

地震作用下非均质土体隧道掌子面支护力极限上限分析

罗伟, 王海峰, 陈静瑜, 肖葛全, 龚著龙

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为探究复杂工况下隧道掌子面稳定性, 基于线性 Mohr-Coulomb 准则, 利用空间离散与“点生点”技术, 构建综合考虑土体非均质及地震效应的三维主动破坏模型, 引入非均质系数表征黏聚力随深度线性分布特征, 推导极限支护力上限解析解并通过 MATLAB 优化求解。对比验证表明该方法计算精度良好。研究结果显示: 地震效应显著降低掌子面稳定性, 极限支护力随水平地震加速度系数及竖向地震比例系数增大而提高, 且竖向地震对支护力的相对增幅具有非线性放大特征; 土体非均质性有利于增强自稳能力, 极限支护力与非均质系数呈显著线性负相关, 充分利用深部土体强度增长特性可优化支护设计; 然而强震作用会削弱土体非均质性带来的安全收益, 高烈度区工程设计需提高抗震冗余度。

关键词: 隧道工程; 稳定性分析; 极限分析上限定理; 地震效应; 土体非均质

中图分类号: U451

文献标志码: A

Upper Bound Limit Analysis of Tunnel Face Support Pressure in Non-homogeneous Soil Under Seismic Action

Luo Wei, Wang Haifeng, Chen Jingyu, Xiao Gequan, Gong Zhulong

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Jiangxi Nanchang 330013)

Abstract: To investigate tunnel face stability under complex working conditions, a three-dimensional active failure model incorporating soil non-homogeneity and seismic effects is constructed based on the linear Mohr-Coulomb criterion, utilizing spatial discretization and "point-generation" techniques. A non-homogeneity coefficient is introduced to characterize the linear distribution of cohesion with depth, and an analytical upper-bound solution for the limit support pressure is derived and optimized via MATLAB. Comparative validation demonstrates that the proposed method possesses good calculation accuracy. The results indicate that seismic effects significantly reduce tunnel face stability; the limit support pressure increases with the rise of the horizontal seismic acceleration coefficient and the vertical seismic proportionality coefficient, with the vertical seismic action exhibiting a non-linear amplification effect. Conversely, soil non-homogeneity contributes to enhancing self-stability capabilities; the limit support pressure shows a significant linear negative correlation with the non-homogeneity coefficient, suggesting that fully utilizing the strength increase characteristics of deep soil can optimize support design. However, strong seismic action weakens the safety benefits derived from soil non-homogeneity, necessitating increased seismic redundancy in engineering designs for high-intensity earthquake zones.

Key words: Tunnel engineering; Stability analysis; Upper bound theorem of limit analysis; Seismic effect; Soil non-homogeneity.

随着地下空间开发的不断深入, 隧道工程面临的建造环境日益复杂。在天然土层中进行隧道掘进时, 掌子面的稳定性控制是确保施工安全的核心环节^[1-2]: 支护力不足易诱发前方土体坍塌与地表沉降, 而支护力过大则可能导致掌子面隆起破坏。受长期自重固结影响, 实际工程中的土体抗剪强度往往表现出随埋深递增的非均质特性。此外对于地处地震区的隧道, 突发的地震动荷载极易打破掌子面前方土体的力学平衡。因此建立考虑土体非均质特征及地震效应的掌子面稳定性分析模型, 对于准确评估隧道施工风险具有重要的工程意义。

近年来, 极限分析上限法因其力学概念明确、计算简便, 被广泛应用于隧道掌子面稳定性评价中^[3-7]。Mollon 等^[8]突破了传统规则锥体模式的局限, 首创性地利用空间离散与“点生点”技术构建了三维旋转破坏机制, 显著提升了极限支护力的计算精度; 为进一步提高求解效率与收敛性, 王伟等^[9]基于自适应混合常应力-光滑应变极限分析方法, 验证了其在掌子面稳定性分析中的优势, 定量揭示了开挖未支护段长度对稳定性的影响规律; 许敬叔等^[10]通过编程求解了三维支护压力的最优上限解; 尹水金等^[11]结合空间离散技术与非线性 Hoek-Brown 准则, 建立了改进的倾斜隧道掌子面主被动破坏模型, 分析表明盾构偏仰角是影响掌子面稳定的关键因素; 此外, 针对地层材料的复杂特性, 石修松等^[12]引入非线性 Hvorslev 面描述土体强度, 通过切线技术推导了考虑超固结比随深度变化的黏土层掌子面极限支护力, 弥补了传统方法无法反映土体应力历史及超固结特性的不足; Zhao 等^[13]对纵向倾斜浅埋隧道掌子面的三维稳定性进行了深入探讨。在土体非均质研究方面, 学界也已开展了大量深入的研究^[14-16]。然而现有的隧道地震稳定性研究多基于均质土层假设^[17], 这往往导致计算结果与工程实际存在偏差, 且对地震作用在非均质土体中的影响机制鲜有涉及, 相关理论体系尚待完善。

针对上述研究不足, 本文基于极限分析上限法与空间离散技术, 构建了能够反映土体非均质特征与地震效应的掌子面三维主动破坏模型。研究中引入拟静力法模拟地震作用, 并结合黏聚力随深度线性增加的非均质参数, 推导出复杂工况下极限支护力的上限解析解, 进而通过 MATLAB 编程实现目标函数的全局寻优求解。最后通过与三维数值模拟及既有文献的对比验证了理论方法的可靠性, 并重点揭示了地震加速度系数与土体非均质参数对极限支护力的影响规律。本研究成果可为地震区隧道的抗震支护设计以及非均质土层中掌子面支护压力的合理设定提供量化的理论参考。

1 基本原理与假设

1.1 极限分析上限定理

极限荷载是许可运动速度场、应变率场中最小的荷载。基于塑性极限分析中的上限法理论, 构建一个符合机动容许条件的速度场, 在此基础上, 应用外力做功功率与内部能量耗散率相平衡的原则, 通过计算即可求得目标函数的最小上限值。相应的虚功率平衡方程表述如下

$$\int_A T_i u_i dA + \int_V F_i u_i dV = \int_V \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dV \quad (1)$$

式中: A 为变形体面积, V 为变形体体积; T_i 、 F_i 分别为变形体所受到的面力和体力; u_i 、 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 分别为速度场中的速度和应变。上述速度场基于土体为理想刚塑性材料且服从相关联流动法则的基本假定。该方法适用于求解掌子面的极限失稳状态, 但受限于刚塑性前提, 无法反映实际土体的应变软化现象及其位移变形演化规律。

1.2 地震作用理论

鉴于地震动力响应的复杂性与随机性, 为便于理论模型的构建与求解, 本文引入拟静力法来模拟地震对隧道掌子面的影响。该方法的基本假定是将地震引起的动力效应简化为作用在土体上的恒定惯性力, 即将复杂的动力学问题转化为静力平衡问题进行分析。基于拟静力法假设, 作用于土体单元上的水平地震惯性力与竖向地震惯性力可分别表达为

$$F_h = \alpha_h G / g = k_h G \quad (2)$$

$$F_v = \alpha_v G / g = k_v G \quad (3)$$

式中: G 为土体单元的自重; k_h 为水平地震加速度系数, 反映地震强度的水平分量, 常规取值区间为 0~0.4;

k_v 为竖向地震加速度系数； λ 为竖向与水平地震系数的比例系数（即 $k_v = \lambda k_h$ ），取值范围通常为 -1~1，其中规定竖向加速度向下时 λ 取正值，向上时取负值。这种简化方法能够有效求解极限地震惯性力作用下的最危险失稳状态，但客观上无法反映真实地震波的时程动力响应与频率相位特征。

1.3 土体非均质性

针对土体参数的非均质特性，现有文献多采用强度随深度递增的模型进行描述。在实际地质环境中，正常固结黏土或原状土层受长期自重应力沉积固结影响，其不排水抗剪强度在宏观上表现为黏聚力 c 随埋深增加呈显著的线性增长趋势，这符合经典的 Gibson 土特性^[18]。相反，土体的有效内摩擦角 φ 主要受土颗粒的矿物成分与排列状态控制，在同一沉积相的土层中通常变化较小。据此，本文假定土体黏聚力 c 与埋深之间遵循线性变化关系，其表达式如下

$$c = c_0 + \rho(H - y) \tag{4}$$

式中： c_0 为土体表面处黏聚力；参数 ρ 定义为非均质系数，主要用于表征岩土黏聚力沿深度方向的分布特征；而 y 则代表任意计算点至隧道拱顶的垂直间距。

2 隧道掌子面三维主动破坏模式上限解

2.1 三维主动破坏模型

基于 Mohr-Coulomb 准则，利用 Mollon 等^[8]的空间离散与“点生点”技术实现破坏机制的离散化生成，构建了隧道掌子面的三维主动失稳模型。所谓“点生点”技术是指在三维空间坐标系中利用相关联流动法则的运动学几何约束条件，由已知的破坏面边界节点递归迭代计算出下一截面未知节点的三维空间坐标，从而将连续的复杂曲面转化为有限个离散三角面元集合的网格生成算法。

该模型基于极限分析上限法的机动容许条件，假定破坏体为绕旋转中心 O 转动的楔体。为满足能量耗散仅发生在速度间断面上的理论前提，本文将该楔体视为刚体。破坏体的上下滑裂面均遵循对数螺旋线轨迹，最终汇交于顶点 F ，如图 1 所示。在试验与工程印证方面，Takano 等^[19]利用 X 射线断层扫描技术进行掌子面失稳模型试验，精确观测到土层破坏区域在竖直剖面上高度相似于对数螺旋线，而在水平剖面上相似于椭圆面。此外实际掌子面挤出塌方事故也表明掌子面前方土体失稳往往表现为一个具有明确剪切滑裂面的整体楔形滑移破坏。这印证了本文三维破坏机制的合理性。

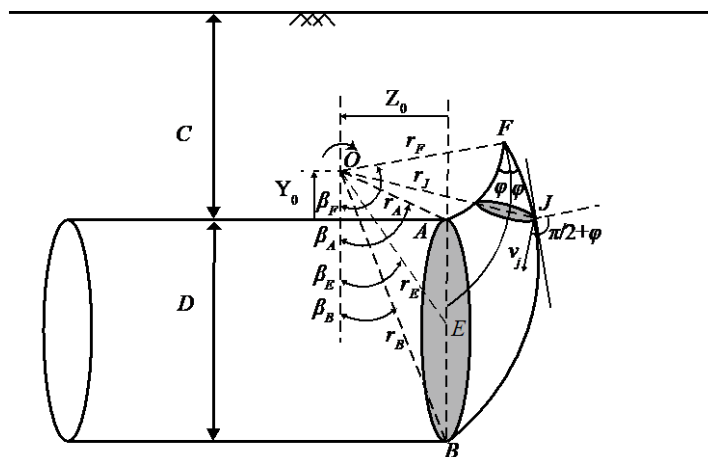


图 1 隧道掌子面三维破坏模型

Fig.1 Three-dimensional failure model of the tunnel face

如图 1 所示，设定隧道开挖直径为 D ，结构埋深为 C 。将掌子面前方潜在的破坏土体假定为楔体，并采用三维空间旋转速度场来表征其运动学特征：土体单元围绕过 O 点的 X 轴作顺时针转动，旋转角速度记为 ω 。对于滑裂面上的特征点 J ，其线速度 v_J 与该点至旋转中心的径向距离 r_J 有关，具体表达如式(5)所示

负功,即为维持系统平衡提供的抗力功率。由图 3 所示,隧道开挖面被划分为若干微元,其中特征点 A_j 、 A_{j+1} 、 A'_j 与 A'_{j+1} 共同围成了一个典型的离散单元面。支护力做功的计算遵循“分块计算再总和”的原则,首先量化作用于单个离散单元上的功率分量,随后对所有单元进行叠加求和,运算公式如式(7)所示

$$W_{\sigma_t} = -\omega \cdot \sigma_t \cdot \sum_j (S_j \cdot R_j \cdot \cos \beta_j) \quad (7)$$

式中: S_j 表征该离散单元面的几何面积; R_j 、 β_j 分别对应单元几何中心点的旋转半径和旋转角。

2.2.2 土体重力功率

结合图 3,单元面 $S_{i,j}$ 由点 $P_{i,j}$ 、 $P_{i+1,j}$ 、 $P_{i,j+1}$ 确定,将其映射至 YAZ 中心平面后,形成了体积为 $V_{i,j}$ 的计算单元,同理可以得到 $S'_{i,j}$ 和 $V'_{i,j}$ 。在此基础上,重力功率 W_γ ,等于所有微元土体重力功率的代数和,具体算式见式(8)

$$W_\gamma = \omega \cdot \gamma \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \sin \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \sin \beta'_{i,j}) \quad (8)$$

式中: $R_{i,j}$ 、 $\beta_{i,j}$ 表征由 $P_{i,j}$ 、 $P_{i+1,j}$ 、 $P_{i,j+1}$ 所围单元面的极坐标参数;而 $R'_{i,j}$ 与 $\beta'_{i,j}$ 则对应于由 $P_{i+1,j}$ 、 $P_{i,j+1}$ 、 $P_{i+1,j+1}$ 构成的单元面参数。

2.2.3 地震力功率

基于拟静力假定,将地震作用等效为作用于破坏楔体上的恒定惯性力。而在功率求解环节,其计算逻辑与土体自重做功完全一致,即对各离散单元体上的地震力功率进行逐一量化

$$W_{kh} = \omega \cdot k_h \cdot \gamma \cdot \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \sin \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \sin \beta'_{i,j}) \quad (9)$$

$$W_{kv} = \omega \cdot k_v \cdot \gamma \cdot \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \cos \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \cos \beta'_{i,j}) \quad (10)$$

2.2.4 内能耗散率

根据本文理论,破坏土体被视为刚性体,因此能量耗散仅发生于速度间断面上,即分隔静止土体与运动土体的塑性剪切面。已知该剪切面上任一微元单位时间的能量耗散,等于黏聚力 c 与该微元处速度在剪切面切向分量的乘积。本文进一步考虑土体的非均质性,假定黏聚力随深度呈线性变化,故通过对所有微元的能量耗散率进行积分累加,即可得到整个破坏机构的总能量耗散率,具体计算方法如式(11)所示

$$W_D = \omega \cdot c_{i,j} \cdot \cos \varphi \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot S_{i,j} + R'_{i,j} \cdot S'_{i,j}) \quad (11)$$

2.2.5 支护力上限求解

将前述公式代入能耗方程 $W_{\sigma_t} + W_\gamma + (W_{kh} + W_{kv}) = W_D$ 可得 σ_t 的表达式为

$$\sigma_t = \gamma \cdot D \cdot (N_\gamma + N_{kh} + N_{kv}) - N_c \quad (12)$$

其中 N_γ 、 N_{kh} 、 N_{kv} 和 N_c 为无量纲常数,分别代表土体重力、水平地震力、垂直地震力和土壤黏聚力的影响。系数 N_γ 、 N_{kh} 、 N_{kv} 和 N_c 的表达方式如下:

$$N_\gamma = \frac{\sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \sin \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \sin \beta'_{i,j})}{D \cdot \sum_j \left(\sum_j R_j \cdot \cos \beta_j \right)} \quad (13)$$

$$N_{kh} = \frac{k_h \cdot \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \cos \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \cos \beta'_{i,j})}{D \cdot \sum_j \left(\sum_j R_j \cdot \cos \beta_j \right)} \quad (14)$$

$$N_{kv} = \frac{k_v \cdot \sum_{i,j} (R_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot \sin \beta_{i,j} + R'_{i,j} \cdot V'_{i,j} \cdot \sin \beta'_{i,j})}{D \cdot \sum_j \left(\sum_j R_j \cdot \cos \beta_j \right)} \quad (15)$$

$$N_c = \frac{\sum_{i,j} (c_{i,j} \cdot \cos \varphi_{i,j} \cdot R_{i,j} \cdot S_{i,j} + c'_{i,j} \cdot \cos \varphi'_{i,j} \cdot R'_{i,j} \cdot S'_{i,j})}{\sum_j \left(\sum_j R_j \cdot \cos \beta_j \right)} \quad (16)$$

基于 MATLAB 平台编写计算程序,对构建的三维破坏模型实施全局寻优。计算流程主要通过遍历 YAZ 平面内的旋转中心坐标(Y₀,Z₀), 求解对应工况下的支护力。依据极限分析上限定理的推论, 在所有潜在破坏机构中, 所需支护力最大者即为临界状态下的极限支护力 σ_t, 该极值对应的几何形态即为最终的主动破坏模型, 如图 4 和图 5 所示, 计算参数设定为: 隧道直径 D=10 m, 土体重度 γ=18 kN/m³。

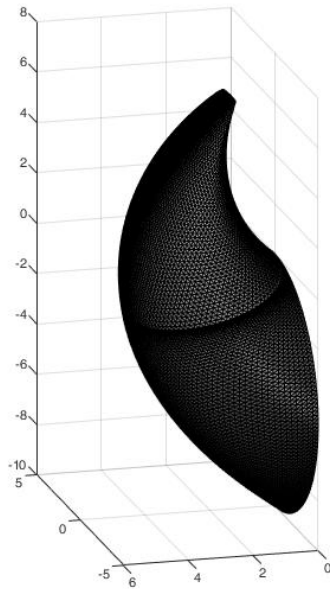


图 4 隧道掌子面破坏模型图 (c=7 kPa, φ=17°)

Fig.4 Active failure model of the tunnel face (c=7 kPa, φ=17°)

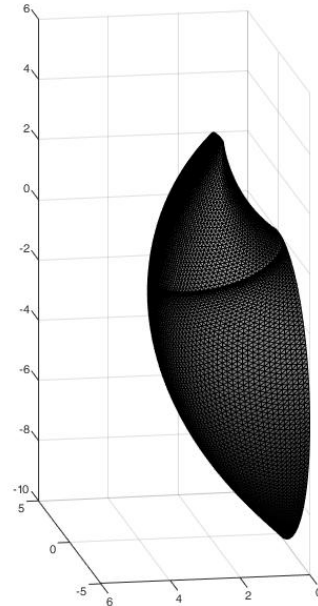


图 5 隧道掌子面破坏模型图 (c=10 kPa, φ=25°)

Fig.5 Active failure model of the tunnel face (c=10 kPa, φ=25°)

3 对比验证

3.1 算例对比

为验证本文提出的隧道极限支护力上限解析解的可靠性, 选取 Mollon 等^[8]、Zhao 等^[13]及 Zhong 等^[20]的研究成果进行对比分析。计算参数设定为: 隧道直径 D=10 m, 土体重度 γ=18 kN/m³。针对两种典型工况 (工况 1: c=7 kPa, φ=17°; 工况 2: c=10 kPa, φ=25°) 的对比结果分别如图 6 和图 7 所示。

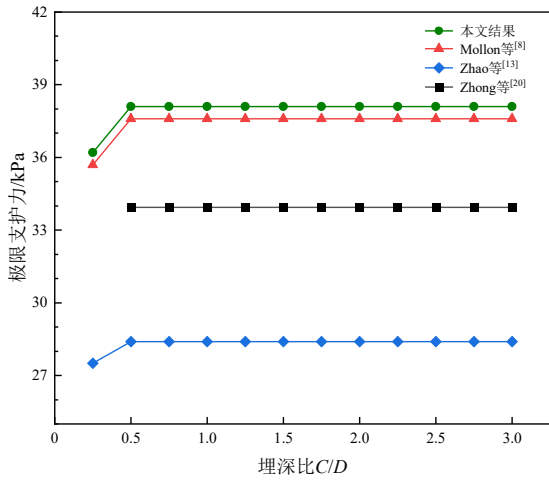


图 6 工况 1 计算结果对比

Fig.6 Comparison of calculation results for Case 1

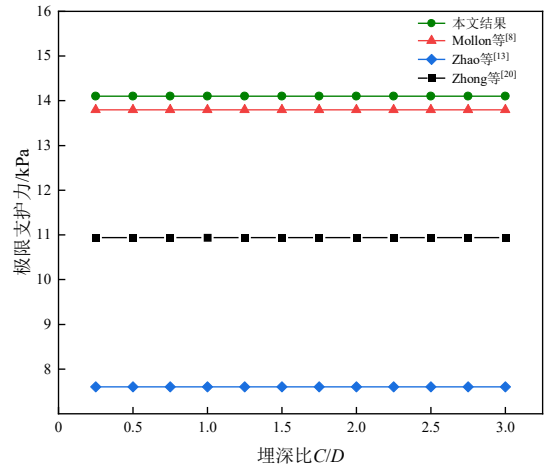


图 7 工况 2 计算结果对比

Fig.7 Comparison of calculation results for Case 2

结果显示，各模型的计算曲线演化规律基本一致。随着埋深增加，受土体土拱效应^[21]限制，破坏面无法贯通至地表而转变为局部坍塌模式，导致极限支护力在达到临界深度后不再随覆盖层厚度增加而显著变化。定量分析表明，本文解与 Mollon 等^[8]的结果吻合度极高，最大相对误差仅为 2.17%，有力证明了本文理论推导与算法程序的正确性。此外，依据极限分析上限定理在主动支护问题中的性质，所得计算值往往构成真实解的下界逼近；因此，计算结果数值越大，意味着越接近真实解。鉴于本文计算值高于 Zhao 等^[13]和 Zhong 等^[20]的结果，说明本模型在预测精度上具有更优的表现。

3.2 数值模拟

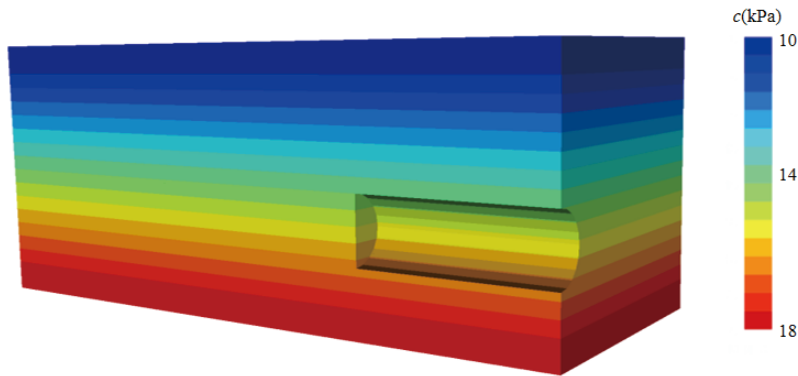


图 8 基于 OPTUM G3 数值仿真软件构建的非均质土体模型

Fig.8 Non-homogeneous soil model constructed using OPTUM G3 numerical simulation software

为验证本文所建立的非均质土体隧道掌子面三维破坏模型在地震作用下的分析效果，利用有限元软件 OPTUM G3 建立极限分析条件下沿隧道纵向中线剖开的三维掌子面模型。数值模型采用 Mohr-Coulomb 本构模型，模型底部边界固定，侧向边界限制水平位移，地表为自由面。计算过程中采用 OPTUM G3 内置的自适应网格加密技术，对 1 万个单元格进行 3 次自适应迭代，自动加密塑性剪切带区域的网格并自带上下限解包围算法，确保了网格精度与计算结果的严格收敛。所构建的数值模型黏聚力随着埋深线性增大，如图 8 所示。将理论预测值与数值仿真结果进行对照分析，统一选取的物理力学参数如下： $C=20\text{ m}$ 、 $D=10\text{ m}$ 、 $\varphi=17^\circ$ 、 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ 、 $c=10\text{ kPa}$ 、 $k_h=0\sim 0.4$ 、 $\lambda=0.5$ 、 $\rho=0.2$ ，对比结果如表 1 所示。

表 1 极限支护力数值模拟验证

Tab.1 Numerical simulation verification of limit support pressure

k_h	理论计算结果/kPa	数值模拟结果/kPa	误差百分比/%
0	16.32	17.78	8.9
0.1	23.99	25.95	8.2
0.2	34.78	34.24	1.6
0.3	45.33	43.42	4.2
0.4	55.29	52.77	4.6

从上表可以看出,本文模型的计算结果与数值模拟结果差距不大,最大相对误差控制在 8.9%以内,这一精度有力证明了本文方法在预测地震工况下非均质土体掌子面稳定性方面的可靠性。此外,为进一步验证破坏机理,将理论推导生成的土体破坏范围与数值模拟生成的剪切耗散云图进行了几何形态对照,相关计算参数设定如下: $C=20$ m、 $D=10$ m、 $\varphi=17^\circ$ 、 $\gamma=18$ kN/m³、 $c=10$ kPa、 $k_h=0.2$ 、 $\lambda=0.5$ 、 $\rho=0.2$ 。

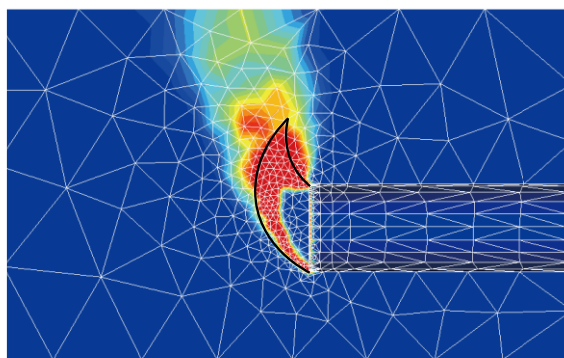


图 9 隧道开挖面前方土体破坏范围的对比

Fig.9 Comparison of failure ranges of the soil in front of the tunnel excavation face

如图 9 所示,理论模型预测的滑移范围与数值模拟破坏云图在宏观上展现出高度的包络一致性。局部形态的差异主要源于方法论本质:解析法受限于相关联流动法则,将滑裂面简化为严格的对数螺旋曲面;而有限元法允许土体发生连续塑性屈服,故塑性区分布相对更广。两者宏观边界的吻合有力验证了本文三维破坏机制的可靠性。综合而言,相比有限元等数值软件,本文解析方法力学机制清晰、求解效率极高,尤为适合大批量的参数敏感性分析;但客观上受限于刚体运动学假定,该方法在精细模拟土体渐进屈服过程或极端不规则边界时存在一定局限性。

4 参数分析

4.1 地震效应的影响分析

地震作用是诱发隧道掌子面失稳的关键外部因素。考虑地震效应时,参数取值分别为:埋深 $C=20$ m,隧道直径 $D=10$ m,水平地震加速度系数 $k_h=0\sim 0.4$, $\lambda=0\sim 1.0$,非均质系数 $\rho=0.1$,岩土重度 $\gamma=20$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi=20^\circ$,地表黏聚力 $c=10$ kPa,计算结果如图 10。

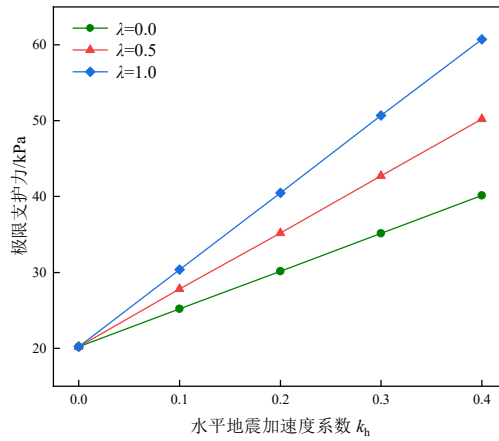


图 10 水平地震效应和比例系数对极限支护力的影响

Fig.10 Influence of horizontal seismic effect and proportionality coefficient on limit support pressure

由图 10 可知：水平地震加速度系数 k_h 对掌子面稳定性起主控作用，极限支护力随 k_h 的增加呈现显著的线性增长趋势。在不考虑竖向地震的条件下，当 k_h 从 0 增加至 0.4 时，极限支护力由 20.20 kPa 线性增加至 40.15 kPa，增幅约为 98.8%。从力学机制分析，水平向外的地震惯性力不仅直接对滑动楔体做正功，还促使滑裂面倾角变缓、破坏土体体积增大；这种外部输入功率与重力做功的叠加，迫使支护系统必须提供更大的反力。

此外，竖向地震作用对支护力的影响随 k_h 的增大呈现出显著的非线性放大特征。当 $k_h=0.1$ 时，随着竖向地震比例系数 λ 由 0 增大至 1.0，极限支护力由 25.19 kPa 增加至 30.37 kPa，增幅约为 20.56%；当 k_h 增大至 0.2 时， λ 的变化导致支护力由 30.18 kPa 增加至 40.51 kPa，增幅扩大为 34.23%；而在 $k_h=0.4$ 的工况下，支护力则由 40.15 kPa 激增至 60.72 kPa，增幅高达 51.23%。从能量耗散机制剖析，向下的竖向地震惯性力与土体自重产生直接叠加，等效增大了系统的驱动体积力。基于极值寻优原理，为满足上限法虚功率方程的平衡，三维滑裂面必然向地表及前方发生非线性扩张。在该演化过程中，外部体积力做功增量远超滑裂面上内部剪切耗散功率的增量，这种做功速率的差异最终导致了支护力需求的非线性激增。因此，在抗震设防设计中，若忽略竖向地震效应，在强震区域工程中可能导致支护力设计值偏低 20% 以上，存在严重的安全隐患，建议在实际工程中综合考虑水平地震效应与竖向地震效应，且在强震地区应合理提高支护力设计值来保证隧道掌子面稳定性。

4.2 地震效应和非均质性的影响分析

为进一步探究土体非均质性在不同地震烈度下的稳定性贡献差异，选取非均质系数 ρ 与水平地震加速度系数 k_h 作为关键变量进行对比分析。计算参数设定如下：隧道埋深 $C=20$ m，直径 $D=10$ m，土体重度 $\gamma=20$ kN/m³；地表黏聚力 $c=10$ kPa，内摩擦角 $\varphi=20^\circ$ ；引入竖向地震比例系数 $\lambda=0.5$ 。基于上述工况，计算得到非均质系数 ρ 在 -0.2~0.2 范围内，极限支护力随水平地震加速度系数 k_h (0~0.4) 的变化趋势，如图 11 所示。

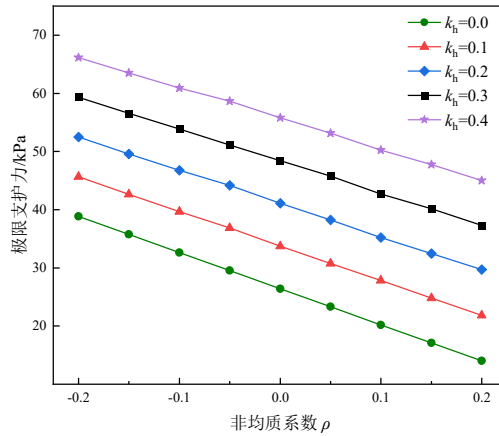


图 11 非均质系数和水平地震效应对极限支护力的影响

Fig.11 Influence of non-homogeneity coefficient and horizontal seismic effect on limit support pressure

由图 11 可知，掌子面极限支护力随非均质系数的增大呈现显著的线性递减效应，而随地震作用的增强呈线性增长。从曲线形态来看，不同地震系数下的极限支护力随非均质系数 ρ 的变化曲线近似平行，表明土体非均质性对支护力的削减梯度在不同地震烈度下基本保持恒定。进一步的数据分析显示，土体非均质性对稳定性的改善效果受地震烈度的显著制约。在低烈度工况 ($k_h=0.1$) 下，随着非均质系数 ρ 由-0.2 增加至 0.2，极限支护力由 45.67 kPa 大幅下降至 21.83 kPa，降幅高达 52.19%，表明在低震级环境，充分利用深部土体强度的增长特性可大幅降低支护需求。然而，在强震工况 ($k_h=0.4$) 下，虽然非均质性仍能带来绝对数值上的减载，但其相对降幅收窄至 31.95%。

产生该现象的力学机制可通过能量耗散与外部做功的动态平衡关系进行剖析。在静力或低烈度工况下，深部土体强度较高，其提供的内部剪切耗散功率在能量平衡中占比较大，有效限制了破坏面的深层扩展；而在高烈度强震工况下，水平地震惯性力显著增大了系统的总外部输入功率。在极值寻优过程中，外部地震荷载做功的增长幅度远超深部非均质土体所能提供的内部耗散增量，导致地震力做功在总虚功率方程中占据绝对主导地位。这种外部驱动效应的显著增强，相对降低了深层土体高耗散特性的贡献占比，从而在宏观上表现为非均质特性带来的安全收益被大幅削弱。因此，在实际工程中，特别是对于位于高烈度地震区的非均质土体隧道，设计时应充分考虑地震作用对土体自稳能力的削弱机制，不可过分依赖土体深部强度增长带来的安全储备，建议通过提高支护系统的抗震冗余度来确保掌子面的稳定性。

5 结论

本文基于极限分析上限法与空间离散技术，构建了反映土体非均质特征与地震效应的隧道掌子面三维主动破坏模型，推导了极限支护力的上限解析解。通过与既有解析解及数值模拟结果对比，验证了本文理论方法与破坏机制的合理性。主要结论如下。

1) 土体黏聚力随埋深递增的非均质特性显著提升了掌子面的自稳能力。极限支护力与非均质系数呈线性负相关规律。在 $k_h=0.1$ 工况下，非均质系数由-0.2 增加至 0.2 时，极限支护力降幅高达 52.19%。充分利用深部土体强度的深度增长特性可有效避免过度支护。

2) 地震效应极大削弱了掌子面的稳定性。极限支护力随水平及竖向地震加速度系数的增大而显著提高，且竖向地震对支护力增幅具有明显的非线性放大特征。当水平地震加速度系数由 0 增加至 0.4 时，所需极限支护力激增了 98.8%。

3) 强震作用会显著削弱土体非均质特性带来的安全增益。在震区非均质土层隧道工程设计中,不可盲目依赖土体深部强度带来的安全储备,需充分考虑地震作用对土体自稳能力的削弱效应并适当提高抗震冗余度。本方法可为非均质土层中合理设定掌子面支护压力提供量化参考。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
WANG M S. Tunneling and underground engineering technology in China [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] 彭立敏. 隧道工程 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.
PENG L M. Tunnel engineering [M]. Changsha: Central South University Press, 2009.
- [3] ZHANG Y, TAO L J, ZHAO X, et al. An analytical model for face stability of shield tunnel in dry cohesionless soils with different buried depth [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 142: 104565.
- [4] 胡瑞奇, 张海娜, 杜可, 等. 管棚支护下软岩隧道掌子面稳定性研究 [J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(3): 31-39.
HU R Q, ZHANG H N, DU K, et al. Study on face stability of soft rock tunnel reinforced by pipe roof [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2025, 42(3): 31-39.
- [5] 李得建, 赵炼恒, 杨峰, 等. 非线性破坏准则下浅埋隧道掌子面三维被动稳定性能耗分析改进方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 743-752.
LI D J, ZHAO L H, YANG F, et al. Improved method for energy dissipation analysis of three-dimensional passive stability of shallow tunnel face under non-linear failure criterion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 743-752.
- [6] 梁桥, 杨小礼, 张佳华, 等. 非均质土体中盾构隧道开挖面支护力上限分析 [J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2585-2592.
LIANG Q, YANG X L, ZHANG J H, et al. Upper bound analysis of face support pressure of shield tunnel in heterogeneous soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(9): 2585-2592.
- [7] 罗伟. 浅埋偏压隧道稳定性分析及其可靠度研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
LUO W. Stability analysis and reliability study of shallow buried unsymmetrical loading tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [8] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35(12): 1363-1388.
- [9] 王炜, 刘锋涛, 周锡文, 等. 基于光滑有限元的隧道掌子面稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(2): 606-614.
WANG W, LIU F T, ZHOU X W, et al. Stability analysis of tunnel face based on smoothed finite element method [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(2): 606-614.
- [10] 许敬叔, 潘秋景. 盾构隧道开挖面支护力上限分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 80-84.
XU J S, PAN Q J. Upper bound analysis of support pressure on excavation face of shield tunnel [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(4): 80-84.
- [11] 尹水金, 谭子安. 盾构偏仰角影响下隧道掌子面稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(5): 1467-1484.
YIN S J, TAN Z A. Analysis of tunnel face stability under influence of shield pitch angle [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(5): 1467-1484.

- [12] 石修松, 周高涨, 刘磊磊. 基于非线性 Hvorslev 面的超固结土层隧道掌子面稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2595-2610.
- SHI X S, ZHOU G Z, LIU L L. Face stability analysis of tunnel in overconsolidated soil based on nonlinear Hvorslev failure criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(9): 2595-2610.
- [13] ZHAO L H, LI D J, LI L, et al. Three-dimensional stability analysis of a longitudinally inclined shallow tunnel face [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 87(1): 32-48.
- [14] 傅鹤林, 吴疆, 邓皇适, 等. 分层土中盾构隧道掌子面极限推力研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(4): 1370-1378.
- FU H L, WU J, DENG H S, et al. Limit thrust on shield tunnel face in layered soils [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(4): 1370-1378.
- [15] 陈光辉. 隧道掌子面稳定性上限分析方法及超前预加固设计研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- CHEN G H. Upper bound analysis method of tunnel face stability and advanced pre-reinforcement design [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [16] ZHANG F, GAO Y, WU Y, et al. Face stability analysis of large-diameter slurry shield-driven tunnels with linearly increasing undrained strength [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 78: 178-187.
- [17] 鹿存金, 傅鹤林, 李鲇, 等. 基于拟动力法的地震作用下隧道掌子面动态稳定性上限分析 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 251-257.
- LU C J, FU H L, LI J, et al. Upper bound analysis of dynamic stability of tunnel face under seismic action based on pseudo-dynamic method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 251-257.
- [18] GIBSON R E. The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time [J]. Geotechnique, 1958, 8(4): 171-182.
- [19] TAKANO D, OTANI J, NAGATANI H, et al. Application of X-ray CT on boundary value problems in geotechnical engineering: research on tunnel face failure [C]// GeoCongress 2006.
- [20] ZHONG J H, YANG X L. Kinematic analysis of the three-dimensional stability for tunnel faces by pseudodynamic approach [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 128: 103802.
- [21] LI W, ZHANG C, ZHANG D, et al. Face stability of shield tunnels considering a kinematically admissible velocity field of soil arching [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(2): 505-526.



通信作者: 罗伟 (1986—), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为岩土工程非线性极限分析理论。