



罗泾港区老引桥改造方案研究

刘傲祥¹, 刘国宝²

(1. 辽宁筑港交通工程技术研究有限公司, 辽宁 大连 116023; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 罗泾港区老引桥存在承载能力不足、桥面营运空间不足及结构老化等问题。为实现改造方案的科学决策, 采用层次分析法(AHP)构建包含5个一级指标(进度、成本、安全、质量、环保)和13个二级指标的量化评价体系。经专家基于1-5标度法构建判断矩阵并通过一致性检验, 确定成本与进度为核心评价维度。对3种方案展开定量比选: 方案1“中间增加排架”(新增排架间距至13.5 m, 利用原有桩基)、方案2“维持27 m跨度补桩”、方案3“全拆新建40 m引桥”。结果表明, 方案1综合得分4.16分(满分5分), 较方案2(3.58分)和方案3(2.45分)优势显著, 其直接费用较全拆方案降低20%, 工期缩短30%; 尽管方案1行洪断面减少, 但优化桩基布置并增设防撞措施可有效降低洪水影响。层次分析法可有效解决多目标决策难题, 所构建的量化模型为港口老引桥改造提供可复制的决策框架, 对同类工程方案比选具有重要参考价值。

关键词: 引桥改造; 层次分析法; 方案比选

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0100-06

Scheme for old approach bridge renovation in Luoqing port area

LIU Aoxiang¹, LIU Guobao²

(1. Liaoning Port Design Institute for Transportation Engineering Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: There are the insufficient bearing capacity, inadequate operational space, and structural aging of the old approach bridge in Luoqing port area. To achieve scientific decision-making for the renovation scheme, we build a quantitative evaluation system with 5 primary indicators (progress, cost, safety, quality, environmental protection) and 13 secondary indicators by the analytic hierarchy process (AHP). After experts built judgment matrices by the 1-5 scaling method and passed consistency checking, we identify cost and progress as core evaluation dimensions, and quantitatively compare three schemes including scheme 1 (adding piers to reduce span to 13.5 m with existing piles), scheme 2 (supplementing piles to maintain 27 m span), and scheme 3 (full demolition and reconstruction of a 40 m approach bridge). The results show scheme 1 scored highest (4.16/5), outperforming scheme 2 (3.58) and scheme 3 (2.45), with 20% lower direct costs and 30% shorter construction period. Although scheme 1 reduces flood discharge section, optimizing pile layout and anti-collision measures mitigate flood impacts. AHP can effectively solve the problem of multi-objective decision-making, providing a replicable quantitative framework for port approach bridge renovation and referencing similar projects.

Keywords: approach bridge renovation; analytic hierarchy process; scheme comparison and selection

罗泾港区作为上海港的重要组成部分, 对促进区域经济发展和提升港口竞争力具有不可替代的作用。为贯彻国家及上海市环保和生态建设要求, 顺应“散改集”发展趋势, 服务交通强国战略和长江经济带发展, 罗泾港区全面开展绿色港口

建设。罗泾港区原有的老引桥暴露出承载能力不足、桥面营运空间不足等诸多问题, 严重制约了港口的进一步发展。为此, 对老引桥进行改造显得尤为迫切且必要。本文采用层次分析法(AHP)^[1-2], 结合罗泾港区的实际情况, 构建一套全面的引桥

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 刘傲祥(1995—), 男, 工程师, 从事水运工程设计工作。

改造方案评价指标体系,邀请行业专家对各指标进行打分以确定权重,进而对多个改造方案进行全方位的比选分析,涵盖技术、经济、运营影响等多个关键方面,最终确定最优的引桥改造方案,旨在为罗泾港区的安全高效运营提供有力保障,并为类似港口工程改造提供经验借鉴。

1 工程概况

1.1 现状

罗泾港区位于长江入海口南岸,是上海港的重要组成部分,主要承担煤炭、矿石等大宗货物的装卸运输任务,拥有丰富的水资源和便捷的交通条件,为区域经济发展提供了有力支撑。老引桥建成年限长、设计标准低,随着港区“散改集”的推进,出现承载能力不足、结构安全性和适应性变差等问题,如梁体裂缝、混凝土剥落、钢筋锈蚀等病害,严重影响正常使用和安全运营。

1.2 设计条件

1) 建设尺度:老引桥面宽 21.5 m,通过改扩建的形式使引桥面宽增加至 40 m。

2) 地质条件:工程场地内土层自上而下依次为淤泥、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、黏土、粉质黏土、粉砂夹砂质粉土、粉砂等,其中最下方粉砂层为工程桩基持力层,此层顶高程为-52 m,由此确定桩基平均长度为 59 m。

3) 流动机械荷载:老引桥上通过皮带输送机运输煤炭,可通行 10 t 平板车,以及 25 t 轮胎吊空载通行,均载 10 kN/m^2 ;改造后引桥可通行流动机械包括汽车起重机、集卡车、自动化集装箱运输车(automated intelligent vehicle, AIV)等。70 t 汽车起重机(检修设备)空载通过;集装箱拖挂车采用 TR-80 集卡车荷载;AIV 荷载共 4 轴,轴距为 $1.65 \text{ m}+6.00 \text{ m}+1.65 \text{ m}$,每轴 2 轮,轮距 2.5 m,满载运行状态时轮压为 125 kN。运行时前后车辆最小轴距为 5 m,引桥设 6 车道,每条车道均考虑有 AIV 荷载同时存在。

4) 施工条件:场地内水深大于 6 m,可以使用大型打桩船和起重船作业。

5) 防洪要求:根据防洪要求,引桥排架间距

不可小于 16 m。

6) 设计使用年限:50 a。

7) 抗震要求:场地的抗震设防烈度为 7 度,所属的设计地震分组为第二组,地基土属软弱土,场地类别为 IV 类,设计基本地震加速度为 $0.10g$ 。

2 改造方案

针对老引桥上部结构已不满足承载力需求的问题,采用拆除重建的方式替换上部结构。引桥上部结构可选用空心板梁、空心板或小箱梁 3 种结构形式,均为预应力结构。其中,空心板梁和空心板结构适用于 16~22 m 排架间距,小箱梁结构适用于 20~35 m 排架间距。排架间距小于或等于 20 m 时,空心板方案投资较低;排架间距大于 20 m 时,小箱梁结构投资较低^[3-4]。

针对下部结构桩基承载力不足的问题,通过增加桥梁基础,增加桩基等形式提升桥梁的基础承载能力^[5-7]。

针对引桥面宽度不足的问题,为防止桥梁拓宽对旧桥预应力造成损坏,采用上下部均不连接的拼接方式^[8]。

为了针对性地解决老引桥面临的问题,本文最终拟定 3 种改造方案。

2.1 方案 1

拆除引桥上部现浇面层、栏杆及预应力空心板梁等;在原有引桥每跨中间位置增加 1 排桩基,灰堤内陆地结构段采用陆地打设直径 800 mm 的预应力高强度混凝土(PHC)直桩,每个排架设置 5 根。新桩基顶部现浇钢筋混凝土帽梁,新老帽梁上方安装厚 0.8 m 预应力空心板,板梁上方现浇厚 120 mm 混凝土面层,面层上方磨耗层厚约 50 mm,顶高程 7.5 m。改造后的引桥排架间距为 13.5 m。在原有引桥东侧新建宽度 18.5 m 的引桥,与西侧改造后的结构共同形成宽 40 m 的新引桥结构。新建引桥排架间距 27 m,采用水上打设直径 800 mm 的 PHC 叉桩,每个排架设置 8 根;桩基上方现浇帽梁,帽梁上方安装高 1.8 m 装配式预应力小箱梁,箱梁上方现浇厚 100 mm 面层,面层上方磨耗层厚约 50 mm,顶高程 7.5 m。方案 1 断面见图 1。

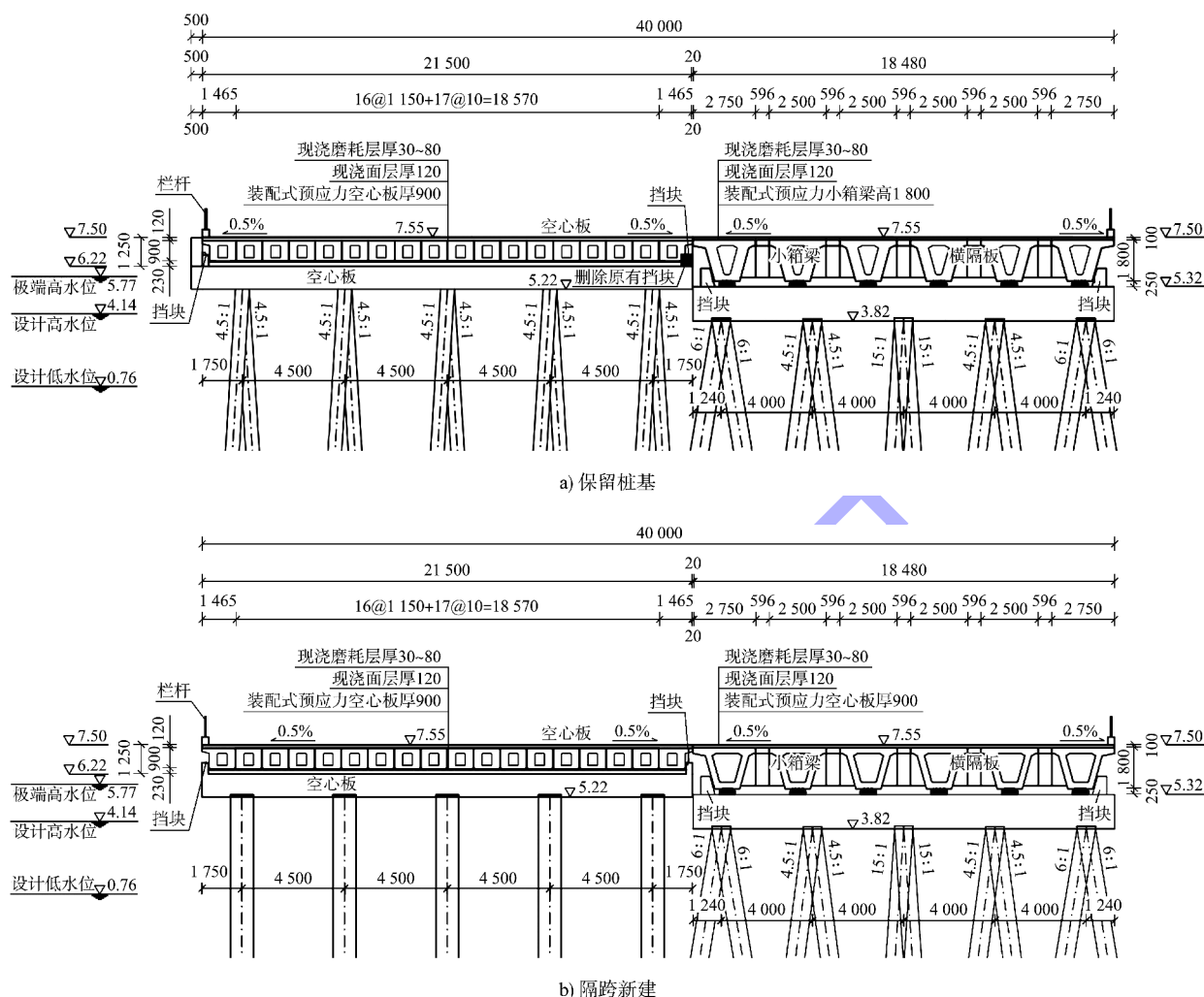


图 1 方案 1 断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 1 Section of scheme 1 (dimension: mm; elevation: m)

2.2 方案 2

拆除引桥上部现浇面层、护轮槛、预应力空心板梁以及帽梁;在原引桥排架下方补充桩基,

打设直径 800 mm 的 PHC 桩,每个排架补充 4 根。

上部结构以及西侧扩建方案与方案 1 保持一致。方案 2 断面见图 2。

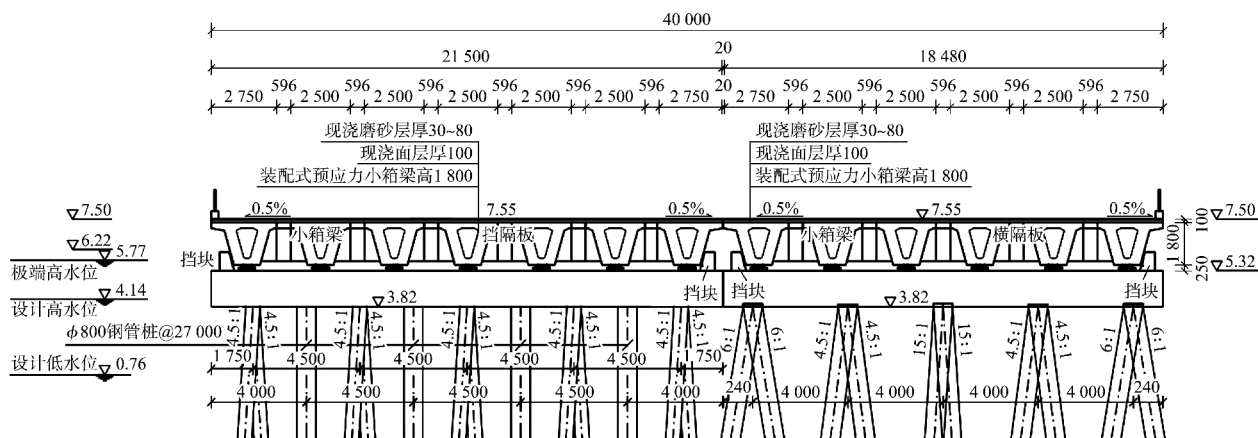


图 2 方案 2 断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 2 Section of scheme 2 (dimension: mm; elevation: m)

2.3 方案 3

拆除原引桥结构后新建宽 40 m 引桥, 排架间距 27 m, 灰堤内陆地结构段采用陆地打设直径 800 mm 的 PHC 直桩, 每个排架设置 20 根, 桩间距 4.2 m; 桩基上部新建帽梁, 帽梁上方安装高 1.8 m

装配式预应力小箱梁, 箱梁上方为现浇厚 100 mm 混凝土面层, 面层上方磨耗层厚约 50 mm, 顶高程 7.5 m, 引桥两侧为现浇护轮槛并设置栏杆。方案 3 断面见图 3。

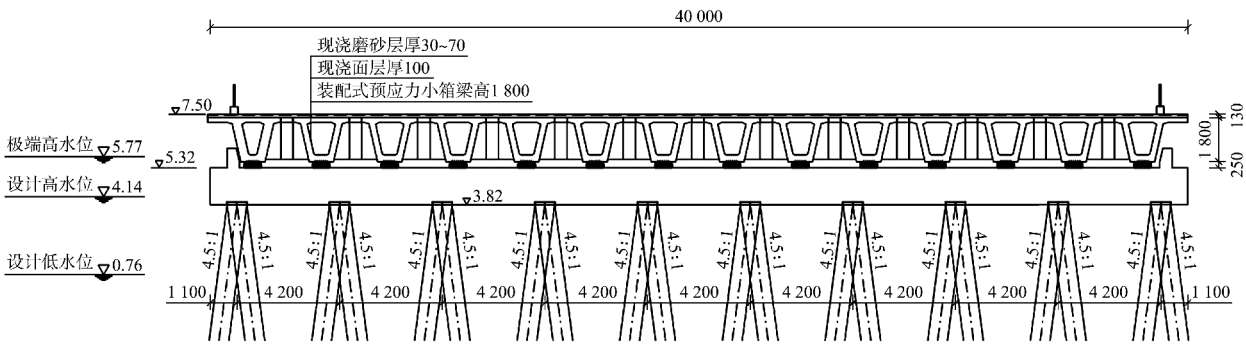


图 3 方案 3 断面 (尺寸: mm; 高程: m)
Fig. 3 Section of scheme 3 (dimension: mm; elevation: m)

3 个结构方案各有特点, 方案 1 保留原结构桩基与帽梁, 增加排架后安装 13.5 m 空心板梁, 最大限度地利用了原有结构, 造价较少, 但增加排架后, 过水断面减小。方案 2 只利用原有引桥桩基础, 拆除帽梁后进行补桩处理, 在原有桩基间补桩施工难度较大, 新老桩基上方浇筑帽梁, 整体性较差, 但维持排架间距不变, 不影响过水断面。方案 1 与 2 均利用部分原结构进行改造, 东侧再扩建引桥, 原引桥寿命较少, 新老结构寿命周期不同。方案 3 则采用全部拆除后新建宽 40 m 引桥, 拆除量较大, 造价高, 但因为是全新结构, 拥有完整的生命周期。同时方案 1 和 2 可以利用老引桥结构作为施工通道对扩建引桥施工大幅节省施工工期。

3 基于层次分析法的定量评价模型

3.1 评价指标体系构建

依据决策问题将相关因素分为目标层、指标层和方案层, 构建有序的递接层次结构。基于工程特点以加快进度、节约成本、保障安全、保证质量、施工环保为原则, 选择进度、成本、安全、质量、环保等 5 个一级指标^[9-10]和 13 个二级指标, 见表 1。

表 1 老引桥改造方案评价指标

Tab. 1 Evaluation indexes for old approach bridge renovation schemes

一级指标	二级指标	指标说明
进度 B ₁	施工工期 C ₁₁	反映工期长短, 工期越短越好
成本 B ₂	直接费用 C ₂₁	资源投入、现场准备、增加工程费用等直接成本, 成本越低越好
	间接效益 C ₂₂	因工期提前/滞后导致人料机间接效益增/减, 增加效益越多越好
安全 B ₃	结构吊装风险 C ₃₁	结构自身重力越大, 个数越多, 吊装风险越大
	碰桩风险 C ₃₂	在老引桥原有桩基处打桩越多, 碰桩风险越大
	行洪风险 C ₃₃	结构过水断面越大越安全
	抗震风险 C ₃₄	结构整体性越强, 桩基布置越合理, 风险越低
质量 B ₄	结构耐久性 C ₄₁	结构使用年限越长, 耐久性越好
	结构安装质量 C ₄₂	对上部结构安装质量的影响程度, 安装质量理论优良率越高越好
环保 B ₅	噪声污染 C ₅₁	场地噪声值, 越低越好
	空气污染 C ₅₂	增加场地空气质量指数, 越低越好
	固态废弃物污染 C ₅₃	掉落的渣土等固废数量, 越少越好
	水污染 C ₅₄	对长江水环境的影响, 越低越好

3.2 构建判断矩阵

依据 1-5 标度法赋予相应的判断值, 构建判断矩阵。一级指标和二级指标的判断矩阵及特征向量见表 2~6。

表 2 一级指标 B 的判断矩阵及特征向量
Tab. 2 Judgment matrix and eigenvector of primary index B

指标	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	特征向量
B ₁	1	1	2	4	4	1.635
B ₂	1	1	2	4	4	1.635
B ₃	1/2	1/2	1	3	3	0.971
B ₄	1/4	1/4	1/3	1	1	0.379
B ₅	1/4	1/4	1/3	1	1	0.379

表 3 二级指标 C₂ 的判断矩阵及特征向量
Tab. 3 Judgment matrix and eigenvector of secondary index C₂

指标	C ₂₁	C ₂₂	特征向量
C ₂₁	1	1	1
C ₂₂	1	1	1

表 4 二级指标 C₃ 的判断矩阵及特征向量
Tab. 4 Judgment matrix and eigenvector of secondary index C₃

指标	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	特征向量
C ₃₁	1	1/3	3	5	1.495
C ₃₂	3	1	4	5	2.884
C ₃₃	1/3	1/4	1	3	0.707
C ₃₄	1/5	1/5	1/3	1	0.537

表 5 二级指标 C₄ 的判断矩阵及特征向量
Tab. 5 Judgment matrix and eigenvector of secondary index C₄

指标	C ₄₁	C ₄₂	特征向量
C ₄₁	1	1/2	0.667
C ₄₂	2	1	1.333

表 6 二级指标 C₅ 的判断矩阵及特征向量
Tab. 6 Judgment matrix and eigenvector of secondary index C₅

指标	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	特征向量
C ₅₁	1	1/2	1/3	1/4	0.380
C ₅₂	2	1	1/2	1/2	0.725
C ₅₃	3	2	1	1/3	1.031
C ₅₄	4	2	3	1	1.864

3.3 确定指标权重

通过计算判断矩阵的最大特征根和对应的特征向量,归一化后得到各准则的权重向量。评价指标权重计算结果见表 7。可以看出,成本和进度为核心评价指标。

表 7 评价指标权重计算结果
Tab. 7 Calculation results of evaluation index weights

一级指标	权重/%	二级指标	权重/%	综合权重
B ₁	32.700	C ₁₁	100.000	32.700
B ₂	32.700	C ₂₁	50.000	16.350
		C ₂₂	50.000	16.350
B ₃	19.427	C ₃₁	26.600	5.177
		C ₃₂	51.300	9.966
		C ₃₃	12.600	2.448
		C ₃₄	9.500	1.846
B ₄	7.587	C ₄₁	33.333	2.529
		C ₄₂	66.667	5.058
B ₅	7.587	C ₅₁	9.497	0.721
		C ₅₂	18.132	1.375
		C ₅₃	25.763	1.955
		C ₅₄	46.608	3.536

3.4 评分标准

将改造方案指标设定 3 个评价分级,即 V₁ 为极好、V₂ 为较好、V₃ 为一般,并给出每一个分级赋分,见表 8。

表 8 评级赋分
Tab. 8 Rating score

评价等级	V ₁ (极好)	V ₂ (较好)	V ₃ (一般)
赋分	5	3	1

3.5 方案评分与排序

对各改造方案在主要技术指标上的表现,依据上述评分标准进行打分,并将各指标得分与相应的权重相乘后求和,得到各方案的综合得分。改造方案指标评价各等级人数见表 9,3 种方案综合得分见表 10(满分为 5 分)。

表 9 改造方案指标评价各等级人数
Tab. 9 Number of people for each grade in the renovation scheme index evaluation 人

指标	方案 1			方案 2			方案 3		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
C ₁₁	5	0	0	2	2	1	0	1	4
C ₂₁	2	3	0	4	1	0	1	1	3
C ₂₂	2	3	0	4	1	0	1	1	3
C ₃₁	1	3	1	1	3	1	3	2	0
C ₃₂	1	3	1	1	3	1	3	2	0
C ₃₃	1	3	1	1	3	1	3	2	0
C ₃₄	1	3	1	1	3	1	3	2	0
C ₄₁	1	3	1	1	3	1	3	2	0

续表9

指标	方案 1			方案 2			方案 3		
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃	V ₁	V ₂	V ₃
C ₄₂	1	3	1	1	3	1	3	2	0
C ₅₁	0	1	4	0	1	4	0	1	4
C ₅₂	0	1	4	0	1	4	0	1	4
C ₅₃	0	1	4	0	1	4	0	1	4
C ₅₄	0	1	4	0	1	4	0	1	4

表 10 3 种方案综合得分

Tab. 10 Comprehensive score of three schemes

方案	综合得分
1	4.16
2	3.58
3	2.45

4 结论

1) 通过层次分析法量化比选, 方案 1“中间增加排架”以综合得分 4.16 分成为最优方案, 其核心优势在于充分利用原有结构, 较全拆方案节省直接成本 20%, 缩短施工工期 30%, 且结构吊装风险较低。

2) 方案 1 行洪断面因排架间距缩小至 13.5 m 而减小, 可通过优化桩基布置, 增设防冲撞措施提升行洪安全性, 同时增强新老结构连接整体性以降低抗震风险。

3) 本文建立的 5 个一级指标、13 个二级指标的评价体系与 AHP 量化模型, 为老引桥改造提供了融合技术、经济、环保的多维度决策框架, 其方法为罗泾港区老引桥改造提供了可复制的量化决策模型, 对同类工程的方案比选具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
WANG L F, XU S B. Introduction to analytic hierarchy process[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990.
- [2] 陈文, 谢栋明. 基于层次分析法的工程建设方案优选[J]. 新型工业化, 2018, 8(10): 110-114.
CHEN W, XIE D M. Optimization of engineering construction plan based on analytic hierarchy process[J]. The journal of new industrialization, 2018, 8(10): 110-114.
- [3] 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.

General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

- [4] 赵丽云, 刘国宝. 集装箱码头引桥不同结构造价比较[J]. 水运工程, 2024 (1): 31-35.
ZHAO L Y, LIU G B. Comparison of cost for different structures of container terminal approach bridges [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 31-35.
- [5] 公路桥梁加固设计规范: JTG/T J22—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Specifications for strengthening design of highway bridges: JTG/T J22-2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [6] 穆祥纯. 我国既有城市危桥改造的实践和研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018 (9): 47-50, 69.
MU X C. Practice and study on reconstruction of urban damaged bridges in China [J]. Urban roads bridges & flood control, 2018(9): 47-50, 69.
- [7] 刘赛. 公路桥梁养护管理与危桥加固改造技术的探究[J]. 建材发展导向, 2024, 22 (22): 99-101.
LIU S. Research on highway bridge maintenance management and dangerous bridge reinforcement technology [J]. Development guide to building materials, 2024, 22 (22): 99-101.
- [8] 徐廷霞, 李攀, 李岩. 既有拓宽改造混凝土梁桥现状研究[J]. 江西建材, 2018 (4): 154-155.
XU T X, LI P, LI Y. Study on existing widened and reconstructed concrete girder bridges[J]. Jiangxi building materials, 2018(4): 154-155.
- [9] 王梦, 马浩森, 冯悦, 等. 层次分析与模糊评价法在工程方案比选中的应用[J]. 工程管理学报 2023, 37(5): 117-122.
WANG M, MA H S, FENG Y, et al. Application of analytic hierarchy process and fuzzy evaluation method in engineering scheme selection [J]. Journal of engineering management, 2023, 37(5): 117-122.
- [10] 陈叙伸. 海洋石油平台工程可行性方案比选研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
CHEN X S. A comparison study on the feasibility plan of the offshore platform engineering project [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

(本文编辑 王璁)