

基于强度折减法的浅埋偏压隧道——边坡联合地层稳定性研究

Research on Formation Stability of Shallow Buried Partial Pressure Tunnel and Slope based on Strength Reduction Method

陈家征, 李 忠, 袁文佳

(石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 为了解决当浅埋偏压段的隧道与软弱夹层相交时, 边坡与隧道联合地层稳定性安全问题, 通过理论分析和 FLAC 3D 有限差分数值模拟方法研究了在基于抗剪强度折减法的理论基础下, 将抗拉强度进行折减, 即抗拉剪强度同步折减法, 采用该理论对不同软弱夹层倾角和不同软弱夹层与隧道的相对位置下进行模拟, 分析边坡与隧道联合地层的安全系数变化规律和塑性区发展过程。结果表明: 地层的失稳形式主要分为受隧道稳定性控制和受隧道稳定性和边坡稳定性共同控制两种。且在考虑抗拉剪强度同步折减下, 由隧道底部产生的剪切屈服区和地表顶部的张拉屈服区发生贯通相连, 边坡逐渐失稳滑移。修正后的 M-C 准则因考虑了抗拉强度的折减, 更符合岩土体破坏类型, 结果较 M-C 准则更为准确。

关键词: 浅埋偏压; 抗拉强度; 强度折减法; 稳定性; 安全系数

中图分类号: U418.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0087-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.016

CHEN Jiazhen, LI Zhong, YUAN Wenjia

(Shijiazhaung Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to solve the problem of the stability and safety of the combined stratum of the slope and tunnel when the tunnel in the shallow buried and shallow unsymmetrical pressure section intersects with the weak interlayer, the tensile strength is reduced based on the theory of shear strength reduction, namely the synchronous reduction of tensile shear strength, through theoretical analysis and FLAC 3D finite difference numerical simulation method. This theory is used to simulate different dip angles of soft interlayer and different relative positions of soft interlayer and tunnel, and analyze the variation law of safety factor of slope and tunnel combined stratum and the development process of plastic zone. The results show that the formation instability can be divided into two types: tunnel influence and tunnel and slope influence. Considering the synchronous reduction of tensile shear strength, the shear yield zone generated at the bottom of the tunnel is connected with the tensile yield zone at the top of the surface, and the slope gradually loses stability and slides. The modified M-C criterion is more accurate than the M-C criterion because it considers the reduction of tensile strength, which is more consistent with the failure type of rock and soil mass.

Keywords: shallow buried bias; tensile strength; strength reduction method; stability; safety margin

0 引言

作者简介: 陈家征 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 地质灾害超前预报及隧道及地下工程。

通信作者: 李忠 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 地质灾害超前预报及隧道及地下工程。

收稿日期: 2023-10-19

由于山岭隧道受到地形地质等复杂条件的限制, 目前大多数隧道修建于浅埋偏压地段, 而当隧道在下穿边坡遇到软弱夹层时, 此时由隧道和边坡形成的联合受力体系会变得复杂^[1-4], 隧道和边坡的安全性也会降低, 因此分析隧道和边坡联合体系下

岩土力学

的地层稳定性显得十分重要,是进行隧道安全建设的第一步^[5-6]。

吴红刚等^[7]以某隧道浅埋偏压洞口段为研究对象,提出了基于“隧道-边坡体系”概念的变形机理分析方法;Zienkiewicz 等^[8]提出了抗剪强度折减法,通过对岩土体的黏聚力和内摩擦角不断折减,对分析边坡的稳定性具有重要意义,并随着计算机技术的发展,取得了更广泛的应用;靳晓光等^[9]以三峡库区的边坡为研究对象,数值模拟研究了软弱夹层的存在对岸坡岩体的应力、位移的影响以及软弱夹层岩土体的位移特征,认为软弱夹层是边坡稳定的主要控制因素且岸坡位移和应力随着软弱夹层的强度降低而显著增大;郑颖人等^[10]提出了 M-C 等面积屈服准则,认为岩质边坡的塑性区贯通是从一个局部剪切破坏逐渐扩展到整体剪切破坏的过程。但是在边坡的实际破坏过程中,某些部位主要表现为张拉破坏^[11],因此在基于强度折减法的边坡失稳分析中,也应该将岩土体的抗拉强度进行折减。靳晓光等^[12]通过分析岩土体材料在不同应力情况下的破坏特征,指出对结构起作用的强度除抗剪强度外,还包括抗拉强度,因此提出了抗拉剪强度折减法,并通过算例验证考虑抗拉强度的强度折减法在岩土工程中更具有普遍的适用性。

鉴于目前边坡隧道联合受力体系下地层稳定性的研究尚少,因此,在基于抗拉剪强度同步折减法的理论下,采用 FLAC 3D,对不同软弱夹层倾角和不同软弱夹层与隧道的相对位置进行研究,分析边坡隧道联合受力体系下的地层受力特性,以指导含软弱夹层的浅埋偏压段隧道的设计与施工。

1 张拉-剪切破坏强度折减法

1.1 基本原理

目前,在边坡稳定的安全性分析中,大多常采用抗剪强度折减法,即对剪切强度参数 c 、 $\tan \varphi$ 进行不断折减,通过输入不同的折减系数来迭代计算边坡的安全系数,但研究表明,基于抗剪强度折减法只适用于压剪型破坏,而在含有软弱夹层的边坡中,随着隧道的不断掘进,边坡会产生相应的变形,在边坡的后缘、坡面等位置会出现明显的拉裂缝,甚至贯通拉裂缝,这些主要都是和土体的抗拉强度、

抗剪强度密切相关,但是由于抗拉强度较小,往往被忽略,因此这也常常增加了边坡失稳的潜在因素。

因此仅考虑剪切破坏不符合实际要求,且安全系数数值偏大。故在实际分析中应考虑抗拉强度并对其进行不断折减,利用张拉-剪切破坏强度折减法,即抗拉剪强度同步折减法来分析边坡和隧道联合地层稳定性问题。

目前,抗剪强度折减法大多采用 M-C 准则,对 c 、 $\tan \varphi$ (抗剪强度参数) 进行折减,但抗拉强度却未折减,因此 M-C 准则已不能准确描述材料的抗拉性能,不适合受拉破坏的材料。原因如下:

对于满足 M-C 屈服准则的材料,满足极限抗剪强度公式^[13]:

$$\tau_f = c - \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: τ_f 为剪切面的剪应力; c 为黏聚力; σ 为剪切面的正应力; φ 为内摩擦角。

当 $\tau_f = 0$ 时,其三轴受拉极限强度为:

$$\sigma_{\text{tri}} = c / \tan \varphi \quad (2)$$

式中: σ_{tri} 为三轴受拉极限强度。

当 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ 时,其单轴受拉极限强度为:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} = \frac{2c}{\tan \varphi + \sqrt{1 + \tan^2 \varphi}} \quad (3)$$

式中: σ_t 为单轴抗压极限强度。

由以上公式可知,当对 c 、 $\tan \varphi$ 进行折减,材料的三轴极限抗拉强度却不会降低; $\sigma_t < \sigma_{\text{tri}}$ 。因此 M-C 准则不在适用于抗拉剪强度同步折减。

对 M-C 剪切屈服面拉伸截断后用来描述材料的受拉屈服状态,在 FLAC 3D 中对其进行拉伸设定,用单周抗拉强度 σ_t 来定义抗拉屈服应力,在对 c 、 $\tan \varphi$ 折减的同时也同样对 σ_t 折减,故强度折减后的单轴抗拉强度为:

$$\sigma'_t = \frac{2c}{\tan \varphi + \sqrt{\omega^2 + \tan^2 \varphi}} \quad (4)$$

采用修正后的 M-C 准则进行折减不会出现抗剪强度参数模型不发生破坏的现象。由于 $0 < \sigma_t < \sigma_{\text{tri}}$, 因此设定了拉伸截断应力 $T = \sigma_t$, 在折减时材料到达三轴受拉极限状态后就已受拉屈服,因此修正后的 M-C 准则对受抗拉强度和抗剪强度的岩土体较为适用。

1.2 边坡失稳判据

在强度折减法计算中,边坡失稳的判断依据主

要有三种^[14]：在数值模拟计算中未能收敛；边坡特征点的位移发生突变；塑性区发生贯通。

由于边坡在失稳过程中，边坡由静态变为动态，因此必然会发生较大的位移突变，而目前对边坡哪一具体位置（坡脚、坡顶）的位移突变，以及何种位移（X 位移、Z 位移、总位移、总位移增加速率等）产生的突变未能深入研究，因此位移突变的判别依据不宜直接使用。塑性区贯通是边坡失稳的必要条件，并非充分条件，因此也不宜采用。基于以上分析，采用有限元迭代计算不收敛作为失稳的判据。

2 偏压隧道边坡地层联合稳定性分析

一般隧道围岩结构与含软弱夹层的边坡坡体的受力状态不同，隧道围岩的稳定性主要取决于其周围围岩的强度，而含软弱夹层的边坡坡体的稳定性主要取决于边坡和软弱夹层的抗拉强度，其破坏模式一般表现为沿边坡内部潜在滑移面产生滑动。

2.1 模型建立

忽略模型纵向对研究规律的影响，建立的模型纵向长度为 5 m，近似视为平面应变问题。为了忽略隧道在开挖过程中对于周围岩体的影响，模型计算范围：左右边界按照 3 倍洞径考虑，下部边界按照 3.5 倍隧道高度考虑。建立的平面模型尺寸为 98 m×81 m，隧道断面形状参考公路双车道隧道断面，宽 11.1 m，高 8.5 m，软弱夹层宽 1 m。模型表面为自由边界，底部为固定边界条件，四周为法向位移约束边界条件。围岩材料参数表 1。

表 1 围岩材料参数表						
Table 1 Surrounding rock material parameters						
材料	密度 (/kg·m ⁻³)	弹性模量 (/GPa)	泊松比	黏聚力 (/kPa)	内摩擦角 (/°)	抗拉强度 (/kPa)
上层黏土	1760	0.06	0.38	40	27.5	0.10
软弱夹层	1800	0.20	0.36	10	37.0	0.02
下层玄武岩	2100	0.40	0.32	200	34.0	0.78

2.2 软弱夹层与隧道不同相对位置的影响

对软弱夹层与隧道不同相对位置的边坡隧道地层稳定性进行研究分析。设置了 5 个工况，分别为-16、-8、0、8、16 m。各个工况下隧道与边坡相对位置关系如图 1 所示。

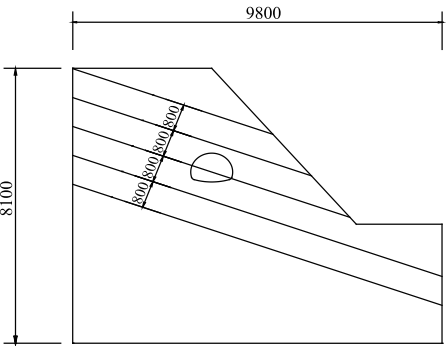


图 1 软弱夹层与隧道不同相对位置计算模型/cm
Fig. 1 Calculation model of different relative positions between soft interlayer and tunnel

2.2.1 地层稳定安全系数分析

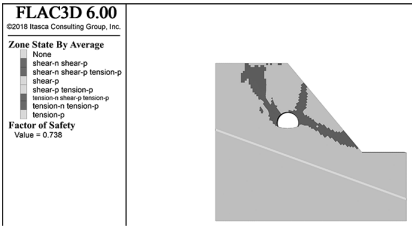
采用有限差分软件计算不同工况下与不同 M-C 准则下的地层稳定性安全系数，见表 2。由表 2 可知，随着软弱夹层逐渐从隧道底端靠近隧道中心在不断远离隧道的过程中，边坡隧道地层安全系数先逐渐减小再逐渐增大。可以看出隧道与软弱夹层相对位置的改变对地层稳定性安全系数值的变化影响较大，施工时须格外注意。

用 M-C 准则与修正后的 M-C 准则分别计算的安全系数对比来看，由于修正后的 M-C 准则考虑了抗拉强度折减，因此安全系数较小；而 M-C 准则则相对较大，因此采用修正 M-C 准则对评价边坡与隧道联合地层稳定性更为适用。

表 2 地层稳定安全系数			
Table 2 Formation stability safety factor			
工况	隧道与软弱夹层相对位置/m	安全系数 F_s	
		M-C	M-C 修正
1	-16	0.740	0.700
2	-8	0.738	0.713
3	0	0.686	0.652
4	8	1.051	0.986
5	16	1.387	1.134

2.2.2 破坏模式分析

在软弱夹层与隧道不同相对位置，边坡临界失稳状态的岩土塑性区云图如图 2 所示。



(a) 工况 1

岩土力学

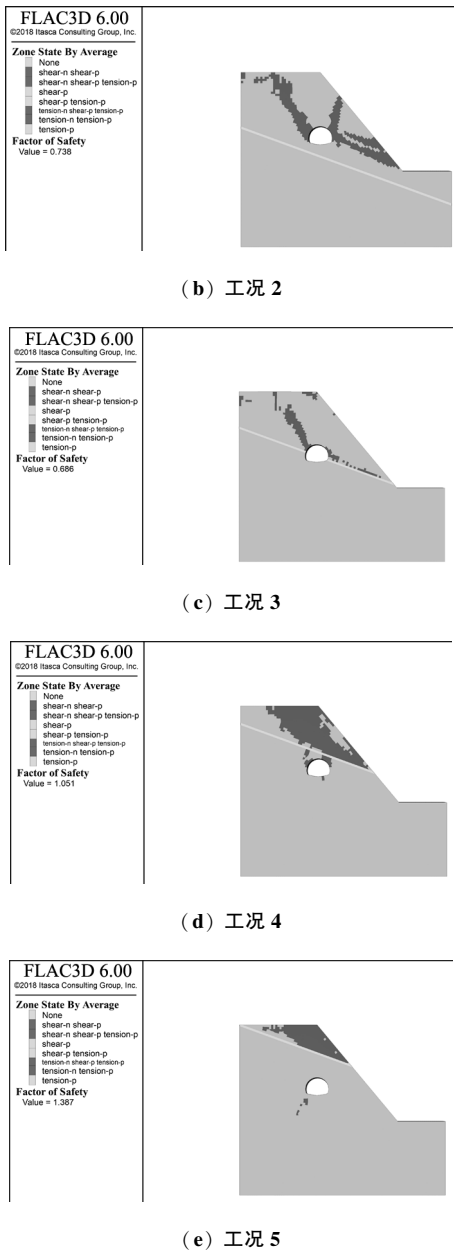


图 2 不同工况下地层临界失稳岩土塑性区
Fig. 2 Critical unstable geotechnical plastic zone of stratum under different working conditions

分析塑性区分布模式存在一定的规律：

(1) 当软弱夹层位于隧道底端且不断靠近隧道中心位置时（工况 1、工况 2、工况 3），由地层临界失稳岩土体的塑性区可知，隧道左侧岩土塑性区沿理论破裂面方向形成破坏区，隧道右侧岩土塑性区从拱墙位置向边坡坡脚贯通形成破坏区，此种工况下边坡与隧道联合地层稳定性受隧道稳定性和边坡稳定性同时控制。

(2) 当软弱夹层位于隧道顶端且不断远离隧道中心位置时（工况 3、工况 4、工况 5），由地层临界失稳岩土体的塑性区可知，隧道两侧部的岩土塑性区逐渐从隧道侧部转移至软弱夹层的上部区域，在软弱夹层上部发生剪切破坏，坡顶产生张拉塑性区，岩土体的剪切塑性区逐渐与地表张拉塑性区贯通。

(3) 从地层临界失稳岩土体的塑性区图可知，在考虑抗拉强度的条件下，当软弱夹层位于隧道底端且不断靠近隧道中心位置时，软弱夹层附近未出现塑性区域，在隧道拱墙与拱肩处出现塑性区，剪切屈服区域在隧道两侧扩大并不断向上发展，与地表的张拉塑性区逐渐贯通。

2.3 软弱夹层不同倾角的影响

对软弱夹层不同倾角的边坡隧道地层稳定性进行研究分析。设置了 5 个工况，分别为 0°、10°、20°、30°、40°。各个工况下边坡内部软弱夹层不同倾角关系如图 3 所示。

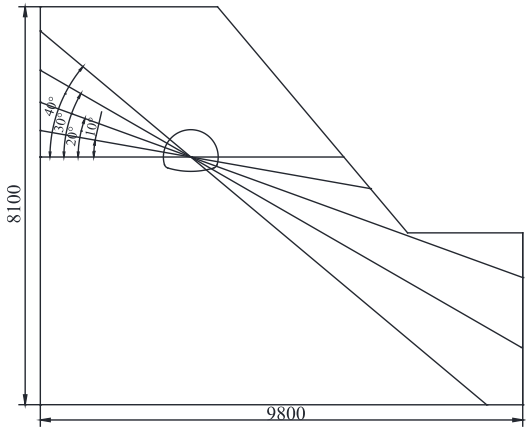


图 3 软弱夹层不同倾角计算模型/cm
Fig. 3 Calculation model for different dip angles of weak intercalation

2.3.1 地层稳定安全系数分析

采用有限差分软件计算不同工况与不同 M-C 准则的地层稳定性安全系数，见表 3。随着软弱夹层倾角的不断增大，边坡隧道地层稳定安全系数先不断减小后逐渐增大。可以看出隧道与软弱夹层相对位置的改变对地层稳定性安全系数值的改变影响较小。

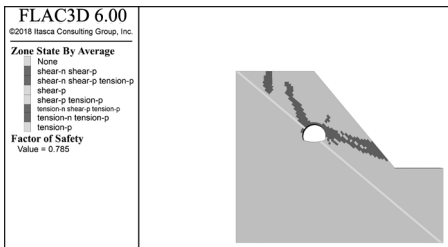
用 M-C 修正准则计算的安全系数普遍高于 M-C 准则的安全系数，产生误差原因主要由于材料的抗拉强度所导致的。因此采用修正 M-C 准则对评价边坡与隧道联合地层稳定性更为适用。

表 3 地层稳定安全系数
Table 3 Formation stability safety factor

工况	软弱夹层倾角/°	安全系数 F_s	
		M-C	M-C 修正
1	0	0.811	0.753
2	10	0.758	0.713
3	20	0.686	0.636
4	30	0.740	0.698
5	40	0.785	0.753

2.3.2 破坏模式分析

软弱夹层不同倾角下的边坡临界失稳状态的岩土塑性区云图如图 4 所示。



(e) 工况 5

图 4 不同工况下地层临界失稳岩土塑性区
Fig. 4 Critical unstable geotechnical plastic zone of stratum under different working conditions

分析塑性区分布模式存在一定的规律：

(1) 当软弱夹层的倾角较小时（工况 1、工况 2），由地层临界失稳岩土体的塑性区可知，塑性区位于隧道拱墙两侧，隧道左侧岩土塑性区在理论破裂面方向形成破坏区，隧道右侧岩土塑性区从拱肩位置贯通到边坡坡面形成破坏区，此种工况的边坡与隧道联合地层稳定性受隧道稳定性影响较大。

(2) 当软弱夹层倾角较大时（工况 3、工况 4、工况 5），由地层临界失稳岩土体的塑性区可知，隧道左侧岩土塑性区沿理论破裂面方向形成破坏区，隧道右侧岩土塑性区从拱墙位置向边坡坡脚贯通形成破坏区，此种工况的边坡与隧道联合地层稳定性受隧道稳定性和边坡共同影响。

(3) 从以上地层临界失稳岩土体的塑性区图可知，在考虑抗拉强度的条件下，底部的顺向软弱夹层发生剪切破坏，剪切屈服区域向软弱夹层两侧扩大，并在软弱夹层末端向上发展，同时坡顶开始产生张拉塑性区，并向下发展，当隧道底部剪切屈服区和地表顶部张拉屈服区发生贯通相连时，边坡即将发生失稳滑移。

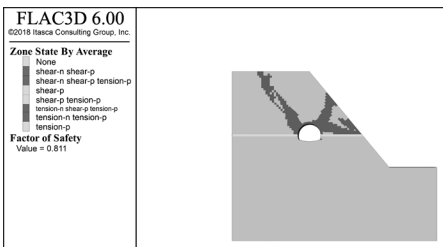
3 结论

在基于抗拉剪强度同步折减法的理论下，从不同软弱夹层倾角和软弱夹层与隧道的不同相对位置角度出发，计算不同工况下隧道边坡联合地层的稳定安全系数，分析隧道边坡联合地层临界失稳的塑性区变化过程，得到主要的结论如下：

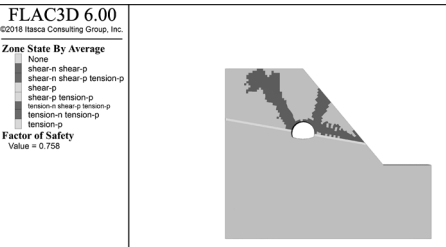
(1) 当软弱夹层位于隧道底端，且相对隧道中心的位置不断增大时，边坡与隧道联合地层稳定性受隧道和边坡共同影响。

(2) 当软弱夹层的倾角

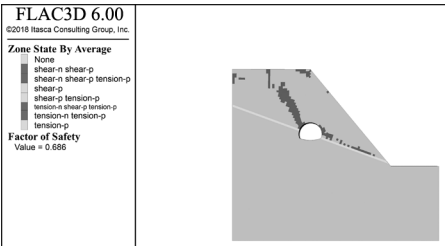
(下转第 97 页)



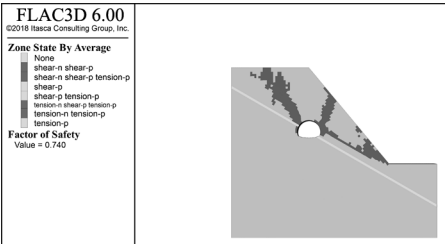
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

4 结论

以工程案例研究复杂地质条件下的基坑支护设计及其变形控制效果, 得到主要结论如下:

(1) 基坑地质条件较为复杂, 对基坑支护进行分区设计, 即 I 区段支护措施设计为“锚索+双排支护桩”, II 区段支护措施设计为“土钉墙+放坡”, III 区段支护措施设计为“锚索+单排支护桩”。

(2) 在基坑变形控制效果研究中, 现阶段的变形值为 12.93~28.41 mm, 后续预测阶段的变形值为 24.94~28.52 mm, 均在变形控制范围内, 充分说明基坑支护措施是合理有效的。

参 考 文 献

[1] 王长青, 王坦, 熊育久. 长春地铁站深基坑支护设计方案

对比研究[J]. 城市地质, 2022, 17(2): 232-239.

- [2] 张训玉. 紧邻地铁隧道及车站的深基坑设计与施工实例[J]. 城市地质, 2021, 16(3): 314-318.
- [3] 王吉豪, 张隆, 宋业春, 等. 房建深基坑施工中周围土体变形监测及分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 2865-2869.
- [4] 江焕钊, 李俊才, 赵久凤, 等. 超大环形支撑深基坑支护设计与监测分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 181-187.
- [5] 李章杰, 周源海, 王宇栋, 等. 多级支护体系在深基坑中的应用[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 2378-2383.
- [6] 李尚明, 洪成雨, 姬凤玲, 等. 深基坑的机器视觉监测与变形预测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 992-1000.
- [7] 岳建伟, 仲豪磊, 赵丽敏, 等. 深基坑变形的滚动预测方法[J]. 中国科技论文, 2022, 17(6): 639-646.

(上接第 91 页) 较小时, 边坡与隧道联合地层稳定性受隧道稳定性控制, 此时应该加强隧道的支护强度, 随着软弱夹层的倾角不断增大, 边坡与隧道联合地层稳定性受隧道和边坡共同影响。

(3) 在考虑抗拉剪强度同步折减时, 首先在软弱夹层穿过隧道附近发生剪切破坏, 剪切屈服区域向软弱夹层两侧扩大, 并在软弱夹层末端向上发展, 同时坡顶开始产生张拉塑性区, 并向下发展, 当隧道底部剪切屈服区和地表顶部张拉屈服区发生贯通相连时, 边坡即将发生失稳滑移。

(4) 由于 M-C 准则未考虑材料的抗拉折减, 因此具有一定的局限性, 对 M-C 准则进行修正, 得到的安全系数计算结果变化规律与 M-C 准则一致, 但均小于 M-C 准则下的安全系数, 主要由于考虑了抗拉强度折减导致的。故在采用修正后的 M-C 准则对实际情况可以做出更好的评价, 对现场施工具有更佳的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 浅埋偏压隧道衬砌受力特征及破坏机制试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3316-3325.
- [2] 杜建明, 房倩, 海路, 等. 地表变坡下浅埋偏压隧道围岩压力计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4088-4098.
- [3] 陈红军, 刘新荣, 杜立兵, 等. 浅埋层状岩体偏压隧道滑移破

坏机理及判定方法[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1733-1741.

- [4] 邱业建, 彭立敏, 雷明锋. 浅埋偏压隧道围岩压力上限法解析解[J]. 土木工程学报, 2015, 48(6): 106-113.
- [5] 仇明, 张胜, 夏鑫, 等. 浅埋偏压隧道进洞方案优化与边坡稳定性分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2019, 28(4): 1-5.
- [6] 张孝伟. 顺层岩质边坡隧道破坏模式与防治对策[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(10): 184-186.
- [7] 吴红刚, 马惠民, 包桂钰. 浅埋偏压隧道一边坡体系的变形机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊1): 516-521.
- [8] ZIENKIEWICZ C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [9] 靳晓光, 陈力华, 张永兴. 考虑张拉及剪切破坏的强度折减法在岩土工程中的应用[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(8): 97-104.
- [10] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002(10): 57-61, 78.
- [11] 戴自航, 卢才金. 边坡失稳机理的力学解释[J]. 岩土工程学报, 2006(10): 1191-1197.
- [12] 靳晓光, 李晓红, 刘新荣, 等. 某含软弱夹层顺层岸坡应力位移特征数值模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004(9): 129-132, 136.
- [13] 丁涛, 王在泉, 张黎明, 等. Mohr-Coulomb 屈服准则在岩质边坡强度折减中的适用性探讨[J]. 工程建设, 2014, 46(2): 1-5.
- [14] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 136-146.