

# 支撑失效下预应力钢板带-砖砌体 组合墙墙变形特性

郝卫东, 李鉴奇

(河北工程大学 建筑与艺术学院, 河北 邯郸 056000)

**摘要:**为深入探究预应力钢板带加固技术在提升墙体承载力和降低变形程度方面的应用效果,探讨了支撑失效状态下预应力钢板带-砖砌体组合墙在施加荷载时的变形特性。在试验中,设计7个试件,均利用预应力钢板带实施加固,各自的加固情况不同。在试件制作中,实施底梁的浇筑后制作砖砌体墙,浇筑顶梁后对表面实施抹平处理,与底梁和砖砌体墙形成整体结构。将养护后的试件运至实验室中实施预应力钢板带加固。纵向钢板带的下料长度与墙体的高度保持一致。若需施加竖向预压应力,则下料长度会相应增加2或4 mm。横向钢板带与墙体的实际宽度相匹配。布设试验仪器与应变片并开始加载,直至组合墙体的支撑功能失效,停止试验加载。结果表明,墙体预应力钢板带的加固性能与墙体承载能力之间存在正相关关系;在墙体支撑失效前,曲线出现降低趋势,随后墙体支撑失效;较强加固性能的预应力钢板带可以降低墙体自身的应变值,即降低墙体自身的变形程度。预应力钢板带的应用能够显著增强墙体的整体刚度和稳定性。

**关键词:**支撑失效;预应力钢板带;底梁;顶梁;砖砌体墙;组合墙;墙变形特性

**中图分类号:**TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)04-1356-07

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240402

## Deformation characteristics of prestressed steel plate-brick masonry composite wall under support failure

HAO Wei-dong, LI Jian-qi

(School of Architecture and Art, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

**Abstract:** To investigate the application effect of prestressed steel plate strip reinforcement technology in improving the load-bearing capacity of walls and reducing the degree of deformation, the deformation characteristics of prestressed steel plate strip brick masonry composite walls under applied loads were investigated by considering the failure state of supports. In the experiment, 7 specimens were carefully designed and reinforced with prestressed steel plates, each with different reinforcement situations. In the production of specimens, after pouring the bottom beam, a brick masonry wall is made. After pouring the top beam, the surface is smoothed to form an overall structure with the bottom beam and brick masonry wall. Transport the cured specimens to the laboratory for reinforcement with prestressed steel plates. The

收稿日期:2024-04-06.

基金项目:河北省社会科学基金项目(HB20SH015).

作者简介:郝卫东(1968-),男,副教授.研究方向:建筑设计及理论. E-mail: 986328101@qq.com

cutting length of the longitudinal steel plate strip should be consistent with the height of the wall. If vertical preloading stress is required, the cutting length will correspondingly increase by 2 or 4 mm. The horizontal steel plate strip matches the actual width of the wall. Install testing instruments and strain gauges, start loading until the support function of the composite wall fails, and stop the test loading. The results demonstrate a positive correlation between the reinforcement performance of prestressed steel plate strips on walls and the load-bearing capacity of the walls. Before the wall support fails, the curve shows a decreasing trend, followed by the failure of the wall support. A prestressed steel plate strip with strong reinforcement performance can reduce the strain value of the wall itself, that is, reduce the degree of deformation of the wall itself. The application of prestressed steel plate strips can significantly enhance the overall stiffness and stability of walls.

**Key words:** support failure; pre stressed steel plate strip; bottom beam; top beam; brick masonry walls; composite wall; wall deformation characteristics

## 0 引言

随着建筑技术的不断发展,传统砖砌体结构已经难以满足复杂多变的工程需求。因此,研究和开发新型复合墙体材料和技术,以提高墙体的抗变形能力、承载力和抗震性能,成为当前建筑领域的重要课题<sup>[1]</sup>。

已有学者提出关于建筑结构变形特性的分析,如:文献[2]运用有限单元法建立数值模型模拟分析基坑开挖过程,施工过程中全程监测地下连续墙围护结构变形与地表沉降,结合实测与计算结果证实了模型的有效性,并揭示了阳角部位变形规律;文献[3]利用LS-DYNA有限元软件,模拟了建筑结构框架在不同比例距离的远爆荷载下的动力响应,得出了不同比例距离下的损伤状态;文献[4]基于拟静力试验和数字图像相关法,对预应力节段拼装桥墩的变形分量进行量测分析,结果表明桥墩整体变形中底接缝转动占比最大,其他变形成分影响较小,为桥墩变形能力及抗震性能分析提供了重要参考。

预应力钢板带-砖砌体组合墙作为一种新型复合墙体结构,兼具钢板带的高强度、高韧性和砖砌体的良好保温、隔音性能,展现出优良的综合性能。然而,这种新型墙体的变形特性尚未得到充分研究,特别是在支撑失效等极端情况下,墙体的变形特性及受力机理尚未得到充分揭示。深入研究预应力钢板带-砖砌体组合墙的变形特性,可以更加准确地评估其在实际工程中的表现,为优化设计提供依据。本文通过系统的试验和理论分析,揭示预应力钢板带-砖砌体组合墙的变形特性

及其影响因素,旨在为该类墙体的工程应用提供理论支持和指导。

## 1 试验材料

### 1.1 试件设计

本实验共设计7个试件(编号E-1~E-7),均采用钢板带加固。在试验中,涉及的试验参数包括墙体的负荷水平、钢板带加固情况等。

试件选用强度等级为MU25的实心烧结普通砖,其实际测量尺寸为230 mm×100 mm×45 mm。在砌筑过程中,采用M7.5强度等级的砂浆。完成砌筑后,砖砌体墙的设计尺寸为825 mm×230 mm×1 205 mm。

为简化砖砌体墙的施工流程、加固操作、运输过程以及试验加载步骤,在墙体顶部和底部设计了钢筋混凝土的顶梁与底梁<sup>[5]</sup>。这些梁采用C30强度的混凝土制成,确保了结构的稳固性和安全性。详细的试件设计图如图1所示。

试件E-1和E-2均采用竖向预应力钢板带实施墙体加固。其中,对试件E-1施加的预应力为50 MPa,对试件E-2施加的预应力为100 MPa<sup>[6]</sup>。试件E-1在砖砌体墙的两个面上分别安装2条纵向钢板带和2条横向钢板带。为了产生50 MPa的竖向预压应力,竖向钢板带的下料长度需要比墙体实际高度多2 mm,这考虑了应力损失和施工误差等因素;而横向钢板带则不施加预拉应力,只需将拉螺栓拧紧至钢板带与墙面平行即可。在施加预应力的过程中,为减少拉螺栓对钢板带变形的限制,每条竖向钢板带均钻设3个椭圆孔,而每条横向钢板带则钻设3个圆孔,并安装

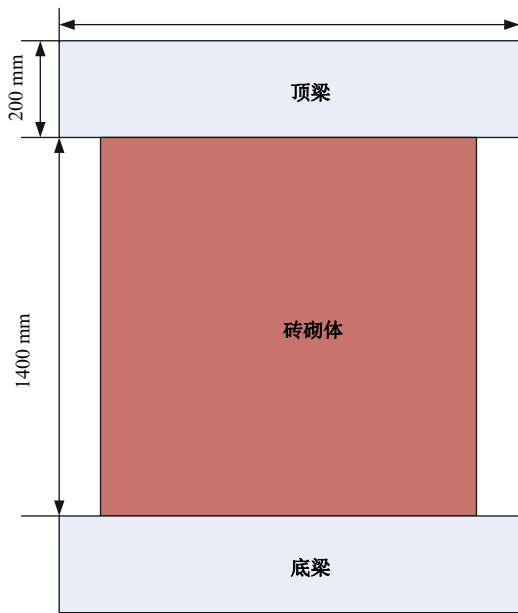


图1 砖砌体墙立面图

Fig. 1 Vertical view of brick masonry wall

相应的对拉螺栓<sup>[7]</sup>。试件E-2的加固方法与试件E-1相似,但由于需要施加的竖向预压应力更大,其竖向钢板带的下料长度需要比墙体实际高度多4 mm。

试件E-3采用横向预应力钢板带实施加固,对横向钢板带施加20 MPa预拉应力。在墙体两个面上分别安装2条纵向钢板带和2条横向钢板带。这些钢板带的下料长度均需精确匹配墙体的实际高度和宽度。在钢板带的孔洞处理上,在每条竖向钢板带上钻设3个圆孔,而每条横向钢板带则钻设3个椭圆孔,并安装相应的对拉螺栓。通过拧紧这些对拉螺栓,可确保纵向和横向钢板带都能与墙面紧密贴合<sup>[8]</sup>。这种横向紧固作用将在横向钢板带中产生所需的预拉应力。

试件E-4~E-7均为在负荷状态下采用预应力钢板带实施墙体加固的试件。其中,试件E-7的墙体特别选用M7.5级砂浆砌筑。在加固过程中,试件E-4、E-5和E-7分别承受约20%、40%和20%的砖砌体墙轴向承载力作为竖向压力,并对竖向钢板带施加50 MPa的预压应力。对于各试件,在墙体的两个面上分别安装2条横向钢板带和2条纵向钢板带。为了产生纵向预压应力,使竖向钢板带的下料长度比墙体实际高度多2 mm,而横向钢板带的长度则与墙体的实际宽度相匹配<sup>[9]</sup>。在钢板带的孔洞处理上,在每条竖向钢板带上钻设3个椭圆形孔,在每条横向钢板带则钻设3个圆

孔,并安装相应的对拉螺栓。试件E-6在加固前需承受约20%的砖砌体墙轴向承载力的竖向压力。加固时,对横向钢板带与竖向钢板带分别施加20、50 MPa的预压应力。同样地,在墙体的两个面上安装2条横向钢板带和2条纵向钢板带<sup>[10]</sup>。竖向钢板带的下料长度也需要比墙体实际高度多2 mm。在钢板带的孔洞处理上,在每条竖向和横向钢板带上均钻设3个椭圆形孔,并安装对拉螺栓。通过横向紧固对拉螺栓在竖向钢板带上产生纵向预压应力,通过拧紧横向钢板带上的对拉螺栓使钢板带紧密贴合墙面,从而产生预拉应力。

## 1.2 制作与养护过程

### 1.2.1 制作过程

首先,实施底梁的浇筑。按照设计图要求,精确确定底梁的位置和尺寸。准备C30强度的混凝土材料,并确保混凝土搅拌均匀,无杂质。在浇筑前,对底梁模板实施清理,确保表面干净,并湿润模板以增强混凝土与模板的黏结力<sup>[11]</sup>。浇筑过程中,要控制混凝土的浇筑速度和均匀性,确保底梁内部无空洞或缺陷。浇筑完成后,对底梁表面实施抹平处理,使其平整光滑。

其次,开始制作砖砌体墙。在砌筑前,将砂浆搅拌均匀。在砌筑过程中,要确保每层砖块水平放置,砂浆填充均匀且饱满。使用专用的砌筑工具压实,以提高墙体的密实性和稳定性<sup>[12]</sup>。同时,要注意控制墙体的垂直度和水平度,确保墙体整体平整、垂直。砖砌体墙的砌筑效果如图2所示。

最后,实施顶梁的浇筑。按照设计图的要求,

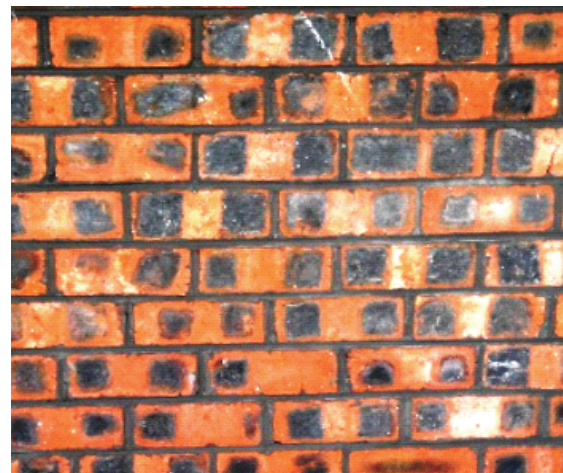


图2 砖砌体墙的砌筑效果

Fig. 2 Masonry effect of brick masonry walls

精确确定顶梁的位置和尺寸。准备C30强度的混凝土材料,并实施必要的清理和湿润处理。浇筑过程中,同样要控制混凝土的浇筑速度和均匀性,确保顶梁内部无空洞或缺陷。浇筑完成后,对顶梁表面实施抹平处理,并与底梁和砖砌体墙形成整体结构<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 养护过程

试件的养护对于确保砖砌体墙的质量和性能至关重要,在施工完成后,应立即开始养护工作。首先,对梁和砖砌体墙的表面实施喷水保湿,使混凝土和砂浆保持湿润状态。其次,用湿布覆盖试件表面,以减少水分的蒸发,维持适宜的湿度条件。湿布应紧密贴合试件表面,避免产生空隙,有效维持湿润环境。在养护初期,应保持较高的喷水频率,确保试件表面始终保持湿润。随着养护时间的延长,可以适当减少喷水次数,但仍需保持试件表面的湿润状态。在养护过程中,还应注意避免试件受到阳光直射、强风直吹或雨水冲刷等不利因素的影响<sup>[14]</sup>。养护时间为7 d,以确保其达到足够的强度和稳定性。

### 1.3 预应力钢板带加固过程

将养护后的试件运至实验室中实施预应力钢板带加固。纵向钢板带的规格确定为1 205 mm×100 mm×5 mm,其下料长度与墙体的高度保持一致,若需施加竖向预压应力,则下料长度会相应增加2或4 mm,以适应预应力的需求。横向钢板带的尺寸为825 mm×100 mm×3 mm,确保与墙体的实际宽度相匹配。在加固工作开始前,先在砖砌体墙上下两端与混凝土梁的接触面上固定安装用于锚固竖向钢板带的横向角钢和定位螺栓。随后,根据各试件加固的需要,下料制作所需的竖向和横向钢板带,确保加固工作的顺利进行。

对于采用预应力钢板带实施加固的墙体,需要在施加预应力前实施一项关键预处理,即钢板带上应变片的粘贴。这些应变片需与数据采集仪连接,以确保数据的准确记录<sup>[15]</sup>。其中应变片的布置序号如图3所示。

在整个过程中,特别是在拧紧对拉螺栓以施加预应力的环节,需要密切关注各钢板带上应变数值的变化。通过这一方式,能够获得施加预应力效果的详实数据,为后续的分析 and 判断提供可靠依据。

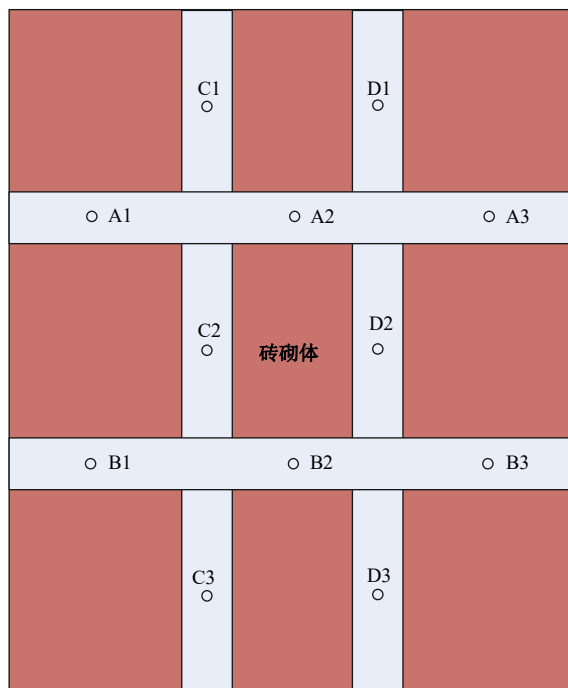


图3 应变片的布置序号

Fig. 3 Layout number of strain gauges

## 2 试验仪器与方法

### 2.1 试验仪器

在预应力钢板带-砖砌体组合墙墙变形特性的探究中,使用的试验仪器包括位移计、液压千斤顶等,具体如表1所示。

表1 使用的试验仪器

Table 1 Test instruments used

序号	试验仪器名称	型号	生产厂家
1	位移计	D55	欧尔博自动化科技有限公司
2	2 000 kN 液压千斤顶	EFSW588	南方液压工具制造有限公司
3	静态应变仪	RG1557	一洋应振测试技术有限公司
4	静态伺服液压控制台	XDW784	一洋应振测试技术有限公司

位移计的作用是测量抗倾覆位移与墙顶墙底相对位移,液压千斤顶的作用是施加竖向荷载与水平荷载,静态应变仪的作用是采集混凝土应变、预应力钢板带应变以及位移计数据,静态伺服液压控制台的作用是控制竖向荷载与水平荷载。

### 2.2 试验方法

在墙体前、后表面各布置3个应变片,测量墙体的应变值并取得均值。使用钢板带上的应变片持续测量加载后的应变,并在横向与纵向上取平均值。将位移计布置在墙体的正面上中下处并取平均值。

试验初始阶段,对组合墙体施加竖向荷载,加载速度设定为 20 kN/min,直至达到竖向荷载的 85%,并保持这一状态 10 min,使墙体充分适应荷载。随后,加载速度调整为 10 kN/min,直至达到预定的轴压力<sup>[16]</sup>。接着通过位移控制加载水平荷载,速度为 1 mm/min。每完成一级荷载加载后,给予墙体足够的持荷时间,确保不超过 10 min,并在此期间详细记录所有相关数据。在加载过程中,若荷载呈现下降趋势且无法再上升,或者试件出现显著的塑性变形,将加载速度提升至 2 mm/min。当接近极限值或墙体出现掉渣现象时,再将速度调整为 3 mm/min。整个加载过程将持续进行,直至组合墙体的支撑功能失效。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 荷载-位移曲线测试结果

测试荷载施加直到支撑失效情况下 7 个试件墙体的荷载-位移曲线,结果如图 4 所示。

在初始加载阶段,各试件的曲线呈现线性增长趋势。当墙体出现开裂后,曲线出现明显的转折点。这一变化主要是由于墙体开裂后,组合墙体的承载能力显著下降。随后,墙体中的预应力钢板带作为主要承载结构,开始发挥作用,使曲线再次上升,但斜率较之前有所减小,标志着墙体进入弹塑性阶段。进一步观察发现,墙体预应力钢板带的加固性能与墙体承载能力之间呈正相关关系,即墙体预应力钢板带的加固性能越强,墙体承载能力越强。在墙体支撑失效前,曲线出现了降低趋势,随后墙体支撑失效。

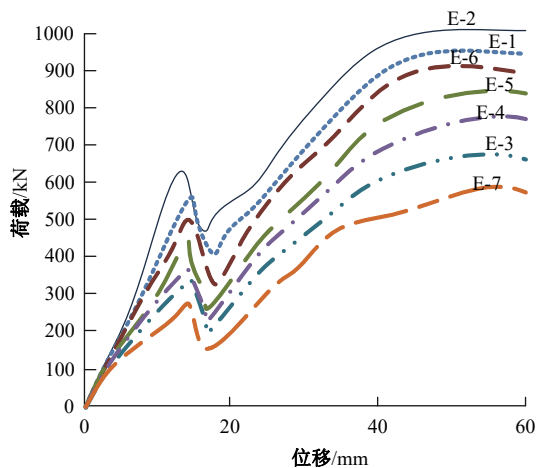
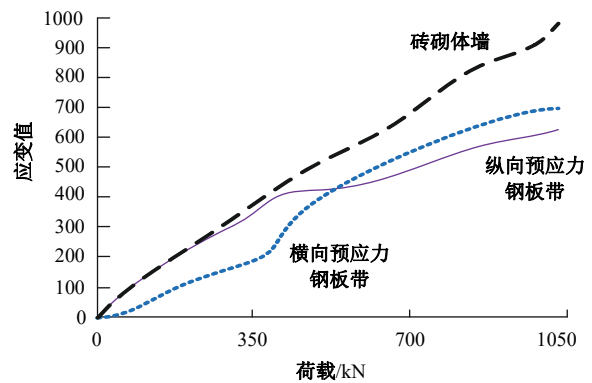


图 4 试件墙体的荷载-位移曲线

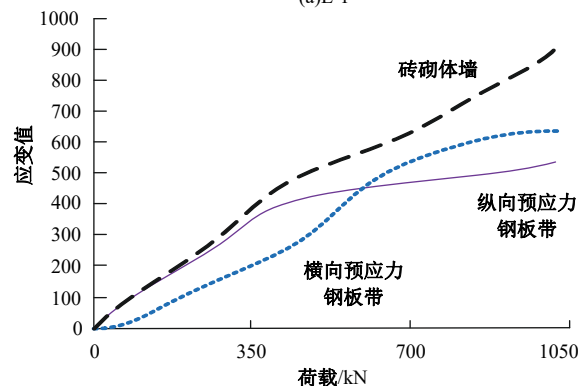
Fig. 4 Load displacement curve of specimen wall

#### 3.2 应力测试结果

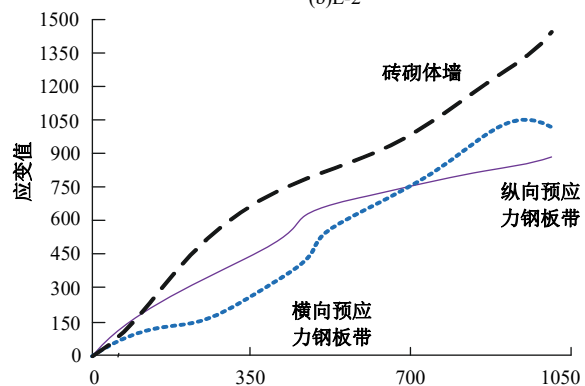
7 个试件墙体的应力测试结果如图 5 所示。



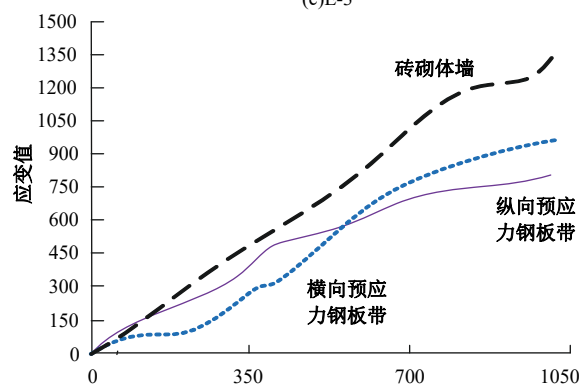
(a)E-1



(b)E-2



(c)E-3



(d)E-4

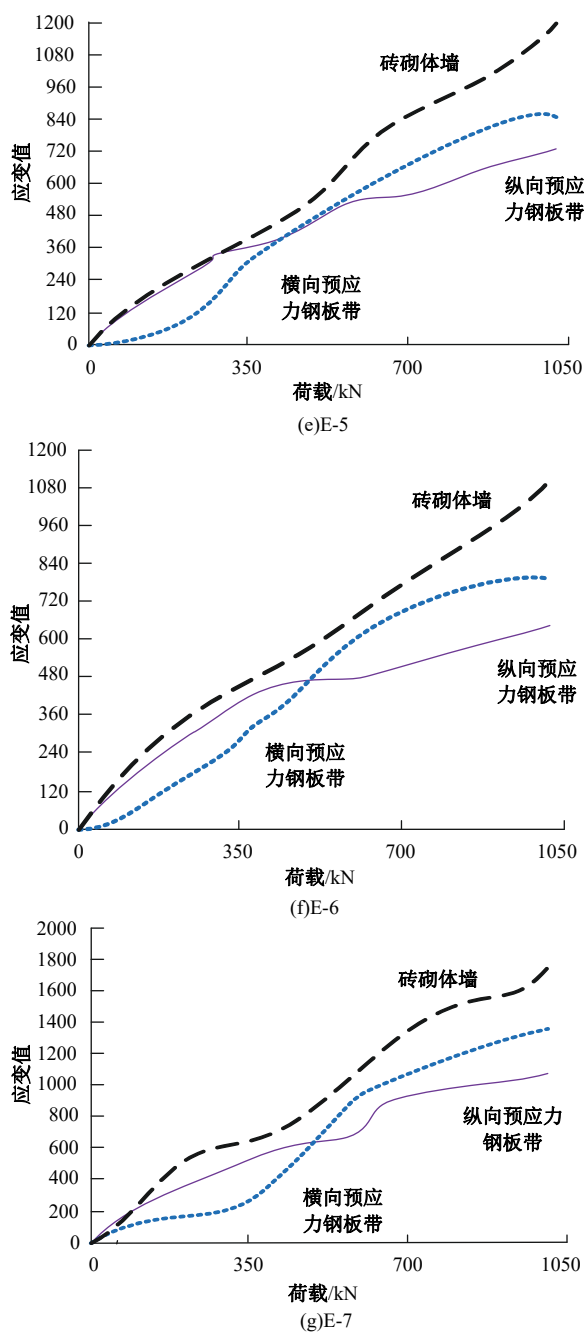


图5 应力测试结果

Fig. 5 Stress test results

由图5可知,试件墙体预应力钢板带的加固性能越强,其预应力钢板带的应变均值越小,即变形程度越低;而较强加固性能的预应力钢板带可以降低墙体自身的应变值,即降低墙体自身的变形程度。这说明预应力钢板带的应用显著增强了墙体的整体刚度和稳定性。通过预先施加应力,钢板带与砖砌体之间形成紧密的结合,有效分散和承受外部荷载,减少墙体的变形和位移。这种增强作用不仅提高了墙体的承载能力,还可以延长其使用寿命。

## 4 结论

(1)墙体在预应力钢板带加固下,初始阶段荷载-位移曲线呈现线性增长,开裂后曲线出现转折点,随后钢板带发挥主要承载作用。加固性能与承载能力正相关,支撑失效前曲线出现降低趋势。

(2)加固性能越强,钢板带应变均值越小,墙体变形程度越低。预应力钢板带显著增强了墙体的整体刚度和稳定性,有效分散和承受外部荷载,延长了墙体使用寿命。

### 参考文献:

- [1] 彭志明, 陈忠范, 徐志峰, 等. 不同截面冷弯型钢-泡沫混凝土组合墙体抗震性能[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2023, 53(5): 783-793.  
Peng Zhi-ming, Chen Zhong-fan, Xu Zhi-feng, et al. Seismic performance of cold-formed steel-foam concrete composite walls with different cross-sections [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2023, 53(5): 783-793.
- [2] 宋卓华, 张克胜, 翟浩博, 等. 软土地层深基坑阳角部位地下连续墙变形特性分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1):2491-2496.  
Song Zhuo-hua, Zhang Ke-sheng, Zhai Hao-bo, et al. Deformation characteristics of diaphragm walls at convex corners in deep excavations within soft soil strata[J]. Building Structure, 2022, 52(Sup. 1): 2491-2496.
- [3] 司豆豆, 潘钻峰, 曾滨, 等. 爆炸荷载作用下大跨预应力混凝土框架动力响应分析[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11):3-13.  
Si Dou-dou, Pan Zuan-feng, Zeng Bin, et al. Dynamic response analysis of long-span prestressed concrete frames under blast loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(11): 3-13.
- [4] 王东升, 陈贺, 李俭涛, 等. 基于DIC的预应力节段拼装桥墩变形成分分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2022, 38(5):821-829.  
Wang Dong-sheng, Chen He, Li Jian-tao, et al. Deformation component analysis of prestressed segmental bridge piers based on DIC[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science Edition), 2022, 38(5): 821-829.
- [5] Tripathi L, Behera B K. Comparative analysis of aluminium core honeycomb with 3D woven Kevlar honeycomb composite[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(14): 1697-1708.

- [6] 刘小良, 秘金卫, 陈佑童, 等. 土岩组合深基坑围护结构受力与变形特性分析:以青岛海天中心深基坑为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6):2549-2557.  
Liu Xiao-liang, Mi Jin-wei, Chen You-tong, et al. Mechanical and deformation characteristics of retaining structures in soil-rock composite deep excavations: a case study of Qingdao Haitian Center deep excavation[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2549-2557.
- [7] 成怡冲, 张日红, 王奎华, 等. 考虑桩-桩剪切作用的连锁墙时空变形分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3768-3778.  
Cheng Yi-chong, Zhang Ri-hong, Wang Kui-hua, et al. Spatiotemporal deformation analysis of interlocking walls considering pile-to-pile shear effects[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(10): 3768-3778.
- [8] Senthilkumar R, Karunakaran P, Chandru U. Progress and challenges in double skin steel-concrete composite walls: a review[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2023, 8(1): 1-74.
- [9] 马书文, 卢谅, 王宗建, 等. 落石冲击下预应力加筋土路堤变形及荷载传递机制[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 799-809.  
Ma Shu-wen, Lu Liang, Wang Zong-jian, et al. Deformation and load transfer mechanism of prestressed reinforced earth embankment under rockfall impact[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 799-809.
- [10] Barkhordari M S. A modeling strategy for predicting the response of steel plate-concrete composite walls[J]. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 2023, 11(2): 43-63.
- [11] 刘冲. 新元煤矿软岩段井筒破坏机理及综合修复技术[J]. 煤炭工程, 2022, 54(12): 37-43.  
Liu Chong. Failure mechanism and comprehensive rehabilitation technology of shaft in soft rock strata of Xinyuan Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2022, 54(12): 37-43.
- [12] 涂正楠, 吴羿君, 冯君, 等. 基于FEM-SPH耦合方法的挡土墙墙后土体变形破损研究[J]. 山地学报, 2023, 41(2): 243-253.  
Tu Zheng-nan, Wu Yi-jun, Feng Jun, et al. Study on deformation and failure of backfill soil behind retaining wall based on FEM-SPH coupling method. [J]. Journal of Mountain Science, 2023, 41(2): 243-253.
- [13] 张良, 吴边, 张凤亮, 等. 波形钢板加强的钢管混凝土组合剪力墙抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 146-155.  
Zhang Liang, Wu Bian, Zhang Feng-liang, et al. Seismic performance analysis of concrete-filled steel tube composite shear walls reinforced with corrugated steel plates[J]. Industrial Construction, 2022, 52(10): 146-155.
- [14] 冷伍明, 姚康, 门小雄, 等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4):1347-1358.  
Leng Wu-ming, Yao Kang, Men Xiao-xiong, et al. Analysis of deformation characteristics of coastal deep foundation pits considering engineering pile effects[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1347-1358.
- [15] 向朱锋, 徐金明. 悬挂式止水帷幕条件下深基坑开挖变形特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 96-106.  
Xiang Zhu-feng, Xu Jin-ming. Study on deformation characteristics of deep foundation pit excavation under suspended waterproof curtain conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 96-106.
- [16] 曲烽豪, 尹世平, 王飞, 等. 纤维编织网增强混凝土双面加固不同损伤程度砌体墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增刊1): 83-91.  
Qu Feng-hao, Yin Shi-ping, Wang Fei, et al. Experimental study on seismic performance of masonry walls with different damage levels strengthened by textile-reinforced concrete on both sides[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup. 1): 83-91.