

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240402

S 形曲线双斜塔斜拉桥的总体设计和技术特点

黄逸群

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 崇明环岛景观道一期工程鹤龙港闸外桥主桥是一座跨径布置为(75+150+75)m的S形曲线双斜塔斜拉桥,主梁采用扁平钢箱梁,主塔为人字形斜钢塔。详细介绍了主桥的总体设计方案、结构的受力特点以及主桥设计的关键技术,对类似的斜拉桥设计提供了有益的参考。
关键词: 斜拉桥;S形曲线;扁平钢箱梁;斜塔
中图分类号: U448.27 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2025)04-0068-05

Overall Design and Technical Characteristics of S-shaped Curved Double Inclined Pylon Cable-stayed Bridge

HUANG Yiqun

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In the Chongming Island landscape Road Phase I Project, the main bridge of Gelong Port Gate Bridge is an S-shaped curved double leaning pylon cable-stayed bridge with a span arrangement of (75+150+75) m. Its main girder is a flat steel box girder, and its main pylon is a herringbone-shaped inclined steel pylon. The overall design scheme of the main bridge, the force characteristics of the structure and the key technology of the main bridge are introduced in detail, which provides the useful reference for the design of similar cable-stayed bridges.
Keywords: cable-stayed bridge; s-shaped curve; flat steel box girder; inclined pylon

1 工程概况

崇明环岛景观道一期工程西起规划新北沿公路,东至老滬港,全长 44.5 km(公路段全长约 38.5 km,西起规划新北沿公路,东至岱山路)。该工程范围东自分水岭路,西至西门路西侧,包括新建港、三沙洪、鹤龙港三座闸外桥。

鹤龙港闸外桥主桥为 S 形曲线双斜塔斜拉桥^[1-2],跨径布置为(75+150+75)m(见图 1、图 2)。

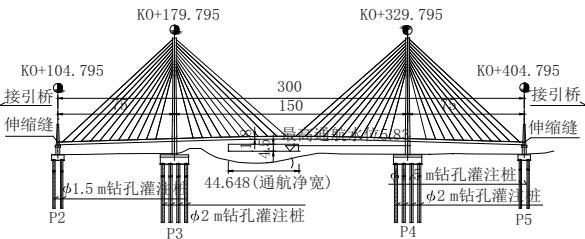


图 1 主桥立面布置图(单位:m)

主梁采用平面半径 $R=220\text{ m}$ 的 S 形曲线扁平钢箱梁,主塔采用人字形斜钢塔柱,边墩由门式墩与装

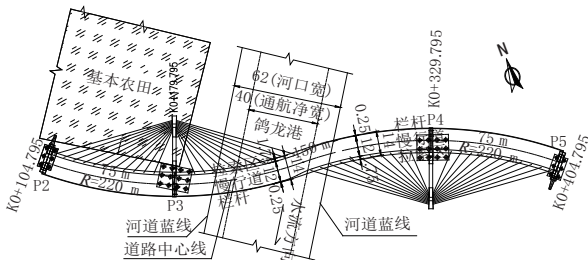


图 2 主桥平面布置图(单位:m)

饰钢灯柱组成。这座桥的设计灵感来源于渔民收网,崇明岛位于长江入海口,素有“鱼米之乡”之称,出海捕鱼更是崇明人主要的生活方式之一。两座人字形主塔比喻成一对夫妻,两个边墩装饰灯柱象征着一对子女,斜拉索则代表着渔网,这三者共同构成了一幅一个渔民家庭撒网捕鱼、其乐融融的美好画卷,寓意着勤劳、质朴的崇明岛人民幸福美好的生活(见图 3)。

2 主要技术标准

- (1)道路等级:慢行道及小型车专用通道。
- (2)设计车速:20 km/h。
- (3)桥梁设计荷载:人群荷载按《城市人行天桥

收稿日期: 2024-04-12
作者简介: 黄逸群(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。



图3 主桥效果图

与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)取用;汽车荷载按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019 年版)中的小型车取用。

- (4)桥梁设计基准期:100 a。
- (5)桥梁设计使用年限:100 a。
- (6)桥梁设计安全等级:一级。
- (7)设计风速:设计基本风速 $U_{10}=32.8\text{ m/s}$ 。
- (8)设计洪水频率:1/100。
- (9)通航标准

航道技术定级为Ⅵ级航道,设计最高通航水位0.70 m,设计最低通航水位5.83 m。

- (10)地震作用

地震基本烈度为7度,地震动峰值加速度为0.1g,Ⅳ类场地调整系数为1.2,桥梁抗震设防分类为丁类,抗震设计方法为B类。

- (11)耐久性基本要求:混凝土结构按环境类别Ⅰ-C设计,钢结构按环境类别C4设计。

3 结构设计

3.1 结构体系

主桥采用半漂浮结构体系,塔墩固结。P3主墩上设置两个单向滑动支座,P4主墩上设置两个双向滑动支座,主塔上均设置一个侧向支座;边墩上设置一个单向滑动支座和一个双向滑动支座。

3.2 主塔设计

主塔总高为75.5 m,桥面以上为65.0 m,横桥向呈人字造型,分为上、中、下塔柱,上、中塔柱处设置转折点。上塔柱轴线在横桥向与水平线夹角为74.1°,下、中塔柱轴线在横桥向与水平线夹角为66.3°(见图4)。

上塔柱采用单箱双室截面,截面尺寸由塔顶4.0 m(横桥向)×2.5 m(顺桥向)变化至转折点3.028 m(横桥向)×2.0 m(顺桥向);中塔柱采用单箱单室截面,截面尺寸由转折点3.028 m(横桥向)×2.0 m(顺桥向)变化至桥面处4.0 m(横桥向)×3.0 m(顺桥向);上、中

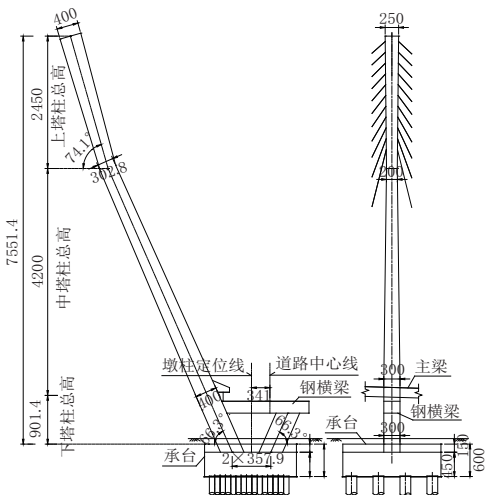


图4 主塔构造图(单位:cm)

塔柱顶、底、腹板厚均为30 mm,设置25 mm的板式加劲肋。上、中塔柱采用Q345qD钢材。

主墩为下塔柱、斜墩及横梁组成的门式墩。下塔柱及斜墩与水平线夹角均为66.3°,下塔柱和斜墩均采用单箱单室截面,截面尺寸为4.0 m(横桥向)×3.0 m(顺桥向),顶、底、腹板厚均为30 mm,设置25 mm的板式加劲肋。横梁长16.191 m,高2.2 m,宽3 m,采用单箱单室截面,顶、底、腹板厚度均为30 mm,设置25 mm的板式加劲肋。主墩采用Q420qD钢材。

主塔P3承台尺寸为18.2 m×13.7 m,P4承台尺寸18.2 m×14.7 m,承台厚6 m,其中承台顶1.5 m为后浇带,承台下设12根直径为2.0 m的钻孔灌注桩,桩长均为85 m,桩基持力层为灰色中砂层。

3.3 边墩设计

边墩由门式墩与钢制装饰灯柱组成(见图5)。门式墩采用钢横梁接混凝土斜墩柱形式。钢横梁采用矩形截面,截面尺寸为3.32 m×1.8 m,两侧混凝土斜墩柱截面均为矩形,近灯柱侧截面尺寸为2.5 m×2.5 m,远灯柱侧截面尺寸为2.5 m×2 m。钢制灯柱截面尺寸由柱底2.5 m×2.5 m变化至柱顶1.0 m×1.0 m,钢制灯柱底部与门式墩墩柱顺接。

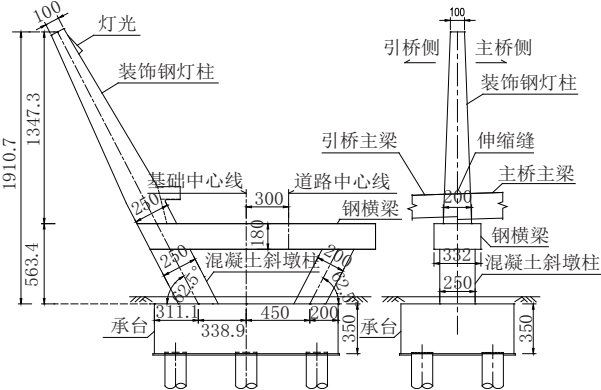


图5 主塔构造图(单位:cm)

边墩承台尺寸为13.0 m×8.0 m×3.5 m(横桥向×顺桥向×高),承台下设6根直径为1.5 m的钻孔灌注桩,桩长均为65.1 m,桩基持力层为灰色细粉砂层。

3.4 钢-混凝土结合段设计

本桥在边墩和主墩均设置钢-混凝土结合段。

主墩钢-混凝土结合段位于承台顶,采用承压传剪式整体锚固构造(见图6)。承压板厚50 mm,承压板背面对应主塔及主墩顶、底、腹板设置开孔板,开孔板厚25 mm,开孔板上设置 $\phi 80$ mm圆孔,孔中贯通钢筋直径为25 mm,开孔板上同时布置d22×180 mm的圆柱头焊钉。主塔及主墩周围设置 $\phi 50$ mm的PSB830级预应力螺纹钢筋,张拉端设置于承压板上,固定端锚固于承台内。

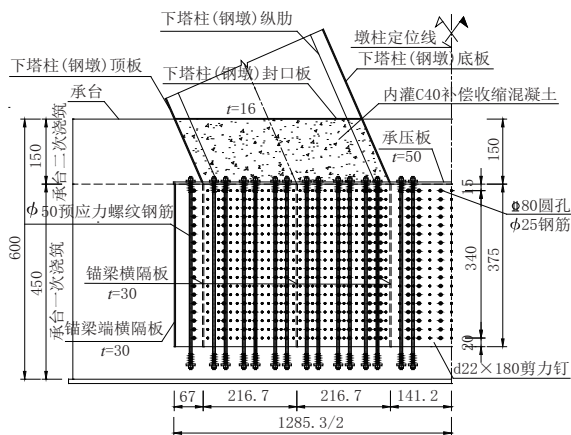


图6 塔底钢-混凝土结合段立面图(单位:cm)

边墩在钢横梁与混凝土斜墩柱之间设置钢-混凝土结合段(见图7)。斜墩柱顶对应钢横梁横隔板及腹板设置30 mm厚钢围板,钢围板上设置规格为D22×180 mm的圆柱头焊钉。

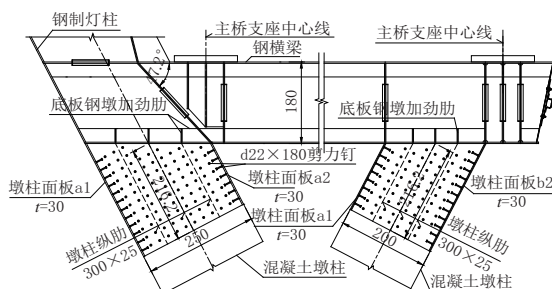


图7 边墩钢-混凝土结合段立面图(单位:cm)

3.5 钢主梁设计

主梁为单箱双室的扁平钢箱梁,设三道腹板,两侧设置风嘴构造。主梁全宽14 m(不含风嘴),底宽12.8 m,道路中心线处梁高为1.8 m,顶板设置1.5%的双向横坡,底板水平。主梁顶板和底板厚14~24 mm,腹板厚12~16 mm,均设置板式加劲肋(见图8)。

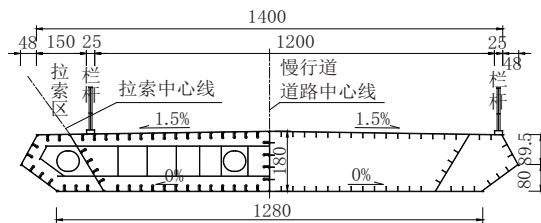


图8 主梁标准横断面(单位:cm)

钢箱梁纵向每间隔2 m设置一道实腹式横隔板,板厚12 mm,每隔6 m设置一道锚固横隔板,板厚为20 mm。主梁采用Q345qD钢材。

3.6 斜拉索及其锚固构造设计

斜拉索采用标准强度为1 670 MPa的平行钢丝成品索,规格型号为PES()7-139。全桥共设置44对斜拉索,呈空间扇形布置,拉索在梁端标准索距为6 m,在塔端索距为2 m。索梁、索塔锚固均采用耳板式的锚固形式,由一道主耳板及两道贴板组成,主耳板厚度为40 mm,贴板厚度为25 mm。

梁上耳板平面位于拉索轴线和腹板纵向轴线所构成的平面上,耳板两侧设置垂直于耳板的加劲板。塔上耳板平面位于拉索轴线和塔柱中线所构成的平面内,耳板通过加劲板、横隔板与塔腹板一体加工完成。主塔在耳板处设置横隔板,以平衡两侧斜拉索的水平力。

3.7 主要施工步骤

本桥采用先梁后索的施工方法,主梁和主塔均采用少支架吊装。主要施工步骤如下。

(1) 步骤1

进行主墩、边墩桩基及承台施工,待主墩承台混凝土强度及弹模达到设计要求后,张拉承台预应力;搭设临时支架,主墩及边墩墩身施工至墩顶处,主塔施工至塔顶。

(2) 步骤2

少支架施工架设主梁,主梁端部设置横向预偏量,同时释放边墩支座横向约束。

(3) 步骤3

对P4主墩支座进行纵向临时固定;安装及初次张拉斜拉索;待主梁端部横向滑移到位后,对P2/P5边墩支座底板进行焊接固定。

(4) 步骤4

拆除主梁、主塔临时支架及中墩、边墩临时支座;进行桥面铺装及栏杆等桥面系施工;对斜拉索进行索力调整,使其满足设计要求;拆除P4主墩支座的纵向临时约束。

4 结构总体计算分析

4.1 结构建模

采用 MIDAS Civil (2022v1.1) 空间有限元程序对全桥进行分析,斜拉索采用桁架单元模拟,主塔、主梁、下部结构及基础均采用梁单元进行模拟,支座按实际滑动方向采用弹性连接模拟,桩基采用土弹簧模拟桩土共同作用效应(见图 9)^[3]。

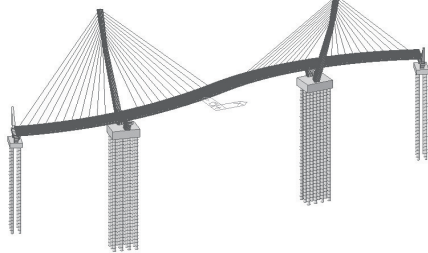


图 9 主桥空间有限元模型

4.2 静力计算结果

(1)成桥阶段主梁的最大压应力为 207 MPa,最大拉应力为 160 MPa,均位于中支点处(见图 10),考虑了剪力滞效应和局部稳定折减后,小于 Q345qD 钢材强度设计值 275 MPa,满足规范要求。

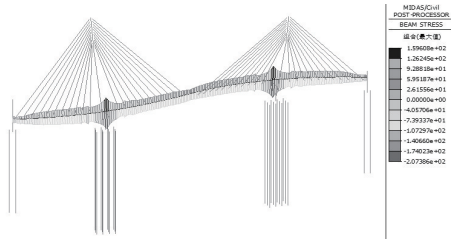


图 10 成桥阶段主梁基本组合应力(单位:MPa)

(2)成桥阶段上中塔柱最大压应力为 189 MPa,最大拉应力为 129 MPa,均位于桥面处(见图 11),考虑局部稳定折减后,小于 Q345qD 钢材强度设计值 275 MPa,满足规范要求。主墩最大压应力为 246 MPa,最大拉应力为 171 MPa,均位于下塔柱底部(见图 12),考虑局部稳定折减后,小于 Q420qD 钢材强度设计值 335 MPa,满足规范要求。

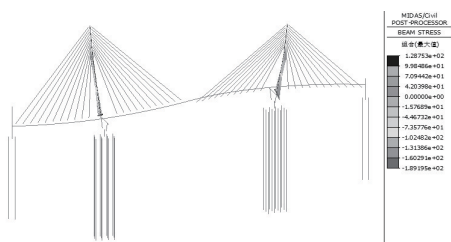


图 11 成桥阶段上中塔柱基本组合应力(单位:MPa)

(3)成桥阶段斜拉索最大拉应力为 442 MPa(见图 13),小于平行钢丝抗拉强度设计值 900 MPa,满足规范要求。

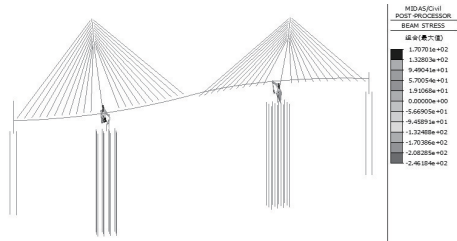


图 12 成桥阶段主墩基本组合应力(单位:MPa)

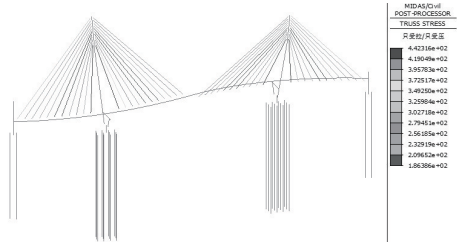


图 13 成桥阶段斜拉索基本组合应力(单位:MPa)

(4)活载作用下主梁最大竖向正负挠度之和:中跨(22+59)=81 mm,小于 $L_{中}/400=375$ mm;边跨(24+35)=59 mm,小于 $L_{边}/400=187.5$ mm,满足规范要求。

4.3 稳定分析结果

对主桥成桥状态进行稳定分析,考虑工况组合为:恒载+活载+风荷载,主桥一阶弹性稳定系数及失稳模态见表 1 和图 14。

表 1 前 3 阶弹性稳定系数

阶数	稳定系数	失稳形态
K1	29.4	主塔横桥向弯曲

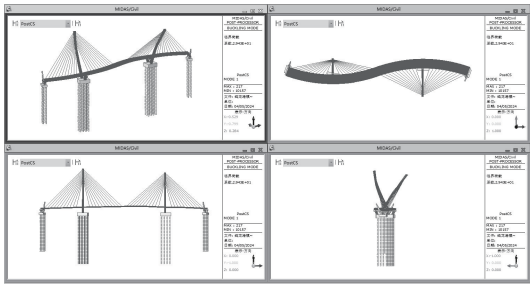


图 14 K1 阶弹性稳定屈曲模态

5 主桥的受力特点及设计关键技术

5.1 主桥受力特点分析

(1)主塔横桥向的平衡。主塔因景观造型需要设计成横桥向倾斜的塔柱,与传统直塔斜拉桥不同,斜拉索不仅沿塔柱产生轴向压力,其垂直于塔柱的分力 T_y 会使得主塔在横桥向有倾覆趋势,主塔自重分力 W_y 抵抗其倾覆。为保证主塔的横桥向弯矩尽可能小,主塔倾角 α 需要精心设计,以确保主塔自重分力 W_y 与斜拉索分力 T_y 差值尽可能地小(见图 15)。

(2)主梁横向分力的平衡。主梁平面呈 S 形曲

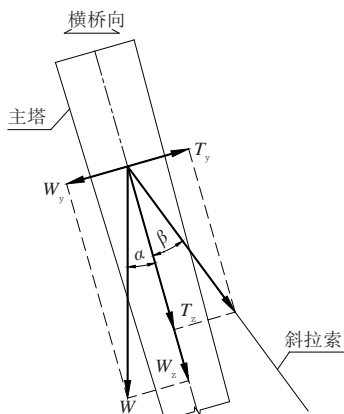


图15 主塔横桥向平衡示意图

线,斜拉索关于主梁中心也呈反对称布置,拉索垂直于主梁轴线的水平分力使得主梁平面会绕着主梁中心点(反对称点)发生转动。为平衡拉索在主梁上的横向分力,需要设置侧向约束以限制主梁的水平位移(见图16)。

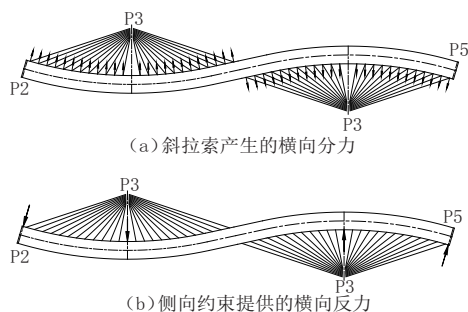


图16 主梁横向分力平衡示意图

(3)曲线梁内侧支座脱空问题。主桥斜拉索设置在主梁曲线内侧,加剧了内侧支座脱空的趋势,因此如何采取措施消除支座负反力也是该桥的一大设计难点^[4]。

5.2 主桥设计的关键技术

(1)主塔上设置侧向支座,将拉索的水平分力传递至主墩及基础。

(2)为尽可能减少拉索的水平分力对边墩支座、下部结构及基础的影响,主梁边跨设置横向预偏,拉索进行初次张拉阶段允许主梁横向滑动,待主梁横向滑移到成桥位置,对边墩支座底板进行焊接固定。边墩支座仅承担二期恒载以及运营阶段活载产生的横向水平力。

(3)为满足主梁在施工过程中横向滑移的需求,边墩支座与主梁上支座垫板先焊接固定,支座与主梁同步滑动。同时在支座底板与下支座垫板之间设置四氟板,支座底板采用不锈钢板,以尽可能减小钢板之间的摩擦力(见图17)。

(4)为了解决曲线梁内侧支座脱空问题,常规做

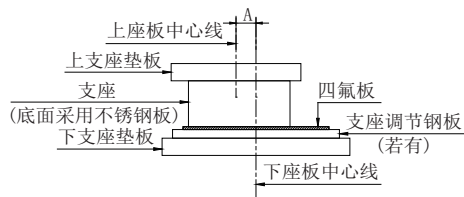


图17 边墩支座横向预偏示意图

法是在钢梁内采用铁砂混凝土(容重 35 kN/m^3)进行压重。通过计算分析,若要完全消除负反力,本桥主墩需要压重的范围为 16 m ,边墩需要压重的范围为 9 m 。常规的压重方案填芯范围过大,随之带来的负面效应也会增大,不仅会增加主梁的弯矩,增加下部结构负担,同时也会增大拉索力及其水平分力,进而导致支座水平力也会继续增大。

因此设计考虑采取别的更有效的措施来解决支座脱空问题,即通过在主塔及边墩灯柱近主梁侧设置上牛腿构造(主梁对应设置下牛腿构造),巧妙地将原本一直处于受拉状态的支座转化为永久受压支座,向上的竖向力通过牛腿传递给主塔和边墩及基础(见图18、图19)。

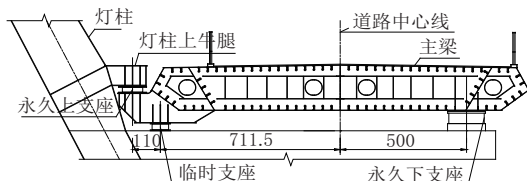


图18 主塔侧上牛腿及支座布置立面图(单位:cm)

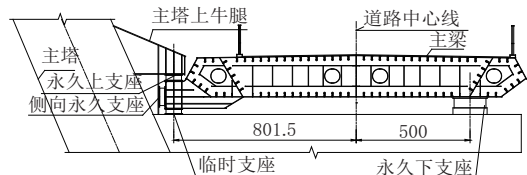


图19 灯柱侧上牛腿及支座布置立面图(单位:cm)

因此,该桥设置了复杂的约束系统(见图20):主梁在主墩近主塔侧设置上、下及侧向支座,远离主塔侧设置下支座,其中近主塔侧下支座为施工临时支座,其余支座均为永久支座;在边墩近灯柱侧设置上、下支座,远离灯柱侧设置下支座,其中近灯柱侧下支座为施工临时支座,其余支座均为永久支座。临时支座在拉索初次张拉后拆除。

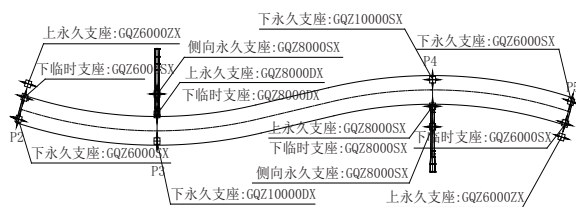


图20 主桥约束系统平面布置图

(下转第100页)