DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.03.016

钢筋交叉搭接桥面板湿接缝轴拉试验研究

李洞明
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 2000092]

摘　要：预制拼装桥梁主梁横向接缝常采用钢筋交叉搭接的桥面板湿接缝形式,但是这种连接方式的计算方法有待完善,正常使用性能尚无试验数据基础。因此,通过轴拉试验揭示不同缝宽、钢筋形式、接缝材料组合下桥面板湿接缝的性能,为理论计算方法提供试验数据,为设计提供参考。

关键词：湿接缝;钢筋交叉搭接;预制拼装
中图分类号：U445　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1009-7716(2022)03-0064-05

1　概　述

目前随着预制拼装技术的发展和广泛应用,小箱梁、空心板梁、T 梁、组合梁等预制主梁的横向湿接缝常采用钢筋交叉搭接的桥面板湿接缝形式,但是这种连接方式的计算方法有待完善，正常使用性能尚无试验数据基础。为此,通过考虑多种湿接缝形式,以钢筋形状、接缝材料、接缝宽度、钢筋纵向间距布置、插销钢筋数量等构造参数为变量,制作足尺模型进行轴拉加载试验。通过试验探明不同浇筑材料中不同形状钢筋的锚固性能,揭示接缝破坏特征,为理论计算方法提供试验数据,为设计提供参考。

2　发展趋势和国内外研究存在的问题

随着桥梁预制拼装技术的完善与推广，预制主梁横向接缝的承载力、耐久性和构造优化成为研究重点之一[1]。钢筋交叉搭接的现浇混凝土接缝目前已广泛应用于国内外装配式小箱梁、空心板梁、T 梁、组合梁的桥面板连接中。尽管预制结构湿接缝已得到广泛应用,但仍须解决几个主要问题:

(1)目前 U 型钢筋、直钢筋和弯钩搭接长度尚无合适的计算方法，国内外的研究多直接参照末端带弯钩的钢筋搭接长度确定。文献资料显示,国内外对几种形状钢筋接缝承载能力的相关研究较少，主要计算方法可归类为拉压杆模型[2]、塑性功模型[3-4]、经验回归方法[5-6]三种,但相互间计算结果的吻合程度有待验证。

(2)对于型钢筋、直钢筋和弯钩钢筋接缝正常使用性能尚无试验数据基础。由于界面材料不均匀且强度较弱,接缝界面通常控制构件的开裂特性。裂缝开展的影响因素较多,常规设计中相关设计缺乏理论验算和构造对比的依据。

收稿日期：2021-06-18
作者简介：李洞明(1979—)，男，硕士，高级工程师，从事桥梁设计工作。

3　试验主要研究内容

针对钢筋现浇接缝的性能特点和以往研究的不足进行系列模型试验,主要研究内容为现浇不同浇筑材料接缝中不同形状钢筋的锚固性能和 接缝受力性能。

4　试件参数选择

关于钢筋搭接的混凝土湿接缝,为保证接缝承载力与延性,判定受拉状态下后浇混凝土破坏与接缝钢筋屈服的界限是研究与设计的关键。影响钢筋接缝受力性能的因素很多,试验主要考虑了以下 5 个因素:

(1)接缝钢筋搭接长度(含带弯钩钢筋或 U 型钢筋的曲线部分)。湿接缝宽度直接影响普通钢筋强度锚固长度,既而决定其强度发挥。接缝设计时应尽量减少现浇混凝土工作量,预留接缝内足够的工作空间。

(2)接缝横向钢筋纵向间距。预制构件钢筋初始间距、拼装后两侧钢筋纵向间距存在较大变异性,可能导致接缝受力机制和破坏模式发生变化。试验中采用几种钢筋纵向对拼间距予以模拟:同侧钢筋初始间距为 20 cm,拼装后两侧钢筋纵向间距为 10 cm+10 cm 或 5 cm+15 cm(钢筋贴近)。

(3)接缝混凝土类型。接缝混凝土材性决定接缝内应力(重)分布特性,影响接缝混凝土抗裂性和混凝土破坏模式。本试验采用 C60 混凝土(以下简称“C60NC”)、高性能 C80 混凝土(以下简称“C80HPC”)、高性能

C80 钢纤维混凝土（以下简称“C80SFRC”）和超高性能混凝土（以下简称“UHPC”）4 种现浇混凝土类型。

（4）插销钢筋（即核心混凝土加强钢筋）数量。钢筋搭接区域内核心混凝土柱的配筋率可能影响横向钢筋对混凝土的销栓作用，改变接缝整体的受力性能。

（5）钢筋形状。钢筋形状直接影响钢筋在接缝材料内的受力性能。本试验采用的钢筋形状为 90°弯钩钢筋、180°弯钩钢筋、直钢筋、螺帽直钢筋、U 型钢筋和焊接直钢筋。

5　试件设计

试验共分为 5 个系列（46 只试件）：4 个参数化试件系列，1 个对比试件系列（见表 1）。其中，参数化试件系列每个试件均有两个，以减小个体试件的偶然误差。系列一为 C80SFRC 接缝，钢筋带 180°弯钩（共 8 只）；系列二为 UHPC 接缝，钢筋带 90°弯钩（共 4 只）；系列三为 UHPC 接缝，钢筋无弯钩（共 12 只）；系列四为 C80HPC 接缝，钢筋带 180°弯钩（共 12 只）；系列五为对比试件系列（共 10 只）。桥面板钢筋采用直径 20 mm 的 HRB400 钢筋，钢筋外露长度（锚固长度）为湿接缝宽度 S1 减 30 mm，钢筋搭接长度 S2 为湿接缝宽度减 60 mm，见图 1。插销钢筋采用 4 根直径 16 mm 的 HRB400 钢筋。UHPC 28 d 压强度不小于 120 MPa，试验方法标准采用《活性粉末混凝土》（GB/T 31387—2015）。

6　试验加载装置

试验采用千斤顶分级顶升加载，加载系统见图 2。试件下侧牛腿通过钢横梁和精轧螺纹钢锚固于地槽中。两相同规格的千斤顶通过同一个油泵输出油压，保证其力相等。

7　试验结果与分析

7.1　试验结果

为了尽可能全面地分析试验结果，选取了对研究接缝试件静力性能很重要的两个参数：接缝开裂时的开裂荷载和试件最后破坏时的破坏荷载。由于界面材料不均匀、强度较弱，开裂荷载反映了接缝界面的开裂特性。达到破坏荷载时，接缝的破坏特征反映了钢筋锚固性能和接缝受力性能。

试验结果，见表 2。

7.2　结果分析

（1）所有试件接缝界面首先开裂并贯穿。C80SFRC 接缝开裂荷载较大，试件开裂时截面平均应力与 C60NC 抗拉标准强度之比约为 32.8%。UHPC 接缝开裂荷载较小，试件开裂时截面平均应力与 C60NC 抗拉标准强度之比约为 26.5%。C80HPC 接缝开裂荷载较大，试件开裂时截面平均应力与 C60NC 抗拉标准强度之比约为 49%。

（2）NC–J1 试件在破坏时钢筋拉断，验证了其承载力能够满足工程需求，但其接缝宽度 500 mm，现浇体量较大，且钢筋需要焊接，工艺繁杂。

（3）工字型接缝能够明显提高接缝的抗裂性。

（4）对于采用 C80HPC 材料的接缝，插销钢筋能够显著提升试件的承载力和延性。无插销钢筋时接缝最终破坏呈波浪形（两侧相邻 U 型钢筋圆端头连线）拉开，有插销钢筋时接缝破坏为混凝土整体碎裂，无插销钢筋接缝的破环荷载为有插销钢筋接缝的 55%左右。根据无插销钢筋接缝对比试件试验结果，建议不同钢筋形式的接缝均设置插销钢筋（即核心混凝土加强钢筋）。

（5）接缝使用 C80SFRC 材料时，180°弯钩试件的承载力略大于 U 型钢筋试件。这可能是由于两个 180°弯钩形成的 U 型环横向套箍作用更大，增大了核心混凝土的抗剪切能力。

（6）接缝采用 C60NC 材料，即 28 cm C60NC 接缝 +U 型环钢筋（NC–J2）时，同样能够使钢筋屈服，但钢筋屈服后，强度增长相对于其他材料接缝略小些。与之相比，180°弯钩 +C80HPC 的组合能够较大提高接缝的承载力。

（7）使用 UHPC 接缝材料的情况下，直钢筋构造的承载力＜90°弯钩构造的承载力＜螺帽直钢筋构造的承载力＜U 型钢筋构造的承载力。

（8）采用 C80SFRC 材料的情况下，螺帽直钢筋构造的承载力小于 180°弯钩钢筋构造的承载力。

（9）在 C80HPC 中加入钢纤维的 SFRC 能够提高此类接缝构造的承载力。

（10）在使用 UHPC 材料的情况下，相比直钢筋构造，采用 90°弯钩钢筋能够提升试件的承载力。

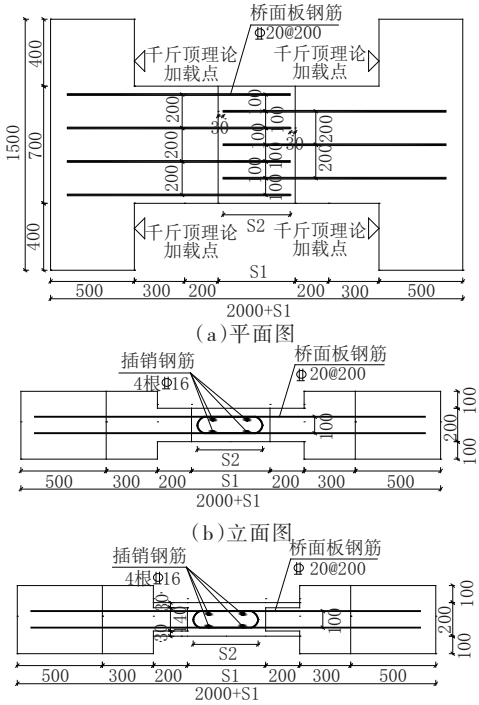
（11）钢筋纵向布置对接缝承载力的影响。系列一 C80SFRC 接缝，钢筋正位布置（10 cm+10 cm）试件的承载力比偏位布置（15 cm+5 cm）更大，平均大 13%。系列三 UHPC 接缝，钢筋正位布置试件的承载力比偏位布置略大，平均大 5%。系列四 C80HPC 接缝，钢筋正位布置与偏位布置的承载力没有显现出明显相关趋势。根据试验结果，实际工程中，钢筋纵

表 1　试件参数

系列编号	接缝特征	试件编号	湿接缝长度 S1/mm	钢筋纵向间距
1	C80SFRC、钢筋带 180° 弯钩	SFRC-J1	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		SFRC-J1-2	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		SFRC-J2	280	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		SFRC-J2-2	280	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		SFRC-J3	230	单侧 20 cm,交叉后 15cm+5cm
		SFRC-J3-2	230	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		SFRC-J4	280	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		SFRC-J4-2	280	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5cm
2	UHPC、钢筋带 90° 弯钩	UHPC-J1	170	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J1-2	170	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J2	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J2-2	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
3	UHPC、钢筋无弯钩	UHPC-J3	170	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J3-2	170	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J4	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J4-2	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J5	330	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J5-2	330	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		UHPC-J6	170	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		UHPC-J6-2	170	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		UHPC-J7	230	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		UHPC-J7-2	230	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		UHPC-J8	330	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		UHPC-J8-2	330	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
4	C80HPC、钢筋带 180° 弯钩	HPC-J1	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		HPC-J1-2	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		HPC-J2	280	单侧 20 cm,交叉后 10cm
		HPC-J2-2	280	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		HPC-J3	330	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		HPC-J3-2	330	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
		HPC-J4	230	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		HPC-J4-2	230	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		HPC-J5	280	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		HPC-J5-2	280	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		HPC-J6	330	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
		HPC-J6-2	330	单侧 20 cm,交叉后 15 cm+5 cm
5	对比试件 1:C60NC、钢筋焊接	NC-J1	500	单侧 20 cm,两侧钢筋位置对应
	对比试件 2:UHPC 工字型接缝、钢筋带 90°弯钩	UHPC-J9	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
	对比试件 3:C80HPC、钢筋带 180°弯钩	HPC-J7		参考 HPC-J1,无插销钢筋
	对比试件 4:C80HPC、钢筋带 180°弯钩	HPC-J8		参考 HPC-J2,无插销钢筋
	对比试件 5:C80SFRC、U 型钢筋	SFRC-J5	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
	对比试件 6:C80HPC、U 型钢筋	HPC-J9	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
	对比试件 7:C60NC、U 型钢筋	NC-J2	280	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
	对比试件 8:UHPC、U 型钢筋	UHPC-J10	170	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
	对比试件 9:C80SFRC、钢筋加螺帽	SFRC-J6	230	单侧 20 cm,交叉后 10 cm
	对比试件 10:UHPC、钢筋加螺帽	UHPC-J11	170	单侧 20 cm,交叉后 10 cm

表 2　试验结果

系列编号	试件编号	开裂荷载 /kN	破坏荷载 /kN	钢筋是否屈服	破坏特征(初始裂缝均在两种材料交界面上)
1	SFRC-J1	110	952	屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	SFRC-J1-2	150	969	屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	SFRC-J2	190	837	部分屈服	一边保护层太小,而且偏心受力,SFRC 中间碎裂
	SFRC-J2-2	76.8	1 064	屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	SFRC-J3	130	940	屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	SFRC-J3-2	90	791	部分屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	SFRC-J4	150.8	941	屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	SFRC-J4-2	150	918	屈服	SFRC 中间碎裂,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
2	UHPC-J1	110	848	部分屈服	UHPC 中间横向撕裂,钢筋滑移
	UHPC-J1-2	90	752	部分屈服	UHPC 中间横向撕裂,钢筋滑移
	UHPC-J2	112.4	623	屈服	钢筋拉断,因为设备故障,导致测试数值不对
	UHPC-J2-2	92	1 095	屈服	UHPC 中间横向撕裂, 钢筋接近拉断
3	UHPC-J3	90	631	未屈服	UHPC 中间横向撕裂,钢筋滑移
	UHPC-J3-2	110	628	未屈服	UHPC 中间横向撕裂,钢筋滑移
	UHPC-J4	102.2	1 190	屈服	UHPC 中间横向撕裂,钢筋接近拉断
	UHPC-J4-2	110	1 059	屈服	交界面处钢筋拉断
	UHPC-J5	191.6	1 092	屈服	交界面处钢筋拉断
	UHPC-J5-2	150.8	1 120	屈服	交界面处钢筋拉断
	UHPC-J6	90	592	未屈服	UHPC 中间横向撕裂
	UHPC-J6-2	90	627	未屈服	UHPC 中间横向撕裂
	UHPC-J7	74.2	1 122	屈服	交界面处钢筋拉断,同时有部分钢筋滑移
	UHPC-J7-2	110	912	屈服	受力偏心,四根钢筋拉断,两根滑移
	UHPC-J8	94.6	1 123	屈服	交界面处钢筋拉断
	UHPC-J8-2	115	1 064	屈服	交界面处钢筋拉断
4	HPC-J1	130	941	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J1-2	191.6	852	部分屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J2	190	1 009	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J2-2	190	929	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J3	232.2	997	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J3-2	168.6	965	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J4	150.8	817	部分屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J4-2	210	934	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J5	191.6	906	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J5-2	230	953	屈服	HPC 中间破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
	HPC-J6	212	1 051	屈服	交界面处钢筋拉断一根,HPC 中间破碎
	HPC-J6-2	250	1 031	屈服	HPC 破碎,受力后弯钩向外顶,顶碎保护层
5	NC-J1	190	1 335	屈服	后期偏心受力,钢筋拉断数根
	UHPC-J9	310	1 166	屈服	钢筋拉断,破坏界面为工字型
	HPC-J7	310	506	未屈服	HPC 中产生波浪形裂缝
	HPC-J8	190.6	510	未屈服	HPC 中产生波浪形裂缝
	SFRC-J5	210	926	屈服	核心混凝土剪切破碎
	HPC-J9	270.6	840	部分屈服	核心混凝土剪切破碎
	NC-J2	170	871	屈服	核心混凝土剪切破碎
	UHPC-J10	90	1 116	屈服	交界面处钢筋拉断
	SFRC-J6	230	834	部分屈服	SFRC 中间碎裂,试件制作成了 15 cm+5 cm,钢筋保护层太小
	UHPC-J11	90	930	屈服	UHPC 横向波浪形撕裂



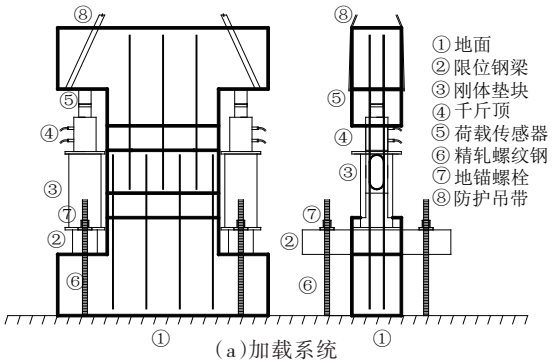
(a)平面图

(b)立面图

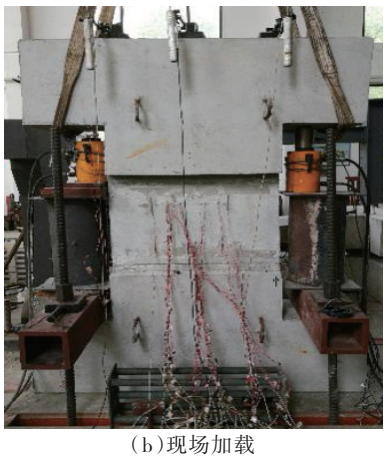
(c)立面图(工字型接缝)

注：仅示桥面板钢筋和插销钢筋。

图 1　试件构造钢筋示意图(单位：mm)



(a)加载系统



(b)现场加载

图 2　加载系统

向按正位布置。

8　湿接缝系列化设计参数建议

根据试验结果，并考虑施工因素，对桥面板钢筋(HRB400)直径 d=20 mm 的湿接缝设计参数建议如下：

(1)对于系列一钢筋带 180°弯钩的 C80SFRC 试件，接缝的承载力与钢筋搭接长度呈正相关，同时正位布置试件的承载力比偏位布置更大，建议此类型构造接缝宽度不小于 300 mm(12.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 250 mm(12.5d)。根据系列五对比试件 5 的结果，采用 C80SFRC 材料的 U 型钢筋接缝构造的接缝宽度同样建议不小于 300 mm(12.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 250 mm(12.5d)；对比试件 9，即采用 C80SFRC 材料的钢筋 + 螺帽接缝构造，接缝宽度也建议不小于 300 mm(12.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 250 mm(12.5d)。

(2)对于系列二钢筋带 90°弯钩的 UHPC 试件，接缝的承载力与钢筋搭接长度也呈正相关，同时正位布置试件的承载力也比偏位布置略大。建议此类型构造的接缝宽度不小于 250 mm(10d+50 mm)、钢筋搭接长度不小于 200 mm(10d)。

(3)对于系列三钢筋无弯钩的 UHPC 试件，接缝承载力与钢筋搭接长度同样也呈正相关，同时正位布置的试件承载力同样比偏位布置略大。建议此类型构造的接缝宽度不小于 250 mm(10d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 200 mm(10d)。根据系列五对比试件 8 结果，采用 UHPC 材料的 U 型钢筋接缝构造的接缝宽度建议不小于 200 mm(7.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 150 mm(7.5d)；对比试件 10，即采用 UHPC 材料的钢筋 + 螺帽接缝构造，接缝宽度也建议不小于 200 mm(7.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 150 mm(7.5d)。

(4)对于系列四钢筋带 180°弯钩的 C80HPC 试件，接缝的承载力与钢筋搭接长度一样呈正相关，接缝的承载力与钢筋纵向布置无明显相关性。建议此类型构造接缝宽度不小于 300 mm(12.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 250 mm(12.5d)。根据系列五对比试件 6 结果，采用 C80HPC 材料的 U 型钢筋接缝构造的接缝宽度建议不小于 300 mm(12.5d+50 mm)，钢筋搭接长度不小于 250 mm(12.5d)。

(5)根据系列五对比试件 7 结果，采用 C60NC、U 型钢筋构造的接缝也能够满足屈服条件，相比其他材料混凝土，建议接缝宽度大于 300 mm(12.5d+50 mm)、钢筋搭接长度大于 250 mm(12.5d)。

9　结　语

通过湿接缝轴拉试验研究了不同缝宽、钢筋形

(下转第 73 页)

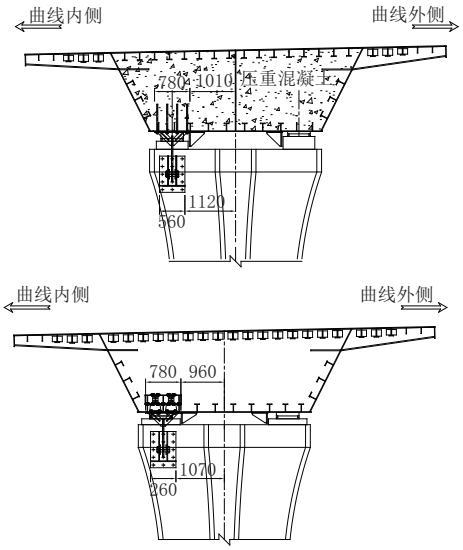


图 12　钢箱梁桥增设抗拉拔装置改造示意图(单位:mm)

5　结　论

通过南京市已完成的城市独柱墩桥梁的改造工程,得出以下主要结论:

(1)特征状态 1 不满足规范的,可在梁底与桥墩之间设置抗拉拔装置,使支座始终处于受压状态。

(2)特征状态 2 不满足规范的,可在独柱墩上采用钢抱箍形式增加支座,提高桥梁的横向抗倾覆稳定性系数。

(3)特征状态 1 和特征状态 2 都不满足规范的,混凝土箱梁可以通过在中间墩增加支座的方式进行改造,钢箱梁可以通过增设抗拉拔装置进行改造。

参考文献:

[1] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
[2] CJJ 99—2017,城市桥梁养护技术标准[S].

(上接第 68 页)

式、接缝材料组合下桥面板湿接缝的性能,探明了不同浇筑材料中不同形状钢筋的锚固性能,揭示了接缝破坏特征,为理论计算方法提供了试验数据,并提出了系列化设计参数,为设计提供参考,保证了湿接缝的安全性和耐久性,促进了桥梁预制拼装技术的发展。

参考文献:

[1] 李国平.全预制混凝土桥梁技术概论[C] 第十八届全国桥梁学术会议论文(上册),2008.
[2] ONG K C G. Flexural behavior of precast joints with horizontal loop connections[J].Aci Structural Journal,2006,103(5):664-671.
[3] JOERGENSEN H B, HOANG L C. Strength of loop connections between precast bridge decks loaded in combined tension and bending [J].Structural Engineering International,2018,25(1):71-80.
[4] JOERGENSEN H B,HOANG L C.Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension[J]. Engineering Structures,2013,52:558-569.
[5] ZALESOV A S,KIRILLOV A P,RUBIN O D,et al. Calculation of the strength and design of welding loops and linear anchor joints in combined precast-in situ reinforced concrete members [J]. Hydrotechnical Construction,1989,23(2):120-124.
[6] 朱玉,丁德豪.预制混凝土梁湿接缝环形钢筋搭接长度研究[J].公路,2015,60(12):89-93.