

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.08.018

塔梁固结斜拉桥局部分分析及优化设计研究

丁滨阳

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:斜拉桥塔梁固结处的构造复杂,是整个斜拉桥体系关键受力位置,因此需要对其进行局部精细化分析,为塔梁固结处局部构造设计及配筋优化提供理论依据。为研究塔梁固结斜拉桥塔和主梁结合位置处的受力性能,以本溪市小华山大跨度塔梁固结斜拉桥为工程案例,采用三维有限元软件建立塔梁实体局部模型,分析原有设计方案下桥塔底部实心段与空心段结合面的纵横向应力、桥塔底部与主梁交接处的纵横向应力。具体分析过程为:基于正交试验方法的参数分析,选择桥塔底部过渡面倒角尺寸和实心段高度作为分析参数,提取桥塔底部实心段顶面的纵横向应力、桥塔底部与主梁结合面的纵横向应力这4个指标作为目标评价函数,然后定义综合目标评价函数 W ,确定设计参数最优组合;采用极差分析法和方差分析法对结构综合目标评价函数进行分析,获得结构设计参数的敏感性和显著性。结果表明:塔底实心段高度是对塔梁固结处局部应力影响程度最大、最敏感的参数;通过构造设计优化后的参数组合为:塔底过渡面倒角宽度550 mm、倒角高度1500 mm;塔底实心段高度1000 mm;与原设计方案相比,塔底实心顶面纵向应力减小了21.8%,横向应力减小了14.2%;塔梁结合面纵向应力减小了7.3%,横向应力减小了3.7%;参数敏感性程度由强到弱依次为:塔底实心段高度、塔底过渡面倒角宽度、塔底过渡面倒角高度。

关键词:斜拉桥;塔梁固结体系;局部分分析;正交试验;参数优化

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)08-0073-05

0 引言

随着国家经济的不断发展和社会发展水平的逐渐提高,城市桥梁的跨径越来越大,对于桥梁的要求也从通行功能逐渐延申至桥梁美学方面^[1-2]。斜拉桥作为一种索结构体系,结构承载能力大,跨越能力强,且桥梁外形优美,能够很好地融入城市的发展规划中,成为当地一张显耀的名片,因此越来越多的城市桥梁采用斜拉桥型式。而塔梁固结斜拉桥作为一种兼具梁桥和斜拉桥2种结构受力特点的桥型,在城市大跨径桥梁中得到了广泛使用^[3]。但是该种桥型在其塔梁固结处的局部受力相对复杂,在进行构造设计时,需充分考虑各参数变化。目前国内外已有大量学者对塔梁固结斜拉桥进行了深入探讨^[4-5],但针对大跨度塔梁固结斜拉桥局部构造设计优化的研究较少。为此,本文以某大跨度塔梁固结斜拉桥为工程案例,采用三维有限元软件建立塔梁实体局部模型,分析原有设计方案下桥塔底部实心段与空心段结合面的纵横向应力、桥塔底部与主梁交接处的纵

横向应力。具体分析过程为:基于正交试验方法的参数分析,选择桥塔底部过渡面倒角尺寸和实心段高度作为分析参数,提取桥塔底部实心段顶面的纵横向应力、桥塔底部与主梁结合面的纵横向应力这4个指标作为目标评价函数,然后定义综合目标评价函数 W ,确定设计参数最优组合;采用极差分析法和方差分析法对结构综合目标评价函数进行分析,获得结构设计参数的敏感性和显著性^[6-9]。

1 工程概况

本溪市小华山大桥主桥为75 m+158 m+75 m双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,采用158 m主跨跨越深水区域,75 m边跨跨越两岸大堤,总长315.16 m。塔柱采用双柱式,柱尺寸顺桥向长4.5 m,横桥向宽2.5 m;壁厚顺桥向1.25 m,横桥向0.65 m;横桥向中距与索面距一致为23.5 m。桥面以上塔柱高35 m,两主塔均采用塔梁固结体系,主墩顶设支座。桥型布置图见图1。

2 塔梁结合段局部分分析

2.1 有限元模型建立

针对塔梁固结斜拉桥的特点,采用三维空间有限

收稿日期:2023-07-03

作者简介:丁滨阳(1997—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

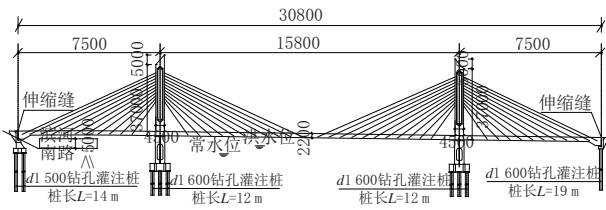


图1 桥型布置图(单位:cm)

元分析软件建立局部模型。为消除局部模型边界效应,模型选取支点处7.5 m节段纵梁,支点处设置一道宽3.5 m的中横梁。根据圣维南原理,模型中桥塔空心段高度为9 m,底部实心段和过渡段按实际情况建立。整个模型采用三维可变性solid单元模拟,纵梁支点处建立圆形支座,通过绑定将支座上表面与纵梁底面连接,在支座下表面施加压力荷载,两桥塔顶部空心段表面采用完全固结的约束状态。

塔梁固结段局部空间模型图见图2。

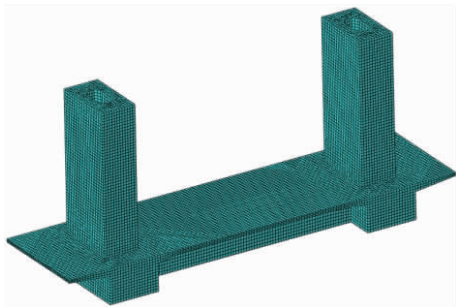


图2 塔梁固结段局部空间模型图

2.2 局部应力分析

通过所建立的模型对塔梁固结段进行分析,在支座最大吨位下出现最不利工况,施加最不利竖向压力荷载,得到桥塔和纵梁的纵横向最不利主应力。

极限工况下塔梁固结处局部应力云图见图3。

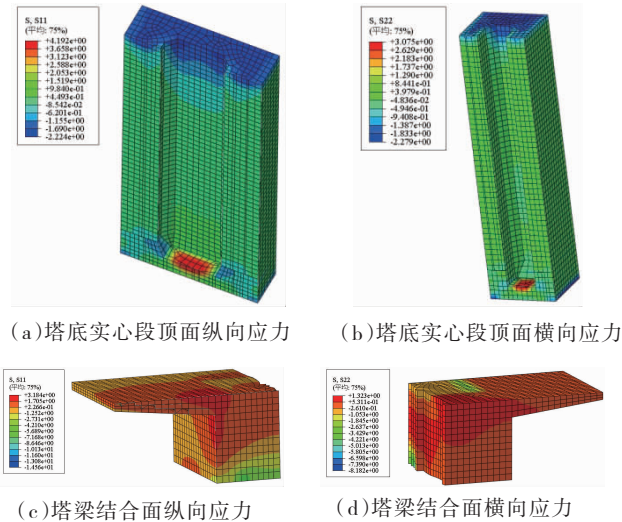


图3 极限工况下塔梁固结处局部应力云图(单位:MPa)

由图3可知:塔底实心段顶面纵横向拉应力分别为4.192 MPa和3.075 MPa;塔梁结合面纵横向拉应力分别为3.184 MPa和1.323 MPa。由此可知,塔

底实心段顶面纵向应力较大,并且由于实心段高度只有0.5 m,仅仅通过配筋难以满足结构受力要求,因此需要对塔梁固结处构造设计进行优化。

3 塔梁固结构造优化设计

3.1 优化设计方法

3.1.1 正交试验法原理

正交试验法多用于解决多目标优化问题。此方法根据数理统计概率学的原理,基于正交性原理,优选出部分具有代表性的水平组合进行试验,在保证试验结果可靠和结论正确的前提下,使试验次数尽可能地少。由于结构参数较多,引入正交试验法可以在大幅减少模拟次数的同时,获得最优的结构设计参数组合。

3.1.2 综合目标评价函数建立

为将多目标优化问题转换为单目标优化问题,本文采用公式评分法,以塔底实心顶面纵横向应力和塔梁结合面纵横向应力作为评价指标,以优化原有设计方案为目标,建立综合目标评价函数W。综合目标评价函数W的表达式为:

$$W = \frac{\sigma_1}{[\sigma_1]} + \frac{\sigma_2}{[\sigma_2]} + \frac{\sigma_3}{[\sigma_3]} + \frac{\sigma_4}{[\sigma_4]} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \quad (1)$$

式中: σ_1 和 σ_2 分别为塔底实心顶面纵横向应力; σ_3 和 σ_4 分别为塔梁结合面纵横向应力; $[\sigma_1]$ 和 $[\sigma_2]$ 分别为原设计方案塔底实心顶面纵横向应力; $[\sigma_3]$ 和 $[\sigma_4]$ 分别为原设计方案塔梁结合面纵横向应力; W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 为单个目标评价函数。

由式(1)可知,在确定的试验情况下,综合目标评价函数值越小,则抗震性能参数组合越好。

3.1.3 正交表设计及试验参数确定

正交试验法可以有效减少试验次数。选取桥塔底部过渡面倒角尺寸和实心段高度作为正交试验的研究因素进行优化分析。3种试验因素及水平设置见表1。

表1 试验因素及水平设置表

水平	A(塔底过渡面倒角宽度)/mm	B(塔底过渡面倒角高度)/mm	C(塔底实心段高度)/mm
1	200	600	500
2	400	1 000	1 000
3	550	1 500	1 500

每种结构参数选取3种水平,若采用全面试验的研究方法,需要进行27次试验计算才能完成结构参数的优化分析。选用L9(3×3)正交表,对优化参

数进行试验设计,则只需进行9次试验计算。L9(3×3)正交表见表2。

表2 L9(3×3)正交表

试验编号	设置水平		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

3.2 优化结果分析

依托上文中已建成的塔梁固结局部三维实体模型,通过调整3个设计参数,分析不同试验组合的塔底实心顶面纵横向应力和塔梁结合面纵横向应力,得到的模拟结果见表3。

表3 L9(3×3)正交试验数值模拟结果

试验编号	各因素尺寸/mm			评价指标/MPa			
	A	B	C	塔底实心顶面纵向应力	塔底实心顶面横向应力	塔梁结合面纵向应力	塔梁结合面横向应力
1	200	600	500	4.192	3.075	3.184	1.323
2	200	1000	1000	3.796	3.317	3.023	1.281
3	200	1500	1500	3.740	3.818	2.895	1.546
4	400	600	1000	3.537	3.135	3.027	1.276
5	400	1000	1500	3.421	3.459	2.716	1.298
6	400	1500	500	4.051	2.801	3.062	1.299
7	550	600	1500	3.261	3.419	2.932	1.296
8	550	1000	500	3.719	2.563	3.088	1.301
9	550	1500	1000	3.278	2.639	2.952	1.272

根据表3数据,结合式(1)分别计算单个目标评价函数 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 和综合目标评价函数 W 值,计算结果见表4。

由表4可知,8号A3B2C1和9号A3B3C2试验组合的综合目标评价函数 W 值较小,分别为3.68和3.53。9号A3B3C2组合的综合目标评价函数 W 值最小,由此确定塔梁固结处局部设计参数最优组合为:塔底过渡面倒角宽度550mm、倒角高度1500mm;塔底实心段高度1000mm。

将 W 值较小的试验组合局部应力与原方案进行对比分析,结果见表5。由表5可知:塔梁固结处局部

表4 目标评价函数计算结果

试验编号	W_1	W_2	W_3	W_4	W
1	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00
2	0.91	1.08	0.95	0.97	3.90
3	0.89	1.24	0.91	1.17	4.21
4	0.84	1.02	0.95	0.97	3.78
5	0.82	1.12	0.85	0.98	3.78
6	0.97	0.91	0.96	0.98	3.82
7	0.78	1.11	0.92	0.98	3.79
8	0.89	0.83	0.97	0.98	3.68
9	0.78	0.86	0.93	0.96	3.53

设计参数最优组合的力学状态最好,与原方案相比,最优组合的塔底实心顶面纵向应力减小了21.8%,横向应力减小了14.2%;塔梁结合面纵向应力减小了7.3%,横向应力减小了3.7%;8号试验组合的改善幅度略低。由此验证了最优组合选择的正确性。

表5 优化方案与原方案对比表

对比项目	原方案	9号方案		8号方案	
		数值	减小幅度/%	数值	减小幅度/%
塔底实心顶面纵向应力/MPa	4.192	3.278	21.8	3.719	11.3
塔底实心顶面横向应力/MPa	3.075	2.639	14.2	2.563	16.7
塔梁结合面纵向应力/MPa	3.184	2.952	7.3	3.088	3.0
塔梁结合面横向应力/MPa	1.321	1.272	3.7	1.301	1.5
W 值	4.00	3.53		3.68	

3.3 设计参数敏感性分析

为了获得塔底结构设计参数对塔底局部应力的敏感性和显著性,采用极差和方差分析方法,对结构综合目标评价函数 W 进行分析。

3.3.1 极差分析

计算各项评价指标在不同结构设计参数下的极差分析结果,如表6~8所示。

由表6~8可知:在 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 单个目标评价函数下,因素C塔底实心段高度为各目标评价函数的最大值,极差 R 分别为0.12、0.24、0.08、0.08,说明塔底实心段高度的改变对塔梁结合段局部应力是最敏感的因素;其次,在 W_1 、 W_2 和 W_4 单个目标评价函数中,因素A比因素B敏感,而在 W_3 目标评价函数中,因素B比因素A敏感,但总体而言3种因素对 W_3 和 W_4 目标评价函数的敏感程度均较小;在综合目标评价函数 W 中,因素A最敏感,而因素B敏感性最弱。

表6 塔底实心顶面纵横向应力 W_1 和 W_2 极差分析表

指标	W_1			W_2		
	A	B	C	A	B	C
K1	2.80	2.62	2.85	3.32	3.13	2.74
K2	2.63	2.61	2.53	3.06	3.04	2.96
K3	2.45	2.64	2.49	2.80	3.01	3.48
K1	0.93	0.87	0.95	1.11	1.04	0.91
K2	0.88	0.87	0.84	1.02	1.01	0.99
K3	0.82	0.88	0.83	0.93	1.00	1.16
R	0.12	0.01	0.12	0.17	0.04	0.24
因素主次	CAB			CAB		

表7 塔梁结合面纵横向应力 W_3 和 W_4 极差分析表

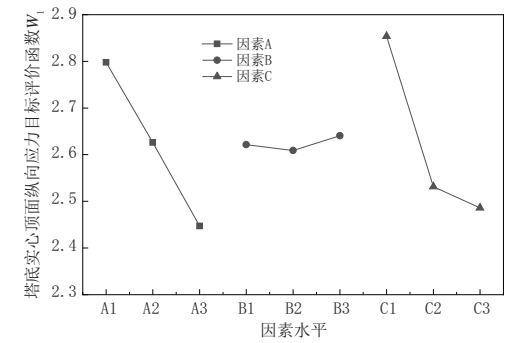
指标	W_3			W_4		
	A	B	C	A	B	C
K1	2.86	2.87	2.93	3.14	2.95	2.97
K2	2.77	2.77	2.83	2.93	2.94	2.90
K3	2.82	2.80	2.68	2.93	3.12	3.13
K1	0.95	0.96	0.98	1.05	0.98	0.99
K2	0.92	0.92	0.94	0.98	0.98	0.97
K3	0.94	0.93	0.89	0.98	1.04	1.04
R	0.03	0.03	0.08	0.07	0.06	0.08
因素主次	CBA			CAB		

表8 综合目标评价函数 W 极差分析表

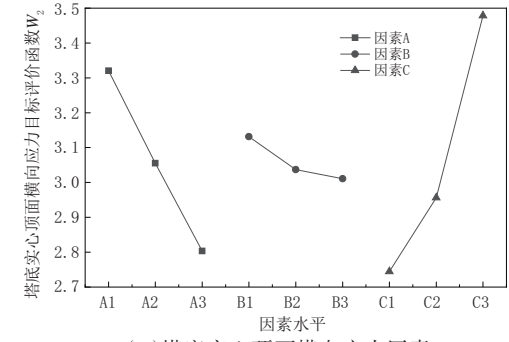
指标	A	B	C
K1	12.12	11.57	11.50
K2	11.38	11.36	11.21
K3	11.00	11.57	11.78
K1	4.04	3.86	3.83
K2	3.79	3.79	3.74
K3	3.67	3.86	3.93
R	0.37	0.07	0.19
因素主次	ABC		

为得到各指标随不同水平的变化规律, 绘制评价指标 - 因子变化曲线, 见图4。

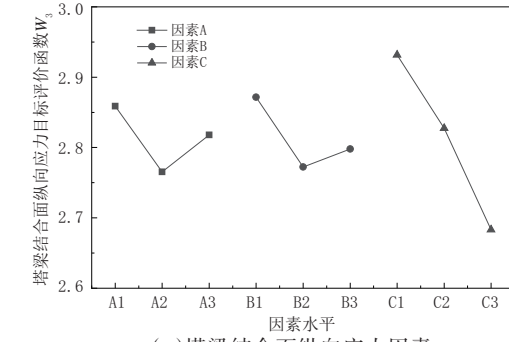
由图4可知, 随着塔底过渡面倒角宽度的增大, 塔底实心顶面纵横向应力和塔梁结合面横向应力呈现减小的趋势; 而随着塔底实心段高度的增加, 实心段顶面和塔梁结合面的纵向应力有所减小, 但实心段顶面横向应力反而增大; 当塔底过渡面倒角高度增大时, 除塔底实心段顶面横向应力随之减小以外, 其他3个应力指标均呈现先下降后上升的趋势。综



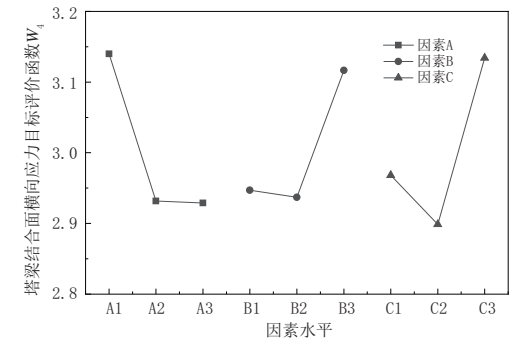
(a) 塔底实心顶面纵向应力因素



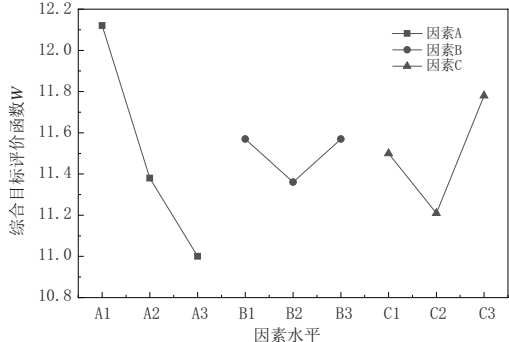
(b) 塔底实心顶面横向应力因素



(c) 塔梁结合面纵向应力因素



(d) 塔梁结合面横向应力因素



(e) 综合评价指标因素

图4 评价指标 - 因子变化曲线

合可知,尽可能地增加塔底过渡面倒角宽度,可以在保证塔梁结合面纵向应力和塔内空间范围的前提下改善塔梁局部应力;而塔底实心段高度增加有利于塔梁局部纵向应力的减小,但不利于横向应力的改善;塔底过渡面倒角高度增加到一定值时,反而会增加塔梁局部应力,应对其进行进一步的对比分析。

3.3.2 方差分析

为进一步判断各因素的显著性,对综合目标评价函数进行方差分析。表9~13为分目标和综合目标下各因素的离差平方和、自由度、平均离差平方和方差 F 值。通过各 F 值与临界 F 值的对比,对各因素影响试验指标的显著性做出判断。

表9 塔底实心顶面纵向应力目标评价函数 W_1 方差分析表

项目	离差平方和	自由度	均方和	F 值	临界 F 值	显著性
因素A	0.020	2	0.010	45.88	$F_{0.1}=(2,2)=9$	非常显著
因素B	0	2	0	0.38	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素C	0.027	2	0.014	59.90	$F_{0.1}=(2,2)=9$	非常显著
误差	0	2	0			
总和	0.048	8				

表10 塔底实心顶面横向应力目标评价函数 W_2 方差分析表

项目	离差平方和	自由度	均方和	F 值	临界 F 值	显著性
因素A	0.045	2	0.023	15.12	$F_{0.1}=(2,2)=9$	显著
因素B	0.003	2	0.002	0.91	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素C	0.095	2	0.048	32.30	$F_{0.1}=(2,2)=9$	非常显著
误差	0.003	2	0.002			
总和	0.145	8				

表11 塔梁结合面纵向应力目标评价函数 W_3 方差分析表

项目	离差平方和	自由度	均方和	F 值	临界 F 值	显著性
因素A	0.001	2	0.001	2.55	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素B	0.002	2	0.001	3.09	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素C	0.010	2	0.005	18.12	$F_{0.1}=(2,2)=9$	显著
误差	0.001	2	0.001			
总和	0.014	8				

综上所述,在 W_1 、 W_2 的方差分析中, F_A 和 F_C 值远大于临界值9,说明塔底过渡面倒角宽度和塔底实心段高度对实心段顶面拉应力的影响非常显著;在 W_3 的方差分析中, F_C 为18.12,说明塔底实心段高度对塔梁结合面纵向应力的影响非常显著;在 W_4 的方

表12 塔梁结合面横向应力目标评价函数 W_4 方差分析表

项目	离差平方和	自由度	均方和	F 值	临界 F 值	显著性
因素A	0.010	2	0.005	1.33	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素B	0.007	2	0.004	0.93	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素C	0.010	2	0.005	1.33	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
误差	0.007	2	0.004			
总和	0.034	8				

表13 综合目标评价函数 W 方差分析表

项目	离差平方和	自由度	均方和	F 值	临界 F 值	显著性
因素A	0.216	2	0.108	9.81	$F_{0.1}=(2,2)=9$	较显著
因素B	0.010	2	0.005	0.46	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
因素C	0.054	2	0.027	2.44	$F_{0.1}=(2,2)=9$	微弱
误差	0.022	2	0.011			
总和	0.302	8				

差分析中, F_A 、 F_B 和 F_C 均远小于临界值9,此时3种因素对塔底局部横向应力的影响微弱。在对综合目标评价函数 W 的方差分析中可知,塔底过渡面倒角宽度对综合目标评价函数的影响较显著,其他2个因素对综合目标评价函数的影响微弱。总体而言,方差分析结果与极差分析结果基本一致。

4 结语

(1)原有设计方案的塔底实心段顶面纵向局部应力达到了4.192 MPa,难以满足结构受力要求。

(2)采用正交试验法对塔梁固结处构造进行优化设计,确定了塔底构造设计优化后的参数组合为:塔底过渡面倒角宽度550 mm、倒角高度1 500 mm;塔底实心段高度1 000 mm。与原设计方案相比,塔底实心顶面纵向应力减小了21.8%,横向应力减小了14.2%;塔梁结合面纵向应力减小了7.3%,横向应力减小了3.7%。

(3)采用极差分析法分析设计参数敏感性,得到了参数敏感性程度由强到弱依次为:塔底实心段高度、塔底过渡面倒角宽度、塔底过渡面倒角高度。

参考文献:

[1] 刘充.斜拉桥塔梁固结处局部应力有限元分析[J].国防交通工程与技术,2022,20(1):22-25,73.
 [2] 潘湘文.高速铁路多塔矮塔斜拉桥力学性能研究[J].铁道标准设计,2021,65(7):98-102.

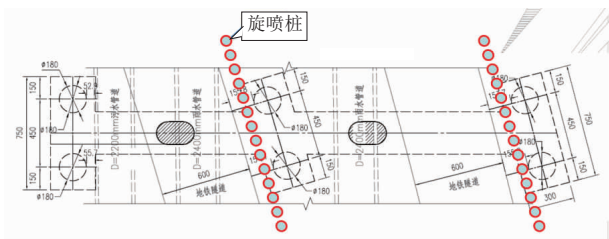


图7 旋喷桩加固平面布置图(单位:cm)

4 结语

城市建设用地有限,面临征地拆迁的制约,一个立交项目从功能性、经济性和社会效应等各方面经过多番比较论证,而后能落地实属不易。城市桥梁作为城市立体交通的重要组成部分,对改善区域交通,促进城市发展发挥着巨大的作用。不同于公路、铁路桥梁,城市桥梁最大的特点就是受复杂的地下空间构筑物影响,增加了设计和施工的难度。设计师能够

应对难点并提出合理且经济的基础处理方案是保证立交整体方案顺利落地的一个必要条件。本文以实际立交工程为例,研究了城市桥梁基础在和地铁、干管等重要地下构筑物空间交叉时,桥梁桩基无法常规设置,而采取一些特殊的基础设计措施。这些措施能够有效的解决基础设计面临的难题,节约工程成本,保证了整个项目的落地,取得了较好的社会和经济效益,可以在其它工程中推广应有。

参考文献:

[1] 卫超.武汉市光谷大道南延线与地铁及燃气管道相关区段桥梁总体设计[J].城市道桥与防洪,2019(12):40-42.
 [2] 陈发文,王孝生,白海珠,等.受限条件下的桥梁桩基及承台施工技术[J].建筑施工,2022,44(12):2872-2874,2878.
 [3] 化建新.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
 [4] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].

(上接第77页)

[3] 杨正东,郭大成,张文学.斜拉桥塔梁固结区预应力束张拉对横梁应力影响研究.公路,2020,65(4):98-104.
 [4] 程晓毛.新洋港斜拉桥钢桁梁合龙精度敏感性分析[J].铁道建筑,2019,59(9):32-35.
 [5] 卫少阳,张朝晖,严超群,等.塔梁固结体系矮塔斜拉桥墩身结构优化研究[J].工程技术研究,2019,4(16):176-177.
 [6] 李春宏.超宽幅单索面混合梁斜拉桥塔梁固结处受力仿真分析[J].

公路,2019,64(7):169-173.
 [7] 丁晓峰,刘流,曲汉波.超宽混凝土主梁斜拉桥空间受力分析[J].南京工程学院学报(自然科学版),2018,16(3):49-53.
 [8] 武志军.塔梁固结体系斜拉桥下横梁预加力效应研究[J].世界桥梁,2008(1):50-52,60.
 [9] 刘凯舟,吴文清,姚伟发.塔梁固结斜拉桥横梁预应力缺陷研究[J].山西建筑,2008(4):16-17.