

DOI: 10.7672/sgjs2025070064

物流仓库框架结构预应力钢筋混凝土加固技术*

刘 龙

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 为了分析物流仓库常用的混凝土框架结构中预应力钢筋加固技术的加固效果,针对预先带有缺陷的钢筋混凝土框架结构进行了加载试验,试验过程中对比了外部预应力钢筋加固以及近表面嵌入法(NSM)两种加固方法对框架结构节点极限荷载的加固效果。试验考虑了3种常见缺陷,分别设置在框架结构内侧、外侧以及立柱处。研究表明,3组带有缺陷的试样极限荷载相比未设置缺陷的构件分别降低了58%、22%和54%。对于缺陷1,外部预应力钢筋加固与NSM钢筋加固后的极限荷载分别提升了9.2kN和39.1kN。对于缺陷2,两种措施加固后的极限荷载分别提升了17.7kN和14.6kN。对于缺陷3,两种措施加固后的极限荷载分别提升了21.4kN以及26.2kN。

[关键词] 框架结构;加固;预应力;近表面嵌入法;极限荷载

[中图分类号] TU746.31

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0064-07

Reinforcement Technology of Prestressed Reinforced Concrete for Logistics Warehouse Frame Structure

LIU Long

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: This paper aims to analyze the reinforcement effect of prestressed steel reinforcement technology in concrete frame structures commonly used in logistics warehouses. A loading test was carried out on a reinforced concrete frame structure with defects. During the test, the reinforcement effects of two reinforcement methods, external prestressed steel reinforcement and near-surface embedding method (NSM), on the ultimate load of the frame structure node were compared. The test considered three common defects, which were set on the inside, outside and column of the frame structure. The study showed that the ultimate loads of the three groups of defective specimens were reduced by 58%, 22% and 54% respectively compared with the components without defects. For defect 1, the ultimate loads after external prestressed steel reinforcement and NSM steel reinforcement increased by 9.2kN and 39.1kN respectively. For defect 2, the ultimate loads after the two measures were strengthened increased by 17.7kN and 14.6kN respectively. For defect 3, the ultimate loads after the two measures were strengthened increased by 21.4kN and 26.2kN respectively.

Keywords: frame structure; reinforcement; prestressed; near surface mounted (NSM); ultimate loads

0 引言

随着物流行业的快速发展,物流仓库作为货物存储与流通的关键设施,其结构安全性和稳定性日益受到重视。物流仓库框架结构作为承载货物与设备的主体,在长期运营过程中可能因设计缺陷、使用环境变化或自然灾害等因素导致结构性能下

降,增加安全隐患。预应力钢筋混凝土加固技术作为一种有效的结构加固手段,在提高结构承载力、改善结构延性及增强结构整体稳定性方面展现出显著优势。因此,针对物流仓库常用的框架结构预应力钢筋混凝土加固技术进行研究,不仅能够保障物流仓库的安全运营,也能够为类似结构的加固改造提供设计依据和技术参考。

目前有关混凝土结构的加固研究取得了一定的进展,林福宽等^[1]利用ABAQUS有限元软件构建了悬臂梁的数值模型,分析了表层粘贴碳纤维增强

* 中国铁建股份有限公司2022年度科技研究开发计划(2022-C1);

中铁十八局集团有限公司2022年度科研创新项目(C2022-051)

[作者简介] 刘 龙,工程师,E-mail: 1245490948@qq.com

[收稿日期] 2024-12-15

复合材料 (CFRP) 对悬臂梁性能的提升效应,最终明确了 CFRP 的加固方式、加固比例以及预应力状态对悬臂梁抗弯性能的具体影响。骆俊晖等^[2]采用纺织纤维增强混凝土 (TRC) 面层的预应力 CFRP 筋加固了钢筋混凝土 (RC) 受弯梁,考虑 TRC 层数与开槽间距等因素,对 1 根普通 RC 梁和 5 根经过复合加固的梁进行了四点弯曲试验,分析了 TRC 面层预应力 CFRP 筋嵌入式加固 RC 受弯梁的破坏模式、承载能力及其使用性能。肖体德等^[3]综合了国内外关于预应力加强框架节点的试验与数值模拟研究成果,对比分析了不同加强形式对框架节点性能的影响。研究结果显示,预应力加强节点相较于传统节点,在承载力和抗剪强度方面表现更优,能有效提升结构的抗震性能。何永利等^[4]为探究预应力加固混凝土框架梁后框架节点的抗震性能变化,以框架节点为研究对象,采用位移法分析了斜腹杆体外预应力技术加固混凝土框架梁后节点的受力状态。部分研究利用 ABAQUS 建立了有限元模型,并设计了 1 个 3 层 2 跨的试验框架模型,以验证数值模拟结果的准确性^[5-6]。目前预应力钢筋混凝土加固技术已经作为一种有效的结构修复手段得到了广泛应用。通过在结构关键部位增设预应力钢筋,利用预应力产生的反弯矩抵消部分外荷载,从而实现提高结构承载能力的目的。

框架节点作为结构中的关键部位,其性能直接影响整体结构的稳定性和安全性。目前,针对框架节点的加固方法有增大截面法、粘贴钢板法、碳纤维布加固法等。对于整体结构加固,预应力钢筋混凝土加固技术通过增设预应力筋或预应力梁、板等构件,能够显著提高结构的整体承载能力和抗震性能。但预应力混凝土的加固机理目前依旧存在大量待解决的问题,并且该技术手段对于具有不同功能需求的框架结构的应用效果也仍旧缺少总结。

本研究旨在通过理论分析、试验验证等方法,系统研究预应力钢筋混凝土加固技术在物流仓库框架结构中的应用效果,为工程实践提供理论支撑和技术指导。

1 工程概况

本研究主要依托于水发国际物流园项目的各单体仓库及卸货平台结构预应力混凝土梁施工项目。项目结构主体为混凝土框架结构,框架梁采用了后张法有粘结和无粘结预应力技术,预应力梁多跨连续布置,配多种束型有粘结预应力筋结合多种束型无粘结预应力筋。

本项目有粘结梁预应力施工工序包括预应力

筋制作、预应力孔道布设、孔道接头管、泌水管安装、有粘结张拉端预埋安装、预应力束布置、有粘结预应力筋张拉、灌浆、封锚。无粘结预应力施工包括无粘结预应力筋制作、无粘结固定端预埋安装、无粘结张拉端预埋安装、无粘结预应力筋安装、无粘结预应力筋张拉、封锚等工序。

2 试验方案

2.1 试样制作

本研究所用试件包括 11 个钢筋混凝土框架,其中 5 个试件未加固,6 个试件采用不同的方法进行加固,钢筋采用传统光圆钢筋。

所有试件的整体尺寸相同,而钢筋配置根据加载方向将框架节点分为闭合或张开,如图 1 所示。其中试件可以分为 3 个部分:悬臂部分、立柱和支撑梁部分。根据两个框架试件计算弯矩等内力,得到试件内力如图 2 所示。

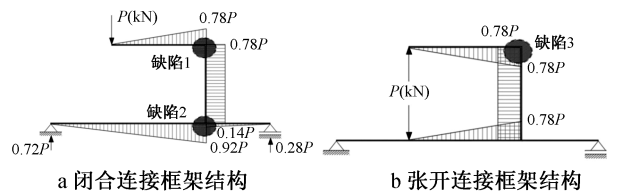


图 1 闭合与张开框架结构
Fig. 1 Closed and open frame structure

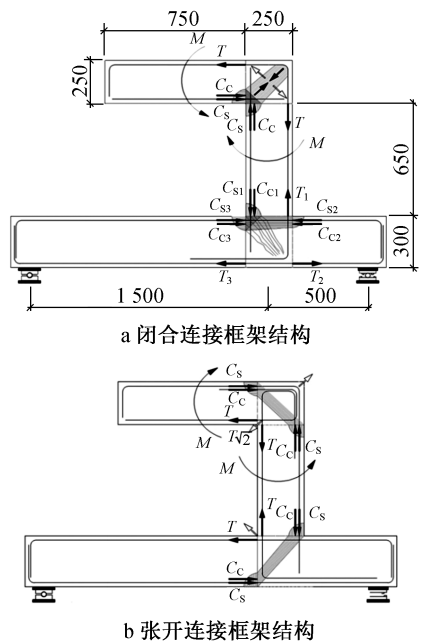


图 2 内力分析
Fig. 2 Internal force analysis

水发国际物流园中各仓库的混凝土框架结构可视为闭合连接以及张开连接两种接头的组合体,两种连接在仓库整体的钢筋混凝土框架结构中作

为独立单元广泛存在。试件悬臂部分的混凝土横截面尺寸为宽 150mm,高 250mm,下部横梁截面宽 150mm,高 300mm,立柱部分横截面为宽 250mm,厚 150mm。悬臂部分长度为 750mm,因此跨深比为 3 : 1,属于浅悬臂,其承载力受弯矩控制。下部横梁跨度为 2 000mm,长高比为 6.6 : 1,立柱位于 1 500mm 处,因此下部横梁左侧长高比为 5 : 1,横梁能够消除任何纵断面的面外变形。立柱部分净高为 650mm,因此立柱部分高宽比以及高厚比分别为 13 : 5 和 43 : 10,可避免产生屈曲效应。

上部悬臂梁以及立柱主筋均由两个直径为 10mm 的光圆钢筋组成。下部横梁,上、下主筋均由 3 条直径为 16mm 的光圆钢筋组成。框架试件的所有箍筋均由直径为 8mm 的光圆钢筋组成,沿每个部分的纵向钢筋方向间隔 100mm 设置。试验所用试件具体情况如表 1 所示,第 1 组试件由不设置缺陷的两个框架结构试件组成。其余 3 组分别设置 1 个未加固带有缺陷的试样以及两个采用不同加固方式的试样,两个加固试样分别采用外部预应力钢筋加固和近表面嵌入法(NSM)钢筋加固。

表 1 试件设置情况		
Table 1 Specimen setting		
组别	名称	特征
第 1 组	CJ-C	闭合节点框架试件
	OJ-C	张开节点框架试件
第 2 组	CJ-D1-C	未加固的缺陷框架试件(缺陷 1)
	CJ-D1-S1	外部预应力钢筋加固有缺陷 1 的框架试件
	CJ-D1-S2	用 NSM 钢筋加固有缺陷 1 的框架试件
	CJ-D2-C	未加固的缺陷框架试样(缺陷 2)
第 3 组	CJ-D2-S1	外部预应力钢筋加固有缺陷 2 的框架试件
	CJ-D2-S2	用 NSM 钢筋加固有缺陷 2 的框架试件
第 4 组	OJ-D3-C	未加固的缺陷框架试样(缺陷 3)
	OJ-D3-S1	外部预应力钢筋加固有缺陷 3 的框架试件
	OJ-D3-S2	NSM 钢筋加固有缺陷 3 的框架试件

第 2 组中的 CJ-D1-C 试样以及 2 个设置了加固试样的尺寸及钢筋设置方式如图 3 所示,未加固的 CJ-D1-C 试样作为对照。其中设置了加固的 CJ-D1-S1 以及 CJ-D1-S2 试样中钢筋笼与 CJ-D1-C 试样保持一致。图 3b 中 CJ-D1-S1 针对缺陷 1 实施的第 1 种加固技术是基于正交的外部预应力杆,在直径为 16mm 的钢筋两端拧紧螺栓,钢筋穿过 20mm 厚的端板,使外部加固钢筋的预应力达到其屈服应变的 33%。这两根钢筋在悬臂梁的张力侧上排列,距试件边缘 50mm。另外两个直径为 16mm 的钢筋设置于立柱受拉侧,张拉预应力到相同水平。因此,粘结不足的内部钢筋所缺的锚固力可以通过相同横截面面积的外部预应力钢筋进行补偿。

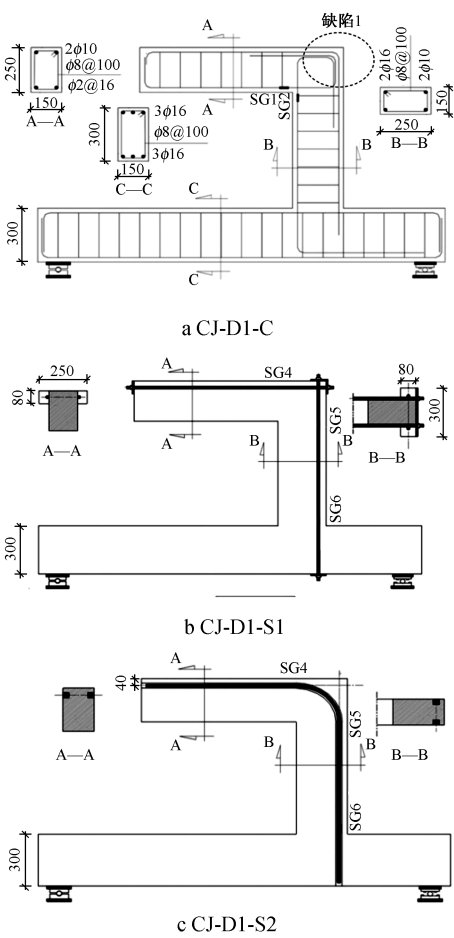


图 3 第 2 组试样的混凝土尺寸和钢筋细节
Fig. 3 Details of concrete size and steel bar of the second group of specimens

图 3c 为第 2 种 CJ-D1-S2 的加固措施,采用基于等效 NSM 的钢筋对不适当粘接的内部钢筋进行补偿。为了实现 NSM 技术,需要在试样两侧表面预留两个连续的凹槽,可通过浇筑混凝土之前在钢筋笼外侧预埋聚苯乙烯泡沫条或木条的方式设置,如图 4 所示。试件混凝土硬化后,移除聚苯乙烯泡沫条或木条,并将凹槽彻底清理干净。然后在凹槽内壁涂抹环氧树脂,并将钢筋放置在凹槽中,轻轻按压,以使环氧树脂将钢筋牢固黏结在凹槽中,再补充环氧树脂直至完全填满钢筋和凹槽两侧之间的空隙。

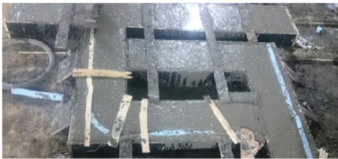


图 4 NSM 技术加固预埋聚苯乙烯泡沫条
Fig. 4 Reinforcement of embedded polystyrene foam strips by NSM technology

设置了缺陷 2 的 3 个试样中的钢筋以及加固措施设置细节如图 5 所示。其中 2 个加固组中的钢筋笼与第 1 个 CJ-D2-C 试件保持一致。缺陷 2 代表立柱与下部横梁之间的锚固长度不足。第 2 个 CJ-D2-S1 试样的加固技术是基于使用相同横截面面积的外部预应力钢筋进行补强,对立柱的受拉侧纵向钢筋进行补偿。预应力钢筋张拉应力直到相应屈服应变达到 33%,与有缺陷 1 的试样 CJ-D1-S1 相同。第 3 个 CJ-D2-S2 试样是采用两个 NSM 钢筋加固,使用与有缺陷 1 的 CJ-D1-S2 试件相同的技术来实现。由于下侧(梁间连接处)的 NSM 钢筋仅向横梁延伸 300mm,小于加固所需的锚固长度,因此两个钢筋的下端用螺纹拧紧,并用螺母固定在端钢板上,以避免钢筋下端出现拉伸破坏。

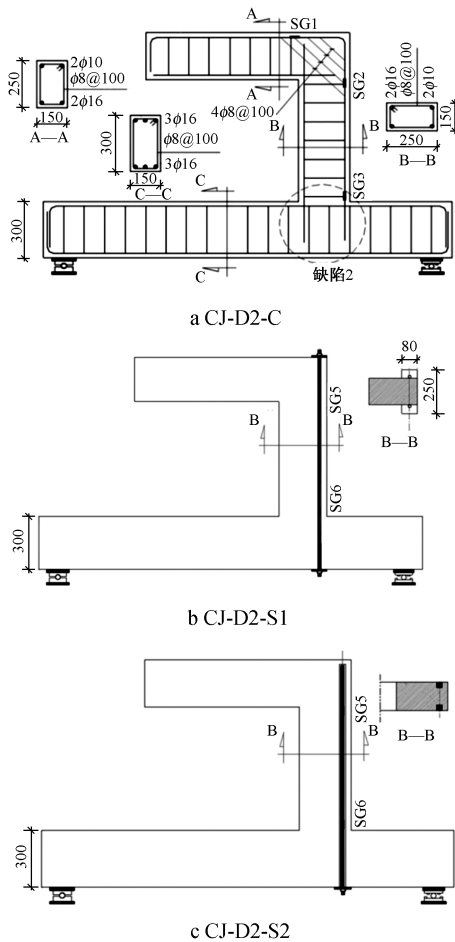


图 5 第 3 组试样的混凝土尺寸和钢筋细节
Fig. 5 Details of concrete size and steel bar of the third group of specimens

第 4 组中所有试样的尺寸和钢筋设置细节如图 6 所示,其中两个加固组中的钢筋笼与第 1 个 OJ-D3-C 试件保持一致。缺陷 3 代表开口节点内侧钢筋强度不足,如图 6a 所示。对于这一缺陷,常用的

加固策略是通过设置补充预应力钢筋对缺陷处受拉钢筋进行补偿。但由于上部悬臂横梁与立柱的加固钢筋在缺陷处存在交叉,为了避免交叉处的加固效果可能受限,因此第 2 个 OJ-D3-S1 试样悬臂梁部分采用 NSM 预应力钢筋加固,钢筋设置于预处理凹槽内。而立柱方向的预应力钢筋则采用外部预应力钢筋加固。第 3 个 OJ-D3-S2 试样悬臂部分采用外部预应力钢筋进行加固,立柱部分则采用 NSM 预应力钢筋进行加固。

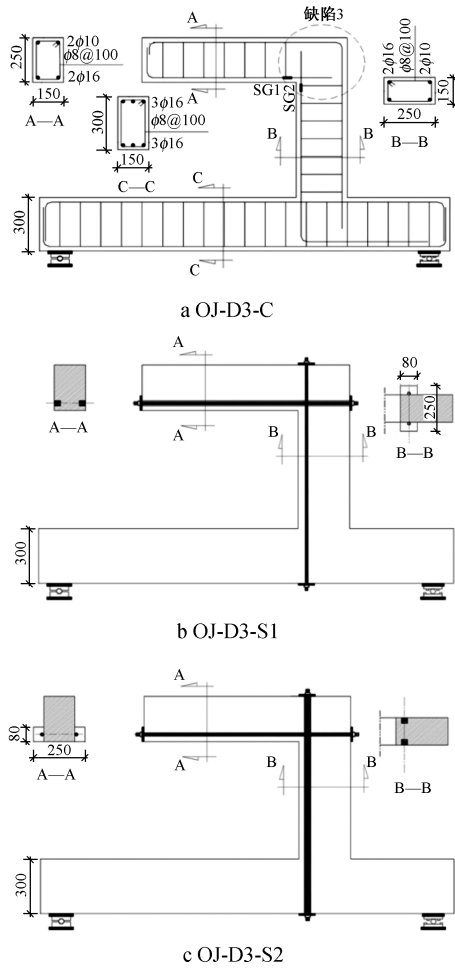


图 6 第 4 组试样的混凝土尺寸和钢筋细节
Fig. 6 Details of concrete size and steel bar of the fourth group of specimens

2.2 试验材料

框架试样所用混凝土的抗压强度标准值通过对边长 150mm 的 3 个标准立方体以及直径为 150mm,高 300mm 的 3 个标准圆柱体在测试当天进行单轴压缩试验后取平均值。得到标准立方体的平均抗压强度约为 31.93MPa,平均抗拉强度约为 3.45MPa。此外,为了确定内部钢筋笼以及外部加固预应力钢筋的力学性能,对每个断面尺寸的钢筋选取 3 个试样进行了拉伸试验,测试结果如表 2

所示。

表 2 钢筋的力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel bars			
钢筋公称 直径/mm	平均屈服 强度/MPa	平均抗拉 强度/MPa	平均弹性 模量/GPa
16	421	556	202
10	427	574	203
8	277	396	201

2.3 试验装置及流程

在混凝土结构试验中,配备三维钢框架,用于进行框架试件的测试(见图 7)。测试过程中使用 6mm 长的电应变计测量内部受拉钢筋以及预应力补强钢筋的应变。此外,使用两个线性可变差动位移计测量下部横梁在立柱处的垂直挠度和框架悬臂部分的尖端挠度。作用荷载施加在悬臂部分,直到框架失效,荷载由 400kN 量程的应力传感器测量。

3 试验结果与分析

针对混凝土框架结构常见的 3 种缺陷,采用了两种加强技术,以提升缺陷处的抗变形能力。本文考虑的 3 个缺陷分别为闭合框架试件在立柱上下两端拐角外侧的受拉钢筋不足以及开口框架试件在立柱上部拐角内侧的受拉钢筋不足。因此试验针对不同情况下的荷载情况进行分析。4 组试样的试验结果如表 3 所示。

3.1 开裂模式和失效模式

对于面临闭合荷载框架的试样(试样 CJ-C),在约 16.3kN 的垂直载荷下,悬臂部分的受拉侧(框架外侧)开始出现裂纹。随着进一步加载,在垂直荷载约为 18.7kN 时,立柱的受拉侧开始出现裂纹。当垂直荷载达到 19.7kN 时,下部横梁的底部开始

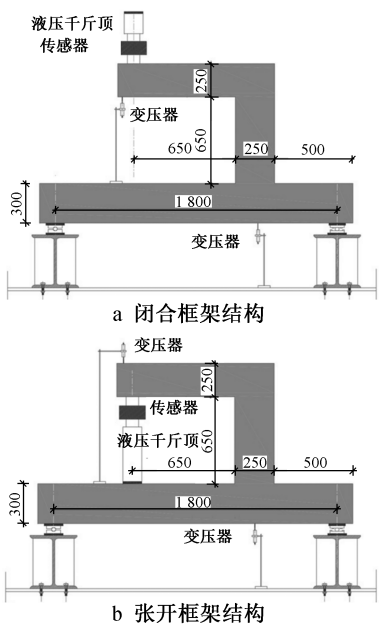


图 7 试验装置
Fig. 7 Test device

出现裂纹。随着进一步加载,裂缝在整个框架的受拉侧蔓延,如图 8a 所示,直到框架立柱与悬臂连接处失效,此时垂直荷载约为 54.7kN。而对于张开荷载的框架试样 OJ-C(见图 8b),由于悬臂与立柱连接处未设置马凳,因此在垂直荷载达到约 9.5kN 时,连接处开始出现倾斜裂纹。随着垂直加载至 16.0kN 时,悬臂梁以及立柱的受拉侧都开始陆续出现裂纹。其中垂直张开载荷的增大导致悬臂梁-立柱连接处形成局部压缩区域,同时悬臂梁以及立柱的受拉侧则均出现弯矩导致的裂纹。该框架试样的失效荷载约为 35.4kN。而加载过程中在下部支撑横梁上未观测到明显裂纹,这可能是由于悬臂-立柱接头的钢筋布置不当,导致整个框架刚度分布不均。

表 3 试验荷载分析

组别		开裂荷载/kN			失效荷载 P_U /kN	P_U/P_c	P_L /kN	P_R /kN	P_R/P_L
		缺陷 1 处	缺陷 2 处	缺陷 3 处					
第 1 组	CJ-C	—	16.3	18.7	54.7	1	—	—	—
	OJ-C	9.5	16.0	16.0	35.4	1	—	—	—
第 2 组	CJ-D1-C	—	11.9	9.8	22.8	0.42	31.9	0	0
	CJ-D1-S1	31.0	23.4	24.9	32.0	0.59	31.9	9.2	0.29
	CJ-D1-S2	33.6	21.4	51.0	61.9	1.13	31.9	39.1	1.23
第 3 组	CJ-D2-C	—	18.7	18.7	42.5	0.78	12.2	0	0
	CJ-D2-S1	37.0	15.3	35.0	60.2	1.12	12.2	17.7	1.45
	CJ-D2-S2	54.0	15.9	33.3	57.1	1.04	12.2	14.6	1.20
第 4 组	OJ-D3-C	6.8	—	11.9	15.6	0.44	19.8	0	0
	OJ-D3-S1	16.0	—	27.5	37.0	1.05	19.8	21.4	1.08
	OJ-D3-S2	18.3	28.9	39.7	41.8	1.18	19.8	26.1	1.32

注: P_c 为极限荷载; P_L 为损失荷载; P_R 为恢复荷载

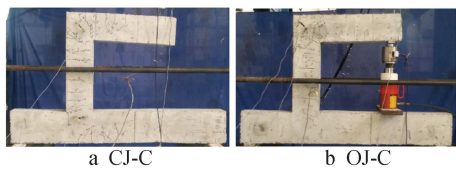


图 8 框架结构上的裂纹分布情况

Fig. 8 Crack distribution on frame structure

在缺陷 1 的试验过程中,未加固试样 (CJ-D1-C) 在直载荷约为 9.8kN 时,立柱的受拉侧开始出现裂纹。继续加载至 11.9kN 时,悬臂部分开始出现裂纹。随着垂直荷载的继续增大,上部悬臂梁以及立柱上的裂纹分布逐渐增加,直到立柱受拉侧开始出现大量宽度较大的倾斜裂纹。最终试样在约 22.8kN 的垂直荷载下失效 (见图 9a)。第 2 组试样采用了两种不同的加固技术,但试验结果表明,在这两种加固措施下,最终引发失效的主要裂纹与对照未强化试件 CJ-D1-C 发生在相同位置,如图 9b, 9c 所示。但预应力钢筋使悬臂梁和立柱部分的开裂荷载增加,如表 3 所示。对于试件 CJ-D1-S1,在垂直荷载达到 23.4kN 时,上部悬臂梁和下部支撑横梁的受拉侧开始出现裂纹,在垂直荷载达到 24.9kN 时,立柱的受拉侧开始出现裂纹。直到垂直荷载达到 31.0kN 之前,随着垂直荷载的增大,整个框架的弯曲裂缝分布也逐渐增加。随着继续加载,构件开始产生倾斜裂缝,裂缝从立柱上方设置缺陷处开始延伸,逐渐倾斜向下传播,直到 32.0kN 时完全失效 (见图 9b)。其中,NSM 技术表现出显著优势,在荷载达到 61.9kN 时才失效。与外部预应力钢筋加固技术相比,NSM 技术能够提升抵抗开裂的能力。与试样 CJ-D1-S1 相比,在较高的持续荷载下,也抑制了弯矩产生的裂纹分布,如图 9c 所示。

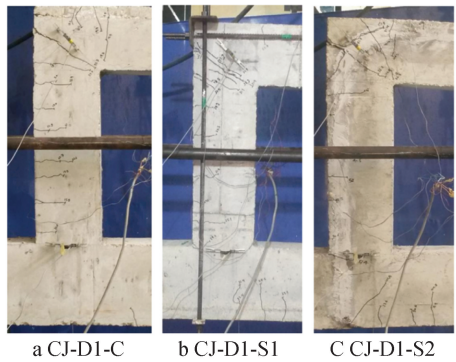


图 9 第 2 组试样上出现的裂纹 (缺陷 1)

Fig. 9 Cracks on the second group of specimens (defect 1)

第 3 组试样中对缺陷 2 的试验主要是为了分析构件下部支撑横梁以及立柱连接部分的主拉钢筋

锚固不足时,框架构件的失效模式,如图 10a 所示。对于这一缺陷,两种强化技术都显示出明显的增强效果,其中外预应力钢筋加固效果比 NSM 钢筋加固效果更好。这两种加固措施都使 CJ-D2-S1 和 CJ-D2-S2 的缺陷框架试件的最终荷载分别超过了 CJ-D2-C 约 12% 和 4%。加固试件 CJ-D2-S1 和 CJ-D2-S2 达到失效时裂缝主要集中在立柱两端,如图 10b 和图 10c 所示。但 NSM 钢筋的加固使 CJ-D2-S2 试件中裂缝在向下扩展延伸的过程中得到抑制 (见图 10c)。

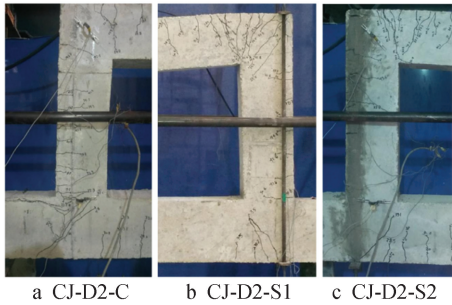


图 10 第 3 组试样上出现的裂纹 (缺陷 2)

Fig. 10 Cracks on the third group of specimens (defect 2)

对于缺陷 3,未加固的缺陷框架试件 OJ-D3-C 在垂直荷载约为 6.8kN 时,开始在悬臂梁与立柱之间的连接处出现裂纹。随着进一步加载,当荷载达到 11.9kN 后,在柱上观察到弯矩引发的裂纹。持续的加载导致构件产生对角裂纹 (见图 11a),直到加载至 15.6kN 时,这些对角裂纹导致接头失效。

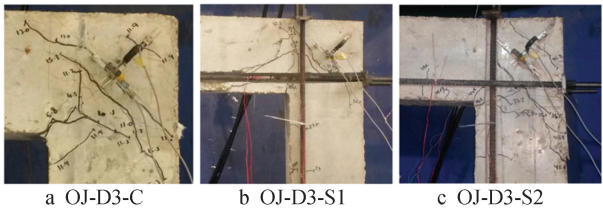


图 11 第 4 组试样上出现裂纹 (缺陷 3)

Fig. 11 Cracks on the fourth group of specimens (defect 3)

对于试件 OJ-D3-S1,在荷载达到 16.0kN 时,缺陷处接头开始出现裂纹。随着进一步加载,倾斜裂纹开始形成并扩散,直到在大约 27.5kN 时,立柱的受拉侧开始形成弯曲裂纹。此时,倾斜裂纹集中在连接处缺陷位置的受拉钢筋两端,形成一个局部压缩区域。在约 37.0kN 的垂直荷载下接头处完全失效 (见图 11b),加载过程中悬臂部分未发现可见的弯曲裂纹。试样 OJ-D3-S2 则在加载至 28.9kN 时悬臂梁受拉侧开始出现弯曲裂纹,其失效荷载超过试件 OJ-D3-S1。在垂直荷载约为 39.7kN 时,试件 OJ-

D3-S2 立柱部分的受拉侧开始出现弯曲裂纹,直到在荷载达到 41.8kN 时失效(见图 11c)。试验结果显示 NSM 预应力钢筋较好地抑制了裂纹的扩展,使裂纹主要集中在 NSM 预应力钢筋的另一侧,如图 11b,11c 所示。

根据试验结果,外部预应力钢筋对于张开框架的工况有显著的加固效果,但对闭合框架的加固效果有限。而对于张开框架的工况,NSM 预应力钢筋能够对缺陷施加横向约束,从而提高抗裂性能。

3.2 极限荷载分析

未设置加固措施的构件试验结果显示,相比第 1 组试样,设置了缺陷 1,2,3 的后 3 组试样极限承载力分别降低约 58%,22%和 54%。因此,对 3 种缺陷分别设置了 2 种加固措施之后,构件损失的强度以及刚度得到了显著提升。相比第 1 组试样,后 3 组试样在设置了缺陷 1,2,3 之后极限承载力分别降低了 31.9,12.2,19.8kN。

对于缺陷 1,两种加固措施使试样(CJ-D1-S1 和 CJ-D1-S2)的极限承载力分别提升了 9.2kN 和 39.1kN。第 1 种基于正交预应力钢筋的加固措施对构件产生的加固效果相对较低,而基于 NSM 钢筋的第 2 种加固措施对构件的加固效果良好。对缺陷 2 设置的两种加固措施使试样(CJ-D2-S1 和 CJ-D2-S2)的最终承载力分别提升了 17.7kN 和 14.6kN。表明这两种加固方式对于缺陷 2 这一类缺陷的加固效果是良好的,但基于外部预应力钢筋的方式优于基于 NSM 钢筋的加固方式。对于缺陷 3,外部预应力钢筋加固与 NSM 钢筋加固后的极限承载力分别提升了 21.4kN 和 26.2kN。

4 结语

本文通过试验研究针对外部预应力钢筋加固与 NSM 钢筋加固两种方法对混凝土框架的加固效果进行了分析。试验制备的框架构件试样分别设置了 3 中不同类型的缺陷,但试验结果表明,两种加固方法在提升结构承载力、增大抗裂性能等方面均表现出了良好的加固效果。

试验中设置 3 种缺陷的构件试样达到的极限荷

载相比未设置缺陷的构件,极限承载力分别降低约 58%,22%和 54%。

对于缺陷 1,外部预应力钢筋加固与 NSM 钢筋加固后的极限承载力分别提升了 9.2kN 和 39.1kN。对于缺陷 2,两种措施加固后的极限承载力分别提升了 17.7kN 和 14.6kN。对于缺陷 3,两种措施加固后的极限承载力分别提升了 21.4kN 和 26.2kN。

参考文献:

[1] 林福宽,彭晖,龚爽,等. 预应力 NSM CFRP 加固悬臂梁有限元与试验研究[J]. 交通科学与工程,2024,40(4):122-128.
LIN F K, PENG H, GONG S, et al. Finite element and experimental study on cantilever beam strengthened with prestressed NSM CFRP [J]. Journal of transport science and engineering,2024,40(4):122-128.

[2] 骆俊晖,宁杰钧,罗资清,等. 采用 TRC 面层的预应力 CFRP 筋嵌入式增强 RC 受弯梁性能评价[J]. 中国公路学报,2023,36(9):193-201.
LUO J H, NING J J, LUO Z Q, et al. Performance evaluation of prestressed CFRP bars embedded reinforced RC flexural beams with TRC surface layer [J]. China journal of highway and transport,2023,36(9):193-201.

[3] 肖体德,董锦坤,许淞清. 预应力加强框架节点的抗震性能研究综述[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2024,44(3):177-180.
XIAO T D, DONG J K, XU S Q. Summary of research on seismic performance of prestressed reinforced frame joints [J]. Journal of Liaoning University of Technology (natural science edition), 2024,44(3):177-180.

[4] 何永利,陶淑娟,高旭东. 预应力加固框架梁对节点抗震性能分析[J]. 低温建筑技术,2024,46(3):99-102.
HE Y L, TAO S J, GAO X D. Seismic performance analysis of prestressed reinforced frame beam-to-joints [J]. Low temperature architecture technology,2024,46(3):99-102.

[5] 杨佑珩. 加固技术在钢筋混凝土框架结构设计中的运用[J]. 住宅与房地产,2023(23):101-103.
YANG Y H. The application of reinforcement technology in the design of reinforced concrete frame structure [J]. Housing and real estate,2023(23):101-103.

[6] 哈小平. 冻融循环作用下预应力混凝土构件疲劳特性研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(15):129-133,138.
HA X P. Fatigue characteristics of prestressed concrete members under freeze-thaw cycles [J]. Construction technology, 2024,53(15):129-133,138.