DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260240

基于可靠度的环形立交加盖拼宽关键技术研究

杨万辉
(中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以西安市南二环雁塔立交改造工程为背景,针对城市复杂交通环境下旧桥拓宽改造的关键技术难题开展系统研究。提出“上部铰接、下部结构分离”的总体设计原则,创新性地采用纵向圆弧形曲线伸缩缝与横向“整体式钢箱梁+刚度协调”的拼宽技术。通过有限元分析,验证了新旧桥梁协同工作机制、纵向接缝精细化设计、基于地铁沉降保护的控制性施工措施及新旧结合部可靠度评估的有效性。结果表明,该技术方案能有效控制新旧桥差异沉降,确保拼宽后结构的整体性与耐久性。基于响应面法的可靠度分析给出了东西侧拼接部位的允许挠度建议值,为同类城市旧桥改造工程提供技术参考。

关键词: 环形拼宽;曲线伸缩装置;钢混连接;可靠度评估;沉降控制
中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0181-05

Research on Key Technologies for Capping and Widening of Ring Interchange Based on Reliability

YANG Wanhui
(China Municipal Engineering Northwest Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking the Xi'an South Ring II Yanta Interchange Reconstruction Project as the background, the systematical study is conducted on the key technical challenges in widening and reconstructing the old bridges under complex urban traffic environments. The overall design principle of “superstructure hinged, substructure separated” is proposed. The widening techniques are innovatively adopted, including a longitudinal curved expansion joint and a transverse “integral steel box girder + stiffness coordination” approach. Through the finite element analysis, the effectiveness of the collaborative working mechanism between new and old bridges, the refined design of longitudinal joints, the controlled construction measures based on the settlement protection of subway, and the reliability assessment of the new and old connection are verified. The results show that the proposed technical scheme can effectively control differential settlement between new and old bridges, and ensure the structural integrity and durability after widening. The reliability analysis based on the response surface method provides the recommended allowable deflection values at the east and west splicing locations, offering technical references for similar old urban bridge reconstruction projects.

Keywords: ring widening; curved expansion joint; steel-concrete connection; reliability assessment; settlement control

0 引 言

随着西安市城市化进程的加速,南二环交通流量持续攀升,雁塔立交作为南二环快速路与雁塔路关键交通枢纽,其通行能力已无法满足现状需求。在对既有交通影响最小化的前提下,对既有雁塔立交进行“加盖”拼宽改造,成为提升节点通行能力的必然选择。雁塔立交原为中央镂空的双向通行立交,本次改造旨在通过桥梁结构对中央区域进行“加盖”,新增车道以优化交通组织。

收稿日期:2026-03-10
作者简介:杨万辉(1990—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

既有建筑、地下管线等与存档竣工图纸存在较多数据偏差,且地下管网分布密集,涉及快速路、地铁、泵站、暗河及军用光缆等多种构筑物在三维空间内立体交叉,设计、施工难度极大[1]。

实施改造过程中,该工程面临诸多技术难题:(1)新旧结构如何有效连接,实现荷载协同传递,确保新旧结构刚度匹配,沉降差控制在正常使用允许的范围内;(2)“加盖”拼宽桥梁所处位置正下方 17 m 处为地铁 4 号线南北向盾构区间,桥梁桩基下穿时与隧道的横向间距较小,施工需确保地铁绝对安全;(3)“加盖”拼宽桥梁东西两侧为 20 世纪 90 年代初建造的钢筋混凝土框架桥,需对旧桥结构进行承载能力评定,悬臂板的利用与处治决定本项目桥梁的横

向规模；(4)该项目为西安市核心区的更新改造，地上地下情况复杂。

1　工程概况

雁塔立交“加盖”工程采用桥梁形式对镂空区域进行整体覆盖。上跨二环路的主桥上部结构采用跨径为21.5 m+21 m+10.5 m=53 m，宽度为35.8 m，三跨连续钢箱梁结构，下部桥墩采用盖梁柱式墩，桥台采用桩柱式轻型桥台。桥梁墩台布置充分结合现状：1#中墩位于二环路中分带内，与下方既有框架桥中隔墙对应；为避让地下暗河箱涵，2#中墩则布置于原南侧辅道人行道。南北向两端弧形区考虑到最大可能的减少对地铁的影响，桥台两侧以轻质泡沫混凝土回填至设计标高，“加盖”桥梁现状，平纵横如图1和图2所示。

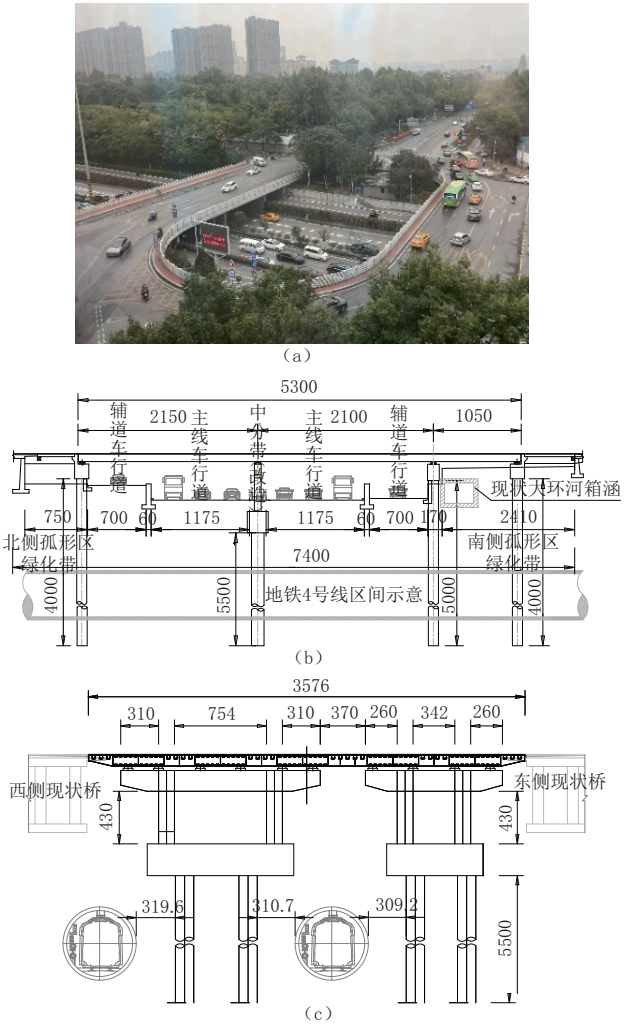


图1　“加盖”桥梁现状及立面、横断面布置图(单位：cm)

2　新旧结构纵横向拼宽关键技术

桥梁拼宽并非简单的“物理加宽”，而是一项及

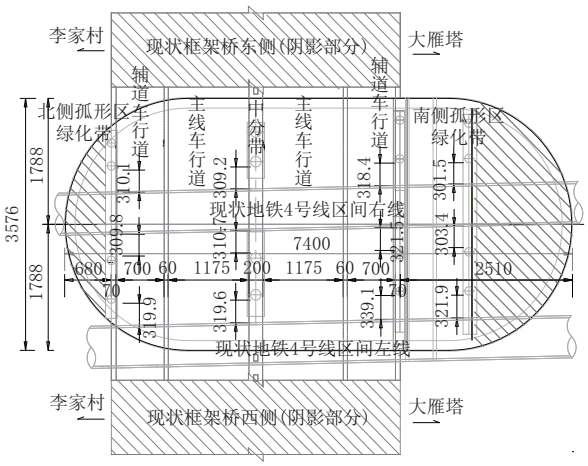


图2　“加盖”桥梁平面布置图(单位：cm)

结构工程、土力学、材料科学及施工技术的复杂系统工程，其成败的关键在于如何处理新旧结构之间的连接关系[2-3]。新旧混凝土之间存在的差异沉降、收缩徐变差异、温度效应差异以及刚度差异，都会在拼接部位产生复杂的附加内力。若处理不当，极易导致拼接部位开裂、桥面铺装损坏，严重影响结构的耐久性、安全性和行车舒适性。因此，选择合适的拼宽连接方案是设

计与施工中的首要解决的问题[4-5]，表1所示为桥梁纵横向接缝连接方式对比。

表1　桥梁纵横向接缝连接方式对比

拼宽方法	特点	优点	缺点	适用范围
上下均不连接	完全独立，互不干扰	避免差异沉降，设计施工简单	桥面易裂，舒适性差，荷载不分布	地质差、旧桥状况差、低等级路
上下均连接	刚性连接，形成整体	整体性好，舒适性高，荷载分布好	对差异沉降极度敏感，施工复杂	地质好、沉降稳定要求高的桥梁
上部铰接下部分离	刚柔并济，以剪为主	缓解沉降影响，改善桥面性能	设计计算复杂，长期性能需关注	轻微沉降，折中方案

目前，主流的拼宽方法主要围绕上部结构和下部结构的连接方式展开，形成了以下三大类典型技术路线[6]。上部铰接、下部分离方案通过精巧的构造设计，在保证良好使用性能和一定结构效率的同时，显著提升了对地基变形的适应能力，正日益成为拼宽工程的主流选择[7-8]。雁塔立交加盖桥梁横向宽度达35.8 m，采用5片单箱双室主纵梁+横梁联系的整体式钢箱梁结构。这种设计保证了桥梁横向具有足够的整体刚度，能将车辆荷载有效地分配给各主梁。

为协调新旧桥横向刚度，对新建钢箱梁的悬臂翼缘进行了刚度加强设计。通过调整顶底板厚度、加劲肋布置等，使新建部分的悬臂刚度与旧桥剩余

悬臂刚度相协调,避免在接缝处因刚度突变而产生过大的应力集中[9-11]。

通过“上部铰接、下部分离”的新旧桥梁协同工作机制,使得新旧桥梁在竖向荷载作用下可共同承担弯矩与剪力,而在温度、收缩徐变及基础沉降引起的变形中又具有一定的相对自由度。有限元分析表明,该机制能有效降低接缝处的应力峰值与挠度差异,提高结构的整体协同工作性能。模型中通过设置合理的接触单元与约束条件,模拟了铰接部位的传力特性,验证了该连接方式在控制差异变形方面的优越性。

图 3 和图 4 所示为“加盖”钢梁与既有旧混凝土框架拼宽具体做法。

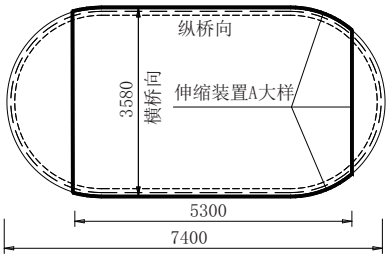


图 4　曲线伸缩装置平面布置示意图(单位:cm)

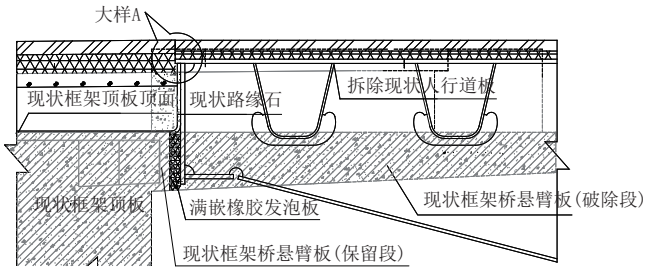


图 3　钢-混拼宽示意图

纵横向拼宽的连接部位均采用桥梁伸缩装置,通过特殊设计的的圆弧形曲线伸缩装置,利用圆弧形钢梁或弹簧系统的柔性变形来吸收位移,使得新旧桥梁结构上部铰接下部分离,确保旧桥受力状态不变,新桥独立受力,使得新旧结构能够较好的适应加盖桥梁在各类荷载作用下的协同变形[12]。图 4 所示为“加盖”钢梁与既有旧混凝土框架连接部位均采用曲线伸缩装置。

圆弧形曲线伸缩装置在桥面处提供了一个连续无突变的行驶表面,车辆通过时几乎没有颠簸感或跳车现象,平稳、噪音低、安全性能高,极大地提升了行车舒适性。该装置通过圆弧形钢梁或内置弹簧系统,在纵向和横向均具备一定的柔性变形能力。当新旧桥梁因温度变化、混凝土收缩徐变或基础差异沉降产生相对位移时,曲线伸缩装置可通过其弧形轨道的滑动或弹簧的伸缩,吸收并释放这些位移,从而避免在接缝处产生过大的约束力。可为城市更新改造过程中同类型工程项目提供宝贵经验。

3　地铁范围沉降保护的处理措施

雁塔立交“加盖”工程位于已运营地铁 4 号线盾构区间正上方,桥梁桩基施工过程将彻底打破地铁隧道周围土体原有的应力平衡和稳定状态,从而可能引发隧道结构的位移、变形、沉降甚至损坏,严重威胁地铁运营安全。桩基采用钻孔或挖空施工时,会导致隧道周围土压力重新分布,可能引起隧道朝向桩孔方向的变形[12-13]。

图 5 为沉降荷载作用下东西侧拼接处挠度及挠度差对比分析。结果表明在沉降荷载工况下高次超静定混凝土框架梁挠度明显高于新建钢结构连续梁。框架梁最大挠度发生在快速路主车道跨中位置,最大挠度为 0.86cm,约为钢梁挠度的 4.7 倍,各跨挠度值大小均对称分布。

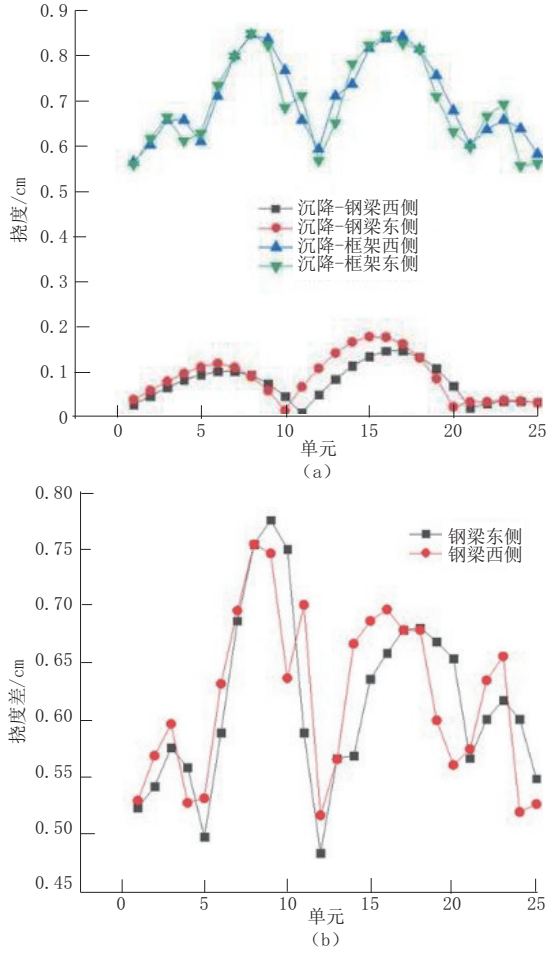


图 5　沉降荷载作用下东西侧拼接处挠度及挠度差对比分析

4　新旧钢混结合部可靠度评估

各荷载效应挠度差的均值和标准差基于有限元

计算结果及荷载统计参数推算得出。表 1 为结合规范与工程经验，确定用于可靠度计算的主要随机变量及其统计特性。既有现浇框架模型采用梁单元模型，全桥共计 153 个节点，134 个单元，截面共计 7 个。雁塔路桥位于雁塔北路上跨南二环，因上层为环形，桥梁分为东西两幅桥。主体结构采用三孔箱型结构，中间孔采用钢筋混凝土立柱隔成 2 跨。由箱涵、挡墙、道路三部分组成。采用 MIDAS Civil 2025 建立雁塔立交“加盖”拼宽结构的全桥三维有限元模型，如下图 6 所示。其中新建钢梁及框架模型采用梁单元建模，钢混结合处采用释放梁单元约束模拟新旧铰接，全桥共计 962 个节点，560 个单元，截面共计 37 个。

表 1　主要随机变量统计参数

随机变量	变量	分布类型	平均值μ	标准差σ	变异系数δ
容许挠度差/cm	$[\Delta]$	正态	15	1.5	0.10
不确定性系数	γ	对数正态	1.0	0.266	0.266
恒载挠度差效/cm	Δ_G	正态	0.4	0.08	0.20
活载挠度差效/cm	Δ_Q	正态	0.3	0.09	0.30
沉降挠度差效/cm	Δ_S	正态	0.75	0.23	0.30

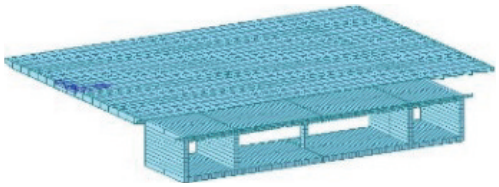


图 6　钢-混拼宽新旧结合有限元模型

采用 MATLAB 基于响应面法编程计算可靠指标对各随机变量 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 情况，响应面函数通常采用不含交叉项的二次多项式形式：$\bar{Z} = \bar{G}(X_1, X_2, \cdots, X_n) = a + \sum_{i=1}^{n} b_i X_i + \sum_{i=1}^{n} c_i X_i^2$　（1）

式中：$a, b_i, c_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 为待定系数。

响应面法的计算步骤如下：

（1）假定初始中心点 $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \cdots, x_n^{(1)})$，一般取均值点；

（2）近似功能函数 $g(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \cdots x_n^{(1)})$ 以及 $g(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \cdots x_i^{(1)} \pm f\sigma_i, \cdots, x_n^{(1)})$ 得到 $2n+1$ 个试验点估计值。

（3）利用 $2n+1$ 个点估计值求解式（1）的待定系数，从而得到当前迭代点处功能函数的近似极限状态方程；

（4）求解验算点 $X^{*(k)}$ 和结构可靠指标 $\beta^{(k)}$，其中上标表示第 k 步迭代；

（5）计算 $\left|\beta^{(k)} - \beta^{(k-1)}\right| < \varepsilon$（给定精度），直至收敛为止[14-15]。得到东西侧拼接部位响应面沉降工况及活载工况的挠度差变化关系，如图 7~9 所示。

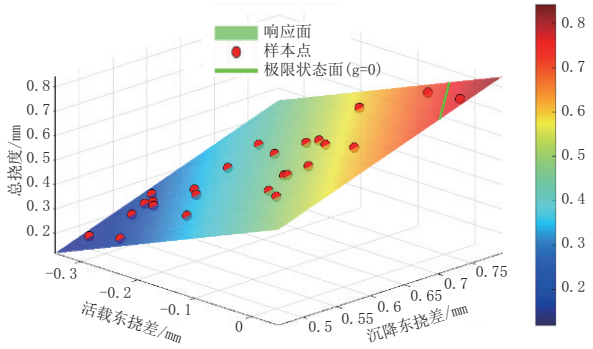


图 7　钢-混拼宽东侧响应面

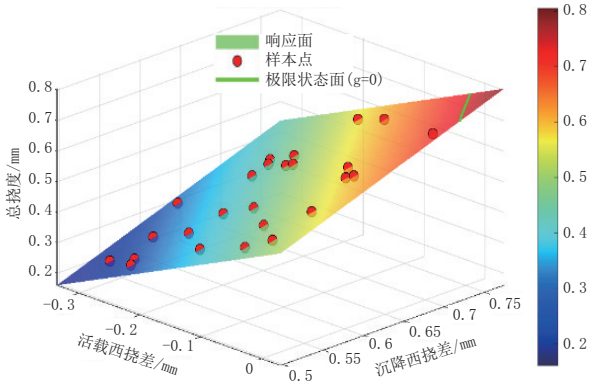


图 8　钢-混拼宽西侧响应面

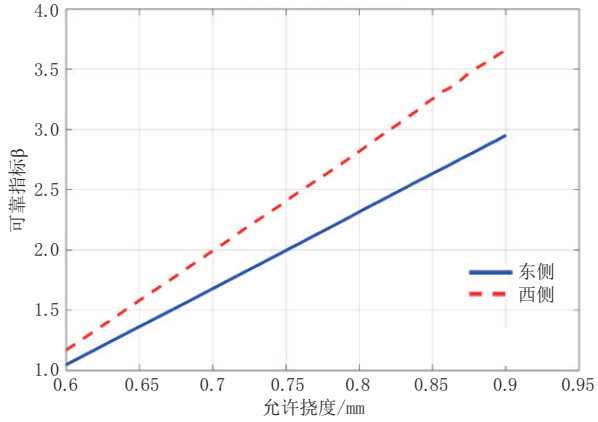


图 9　东西侧可靠指标与允许挠度关系

结果表明东西侧拼接部位的总挠度与活载挠度差、沉降挠度差均呈现线性响应面关系，样本点在响应面上的分布较为均匀，表明总挠度随两个挠度差的增大而单调递增，且拟合关系稳定。

5　结　语

以西安南二环雁塔立交“加盖”改造工程为背景，系统研究了城市复杂环境下旧桥拓宽的关键技术难题，并通过理论分析、数值模拟，得出以下主要结论：

（1）提出了适用于复杂条件的拼宽总体原则，即

针对紧邻地铁、地下管网复杂、新旧结构并存的复杂工况，实现了新旧结构的协同工作，大幅度降低差异沉降、收缩徐变等不利影响。采用圆弧形曲线伸缩缝，显著提升了行车舒适性，其柔性变形特性更使其成为实现“上部铰接”理念的关键构件，有效释放了纵横向位移。

（2）面对桩基紧邻地铁盾构区间的极高风险，提出了以“隔离、补偿、加强、监控”为核心的综合保护措施。实践证明，桩端后压浆技术能显著提高桩基承载力、减小沉降，是控制地铁范围隧道变形的有效手段，确保了下方地铁运营安全。

（3）若以β=3.0 作为可靠度目标，东侧拼接部位的允许挠度需不低于0.9 mm，西侧则可在0.85 mm左右达到目标，可据此优化设计限值。

由于东西侧响应规律一致但可靠度存在差异，建议在施工阶段重点关注东侧拼接部位的约束与荷载分配，通过精细化施工减小两侧可靠度差距。

参考文献：

[1] 张经纬.城市高架桥梁拼宽方案比选[J].城市道桥与防洪，2022(6)：68-71.

[2] 邹骋.城市高架桥拓宽的拼缝构造及对老桥影响的分析[J].中国市政工程，2022(6)：8-11.

[3] 袁青峰.复杂工况下的桥梁拼宽构造研究[J].城市道桥与防洪，2023(12)：146-149.

[4] 梁湖清，唐孟雄，朱瑞林.钢-混凝土组合结构桥梁拼宽设计与成桥试验研究[J].广州建筑，2024，7(52)：103-108.

[5] 聂建国，张晓光，樊健生，等.钢-混凝土组合梁加宽混凝土梁桥的横向分布系数[J].清华大学学报(自然科学版)，2010，50(6)：805-809.

[6] 黄和.采用钢—混组合结构拓宽既有混凝土箱梁桥关键技术研究[D].南京：东南大学，2019.

[7] 朱晓栋.钢-混凝土组合梁桥在城市拼宽桥梁中的应用[J].城市道桥与防洪，2017，34(5)：115-119.

[8] 孙治海，张俊平，魏斌，黄河溧，张泰权.基于动力响应频谱的多梁式拼宽桥梁整体性评估[J].广州大学学报(自然科学版)，2017，24(3)：52-60.

[9] 冯雷.立交改造设计中桥梁拼接设计案例分析[J].城市道桥与防洪，2025(8)：163-166.

[10] 刘超，黄钰豪，陆元春.新老桥间超高性能混凝土拼接接缝性能试验[J].同济大学学报(自然科学版)，2019，47(3)：0322-0330.

[11] 张丽芳，郭涛吴文清，叶见曙.旧桥拓宽中拼接方式对旧桥受力状态的影响分析[J].公路交通科技，2006，23(2)：102-105.

[12] 罗沐鑫，市政桥梁拼宽加固设计研究[J].工程技术研究，2021，6(17)：234-235.

[13] CJJ/T 233—2015 城市桥梁检测与评定技术规范 [S].

[14] 杨万辉.正常使用极限状态下钢筋混凝土板式结构可靠度研兰州：兰州理工大学硕士学位论文，2016.

[15] 丁幼亮，李爱群，姚晓征，叶继红.结构可靠度响应面法的混沌动力学分析及其改进方法研究[J].应用力学学报特，2009，26(1)：12-16.

（上接第 142 页）

南北高架为例[J].城市道桥与防洪，2025(5)：9-14.

[4] 韩艳.城市快速路跨江通道总体方案研究—以宁波镇浦快速路跨甬江通道为例[J].城市道桥与防洪，2023(11)：11-14.

[5] 马铨，缪永春.昆明市二环快速系统交通拥堵治理的实践与思考[J].道路交通管理，2022(4)：44-47.

[6] 苗慕楠.城市快速路互通立交拥堵成因及改造策略——以南京市内环快速路为例[J].工程技术研究，2025，10(18)：32-34.

[7] 钱城.城市快速路兼高速功能复合式枢纽互通立交方案设计思路[J].工程建设与设计，2021(23)：86-88.

[8] 赵群，罗建晖，秦方方.浅谈我国城市地下快速路地下互通立交研究及发展[J].城市道桥与防洪，2025(5)：15-20.

[9] 赵皖晓.城市快速路互通立交选型要点分析[J].安徽建筑，2024，31(3)：170-172.

[10] 王文聪.城市快速路立交及匝道布置方案研究——以绍兴市越东路为例[J].城市道桥与防洪，2025(6)：65-69.

[11] 张汐.城市快速路出口匝道与地面路口衔接优化设计[J].交通与运输，2026，42(2)：13-18.

[12] 孙闻鹏.高架快速路下匝道与地面交叉口衔接段交通组织方法[J].交通世界，2025(26)：9-11.

[13] 刘永泽.快速路地面雨水系统设计经验总结[J].工程建设与设计，2025(5)：72-75.

[14] 陈祺.城市高架快速路地面交织流对交通的影响及改善措施探讨[J].城市道桥与防洪，2011(8)：74-79.

[15] CJJ 129—2009 城市快速路设计规范 [S].