不断增大, 拱券收敛变形值和窑腿侧移角基本呈增大趋势, 至加载结束, 拱券收敛变形值缩小1.36%和扩大0.83%, 窑腿侧移角最大值为1/29。结合模型结构破坏程度、拱券收敛变形值和窑腿侧移角限值, 提出了震后模型的损伤控制指标和评估方法, 通过有限元软件ABAQUS验证了所提评估方法的合理性。

[关键词] 窑洞; 加固; 聚丙烯网; 水泥砂浆面层; 振动台; 试验; 抗震性能; 评估

[中图分类号] TU362; TU317⁺.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2097-0897(2025)24-0134-07

Evaluation Method of Seismic Performance of Damaged Brick Hoop Cave Dwelling Strengthened by Cement Mortar Coating with Polypropylene Packaging Belt Mesh

ZHOU Gengmin^{1,2}, HAN Luping^{1,2}, LIU Shengyu^{1,2}, ZHANG Wei³, TIAN Chongchong^{1,2},
LI Mingjun^{1,2}, WANG Jiongwen^{1,2}, LI Dong^{1,2}

(1. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China;

2. Shaanxi Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China;

3. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of the damaged brick hoop cave dwelling, the seismic reinforcement of a typical traditional brick hoop cave dwelling damage test model with a scale ratio of 1:4 was carried out by cement mortar coating with polypropylene packaging belt mesh. In the test, two natural waves and one artificial wave were selected as an earthquake input, analyzing the damaged form of the structural model, the arch convergence deformation, and the lateral angle of the cave leg. The results show that the weakness of the damaged brick hoop cave dwelling strengthened by cement mortar coating with polypropylene packaging belt mesh under the action of earthquake is located in the arch and cave leg; As the peak of the input acceleration continues to increase, the arch convergence deformation value and the lateral displacement angle of the cave leg is basically increasing. By the end of the load, the arch convergence deformation value is reduced by 1.36% and expanded by 0.83%, the maximum lateral angle of the cave leg is 1/29. Based on the degree of model structural damage, the convergence deformation value of the arch, and the limit value of the cave leg lateral displacement angle,

*陕西省重点研发计划(2025YS-01);陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(ZXZJ-2024-015);陕西省建筑科学研究院科研项目(2023-11-458, 2025-1-545)

[作者简介] 周庚敏, 硕士, 工程师, E-mail: 1301426962@qq.com

[收稿日期] 2025-03-11

damage control indicators and evaluation methods for post-earthquake models were proposed. The rationality of the proposed evaluation method was verified by finite element software ABAQUS.

Keywords: cave dwelling; strengthening; polypropylene mesh; cement mortar coating; shaking table; testing; seismic performance; evaluation

0 引言

窑洞是中国黄土高原地区一种典型的传统民居,根据其结构形式可分为独立式、下沉式和靠崖式。窑洞建筑不仅冬暖夏凉、绿色环保、低能耗,同时还具有取材方便、施工简单、建造成本低等优点,广泛分布在陕西、甘肃、山西和河南等地区,部分建于高烈度地区。文献[1]研究表明,窑洞建筑因缺乏科学的抗震构造措施,其抗震承载力较低,地震时易发生损毁,严重威胁人民生命和财产安全。

近年来,诸多学者针对建筑结构抗震性能评估方法的研究较多,其中刘晶波等^[2]采用结构损伤前后的刚度变化对结构损伤程度进行评估;朱红武等^[3]在模态弹塑性分析方法的基础上,提出模态损伤指标及其分析方法;黄志华等^[4]建立了双参数损伤指标的表达式,对结构的损伤程度进行评估。但针对窑洞抗震性能评估方法的研究极少,主要研究集中在窑洞结构薄弱区域、动力特性和滞回耗能方面。王飞剑等^[5-6]采用数值模拟方法对比窑洞最大竖向位移下结构损伤情况,确立窑洞损伤指标量化值,研究了窑洞外形特征对结构抗震性能的影响规律,结果表明,具有合理拱曲线的窑洞其抗震性能优于一般形状窑洞;陈国兴等^[7]总结了黄土崖窑洞的历史震害治理经验,提出了地震时崖坡临界高度的估算方法;郭平功等^[8]采用 FLAC2D 软件模拟横向地震对黄土窑洞稳定性的影响,结果表明,最先出现塑性区域且塑性应变最大的区域在窑腿;童丽萍等^[9]采用有限元软件 ABAQUS 对生土地坑窑结构进行整体建模,研究了各级开挖卸载下的应力、位移及塑性区发展,结果表明,窑腿和拱顶是主要承力部位;张风亮等^[10-11]通过振动台试验研究了独立式石箍窑洞缩尺比例为 1:4 简化模型的破坏形态,结果表明,地震作用下独立式石箍窑洞拱顶与中窑腿根部为结构抗震薄弱区域,采用聚丙烯打包带网水泥砂浆面层对缩尺比例为 1:4 的震后残损砖箍窑洞模型进行抗震加固,并对其进行振动台试验,结果显示加固后结构具有较大抗扭刚度,抗震性能和耗能能力显著提升,同时具有极其明显低成本优势。

随着国家实施“美丽乡村”建设、高烈度区农房抗震加固等重大战略的不断纵向推进,亟待对其抗

震性能评估方法及理论进行深入研究,以填补该空白领域。

为此,本文基于课题组前期开展的聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞振动台试验,对加固模型震后损伤性能指标进行分析研究,提出基于拱券收敛变形和窑腿侧移角的损伤控制指标和评估方法,为加固震后独立式砖箍窑洞的抗震性能评估和后续持续加固提供参考。

1 试验概况

1.1 模型加固

以山西汾西地区典型单层三连孔砖箍窑洞为研究对象,该地区设防烈度为 8 度(0.20g),场地类型为Ⅲ类。考虑到边界条件、动力平衡方程和运动的初始条件相似关系^[12],以及考虑振动台尺寸,根据当地施工工艺按缩尺比例为 1:4 建造独立式砖箍窑洞,建在砌筑钢筋混凝土条形基础梁上,具体尺寸如图 1 所示,根据动力相似关系实施三维振动台试验^[11]。

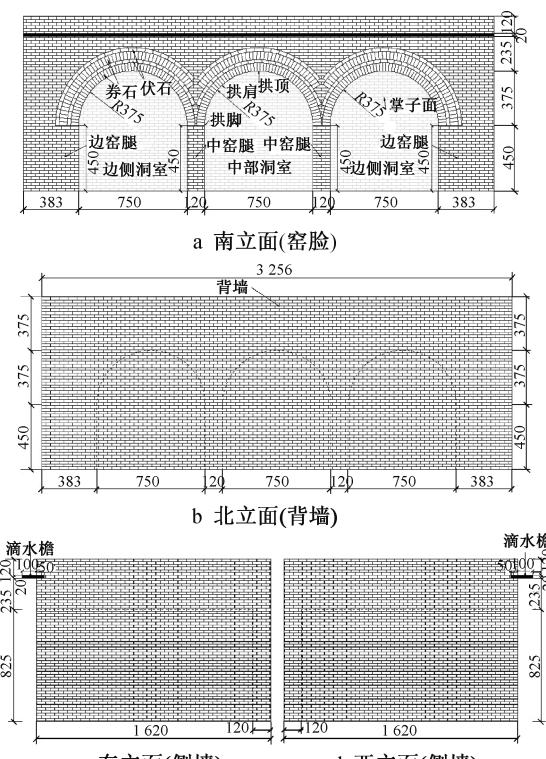


图 1 独立式砖箍窑洞试验模型

Fig. 1 Test model of independent brick hoop cave dwelling

为了模拟地震,通过振动台试验对独立式砖箍窑洞进行加载,当输入峰值加速度(PGA)加载至0.8g时,模型结构失去承载力,扭转破坏明显,结构损毁严重,最大裂缝宽度达5mm^[11]。

为探究聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞的抗震性能,对残损模型结构损伤部位进行注浆(胶)或封缝修补,采用打包带(宽8mm、厚0.6mm、50mm×50mm网格状)和水泥砂浆面层对残损砖箍窑洞进行加固,如图2所示。通过材性试验得出打包带力学性能抗拉强度均值为1 185.2N,打包带耐久性能抗拉强度均值为1 108N,水泥砂浆抗压强度为9.4MPa^[11]。



图2 独立式砖箍窑洞加固后模型

Fig. 2 Model of reinforced independent brick hoop cave dwelling

1.2 地震波选取与加载工况

该地区设防烈度为8度(0.20g),场地类型为Ⅲ类,依据GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》(2024年版)的规定,采用时程分析法选取3条地震波,分别为2条自然波(El Centro Array #9波、LA-Hollywood波)和1条人工波对模型结构进行三维地震激励(x, y, z 向),其加速度反应谱与规范设计反应谱相近^[11]。模型结构输入加载工况共分12级,分别为 $PGA = 0.036g, 0.01g, 0.14g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g, 1.0g, 1.4g$ 。

2 加固模型损伤及其评估指标与方法

2.1 试验模型损伤情况

由试验模型损伤结果可知,聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞模型结构在地震作用下破坏较严重的部位为拱券、窑腿、窑脸和侧墙,其中最薄弱的部位为拱券和窑腿(见图3)^[11]。

参考GB/T 24335—2009《建(构)筑物地震破坏等级划分》,砌体房屋破坏划分为5个等级:①基本完好,主要承重墙体基本完好,屋盖和楼盖完好,个别非承重构件轻微损坏,结构使用功能正常;②轻微破坏,承重墙无破坏或个别有轻微裂缝,屋盖和楼盖完好,部分非承重构件有轻微损坏,或个别有明显破坏;③中等破坏,多数承重墙出现轻微

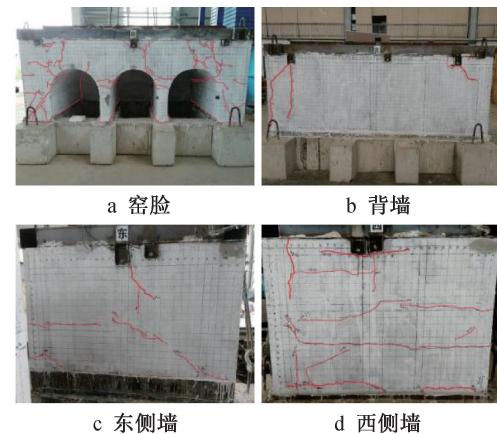


图3 模型的裂缝分布

Fig. 3 Crack distribution of the model

裂缝,部分墙体有明显裂缝,个别墙体有严重裂缝,个别屋盖和楼盖有裂缝,多数非承重构件有明显破坏;④严重破坏,多数承重墙有明显裂缝,部分有严重破坏,如墙体错动、破碎、内外倾斜或局部倒塌,屋盖和楼盖有裂缝,非承重构件破坏严重,如非承重墙体成片倒塌;⑤毁坏,多数墙体严重破坏,结构濒临倒塌或已倒塌,结构使用功能不复存在,已无修复可能。结合试验现象,对加固后砖箍窑洞地震破坏等级进行划分,当模型输入 $PGA = 0.036g \sim 0.4g$ (原型 $PGA = 0.018g \sim 0.2g$)时,结构处于基本完好状态;加载至 $PGA = 0.5g \sim 0.60g$ (原型 $PGA = 0.25g \sim 0.3g$)时,结构处于轻微破坏状态;加载至 $PGA = 0.7g \sim 0.8g$ (原型 $PGA = 0.35g \sim 0.4g$)时,结构处于中等破坏状态;加载至 $PGA = 0.9g \sim 1.0g$ (原型 $PGA = 0.45g \sim 0.50g$)时,结构处于严重破坏状态;加载至 $PGA = 1.4g$ (原型 $PGA = 0.70g$)时,结构处于毁坏状态。

2.2 抗震性能损伤控制指标

试验现象表明,聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固砖箍窑洞结构在地震作用下薄弱部位为拱券和窑腿。拱券易产生损伤的原因是,在水平地震作用及法向土压力作用下,拱券的抗剪承载力较小,致使拱券发生损伤。窑腿易产生损伤的原因为:①对于单层砖箍窑洞来说,在水平地震作用下,窑腿所受地震剪力最大,易发生剪切破坏;②特殊的拱券式构造形式使得结构质量主要集中于窑腿上部的拱券及覆土,抗侧刚度沿竖向形成“头重脚轻”的不利布置,从而导致窑腿产生裂缝。本文为了研究砖箍窑洞抗震性能损伤控制指标,对拱券和窑腿变形损伤进行研究。

2.2.1 拱券变形损伤控制指标

为精确表达砖箍窑洞拱券的损伤性能,本文采

用拱券的收敛变形值评判砖箍窑洞拱券在地震作用下的变形控制指标,拱券收敛变形值计算公式如下:

$$\Delta = \frac{l_t - l}{l} \quad (1)$$

式中: Δ 为收敛变形值; l_t 为拱顶与拱脚在 t 时刻距离; l 为加载前拱顶与拱脚距离。

由于边拱脚的位移响应强于中拱脚,所以采用西洞拱顶与边拱脚间变形进行分析。由于仪器布置限制,假定西洞拱顶与边拱脚竖向位移不变,结构只在水平方向产生位移,加固砖箍窑洞拱顶与拱脚在 t 时刻距离,如表 1 所示,每个工况拱券收敛变形值如图 4 所示。由图 4 可知,加固结构随着输入峰值加速度的不断加大,在 $PGA = 0.6g$ 前,拱券收缩变形值持续增加,拱券最大收缩变形值增至 0.73%;在 $PGA = 0.5g$ 前,拱券扩大变形值持续增加,拱券扩大变形值增至 0.62%,这是由于结构本身刚度较大,内部未出现较大损伤; $PGA = 0.6g \sim 0.7g$,拱券收缩变形值由 0.73% 变小至 0.56%; $PGA = 0.5g \sim 0.6g$,拱券收缩变形值由 0.62% 变小至 0.47%,这是由于砖拱券与其上部覆土脱开,在地震作用下上部覆土与砖拱券来回碰撞,约束了砖拱券的变形,导致砖拱券的收缩变形变小; $PGA = 0.7g \sim 1.4g$,收缩变形值随着地震动作用的增加而变大;加载至 $PGA = 1.4g$,拱券扩大变形值由 1.08% 大幅度变小至 0.83%,说明拱券发生了破坏。最终,加载至结束时($PGA = 1.4g$),收缩最大变形值及扩大最大变形值分别为 1.36%,1.08%。

表 1 加固砖箍窑洞拱顶与拱脚在 t 时刻距离

Table 1 The distance between the arch crown and the arch foot of the strengthened brick hoop cave dwelling at time t

PGA	原距离	t 时刻距离 mm	
		最小	最大
0.036g	530.330	530.158	530.436
0.1g	530.330	529.955	530.600
0.14g	530.330	529.808	530.731
0.3g	530.330	529.339	531.079
0.4g	530.330	528.959	531.846
0.5g	530.330	527.042	533.619
0.6g	530.330	526.463	532.843
0.7g	530.330	527.378	532.861
0.8g	530.330	526.075	534.189
0.9g	530.330	526.049	533.693
1.0g	530.330	523.722	536.040
1.4g	530.330	523.112	534.757

结合试验模型损伤情况可知,输入峰值加速度加载至 $PGA = 0.4g$ 时,拱券和拱脚间最大值间距为

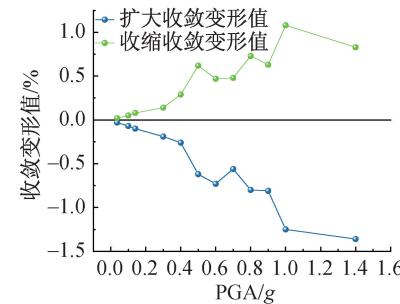


图 4 加固砖箍窑洞拱券收敛变形值

Fig. 4 The convergence deformation values of strengthened brick hoop cave dwelling arch

531.846mm,收敛变形值扩大 0.29%;最小值间距为 528.959mm,收敛变形值收缩 0.26%,此时结构处于基本完好状态。加载至 $PGA = 0.6g$ 时,拱券和拱脚间最大值间距为 532.843mm,收敛变形值扩大 0.47%;最小值间距为 526.463mm,收敛变形值收缩 0.73%,此时结构处于轻微破坏状态。加载至 $PGA = 0.8g$ 时,拱券和拱脚间最大值间距为 534.189mm,收敛变形值扩大 0.73%;最小值间距为 526.075mm,收敛变形值收缩 0.80%,此时结构处于中等破坏状态。加载至 $PGA = 1.0g$ 时,拱券和拱脚间最大值间距为 536.040mm,收敛变形值扩大 1.08%;最小值间距为 523.722mm,收敛变形值收缩 1.25%,此时结构处于严重破坏状态。加载至 $PGA = 1.4g$ 时,拱券和拱脚间最大值间距为 534.757mm,收敛变形值扩大 0.83%;最小值间距为 523.112mm,收敛变形值收缩 1.36%,此时结构处于毁坏状态。

2.2.2 窑腿侧移角损伤控制指标

为精确表达砖箍窑洞窑腿的损伤性能,本文采用窑腿侧移角 θ 评判窑腿在地震作用下的变形控制指标,经分析边拱脚的位移响应强于中拱脚,所以采用西洞边拱脚与基础相对最大位移和窑腿高度的比值分析窑腿侧移角。

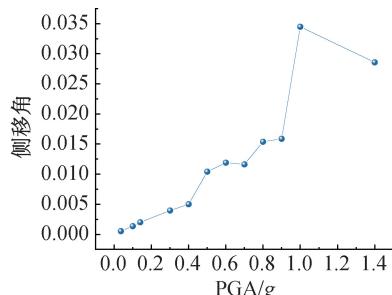
模型结构关键部位西洞边拱脚相对于基础在不同工况作用下 x 向位移最大值(相对位移最大值取单向、双向和三向地震作用中的最大值)如表 2 所示,相对应的窑腿侧移角(拱脚-基础相对最大位移与窑腿高度比值)如图 5 所示。由图 5 可知,随着输入峰值加速度的不断加大,拱脚相对于基础最大位移基本呈增大趋势,即结构变形增大,窑腿侧移角也随之增大。

结合模型试验损伤情况可知,加载至 $PGA = 0.4g$ 时,窑腿侧移角为 1/200,此时结构处于基本完好状态;加载至 $PGA = 0.6g$ 时,窑腿侧移角为 1/84,

表 2 加固砖箍窑洞拱脚-基础 x 向相对最大位移

Table 2 The relative maximum displacement of arch foot-foundation in x direction of strengthened brick hoop cave dwelling

PGA	窑腿高度	拱脚-基础相对最大位移 mm
0.036g	450	0.239
0.100g	450	0.614
0.140g	450	0.901
0.300g	450	1.786
0.400g	450	2.267
0.500g	450	4.695
0.600g	450	5.376
0.700g	450	5.229
0.800g	450	6.933
0.900g	450	7.158
1.000g	450	15.392
1.400g	450	12.964

图 5 加固砖箍窑洞窑腿侧移角 θ Fig. 5 The lateral displacement angle θ of the cave leg for strengthened brick hoop cave dwelling

此时结构处于轻微破坏状态;加载至 $PGA = 0.8g$ 时,窑腿侧移角为 $1/65$,此时结构处于中等破坏状态;加载至 $PGA = 1.0g$ 时,窑腿侧移角为 $1/29$,此时结构处于严重破坏状态;加载至 $PGA = 1.4g$ 时,窑腿侧移角为 $1/35 < 1/29$,此时结构处于毁坏状态,由于结构发生严重破坏,结构耗能能力变差,变形能力严重降低。

2.3 震后抗震性能评估方法

结合试验及分析结果可知,结构处于毁坏状态时的拱券收敛变形值和窑腿侧移角不能代表最终真实状态,故本文将抗震性能水准分为 A, B, C, D 4 个等级,分别对应结构处于基本完好状态、轻微破坏状态、中等破坏状态和严重破坏状态下震后损伤性能评估。

采用拱券收敛变形值和窑腿侧移角限值对聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞震后抗震性能进行评估(见表 3)。

3 抗震性能评估分析

3.1 有限元模型建立

采用有限元分析软件 ABAQUS 进行建模,本文

表 3 加固砖箍窑洞震后抗震性能评估参数

Table 3 Seismic performance evaluation parameters of strengthened brick hoop cave dwelling after earthquake

抗震性能水准	破坏等级	拱券收敛变形值 Δ		窑腿侧移角 θ
		收缩	扩大	
A	基本完好	$\Delta \leq 0.26\%$	$\Delta \leq 0.29\%$	$\theta \leq 1/200$
B	轻微破坏	$0.26\% < \Delta \leq 0.56\%$	$0.29\% < \Delta \leq 0.48\%$	$1/200 < \theta \leq 1/86$
C	中等破坏	$0.56\% < \Delta \leq 0.81\%$	$0.48\% < \Delta \leq 0.63\%$	$1/86 < \theta \leq 1/63$
D	严重破坏	$\Delta > 0.81\%$	$\Delta > 0.63\%$	$\theta > 1/63$

主要关注砖窑的宏观反应,故采用整体连续式模型建立聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞模型,该方法具有易于建模、计算量小等优点,可从宏观揭示窑洞的破坏机理。

窑洞模型分为 4 个非独立的模型进行建立,如图 6 所示。该模型分别为砖砌体、覆土、聚丙烯打包带网和水泥砂浆,其中砖砌体、水泥砂浆、覆土模型采用 C3D8R 单元类型,采用 Tie 进行约束;聚丙烯打包带网采用 3D shell 单元类型,采用嵌入式约束聚丙烯打包带网与水泥砂浆。

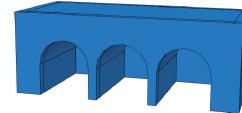


图 6 聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞有限元模型

Fig. 6 Finite element model of damaged brick hoop cave dwelling strengthened by cement mortar coating with polypropylene packaging belt mesh

砖砌体受压本构关系采用杨卫忠受压应力-应变曲线,受拉本构关系采用规范中混凝土的受拉本构模型;覆土土体本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型;水泥砂浆单轴受拉应力-应变关系上升段采用弹性模型,下降段采用 Hiberborg 的单直线下降式,水泥砂浆单轴受压应力-应变关系采取 Desai 和 Krishnan 提出的混凝土应力-应变关系。聚丙烯打包带的应力-应变本构关系简化为线弹性关系, $E = 1668 \text{ MPa}$ 。窑洞砖强度取 MU10, 水泥砂浆强度取 M2, 加固水泥砂浆强度取 M10, 聚丙烯打包带抗拉强度取 1 100N, 覆土材料物理参数取值为:弹性模量 23.58 MPa, 泊松比 0.25, 密度 1.8 g/cm³, 摩擦角 40.69°, 膨胀角 23.6°。

3.2 有限元模型评估分析

对该模型进行了模态计算,得到模型前两阶自振频率,如表 4 所示。 x 向平动自振频率大于 y 向平动自振频率,表明纵墙刚度大于横墙刚度。

表 4 频率分析结果

Table 4 Frequency analysis results

振型	频率 f/Hz	周期 T/s
一阶振型 y 向	15.05	0.066
二阶振型 x 向	17.52	0.057

本节分析在三向地震波 El Centro Array #9 波作用下模型的受拉塑性损伤, 输入峰值加速度分别为 $0.4g$ 、 $0.6g$ 、 $0.8g$ 、 $1.0g$, 得到各峰值加速度作用下模型受拉塑性损伤, 如图 7 所示。当 $\text{PGA} = 0.4g$ 时, 模型未发现明显损伤; 当 $\text{PGA} = 0.6g$ 时, 模型拱券、拱脚和窑腿出现损伤; 当 $\text{PGA} = 0.8g$ 时, 模型拱券、拱脚和窑腿的损伤加大, 背墙出现开裂现象; 当 $\text{PGA} = 1.0g$ 时, 模型拱券、拱脚和窑腿出现严重损伤。

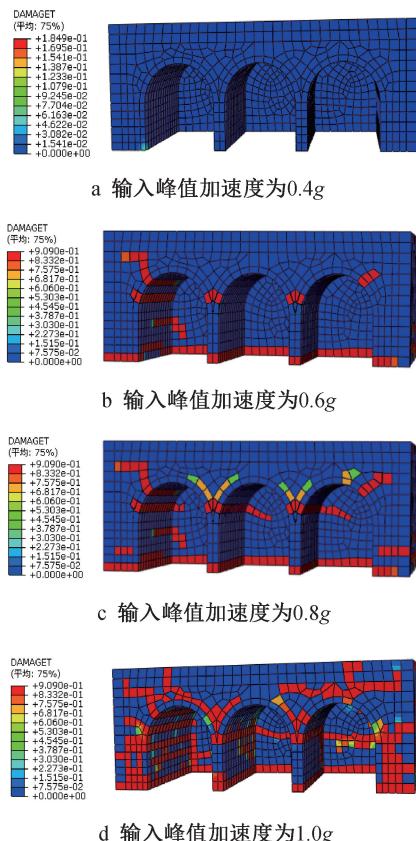


图 7 三向地震波 El Centro Array #9 波作用下有限元模型地震损伤

Fig. 7 Seismic damage of finite element model under the action of triaxial earthquake wave El Centro Array #9

3.2.1 拱券收敛变形值评估

经过对数值模拟分析分别得到西洞拱券、中洞拱券和东洞拱券收敛变形值, 如图 8 所示。当 $\text{PGA} = 0.4g$ 时, 拱券最大收敛变形值 $< 0.26\%$, 拱券最大扩大变形值 $< 0.29\%$, 其抗震性能水准为 A 级, 说明窑洞基本完好; 当 $\text{PGA} = 0.6g$ 时, 其抗震性能

水准为 B 级, 说明窑洞轻微破坏; 当 $\text{PGA} = 0.8g$ 时, 其抗震性能水准为 C 级, 说明窑洞中等破坏; 当 $\text{PGA} = 1.0g$ 时, 其抗震性能水准为 D 级, 说明窑洞严重破坏。这与振动台试验现象基本一致, 说明所提出的拱券收敛变形值损伤控制指标和评估方法合理。

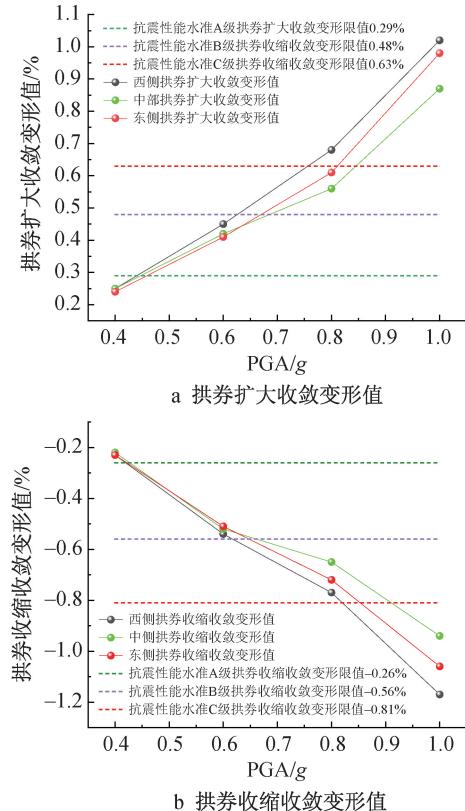


图 8 三向地震波 El Centro Array #9 波作用下拱券收敛变形值

Fig. 8 Convergence deformation values of the arch under the action of triaxial earthquake wave El Centro Array #9

3.2.2 窑腿侧移角评估

经数值模拟分析分别得到边窑腿和中窑腿侧移角, 如图 9 所示。当 $\text{PGA} = 0.4g$ 时, 窑腿侧移角最大值为 $1/200$, 其抗震性能水准为 A 级, 说明窑洞基本完好; 当 $\text{PGA} = 0.6g$ 时, 其抗震性能水准为 B 级, 说明窑洞轻微破坏; 当 $\text{PGA} = 0.8g$ 时, 其抗震性能水准为 C 级, 说明窑洞中等破坏; 当 $\text{PGA} = 1.0g$ 时, 其抗震性能水准为 D 级, 说明窑洞严重破坏。这与振动台试验现象基本一致, 说明所提出的窑腿侧移角损伤控制指标和评估方法合理。

4 结语

1) 在地震作用下, 聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞的薄弱点在拱券和窑腿, 并表明聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固法具有良好

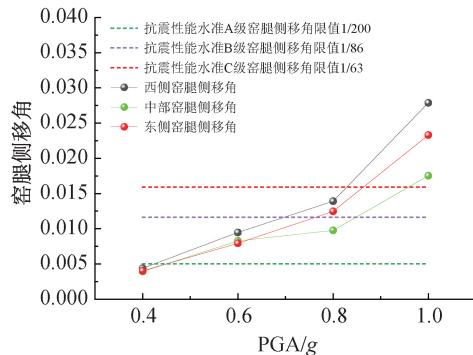


图 9 三向地震波 El Centro Array #9 波作用下窑腿侧移角

Fig. 9 Lateral displacement angles of the cave leg under the action of triaxial earthquake wave El Centro Array #9

的约束性能。

2) 随着输入峰值加速度的不断加大,拱券收敛变形值呈增大趋势。至加载结束时,拱券收敛变形值缩小 1.36%、扩大 0.83%。

3) 随着输入峰值加速度的不断加大,窑腿最大位移基本呈增大趋势,即结构变形逐步增大,侧移角也随之增大。至加载结束时,窑腿侧移角最大值为 1/29。

4) 结合结构模型破坏等级、拱券的收敛变形值和窑腿侧移角限值,对聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑提出了评估震后模型的损伤控制指标和评估方法,为加固震后独立式砖箍窑洞的抗震性能评估和后续持续加固提供参考。

5) 通过 ABAQUS 验证了本文所提出的基于拱券收敛变形和窑腿侧移角的损伤控制指标和评估方法的合理性。

参考文献:

- [1] 罗文豹. 黄土窑洞的抗震问题 [J]. 工程抗震, 1985, 7(4): 11-15.
- [2] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 循环往复加载的地下结构 Pushover 分析方法及其在地震损伤分析中的应用 [J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 21-28.
- [3] LIU J B, WANG W H, ZHAO D D, et al. Pushover analysis method of underground structures under reversal load and its application in seismic damage analysis [J]. China earthquake engineering journal, 2013, 35(1): 21-28.
- [4] 朱红武, 王孔藩, 唐寿高. 模态损伤指标及其在结构损伤评估中的应用 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1589-1592.
- ZHU H W, WANG K F, TANG S G. Modal damage index and its

application in structure damage assessment [J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(12): 1589-1592.

- [5] 黄志华, 吕西林, 周颖, 等. 高层混合结构地震整体损伤指标研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 170-177.

HUANG Z H, LÜ X L, ZHOU Y, et al. Studies on global seismic damage indices of high-rise hybrid structures [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2010, 38(2): 170-177.

- [6] 王飞剑, 刘如山, 马朝晖. 窑洞外形特征对结构抗震性能影响研究 [J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 910-918.

WANG F J, LIU R S, MA Z H. Effect of cave dwelling shape on the seismic performance of structures [J]. China earthquake engineering journal, 2018, 40(5): 910-918.

- [7] 王飞剑, 刘如山, 马朝晖. 独立式窑洞在地震作用下损伤指标的分析 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 281-286.

WANG F J, LIU R S, MA Z H. Damage measures analysis of independent cave dwelling under earthquake [J]. Science technology and engineering, 2018, 18(15): 281-286.

- [8] 陈国兴, 张克绪, 谢君斐. 黄土崖窑洞抗震性能分析 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995(1): 15-22.

CHEN G X, ZHANG K X, XIE J F. Aseismic performance analysis of the cave dwelling on the loess precipice [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995(1): 15-22.

- [9] 郭平功, 童丽萍. 横向地震对黄土窑洞稳定性的影响 [J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(6): 56-63.

GUO P G, TONG L P. Influence of crosswise earthquake on loess cave dwellings' stability [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2015, 35(6): 56-63.

- [10] 童丽萍, 柳帅军. 减法荷载生土地坑窑结构的非线性有限元分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 14-20.

TONG L P, LIU S J. Structural nonlinear finite element analysis for subtraction load underground cave dwelling [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2011, 28(2): 14-20.

- [11] 张风亮, 潘文彬, 刘祖强, 等. 独立式石箍窑洞振动台试验研究 [J]. 工程力学, 2023, 40(2): 85-96.

ZHANG F L, PAN W B, LIU Z Q, et al. Study on shaking table test of freestanding stone cave dwelling [J]. Engineering mechanics, 2023, 40(2): 85-96.

- [12] 张风亮, 周庚敏, 薛建阳, 等. 聚丙烯打包带网水泥砂浆面层加固残损砖箍窑洞振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 113-124.

ZHANG F L, ZHOU G M, XUE J Y, et al. Shaking table test on damaged brick hoop caves strengthened by cement mortar coating with polypropylene packing belt meshes [J]. Journal of building structures, 2021, 42(12): 113-124.

- [13] 迟世春, 林少书. 结构动力模型试验相似理论及其验证 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 11-20.

CHI S C, LAM S S E. Validation of similitude laws for dynamic structural model test [J]. World information on earthquake engineering, 2004, 20(4): 11-20.