

# 立交匝道桥梁选型设计研究

陈文超, 吴怀强, 李文勃

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:**为研究钢混组合结构桥梁在立交匝道中运用的可行性及合理性,分析了钢板组合梁、槽形组合梁和窄边箱组合梁的结构性能;并结合日本的相关工程实例,对窄边箱组合梁和钢筋混凝土箱梁桥的经济指标进行了详细计算对比。结果表明:窄边箱组合梁最适宜于立交匝道桥梁工程,且当跨径布置为  $N \times 40$  m 时最具经济性。相比以往立交匝道桥梁工程中连续现浇钢筋混凝土箱梁桥,连续窄边箱组合梁造价预计可节省约 20%,且综合性能更优。

**关键词:**组合梁;立交匝道;选型;窄边箱组合梁;经济指标

**中图分类号:** U442.5+4

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2022)07-0078-04

## 0 引言

随着我国城市化的推进,城市交通需求也越来越大,互通立交逐渐成为城市不可缺少的基础性设施。大型城市互通式立交线形复杂、层次繁多,且一般需要跨越现状道路,下部条件受到极其严格的限制,互通立交桥梁在有限的空间内布设时常采用小半径平曲线<sup>[1]</sup>,见图1。



图1 北京四元立交桥<sup>[2]</sup>

中小跨径预应力和钢筋混凝土箱梁桥,由于技术简单、成熟且经济性较好,在国内运用最为广泛。但现浇预应力混凝土箱梁弯桥因其预应力线形为空间弯曲曲线,设计计算繁琐、难度大因而在国内匝道弯桥中应用较少,预制的预应力小箱梁一般为直线线形又无法满足小半径平曲线的要求,因此以往国内立交匝道弯桥一般采用 18~24 m 跨度的现浇钢筋混凝土连续箱梁桥。

钢混组合结构桥梁通过钢梁与混凝土板协同工作,充分发挥各自材料的性能,具有强度高、延性好、结构轻、环保、可回收重复利用等许多优点,其综合

效益显著<sup>[3]</sup>。近年来随着国内钢混组合结构桥梁技术的发展,组合结构桥梁在国内的运用越来越广泛,但钢混组合结构桥梁大规模运用于立交匝道工程中,国内尚未有探索。

因此,本文以立交匝道桥梁的合理选型为背景,通过不同桥型方案结构性能的定性分析、经济指标的定量分析及其他综合性能的对比分析,探索钢混组合结构桥梁在国内立交匝道中运用的可行性及合理性。

## 1 立交匝道桥梁合理结构形式选型研究

### 1.1 立交匝道钢混组合梁结构选型分析

#### 1.1.1 立交匝道桥梁主要特点及性能需求分析

立交匝道桥梁一般具有以下主要的特点:匝道桥梁为标准宽 8.0~9.5 m 的双车道;立交匝道桥梁平面线形一般为小半径平曲线;平曲线转弯处由于车辆行驶受离心力作用,通常需要设置超高;立交匝道桥梁常需跨越现状道路、各层间桥梁相互交叉,桥梁结构选型时需考虑减少对现状交通运营的影响,提高桥下道路的使用性能。

根据以上立交匝道桥梁的主要特点,可概括得到立交匝道桥梁相应的性能需求如下。

#### (1) 弯扭耦合承载性能

立交桥梁平面线形为小半径平曲线,弯桥在承受竖向弯曲时,由于曲率的影响,产生扭矩,而这种扭转作用又将导致截面翘曲变形。弯扭耦合作用将加大桥梁上部结构的受力,因此匝道桥梁对弯扭耦合的承载力要求高。

#### (2) 抗倾覆性能

收稿日期: 2021-12-01

作者简介: 陈文超(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

弯桥的另一特点是外侧承载较大,在曲线半径较小时,梁端的内侧支座易产生负反力,形成支脱空。近年来国内已有多起倾覆事故发生,造成了巨大的经济损失和严重的社会影响,立交匝道桥梁对抗倾覆性能要求高。

(3)其他综合性能

为减少对现状交通运营的影响,提高桥下道路的使用性能,立交匝道桥梁应具有较大跨越能力和快速化施工的特点。同时由于桥面超高的存在,桥梁结构的桥面系应易于适应横坡变化。另外立交匝道桥梁还应注重桥型结构的环保性能和美观。

1.1.2 立交匝道钢混组合结构桥梁选型分析

目前国内工程中的组合结构桥梁,从断面结构形式上区分主要有:工形钢板组合梁和槽形组合梁。为降低钢梁制造难度、减少后期钢梁的涂装和运营维护费用,日本于 2000 年起开发窄边箱组合梁。窄边箱的钢箱宽度 1.2 m 左右,顶底板仅设置 1~2 道纵向加劲肋、箱间设置 60~70 cm 高小横梁,横梁间距 10 m 左右。窄边箱组合梁由于构件简化后,在运输及安装方面也展现出明显的优势。

根据匝道桥梁标准宽为 8.0~9.5 m 的特点,三种结构形式组合梁的典型断面布置见图 2~图 4。

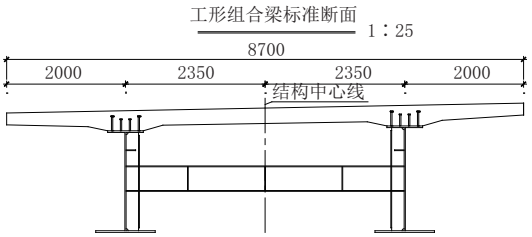


图 2 工形钢板组合梁标准断面(单位:mm)

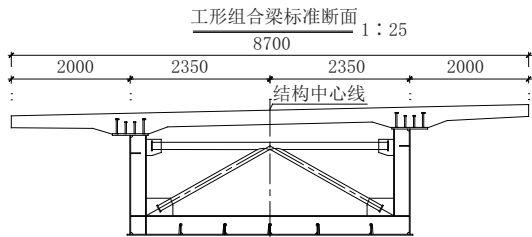


图 3 槽形组合梁标准断面(单位:mm)

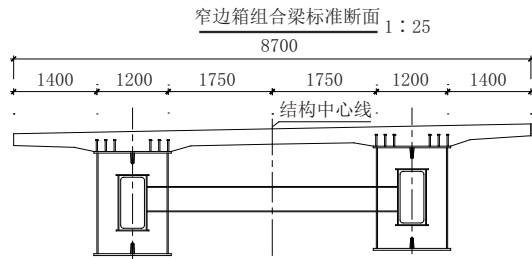


图 4 窄边箱组合梁标准断面(单位:mm)

根据立交匝道桥梁的性能需求,将三种断面形式组合梁桥的性能进行对比,见表 1。

表 1 组合梁桥性能对比表

| 类别     | 承载跨越能力 | 抗弯扭性能 | 抗倾覆性能 | 加工难易 | 安装难易 | 维护难易 | 景观效果 |
|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------|
| 钢板组合梁  | △      | ×     | △     | ■    | ■    | ■    | △    |
| 槽形组合梁  | ■      | ■     | △     | △    | ○    | △    | ■    |
| 窄边箱组合梁 | ■      | △     | ■     | ■    | ■    | ■    | △    |

注:×表示差;○表示一般;△表示良;■表示优。

表中加工难易包括制造量及制造工序的复杂程度;维护难易包括维护工作量及维护工序的复杂程度;安装难易包括钢构件运输难易、安装工序的复杂程度及安装速度。

由于组合结构具有高强的特性,三种断面形式的组合梁跨径一般都能达到 60~80 m,可满足立交匝道桥跨越能力的需求。但钢板组合梁在抗弯扭性能方面较差,难满足匝道弯桥的弯扭耦合承载力要求;相比窄边箱组合梁,槽形组合梁由于钢箱截面尺寸大、内部构件繁多、焊接量大、制造复杂,不仅安装难度大,后期的维护工作也将更复杂。

通过以上定性分析可知,窄边箱组合梁桥是最适宜于立交匝道的组合结构桥梁方案。

1.1.3 窄边箱钢混组合桥梁工程实例

窄边箱组合梁在国外已有较丰富的工程实践,通过调研国外相关工程实例,可得到窄边箱组合梁桥的相关技术参数。

日本门真高架立交是于 2009 年修建的上跨大阪近畿快速路和第二京阪公路交叉处的重要节点立交,见图 5。因受周边建筑无法拆除的限制和为确保现状交通的通行,桥梁上部结构设计时确定了最大跨径达 90 m、最小平面曲线半径仅有 100 m 的连续多跨窄边箱组合梁<sup>[4]</sup>。



图 5 日本门真高架立交桥

日本门真高架立交桥型结构参数见表 2。

通过调研日本近 70 余座窄边箱组合梁的工程

表2 门真高架立交桥型结构参数表

| 类别      | A 匝道桥      | B 匝道桥      | C 匝道桥       | D 匝道桥       |
|---------|------------|------------|-------------|-------------|
| 桥长 /m   | 622.1      | 799.1      | 246.2       | 331.4       |
| 最大跨径 /m | 88.9       | 78.7       | 91.0        | 86.0        |
| 桥宽 /m   | 6.75 ~ 9.3 | 8.3 ~ 11.2 | 8.25 ~ 8.96 | 6.79 ~ 7.05 |
| 曲线半径 /m | R=100      | R=100      | R=240       | R=120       |
| 横坡      | -7% ~ 9%   | -8% ~ 9%   | -5% ~ -0.2% | 2% ~ 8%     |

实例<sup>[5]</sup>,拟合了其用钢量与平均跨径和最大跨径的相关曲线,见图6、图7。图8、图9拟合了窄边箱组合梁跨径与平曲线半径的相关关系图。

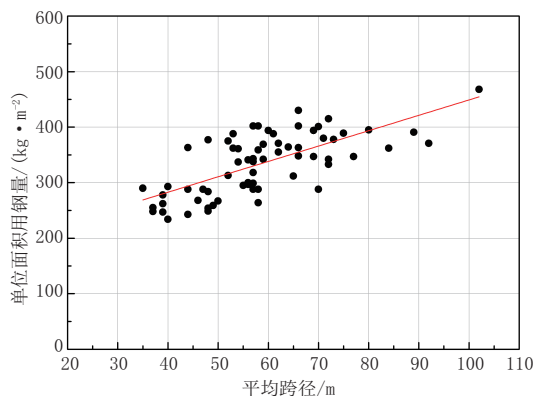


图6 用钢量与平均跨径关系图

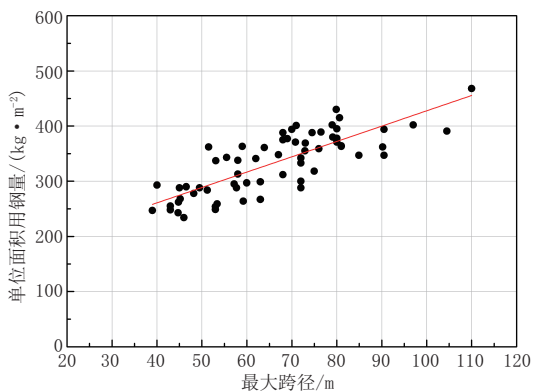


图7 用钢量与最大跨径关系图

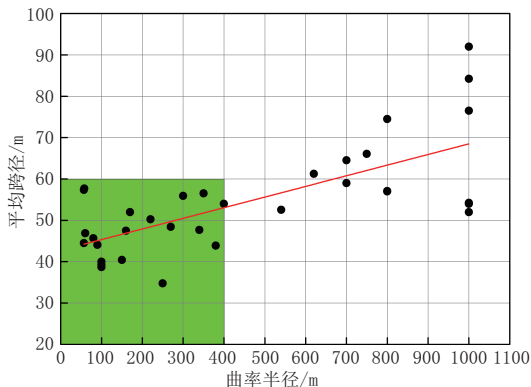


图8 平均跨径与曲线半径关系图

从图中拟合曲线可以看出:(1)用钢量与跨径可

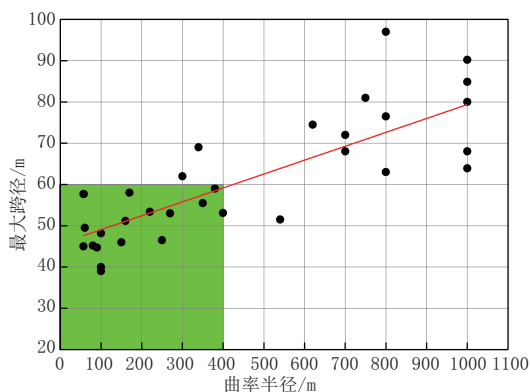


图9 最大跨径与曲线半径关系图

大致用直线线性拟合,且用钢量随跨径增大而增大;(2)桥梁跨径随曲线半径增大具有相应增大的趋势,曲线半径在400 m以下时,桥梁跨径大部分在40 ~ 60 m,曲线半径在400 m以上时,桥梁跨径可达90 ~ 100 m。

## 1.2 不同桥型立交匝道桥梁经济性对比

立交匝道桥梁的选型尚应通过计算不同桥型的经济性指标,对比其经济性上的优异。

假定工程场地位于我国东部沿海地区,桥梁宽取匝道标准宽度9 m,立交桥下净空取平均值8 m,下部结构采用钻孔灌注桩,桩基按摩擦桩设计,桩长40 m。

下部构造尺寸一般由桥墩造型控制,不同跨径下部构造尺寸差别不大,因此拟定下部结构构造尺寸时暂取统一的构造尺寸。上部结构跨径不同对下部结构工程量的影响,可通过下部结构钢筋数量指标不同加以区别。同时经设计试算可知3×20 m现浇钢筋混凝土箱梁桥的支反力与3×35 m、3×40 m窄边箱组合梁桥的支反力基本相当,因此其单个的下部结构材料数量也应基本相当。

标准宽度9 m的匝道桥上、下部结构尺寸及材料用量指标根据已有的工程实例拟定后,具体参数见表3~表5。

表3 拟定3×20 m现浇箱梁桥的单个下部结构尺寸及材料数量表

| 类别 | 尺寸 /m       | HRB400/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|----|-------------|------------------------------|
| 承台 | 5.2×5.2×2   | 125                          |
| 桥墩 | 1.5×2.0×8.5 | 480                          |
| 桩基 | φ1.2×40     | 85                           |

根据上述拟定的工程规模、结构构造尺寸及工程材料数量,采用《浙江省市政工程预算定额(2010版)》<sup>[6]</sup>编制桥梁预算清单,进行不同桥型方案下的经济指标对比。经济指标计算时仅考虑分部分项工程



表 4 窄边箱组合梁桥材料数量表

| 跨径布置/m                                  | 3×30 | 3×35 | 3×40 | 3×50 | 3×60 | 3×70 |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 用钢量<br>Q345Qd<br>/(kg·m <sup>-2</sup> ) | 200  | 210  | 220  | 270  | 310  | 360  |

表 5 3×20 m 现浇钢筋混凝土箱梁桥材料数量表

| 箱梁 C40 混凝土<br>/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ) | 横梁钢筋<br>HRB400/(kg·m <sup>-2</sup> ) | 纵向钢筋<br>HRB400/(kg·m <sup>-2</sup> ) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.68                                              | 30                                   | 230                                  |

费与施工技术措施费之和,规费、税金及其他暂列金,暂不考虑。

图 10 分别给出了根据编制的预算清单统计得到的窄边箱组合梁不同跨径下(3×30 m、3×40 m、3×50 m、3×60 m、3×70 m)的每平米造价,从图 10 中曲线可知,3×40 m 窄边箱组合梁每平米造价最低。

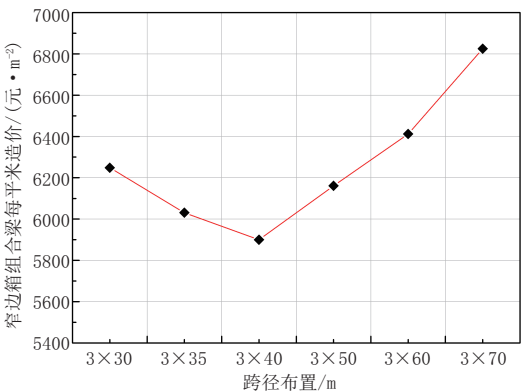


图 10 窄边箱组合梁经济指标

图 10 中不同跨径组合梁经济指标变化趋势虽然以标准宽度 9 m 时统计得到,但当标准宽度取城市高架主线双向六车道 25.5 m 时,仍然能得到相同的经济指标随跨径变化的趋势。因此可知, $N\times 40$  m 为城市高架连续组合梁的最经济跨径布置。

表 6 给出了根据预算清单统计得到的 3×40 m 窄边箱组合梁、3×20 m 现浇钢筋混凝土箱梁造价构成表。

表 6 立交匝道桥梁造价构成表

| 类别                            | 窄边箱组合梁 | 钢筋混凝土箱梁 |
|-------------------------------|--------|---------|
| 上部结构/(元·m <sup>-2</sup> )     | 3 568  | 2 840   |
| 下部结构及土石方/(元·m <sup>-2</sup> ) | 1 655  | 3 218   |
| 附属设施/(元·m <sup>-2</sup> )     | 677    | 902     |
| 合计/(元·m <sup>-2</sup> )       | 5 900  | 6 960   |

由表 6 可知,3×40 m 窄边箱组合梁总经济指标约为 5 900 元/m<sup>2</sup>,3×20 m 现浇钢筋混凝土箱梁总

经济指标为约 7 000 元/m<sup>2</sup>。相比现浇钢筋混凝土箱梁,窄边箱组合梁由于采用钢结构,在上部结构造价上更高,但组合梁跨径增大,相应减少了桥墩、承台、桩基以及土方开挖、转运、废弃等工程量。

综合而言,下部结构节省的工程造价较上部结构增加的工程造价更多。因此,3×40 m 窄边箱组合梁最终的综合单价相比 3×20 m 现浇钢筋混凝土箱梁更低。

3×40 m 窄边箱组合梁相比 3×20 m 现浇钢筋混凝土箱梁每平米综合单价节省了 1 100 元/m<sup>2</sup>,减少了约 20%。若考虑全寿命周期内钢结构绿色可回收的计算造价,采用组合结构桥梁其经济性将更为显著。

1.3 不同桥型立交匝道桥梁综合性能对比

立交匝道桥梁选型除应在经济性上进行比选外,尚应对桥梁结构性能、耐久性、施工速度及桥梁景观等综合性能上进行比选研究。

(1)结构力学性能对比

组合梁通过钢梁与混凝土板协同工作,充分发挥各自的材料性能,相比现浇钢筋混凝土箱梁具有更高的强度和延性。

(2)施工速度对比

立交匝道采用现浇钢筋混凝土箱梁方案下部结构工程量大,上部结构采用满堂支架施工,施工周期长,对周边环境影响大。采用组合梁方案上部结构跨径大、下部结构工程量小,同时上部结构可采用预制吊装施工,不仅在施工速度上大大加快,同时减少了对现状环境、交通组织等影响,综合社会效益极为显著。

(3)桥梁景观

组合梁方案可采用的桥梁跨度大,桥下空间简洁、通透,景观性能更佳。

综合以上比选可知,窄边箱组合梁相比现浇钢筋混凝土箱梁具有更优的综合性能。

2 结 语

本文以立交匝道桥梁合理选型为背景,通过不同桥型方案结构性能的定性分析、经济指标的定量分析及其他综合性能的对比分析可以得到以下结论:

(1)窄边箱组合梁相比其他断面结构形式的组合梁,最适宜于立交匝道桥梁工程。

(2)连续组合梁运用于城市高架主线或立交匝道桥梁工程中时, $N\times 40$  m 为其最经济的跨径布置。

(下转第 91 页)

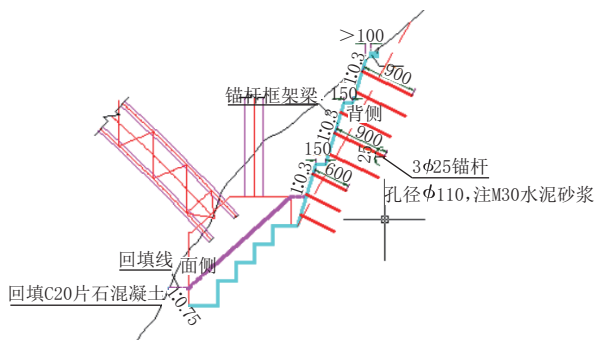


图 11 巫溪岸拱座基坑边坡加固设计剖面图

巫溪岸拱座处治设计的主要措施和技术参数为:

(1)拱座基础左侧、右侧及面侧开挖坡率为 1 : 0.75,分级高度为 8 m,级间平台宽 1 m。

(2)拱座基础背侧边坡开挖坡率为 1 : 0.3, 分级高度为 10 m, 级间平台宽 1.5 m, 坡面采用锚杆框架梁加固。

(3)新开挖的坡面均先采用挂网喷射 C20 混凝土进行防护,喷射混凝土厚度为 5 cm。

(4)拱座基础及坡面防护完成后应按设计要求对拱座基础周围进行回填,回填材料采用 C20 片石混凝土。

(5)背侧及右侧边坡后缘设置截水沟,截水沟尺寸为  $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$  矩形,采用 C20 片石混凝土浇筑。

## 5 结 语

极射赤平投影法在地质复杂区峡谷拱桥拱座边坡稳定性分析中的应用表明,极射赤平投影法为峡谷拱桥地质勘察、拱座基础边坡稳定性分析提供了简便可行的空间问题图解方法。利用极射赤平投影来表示和测度空间上的平面或直线的方向和角度,具有实用性和便捷性。

## 参考文献:

- [1] 田洪铭, 陈卫忠, 郑鹏强, 等. 桥梁荷载下跨谷拱桥岩质基岸坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 379-385.
- [2] 杨建平, 陈卫忠, 于洪丹, 等. 大宁河特大拱桥拱座-基岩长期稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1178-1184.
- [3] 梁海, 胡向阳, 严耿升. 赤平投影法在风电场岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 西北水电, 2020(6): 68-71.
- [4] 葛绪祯. 赤平投影在岩质边坡稳定性分析中的应用探讨[J]. 市政技术, 2021, 39(7): 17-20.
- [5] 程国能. 岩石边坡稳定性地质分析及工程应用[J]. 城市道桥与防洪, 2015(6): 234-236, 23.

(上接第 81 页)

(3)相比以往国内立交匝道桥梁工程中 20 m 左右跨径的连续现浇钢筋混凝土箱梁桥,40 m 跨径连续窄边箱组合梁经济指标预计可节省约 20%,且综合性能更优。

立交匝道桥梁工程中采用组合结构桥梁充分发挥组合结构高强、轻质的特点,通过上部结构大跨度的布置,大幅减少了下部结构工程量,实现了经济性、建设工期、社会效益和环保等综合性能上的优势。未来仍应积极发展钢混组合结构桥梁技术,进一步研究解决曲线钢混组合梁的墩梁固结构造、快速化施工等系列技术,实现更大跨、快速、经济、环保、

美观的目标,提升国内桥梁建设水平。

## 参考文献:

- [1] 沈冰.城市互通立交匝道桥梁结构设计研究[J].工程技术研究,2019,4(23):180-181.
- [2] 王龙辰.城市立交异形桥梁地震反应分析[D].兰州:兰州交通大学,2013.
- [3] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [4] Toyomu KUWAYMA.Design of Kadoma Junction Work (Steel Super-structure Work) for Kinki Highway[Z].2009.
- [5] Japan Bridge Association Inc.STEEL BRIDGES[M].2016.
- [6] 浙江省建设工程造价管理总站. 浙江省市政工程预算定额(2010版)[M].北京:中国计划出版社,2010.