

DOI:10.11918/202405012

# 衬垫法加固地下连续墙接缝防水与力学性能试验

钟紫蓝<sup>1</sup>, 郭栋<sup>1</sup>, 张卜<sup>1</sup>, 张亚波<sup>1</sup>, 王鸿鹏<sup>2</sup>, 孟啸<sup>3</sup>

(1. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学), 北京 100124;

2. 深圳市巍特环境科技股份有限公司, 广东 深圳 518112; 3. 中铁建设集团有限公司, 北京 100041)

**摘要:** 地下连续墙作为截水、防渗、承重、挡水结构, 在深基坑工程中应用前景广泛。为提高地下连续墙接缝开裂后的防水与力学性能, 采用高密度聚乙烯速格垫对4片带有接缝加固后的墙体和2片作为对比带有接缝未加固的墙体进行四点弯曲与注水加压试验。研究高密度聚乙烯速格垫以及植筋加固前后墙体的破坏形态、变形能力、承载能力和防水性能等。试验结果表明: 采用速格垫加固后的地连墙接缝, 能够显著提高承载能力及防水性能, 延缓墙体开裂, 并提高地连墙接缝的极限变形能力; 根据墙体接缝处“荷载-挠度”曲线, 将墙体承载力划分为初始开裂阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段; 当墙体达到裂缝发展阶段时, 需要及时考虑接缝漏水问题; 随着水压增大, 相同荷载条件下衬垫法加固前后墙体接缝的防水性能降低。

**关键词:** 地下连续墙; 高密度聚乙烯速格垫; 接缝加固; 防水; 力学性能

中图分类号: TU476.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)09-0130-10

## Experimental waterproofing and mechanical properties of liner-reinforced diaphragm wall joints

ZHONG Zilan<sup>1</sup>, GUO Dong<sup>1</sup>, ZHANG Bu<sup>1</sup>, ZHANG Yabo<sup>1</sup>, WANG Hongpeng<sup>2</sup>, MENG Xiao<sup>3</sup>

(1. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China; 2. Shenzhen Vicquick Environmental Technology Co., Ltd., Shenzhen 518112, Guangdong, China;

3. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100041, China)

**Abstract:** Diaphragm walls, as water interception, seepage control, load bearing, and water retaining structures, have many applications in deep foundations. To improve the waterproofing and mechanical properties of diaphragm walls after joint cracking, four-point bending, and waterproofing tests were carried out using high-density polyethylene corrosion protection liners on four pieces of wall with reinforced joints and two pieces of wall to compare with unreinforced walls with joints. To study the damage pattern, deformation capacity, load-bearing capacity, and waterproofing performance of walls before and after reinforcement with high-density polyethylene corrosion protection liners and reinforcement planting. The experimental results show that the diaphragm wall joints reinforced with corrosion protection liners can significantly improve the bearing capacity and waterproofing performance, postpone the concrete cracking, and increase the ultimate deformation capacity of the diaphragm wall joints. According to the “load-deflection” curve at the joints of the wall, the bearing capacity of the wall is divided into the initial cracking stage, the crack development stage, and the damage stage. When the wall reaches the cracking stage, the joint leakage problem must be considered quickly. As the water pressure increases, the waterproofing performance of the joints before and after corrosion protection liners decreases under the same loading conditions.

**Keywords:** diaphragm wall; high-density polyethylene corrosion protection liners; joint reinforcement; waterproofing; mechanical property

随着建筑行业的持续发展, 地下连续墙(简称“地连墙”)在房建、地铁等大型深基坑工程中得到越来越广泛的应用。近年来地连墙呈大深度、大厚度的发展趋势。采用连续墙槽段分开施工的方法,

虽然大大提高了地连墙施工的效率, 但同时地连墙接缝处渗水的机率也大大增加, 如何有效防止地连墙工字钢接缝处渗水的问题成为施工过程的重中之重<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2024-05-07; 录用日期: 2024-07-03; 网络首发日期: 2024-08-02

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240731.1702.004>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52378470); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52220105011)

作者简介: 钟紫蓝(1986—), 男, 副研究员, 博士生导师

通信作者: 张卜, zhangbu@bjut.edu.cn

由于施工及管理水平参差不齐,在基坑开挖后,地连墙经常会暴露出大面积露筋、夹渣、混凝土疏松、接缝夹泥、渗漏水,甚至更严重的质量缺陷。使工程风险增加,影响周边建筑物安全。因此,有必要对地连墙进行加固和止水处理以确保墙体的稳定性和防水性。目前,常用的接缝加固方法有增加连接钢筋、使用搭接板和加固钢筋笼。常用的接缝止水方法有注浆、橡胶密封条、灌浆和防水涂层。陈标<sup>[4]</sup>在开挖前对易出现渗漏的地连墙接缝采取预加强措施,采用大直径高压喷射注浆法工法对地连墙接缝进行预加强,有效提高了基坑地连墙接缝止水效果;李焕君等<sup>[5]</sup>针对开挖范围内地连墙大面积露筋、混凝土夹渣、少筋等严重缺陷,采用以地连墙为板、H型钢为次梁、支撑腰梁为主梁的空间结构加固体系,提高竖向围护结构的承载力;王兴国等<sup>[6]</sup>通过预张玻璃纤维增强塑料板粘贴加固钢筋混凝土梁试验,研究不同预应力水平的玻璃纤维增强塑料板对加固梁受弯性能的影响,试验结果表明,预应力粘贴法可以提高梁的受弯承载力,减小裂缝宽度;姜海波等<sup>[7]</sup>对底面外贴钢筋加固混凝土梁的抗弯性能进行试验研究,讨论加固试验梁在不同钢筋面积下的裂缝开展、刚度变化和承载力提高等情况,试验结果表明,底面外贴钢筋加固试验梁经加固后其开裂荷载、刚度和抗弯承载力均显著提高;Gong等<sup>[8]</sup>建立带有接缝的隧道非线性有限元模型,对隧道接缝张开量和接缝转角对防水能力的影响进行了量化,计算结果表明随着接缝张开量和接缝转角的增加,接缝的防水能力显著降低;Dimai<sup>[9]</sup>介绍了一种世界逐渐兴起的防腐保护衬垫(corrosion protection liners, CPL)的性能、测试安装以及工业化生产的过程,验证了该衬垫具有良好的抗渗性能;Loganathan等<sup>[10]</sup>在CPL的基础上提出了一种针对隧道防腐利用混凝土与HDPE或PVC衬垫现场浇筑的复合修复措施,并通过新加坡深埋隧道排水系统的案例说明了该方法的适用性与可行性;Li等<sup>[11]</sup>对CPL加固前后带有的球墨铸铁管进行足尺拟静力试验,研究接缝在纵向荷载和横向弯曲下的非线性行为,结果表明CPL加固后有效降低了试件本身的接缝张开量,具有较好的抗震性能;钟紫蓝等<sup>[12]</sup>采用柔性高密度聚乙烯速格垫作为内衬材料,并使用V型速格键与高徽浆进行贴合,对现有DN400球墨铸铁供水管道的承插式接口进行修复,进行拟静力拉拔与弯曲试验,得出CPL方法能显著提高管道接口的抗拉、抗弯承载力。

本文研究的衬垫加固方法指采用柔性的高密度

聚乙烯速格垫,将速格垫预制成相应规格并安装到位,通过对速格垫外部支模与压条锚固方法使其与待修复墙面充分贴合,采用灌浆料填充速格垫与墙面之间的空隙,使速格垫与原墙体形成一个整体,以达到对破坏墙体进行维护修复加固的作用。该方法结合了速格垫与高徽浆的优良性能,能够有效提高墙体承载能力、防渗漏性能与耐腐蚀性。对于衬垫加固法的研究,目前主要存在以下两个有待完善的方面:1)衬垫加固后地连墙的力学性能、破坏模式和失效判定准则等缺少量化衡量的指标;2)衬垫加固后地连墙接缝处防水性能的改善提升情况仍有待研究。

本研究针对经衬垫加固后带有接缝的地连墙进行一系列四点弯曲试验,试验在不同水压、有无植筋及衬垫加固情况下模拟地连墙试件在水土压力荷载综合作用下的受力与变形特征,量化分析衬垫加固后地连墙试件接缝处的力学性能和破坏模式以及加固后的防水性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

根据GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》<sup>[13]</sup>和GB 50108—2008《地下工程防水技术规范》<sup>[14]</sup>,本试验设计了3种类型地下连续墙进行分析,其中1类地连墙不粘贴速格垫,1类地连墙粘贴速格垫,1类地连墙在速格垫中放置钢筋网片,分别对比粘贴速格垫加固后的力学性能及防水效果。地连墙试件总体尺寸长2 m,宽1 m,高0.5 m。通过现浇后浇的形式将2幅地连墙节段构成1个整体,并在墙体接缝处安装H型止水钢板,地连墙总体尺寸示意图1(a)。为了对比不同加固方式下地连墙的防水与力学性能,试件DW1-Unpaste、DW2-Unpaste为地连墙未采取加固措施,作为试验对照组;试件DW1-CPL、DW2-CPL为单面粘贴速格垫加固;试件DW1-Steel、DW2-Steel为单面速格垫中放置钢筋网片加固,地连墙加固示意图1(b)。试件由现浇地连墙、H型钢和后浇地连墙3部分组成。首先,绑扎试件现浇地连墙侧钢筋笼,其中现浇地连墙水平钢筋焊接在H型钢上,H型钢高400 mm,宽300 mm,腹板厚10 mm,翼缘板厚16 mm,绑扎完成后支模,浇筑现浇地连墙混凝土。当现浇地连墙混凝土养护至一定强度后,进行后浇地连墙钢筋笼绑扎,支模以及浇筑,其中后浇地连墙水平筋搭接在工字钢上,地连墙试件配筋示意图见图1(c)。试件设计参数见表1。

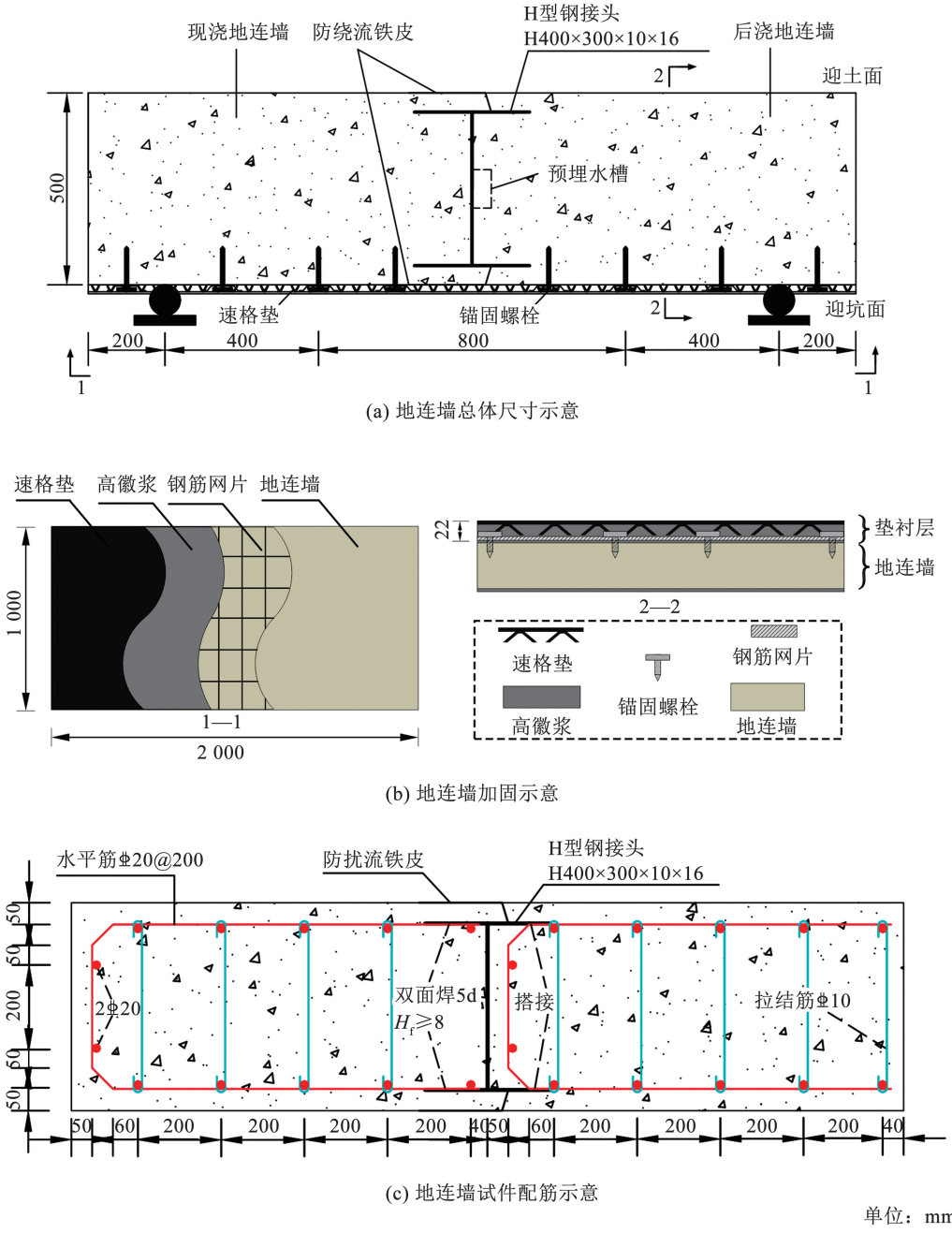


图 1 地连墙加固构造

Fig. 1 Diaphragm wall reinforcement construction

表 1 地连墙试件

Tab. 1 Diaphragm wall specimens

试件编号	水压/MPa	地连墙类型	试件个数
DW1-Unpaste	0.03	未粘贴速格垫	1
DW2-Unpaste	0.06	未粘贴速格垫	1
DW1-CPL	0.03	速格垫锚固	1
DW2-CPL	0.06	速格垫锚固	1
DW1-Steel	0.03	带有钢筋的速格垫加固	1
DW2-Steel	0.06	带有钢筋的速格垫加固	1

试件中心有预埋水槽,后浇段墙内预埋水管,一侧连接水槽,一侧连接注水管道和水压表,预埋水槽紧贴在 H 型钢腹板中心,直径为 100 mm。预埋水槽见图 2。

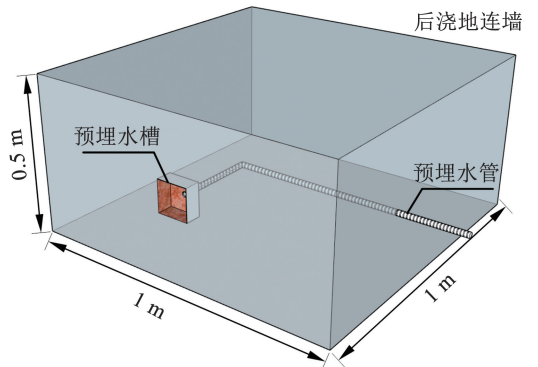


图 2 预埋水槽

Fig. 2 Pre-built sinks

## 1.2 材料力学性能

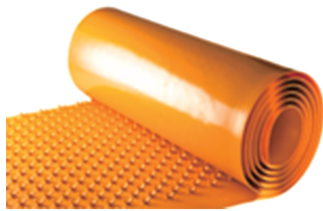
### 1.2.1 地连墙试件材料

本次试验中6个试件均采用C30混凝土,基于混凝土立方体试块标准抗压强度试验,根据GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[15]</sup>将试验结果的原始数据进行整理,6组试块测得的立方体抗压强度试验值分别为34.15、34.67、36.53、35.42、35.21和36.14 MPa,均符合C30混凝土的强度要求。6组地连墙试件均采用HRB400钢筋,通过钢筋拉拔试验仪器对HRB400级钢筋展开拉拔试验,研究钢筋受力性能,基于不同直径钢筋的拉拔试验,测得钢筋具有明显的弹性和屈服阶段,具体钢筋力学性能指标见表2。

表2 钢筋力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of steel bars

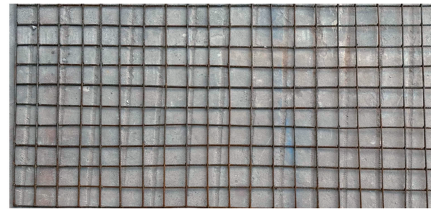
钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
10	434	650
20	425	595
22	423	591



(a) 速格垫



(b) 高微浆



(c) 钢筋网片

图3 地连墙加固材料

Fig. 3 Diaphragm wall reinforcing material

### 1.3 加固工艺

试件加工过程中采用速格垫对既有墙体进行单面加固<sup>[18-19]</sup>,并采用锚固螺栓、灌浆和植筋等连接措施保证墙片与速格垫之间的协同工作。待地连墙养护28 d,达到规范强度后,进行加固操作。首先是进行墙体打磨,增加混凝土与高微浆交界面黏结力,然后使用6.5 mm的锚固螺栓挂置钢筋网片,再使用锚固螺栓挂置速格垫和上部压条,进行初步定位,待定位完成后,在速格垫周围进行压条螺栓锚固,压条在进行灌浆时,可以防止灌浆压力过大速格垫膨胀以及增加速格垫与地连墙黏结力。待速格垫四周用压条锚固后,对压条打孔处以及压条边部涂抹防水胶,防止灌浆时渗漏。同时对速格垫上部以外的三边用堵漏王(速干型水泥)进行封堵,限制灌浆时浆体流出。之后进行支模,防止局部浆体压力过大,导致固化后速格垫表面不平整。然后将高微浆和水

### 1.2.2 地连墙加固材料

地连墙加固材料包括锚固螺栓、钢筋网片、速格垫、压条和高微浆。其中速格垫是一种薄壁、不透水的有机复合材料衬层,其防渗漏性能好、耐酸碱腐蚀、适应性强、施工快捷高效;高微浆主要由水泥、专用外加剂,以及多种矿物改性组分和分子聚合物材料配合组成,具有低水胶比、高流动性、零泌水、微膨胀、耐久性好的特点,施工时,直接加水搅拌使用;采用HPB235钢筋编制成的钢筋网片,尺寸2 000 mm × 1 000 mm,钢筋直径6 mm,钢筋间距100 mm。地连墙加固材料见图3。

通过加载速率下的材性试验<sup>[16]</sup>,发现速格垫的峰值应力在17左右,拉伸应变能达到700%,具有很好的拉伸性能;高微浆中水与砂浆配合比为100:27,根据GB/T 50081—2016《建筑砂浆基本性能试验方法标准》<sup>[17]</sup>,采用边长70.7 mm的立方体试块测得高微浆28 d抗压强度平均值为35 MPa;进行3组直径6 mm的HPB235钢筋拉拔试验,得出其平均屈服强度为261 MPa,平均抗拉强度为394 MPa。

按照质量比为100:27的比例混合,并采用手动搅拌机将浆液搅拌均匀,并保证高微浆液流动性良好,由于试件尺寸较小,采用人工注浆方式进行灌浆。最后进行试件的养护工作,养护28 d后进行试验。地下连续墙加固流程见图4。

### 1.4 加载方法与测点布置

试验采用单调加载方式,首先通过手动水泵手动加压,将水压控制在固定数值,试验过程中保持水压不变,然后通过竖向作动器分阶段控制试验加载位移大小,依次观察地下连续墙的渗水状态以及水压变化。加载程序分为2个阶段:1)施加水压,保持水压在固定值;2)按照不同阶段加载位移,每提高0.5 mm位移,观测到地连墙接缝处是否有水渗出,间隔5 min无水渗出进行下一级加载。水压加载装置与位移-时间关系见图5。

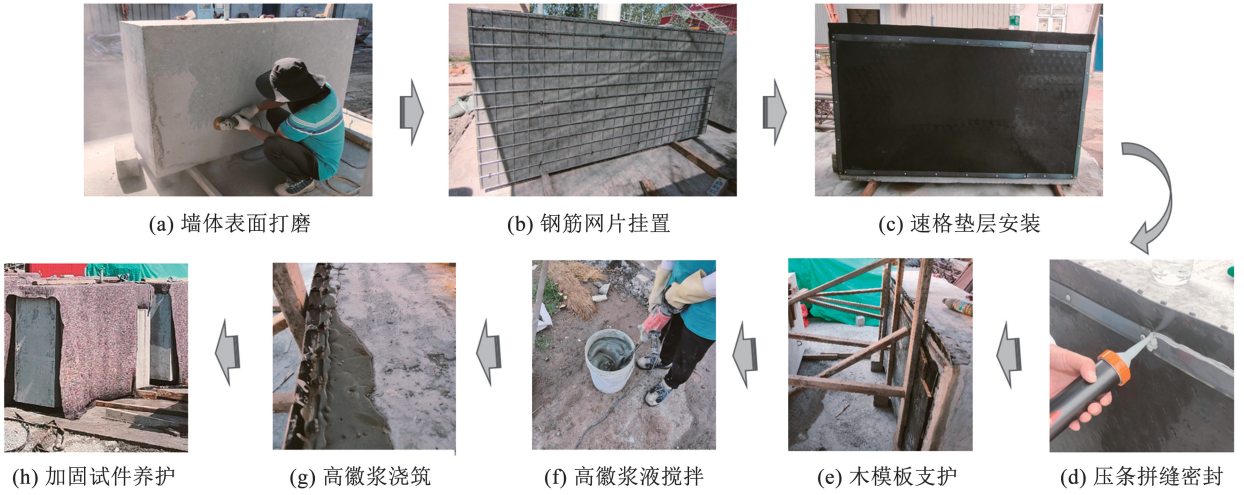
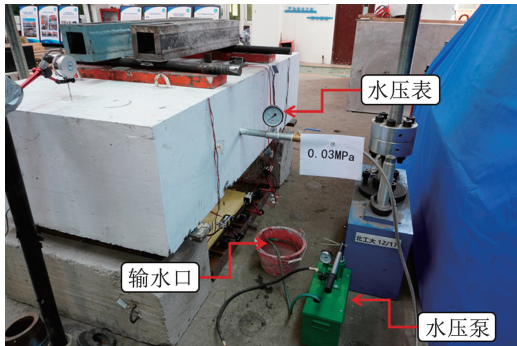
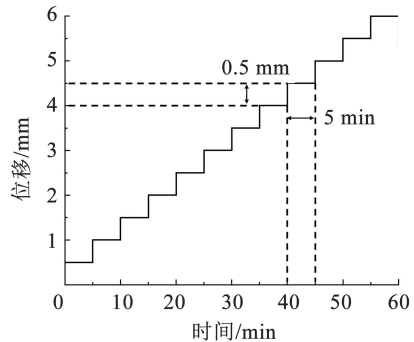


图 4 地连墙加固流程

Fig. 4 Diaphragm wall reinforcement process



(a) 地连墙接缝水压加载装置



(b) 作动器加载的位移-时间关系

图 5 地连墙接缝加载装置

Fig. 5 Diaphragm wall joint loading device

试验测量装置包括力传感器、顶杆位移计和拉线位移计。在跨中位置布置 1 个顶杆位移计,测量试件跨中位移;在加载点处各布置 1 个顶杆位移计,分析试件的整体挠度曲线;在支座处各布置 1 个顶杆位移计,测量支座处变形。在地连墙迎土面和迎坑面各布置 2 个拉线位移计,测量地连墙接缝张开

量及计算转角的大小。本试验采用 2 种不同水压分别进行试验(0.03 MPa 和 0.06 MPa),在地连墙侧面注水口处连接水压表用来监测水压变化的大小。在作动器上布置 1 个拉线位移计和力传感器,用来监测作动器加载位移的变化和加载力的大小。试验测量装置示意图 6。

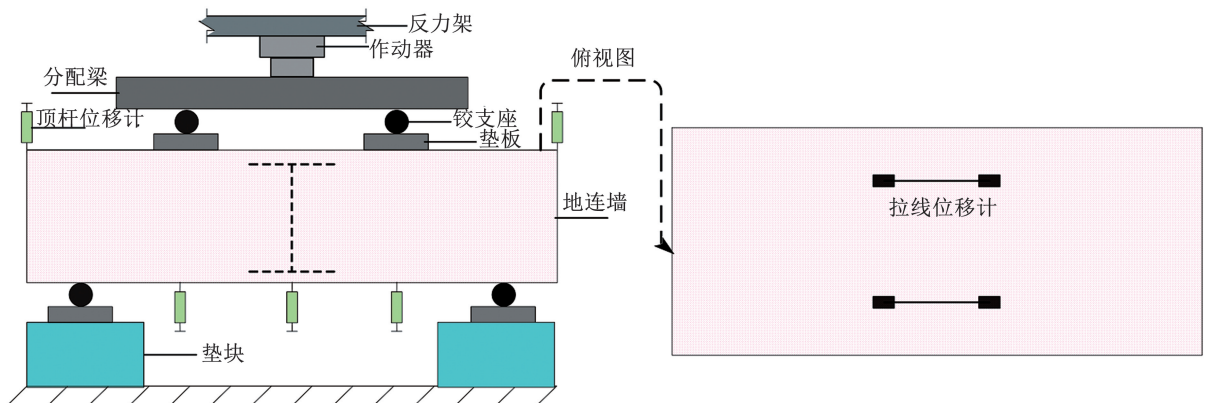


图 6 试验测量装置示意

Fig. 6 Schematic diagram of experimental measurement device

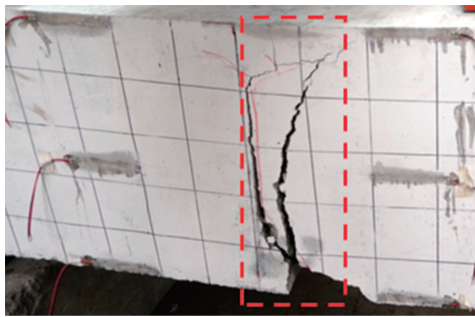
## 2 试验现象及破坏形态

### 2.1 未粘贴速格垫试件 (DW1-Unpaste、DW2-Unpaste) 试验现象

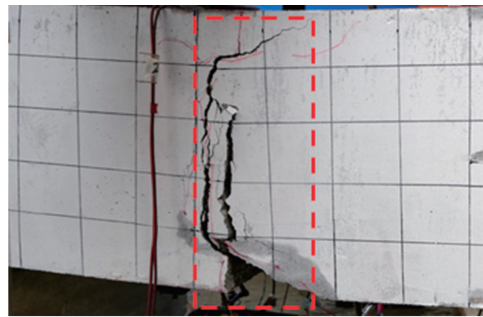
DW1-Unpaste 和 DW2-Unpaste 作为对照组,分别对应了 0.03 MPa 和 0.06 MPa 水压下未粘贴速格垫的地连墙试件。对于 DW1-Unpaste,当试件达到 357 kN 时,混凝土裂缝难以通过肉眼观测,钢筋有轻微异响。竖向荷载加载至 411 kN 时,试件发生脆性破坏,沿搭接侧工字钢内壁出现 1 条贯通裂缝,水压降为 0,底部裂缝宽度为 9.47 mm,力卸载至 101 kN。随后继续进行加载,随着右侧搭接钢筋被拉伸,竖向荷载出现不同程度卸载,竖向荷载加载至 200 kN 时,工字钢翼缘板搭接侧保护层部分脱落,底部裂缝宽度为 17.81 mm。竖向荷载加载至 288 kN 时,出现沿工字钢搭接侧翼缘板的 1 条贯通斜裂缝,力卸载至 92 kN。之后承载力缓慢增加,裂缝会出现较大扩展,试件达到最大裂缝宽度。对于

DW2-Unpaste,当试件小于 200 kN 时,混凝土裂缝难以通过肉眼观测,钢筋有轻微异响。竖向荷载加载至 396 kN 时,试件发生脆性破坏,沿搭接侧工字钢内壁出现 1 条贯通裂缝,水压降为 0,底部裂缝宽度为 7.50 mm,力卸载至 89 kN。随后继续进行加载,随着右侧搭接钢筋被拉伸,竖向荷载出现不同程度卸载,竖向荷载加载至 150 kN 时,工字钢翼缘板搭接侧保护层部分脱落,底部裂缝宽度为 10.83 mm。竖向荷载加载至 251 kN 时,出现沿工字钢搭接侧翼缘板的 1 条贯通斜裂缝。

未粘贴速格垫试件 DW1-Unpaste、DW2-Unpaste 的破坏形态为弯曲破坏,表现出明显的脆性特征,试件在开裂之前并无明显变化,待弯矩达到开裂要求后,作用在底部的受拉正应力较大,因此试件开裂首先从底部开展,开裂后随着弯矩的增大,裂缝沿跨中工字钢搭接侧薄弱面向上延伸,直到裂缝贯穿整个试件,墙体达到承载力极限状态,发生脆性破坏。DW1-Unpaste 和 DW2-Unpaste 的破坏形态见图 7。



(a) DW1-Unpaste



(b) DW2-Unpaste

图 7 未粘贴速格垫试件破坏形态

Fig. 7 Unpasteed corrosion protection liners specimen damage pattern

### 2.2 速格垫锚固试件 (DW1-CPL、DW2-CPL) 试验现象

DW1-CPL 和 DW2-CPL 分别对应 0.03 MPa 和 0.06 MPa 水压下速格垫锚固后的地连墙试件。对于 DW1-CPL,当试件达到 300 kN 时,速格垫边缘堵漏型水泥出现裂纹。竖向荷载加载至 518 kN 时,试件发生脆性破坏,沿搭接侧工字钢翼缘板出现 1 条斜裂缝,并通过工字钢腹板向上延伸,水压降为 0,底部裂缝宽度为 4.91 mm,力卸载至 254 kN。随着右侧搭接钢筋被拉伸,竖向荷载出现不同程度卸载。随后继续进行加载,竖向荷载加载至 415 kN 时,速格垫底部压条被拉伸,随后压条铆钉被拉断,力卸载至 353 kN,底部裂缝宽度为 20.52 mm。待竖向荷载稳定在 330 kN 左右时,裂缝发展成为沿工字钢内壁的贯通裂缝,达到最大裂缝宽度。对于 DW2-CPL,

当试件加载到 357 kN 时,钢筋有轻微异响,混凝土裂缝难以通过肉眼观测。竖向荷载加载至 503 kN 时,试件发生脆性破坏,沿搭接侧工字钢内壁出现 1 条贯通裂缝,水压降为 0,底部裂缝宽度为 4.07 mm,力卸载至 251 kN。随着右侧搭接钢筋被拉伸,竖向荷载出现不同程度卸载。随后继续进行加载,竖向荷载加载至 405 kN 时,速格垫底部压条被拉伸,随后压条铆钉被拉断,底部裂缝宽度为 25.50 mm。裂缝发展成为沿工字钢内壁的贯通裂缝,达到最大裂缝宽度。

速格垫锚固试件 DW1-CPL、DW2-CPL 的破坏形态为弯曲破坏,与未粘贴速格垫试件相比,脆性破坏有所改善,提高了开裂荷载及承载能力。DW1-CPL 和 DW2-CPL 的破坏形态见图 8。

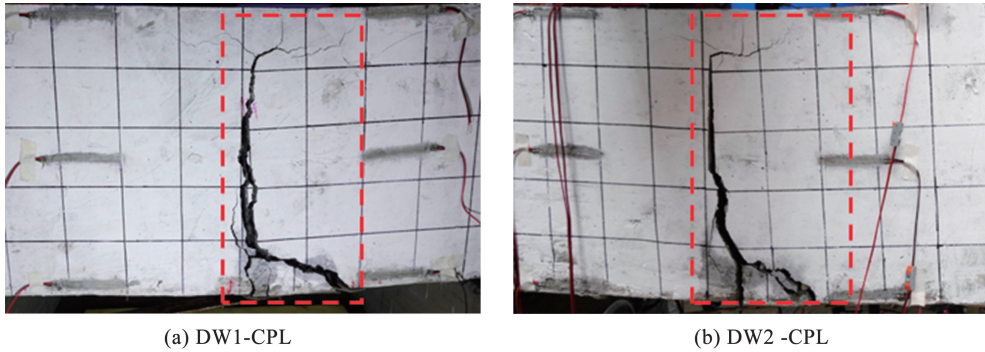


图 8 速格垫锚固试件破坏形态

Fig. 8 Corrosion protection liners anchorage specimen damage pattern

### 2.3 带有钢筋网片的速格垫锚固试件 (DW1-Steel、DW2-Steel) 试验现象

DW1-Steel 和 DW2-Steel 分别对应 0.03 MPa 和 0.06 MPa 水压下植筋后速格垫锚固的地连墙试件。对于 DW1-Steel, 当试件达到 381 kN 时, 搭接侧钢筋有异响, 速格垫边缘堵漏型水泥出现裂纹。竖向荷载加载至 491 kN 时, 试件发生脆性破坏, 沿搭接侧工字钢翼缘板出现 1 条斜裂缝, 并通过工字钢腹板向上延伸, 水压降为 0, 底部裂缝宽度为 0.69 mm, 力卸载至 403 kN。随后继续进行加载, 由于钢筋提高其试件底部的抗拉性能, 增加其承载力, 竖向荷载加载至 605 kN 时, 速格垫底部压条被拉伸, 随后压条铆钉被拉断, 力卸载至 309 kN, 底部裂缝宽度为 6.47 mm。竖向荷载加载至 300 kN 时, 裂缝发展成为沿工字钢内壁的贯通裂缝, 达到最大裂缝宽度。对于 DW2-Steel, 当试件加载到 400 kN 时, 搭接侧钢筋有异响, 速格垫边缘堵漏型水泥出现裂纹。竖向荷载加载至 480 kN 时, 试件发生脆性破坏, 水压降

为 0, 底部裂缝宽度为 0.11 mm, 力卸载至 426 kN。随后继续进行加载, 由于钢筋提高其试件底部的抗拉性能, 增加其承载力, 竖向荷载加载至 546 kN 时, 速格垫底部压条被拉伸, 随后压条铆钉被拉断, 力卸载至 441 kN, 底部裂缝宽度为 7.46 mm。随后竖向荷载继续加载至 533 kN, 钢筋网片中部分横向钢筋被拉断, 力卸载至 386 kN, 底部裂缝宽度为 12.75 mm。竖向荷载加载至 350 kN 时, 裂缝发展成为沿工字钢内壁的贯通裂缝, 达到最大裂缝宽度。

带有钢筋网片的速格垫锚固试件 DW1-Steel、DW2-Steel 的破坏形态为弯曲破坏, 与未粘贴速格垫试件相比, 脆性破坏得到明显改善, 大幅提高了开裂荷载及承载能力, 与粘贴速格垫试件相比, 提高了承载能力。进行的 6 个地连墙试件所发生的破坏模式均为脆性破坏, 试件接缝部位一开裂就会造成渗漏现象, 但经过粘贴速格垫以及植筋操作可大幅降低试件的脆性, 提高其开裂荷载和抗渗性能。DW1-Steel 和 DW2-Steel 的破坏形态见图 9。

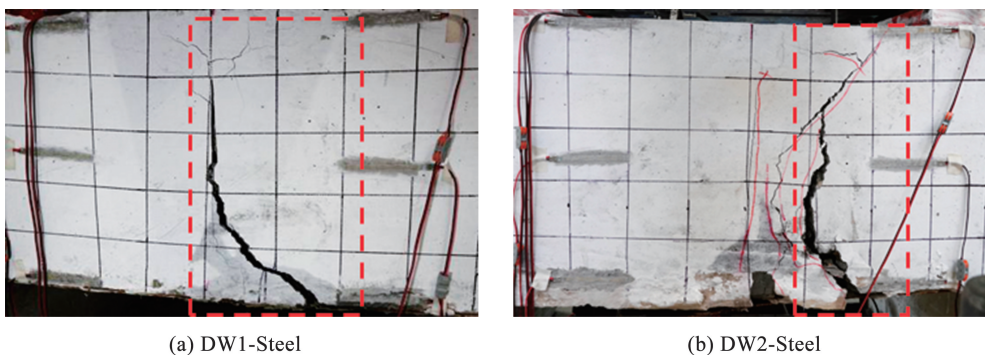


图 9 带有钢筋网片的速格垫锚固试件破坏形态

Fig. 9 Damage pattern of anchored specimens of corrosion protection liners with reinforcing steel mesh

## 3 试验结果及分析讨论

### 3.1 地连墙接缝处转角-弯矩关系

图 10 对比了 0.03 MPa 和 0.06 MPa 水压下未粘贴速格垫、粘贴速格垫以及钢筋网片加固后地连

墙接缝处转角-弯矩曲线。其中通过结构力学计算将作动器的位移与轴力换算为试件接缝处<sup>[20]</sup>的转角  $\theta$  与弯矩  $M$ , 具体通过式(1)~(4)进行换算:

$$M = \frac{F(L_2 + L_3)}{2} - \frac{FL_3}{2} = \frac{FL_2}{2} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \left[ \arctan\left(\frac{D_1}{L_1}\right) + \arctan\left(\frac{D_2}{L_2}\right) \right] / 2 \quad (2)$$

$$\theta_2 = \left[ \arctan\left(\frac{D_3}{L_3}\right) + \arctan\left(\frac{D_4}{L_4}\right) \right] / 2 \quad (3)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (4)$$

式中: $F$ 为作动器施加的力, $F/2$ 为两侧支座的反力, $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 和 $D_4$ 分别为支座两侧 $L_1$ 和 $L_2$ 对称位置处顶杆位移计测量值, $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为两幅墙体的试验转角, $\theta$ 为试件接缝处的转角,具体计算简图见图11。

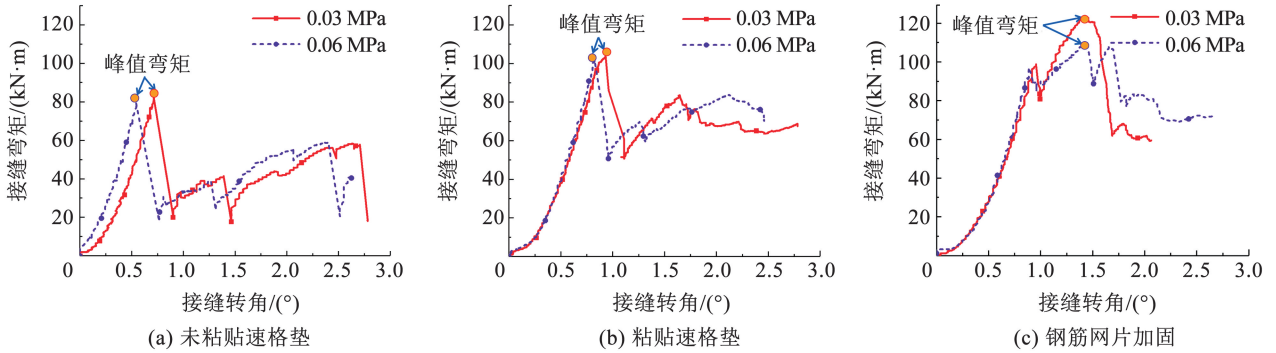


图10 地连墙接缝处转角-弯矩曲线

Fig. 10 Diaphragm wall joints corner-moment diagrams

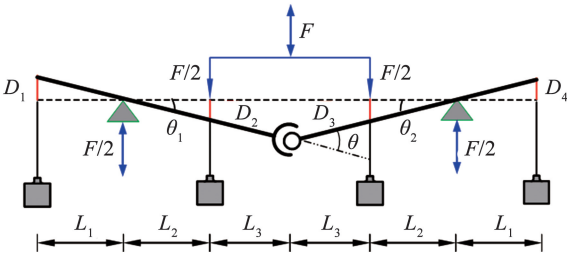


图11 弯矩与转角计算简图

Fig. 11 Sketch of bending moment and corner calculation at diaphragm wall joints

从图10可知,随着接缝的弯矩增加,转角角度增加。在0.03 MPa水压下,未粘贴速格垫、粘贴速格垫以及钢筋网片锚固后地连墙接缝处开裂弯矩分别为79.14、103.71、97.02 kN·m,钢筋网片锚固后地连墙接缝承载力较速格垫锚固后的试件承载力可提高至121.37 kN·m;在0.06 MPa水压下,未粘贴速格垫、粘贴速格垫以及钢筋网片锚固后地连墙接缝处开裂弯矩分别为82.20、100.67、98.24 kN·m,

钢筋网片锚固后地连墙接缝承载力较速格垫锚固后的试件承载力可提高至109.36 kN·m。0.03 MPa水压下,CPL承载力较未粘贴提高31.05%,对比未加固试件地连墙接缝处仅依靠钢筋搭接在工字钢以及混凝土受拉,CPL可以通过速格垫和压条共同作用提高底部地连墙抗拉性能;钢筋加固较未粘贴提高53.36%,主要是因为底部钢筋网整张锚固在地连墙底部,加强了地连墙接缝处的连接,大幅增加地连墙抗拉性能。0.06 MPa水压下,CPL承载力较未粘贴提高22.47%,钢筋加固较未粘贴提高33.04%。随着水压增加,同条件下试件承载力降低。

### 3.2 荷载-挠度关系

图12对比了竖向荷载作用下地连墙接缝处的荷载-挠度曲线,其中竖向荷载包含了竖向作动器施加的力以及分配梁自重。试验中地连墙接缝挠度由布置于跨中的顶杆位移计测得。

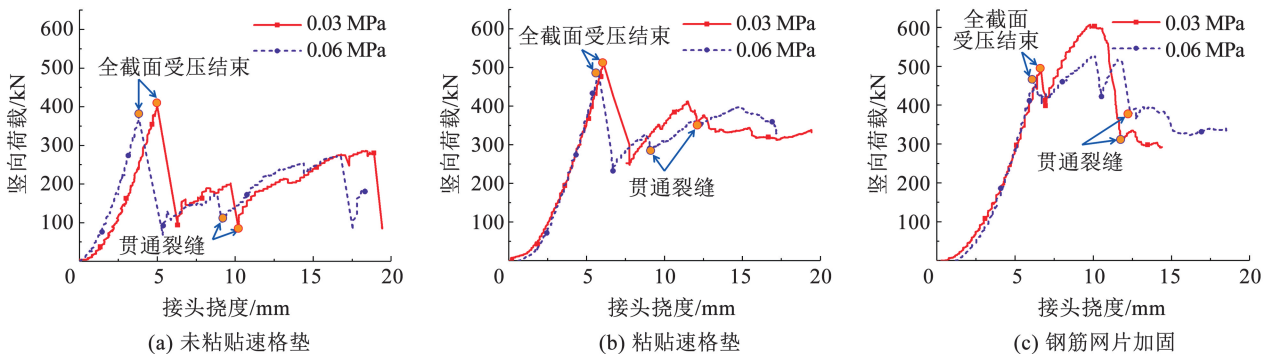


图12 地连墙接缝处荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection diagram at Diaphragm wall joints

从图 12 可知,带有接缝的地连墙试件具有明显的脆性破坏,在对试件进行粘贴速格垫后,承载力提高 20% 左右,植筋后进一步提高到 40% 左右,增加了试件延性。地连墙接缝处的荷载-挠度曲线划分为 3 个阶段。初始开裂阶段:竖向荷载不断增长,接缝挠度在未达到临界承载点时,产生的位移较小,接缝处于全截面受压阶段,达到临界承载点后,突然发生脆性破坏,接缝发生大规模开裂,接缝全截面受压结束。裂缝发展阶段:随着竖向荷载的继续增加,接缝全截面受压结束,受压区域减小,中性轴上移,期间随着右侧搭接钢筋不断拔出,承载力随着突然挠度增加表现出不同程度的卸力现象,直至右侧搭接钢筋滑脱,形成贯通裂缝。破坏阶段:右侧搭接钢筋出现滑脱后,接缝处混凝土大面积脱落,荷载缓慢增加,裂缝会出现较大扩展,随着裂缝的快速增加,接缝处因达到裂缝宽度限值而破坏。

### 3.3 防水失效时试件不同高度处接缝张开量

“防水失效”是指水压表水压显示为 0,地连墙接缝发生渗漏时的状态。绘制防水失效时试件不同高度处接缝张开量曲线,选取接缝顶部处张开量( $\Delta_1$ ),距接缝顶部 100 mm 处张开量( $\Delta_2$ ),接缝形心处张开量( $\Delta_3$ ),距接缝底部 100 mm 处张开量( $\Delta_4$ ),接缝底部处张开量( $\Delta_5$ )进行分析。在弯矩作用下,试件底部首先张开,图 13 以“-”为压缩变形,“+”为拉伸变形。当接缝处于“防水失效”状态时,相同水压条件下未粘贴速格垫试件的接缝张开量远大于粘贴速格垫和植筋的试件,表明粘贴速格垫和植筋可以提高地连墙试件接缝处的延性,能够更好地承受水压,减少混凝土的变形和开裂;随着水压增加,相同试件的接缝张开量降低,原因是随着水压增大,这使得接缝处的材料受到更大的挤压力,从而减小了接缝的张开量。

### 3.4 防水失效时试件承载力

根据试件接缝水压降至零点时的破坏情况绘制防水失效时试件承载力柱状图。当水位每增加 1 m,压强就会在增加 0.01 MPa,试验模拟了地下水位 3 m 和 6 m 时地连墙接缝处的防水情况。由图 14 析可知,相同水压下,试件的防水性能 CPL > Steel > Unpaste,随着水压的增大,试件的防水性能降低;以 0.03 MPa 水压下 3 种不同类型试件为例,DW1-CPL 防水失效时的荷载较 DW1-Unpaste 提高 26.03%,DW1-Steel 防水失效时的荷载较 DW1-Unpaste 提高 19.46%,DW1-Steel 防水失效时的荷载较 DW1-CPL 降低 5.21%,原因是 DW1-CPL 可以通过速格垫周边压条锚入墙体内部,以及高微浆与速格垫锚固键之间的共同作用,显著提高接缝处的

防水效果,DW1-Steel 较 DW1-CPL 由于植入钢筋网片,厚度达到 22 mm,导致速格垫与试件表面之间距离增加,防水失效时承载力略有降低。

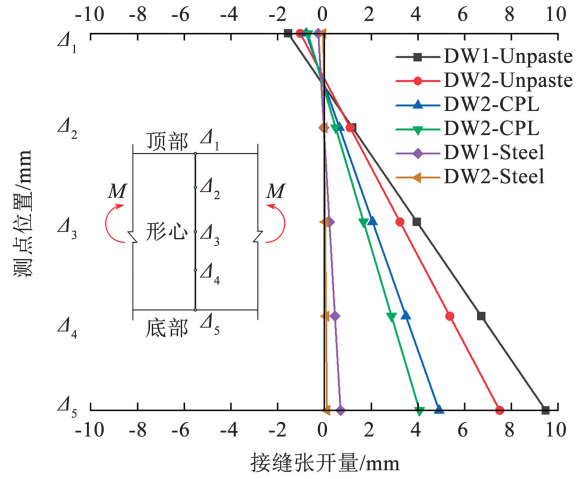


图 13 防水失效时试件不同高度处接缝张开量曲线

Fig. 13 Seam opening curves at different heights of the specimen in case of waterproofing failure

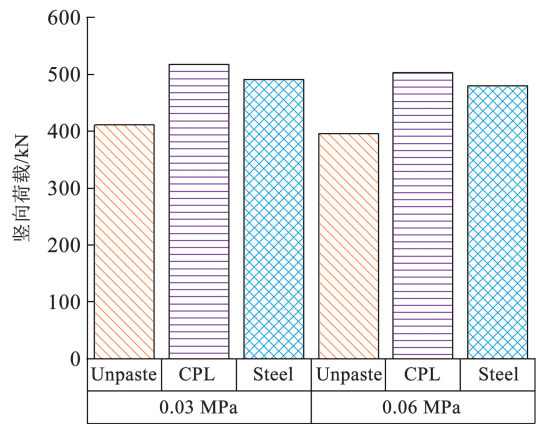


图 14 防水失效时试件承载力

Fig. 14 Vertical bearing capacity of specimen in case of waterproof failure

## 4 结 论

1) 未加固的地连墙试件发生脆性弯曲破坏,延性较差。采用 CPL 加固的试件,提高了其开裂荷载及承载能力,开裂荷载后,承载力下降缓慢,脆性明显降低。

2) CPL 加固可以提高损伤试件的峰值荷载。0.03 MPa 水压下,相较于未加固试件,仅粘贴速格垫和粘贴速格垫植筋后试件的峰值荷载分别提高了 31.05%、53.36%。

3) 根据地连墙接缝处的荷载-挠度曲线,划分为 3 个阶段:初始开裂阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段。对于处在地下水位以下的地连墙,当达到第二阶段,接缝全截面受压结束时,接缝处发生漏水,此

时需考虑地连墙的防水与加固问题。

4)相同水压下,试件的防水性能  $CPL > Steel > Unpaste$ ,随着水压的增大,试件的防水性能降低。0.03 MPa 水压下,相较于未加固试件,仅粘贴速格垫和粘贴速格垫植筋后试件的防水失效时的荷载分别提高了 26.03%、19.46%。

## 参考文献

- [1]钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945  
QIAN Qihu. Challenges and countermeasures for underground construction safety [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945
- [2]黄茂松,王卫东,郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 1461  
HUANG Maosong, WANG Weidong, ZHENG Gang. Advances in soft ground engineering and deep foundation pit research [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 146. DOI:10.15951/j.tmgxb.2012.06.019
- [3]徐中华,王建华,王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81  
XU Zhonghua, WANG Jinhua, WANG Weidong. Deformation characteristics of diaphragm walls in deep foundation pit projects in Shanghai area [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 81. DOI:10.15951/j.tmgxb.2008.08.013
- [4]陈标. 超深地下连续墙开挖前接缝预加固 RJP 工法桩应用与建议[J]. 工程质量, 2019, 37(8): 42  
CHEN Biao. Application and recommendation of RJP method piles for pre-reinforcement of joints before excavation of ultra-deep diaphragm walls [J]. Construction Quality, 2019, 37(8): 42
- [5]李焕君,张寒,李冰. 孟加拉某基坑工程地连墙安全评估及加固处理[J]. 建筑结构, 2022, 52(12): 139  
LI Huanjun, ZHANG Han, LI Bing. Safety assessment and reinforcement of diaphragm wall in a foundation pit project in Bangladesh [J]. Building Structure, 2022, 52(12): 139. DOI:10.19701/j.jzjg.l210201
- [6]王兴国,周朝阳,曾亮桃,等. 外贴预应力 GFRP 板加固混凝土梁抗弯试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(3): 351  
WANG Xingguo, ZHO Chaoyang, ZENG Xiantao, et al. Test of flexural behavior of RC beams strengthened by bonding prestressed GFRP plates [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(3): 351
- [7]姜海波,韦荣彬,刘博,等. 底面外贴钢筋加固混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(10): 71  
JIANG Haibo, WEI Rongbin, LIU Bo, et al. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by external rebars at the bottom surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(10): 71
- [8]GONG Chenjie, DING Wenqi, SOGA K, et al. Failure mechanism of joint waterproofing in precast segmental tunnel linings [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 334. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.003
- [9]DIMAIO P G. Introduction to concrete protection liners [C]//Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas, TX: Geo-Institute of ASCE, 2011: 1882
- [10]LOGANATHAN L N, Carroll J O, Flanagan R, et al. Corrosion protection lining (CPL) for the deep tunnel sewer system in Singapore—A case history [C]//Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas, TX: Geo-Institute of ASCE, 2011: 1902
- [11]LI Jinqiang, ZHONG Zilan, WANG Shurui, et al. Seismic fragility analysis of water supply pipelines retrofitted with corrosion-protection liner buried in non-uniform site [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 176: 108333. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.108333
- [12]钟紫蓝,王书锐,甄立斌. 经垫衬法修复后铸铁管道接口力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(6): 141  
ZHONG Zilan, WANG Shushui, ZHEN Libin. Experimental mechanical properties of cast iron pipe interface after rehabilitation by bedding method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(6): 141. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201812142
- [13]混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013  
Reinforcement design code for concrete structures: GB 50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013
- [14]地下工程防水技术规范: GB 50108—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008  
Technical code for waterproofing of underground works: GB 50108—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008
- [15]普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016  
Standard test methods for mechanical properties of normal concrete: GB/T 50081—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016
- [16]王书锐. 垫衬法加固前后地下供水管道抗震易损性分析 [D]. 北京: 北京工业大学, 2020
- [17]建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009  
Standard test methods for basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009
- [18]尹世平,曲烽豪,王飞. 纤维编织网增强混凝土加固砌体墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增刊1): 75  
YIN Shiping, QU Fenghao, WANG Fei. Experimental study on seismic performance of masonry walls reinforced with concrete reinforced by fiber woven mesh [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup. 1): 75. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.S1.0009
- [19]唐曹明,罗瑞,程绍革. 水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆单面加固低强度砖墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(10): 157  
TANG Caoming, LUO Rui, CHENG Shaoge. Experimental study on seismic performance of low-strength brick wall reinforced with cement mortar and reinforcing mesh cement mortar on one side [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(10): 157. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.10.019
- [20]钟紫蓝,张亚波,李锦强. 球墨铸铁管道接口弯曲性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(9): 143  
ZHONG Zilan, ZHANG Yabo, LI Jinqiang. Ductile iron pipe interface bending performance experimental [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(9): 143. DOI:10.11918/202206020