

小型城市桥梁低影响更新案例研究

陈以荣

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 以上海市市区一座服役近40年的小型城市桥梁为例,针对桥梁结构裂缝、主梁混凝土风化锈蚀等典型病害,以及承载能力下降近25%的现状,基于2012—2024年多轮检测数据,系统分析病害演化规律。贯彻低影响更新理念,在维持原设计荷载与桥面线形的前提下,提出“桥面系重做+上部结构整体更换+下部结构局部加固”的维修方案,并采用分幅、分阶段施工组织模式,实现施工对区域交通运行与周边环境的最小扰动。从病害诊断、更新策略、施工组织三个方面,总结小型城市桥梁低影响更新的技术路径,可为同类工程提供参考。

关键词: 小型城市桥梁;低影响理念;桥梁病害;维修更新;交通组织

中图分类号: U442.5;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0029-06

Case Study on Low-Impact Renewal of Small Urban Bridges

CHEN Yirong

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking a small urban bridge been in service for nearly 40 years in the urban area of Shanghai as an example, in view of typical diseases such as cracks in the bridge structure, weathering and rusting of the girder concrete, and the current situation of a nearly 25% decline in bearing capacity, based on the multiple rounds of inspection data from 2012 to 2024, the evolution law of diseases is systematically analyzed. Adhering to the concept of low-impact renewal, under the premise of maintaining the original design load and bridge deck alignment, a maintenance scheme of “renewal of bridge deck system + overall replacement of superstructure + local reinforcement of substructure” is proposed, and a construction organization mode in sections and phases is adopted to minimize the disturbance to the regional traffic operation and the surrounding environment during construction. From three aspects of disease diagnosis, renewal strategy and construction organization, the technical path of low-impact renewal for small urban bridges is summarized, which can provide a reference for similar projects.

Keywords: small urban bridge; low-impact concept; bridge diseases; maintenance and renewal; traffic organization

0 引言

随着城市建成区功能日趋完善,如何在不影响正常交通通行与市民生活的前提下进行市政基础设施更新,已成为当前城市更新的重要议题。

小型城市桥梁是城市交通网络的重要构成,广泛分布于城市次干路与支路系统中,承担着区域交通联系、非机动车与行人通行等功能。此类桥梁通常建设年代较早,设计标准偏低,随着运营年限增长,由于环境侵蚀等因素影响,逐渐出现混凝土碳化、氯离子侵蚀和钢筋锈蚀等病害问题。通常结构裂缝是混凝土结构病害的重要表现^[1]。柳俊哲^[2]对

混凝土碳化的机理及碳化程度评估进行了研究,表明碳化过程会对实际混凝土构筑物产生质量增加、体积收缩、强度降低、钢筋腐蚀加速等影响^[3]。孙舰等^[4]对桥梁混凝土钢筋锈蚀的成因、影响因素以及评价方法进行了研究,提出了提高混凝土密实度等减缓钢筋锈蚀的措施。李雅^[5]在分析钢筋锈蚀原因与危害的基础上,提出了具体的检测方法。张强^[6]研究了桥梁维修和养护过程中钢筋保护层厚度的检验方法。李鸿斌^[7]以某收费站桥为例,分析钢筋混凝土桥腹板纵向裂缝产生的原因,并提出了粘贴钢板的加固措施。涂洪华^[8]在混凝土桥梁裂缝成因分析的基础上,提出了具体的应对措施。朱梓铭^[9]总结了桥梁结构裂缝处治的相关研究成果,并针对性地提出了城市桥梁结构裂缝处治方法。付翠英等^[10]针对老旧桥梁混凝土结构表面裂缝状况复杂等问题,通过改性制备了一种环氧树脂胶黏剂,实现了

收稿日期: 2026-04-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3805900)

作者简介: 陈以荣(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计研究工作。

良好的裂缝修补加固效果。王锋^[11]以实际工程为案例,介绍桥梁上部结构低影响快速化施工的建设管理经验。张焱等^[12]采取预制拼装结构、分时段施工组织等低影响施工技术对上海内环高架进行了更新,有效提升了城市快速路的使用品质。

本文以上海市某小型城市桥梁为研究对象,基于年度结构定期检测报告,系统梳理桥梁病害类型、分布特征与发展演化规律,结合工程实际提出维修更新方案,并在不影响交通通行的前提下,研究施工期间低影响交通组织策略,为同类桥梁的养护决策与工程实践提供借鉴。

1 工程概况与现状评估

1.1 桥梁基本概况

上海市某小型城市桥梁,建成于1986年,为一座东西走向的简支混凝土空心板梁桥,跨径为8.0 m+8.0 m+8.0 m=24.0 m。上部结构采用普通钢筋混凝土空心板梁,每跨横向由20片板梁组成,板梁高0.52 m,宽0.99 m。板梁间采用剪力铰连接,铰缝材料为C30混凝土。下部结构为轻型桥台与桩柱式桥墩,支座采用简易油毛毡支座。桥面铺装为钢筋混凝土加环氧薄层,两侧桥头设置弹塑体伸缩缝,栏杆为大理石花板栏杆。桥面总宽20.6 m,横向布置为:0.3 m栏杆+4.0 m人行道+12.0 m车行道+4.0 m人行道+0.3 m栏杆。

该桥设计荷载为汽车—20级、挂车—100。截至2025年,该桥已投入运营近40年。受长期服役、环境侵蚀及荷载作用影响,桥梁各主要构件均出现不同程度的病害。

1.2 主要病害类型与分布

根据2023、2024年检测报告,桥梁各主要构件病害情况如下。

(1)桥面系:桥面铺装存在多条纵横向贯通裂缝,部分区域环氧薄层剥落破损,裂缝位置与下部铰缝损坏高度对应,反映上部结构横向联系退化对桥面铺装的直接影响。

(2)上部结构:主梁混凝土风化、疏松现象普遍,共16片梁存在锈胀破损,多片梁出现主筋外露锈蚀,部分梁底存在空洞露筋。铰缝渗水问题突出,共16处铰缝通长渗水,6处端部渗水,表明铰缝失效导致单梁受力状态加剧。

(3)下部结构:桥台与盖梁普遍存在渗水、锈胀破损、混凝土剥落等问题,0#台与3#台帽表面裂缝多处分布,部分裂缝宽度达0.5 mm。全桥支座老化失效。

(4)附属设施:台前护坡存在局部塌陷、开裂破损,影响桥头稳定性。

1.3 病害演化与结构评定

对比2012年、2019年、2023年、2024年4次检测数据,桥梁病害呈现明显的累积与加速演化趋势。

1.3.1 钢筋保护层厚度

混凝土保护层主要通过阻止外界腐蚀介质对钢筋的影响,使其工作性能保持相对稳定。该桥近年来钢筋保护层厚度检测结果如表1所示。

表1 上部结构部分构件钢筋保护层厚度检测结果				
年份	检测值 D_{ne-min}/mm	设计值 D_{nd}/mm	D_{ne-min}/D_{nd}	评定 标度
2012	18	30	0.6	4
2019	21.3	20	1.07	1
2024	10.1	25	0.4	5

注:检测中采用钢筋探测仪对主要构件钢筋保护层厚度进行检测,每个抽检构件各取20个测点,并对测试结果进行统计。

由表1可知, D_{ne-min}/D_{nd} 值从2012年的0.6上升至2019年的1.07,随后在2024年下降至0.4。根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)第5.8节^[13]评定结果,评定标度分别为4(有较大影响)、1(影响不显著)、5(钢筋易失去碱性保护,发生锈蚀)。

1.3.2 混凝土碳化深度

混凝土碳化作用会使结构内部钢筋失去碱性环境的保护,从而易发生锈蚀。

通过测试混凝土的碳化深度指标,结合钢筋保护层厚度状况,可以评判混凝土碳化对钢筋锈蚀的影响程度。该桥近年来上部结构混凝土碳化深度检测结果如表2所示。

表2 上部结构部分构件混凝土碳化深度检测结果			
年份	碳化深度检测 平均值/mm	保护层厚度实测 平均值/mm	K_c
2012	4	18	0.22
2019	2.5	28.5	0.09
2024	42	16.8	2.50

注:混凝土碳化深度检测采用酚酞试剂的方法进行测试,每个抽检构件选取3个测区进行碳化深度测试,并对测试结果进行统计。

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)第4.6.8节^[13]评定结果,上部结构混凝土碳化由2012、2019年的“无影响”,转变为2024年局部混凝土“保护层失效”。

1.3.3 钢筋锈蚀电位检测

混凝土中钢筋锈蚀不仅影响结构耐久性,而且影响结构的安全性。通过测试钢筋与混凝土和参考

电极之间的电位差,可判断钢筋发生锈蚀的概率。通常,电位差越大,混凝土中钢筋发生锈蚀的可能性越大。

实测结果如图1和图2所示,按《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015)第4.6.9条^[14],桥梁上部结构钢筋锈蚀电位实测值由2012、2019年的(-350,-200]mV(钢筋锈蚀性状不确定,可能存在坑蚀现象),发展至2024年抽检的上部结构板梁的钢筋锈蚀电位均小于-350 mV,此时混凝土中钢筋发生锈蚀的概率大于90%。

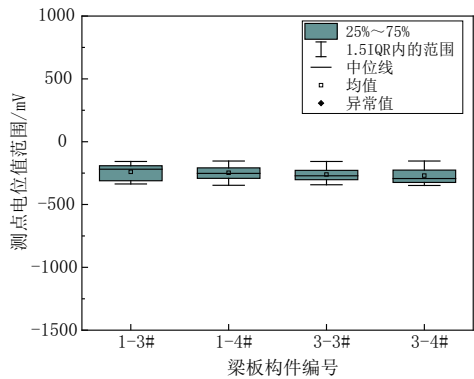


图1 2019年桥梁梁板钢筋锈蚀电位实测结果

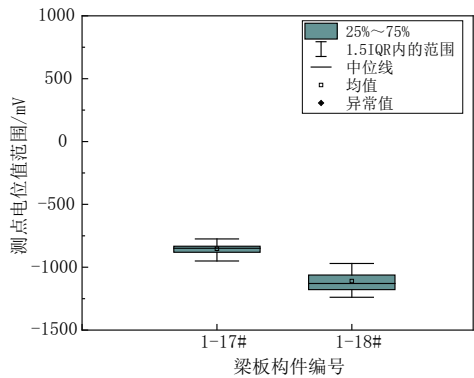


图2 2024年桥梁梁板钢筋锈蚀电位实测结果

结合检测数据与维修记录进行分析可知,该桥梁在2012—2019年间对桥梁进行过一次维修,对桥面系、上部结构的部分病害进行了处理,但未从根本上解决桥梁关键病害。桥梁铰缝未能得到及时修理,导致桥梁在承受较大荷载的情况下部分单梁受力,桥梁裂缝超过限制,主梁受力钢筋发生锈蚀,进一步引起主梁承载能力下降。2019—2023年间,桥梁碳化深度大幅增加,主筋锈蚀情况明显加剧。

2012年桥梁总体评价为D级,期间局部维修后,2019年提升至B级,但未从根本上解决铰缝失效、主梁受力钢筋锈蚀等关键问题。2023年全桥完好状况等级回落至C级,2024年上部结构技术状况与结构状况等级均为D级。

1.4 总体维修策略

基于病害诊断结果与设计原则,确定“桥面系重做+上部结构整体更换+下部结构局部加固”的总体维修策略:

(1)桥面系:全幅拆除既有桥面铺装、人行道及栏杆,重做铺装结构层,并同步重建连续缝与伸缩缝。

(2)上部结构:拆除现有小铰缝空心板梁,统一更换为刚接空心板梁,以消除铰缝失效引起的单梁受力问题。

(3)下部结构:对墩台露筋、破损区域进行修补,更换全桥支座,对受力薄弱部位粘贴钢板进行补强。

1.5 设计原则

维修方案制定遵循以下4项原则:

(1)荷载标准不变:维修后维持原设计荷载等级,确保结构安全性与历史技术标准的一致性。

(2)线形与断面恢复:桥面宽度、纵坡、横坡均与原设计保持一致,避免对周边交通及排水系统产生扰动。

(3)结构扰动最小化:尽可能保留既有结构,避免因维修加固引发新的病害或次生损伤。

(4)技术与经济协调:在保证技术可靠性的前提下,优先采用施工便捷、经济合理的方案。

2 低影响理念下的实施方案

2.1 周边路网与交通条件

该桥位于市区开发区内,周边以商业办公楼为主。从管理层面看,不具备封闭施工条件。因此,需要研究在保障交通通行的前提下的分段施工方案。根据交通调查显示,周边路段饱和度介于0.24~0.75之间,道路交通运行整体处于相对可控状态,为分段施工组织提供了基础条件。

2.2 分阶段施工组织方案

为最大限度减少施工对区域交通的影响,工程采用分幅、分阶段施工组织模式,将全桥划分为三幅,四个阶段实施:

(1)第一阶段:拆除北幅部分人行道,新建临时钢板人行道与沥青铺装层,并对南幅范围内上部结构进行拆除新建。布置形式如图3所示。

(2)第二阶段:南幅新建临时人行道与沥青铺装层,北幅同步调整,并对中间范围内上部结构进行拆除新建。布置形式如图4所示。

(3)第三阶段:调整南幅车道布置,并对北幅剩

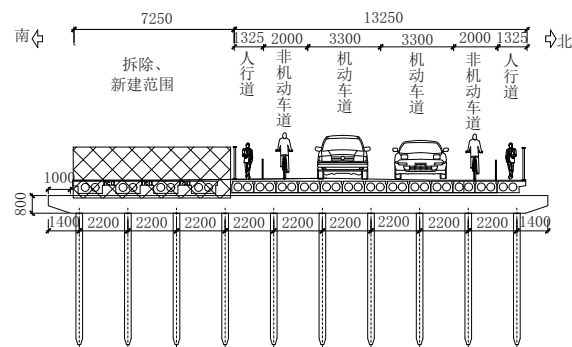


图3 第一阶段施工示意图(单位:mm)

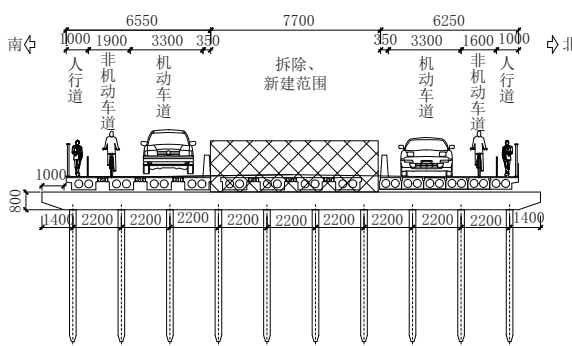


图4 第二阶段施工示意图(单位:mm)

余范围内的上部结构进行拆除新建。布置形式如图5所示。

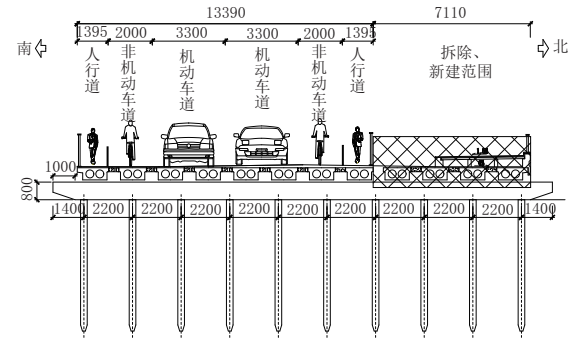


图5 第三阶段施工示意图(单位:mm)

(4)第四阶段:全桥板梁更换完成,恢复原断面交通,并对桥头两侧路段进行路面铣刨加罩。布置形式如图6所示。

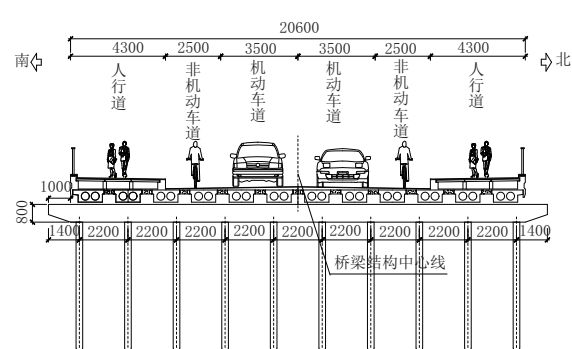


图6 第四阶段施工示意图(单位:mm)

各阶段均设置临时人行与车行通道,确保施工期间非机动车与行人通行不中断,引导机动车通过

周边路网分流绕行。

3 维修方案设计与验算

3.1 上部结构

3.1.1 原板梁上部结构验算

依据分阶段交通组织方案,在第一、第二阶段中,原板梁将作为上部结构承载主体。通过桥梁博士软件计算分析,综合考虑最不利情况,荷载横向分布系数中汽车系数取值0.297,人群系数取值0.247。

参考桥梁检测评估结论:空心板梁承载力已降低近25%,主筋折减为原钢筋截面的0.8进行计算。按要求原桥汽车限载15 t,模型中荷载等级采用汽—10,人群3.5 kN/m²。

实际施工组织中将按12 t执行限载,控制施工期间超限车辆通过桥梁。

3.1.2 新板梁上部结构验算

依据分阶段交通组织方案,在第二、第三、第四阶段,新梁作为上部结构承载主体。通过桥梁博士软件计算,新板梁中板汽车系数在第二阶段交通组织情况为最不利,荷载横向分布系数中汽车系数取值0.445,人群系数取该阶段中板最大值0.21;新板梁边板汽车系数在第二阶段交通组织情况为最不利,汽车系数取值0.371,人群系数取阶段边板最大值0.389。取不利荷载横向分布系数值分别对中板、边板进行结构验算。

结合图纸建立模型,具体参数如表3所示。

表3 模型信息表	
模型信息	参数
构件类型	梁
验算类型	预制A类预应力梁
节点数	15
自重系数	1.04
混凝土等级	C50
钢筋参数	HRB400
钢绞线	1×7-15.20($f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$)

参考原桥设计荷载取值,选取城-B、人群荷载:3.5 kN/m²,进行计算。

3.1.3 计算结果

通过桥梁博士计算软件计算,原板梁、新板梁在施工交通组织各阶段均能满足计算要求。为保障施工过程中的安全,实际施工组织按12 t车辆总重执行限载。

3.2 上部结构更换后盖梁验算

由于原桥梁上部结构为钢筋混凝土铰接空心板

形式,本次上部结构更换为刚接空心板梁。上部结构总荷载不变,但板梁布置位置有局部调整,因此对盖梁进行复核算。计算简图见图 7,计算模型信息见表 4。

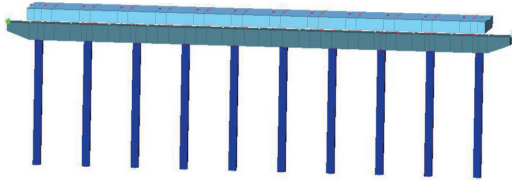


图 7 盖梁计算简图

表 4 模型信息表

模型信息	参数
构件类型	梁
验算类型	钢筋混凝土梁
节点数	47
自重系数	1.04
混凝土等级	C25

3.2.1 模型信息

3.2.2 荷载取值

模型中采用城—B,人群 3.5 kN/m²。

3.2.3 计算结果

(1)持久状况承载能力极限状态:正截面承载力验算

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[15]的规定,桥梁构件的承载能力极限状态计算应满足:

$$\gamma_0 S \leq R$$

由图 8 可知,正截面承载力验算满足要求。

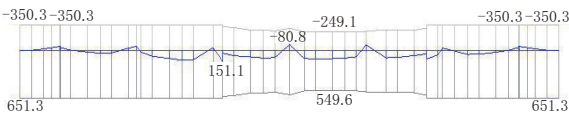


图 8 最大弯矩及其对应的抗力图(单位:kN·m)

(2)持久状况承载能力极限状态:加固前斜截面承载力验算

抗剪计算结论:由图 9、图 10 可知,加固前个别节点的抗剪强度不满足要求。

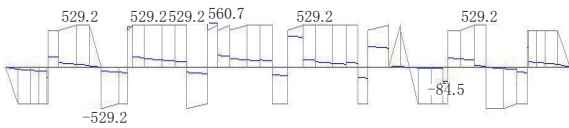


图 9 最大剪力及其对应的抗力图(单位:kN)

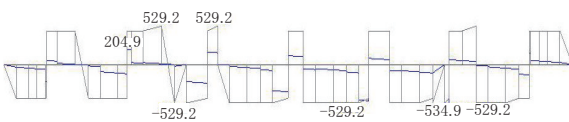


图 10 最小剪力及其对应的抗力图(单位:kN)

(3)持久状况正常使用极限状态:裂缝宽度验算
由图 11 可知,顶、底缘裂缝宽度均小于容许值 2 mm,满足要求。

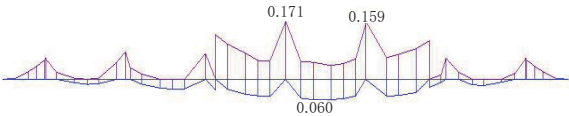


图 11 截面顶缘、底缘裂缝宽度图(单位:mm)

3.2.4 斜截面承载力加固

根据建模计算结果可知,上部结构更新后,由于荷载分布位置变化,部分盖梁与墩柱连接位置抗剪承载力不足。因此,拟采用粘贴钢板的形式对桥墩盖梁进行抗剪加固设计。钢板条宽 8 cm、厚 5 mm,间隔 12 cm 布置。

根据规范《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)第 9.3.3 条^[16],

$$V \leq V_{b0} + V_{b,sp} \quad (1)$$

式中:V 为设计剪力值,kN;V_{b0} 为加固前梁的斜截面承载力,kN;V_{b,sp} 为粘贴钢板加固后,对梁斜截面承载力的提高值,kN。

经计算,加固后的承载力为 1 009.0 kN>设计剪力值 560.7 kN,粘贴钢板加固后盖梁抗剪承载力满足规范要求。

4 实施效果与经验总结

4.1 维修效果预期

通过本次大修,预期实现以下效果:

(1)结构性能恢复:更换为刚接板梁后,横向整体性显著提升,消除单梁受力隐患,承载能力恢复至原设计标准。

(2)耐久性增强:桥面铺装更新、支座更换等措施有效提升了结构防水性与抗侵蚀能力。

(3)技术状况提升:桥梁总体技术状况由 D 级提升至合格及以上等级,满足城市桥梁养护技术标准要求。

4.2 小型城市桥梁维修更新关键经验

(1)病害诊断与动态评估

本次小型城市桥梁维修方案的科学性,建立在多轮检测数据的系统分析基础上。2012—2024 年 4 次检测数据揭示了病害从局部发展到结构性能下降的变化过程,为“更换板梁”这一核心决策提供了充分依据。

(2)结构替换与局部加固的权衡

对于服役年限长、病害分布广泛的上部结构,局

部加固的经济性与技术可行性往往不及整体更换。本工程选择统一更换为刚接板梁,虽然初期投资较高,但有效避免了多次维修累积的成本与交通影响。

(3) 交通组织与施工时序协调

分幅、分阶段施工模式在保障施工安全与质量的同时,最大程度地维持了区域交通的基本功能,降低了对周边居民影响。

5 结 语

以典型的小型城市桥梁维修更新实践案例为对象,通过系统分析多轮检测数据,精准识别病害演化规律,制定了“桥面系重做+上部结构整体更换+下部结构局部加固”的综合维修方案,并结合分幅、分阶段施工组织模式,实现了结构性能恢复与区域交通保障的双重目标。

工程实践表明,对于服役年限长、病害累积严重的小型城市桥梁,基于动态评估、结构整体性与耐久性并重的维修策略,以及施工组织与城市运行的协同管理,是确保维修过程实现城市更新低影响目标的关键要素。本研究的经验可为同类桥梁的养护决策与工程实施提供参考。

参考文献:

- [1] 张树仁. 桥梁病害诊断与加固设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.

- [2] 柳俊哲. 混凝土碳化研究与进展(1)——碳化机理及碳化程度评价[J]. 混凝土, 2005(11): 11-14; 24.
- [3] 柳俊哲, 吕丽华, 李玉顺. 混凝土碳化研究与进展(2)——碳化速度的影响因素及碳化对混凝土品质的影响[J]. 混凝土, 2005(12): 10-13; 17.
- [4] 孙舰, 李会强, 张绍宽, 等. 桥梁混凝土钢筋锈蚀与防护技术研究[J]. 混凝土世界, 2025(5): 68-71.
- [5] 李雅. 公路桥梁混凝土中钢筋腐蚀检测方法[J]. 交通世界, 2023(32): 160-162.
- [6] 张强. 桥梁混凝土钢筋保护层厚度检测方法分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(7): 175-177.
- [7] 李鸿斌. 桥梁病害成因分析与加固设计[J]. 城市道桥与防洪, 2026(2): 225-229.
- [8] 涂洪华. 混凝土桥梁裂缝成因分析及应对措施[J]. 工程技术研究, 2021, 6(8): 87-88.
- [9] 朱梓铭. 市政桥梁混凝土结构裂缝及处治方法研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(13): 79-82.
- [10] 付翠英, 赵伟. 老旧桥梁混凝土结构裂缝修补加固粘接的强度测试[J]. 粘接, 2025, 52(4): 44-47.
- [11] 王锋. 桥梁上部结构交通低影响快速化施工建设管理研究[J]. 中国市政工程, 2025(4): 152-156; 185.
- [12] 张焱, 安正阳. 城市核心区高架快速路低影响大修更新技术研究——以上海内环年轻化为例[J]. 交通与港航, 2025, 12(4): 32-38; 50.
- [13] JTG/T J21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [14] CJJ/T 233—2015 城市桥梁检测与评定技术规范[S].
- [15] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [16] GB 50367—2013 混凝土结构加固设计规范[S].

(上接第28页)

(3) 目前该更新决策模型仅针对快速路, 适用场景相对单一。后续需进一步拓展研究范畴, 根据高速公路、一级公路、主干路等道路的特征, 构建差异化、针对性的专项更新决策模型, 持续完善模型体系的通用性与工程实操性。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29)[2025-02-19]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- [2] 上海市统计局. 2023年上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [3] Williams K, DAIR C. A Framework for Assessing the Sustainability of Brownfield Developments[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2007, 50(1): 23-40.
- [4] Langston C, Wong F K W, Hui E C M, et al. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong J. Building and

Environment, 2008, 43(10): 1709-1718.

- [5] Brandt E, Rasmussen M H. Assessment of building conditions[J]. Energy and building, 2002, 34(2): 121-125.
- [6] 李子超, 张健, 吕元. 存量工业用地更新前策划及其决策机制优化策略研究[J]. 城市建筑空间, 2024, 31(11): 67-69.
- [7] 黄礼杰. 可持续城市更新决策阶段的参与机制和策略选择研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [8] Yi Z, Liu G, Lang W, et al. Strategic Approaches to Sustainable Urban Renewal in Developing Countries: A Case Study of Shenzhen, China[J]. Sustainability, 2017, 9(8): 1460-1479.
- [9] 顾佳磊. 上海内环高架路更新的实践、应用与评估[J]. 中国市政工程, 2023(3): 28-32; 113.
- [10] 李思琪. 上海市中心城区快速路潮汐车道设置方案研究——以南北高架为例[J]. 城市道桥与防洪, 2025(5): 9-14.
- [11] 上海交通指挥中心. 2024年四季度上海路网运行报告出炉! 高快速路、省界流量较上季度略有上升, 同比上升明显[EB/OL]. (2025-02-15)[2025-02-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/477KRNLXFzYNRDhPtCWQ>.