

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.02.017

典型高架桥大挑臂盖梁轻型化设计方案研究*

张涛^{1,2}, 甘露^{1,2}, 闫兴非^{1,2}

(1.上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125;

2.上海工业化装配化市政工程技术研究中心, 上海 200125)

摘要: 结合典型城市高架桥盖梁结构, 针对结构轻型化目标, 采用 T 形断面构造及 C80 高强混凝土材料进行盖梁轻型化设计。根据 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》开展抗弯、抗剪、抗扭承载能力极限状态分析, 得到最小腹板厚度, 据此完成盖梁结构方案设计。与原盖梁相比, 采用 C50 混凝土时, T 形断面轻型盖梁结构的质量减少 18%; 采用 C80 混凝土时, T 形断面轻型盖梁结构的质量减少 27%; 采用 T 形断面轻型盖梁结构能大幅度降低盖梁运输吊装难度, 减少生产相应材料产生的碳排放。

关键词: 桥梁; 盖梁; 高架桥; 轻型化设计

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0081-04

装配式桥墩结构应用中常出现质量过大、难以运输吊装的问题^[1-2]。以城市高架桥为例, 若上部结构采用 30 m 小箱梁结构, 通常六车道整幅桥梁对应的混凝土盖梁质量约 300 t, 八车道整幅桥梁对应的混凝土盖梁质量约 450 t^[3-4], 超出预制节段梁桥、预制小箱梁桥预制构件的质量^[5-8]及绝大多数工程的运输能力, 不利于装配式桥梁结构的推广应用。为解决盖梁构件质量大的问题, 工程师们构思了节段拼装盖梁、正 U 形空心盖梁、倒 U 形空心盖梁、分片式盖梁等多种混凝土盖梁形式^[9-11], 或者直接采用钢盖梁结构, 但这些方案都有适应的工程场景。本文以常见的城市高架桥盖梁为例, 结合轻型化需求, 考虑 C80 高强混凝土已经有较多应用, 成本可控并能缩小截面尺寸^[12-13], 根据现有规范开展参数分析及盖梁结构轻型化设计。

1 背景工程

某城市高架桥桥面宽度为 25.5 m, 上部结构采用标准 30 m 跨径小箱梁结构, 四跨一联, 每个断面布置 8 片梁, 高架下面设置地面辅道, 采用双柱大挑臂盖梁(见图 1)。以立柱中心为约束点计算, 盖梁的挑臂总长为 9.25 m, 中跨跨度为 7.00 m。盖梁为变高度矩形截面, 高度从 1.052 m 变化至 2.600 m。盖梁采用 C50 混凝土, 采用预制装配施工工艺, 通过灌浆套筒与立柱连接。单幅盖梁需要 115.5 m³ 混凝土, 质量 300 t, 超出工程现场运输能力, 有必要对盖梁进行轻型化设计。

2 荷载和内力分析

按照 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应

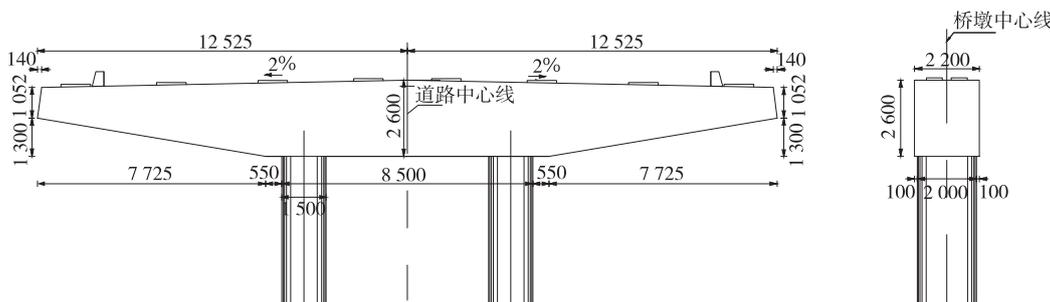


图 1 原盖梁结构设计方案(单位: mm)

* 基金项目: 上海市科委科技创新行动计划(20dz2251900; 20dz1202102); 上海市科委工程技术中心建设专项(21002420100)

力混凝土桥涵设计规范》^[14]，利用有限元软件 MIDAS/Civil 2021 建立原盖梁杆系模型，模型中包括立柱和盖梁结构，立柱底部采用固定约束，立柱和盖梁之间采用刚臂连接，材料模型采用符合规范要求的材料参数。主要考虑如下荷载：1) 施工阶段恒载；2) 汽车荷载，为城-A 级，采用横向车道荷载加载；3) 温度作用，按升温 24 ℃、降温 43 ℃ 考虑。结构重要性系数 γ_0 取 1.1。

在施工阶段及频遇组合、准永久组合作用下需要控制结构应力，而结构应力受预应力布置影响很大，且可以通过变化预应力线形调整这些工况的结构应力状态，这些工况作用下结构状态并不影响结构总尺寸选择。基本组合作用下需要分析结构的承载能力，其中抗弯、抗剪、抗扭承载能力分析均包含最小截面验算。因此，重点针对基本组合工况进行分析，根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》^[15] 计算该桥盖梁在基本组合作用下的荷载值及荷载分布。

2.1 基本组合弯矩

如图 2 所示，基本组合所用下，全盖梁均产生负弯矩，挑臂上负弯矩快速从零变化至最大值 53 700 kN·m；中跨支点位置的弯矩与挑臂支点位置的弯矩接近，数值略小，说明立柱在支点处分担了少量弯矩；中跨随着距离支点距离的增加弯矩下降，但下降幅度非常缓慢。



图 2 基本组合作用下弯矩分布(单位:kN·m)

2.2 基本组合剪力

如图 3 所示，基本组合所用下，剪力在小箱梁支点处出现突变，每个盖梁挑臂上布置了 3 榀小箱梁，最大剪力出现在挑臂根部，为 -12 100 kN，远大于中跨最大剪力。

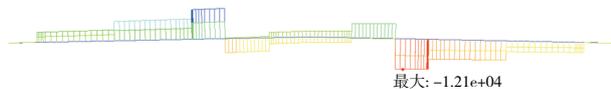


图 3 基本组合作用下剪力分布(单位:kN)

2.3 基本组合扭矩

分以下 2 种工况进行基本组合扭矩计算：

(1) 考虑温度力和制动力引起的扭矩最不利组合，对典型四跨连续梁的 2[#]墩、4[#]墩最大扭矩进行分析，四跨连续梁桥墩布置见图 4。计算得挑臂最

大扭矩为 339 kN·m、跨中最大扭矩为 113 kN·m，均出现在支点附近。

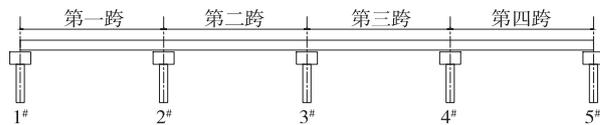


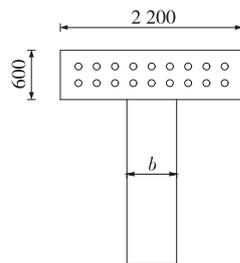
图 4 四跨连续梁桥墩布置

(2) 考虑制动力和车道荷载偏心加载引起的扭矩最不利组合，对典型四跨连续梁的 1[#]墩、5[#]墩最大扭矩进行分析。计算结果显示挑臂最大扭矩为 488 kN·m、跨中最大扭矩为 162 kN·m，均出现在支点附近。

3 轻型盖梁截面设计

3.1 截面形式

为使盖梁轻型化，须减少盖梁截面面积。宽度方向，考虑抗震性能要求，盖梁顶面应有足够的宽度防止地震作用下发生落梁现象^[16]，不宜减小盖梁顶面宽度，但可减小盖梁底面宽度。高度方向，梁截面高度是保障结构抗弯能力的重要参数，理论上，适当提高截面高度能大幅度提高梁截面抗弯承载能力，故不宜缩小截面高度，为方便参数分析，也不增加截面高度。综合分析，采用 T 形断面形式，参考原结构的预应力布置形式，将顶板厚度假定为 600 mm，在弯矩最大位置按照结构构造要求布置 2 层规格为 21 ϕ 15.20 mm 的钢绞线（21 根公称直径为 15.20 mm 的钢绞线），抵抗盖梁使用阶段的弯矩（见图 5）。这样，截面尺寸的未知参数就是 T 形结构的腹板厚度 b 。



圆圈代表预应力管道布置位置

图 5 T形截面构造示意图(单位:mm)

3.2 截面尺寸

盖梁与立柱连接部位由于连接的需要不宜大幅度缩小截面尺寸，根据 JTG 3362—2018 分别开展挑臂根部和中跨支点盖梁截面的抗弯、抗剪、抗扭承载能力极限状态分析，分析中桥涵结构重要性系数

取 1.1。

由于盖梁结构荷载中自质量产生的荷载比例较小,在 T 形截面承载能力极限状态分析中采用原结构组合荷载偏保守但有效。盖梁采用 C80 混凝土,利用其高强材料性能减小截面尺寸。

根据盖梁的受力特点,将挑臂与中跨腹板厚度分开分析,分别取两者最大荷载进行分析。由于盖梁与立柱的连接位置需要考虑与立柱的衔接,盖梁腹板最小厚度不能小于立柱尺寸即 2 m,与原结构区别不大。因此,挑臂根部最不利荷载取挑臂紧贴

立柱位置的荷载,中跨支点最不利荷载取中跨紧贴立柱位置的荷载。

(1) 抗弯承载能力极限状态分析。按照 JTG 3362—2018 要求进行结构计算,结果表明顶板上布置 1 层钢绞线时,对于 C80 混凝土结构,需要设置 5 束 $19\phi^s 15.20$ mm 钢绞线和 4 束 $21\phi^s 15.20$ mm 钢绞线;对于 C50 混凝土结构,需要设置 9 束 $21\phi^s 15.20$ mm 钢绞线。将腹板厚度从 2.2 m 逐步缩小,每次缩小 0.1 m,通过计算,抗弯最小腹板厚度应满足表 1 的要求。

表 1 抗弯最小腹板厚度要求及对应弯矩设计值

混凝土 型号	最小腹板厚度 b/mm		截面受压区高度 x/mm		截面受压区界限高度 $\xi_b h_0/\text{mm}$		$\xi_b h_0 : x/\%$		基本组合弯矩 $M_d/(\text{kN}\cdot\text{m})$		抗弯承载能力 $M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$\gamma_0 M_d : M_u/\%$	
	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点
C80	1 000	1 000	788	788	819	819	96	96	44 070	47 872	53 096	53 096	91	99
C50	1 300	1 400	895	918	936	936	95	98	44 070	47 872	51 023	54 188	95	97

(2) 抗剪承载能力极限状态分析。根据 JTG 3362—2018 对抗剪截面最小尺寸的要求计算最小腹板厚度。假设腹板每个断面布置 4 根直径 20 mm 的竖直钢筋,钢筋间距为 100 mm,通过计算,抗剪最小腹板厚度应满足表 2 的要求。

(3) 抗扭承载能力极限状态分析。根据 JTG 3362—2018 对抗扭截面最小尺寸的要求计算最小腹板厚度。假设腹板每个断面布置 1 圈直径 20 mm 的扭转钢筋,钢筋间距为 100 mm,通过计算,抗扭最小腹板厚度应满足表 3 的要求。

表 2 抗剪最小腹板厚度要求及对应剪力设计值

混凝土 型号	最小腹板厚度 b/mm		基本组合剪力 V_d/kN		抗剪承载能力 V_u/kN		$\gamma_0 V_d : V_u/\%$	
	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点
C80	1 200	600	12 000	5 793	13 340	9 528	99	66
C50	1 500	800	12 000	5 793	13 234	9 734	99	65

表 3 抗扭最小腹板厚度要求及对应扭矩设计值

混凝土 型号	最小腹板厚度 b/mm		基本组合扭矩 $T_d/(\text{kN}\cdot\text{m})$		抗扭承载能力 $T_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$\gamma_0 T_d : T_u/\%$	
	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点	挑臂根部	中跨支点
C80	1 300	700	488	162	4 263	2 467	13	7
C50	1 600	800	488	162	5 008	2 632	10	7

由表 1~3 可知:1) 挑臂根部最小腹板厚度主要受 JTG 3362—2018 抗扭截面最小尺寸的限制,采用 C80 混凝土时挑臂根部最小腹板厚度为 1 300 mm,采用 C50 混凝土时挑臂根部最小腹板厚度为 1 600 mm。基本组合扭矩与抗扭承载能力的比值非常小,C80 混凝土结构的扭矩作用组合效应设计值乘以结构重要性系数后仅占结构承载能力设计值

的 13%,C50 混凝土结构占 7%。主要原因是结构在这个位置同时承受剪力和扭矩,而基本组合剪力值较大,只有剪力作用时产生的混凝土剪应力已接近混凝土名义剪应力设计值,截面偏小时可能出现混凝土被压坏而钢筋达不到屈服强度的现象。2) 中跨支点最小腹板厚度主要受 JTG 3362—2018 最大受压区高度限制,C80 混凝土结构的最小腹板

厚度为 1 000 mm, C50 混凝土结构的最小腹板厚度为 1 400 mm。3) 需要布置 9 束预应力钢绞线, C80 混凝土结构为 5 束 $19\phi^{s}15.20$ mm 钢绞线、4 束 $21\phi^{s}15.20$ mm 钢绞线, C50 混凝土结构全部为 $21\phi^{s}15.20$ mm 钢绞线; 每层布置 4 根直径 20 mm 的抗剪钢筋, 间距为 100 mm, 挑臂根部抗剪钢筋在剪力基本组合作用下基本完全发挥作用, 中跨支点尚有较大富余量, 有大幅度减少钢筋的空间; 每层布置 1 圈直径 20 mm 的抗扭钢筋, 间距为 100 mm, 挑臂根部和中跨支点都有非常大的抗扭富余量。4) 计算得到的最小截面中有足够的构造空间布置需要配置的预应力钢绞线、抗剪和抗扭钢筋, 甚至可以采用数量更多、规格更小的预应力钢绞线, 在顶板布置 2 层。综上所述, 可以认为该最小截面在构造上可行。

3.3 设计方案

根据以上分析, 同时兼顾构造要求, 盖梁与立柱连接位置保持与立柱截面同宽, 便于采用灌浆套筒与立柱连接。盖梁端部, 考虑到预应力锚固区需要满足锚下抗劈裂和抗剥裂的能力, 在端部约 1.5 m 范围内保持为原矩形断面。

对于 C50 混凝土结构, 挑臂上 T 形截面腹板保持等厚度, 为 1 600 mm; 跨中 T 形截面腹板保持等厚度, 为 1 400 mm。通过计算, 单榀盖梁需要 94.3 m^3 混凝土, 质量为 245 t, 质量比原盖梁减少 18%。

图 6~8 为采用 C80 混凝土的轻型化盖梁设计图。挑臂上 T 形截面腹板保持等厚度, 为 1 300 mm; 跨中 T 形截面腹板保持等厚度, 为 1 000 mm。通过计算, 单榀盖梁需要 84.9 m^3 混凝土, 质量为 220 t, 质量比原盖梁减少 27%。

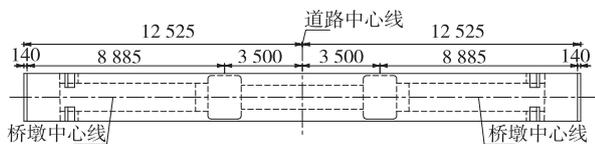


图 6 轻型化盖梁设计平面图(采用 C80 混凝土; 单位: mm)

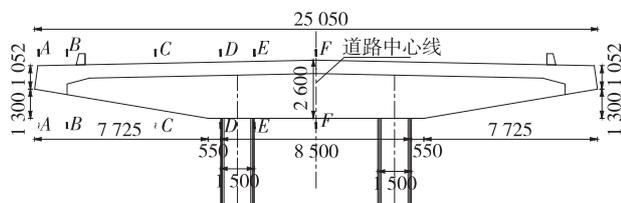


图 7 轻型化盖梁设计立面图(采用 C80 混凝土; 单位: mm)

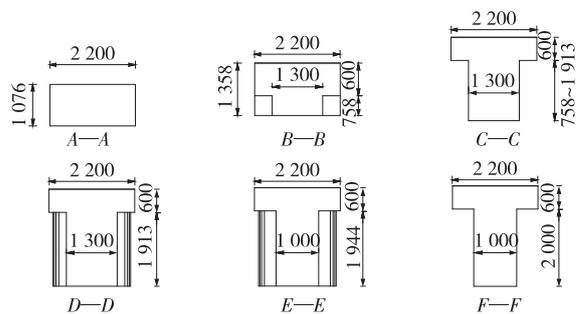


图 8 轻型化盖梁设计断面图(采用 C80 混凝土; 单位: mm)

4 结语

本文针对六车道高架桥对应的混凝土盖梁进行轻型化设计, 兼顾盖梁宽度需求和抗弯、抗剪、抗扭承载能力要求, 提出 T 形断面形式, 结合 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中承载能力极限状态计算荷载作用下最小截面尺寸, 开展盖梁设计。不改变盖梁结构材料(采用 C50 混凝土)时, 按上述方案设计的盖梁质量约 245 t, 比原盖梁减少 18%; 将盖梁混凝土提高到 C80 时, 按上述方案设计的盖梁质量约 220 t, 比原盖梁减少 27%。该设计方案能大幅度降低盖梁运输吊装难度, 减少生产相应材料产生的碳排放。

该方案还存在以下优化空间: 1) 根据受力特点采用腹板变厚度设计; 2) 顶板厚度减为 400 mm, 只设置 1 层预应力钢束, 预计可以节省约 10 t 质量; 3) 中跨断面采用工字形断面, 在截面抗弯受压区采用抗弯最小腹板厚度, 腹板采用抗扭最小腹板厚度; 4) 进一步提高混凝土材料级别, 采用超高性能混凝土材料, 减小腹板厚度。

参考文献:

- [1] 李福鼎. 预制拼装桥墩轻型化设计[J]. 城市道桥与防洪, 2021(2): 69-73.
- [2] 张涛. 内侧钢筋不连接的预制空心桥墩设计[J]. 中国市政工程, 2021(2): 16-18.
- [3] 郭忆. 城市高架预制装配式桥梁方案研究[J]. 城市道桥与防洪, 2017(6): 95-98+15.
- [4] 王志刚, 孙贵清, 余顺新, 等. 公路桥梁装配式桥墩工业化快速建造技术[J]. 公路, 2021, 66(6): 145-150.
- [5] 郑晏华. 装配式城市高架桥预制桥墩、桥梁的运输方法[J]. 建筑施工, 2019(3): 354-355.
- [6] 曾勇, 孟杰. 绵阳飞云大道跨线桥节段预制拼装设计[J]. 公路交通技术, 2012(1): 62-66.

(下转第 100 页)

一般在塔柱内设置环向预应力。由图 18 可知:对于跨径较小的斜拉桥,混凝土塔柱外侧拉应力在运营阶段最大为 2 MPa,不设环向预应力也能满足受力安全的要求^[15]。因此,跨径较小的斜拉桥可不设置环向预应力。

5 结论

本文以湖州风荷桥为工程背景,采用有限元软件建立整桥模型,分析非对称独塔斜拉桥最薄弱受力节段,通过理论推导和建立锚固区局部模型,研究斜拉桥索塔锚固区的传力机制和受力特性。结论如下:

(1) 以位移相等理论推导的水平力在索塔锚固区传递比例计算公式的计算结果与有限元模拟结果的误差在 1% 以内。

(2) 锚固结构的最薄弱受力环节是钢结构的焊缝处,受力最不利构件为锚垫板和钢锚箱。钢锚梁的最不利受力构件是侧板,钢锚箱的最不利受力构件是上支撑板、后承托板,钢牛腿的最不利受力构件是顶板。

(3) 对于跨径较小的斜拉桥,混凝土塔柱内不设置环向预应力能满足后期运营阶段的要求。

参考文献:

[1] 刘扬,罗振宇,殷新锋.大跨度斜拉桥索塔锚固区足尺模型试验及分析[J].公路与汽运,2015(1):190-196.
 [2] 赵金霞,常英,张家元.武汉青山长江公路大桥索塔锚固区钢锚梁设计研究[J].桥梁建设,2020(增刊 1):

82-88.
 [3] 李茜,左新黛,文坡.斜拉桥索塔分组集聚锚固体系设计探讨[J].公路交通科技,2021,38(4):55-62.
 [4] 王鹏,金华江大桥索塔锚固区节段足尺模型试验研究[J].公路与汽运,2005(4):103-106.
 [5] 严国敏.现代斜拉桥[M].成都:西南交通大学出版社,1996.
 [6] 范立础.世界斜拉桥的新进展:加拿大安娜雪丝岛(Annacis Island)桥[J].重庆交通学院学报,1985(2):1-11.
 [7] 赵敏.钢锚梁-钢牛腿组合索塔锚固结构受力性能与设计方法研究[D].西安:长安大学,2015.
 [8] 邵旭东,何东升,李立峰.钢锚梁-钢牛腿组合结构水平受力机理试验[J].中国公路学报,2014,27(4):55-61+68.
 [9] 贺国栋,石雪飞.钢锚梁索塔锚固区混凝土塔壁简化计算方法[J].交通科学与工程,2014,30(3):40-44.
 [10] 胡楠.非对称双层钢桁梁斜拉桥力学分析及施工控制[D].苏州:苏州科技大学,2023.
 [11] 苗通.钢锚梁-钢牛腿组合索塔锚固结构足尺模型试验研究[D].西安:长安大学,2012.
 [12] 张俊彦,赵荣国.理论力学[M].2 版.北京:北京大学出版社,2012.
 [13] BALTAY P,GJELSVIK A.Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J].Journal of Materials in Civil Engineering,1990,2(1):46-49.
 [14] 刘昊.斜拉桥索梁钢锚箱受力分析和构造优化研究[D].南昌:南昌大学,2013.
 [15] 叶见曙.结构设计原理[M].4 版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

收稿日期:2023-03-02

(上接第 84 页)

[7] 付军恩.某铁路 900 t 预制箱梁运输通道遇见问题及对策[J].铁道建筑技术,2014(10):88-91.
 [8] 修博然,李雪.40 m 箱梁运输及安装施工技术[J].中国电力企业管理,2021(3):84-87.
 [9] 张涛,王云龙.城市高架分节预制拼装盖梁设计与施工方案[J].城市道桥与防洪,2021(3):88-90+93.
 [10] 闫兴非,葛继平,王志强,等.装配式大悬臂分段预应力混凝土盖梁抗弯性能研究[J].中国市政工程,2019(4):72-76.
 [11] HU H,WANG J W,YAN X F,et al.Experimental research and numerical analysis on mechanical behavior of lightweight-design precast bent caps with large cantilevers[J].Structures,2022,40(4):536-545.
 [12] 周剑,任宝双,刘彦生.C80 以上高强混凝土梁受力性

能研究综述及建议[J].建筑技术,2019,50(12):1516-1520.
 [13] 李静,张海军.超高层建筑大体积 C80 高强混凝土的应用[J].施工技术,2015,44(12):14-16.
 [14] 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:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
 [15] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
 [16] 魏思斯.减隔震支座在连续梁桥中的合理适用范围研究[J].公路交通技术,2015(6):32-37.

收稿日期:2023-02-03