

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.08.015

管棚预支护条件下隧道开挖面 三维稳定性分析

王凯¹, 康海贵¹, 王海涛²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连交通大学 土木与安全工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 为了研究管棚预支护对隧道开挖面稳定性的影响, 从塑性极限分析机动学方法出发, 利用土的强度折减系数概念, 建立了管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析模型, 由此确定开挖面稳定系数及其相应的潜在破坏模式。结合实际工程, 采用该方法计算得到的开挖面极限支护压力与有限元强度折减法的计算结果吻合较好, 验证了本文方法的合理性。进而研究了隧道埋深、隧道洞径及围岩条件对开挖面稳定性的影响, 分析了上述因素与开挖面极限支护压力及稳定系数的关系。对有无管棚预支护隧道开挖面稳定性分析表明: 在软弱地层、大跨洞径等条件下, 管棚预支护能有效提高开挖面稳定性。

关键词: 隧道工程; 开挖面稳定; 极限分析; 管棚; 强度折减技术

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2012)08-0087-07

3D Stability Analysis of Tunnel Excavation Surface with Pipe Roof Reinforcement

WANG Kai¹, KANG Haigui¹, WANG Haitao²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;

2. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning 116028, China)

Abstract: In order to study the influence of pipe roof reinforcement on tunnel excavation surface stability, based on the kinematic method of limit analysis and the soil strength reduction coefficient, the 3D stability analysis model of tunnel excavation surface with pipe roof reinforcement was established, which was employed to define the safety factor and its corresponding potential failure mode of a given tunnel. For a certain tunnel excavation, the ultimate support pressure of tunnel excavation surface computed by the proposed approach is consistent with the results given by strength reduction FEM, which verified the reasonability of the method. Then, the proposed approach was also employed to study how the tunnel cover depth, tunnel diameter and surrounding rock affect the surface stability, ultimate support pressure and safety factor of tunnel excavation surface. The analytical results of tunnel excavation surface stability with/without pipe roof reinforcement reveal that in soft weak stratum and large span excavation conditions, the pipe roof reinforcement can increase excavation surface stability effectively.

Key words: tunnel engineering; excavation surface stability; limit analysis; pipe roof; strength reduction technique

0 引言

管棚注浆法是地下结构工程浅埋暗挖时通常采

用的一种预支护技术,其实质是就是在拟开挖的隧道外周边钻设水平孔,然后安装钢管,再进行灌注固结,使拱顶形成加固的伞形保护环,在该保护环

收稿日期: 2011-12-08;

基金项目: 中国博士后基金项目(20110491537); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2011071)

作者简介: 王凯(1966-),男,内蒙古包头人,博士研究生。(wk_dlut@126.com)

的支撑下,进行循环的掘进和支护施工。

近年来,国内外学者对管棚预支护机理进行了大量的研究,主要包括现场试验研究^[1]、解析分析^[2-3]、数值模拟分析^[4-5]与离心模型试验研究^[6-8]等。然而由于模型边界条件的复杂性,目前多局限于从管棚对控制隧道拱部围岩变形和地表沉降的整体效果进行研究,关于管棚预支护条件下隧道开挖面稳定性研究开展得还不够深入,可检索到的相关文献寥寥无几。本研究从塑性极限分析机动学方法出发,利用土的强度折减系数概念,建立了管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析模型,由此确定开挖面稳定系数及其相应的潜在破坏模式。结合实际工程,将该方法计算的开挖面极限支护压力与有限元强度折减法计算结果进行对比分析,验证本文方法的合理性。进而研究了隧道埋深、隧道洞径及围岩条件对开挖面稳定性的影响,分析了上述因素与开挖面极限支护应力及稳定系数的关系。

1 管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性塑性极限分析

由弹性理论可知,对以自重应力场为主的地层中,坍塌后,次生稳定的形状应为立椭圆,按最优椭圆形状,此时轴压比等于侧压系数。为了定量分析,Leca和Dormieux^[9]采用塑性极限理论研究砂土隧道开挖面稳定性问题,并与Chambon和Corte^[10]的离心模型试验结果进行对比。结果表明:采用塑性极限分析上限定理计算的开挖面极限支护压力与离心模型试验结果吻合较好。因此,本研究对Leca和Dormieux建立的隧道开挖面稳定性分析模型进行改进,采用上限定理来分析管棚预支护条件下隧道开挖面稳定。

1.1 力学模型的建立

为建立管棚预支护条件下隧道开挖面稳定性分析的一般力学模型,现作如下假设。

(1) 假设土体为具有一定 c 、 φ 值的 Mohr - Coulomb 材料。

(2) 开挖面破坏失稳考虑以下 2 个圆锥体:

锥体 C_1 由底面 Σ_1 (开挖面)、沿轴向 Δ_1 , 即沿 $Z_1 - X_1$ 方向 (与水平方向夹角为 α) 及顶点 Ω_1 构成; 锥体 C_2 由底面 Σ_{12} 、沿轴向 Δ_2 , 即沿 $Z_2 - X_2$ 方向及顶点 Ω_2 构成, 其中平面 Σ_{12} 在 π 平面上。假设开挖面失稳体为 B_1 和 B_2 , B_1 为锥体 C_1 平面 π 以下的部分, 滑块 B_2 为锥体 C_2 在平面 π 以上隧道开挖轮廓线以下的部分。

锥体 C_2 与管棚底面相交为半径为 r_2 的圆 Σ_2 。圆的半径及面积分别为:

$$r_2 = \frac{D}{2} \left[\frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin \varphi \sin (\beta + \varphi)} - 1 \right] \tan \varphi, \quad (1)$$

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4} \left[\frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin \varphi \sin (\beta + \varphi)} - 1 \right]^2 \tan \varphi. \quad (2)$$

由此,可建立管棚预支护条件下隧道开挖面稳定性分析的一般力学模型,如图 1 所示。

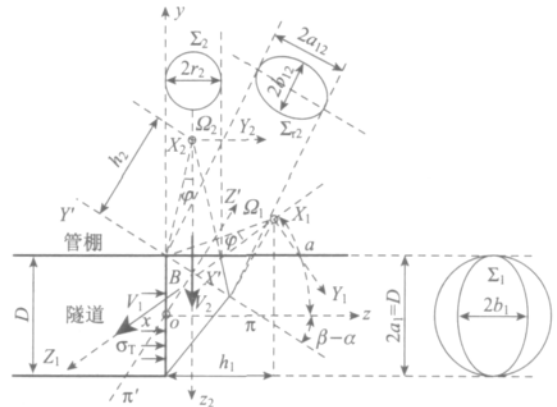


图 1 管棚预支护条件下隧道开挖面稳定分析模型

Fig. 1 Analytical model of tunnel excavation surface stability with pipe roof reinforcement

(3) 根据土中管体的剩余长度 Le 是否大于隧道破坏面长度分别计算隧道顶部附加荷载 σ_s , 具体计算方法参考文献 [3]。计算简图如图 2 所示。

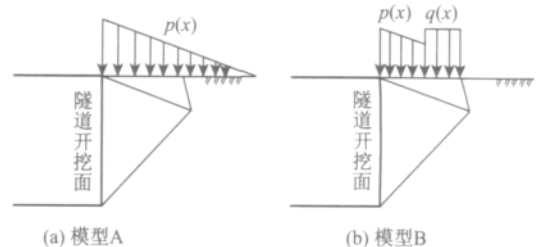


图 2 隧道顶部附加应力计算图

Fig. 2 Calculating diagram of additional stress above tunnel excavation surface

① 土中管体的剩余长度 Le 大于隧道破坏面长度时 (模型 A), 作用在隧道开挖面顶部的附加荷载 σ_s 为地基反力 $p(x)$ (假设为三角形分布);

② 土中管体的剩余长度 Le 小于隧道破坏面长度时 (模型 B), 作用在隧道开挖面顶部的附加荷载 σ_s 分为 2 部分, 其一是沿管长的地基反力 $p(x)$ (假设梯形分布); 其二是直接作用在为隧道开挖面顶部的围岩压力 $q(x)$ 。

1.2 分析模型的上限解

根据上限定理, 开挖面要稳定就必须满足外力

功小于内部能量耗散,即:

$$P_e \leq P_v, \quad (3)$$

外力功 P_e 为:

$$P_e = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \varphi)}{\cos^2 \varphi} \left\{ \frac{R_E^2}{\cos^2(\alpha + \varphi)} \sigma_s - \frac{\cos \alpha}{R_c^2} R_A \sigma_T + \left[\sin \alpha \frac{R_A R_B}{R_c^2} + \frac{\cos \alpha \cos \varphi \cos(\beta + \varphi)}{2 \sin \varphi \sin(\beta + \varphi)} R_c - \frac{R_E^3}{2 \sin \varphi \cos^2(\alpha + \varphi)} \right] \frac{\gamma D}{3} \right\} V_2; \quad (4)$$

内部能量耗散 P_v 为:

$$P_v = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos^2(\alpha + \varphi)}{\cos^2 \varphi} \left[\frac{\cos \alpha}{\sin \varphi} \frac{R_A}{R_c^2} - \frac{R_E^2}{\sin \varphi \cos^2(\alpha + \varphi)} \right] c \cos \varphi V_2. \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)可得在管棚预支护条件下隧道开挖面稳定性的上限解:

$$N_s \left[(K_p - 1) \frac{\sigma_s}{\sigma_c} + 1 \right] + N_\gamma (K_p - 1) \frac{\gamma D}{\sigma_c} \leq (K_p - 1) \frac{\sigma_T}{\sigma_c} + 1, \quad (6)$$

式中, σ_c 为无约束的压应力; K_p 为朗肯被动土压力系数; N_s 、 N_γ 为 φ 的函数。

$$\sigma_c = 2 \frac{c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (7)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (8)$$

$$N_s = \frac{1}{\cos \alpha \cos^2 \varphi} \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} \frac{R_E^2}{R_A}, \quad (9)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{3} \left[\tan \alpha R_B + \frac{\cos \varphi \cos(\beta + \varphi)}{2 \sin \varphi \sin(\beta + \varphi)} \frac{R_c^3}{R_A} - \frac{1}{2 \sin \varphi \cos \alpha \cos^2 \varphi} \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} \frac{R_E^3}{R_A} \right], \quad (10)$$

$$R_A = \frac{\sqrt{\cos(\alpha - \varphi) \cos(\alpha + \varphi)}}{\cos \varphi}, \quad (11)$$

$$R_B = \frac{\cos(\alpha - \varphi) \cos(\alpha + \varphi)}{\sin 2\varphi}, \quad (12)$$

$$R_c = \frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\cos \varphi} \left[\frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$R_D = \frac{\sin \beta}{\sin \varphi \sin(\beta + \varphi)}, \quad (14)$$

$$R_E = \frac{\sin(\beta - \varphi) \cos(\alpha + \varphi)}{\sin(\beta + \varphi)}. \quad (15)$$

由文献[9]可知,对一般地层条件,开挖面土体破裂滑动角并不因技术措施的变化而变化,而是保持在一个稳定值。因此,管棚预支护条件下隧道

破坏面的形状保持不变,则模型中 α 与 β 的值与无管棚预支护隧道开挖面稳定性分析模型相同。即给定内摩擦角 φ ,当 N_s 和 N_γ 取得最大值时,可以求得 α 的值, α 与 β 的关系式为: $2\beta - \alpha = \pi/2$ 。Leca 和 Dormieux^[7] 采用塑性极限理论分析表明, α 大约等于 $49^\circ - \varphi/2$,即破坏面与隧道水平轴线的夹角大约为 $49^\circ + \varphi/2$,大于平面应变情况下的按朗肯主动土压力理论计算的破坏面夹角 $45^\circ + \varphi/2$,可解释为隧道开挖面的三维促稳效应。

1.3 开挖面稳定系数 K_s

强度折减技术在土坡稳定性的有限元分析中得到广泛的应用^[11-12]。在土坡稳定性分析中,对于某个给定状态,假定各点的强度发挥程度相同,则土体中所可能发挥的抗剪强度应与外荷载所产生的实际剪应力相平衡,此时实际中发挥的抗剪强度指标 c_m 和 φ_m 可由土的实际抗剪强度指标 c 和 φ 按照某一系数折减后得到,即:

$$\begin{cases} c_m = \frac{c}{K} \\ \tan \varphi_m = \frac{\tan \varphi}{K} \end{cases} \quad (16)$$

式中, K 即为强度折减系数或强度储备系数,表示实际中的强度发挥程度系数,当假定各点强度发挥程度相同时,强度折减系数 K 相当于整体稳定安全系数 K_s 。

由式(6)可知,在假定的隧道直径及围岩条件下,当计算的开挖面极限支护压力 σ_T 等于 0,隧道开挖面处于极限平衡状态。 σ_T 是 c 和 φ 的非线性函数,采用迭代的方法,逐步折减土的强度参数直至 σ_T 趋于 0,则此时的强度折减系数 K 为开挖面稳定系数 K_s 。

2 基于有限元强度折减法的管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析

黄正荣等^[13]基于有限元强度折减法研究了浅埋砂土中盾构隧道开挖面极限支护压力及其稳定性。本文借鉴该方法研究管棚预支护条件下隧道开挖面的极限支护压力及其稳定性。开挖面极限支护压力研究的模拟过程如下:

(1) 建立原始地层模型;

(2) 一次性开挖隧道至规定距离处,同时施加管棚预支护体系及隧道支护结构,并在开挖面上施加设计支护压力;

(3) 开挖面支护压力以缓慢的速度逐渐减小,

直至开挖面塑性区连通，程序终止计算。数值模拟过程中，隧道开挖面的失稳采用突变性判据。

研究开挖面稳定安全系数时前 2 步同上，不同的是第 3 步。具体方法为：开挖面上作用一定的支护压力，通过逐步减小土体抗剪强度指标，将 c 、 φ 值同时除以折减系数 K_s ，作出折减系数与开挖面中心点水平位移的曲线。随着折减系数的增大开挖面中心点的水平位移逐渐增大，当折减系数变化很小而开挖面中心点的水平位移急剧增大时，由于出现过大变形程序中止计算，此时的折减系数即为开挖面稳定的稳定系数。通过计算不同支护压力下的开挖面稳定的安全系数，即可以确定不同的支护压力与开挖面稳定的安全系数之间的关系。

3 工程实例

深圳地铁大剧院站至科学馆站区间隧道有几处含水丰富的砂层，由于工程位于市中心区，对地表沉降有较严格的限制。为了保证施工以及周围建筑物的安全，隧道施工期间，在透水性较强的砂砾层、砾质黏性土中的隧道周边围岩进行超前注浆管棚支护^[14]。具有代表性的典型地质断面地层岩性从上至下分别为素填土、砂砾层、砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩和中风化花岗岩，不考虑地下水。隧道直径为 6 m，隧道埋深为 12.0 m，管片材料为 C50 钢筋混凝土，厚度为 0.35 m，采用板单元模拟。注浆管棚的长度为 12.5 m。具体围岩、管棚

及支护结构物理力学参数如表 1 所示。有限元模型如图 3。模型除地表面为自由面外，四周采用变形约束条件。在隧道开挖面上施加支护压力，通过逐步减少支护压力来达到开挖面的失稳。

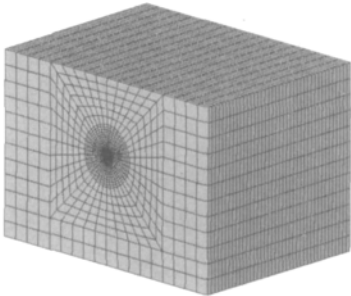


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 3D FEM model

表 1 围岩及支护结构物理力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of surrounding rock and reinforcement structure

材料	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	C/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
围岩	30	0.34	18	0	25
管棚	10 500	0.25	25	—	—
管片	3 450	0.17	24.5	—	—

不同支护压力下开挖面附近土体位移及塑性区开展如图 4 所示，由计算可知，随着开挖面支护压力的减少，开挖面前方土体的位移量不断增加，开挖面前方塑性区不断扩大。由不同支护压力比下的塑性区开展情况可知，塑性区的开展情况在支护压力接近极限支护压力阶段时表现敏感，区域内土体

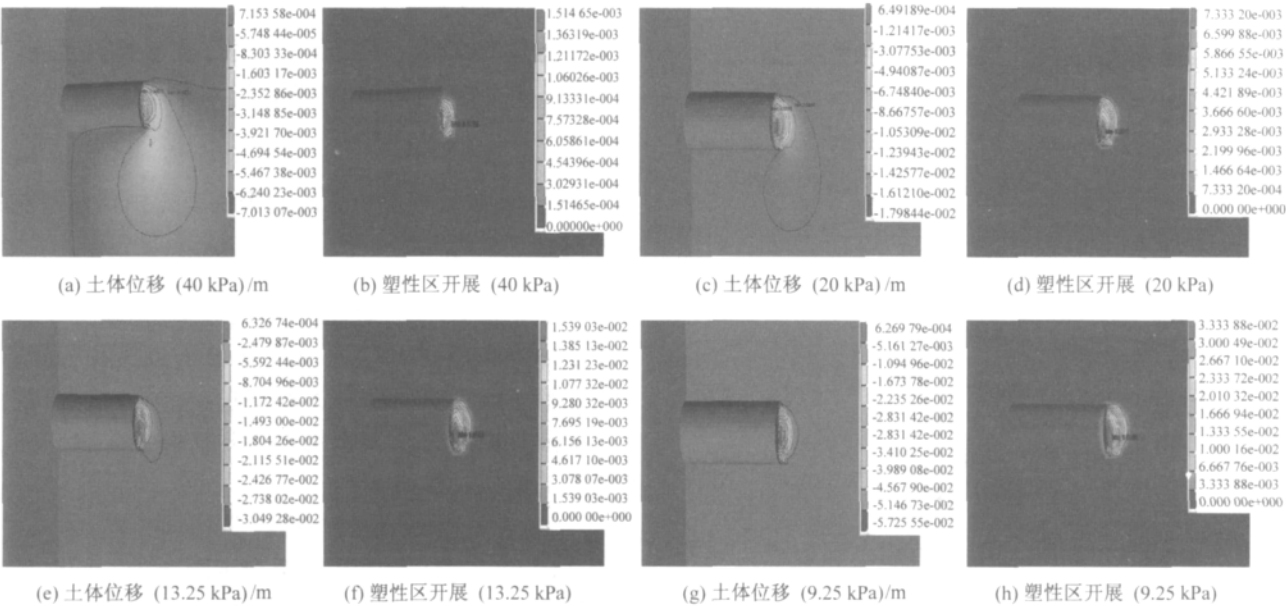


图 4 不同支护压力下开挖面附近土体位移及塑性区分布图

Fig. 4 Displacement of soil around tunnel excavation surface and plastic zone distribution under different support pressures

的位移量也急剧增大。

通过计算开挖面极限支护压力变化与开挖面中心点纵向位移之间的关系研究开挖面极限支护压力。图5为支护压力与纵向位移的关系曲线。计算结果表明,随着开挖面支护压力的逐渐减小,开挖面前方土体水平位移量逐渐增加,随着开挖面支护压力下降到一定程度,在支护压力减小很小的情况下,开挖面纵向位移量急剧增大,此时可以认为开挖面失去稳定,可以得到极限支护压力约为10.25 kPa。

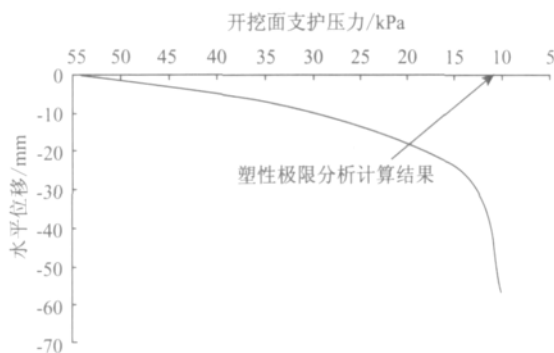


图5 支护压力与隧道开挖面中心水平位移关系

Fig. 5 Relation between support pressure and longitudinal displacement of tunnel excavation surface center

考虑表1中的土体材料特性,采用塑性极限分析方法计算作用在隧道开挖面的极限支护压力,图5中标出的塑性极限分析方法计算结果为11.45 kPa,与有限元强度折减法分析对比,2种方法分析结果接近,但塑性极限分析方法数值偏大。文献[9]证实隧道埋深在一定范围($H/D < 6$)内时利用土体稳定的极限平衡和极限分析法计算的临界土压力值远大于模拟试验的值。该工程隧道埋深与洞径比为2,误差处于合理的范围内。

4 参数分析

隧道施工过程中,隧道的直径及埋深大小,开挖面地层条件等都对开挖面极限支护压力及开挖面稳定系数产生影响,基于此原因,采用塑性极限分析分别对有无管棚预支护条件下隧道条件及土层参数进行相关敏感性分析。其中,管棚预支护参数为:钢管直径108 mm,壁厚6 mm,长度30 m,环向间距为40 cm,管棚搭接长度为1.5 m。土体参数为: $c = 10$ kPa, $\varphi = 35^\circ$, $\gamma = 18$ kN/m³。

4.1 隧道埋深的影响

研究隧道直径 D 为5 m,上覆土层厚度 H 分别为2.5、5、10、20、40 m情况下,有无管棚预支护隧道开挖面的极限支护应力及其稳定系数。不同埋

深下,隧道在有无管棚预支护时的开挖面稳定系数及开挖面支护应力曲线如图6和图7所示。

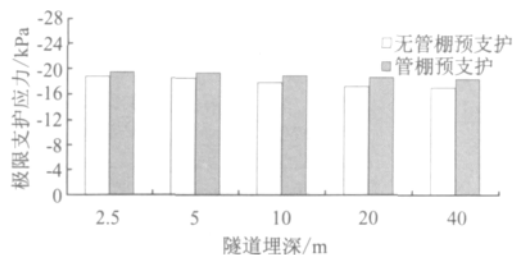


图6 隧道埋深与极限支护压力关系

Fig. 6 Relation between tunnel cover depth and ultimate support pressure

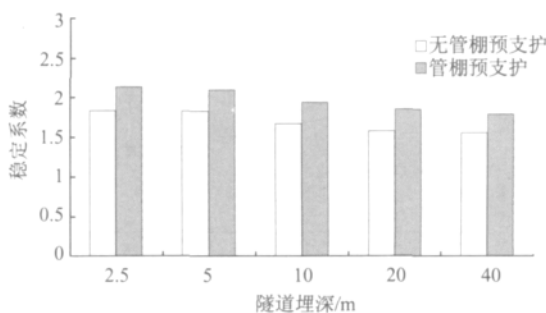


图7 隧道埋深与稳定系数关系

Fig. 7 Relation between tunnel cover depth and safety factor

图6中计算的开挖面极限支护应力为负值,表明隧道开挖面处于稳定状态,可理解为隧道开挖面正面土体不需要预加固也可以保证开挖面稳定。由上述计算,可以得到以下认识。

(1) 在同样隧道直径下,随着隧道埋深的增加,开挖面极限支护应力随之增大,当埋深大于2倍洞径时,开挖面极限支护应力趋于定值,隧道埋深对极限支护压力影响不大。

(2) 采用管棚预支护后,隧道开挖面稳定系数得到一定程度的提高。当隧道埋深为2.5 m时,有无管棚预支护开挖面稳定系数分别为2.137、1.835。大约提高1.16倍;当隧道埋深为40 m时,有无管棚预支护开挖面稳定系数分别为1.797、1.561,大约提高1.15倍。这说明管棚预支护技术能有效地提高开挖面稳定性,保证隧道的安全顺利施工。

4.2 隧道洞径的影响

为研究隧道直径对开挖面稳定性的影响,计算了隧道埋深为20 m条件下,有无管棚预支护时,直径为5、6、8、10、15 m共10种工况隧道开挖面稳定性与洞径的关系。图8和图9分别为开挖面稳定系数和极限支护应力与隧道直径的关系。

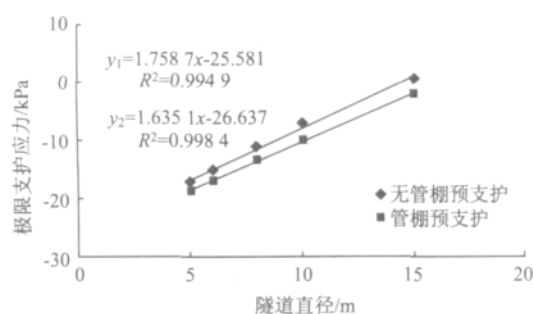


图8 隧道直径与极限支护压力关系

Fig. 8 Relation between tunnel diameter and ultimate support pressure

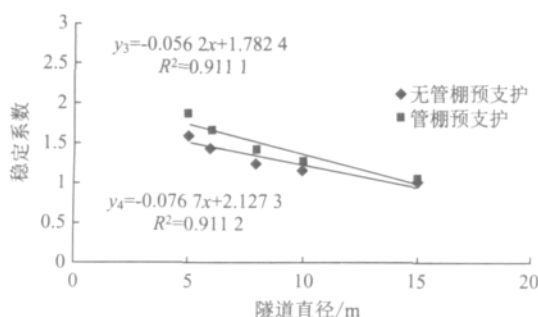


图9 隧道直径与稳定系数关系

Fig. 9 Relation between tunnel diameter and safety factor

由图8、图9知,同样埋深条件下,随着隧道直径的增大,开挖面极限支护应力呈线性增大,开挖面稳定系数呈线性减小。 y_1 、 y_2 分别为有无管棚预支护开挖面极限支护应力随洞径变化的拟合直线; y_3 、 y_4 分别为有无管棚预支护稳定系数随洞径变化的拟合直线。

由图9知,采用管棚预支护后,隧道开挖面稳定系数得到一定程度的提高。当隧道直径为5 m时,有无管棚预支护开挖面稳定系数分别为1.858、1.585,大约提高1.17倍;当隧道直径为15 m时,无管棚预支护开挖面稳定系数分别为1.051、0.994,大约提高1.06倍。随着隧道开挖跨度的增大,管棚预支护对隧道开挖面的促稳效果减弱,对于大跨度隧道,应采用分部开挖并结合隧道留核心土等正面预加固措施保证开挖面的稳定。

4.3 围岩条件的影响

为研究不同围岩条件对隧道开挖面稳定性的影响,本文对围岩参数进行了敏感性分析。分别研究围岩内摩擦角为 35° ,粘聚力为5、10、20、50、80 kPa,围岩粘聚力为20 kPa,内摩擦角为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° ,有无管棚预支护时,隧道开挖面稳定性与围岩参数之间的关系。图10和图11分别为有无管棚预支护时,极限支护应力与围岩参数的关系。

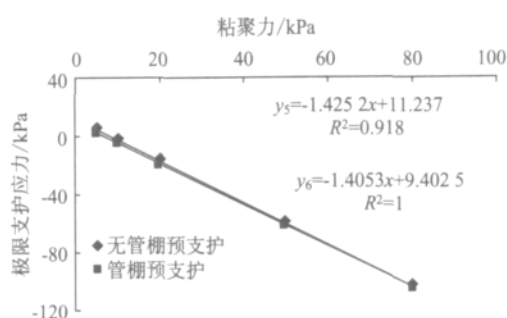


图10 极限支护压力与围岩粘聚力关系

Fig. 10 Relation between cohesion of surrounding rock and ultimate support pressure

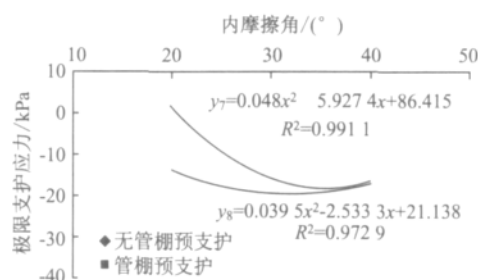


图11 极限支护压力与围岩内摩擦角关系

Fig. 11 Relation between ultimate support pressure and interior friction angle of surrounding rock

由图10和图11可知,在围岩内摩擦角一定的条件下,随着围岩粘聚力的增大,开挖面极限支护应力呈线性减小;在围岩粘聚力一定的条件下,开挖面极限支护应力与内摩擦角呈二次非线性关系。 y_5 、 y_6 分别为有无管棚预支护开挖面极限支护应力随围岩粘聚力变化的拟合直线; y_7 、 y_8 分别为有无管棚预支护开挖面极限支护应力随围岩内摩擦角变化的拟合直线。

从图中还可以看出,在围岩条件一定的情况下,采用管棚预支护较无管棚预支护能使开挖面稳定系数提高1.05~1.20倍,围岩条件越差,管棚预支护对开挖面促稳效果越明显,这说明在软弱围岩地段,应优先选择管棚等预支护措施。

5 结语

(1) 将塑性极限分析上限定理与强度折减技术相结合,建立了管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析模型,由此确定开挖面稳定系数及其相应的潜在破坏模式,对管棚预支护条件下隧道开挖面的稳定性进行定量的描述。结合深圳地铁实际工程,采用该方法计算得到的开挖面极限支护压力与有限元强度折减法的计算结果吻合较好,验证了本

文方法的合理性。

(2) 隧道施工过程中,隧道的直径及埋深大小,开挖面地层条件等都对开挖面极限支护压力及开挖面稳定系数产生影响。隧道埋深超过2倍洞径时,埋深对开挖面稳定性影响不明显;同样的地层及埋深条件下,开挖面稳定系数随洞径的增大呈线性减少;在隧道埋深和洞径一定的条件下,开挖面极限支护压力与围岩粘聚力及内摩擦角呈线性和二次非线性关系。

(3) 隧道采用管棚预支护较无管棚预支护能使开挖面稳定系数提高1.05~1.20倍,围岩条件越差时,管棚预支护的效果越明显,所以在复杂条件下,应优先考虑管棚等预支护措施。

参考文献:

References:

- [1] 钟放平. 下穿既有公路的土江冲隧道双层管棚设计及监测分析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(4): 36-40.
ZHONG Fangping. Double-layer Pipe Roofing Design and Monitoring for Tujiachong Tunnel Under-crossing and Existing Highway [J]. Modern Tunneling Technology, 2007, 44(4): 36-40.
- [2] 王海涛. 隧道管棚支护体系的力学机理与开挖面稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
WANG Haitao. Research on Mechanism of Pipe Roof Reinforcement and Tunnel Face Stability [J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [3] 郭小红, 王梦恕. 隧道支护结构中锚杆的能效分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2234-2239.
GUO Xiaohong, WANG Mengshu. Analysis of Efficacy of Rock Bolt for Tunnel Support Structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2234-2239.
- [4] PEILA D. A Theoretical Study of Reinforcement Influence on the Stability of a Tunnel Face [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1994, 12(3): 145-168.
- [5] YOO C S. Finite-element Analysis of Tunnel Face Reinforced by Longitudinal Pipes [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(1): 73-94.
- [6] KAMATA H, MASHIMO H. Centrifuge Model Test of Tunnel Face Reinforcement by Bolting [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 205-212.
- [7] HISATAKE M, OHNO S. Effects of Pipe Roof Supports and the Excavation Method on the Displacements above a Tunnel Face [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 120-127.
- [8] SHIN J H, CHOI Y K, KWON O Y, et al. Model Testing for Pipe-reinforced Tunnel Heading in a Granular Soil [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 241-250.
- [9] LECA E, DORMIEUX L. Upper and Lower Bound Solutions for the Face Stability of Shallow Circular Tunnels in Frictional Material [J]. Geotechnique, 1990, 40(4): 581-606.
- [10] CHAMBON P, CPRTE J F. Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [11] HUANG M S, JIA C Q. Strength Reduction FEM in Stability Analysis of Soil Slopes Subjected to Transient Unsaturated Seepage [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1): 93-101.
- [12] WEI W B, CHENG Y M, LI L. Three-dimensional Slope Failure Analysis by the Strength Reduction and Limit Equilibrium Methods [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1): 70-80.
- [13] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 2005-2009.
HUANG Zhengrong, ZHU Wei, LIANG Jinghua, et al. Study on Limit Supporting Pressure and Stabilization of Excavation Face for Shallow Shield Tunnels in Sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 2005-2009.
- [14] 高健, 张义同. 实施超前注浆管棚支护的隧道开挖面稳定分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(8): 666-672.
GAO Jian, ZHANG Yitong. Stability Analysis of Tunnel Face Reinforced with Advanced Pipe Grouting [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(8): 666-672.