

超宽三塔斜拉桥结构静动力行为试验研究

肖 鸣¹, 杨鑫炎²

(1. 荆州市五维公路勘察设计有限公司, 湖北 荆州 434005; 2. 中交建筑集团第五工程有限公司, 陕西 西安 725106)

摘 要: 为研究超宽三塔斜拉桥结构的整体静动力行为, 以主跨 176 m、桥面宽 57 m 的西安沣邑大桥为背景, 开展了实桥荷载试验研究。基于静载试验获得了结构变位与关键位置的应力变化, 采用无障碍行车与有障碍行车试验研究了结构冲击系数的变化。结果表明: 圆形截面独柱塔刚度效应及几何非线性明显, 在最不利静力荷载作用下, 三塔斜拉桥的主梁及主塔位移较大, 且中塔变形大于边塔变形; 同时, 超宽钢箱梁剪力滞效应明显, 在最不利静力荷载作用下, 主梁截面应力分布非常不均匀, 且受横坡及局部荷载效应影响显著。另一方面, 超宽三塔斜拉桥的应力冲击效应非常明显, 在行车及有障碍行车情况下, 钢梁顶底板的应力冲击系数最大为 0.29, 这表明, 实际运营中应关注桥面铺装的损伤, 避免跳车带来的影响。

关键词: 桥梁工程; 三塔斜拉桥; 荷载试验; 静动力响应; 冲击系数

中图分类号: U441; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0078-05

Experimental Study on Static and Dynamic Behaviors of Ultra-wide Three-pylon Cable-Stayed Bridge

XIAO Ming¹, YANG Xinyan²

(1. Jingzhou Wuwei Highway Survey and Design Co., Ltd., Jinzhou 434005, China; 2. China Communications Construction Group Fifth Engineering Co., Ltd., Xi'an 725106, China)

Abstract: To study the overall static and dynamic behaviors of an ultra-wide three-pylon cable-stayed bridge structure, taking the Xi'an Fengyi Bridge with the main span of 176 m and deck width of 57 m as the background, a full-scale load test study is conducted. The structural displacement and the stress variations at critical locations are obtained through static load tests, while the unimpeded and impeded vehicle running tests are performed to study the variations in structural impact coefficients. The results demonstrate that the stiffness effect and geometric nonlinearity of the circular cross-section single-column pylon are obvious. Under the most adverse static loading condition, the displacements of the girder and main pylon of the three-pylon cable-stayed bridge are greater, and the deformation of the middle pylon is larger than one of the side pylons. At the same time, the shear lag effects of ultra-wide steel box girder is obvious. Under the most adverse static loading condition, the stress distribution of the girder section is very uneven and is significantly affected by the cross slope and local load effects. Furthermore, the stress impact effect of the ultra-wide three-pylon cable-stayed bridge is very obvious. Under the conditions of driving and impeded driving, the maximum stress impact coefficients of the top and base plates of steel girder is 0.29, which indicates that more attention should be paid to the damage of deck pavement in the actual operation and avoids the impacts from vehicle bumping effects.

Keywords: bridge engineering; three-pylon cable-stayed bridge; load test; static and dynamic responses; impact coefficient

0 引 言

多塔斜拉桥因其良好的经济性、造型美观和较短的施工周期, 已成为现代桥梁中广泛使用的结构形式之一^[1]。然而, 其在设计和施工中 also 面临诸多技术挑战, 尤其是结构刚度方面的问题^[2]。在典型

的三塔斜拉桥体系中, 由于中塔缺少辅助墩、过渡墩和端锚索的支撑, 在荷载作用下容易产生较大的纵向位移, 进而显著增加结构跨中挠度、斜拉索疲劳应力幅和塔底内力。因此, 研究优化中塔的刚度已成为提升多塔斜拉桥整体性能的关键。现有的刚度增强方法包括增大中塔弯曲刚度^[3]、增加加劲索^[4]、改变拉索布置形式^[5-6]和增加塔梁约束^[7]等手段。

作为本文工程背景的西安沣邑大桥是一座典型的三塔斜拉桥, 但其设计未采用增大中塔截面或增

收稿日期: 2025-02-27

作者简介: 肖鸣(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路、桥梁的设计工作。

加加劲索的方式,且采用了全漂浮体系,结构整体刚度较小,使结构在外力作用下的响应更加明显。同时,该桥采用了超宽桥面设计,桥面宽度达 57 m,大大超出了传统桥梁的标准宽度,使桥梁的力学行为愈加复杂^[8-9]。为准确掌握该桥的整体静动力行为,本文针对西安沣邑大桥开展了荷载试验研究。荷载试验作为评价桥梁整体结构性能的重要方法,可以有效揭示桥梁在实际荷载下的静动力响应特性^[10-11]。通过施加设计荷载并实时监测桥梁的变形、应力、振动等状态,荷载试验能够真实反映桥梁的工作状态,为桥梁结构的承载能力和耐久性提供直接的验证数据^[12]。研究结果不仅为西安沣邑大桥的后续运营管养提供了基础数据,还为国内外类似超宽三塔斜拉桥的设计和施工提供了技术参考,有助于推动该类桥梁的技术发展和设计优化。

1 工程背景

西安沣邑大桥位于西安市国际社区灵韵北路,是国内最宽的全漂浮体系多塔斜拉桥。桥梁跨径布置 87 m+176 m+176 m+87 m。在纵桥向,主梁与桥台之间设置纵向限位弹簧,保证运营状态下主梁纵向变形及回位;在横桥向,主梁在桥塔及桥台处均设置横向限位拉索;在竖桥向,主梁在桥塔处不设置竖向支座,竖向作用均通过斜拉索传递给主塔。主梁采用全焊钢箱梁,采用双边箱结构,2 箱之间设横梁连接。顶面总宽 57 m,底面总宽 43.9 m。主塔采用变截面圆形塔柱,为钢结构-混凝土结构混合塔,其中塔顶及斜拉索锚固区采用钢塔,钢塔总高 35 m,采用 Q345qD 钢材;中塔柱及下塔柱采用混凝土塔,采用 C60 混凝土。

2 静动力试验

2.1 静载试验

为确定静载试验加载断面和加载效率,首先采用 MIDAS /Civil 软件建立全桥有限元模型^[13-14]。考虑到桥梁较宽,模型采用双主梁模型。根据 MIDAS 计算的活载弯矩包络图与三塔斜拉桥结构的受力特点,在全桥范围内选取 S1~S8 共 9 个控制部位(断面)。西安沣邑大桥立面布置与加载控制断面见图 1。根据静力荷载效率要求及主要控制断面的设计内力计算结果,选用了 24 辆单车满载总重约 36 t 的载重车作为加载车辆。本次全桥测点布置示意图见图 2。

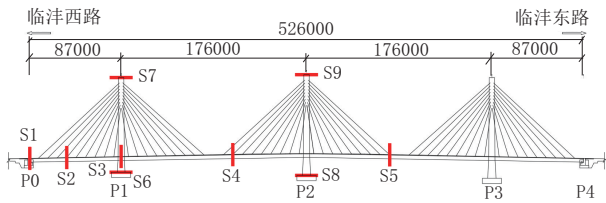


图1 西安沣邑大桥立面布置图与加载控制断面(单位:mm)

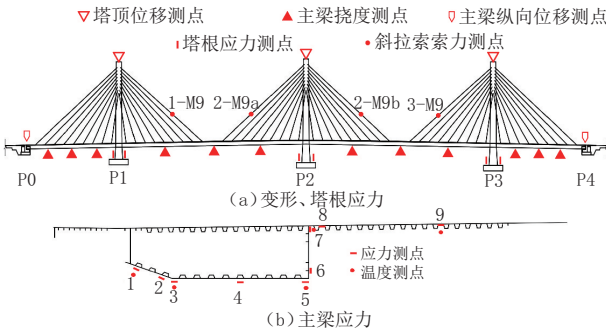


图2 全桥测点布置示意图

2.2 动载试验

动载试验选取 2 辆载重车以 10、20、30 和 40 km/h 的速度匀速驶过桥面,随后,在 S2 和 S4 断面布置障碍物,2 辆载重车再以 10、20 km/h 的速度匀速驶过桥面。本次动载试验选取 S2、S3、S4 断面(见图 1)测试主梁动应力;截面动应力测点为 4、5、8、9 点及其对称截面的应力测点(见图 2)。

3 静力荷载下结构整体力学行为

3.1 主梁位移

大桥为全漂浮结构,主梁在塔梁结合处无竖向支承,在竖向荷载作用下易产生较大变形。对称加载作用下,主梁测点竖向变形实测结果与理论值比较见图 3。

由图 3 可知:对称荷载作用下,主梁左、右幅变形协调,各主要测点实测变形均小于理论变形,校验系数在 0.44~0.97 之间。边跨实测最大竖向变形为 -6.9 cm(理论值为 -8.7 cm),中跨实测最大竖向变形为 17.1 cm(理论值为 19.6 cm),结构对称性良好。

偏载作用下,主梁测点竖向变形实测结果与理论计算值的比较见图 4。

由图 4 可见:边跨跨中钢梁上下游实测最大变形差为 1.0 cm,2 个中跨跨中钢梁上下游实测最大变形差分别为 4.6、3.6 cm,钢梁扭转效应明显。

3.2 塔顶位移

三塔斜拉桥结构体系中,中塔变形通常较大,在设计中常采用加大中塔刚度或增加加劲索等方式来控制中塔变形。本桥并未设置加劲索,且中塔与边塔采用了相同的圆形截面设计,应格外关注塔顶位

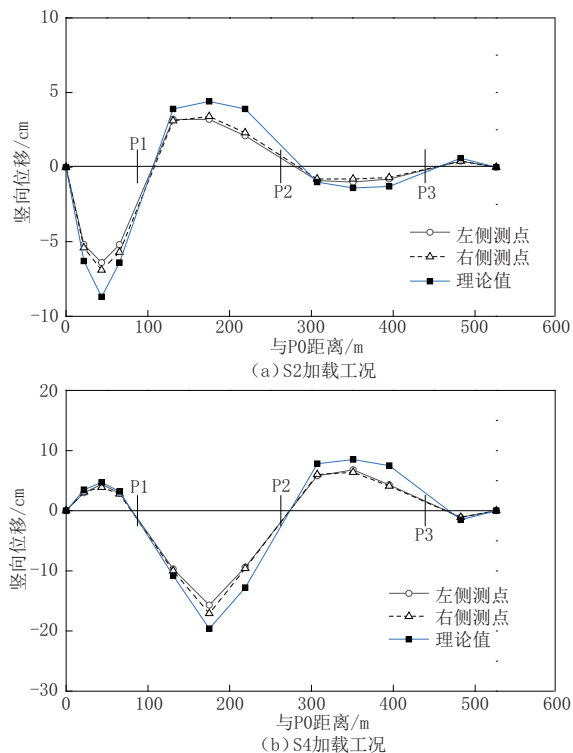


图3 对称加载作用下主梁竖向变形实测结果与理论值的比较

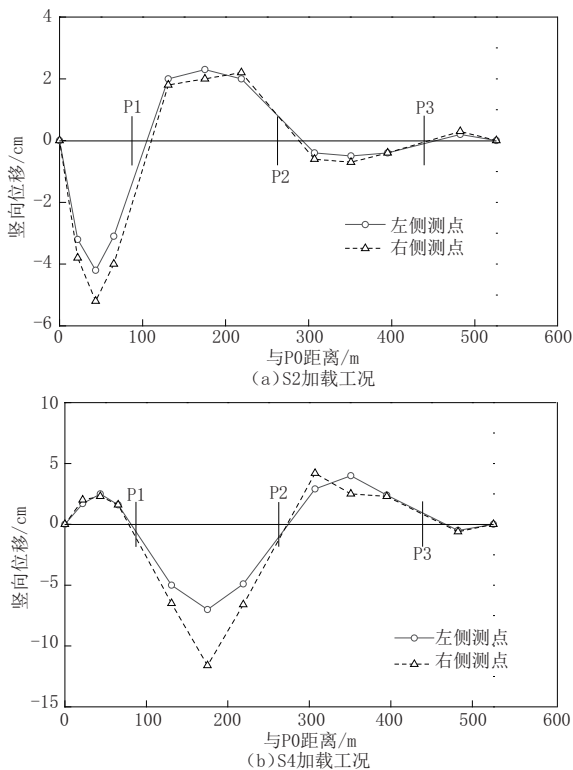


图4 偏载作用下钢梁竖向挠度理论与实测结果

移变化情况。

各主要加载工况下P1~P3塔塔顶纵向变形实测结果与理论值比较见图5(图中变形以向P4台侧为正)。由图5可见:各主塔塔顶纵向变形的实测结果小于理论值,比值在0.54~0.94之间;其中,中塔塔顶位移显著大于边塔,P1索塔塔顶最大纵桥向位移

为9.2 cm(理论值为11.5 cm),P2索塔塔顶最大纵桥向位移为13.3 cm(理论值为15.2 cm),P3索塔塔顶最大纵桥向位移为-8.6 cm(理论值为-11.4 cm)。

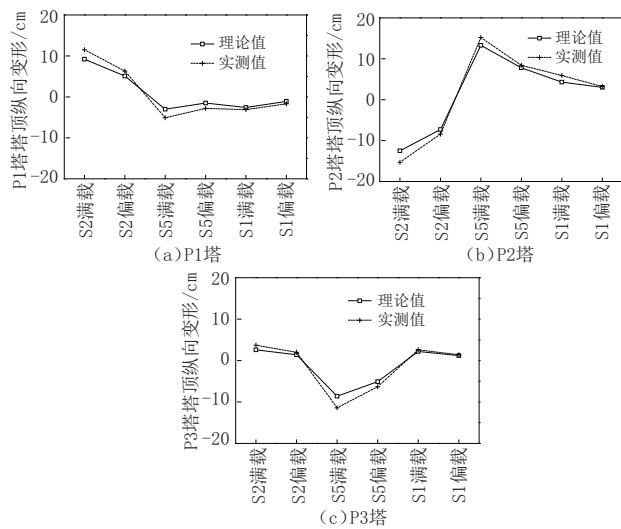


图5 P1~P3塔塔顶纵向变形实测结果与理论值比较

3.3 主梁应力

对称加载工况下,主梁截面应力测点的实测结果与理论值比较见图6和图7。

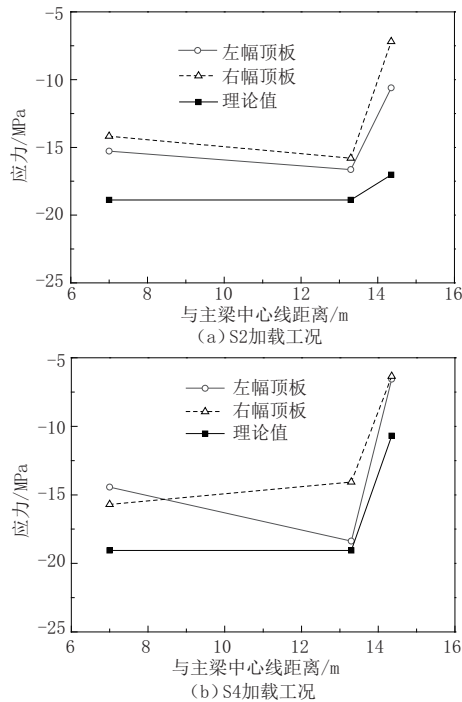


图6 对称加载工况下钢梁顶板应力理论与实测结果比较

由图6、图7可知:各试验控制断面主要应力测点的实测结果均小于理论值,校验系数在0.42~0.97之间。主梁顶板最大压应力为-18.38 MPa(理论值为-19.05 MPa),最大拉应力为4.46 MPa(理论值为7.14 MPa);底板最大拉应力为48.30 MPa(理论值为50.32 MPa),最大压应力为-14.65 MPa(理论值为-15.45 MPa)。对称荷载下主梁断面对称测点的应力

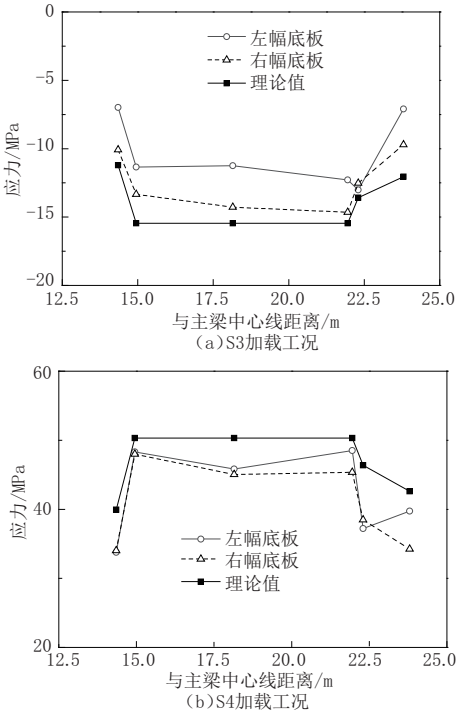


图7 对称加载工况下钢梁底板应力理论值与实测结果比较

相近,证明主梁沿纵向的整体刚度对称性良好。此外,受剪力滞效应和桥面横坡的影响,顶板、底板纵向应力在横断面的分布存在不均匀现象。卸载后,各点的残余应变均小于5%,结构处于良好的线弹性工作状态。

4 动力荷载下结构整体力学行为

在动载试验中,2 辆车以不同速度匀速驶过桥面,采用动态应变采集仪采集控制断面上的动应力时程变化。选取跨中 S4 断面作为代表截面,同一截面上不同测点的应力时程图见图 8。

由图 8 可见:顶面测点基本表现为压应力,最大应力峰值约为 -5.2 MPa;底面测点基本表现为拉应力,最大应力峰值约为 10.1 MPa。主梁上下游对称测点的数据呈现良好的对称分布。

在不同行车速度下,顶底板的动应力时程图见图 9。由图 9 可见:结构冲击系数随行车速度变化不明显。

在有障碍行车的工况下,S4 截面的动应力时程比较见图 10。由图 10 可见:车辆跨越障碍物时有一定冲击作用;在无障碍情况下,钢梁顶底板冲击系数均小于 0.05,有障碍时,桥面板纵桥向测点和底板测点的应力冲击系数均有明显提高,最大值为 0.29。

5 结 语

(1)圆形截面独柱塔几何非线性明显,在最不利

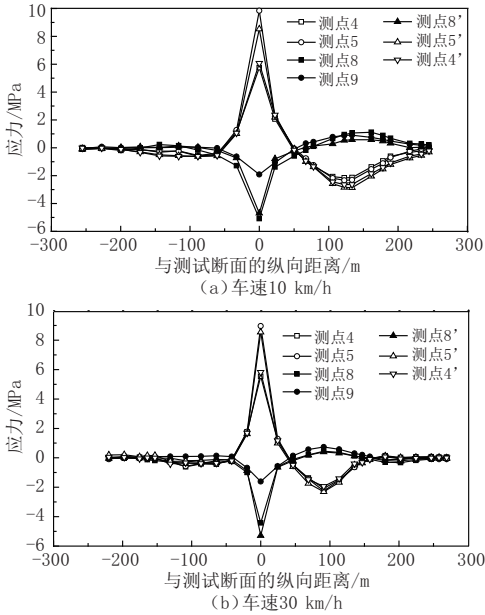


图8 S4断面动应力时程

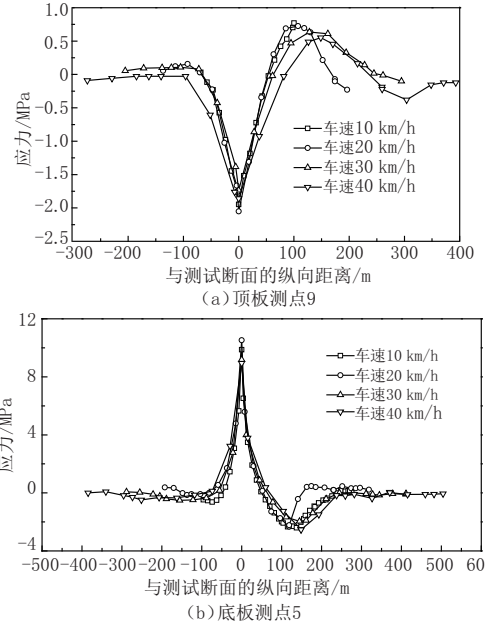


图9 不同行车速度下动应力时程比较

静力荷载作用下,三塔斜拉桥的主梁及主塔位移较大,且中塔变形大于边塔变形。这在设计与运营阶段值得关注,此类桥梁设计时需着重考虑圆形塔的刚度效应及几何非线性影响。

(2)超宽三塔钢箱梁斜拉桥主梁剪力滞效应非常明显,在最不利静力荷载作用下,主梁截面应力分布非常不均匀,且受横坡及局部荷载效应影响较显著。

(3)此类桥梁的应力冲击效应非常明显,在行车及有障碍行车情况下,钢梁顶底板的应力冲击系数最大为 0.29。这表明实际运营中应关注桥面铺装的损伤,避免跳车带来的影响。

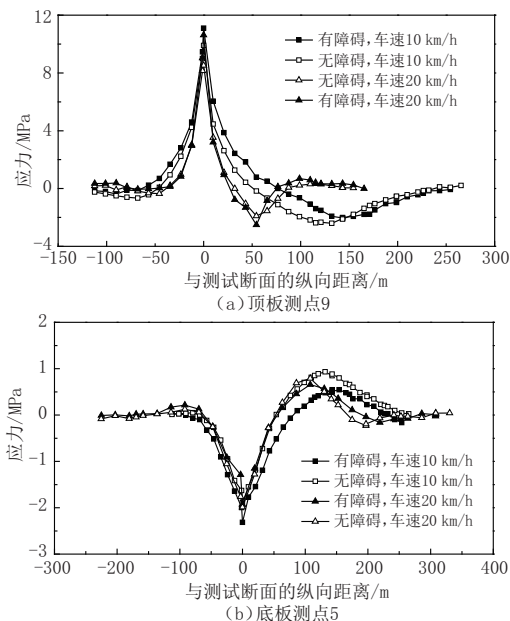


图10 有障碍与无障碍的动应力时程比较

参考文献:

- [1] 李忠三. 基于静动力特性的多塔长跨斜拉桥结构体系刚度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [2] 刘喆. 多塔斜拉桥合理结构体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [3] 张强, 刘汉顺, 王东晖, 等. 马鞍山长江公铁大桥主跨超千米三塔斜拉桥设计[J]. 桥梁建设, 2023, 53(增刊2): 16-21.
- [4] 易伦雄. 洞庭湖主跨406 m三塔铁路斜拉桥设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 86-90.
- [5] CHAI Shengbo, LI Liuhao, WANG Xiulan. Study on asymmetric arrangement ratio of main span stay cables of multi-tower cable-stayed bridge[J]. Structures, 2024(64): 106539-1~8.
- [6] CHAI Shengbo, ZHANG Rulin, WANG Xiulan, et al. Asymmetric arrangement of crossed cables in multitower cable-stayed bridges based on structural stiffness[J]. Journal of Bridge Engineering, 2023(28): 04022142-1~11.
- [7] CUI Bing, WU Huanling, ZHAO Canhui, et al. Steel-concrete composite cable-stayed bridge-main bridge of the jiangxinzhou yangtze river bridge at nanjing[J]. Structural Engineering International, 2023(33): 107-114.
- [8] 解增援. 超宽混凝土自锚式悬索桥主梁空间受力规律分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [9] 李刚, 肖林, 张伟勇, 等. 公铁平层斜拉桥超宽幅钢箱梁节段模型试验及活载作用效应研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(3): 47-54.
- [10] 李元兵, 张启伟, 季云峰. 千米级斜拉桥结构静力行为试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 495-500; 523.
- [11] 陈华婷, 李德旺, 张文学, 等. 公铁两用桥公路组合桥面板车辆荷载试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 211-224.
- [12] ALAMPALLI S, FRANGOPOL D, GRIMSON J, et al. Bridge load testing: state-of-the-practice[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022(27): 1-16.
- [13] 朱利明, 陈彦铭, 李军堂. 半飘浮体系斜拉桥荷载试验有限元分析影响因素研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 72-76.
- [14] 王祥寿, 张晨, 康新章, 等. 武汉青山长江公路大桥主桥荷载试验有限元分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(增刊1): 3-67.

(上接第58页)

技术手段,旨在通过优化道路绿化带设计,提升雨水渗透、滞留和净化能力,从源头上减小雨水径流总量,达到缓解城市内涝的目的,同时也能很好地将传统观赏性景观绿化带转变为功能性绿化带。但在下凹式绿带改造时,应充分考虑绿带内已建成的各项市政设施,如路灯杆、标志标牌杆等,要充分评估其

迁改的难度和工程造价,而不是盲目地将改造项目按照新建项目来做。

参考文献:

- [1] 周飞祥. 既有市政道路海绵城市改造案例中若干关键问题探讨[J]. 中国给水排水, 2022, 38(12): 100-106.