

含大粒径漂石复合地层地下连续墙槽壁稳定性三维极限分析与控制研究

严浩铭, 周维成

武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

针对含大粒径漂石、卵石等非均质复合地层中地下连续墙成槽极易失稳塌孔的工程难题, 本文依托北京地铁1号线支线工程, 提出了一套理论评价、数值揭示、现场控制的完整方案。首先, 突破传统均质地层假设与二维平面应变局限, 基于塑性力学上限极限分析定理与空间刚体离散技术, 构建了适用于三维复合地层的二阶锥规划(SOCP)优化模型, 推导并反演了维持槽壁稳定的极小泥浆重度。其次, 构建三维非线性有限差分模型, 揭示了复合地层槽壁的宏观失稳机理与空间应力-应变演化规律。最后, 基于理论预测的极限目标参数, 研发了适用于大孔隙地层的高分子聚合物改性泥浆, 并通过现场高频超声波探测验证了控制效果。试验结果表明复合地层临界滑移面受抗剪强度空间突变控制, 呈现显著的“折射”与“土拱”效应; 最危险破坏面具有极强的“地层靶向性”, 优先发育于低黏聚力卵石层; 理论优化的聚合物泥浆(密度 1.12 g/cm^3)成功在深部易扰动地层孔隙中水化固结出3~5 mm厚的致密低透泥皮, 实现了长达8小时、深36 m槽壁的全尺度稳定。

关键词

复合地层, 二阶锥规划, 数值模拟, 泥浆护壁机制, 超声波探测

Three-Dimensional Limit Analysis and Control Study on the Stability of Diaphragm Wall Trench Walls in Composite Strata Containing Large-Grain Boulders

Haoming Yan, Weicheng Zhou

School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: April 27, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

To address the critical engineering challenge of extreme vulnerability to instability and trench collapse during the excavation of diaphragm walls in heterogeneous composite strata containing large boulders and cobbles, this paper proposes a comprehensive scheme integrating theoretical evaluation, numerical investigation, and on-site control, based on the Branch Line Project of Beijing Subway Line 1. First, breaking through the limitations of the traditional homogeneous stratum assumption and two-dimensional (2D) plane strain, a Second-Order Cone Programming (SOCP) optimization model applicable to three-dimensional (3D) composite strata was constructed. This model, based on the upper bound limit analysis theorem of plasticity and 3D rigid block discretization technique, deduced and back-calculated the minimum slurry unit weight required to maintain trench wall stability. Second, a 3D nonlinear finite difference model was established to reveal the macroscopic instability mechanism and the spatial stress-strain evolution patterns of the trench wall in composite strata. Finally, based on the theoretically predicted limit target parameters, a polymer-modified slurry suitable for highly porous strata was developed, and its stabilization effect was verified through *in-situ* high-frequency ultrasonic detection. The experimental results demonstrate that the critical slip surface in composite strata is controlled by the spatial abrupt variation in shear strength, exhibiting significant “refraction” and “soil arching” effects. Furthermore, the critical failure surface displays a strong “stratum-targeting” characteristic, preferentially developing in the low-cohesion cobble layer. The theoretically optimized polymer slurry (density 1.12 g/cm³) successfully hydrated and consolidated within the pores of the deep, easily disturbed strata to form a dense, low-permeability filter cake with a thickness of 3~5 mm, achieving full-scale stability of the 36 m deep trench wall for up to 8 hours.

Keywords

Composite Strata, Second-Order Conic Programming, Numerical Simulation, Mud-Supported Wall Mechanism, Ultrasonic Detection

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

地下连续墙因其刚度大、整体性好及抗渗性能优异,已成为城市深大基坑与地铁工程中最核心的围护结构形式之一[1][2]。成槽阶段的槽壁稳定性是地连墙施工的安全命脉,槽壁一旦发生局部剥落或深层滑塌,不仅会导致后续钢筋笼下放受阻、混凝土浇筑超方,更将引发地表沉降及周边敏感管线的灾难性破坏[3][4]。

在槽壁稳定性评价领域,传统方法多基于经典极限平衡理论(如二维楔体、三维棱柱体破坏模型),这些解析模型大多建立在土体为均质、各向同性的理想假设之上。然而,在我国华北地区(如北京京西地区),广泛分布着冲洪积相的含大粒径漂石、卵石复合地层[5]-[7]。此类地层呈现典型的上软下硬、交互沉积的非均质特性,其物理力学参数在空间上存在极大的变异性与不连续性[8][9]。由于无法刻画地层界面的参数突变效应,传统均质模型不仅难以准确捕捉漂石与周边软弱土体的协同失稳机制,更极易低估局部抗剪强度不足引发的深层塌孔风险[10][11]。近年来,有限元(FEM)和有限差分法(FDM)等非线性数值计算

方法被广泛引入该领域, 能够较好地模拟复杂地层的渐进破坏过程[12]-[15]; 但数值方法计算成本高昂, 且属于正向分析, 难以直接反演求解工程现场迫切需要的极小泥浆重度等关键控制性边界参数[5] [16]。

塑性力学极限分析上限定理[17]-[20]通过构建运动学许可速度场, 能够从能量耗散的角度严格界定结构的极限承载状态, 近年来在边坡与隧道工程中大放异彩。基于此, 本文以北京地铁 1 号线支线体育场南街站深地连墙工程为依托, 引入空间刚体离散技术[21] [22]与二阶锥规划(SOCP)数学优化算法[23] [24], 建立一种能够严密考虑地层力学属性三维空间非连续性的槽壁稳定性分析理论。本文首先通过 SOCP 理论模型反求极限泥浆重度并剖析微观滑移机制; 随后利用 FLAC3D 数值模拟揭示宏观失稳靶向规律; 最终, 基于理论计算的目标阈值, 指导现场高分子聚合物泥浆的配比优化, 并通过高频超声波无损成像技术[25]对槽壁控制效果进行严密的工程实测, 以期类似复合地层深槽开挖提供科学、定量的分析与控制体系。

2. 复合地层槽壁稳定性三维极限分析理论

2.1. 极限分析上限定理与空间离散

基于塑性力学上限定理, 系统处于极限状态时, 外力所做功率必然大于或等于内部能量耗散率, 由于复合地层中土体参数黏聚力、内摩擦角、重度在空间上是不连续的, 本文将待分析的三维土体离散为 m 个刚性四面体单元, 节点数为 n 。每一个节点具有三维速度矢量 $\mathbf{v}_i = [u_i, v_i, w_i]^T$, 整个系统的未知速度变量为单一系列向量 $\mathbf{X} (3n \times 1)$ 。并且由于四面体是刚性, 发生塑性滑移即速度具有不连续性, 且发生在相邻两个四面体共享的公共三角形面上, 面上的速度矢量 $\Delta \mathbf{v}_f$ 满足:

$$\Delta \mathbf{v}_f = \mathbf{T}_f \mathbf{X}$$

根据 Mohr-Coulomb 屈服准则的相关联流动法则, 面 f 上的法向相对速度与切向相对速度必须满足 $\Delta \mathbf{v}_{nf} = \|\Delta \mathbf{v}_f\| \tan \phi'_f$, 其中, ϕ'_f 为面 f 所在位置土层空间的有效内摩擦角。

2.2. 复合地层功率平衡方程构建

在极限分析框架下, 功率主要由内能耗散功率、土体自重功率、泥浆支护力功率、孔隙水压力功率组成, 分别见式(1~式(4))。

$$D_{\text{int}} = \sum_{f \in \text{internal}} c'_f A_f \|\Delta \mathbf{v}_f\| \quad (1)$$

$$W_\gamma = \sum_{k=1}^{M-1} (\gamma'_k V_k) w_{c,k} = \mathbf{C}_\gamma^T \mathbf{X} \quad (2)$$

$$W_s = \sum_{f \in \text{trench}} \mathbf{F}_{s,f} \cdot \mathbf{v}_{c,f} = \mathbf{C}_s^T \mathbf{X} \quad (3)$$

$$W_u = \sum_{f \in \text{internal}} (u_f A_f \tan \phi'_f) \|\Delta \mathbf{v}_f\| \quad (4)$$

2.3. 二阶锥规划模型求解

为获得最危险的滑移面与安全系数, 寻找一个最大荷载乘数 α 施加在土体自重上, 使得系统达到极限平衡状态, 引入辅助变量 $\mathbf{p}_f = \|\Delta \mathbf{v}_f\|$, 将非线性优化转化为标准二阶锥问题:

目标函数: $\text{Max } \alpha$

约束条件见式(5)~式(8)

$$\alpha (\mathbf{C}_\gamma^T \mathbf{X}) + \mathbf{C}_s^T \mathbf{X} - \sum (c'_f A_f + u_f A_f \tan \phi'_f) p_f = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{t}_{nf}^T \mathbf{X} - p_f \tan \phi'_f = 0 \quad (6)$$

$$\|\mathbf{T}_f \mathbf{X}\| \leq p_f \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_\gamma^T \mathbf{X} = 1 \quad (8)$$

求解出安全系数 $F_s = 1/\alpha_{\max}$, 并且可通过调整目标函数直接反求维持槽壁稳定的最小泥浆极限重度 γ_{\min} 见式(9)和式(10)。

$$\gamma_m^{trial} = \frac{W_S - W_{int} - W_u}{Q_m} \quad (9)$$

$$\gamma_{\min} = \max_{\mathbf{V} \in \mathbf{K}} \left\{ \frac{\mathbf{W}_S \mathbf{V} - \mathbf{W}_{int}(\mathbf{V}) - \mathbf{W}_u(\mathbf{V})}{Q_m(\mathbf{V})} \right\} \quad (10)$$

3. 槽壁失稳机理与稳定性参数分析

3.1. 复合地层空间破坏面形态演化

基于本文建立的三维 SOCP 上限极限分析模型, 构建上软下硬与上硬下软两类双层复合地层基准模型。通过追踪目标函数(最大荷载乘数)寻优过程中的运动学许可速度场, 系统剖析了土层界面参数突变对临界滑移面空间形态的非线性演化规律, 见图 1 所示。

从图 1(a)所示, 有效黏聚力的空间差异对滑动面的展布具有决定性重塑作用。由于内部能量耗散功率泛函高度依赖于滑移面上的有效黏聚力 c' , 优化算法在三维空间内自适应寻求最小能量耗散路径, 当上下层 c' 值差异显著时, 运动学许可速度场在穿过土层物理交界面时, 因抗剪强度的断崖式突变产生了强烈的折射现象, 为了规避高耗散区, 破坏面在低黏聚力(弱)土层中发生显著的侧向扩张, 而在高黏聚力土层中则急剧收缩。当界面两侧 c' 差异达到临界值阈值时, 可能会演化出沿地层界面的断层式非连续滑移机制。

内摩擦角 ϕ 不仅决定了材料的剪胀特性, 更是控制复合地层刚性块体体积分配与破坏边界几何拓扑的最核心敏感参数。从图 1(b)所示, 在 $\phi_1 > \phi_2$ 工况下, 上部高摩擦角地层极大地抑制了浅层塑性变形, 破坏面在浅部迅速向槽壁收敛; 而深部低摩擦角软土层则因抗剪不足, 极易诱发大范围的深层滑动。这种界面处的角度突变现象表明, 上覆高强度地层产生了显著的土拱效应, 将剪切破坏的核心区域向下钉扎于深部软弱层, 从而加剧了深层塌孔的风险。

与抗剪强度参数相比, 土体有效重度的差异对滑移面轮廓的扰动极其微弱(图 1(c))。从力学本质剖析, 重度 γ 作为滑移体失稳的主驱动力, 直接参与外部重力功率的做功项, 但并不改变土体材料的塑性流动法则与 Mohr-Coulomb 屈服边界。因此, 抗剪强度比值(c_1/c_2 与 ϕ_1/ϕ_2)是主导破坏面空间形态的核心参量, 而重度比值的作用退居次位。

3.2. 数值模拟宏观响应机制

为验证 SOCP 理论分析的可靠性, 采用 FLAC3D 非线性有限差分软件, 构建了北京地铁 1 号线支线体育场南街站深地连墙三维全尺寸模型。模拟采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构, 分别设置 10 m、20 m、30 m 等阶梯开挖工况, 揭示槽壁的空间应力-应变响应机制。

从图 2(a)中的应力与塑性区分布云图中可以看出, 槽壁最危险破坏面并未随成槽深度的增加而呈线性向下延伸, 而是严格受控于地层的空间力学属性, 表现出显著的地层靶向性, 在 20 m 和 30 m 的深槽工况下, 最大剪切塑性区未出现在槽底, 而是高度集中于第四纪沉积卵石层段。该层具有粒径大、黏聚

力极低的典型特征, 成为抵抗侧向卸荷变形的薄弱环节。20 m 工况下塑性区则主要转移并滞留于砂质粉土层。这一宏观数值现象与前述理论分析中滑移面主动寻找弱抗剪强度路径进行能量释放的力学规律实现了高度的交叉印证。

从图 2(b)与图 2(c)中表明了土体黏聚力 c 对抑制槽壁侧向变形的非线性影响。通过敏感性对比分析发现, 当土体黏聚力由 10 kPa 提升至 30 kPa 时, 地表及浅层最大水平位移由 3.74 m 锐减至 2.72 m, 降幅高达 27%。高黏聚力显著增强了土体骨架的自稳能力, 有效遏制了深部卸荷诱发的地表沉降槽扩展。黏聚力的提升促使槽壁破坏模式发生根本性改变。在最大剪切应变场中, 高应变核心区大幅收缩, 峰值应变增量由 2.87 骤降至 1.91。当 $c = 10 \text{ kPa}$ 时, 土体表现为广域分布的拉-剪复合型屈服; 当 $c = 30 \text{ kPa}$ 时, 拉伸破坏带基本消散, 塑性屈服仅局限于槽底尖端应力集中区的局部剪切破坏, 槽壁整体稳定性得到质的跃升。

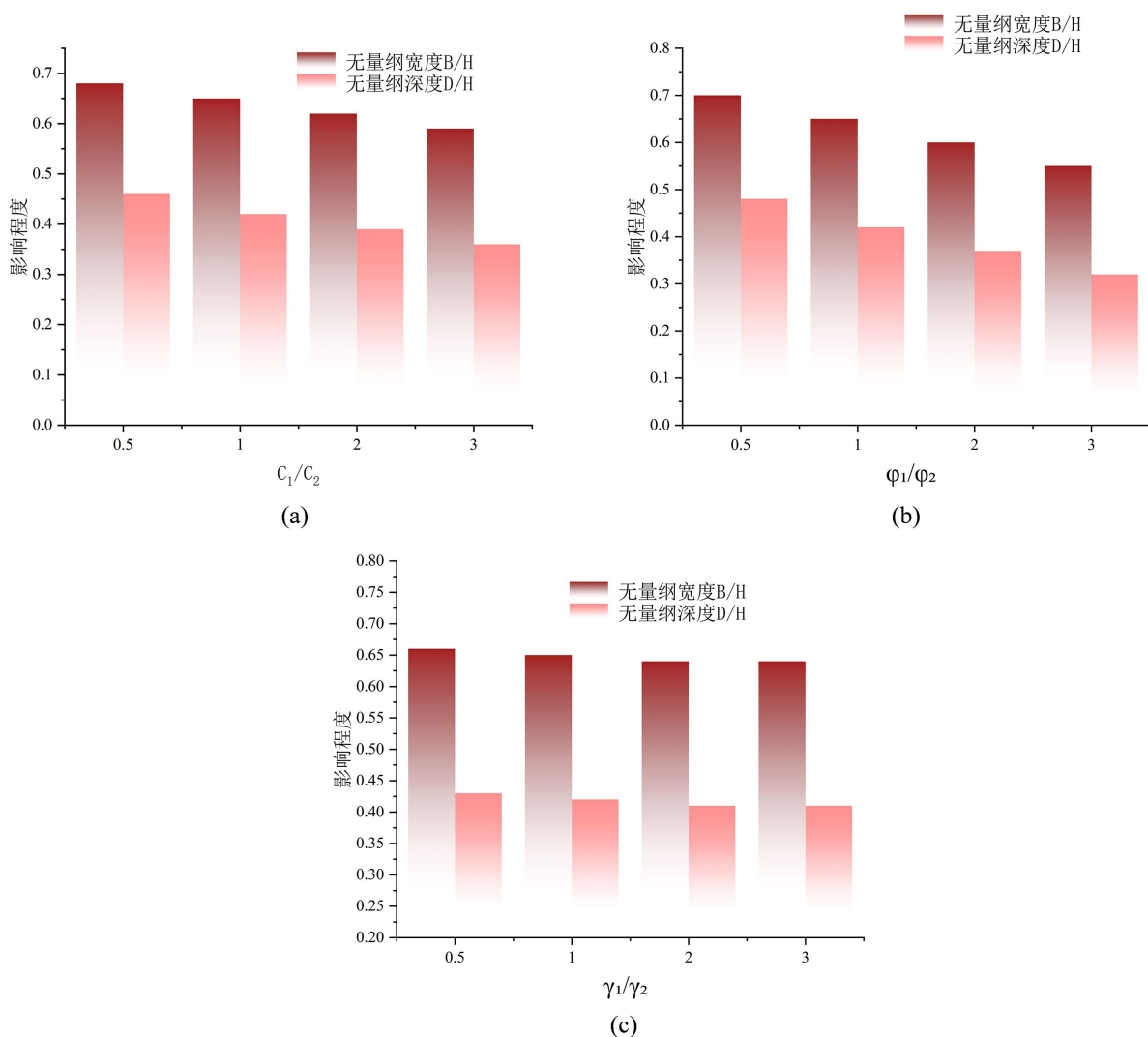


Figure 1. Effect of shear strength ratio on the failure surface. (a) The effect of the cohesion coefficient c on the kinematic failure plane; (b) The effect of the internal friction angle ratio on the kinematic failure surface; (c) The effect of the soil density ratio on the morphology of kinematic failure surfaces

图 1. 抗剪强度比值对破坏面的影响。(a) 粘聚力 c 比值对运动学破坏面的影响; (b) 内摩擦角比值对运动学破坏面的影响; (c) 土体重度比值对运动学破坏面形态的影响

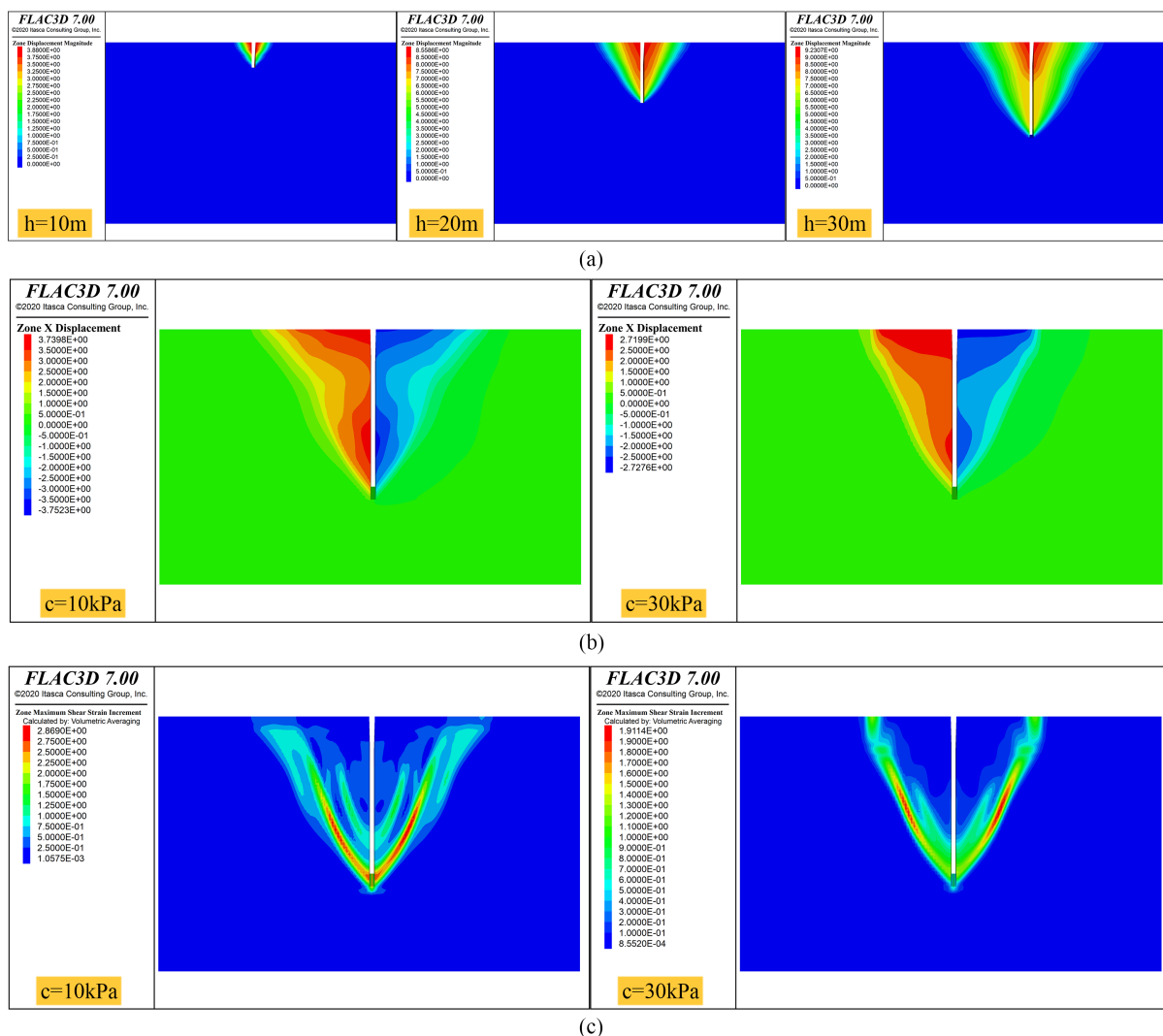


Figure 2. Numerical simulation of a deep underground diaphragm wall. (a) Stress distribution contour plot for a deep-trench continuous wall; (b) Contour map of horizontal displacement distribution for deep-trench diaphragm walls; (c) Contour plot of the distribution of the maximum horizontal shear strain increment for deep-trench diaphragm walls

图 2. 深地连续墙数值模拟。(a) 深槽连续墙应力分布云图; (b) 深槽连续墙水平位移分布云图; (c) 深槽连续墙水平最大剪切应变增量分布云图

4. 基于理论极限的泥浆优化与现场控制验证

4.1. 泥浆极限重度预测与配比优化

基于本文构建的复合地层三维 SOCP 模型反演计算, 维持体育场南街站含大粒径漂石卵石地层槽壁稳定的极限泥浆重度理论最小阈值为 $\gamma_{\min} = 1.12\text{g}/\text{cm}^3$ 。然而, 传统工程经验配制的钠基膨润土泥浆密度通常徘徊在 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ 左右, 其提供的静液柱压力严重不足以抵抗该复合地层深槽的侧向土压力。为此, 本文摒弃传统的单一加重思路, 引入高分子聚合物改性技术, 开展了泥浆流变学与滤失性能的系统优化试验。

以 100g 钠基膨润土复配 960g 水作为基浆, 首先添加 4% 的重质烧碱(NaOH)以优化水化分散相环境, 使基浆胶体率稳定在 90% 。见图 3(a)所示, 在引入不同加量梯度的提粘护胶剂后, 羧甲基纤维素(CMC)

对基浆体系的表现黏度提升最为显著。从微观大分子链理化机制来看, CMC 长链分子能够有效吸附在膨润土颗粒表面形成空间网状交联结构, 极大地增强了泥浆的悬浮携渣能力。试验表明, 当 CMC 添加量达到钠基膨润土质量的 1% 时, 泥浆漏斗黏度跃升至 24.5 s, 达到最优流变阈值, 且在基础改性剂协同作用下保持高度稳定的胶体悬浮态。

针对漂石卵石地层孔隙率大、极易发生泥浆漏失的工程痛点, 引入聚丙烯酸钠(Na-PAM)进行滤失控制。如图 3(b)所示, Na-PAM 表现出卓越的降滤失性能。当 Na-PAM 添加量达到膨润土质量的 3% 时, 泥浆的 API 标准滤失量骤降至 24 mL/30min。其微观力学机制在于: Na-PAM 分子链在压差作用下进入地层孔隙, 发生水化膨胀与桥接絮凝, 迅速在渗透性极强的卵石地层壁面形成一层低渗透性的致密聚合物泥皮。在此优化配比基础上, 精准混入 1% 重晶石粉, 将最终泥浆密度锚定于理论目标值 1.12 g/cm³。

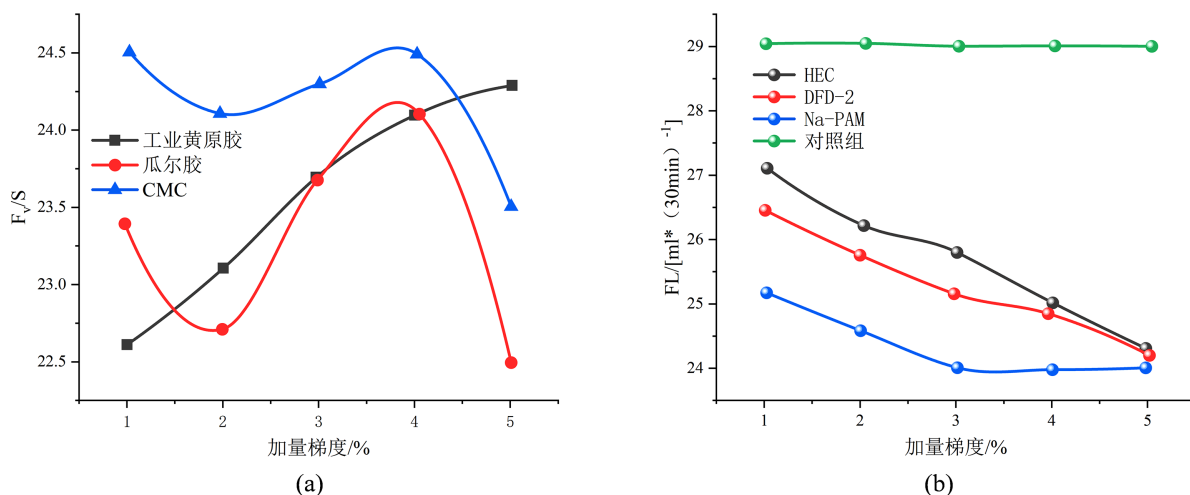


Figure 3. Results of the slurry optimization. (a) Testing the viscosity of mud in a funnel using a mud-thickening agent at different dosage gradients; (b) Graph showing the results of mud loss tests using different polymers and varying dosage gradients

图 3. 泥浆优化结果。(a) 不同加量梯度提粘护胶剂泥浆漏斗黏度测试; (b) 添加不同聚合物不同加量梯度泥浆滤失量测试结果

4.2. 现场超声波实测验证

为验证理论计算与室内优化的可靠性, 将上述高分子复合优化泥浆体系定点应用于北京地铁 1 号线支线现场。选取设计深度 36 m、槽宽 0.8 m 的典型高风险槽段, 利用高频超声波孔壁测定仪[26] [27], 分别于成槽终孔静置 1 h、4 h 及 8 h 后, 开展三维空间无损成像检测。

图 4 的超声波扫描雷达回波图提供了槽壁全深度稳定性演化的直观证据, 在 0~36 m 的全深度域内, 超声波反射界面提取的槽壁两侧轮廓线始终保持平直连续。未探测到明显的局部凹陷(扩孔)或颈缩(缩径)畸变, 充分证明 1.12 g/cm³ 泥浆静液压力在三维空间内完美平衡了复合地层的非均匀侧向土压力。在极易塌孔的卵石分布标高内, 超声波图像清晰捕捉到紧贴槽壁连续弱反射带。从声学原理分析, 该低声速带正是 CMC 与 Na-PAM 聚合物大分子深度渗入孔隙、发生固结水化后形成的 3~5 mm 厚低渗透致密泥皮。这层泥皮作为隔离流体静压力与土骨架的物理隔膜, 是维持大孔隙漂石层稳定的关键阻滑界面。对比 1 h 至 8 h 的时间序列回波图可知, 历经长时间静置, 槽壁形态特征与泥皮厚度保持高度固化, 未发生泥浆沉淀分层或泥皮剥落退化。现场实测硬数据形成了完整的闭环, 不仅无可辩驳地证实了本文三维 SOCP 极限分析模型在复杂地层参数预测中的超高精度, 更凸显了聚合物优化泥浆体系在深大复合地层

成槽中的卓越工程应用价值。

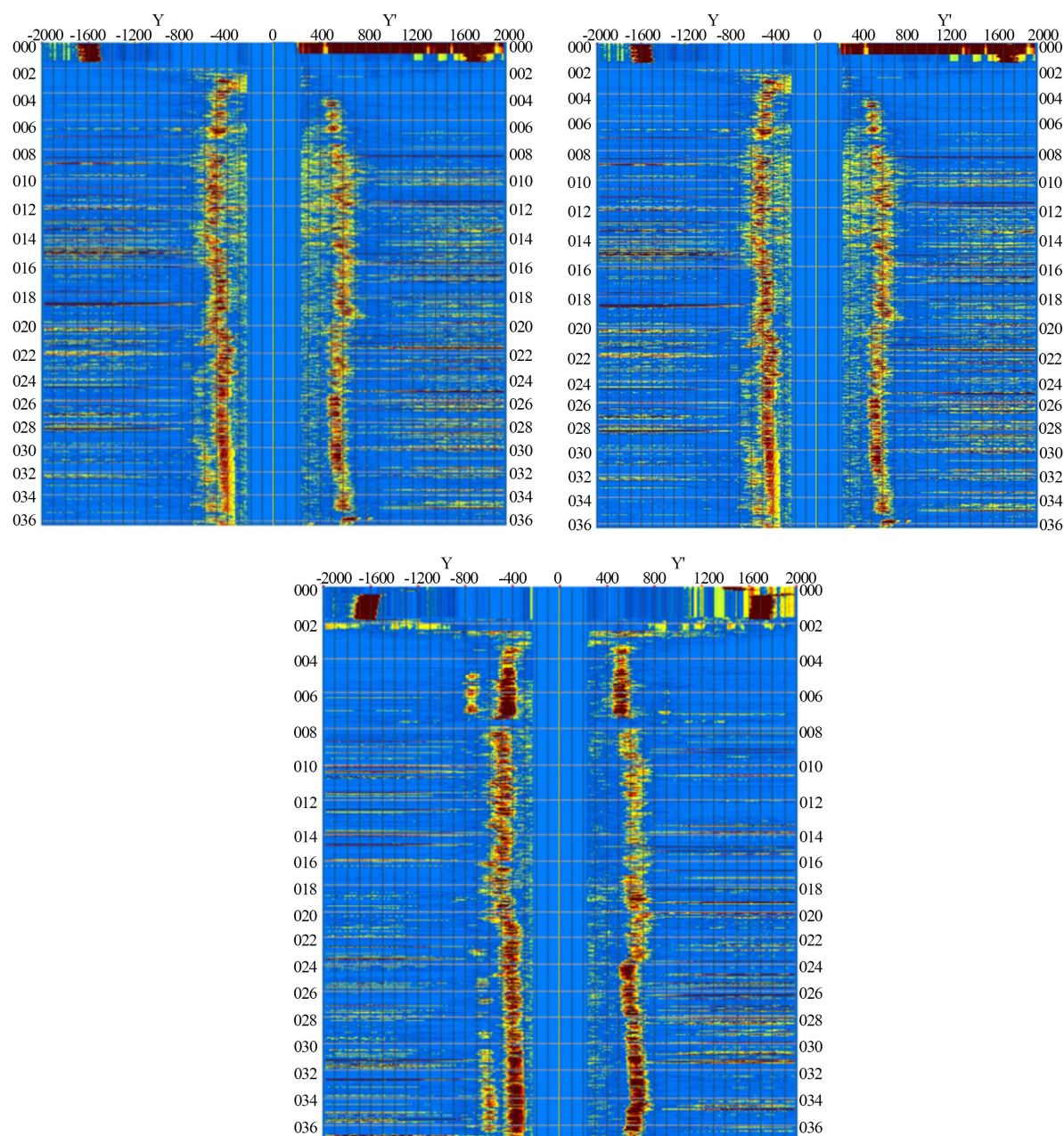


Figure 4. Ultrasound imaging

图 4. 超声波扫描成像

5. 结论

本文针对含大粒径漂石卵石复合地层地下连续墙成槽易失稳的难题, 融合三维极限分析理论、非线性数值模拟与现场流变学控制试验, 形成了一套严密的槽壁稳定评价与控制体系。得出以下主要结论:

(1) 构建了复合地层三维 SOCP 上限分析模型, 从理论上揭示了复合地层临界破坏面的几何拓扑强烈受控于上下地层抗剪强度的空间突变。黏聚力 c 的断崖式差异导致滑移面在弱土层中寻求最小耗散路

径, 产生显著的折射扩张现象; 而内摩擦角 ϕ 的层间差异则诱发土拱效应, 决定了三维破坏体的体积分配与深层钉扎机制。

(2) 揭示了复合地层槽壁失稳的地层靶向性与变形演化规律, FLAC3D 三维非线性数值模拟证实, 深槽连续墙的最危险破坏面并不随成槽深度线性向下发育, 而是主动向第四纪卵石层等低黏聚力薄弱带集中。土体黏聚力的小幅提升(10 kPa 至 30 kPa)即可促使槽壁破坏模式由广域拉-剪复合型向局部剪切屈服型发生的根本性转化, 并且水平变形降幅可达 27%。

(3) 实现了理论预测、配比优化、现场实测的工程控制流程, 基于 SOCP 理论反演求得的极限泥浆重度阈值(1.12 g/cm³), 摒弃了传统单一加重泥浆体系, 研发了 CMC-PAM 复合高分子聚合物改性泥浆。现场高频超声波三维无损探伤证实, 该优化泥浆凭借卓越的网状交联与降滤失性能, 成功在极易塌孔的卵石地层孔隙中水化固结出 3~5 mm 厚的低渗透致密泥皮。成槽静置 8 小时内, 深达 36 m 的槽壁轮廓平直连续, 这说明了 CMC-PAM 复合高分子聚合物改性泥浆对塌孔、缩径具有很大的改善, 同时充分验证了本文理论模型的高精度与工程控制方案的卓越可靠性。

参考文献

- [1] 黄茂松, 王鸿宇, 谭廷震, 等. 地下连续墙成槽整体稳定性的工程评价方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 795-803.
- [2] 路乾, 胡长明, 王晓华, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁整体稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 864-871.
- [3] 王启云, 林华明, 臧万军, 等. 深厚软弱地层地下连续墙槽壁稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35): 58-64.
- [4] 黄茂松, 宁剑新, 俞剑, 等. 砂土地层中泥浆护壁地连墙成槽稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(7): 1767-1777.
- [5] 姜厚停, 周秀普, 李志强, 等. 厚卵石地层地下连续墙槽壁失稳机理及护壁泥浆性能研究[J]. 市政技术, 2019, 37(6): 220-223.
- [6] 刘明玮, 王小龙, 朱晶晶, 等. 超深基坑地下连续墙渗漏缺陷温度示踪测试分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(6): 1525-1531.
- [7] 桑松. 高渗透大粒径砂卵石地层地下连续墙成槽施工技术研究[J]. 建筑技术, 2025, 56(24): 2980-2983.
- [8] 白楠, 尹长海, 王君. 不良地质条件下地下连续墙成槽施工技术[J]. 施工技术, 2012, 41(6): 110-112.
- [9] 安辰亮, 吴文亮, 赵小鹏, 等. 跨软弱夹层地下连续墙槽壁局部稳定性分析[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(3): 7-12, 39.
- [10] 袁浩峦, 李云涛. 海域围堰上软下硬地层中地下连续墙施工技术研究与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 254-259.
- [11] 王晓华, 贾文彪, 胡长明, 等. 地下连续墙成槽施工槽壁稳定时空效应的分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(2): 101-107.
- [12] 王松, 朱永强, 姚韦靖. 狭长深基坑开挖过程中位移变化及受力的有限元分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2025, 43(10): 78-81.
- [13] 许源华, 贺太红, 谢配红, 等. 基于 FLAC3D 的复杂堆积体稳定性分析及其治理研究——以贵州都匀-安顺高速公路摆拢大桥堆积体为例[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(5): 112-121.
- [14] 朱浩, 易辉, 苗祯, 等. 基于 FLAC3D 软件模拟的高层建筑空调管道应力、稳定性及碳排放影响研究[J]. 江西建材, 2024(10): 460-463.
- [15] 成小飞, 徐辰皓, 杨岳峰, 等. 基于 FLAC3D 软件模拟港池疏浚对高桩码头结构及岸坡的影响[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(3): 53-61.
- [16] 崔根群, 刘瑶. 基于槽壁稳定性的地下连续墙成槽施工泥浆重度计算方法[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 178-183.
- [17] 尹宏磊, 徐千军, 李仲奎. 膨胀变形对膨胀土边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2506-2510.
- [18] 陈祖煜汪, 王玉杰, 王剑, 陆峰. 拱座稳定的三维极限分析[J]. 水利学报, 2001(8): 1-6.

-
- [19] 尹宏磊, 徐千军, 李仲奎. 单元集成法在地基承载力分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007(2): 285-288.
- [20] 孙志彬, 罗跃, 杨小礼, 等. 基于塑性极限分析的长边坡三维稳定上限解[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 94-99.
- [21] 黄阜, 张洪源, 张敏, 等. 基于空间离散技术的盾构隧道近距离下穿既有隧道开挖面稳定性研究[J/OL]. 华东交通大学学报, 2026: 1-14. <https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20260320.010>, 2026-05-26.
- [22] 夏丘炜晗, 张斌. 非结构四面体网格的步进短特征线空间离散格式研究[J]. 现代应用物理, 2025, 16(4): 101-107.
- [23] 侯祖锋, 林桂辉, 郭华君, 等. 基于鲁棒混合整数二阶锥规划的配电网故障恢复策略[J]. 电子器件, 2024, 47(6): 1619-1624.
- [24] 孙锐, 张箭, 阳军生, 等. 基于 Mohr-Coulomb 准则和二阶锥规划技术的轴对称自适应下限有限元法[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2387-2395.
- [25] 邢亮. 超声波法在地下连续墙成槽质量检测中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2015, 22(7): 25-27.
- [26] 杨武厂. 天津地区超深地下连续墙成槽关键技术[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 291-295, 301.
- [27] 张朝南. 超声透射法在地铁工程地下连续墙完整性检测中的应用[J]. 工程技术研究, 2025, 10(16): 108-110.