

强风化破碎角砾岩边坡稳定性评价圆弧形与折线形 滑动面安全系数对比分析

董继昌

(陕西西域岩土工程有限公司,陕西 西安 710016)

摘要:山区工程建设中,强风化破碎角砾岩高陡边坡的稳定性直接关乎工程安全与人员生命财产安全,需通过科学的分析评价为边坡治理提供可靠依据。现有研究多聚焦于土质边坡或含明显结构面的岩质边坡,对无明显结构面的强风化破碎角砾岩边坡的滑动面选型及计算方法对比研究存在不足,导致工程中方法选择缺乏针对性,易出现计算结果与实际偏差较大的问题。本文以该类边坡为研究对象,系统对比圆弧形与折线形两种滑动面下包括瑞典条分法、摩根斯顿-普赖斯法、简化 Bishop 法等在内的 6 种条分法的计算差异,首次明确简化 Bishop 法、Janbu 法及简化 Janbu 法为该边坡的最优计算组合,并提出“双滑动面交叉验证”方法,有效解决了单一滑动面计算结果偏差大、与实际状态不符的问题。工程案例验证表明,推荐方法的计算结果与边坡实际安全状态更为契合,可为同类工程的边坡治理决策提供精准可靠的技术支撑。

关键词:强风化角砾岩;岩质边坡;稳定性评价;圆弧形滑动面;折线形滑动面;安全系数

中图分类号:TU457

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)07-0023-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.07.074

Comparative analysis of safety factors between circular and polygonal sliding surfaces in stability evaluation of strongly weathered rock slopes

DONG Jichang

(Shaanxi Xiyu Geotechnical Engineering Co., Ltd., Xi'an 710016, Shaanxi, China)

Abstract: In mountainous engineering construction, the stability of highly weathered, fractured breccia high-steep slopes is directly related to both project safety and the safety of human life and property, necessitating reliable scientific analysis and evaluation to inform slope treatment decisions. Existing studies have predominantly focused on soil slopes or rock slopes with distinct structural planes, while comparative investigations into sliding surface selection and calculation methods for highly weathered, fractured breccia slopes without obvious structural planes remain insufficient. This gap often leads to a lack of methodological specificity in engineering practice, resulting in significant discrepancies between calculated results and actual conditions. Taking this type of slope as the research object, this study systematically compares the computational differences among six slice methods, including the Swedish slice method, the Morgenstern-Price method, and the simplified Bishop method, under both circular and polygonal sliding surfaces. For the first time, this study identifies the simplified Bishop method, the Janbu method, and the simplified Janbu method as the optimal calculation combination for such slopes. Furthermore, a “dual sliding surface cross-validation” method is proposed, effectively addressing the issue of large deviations in single sliding surface calculations and their inconsistency with actual conditions. Engineering case verification

收稿日期: 2025-12-29

作者简介: 董继昌(1989—),男,工程师,从事岩土工程勘察和设计。

demonstrates that the calculation results obtained using the recommended method are more consistent with the actual safety state of the slope, thereby providing accurate and reliable technical support for slope treatment decision-making in similar projects.

Key words: strongly weathered breccia; rock slope; stability evaluation; circular sliding surface; polygonal sliding surface; safety factor

在山区进行工程建设时,经常会遇到强风化岩质边坡,这类边坡埋深较浅,甚至岩体裸露地表,导致风化严重、岩体破碎,当边坡为高陡边坡时,边坡一旦失稳,极易产生大规模整体式滑坡。因此,若工程项目位于强风化岩质边坡场地,必须要针对高陡边坡的稳定性进行分析评价,确保工程建设的安全。根据现行国家标准《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013),在进行边坡稳定性分析评价时,计算沿结构面滑动的稳定性应根据结构面形态采用平面或折线形滑动面;计算土质边坡、极软岩边坡、破碎或极破碎岩质边坡的稳定性时,可采用圆弧形滑动面。在实际工程中,当分析评价强风化岩质边坡的稳定性时,经常需要考虑采用圆弧形滑动面还是折线形滑动面。采用不同的滑动面,计算所得安全系数有差异,并且采用圆弧滑动面容易陷入局部极值,而折线滑动面得到的安全系数可能会偏小。目前有关边坡稳定性分析评价的研究多聚焦于土质边坡或有明显结构面的岩质边坡,对无明显结构面的强风化角砾岩边坡研究较少,尤其是针对滑动面选型及计算方法的对比研究存在不足,导致工程中方法选择缺乏针对性,易出现计算结果与实际偏差较大的问题。

本文以陕西省商南县富居城(四期)项目东南侧强风化角砾岩高边坡为研究对象,使用理正岩土边坡稳定分析系统(软件版本:理正岩土 7.0PB1),通过双滑动面交叉验证方法,对 6 种条分法的适用性及计算结果合理性展开系统对比。与现有研究相比,本文的创新价值体现在 3 个方面:1) 研究对象聚焦于“无明显结构面的强风化破碎角砾岩边坡”;2) 方法上创新性地采用“双滑动面交叉验证”,有效规避单一滑动面分析可能产生的极值偏差;3) 通过 6 种条分法的横向对比,系统评估各方法的计算偏差机制,首次明确适用于该类边坡的最优方法组合,为工程实践提

供更全面的方法选择依据。

1 工程概况

商南县富居城(四期)项目(23#~32#楼及地下车库)场地位于商洛市商南县城关街道,场地北侧为移民路,西侧为富兴路,场地地貌单元为秦岭南麓低山、丘陵地貌。场地东南侧边坡岩土体主要为强风化角砾岩,该边坡为人工开挖取土后形成的高陡边坡,边坡东侧紧邻商南移民安置房项目,南侧相对较开阔。边坡最大高差达 17 m,最陡处坡比约为 1:0.3,场地东南侧较陡处边坡产状约为 $211^{\circ} \angle 73^{\circ}$,边坡现状如图 1 所示。现场调查发现,边坡岩体无明显的结构面,亦未发现有倾向坡外的结构面,在边坡顶部也未发现有明显张拉裂隙等滑动迹象。边坡除东侧已有挡土墙支护区域外,其他区域岩体裸露,受风化作用强烈,风化节理裂隙发育,坡面岩体胶结程度较弱,部分岩块已松动,局部已出现小范围滑塌现象,在坡脚处有岩体风化破碎后滑塌的堆积物,如图 2 所示。鉴于该区域内边坡为高陡边坡,人工开挖、破坏痕迹明显,风化严重,拟建的 31#楼东侧距边坡边缘约 7.5 m,拟建的 32#楼位于东南侧边坡上,边坡发生滑塌后所造成的后果严重,因此必须对此范围内的边坡进行稳定性分析和评价。本文选取其中 21-21'剖面(勘探点编号:64#、67#、70#、76#)进行分析研究,工况选取一般工况和地震工况分别进行计算。



图 1 场地东南侧边坡现状



图 2 边坡节理构造调查现场

2 边坡稳定性分析评价

2.1 分析方法简介

采用理正岩土边坡稳定分析系统(软件版本:理正岩土 7.0PB1)进行边坡的稳定性分析时,软件针对圆弧形滑动面和折线形滑动面,均给出了几种不同的分析方法,具体分析方法及区别见表 1。

表 1 圆弧形与折线形滑动面的分析及区别

滑动面形状	分析方法	是否考虑条间力
圆弧形滑动面	瑞典条分法	不考虑土条的条间力
	简化 Bishop 法	考虑土条的水平条间力
	Janbu 法	考虑土条的条间力
折线形滑动面	简化 Bishop 法	考虑土条的水平条间力
	简化 Janbu 法	考虑土条的水平条间力
	摩根斯顿-普赖斯法	考虑土条的条间力

2.2 计算模型

选取 21-21'剖面(勘探点编号:64#、67#、70#、76#)进行分析研究,以富居城(四期)项目岩土工程勘察报告中 21-21'剖面的工程地质剖面图(图 3)为依据,结合该剖面处边坡实际形态绘制计算模型简图(图 4)。

2.3 计算参数选取

2.3.1 边坡岩土体的抗剪强度参数

富居城(四期)项目 21-21'剖面处边坡岩土体主要为强风化角砾岩,地表仅有厚约 0.4 m 左右的杂填土。根据现场勘探结果,并结合场地岩土工程条件及工程经验,综合确定边坡岩土体的抗剪强度参数按表 2 选取。

表 2 边坡岩土体抗剪强度参数

岩土类型	状态	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土①	天然	18.0	5.0	10.0
强风化角砾岩④	天然	21.0	15.0	35.0

2.3.2 地震动参数

富居城(四期)项目场地位于商南县城关街道,通过查询《建筑抗震设计标准》(2024 年版)(GB/T 50011—2010)附录 A 及《中国地震动参数区划图》附录 C 可知,商南县城关街道抗震设防

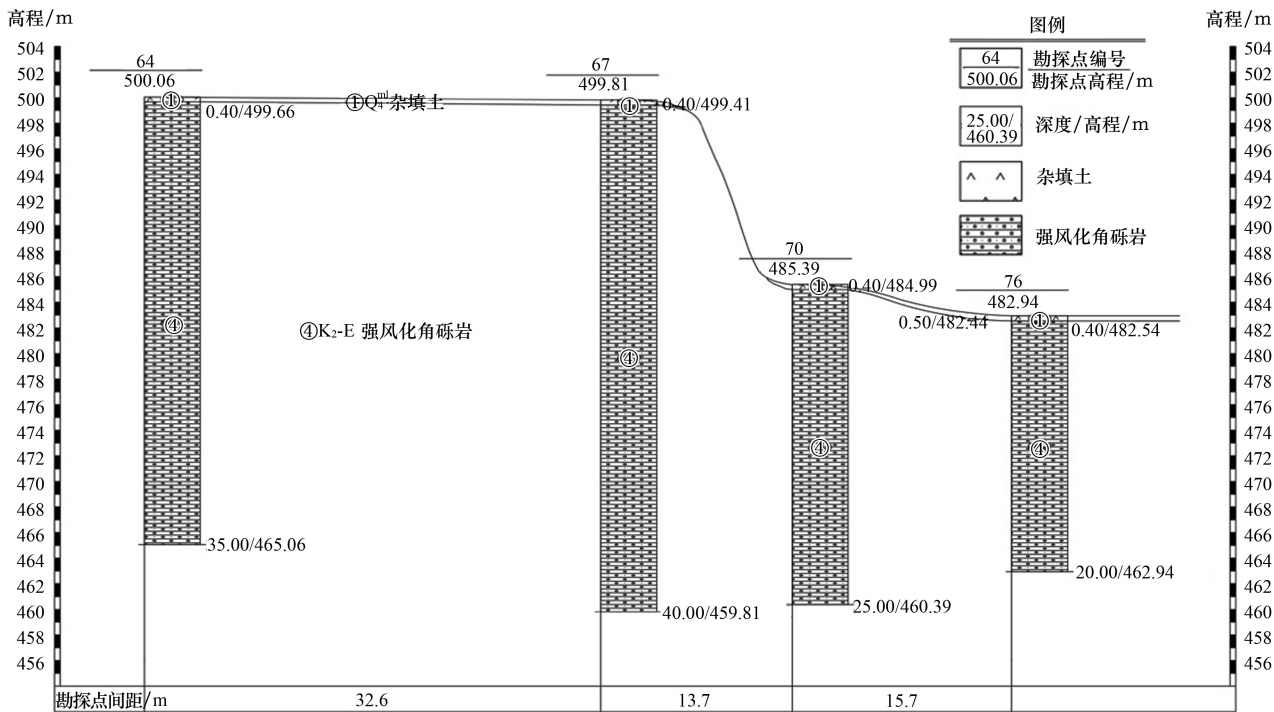


图 3 工程地质剖面图 (21-21'剖面)

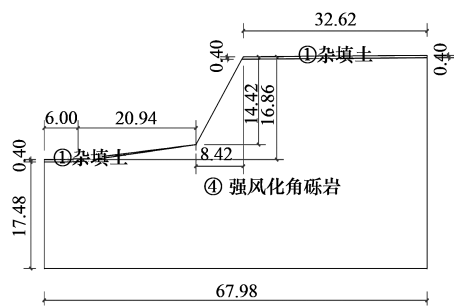


图 4 计算模型简图 (21-21'剖面) m

烈度为 7 度，设计基本地震动峰值加速度值为 0.10g，设计地震分组属第一组。

2.3.3 软件设置计算条件、控制参数

(1) 圆弧形滑动面。采用圆弧形滑动面进行边坡稳定性分析评价时，划分的土条宽度均为 1.0 m；当土条的重力沿切向的分力与滑动方向反向时，此分力按抗滑力对待；稳定计算目标为自动搜索最危险滑裂面，搜索时的圆心步长设置为 2.0 m，搜索时的半径步长设置为 0.5 m。圆弧形滑动面各分析方法及对应控制参数按表 3 选取。一般工况条件下，不考虑地震作用；地震工况条件下，地震动参数按表 3 取值。

(2) 折线形滑动面。采用折线形滑动面进行边坡稳定性分析评价时，划分的土条宽度均为 1.0 m；稳定计算目标为自动搜索最危险滑面；非线性方程求解容许误差为 1×10^{-5} ；方程求解允许的最大迭代次数为 50；搜索有效滑面数为 100(采用摩根斯顿-普赖斯法时，条间力函数类型为常量，非线性方程组求解容许误差为 5×10^{-3})。折线形滑动面各分析方法及对应控制参数按表 4 选取。一

般工况条件下，不考虑地震作用；地震工况条件下，地震动参数按表 4 取值。

2.4 计算结果

利用理正岩土边坡稳定分析系统(软件版本：理正岩土 7.0PB1)采用上述分析方法并选取对应的计算参数、控制参数，分别按圆弧形滑动面和折线形滑动面，对 21-21'剖面处的边坡进行滑动安全系数计算。根据计算结果，按《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)对边坡的稳定性状态进行划分，边坡稳定性系数 F_s 与边坡稳定安全系数 F_{st} 关系：当 $F_s < 1.00$ 时，边坡处于不稳定状态； $1.00 \leq F_s < 1.05$ ，边坡处于欠稳定状态； $1.05 \leq F_s < F_{st}$ ，边坡处于基本稳定状态； $F_s \geq F_{st}$ ，边坡处于稳定状态。该工程边坡属永久边坡，根据上述规范第 3.2.1 条及第 5.3.2 条可知，该边坡工程安全等级为二级，一般工况时，边坡稳定安全系数 F_{st} 为 1.30，地震工况时，边坡稳定安全系数 F_{st} 为 1.10。边坡滑动安全系数计算结果及边坡稳定性状态见表 5。

计算结果表明，对于无明显结构面的强风化破碎角砾岩边坡，采用瑞典条分法(圆弧形滑动面)和摩根斯顿-普赖斯法(折线形滑动面)计算所得的滑动安全系数偏差较大，与现场实际观测到的边坡稳定性状态不相符。简化 Bishop 法(圆弧形或折线形滑动面)、Janbu 法(圆弧形滑动面)和简化 Janbu 法(折线形滑动面)计算所得的边坡滑动安全系数较为接近，相同工况条件下对边坡的稳定性状态划分结果也一致，与边坡现场实际稳定性状态较为相符。

表 3 圆弧形滑动面分析方法及对应控制参数选取

控制参数	瑞典条分法	简化 Bishop 法	Janbu 法
采用规范	通用方法	通用方法	通用方法
计算目标	安全系数计算	安全系数计算	安全系数计算
滑裂面形状	圆弧滑动面	圆弧滑动面	圆弧滑动面
地震烈度/度	7	7	7
水平向地震系数	0.1	0.1	0.1
地震作用综合影响系数	0.25	0.25	0.25
地震作用重要性修正系数	1	1	1
地震力作用位置	土条质心处	土条质心处	土条质心处
是否考虑法向分力	是	是	是
水平加速度系数分布	矩形	矩形	矩形
考虑竖向地震力	否	否	否

表 4 折线形滑动面分析方法及对应控制参数选取

控制参数	简化 Bishop 法	简化 Janbu 法	摩根斯顿 – 普赖斯法
采用规范	通用方法	通用方法	通用方法
计算目标	安全系数计算	安全系数计算	安全系数计算
滑裂面形状	折线形滑动面	折线形滑动面	折线形滑动面
地震烈度/度	7	7	7
水平向地震系数	0.1	0.1	0.1
地震作用综合影响系数	0.25	0.25	0.25
地震作用重要性修正系数	1	1	1
地震力作用位置	土条质心处	土条质心处	土条质心处
水平加速度系数分布	矩形	矩形	矩形
考虑竖向地震力	否	否	否

表 5 滑动安全系数计算结果

分析方法	圆弧形滑动面		折线形滑动面	
	一般工况	地震工况	一般工况	地震工况
瑞典条分法	0.986(不稳定)	0.952(不稳定)	—	—
简化 Bishop 法	1.011(欠稳定)	0.956(不稳定)	1.039(欠稳定)	0.983(不稳定)
Janbu 法	1.012(欠稳定)	0.958(不稳定)	—	—
简化 Janbu 法	—	—	1.010(欠稳定)	0.907(不稳定)
摩根斯顿 – 普赖斯法	—	—	1.080(基本稳定)	0.997(不稳定)

2.5 结果差异机制分析

根据理正岩土边坡稳定分析系统(软件版本:理正岩土 7.0PB1)计算结果可知,采用圆弧形滑动面且分析方法选用瑞典条分法时,一般工况和地震工况条件下的滑动安全系数均较低,边坡处于不稳定状态。分析方法选用简化 Bishop 法和 Janbu 法时,两者的计算结果较为接近,且在一般工况条件下边坡均处于欠稳定状态,地震工况条件下边坡均处于不稳定状态。与瑞典条分法相比,简化 Bishop 法和 Janbu 法的计算结果与边坡实际情况更为接近,计算结果更合理。这说明在采用圆弧形滑动面时,由于瑞典条分法不考虑土条的条间力,导致计算的安全系数偏小,边坡的实际安全状态被低估;简化 Bishop 法与 Janbu 法均不同程度地考虑土条的条间力,两者计算的安全系数较为接近,且计算结果与边坡的实际状况较为接近,说明上述方法平衡了计算精度与工程实用性,能较准确地反映岩体风化破碎后的整体滑动趋势。

采用折线形滑动面,分析方法选用摩根斯顿 – 普赖斯法时,在一般工况条件下,计算的滑动安全系数为 1.080,大于 1.05,边坡处于基本稳定状态,

这与现场实际调查显示的边坡存在部分岩块已松动,局部已出现小范围滑塌现象、坡脚处有岩体风化破碎后滑塌的堆积物等现象不完全相符,说明采用该方法计算的滑动安全系数偏大,结果偏于风险。分析方法选用简化 Bishop 法和简化 Janbu 法时,简化 Bishop 法计算的滑动安全系数比简化 Janbu 法稍大,但边坡的稳定性状态一致,即在一般工况条件下边坡均处于欠稳定状态,在地震工况条件下边坡均处于不稳定状态,结果表明简化 Bishop 法和简化 Janbu 法的计算结果与边坡实际情况接近,计算结果较合理。摩根斯顿 – 普赖斯法计算结果偏差较大的原因主要在于:该计算方法虽考虑完整条间力,但假设的条间力函数类型为常量,与强风化岩“破碎、非均质”的特性不完全匹配,因此计算的滑动安全系数偏大,结果偏于风险。

3 适用性范围及建议

3.1 适用性范围与边界条件

对于无明显结构面的强风化破碎岩体边坡(如角砾岩、凝灰岩、砂岩等),通过合理选择计算参数和分析方法,采用圆弧形滑动面或折线形滑动面均能

获得与现场实际情况基本吻合的滑动安全系数,且可依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)对边坡稳定性状态进行较为合理的划分。本研究结论的适用范围:高度 ≤ 30 m、坡比 $\leq 1:0.3$ 的人工开挖或自然形成的无明显结构面强风化破碎岩质边坡;对于高度 > 30 m或坡比 $> 1:0.3$ 的超高、超陡边坡,或存在明显结构面(含软弱夹层)的复合边坡,建议结合有限元强度折减法进一步验证。

3.2 工程应用建议

针对无明显结构面的强风化破碎岩质边坡,可优先采用简化 Bishop 法(适用于圆弧形或折线形滑动面)、Janbu 法(适用于圆弧形滑动面)或简化 Janbu 法(折线形滑动面)进行计算。为避免单一滑动面分析的局限性(如圆弧形滑动面易陷入局部极值、折线形滑动面得到的安全系数可能偏小),建议采用双滑动面交叉验证以确保结果的准确性。工程实践中,需根据边坡岩性、裂隙发育情况及风化程度动态调整抗剪强度参数;对极破碎岩体(黏聚力 < 10 kPa,内摩擦角小于 30°)应适当提高安全系数的取值;对于小型边坡(高度 < 5 m),可简化采用单一滑动面计算,但中大型工程(如公路、铁路、建筑边坡)必须采用双滑动面交叉验证以确保结果可靠。

4 结 论

本文针对无明显结构面的强风化破碎角砾岩边坡,开展了圆弧形与折线形滑动面安全系数的对比研究。以陕西省商南县富居城(四期)项目强风化破碎角砾岩边坡为工程案例,采用理正岩土边坡稳定分析系统,对瑞典条分法、摩根斯顿-普赖斯法等 6 种条分法在两种滑动面下的计算结果差异进行了系统分析。研究表明:简化 Bishop 法(适用于圆弧形或折线形滑动面)、Janbu 法(圆弧形滑动面)及简化 Janbu 法(折线形滑动面)为该边坡的最优计算组合,本文提出的“双滑动面交叉验证”方法有效解决了单一滑动面计算结果偏差大的问题,且推荐方法的计算结果与边坡实际安全状态吻合度更高。研究成果可为类似无明显结构面的强风化破碎角砾岩边坡稳定性评价提供可靠的技术支撑,对同类工程的边坡治理决策具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 杨龙,何林城.强风化极破碎岩体路堑边坡失稳处治研究[J].建筑安全,2025,40(12):31-35.
- [2] 章建勋.贵州某高边坡岩土勘察及稳定性分析研究[J].科技资讯,2025,23(18):132-134.
- [3] 刘志军,艾凯文,陶志刚.复杂岩性下高陡边坡稳定性分析及变形机理研究[J].采矿技术,2025,25(2):158-163.
- [4] 邓东平,徐润冬,彭一航,等.强度空间非均质性与各向异性特征下边坡稳定性极限平衡滑面应力法[J].岩土力学,2025,46(1):55-72.
- [5] 章鑫.基于 Bishop 法的边坡稳定性评价及防治策略研究[J].华北自然资源,2025(6):124-128.
- [6] 梁智星,梁智元,邓文轩,等.基于岩体块体化程度指标的边坡裂隙发育及稳定性分析[J].矿冶工程,2025,45(5):34-40.
- [7] 杨波,南宁,康领,等.基于折减系数的全风化花岗岩边坡稳定性评价[J].路基工程,2025(5):37-44.
- [8] 肖国光,何能方,何晓芸.考虑风化作用下崩解性软岩边坡开挖稳定性分析[J].四川建筑,2025,45(6):148-150.
- [9] 徐竟航.某山区铁路弃土场不同工况稳定性分析[J].黑龙江科学,2024,15(24):42-45.
- [10] 李连祥,贾斌,赵忠杨,等.土与强风化岩二元边坡圆弧-平面破坏模式与支护设计方法[J].重庆大学学报,2024,47(2):1-13.
- [11] 李兆宇,马宗源,魏睿真,等.地震作用下边坡及滑坡稳定性及破坏过程分析[J].西安理工大学学报,2023,39(1):125-132.
- [12] 蒋青江,邓亚虹,杨楠,等.基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究[J].地震工程学报,2023,45(3):716-723.
- [13] 温晓凯,王新宇,周斌,等.有限元边坡稳定性分析计算精度和效率问题[J].工业建筑,2023,53(增刊1):533-538.
- [14] 王思源.土岩复合地层顺向边坡稳定性研究[D].南京:东南大学,2023.
- [15] 郭延亭.某铅锌矿尾矿库坝体渗流及稳定性分析[D].绵阳:西南科技大学,2023.
- [16] 黄俊光,范培彦,单毅,等.花岗岩残积土非饱和特性及其边坡稳定性研究[J].建筑结构,2022,52(24):138-143.

方计算的精度得到了大幅提升,误差控制在 1% 以内,有效避免了因土方量计算误差导致的工程成本增加和工期延误。通过精确的土方计算,施工单位能够更加合理地安排施工资源,减少了资源的浪费和闲置。

在计算效率方面,容差 AI 技术实现了土方计算的秒级响应,计算效率是传统方法的数倍,大幅提高了工作效率,为加快项目进度提供了有力支持。施工单位能够及时获取土方计算结果,快速调整施工方案,确保了项目的进度。

此外,在项目的成本控制方面,通过精确的土方计算,施工单位能够更加准确地估算工程成本,合理控制土方调配和运输费用,降低了工程成本。

5 结 语

本文通过将容差 AI 技术与四面体化技术相结合,应用于土方计算领域,系统阐述了其应用方法与原理。研究采用四面体化技术构建三维土方计算模型,利用容差 AI 处理含噪声的地形数据,实现计算效率较传统方法提升 7~8 倍、计算精度控制在 1% 以内的显著成果。通过余杭鸬鸟温泉度假综合体一期地块项目的实际应用验证,该技术

方案在计算性能上达到秒级响应,精度与效率均取得突破。此外,本研究成功实现了软件科技成果转化,为土方计算提供了兼具高效率与高精度的先进工具,促进了计算机科学与土木工程学科的交叉融合。上述成果不仅打破了传统计算方法的局限,也为复杂地形条件下的土方工程量精确测算提供了新的理论依据与实践路径。

参考文献:

- [1] 张茂聪,李琰. 人工智能的演进逻辑与教育造化:兼论“人工智能者”的概念及特征[J]. 华中师范大学学报(人文社会科学版),2025,64(1):147-159.
- [2] 吴小应. 无人机倾斜摄影测量技术在土方计算中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(9):215-217;224.
- [3] 程亮,钟岩,刘继龙,等. 不规则场地土方量计算的对比研究[J]. 城市地质,2021,16(3):325-331.
- [4] 侯汉霜. 基于 Delaunay 三角网法的土石方量计算精度探讨[J]. 城市勘测,2022(2):159-163.
- [5] 于坤. 基于物探数据的采煤工作面三维地质建模与可视化系统研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2024.
- [6] 李笑. 基于三角网格的复杂地区构造制图方法的研究与实践[D]. 武汉:长江大学,2024.
- [7] 赵建国,师伟雄. 多级滑面条件下堆积体滑坡稳定性分析[J]. 路基工程,2021(1):210-216.
- [8] 杜显祥,房浩,曹佳文. 建房切坡条件下边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(5):40-47.
- [9] 赵永清,张洁. 谈强风化岩质高边坡勘察中的边坡稳定性问题[J]. 山西建筑,2020,46(6):58-59.

(上接第 28 页)