

# 宝鸡清水河特大桥主桥总体设计

王桢<sup>1,2</sup>,牛永喆<sup>3</sup>,李海鹏<sup>4</sup>

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075;2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆市 400074;  
3.陕西省交通规划设计研究院,陕西 西安 710065;4.陕西交通控股集团有限公司,陕西 西安 710054)

**摘要:**清水河特大桥主桥为 $(65+5\times 120+65)$  m连续刚构桥。主梁采用波形钢腹板-混凝土组合箱梁,双幅单箱单室断面。波形钢腹板采用1600型波形钢板,与顶、底板分别采用双PBL剪力键和 $\angle 200$ 角钢连接。纵向预应力钢筋分为体内束和体外束2种。下部结构采用双薄壁空心桥墩、承台和钻孔桩基础,最大墩高73 m,平均墩高71.4 m。主桥采用悬臂现浇施工方案,合龙顺序为边、中跨 $\rightarrow$ 次中跨 $\rightarrow$ 次边跨,合龙温度为 $10^{\circ}\text{C}$ ,顶推力为中跨500 kN,次中跨800 kN,次边跨1 200 kN。借助Ansys 14.0分析中跨跨中截面扭转横坡和翘曲比,说明布置6道横隔板较为合理。通过比较最不利偏载和对称荷载工况,确定波形钢腹板受力时的活载偏载系数为1.3。采用Midas/Civil 2019进行施工和成桥阶段纵桥向静力计算,波形钢腹板剪切屈服和屈曲计算,顶、底板剪力连接件剪切强度计算,组合梁跨中、根部和墩顶截面横桥向静力计算以及抗震计算,结果表明该桥各项指标均满足规范要求。

**关键词:**连续刚构桥;波形钢腹板;单箱单室;横隔板间距;合龙方案;抗震设计

**中图分类号:**U442

**文献标志码:**A

## 1 工程概况

清水河特大桥位于宝鸡市高新区,在温泉村跨越宝钛公路、七一公路和宝钛工业园区,是国家高速公路银昆线(G85)陕西境宝鸡至坪坎公路的控制性工程。桥梁全长1 440 m,主桥跨径布置 $(65+5\times 120+65)$  m,是目前中国在Ⅷ度地震区在建的最大跨径高墩多跨波形钢腹板-混凝土组合箱梁连续刚

构桥,最大墩高73 m,平均墩高71.4 m,两侧引桥结构为 $(3\times 50+4\times 50)$  m先简支后连续预应力混凝土T形梁桥。主桥下部结构为双薄壁空心墩、钻孔灌注桩基础。引桥4<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>~17<sup>#</sup>桥墩采用墩、梁固结。桥梁平面位于 $R_1=880$  m、 $L_{s1}=880$  m、 $L_{s2}=180$  m、 $R_2=1 475$  m、 $L_{s3}=180$  m、 $R_3=1 500$  m的反向平面曲线上,纵坡为2.3%,横坡为2%双向坡。清水河特大桥主桥总体布置见图1。

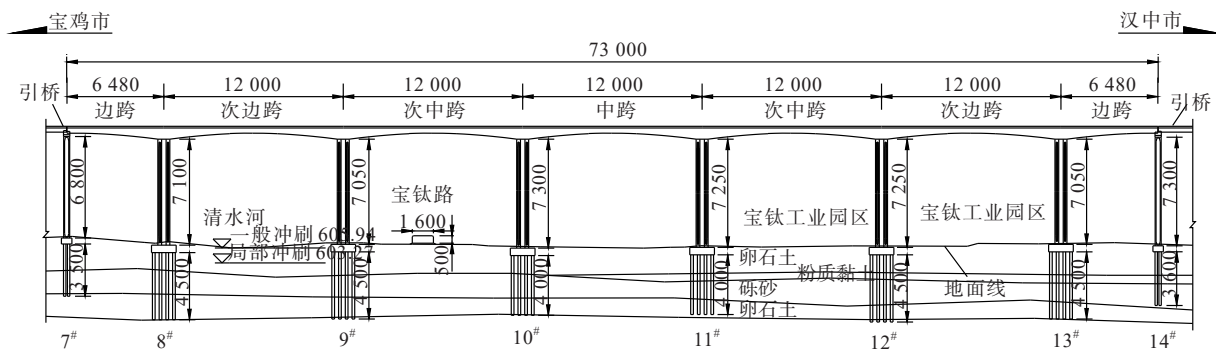


图1 清水河特大桥主桥总体布置(单位:cm)

收稿日期:2023-05-20(修改稿)

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(编号:51425801);重庆市自然科学基金创新群体科学基金资助项目(编号:cstc2019jcyj-xttX0004);重庆市技术创新与应用发展专项项目(编号:cstc2019jcsx-gksbX0047)

作者简介:王桢,男,博士研究生,高级工程师.E-mail:458695612@qq.com

桥址区所处地貌单元位于黄土台塬区清水河河谷区,河谷开阔且呈“U”字形,谷底平坦,宽 920 m。该地区年平均气温 7.6~12.9℃,最冷月元月平均气温 -0.8~-4.7℃,最热月 7 月平均气温 19~26℃。年极端最低气温 -29.8℃,年极端最高气温 42.7℃。

清水河流经河谷右侧,为渭河支流,黄河水系二级支流,河宽 40 m,平时水量较小,遇强降水时水量激增,桥位与河谷斜交 74°,河岸两侧植被茂密。

桥址区地层为全新统冲洪积卵石土和第四系上更新统风积、冲洪积卵石土和砂砾以及中更新统风积、冲洪积卵石土和砂砾。

工程区未见明显的断裂构造,该场地类别属于 II 类场地,为抗震有利地段、基本稳定、适宜建桥。该桥地震动峰值加速度为 0.244g,反应谱特征周期为 0.49 s。

## 2 主要技术指标

- (1) 道路等级:高速公路。
- (2) 桥面宽度:左、右分幅,单幅宽度 16 m。
- (3) 设计行车速度:80 km/h。

(4) 设计荷载:公路-I 级。

(5) 安全等级:一级,基准期 100 年。

(6) 洪水频率:1/300,设计流量:462 m<sup>3</sup>/s。

(7) 基本风速:10 年一遇 19 m/s,100 年一遇 26.8 m/s。

(8) 地震设防:地震基本烈度为 VIII 度,桥梁抗震设防类别属 B 类,抗震设防措施等级Ⅷ度。

## 3 桥式方案比选

清水河特大桥主桥跨径布设受清水河、宝钛公路、七一公路和宝钛工业园区等因素控制,其中宝钛工业园区宽度为 310 m。考虑到地形地貌、地面构造物和成桥景观效果等因素,同时兼顾宝鸡城市远期发展需求,并适当缩小桥梁规模、科学降低工程造价,提出 3 种桥式比选方案见表 1。

由表 1 可以看出:

(1) T 形梁桥工程造价最低,经济性优越、工期较短、施工工艺成熟,但跨越能力有限,无法适应宝鸡市远期规划,大跨度跨越宝钛工业园区,故仅在引桥采用此桥式方案。

表 1 清水河特大桥主桥桥式方案比选

桥式方案	跨径布置/m	桥长/ m	建设工 期/月	工程造 价/万元	施工难度	养护 成本	比选结果
先简支后连续预应力混凝土 T 形梁桥	15×50	750	10	11 238	常规桥型、工艺成熟	低	比选方案
预应力混凝土	50+7×90+50	730	22	16 930	与波形钢腹板桥比,同跨径主梁节段较重、挂篮自重较大	一般	比选方案
连续刚构桥	65+5×120+65		24	16 778			比选方案
预应力波形钢腹板-混凝土组合连续刚构桥	50+7×90+50	730	22	16 445	自重轻、结构新颖,有效解决腹板开裂	较高	比选方案
	65+5×120+65		24	15 939			推荐方案

(2) 主跨跨径 90 m 和 120 m 的连续刚构桥均能满足大跨度跨越宝钛工业园区的功能,但跨径 120 m 和 90 m 相比,薄壁墩和桩基数量较少、经济性较好、对工业园区干扰也较小,且高跨比接近黄金分割点,景观效果符合大众审美观念,故主跨跨径方案采用 120 m。

(3) 同跨径的波形钢腹板-混凝土组合连续刚构桥和混凝土连续刚构相比,具有可避免混凝土箱梁

腹板开裂、减少跨中下挠、提高抗震性能、上部结构重量较轻、下部工程数量较少、全桥经济性较为优越等特点;且此种结构充分发挥各种材料性能、有效缩短工期、成桥景观效果好。故主桥桥式方案采用波形钢腹板-混凝土组合连续刚构桥。

基于上述考虑,确定(65+5×120+65) m 预应力波形钢腹板-混凝土组合连续刚构桥为主桥最终桥式方案。

4 主桥结构设计

近年来,国内外已建和在建的波形钢腹板-混凝土组合连续梁桥主跨跨径已经突破 165 m,连续刚构桥主跨跨径已突破 140 m。大部分桥梁边中跨比为 0.536~0.58,根部高跨比为 1/16~1/17.4,跨中高跨

比为 1/29.6~1/41.3<sup>[1-8]</sup>。对于跨河桥梁,受通航要求限制的影响,根部梁高较小,高跨比为 1/16.8~1/17.4;对于山谷桥梁,适当增加梁高,可提高桥梁整体承载力和减少运营期跨中下挠,根部梁高较大,高跨比为 1/16~1/16.5。随着桥梁跨径逐渐增大,跨中高跨比逐渐减小。近 5 年国内外典型的大跨径波形钢腹板-混凝土组合连续(刚构)梁桥见表 2。

表 2 近 5 年国内外典型的大跨径波形钢腹板-混凝土组合连续(刚构)梁桥

桥名	跨径布置/m	跨中高跨比	根部高跨比	边中跨比	建成年份	桥梁特点
内蒙古景家湾大桥	44+3×80+44	1/29.6	1/16.0	0.550	2015	山谷桥,连续刚构桥
兰州小砂沟大桥	57+2×100+57	1/31.3	1/16.1	0.570	2015	山谷桥,连续刚构桥
山东鄞城黄河大桥	70+11×120+70	1/34.3	1/17.1	0.580	2015	跨河桥,连续梁桥
珠海前山河特大桥	90+160+90	1/40.0	1/16.8	0.563	2017	跨河桥,连续梁桥
日本丰田巴川桥	84.9+155+164+ 152+81.9	—	—	0.548	2017	连续梁桥
陕西梁渠沟大桥	75+2×140+75	1/40.0	1/16.5	0.536	在建	山谷桥,连续刚构桥
兰州雁白黄河大桥	90+165+90	1/41.3	1/17.4	0.545	在建	跨河桥,连续梁桥

4.1 上部结构

4.1.1 主梁构造

主桥箱梁采用悬臂挂篮施工工艺,材料为 C55 混凝土,边中跨比为 0.54,分为 0<sup>#</sup> 节段(长度 11.2 m)、悬臂浇筑节段(1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup> 节段长度 3.2 m、4<sup>#</sup>~12<sup>#</sup> 节段长度 4.8 m),合龙节段(长度 3.2 m)和边跨现浇节段(长度 3.2 m)。

单幅箱梁采用单箱单室断面,顶板宽度 15.9 m,底板宽度 8.4 m。梁高和底板厚度均以 1.8 次抛物线的形式,由跨中向根部变化,跨中梁高 3.5 m,底板厚度 0.32 m,高跨比为 1/34.3,根部梁高 7.5 m,底板厚度 0.8 m,高跨比为 1/16。

单幅箱梁翼缘悬臂长度 3.75 m,悬臂端厚度 0.2 m,悬臂根部厚度 0.8 m。顶板厚度在 0<sup>#</sup> 节段由 0.32 m 增加至 1.3 m,在边跨现浇节段由 0.32 m 增加至 0.8 m,其余节段厚度均为 0.32 m。

单幅箱梁在体外预应力钢束的转向位置设置横隔板兼做转向块,隔板厚度 0.5 m,设置 1.0 m×1.5 m (宽×高)的人洞。清水河特大桥主桥单幅主梁断面见图 2。

4.1.2 波形钢腹板构造

波形钢腹板采用 1600 型波纹钢板,材料为 Q345D 级低合金钢材,波长 1 600 mm,波高 220 mm,

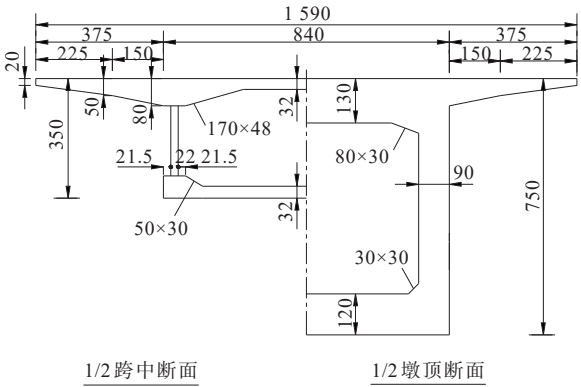


图 2 单幅桥梁主梁横断面(单位:cm)

水平段长 430 mm,斜段水平长 370 mm,水平折叠角度 30.7°,弯折半径为 15*t*(*t*为波形钢腹板厚度)。波形钢腹板厚度采用 12 mm、14 mm、16 mm、18 mm、20 mm 共 5 种型号。波形钢板弯折构造示意图 3。

4.1.3 波形钢腹板的连接

波形钢腹板和顶板采用双 PBL 剪力键连接。钢腹板顶部焊接上翼缘钢板,钢板厚度 20 mm,宽度 420 mm,兼作箱梁顶板加腋处混凝土浇筑时的底模。上翼缘钢板焊接 2 块倒“Ⅱ”形开孔钢板,倒“Ⅱ”形开孔钢板高度 160 mm,厚度 18 mm,钢板上设置一排直径  $\phi 60$  mm 的圆孔,孔中贯穿横桥向直径  $\phi 25$  mm 的钢筋。

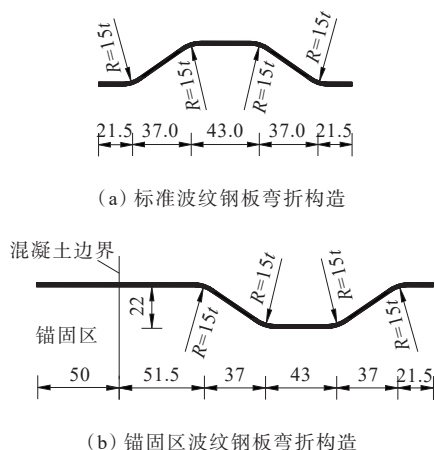


图3 波纹钢板弯折构造示意(单位:cm)

波形钢腹板和底板采用 $\angle 200 \times 200$ 角钢连接。钢腹板底部焊接下翼缘钢板,钢板厚度20 mm,宽度420 mm。下翼缘钢板焊接角钢,角钢厚度20 mm,纵向间距320 mm,角钢两侧各自焊接1道倒“U”形钢筋,角钢上设置一排直径 $\phi 55$  mm的圆孔,孔中贯穿纵桥向直径 $\phi 25$  mm的钢筋。

波形钢腹板和横隔板采用 $\phi 19$  mm $\times$ 200 mm剪力栓钉连接。栓钉在纵桥向布置3列,纵桥向间距150 mm,高度方向间距150 mm。波形钢腹板与边跨端部和0#节段的横隔板采用钢板直接嵌入混凝土的

方式连接,嵌入段设置钢筋混凝土榫剪力键,开孔直径 $\phi 60$  mm,贯穿钢筋直径 $\phi 25$  mm。波形钢腹板的连接总体示意图4,波形钢腹板和顶底板的连接示意图5。

#### 4.1.4 波形钢腹板的涂装防腐

桥址区属于I类环境,腐蚀环境按C3选取,采用长效型25年。涂装配套体系见表3。

表3 涂装配套体系

涂装位置	涂层	道数	干膜厚度/ $\mu\text{m}$
底漆	环氧富锌漆	2	一道30共60
中间漆	环氧云铁中间漆	1	一道40共40
面漆	氟碳面漆(工厂)	1	30
	氟碳面漆(工地)	1	30

波形钢腹板防腐体系方案如下:①涂装配套体系中未列入车间底漆,车间底漆喷涂厚度为一道20~25  $\mu\text{m}$ ;②封闭环境钢材表面防腐体系可取消面漆;③氟碳面漆溶剂可溶物氟含量 $\geq 24\%$ 。

#### 4.1.5 横隔板间距布置

对大跨径波形钢腹板-混凝土组合连续刚构桥,受波形钢板纵向刚度很小、腹板较薄和横向框架作用较低等因素影响,相对于传统混凝土箱梁,在偏心

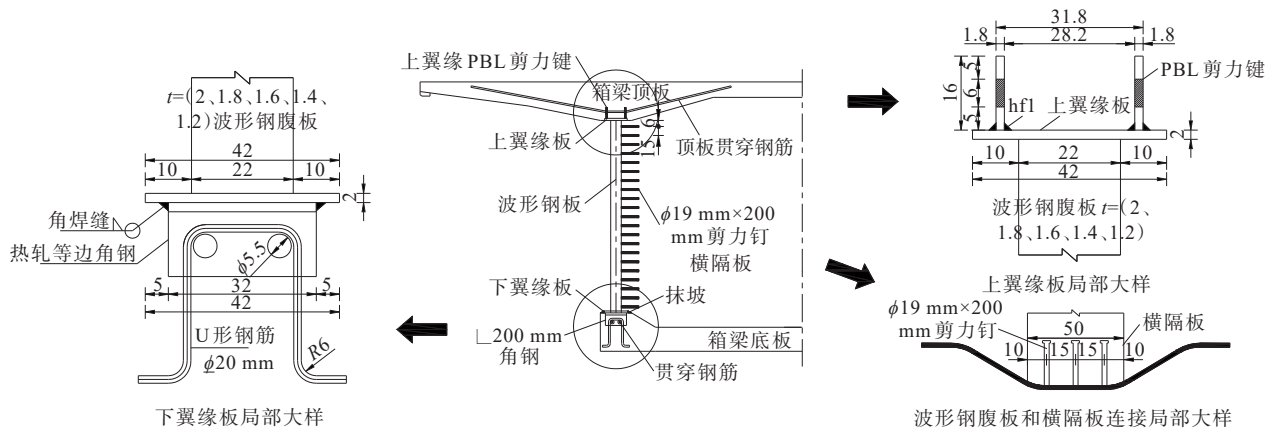


图4 波形钢腹板的连接总体示意(单位:cm)

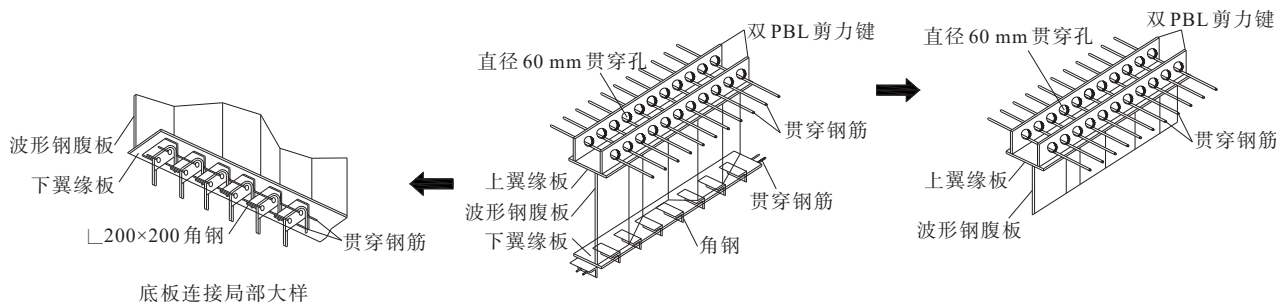


图5 波形钢腹板和顶底板的连接示意



荷载作用下,组合箱梁会产生较大的扭转变形、畸变变形和纵向翘曲正应力。

为减小上述变形和应力,一般措施为设置一定数量的混凝土横隔板<sup>[9]</sup>。对于横隔板间距的布置,在设计上是一个难点。李宏江等<sup>[10]</sup>确定横隔板最大间距原则为:在偏心荷载作用下,纵向翘曲正应力 $\sigma_w = \sigma_E - \sigma_s$ 与在对称弯曲荷载(恒载和对称活载)作用下最大正应力 $\sigma_M$ 的比值控制在10%以内,即翘曲比 $\sigma_w/\sigma_M \leq 10\%$ ,其中 $\sigma_s$ 为对称活载产生的弯曲正应力, $\sigma_E$ 为偏心活载产生的正应力。根据滕乐等<sup>[11]</sup>研究,在恒载和活载作用下,翘曲正应力最大值位于中跨跨中截面,以波形钢腹板和混凝土底板的连接点为控制点。

基于上述考虑,宝鸡清水河特大桥主桥在提出多种横隔板布置方案的基础上,以中跨跨中截面为翘曲正应力分析截面,用翘曲比和扭转横坡确定最优的横隔板布置方案。半跨中间横隔板布置方案见图6,中跨跨中截面控制点畸变比和翘曲比见图7,中跨跨中扭转位移见表4。图7中 $\sigma_D$ 为畸变翘曲正应力。

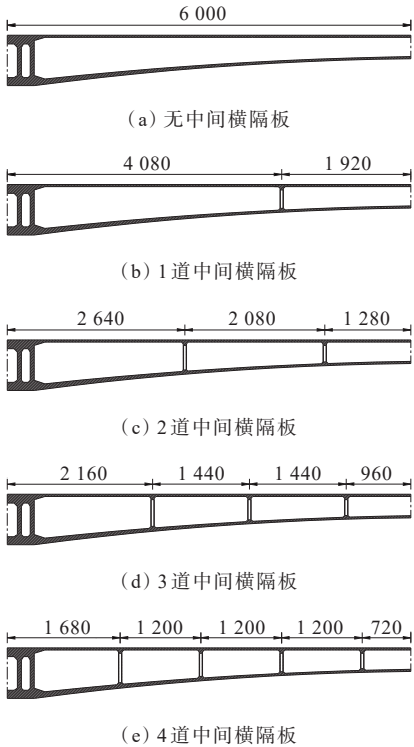


图6 半跨中间横隔板布置方案(单位:cm)

由图7、表4可以看出:

(1) 随着横隔板数量增加,畸变比和翘曲比均逐渐减小。当布置6道和8道横隔板时,翘曲比分别为

0.098和0.059,均小于10%。

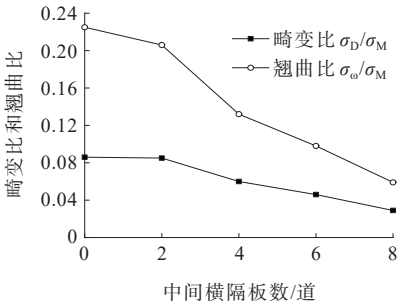


图7 中跨跨中截面控制点畸变比和翘曲比

表4 中跨跨中截面扭转位移

中间横隔板数/道	加载侧腹板挠度/mm	非加载侧腹板挠度/mm	扭转形成横坡/%	相对扭转刚度
0	-9.52	-6.92	0.034	1.00
2	-9.49	-6.90	0.033	1.00
4	-9.34	-7.00	0.030	1.11
6	-9.21	-7.09	0.027	1.23
8	-9.17	-7.08	0.027	1.24

(2) 随着横隔板数量增加,扭转形成横坡逐渐减小,相对扭转刚度逐渐增大。当布置6道和8道横隔板时,扭转形成横坡和相对扭转刚度差别很小,因此在6道横隔板基础上再增加横隔板意义不大。

有鉴于此,在保证翘曲比 $\sigma_w/\sigma_M \leq 10\%$ 的前提下,综合对比扭转形成横坡和扭转刚度,同时考虑尽可能减小结构自重,在主梁内布置6道中间横隔板较为合理。

4.1.6 预应力体系

主桥箱梁采用纵、横双向全预应力体系设计,纵向预应力钢束分为体内束和体外束两种。

箱梁悬臂浇筑和边、中跨合龙的预应力全部采用体内束,用于抵抗结构自重和临时施工荷载。体内束采用高强度、低松弛钢绞线, $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ ,按照“逐个节段对称、先长束后短束”的顺序进行穿索张拉。顶板束采用17 $\phi$ 15.2钢绞线,钢束编号T1~T13,共576束,锚固于顶板梗肋区域;中跨顶板合龙束采用15 $\phi$ 15.2钢绞线,钢束编号ZH,共20束,锚固于中跨顶板齿板上;中跨底板合龙束采用17 $\phi$ 15.2和19 $\phi$ 15.2钢绞线,钢束编号D1~D8,共160束,锚固于中跨底板齿板上;边跨顶板合龙束采用15 $\phi$ 15.2钢绞线,钢束编号BH1~BH2,共16束,锚固于边跨顶板齿板上;边跨底板合龙束采用15 $\phi$ 15.2钢

绞线,钢束编号 BD1~BD3,共 24 束,锚固于边跨底板齿板上。预应力钢束均采用两端张拉,锚下控制张拉应力 1 395 MPa。

体外束以“易安装检查、可维修更换”为设计出发点,即采用有效的防腐措施,方便单根换束,能够多次张拉和补张拉。体外束用于抵抗二期恒载和活载,在全桥合龙后、二期铺装和护栏等附属设施施工前,按照从边跨至中跨的顺序依次对称穿索张拉。体内束采用环氧涂层钢绞线成品索,由环氧喷涂钢绞线、专用油脂和热挤外层 PE 等多层防腐结构组成,  $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 。体外束采用 23 $\phi 15.2$  钢绞线,钢束编号 TWS1~TWS2,共 104 束,一端锚固在端横梁或中横隔梁处,另外一端锚固在 0 $^\circ$  节段顶板处。预应力钢束均采用两端张拉,锚下控制张拉应力 1 116 MPa。

体外束转向器和预埋保护套管采用无缝钢管和

内衬 HDPE 管组成,钢管提供体外束转向角度和弧度,HDPE 管起隔离锁体和钢管作用。转向器共有 6 种类型,识别号 ZXQ15-23,均布置在横隔板上。转向器确保钢束在转向过程中,钢绞线之间位置平行、受力均匀,以减小钢绞线磨损,可有效方便换束。

横向束采用 3 $\phi 15.2$  钢绞线,纵向间距 50 cm,采用单端交替张拉,锚下控制张拉应力 1 395 MPa。

0 $^\circ$  节段设有竖向预应力束,采用 JL32 精轧螺纹钢,  $f_{pk}=930\text{ MPa}$ ,分两次单端张拉,第二次为检查性张拉。

#### 4.2 下部结构

桥梁 8 $^\circ$ ~13 $^\circ$  桥墩采用等截面双薄壁空心墩,顺桥向尺寸 8.4 m,横桥向尺寸 2.5 m。为增加耐久性,墩身表面设 D3 高强弹簧防裂钢筋网。主桥桥墩构造见图 8。

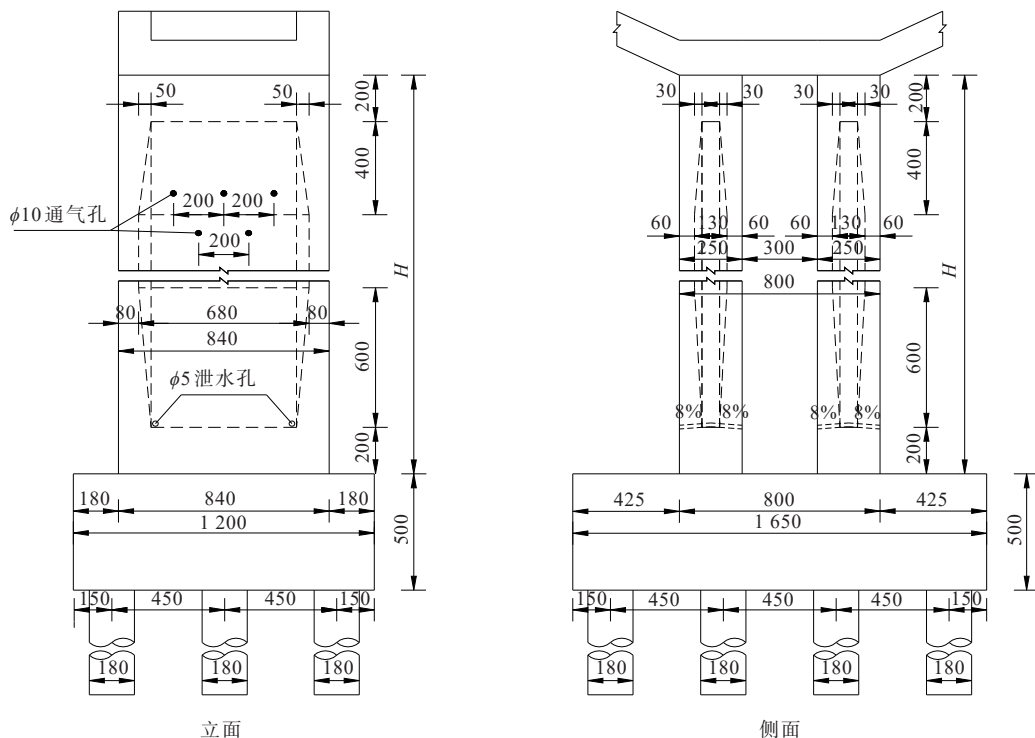


图 8 主桥桥墩构造(单位:cm)

#### 4.3 合龙顺序和顶推力

目前,多跨波形钢腹板-混凝土组合连续刚构桥的体系转变过程通常为先小合龙后大合龙,即各个桥墩顶悬臂施工形成 T 构后,先两两合龙形成 II 构(小合龙),再将 II 构逐个相互连接(大合龙),形成全桥。这种合龙方式可多点同时施工、互不干扰,体系转换对称进行,桥墩和箱梁受力均匀合理<sup>[12]</sup>。

对于宝鸡清水河特大桥主桥,结合顶推次数和顶推力大小,存在两种可行的合龙顺序:

方案 1:边跨、次中跨(形成 II 构,小合龙)→次边跨(大合龙)→中跨(成桥)。在中跨合龙前顶推,顶推作业一处,顶推力较大,桥墩纵向水平位移较大,线形不理想。

方案 2:边、中跨(形成 II 构,小合龙)→次中跨

(大合龙)→次边跨(成桥)。在中跨、次中跨和次边跨合龙前顶推,顶推作业三处,顶推力较小,桥墩纵向水平位移可控,线形理想。

鉴于此,宝鸡清水河特大桥主桥合龙顺序采用方案2。各跨合龙温度拟定为 $10^{\circ}\text{C}$ ,合龙顶推力为中跨 $500\text{ kN}$ ,次中跨 $800\text{ kN}$ ,次边跨 $1\,200\text{ kN}$ 。

## 5 结构分析

### 5.1 波形钢腹板受力时的活载偏心系数

为研究波形钢腹板受力时的活载偏心系数,笔者借助有限元软件Ansys 14.0建立空间实体单元有限元模型,见图9。

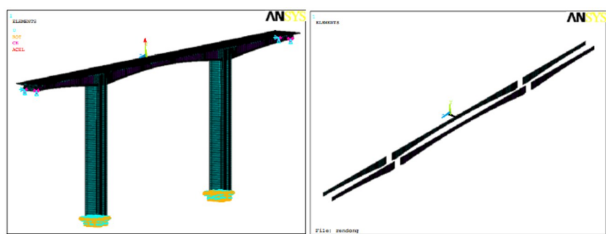


图9 桥梁空间实体单元有限元模型

模型组合箱梁的混凝土顶板、底板、0#块腹板和横隔板均采用实体单元Solid 45模拟,波形钢腹板采用板壳单元Shell 63模拟。通过最不利偏载和对称荷载工况进行比较,波形钢腹板竖向剪应力比值为1.3。进行全桥空间杆系单元模拟分析时,对车道荷载乘以1.3倍的增大系数,以考虑扭转剪应力的附加作用。

### 5.2 波形钢腹板-混凝土组合箱梁受力分析

#### 5.2.1 有限元模型

为研究组合箱梁的结构受力,笔者采用大型桥梁专用有限元软件Midas/Civil 2019建立空间杆系单元有限元模型,见图10。主墩墩梁结合部位采用刚性连接模拟,边跨支座采用一般支承模拟,约束竖向、横桥向线位移。



图10 桥梁空间杆系单元有限元模型

#### 5.2.2 施工阶段和成桥阶段结构受力分析

对结构受力分析时,尚需遵循如下力学

假定<sup>[13-14]</sup>:

(1) 忽略波形钢腹板的纵向抗弯作用。受褶皱效应影响,波形钢腹板不承受纵桥向轴力,其断面抗拉压面积、抗弯惯性矩计算仅考虑混凝土顶、底板。

(2) 在竖向荷载作用下正弯曲平面假定成立。波形钢腹板与混凝土顶、底板共同工作,不发生相对滑移,忽略波形钢腹板的竖向压缩变形。

(3) 弯矩仅由混凝土顶、底板断面承担,剪力由波形钢腹板承担,且剪应力在腹板上均匀分布。

在短暂状况和持久状况的不同极限状态下,考虑永久荷载、可变荷载和偶然荷载等多种荷载的组合工况。计算结果表明:

(1) 在短暂状况组合工况下,主梁组合截面最大压应力为 $14.5\text{ MPa}$ ,最大拉应力为 $0.9\text{ MPa}$ 。

(2) 在持久状况准永久效应组合下,主梁组合截面上缘最大拉应力为 $0.5\text{ MPa}$ ,出现在边跨支点附近;截面下缘最小压应力 $1.8\text{ MPa}$ ,出现在边跨支点附近。在持久状况频遇效应组合下,截面不出现拉应力。在持久状况组合工况下,主梁组合截面上缘最大压应力为 $16.0\text{ MPa}$ ,截面下缘最大压应力为 $4.2\text{ MPa}$ 。

(3) 在持久状况承载能力极限状态下,主梁组合截面最大正弯矩为 $253\,089\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,最大负弯矩为 $101\,226.8\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

#### 5.2.3 波形钢腹板受力分析

对波形钢腹板受力分析<sup>[15]</sup>,遵循如下步骤:

(1) 与传统的混凝土腹板不同,波形钢腹板的剪应力沿梁高基本呈等值分布。由于轴向压应力较小,钢腹板视为纯剪应力状态,剪应力较大,可能发生剪切屈服,故需验算波形钢腹板剪应力,同时修正拟定钢板厚度。

(2) 在极限荷载作用下,虽然剪应力在允许范围内,但因波形钢腹板形状不同,板的剪切屈曲也可能发生。以压杆理论为基础的剪切屈曲强度分布曲线见图11,设计宜以控制屈曲发生在屈服区、非弹性区为原则,依次进行局部屈曲、整体屈曲和合成屈曲验算,同时修正拟定波宽和波高。

(3) 对大跨波形钢腹板箱梁桥,墩顶部位截面高度较大,在支点附近设置内衬混凝土,可以有效提高波形钢腹板抗屈曲性能,保证结构的稳定承载能力,并把腹板承受的剪力呈递给下部结构。一般当支点梁高超过 $5\text{ m}$ 时,应设置内衬混凝土,厚度为 $20\sim 90$

cm,设置区间为从0#节段中横梁侧面起,至挂篮悬臂浇筑第1节段末。

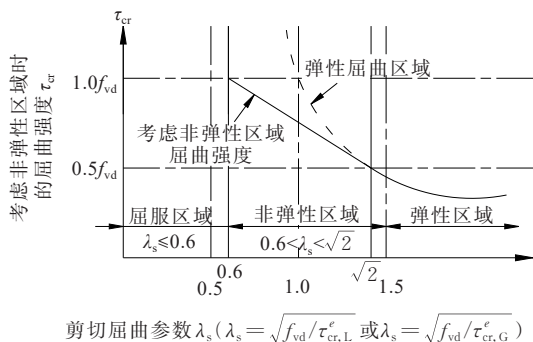


图 11 考虑非弹性的剪切屈服强度分布曲线

对结构受力分析时,虽然假定剪力完全由波形钢腹板桥承担,但是实际上内衬混凝土和钢腹板存在剪力分配关系,故有必要单独计算在墩顶中横梁附近区域,有、无混凝土内衬两种情况下的波形钢腹板剪应力。宝鸡清水河特大桥主桥内衬混凝土厚度为 21.5~98.5 cm,设置区间为从 0#节段中横梁侧面起,至 1#节段,长度为 9.6 m。图 12 为波形钢腹板剪屈服和剪切屈曲分布曲线。

由图 12 可以看出:

(1) 在极限荷载作用下,全桥最大剪应力为 146.7 MPa;在设计荷载作用下,全桥最大剪应力为 119.3 MPa。这表明在极限荷载或设计荷载作用下,全桥最大剪应力均小于容许剪应力,波形钢腹板不会发生剪切屈服。

(2) 在极限荷载作用下,不考虑内衬混凝土作用,内衬混凝土区域的剪应力为 -146.4~123.6 MPa,考虑内衬混凝土作用,内衬混凝土区域的剪应力为 -55.6~49.9 MPa。这表明在考虑内衬混凝土抗剪后,波形钢腹板剪应力安全储备显著提高。

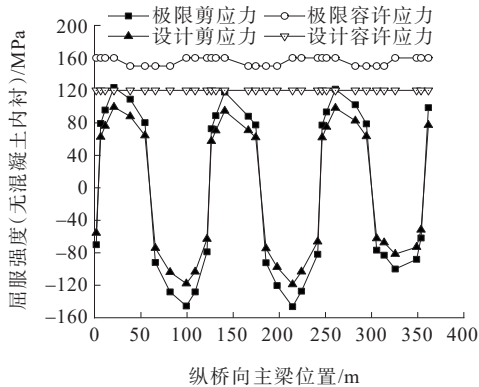
(3) 在极限荷载作用下,局部屈曲、整体屈曲和合成屈曲的参数最大值分别为 0.45、0.52、0.52。剪切屈曲参数均小于 0.6,波形钢腹板不会发生整体屈曲、局部屈曲和合成屈曲。

#### 5.2.4 剪力连接件受力分析

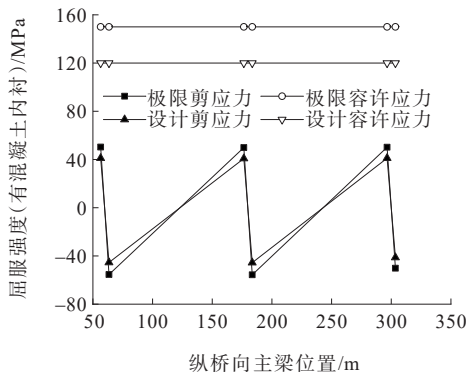
图 13 为顶、底板连接件纵向剪切强度分布曲线。

由图 13 可以看出:

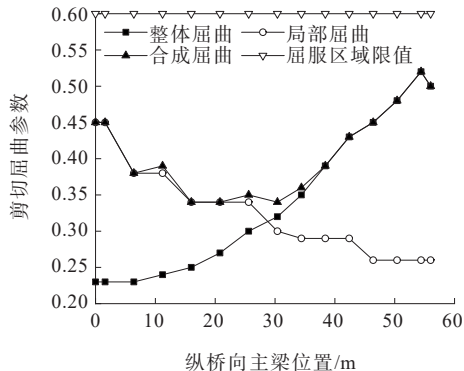
(1) 在极限荷载作用下,顶板连接件最大水平剪力为 3 648.2 kN;在设计荷载作用下,顶板连接件最大水平剪力为 2 963.5 kN。这表明在极限荷载或设



(a) 剪切屈服



(b) 内衬混凝土区域剪切屈服



(c) 剪切屈曲

注:① 在极限荷载作用下,钢板厚度为 12 mm、14 mm 时,容许应力为 160 MPa;厚度为 16 mm、18 mm 和 20 mm 时,容许应力为 150 MPa;在设计荷载作用下,容许应力均为 120 MPa;② 纵桥向主梁位置中的“0”为跨中,“60”为 11#墩顶,“180”为 12#墩顶,“300”为 13#墩顶。

图 12 波形钢腹板剪切屈服和剪切屈曲分布曲线

计荷载作用下,最大水平剪力均小于剪切抗力。

(2) 在极限荷载作用下,底板连接件最大水平剪力为 3 910.2 kN,小于剪切抗力。

#### 5.2.5 组合梁横向受力分析

选取主梁跨中、根部和墩顶截面进行横向设计分析,其中跨中、根部截面为钢-混组合箱梁截面,墩



顶截面为混凝土箱梁截面。清水河特大桥横桥向有限元模型见图14。

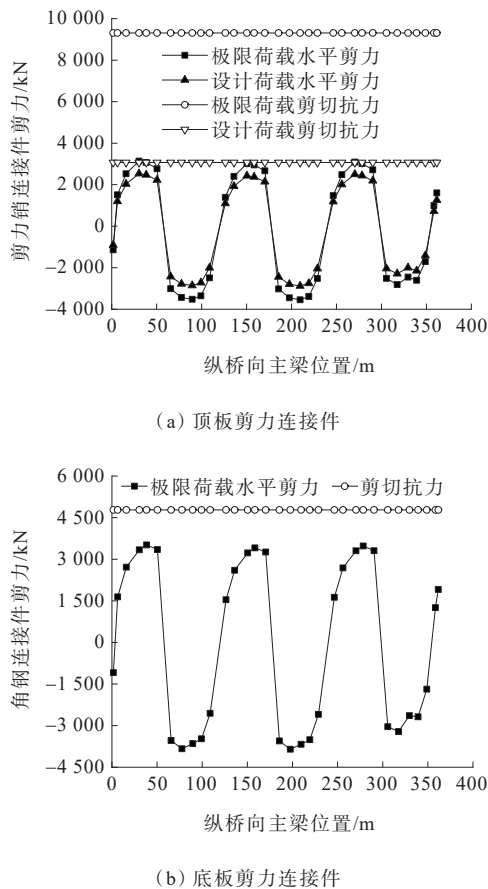


图13 顶、底板连接件纵向剪切强度分布曲线

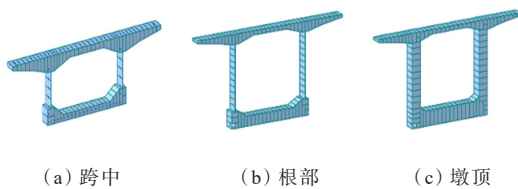


图14 清水河特大桥主桥横桥向有限元模型

考虑的荷载有恒载、收缩徐变、车轮荷载、温度作用等。计算结果表明:

在持久状况准永久效应组合下,混凝土顶板的跨中、根部和墩顶位置最大拉应力分别为1.2 MPa、1.2 MPa、1.0 MPa,最大压应力分别为5.9 MPa、9.3 MPa、9.6 MPa,最大裂缝宽度分别为0.17 mm、0.2 mm、0.15 mm。

### 5.3 地震响应分析

与预应力混凝土连续刚构桥相比,波形钢腹板-混凝土组合箱梁连续刚构桥上部结构的截面刚度和重量发生了变化,因此动力特性有别于预应力混凝土

连续刚构桥<sup>[16-18]</sup>。以清水河特大桥主桥为工程实例,采用非线性动态时程法,对主跨120 m的波形钢腹板连续刚构桥和预应力混凝土连续刚构桥进行地震响应分析。拟定预应力混凝土连续刚构桥单幅主梁横断面见图15。清水河特大桥主桥采用2种地震波分别对2座桥梁的地震响应进行计算。波形1:50年超越概率为40%;波形2:50年超越概率为2%。2种波形的水平地面峰值加速度分别为0.112g、0.465g。2种地震波波形见图16。

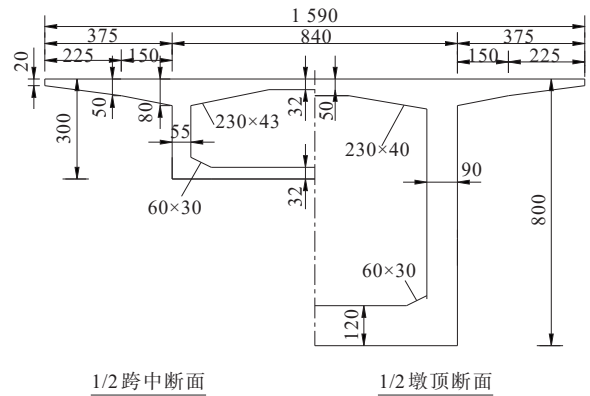
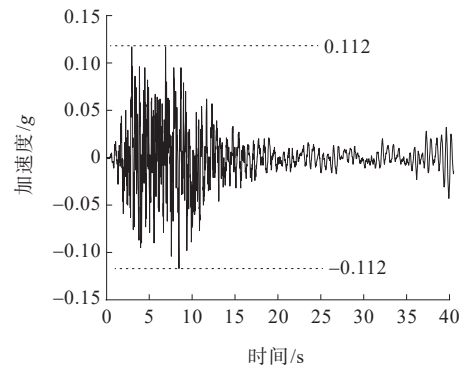
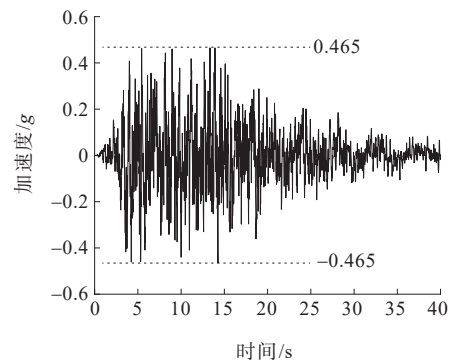


图15 预应力混凝土连续刚构桥单幅主梁横断面(单位:cm)



(a) 波形1



(b) 波形2

图16 2种地震波波形

### 5.3.1 桥墩最大内力

2 种地震波作用下预应力混凝土连续刚构桥和波形钢腹板连续刚构桥桥墩内力比见表 5。

表 5 预应力混凝土和波形钢腹板连续刚构桥桥墩内力比

波形	位置	纵向地震作用		横向地震作用		
		$F_x$	$M_y$	$F_y$	$M_z$	
1	矮墩	墩顶	0.49	0.84	0.75	0.97
		墩底	1.00	0.94	0.93	0.94
	高墩	墩顶	0.78	0.83	0.80	0.90
		墩底	0.85	0.94	0.93	0.95
2	矮墩	墩顶	0.60	0.86	0.68	0.94
		墩底	0.56	0.90	0.76	0.84
	高墩	墩顶	0.90	0.86	0.67	0.76
		墩底	0.79	0.90	0.83	0.77

注:桥墩内力比=波形钢腹板桥内力/预应力混凝土桥内力。

由表 5 可以看出:

在纵向地震作用下,波形钢腹板连续刚构桥的轴力、绕 y 轴弯矩分别为预应力混凝土连续刚构桥的 0.49~1、0.83~0.94。在横向地震作用下,波形钢腹板连续刚构桥的轴力、绕 z 轴弯矩分别为预应力混凝土连续刚构桥的 0.67~0.93、0.76~0.97。这表明波形钢腹板连续刚构桥上部结构质量较小,对桥墩地震响应有利,故在地震作用下,桥墩轴力和弯矩较小。

### 5.3.2 主梁跨中位移

2 种地震波作用下预应力混凝土和波形钢腹板连续刚构桥主梁跨中位移见表 6。

表 6 预应力混凝土和波形钢腹板连续刚构桥主梁跨中位移

波形	截面位置	波形钢腹板刚构桥/cm		PC 连续刚构桥/cm	
		$D_x$	$D_y$	$D_x$	$D_y$
1	第 2 跨跨中	7.3	6.4	6.6	5.9
2	第 2 跨跨中	22.2	20.7	20.1	17.1

由表 6 可以看出:

在地震波 1 作用下,波形钢腹板连续刚构桥的主梁跨中 x、y 轴位移分别为预应力混凝土连续刚构桥的 0.9、0.92;在地震波 2 作用下,波形钢腹板连续刚构桥的主梁跨中 x、y 轴位移分别为预应力混凝土连续刚构桥的 0.91、0.82。这表明波形钢腹板连续刚构桥上部结构横向刚度较小、框架效应减弱,故在地震作用下,主梁位移较大。

## 6 结论

宝鸡清水河特大桥主桥于 2017 年 6 月开工建设,2020 年 10 月建成通车。该桥是目前中国Ⅷ度地震区建成的最大跨径高墩多跨波形钢腹板-混凝土组合箱梁连续刚构桥,也是陕西省首座波形钢腹板-混凝土组合箱梁连续刚构桥。以该桥为工程实例,通过本文研究工作,得出如下结论:

(1) 通过对桥梁静力特性、地震响应、顶底板连接件剪切强度、波纹钢腹板剪切屈服和屈曲的验算,表明清水河特大桥主桥各项指标均满足规范要求。

(2) 波形钢腹板连续刚构桥在提出多种横隔板布置方案的基础上,可以以中跨跨中截面为翘曲正应力分析截面,利用翘曲比和扭转横坡,确定主梁内中间横隔板的最优布置方案。

(3) 多跨波形钢腹板连续刚构桥可以按照先小合龙后大合龙的原则,提出多种可行的合龙方案,结合顶推次数和顶推力大小,确定最优合龙顺序。

(4) 在地震波作用下,波形钢腹板连续刚构桥与预应力混凝土连续刚构桥相比,主梁位移较大,桥墩轴力和弯矩较小。在高烈度地震山区,采用波形钢腹板-混凝土组合体系,对桥梁地震响应总体有利。

### 参考文献:

- [1] 李宁,卢勇,陈成,等.波形钢腹板连续梁桥错位法悬浇施工技术适用性研究[J].中外公路,2018,38(1):145-147.
- [2] 陈卫华.波形钢腹板施工定位研究与安装优化[J].中外公路,2017,37(4):193-195.
- [3] 张巍.波形钢腹板 PC 梁桥施工期局部应力分析[J].中外公路,2017,37(3):161-163.
- [4] 张国清,范宇丰,郑尚敏.十字空间网格法在波形钢腹板组合箱梁中的应用[J].中外公路,2017,37(3):73-78.
- [5] 秦明星.波形钢腹板 PC 梁施工期位移分析与控制[J].中外公路,2017,37(3):138-140.
- [6] 谷守法,王志东,邓振全,等.波形钢腹板箱梁桥新型拖吊结合式挂篮设计[J].中外公路,2017,37(2):72-76.
- [7] 郑和晖,王敏,巫兴发.节段预制拼装波形钢腹板组合梁整体受力性能试验研究[J].中外公路,2017,37(1):118-124.
- [8] 李广慧,张建勋,王用中.山东鄄城黄河大桥设计创新[J].人民黄河,2010,32(6):93-94,97.
- [9] 陈水生,陈志兴.横隔板对波形钢腹板箱梁动力特性的

# 大跨度组合梁斜拉桥中跨合龙口相对转角误差分析

涂光亚,周城勇

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**根据无应力状态法理论,为保证斜拉桥施工完成后的成桥内力和线形达到目标状态,中跨合龙时的主梁弹性曲线应保持连续,即合龙口两侧主梁的相对转角应为零,但在实际工程中很难满足相对转角绝对为零的条件。该文以赤壁长江公路大桥为工程背景,针对大跨度组合梁斜拉桥中跨合龙时的相对转角误差对最终成桥目标状态的影响进行研究,进而确定相对转角误差的容许范围。分析结果表明:中跨合龙时合龙口两侧主梁相对转角误差主要对成桥目标状态下主梁的应力有较大影响,对塔偏、索力、主梁线形基本没有影响;对于赤壁长江公路大桥,中跨合龙时合龙口两侧主梁的容许相对转角误差可定为 $\pm 1 \times 10^{-3}$  rad,在此范围内可认为合龙口两侧主梁弹性曲线是连续的。

**关键词:**组合梁斜拉桥;无应力状态法;中跨合龙;相对转角误差;主梁应力

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## 0 引言

随着斜拉桥理论的发展以及建桥工艺的成熟,越来越多的斜拉桥主梁采用了钢-混凝土组合结构,与混凝土斜拉桥和钢结构斜拉桥相比,这种结构形式兼顾了混凝土和钢结构的部分优势<sup>[1-5]</sup>。对于大跨度组合梁斜拉桥,结构体系复杂,一般采用分阶段施工的建造方法,需经历多次体系转换才能达到最终的成桥状态<sup>[6-9]</sup>。为了避免施工过程中工序改变、临时外荷载出现和温度变化导致成桥状态改变的问题<sup>[10-13]</sup>,大跨度斜拉桥一般采用无应力状态法确定桥

梁施工阶段理想状态。

根据无应力状态法理论,在外荷载、结构体系、支撑边界条件、单元无应力状态下的几何长度和曲率已确定的情况下,最终状态的内力和位移是唯一的<sup>[6,11,14]</sup>。为了确保实际恒载状态与成桥目标状态一致,关键和难点就是控制主梁和斜拉索的无应力状态量,对保证中跨合龙段无应力安装至关重要。为了满足合龙段无应力安装的条件,有时通过强制位移、施加临时压重或调索手段使合龙段在无应力条件下安装,使合龙段与已安装梁段位移和转角连续和一致<sup>[15-17]</sup>(即主梁中跨合龙口两侧相对转角为零),对于大跨度组合梁斜拉桥一般可以通过调索手段达

影响分析[J].中外公路,2015,35(3):77-79.

[10] 李宏江,叶见曙,万水,等.波形钢腹板箱梁横隔板间距的研究[J].公路交通科技,2004,21(10):51-54,61.

[11] 滕乐,郑凯锋,吴涤,等.单箱双室波形钢腹板连续刚构桥横隔板间距研究[J].铁道建筑,2017,57(10):1-5.

[12] 胡清和,邓江明,周水兴,等.多跨连续刚构桥顶推合龙方案研究[J].中外公路,2009,29(3):109-114.

[13] 王东炜,张奇伟,王用中.基于模态分析的郟城黄河公路大桥优化设计[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(6):1-5.

[14] 王健.波形钢腹板PC箱梁桥的设计与工程实例分析[J].桥梁建设,2010,40(4):61-64.

[15] 胡建华,刘海波,狄瑾.波形钢腹板PC组合箱梁扭转性能分析[J].中外公路,2017,37(3):118-123.

[16] 张海君.钢波纹板-混凝土组合拱涵影响参数分析[J].中外公路,2023,43(1):139-143.

[17] 田波,宋路兵.混合梁斜拉桥钢-混结合段设计关键技术[J].中外公路,2023,43(2):117-120.

[18] 冯文章,刘保东,牟开,等.波纹钢腹板连续刚构桥抗震性能研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(5):70-74.

收稿日期:2023-10-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073)

作者简介:涂光亚,男,博士,副教授.E-mail:runner\_mail@126.com