

文章编号:1005-0523(2022)02-0001-07



考虑黏土强度各向异性的掌子面支护压力分析

王凌¹, 张跃明¹, 钟久强², 罗如平^{2,3}

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司中南分院, 广东 广州 510010; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;
3. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要: 掌子面稳定支护压力的确定是保证隧道正常施工及周边环境安全的关键, 目前相关研究多基于各向同性土体假定, 忽略了土体强度各向异性的影响。基于有限单元极限分析软件 OptumG3, 介绍了一种考虑土体强度各向异性的掌子面稳定下限支护压力分析模型, 并通过案例对比分析验证了模型的有效性。在此基础上, 对强度各向异性黏土地层中掌子面稳定下限支护压力进行了参数敏感性分析, 并给出了相应经验计算方法。研究结果表明: 掌子面承载力系数 N_c 、 N_γ 与隧道埋深比 C/D 分别呈指数函数及线性函数关系; 强度各向异性地层中 N_c 的修正系数 r_m 主要受土体抗剪强度比 k 影响, 二者符合幂函数关系, 而 N_γ 则不受土体抗剪强度比 k 影响; 强度各向同性及异性地层中掌子面前端土体破坏形态较为一致, 均为“烟囱型”, 但其分布范围有所不同, 各向同性地层中土体破坏面分布范围更大。

关键词: 掌子面稳定; 下限支护压力; 各向异性; 有限单元极限分析

中图分类号: U455.7; [U25]

文献标志码: A

本文引用格式: 王凌, 张跃明, 钟久强, 等. 考虑黏土强度各向异性的掌子面支护压力分析[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(2): 1-7.

Pressure Analysis of Excavation Face Support Considering Anisotropy of Clay Strength

Wang Ling¹, Zhang Yueming¹, Zhong Jiuqiang², Luo Ruping^{2,3}

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The determination of the support pressure for face stability of tunnel headings is a critical issue to ensure the normal construction of the tunnel and the safety of the surrounding environment. Most existing studies are based on the assumption of isotropic soil, which have neglected the influence of soil strength anisotropy. Based on the finite element limit analysis software OptumG3, a numerical model for the lower bound support pressure for face stability of tunnel headings in anisotropic undrained clay was introduced, and the validity of the numerical model was verified by comparative analysis of a case study. Then, parameter sensitivity analysis of the lower bound support pressure for face stability of tunnel headings in anisotropic undrained clay was carried out, and the corresponding empirical calculation method was proposed. The results show that: the bearing capacity coefficients N_c and N_γ are exponential and linear with the ratio of tunnel buried depth C/D , respectively; in anisotropic clay, the correction coefficient r_m of N_c is in a power function relationship with the soil shear strength

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972291); 江西省教育厅科学技术项目(GJJ200637); 江西省交通运输厅科技项目(2020Z0001)

ratio k , while N_γ is not affected by the soil shear strength ratio k ; the failure model of tunnel heading is similar to a chimney type in the isotropic and anisotropic clay, but the distribution ranges are different, in which the distribution range is larger in the isotropic clay.

Key words: stability of tunnel heading; lower limit support pressure; anisotropic clay; finite element limit analysis

Citation format: WANG L, ZHANG Y M, ZHONG J Q, et al. Pressure analysis of excavation face support considering anisotropy of clay strength[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 1-7.

在盾构隧道掘进过程中,其环向土压力及变形通过立即施加的管片衬砌结构得到控制,而掌子面处土体的稳定则依靠土舱和液压系统施加的掌子面力进行控制。为了保证隧道正常施工及周边环境的安全,掌子面支护压力大小的控制应该保证不至于压力过低发生开挖面坍塌(下限压力),同时又不能压力过大而发生隆起破坏(上限压力)。

针对隧道掌子面稳定支护压力的计算,国内外相关学者基于理论分析和数值模拟等手段开展了大量研究^[1-8]。例如,Broere^[1]采用楔体破坏模型的极限平衡理论方法研究了泥水盾构和土压盾构开挖面稳定性,并给出了相应极限支护压力的计算公式。Ukritchon 等^[2]采用三维有限元 PLAXIS 分析了强度沿深度线性增长的黏土地层中隧道掌子面稳定支护压力分布特征,并在此基础上给出了相应经验计算方法。此外,吕玺琳等^[3]基于村山氏极限平衡法和极限分析上限法研究了盾构隧道开挖面稳定性,推导了维持开挖面稳定的最小极限支护压力计算公式。蒋武军等^[7]也通过构建三维多滑块破坏模型,开展了基于强度折减法的掌子面三维主动稳定性上限分析。

需要指出的是,对于隧道掌子面稳定支护压力的分析,目前相关研究多假定地基土满足各向同性条件,不考虑土体各向强度的差异。事实上,对于实际工程中的地层(尤其是黏土地层),由于受自然沉积以及后期加载等因素的影响,土体抗剪强度在不同方向上存在较大差异,呈现出显著的各向异性与非均质性。Ukritchon 等^[9]通过二维极限分析表明:在不排水黏土中考虑土体强度的各向异性会使掌子面前端土体抗塌陷承载力降低,从而需要更大的外部支护压力以满足掌子面的稳定;采用常规各向同

性土体假定会低估掌子面稳定支护压力大小,造成施工偏于不安全。Zhang 等^[10],Li 等^[11]研究表明,土体各向异性会造成隧道衬砌弯矩、位移及所需支护力显著差异。基于以上研究,各向异性会造成隧道受力的改变,失稳路径的差异等,现有研究不足,亟需开展系统的研究。

鉴于此,本文采用三维有限单元极限分析软件 OptumG3,通过考虑土体竖向及水平方向抗剪强度的差异,对黏土地层中隧道掌子面稳定的下限支护压力进行分析,并基于参数敏感性分析给出考虑土体强度各向异性的掌子面稳定下限支护压力经验计算方法,为相关工程设计及施工提供参考。

1 土体抗剪强度各向异性及模型验证

1.1 土体抗剪强度各向异性及分析模型

对于三轴试验下典型黏土在不同加载方向下的应力-应变曲线,由于受自然沉积等因素的影响,不同加载(剪切)方向下土体的抗剪强度存在较大差异;三轴压缩(TC)试验得到的土体抗剪强度 S_{uc} 要普遍大于三轴拉伸(TE)试验得到的土体抗剪强度 S_{ue} ,呈现出较为显著的强度各向异性^[12-13]。

基于理论和试验研究^[3,14-16]发现,黏性土中隧道掌子面破坏模式主要呈现为“漏斗状”。图 1 为典型黏土地层中隧道掌子面失稳破坏模式示意图,从图中可直观地看出:掌子面前端土体破坏面呈曲面形式分布,其土体剪切方向随着深度的变化而不断改变。受土体强度各向异性的影响,在不同剪切方向作用下土体将表现出不同的抗剪强度特性,剪切破坏面上的土体抗剪强度并不是均匀分布的,采用统一的土体抗剪强度进行分析将使计算结果带来较大误差。

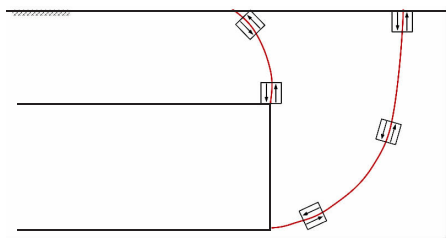
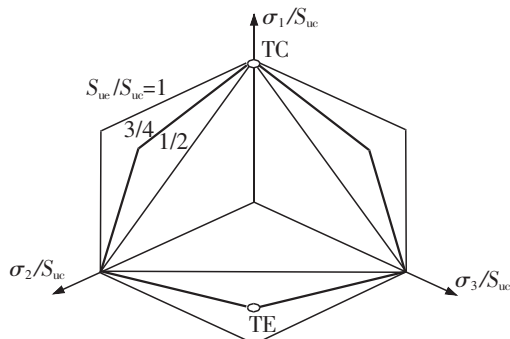


图 1 黏土地层隧道掌子面失稳破坏模式示意图

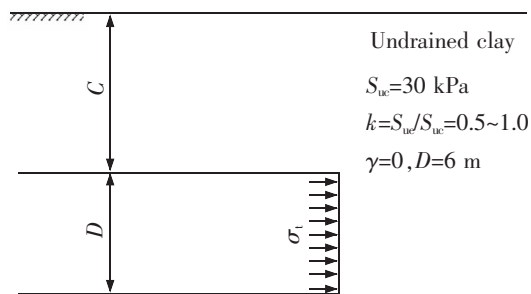
Fig.1 Failure mode of tunnel face instability in clay stratum

本文采用 OptumG3 对考虑土体强度各向异性条件下的掌子面稳定下限支护压力进行分析。该软件是一款集极限分析和有限元分析于一体的三维岩土分析软件,通过内置的上、下限极限分析法可快速得到极限状态下掌子面临界支护压力值,计算效率较高,且可避免有限元或有限差分方法中通过寻找支护压力-变形曲线的拐点来确定临界支护压力的不确定性^[17-18]。同时,基于 OptumG3 自带的强度各向异性土体本构 (anisotropic undrained shear strength, AUS) 模型^[19],可方便地得到不同抗剪强度比 k ($k=S_{uc}/S_{uc}$) 下隧道掌子面临界稳定支护压力值。在实际工程中,可通过控制三轴试验的加载方向 (三轴压缩试验和三轴拉伸试验) 来得到土体的抗剪强度比 k 值。图 2 为 AUS 模型所采用的土体破坏准则示意图,从图中可以看出:为了考虑土体抗剪强度的各向异性, AUS 模型所采用的破坏包络面为一不规则六边形;当土体抗剪强度比 $k=0.5$ 时,破坏包络面退化为一等边三角形,而当 $k=1.0$ 时,其破坏包络面回归至常规的正六边形 (Tresca 模型);在 AUS 模型中,其允许的抗剪强度比 k 为 $0.5\sim 1.0$ 。

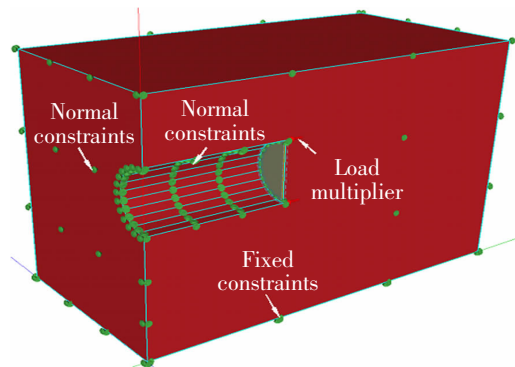
图 2 AUS 模型破坏准则示意图^[14]Fig.2 Schematic diagram of failure criteria of AUS model^[14]

1.2 模型验证

为了验证 AUS 模型的准确性,本文采用 Ukritchon 等^[9]所给出的计算案例进行对比分析。图 3(a)为案例计算工况示意图,地基为无重度的不排水黏土,三轴压缩抗剪强度 S_{uc} 为 30 kPa,土体抗剪强度比 $k=0.5\sim 1.0$ 。数值计算模型如图 3(b)所示,其中在模型四周边界采用法向约束,底部边界采用固定约束,同时对隧道衬砌施加法向约束以保证衬砌结构不发生变形。采用极限分析时,在掌子面处施加法向荷载乘子,计算程序通过不断自动减小所施加的支护压力值,使隧道掌子面达到坍塌失稳破坏,从而可以很方便地得到掌子面稳定支护压力的下限支护压力。图 3 中, C/D 为埋深比; D 为隧道直径,在数值模型中统一取为 6 m; γ 为土体重度; σ_t 为掌子面支护压力。



(a) Calculated working conditions



(b) Numerical calculation model

图 3 计算工况及数值模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of calculated working conditions and numerical model

图 4 为案例计算结果对比图,其中横坐标为土体强度比 k ,纵坐标为归一化的承载力系数 σ_t/S_{uc} 。从图中可以看出:随着土体强度比 k 和埋深比 C/D 的增大,掌子面稳定支护压力逐渐提高。总体而言,本文计算结果与 Ukritchon 等^[9]计算结果较为接近,

验证了本文数值分析模型及 AUS 本构模型的有效性。二者之间的误差可能主要由三维形状效应及土体各向异性模拟方法差异等因素引起,但最大误差不超过 10%。

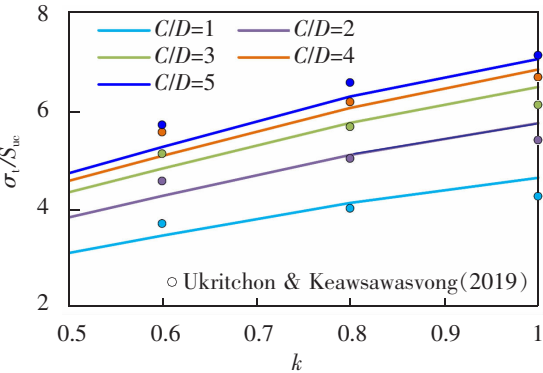


图 4 计算结果对比图
Fig.4 Comparison of calculation results

2 掌子面稳定支护压力数值分析

2.1 强度各向同性地层

为了得到强度各向同性地层中隧道掌子面稳定支护压力的计算方法,首先需要明确强度各向同性地层中隧道掌子面稳定支护压力计算方法,在此基础上再考虑作相应修正。鉴于此,本文首先对强度各向同性地层中掌子面的稳定支护压力进行分析。

表 1 为数值参数分析所采用的 2 种计算工况,参数分析包括土体不排水抗剪强度 S_u 、埋深比 C/D 及土体重度 γ 。在数值模型中隧道直径 D 统一取为 6 m。

表 1 各向同性地层参数分析工况汇总表
Tab.1 Summary of isotropic formation parameter analysis conditions

Type	S_u/kPa	C/D	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
1	30	1~5	0
			10
2	50	1~5	16
			20

与前述案例验证分析模型一致,数值模型中土体采用 AUS 模型,但其抗剪强度比 k 均取为 1,以满足强度各向同性要求。图 5 为极限状态下掌子面受力示意图,根据掌子面前端土体受力平衡条件,Ukritchon 等^[2]给出了均质不排水黏土中掌子面临界

支护压力的统一计算公式

$$\sigma_l + N_c S_u = N_\gamma \gamma D + \sigma_s \tag{1}$$

式中:等号左边为维持掌子面稳定的抗力值,等号右边为驱动掌子面失稳破坏的荷载大小; σ_l 为掌子面支护压力; σ_s 为地表堆载; N_c, N_γ 均为承载力系数。

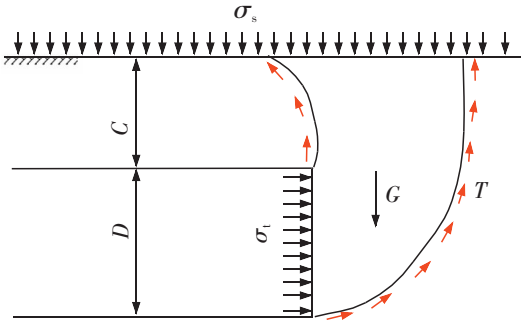


图 5 极限状态下掌子面受力示意图
Fig.5 Force on the palm surface under extreme conditions

由表 1 中计算工况 1 开展分析,取土体重度 γ 及地表堆载 σ_s 均为 0,则从式(1)可以得到 $N_c = -\sigma_l/S_u$ 。图 6 为不同埋深比下 N_c 分布曲线,从图中可直观地看出:随着隧道埋深比 C/D 的增大,承载力系数 N_c 也在不断增长,但增长幅度显著降低;土体不排水抗剪强度 S_u 对 N_c 的影响基本可以忽略。计算结果表明,采用 e 为底的指数函数可较好地拟合 N_c 随埋深比 C/D 的变化关系,在实际工程中可按下式计算承载力系数 N_c 。

$$N_c = -8.9e^{-0.66C/D} + 12.6 \tag{2}$$

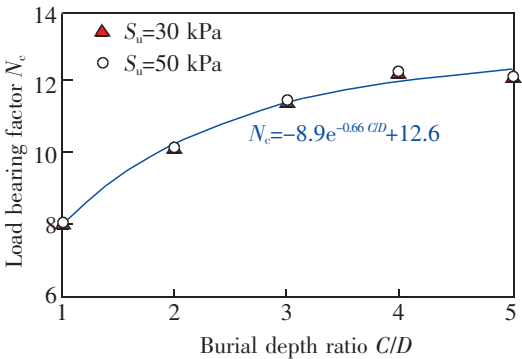


图 6 承载力系数 N_c 分布曲线

Fig.6 Distribution curve of bearing capacity coefficient N_c

同理对表 1 中计算工况 2 开展分析,可得承载力系数 N_γ 的分布曲线,如图 7 所示。从图 7 可以看出:承载力系数 N_γ 随隧道埋深比的增大而基本呈线性增长,土体重度 γ 对 N_γ 的影响可以忽略。便于实际工程应用,可按下式计算承载力系数 N_γ 。

$$N_\gamma = C/D + 0.5 \tag{3}$$

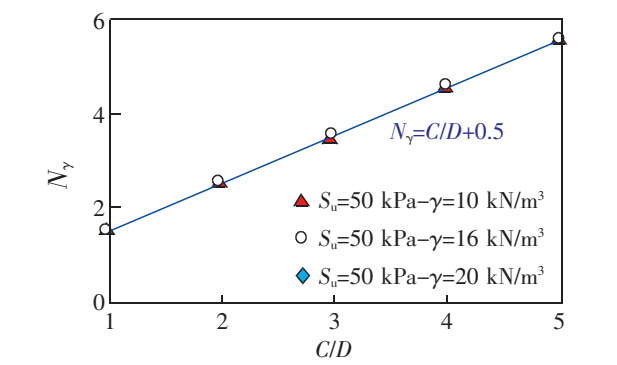


图 7 承载力系数 N_γ 分布曲线

Fig.7 Distribution curve of bearing capacity coefficient N_γ

2.2 强度各向异性地层

表 2 为强度各向异性地层中参数分析所采用的 2 种计算工况,参数分析包括三轴压缩抗剪强度 S_{uc} 、抗剪强度比 k 、埋深比 C/D 及土体重度 γ 。同理,在数值模型中隧道直径 D 统一取为 6 m。

表 2 各向异性地层参数分析工况汇总表				
Tab.2 Summary of anisotropic stratigraphic parameters analysis working conditions				
Type	S_{uc}/kPa	k	C/D	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
1	30	0.5~0.8	1~5	0
				10
				16
2	50	0.6	1~5	20

由于考虑了土体强度各向异性的影响,且抗剪强度比 k 小于 1,维持掌子面前端土体稳定的抗力值将有所降低。为了分析土体强度各向异性对承载力系数 N_c 的影响特性,与前述各向同性地层中的分析流程一致,本文对表 2 中计算工况 1 开展分析,给出了不同抗剪强度比下 N_c 的修正系数 r_m 的分布规律,如图 8 所示。其中,修正系数 r_m 的定义为各向异性地层与各向同性地层中承载力系数 N_c 的比值。

从图 8 可以明显看出:修正系数 r_m 主要与土体抗剪强度比 k 有关,土体三轴压缩剪切强度 S_{uc} 及隧道埋深比 C/D 对其影响基本可以忽略。

取不同埋深比下 r_m 的平均值作为修正系数的代表值,进一步可以得到修正系数 r_m 随土体抗剪强

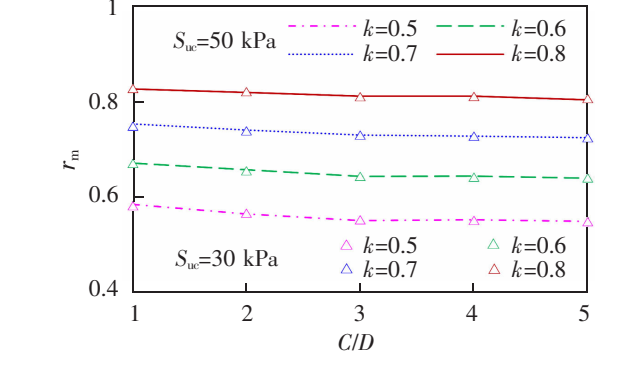


图 8 各向异性地层参数分析工况汇总不同强度比下修正系数 r_m 分布规律

Fig.8 Distribution of correction factor r_m under different strength ratio in anisotropic formation parameter analysis

度比 k 的变化曲线,如图 9 所示。从图中可以看出: r_m 随着 k 值的增大而增大,采用幂函数能较好拟合修正系数 r_m 与土体抗剪强度比 k 的分布关系。为便于实际工程应用,可按 $r_m = k^{0.88}$ 计算修正系数 r_m 。

需要指出的是,Ukritchon 等^[9]基于二维数值模拟给出了 $r_m = k^{0.3346}$ 的经验计算方法。与该计算方法相比,本文计算结果有所偏大,其原因可能是 Ukritchon 等^[9]采用平面应变模型进行分析,与本文三维模型存在一定差异。

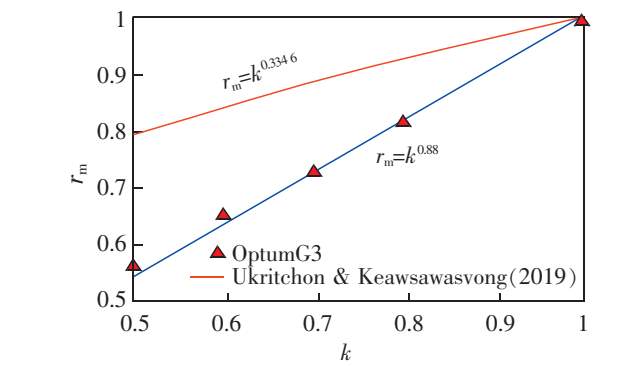
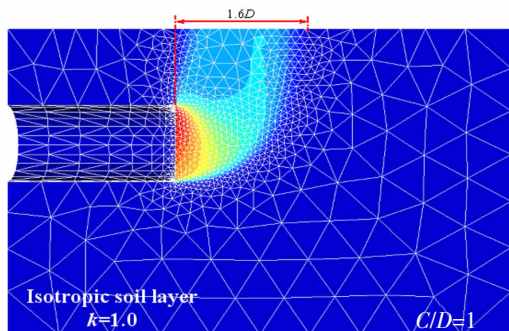


图 9 修正系数 r_m 随抗剪强度比 k 变化曲线

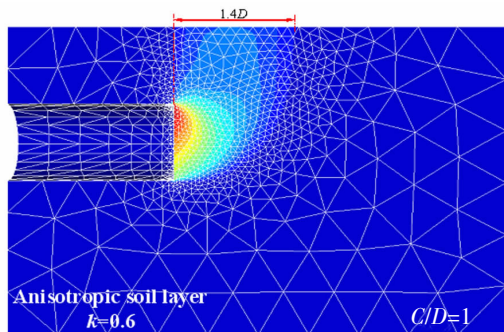
Fig.9 Curve of correction coefficient r_m with shear strength ratio k

图 10 为埋深比 $C/D=1$ 条件下强度各向同性与强度各向异性地层中土体剪切耗散功分布云图,通过其分布形态可直观地反映土体破坏模式。从图中可以看出:不同地层中掌子面前端土体破坏形态较为一致,均为“烟囱型”;但其分布范围有所不同,各向同性地层中土体破坏面分布范围更大。

前述分析主要讨论了土体强度各向异性对承载力系数 N_c 的影响特性,同理对表 2 中计算工况 2



(a) Isotropic soil layer

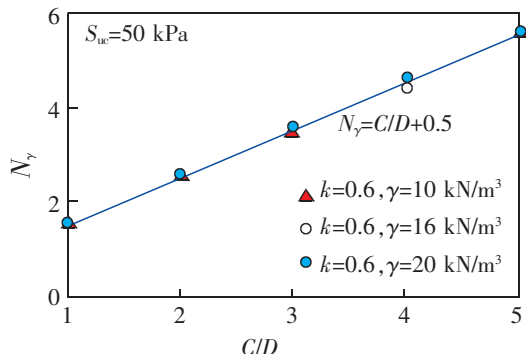


(b) Anisotropic soil layer

图 10 不同地层条件下掌子面破坏形态云图

Fig.10 Nephogram of failure pattern of tunnel face under different stratum conditions

开展分析,得到图 11 为土体强度异性条件下承载力系数 N_γ 的分布曲线。从图中可以看出:由于承载力系数 N_γ 关系到驱动掌子面失稳破坏的荷载值,其主要与掌子面前端失稳破坏土体的体积相关,不受土体强度各向异性的影响,各向同性地层中的 N_γ 计算方法仍可适用于强度各向异性地层。

图 11 强度各向异性地层承载力系数 N_γ 分布曲线Fig.11 N_γ distribution curve of bearing capacity coefficient in strength anisotropic formation

综上所述,参考强度各向同性地层中掌子面稳定支护压力计算方法,对于强度各向异性地层中掌

子面稳定下限支护压力,其可按下式进行计算

$$\sigma_t = N_\gamma \gamma D + \sigma_s - r_m N_c S_{uc} \quad (4)$$

式中: r_m 为承载力修正系数,可按 $r_m = k^{0.88}$ 计算。

3 结论

基于三维有限单元极限分析软件 OptumG3,本文对强度各向异性黏土地层中隧道掌子面的稳定支护压力进行了分析,并给出了其下限支护压力经验计算方法,本文主要结论如下:

1) 掌子面稳定支护压力主要受维持掌子面稳定的抗力及驱动掌子面失稳破坏的荷载影响,其对应承载力系数 N_c 、 N_γ 与隧道埋深比 C/D 分别呈指数函数及线性函数关系;

2) 强度各向异性地层中承载力 N_c 修正系数 r_m 主要受土体抗剪强度比 k 影响,土体三轴压缩剪切强度 S_{uc} 及隧道埋深比 C/D 对其影响基本可以忽略,而承载力系数 N_γ 则不受土体抗剪强度比 k 的影响;

3) 强度各向同性及异性地层中掌子面前端土体破坏形态较为一致,均为“烟囱型”,但其分布范围有所不同,各向同性地层中土体破坏面分布范围更大。

参考文献:

- [1] BROERE W. Tunnel face stability and new CPT applications[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2001.
- [2] UKRITCHON B, YINGCHALOENKITKHAJORN K, KEA-WSAWASVONG S. Three-dimensional undrained tunnel face stability in clay with a linearly increasing shear strength with depth[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 88: 146–151.
- [3] 吕玺琳,王浩然,黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 57–62.
LYU X L, WANG H R, HUANG M S. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 57–62.
- [4] HUANG M, LI S, YU J, et al. Continuous field based upper bound analysis for three-dimensional tunnel face stability in undrained clay[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 94: 207–213.
- [5] 李艳祥,蒋刚,王旭东. 软土隧道支护压力与稳定性下限有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1558–1563.
LI Y X, JIANG G, WANG X D. Study on support pressure and stability of the tunnel face by finite element lower

- bound limit method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1558–1563.
- [6] 付亚雄,郑宏. 软黏土地层顶管隧道掌子面稳定性数值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 623–632.
FU Y X, ZHEN H. Numerical research on face stability of pipe jacking tunnel in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 623–632.
- [7] 蒋武军,李得建,瞿拓宇. 基于强度折减法的浅埋隧道掌子面三维主动稳定性上限解析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 55–62.
JIANG W J, LI D J, ZHAI T Y. Upper bound analysis of three-dimensional active stability of a shallow tunnel face based on the strength reduction method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 55–62.
- [8] 李汉愿. 纯黏土条件下浅埋隧道掌子面稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12): 3150–3156.
LI H Y. Stability analysis of shallow tunnel face in pure clay[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(12): 3150–3156.
- [9] UKRITCHON B, KEAWSAWASVONG S. Lower bound solutions for undrained face stability of plane strain tunnel headings in anisotropic and non-homogeneous clays[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 204–217.
- [10] ZHANG W G, LI Y Q, WU C Z, et al. Prediction of lining response for twin tunnels constructed in anisotropic clay using machine learning techniques[J]. Underground Space, 2020(7): 1–12.
- [11] LI Y Q, ZHANG W G. Investigation on passive pile responses subject to adjacent tunnelling in anisotropic clay[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 127(3): 103782.
- [12] GEORGIANNOU V N, CALABRESI G, RAMPOLLO S, et al. A laboratory study of the strength of four stiff clays[J]. Géotechnique, 1997, 46(3): 491–514.
- [13] 王立忠,叶盛华,沈恺伦,等. K0固结软土不排水抗剪强度[J]. 岩土工程学报, 2006(8): 970–977.
WANG L Z, YE S H, SHEN K L, et al. Undrained shear strength of K0 consolidated soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(8): 970–977.
- [14] WENG X, SUN Y, YAN B, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of tunnel face stability considering longitudinal slope angle and steady state seepage in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 101: 103406.
- [15] MA S, DUAN Z, HUANG Z, et al. Study on the stability of shield tunnel face in clay and clay-gravel stratum through large-scale physical model tests with transparent soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104199.
- [16] PAN Q, DIAS D. Three dimensional face stability of a tunnel in weak rock masses subjected to seepage forces[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 555–566.
- [17] PAN Q, DIAS D. The effect of pore water pressure on tunnel face stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(15): 2123–2136.
- [18] 傅鹤林,邓皇适,黄震,等. 下穿砂土地层掌子面盾构推力大小的极限分析[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 80–86.
FU H L, DENG H S, HUANG Z, et al. Limit analysis of the thrust of the shield on the face passing underneath the sand layer[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 37(5): 80–86.
- [19] KRABBENHØFT K, GALINDO-TORRES S A, ZHANG X, et al. AUS: Anisotropic undrained shear strength model for clays[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(17): 2652–2666.



第一作者:王凌(1980—),男,高级工程师,广州地铁设计研究院股份有限公司中南分院副院长、南昌分院院长。研究方向为城市轨道交通结构设计。E-mail:283084255@qq.com。



通信作者:罗如平(1989—),男,讲师,博士,博士毕业于同济大学。研究方向为隧道工程。E-mail:394223111@qq.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)