Advances in Geosciences 地球科学前沿, 2026, 16(11), 1589-1598
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ag
https://doi.org/10.12677/ag.2026.1611140

Hans汉斯

基于高填方矿山边坡稳定性综合分析方法的研究

孙　志[1*]，钟　睿[1,2#]，颜建东[1,2]

[1]深圳地质建设工程公司，广东　深圳
[2]深圳地质科技创新中心，广东　深圳

收稿日期：2026年9月18日；录用日期：2026年11月1日；发布日期：2026年11月12日

摘　要

高边坡工程安全稳定性分析是岩土工程研究的重要内容。伴随大、中等城市土地资源的日益紧张，大量工程建设靠近山体。土体的开挖施工会扰动原有地层平衡条件，极易引发边坡变形和失稳等一系列复杂的岩土工程稳定与安全诸多问题。本文以深圳市罗湖外国语学校全寄宿制高中新建工程边坡为例，构建极限平衡计算、有限元数值仿真、现场实测校核三位一体的综合分析体系开展边坡稳定性研究。对比研究复合支护体系实施前后填方边坡稳定状态，依托不平衡推力传递系数法与有限元仿真手段开展支护结构受力验算，同时依托长期现场监测资料，佐证理论计算成果的可靠性。研究结果证实，传递系数法结合数值仿真手段能够实现高填方矿山边坡整体稳定验算，可为支护结构布局优化、边坡安全等级判定提供支撑；相关研究思路可为城区采石坑回填形成的高填方边坡治理提供理论支撑，同时为同类矿山回填边坡勘察设计、现场治理施工提供实践参考。

关键词

传递系数法，数值模拟，边坡监测，边坡稳定性分析，高填方矿山边坡

Research on the Comprehensive Analysis Method for the Stability of High-Excavation Mine Slopes

Zhi Sun[1*], Rui Zhong[1,2#], Jiandong Yan[1,2]

[1]shenzhen Geology & Construction Company, Shenzhen Guangdong
[2]Shenzhen Geological Science and Technology Innovation Center, Shenzhen Guangdong

Received: September 18, 2026; accepted: November 1, 2026; published: November 12, 2026

[*]第一作者。
[#]通讯作者。

文章引用: 孙志, 钟睿, 颜建东. 基于高填方矿山边坡稳定性综合分析方法的研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(11): 1589-1598. DOI: 10.12677/ag.2026.1611140

Abstract

The safety and stability analysis of high slope engineering is an important part of geotechnical engineering research. With the increasingly scarce land resources in large and medium-sized cities, a large number of construction projects are located close to mountains. The excavation and construction of the soil will disturb the original geological balance conditions, which is very likely to cause slope deformation and instability and a series of complex problems related to the stability and safety of geotechnical engineering. Taking the new construction project of the full boarding high school of Luohu Foreign Language School in Shenzhen as an example, this paper constructs a comprehensive analysis system integrating limit equilibrium calculation, finite element numerical simulation, and on-site measurement verification to conduct slope stability research. By comparing the stability state of the fill slope before and after the implementation of the composite support system, the force calculation of the support structure is carried out based on the unbalanced thrust transfer coefficient method and finite element simulation means. At the same time, the reliability of the theoretical calculation results is verified based on long-term on-site monitoring data. The research results confirm that the transfer coefficient method combined with numerical simulation means can achieve the overall stability calculation of high-fill mining slope, which can provide support for the layout optimization of support structures and the determination of slope safety levels; the related research ideas can provide theoretical support for the treatment of high-fill slope formed by the backfill of urban quarry pits, and at the same time provide practical references for the investigation and design, and on-site treatment construction of similar mining backfill slopes.

Keywords

Transfer Coefficient Method, Numerical Simulation, Slope Monitoring, Slope Stability Analysis, High-Fill Mining Slope

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

城市化建设进程中，大量关停采石坑通过渣土回填进行场地平整，由此形成大量高填方矿山边坡。该类边坡普遍具备坡体高差大、回填方量巨大、填筑土体结构性松散、填土与下伏基岩接触面界限明显等特征。边坡开挖作业将打破坡体原始地应力平衡状态，诱发土体应力重分布，增大潜在滑带剪应力。开挖造成地表植被剥离、岩土直接裸露，如在遇到降雨形成的坡面径流更容易渗入填筑土体内部并产生冲刷作用，弱化岩土抗剪强度指标，进一步降低边坡整体稳定储备。针对此类采石矿山回填边坡，工程领域常结合传递系数极限平衡法与有限元数值仿真开展稳定性评估[1]-[3]。

顾宝和[1]系统梳理不平衡推力传递系数法的理论起源、核心原理与工程适用场景，探讨条块间推力传递规律，对比理论推导基本假设与工程现场实际条件存在的偏差。耿雪峰等[2]依托传递系数法开展采石坑回填边坡稳定验算，依据计算成果确定支护构筑物布设位置与外部荷载水平。

R.W.Clough 等率先将有限元理论运用于土石坝的受力变形分析中，从此数值仿真技术逐步在岩土工程领域大范围推广。相较于传统极限平衡法，数值仿真技术具备计算高效、可视化程度更高、更能够还原坡体应力变形演化特征等优势[3] [4]。陈冲等[5]建立了一套复合单元抗滑桩数值计算模型，依托模型对比桩顶自由、桩顶约束两类边界条件下，桩体布设位置、桩间距等参数对边坡加固效果的影响规律，总

结抗滑桩典型破坏模式模型。

本文以深圳市罗湖外语学校全寄宿制高中新建项目矿山边坡为研究载体，该场地边坡由废弃采石坑渣土回填而形成。后期场地开挖施工后，坡脚及坡面区域规划建设教学楼与宿舍等建筑。该边坡具备坡高大、回填体量庞大、填土松散、土岩分界面清晰等典型特征。本文采用传递系数法与 MIDAS GTS 有限元仿真法相结合开展稳定计算与支护方案设计分析研究，优化了边坡治理措施，保障了边坡长期服役安全性。

2. 工程概况

研究项目坐落于深圳市罗湖区梧桐山南麓，罗沙路北侧、国威路与仙桐路交叉口东侧。场地东侧为苗圃用地，北侧地块尚未开发，用地边界与总章莲塘项目相连；西侧毗邻莲馨家园居住区，南侧临近仙桐路；场地西南区域存在地铁 8 号线莲塘站至梧桐山南站隧道区间。

项目总用地面积 30,118 m^2，规划建设 6 层综合楼、13 层学生宿舍、9 层学生宿舍、10 层教师宿舍，并配套建设 2~4 层地下空间，建筑基础选用灌注桩基础。场地东西方向最大地形高差可达 28.00 m，南侧临近梧桐山风景区仙桐路，外部交通条件良好。

3. 工程地质条件

场地原始地貌单元属于丘陵地貌，早年城市建设期间开展采石开挖，形成规模较大采石坑；采石活动终止后，渣土分层回填形成当前场地现状。勘察阶段场地分布临时板房、块石料堆与各类建筑材料，地表地形起伏明显。勘察钻孔孔口高程区间为 109.06 m~114.13 m。

钻探勘察成果显示，场地地层由上至下主要包含：人工素填土(Q^{ml})、第四系残积层(Q^{el})，下伏基岩为侏罗系梧桐山组凝灰熔岩($J_{2\text{-}3}w$)。研究区各岩土层的岩性特征自上而下分述如下：

1) 第四系人工填土层

① 素填土：褐黄、褐灰色，稍湿状态，整体呈稍密状态，局部区域土体松散；填料以碎石为主，夹杂黏性土、建筑垃圾碎块。碎石母岩为中~微风化凝灰熔岩，碎石占比 60%~85%；局部区段分布花岗岩大块石，块径 0.30~1.20 m；少数区域以黏性土夹碎石填筑，填料空间分布不均匀。回填时长 8~15 a，经历多次分层堆填，土体密实度差异显著。场地共开展 188 组标准贯入测试，校正后锤击数 N 处于 5.7~16.4 击区间，均值 9.8 击。

2) 第四系残积层

② 粉质黏土：褐黄、褐红色，稍湿、硬塑状态，由凝灰熔岩原地风化残积形成。土体无摇震反应，干强度较高，韧性中等，钻探岩芯采取率 90%~94%。完成 34 组标贯试验，实测锤击数 N’范围 14~26 击，平均值 18.9 击。

3) 侏罗系梧桐山组凝灰熔岩

晶屑砂状结构，块状构造，颗粒矿物以石英、长石为主，熔岩胶结。钻孔控制深度内根据其风化程度的不同可分为全风化、强风化、中风化、微风化四个风化带。现将其岩性特征简述如下：

全风化凝灰熔岩：褐黄色，岩芯呈坚硬土状，岩石完全风化，原岩结构大部分已破坏，手捏易散，泡水易软化，偶夹有强风化岩块，岩芯采取率约为 75%~79%。现场标准贯入试验 32 次，校正后 N 值介于 30.1 击~36.9 击，平均 33.3 击。揭露厚度介于 0.90 m~11.20 m，平均 5.14 m，层顶标高介于 81.31 m~100.84 m，层顶埋深介于 1.00 m~24.80 m。

全风化凝灰熔岩：褐黄色，岩芯呈坚硬土状，岩石完全风化，原岩结构大部分已破坏，手捏易散，泡水易软化，偶夹有强风化岩块，岩芯采取率约为 75%~85%。现场标准贯入试验 60 次，实测 N’值介于 32

击~48 击，平均值为 41.4 击。

土状强风化凝灰熔岩：褐黄色，褐灰色，岩石结构大部分破坏，岩芯呈土状及碎块混土状，局部碎块状，碎块大多手折可断，风化裂隙极发育，岩芯采取率约为 72%~81%。现场标准贯入试验 63 次，实测 N’值介于 53 击~93 击，平均值为 73.8 击；校正后 N 值介于 39.9 击~69.3 击，平均 53.6 击。

块状强风化凝灰熔岩：褐黄色、灰褐色，岩石因强烈风化而解体，岩芯多呈碎块状，碎块手折易断，风化裂隙极发育，不均匀夹中风化块，岩体极破碎，软岩，岩体质量等级为V类，岩芯采取率约为 72%~78%。现场标准贯入试验 16 次，实测 N’值介于 96.0 击~102.0 击，平均 98.3 击；校正后 N 值介于 67.2 击~71.6 击，平均 69.0 击。

中风化凝灰熔岩：褐灰色，青灰色，颗粒矿物以石英、长石为主，晶屑砂状结构，块状构造，岩芯呈块状、短柱状，锤击易碎，裂隙发育，岩石坚硬程度为软岩~较软岩，岩体完整程度为破碎~较破碎，岩体基本质量等级为IV级~V级，岩芯采取率约为 65%~75%，RQD 值约为 11%~30%。

微风化凝灰熔岩：青灰色，颗粒矿物以石英、长石为主，晶屑砂状结构，块状构造，岩芯呈柱状，锤击声脆，裂隙稍发育，属坚硬岩，岩体较破碎~较完整，岩体基本质量等级为II~III级，岩芯采取率约为 78%~89%，RQD 值约为 35%~73%。

4. 边坡稳定性分析

4.1. 稳定性定量分析

边坡开挖涉及地层以人工填土为主，岩土力学计算参数综合室内土工试验数据，并结合深圳地区填土边坡工程经验综合确定，参数取值详见表 1。

Table 1. Design parameter values for slope support
表 1. 边坡支护设计参数值

岩土层			地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	压缩模量 $E_{S1\text{-}2}$ (MPa)	变形模量 E_0 (MPa)	抗剪强度		天然重度 r (kN/m^3)
代号	层序号	名称				内摩擦角 Φ (度)	凝聚力 C (kPa)	
Q^{ml}	①	素填土	80	4.5	8	12	15	19.5
Q^{el}	②	粉质黏土	190	6.0	23	20	25	19.0
	③1	全风化凝灰熔岩	300	10	50	25	30	20.0
	③2	土状强风化凝灰熔岩	500	16	100	30	35	20.5
$J_{2\text{-}3}w$	③3	块状强风化凝灰熔岩	700	--	150	35	40	21.0
	③4	中风化凝灰熔岩	1500	--	--	--	--	23.0
	③5	微风化凝灰熔岩	4000	--	--	--	--	25.0

Table 2. Physical mechanics indicators statistics table
表 2. 物理力学指标统计表

地层编号	岩土名称	统计项目	土常规试验				直剪(快剪)		直剪(固结)		渗透系数 K
			天然含水量 w	质量密度 ρ	土粒比重 G_s	压缩模量 $ES_{1\text{-}2}$	凝聚力 c	内摩擦角 φ	凝聚力 c	内摩擦角 φ	
			%	/cm^3	-	1/MPa	kPa	°	kPa	°	10^{-6} cm/s
①	素填土	最大值	30.1	1.91	2.69	4.87	22.2	16.7	31.6	19.7	10.1

续表

①	素填土	最小值	21.0	1.81	2.66	3.82	16.1	12.6	23.8	15.2	5.5
		平均值	24.8	1.86	2.68	4.28	18.7	14.8	27.2	17.7	7.7
		标准差	2.639	0.029	0.010	0.323	1.987	1.531	2.495	1.407	1.444
		变异系数	0.106	0.016	0.004	0.075	0.106	0.103	0.092	0.080	0.187
		修正系数	1.042	0.994	0.999	0.970	0.938	0.940	0.946	0.953	1.073
		标准值	25.8	1.85	2.67	4.16	17.6	13.9	25.7	16.9	8.3
②	粉质黏土	最大值	27.3	1.95	2.69	6.87	30.6	19.0	35.8	23.0	4.0
		最小值	20.5	1.85	2.67	4.98	20.8	16.4	28.1	18.9	0.9
		平均值	23.6	1.90	2.68	5.87	25.8	17.8	31.6	21.0	2.3
		标准差	2.009	0.031	0.007	0.589	3.552	0.911	2.527	1.485	0.916
		变异系数	0.085	0.017	0.003	0.100	0.138	0.051	0.080	0.071	0.399
		修正系数	1.041	0.992	0.999	0.952	0.898	0.962	0.941	0.948	1.191
		标准值	24.6	1.88	2.67	5.59	23.2	17.2	29.7	19.9	2.7

(1) 采用传递系数法(不平衡推力法)开展边坡整体极限平衡验算，其计算公式如下：

$$P_n = 0 \tag{1}$$

$$P_i = P_{i-1}\psi_{i-1} + T_i - T_i/F_S \tag{2}$$

$$\psi_{i-1} = \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) - \sin(\theta_{i-1} - \theta_i)\tan\varphi_i/F_S \tag{3}$$

$$T_i = (G_i + G_{bi})\sin\theta_{i-1} - Q_i\cos\theta_i \tag{4}$$

$$R_i = c_i l_i + \left((G_i + G_{bi})\cos\theta_{i-1} - Q_i\sin\theta_i - U_i\right)\tan\varphi_i \tag{5}$$

式中：P_n为第 n 条块单位宽度剩余下滑力；P_i为第 i 计算条块与第 $i+1$ 计算条块单位宽度剩余下滑力抗滑力；T_i为第 i 计算条块单位宽度重力及其他外力引起的下滑力；R_i为第 i 计算条块单位宽度重力及其他外力引起的抗滑力；Ψ_{i-1}为第 $i-1$ 计算条块对第 i 计算条块土岩界面的内摩擦角标准值/(˚)；

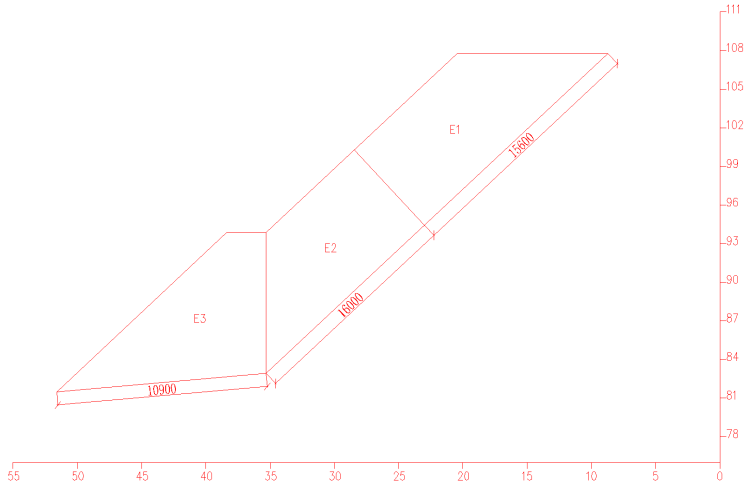


Figure 1. Block diagram of the main slip surface of the slope
图 1. 边坡主滑面分块图

选取典型主滑剖面，针对边坡原始现状开展暴雨饱和工况稳定计算，计算边坡主滑面分块模型见图1，验算结果汇总至表2。计算结果表明，饱和工况条件下边坡整体稳定系数仅0.684，坡体处于不稳定状态。

(2) 采用MIDAS GTS岩土有限元软件构建三维计算模型开展数值仿真分析，求解得到边坡位移分布云图、坡土压力计算云图、锚杆内力计算云图见图2~4。

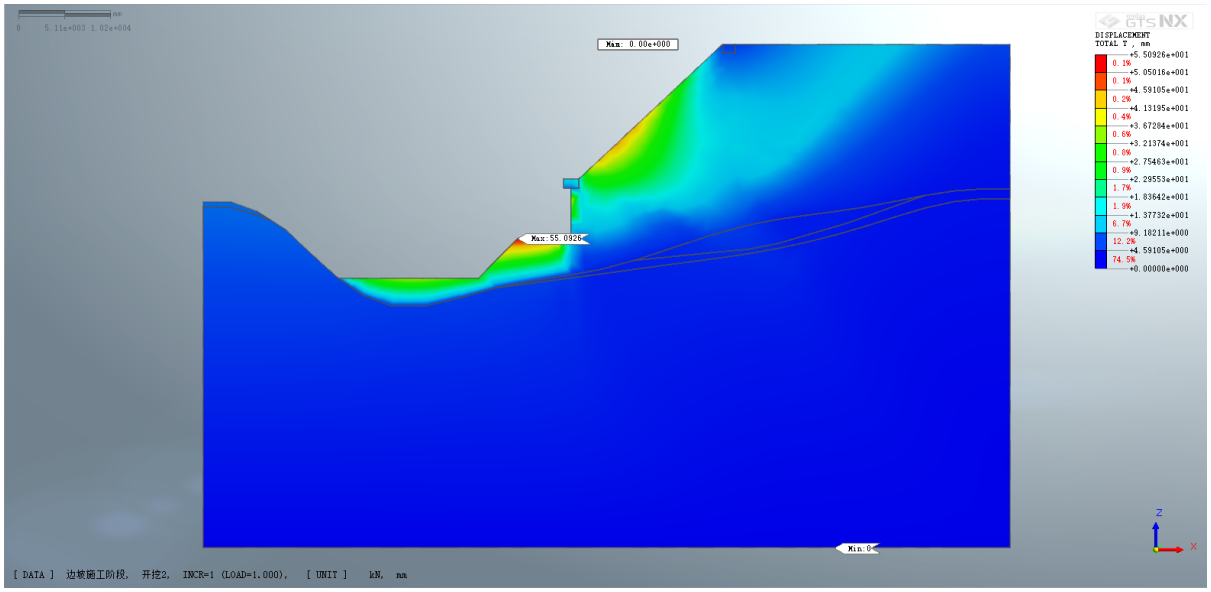


Figure 2. Cloud map of slope displacement calculation
图 2. 边坡计算位移云图

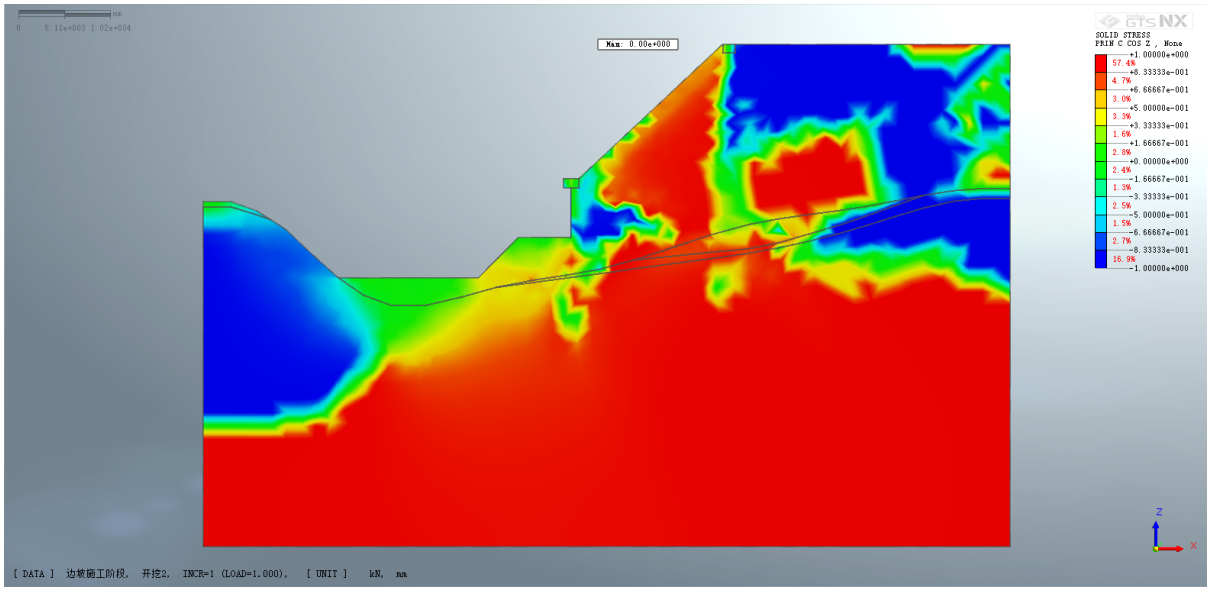


Figure 3. Cloud map of slope soil pressure calculation
图 3. 边坡土压力计算云图

计算结果表明，岩土层内摩擦角对边坡稳定性的影响最大，其次是水位、粘聚力和岩土体重度等参数变化。边坡水位上升或地表水漫流时，岩土体被水浸泡，其物理、力学性质发生改变，如内摩擦角、粘

聚力降低等，土体重度、孔隙水压力增大，边坡侧向土压力增大，导致边坡整体稳定性降低。

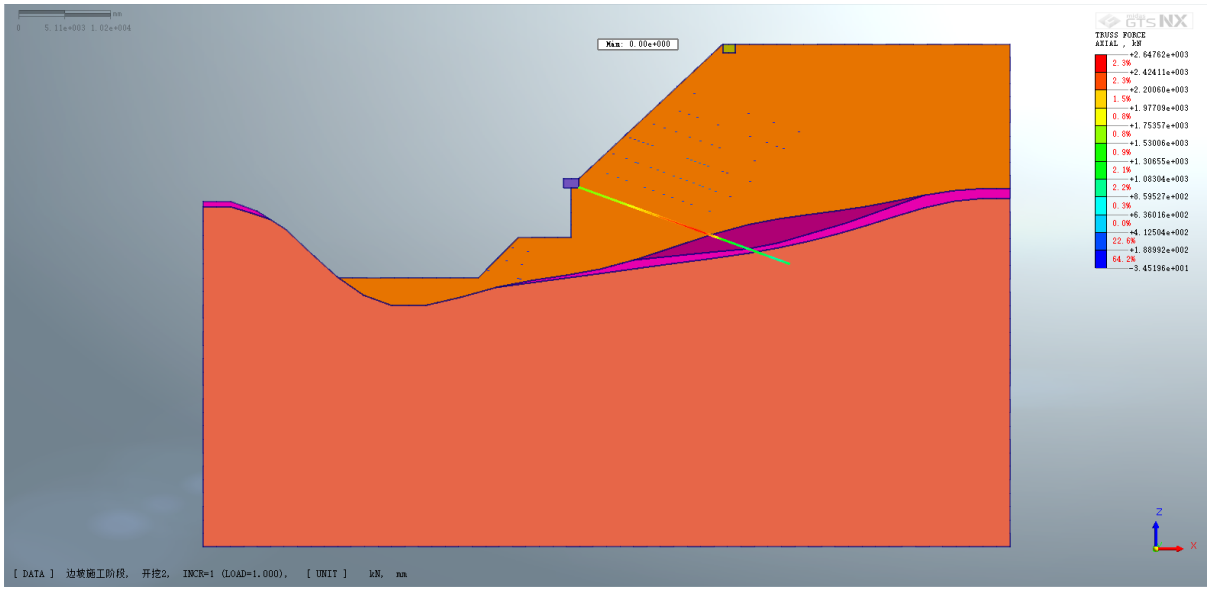


Figure 4. Cloud map of anchor bolt internal force calculation
图 4. 锚杆内力计算云图

4.2. 稳定性评价

削坡完成后边坡最大高度约 27 m，一级边坡综合坡角 49°，二级边坡综合坡角 44°，上部缓坡段坡角约 11°。坡体由厚层松散素填土构成，岩土工程性质较差，坡体坡面土体直接裸露。验算结果表明，开挖形成的边坡饱和工况稳定系数仅有 0.684，属于不稳定边坡。若发生滑坡灾害，将直接威胁坡下在建教学楼、现场施工人员生命财产安全，灾害风险等级较高。开挖后边坡主滑断面饱和状态稳定性计算结果详见表 3。

Table 3. Calculation results of saturation stability of main sliding section of slope after excavation
表 3. 开挖后边坡主滑断面饱和状态稳定性计算结果表

条块号	天然重度 (KN/m^3)	单宽面积 m^2	条块重量 KN/m	滑面长(m)	粘聚力 (kpa)	内摩擦角(度)	下滑力 kN/m	抗滑力 kN/m	传递系数	安全系数 Fs
E1	19.5	61.2	1193.4	15.6	15	12	900.7	400.4	$0.996-\frac{0.087}{Fs}$	
E2	19.5	73.1	1425.5	16.0	15	12	990.2	458.0	$0.839-\frac{0.545}{Fs}$	0.684
E3	19.5	32.6	635.7	10.9	15	12	121.3	296.2	-	

5. 支护设计方案

5.1. 设计工况

本文参照《建筑边坡工程技术规范》（GB50330—2013）[6]相关规定，将本边坡安全等级划定为一级永久边坡。本次设计设置两类核心控制工况：工况 1 仅考虑岩土自重作用；工况 2 为自重叠加地震作用。结合规范条文，自重持久工况安全控制系数取值 1.35，地震偶然工况安全系数按照规范要求取值。

5.2. 边坡支护设计计算

选取典型主滑剖面，遵循一级边坡规范安全储备要求，利用传递系数法分级计算修坡完成后不同工况条件下支护桩后侧剩余下滑推力，计算成果见表 4~6。不同工况下支护桩前后土体作用力汇总如表 6 所示。

Table 4. Calculation results of residual sliding force after graded slope repair and support pile for main sliding section design (considering self weight condition)
表 4. 主滑断面设计分级修坡后支护桩后剩余下滑力计算结果(考虑自重工况)

条块号	天然重度 (KN/m^3)	单宽面积 m^2	条块重量 KN/m	滑面长 (*m*)	粘聚力(kpa)	内摩擦角(度)	下滑力 kN/m	抗滑力 kN/m	传递系数	安全系数 *Fs*	剩余下滑力 kN/m
1	19.5	61.2	1193.4	15.6	15	12	900.7	400.4	0.932	1.35	604.1
2	19.5	73.1	1425.5	16.0	15	12	990.2	458.0	0.435	1.35	1212.1

Table 5. Calculation results of residual sliding force after graded slope repair of the main sliding section design and support piles (considering soil saturation and seepage conditions along the slope)
表 5. 主滑断面设计分级修坡后支护桩后剩余下滑力计算结果(考虑土体饱和 + 顺坡渗流工况)

条块号	天然重度 (KN/m^3)	单宽面积 m^2	条块重量 KN/m	滑面长 (*m*)	粘聚力(kpa)	内摩擦角(度)	下滑力 kN/m	抗滑力 kN/m	传递系数	安全系数 *Fs*	剩余下滑力 kN/m
1	19.5	61.2	581.4	15.6	15	12	877.6	315.1	0.932	1.35	644.2
2	19.5	73.1	694.5	16.0	15	12	964.9	346.2	0.435	1.35	1306.9

Table 6. Stress distribution before and after supporting piles under different calculation conditions
表 6. 不同计算工况条件下支护桩桩前及桩后受力情况

序号	工况条件	安全系数	剩余下滑力 kN/m	桩后土抗力 kN/m	桩身受力 kN/m
1	自重工况	1.35	1212.1	98.1	1114.0
2	土体饱和 + 顺坡渗流工况	1.35	1306.9	109.9	1197.0

5.3. 边坡传递系数法和数值模拟计算结果分析

1) 传递系数法边坡滑面形态为假想折线，采用人工分块，计算刚性块体滑坡安全系数。本边坡主要用于计算边坡开挖后、支护前工况。计算结果显示，边坡开挖后整体稳定系数 0.684，处于不稳定状态，需采用支护措施。但其难以计算多排支护桩及锚杆等复合支护条件下的边坡安全系数。

2) 数值模拟法可用来分析多排支护桩及锚杆复合支护下的边坡在天然条件和暴雨条件下的稳定性。数值模拟表明土体饱和 + 顺坡渗流工况下的应力、应变、位移和塑性区变化最为明显。

3) 传递系数法和数值模拟法两者结合使用，可以更全面地计算、分析边坡的稳定性，并为支护措施提供依据。

5.4. 边坡支护方案

坡体中下部规划建设学校教学楼，结合建筑物重要程度与使用年限要求，边坡治理工程设计使用年限设定为 50 年。本次边坡治理采用双排抗滑桩 + 分级放坡 + 坡面锚杆(锚索) + 完善截排水体系 + 坡面隔水封闭的复合支护方案。

依据传递系数法和数值模拟法求解得到的剩余下滑力，依托理正岩土抗滑桩计算模块开展桩身内力，

确定支护桩的截面尺寸和嵌固长度。根据内力计算结果，确定桩身各截面的弯矩、剪力等内力值，计算所需的钢筋总面积和布置方式，确保边坡支护桩的承载能力。坡面布设直径 1.4 m 双排抗滑桩，前后排桩排距 17.50 m，同排桩中心间距 1.8 m，所有桩顶设置通长钢筋混凝土冠梁。桩顶上方边坡按照 1:1.0 进行分级放坡，单级边坡高 10 m，坡间平台宽 10 m；纵向排水沟断面尺寸 400 mm × 400 mm，顶部平台结合周边地形平顺衔接。坡顶平台、各级马道表层铺设厚度 30 cm 压实黏土进行隔水封闭；各级坡面布设深层泄水孔，孔深 15 m，水平布设间距 3 m。

6. 支护设计方案可靠性验证

6.1. 边坡整体稳定性计算

选取主滑剖面开展治理后边坡整体稳定复核，采用传递系数法求解分级修坡后支护桩后侧剩余推力；以规范规定安全系数 1.35 作为控制条件，得到作用于支护结构的下滑荷载。由表 6 可知，自重工况、土体饱和顺坡渗流工况对应的剩余下滑推力分别为 1212.1 kN/m、1306.9 kN/m，选用大直径抗滑桩承担坡体下滑荷载[7]。为简化力学求解，将滑体作用于抗滑桩的荷载按照下滑力与桩前土体抗力差值进行折减，最终得到两种工况下桩身设计荷载依次为 1114 kN/m、1197 kN/m，并以此开展桩身配筋设计[8]。

6.2. 边坡治理后效果

工程实施阶段在坡顶与各级马道按照 20~25 m 间隔布设地表位移、沉降监测点位，合计布置了 62 个测点；沿边坡主滑方向选取了 7 个监测剖面，布置了 10 处深部测斜孔监测坡体内部变形。根据竣工后连续 2 a 监测成果，地表最大水平位移测点 WY24 累计变形 25.2 mm；地表最大沉降测点 WY20 累计沉降 12.30 mm；深部土体最大水平位移测点 CX9 累计变形 18.93 mm。监测周期内所有测点变形均未达到预警阈值，坡体保持稳定。边坡治理完工至今已满两年，支护结构、截排水设施运转状态良好，坡面植被恢复效果理想，填筑土体失稳风险得到消除，边坡能够安全投入运营[9]-[11]。

7. 结论

本研究基于传递系数法和数值模拟法对高填土矿山边坡的稳定性进行分析研究，以深圳外国语学校新建工程边坡为例，采用传递系数法和 MIDAS NGTS 软件分析计算了边坡治理前后的整体稳定性，提出填土边坡支护方案方案，采用边坡监测数据验证了边坡治理后的稳定性。得到如下结论：

(1) 通过分析，传递系数法能够满足回填矿山边坡稳定计算需求，方法实用性较强。该方法需要对边坡模型进行适当简化，更适合自然边坡或者仅布置抗滑桩的支护工况，难以充分考虑锚索、锚杆等多种支护构件协同作用，计算得到的稳定安全系数偏于乐观。

(2) 结合规范规定的安全储备指标开展数值仿真试算，能够有效求解支挡构筑物外部荷载，为支挡结构布设位置、截面尺寸、钢筋配置设计提供依据。

(3) 依托传递系数法结合数值仿真联合分析思路确定复合支护方案，同步配套系统化截排水措施与坡面生态治理手段，可以有效控制采石坑回填高填方边坡变形、消除地质灾害隐患。该成套分析手段可为同类高填方矿山边坡设计提供可靠技术支撑。

参考文献

[1] 顾宝和, 毛尚之. 滑坡稳定分析传递系数法的讨论[J]. 工程勘察, 2006, 209(12): 8-11+31.

[2] 耿雪峰. 基于传递系数法的人工填土边坡稳定性分析[J]. 土工基础, 2023, 37(6): 915-919.

[3] 夏艳华, 白世伟. 传递系数法在滑坡治理削坡方案设计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 5.

[4] 孙玉科, 杨志法, 姚宝魁, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.

[5] 陈冲, 王卫, 吕华永. 基于复合抗滑桩模型加固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2019(8): 3207-3217.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 联合发布. 《建筑边坡工程技术规范》（GB50330—2013）[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[7] 张延森, 邱化廷. 影响露天金属矿山开采边坡安全的因素及安全技术分析[J]. 世界有色金属, 2022(17): 232-234.

[8] 李克钢, 张雪娅, 秦庆词, 等. 基于岩体扰动参数的边坡结构优化[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 780-787.

[9] 崔松军, 王飞飞, 等. 露天采场多台阶滑坡机理与理方案研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(5): 65-69.

[10] 杜时贵, 雍睿, 陈喆扦, 等. 大型露天矿山边坡岩体稳定性分级分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2601-2611.

[11] 衣瑛, 亢建民, 钟小宇, 等. 哑巴岭露天采场边坡工程地质特征分区与稳定性评价[J]. 采矿技术, 2022, 22(1): 42-46.