

非对称连续梁桥力学性能和设计方法研究

张征浩¹, 郭峰石¹, 彭建新^{2*}

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要:该文介绍非对称大跨度箱梁的计算分析及采取的设计措施,在边中跨比极不协调的情况下,采取一定的设计措施解决箱梁的受力不均衡和结构布置困难等问题,提出非对称连续梁桥结构设计方法。对箱梁进行受力分析,对比分析了不同工况下结构的力学响应,结果表明该不对称箱梁结构合理,受力得到较大改善,可为类似结构设计提供参考。

关键词: 不对称桥跨; 大小 T 构; 压重; 悬浇施工; 双排支座; 体外预应力

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

预应力混凝土连续箱梁是一种整体性好、受力明确、造型简洁的结构形式,且结构刚度大、变形小、动力性能好^[1],在中国桥梁建设中得到了广泛运用。采用悬臂施工法施工逐步施加预应力可以提高工程质量,降低维护费用。

设计者一般会优先选取对称的桥跨布置,通过调整各控制截面的弯矩变化幅值,降低跨中的正弯矩,使得预应力筋大部分布置在梁的截面顶部,便于张拉。变高度主梁虽然会增大中间支点处的负弯矩,但梁高增加并不引起钢筋用量增加;另外,加大支点附近的梁高,能抵抗支点截面处的高剪力。边中跨比例易控制在 0.52~0.65,支点截面的梁高 $H_{支}$ 为 $l/16 \sim l/18$ (l 为中跨跨长),一般不小于 $l/20$,桥梁跨中梁高 $H_{中}$ 为 $H_{支}/1.5 \sim H_{支}/2.5$ 。当支座出现负反力时,应采用配重措施或设置拉力支座^[2]。跨径对称桥梁结构只有当桥位受限的情况下才考虑采用不对称桥跨。目前,中国修建了部分由于受到地形限制而采用不对称连续刚构形式的桥梁^[3],并进行了跨径不对称连续刚构有限元分析。但采用不对称连续梁形式的桥梁较少,即使采用不对称连续梁形式也是跨径较小的桥梁,暂无大跨径不对称连续梁桥的设计案例。

王永锋^[4]和喻文杰^[5]对不对称连续梁桥的悬臂施工及合龙技术进行了研究,指明了不对称连续梁施工中的诸多难点并给出了相应解决方案;翁方文等^[6]、毛林^[7]以及陈建峰等^[8]不仅对施工过程进行了探讨,针

对不对称连续梁在设计以及施工监控中的空间受力亦进行了分析。

该文以某跨越南水北调总干渠管道桥为背景,采用 Midas 有限元软件模拟桥梁施工过程,针对不对称连续梁桥的结构特点进行受力分析。根据鲍卫刚等^[9]预应力混凝土梁式桥梁设计施工建议,对于悬臂施工桥梁,其设计计算应按施工顺序体现结构形成的过程和状态,不应按桥梁总体形成时的整体落架一次性地计算内力效应,以避免出现计算得到的根部负弯矩效应比实际情况偏小的现象。根据计算结果,研究控制结构受力的关键参数,采取相应的控制措施,在此基础上,提出不对称连续梁桥设计方法,为类似桥梁设计提供有价值的参考。

1 工程概况

某跨越南水北调中线干线工程总干渠管道桥桥位处总干渠渠道为全挖方断面,渠道设计水深 7.0 m,渠道开口宽 105 m,两侧管理防护围栏的间距约 131.7 m。总干渠左岸现状有一处与总干渠渠道基本平行的 500 kV 高压线走廊,迁建困难;受地形限制,总干渠左右岸可利用空间不对称,桥梁考虑采用不对称布跨形式。由于需要综合考虑热力管道的衔接要求以及现场景观需求,该处不宜采用桥面高度较高的不对称连续刚构桥,同时考虑单塔斜拉桥方案,主要存在民宅拆迁

收稿日期:2022-11-14(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2600900);国家自然科学基金资助项目(编号:52078056);河南省水利技术攻关计划项目(编号:GG201909)

作者简介:张征浩,男,高级工程师。E-mail:475557601@qq.com

* 通信作者:彭建新,男,博士,教授。E-mail:jianxin_peng78@163.com

难度大的问题,且后续斜拉桥养护维修需在桥面进行可能存在污染源问题,故报备南水北调审批难度大且周期长。综合以上因素,桥梁采用不对称大跨度连续梁桥形式,上部结构采用(50+150+100) m 预应力混凝土变截面连续箱梁,悬浇挂篮施工。下部结构为板式墩和柱式墩,配钻孔灌注桩基础。根据热力管道运行及检修维护要求,确定桥面总宽 16 m,单箱单室断面,箱室宽 8.5 m,悬臂 3.75 m,箱梁采用 C55 混凝土,如图 1 所示。由于边中跨比例仅为 0.33,远低于常规设计,很明显这样的边中跨比例给箱梁受力和构造设计带来了较大困难,主要存在以下问题:① 50 m 边跨与 150 m 中跨比例过小致使箱梁构造设计困难;② 悬浇施工不平衡风险增大;③ 主跨底板合龙预应力布置困难;④ 主跨跨中开裂风险增大;⑤ 边墩支座存在脱空风险。

上述问题较常规箱梁更为突出,除了参经常规箱

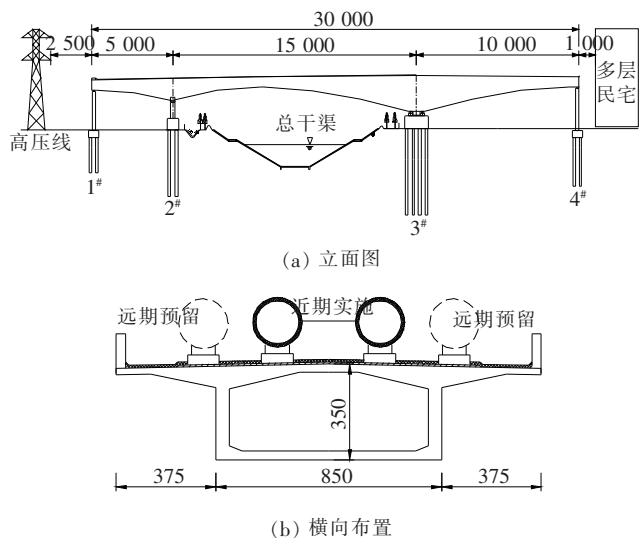


图 1 管道桥桥型布置图(单位:cm)

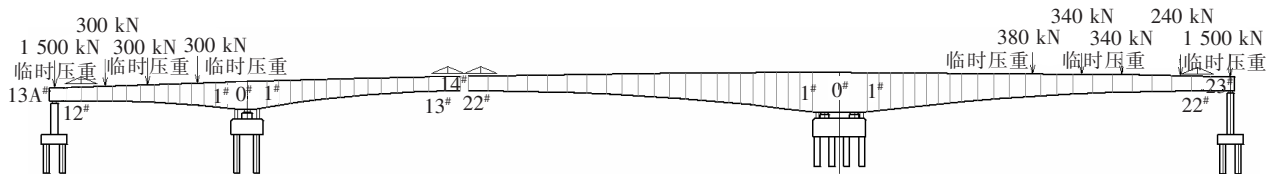


图 2 箱梁施工工序图

2.2 压重措施

针对不对称连续梁桥的受力特点,采取 3 项压重措施改善箱梁 T 构悬浇施工不平衡问题及支座反力差较大的问题。

(1) 1# 边墩临时压重,因 50 m 边跨侧较中跨侧

梁设计思路之外,还需采取一定的设计措施解决。

2 解决措施

2.1 采用大小 T 构悬浇构造

大小 T 构构造旨在改善箱梁构造布局 and 梁体受力,降低合龙前的悬浇施工风险,缓解箱梁合龙后的结构受力不平衡,促使箱梁在自重作用下达到受力平衡。

(1) 100 m 边跨侧为大 T 构,施工悬臂长 94 m,相当于 190 m 主跨 T 构,根部梁高 $H_{\text{根}} = 12.5$ m,跨中梁高 $H_{\text{中}} = 3.5$ m,中跨跨径 L 为 150 m,梁高变化按 1.6 次抛物线布置, $H_{\text{根}}/L = 1/12$, $H_{\text{中}}/L = 1/42.86$ 。由于管道荷载较大,箱梁根部梁高稍有加大以提高其载荷能力;大 T 构箱梁根部纵向设双支座(间距 7.5 m),一方面可以加强悬臂施工稳定性;另一方面可以削峰主梁负弯矩,同时也分散了下部承台受力。大 T 构节段划分为 $[(7 \times 5 + 7 \times 4 + 8 \times 3) + 14 + (8 \times 3 + 7 \times 4 + 7 \times 5)]$ m。

(2) 50 m 边跨侧为小 T 构,施工悬臂长 54 m,相当于 110 m 主跨 T 构,根部、跨中梁高分别为 7.5 m、3.5 m,梁高变化按二次抛物线布置, $H_{\text{根}}/L = 1/20$, $H_{\text{中}}/L = 1/42.86$ 。小 T 构节段划分为 $[(3 \times 4 + 4 \times 3.5 + 5 \times 3) + 10 + (5 \times 3 + 4 \times 3.5 + 5 \times 4)]$ m,由于 50 m 边跨过小,难以布置成完全对称的 T 构,边跨侧悬浇施工节段少 2 个,这将增加悬浇施工不平衡风险,需在完成 12 个对称悬浇段后暂停悬臂施工,待边墩处支架现浇段先施工并完成临时压重后,再进行主跨侧单悬臂悬浇施工,确保施工稳定。箱梁施工工序如图 2 所示(悬浇块上的临时压重为平衡跨中体外预应力转向块)。

少 2 个悬浇节段,采取压重措施解决不对称悬臂 T 构施工稳定问题。

(2) 1# 边墩永久压重,消除支座脱空问题,确保运行阶段 1# 墩支座有足够的压力储备。

(3) 对 50 m 边跨与 150 m 中跨采用 6 cm 厚 C40

混凝土铺装,100 m 边跨采取 20 cm 铁砂混凝土铺装,相当于施加 77.4 kN/m 均布荷载的永久压重,改善 3[#]墩支反力,促使 3[#]墩双排支座支反力差值缩小,同时也有利于该墩桩基础受力,如图 3 所示。

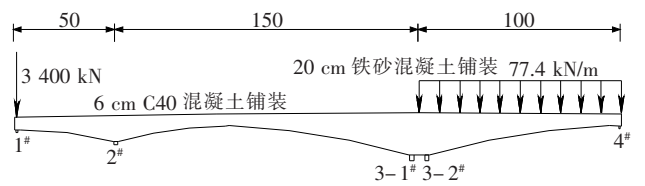


图 3 箱梁永久压重示意(单位:m)

2.3 增设备用体外预应力

根据热力管道供热规划,大桥近期先行铺设两根直径 1.6 m 热力管道,远期预留 2 根直径 1.6 m 热力管道。经计算,2 根热力管道荷载与公路四车道荷载基本相当,远期 4 根热力管道荷载相当于八车道荷载,将对桥梁主跨跨中受力极为不利,但箱梁底板钢束难以一次性布置到位满足远期受力需求,因此引入体外预应力钢束设计思路。中跨合龙段设置 3 对 26 束 $\phi^{15.2}$ 体外预应力束,采用无黏结环氧低松弛钢绞线,钢束外套采用高密度聚乙烯管。桥梁施工时,同期在箱梁箱室内部设置钢结构转向块,预留备用体外预应力钢束,待远期 4 根热力管道通水时再行张拉、锚固,体外预应力钢束张拉后可以大幅度提高箱梁承载能力,满足后期大幅增加的管道荷载要求。

2.4 单墩纵向双支座布置

大桥远期荷载为 4 根内径 1.6 m 的热力管道,相当于八个车道荷载。恒载重量大,常规桥梁根部梁高与主跨跨径比为 1/15~1/20,通过计算不能满足要求,恒载弯矩占总弯矩的比例较大,实际上支点控制设计是负弯矩^[1]。该桥通过加高 3[#]桥墩箱梁根部梁高到 12.5 m。3[#]墩采用单排支座,单个支座支反力达到了 83 793 kN,且 3[#]主墩箱梁正截面抗裂出现 0.047 MPa 拉应力,在现状桥梁宽度及各种控制条件下钢束布置困难,不能仅通过增加钢束来解决此问题。另外,单个支座支反力达到了 83 793 kN,反力示意图如图 4 所示,造成承台结构受力不利,且支座支反力超出常规型号支座承受范围,支座加工制作安装及后期检修更换难度较大。且受双柱(壁)式墩启发,双柱(壁)式墩可消掉梁的墩顶处负弯矩尖峰^[1],大桥考虑在 3[#]墩采用纵向双排支座布置方式,通过建立 Midas 有限元分析模型,对比分析双排支座方案与单排支座的反力结果(表 1),由表 1 可得,3[#]墩墩顶弯矩减小了 10.1%,

支点截面正应力提高了 1.04 MPa,满足规范要求,且有一定富余,反力示意图如图 5 所示。

表 1 计算结果比较

验算内容	3 [#] 墩弯矩设计值/(kN·m)	单个支座反力/kN	支点截面正应力/MPa
单排支座	3 737 563	83 793	-0.047
双排支座	3 358 323	50 445/43 969	0.99

注:拉应力为负,压应力为正。

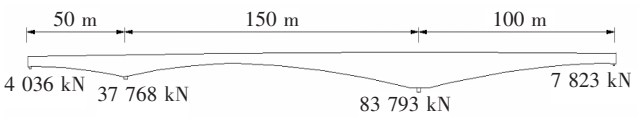


图 4 单排单个支座反力示意图

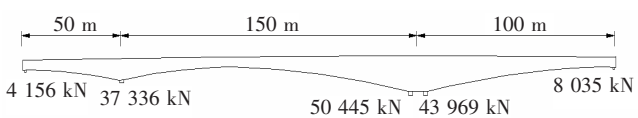


图 5 双排单个支座反力示意图

3 计算分析

3.1 计算参数

- (1) 设计荷载:1 根管水荷载为 20.1 kN/m。
- (2) 压重荷载:50 m 跨边墩集中压重 3 400 kN, 100 m 跨均布压重 77.4 kN/m。
- (3) 体外预应力:6 根 26 束 $\phi^{15.2}$ 钢绞线体系成品索。
- (4) 雪荷载:0.45 kN/m², 荷载取值参照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[10]。
- (5) 不均匀沉降:主墩 2 cm,边墩 2 cm。
- (6) 其他参数均参照相关规范取值^[11-12]。

3.2 计算模型

箱梁纵向计算采用有限元软件 Midas 进行,箱梁纵向受力按全预应力构件控制设计,支点截面处横隔板段采取其空心处的截面尺寸^[11]进行建模,支点隔板、体外预应力转向块重量均按照集中力加在对应位置。计算步骤模拟悬浇施工过程,箱梁计算模型如图 6 所示。

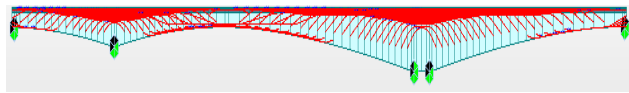


图 6 箱梁计算模型

计算分 4 组荷载工况进行对比,荷载组合系数按

照 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》^[12]取值:

- (1) 工况 1:近期 2 根管过桥、施加永久压重。
- (2) 工况 2:近期 2 根管过桥、无永久压重。
- (3) 工况 3:远期 4 根管过桥、施加永久压重、张拉体外预应力。
- (4) 工况 4:远期 4 根管过桥、无永久压重、张拉体外预应力。

3.3 计算结果

该文主要考虑工况 1、2 时箱梁受力情况,结果如图 7、8 所示。

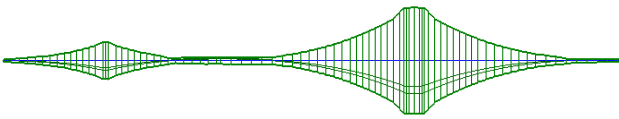
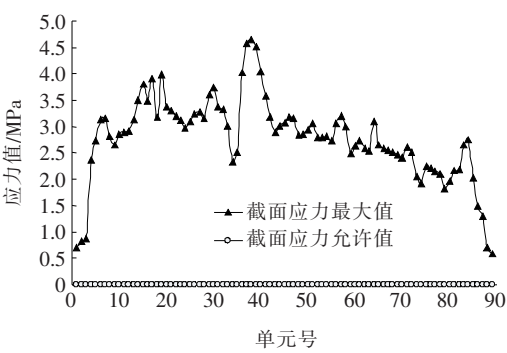


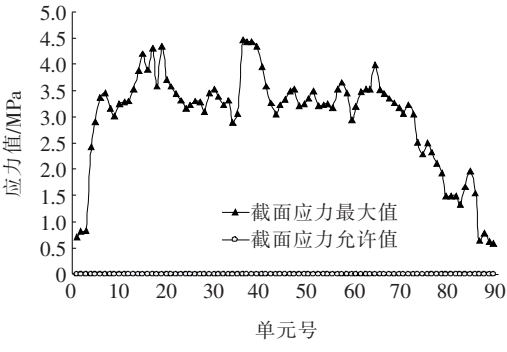
图 7 抗弯承载能力包络图(工况 1、工况 2)

通过有限元计算分析,得到各工况的主要受力指标,4 组工况具体计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知:工况 1、3 梁体主要受力指标均处于良好状态,说明设计采取的措施是恰当的,大小 T 构能较好地适应受力需求。



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 8 箱梁正截面抗裂应力图

表 2 不同工况箱梁计算结果比较表

工况	抗弯承载能力富余量/%	支点截面正应力/MPa	跨中下缘正应力/MPa	斜截面主拉应力/MPa	正压应力峰值/MPa	跨中下挠位移/mm	3—1 [#] 支反力/kN	3—2 [#] 支反力/kN	1 [#] 墩最小支反力/kN
1	33.9	2.41	2.32	-1.03	16.63	72	86 651	91 651	4 216
2	38.5	2.95	2.88	-0.98	17.27	67	97 176	74 549	-310
3	32.0	0.99	2.43	-1.25	16.15	87	100 891	87 938	6 397
4	36.4	1.45	2.98	-1.19	16.44	82	111 384	70 833	1 871

箱梁抗弯承载能力:工况 3 比工况 1 增加了 1 倍的管道荷载,但箱梁抗弯承载力富余量几乎持平,说明体外预应力刚好可承担新增的管道荷载。工况 2 的承载能力略高于工况 1,这是第 3 跨压重产生了不利影响,但影响较小。

箱梁正截面抗裂性能:工况 1~4 跨中下缘均有超过 2 MPa 的压应力储备,说明箱梁抗裂性能处于良好状态。

箱梁斜截面抗裂性能:规范限值为 1.096 MPa,在不考虑竖向预应力的情况下,工况 1、2 均可满足要求,工况 3、4 仅支点截面略超规范,如考虑部分竖向预应力参与受力则均可满足要求。

箱梁正截面最大压应力:工况 2 最大压应力达到 17.27 MPa,虽满足规范,但已接近规范限值 17.75

MPa,其压应力值是偏高的,而采取压重措施后,工况 1 的最大压应力为 16.63 MPa,较工况 2 有明显降低。

1[#]墩和 3[#]墩支反力:1[#]墩工况 2 出现负反力,工况 4 压力储备较小,工况 1 和工况 3 压力储备充足,说明对 1[#]墩采取集中压重后消除了支座脱空风险。3[#]墩工况 4 双支座反力差值达到 40 551 kN,而工况 1 和工况 3 的双支座反力差值比较小,这是因为第 3 跨均布荷载压重发挥了作用,使得双支座反力更为均匀,也对下部结构受力更为有利。

4 结论

以某座非常规大跨度箱梁桥为工程背景,通过 4 组不同的荷载工况对箱梁受力性能进行计算分析,验

水性环氧树脂改性桥梁混凝土增韧阻裂性能研究

林哲¹, 苟堡铭¹, 郭寅川², 周笑寒², 魏鑫², 尹磊²

(1. 陕西省高速公路建设集团公司 古镇高速公路建设管理处, 陕西 汉中 723500;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:普通桥梁混凝土抗弯拉强度低、脆性大、韧性差,在行车荷载作用下,桥梁构造物易产生开裂问题,不能满足现代交通对桥梁工程的使用要求,因此急需提高桥梁混凝土的抗裂性能。水性环氧树脂作为一种水溶性聚合物,不仅具有黏结力强、耐水、耐酸碱腐蚀、耐冲刷、抗渗性好等传统环氧树脂的特点,而且不含有机溶剂等污染物。将其应用于桥梁混凝土中,可以有效提高混凝土的弯拉强度与弯曲韧性,从而解决桥梁混凝土开裂问题,提高桥梁构造物的使用寿命。该文通过设计水性环氧树脂改性混凝土的抗弯拉强度与三点弯曲试验,通过强度(抗弯拉强度、弯曲韧性系数)、变形(挠度)、能量(断裂能)三方面对其增韧效果进行评价,再通过平板诱导开裂试验对其阻裂效果进行验证,最后通过微观分析方法,阐明水性环氧树脂改性混凝土的增韧阻裂机理。试验结果表明:水性环氧树脂的掺入可以有效提高混凝土的抗弯拉强度、弯曲韧性以及断裂能,与普通水泥混凝土相比,水性环氧树脂改性混凝土的7 d抗弯拉强度可提高20.4%,弯曲韧性和断裂能最高可分别提高42.7%、51.8%,水性环氧树脂主要通过改善孔结构、微纤维作用以及保水作用来提升桥梁混凝土的抗裂性能。

关键词:水性环氧树脂;桥梁混凝土;弯曲韧性;塑性开裂;增韧阻裂

中图分类号: U444

文献标志码: A

随着中国交通建设的快速发展,高速公路建设已由平原逐渐转向山区,特殊的山区地形致使桥梁构造

物占高速公路里程的比重越来越大。截至2019年末^[1],中国公路桥梁为87.83万座/6 063.46万m,比

证针对特殊箱梁设计措施的合理性。根据计算分析,得出以下结论:

(1) 不对称大跨度箱梁采用大小T构,其受力性能、施工稳定性基本能与对称大跨度箱梁持平,同时也简化了预应力布设。

(2) 对小跨边墩施加一定的集中压重,可以消除支座脱空问题。

(3) 采用双支座可避免支点截面出现拉应力,避免承台集中受力;对于受力不平衡的双支座,可以通过压重措施调节支反力。

参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 张喜刚. 大跨径预应力混凝土梁桥设计施工技术指南[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [3] 朱静. 不对称连续刚构桥受力分析[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [4] 王永锋. 216 m大跨非对称刚构连续梁合龙施工关键技术

术[J]. 铁道建筑技术,2020(3):69-72,77.

- [5] 喻文杰. 大跨径连续梁不对称悬臂施工若干问题探讨[J]. 铁道建筑技术,2021(2):93-96,131.
- [6] 翁方文,吴成,鲁祖泽. 大跨度不对称连续梁设计与施工关键技术[J]. 铁道建筑,2021,61(12):28-30,39.
- [7] 毛林. 多跨非对称连续梁桥施工控制研究和横向受力分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2020.
- [8] 陈建峰,李慧君,袁明,等. 非对称连续梁桥设计与施工[J]. 铁道工程学报,2006,23(9):31-35.
- [9] 鲍卫刚,周永涛. 预应力混凝土梁式桥梁设计施工技术指南[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [10] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 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.
- [12] 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.

收稿日期:2020-08-24

作者简介:林哲,男,硕士,高级工程师, E-mail:228896141@qq.com