

# 地铁车站交叠式群洞结构施工过程中动态安全变化对比研究

贺维国<sup>1</sup> 李若舟<sup>2</sup> 袁 勇<sup>2</sup> 李清菲<sup>1</sup> 高 鑫<sup>1</sup>

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司隧道设计分公司, 300308, 天津;

2. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 目的: 由于对隧道的稳定性评价缺乏合理的评判标准, 传统有限元方法无法得到隧道工程的安全系数和围岩破坏面, 为解决此问题, 将有限元强度折减法引入到隧道施工稳定性分析与控制中。方法: 以青岛某地铁车站为例, 尝试将强度折减法应用于研究该车站隧道施工过程中的各阶段安全系数动态变化, 并对关键施工工序围岩塑性区进行分析。将施工现场的监测数据与数值模型进行对比, 验证模型的准确性。通过等效塑性应变和围岩位移, 研究叠式群洞地铁车站典型开挖工况下的整体极限状态, 指出施工过程中的围岩潜在破坏面, 同时研究了站台的水平极限间距和站厅与站台的垂直极限间距, 以期为此类地下结构的初步设计和施工过程评价提供依据。结果及结论: 各开挖步中初期支护的施作都会对围岩整体稳定安全系数有不同程度的提高, 其中区域3的开挖为最不利施工步骤, 围岩会产生塑性区贯通现象, 加剧围岩变形, 增加站台层衬砌受力, 此时车站整体安全系数达到最小; 站台层水平极限间距和站厅-站台垂直极限间距分别为4.5 m和1.8 m, 此时整体安全系数的最小值为1.0。

**关键词** 叠式群洞地铁车站; 拱盖法; 强度折减法; 安全系数; 等效塑性应变

**中图分类号** U231.4; U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.013

## Comparative Study on Dynamic Safety Changes during Construction Process of Metro Station Overlapping Tunnel-group Structure

HE Weiguo, LI Ruozhou, YUAN Yong, LI Qingfei, GAO Xin

**Abstract** Objective: Due to the lack of reasonable judgment criteria for tunnel stability assessment and the inability of conventional finite element methods to obtain safety factor and surrounding rock failure surface for tunnel engineering, the finite element strength reduction method is introduced into tunnel construction stability analysis and control to address this issue. Method: Taking a metro station in Qingdao as example, the

strength reduction method is applied to study the dynamic changes in safety factors during various stages of station tunnel construction. An analysis of surrounding rock plastic zone of key construction procedures is conducted. Monitoring data from the construction site is compared with the numerical model to verify the accuracy. By studying equivalent plastic strain and surrounding rock displacement, the overall limit state under typical excavation working conditions for overlapping tunnel-group metro stations is investigated. Potential failure surfaces of the surrounding rock during construction process are identified. Additionally, the horizontal and vertical limit distances between the platform and the station hall are studied, aiming to provide reference for the preliminary design and construction process evaluation of such underground structures. Result & Conclusion: The construction of initial supports in each excavation step contributes to varying degrees of improvement in the overall stability safety factor of the surrounding rock. The excavation in Area 3 is identified as the least favorable construction step, leading to plastic zone breakthrough and exacerbated deformation in surrounding rock, increasing the stress on platform lining. At this point, the station overall safety factor reaches the minimum. The platform-platform horizontal and station hall-platform vertical limit distances are 4.5 m and 1.8 m, respectively, with a minimum overall safety factor of 1.0.

**Key words** overlapping tunnel-group metro station; arch-cover method; strength reduction method; safety factor; equivalent plastic strain

**First-author's address** Tunnel Design Branch of China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

## 0 引言

近年来,在城市繁华地区或一些特定地段,由于受既有建筑物或地质条件的限制及地下空间综合开发利用的需要,地下结构的型式变得越来越复

杂,涌现出许多近距离、复杂、相互穿越的大型地下空间工程<sup>[1]</sup>。大型交叠型群洞隧道的出现给从事地下工程的科研、设计与施工人员提出了许多新的课题。由于对隧道的稳定性评价一直缺乏一个合理的评判标准<sup>[2-3]</sup>,传统有限元方法无法得到隧道工程的安全系数和围岩破坏面,一般根据经验对围岩的稳定性进行分类。为解决此问题,本研究将有限元强度折减法引入到隧道施工稳定性分析与控制中,并提出基于安全系数进行施工阶段围岩稳定性全过程的动态评价。

文献[4]首先提出了通过强度折减的方式来计算岩土工程的安全系数,并在边坡工程中得到了广泛应用。文献[5]将强度折减法运用在边坡和大坝的稳定性分析中,认为有限元强度折减法较之极限平衡法有更好的适用性。文献[6]首先将强度折减法引入隧道工程。文献[7]将有限元强度折减法应用于浅埋偏压小净距隧道的稳定性评价。文献[8]提出基于围岩安全系数进行施工阶段围岩稳定性全过程的动态评价,并通过隧道洞周围岩变形规律的研究,建立施工阶段隧道监控量测的动态控制指标。

目前,对于隧道稳定性的研究主要集中于不同围岩或埋深下的隧道整体安全系数,而对于隧道群在整个施工期的安全系数动态变化的研究成果较少。因此,本研究以青岛某地铁车站为例,尝试将强度折减法应用于研究该车站隧道施工过程中的各阶段安全系数动态变化,并对关键施工工序围岩塑性区进行分析;指出施工过程中的围岩潜在破坏面,同时研究了站台的水平极限间距和站厅与站台的垂直极限间距,以期为此类地下结构的初步设计和施工过程评价提供依据。

## 1 基本方法

### 1.1 强度折减法简介

岩土体的破坏多为剪切破坏,强度折减法引入一个大于1的折减系数 $\omega$ 对岩土体的抗剪强度指标 $c$ 和 $\tan \varphi$ 进行折减,其表达式如下:

$$c_1 = \frac{c}{\omega} \quad (1)$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{\omega}\right) \quad (2)$$

$c_1$ 和 $\varphi_1$ 分别代表折减后的黏聚力和摩擦角。将折减后的参数代入公式,进行有限元计算,如果

计算收敛则增大折减系数,直到模型不收敛为止。在临界破坏状态下的折减系数 $\omega$ 即为安全系数。在隧道工程中,洞室的开挖使得围岩应力场不断进行变化,大量工程实践表明:隧道围岩失稳最直观的体现是洞周岩体发生大变形,岩体发生剪切屈服并出现塑性流动,所以此方法所确定的安全系数是把非等强度的真实岩体视为均质等强的岩体,反映了隧道围岩的整体强度储备。

### 1.2 隧道失稳在计算中的判定

有限元计算收敛标准一般有位移收敛标准、不平衡力收敛标准和不平衡能量收敛标准,均使用向量方式的欧几里得范数。例如位移收敛标准是到第 $i$ 次迭代计算中的位移增量范数与第 $k$ 次迭代前的位移增量范数的比值作为收敛标准。

$$\frac{\Delta u_i}{\sum_{k=1}^{i-1} \Delta u_k} \leq \varepsilon_d \quad (3)$$

式中:

$\Delta u_i$ ——第 $i$ 次迭代计算得到的位移增量;

$\varepsilon_d$ ——位移收敛标准限值;

$\Delta u_k$ ——第 $k$ 次迭代计算得到的位移增量。

采用强度折减法进行围岩稳定分析时,关键是如何根据有限元计算结果来判断围岩是否达到极限破坏状态,从而得到围岩安全系数。岩土工程中土体破坏的标志是滑体出现无限移动,此时滑移面上的应变和位移发生突变并无限发展,与此同时在有限元计算中表现出计算不收敛。

## 2 隧道群安全系数的计算

### 2.1 工程概况

本研究以采用组合施工方法修建的某地铁车站为背景工程。该车站形式为厅台分离、单洞单线隧道。站厅层采用拱盖法施工,站台层采用台阶法施工;场地从上到下依次为素填土、强风化花岗岩和中风化花岗岩,场地剖面图见图1。站厅层洞室跨度为21.1 m,高为14.5 m,埋深为15 m;站台层洞室跨度为10.6 m,高度为12.3 m,埋深为40 m,考虑初始断面的左右站台水平间距为25.0 m,站厅和站台所夹围岩厚度为8.5 m。

### 2.2 数值模型建立

计算模型选用平面应变弹塑性本构模型,采用Mohr-Coulomb(摩尔库伦)屈服准则,采用四边形8

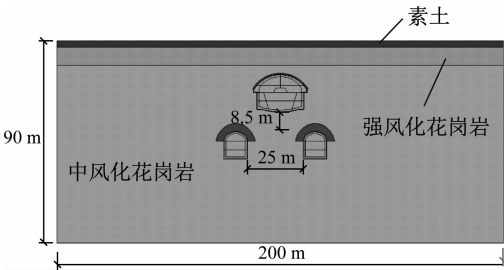


图 1 车站剖面与围岩分布

Fig. 1 Station profile and surrounding rock distribution

节点单元建模。该模型包括场地岩土体、支护结构和加固体。在有限元计算中,可认为辅助施工方法在洞室围岩周围形成一定厚度的加固区,因此,支护效果的模拟可以采用提高加固区范围内围岩参数的等效办法来实现。通过以下步骤计算注浆加固区厚度<sup>[9]</sup>:考虑注浆扩散范围相互重叠的情况,首先按式(4)计算浆液扩散半径  $R$ :

$$R = (0.6 \sim 0.7)L_0 \tag{4}$$

式中:

$L_0$ ——导管中心间距,取 0.4 m。

按式(5)计算注浆加固区厚度  $D$ :

$$D = 2 \left[ R^2 - \left( \frac{S}{2} \right)^2 \right]^{0.5} \tag{5}$$

式中:

$S$ ——相邻两注浆孔间距,取 0.2 m。

最后计算得到注浆加固区厚度  $D = 0.5$  m。文献[10]研究表明,围岩注浆后其黏聚力可提高 2~3 倍,围岩可提高一个级别。综合场地地质情况,计算中对等效加固区内的参数  $E$ (弹性模量)和  $c$  以提高 1 倍处理。根据地质勘察报告将场地土层简化为 3 层,简化后的岩土体物理力学参数及喷射混凝土初期支护参数见表 1。素填土厚度 3 m,中风化花岗岩厚度 8 m,微风化花岗岩深度达到模型底部。

表 1 岩土体及初期支护物理参数

Tab. 1 Physical parameters of rock and soil mass and primary support

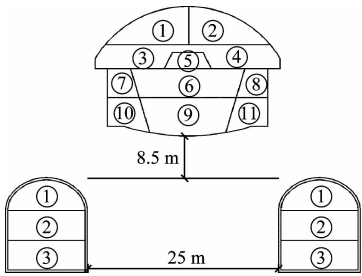
名称	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
素填土	2	10	8	0.42
强风化花岗岩	1 500	300	30	0.35
中风化花岗岩	3 000	600	33	0.30
初期支护	28 000	2 000	45	0.20

按隧道开挖影响范围的大小,计算模型边界范围:左、右边界均取隧道最大跨度的 4 倍,下边界取至 90 m,上边界取至地面,站厅层埋深选 15 m,即模

型范围为 200 m × 90 m(见图 1);模型边界仅作用于位移约束,左、右边界约束其水平位移,下边界约束其竖向位移,上边界为自由面。

2.3 开挖工况

考虑到隧道开挖过程中应力释放的时间效应,在设计隧道施工步骤时分 2 步释放应力,一个完整的开挖过程包括连续的 2 个施工步骤,在开挖步先释放 50% 应力,施作衬砌后再释放 50% 应力,然后进行下一个开挖区施工。站厅层分为 11 个开挖区域及开挖顺序,站台层分为 3 个开挖区域及开挖顺序。两者同时进行施工,开挖施工顺序见图 2,总共 22 个施工步骤。车站叠式隧道的整个施工流程图见图 2。



注:站厅开挖区域及开挖顺序分为 11 部分;站台开挖区域及开挖顺序分为 3 部分。

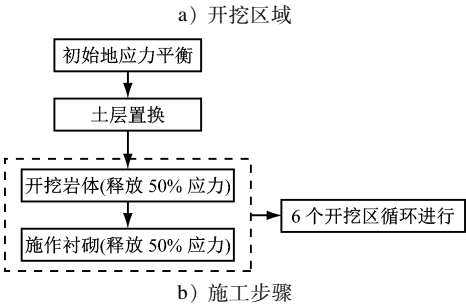


图 2 开挖区域及施工步骤流程图

Fig. 2 Excavation area and construction process flowchart

2.4 与现场监测结果对比

为验证数值模型和参数选择的准确性,选取 2 个具有代表性的断面(K1 + 809 和 K1 + 846 断面)进行地面沉降监测。2 段沉降槽曲线随施工开挖顺序的发展曲线和数值模拟的最终沉降曲线如图 3 所示。

对比现场监测数据和有限元分析结果,距离车站中心线 1 倍洞径处的地面沉降量约为中心线处的 60%。其中,第③步开挖造成地面沉降较大,地面沉降最大值小于 3 mm。实际最终沉降曲线与数值模拟结果接近,最大误差小于 8%。这说明了有限元模型的稳健性,因为模型中没有使用拟合参数。

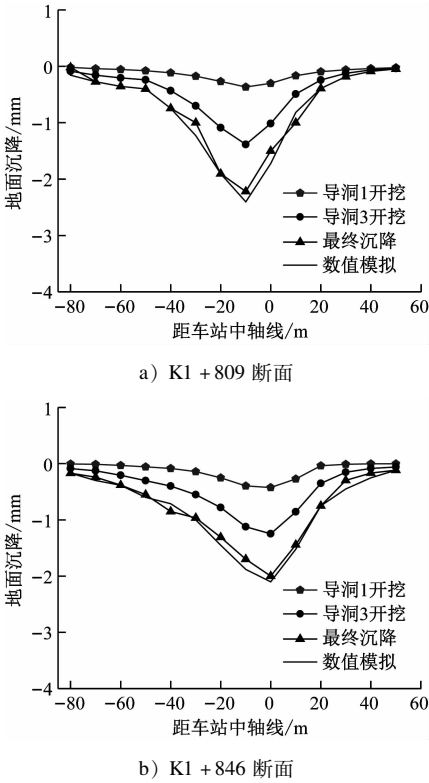


图 3 有代表性的断面地面沉降曲线

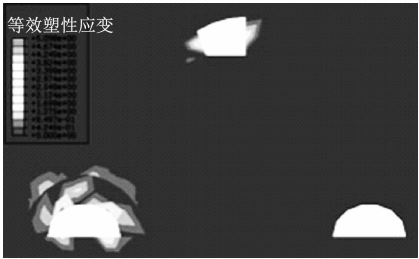
Fig. 3 Representative cross-section land subsidence curves

### 3 车站整体的极限状态

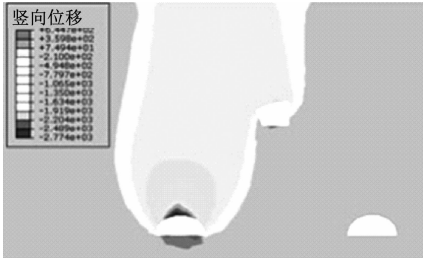
#### 3.1 等效塑性应变与位移

群洞地铁车站施工过程中施工工序繁多,围岩和支护结构受力复杂,易出现应力集中现象,研究其塑性区发展规律是保证围岩稳定和施工安全的关键。选取隧道施工中的关键施工工序,对其强度折减至破坏时的塑性区进行分析,研究其围岩破坏发展规律。选取初始断面的关键开挖区①、③和⑤在围岩强度折减至破坏时的模型等效塑性应变与位移云图(见图 4)。

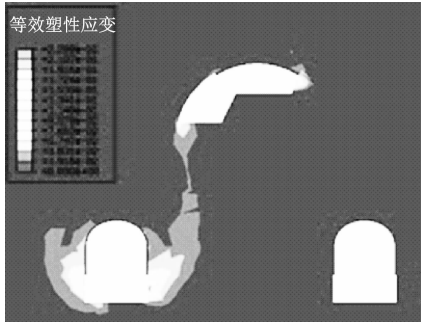
由图 4 可知:比较各开挖步等效塑性应变和模型位移,开挖区域①时,围岩强度不足将引起站台层洞顶失稳,导致地表产生较大的沉降;开挖区域



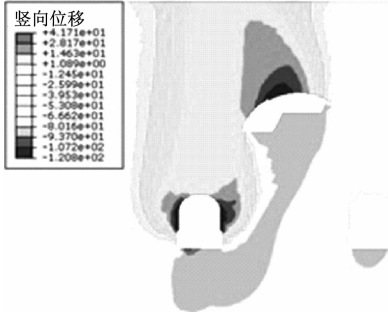
a) 开挖区①的等效塑性应变(第 1 步)



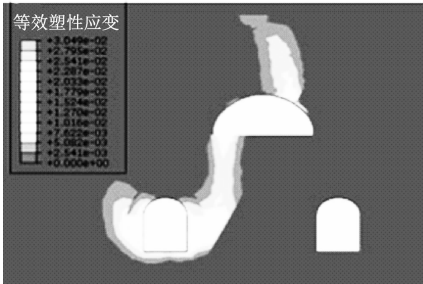
b) 开挖区①的竖向位移



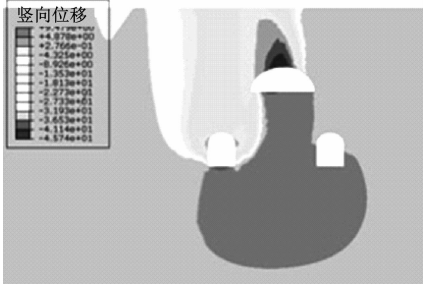
c) 开挖区③的等效塑性应变(第 5 步)



d) 开挖区③的竖向位移



e) 开挖区⑤的等效塑性应变(第 9 步)



f) 开挖区⑤的竖向位移

图 4 开挖后的等效塑性应变和竖向位移云图

Fig. 4 Nephogram of Equivalent plastic strain and vertical displacement after excavation

③时,会出现站台层和站厅层所夹围岩的等效塑性应变区呈贯通现象,塑性区增大,此时破坏区分别在左站台的下台阶,围岩破坏区尚未贯穿至地表;开挖区域⑤为上部核心土的开挖,破坏将发生在站厅层拱顶部位,拱顶至地面的围岩产生了较大的塑性应变,使得站厅和站台所夹围岩的塑性区进一步增大,但并不会发生隧道的整体坍塌。该工况下由于站台层的初期支护已经闭合,站台未产生破坏,可见初期支护对于稳定围岩有较大作用。

3.2 水平间距极限状态

所夹围岩垂直厚度保持不变,逐步减小站台所夹围岩的水平间距,对隧道的施工区域分别在开挖和支护状态时进行强度折减计算,得到对应施工步骤的安全系数变化情况如图 5 所示。

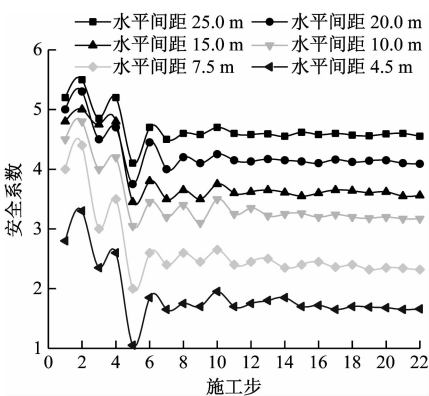


图 5 水平间距极限状态的安全系数动态变化  
Fig. 5 Dynamic variation of safety factors in horizontal spacing limit state

由图 5 可以发现,安全系数的变化趋势随着已开挖区域的增大而减小。其中,开挖 3 号导洞(区域③)在所有工况中安全系数都是最小的。由此可见,第 5 施工步骤是隧道施工过程中的关键控制步。随着隧道开挖至站厅层下半部,安全系数变化平稳,说明隧道结构与围岩整体已经趋于稳定。对比一个开挖区域的安全系数变化,可见安全系数最小的工况为刚完成开挖未进行支护时,说明初期支护的施作可显著提高隧道的稳定性。对于整个隧道群的开挖断面,由于站台层初期支护已闭合,当站厅层下半部分进行开挖时,此部分的开挖对隧道的整体稳定性影响较小。由于区域③的开挖步骤是危险工况,因此选取区域①、③、⑤刚完成开挖时的工况(水平间距为 4.5 m)进行深入分析,所选工况安全系数、失稳形式及支护提高幅度见表 2。

表 2 各工序安全系数、失稳形式及支护后提高的幅度  
Tab. 2 The safety factor, instability form, and the extent of improvement after support in each process

区域	工况	安全系数	失稳形式	提高幅度/%
①	开挖	2.83	拱脚塌落	17.3
	支护	3.42		
③	开挖	1.00	侧墙塌落	75.0
	支护	1.75		
⑤	开挖	1.71	侧墙塌落	14.6
	支护	1.96		

在城市地铁中,局部失稳虽然不引起隧道的整体破坏,但其所导致的过大地面沉降已为环境保护所不允许。支护区域③后安全系数提高的幅值最大,说明拱部的初期支护可显著提高隧道整体的稳定性。因此,针对围岩强度不足可能出现的失稳形式,开挖前应注意进行合适的预加固,开挖后尽早使初期支护闭合。

3.3 垂直间距极限状态

控制水平所夹围岩厚度不变,逐步减小站厅与站台所夹围岩的垂直间距,对隧道的施工区域分别在开挖和支护状态时采用强度折减计算,得到对应施工步骤的安全系数变化情况如图 6 所示。

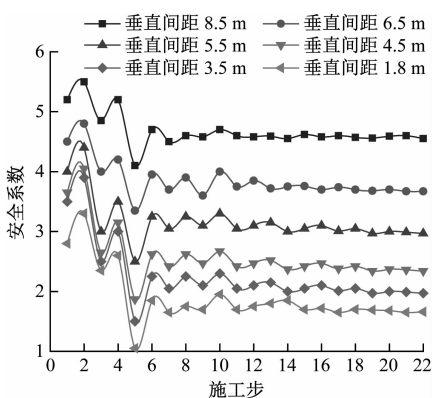


图 6 垂直间距极限状态的安全系数动态变化  
Fig. 6 Dynamic variation of safety factors in vertical spacing limit state

由图 6 可以发现:安全系数的变化规律与水平间距极限状态接近,随着垂直间距的减小,各种工况的安全系数变化幅度增大;其中,开挖 3 号导洞是所有工况中安全系数最小的,可见第 5 施工步骤是隧道施工过程中的关键控制步;当垂直间距为 1.8 m 时,最小安全系数达到 1.0,此时是隧道整体极限稳定状态。

## 4 结语

本文将边坡稳定性分析中广泛采用的有限元强度折减法引入隧道施工开挖的动态安全研究,选取拱盖法作为开挖施工方法。针对岩石场地叠式群洞隧道的结构特点,对关键施工步骤的围岩塑性区进行分析,指出施工过程中的围岩潜在破坏面,并研究了站台的水平极限间距和站厅与站台的垂直极限间距。得出以下结论:

1) 各开挖步中初期支护的施作都会对围岩整体稳定安全系数有不同程度的提高,其中区域③的开挖为最不利施工步骤。隧道整体安全系数作为围岩稳定性的判据可以定量、直观地掌握施工期围岩稳定性的动态演化规律。

2) 由于站台隧道埋深较大,岩土体强度不足所造成的破坏最先发生在侧墙围岩,其失稳形式为侧墙围岩的局部坍塌。施工时应注意对未开挖岩体进行预加固,必要时可考虑加大围岩的加固范围和加固强度。

3) 由于站厅隧道埋深较小,应慎重选择隧道拱顶穿越地层,施工前应注意对拱顶围岩的预加固,可考虑扩大加固范围、增强加固强度,并应在开挖完成后及时施作初期支护并闭合。

4) 当左右站台水平间距为 25.0 m,站厅和站台所夹围岩厚度 8.5 m,站厅埋深为 15.0 m。采用强度折减法计算洞室间距的极限距离,依次计算得到站台层水平极限间距为 4.5 m 和站厅-站台垂直极限间距为 1.8 m,此时最小安全系数达到 1.0。极限设计研究可为类似车站的初步设计和施工过程提供参考。

## 参考文献

- [1] 彭芳乐,乔永康,程光华,等.我国城市地下空间规划现状、问题与对策[J].地学前缘,2019,26(3):57.  
PENG Fangle, QIAO Yongkang, CHENG Guanghua, et al. Current situation and existing problems of and coping strategies for urban underground space planning in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 57.

- [2] BHASIN R, GRIMSTAD E. The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 93.
- [3] MENG L, LI T, JIANG Y, et al. Characteristics and mechanisms of large deformation in the Zhegu Mountain tunnel on the Sichuan-Tibet Highway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 157.
- [4] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671.
- [5] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, 49(6): 835.
- [6] 郑颖人,赵尚毅.岩土工程极限分析有限元法及其应用[J].土木工程学报,2005,38(1):91.  
ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 91.
- [7] 侯晓彬,申玉生,陈明奎.基于强度折减法的浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性分析[J].铁道标准设计,2014,58(4):55.  
HOU Ruibin, SHEN Yusheng, CHEN Mingkui. Analysis on surrounding rock stability of shallowly-buried eccentrically-loaded tunnels with small interval based on strength reduction method[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(4): 55.
- [8] 唐晓松,郑颖人,王永甫.有限元强度折减法在隧道施工稳定分析与控制中的应用[J].现代隧道技术,2020,57(3):49.  
TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, WANG Yongfu. Application of FEM strength reduction method in stability analysis and control of tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(3): 49.
- [9] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].合肥:安徽教育出版社,2005.  
WANG Mengshu. General discussion on shallow buried and underground excavation technology in underground engineering[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2005.
- [10] 关宝树,杨其新.地下工程概论[M].成都:西南交通大学出版社,2003.  
GUAN Baoshu, YANG Qixin. Probability of underground engineering[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.

(收稿日期:2023-06-08)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com