

考虑非均质性和各向异性的 隧道掌子面稳定性上限分析

姜涛^{1*}, 姚元¹, 周飞², 凌涛², 刘云龙², 彭学军², 杨小丽³, 尹华东³

(1.南昌轨道交通集团有限公司,江西 南昌 330200;2.中铁五局集团 第一工程有限责任公司,湖南 长沙 410117;

3.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为深入了解土体非均质性和各向异性对隧道掌子面稳定性的影响机制,基于普氏压力拱的损坏模式,构建一个隧道掌子面稳定性的分析模型,并推导出基于对数螺旋曲线的隧道掌子面支护力的解析解.进一步分析非均质性和各向异性对隧道掌子面支护力的影响规律,并依据可靠性理论来确定其安全系数以及合适的支护力范围.通过与实际工程案例的计算对比,验证其在实际工程中的实用性.研究表明,土体的非均质性和各向异性对隧道掌子面支护力产生显著的影响,而且非均质性和各向异性系数的离散性越高,对支护力的影响也就越大.建议设计浅埋土壤隧道时,务必深入考虑土体的非均质性和各向异性,以确保隧道施工的安全与隧道的稳定.

关键词:隧道掌子面;极限分析;可靠度;非均质性和各向异性

中图分类号:TU457

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)02-0008-12

Upper Limit Stability Analysis of Tunnel Faces Under the Effect of Soil Heterogeneity and Anisotropy

JIANG Tao¹, YAO Yuan¹, ZHOU Fei², LING Tao², LIU Yunlong²,

PENG Xuejun², YANG Xiaoli³, YIN Huadong³

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330200, China;

2. First Engineering Co., Ltd., China Railway No. 5 Engineering Group, Changsha 410117, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To investigate the influence mechanism of soil heterogeneity and anisotropy on the stability of tunnel face, the analysis model of tunnel face stability is developed by the failure model of Platts pressure arch. The analytical solution of the support force based on logarithmic spiral curve is deduced. Additionally, the influence of heterogeneity and anisotropy on support force is analyzed, according to the reliability theory to determine the safety factor and the appropriate range of support force. The reliability of the proposed method is validated through comparison with the actual engineering cases. Results indicate that soil heterogeneity and anisotropy have a remarkable influence on support force, and the higher the discreteness of heterogeneity and anisotropy coefficient is, the greater the influence on support force is. It is proposed that the heterogeneity and anisotropy of soil should be taken into account in the design of shallow buried soil tunnel to ensure the safety and stability of tunnel construction.

Keywords: tunnel faces; limit analysis; reliability; heterogeneity and anisotropy

在工程实际中,真实的岩土材料呈现明显的非均质性和各向异性特征,这是由于自然层理结构沉积作

用和地质构造作用等因素的综合影响.然而,目前在对隧道开挖面稳定性的极限分析研究中,多数研究均进行了简化处理,即假定岩土体为均质和各向同性.但在岩土工程中,围岩受到开挖、荷载等影响,其黏聚力通常呈现非均质性和各向异性.在对隧道、边坡、地基以及挡土墙等岩土结构的稳定性进行研究时,忽略非均质性和各向异性的影响计算得到的结果将存在明显误差.针对岩土工程的稳定性问题,研究土体的非均质与各向异性^[1-5]对实际工程的设计和施工具有重要的现实意义.

目前,有关非均质性和各向异性的研究主要集中在地基承载力和边坡稳定性问题^[5-10].然而,关于非均质性和各向异性对隧道产生影响的研究较少^[11-15].GUO等^[14]研究了巷道在静态和不同动载作用下,巷道围岩的非均质性对其稳定性的影响;JIA等^[15]利用 RFPA^{3D}和 FLAC^{3D}这2个数值程序,分析深部地下洞室围岩在三向应力作用下的非均质性对围岩破坏模式和破坏机制的影响;梁桥等^[16]基于对数螺旋的破坏模式,采用极限分析的上限法,验证了双对数螺旋极限分析上限法在非均质土壤中的适用性,为工程中初步确定盾构隧道掌子面支护压力提供理论依据;DENG等^[17]基于非均匀系数修正的 Mohr-Coulomb 准则,建立了一种在非均匀应力场中计算圆形巷道围岩塑性区边界的方法.

然而,上述研究仅考虑了土体的不均匀性,而忽略了土体的各向异性.GUO等^[18]采用连续离散耦合单元数值方法研究各向异性岩体中的底臃问题,提出了基于渐进破裂和膨胀过程的底臃力学机制,并研究了地应力和岩层厚度的影响;TANG等^[19]推导出各向异性土体中圆形隧道内地下水渗流的解析解,为计算各向异性土圆形隧道涌水量提供了一种有效的方法;ISMAEL等^[20]提出了一种连接2种破坏准则的弹-理想塑性本构模型(Jhoek)模拟各向异性岩石在不同工况下的滑动和非滑动破坏模式.

上述研究分别考虑了非均质性和各向异性的影响,研究了隧道掌子面的破坏模式和支护力,研究成果具有一定的创新性,但所求解的支护力为理论支护力,在该支护力作用下隧道掌子面仍有一定的失效概率.为进一步提高掌子面的安全性,本文引入可靠度理论求解维持掌子面的合理支护力范围,部分学者对相关应用进行了研究.如ZHANG等^[21-22]采用对数螺旋曲线构建了软岩隧道掌子面的牛角破坏模型,并通过拟静力法将地震力整合到牛角破坏模型中,同时考虑岩体参数和荷载的随机性,建立地震影响下软岩隧道掌子面的三维随机坍塌模型;张道兵等^[23]依据非线性 Baker 破坏准则和对数螺旋破坏机制,采用考虑孔隙水压力效应的极限分析上限法,推导出维持掌子面稳定所需的支护力表达式,并计算出支护力的最优上限解;YANG等^[24]采用极限分析方法,并结合非线性破坏判据,推导出孔隙水压力条件下加压隧道面最小坍塌压力和最大井喷压力的解析解;ZHAO等^[25]综合岩石隧道的岩石-支护相互作用及其不确定性,开发了基于可靠度的设计方法.但是以上隧道掌子面可靠度理论的研究都没有考虑土体非均质性和各向异性.

因此,本文综合考虑岩土体的非均质性和各向异性,采用极限分析法和可靠度理论研究隧道开挖面的稳定性,根据影响支护力大小的主要因素,提出隧道掌子面在不同级别时保持稳定性所需的安全系数及合理范围,为隧道掌子面支护设计提供理论依据与借鉴.

1 基本理论

1.1 极限分析法

极限分析上限定理指出:在一个相容的运动许可速度场中,当材料达到极限荷载状态时,变形机构所承受的表面力和体积力肯定不会低于材料所承受的实际破坏荷载,相关的表达式为^[14-15]

$$\int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV \geq \int_S T_i v_i dS + \int_V F_i v_i dV. \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为土体发生破坏时的应力; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为土体破坏时产生塑流所产生的应变; T_i 为施加在变形机构表面 S 上的力; F_i 为土体破坏时塑性破坏区域内的微观体积力; v_i 为速度间断线上的速度; V 为材料发生破坏时的体积微元.

1.2 非均质性和各向异性

假定黏土的内摩擦角 φ 为常数,只考虑黏聚力的非均质性时^[16-17],黏土某一点处的黏聚力 $c_h(z)$ 表达式为

$$c_h(z) = c_0 + \rho z. \quad (2)$$

式中: c_0 为地表处的初始水平黏聚力; ρ 为非均质系数; z 为土体任一点到地表的距离.

已有研究表明,黏土的黏聚力具有各向异性^[18-19],主应力方向不同时,黏聚力也不同.当主应力与竖直方向的夹角为 α 时,黏聚力 c 可表示为

$$c = c_h + (c_v - c_h) \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

式中: c_h 为水平方向的黏聚力; c_v 为竖直方向的黏聚力.

引入各向异性系数 $k = c_h/c_v$, 式(3)又可表示为

$$c = c_h [1 + (1 - k)/k \cos^2 \alpha]. \quad (4)$$

2 破坏模式

为深入研究盾构隧道掌子面的稳定性,构建双对数螺旋曲线的隧道掌子面破坏模型.然而大量研究表明盾构隧道掘进过程中,掌子面前方土体受到扰动后会发生应力重分布现象,进而产生拱效应.基于此,本文结合已有成果,构建一个考虑拱效应的盾构隧道掌子面破坏模型,如图 1 所示.该模型主要由塌落体 ABC 及对数螺旋区域 OCD 组成,其中塌落体 ABC 高度为 H ,以速度 v_1 竖直向下运动, BC 为隧道开挖后的潜在滑动面,宽度为 l .对数螺旋线 CD 表达式为 $r = r_0 e^{[(\theta - \theta_0) \tan \varphi]}$, 旋转中心为点 O , 旋转角速度为 ω , OC 和 OD 的长分别为 r_0 和 r_h , θ 为对数螺旋线 CD 上的任意点和 O 点的连线与水平方向的夹角, OC , OB 和 OD 与水平方向夹角分别为 θ_0 , θ_E 和 θ_h . h 为隧道埋深, d 为隧道高度, φ 为速度 v_0 的方向与对数螺旋线 CD 的夹角,即内摩擦角,根据普氏压力拱理论可得拱高 $H = l/\tan \varphi$.以 BC 向为 x 轴, BC 的中点为原点 $(0,0)$, y 轴过 A 点建立坐标系,可得塌落体 ABC 的抛物线方程为 $f(x) = -4x^2/(l \tan \varphi) + l/\tan \varphi$.

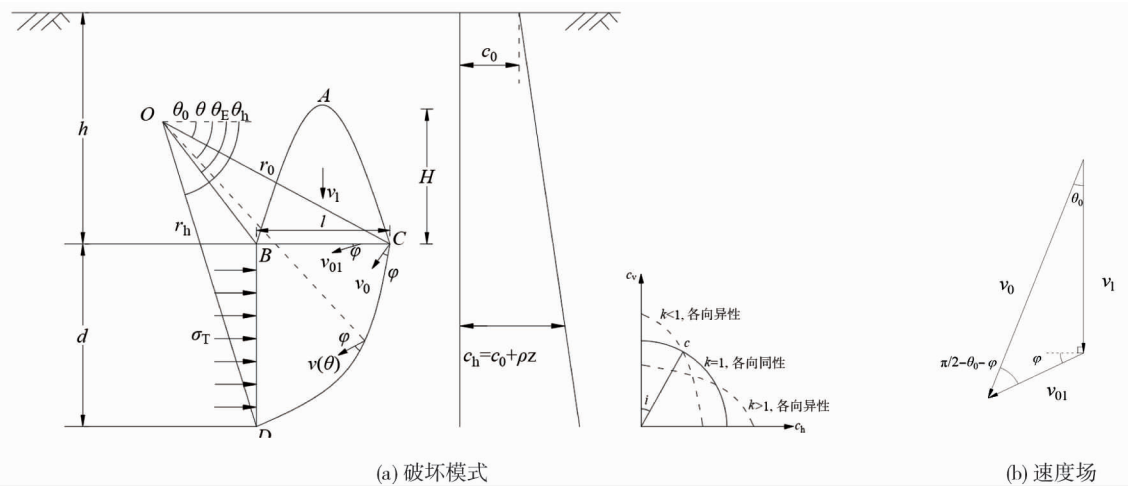


图 1 考虑土拱效应的盾构隧道掌子面稳定性分析模型

由图 1(a) 可知:

$$d = r_0 e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} \sin \theta_h - r_0 \sin \theta_0; \quad (5)$$

$$l = r_0 \cos \theta_0 - r_0 e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} \cos \theta_h; \quad (6)$$

$$\theta_E = \arctan \left[\frac{r_0 \sin \theta_0}{(r_0 \cos \theta_0 - l)} \right]. \quad (7)$$

在机动许可的速度场内,速度场满足图 1(b) 所示矢量关系:

$$\mathbf{v}_0 = \omega \mathbf{r}_0; \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_1 = \frac{\sin(\pi/2 - \theta_0 - \varphi)}{\sin(\pi/2 + \varphi)} \mathbf{v}_0; \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_{01} = \frac{\sin \theta_0}{\sin(\pi/2 + \varphi)} \mathbf{v}_0. \quad (10)$$

3 计算过程

3.1 基本假定

本文的计算中假定:

- 1) 破坏体为刚性块体,在破坏过程中不发生体积变化;
- 2) 土体为理想弹塑性材料,符合相关联流动法则.

3.2 外功率

破坏体自重做功功率 W_γ 等于塌落体 ABC 重力做功功率 W_1 与掌子面前方对数螺旋区域 BCD 重力做功功率 W_2 之和,即破坏体自重与其速度的乘积.

塌落体 ABC 面积:

$$S_{ABC} = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} f(x) dx = \frac{2l^2}{3 \tan \varphi}; \quad (11)$$

故塌落体 ABC 重力做功功率 W_1 为

$$W_1 = \gamma S_{ABC} \left[v_0 \frac{\sin(\pi/2 - \varphi - \theta_0)}{\sin(\pi/2 + \varphi)} \right] = \omega \gamma r_0 f_1. \quad (12)$$

式中: γ 为土体重度; r_0 为破坏体绕中心 O 的旋转半径.

块体 BCD 重力做功功率 W_2 可由块体 OCD 重力做功功率减去块体 OBC 和块体 OBD 重力做功功率得到:

$$W_{OCD} = \int_{\theta_0}^{\theta_h} \gamma \left(\frac{2}{3} \omega r \cos \theta \right) \frac{1}{2} r^2 d\theta; \quad (13)$$

$$W_{OBC} = \int_{\theta_0}^{\theta_E} \gamma \left(\frac{2}{3} \omega \frac{r_0 \sin \theta_0}{\sin \theta} \cos \theta \right) \frac{1}{2} \left(\frac{r_0 \sin \theta_0}{\sin \theta} \right)^2 d\theta; \quad (14)$$

$$W_{OBD} = \int_{\theta_E}^{\theta_h} \gamma \left(\frac{2}{3} \omega \frac{r_h \cos \theta_h}{\cos \theta} \cos \theta \right) \frac{1}{2} \left(\frac{r_h \cos \theta_h}{\cos \theta} \right)^2 d\theta; \quad (15)$$

$$W_2 = W_{OCD} - W_{OBC} - W_{OBD} = \int_{\theta_0}^{\theta_h} \frac{1}{2} r^2 \gamma \left(\frac{2}{3} \omega r \cos \theta \right) d\theta - \left(\frac{1}{2} \gamma l r_0 \sin \theta_0 \right) \left(\omega \frac{2 r_0 \cos \theta_0 - l}{3} \right) - \left(\frac{1}{2} \gamma D r_h \cos \theta_h \right) \left(\omega \frac{2 r_h \cos \theta_h}{3} \right) = \gamma r_0^3 \omega (f_2 - f_3 - f_4). \quad (16)$$

式中: D 为 B 点的竖直高度(y 坐标).

因此,破坏体自重做功总功率为

$$W_\gamma = W_1 + W_2. \quad (17)$$

其中:

$$f_1 = \frac{2l^2}{3 \tan \varphi} \cdot \frac{\sin(\pi/2 - \varphi - \theta_0)}{\sin(\pi/2 + \varphi)}; \quad (18)$$

$$f_2 = \frac{(3 \tan \varphi \cos \theta_h + \sin \theta_h) e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi} - 3 \tan \varphi \cos \theta_0 - \sin \theta_0}{3(1 + 9 \tan^2 \varphi)}; \quad (19)$$

$$f_3 = \frac{l \sin \theta_0}{6 r_0} \left(2 \cos \theta_0 - \frac{l}{r_0} \right); \quad (20)$$

$$f_4 = \frac{d \cos^2 \theta_h}{3 r_0} e^{2(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi}. \quad (21)$$

支护力 σ_T 做功功率 W_T 为隧道掌子面支护力做功,其表达式为

$$W_T = -\sigma_T \int_{\theta_E}^{\theta_h} (\omega r \sin \theta) \frac{r}{\cos \theta} d\theta = -\sigma_T \int_{\theta_E}^{\theta_h} \omega \frac{r_0 \cos \theta_0 - l}{\cos \theta} \sin \theta \frac{r_h \cos \theta_0}{\cos^2 \theta} d\theta = -\sigma_T \omega (r_0 \cos \theta_0 - l) r_h \cos \theta_0 \left(\frac{1}{\cos^2 \theta_h} - \frac{1}{\cos^2 \theta_E} \right). \quad (22)$$

3.3 内能耗散率

内能耗散只发生在边界 BAC 、 BC 及对数螺旋区域边界 CD 处.考虑非均质性和各向异性土中黏聚力随深度的变化关系,各边界上的内能耗散如下:

$$D_{BAC} = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} v_1 \sin[\arctan f'(x)] \sqrt{1+f'(x)} \{c_0 + \rho[h-f(x)]\} [1 + (1-k)/k \cos^2 \alpha] dx; \quad (23)$$

$$D_{BC} = v_{01} \cos \varphi l (c_0 + \rho h) [1 + (1-k)/k \cos^2 \alpha]; \quad (24)$$

$$D_{CD} = \int_{\theta_0}^{\theta_h} \omega r \cos \varphi [c_0 + \rho(h + r_h \sin \theta - r_0 \sin \theta_0)] [1 + (1-k)/k \cos^2 \alpha] \frac{r}{\cos \varphi} d\theta. \quad (25)$$

那么总内能耗散如下:

$$D_v = D_{BAC} + D_{BC} + D_{CD}. \quad (26)$$

3.4 支护力

联立式(17)、式(22)和式(24)可得

$$\sigma_T = \frac{W_\gamma - D_v}{\omega(r_0 \cos \theta_0 - l) r_h \cos \theta_0 \left(\frac{1}{\cos^2 \theta_h} - \frac{1}{\cos^2 \theta_E} \right)}. \quad (27)$$

其中式(27)约束条件为

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 < \theta_0 < \theta_E < \theta_h < \pi/2; \\ r_0 < r_h. \end{cases} \quad (28)$$

在极限状态下,为了确保隧道不会出现损伤,要求式(27)中最小解是隧道掌子面的极限支护力 σ_T ,使用序列二次规划算法并通过编程软件 MATLAB 对其优化求解.

3.5 可靠度模型

前节求解了盾构隧道的坍塌压力 σ_0 ,若隧道掌子面支护设计的安全系数为 F_s ,则实际支护力 σ_{T0} 为 $\sigma_{T0} = \sigma_T F_s$. (29)

考虑岩体参数和荷载之间的离散性,隧道掌子面的极限状态方程可以确定为

$$g(X) = \sigma_{T0} - \sigma_T = \sigma_{T0} - \frac{W_\gamma - D_v}{\omega(r_0 \cos \theta_0 - l) r_h \cos \theta_0 (1/\cos^2 \theta_h - 1/\cos^2 \theta_E)} = 0. \quad (30)$$

那么隧道掌子面的可靠度模型为

$$R_s = P[g(X) = \sigma_{T0} - \sigma_T > 0] = P\left[\sigma_{T0} - \frac{W_\gamma - D_v}{\omega(r_0 \cos \theta_0 - l) r_h \cos \theta_0 (1/\cos^2 \theta_h - 1/\cos^2 \theta_E)} > 0\right]. \quad (31)$$

则失效概率 P_f 为

$$P_f = 1 - R_s = 1 - P[g(X) = \sigma_{T0} - \sigma_T > 0] = 1 - P\left[\sigma_{T0} - \frac{W_\gamma - D_v}{\omega(r_0 \cos \theta_0 - l) r_h \cos \theta_0 (1/\cos^2 \theta_h - 1/\cos^2 \theta_E)} > 0\right]. \quad (32)$$

可靠指标 β 为

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = -\Phi^{-1}\{1 - P[g(X) = \sigma_{T0} - \sigma_T > 0]\} = -\Phi^{-1}\left\{1 - P\left[\sigma_{T0} - \frac{W_\gamma - D_v}{\omega(r_0 \cos \theta_0 - l) r_h \cos \theta_0 (1/\cos^2 \theta_h - 1/\cos^2 \theta_E)} > 0\right]\right\}. \quad (33)$$

4 对比分析

其他参数不变的情况下,分别研究不同的非均质系数 ρ 和各向异性系数 k 对盾构隧道开挖面支护力 σ_T 的影响,结果如表 1 所示.其他参数取值如下:土体重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,隧道高度 $d = 12 \text{ m}$,埋深 $h = 25 \text{ m}$,初始黏聚力 $c_0 = 8 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$.由表 1 可知:各向异性系数 $k = 1.6$,当非均质系数 $\rho = 0$ (不考虑土体非均质性)和 $\rho = 0.8$ 时,盾构隧道开挖面支护力 σ_T 分别为 42.45 kPa 和 13.22 kPa ,相对误差为 68.9% ;非均质系数 $\rho = 0.5$,当各向异性系数 $k = 1.0$ (不考虑土体各向异性)和 $k = 1.8$ 时,盾构隧道开挖面支护力

σ_T 分别为 10.51 kPa 和 25.98 kPa,相对误差为 147.2%.由此可见,非均质系数 ρ 和各向异性系数 k 对盾构隧道开挖面支护力均具有较大影响.

表 1 不同 ρ 和 k 下支护力 σ_T 的计算结果对比

ρ	σ_T/kPa	相对误差/%	k	σ_T/kPa	相对误差/%
0	42.45	—	1.0	10.51	—
0.2	34.62	18.4	1.2	16.17	53.9
0.4	27.11	36.1	1.4	20.32	93.3
0.6	19.96	53.0	1.6	23.49	123.5
0.8	13.22	68.9	1.8	25.98	147.2

5 结果分析

5.1 定值法分析

5.1.1 土体非均质性的影响

不考虑土体各向异性的影响,单独分析土体非均质性系数对支护力的影响,图 2 显示隧道掌子面的支护力 σ_T 随土体非均质性系数的变化规律.在图 2 中,当非均质系数 ρ 增大时,支护力 σ_T 呈线性减小的趋势.以 $c_0=10$ kPa 为例,非均质系数 ρ 由 0.2 增加至 1.0,支护力 σ_T 由 46.48 kPa 减小到 22.20 kPa,其相对差值为 52.2%.由此可见,非均质系数对支护力 σ_T 的影响较为显著,这是由于在隧道埋深确定的情况下,随着非均质系数增大,土体黏聚力增大,土体的稳定性得到提高.

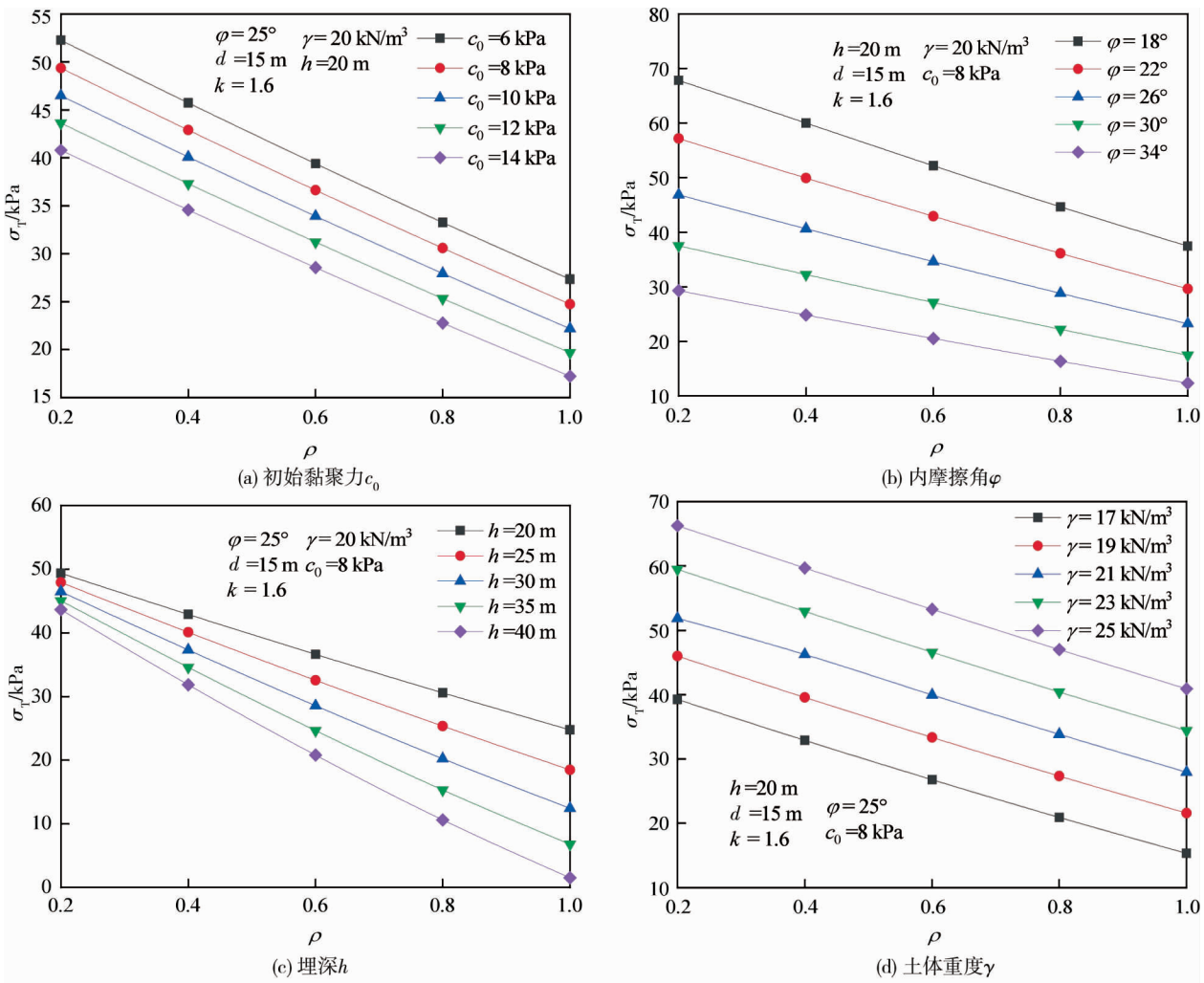


图 2 土体非均质性对支护力的影响

在图 2(a)中,曲线斜率均一致,即随着初始黏聚力 c_0 增大,支护力 σ_T 呈现线性减小,且效果较为显著.以非均质系数 $\rho=0.6$ 为例,初始黏聚力 c_0 由 6 kPa 增加至 14 kPa,支护力由 42.32 kPa 减小到 28.55 kPa,其相对差值为 32.5%.在图 2(b)中,随着内摩擦角 φ 逐渐增大,支护力 σ_T 逐渐减小.同样以非均质系数 $\rho=0.6$ 为例,内摩擦角 φ 由 18° 增加至 34° ,支护力由 52.18 kPa 减小到 20.50 kPa,其相对差值为 60.7%,表明内摩擦角对支护力 σ_T 影响十分显著.此外,由图 2(b)还可看出,曲线斜率随内摩擦角 φ 增大而逐渐减小,这意味着当内摩擦角 φ 增加到一定程度时,其对隧道掌子面稳定性的提升作用将变得有限,此时建议从其他方面着手,增强掌子面稳定性.在图 2(c)中,随着埋深 h 增加,支护力 σ_T 逐渐减小.以非均质系数 $\rho=0.6$ 为例,埋深 h 由 20 m 增加到 40 m 时,支护力 σ_T 由 36.63 kPa 减小到 20.80 kPa,其相对差值为 43.2%.由此可见,隧道埋深 h 对支护力 σ_T 有明显的影响.这是由于土体具有非均质特性,在埋深增加时,土体的黏聚力也随之增大,使得隧道掌子面的稳定性得到加强.在图 2(d)中,随着土体重度 γ 增加,支护力 σ_T 呈线性增大,且效果显著.以 $\rho=0.6$ 为例,土体重度 γ 由 17 kN/m^3 增加至 25 kN/m^3 ,支护力 σ_T 由 26.78 kPa 增加到 53.25 kPa,其相对差值为 98.8%.

5.1.2 土体各向异性的影响

不考虑土体非均质性的影响,单独研究土体各向异性系数对支护力的影响.图 3 显示隧道掌子面的支护力 σ_T 随土体的各向异性系数的变化规律.由图 3 可知,当各向异性系数 k 增大时,支护力 σ_T 呈非线性增大的趋势.以 $c_0=10 \text{ kPa}$ 为例,各向异性系数 k 由 1.2 增加至 2.0,支护力 σ_T 由 29.49 kPa 增加到 41.53 kPa,其相对差值为 40.8%.由此可见,各向异性系数对支护力 σ_T 具有明显影响,这是由于在隧道埋深确定的情况下,随着各向异性系数增大,土体黏聚力减小,土体稳定性降低.

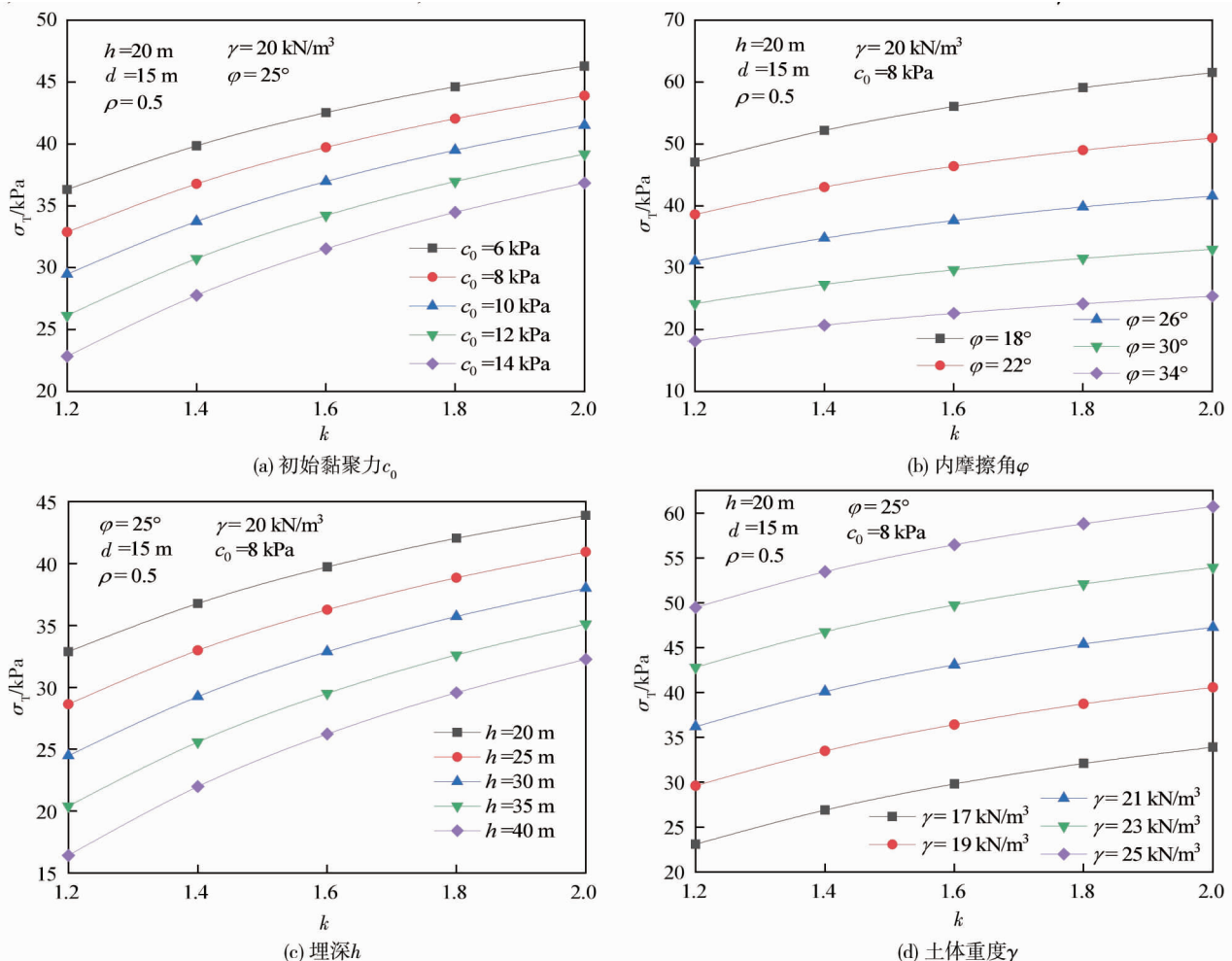


图 3 土体各向异性系数 k 对支护力的影响

由图 3(a)可知:各向异性系数 k 增大时,曲线的斜率也逐渐增大,表明在土体各向异性系数 k 越大时,初始黏聚力 c_0 对支护力 σ_T 的减小效应越明显.由图 3(b)可知:当内摩擦角 $\varphi=34^\circ$ 时,各向异性系数 k 增大,支护力 σ_T 变化较为平缓;而随着内摩擦角 φ 增大,支护力 σ_T 逐渐减小,这表明内摩擦角 φ 越小,各向异性系数 k 对支护力 σ_T 的增大效应越显著.由图 3(c)可知:各向异性系数 k 增加,埋深 h 增大时,曲线斜率也逐渐增大,可见埋深 h 越大,各向异性系数 k 对支护力的增大效应越显著.由图 3(d)可知:曲线斜率基本一致,这表明在其他参数一定的情况下,各向异性系数 k 对支护力 σ_T 提高效率不受土体重度 γ 的影响.

5.1.3 土体非均质性和各向异性对盾构隧道掌子面支护力的影响

土体不同非均质系数 ρ 和各向异系数 k 对支护力的影响如图 4 所示.从图 4 中可以看出,非均质系数对支护力 σ_T 有减小效应,而各向异性系数对支护力 σ_T 有增大效应.伴随这两种效应,非均质系数 ρ 较小时,土体各向异性对支护力 σ_T 的增大效应占据主导地位,而随着非均质系数 ρ 增大,土体非均质性对支护力 σ_T 的增大效应逐渐占据主导地位.这表明在隧道掘进过程中,探明土体的性质,并采取相应的支护手段,可有效预防隧道发生坍塌事故.

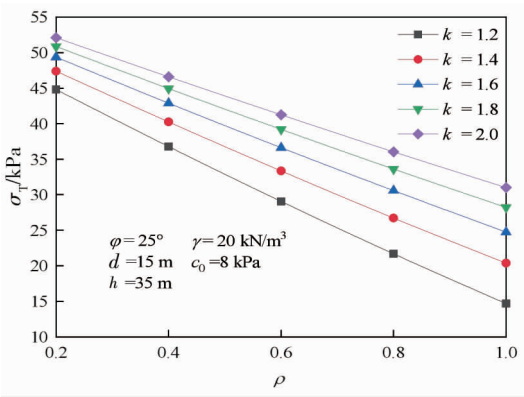


图 4 土体不同非均质系数和各项异系数对支护力的影响

5.2 安全系数与支护力

由上述分析可知,支护力的主要影响因素包含土体非均质系数 ρ 、各向异性系数 k 、土体重度 γ 、内摩擦角 φ 、隧道埋深 h 、初始黏聚力 c_0 .针对影响隧道掌子面稳定性的主要随机变量因素,开展不同安全系数条件下隧道掌子面可靠度指标的求解工作,随机变量统计特征见表 2,其他参数取值:隧道洞径 $d=15\text{ m}$,安全系数 $F_s=1.0$.各参数均值对隧道开挖面可靠度指标的影响如图 5 所示.由图 5 可知:随着安全系数 F_s 逐渐增大,掌子面可靠度呈现增大的趋势.非均质系数 ρ 、各向异性系数 k 和隧道埋深 h 均对隧道掌子面的可靠度指标 β 存在显著影响,其中隧道埋深影响最为显著,非均质性次之,各向异性相对较小.对于土体参数内摩擦角 φ 、初始黏聚力 c_0 以及土体重度 γ 而言,内摩擦角 φ 对隧道掌子面可靠度指标 β 的影响最为显著,土体重度 γ 和初始黏聚力 c_0 的影响则相对较小.此外,可靠度指标 β 为 3.7、4.2、4.7 这 3 个等级,得到不同安全等级下隧道开挖面维持稳定所需要的最小安全系数与最小支护力(表 3),计算结果能够为隧道掌子面的支护设计提供有力的理论支撑和实用参考.

表 2 随机变量统计特性

随机变量	均值	标准差	变异系数 $C_{ov}/\%$	分布类型
h/m	20.0	0.600	3	正态分布
$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	20.0	1.000	5	正态分布
$\varphi/(\circ)$	25.0	3.750	15	正态分布
$c_0/(\text{kPa})$	8.0	1.200	15	正态分布
k	1.6	0.240	15	正态分布
ρ	0.5	0.075	15	正态分布
σ_0/kPa	39.7	5.955	15	正态分布

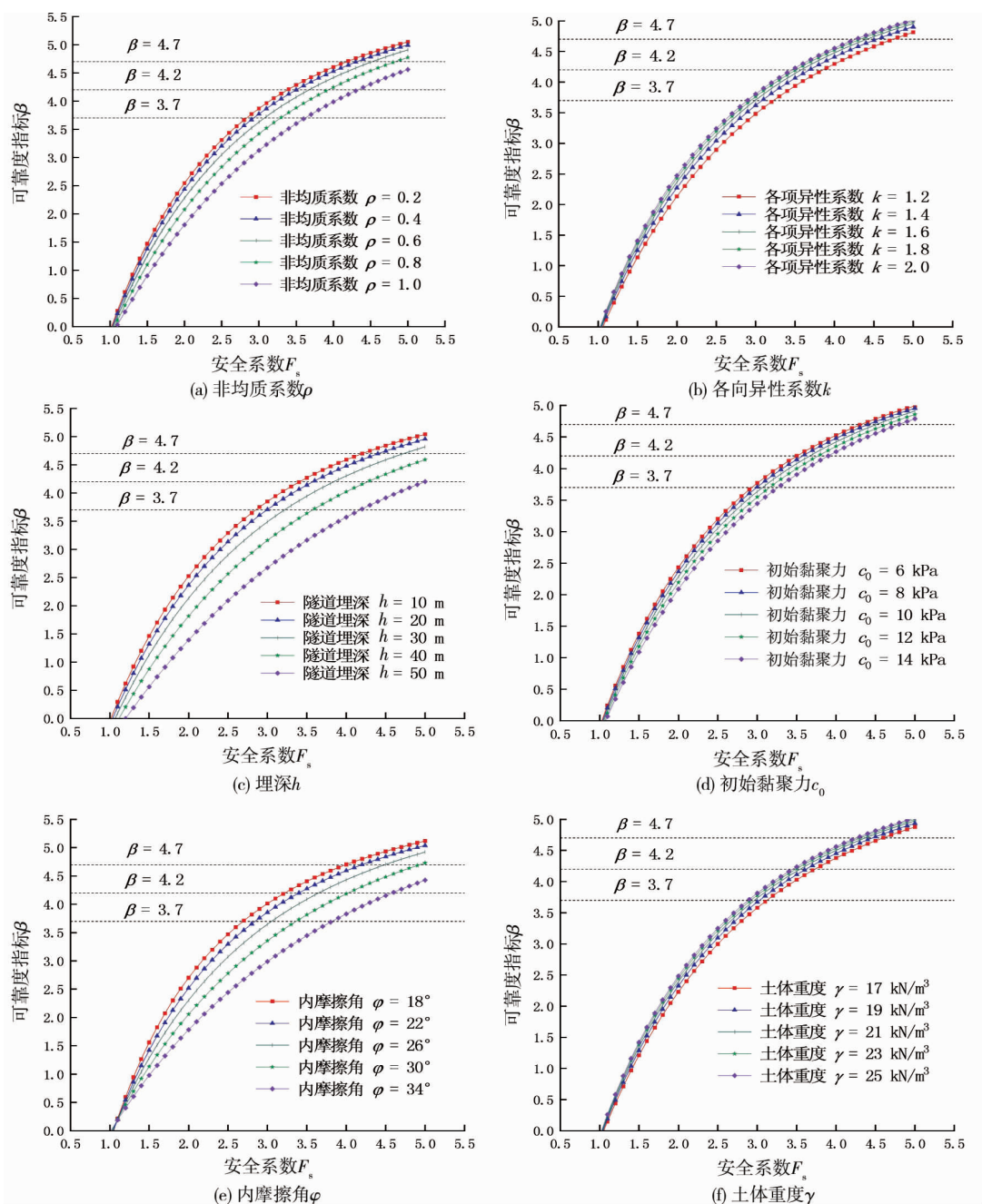


图 5 各参数均值对隧道开挖面可靠度指标的影响

表 3 3 种不同安全等级下隧道掌子面维持稳定所需要的最小安全系数和最小支护力

变量		σ_T/kPa	安全等级					
			1($\beta=3.7$)		2($\beta=4.2$)		3($\beta=4.7$)	
			F_s	σ_{T0}/kPa	F_s	σ_{T0}/kPa	F_s	σ_{T0}/kPa
ρ	0.2	49.35	2.84	140.15	3.38	166.80	4.18	205.30
	0.4	42.89	2.93	125.67	3.50	150.16	4.31	184.86
	0.6	36.63	3.08	112.82	3.66	134.06	4.52	165.57
	0.8	30.58	3.29	100.61	3.94	120.48	4.82	132.11
	1.0	24.75	3.63	89.94	4.33	107.17	—	—
k	1.2	32.88	3.23	106.20	3.86	126.92	4.75	156.18
	1.4	36.78	3.09	113.65	3.68	135.35	4.53	166.61
	1.6	39.74	3.00	119.22	3.58	142.27	4.41	175.25
	1.8	42.05	2.94	123.63	3.51	147.60	4.33	182.08
	2.0	43.90	2.90	127.31	3.47	152.33	4.28	187.90

续表 3

变量		σ_T/kPa	安全等级					
			1($\beta=3.7$)		2($\beta=4.2$)		3($\beta=4.7$)	
			F_s	σ_{T0}/kPa	F_s	σ_{T0}/kPa	F_s	σ_{T0}/kPa
h/m	10	46.77	2.86	133.76	3.42	159.95	4.21	196.90
	20	39.74	3.00	119.22	3.59	142.67	4.41	175.25
	30	32.88	3.22	105.87	3.85	126.59	4.74	155.85
	40	26.23	3.58	93.90	4.29	112.53	—	—
	50	19.82	4.19	83.04	5.00	99.10	—	—
c_0/kPa	6	42.53	2.94	133.86	3.51	159.81	4.35	185.01
	8	39.74	2.99	118.82	3.58	142.27	4.44	176.44
	10	36.97	3.07	113.50	3.67	135.68	4.54	167.84
	12	34.24	3.16	108.20	3.77	129.08	4.66	159.56
	14	31.53	2.26	71.26	3.90	122.97	4.80	151.34
$\varphi/(\text{^\circ})$	18	56.07	2.70	151.29	3.22	180.54	4.00	224.16
	22	46.40	2.85	132.24	3.40	157.76	4.21	196.19
	26	37.62	3.06	115.12	3.66	137.69	4.50	169.30
	30	29.66	3.36	99.66	4.03	119.53	4.95	146.82
	34	22.65	3.83	86.75	4.59	103.96	—	—
$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	17	29.80	3.13	93.27	3.74	111.45	4.60	137.08
	19	36.42	3.03	110.35	3.63	132.20	4.46	162.43
	21	43.07	2.97	127.92	3.55	152.90	4.39	189.08
	23	49.74	2.92	145.24	3.50	174.09	4.31	214.38
	25	56.44	2.89	163.11	3.45	194.72	4.26	240.43

5.3 不同离散情况下的安全支护力

在充分考虑土体的物理特性和力学性能以及支护力的离散性之后,采用可靠度原理深入研究土体非均质性和各向异性对隧道掌子面稳定性的影响机制.通过建立一个简化的破坏模型,研究不同土类及衬砌结构形式下隧道掌子面失稳破坏模式的概率特性.在这一研究过程中,假定隧道围岩的相关参数和支撑力遵循正态分布规律,并依据其非均质性和各向异性的离散度,将这些参数分为理想、一般和不理想 3 个类别.同时,通过统计分析,得到这 3 种类型参数概率分布函数及其相应的极限状态方程,并进一步分析其均值及方差等统计特征.表 4 详尽地列出了这些统计数据 and 分类结果.

针对土壤非均质性和各向异性所呈现的 3 种不同离散场景,本研究探讨了安全系数如何影响隧道掌子面的失效概率及可靠性指标.基于极限平衡理论,建立了计算隧道掌子面破坏概率分布函数的数学模型.研究发现,隧道掌子面失效的可能性会随着安全系数的提升而逐步降低.同时,当 2 种或 2 种以上因素相互独立时,其可靠度指标也会发生变化.不同离散情况下的计算结果如图 6 所示,在这 3 种不同的离散场景中,理想状态下的失效概率是最低的,而在不理想的情况下失效概率则是最高的.当其他条件不变时,安全系数与失效概率呈幂函数关系.显然,非均质系数与各向异性系数的变异率对于失效可能性产生显著影响.此外,还确定了在不同离散环境中,为确保隧道掌子面满足各种安全级别所需要的安全系数和支护力,详细的数据可参见表 5.

表 4 不同离散情况下的统计特征

随机变量	均值	变异系数 $C_{ov}/\%$			分布类型
		理想	一般	不理想	
h/m	20	3	3	3	正态分布
$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	20	5	5	5	正态分布
$\varphi/(\text{^\circ})$	25	15	15	15	正态分布
c_0/kPa	8	10	20	30	正态分布
k	1.6	10	20	30	正态分布
ρ	0.5	10	20	30	正态分布
σ_T/kPa	39.7	15	15	15	正态分布

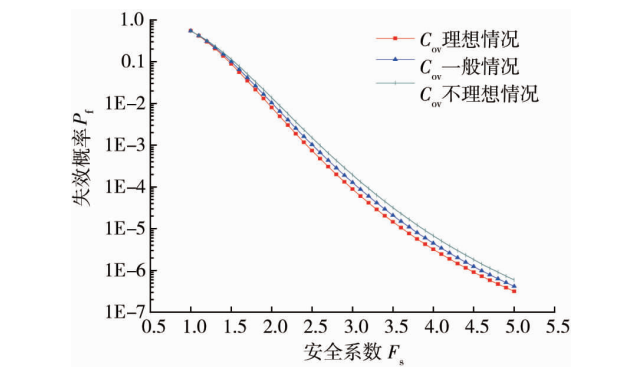


图 6 不同离散情况下安全系数对失效概率的影响

表 5 不同安全等级下盾构隧道掌子面的安全系数与支护力

变异系数 类别	安全等级					
	1($\beta=3.7$)		2($\beta=4.2$)		3($\beta=4.7$)	
	F_s	σ_{T0}/kPa	F_s	σ_{T0}/kPa	F_s	σ_{T0}/kPa
理想	2.96	117.63	3.53	140.28	4.34	172.47
一般	3.05	121.21	3.64	144.65	4.48	178.04
不理想	3.16	125.58	3.79	150.61	4.64	184.39

6 结论

1) 在埋深一定时,非均质系数增大对支护力有减小效应,而各向异性系数增大对支护力有增大效应,伴随这两种效应,非均质系数较小时,土体各向异性对支护力的增大效应占据主导地位,随着非均质系数增大,土体非均质性对支护力的增大效应逐渐占据主导地位。

2) 土体非均质性和各向异性参数的离散程度对隧道掌子面支护力有明显影响,离散程度越大,所需要的支护力也越大,此外,针对支护力的主要影响因素,给出了 3 种不同等级下隧道掌子面维持稳定所需要的安全系数和支护力,为隧道其支护设计提供理论依据和参考。

参考文献:

- [1] CHEN G H, ZOU J F, WEI X X, et al. Three-dimensional blow-out stability analysis of shield tunnel face in anisotropic and heterogeneous soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104851.
- [2] HUANG Q, ZOU J F, QIAN Z H. Face stability analysis for a longitudinally inclined tunnel in anisotropic cohesive soils[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1780-1793.
- [3] DU D C, DIAS D, YANG X L. Analysis of earth pressure for shallow square tunnels in anisotropic and non-homogeneous soils [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 226-236.
- [4] KUMAR B, SAHOO J P. Stability of unsupported circular tunnels in anisotropic normally and over consolidated saturated clay [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104148.
- [5] VITALI O P M, CELESTINO T B, BOBET A. Analytical solution for a deep circular tunnel in anisotropic ground and anisotropic geostatic stresses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(9): 3859-3884.
- [6] LI Z, SUN L, LIU L L, et al. Research on safety evaluation method of high-fill slope considering heterogeneity and anisotropy [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(7): 275.
- [7] LAI V Q, NGUYEN D K, BANYONG R, et al. Limit analysis solutions for stability factor of unsupported conical slopes in clays with heterogeneity and anisotropy[J]. International Journal of Computational Materials Science and Engineering, 2022, 11(1): 2150030.
- [8] RAO P P, ZHAO L X, CHEN Q S, et al. Three-dimensional limit analysis of slopes reinforced with piles in soils exhibiting heterogeneity and anisotropy in cohesion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 194-199.
- [9] ZHANG J W, GAO Y F, ZHANG F, et al. Influence of anisotropy and nonhomogeneity on stability analysis of slurry-support trenches[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(5): 1943-5622.
- [10] UNIVERSITY U S M, ZHABKO A V. Theory of calculation of the stability of slopes and bases. Calculation of anisotropic, heterogeneous and undermined slopes[J]. News of the Ural State Mining University, 2016(2): 42-46.
- [11] KEAWSAWASVONG S, UKRITCHON B. Design equation for stability of a circular tunnel in anisotropic and heterogeneous clay[J]. Underground Space, 2022, 7(1): 76-93.
- [12] LI T Z, YANG X L. Face failure potential of a circular tunnel driven in anisotropic and nonhomogeneous soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(8): 4020112.
- [13] ZHANG D B, ZHANG B. Stability analysis of the pressurized 3D tunnel face in anisotropic and nonhomogeneous soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 4020018.

- [14] GUO T, FENG H, SUN Z Q, et al. Numerical analysis of the effect of heterogeneity on underground roadway stability under dynamic loads[J]. Shock and Vibration, 2021(1): 2738627.
- [15] JIA P, ZHU W C, ZHANG S C. Effect of heterogeneity on occurrence of zonal disintegration around deep underground openings[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(6): 859–864.
- [16] 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.
- [17] DENG S X, ZHENG Y L, FENG L P, et al. Analysis of plastic zones in surrounding rocks around a circular tunnel considering the effect of intermediate principal stress and heterogeneity[J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 275: 03007.
- [18] GUO X X, DENG P H, LIU Q S, et al. Progressive fracture and swelling of anisotropic rock masses around deep tunnels: a new floor heave mechanical mechanism[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022(15): 1325.
- [19] TANG Y, CHAN D H, ZHU D Z. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a circular tunnel in anisotropic soils[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2018, 144(9): 206–209.
- [20] ISMAEL M, KONIETZKY H. Constitutive model for inherent anisotropic rocks: Ubiquitous joint model based on the Hoek-Brown failure criterion[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 105: 99–109.
- [21] ZHANG J H, XU P, SUN W C, et al. Seismic reliability analysis of shield tunnel faces under multiple failure modes by pseudo-dynamic method and response surface method[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5): 1553–1564.
- [22] ZHANG J H, ZHANG B. Reliability analysis for seismic stability of tunnel faces in soft rock masses based on a 3D stochastic collapse model[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1706–1718.
- [23] 张道兵,蔚彪,张静,等.考虑 Baker 准则和孔压效应的隧道掌子面支护力上限分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(9):2311–2319.
- [24] YANG X L, YAO C, ZHANG J H. Safe retaining pressures for pressurized tunnel face using nonlinear failure criterion and reliability theory[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(3): 708–720.
- [25] ZHAO H B, LI S J, CHEN B R. The reliability-based design optimization of considering rock-support interaction for rock tunnels[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(1): 9921881.