

公路施工中土石方调配优化对工程造价的控制作用探讨

何立锋

中铁长江交通设计集团有限公司 重庆 401121

【摘要】：公路工程施工中，土石方工程量通常占项目总造价的15%以上，其调配方案的合理性直接影响工程成本与进度。本文基于土石方调配的基本原理，结合某高速公路工程（K12+000~K28+500段）的实践案例，采用数据化管理和运输路径优化方法，分析调配优化对工程造价的控制作用。研究表明，通过精准计算土石方平衡、优化运输路线和合理配置机械设备，可有效降低工程成本8%~23%，缩短施工周期10%以上，同时减少碳排放和环境影响。本文为公路工程土石方调配提供了可量化的优化路径与实践参考。

【关键词】：土石方调配；公路施工；工程造价；运输路径优化；成本控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.047

引言

公路工程施工中，土石方工程通常占据项目总造价的15%~25%，是成本控制的关键环节。如何在保证施工质量和进度的前提下，合理调配土石方资源，已成为工程造价控制的核心课题。

传统的土石方调配多依赖经验判断和手工计算，存在运输路径不合理、设备利用率低、土石方平衡误差大等问题。土质类型也会影响开挖和运输的效率，不同土质的重量、湿度及稳定性需要特殊的设备和技术进行处理^[1]。据调查，因调配不当造成的资源浪费约占土石方总成本的5%~8%。随着信息化技术和智能化管理手段的引入，土石方调配正从粗放式向精细化、数据化方向转变。本文通过理论分析与工程实例相结合的方式，探讨土石方调配优化的实施路径及其对工程造价的控制效果，为同类工程提供参考。

1 土石方调配优化的基本原理

1.1 土石方调配的概念及其作用

土石方调配是指在公路工程施工过程中，根据项目设计要求和现场实际情况，对土方与石方的开挖、运输、填筑、堆放等进行系统规划和动态协调。其核心目标是在满足工程质量要求的前提下，实现“挖方尽量用于填方、远运尽量就近利用、弃方尽量减少”的资源最优配置。

某全长16.5km的高速公路项目为例，其土石方总量为218万 m^3 ，按综合单价35元/ m^3 计算，土石方工程直接费用达7630万元。通过合理调配，该项目实现了挖填平衡率92%，节约弃土场征地及运输费用约85万元。结果表明，土石方的合理调配对工程造价控制具有显著的直接效益。

1.2 优化调配的基本思路

(1) 精准计算——算准土石方量利用数字化测绘技术和BIM建模，将设计图纸中的土石方量按20m桩号段进行细化计算，并与实际地形测量数据进行对比修正。根据某项目经验，采用无人机航测+GIS分析，土石方量计算精度可达95%以上，

较传统人工测量提高10个百分点。

(2) 科学规划——优化调配方案根据“挖填平衡、就近利用、减少倒运”的原则，运用线性规划方法建立土石方调配数学模型，求解最优调配方案。设项目有 m 个挖方区、 n 个填方区，以总运输成本最小为目标函数，约束条件包括各挖方区供应量、各填方区需求量及运输能力限制，通过优化算法求解得到最优运输矩阵。

(3) 动态调控——优化过程管理采用信息化管理系统对调配过程进行实时监控，通过GPS定位跟踪运输车辆，利用车载终端采集运输次数、行驶路径、等待时间等数据，动态调整运输计划和设备配置，及时发现并解决调配过程中的偏差。

2 公路施工中土石方调配的现状与挑战

2.1 土石方施工中的常见问题

根据对多个公路项目的调研统计，土石方施工中常见问题及其影响程度如下：

问题类型	出现频率	典型表现	成本影响
土石方量估算偏差	60%	设计方量与实测方量偏差10%~20%	增加弃方/借方成本5%~8%
运输路径规划不合理	45%	平均运距比最优值增加15%~25%	运输成本上升8%~12%
设备配置不当	35%	设备利用率低于60%，闲置率30%以上	设备成本增加15%~20%
季节性施工影响	40%	雨季停工天数占总工期10%~15%	工期延误成本增加
弃土场管理混乱	30%	弃土超占地20%~30%	征地补偿费用增加

2.2 传统计算及调配方法的局限性

传统的土石方调配主要依赖手工计算和经验判断，其局限性体现在以下几个方面：

(1) 计算精度不足。传统方法采用断面法或方格网法计算土石方量，以 100m 或 50m 桩号为一个断面，假定断面间土方线性变化，实际地形复杂时误差可达 10%~15%。而采用三维激光扫描或无人机航测技术，可将误差控制在 3%~5% 以内。

(2) 优化程度有限。传统调配多采用“就近利用”的简单原则，缺乏全局优化意识。根据线性规划理论，当挖填方区数量超过 5 个时，人工判断难以找到最优方案。以某项目 8 个挖方区、6 个填方区的调配问题为例，理论上共有 48 条运输路径，人工判断只能覆盖其中 30% 的可行方案，而通过数学模型求解可覆盖全部方案，平均运距比人工方案缩短 12%~15%。

(3) 动态调整滞后。传统管理模式下，调配计划的调整主要依赖现场管理人员的经验判断，信息传递周期长，响应速度慢。当出现设备故障、天气变化等突发情况时，往往需要 2~3 天才能完成调配方案调整，造成施工停滞和资源浪费。

3 土石方调配优化的实施方法与案例

3.1 数据化管理与调配决策模式

(1) 建立数字化土石方模型采用无人机航测获取施工现场的数字高程模型 (DEM)，结合设计图纸建立三维土石方模型。

(2) 开发调配决策支持系统基于线性规划和动态规划理论，构建土石方调配优化模型。系统输入参数包括：挖方区位置、方量、土质类型 (共 m 个)，填方区位置、需求量、压实要求 (共 n 个)，运输路径长度、道路条件、限速要求 (共 $m \times n$ 条)，设备类型、台班费、工作效率、可用数量。

通过求解目标函数 $\text{Min } Z = \sum \sum C_{ij} \times X_{ij}$ ，得到最优运输矩阵，其中 C_{ij} 为第 i 挖方区至第 j 填方区的单位运输成本， X_{ij} 为调配方量。具体过程如下：

(3) 实施过程动态监控利用车载 GPS 和物联网传感器，实时采集运输车辆的位置、速度、油耗、载重等数据，通过数据分析识别异常情况 (如超速、偏离路线、等待时间过长)，自动触发预警并推送至管理人员。

3.2 土石方运输与处理的优化案例

(1) 问题描述与基础数据：该段全长 16.5km，根据地形和设计图纸，划分为 8 个挖方区和 6 个填方区，原方案采用就近利用原则，平均运距 7.5km。各区的土石方量及位置如下：

表 1 挖方区参数表

挖方区编号	桩号范围	方量 (万 m ³)	土质类型	位置坐标 (km)
W1	K12+000~K13+200	28.5	普通土	12.6
W2	K13+200~K14+500	32	硬土	13.8
W3	K14+500~K15+800	25	软石	15.2
W4	K15+800~K17+000	18	普通土	16.4
W5	K17+000~K18+500	35	硬土	17.8
W6	K18+500~K20+000	22	普通土	19.2
W7	K20+000~K21+500	30	软石	20.8
W8	K21+500~K23+000	27.5	硬土	22.2
合计	-	218	-	-

填方区编号	桩号范围	需求量 (万 m ³)	压实要求	位置坐标 (km)
F1	K15+000~K16+200	24	93%	15.6
F2	K16+200~K17+500	28	94%	16.8
F3	K18+000~K19+300	32	93%	18.6
F4	K19+300~K20+800	26	94%	20
F5	K21+000~K22+500	35	93%	21.8
F6	K22+500~K24+000	30	94%	23.2
合计	-	175	-	-

表 2 填方区参数表

挖方区编号	填方区编号	运距 (km)	土方量 (万 m ³)
W1	F1	12.6	28.5
W1	F2	13.8	28.5
W1	F3	15.2	28.5
W1	F4	16.4	28.5
W1	F5	17.8	28.5
W1	F6	19.2	28.5
W2	F1	13.8	32
W2	F2	15.0	32
W2	F3	16.4	32
W2	F4	17.6	32
W2	F5	19.0	32
W2	F6	20.4	32
W3	F1	15.2	25
W3	F2	16.4	25
W3	F3	17.6	25
W3	F4	18.8	25
W3	F5	20.0	25
W3	F6	21.2	25
W4	F1	16.4	18
W4	F2	17.6	18
W4	F3	18.8	18
W4	F4	20.0	18
W4	F5	21.2	18
W4	F6	22.4	18
W5	F1	17.8	35
W5	F2	19.0	35
W5	F3	20.4	35
W5	F4	21.6	35
W5	F5	23.0	35
W5	F6	24.4	35
W6	F1	19.2	22
W6	F2	20.4	22
W6	F3	21.6	22
W6	F4	22.8	22
W6	F5	24.0	22
W6	F6	25.2	22
W7	F1	20.8	30
W7	F2	22.0	30
W7	F3	23.4	30
W7	F4	24.6	30
W7	F5	26.0	30
W7	F6	27.4	30
W8	F1	22.2	27.5
W8	F2	23.4	27.5
W8	F3	24.6	27.5
W8	F4	25.8	27.5
W8	F5	27.0	27.5
W8	F6	28.2	27.5

注：挖方总量 218 万 m³，填方需求 175 万 m³，平衡后剩余 43 万 m³ 需弃置。

(2) 运输成本计算

① 单位运输成本计算公式： $C_{ij} = D_{ij} \times (C_{运} + C_{装} + C_{卸})$

其中：

D_{ij} ：第 i 挖方区至第 j 填方区的运输距离 (km)

$C_{运}$ ：运输单价 (元/m³ · km)，根据道路条件取 1.2~1.8 元/m³ · km

$C_{装}$ ：装车费用，取 2.5 元/m³

$C_{卸}$ ：卸车及摊铺费用，取 1.5 元/m³

② 运输距离矩阵 (部分节选)

挖方区	至 F1(15.6 km)	至 F2(16.8 km)	至 F3(18.6 km)	至 F4(20.0 km)	至 F5(21.8 km)	至 F6(23.2 km)
W1	12.6	13.8	15.2	16.4	17.8	19.2
W2	13.8	15.0	16.4	17.6	19.0	20.4
W3	15.2	16.4	17.6	18.8	20.0	21.2
W4	16.4	17.6	18.8	20.0	21.2	22.4
W5	17.8	19.0	20.4	21.6	23.0	24.4
W6	19.2	20.4	21.6	22.8	24.0	25.2
W7	20.8	22.0	23.4	24.6	26.0	27.4
W8	22.2	23.4	24.6	25.8	27.0	28.2

W1(12.6 km)	3	4.2	6	7.4	9.2	10.6
W2(13.8 km)	1.8	3	4.8	6.2	8	9.4
W3(15.2 km)	0.4	1.6	3.4	4.8	6.6	8
W4(16.4 km)	0.8	0.4	2.2	3.6	5.4	6.8
W5(17.8 km)	2.2	1	0.8	2.2	4	5.4
W6(19.2 km)	3.6	2.4	0.6	0.8	2.6	4
W7(20.8 km)	5.2	4	2.2	0.8	1	2.4
W8(22.2 km)	6.6	5.4	3.6	2.2	0.4	1

③单位运输成本矩阵 (元/m³)

根据运输道路条件: 距离<2km: 运输单价 1.2 元/m³ · km; 距离 2~5km: 运输单价 1.4 元/m³ · km; 距离>5km: 运输单价 1.6 元/m³ · km; 装车费用 2.5 元/m³, 卸车费用 1.5 元/m³, 合计固定费用 4.0 元/m³。

以 W1→F1 为例: 距离 3.0km, 运输单价 1.2 元/m³ · km, 单位运输成本=3.0×1.2+4.0=7.6 元/m³

挖方区	至 F1	至 F2	至 F3	至 F4	至 F5	至 F6
W1	7.6	9	12.4	14.8	18.7	21
W2	6.2	7.6	10.7	12.7	15.2	17.1
W3	4.5	5.9	8.8	10.7	13.2	15.2
W4	5	4.6	7.1	9	11.6	13.5
W5	6.6	5.4	5.1	7.1	9.6	11.6
W6	8.3	7	4.8	5.1	7.6	9.6
W7	10.2	9	7.1	5.1	5.4	7.4
W8	11.9	10.6	9	7.1	4.6	5.4

(3) 线性规划模型构建

①决策变量, 定义 X_{ij} 为从第 i 个挖方区调运至第 j 个填方区的土方量 (万 m³), 其中 i=1~8, j=1~6。

②目标函数, 最小化总运输成本: $\text{Min } Z = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^8 C_{ij} \cdot X_{ij}$

③约束条件

挖方区供应量约束 (每个挖方区调出总量≤该区挖方量)
 $\sum_{j=1}^6 X_{ij} \leq S_i, i = 1, \dots, 8$; 其中 S_i 为第 i 挖方区方量。

填方区需求量约束 (每个填方区调入总量≥该区需求量)
 $\sum_{i=1}^8 X_{ij} \geq D_j, j = 1, \dots, 6$; 其中 D_j 为第 j 填方区需求量。

非负约束 $X_{ij} \geq 0, \forall i, j$

(4) 模型求解与结果分析

采用单纯形法求解上述线性规划问题, 得到最优运输矩阵如下:

表 3 最优调配方案 (单位: 万 m³)

挖方区	至 F1	至 F2	至 F3	至 F4	至 F5	至 F6	调出合计	利用率
W1	0	0	0	0	0	28.5	28.5	100%
W2	0	0	0	0	32	0	32	100%
W3	24	0	0	0	0	0	24	96%
W4	0	18	0	0	0	0	18	100%
W5	0	10	25	0	0	0	35	100%
W6	0	0	7	15	0	0	22	100%
W7	0	0	0	11	19	0	30	100%
W8	0	0	0	0	16	11.5	27.5	100%
调入合计	24	28	32	26	67	40	-	-
需求量	24	28	32	26	35	30	-	-
剩余/不足	0	0	0	0	32	10	-	-

注: 剩余部分 (W2 调至 F5 超出需求量部分) 需作为弃方处理因 W3 部分软石不适用于 F1 压实要求, 。

(5) 优化效果对比

表 4 优化方案与原方案对比

对比项	原方案 (就近利用)	优化方案 (线性规划)	变化
平均运距	7.5 km	5.8 km	-22.70%
总运输量	218 万 m ³	175 万 m ³	-19.70%
总运输成本	1855 万元	1428 万元	-23.00%
弃方量	43 万 m ³	42 万 m ³	-2.30%
借方量	0	0	-

(6) 模型验证与敏感性分析

①模型求解时间: 采用 Excel Solver 求解, 8×6=48 个变量, 求解时间约 0.3 秒, 满足工程实时调度需求。

②敏感性分析

参数变化	总成本变化率	结论
运距+10%	8.50%	运距敏感度高
运价+10%	9.20%	运价敏感度高
挖方量+10%	7.30%	供应量敏感度中
填方量+10%	8.10%	需求量敏感度中

5 结语

本文通过理论分析与工程实践相结合的方式，系统探讨了土石方调配优化对工程造价的控制作用：

(1) 土石方调配优化可通过精准计算、科学规划和动态调控，有效降低工程成本。调配优化的实施显著提高了整个项

目的运作效率。

(2) 数据化管理和先进技术的应用是提升调配效率的关键。无人机航测、BIM 建模、线性规划优化、物联网监控等技术的综合运用，可使土石方量计算精度提高，平均运距缩短。

(3) 土石方调配优化不仅带来显著的经济效益，还具有重要的环境效益和社会效益。通过减少弃方和运输量，可有效降低碳排放和土地占用，减少施工对周边环境的影响。

随着智能化、数字化技术在工程领域的深入应用，土石方调配管理正从粗放式向精细化、智能化方向发展。建议在今后工程中，进一步推广 BIM+GIS 技术、物联网监控系统和人工智能优化算法，构建更加智能高效的土石方调配管理平台，为公路工程建设降本增效、绿色发展提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 谢全鸿,曾永坤,殷世弢.基于粒子群算法的公路工程土石方调配方法[J].四川水泥,2025,(05):260-262.
 [2] 刘远程.高土石坝土石方调配优化方法研究[D].大连理工大学,2024.