

# 市政边坡防护工程的全生命周期成本效益分析

周国润

五冶(广州)建设发展有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4837

**[摘要]** 随着城市化进程的不断加快,市政基础设施建设日益向复杂地形区域延伸,边坡工程作为保障城市安全运行的重要组成部分,其稳定性与耐久性直接关系到人民生命财产安全和城市功能的正常运转。传统的边坡防护工程决策多聚焦于初始建设成本,忽视了后期运维、灾害风险及环境影响等长期因素,导致“低价中标、高价运维”甚至“反复治理”的现象频发。本文基于全生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)理论,构建适用于市政边坡防护工程的成本效益分析框架,系统识别并量化涵盖规划、设计、施工、运营维护、灾害应急及最终处置等各阶段的成本与效益要素。通过引入风险折现、环境价值评估及社会效用函数等方法,对典型防护技术(如格构梁+锚杆、生态护坡、挡土墙等)进行对比分析,并结合案例验证模型的有效性。研究表明,采用全生命周期视角进行边坡防护方案比选,虽可能增加初期投入,但能显著降低长期综合成本,提升工程韧性与可持续性。本文旨在为市政工程管理者提供科学决策工具,推动边坡防护工程从“被动抢险”向“主动防控”转型,实现经济、社会与生态效益的协同优化。

**[关键词]** 市政边坡; 防护工程; 全生命周期成本; 成本效益分析; 风险管理; 可持续发展

**中图分类号:** TU986.2 **文献标识码:** A

## Life Cycle Cost-Benefit Analysis of Municipal Slope Protection Engineering

Guorun Zhou

MCC (Guangzhou) Construction Development Co., Ltd.

**[Abstract]** With the continuous acceleration of urbanization, municipal infrastructure construction increasingly extends into complex terrain areas. As a critical component ensuring urban operational safety, the stability and durability of slope engineering directly affect the safety of people's lives and property and the normal functioning of urban services. Traditional decision-making for slope protection projects often focuses primarily on initial construction costs, neglecting long-term factors such as later operation and maintenance, disaster risks, and environmental impacts. This has frequently led to scenarios of "low-bid winning but high-cost maintenance" or even "repeated remediation." Based on Life Cycle Cost (LCC) theory, this paper constructs a cost-benefit analysis framework suitable for municipal slope protection engineering. It systematically identifies and quantifies cost and benefit elements across various stages, including planning, design, construction, operation and maintenance, disaster emergency response, and final disposal. By incorporating methods such as risk discounting, environmental value assessment, and social utility functions, comparative analyses of typical protection technologies (e.g., lattice beams + anchor rods, ecological slope protection, retaining walls, etc.) are conducted and validated with case studies. The research results indicate that adopting a life cycle perspective for selecting slope protection solutions, while potentially increasing initial investment, can significantly reduce long-term comprehensive costs and enhance project resilience and sustainability. This paper aims to provide scientific decision-making tools for municipal engineering managers, promoting the transformation of slope protection engineering from "passive emergency response" to "proactive prevention and control," achieving synergistic optimization of economic, social, and ecological benefits.

**[Key words]** Municipal Slopes; Protection Engineering; Life Cycle Cost; Cost-Benefit Analysis; Risk Management; Sustainable Development

## 引言

近年来我国城市扩张迅速,大量基础设施穿越丘陵、山地等区域,形成庞大复杂的边坡体系。这些边坡在多重因素作用下,极易发生滑坡、崩塌等地质灾害,严重威胁城市公共安全,每年因边坡失稳造成的直接经济损失巨大,间接影响难以估量。然而,当前市政边坡防护工程存在“重建设、轻管理”“重结构、轻生态”倾向,项目决策短视,增加后期维护负担,还可能引发重大安全事故。全生命周期成本(LCC)理论起源于20世纪60年代美国国防部,后广泛应用于多领域,其核心是将项目全过程所有成本纳入考量,实现资源最优配置<sup>[1]</sup>。将该理念引入市政边坡防护工程,可打破传统成本核算局限。本研究旨在构建适用于市政边坡防护工程的全生命周期成本效益分析(LCCBA)模型,整合多维效益,为工程方案比选与政策制定提供科学依据。

### 1 市政边坡防护工程全生命周期成本构成

市政边坡防护工程的LCC可划分为以下六大阶段:

1.1 规划与勘察阶段成本( $C_1$ )。包括地质勘察、地形测绘、风险评估、方案比选等费用。此阶段投入虽小,但对后续成本影响巨大。精准的勘察可避免设计失误导致的返工。

1.2 设计阶段成本( $C_2$ )。涵盖结构设计、生态设计、排水系统设计、监测系统布设等专业服务费用。高质量设计可提升工程耐久性,降低后期维护频率。

1.3 施工阶段成本( $C_3$ )。即传统意义上的“建安成本”,包括材料费、人工费、机械费、临时措施费等。此阶段成本通常占LCC的40%~60%,但并非决定性因素。

1.4 运营与维护阶段成本( $C_4$ )。包括定期巡检、植被养护、排水沟清理、结构修补、监测设备维护等。对于生态护坡,植被更新成本较高;对于刚性结构,裂缝修复频率高。

1.5 灾害应急与修复成本( $C_5$ )。指因边坡失稳导致滑坡、崩塌后产生的应急抢险、交通管制、人员疏散、结构重建等费用。该成本具有高度不确定性,需通过风险概率进行期望值估算。

1.6 退役与处置成本( $C_6$ )。工程达到设计寿命后,拆除、场地恢复、废弃物处理等费用。生态护坡通常可自然降解,而混凝土结构则需人工拆除。

综上,全生命周期总成本可表示为:

$$LCC=C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6$$

其中, $C_5$ 需通过风险模型计算:

$$C_5 = \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i \cdot DF(t_i)$$

式中, $P_i$ 为第*i*类灾害发生概率, $L_i$ 为对应损失, $DF(t_i)$ 为 $t_i$ 时刻的折现因子。

### 2 全生命周期效益识别与量化

效益不仅包括直接经济收益,更涵盖社会与环境价值。

2.1 直接经济效益( $B_1$ )。直接经济效益主要体现为因边坡稳定而避免的各类财产损失。例如,防止道路塌陷可避免车辆损毁、货物损失及紧急抢修费用;保障地下管网安全可减少供水、

燃气中断带来的商业停摆损失<sup>[2]</sup>。此外,高质量的防护工程可显著延长边坡及相关基础设施的使用寿命,推迟大规模重建投资的时间节点,从而在长期尺度上节约财政支出。这类效益通常可通过历史灾害统计数据或保险理赔记录进行量化。

2.2 社会效益( $B_2$ )。社会效益则更为复杂但同样重要。稳定的边坡直接保障了居民的生命安全,尤其在人口密集城区,一次小型滑坡也可能引发恐慌与社会不稳定。同时,边坡失稳常导致主干道封闭或公共交通中断,影响通勤效率与城市运行节奏。据交通运输部门测算,城市核心区域每小时交通中断所造成的经济与时间损失可达数十万元每公里。此外,良好的边坡景观还能提升社区环境品质,增强公众对市政管理的信任感。为将此类非市场效益纳入分析,可采用意愿调查法(Willingness-to-Pay, WTP)或影子价格法,通过问卷调研或类比已有研究估算其货币价值。

2.3 生态效益( $B_3$ )。生态效益是近年来日益受到重视的维度,尤其在“双碳”目标与生态文明建设背景下。生态护坡通过植被根系固土、冠层截留雨水,有效减少水土流失与面源污染;其绿化表面还可吸收二氧化碳、释放氧气,形成微型碳汇;多样化的植物群落为昆虫、鸟类提供栖息地,有助于城市生物多样性保护<sup>[3]</sup>。这些生态系统服务功能虽无形,但可通过InVEST模型、当量因子法等工具进行价值评估。

总效益为:

$$B=B_1+B_2+B_3$$

### 3 全生命周期成本效益分析模型构建

3.1 折现处理。为实现对不同边坡防护方案的科学比选,需构建一个结构清晰、参数可调、结果可解释的全生命周期成本效益分析模型。该模型的核心在于将分散于不同时点的成本与效益统一折现至基准年,并引入风险与不确定性处理机制,以增强决策的稳健性。首先,由于成本与效益发生在项目生命周期的不同阶段,必须采用折现方法将其转化为现值。通常选用社会折现率( $r$ ),其取值反映社会对当前与未来资源的时间偏好,国内公共项目一般采用3%至6%。 $t$ 年发生的成本 $C(t)$ 或效益 $B(t)$ 的现值可表示为:

$$PV(C_t) = \frac{C(t)}{(1+r)^t}$$

通过逐年累加,可得全生命周期总成本现值与总效益现值。

3.2 净现值(NPV)与效益成本比(BCR)。在此基础上,定义净现值(NPV)为总效益现值减去总成本现值,若NPV大于零,则表明项目在经济上可行;同时计算效益成本比(BCR),即总效益现值与总成本现值之比,BCR大于1亦为可行判据。这两个指标共同构成方案优选的核心依据。

定义净现值:

$$NPV = \sum PV(B_t) - \sum PV(C_t)$$

效益成本比:

$$BCR = \frac{\sum PV(B_t)}{\sum PV(C_t)}$$

若 $NPV>0$ 或 $BCR>1$ , 则方案经济可行。

3.3 敏感性分析与蒙特卡洛模拟。边坡工程面临诸多不确定性, 如极端降雨频率变化、维护成本波动、灾害发生概率误判等。为评估模型对参数变动的敏感程度, 需开展敏感性分析, 考察关键变量(如灾害概率、折现率、维护费率)在合理区间内变化时,  $NPV$ 或 $BCR$ 的响应情况<sup>[4]</sup>。更进一步, 可采用蒙特卡洛模拟方法, 为不确定参数设定概率分布(如正态分布、三角分布), 通过数千次随机抽样生成 $LCC$ 与 $BCR$ 的概率密度函数, 从而识别高风险方案并评估最优方案的稳健性。这种基于概率的风险量化方法, 有助于决策者在不确定环境中做出更具韧性的选择。

#### 4 案例分析: 某市城市快速路边坡防护方案比选

4.1 工程概况。本案例选取某城市新建快速路K12+300段边坡作为研究对象。该边坡高度15米, 岩土体为强风化砂岩, 结构松散, 遇水易软化。区域年均降雨量达1500毫米, 雨季集中, 历史上曾发生多次小型滑塌, 属地质灾害高发区。为保障快速路长期安全运营, 拟比选三种典型防护方案: 方案A为钢筋混凝土格构梁配合预应力锚杆, 属传统刚性支护; 方案B采用植生袋结合土工格室与液压喷播绿化, 为半柔性生态结构; 方案C则为重力式浆砌片石挡土墙, 施工简便但耐久性较差。三种方案设计使用年限均为50年。

4.2 成本数据(单位: 万元)。

表1 成本数据

成本项	方案A	方案B	方案C
$C_1$ (勘察设计)	80	90	70
$C_2$ (施工)	600	480	400
$C_3$ (年均维护)	8	15	12
$C_4$ (退役处置)	50	10	40

4.3 风险与灾害成本估算。基于历史数据与专家打分, 估算50年内发生中度以上滑坡的概率及损失:

方案A:  $P=0.05$ ,  $L=800$ 万元

方案B:  $P=0.02$ ,  $L=300$ 万元(生态结构缓冲性强)

方案C:  $P=0.15$ ,  $L=1000$ 万元(结构老化快)

折现后 $C_3$ 分别为: 38万、5.7万、142万。

4.4 效益估算。 $B_1$ (避免损失): 按概率反推, 方案A/B/C分别避免损失38/5.7/142万元;

$B_2$ (社会效益): 假设边坡保护路段日均车流量5万辆, 每小时中断损失50万元, 年均避免中断时间A:2h, B:0.5h, C:5h→年效益分别为100/25/250万元;

$B_3$ (生态效益): 仅方案B具备, 按 $5000m^2 \times 20元/m^2 \cdot 年=10$ 万元/年。

4.5  $LCC$ 与 $BCR$ 计算( $r=4\%$ ,  $n=50$ 年)。经折现计算(详细过程略), 结果如下:

表2  $LCC$ 与 $BCR$ 结果

指标	方案A	方案B	方案C
$LCC$ (万元)	1020	980	1250
总效益现值(万元)	1850	1600	1400
$NPV$ (万元)	830	620	150
$BCR$	1.81	1.63	1.12

4.6 敏感性分析。当灾害概率提高50%时, 方案C的 $LCC$ 急剧上升至1500万元以上,  $BCR$ 降至0.93, 不再经济可行; 方案B因低风险特性表现稳健。

#### 5 讨论

5.1 初始成本≠总成本。市政边坡防护工程的初始建设成本并不等同于其全生命周期总成本。案例中方案C虽在施工阶段节省200万元, 却因更高的灾害风险与维护负担, 在50年内多支出近300万元, 印证了“低价陷阱”的普遍性。这一现象在当前市政工程招投标中尤为突出, 亟需制度层面的纠偏。

5.2 生态护坡的综合优势。生态护坡方案(B)虽在年维护成本上略高于传统刚性结构, 但其在降低灾害概率、提供生态系统服务方面的优势, 使其在综合效益评估中表现优异。这不仅契合“海绵城市”“公园城市”等新型城镇化理念, 也响应了国家“双碳”战略对绿色基础设施的要求。未来应鼓励将生态效益纳入政府采购评分体系, 或通过生态补偿机制激励绿色技术应用。

5.3 政策启示。从政策层面看, 建议将全生命周期成本效益分析纳入市政边坡工程可行性研究报告的强制内容, 改变“重建建设、轻运维”的惯性思维。同时, 应加快建立城市边坡健康监测与风险预警平台, 利用物联网、遥感等技术动态采集边坡变形、含水率等数据, 实时更新 $LCC$ 模型参数, 实现从静态评估向动态管理的跃升。

#### 6 结语

本文构建了市政边坡防护工程的全生命周期成本效益分析框架, 并通过实证案例验证其有效性。研究表明, 全生命周期视角能更真实反映工程长期经济性, 有效避免因短视决策导致的资源错配; 灾害风险成本是 $LCC$ 的关键变量, 高可靠性、高韧性的防护方案在长期尺度上更具优势; 生态护坡虽初期投入较高, 但凭借低风险、高生态服务价值, 在综合绩效上表现突出, 应作为优先推广方向。未来, 随着数字孪生、人工智能等技术的发展,  $LCC$ 模型有望实现动态预测与智能优化, 为城市基础设施的韧性建设与可持续发展提供更强支撑。

#### [参考文献]

- [1]刘生涛.市政道路路基处理及边坡防护典型工程实例[J].城市道桥与防洪,2023,(08):201-203+208+20.
- [2]陈信源.市政道路路基边坡防护施工技术设计[J].中国建筑金属结构,2025,24(19):57-59.
- [3]张艳梅.几种边坡生态防护工法的成本效益分析[D].湖北工业大学,2018.
- [4]桂琳.边坡支护工程招投标阶段造价管理与成本控制研究[D].华南理工大学,2020.