

城市高架桥斜交跨河设计研究

何炎宏

[华蓝设计(集团)有限公司广东分公司, 广东 广州 510220]

摘 要:城市高架桥是城市立体交通网络的重要组成部分,具有提高路网交通效率和融合新老城区、城乡区域等优点,在新型城镇化发展过程中发挥着重要作用。鉴于高架桥的桥型需服从总体线路的走向,在跨越河流或地面道路等桥下构造物时,其桥墩往往需斜交并在两侧引桥转正交接顺。以广州市某高架桥为例,对此类跨河桥型进行了结构选型优选,介绍了斜交转正变高连续箱梁的构造点及不同腹板预应力钢束异型布置方案,并对该类型斜交桥的梁格和下部抗震计算问题进行了探讨,从而为同类桥梁设计提供一些参考方法和思路。

关键词:城市高架桥;斜交跨河;结构选型;梁格分析;抗震计算

中图分类号:U442

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)07-0087-03

0 引言

随着城镇化的发展,高架桥在城市建设进程中扮演着重要的角色,其斜交跨河桥型占比与日俱增。在此类桥梁当中,现浇箱梁由于具有良好的横向整体稳定性、抗扭性能以及经济性,因此能很好地适应斜交转正交高架桥,其中变高度斜交箱梁因其较大的跨越能力而受到越来越多工程师的青睐。

20世纪70年代 Hambly^[1]基于剪力-柔性梁格原理,分析叙述了包括斜交箱梁等分格式上部结构的受力变形状态和体系模型。近年来,“公混规”应用指南^[2]介绍了斜桥等复杂结构的实用精细化分析方法;张忠效等^[3]对等高斜转正箱梁进行了重点和难点的探讨。鉴于斜交桥对地震动力响应的复杂性,《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)(以下简称《抗规》)、《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)均有需对其进行非线性时程抗震分析的要求。

本文结合广州市某高架桥斜交跨河的设计,简述了斜交桥的总体方案结构选型和概念设计,并以主线左桥为单例,重点介绍了变高度斜转正PC箱梁构造、梁格建模计算和配束;另外结合上述规范,对斜桥下部结构进行了时程抗震分析。

1 工程概况

项目为白云二线主线及其辅道跨越石井河桥结

收稿日期:2023-06-29

作者简介:何炎宏(1990—),男,学士,工程师,从事桥梁设计工作。

构物,包含4座桥梁:主线左桥、主线右桥、地面左桥、地面右桥。主线桥分2幅实施,路线中心线位于缓和曲线+半径1200m圆曲线上;地面左桥匝道中心线位于缓和曲线+半径缓和曲线+半径900m圆曲线上。2座主线桥宽16.5m;地面左桥宽12m、地面右桥宽15m。桥位平面图见图1。

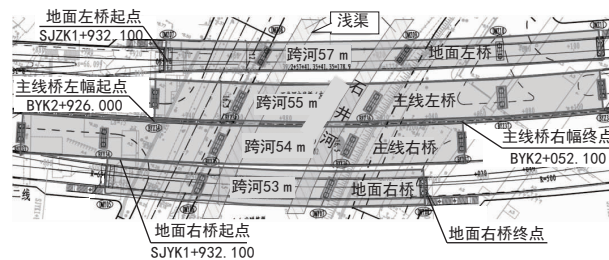


图1 桥位平面图

2 工程技术特点(设计边界条件)

(1)溶洞:项目位于灰岩区,岩溶发育。地质详勘显示约70%桩基基岩范围存有溶洞,多为无填充或半填充的中小型溶洞。

(2)水务要求(防洪、航道):根据广州地标《涉河建设项目河道管理技术规范》第6.1.10条并且结合当地水务局的要求,规划河道上口宽度不大于22m的河道,桥梁应1跨过河、通航净空不小于4.5m、通航净宽不小于40.7m。

(3)平曲线、斜交、桥下构造物:4座桥梁设计线均位于缓和曲线和圆曲线段,地面左桥和地面右桥处于变宽段;桥跨的主要制约因素有石井河(桥跨方向约55m)、河床底两靠岸侧污水管浅隧(1~6×3m箱涵、离岸边净宽约3.5m、河床覆土约2.5m)、桥下现

状石潭路以及规划路；主线设计线法线与水流方向交角约 23°。

3 总体设计

根据前述桥跨各种制约因素，跨河的主墩宜设置在浅隧与两侧桥下道路之间，且为适应水流方向应设为斜交（角度 19.5°~36.5°），其余岸上桥墩正交。由此可以初定主跨为 53~57 m，在此基础上对上部构造进行比选，结果见表 1。

表 1 上部构造比选			单位:元/m ²
上部方案	施工工艺	景观效果	造价指标
等截面钢箱梁	临时墩,现场吊装	轻盈简洁、视野通透	12 000
等截面 PC 箱梁	贝雷梁,支架现浇	主梁厚重、桥下压抑	9 500
变截面 PC 箱梁	贝雷梁,支架现浇	变化跳跃、线型流畅	9 000

鉴于石井河近年来实则已无通航船只通过，河中搭设临时墩+贝雷梁实现难度不大，为节省造价，上部采用 4 跨变截面混凝土箱梁。主线左桥立面图见图 2。

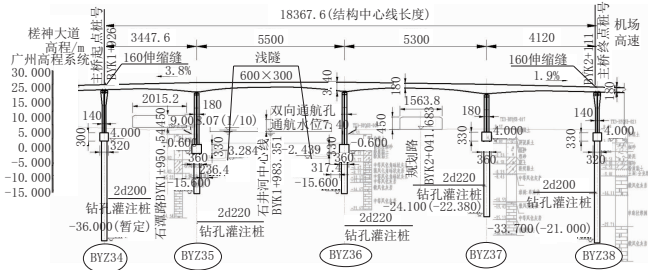


图 2 主线左桥立面图(单位:cm)

对于下部结构的比选，从常规城市高架桥墩构造出发，可选择柱式墩和薄壁花瓶墩。从景观通透性和抗震性能两方面衡量，优选花瓶式桥墩。

4 结构设计

4.1 主梁

4.1.1 构造

采用 C55 单箱 3 室直腹板箱梁，梁高墩顶 3.4 m、跨中 1.8 m，箱梁整体旋转 2%；梁高按 2 次抛物线高度变化。边跨由于斜转正，腹板长度差异较大，为保证各腹板梁高变化长度均一致，分界线需进行特殊处理，使其均与临墩轴线平行，梁高变化段中间留梯形等高段过渡。等高梁段与变高梁段的交界位置示意图见图 3。

4.1.2 计算

对于单箱多室箱梁，箱梁变形不再遵循平截面假定，各腹板变形曲率存在差异。以主线左桥为例，

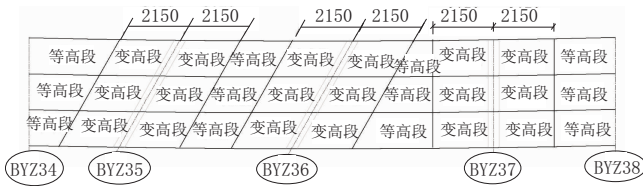


图 3 等高梁段与变高梁段的交界位置示意图(单位:cm)

其左右腹板长度差距达 7.8 m，采用单梁模型计算必然造成较大的误差，需进行进一步的精细化分析。本例采用 Hambly 剪力-柔性梁格模型，以考虑箱梁腹板受力分配效应。梁格构件的特性原理是：当梁格节点与结构相重合的点承受同样的扰度与转角时，由构件刚度产生的内力等效于结构内力，其中扭转变形性能可由剪切刚度较小的横向梁格得到^[1]。本例为与主墩成 24.5°~32.3°斜交的 4 跨 4 格室箱型梁，纵向构件切开后成 4 片“工字梁”，端横梁为矩形截面，跨间虚拟横梁为由顶底板组成的上下 2 块实心板“二”字截面，虚拟横梁采取与腹板或实体横梁正交刚接。模型梁格平面网格划分见图 4。

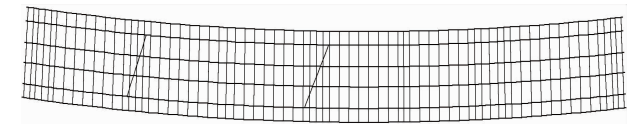


图 4 梁格平面网格划分

基本组合下，各腹板纵向关键截面的最大、最小弯矩值见表 2。由表 2 可知，左右边腹板弯矩差值跨中为 30%、主墩处为 135%。

表 2 各腹板纵向关键截面最大和最小弯矩值 单位:kN·m

腹板	BYZ34-35 跨中	BYZ35	BYZ36	BYZ37
左腹板	14 514	-40 137	-39 431	-29 167
中腹板 1	13 869	-37 547	-37 262	-38 001
中腹板 2	13 740	-38 498	-38 195	-38 613
右腹板	6 170	-42 050	-40 864	-37 922

4.1.3 预应力钢束布置

根据上述计算分析，各腹板因弯矩值的差异必然要各自异性化布置钢束，预应力若按每个腹板同化设计和常规布置基本满足不了规范的要求。由图 4 可知：主线左桥腹板长度差异体现在第 1 跨和第 3 跨，于是在第 1 跨跨中以及第 3、4 跨之间的 BYZ37 主墩处设置不同的腹板束；其余位置为了避免差异化带来的施工复杂性，钢束的布置均保持一致。第 1 跨左腹板、中腹板 1 和中腹板 2 的腹板束布置为：底板 2 排、顶板 1 排；右腹板的腹板束布置为：底板 1 排、顶板 2 排。BYZ37 墩顶处中腹板 1 和中腹板 2 共有 3 排腹板束均布置在顶板；而左腹板、右腹板仅设

2 排布置在顶板。各腹板束布置见图 5 至图 9。

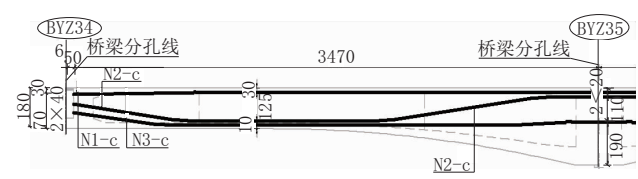


图 5 第 1 跨左腹板、中腹板 1 和中腹 2 腹板束立面图

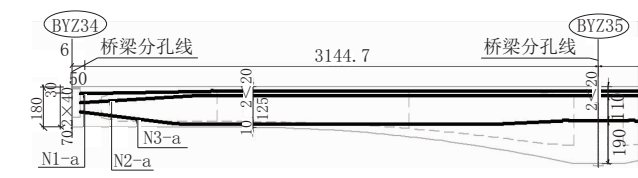


图 6 第 1 跨右腹板束立面图

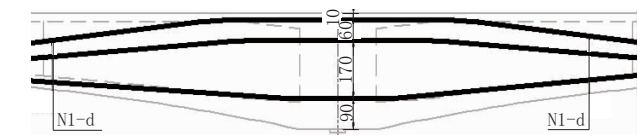


图 7 BYZ37 墩顶处左腹板腹板束立面图

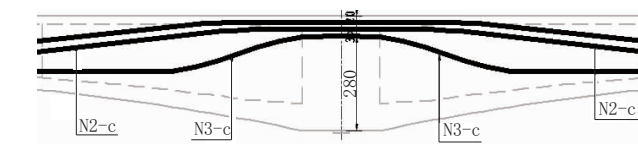


图 8 BYZ37 墩顶处中腹板 1 和中腹板 2 腹板束立面图

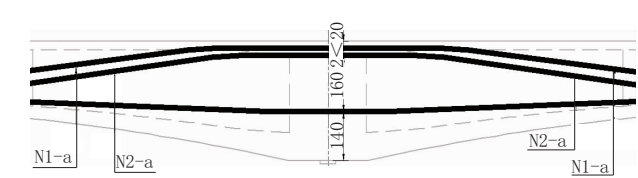


图 9 BYZ37 墩顶处右腹板腹板束立面图

主梁按全预应力构件设计，对应力的要求比较严格，另外还需设置一定数量的顶底板短束。

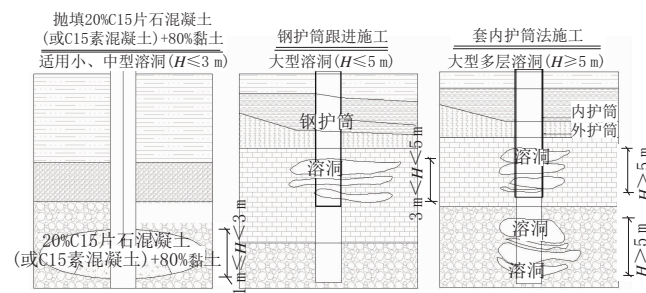
计算结果显示，腹板差异化布置钢束后，各截面正应力、主应力均能满足全预应力构件要求。

4.2 桥墩

桥墩采用较为美观通透的花瓶式独立柱墩，墩底铅直，在墩顶 4.4~5.5 m 范围内采用圆弧外扩墩顶 70 cm 内收，并在墩身中间刻槽成 V 字以提升景观效果。

4.3 桩基础溶洞处理

本桩基溶洞处理根据溶洞规模采用 3 种方案：(1)应先考虑采用抛填片石混凝土或素混凝土 + 黏土为主；(2)桩基础若抛填量大于 60 m³，而溶洞尚未完全堵住时，采用钢护筒跟进施工，钢护筒内径大于桩直径 20 cm；(3)大型溶洞采用套内护筒法施工，多层钢护筒最内层护筒内径大于桩直径 20 cm，外面一层护筒内径大于内层护筒外径 20 cm，并以此类推。溶洞处理方案见图 10。



(a) 溶洞处理方案一 (b) 溶洞处理方案二 (c) 溶洞处理方案三
图 10 溶洞处理方案图

5 抗震设计

5.1 抗震技术标准

桥址处地震基本烈度为 7 度。根据《抗规》，本桥抗震设防分类为丙类、抗震设计方法为 A 类，需进行 E1、E2 地震作用下的抗震分析和验算。

5.2 抗震体系与计算方法

本桥支座为常规盆式支座体系，按类型 I 抗震体系进行设计，即耗能部位和潜在塑性铰区域预设于桥墩底部。主线左桥属斜桥复杂结构，E1、E2 地震作用均采用时程分析；E1 地震作用分析时还与反应谱法结果进行对比来校验模型的准确合理性。

5.3 计算模型与抗震分析

利用 MIDAS Civil 建立全桥模型来反映实际桥梁结构的动力特性，全桥模型透视图见图 11。模型中上部结构、支座连接条件、桥墩、承台及桩基础等模拟均按《抗规》第 6.2 节的要求。其中墩柱铰类型采用骨架模型，其滞回模型为退化模型中的武田三折线模型(Takeda)，内力相关关系为 $P-M$ 。



图 11 抗震分析模型透视图

E1 地震作用按弹性设计，材料强度按设计值取，计算结果满足弹性构件强度要求。

E2 地震作用按延性设计，首先判断构件是否进入塑性阶段，其判断的屈服弯矩可按弹性构件取值（材料强度按标准值取）。计算表明在 E2 地震作用下，各桥墩截面满足弹性构件承载力要求，构件未屈服，仍处于弹性状态。

E2 地震作用下，各墩柱最大弯矩及其承载力汇总见表 3。

时践行创新引领,注重工匠精神,整体造型十分轻巧美观,如图 13 所示,上部结构综合造价与小箱梁相当,经济性突出,为今后同类型桥梁的设计提供借鉴。该桥于 2021 年 12 月开工,计划于 2024 年底建成通车。

参考文献:

[1] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 丰城市紫云大桥新建工程图纸[Z].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2021.
[2] 邵长宇. 梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
[3] 常付平,汤虎,邵长宇. 巢湖大桥主桥设计[J]. 桥梁建设,2020,50(6):91-96.
[4] 林友强,邵长宇,张春雷,等. 一种混凝土桥面板与钢梁的连接构造:



图 13 紫云大桥陆上引桥效果图

中国,CN202320162397.9[P].2023-08-22.
[5] 林友强,邵长宇,张春雷,等. 一种混凝土桥面板与钢梁的连接构造及其施工方法:中国,CN202310085584.6[P].2023-05-09.
[6] 林友强. 梁桥:中国,CN202222086083.3[P].2023-03-28.

~~~~~  
(上接第 89 页)

表 3 E2 地震作用下各墩柱最大弯矩及其承载力汇总表

| 墩底墩号  | 轴力/kN   | 横桥向弯矩 /<br>(kN·m) | 轴力承载能力<br>$N_u$ /kN | 弯矩承载能力<br>$M_{bu}$ /(kN·m) |
|-------|---------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| BYZ34 | -6 417  | 33 745            | 8 454               | 44 641                     |
| BYZ35 | -26 269 | 60 093            | 55 735              | 128 882                    |
| BYZ36 | -27 134 | 72 046            | 46 093              | 123 555                    |
| BYZ37 | -25 138 | -45 597           | 46 293              | -84 736                    |
| BYZ38 | -7 593  | 20 047            | 19 789              | 52 635                     |

6 结 语

城市高架桥斜交跨河,为平顺过渡两侧引桥,采用斜转正变高现浇连续箱梁方案是可行恰当的。但因其构造和受力复杂,在设计阶段需充分考虑长短腹板的受力异性,上部计算时可采用梁格模型等精

细化分析方法。另外由于斜桥在受地震作用时表现出来的动力特性,需采用非线性时程方法进行抗震分析。抗震计算表明,在地震基本烈度不大的区域(0.1g 及以下),花瓶类实体墩由于其尺寸较大,在 E2 地震作用下桥墩处于弹性状态且承载力仍有较大富余量。

参考文献:

[1] 汉勃利,郭文辉.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.  
[2] 中交公路规划设计院有限公司.《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》应用指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.  
[3] 张忠效,张建勋.斜交转正交现浇预应力混凝土连续箱梁桥设计[J]. 城市建设,2011(15):386-387.