

# 铁路PC部分斜拉桥中 斜拉索设计、研究与体会

欧阳辉来 陈应陶 许振中

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 陕西西安 710043)

摘要:结合广佛城际东平水道特大桥部分斜拉桥施工图设计,着重介绍斜拉索设计、研究以及一些个人体会。

关键词:铁路PC部分斜拉桥 设计

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.04.004

## 1 设计

### 1.1 结构特点

广佛城际项目佛山西站至广州南站段,该线路出張槎站后上跨东平水道。桥位处受张槎车站高度、东平水道通航净空、线路纵坡等因素控制,故在该处采用一联(96+176+96)m预应力混凝土部分斜拉桥。部分斜拉桥的设计,可以方便地适应各种轨道结构,噪音问题和结构有效高度问题得到明显改善,结构的刚度也较钢桁梁明显增强,后期养护维修的工作量和工程造价大大降低,有效地降低了该区间的线路标高,节省了区间造价及总投资。

部分斜拉桥是一种介于连续梁与斜拉桥之间的结构形式,以斜拉索承担荷载比例进行命名的,其结构特点为:桥塔高度较低,主梁刚度较大,斜拉索布置较集中。斜拉索主要作用有2个方面:第一,梁索锚固点处相当于梁体的弹性支承,即斜拉索拉力的竖向分力可以在一定程度上削弱主梁沿z轴方向的荷载;第二,斜拉索可以像预应力钢束一样对混凝土梁体施加一定的预压力,延迟梁体因为拉应力过大而开裂;因此,部分斜拉桥的斜拉索可以当成结构的体外预应力钢束。

### 1.2 设计概况

部分斜拉桥的主梁为单箱双室变高度直腹板截面,箱梁顶宽13.50m,箱宽11.0m,中支点截

面高度9.60m,边跨平直段截面高度5.60m,截面高度按二次抛物线变化。由于塔梁固结、支座布置及美观的需要,桥塔位置箱梁底宽两侧各加宽1.85m。箱梁横向索梁锚固位置设横梁,横梁截面为100cm×190cm(宽×高)。

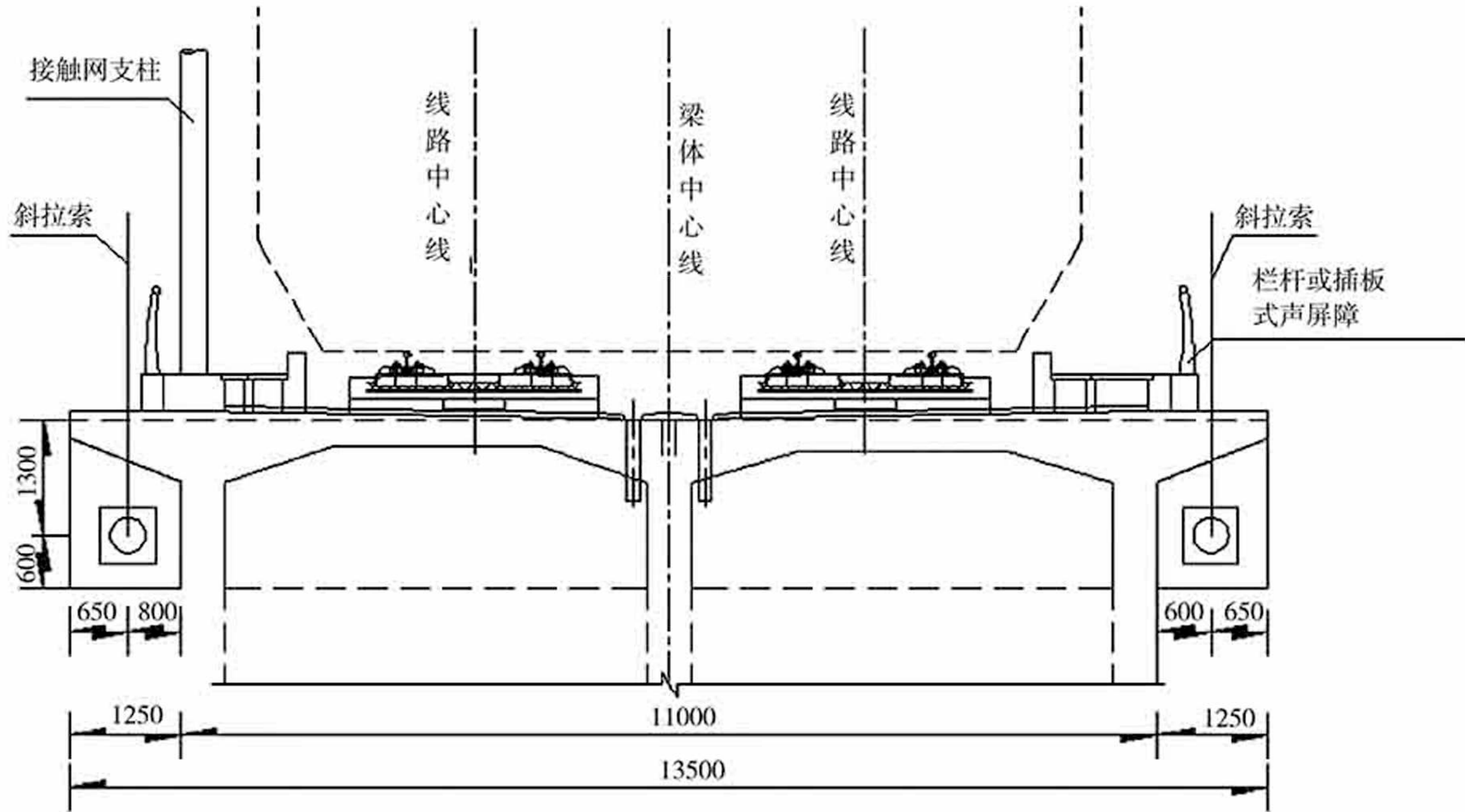
桥塔横向布置为H形钢筋混凝土结构,塔高25.0m(梁顶面起算),塔柱及连接横梁均采用矩形截面。塔柱截面尺寸为4.8cm×2.5m(顺×横),塔柱连接横梁截面尺寸为3.0cm×2.6m(顺×高)。

斜拉索采用双索面扇形布置,全桥设置8对共32组拉索,梁上拉索水平间距8.0m。斜拉索采用 $\phi 15.2$ 的钢绞线索体,采用双层HDPE全防腐索体,全桥共OVM250-61, 85, 109三种规格。斜拉索锚固端位于主梁翼缘悬臂下,桥塔侧为张拉端,张拉端和锚固端均采用OVM250系列锚具锚固,锚具规格与钢绞线索体匹配。为削弱斜拉索风雨激振及列车引起的振动,在拉索桥面附近设置永磁调节式磁流变阻尼器(见图1、图2、图3、图4)。

## 2 斜拉索设计参数研究

### 2.1 研究的必要性

由于铁路荷载大,列车时速高,为确保列车运行过程中的舒适性、平稳性及安全性,对桥梁整体刚度及强度有着较高的要求。结合铁路PC部分斜拉桥的实际工程,对斜拉索承担竖向荷载比例、主梁弯矩比例、竖向刚度比例、温度效应对



1/2带接触网支柱桥面布置

1/2无接触网支柱桥面布置

图1 主梁有索区横断面 (单位: cm)

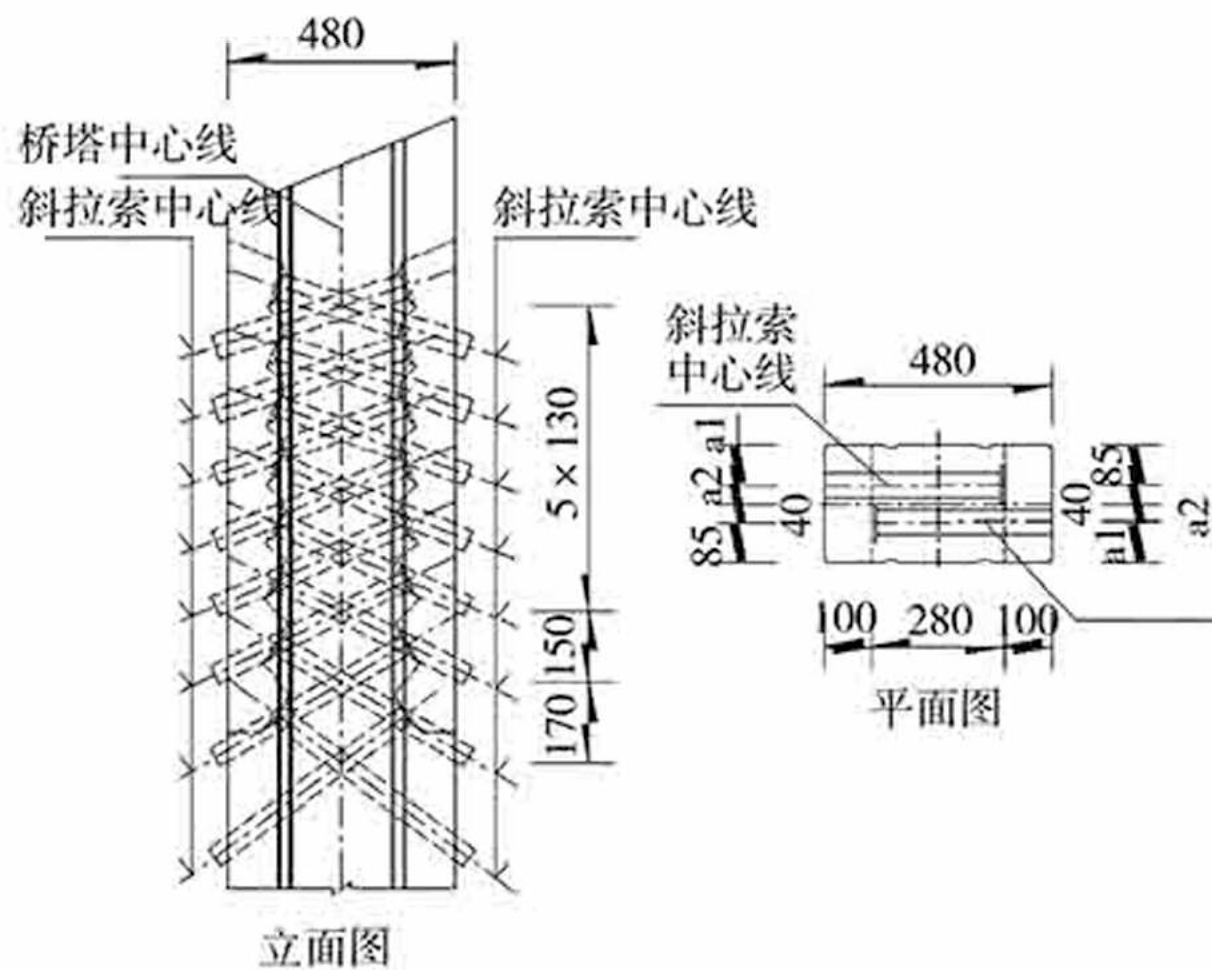


图2 桥塔斜拉索锚固区 (单位: cm)

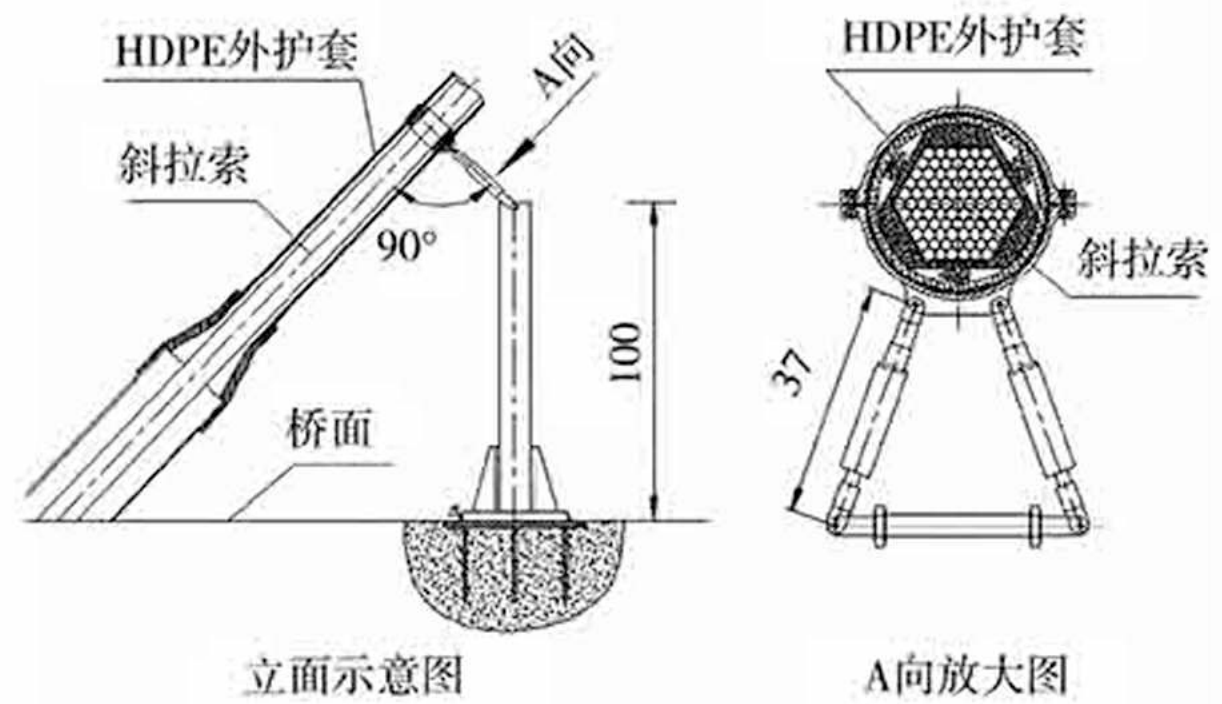


图3 永磁调节式磁流变阻尼器示意图 (单位: cm)

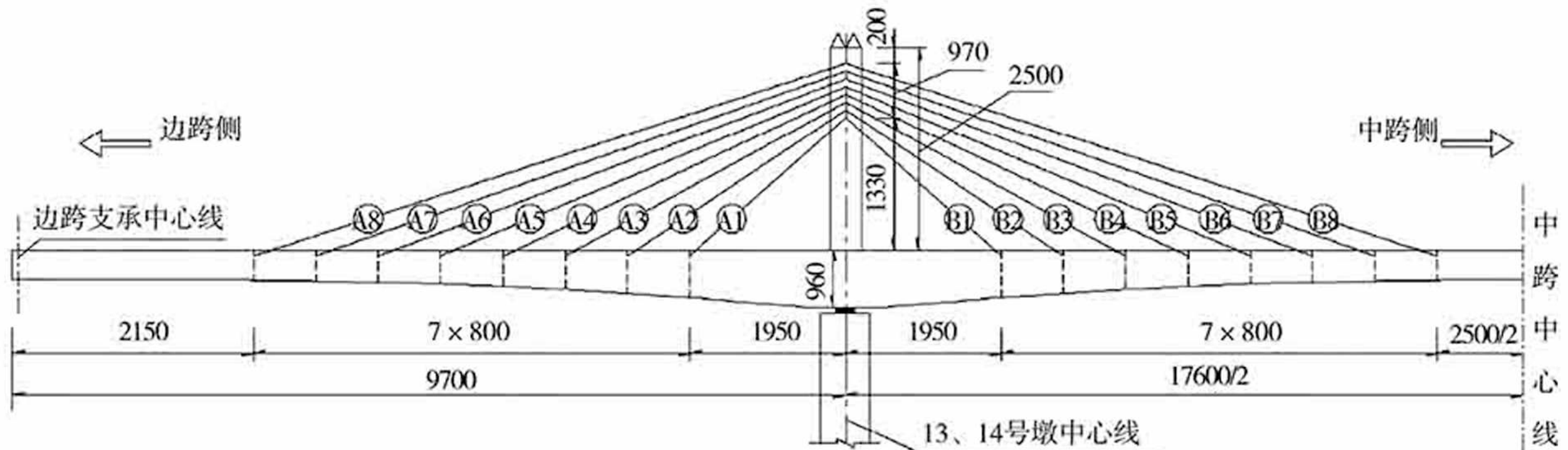


图4 斜拉索布置 (单位: cm)

竖向变形的影响以及对收缩徐变变形的影响等方面进行定量分析,全面分析斜拉索在铁路PC部分斜拉桥中力学特性,获得合理的斜拉索设计参数。

## 2.2 斜拉索承担竖向荷载比例

表1 斜拉索承担竖向荷载比例一览表

一期恒载斜拉索竖向力/(kN)	211144
梁体自重/(kN)	353035
斜拉索承担一期恒载的比例%	59.8
二期恒载斜拉索竖向力/(kN)	7960
二期恒载重量/(kN)	56550
斜拉索承担二期恒载的比例%	14.1
ZC荷载斜拉索竖向力/(kN)	5748
ZC荷载/(kN)	38026
斜拉索承担ZC荷载的比例%	15.1

从表1可以看出,部分斜拉桥的斜拉索承担结构自重荷载比例较大,约60%;斜拉索承担二期恒载、ZC荷载比例较小,约15%。

## 2.3 斜拉索承担主梁弯矩比例

表2 斜拉索承担主梁弯矩比例一览表

截面位置 荷载工况	边跨跨中截面 /(kN·m)	中支点截面 /(kN·m)	中跨跨中截面 /(kN·m)
一期恒载(无斜拉索)	108064	-2938161	186802
一期恒载(有斜拉索)	95343	-580626	108574
斜拉索承担比例	0.12	0.80	0.42
恒载(无斜拉索)	184058	-3213778	473017
恒载(有斜拉索)	133103	-1050241	210499
斜拉索承担比例	0.28	0.67	0.55
活载(无斜拉索)	99537	-336996	159825
活载(有斜拉索)	77605	-285505	141263
斜拉索承担比例	0.22	0.15	0.12
主力(无斜拉索)	294715	-3594419	643062
主力(有斜拉索)	237541	-1371740	363277
斜拉索承担比例	0.19	0.62	0.44
主+附(无斜拉索)	311448	-3625000	704224
主+附(有斜拉索)	251727	-1434648	425745
斜拉索承担比例	0.19	0.60	0.40

从表2可以看出,由于斜拉索是在悬臂阶段安装、张拉的,故斜拉索对降低支点负弯矩作用非常明显;斜拉索对二期恒载、ZC荷载产生的弯矩承担比例较小。

## 2.4 斜拉索承担竖向刚度比例

表3 斜拉索对主梁竖向刚度影响一览表

截面位置 荷载工况	边跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm	中跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm
无斜拉索	-17.5	-85.4
有斜拉索	-17.2	-77.6
斜拉索承担比例	1.7%	9.1%

从表3可以看出,斜拉索对竖向刚度贡献较小,约提供10%左右的刚度,其余均靠主梁自身的竖向刚度。

## 2.5 温度效应对竖向变形的影响

### 2.5.1 整体升(降)温度效应

表4 斜拉索对整体升(降)温度效应影响一览表

截面位置 荷载工况	边跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm	中跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm
整体升温(无索)	0	0
整体降温(无索)	0	0
整体升温(有索)	-0.066	-3.8
整体降温(有索)	0.066	3.8

从表4可以看出,由于斜拉索对主梁的约束,在整体温度效应中结构将会产生竖向变形,数值较小,相当于ZC荷载作用下竖向变形的5%(中跨跨中截面)。

### 2.5.2 主梁非均匀升(降)温度效应

表5 斜拉索对主梁非均匀升温效应影响一览表

截面位置 荷载工况	边跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm	中跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm
主梁非均匀升温(无索)	5.4	-14.1
主梁非均匀升温(有索)	5.2	-10.9
斜拉索承担比例	3.7%	22.7%

从表5可以看出,斜拉索对主梁非均匀升温产生的变形是起到抑制作用的,效果比较明显,约减少25%左右的竖向变形值。

### 2.5.3 斜拉索-主梁温差效应

表6 斜拉索-主梁温差效应影响一览表

截面位置 荷载工况	边跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm	中跨跨中截面 (向上为正、向下为负) mm
索-梁温差(升温)	-0.2	-14.1
索-梁温差(降温)	0.2	14.1

从表6可以看出,斜拉索与主梁属于不同材质的原因,斜拉索-主梁温差效应产生竖向变形较大,约占ZC荷载竖向变形15~20%,故降低斜拉索-主梁之间的温差措施是非常必要的。

## 2.6 斜拉索对主梁收缩徐变影响竖向变形

表7 斜拉索对主梁收缩徐变影响竖向位移一览表

截面位置 荷载工况	边跨跨中截面 (向上为正、向下为负)	中跨跨中截面 (向上为正、向下为负)
	mm	mm
无斜拉索	15.3	-140.8
有斜拉索	-0.9	-1.7
斜拉索承担比例	105.9%	98.8%

从表7可以看出,斜拉索能有效抑制主梁收缩徐变产生的变形,效果非常明显。

## 2.7 斜拉索交叉锚固对桥塔和桥塔横梁影响

由于两侧索面并非完全在同一平面,沿横桥向存在一定的偏心距,因此,在两边索力作用下桥塔产生较大扭矩、桥塔横梁产生较大面外弯矩。

从表8、表9可以看出,在塔柱上采用交叉

锚固点,由于锚固点不在塔柱中心,斜拉索将对桥塔产生较大的扭矩和桥塔横梁较大的面外弯矩。

表8 斜拉索对桥塔截面产生扭矩一览表

项目 截面位置	桥塔扭矩 (kN·m)
桥塔锚固区截面	-11189
桥塔底部截面	10977

表9 斜拉索对桥塔横梁截面产生面外一览表

项目 截面位置	桥塔横梁面外弯矩 (kN·m)
桥塔柱与横梁交汇处	-39427

## 2.8 斜拉索强度及应力幅

从表10可以看出,由于主梁刚度较大,斜拉索的ZC荷载应力幅较小,故铁路PC部分斜拉桥的疲劳问题不控制设计。

## 2.9 研究结论

(1) 悬臂施工的铁路PC部分斜拉桥,斜拉索承担了较大比例的结构重量,约50%~60%;斜拉索对于二期恒载、ZC荷载承担比例较小,约

表10 斜拉索强度和应力幅一览表

斜拉索 单元编号	单根斜拉索最大内力 (kN)	破断拉力 (kN)	恒载作用下斜拉索应力 (MPa)	主力作用下斜拉索应力 (MPa)	破断安全 系数	ZC荷载应力幅 (MPa)
A9	5497	15190	622	640	2.8	41.5
A8	4825	13555	616	630	2.8	33.6
A7	4265	12739	582	593	3.0	26.2
A6	3876	11103	608	618	2.9	24.0
A5	3290	8993	607	615	2.7	20.7
A4	3042	8243	646	653	2.7	17.6
A3	2758	7425	651	657	2.7	15.9
A2	2604	7425	616	621	2.9	11.7
A1	2694	7425	636	642	2.8	13.5
B1	2769	7425	645	660	2.7	20.6
B2	2694	7425	626	642	2.8	24.6
B3	2854	7425	661	680	2.6	29.8
B4	3119	8243	654	670	2.6	26.6
B5	3353	8993	612	627	2.7	27.2
B6	3912	11103	610	624	2.8	27.8
B7	4250	12739	581	591	3.0	25.6
B8	4734	13555	610	618	2.9	26.5
B9	5301	15190	613	618	2.9	25.5

10%~15%。

(2) 悬臂施工的铁路PC部分斜拉桥,斜拉索可有效抵抗支点负弯矩,从而使支点梁高有效降低,支点梁高相对同跨度的连续梁来说降低30%左右。

(3) 在铁路PC部分斜拉桥竖向刚度中,斜拉索提供的竖向刚度较小,约占10%左右,基本由主梁自身提供绝大部分竖向刚度,这一点正好满足铁路对主梁刚度的需求。

(4) 在铁路PC部分斜拉桥温度效应中,斜拉索对整体升(降)温产生的竖向变形数值很小,基本可忽略不计;斜拉索对主梁非均匀升温竖向变形是起到比较明显的抑制作用;斜拉索-主梁之间的温差将会使结构产生较大变形,故需要采取必要的措施来减少斜拉索-主梁之间的温差,从而达到控制索梁温差效应竖向变形的目标。

(5) 铁路PC部分斜拉桥相对同等跨度的连续梁结构而言,斜拉索能有效抑制主梁后期收缩徐变产生的变形,效果非常明显,确保列车运营中轨道的平顺性。

(6) 对于锚固点不在塔柱中心的交叉锚固设计,虽然方便了后期斜拉索的养护、更换,但同时产生了较大的桥塔扭矩和桥塔横梁面外弯矩,并且成为设计的控制点。

(7) 铁路PC部分斜拉桥中,由于主梁刚度较大,斜拉索承担ZC荷载应力幅较小,在斜拉索满足强度的前提下,疲劳问题不突出。

### 3 体会

#### 3.1 设计成功之处

(1) 在结构构造上与PC连续梁相比有着明显的优势:通过利用斜拉索分担部分荷载,达到有效降低了梁高的目标(见图5)。

(2) 从结构受力特点来讲,跟PC连续梁受力类似,斜拉索相当于连续梁的体外束。



图5 铁路PC部分斜拉桥效果图

(3) 从结构分析方法来讲,本次设计成功运用平面和空间、整体和局部相结合的分析方法来控制斜拉索的设计,确保结构的安全。

(4) 从有效降低建筑高度、节省工程投资的角度来讲,铁路PC部分斜拉桥为整个项目带来了可观的综合经济效益。

(5) 从无砟轨道的适应性、防结构噪音的角度来讲,铁路PC部分斜拉桥与钢桁结构相比有着较大的优势。

#### 3.2 设计不足之处

(1) 斜拉索在桥塔上采用交叉锚固设计,虽然便于斜拉索后期养护、更换的,但给桥塔带来较大的扭矩、桥塔横梁较大面外弯矩。

(2) 斜拉索锚固在主梁腹板外侧的悬臂处,虽然满足了运梁车通过、减少主梁底板宽度、降低了主梁断面混凝土指标,但主梁腹板外侧的锚块多少影响了梁体外形美观。

#### 3.3 设计引申

##### 3.3.1 从斜拉索-桥塔锚固方式引申

众所周知,在桥塔处采用分丝管锚固可将锚固点设置在塔柱中心,回避了因斜拉索力产生较大桥塔扭矩和桥塔横梁面外弯矩的问题,但给后期斜拉索养护、更换带来不便。

斜拉索-桥塔交叉锚固方式,常见的有四种锚固方式:在实体塔柱上交错锚固;在空心塔柱的内壁上锚固;采用钢横梁锚固;采用钢锚箱锚固。

实体塔柱上交错锚固方式的优点是构造简单、抗剪截面大、施工方便，缺点是锚固点不在塔柱中心上。

空心塔柱内壁锚固方式的优点是锚固点在塔柱中心锚头塔柱内保护好、塔柱刚度大，缺点是需要施加环向预应力来抵抗斜拉索拉力、施工相对麻烦。

钢横梁锚固方式的优点是受力明确、构造相对简单，缺点是张拉时钢横梁容易移动、换索时会产生不平衡力。

钢锚箱锚固方式的优点受力性能、安全性能好，缺点是构造复杂。

综合上述锚固方式的优缺点，斜拉索-桥塔锚固方式引申出一新方案：对拉钢板+索鞍设在塔柱中心。斜拉索与对拉钢板采用销栓铰接，斜拉索的水平力由对拉钢板承担，斜拉索的竖向力由索鞍承担，如图6所示。

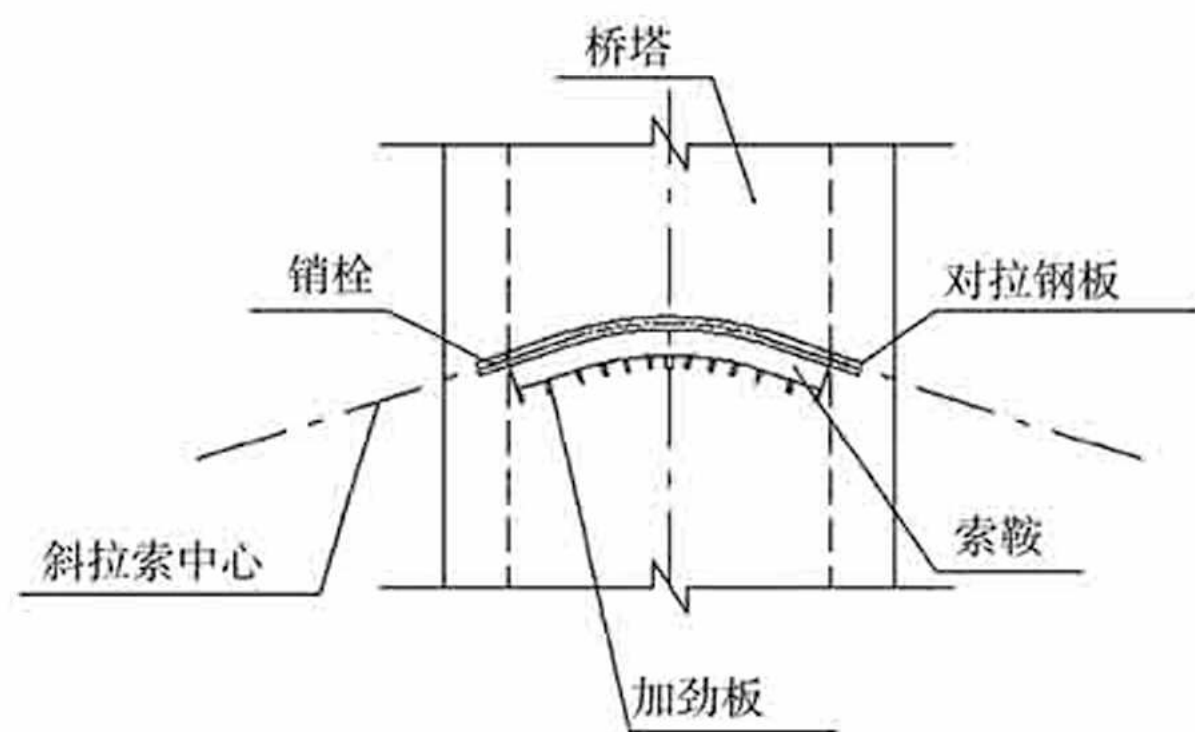


图6 对拉钢板+索鞍锚固方式(立面示意)

### 3.3.2 从斜拉索-主梁锚固方式引申

斜拉索-主梁锚固方式根据位置分悬臂锚固(腹板外侧)、箱室锚固(腹板内侧)、桥面锚固(腹板位置)。

悬臂锚固(腹板外侧)优点是对纵向钢束干扰小，缺点是主梁悬臂有锚固块不美观。

箱室锚固(腹板内侧)优点是张拉方便、主梁外形美观，缺点是对纵向钢束干扰大。

桥面锚固(腹板位置)优点是张拉方便、主梁外形美观，缺点是对竖向预应力钢筋干扰大。

综合上述锚固方式的优缺点，斜拉索-主梁锚固方式引申出一新方案：腹板内预埋钢板+锚拉板式锚固。腹板内预埋钢板位于竖向预应力的两侧，斜拉索力传递钢拉板锚具，钢拉板锚具将力传递给预埋钢板(腹板内)，预埋钢板通过PBL剪将力传递给主梁腹板，最后传递给顶、底板，全截面共同受力，如图7所示。

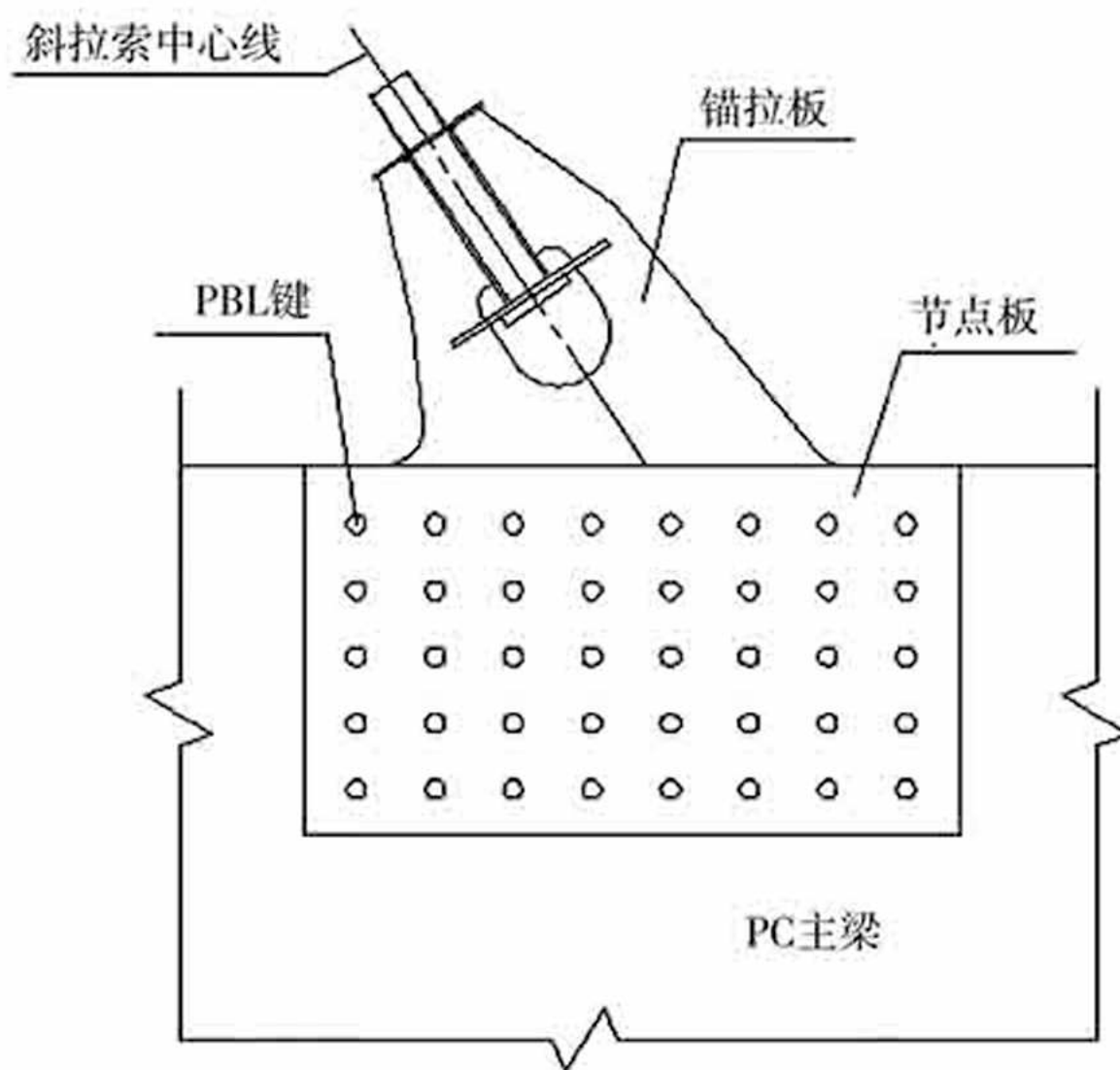


图7 腹板内预埋钢板+锚拉板锚固方式(立面示意)

### 3.3.3 从斜拉索-主梁温差效应引申

从前面分析可知，斜拉索-主梁温差越大，对主梁竖向变形影响越大，故减少斜拉索-主梁温差是消除其变形的根源。

斜拉索-主梁温差效应引申措施是：将斜拉索外护套颜色涂成白色，里面再设置隔热层，尽可能地让斜拉索不受外界温度影响，然后通过温度感应计联动测试主梁温度，系统根据主梁温度对里面的斜拉索体进行温度补偿(加热或制冷)，达到斜拉索-主梁温差最小的目标。

### 参考文献

- [1] 刘士林, 王似舜. 斜拉桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006年.
- [2] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996年.
- [3] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997年.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTG/T(D65-01-2007. 公路斜拉桥设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007年.