

贴边埋置灌浆波纹管锚固连接性能试验研究

卢永成¹, 袁慧玉¹, 王志强²

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2.同济大学, 上海市 200092]

摘要:在绿色低碳发展理念的倡导下,桥梁预制拼装技术在城市桥梁建设中的应用越来越广泛。依托上海两港大道预制拼装桥梁实际工程,其预制立柱钢筋与盖梁采用灌浆波纹管锚固连接。为验证贴边埋置灌浆波纹管锚固连接能提供可靠的黏结锚固能力,考虑不同钢筋锚固长度、灌浆与压浆工艺等因素,开展灌浆波纹管-钢筋黏结滑移力学行为的拉拔试验研究,研究损伤发展过程、破坏模式、力与位移曲线等力学行为,并进行归纳总结,为实际工程的应用提供技术支撑。

关键词:贴边;灌浆;波纹管;锚固;连接;性能

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)03-0199-06

1 背景

近年来,在绿色低碳发展理念的倡导下,桥梁预制拼装技术在城市桥梁建设中的应用越来越广泛,在提高桥梁工程质量、加快施工速度、减少现场污染和对交通的影响等方面发挥了重要作用,取得了较好的社会效益与经济效益。桥梁预制构件的常用连接形式有灌浆套筒连接、灌浆波纹管(金属波纹管)锚固连接、普通混凝土湿接缝连接、超高性能混凝土(UHPC)连接、预应力钢筋连接、插槽式连接、承插式连接等,其中灌浆波纹管连接方式指在相邻构件中通过灌浆波纹管连接纵筋。具体做法是:在连接处,一个构件外伸连接的主筋,另一侧构件预埋灌浆波纹管,现场将外伸的主筋穿入波纹管管内后进行灌浆,通过高强砂浆的黏结力将纵筋承受的力传至波纹管再传至波纹管外的钢筋^[1]。灌浆波纹管有较大的施工容差,但需要较长的锚固长度及较大的埋置空间,常放置在盖梁和承台中,用于立柱与承台和盖梁间的连接。该连接方式已在国内外包括美国 Lake Ray Hubbard Bridge Project、Lake Belton Bridge Project、Dallas High Five Project、华盛顿 HfL 工程项目等多座桥梁中应用,国内在上海国定路匝道、上海 S7 公路(S20-月罗公路)^[2]、无锡凤翔路高架等桥梁中应用。

预制拼装桥梁构件连接构造的可靠性是影响桥

梁安全服役性能最直接且最关键的因素之一。对于灌浆波纹管连接方式,钢筋与浆料的黏结滑移性能对钢筋的锚固起着至关重要的作用,也对立柱整体的受力性能有直接的影响。上海两港大道工程预制拼装桥梁立柱钢筋与预制盖梁采用灌浆波纹管锚固连接,灌浆波纹管贴边埋置在盖梁中,对该类锚固连接目前缺少相关标准与实践指导设计工作。

为验证预制拼装桥梁立柱钢筋与盖梁贴边埋置灌浆波纹管锚固连接是否能提供可靠的黏结锚固能力,开展灌浆波纹管-钢筋黏结滑移力学行为的拉拔试验研究,研究损伤发展过程、破坏模式、力与位移曲线等力学行为,并进行归纳总结,为实际工程的应用提供技术支撑。

2 研究内容

依托上海两港大道新建工程桥梁预制拼装实际工程,考虑不同钢筋锚固长度、灌浆与压浆工艺等因素,开展贴边埋置灌浆波纹管-钢筋黏结滑移力学行为的拉拔试验研究,验证灌浆波纹管是否能提供可靠的黏结锚固能力,包括开展单拉和群拔试验,以探究相邻波纹管之间的相互影响等。具体研究内容如下:

(1)研究波纹管中锚固钢筋在贴边不利情况下的锚固性能;

(2)通过单拉与群拔试验,研究相邻波纹管受力后的相互影响;

(3)通过不同施工工艺(灌浆、压浆)的试件进行试验,研究施工工艺对波纹管黏结锚固的差异等。

收稿日期: 2022-12-23

作者简介: 卢永成(1965—),男,学士,教授级高级工程师,主要从事桥梁工程设计与研究工作。

3 试验方案

3.1 试验概况

基于试验研究内容,以两港大道工程为研究对象,开展试验模型设计和试验加载方案的拟定。

试验研究共设计7组工况7个试件,每个试件2个样本,共14个样本。所有试件采用了相同的C60混凝土,钢筋均采用HRB400钢筋,砂浆强度为100MPa,波纹钢管采用新型轧制波纹钢管,外径89mm,壁厚2mm。所有试件的拉拔钢筋直径均采用40mm,波纹钢管均在试件中贴边埋置,钢筋与波纹钢管间的相对位置均为贴边。变化参数包括拉拔方式(单拉、群拔)、锚固长度(14d、24d、40d)(d为钢筋直径)、施工工艺(灌浆、压浆)。各试件设计关键参数如表1所示。

表1 灌浆波纹钢管拉拔试验试件设计参数

试件编号	钢筋直径/mm	钢筋在波纹钢管内 波纹钢管在试件内 相对位置	锚固长度	拉拔方式	施工工艺	样本个数	试件简称
1#	40	钢筋贴边 波纹钢管贴边	14d	单拉	灌浆	2	1-14d-灌
2#				单拉	灌浆	2	1-40d-灌
3#			40d	3根	压浆	2	3-40d-压
4#				群拔	灌浆	2	3-40d-灌
5#				单拉	灌浆	2	1-24d-灌
6#			24d	3根	压浆	2	3-24d-压
7#				群拔	灌浆	2	3-24d-灌

3.2 试件设计

试件尺寸为1800×1000×1660mm(见图1)。其中试件长度1800mm需要考虑波纹钢管埋置的区域、拉拔过程中波纹钢管附近的开裂范围、加载装

置安放区域等;试件宽度1000mm需要保证每个试件中的两个样本在各自试验中不会互相影响;试件高度1660mm保证埋置波纹钢管及波纹钢管与混凝土内钢筋的连接即可,为减少其他参数的影响,不同锚固长度的试件均保持试件高度为1660mm,保证了所有试件的波纹钢管长度均小于试件高度。

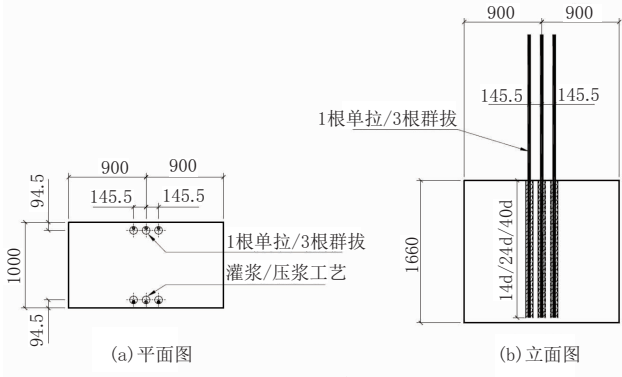


图1 灌浆波纹钢管拉拔试件构造示意图(单位:mm)

设计中波纹钢管放置位置为试件中心,波纹钢管间中心间距设计为145.5mm,实际中间距有109~150mm不等,平均135.5mm。设计波纹钢管外混凝土保护层厚度为50mm,实际中波纹钢管外保护层厚度46~78mm,平均62.6mm。

灌浆波纹钢管所用的混凝土强度等级为C60混凝土,高强砂浆抗压强度设计为100MPa,拉拔钢筋及试件内的钢筋均采用HRB400钢筋。

试件配筋按实际工程如图2所示,包括纵、横、竖三向的分布钢筋,在每个样本中拉拔钢筋的周围设置了较强的箍筋约束,最外侧的水平钢筋采用直径18mm钢筋,内层水平钢筋采用16mm直径,外层竖向钢筋采用16mm直径,内层的竖向钢筋采用20mm直径。

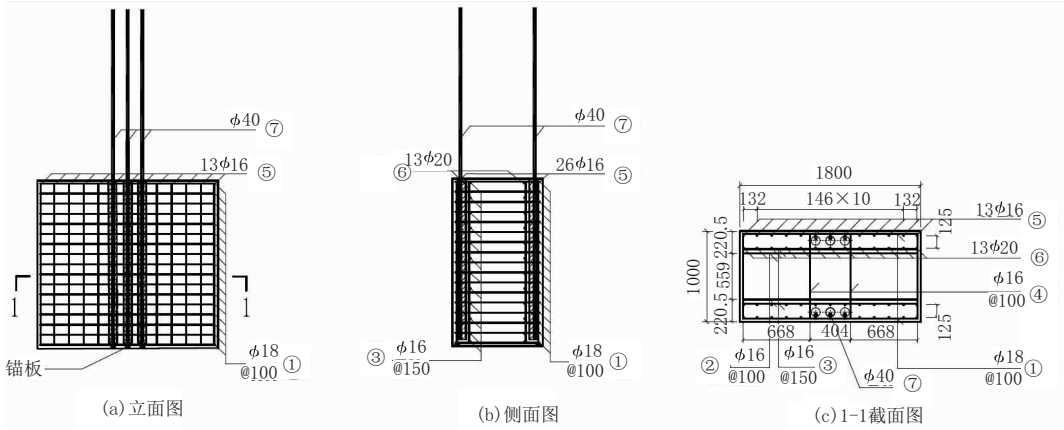


图2 灌浆波纹钢管拉拔试件钢筋示意图(单位:mm)

3.3 试验加载装置

灌浆波纹钢管拉拔试验的试验加载装置如图3、

图4所示。试验采用的自平衡的加载方式,试件放置于地面调平,千斤顶放置在试件顶面,顶升钢梁,钢

梁传递顶升力作用于拉拔钢筋的焊接接头上以实现加载。

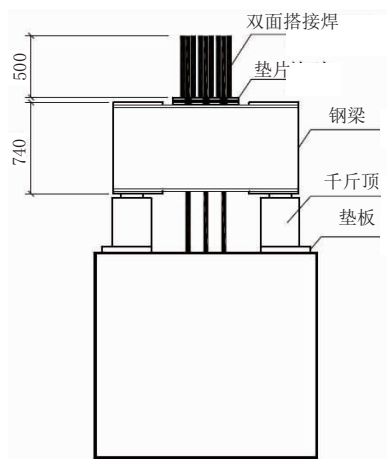


图3 试验装置图示(单位:mm)



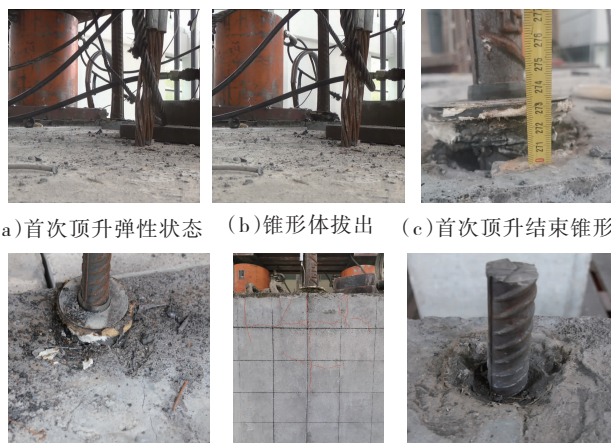
图4 试验总体

4 试验结果与分析

4.1 典型损伤发展过程

试验中通过放置于试件顶面的摄像机观察裂缝的发展过程。以5#-1样本的录制视频为例,开始加载至钢筋屈服前,试件总体没有损伤,基本为弹性状态,变形较小,此时段已在试件顶部附近形成砂浆的锥形拔出块,但变形较小,没有观察到升高,如图5(a)所示。钢筋屈服之后,变形增大,可以明显看到砂浆锥形块随着钢筋变形逐渐升高,如图5(b)所示。首次顶升结束后,钢筋已经达到或接近峰值力,此时锥形块抬升高度约为1~5 cm,多数试件接近2 cm,如图5(c)所示,试验后清理试件顶面,可以看到约2~3 cm深的锥孔;试件顶面波纹钢管附近出现放射性裂缝,同时由于钢筋发生变形,钢筋表面的铁锈落于试件表面,如图5(d)所示;试件侧面在波纹钢管范围内出现竖向裂缝,残余宽度至少约0.1 mm,在千斤顶范围也出现了竖向裂缝;顶面以下约10 cm出现一条主要的水平裂缝,残余宽度至少约0.2 mm,向下间隔约7~15 cm出现更细的水平裂缝,如图5(e)所示。

图5(e)中为单拉试验,若为群拔试验,竖向裂缝在3个波纹钢管范围均会出现,水平裂缝会延伸至更深的范围,接近单拉试验的2~3倍。



(a)首次顶升弹性状态 (b)锥形体拔出 (c)首次顶升结束锥形块
(d)首次顶升结束顶面裂缝 (e)首次顶升结束侧面裂缝 (f)试验结束后锥孔

图5 拉拔试验试件典型损伤发展过程

再次顶升中钢筋应力状态再次到达屈服,此时塑性变形继续增大,锥形块抬升高度继续增加,直至钢筋发生断裂或其他形式的破坏,如图5(f)所示。而再次顶升过程中钢筋已达到过峰值力,即裂缝已在之前发展充分,这一过程中裂缝发展较少。

4.2 破坏模式

7个试件采用3种锚固长度(14d、24d、40d)和单拉、群拔两种不同的拉拔方式,试验结果中出现了2种破坏模式:钢筋断裂、钢筋拔出与波纹钢管断裂。以下简要介绍这两类破坏模式。

(1) 钢筋断裂

钢筋拉断表明锚固性能强于钢筋母材强度,是对锚固性能良好的有效验证。

本次试验中,锚固长度24d、40d的所有试件均为钢筋断裂,采用灌浆方式、锚固长度为14d的单拉试件1#-1样本也为钢筋断裂。7个试件共14样本,共13个样本以钢筋断裂的形式破坏,如图6所示。



(a)单拉试件 (b)群拔试件

图6 钢筋断裂破坏模式

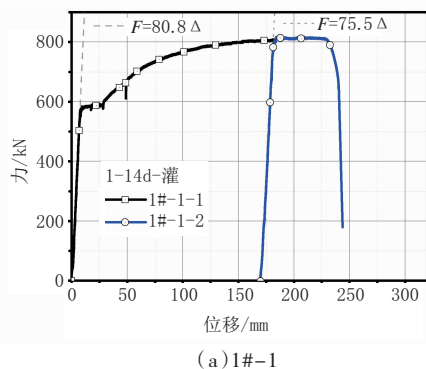
钢筋断裂位置在试件顶面以上 125 mm 至 1 310 mm 不等,这一数值包含了钢筋拉伸后的塑性变形。塑性变形后的焊接接头距试件顶面至少 1 500 mm,断口距离焊接接头均有一定距离。群拔试件中当发生第一根钢筋断裂后停止试验,3 根拉拔钢筋中先断裂的钢筋较为随机,可能由于初始缺陷或施工误差(焊接接头至垫片的初始间隙等)导致。

(2) 钢筋拔出与波纹钢管断裂

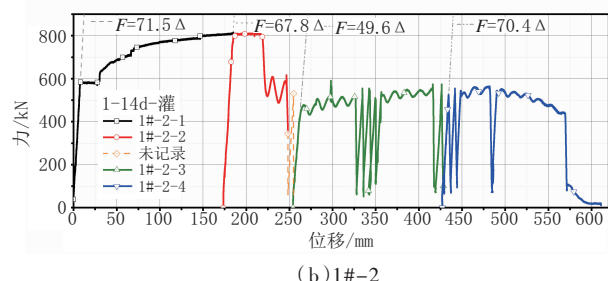
试验中仅采用灌浆工艺、锚固长度为 14d 的单拉试件 1#-2 样本最终发生了钢筋拔出及波纹钢管断裂的破坏模式。一方面表明了波纹钢管内砂浆对钢筋锚固能力的不足,另一方面也表明了波纹钢管断口及破坏范围内的局部的强度不足。

4.3 力-位移曲线

各样本的力-位移曲线按照试件编号分别如图 7、图 8、图 9、图 10、图 11、图 12、图 13 所示。虽出现了两种不同的破坏模式,但在首次顶升过程,两类破坏模式的试件都表现出了钢筋典型的强度发展曲线,仅多次顶升造成损伤后破坏模式发生转变。



(a) 1#-1

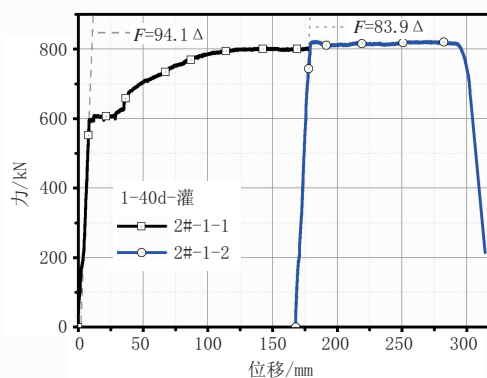


(b) 1#-2

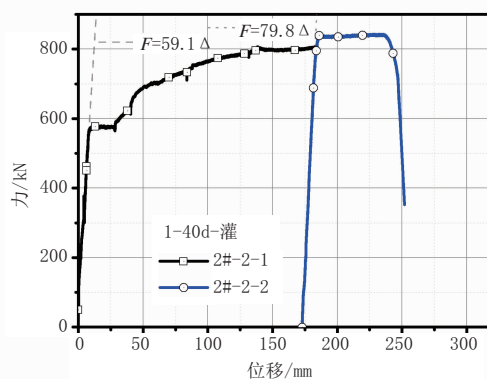
图 7 1# 试件(1-14d-灌)力-位移曲线

对大部分试验样本,自由长度均在 1 280~1 330 mm,按照 25%的断后总伸长率,取 320 mm 作为横坐标范围绘制曲线,5#-1 样本自由长度为 840 mm,取 210 mm 绘制,使得各曲线在图像上可直观作出一定的比较。

1#-2 试件最后发生拔出破坏,图中每一次强度骤降即为一次“响声”,最后一次骤降为波纹钢管拉断,前 11 次均为钢筋拔出回弹,如图 7(b)所示。

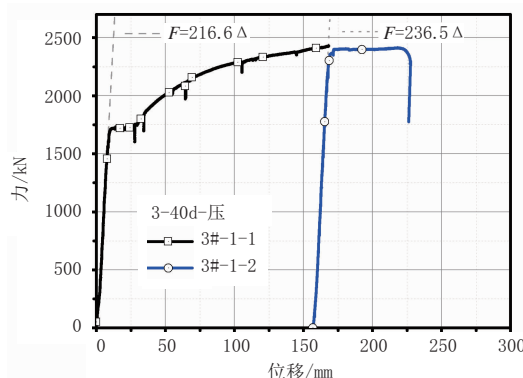


(a) 2#-1

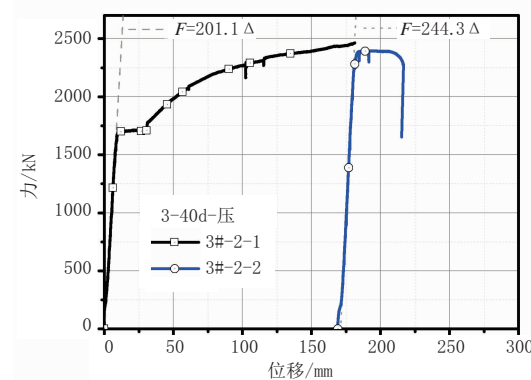


(b) 2#-2

图 8 2# 试件(1-40d-灌)力-位移曲线



(a) 3#-1



(b) 3#-2

图 9 3# 试件(3-40d-压)力-位移曲线

2#-1 试件最后钢筋拔出段较长,这也导致其最大位移较大,如图 8(a)所示。

5#-2 试件采用备用钢梁,其钢筋自由长度较短,位移最大值也较小,如图 11(b)所示。

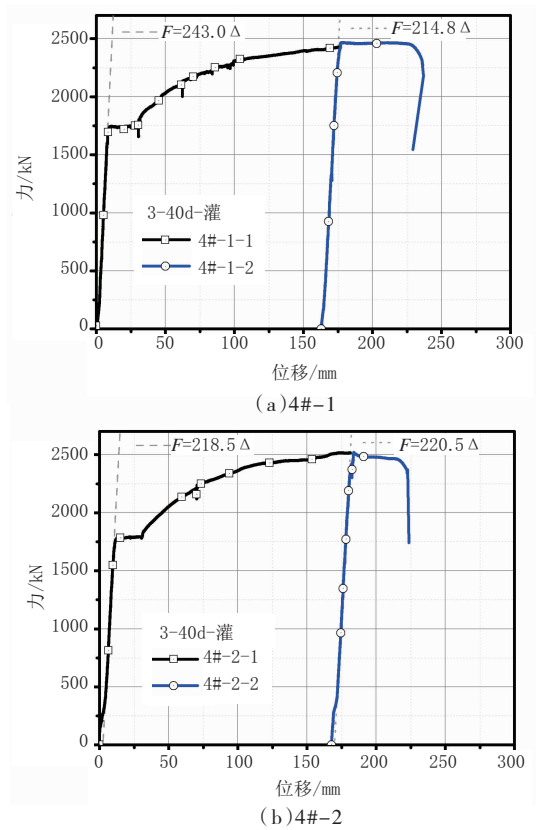


图 10 4# 试件(3-40d-灌)力-位移曲线

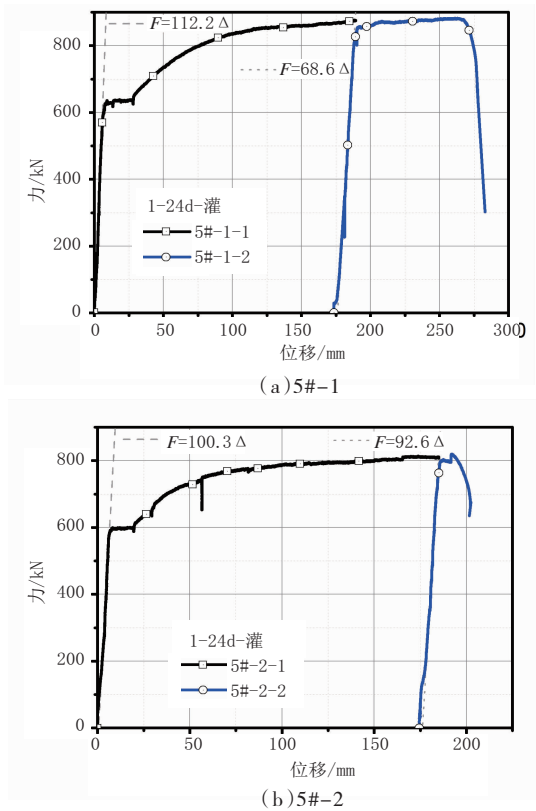


图 11 5# 试件(1-24d-灌)力-位移曲线

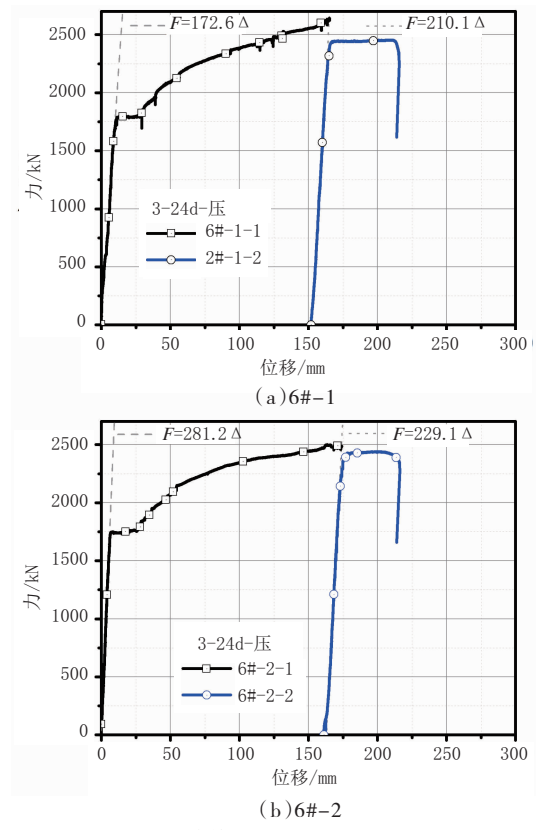


图 12 6# 试件(3-24d-压)力-位移曲线

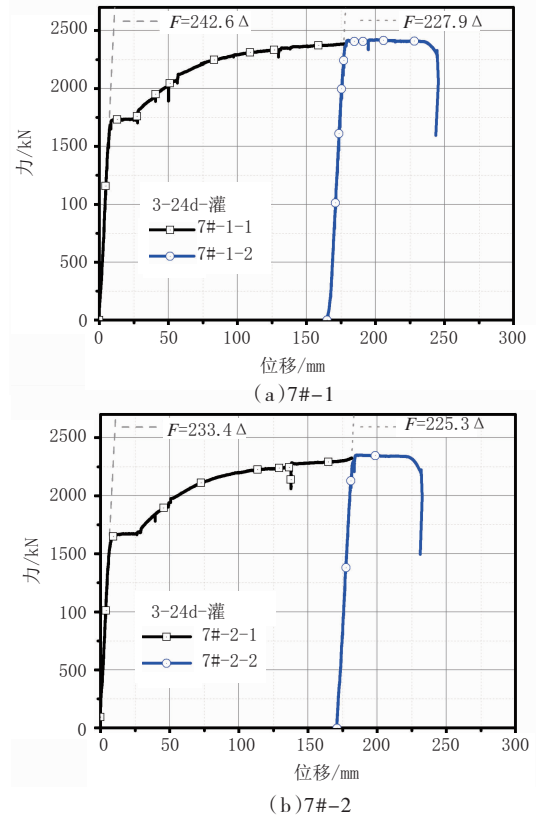


图 13 7# 试件(3-24d-灌)力-位移曲线

6#-1 首次顶升后期,钢梁受力不均导致千斤顶顶升速率不同,使得钢梁面内倾斜,如图 12(a)中最后阶段力仍较快速上升,可能与钢梁倾斜导致钢梁向下传递的水平分力增加了千斤顶的摩阻或黏

滞力。

5 主要结论

(1)根据《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107—

2016)^[3]第 3.0.5 条的要求,钢筋连接接头需要满足极限抗拉强度的要求。本试验结果显示,从极限抗拉强度角度,各灌浆波纹钢管连接方式均满足 I 级接头的要求。参考《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015)^[4]第 3.2.2 条要求,14d 锚固长度的连接有一个样本不满足破坏时应断于接头外钢筋的要求。本试验 24d 锚固长度的灌浆波纹钢管连接方式(单拉 /3 根群拔、灌浆 / 压浆)均满足现行标准的要求,满足强度要求的同时使得破坏模式为接头外钢筋断裂(见表 2)。

(2)钢筋锚固长度对裂缝的发展未发现明显影响。24d 与 40d 的裂缝发展深度均小于其锚固范围,14d 试件裂缝发展最深至 16 倍钢筋直径,一定程度上反映了锚固性能。

(3)24d 的钢筋锚固长度可以保证 3 根钢筋群拔的安全。从加载的弹性刚度来看,单拉的刚度大于群拔刚度,体现了拉拔钢筋间的互相影响。从裂缝深度来看,群拔试验裂缝平均扩展至 21.8d,范围明显大于单拉试验(平均 9.5d),表明群拔试件 3 根拉拔钢筋相互影响的效应。

表 2 性能要求验算表

试件描述	破坏模式	强度 \ MPa		性能要求	级别
		屈服强度	峰值强度		
1-14d- 灌	拉断	465.4	643.6	《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107—2016) I 级 $f_{msl}^0 \geq f_{stk} = 540 \text{ MPa}$ 钢筋拉断 $f_{msl}^0 \geq 1.10 f_{stk} = 594 \text{ MPa}$ 连接件破坏 II 级 $f_{msl}^0 \geq 1.10 f_{stk} = 540 \text{ MPa}$ III 级 $f_{msl}^0 \geq 1.25 f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ 《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015) 接头试件实测极限抗拉强度不应小于钢筋极限抗拉强度标准值 破坏时应断于接头外钢筋	I 级
	拔出	462.2	646.7		破坏形态不满足 JGJ 355
1-40d- 灌	拉断	478.7	639.7		I 级
	拉断	458.5	642.6		I 级
3-40d- 压	拉断	457.2	640.3		I 级
	拉断	453.1	635.8		I 级
3-40d- 灌	拉断	462.3	644.0		I 级
	拉断	474.1	668.2		I 级
1-24d- 灌	拉断	504.4	697.9		I 级
	拉断	475.6	647.9		I 级
3-24d- 压	拉断	476.6	651.1		I 级
	拉断	464.9	647.2		I 级
3-24d- 灌	拉断	459.3	633.0		I 级
	拉断	442.7	616.9		I 级

注:表中 f_{msl}^0 为接头试件实测极限抗拉强度; f_{stk} 为钢筋极限抗拉强度标准值。

(4)试验中未发现灌浆、压浆试件对锚固长度的影响。

(5)波纹钢管中钢筋贴边在 24d 下锚固可靠,未发现滑移破坏。其他影响在于钢筋贴边意味着锥孔形态的改变,锥孔深度及倾角可能改变;1#-2 试验最后产生了波纹钢管拉断,波纹钢管断口形态为贴近钢筋一侧最长而远离钢筋一侧最短。

6 结 语

依托上海两港大道新建工程,开展了预制拼装桥梁立柱钢筋与盖梁贴边埋置灌浆波纹钢管锚固连接性能试验研究,研究损伤发展过程、破坏模式、力与位移曲线等力学行为,并进行了归纳总结,为实际工程的应用提供了技术支撑。具体取得以下主要成果。

(1)24d 钢筋锚固长度的灌浆波纹钢管连接方式

(单拉 /3 根群拔、灌浆 / 压浆) 均满足现行标准的要求,破坏模式为接头外钢筋断裂。

(2)24d 的钢筋锚固长度可以保证 3 根钢筋群拔的安全。试验发现群拔试件 3 根拉拔钢筋存在相互影响的效应。

(3)未发现灌浆、压浆试件对锚固长度的影响。目前尚无灌浆施工技术标准,施工前需制定灌浆工艺要求,确保灌浆质量的稳定性。

参考文献:

[1] 沈维芳,卢永成,王志强,等. 新型灌浆波纹钢管锚固连接性能试验研究与应用[J].施工技术,2020(S):928-933.
[2] 卢永成等. 桥梁预制拼装技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
[3] JGJ 107—2016,钢筋机械连接技术规程[S].
[4] JGJ 355—2015,钢筋套筒灌浆连接应用技术规程[S].