

层次分析法在现役桥梁拆除工程中的研究与实践

贺小卫, 高宇, 王虎军

(西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 现役桥梁拆除方案的评价指标往往涉及多因素和多层次,造成拆除方案难以通过传统决策方法进行科学有效的评价,针对此问题,为了进一步提升方案决策的合规性和合理性,提出采用层次分析法来评价现役桥梁拆除方案。通过对现行规范和工程案例的分析,在综合考量后归纳了6种常用拆除方案和7种主要影响因素,建立了涉及多因素多变量的现役桥梁拆除方案评价模型。为验证评价模型的有效性,将其应用于陕西省西安市的某桥梁拆除工程中,通过评价模型最终选定了分段切割移除的方案;根据全过程各方参建单位的反馈,该方案得到了多数人的认可,进一步验证了评价模型的可靠性和实用性,可为同类项目提供有参考价值的工程案例。

关键词: 桥梁拆除;层次分析法;评价模型;群体决策

中图分类号: U445.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0181-05

Research and Practice of AHP in Bridge Demolition Project

HE Xiaowei, GAO Yu, WANG Hujun

(Xi'an Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

Abstract: The evaluation indexes of existing bridge demolition schemes often involve multiple factors and levels. As a result, it is difficult to conduct the scientific and effective evaluation of the demolition schemes through the traditional decision-making methods. Aiming at this problem, in order to further improve the compliance and rationality of the scheme decision, the analytic hierarchy process (AHP) is used to evaluate the demolition scheme of existing bridges. By analyzing the current regulations and engineering cases, six common demolition schemes and seven main influencing factors are concluded after all things considered. An evaluation model of bridge demolition scheme involving multiple factors and variables is established. To verify its effectiveness, the evaluation model will be used in a bridge demolition project located in Xi'an, Shaanxi Province. Finally, the segmented cutting removal scheme is selected through the evaluation model. According to the feedback of the participating units in the whole process, the scheme has been recognized by the majority of people, which further verifies the reliability and applicability of the evaluation model, and can provide a valuable engineering case for the similar projects.

Keywords: bridge demolition; analytic hierarchy process (AHP); evaluation model; group decision making

0 引言

根据2023年交通运输行业的发展统计公报,全国公路现役桥梁数量已达到107.93万座,总长度约为9 528.82万m,其中有大量桥梁因各种原因已无法满足使用要求,需要拆除,因此桥梁拆除方案评价体系的建立迫在眉睫。杨梓等^[1]归纳了多种常用的旧桥拆除工法并对其概念、优缺点、工作机理、适用条件及局限性进行了研究;陈金州等^[2]结合直觉模糊理论和MYCIN不确定因子,通过不确定因素证据信

息与权重,按照事实上不确定因素最大化的方法来构建最优的桥梁拆除方案决策;纪云涛等^[3]根据某库区高墩连续梁桥拆除方案进行了全方位研究并提出了最优拆除方案,最终按该方案进行桥梁拆除;刘永健等^[4]研究了桥梁拆除的特性及存在的问题,提出了基于数字孪生体的桥梁智能化拆除理念,归纳了桥梁智能拆除技术的发展现状,展望了基于数字孪生体技术的桥梁智能拆除的发展方向;白应华等^[5]应用有限元软件建立桥梁空间模型,分析了各施工阶段的力学和变形特性,并通过实时监控主梁各施工阶段的力学及变形行为,将主体结构的关键施工工况的监测数据与数值模拟结果进行分析比对,研究了拆除结构的力学及变形规律;李兵等^[6]

收稿日期: 2024-09-03

作者简介: 贺小卫(1991—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

归纳已有经验的基础上提出了桥梁爆破拆除新方法,研究了炮孔大小、布孔方法、炸药耗量、起爆路线、安全设施等技术措施。此外,相关国家标准^[7-8]和地方标准^[9-10]对于桥梁拆除的设计、施工及验收已形成了完整的指导体系。本文将对层析分析法在桥梁拆除方案评价体系构建中的应用进行深入探讨,并基于实际工程进行验证,以期为类似工程提供技术支持。

1 现役桥梁拆除方案评价模型

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是 T.L. Satty 在 20 世纪 70 年代结合网络系统理论与多目标综合评价方法,创造性地提出的一种考虑各个因素权重的决策分析方法。该理论是通过将复杂决策问题的本质、影响因素及其内在关联等进行综合考虑后,构建一个层次结构模型,随后利用少数定量信息,把感性化决策转变为理性化决策,从而为求解多准则和无结构特性的复杂决策问题提供一种理性化、数字化的综合决策方法。

1.1 层次分析法结构模型

根据《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)^[11]和《混凝土结构通用规范》(GB 55008—2021)^[12],在确定桥梁拆除评价准则时应以“减量化、资源化、再生利用”为基本原则。参照现有规范及相关研究成果,本模型涉及的桥梁拆除方案有:(1)整体移除;(2)部件移除;(3)分段切割移除;(4)直接破碎;(5)人工拆除;(6)爆破拆除。针对拆除方案确定的相应评价准则包含:(1)结构形式;(2)技术状况;(3)原桥施工方法;(4)环境条件;(5)再生利用;(6)施工速度;(7)工程造价。具体的层次分析法的结构模型如图 1 所示。

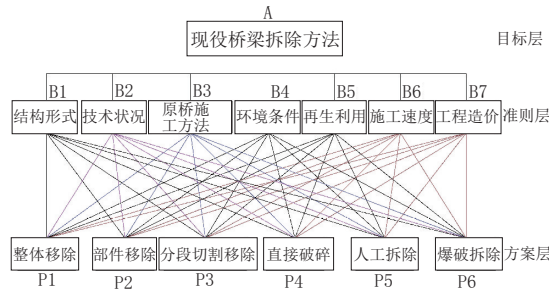


图 1 层次分析法结构模型

1.2 构造比较判别矩阵

依据层次结构模型建立判别矩阵,如式(1)、式(2)所示,其中式(1)为准则层对目标层的判别矩阵,式(2)为方案层对准则层的判别矩阵。

$$AB = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{13} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} \\ \frac{1}{a_{14}} & \frac{1}{a_{24}} & \frac{1}{a_{34}} & 1 & a_{45} & a_{46} & a_{47} \\ \frac{1}{a_{15}} & \frac{1}{a_{25}} & \frac{1}{a_{35}} & \frac{1}{a_{45}} & 1 & a_{56} & a_{57} \\ \frac{1}{a_{16}} & \frac{1}{a_{26}} & \frac{1}{a_{36}} & \frac{1}{a_{46}} & \frac{1}{a_{56}} & 1 & a_{67} \\ \frac{1}{a_{17}} & \frac{1}{a_{27}} & \frac{1}{a_{37}} & \frac{1}{a_{47}} & \frac{1}{a_{57}} & \frac{1}{a_{67}} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$B_nP = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{13} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ \frac{1}{a_{14}} & \frac{1}{a_{24}} & \frac{1}{a_{34}} & 1 & a_{45} & a_{46} \\ \frac{1}{a_{15}} & \frac{1}{a_{25}} & \frac{1}{a_{35}} & \frac{1}{a_{45}} & 1 & a_{56} \\ \frac{1}{a_{16}} & \frac{1}{a_{26}} & \frac{1}{a_{36}} & \frac{1}{a_{46}} & \frac{1}{a_{56}} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, a_{ij} 需依据专家咨询意见结合自身知识、经验和判断进行确定,其中*i*、*j*为不同层的因素代号,其确定标度如表 1 所列。

表 1 层次分析法两两对比标度

标度	取值规则
1	以上层某个因素为参考,本层因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较,具有同等重要性
3	以上层某个因素为参考,本层因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 相对 <i>j</i> 稍微重要
5	以上层某个因素为参考,本层因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 相对 <i>j</i> 明显重要
7	以上层某个因素为参考,本层因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 相对 <i>j</i> 强烈重要
9	以上层某个因素为参考,本层因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 相对 <i>j</i> 极端重要
2、4、6、8	<i>i</i> 与 <i>j</i> 两因素重要性比较结果处于以上结果的中间

1.3 单准则下层次排序及其一致性检验

求解判别矩阵的特征方程可以确定其权重向量和最大特征值,如式(3)所示。

$$|A - \lambda E| = 0 \quad (3)$$

式中: A 为判别矩阵; λ 为特征值; E 为权重向量。

由于方案对比的相对精度要求不是特别高,故可以采用和法或根法进行近似计算。和法计算方法如式(4)~式(7)所示。

第一步,对 A 进行归一化。

$$\tilde{A}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right) \tag{4}$$

式中: $\tilde{A}_{ij}$ 为 A 向量的归一化向量。

第二步,对 $\tilde{A}_{ij}$ 行求和。

$$\tilde{W} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{a_{1j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \sum_{j=1}^n \frac{a_{2j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \dots, \sum_{j=1}^n \frac{a_{nj}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right)^T \tag{5}$$

式中: $\tilde{W}$ 为判别矩阵的和向量。

第三步,对 $\tilde{W}$ 进行归一化。

$$W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \tag{6}$$

式中: $\omega_1 \sim \omega_n$ 为 $\tilde{W}$ 的归一化分量。

第四步,求最大特征值。

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{\omega_i} \tag{7}$$

式中: λ 为 A 向量的最大特征值。

根法计算方法的第二步如式(8)所示,为对 $\tilde{A}_{ij}$ 行求根。其余步骤与和法相同。

$$\tilde{W} = \left[\left(\prod_{j=1}^n \frac{a_{1j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}}, \left(\prod_{j=1}^n \frac{a_{2j}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}}, \dots, \left(\prod_{j=1}^n \frac{a_{nj}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^T \tag{8}$$

式中: $\tilde{W}$ 为判别矩阵的根向量。

为了保证式(1)和式(2)的相对一致性,对式(7)求出的 λ 进行一致性检验,如式(9)、式(10)所示。

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \tag{9}$$

$$CR = CI/RI \tag{10}$$

式中: CI 为一致性比例; RI 为平均随机一致性指标; CR 为一致性比例;当 $CR < 0.1$ 时证明判别矩阵可以接受,否则需要修正判别矩阵并保证 $CR < 0.1$ 。

2 模型应用

2.1 工程概况

拟拆除桥梁位于陕西省西安市,上跨现状高速,桥梁上部结构为四跨一联的单箱单室现浇预应力钢筋混凝土连续梁,跨径布置为 $(17 + 21 \times 2 + 17) = 76 \text{ m}$,横断面布置为 $(0.5 + 6 + 0.5) = 7 \text{ m}$,梁高 1.3 m ;墩柱分别位于现状高速中分带和排水边沟外侧,如图2、图3所示。

现状桥下高速路为双向6车道,中分带宽度为 3 m ,两侧车行道的宽度为 16 m ,该段高速路不仅是国家



图2 现状桥梁侧面照片



图3 现状桥梁桥面照片

高速公路网的重要组成部分,还是西安与咸阳国际机场的主要交通命脉,然而桥位 500 m 范围内的高速道路转弯半径小,且下行方向为下坡路段,车速较高、车流量大,故如何科学合理地制定桥梁拆除方案这一问题就显得极为重要。

2.2 建立 AB 矩阵

拟拆除桥梁上跨高速公路,交通功能十分重要。应相关主管部门的要求, B_6 (施工速度)为本次拆除方案的第一关键准则;根据《工程结构通用规范》(GB 55001—2021)和《混凝土结构通用规范》(GB 55008—2021), B_5 (再生利用)为本次方案的第二关键准则;根据工程实际情况和专家咨询意见,其余准则排序为 B_2 (技术状况) $>$ B_1 (结构形式) $>$ B_3 (原桥施工方法) $>$ B_4 (环境条件) $>$ B_7 (工程造价)。综合上述因素,构造判别矩阵如式(11)所示。

$$AB = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 3 & 1/5 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 2 & 3 & 1/5 & 1/3 & 4 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 1/3 & 1/5 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1/5 & 3 \\ 5 & 5 & 3 & 3 & 1 & 1/2 & 5 \\ 3 & 3 & 5 & 5 & 2 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

2.3 建立 B_nP 矩阵

对于准则层 $B_1 \sim B_7$ 而言,方案层 $P_1 \sim P_6$ 的评价标度有所不同,对评价标度的排序如表2所示。

表2 评价标度排序表

准则层	排序规则	排序
B1	影响越小越好	P6 爆破拆除>P4 直接破碎>P5 人工拆除>P3 分段切割移除>P2 部件移除>P1 整体移除
B2	影响越小越好	P6 爆破拆除>P4 直接破碎>P5 人工拆除>P3 分段切割移除>P2 部件移除>P1 整体移除
B3	影响越小越好	P6 爆破拆除>P4 直接破碎>P5 人工拆除>P3 分段切割移除>P2 部件移除>P1 整体移除
B4	影响越少越好	P3 分段切割移除>P2 部件移除>P1 整体移除>P5 人工拆除>P4 直接破碎>P6 爆破拆除
B5	越充分越好	P1 整体移除>P2 部件移除>P3 分段切割移除>P5 人工拆除>P4 直接破碎>P6 爆破拆除
B6	越快越好	P6 爆破拆除>P1 整体移除>P2 部件移除>P3 分段切割移除>P4 直接破碎>P5 人工拆除
B7	越小越好	P1 整体移除>P2 部件移除>P3 分段切割移除>P5 人工拆除>P4 直接破碎>P6 爆破拆除

2.4 层次单排序及其一致性检验

根据 1.2~1.3 节所述计算方法,得到结果如表 3、表 4 所示。可见,所有层次单排序的 CR 均小于 0.1,符合一致性要求;和法与根法计算的参数基本一致,其中λ仅相差 0.9%,CI 和 CR 仅相差 2.6%。

表3 合理选择方案的计算结果(和法)

矩阵	λ	CI	RI	CR
AB	7.619	0.103	1.32	0.078
B ₁ P	6.401	0.080	1.24	0.064
B ₂ P	6.401	0.080	1.24	0.064
B ₃ P	6.401	0.080	1.24	0.064
B ₄ P	6.442	0.088	1.24	0.071
B ₅ P	6.353	0.070	1.24	0.056
B ₆ P	6.497	0.099	1.24	0.080
B ₇ P	6.525	0.105	1.24	0.084

表4 合理选择方案的计算结果(根法)

矩阵	λ	CI	RI	CR
AB	7.604	0.101	1.32	0.076
B ₁ P	6.392	0.078	1.24	0.063
B ₂ P	6.392	0.078	1.24	0.063
B ₃ P	6.392	0.078	1.24	0.063
B ₄ P	6.438	0.087	1.24	0.070
B ₅ P	6.409	0.081	1.24	0.065
B ₆ P	6.487	0.097	1.24	0.078
B ₇ P	6.518	0.103	1.24	0.083

2.5 层次总排序

根据 2.4 节所列结果,得到方案层相对目标层的权重向量如式(12)、式(13)所示。

和法权重向量:

$(0.143, 0.163, 0.184, 0.113, 0.133, 0.264)^T \quad (12)$

根法权重向量:

$(0.144, 0.166, 0.183, 0.106, 0.128, 0.266)^T \quad (13)$

由此可见,各方案的优先顺序为:P6 爆破拆除>P3 分段切割移除>P2 部件移除>P1 整体移除>P5 人工拆除>P4 直接破碎。根据交通主管部门意见,不建议采用 P6 爆破拆除方案,故最终采用 P3 分段切割移除方案。

3 实施方案

桥梁拆除最终采用分段切割移除方案,其主要施工步骤如下:

- (1)左右幅分别实施临时交通管制并占用超车道搭门式贝雷支架;
- (2)在支架上设置安全防护设施;
- (3)安装 QYLQ300T 架桥机;
- (4)用 35 kW 金刚石绳锯沿待拆桥梁设计位置横向切割;
- (5)切割完成后用架桥机吊运至高速公路线外;
- (6)将构件运至拟利用位置进行重新利用。

本次桥梁拆除共用时 18 d,其中单幅中断交通时间仅为 40 min。现场施工情况如图 4 所示。



(a)架桥机架设完成图



(b)梁体切割图

图4 施工现场照片

4 结 语

桥梁拆除方案需综合考虑海量施工方法和众多影响因素,单纯依靠设计者和决策者自身的知识和经验判断进行定性分析已无法满足科学决策的需求,因此将层次分析法应用于桥梁拆除方案的确定,为设计者和决策者提供了一种可行的综合决策分析方法。本文通过分析得出主要结论如下所列。

(1)基于层次分析法建立了现役桥梁拆除方案评价模型,提出了现役桥梁拆除方案评价方法,为桥梁拆除方案的决策提供了定量分析的方法,为实现“减量化、资源化、再生利用”的桥梁拆除原则创造了有力支撑。

(2)评价模型引入了结构形式、技术状况、原桥施工方法、环境条件、再生利用、施工速度、工程造价等 7 个影响因素,将涉及多因素的感性决策转换为结合多个决策者意见的群体决策。

(3)评价模型具有灵活性、易操作性、可扩展性,综合决策者的主观判断和客观数据,并通过计算机软件进行辅助分析,可完成对任意现役桥梁拆除方案的评价,并可为模糊综合评价在桥梁方案设计中的应用奠定基础。

(4)通过在实体项目中的应用,证明了该模型在现役桥梁拆除方案评价中的实用性,对于跨越交通功能重要、社会影响大的高速公路的桥梁,其拆除方案应优先采用分段切割移除方案。

参考文献:

- [1] 杨梓,徐文平.旧桥拆除方法要览和案例简介[J].特种结构,2010(6):88-90.
- [2] 陈金州,张月,钟正,等.基于 MYCIN 与直觉模糊的桥梁拆除方案优选[J].土木工程与管理学报,2020,37(3):34-38,51.
- [3] 纪云涛,阮树良,冉志红,等.库区水下高墩连续 T 梁桥危桥拆除方法研究[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(增刊 2):115-122.
- [4] 刘永健,唐志伟,肖军,等.大跨度预应力混凝土桥智能拆除技术现状与展望[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):1-24.
- [5] 白应华,汤旭.预应力混凝土连续梁桥拆除施工监控研究[J].中外公路,2023,43(1):104-107.
- [6] 李兵,刘桂勇,徐进.大孔径在桥梁爆破拆除工程中的应用技术研究[J].爆破,2023,40(2):132-137.
- [7] CJJ 248—2016,城市梁桥拆除工程安全技术规范[S].
- [8] T/CECS G:M61-01—2019,公路混凝土桥梁拆除技术规程[S].
- [9] DG/TJ 08-2227—2017,桥梁拆除工程技术规程[S].
- [10] DB42/T 1253—2017,桥梁拆除技术规范[S].
- [11] GB 55001—2021,工程结构通用规范[S].
- [12] GB 55008—2021,混凝土结构通用规范[S].
- [13] 王琦,陈绪新.基于模糊层次分析法的再生水厂基坑施工风险评价[J].特种结构,2024(2):82-86.

(上接第 180 页)

- 程学报,2009(5):40-43.
- [3] 姚玲森.桥梁工程[M].3 版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

- [4] 杨智取.佛山某变截面连续钢箱梁桥的交工检测荷载试验分析[J].工程实际研究,2022,7(124):23-25.
- [5] CJJ/T 233—2015,城市桥梁检测与评定技术规范[S].