

考虑孔隙水作用的盾构倾斜隧道开挖面 可靠性分析

张晗秋¹, 周标¹, 周飞², 刘云龙², 曾林海^{3*}, 朱远嫫³, 王森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:为研究倾斜隧道开挖面在孔隙水作用下的稳定性,将孔隙水作为外力引入倾斜隧道开挖面计算模型中,运用极限分析法求解孔隙水作用下倾斜隧道开挖面支护力的解析解,并通过序列二次规划(Sequence Quadratic Programming, SQP)算法求解得到支护力上限解.根据可靠度理论,构建倾斜隧道开挖面极限状态方程,分析隧道倾角、孔隙水压力系数、水位线高度和 Hoek-Brown 参数对隧道开挖面失效概率的影响以及不同安全等级下支护力的合理范围.结果表明:孔隙水及隧道倾角对隧道的稳定性有显著的影响,隧道开挖面失效概率随孔隙水压力系数的增加而增加.研究结果可为孔隙水作用下倾斜隧道支护提供理论支撑.

关键词:孔压效应;倾斜隧道;极限分析法;失效概率

中图分类号:TU43 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2024)03-0020-09

Reliability Analysis of Inclined Shield Tunnel Face Considering Pore Water Pressure

ZHANG Hanqiu¹, ZHOU Biao¹, ZHOU Fei², LIU Yunlong², ZENG Linhai³, ZHU Yuanlei³, WANG Sen³

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

2. The 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 study the stability of inclined tunnel face under the action of pore water, the pore water is introduced to the calculation model of inclined tunnel excavation face as an external force, and the analytical solution of the support force under the action of pore water is solved by using limit analysis method, and the upper limit solution of the support force is obtained by solving the Sequence Quadratic Program (SQP) algorithm. According to the reliability theory, the limit state equation of inclined tunnel excavation face is established, and the influence of tunnel inclination Angle, pore water pressure coefficient, water level height and Hoek-Brown parameters on the failure probability of tunnel excavation face, and the reasonable range of support force under different safety grades are analyzed. Pore water and tunnel inclination angle have significant effects on tunnel stability. The failure probability of tunnel excavation face increases with the increase of pore water coefficient. It has provided theoretical support for inclined tunnel support under the action of pore water.

Keywords: pore pressure effect; inclined tunnel; limit analysis method; failure probability

随着城市化建设的不断推进,地铁工程应运而生,地铁隧道的稳定性问题在工程建设中一直备受关注.在建设过程中,隧道的开挖打破了岩体本身的平衡,因支护不当导致隧道坍塌的事故屡见不鲜,严重威

胁施工人员的安全^[1-2].因此研究隧道开挖面的可靠性,确定合理的支护力范围,确保及时、有效地对隧道进行支护具有重要的工程意义.

在隧道稳定性分析中,极限分析法因计算简便、结果准确而广受研究者的青睐.PAN等^[3]基于极限分析法与强度折减法,建立非圆形隧道工作面的破坏机制,估算开挖面的安全系数,并讨论不同断面形状对安全系数的影响;HAN等^[4]对多层土体的力学状态进行分析,构建隧道开挖面的多块体破坏模式,基于极限分析上限法求解多层土体情况下支护力的上限解,并与已有研究成果进行对比,验证了计算方法的正确性;汪泓等^[5]基于极限分析上限定理,将地震力用拟静力的方法引入计算中,分析相关参数对隧道开挖面破坏范围的影响;熊小华等^[6]基于极限分析法,建立三维隧道开挖面破坏模式,对纤维锚杆作用下纯黏土地层的稳定性进行分析,并研究得到锚杆加固参数对隧道安全系数的影响规律.

上述研究对隧道进行稳定性分析时均未考虑孔隙水的作用,然而在富水地层进行隧道开挖时,由于其空间条件复杂以及高水压的存在,极易使隧道开挖面发生变形,甚至造成涌水、突泥等地质灾害.CHEN等^[7]考虑孔隙水压力对隧道掌子面临界支护压力的影响,在上限定理的基础上提出计算隧道开挖面临界支护力的方法,并通过有限元分析验证了所提出方法的正确性;谢晓锋等^[8]基于非线性 Mohr-Coulomb 准则和孔隙水压力作用下极限分析的上限定理,研究孔隙水压力对深埋隧道的稳定性的影响.上述对孔隙水作用下隧道开挖面稳定的研究只针对土质隧道,且未给出不同安全等级下隧道开挖面的失效概率和合理的支护力范围.在实际工程中,隧道开挖往往存在一定的倾角,因此本文基于极限分析上限法和 Hoek-Brown 破坏准则,对倾斜隧道稳定性进行分析,并构建隧道开挖面可靠度模型,得出不同安全等级下所需的安全支护力,为隧道支护提供可靠的理论指导.

1 基本理论

采用上限法分析孔隙水压力做功时,通常将孔隙水压力当作外力引入到上限定理中,Viratjandr等^[9]认为孔隙水主要作用于速度间断面上,孔隙水做功功率 P_u 表达式如式(1)所示,孔隙水压力做功表达式如式(2)所示.

$$P_u = - \int_S u_i \mathbf{n}_i \mathbf{v}_i dS; \quad (1)$$

$$\int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV \geq \int_S \mathbf{T}_i \mathbf{v}_i dS + \int_V \mathbf{F}_i \mathbf{v}_i dV - \int_S u_i \mathbf{n}_i \mathbf{v}_i dS. \quad (2)$$

式中: u_i 为孔隙水压力; \mathbf{v}_i 为塌落体中任意点的速度向量; \mathbf{n}_i 为塌落体速度间断面上法线向量; S 为塌落体的边界区域; σ_{ij} 为孔隙水应力; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为孔隙水应变率; \mathbf{T}_i 为作用在 S 上的外应力; \mathbf{F}_i 为作用在体积微元 V 上的应力.

2 破坏模式

依据已有的研究成果^[10],构建考虑孔隙水压力作用下的倾斜隧道开挖面破坏模式,如图1所示.假设 AB 为倾斜隧道开挖面, M 为开挖面中心,隧道洞径和埋深分别为 d 和 h ,隧道倾角为 α .开挖面发生破坏时,以角速度 ω 绕 O 点旋转破坏,破坏体为 AEB .破坏体 AEB 的内边界和外边界分别为对数螺旋线 AE 和 BE ,其表达式分别为 $r_1(\theta) = r_a e^{(\theta-\theta_2)\tan\varphi}$, $r_2(\theta) = r_b e^{(\theta_1-\theta)\tan\varphi}$,其中 r_a 为线段 OA 长度, r_b 为线段 OB 的长度, θ_1 为 r_2 对数螺旋线初始夹角, θ_2 为 r_1 对数螺旋线初始夹角, θ_3 为 OE 与竖直方向的夹角(见图1), θ 为角度微元, φ 为岩体内摩擦角.破坏体顶点 E 的夹角为 2φ , u 为孔隙水压

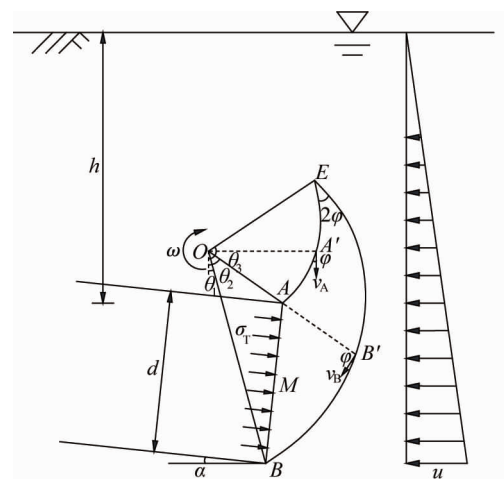


图1 倾斜隧道掌子面破坏模式

力, γ 为岩体重度, σ_T 为开挖面上的均布支护力。

3 塌落岩体外力做功功率及内能耗散率

3.1 塌落岩体重力做功功率

如图 1 所示, 破坏岩体 ABE 在竖直方向的做功功率即为塌落岩体的重力做功功率。将破坏岩体划分为 $AB'E$ 和 $BB'A$ 两部分, 分别求出 $AB'E$ 与 $BB'A$ 两部分破坏岩体重力所做的功率, 得出塌落岩体总重力的做功功率为

$$P_\gamma = P_{\gamma_1} + P_{\gamma_2} = \gamma\omega [r_b^3(f_1 + f_3 - f_4) - r_a^3 f_2]. \quad (3)$$

式中: P_γ 为破坏岩体 ABE 的重力做功功率; P_{γ_1} 与 P_{γ_2} 分别为破坏岩体 $AB'E$ 和 $BB'A$ 的重力做功功率。其中

$$f_1 = \frac{-e^{3(\theta_1-\theta_3)\tan\varphi_1}(3\tan\varphi_1\sin\theta_3 + \cos\theta_3) + e^{3(\theta_1-\theta_2)\tan\varphi_1}(3\tan\varphi_1\sin\theta_2 + \cos\theta_2)}{3(1 + 9\tan^2\varphi_1)}; \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{e^{3(\theta_3-\theta_2)\tan\varphi_1}(3\tan\varphi_1\sin\theta_3 - \cos\theta_3) + \cos\theta_2 - 3\tan\varphi_1\sin\theta_2}{3(1 + 9\tan^2\varphi_1)}; \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{-e^{3(\theta_1-\theta_2)\tan\varphi_1}(3\tan\varphi_1\sin\theta_2 + \cos\theta_2) + \cos\theta_1 + 3\tan\varphi_1\sin\theta_1}{3(1 + 9\tan^2\varphi_1)}; \quad (6)$$

$$f_4 = \frac{1}{3} \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1) \sin(\theta_1 + \alpha) \sin\theta_1}{\sin(\theta_2 + \alpha)}. \quad (7)$$

式中: φ_1 为孔隙水作用下岩体内摩擦角。

3.2 孔隙水压力做功功率

本文假定岩体为理想刚体, 因此塌落岩体 ABE 体积不发生变化, 即孔隙水压力在体应变上的做功为 0, 孔隙水只在边界 AE 和 BE 上做功, 其功率分别为

$$P_{u-AE} = \int_{\theta_2}^{\theta_3} r_1^3(\theta) \cos\theta r_u \gamma \omega \sin\varphi d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} (h - r_a \cos\theta_2) r_u \gamma r_1^2(\theta) \omega \sin\varphi d\theta = r_u \gamma \omega r_a^2 \sin\varphi [f_5 + (h - r_a \cos\theta_2) f_6]; \quad (8)$$

$$P_{u-BE} = \int_{\theta_1}^{\theta_3} (h + d - r_b \cos\theta_1) r_u \gamma r_2^2(\theta) \omega \sin\varphi d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_3} r_2^3(\theta) \cos\theta r_u \gamma \omega \sin\varphi d\theta = r_u \gamma \omega r_b^2 \sin\varphi [(h + d - r_b \cos\theta_1) f_7 + r_u f_8]. \quad (9)$$

式中: r_u 为孔隙水压力系数。其中

$$f_5 = \int_{\theta_2}^{\theta_3} e^{3(\theta-\theta_2)\tan\varphi_1} \cos\theta d\theta = \frac{3\tan\varphi_1 [e^{3(\theta_3-\theta_2)\tan\varphi_1} \cos\theta_3 - \cos\theta_2] + e^{3(\theta_3-\theta_2)\tan\varphi_1} \sin\theta_3 - \sin\theta_2}{1 + 9\tan^2\varphi_1}; \quad (10)$$

$$f_6 = \int_{\theta_2}^{\theta_3} e^{2(\theta-\theta_2)\tan\varphi_1} d\theta = \frac{e^{2(\theta_3-\theta_2)\tan\varphi_1} - 1}{2\tan\varphi_1}; \quad (11)$$

$$f_7 = \int_{\theta_1}^{\theta_3} e^{3(\theta_1-\theta)\tan\varphi_1} \cos\theta d\theta = \frac{3\tan\varphi_1 [\cos\theta_1 - e^{3(\theta_1-\theta_3)\tan\varphi_1} \cos\theta_3] + e^{3(\theta_1-\theta_3)\tan\varphi_1} \sin\theta_3 - \sin\theta_1}{1 + 9\tan^2\varphi_1}; \quad (12)$$

$$f_8 = \int_{\theta_1}^{\theta_3} e^{2(\theta_1-\theta)\tan\varphi_1} d\theta = \frac{1 - e^{2(\theta_1-\theta_3)\tan\varphi_1}}{2\tan\varphi_1}. \quad (13)$$

综上所述, 孔隙水压力的总做功功率为

$$P_u = P_{u-AE} + P_{u-BE}. \quad (14)$$

3.3 支护力做功功率

隧道支护力的做功功率 P_0 的表达式为

$$P_0 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{r_b}{\sin(\theta + \alpha)} \sin(\theta_1 + \alpha) \omega \cos(\theta + \alpha) \sigma_0 \frac{r_b}{\sin^2(\theta + \alpha)} \sin(\theta_1 + \alpha) d\theta = \frac{1}{2} \sigma_0 \omega r_b^2 \left[1 - \frac{\sin^2(\theta_1 + \alpha)}{\sin^2(\theta_2 + \alpha)} \right]. \quad (15)$$

式中: σ_0 为隧道坍塌压力.

3.4 塌落岩体内能耗散率

如图 1 所示,内能耗散仅发生在速度间断线 AE 和 BE 上,塌落岩体内能耗散率 P_V 的计算式为

$$P_{V1} = \int_{\theta_2}^{\theta_3} c_1 (r_a \omega \cos \varphi_1) \frac{r_a}{\cos \varphi_1} d\theta; \quad (16)$$

$$P_{V2} = \int_{\theta_1}^{\theta_3} c_1 (r_b \omega \cos \varphi_1) \frac{r_b}{\cos \varphi_1} d\theta; \quad (17)$$

$$P_V = P_{V1} + P_{V2} = c_1 \omega (r_a^2 f_9 + r_b^2 f_{10}). \quad (18)$$

式中: P_{V1} 与 P_{V2} 分别为速度间断线 AE 和 BE 上的内能耗散率; c_1 为孔隙水作用下岩石黏聚力. 其中

$$f_9 = \frac{e^{2(\theta_3 - \theta_2) \tan \varphi_1} - 1}{2 \tan \varphi_1}; \quad (19)$$

$$f_{10} = \frac{1 - e^{2(\theta_1 - \theta_3) \tan \varphi_1}}{2 \tan \varphi_1}. \quad (20)$$

3.5 支护力计算

基于虚功原理,内能耗散功率和外力功率相等,即 $P_\gamma + P_u = P_0 + P_V$, 由此可推导出隧道坍塌压力 σ_0 的表达式为

$$\sigma_0 = \frac{2(P_\gamma + P_u - P_V)}{\omega r_b^2 \left[1 - \frac{\sin^2(\theta_1 + \alpha)}{\sin^2(\theta_2 + \alpha)} \right]}; \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 < \theta_1 < \theta_2 < \pi/2; \\ \theta_2 < \theta_3 < \pi; \\ r_a < r_b. \end{cases} \quad (22)$$

3.6 结果分析

图 2 给出了孔隙水压力系数 r_u 、隧道倾角 α 、水位线高度 h 、地质强度指标 GSI 、材料常数 m_i 、岩体变形模量 σ_{ci} 、扰动因子 D 对隧道开挖面支护力的影响曲线,其余影响参数的取值:隧道洞径 $d=10$ m、岩体重度 $\gamma=20$ kN/m³. 由图 2a 可以看出,3 条曲线十分接近,且随着孔隙水压力系数的增大,曲线上的点逐渐重合. 当孔隙水压力系数 $r_u=0.5$ 时,隧道倾角 α 为 $0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$ 时对应的支护力分别为 268.40, 267.94, 267.85 kPa, 由此可知隧道倾角小幅度的改变对开挖面支护的影响较为有限. 在图 2b 中,同一孔隙水压力系数下,随着水位线高度的增加,支护力逐渐增大,且孔隙水压力系数越大,水位线高度变化对支护力的影响越大. 在图 2c~图 2f 中,当 Hoek-Brown 参数 GSI, m_i, σ_{ci} 逐渐增大时,支护力逐渐减小;当扰动因子 D 增大时,支护力也逐渐增大. 原因是 GSI, m_i, σ_{ci} 越大说明岩体的岩性越好,开挖所需的支护力则越小;扰动因子越大,表示开挖时对岩体的扰动越大,开挖所需的支护力则越大. 在图 2 中还可以看出,随着孔隙水压力系数的增大,支护力均呈现增大的趋势,这表明孔隙水对隧道开挖稳定性的影响显著,不容忽视.

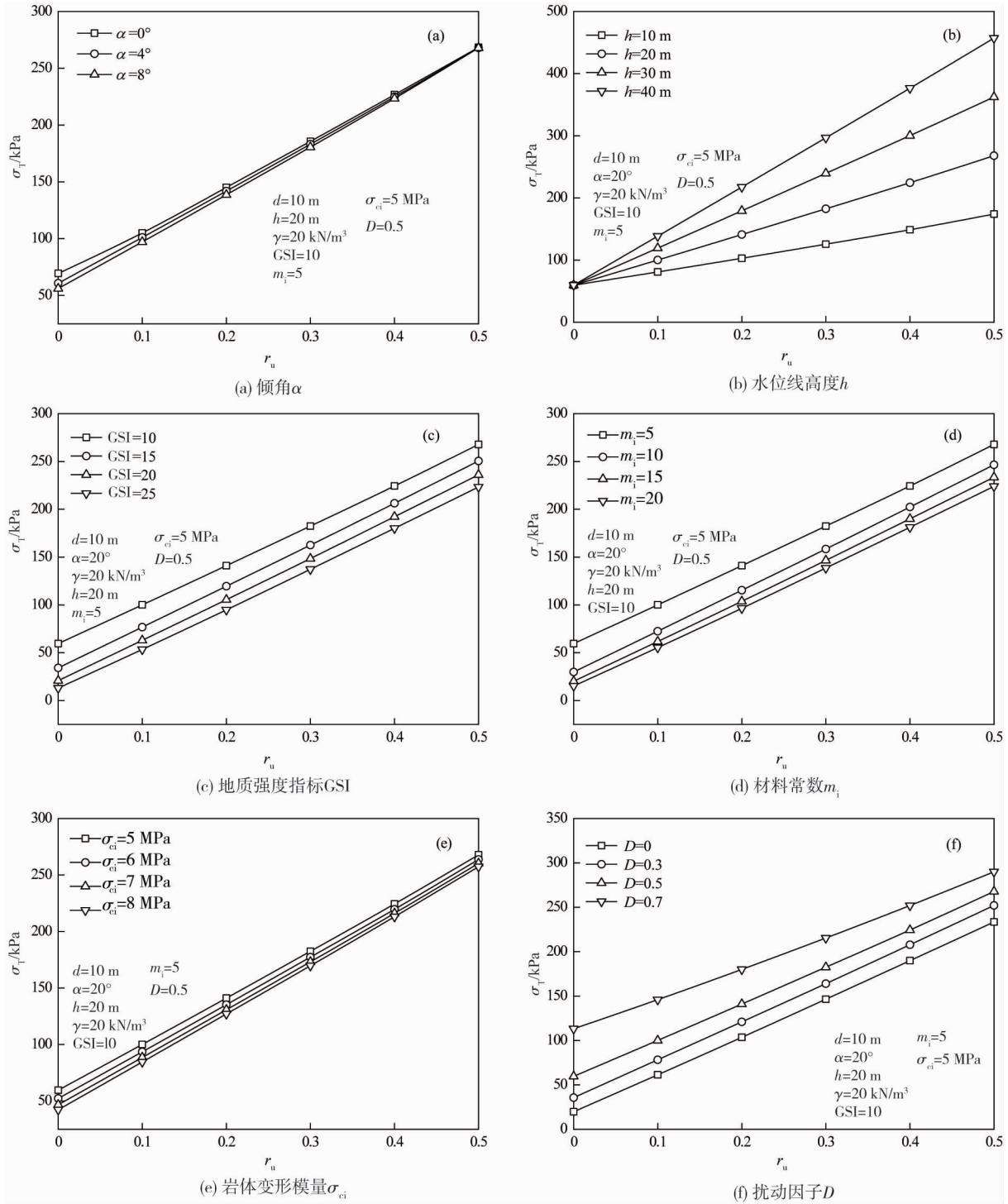


图2 不同参数条件下隧道开挖面支护应力与孔隙水压力系数的变化关系

4 可靠度模型的建立及结果分析

可靠度方法是以概率统计理论为基础,计算结构在规定的的时间和条件下,完成预定功能概率的稳定性分析方法.与传统的定值法相比较,可靠度方法不仅能更好地反映岩土的实际工作状态,还能合理地解释一些定值理论无法解决的工程问题.其计算步骤为首先给出不确定因素的描述方式,然后建立功能函数或极限状态方程,最后求解失效概率以及可靠度指标.

4.1 坍塌压力极限平衡方程

基于3.5节通过极限分析求解得到的隧道坍塌压力,则极限状态方程为

$$g(X) = \sigma_T - \sigma_0 = 0. \tag{23}$$

式中: σ_0 为隧道的坍塌压力; σ_T 为盾构机施加在隧道开挖面的支护应力.

4.2 可靠度模型的建立

隧道开挖面的可靠度模型 R_s 为

$$R_s = P\{g(X) = \sigma_T - \sigma_0 > 0\}. \quad (24)$$

失效概率 P_f 为

$$P_f = 1 - R_s. \quad (25)$$

可靠指标 β 为

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f). \quad (26)$$

4.3 结果分析

根据已有研究成果^[11-13], 给出随机变量统计特征, 如表 1 所示.

表 1 随机变量分布特征

| 随机变量 | 均值 | 标准差 | 变异系数 | 分布类型 |
|--------------------------|------|------|------|------|
| r_u | 0.3 | 0.03 | 0.10 | 正态分布 |
| $\alpha/(\circ)$ | 5.0 | 0.25 | 0.05 | 正态分布 |
| GSI | 10.0 | 1.50 | 0.15 | 正态分布 |
| m_i | 5.0 | 0.75 | 0.15 | 正态分布 |
| σ_{ci}/kPa | 5.0 | 1.00 | 0.20 | 正态分布 |
| D | 0.6 | 0.03 | 0.05 | 正态分布 |
| σ_T/kPa | | | 0.10 | 正态分布 |

与传统的定值方法相比, 可靠度方法的优点之一就是可以简单方便地对随机变量进行敏感性分析, 而通过均值敏感性因子和标准差敏感性因子来识别最敏感的随机变量. 由表 1 可知, 各随机变量的均值敏感性因子都不相同, 标准差敏感性因子也都不相同; 同一随机变量的均值敏感性因子与标准差敏感性因子也不相同. 这说明各随机变量的均值和标准差对可靠度有着不同的影响, 而同一随机变量的均值敏感性因子与标准差敏感性因子却具有高度的相关性.

4.3.1 随机参数对盾构隧道开挖面失效概率的影响

根据表 1 中变异系数可得各随机参数对盾构隧道开挖面失效概率的影响规律, 如图 3 所示. 在图 3a 中, 当支护力一定时, 隧道倾角与失效概率呈负相关. 当支护力增大时, 失效概率逐渐减小. 在图 3b 中, 当支护力一定时, 随着孔隙水压力系数的增大, 失效概率也逐渐增大. 当隧道开挖面支护力 $\sigma_T = 500 \text{ kPa}$ 时, 孔隙水压力系数为 0.1, 0.3, 0.5 时对应的失效概率 P_f 分别为 1.96×10^{-13} , 9.51×10^{-9} , 5.63×10^{-5} , 失效概率急剧增大, 由此可以看出孔隙水压力对隧道开挖面稳定性的影响显著. 在图 3c 中, 当 $\sigma_T = 500 \text{ kPa}$, 水位线高度从 20 m 升高到 40 m 时, 失效概率 P_f 从 5.19×10^{-11} 增大到 1.10×10^{-6} , 这表明水位线的升高会使隧道开挖面趋于不稳定, 在施工时应注意降排水措施. 在图 3d~3f 中, 当地质强度指标 GSI、岩体常数 m_i 、岩体变形模量 σ_{ci} 逐渐增大时, 即岩体的岩性和整体性较好时, 隧道开挖面失效概率逐渐减小. 在图 3g 中, 当隧道开挖面支护力 $\sigma_T = 300 \text{ kPa}$, 扰动因子 D 从 0.1 增大到 0.5 时, 隧道开挖面的失效概率从 7.87×10^{-9} 增大到 7.78×10^{-3} , 这表明较大的扰动会对隧道开挖面的稳定性产生不利影响, 因此在进行隧道开挖时应根据地质情况, 选取合适的开挖方式降低扰动.

4.3.2 安全支护力

根据《工程结构可靠性设计统一标准》^[14], 在脆性破坏条件下, 安全等级 1, 2, 3 级对应的失效概率 P_f 分别为 1.33×10^{-5} , 1.08×10^{-4} , 6.87×10^{-4} . 通过式(3)、式(14)、式(18)、式(21)计算可得表 2 所示的数据, 表 2 中列举了不同安全等级下维持隧道开挖面稳定的最小支护力 σ_T , 如设定安全等级为 1 级, 当孔隙水压力系数从 0.1 增大到 0.5 时, 维持开挖面稳定的最小支护力由 235.87 kPa 增大到 529.51 kPa. 此支护力可为孔隙水作用下盾构隧道开挖支护提供参考.

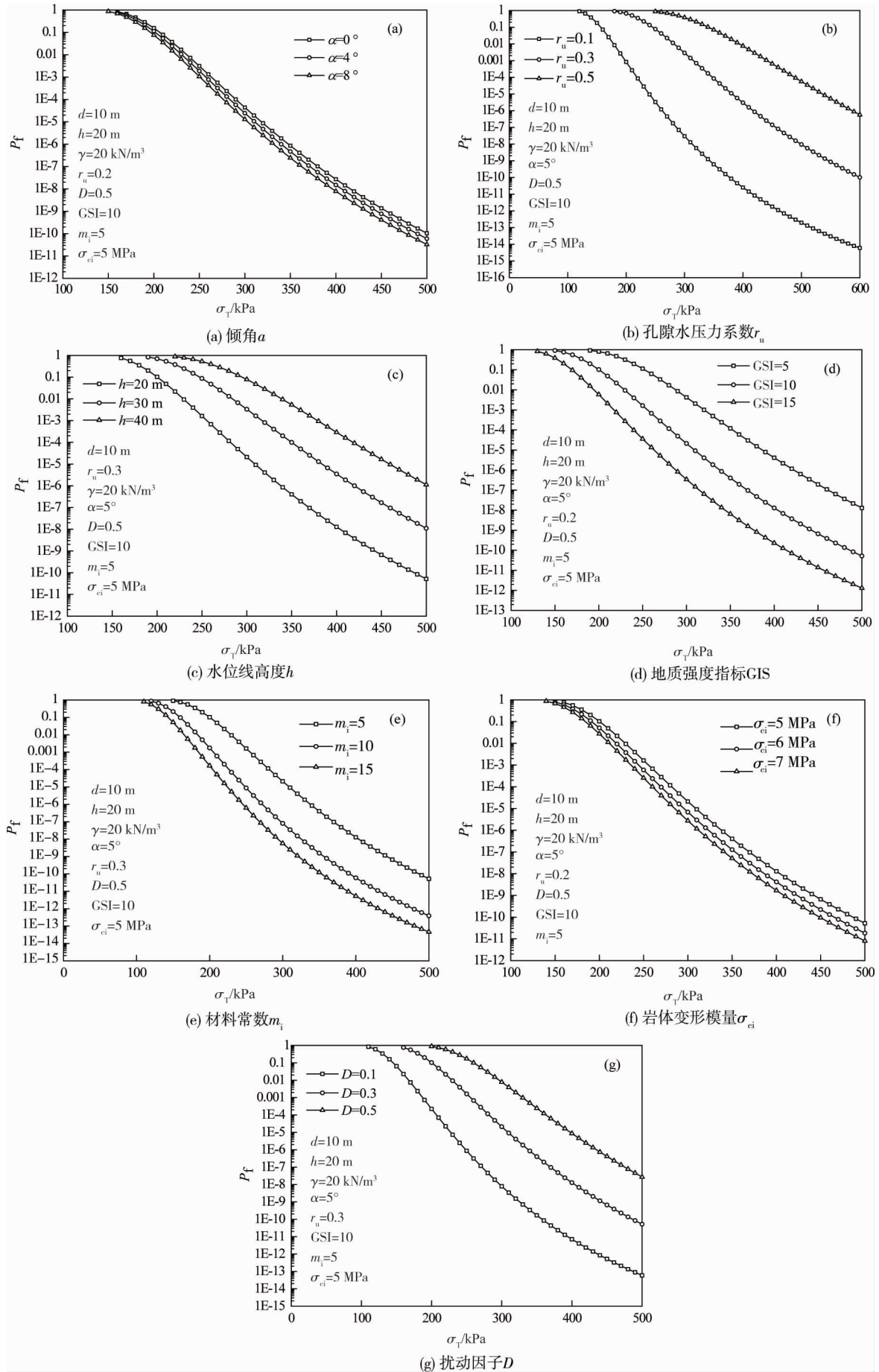


图3 不同参数对隧道开挖面失效概率的影响

表2 不同失效概率(安全等级)下隧道开挖面的最小支护力

| 随机参数 | 均值 | σ_T/kPa | | |
|--------------------------|-----|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | 安全等级1级($P_f = 1.33 \times 10^{-5}$) | 安全等级2级($P_f = 1.08 \times 10^{-4}$) | 安全等级3级($P_f = 6.87 \times 10^{-4}$) |
| $\alpha/(\circ)$ | 0 | 314.55 | 289.18 | 267.55 |
| | 4 | 307.16 | 282.60 | 262.18 |
| | 8 | 299.61 | 275.24 | 254.57 |
| r_u | 0.1 | 235.87 | 216.27 | 201.08 |
| | 0.3 | 375.68 | 347.64 | 319.60 |
| | 0.5 | 529.51 | 486.28 | 450.84 |
| h/m | 20 | 305.11 | 278.88 | 259.58 |
| | 30 | 379.01 | 349.42 | 322.33 |
| | 40 | 455.95 | 418.13 | 385.50 |
| GSI | 5 | 381.61 | 350.63 | 325.36 |
| | 10 | 305.37 | 280.10 | 259.67 |
| | 15 | 258.98 | 238.91 | 220.81 |
| m_i | 5 | 305.71 | 280.29 | 259.09 |
| | 10 | 247.30 | 225.98 | 210.51 |
| | 15 | 220.36 | 203.92 | 187.80 |
| σ_{ci}/MPa | 5 | 306.49 | 280.79 | 260.10 |
| | 6 | 292.56 | 270.23 | 249.11 |
| | 7 | 281.22 | 259.67 | 238.21 |
| D | 0.1 | 225.98 | 206.73 | 191.58 |
| | 0.3 | 304.85 | 280.29 | 260.49 |
| | 0.5 | 393.44 | 363.26 | 335.46 |

5 结论

在考虑隧道倾角和孔隙水的作用下,运用 SQP 算法优化求解,得到保持隧道开挖面稳定性的支护力上限解.实际工程中隧道开挖常会遇见富水地层及无法水平开挖的情况,考虑隧道倾角和孔隙水对开挖面稳定性的影响研究更贴合实际情况.当支护力不变时,隧道失效概率随隧道倾角的增大而减小;孔隙水对隧道的稳定性有显著的影响,水位线高度变化对隧道稳定性的影响更大,孔隙水压力系数从 0.1 增大到 0.5 时,维持开挖面稳定的最小支护力由 235.87 kPa 增大到 529.51 kPa,该支护力上限解可为富水地层盾构倾斜隧道的开挖提供理论支持.

参考文献:

- [1] 文艳芳,陈敬配.地铁隧道施工坍塌风险耦合机理研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):943-952.
- [2] 孙景来,刘保国,储昭飞,等.隧道坍塌事故类型划分及其主要特征[J].中国铁道科学,2018,39(6):44-51.
- [3] PAN Q J, DIAS D. Upper-bound analysis on the face stability of a non-circular tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 62: 96-102.
- [4] HAN K H, ZHANG C P, ZHANG D L. Upper-bound solutions for the face stability of a shield tunnel in multilayered cohesive-frictional soils[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 79: 1-9.
- [5] 汪泓,傅鹤林,王成洋,等.基于拟静力法的地震作用下隧道掌子面动态稳定性上限分析[J].矿业研究与开发,2023,43(2):95-101.
- [6] 熊小华,刘安,黄琦.纯黏土地层锚杆加固隧道掌子面稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2022,19(2):453-460.
- [7] CHEN G H, ZOU J F, CHEN J Q. Shallow tunnel face stability considering pore water pressure in non-homogeneous and anisotropic soils[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 116: 103205.

- [8] 谢晓锋,吴秋红,刘恺.考虑孔隙水压力影响的深埋盾构隧道开挖面稳定性分析[J].公路交通科技,2017,34(7):94-100.
- [9] VIRATJANDR C, MICHALOWSKI R L. Limitanalysis of submerged slopes subjected to water drawdown [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8): 802-814.
- [10] 张佳华,王卫军,张道兵,等.考虑 Hoek-Brown 准则和孔压效应隧道掌子面可靠度分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(12):3173-3180.
- [11] HOEK E, CARRANZE-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion; 2002 edition [C]. Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium, 2002: 18-22.
- [12] HOEK E. Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(1): 63-68.
- [13] 符文熹.岩体等效抗剪强度概率特征值评估在边坡稳定性可靠度分析中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(6):23-27.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程结构可靠性设计统一标准: GB 50153—2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.