

小净距隧道夹岩力学特征分析

章慧健, 仇文革, 冯冀蒙

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 以深圳地铁 3 号线老街站—晒布路站区间盾构隧道为背景, 针对小净距双孔盾构隧道中间夹岩的复杂三维受力状态, 引入基于 Mohr-Coulomb 剪切屈服准则与拉伸屈服准则的屈服接近度函数, 采用数值模拟计算和离心模型试验相结合的手段, 对上下重叠和水平并行两类小净距隧道中间夹岩力学特征进行了深入研究。研究结果表明, 无论是重叠还是并行隧道, 其夹岩的中间部分屈服接近度值均大于两侧部分, 即中间比两侧相对稳定, 但两者的原因侧重点不同, 前者侧重于减小应力圆“半径”, 而后者主要是通过应力圆“圆心”外移来相对改善夹岩中间部分的受力状态; 对于城市浅埋隧道, 在同等静力学条件下, 上下重叠隧道夹岩的受力优于水平并行隧道。计算结果可为今后类似工程的设计、超前注浆孔的合理布置提供指导。

关键词: 重叠隧道; 并行隧道; 中间夹岩; 屈服接近度; 应力圆

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)03-0434-06

作者简介: 章慧健(1982-), 男, 浙江淳安人, 博士研究生, 从事隧道与地下工程的施工力学研究。E-mail: huijianz@163.com。

Mechanical performance of shared rock of neighborhood tunnels

ZHANG Hui-jian, QIU Wen-ge, FENG Ji-meng

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the Laojie-Shaibulu shield tunnels of Shenzhen Metro Line 3, and considering the complicated and three-dimensional stress state in the shared rock of neighborhood tunnels, the yield approach index (YAI) function on the basis of Mohr-Coulomb shear yield criterion and tensile yield criterion is introduced, and two methods, i.e. numerical analysis and centrifugal model test, are employed to analyze the mechanical characteristics of shared rock of the two styles of neighborhood tunnels, which are overlap tunnels and parallel tunnels. The results indicate that YAI value of the middle part is larger than that of the side parts both in the shared rock of the overlap tunnels and parallel tunnels, namely the middle part is relatively far from a failure state compared with the side parts. But the main reason is different. The former is mostly due to the reduction of the ‘radius’ of stress circle, and the latter is mainly due to the move-out of the ‘center’ of stress circle to improve the stress state of the middle part of the shared rock relatively. For shallow buried tunnel, the shared rock of overlap tunnels is in better stress state than that of parallel tunnels under the same static conditions.

Key words: overlap tunnels; parallel tunnels; shared rock; yield approach index; stress circle

0 引言

在城市地铁工程中, 由于上、下行线共用站台的原因, 一般将上、下行隧道设计成水平并行隧道。但是随着地下空间开发利用的不断深入, 地下设施的不断增多, 使得在隧道设计时为了避开已有的地下结构设施(或尽可能少的影响)而被迫改变双线隧道之间的相对位置。如深圳地铁一期工程罗大段(罗湖站~大剧院站)采用了重叠隧道布置形式, 还有日本东京的四孔近距离地铁隧道、新加坡高速公共交通系统中的四孔快速地铁隧道、俄罗斯及我国台湾的垂直双孔隧道。目前正在修建的深圳地铁 3 号线老街站—晒布

路站区间也采用从上下重叠过渡到水平并行的线路形式, 最小净距仅为 1.6 m。

对于小净距隧道, 两隧道中间夹岩的稳定一直被认为是设计施工成功的关键^[3-4]。由于小净距隧道中间夹岩的厚度远小于普通分离式隧道, 并在施工过程中多次受到扰动, 使得围岩稳定性和支护结构受力较为复杂, 且上下重叠布置和水平平行布置时, 夹岩的力学行为也存在较大差异。而中间夹岩在施工过程中的

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878185)

收稿日期: 2009-02-06

力学行为特征, 对围岩稳定性和支护结构参数选取起着决定性的作用, 保证夹岩稳定是小净距隧道设计、施工的关键。因此, 对中间夹岩的力学行为特征进行深入研究具有重要的现实意义。

1 小净距隧道夹岩稳定性评价指标

开挖隧道后产生应力释放, 使洞周的径向应力变为零, 切向应力集中。距洞周一定距离以外又逐渐恢复到初始应力状态^[2]。无论是采用切向应力集中系数或最大(最小)主应力集中系数, 广泛地讲, 就是基于单轴抗拉或抗压强度为基础的评价指标对于临空面围岩(洞周)的安全性评价是合适的, 但是对处于复杂应力状态的夹岩内部岩体, 就不合理了。Von-mises等效应力虽同时考虑了3个主应力的影响, 但在岩体出现拉应力时, 又无法量化拉伸破坏。

本文引入基于Mohr-Coulomb剪切屈服准则与拉伸屈服准则的“屈服接近度”函数用以描述夹岩应力危险程度。

屈服接近度(YAI: yield approach index)将力学概念与几何特点结合起来, 表述清晰, 简单实用, 并且能够比较全面客观地表述围岩的危险性程度。相对于某一强度理论则可以定义为: 空间应力状态下的一点沿最不利应力路径到屈服面的距离与相应的最稳定参考点在相同罗德角方向上沿最不利应力路径到屈服面的距离之比, 即描述了一点的现时状态与相对最安全状态的参量的比^[5]。

对于服从Mohr-Coulomb准则的岩土体, 所考虑的任何一个受力面, 其极限抗剪强度都可表示为

$$t = c + s \tan j \quad (1)$$

式中 t 为岩土体抗剪强度; s 为岩土体破坏面上的正应力; c, j 分别为岩土体的黏聚力和内摩擦角。

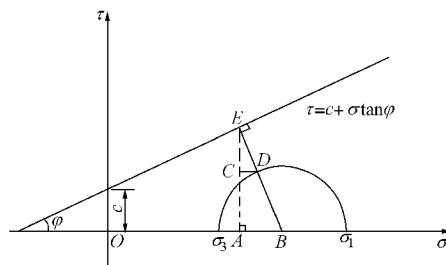


图1 Mohr-Coulomb 屈服条件

Fig. 1 Yield condition based on Mohr-Coulomb criterion

在 $s-t$ 组成的二维平面内, Coulomb 强度直线与某一点的应力圆的相对关系如图 1 所示。显然, Coulomb 强度直线将 $s-t$ 坐标平面分为上、下两部分, 直线上部为不稳定区, 直线下部为稳定区, 根据应力圆与 Coulomb 强度直线之间的关系, 即可判断岩体的破坏情况。

假设 D 点的坐标为 (s_n, t_n) , E 点的坐标为 (s, t) , 根据屈服接近度的定义即可确定其屈服接近度函数。

如剪切破坏:

$$YAI = \frac{ED}{EB} = \frac{EC}{EA} = \frac{t - t_n}{t} = 1 - \frac{t_n}{t} \quad (2)$$

式中,

$$t = c + \frac{(s_1 + s_3) \cot j - 2c}{2(\tan j + \cot j)} \tan j, \quad t_n = \frac{(s_1 - s_3) \cos j}{2},$$

因此,

$$YAI = 1 - \frac{s_1 - s_3}{2c \cos j + (s_1 + s_3) \sin j} \quad (3)$$

如拉伸破坏:

$$YAI = \frac{2(s_3 - s_1)}{s_1 + s_3 - 2s_1} \quad (4)$$

对于同时考虑剪切和拉伸破坏的情况, 如图 2 所示。图中, 线 AC 为剪切包络线, 线 BD 为拉伸破坏线(拉伸极限强度 s_t), 线 BE 为角 FBD 的平分线, 并交横坐标轴于 s_R , 由几何关系可以计算得: $s_R = (s_t + c \cdot \cos j) / (1 - \sin j)$ 。圆 1 与线 BC 和 BD 同时相切, 圆 2 为实际应力状态所对应的 Mohr 圆。从图 2 可知, 当圆 2 的圆心位于圆 1 圆心的左侧时, 即 $(s_1 + s_3)/2 < s_R$ 时, 材料倾向于发生拉伸破坏, 反之, 材料倾向于发生剪切破坏。

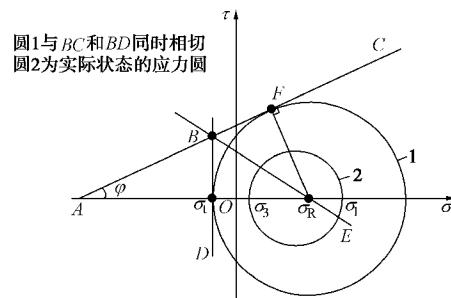


图2 剪切屈服与拉伸屈服关系图

Fig. 2 Relationship between shear yield and tension yield

因此, 综合 Mohr-Coulomb 剪切屈服准则与拉伸屈服准则的屈服接近度函数为

$$YAI = \begin{cases} 1 - \frac{s_1 - s_3}{2c \cos j + (s_1 + s_3) \sin j} \frac{(s_1 + s_3) \geq s_R}{2} \\ \frac{2(s_3 - s_1)}{s_1 + s_3 - 2s_1} \frac{(s_1 + s_3) < s_R}{2} \end{cases} \quad (5)$$

显然, 当屈服接近度 $YAI=0$ 时, 应力点在屈服面上, 发生屈服, 当 $YAI=1$ 时, 应力点处于相对最安全状态。屈服接近度值越小, 越趋于不稳定。同种材料, 强度包络线一定, 屈服接近度值取决于应力圆的“半径”和“圆心”。

2 上下重叠隧道的夹岩力学特征

本次计算以深圳地铁 3 号线老街站—晒布路区间隧道重叠段为工程依托。该区间拟采用盾构法施工, 洞径 6 m, 上、下隧道的最小净距为 1.6 m。

2.1 计算模型

本次计算采用 FLAC 有限差分程序, 选取重叠隧道最小净距处的断面进行了二维数值模拟。建模范围水平向取隧道中线两侧各 35 m (约 $6D$, D 为洞径); 上至地表, 下至下隧道洞底以下 40 m (约 $7D$)。左、右侧边界施加水平方向约束, 底面限制垂直位移, 顶面为自由面。初始应力仅考虑自重应力场的影响。管片按弹性匀质圆环考虑, 用小于 1 的刚度折减系数 h 来体现环向接头的影响。模型中用曲梁单元模拟管片; 地层视为理想弹塑性材料, 服从 Mohr-coulomb 屈服准则; 注浆层按弹性材料考虑, 地层和注浆层均采用实体单元模拟。最终的计算模型如图 3 所示。

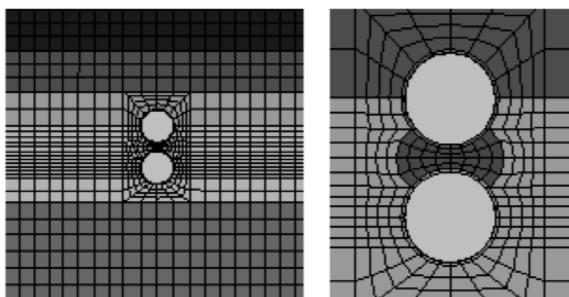


图 3 上下重叠隧道的计算模型

Fig. 3 FEM model of up-down overlap tunnels

2.2 施工过程模拟

结合盾构隧道施工过程, 在初期自重应力场下进行开挖。引入荷载释放系数 $\alpha=25\%$ 以模拟管片环脱环瞬间外围临空面围岩变形效应^[8]; 注浆层及管片环施作完成后, 外围围岩释放剩余 75% 荷载。

后挖隧道对先挖隧道是“卸载”作用, 先开挖下洞可以更好的控制地表位移和隧道本身变位^[7], 文献 [6] 从隧道结构的内力演变角度, 也说明“先下后上”的施工顺序优于“先上后下”。本计算根据“先下后上”顺序进行施工模拟, 具体步骤如表 1。

表 1 上下重叠隧道施工步骤

Table 1 Construction steps of overlap tunnels

施工步骤	施工内容	备注
1	初始地应力场	
2	下洞形成“毛洞”, 管片拼装前	释放载荷 25%
3	下洞管片拼装完成	释放载荷 75%
4	上洞形成“毛洞”, 管片拼装前	释放载荷 25%
5	上洞管片拼装完成	释放载荷 75%

2.3 物理力学参数

根据地质勘察报告, 取计算参数如表 2 所示。

表 2 物理力学参数

Table 2 Physicomechanical parameters

地层及材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 n	重度 $g/(kN \cdot m^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $j/(^\circ)$
<1-1>素填土	0.004	0.30	18.7	—	—
<3-3>中粗砂层	0.020	0.28	20.0	4.3	5.7
<6-2>粉质黏土	0.040	0.29	19.0	17.0	16.5
<11-1-2>全风化 花岗片麻岩	0.060	0.27	19.0	18.0	17.0
<11-2>强风化 花岗片麻岩	0.200	0.22	26.4	—	—
管片	0.75 × 35.5	0.2	26.0	—	—
注浆层	0.010	0.25	21.0	—	—

2.4 计算结果及分析

隧道开挖, 造成切向应力增加, 径向应力释放, 因而主应力方向随之发生偏转 (如图 4), 待到双洞完成后, 径向应力进一步释放, 夹岩中心部分横向应力开始大于竖向应力。从夹岩的位移矢量 (如图 5) 也可以看出: 夹岩两侧有向中间挤压的趋势, 中间横向应力的增加也就自然而然了。

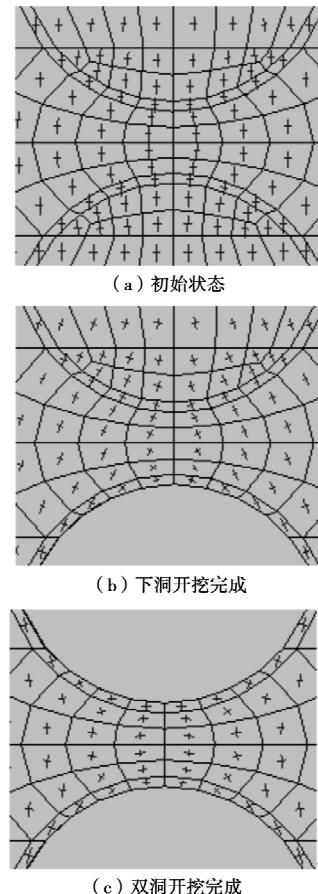


图 4 隧道施工引起的主应力方向变化

Fig. 4 Deflection of principal stress direction due to tunnel excavation

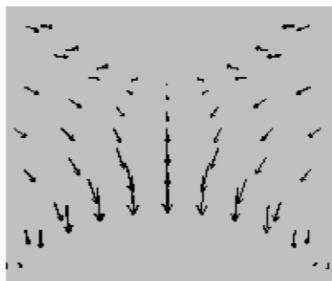


图 5 夹岩的位移矢量

Fig. 5 Displacement vector of shared rock

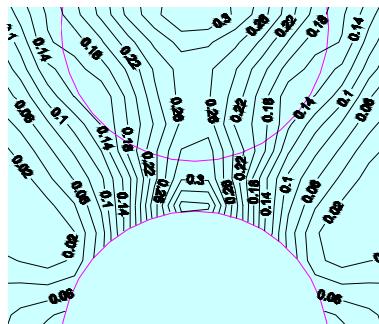


图 6 下洞完成后的屈服接近度等值线

Fig. 6 Contour of YAI after finishing tunnel below

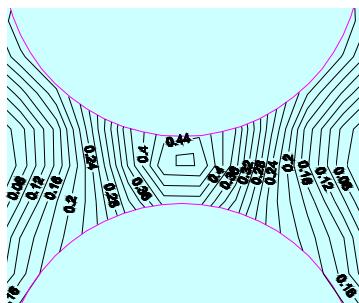


图 7 双洞完成后的屈服接近度等值线

Fig. 7 Contours of YAI after finishing two tunnels

根据屈服接近度的定义,利用FLAC内嵌的Fish语言编制了求解单元YAI的小程序。从下洞开挖后的屈服接近度等值线(如图6)可以看出,隧道的两肩最易失稳。等到上洞也完成后,其YAI等值线(见图7)显示夹岩中间部分属于应力改善区,而两侧为相对不稳定区。因此,在盾构机的超前注浆孔有限的情况下,要合理考虑注浆孔的布置,靠近夹岩的注浆孔宜朝向夹岩两侧部分(可布置于上盾构的左下,右下,下盾构的左上,右上)。

3 水平并行隧道的夹岩力学特征

3.1 计算说明

为与上下重叠隧道形成对比, 水平并行隧道夹岩的厚度同样取为 1.6 m, 夹岩中心与重叠工况等埋深。地层分层情况及其物理力学参数同前。由于左右对称, 施工顺序不影响计算结果, 本计算按“先左后右”顺

序进行模拟。具体施工步骤见表 3。

表 3 水平并行隧道施工步骤

Table 3 Construction steps of parallel tunnels

施工步骤	施工内容	备注
1	初始地应力场	
2	左洞形成“毛洞”，管片拼装前	释放载荷 25%
3	左洞管片拼装完成	释放载荷 75%
4	右洞形成“毛洞”，管片拼装前	释放载荷 25%
5	右洞管片拼装完成	释放载荷 75%

3.2 计算结果及分析

与重叠工况类似,夹岩的两侧向中间挤压(图9),中部切向应力增加。隧道管片呈“横鸭蛋”变形,在左右水平点有朝洞外“主动”变形趋势,减小了径向应力的释放,甚至加大了此处的径向应力值,通过提取该处单元的应力,显示径向应力比初始状态有所增加。对于夹岩的中间部分,切向即是大主应力方向(如图8)。因此,大、小主应力均增大,应力圆“圆心”外移,有利于改善受力状态;另一方面,主应力增幅不同,引起应力圆“半径”也在变(可增可减)。

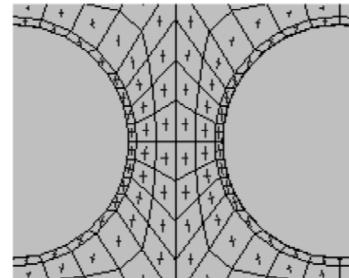


图 8 最终的主应力方向

Fig. 8 Final direction of principal stress



图 9 夹岩的位移矢量

Fig. 9 Displacement vector of shared rock

屈服接近度综合考虑了应力圆“圆心”和“半径”变动对夹岩稳定性的影响,其最终等值线分布如图 10 所示。水平并行隧道的中间夹岩的 YAI 值都很小,极易发生失稳,相对而言,夹岩中间部分应力危险程度不如两侧部分。

3.3 与上下重叠工况的对比分析

在本文计算条件下,水平并行小净距隧道中间夹岩的屈服接近度小于上下重叠工况,说明对于城市浅埋隧道,由于初始状态竖向应力大于水平应力,在同

等静力学条件下, 上下重叠隧道夹岩的受力优于水平并行隧道, 特别对于能有效控制应力释放的盾构隧道。

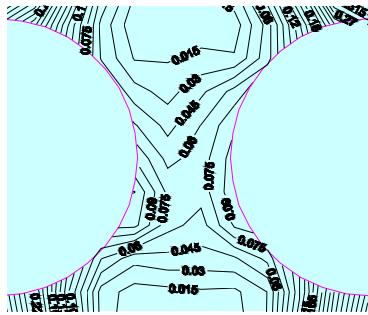


图 10 最终的屈服接近度等值线

Fig. 10 Final contours of YAI

无论是上下重叠还是水平并行隧道, 都出现了夹岩中间部分应力危险程度不如两侧的现象, 但是原因的侧重点是不同的。重叠工况的主因是: 夹岩中间部分大主应力减小(径向释放), 小主应力增大(切向增加), 导致应力圆“半径”减小; 而并行工况主要是由于隧道管片的顶底受较大压力, 而在左右水平点处表现为“主动”朝洞外变形, 反而加大了此处的径向应力, 夹岩中间部分出现了大、小主应力都增大, 致使应力圆“圆心”外移, 从而相对改善了夹岩中间部分的受力状态。

4 离心模型试验研究

4.1 试验模型

试验在西南交通大学土工离心机上进行。选用 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 的模型箱, 据此选定本次试验的几何相似比为 100。根据离心机模型试验的基本原理和 Buckingham 的 π 定理, 各物理量相似比如表 4。

表 4 参数的相似比(原型/模型)

Table 4 Ratios of similitude (prototype / model)

物理量	比例	物理量	比例
几何比 C_l	100	加速度比 C_g	1 : 100
应力比 C_σ	1	弹性模量比 C_E	1
黏聚力比 C_c	1	内摩擦角比 C_ϕ	1
应变比 C_ϵ	1	位移比 C_u	100
密度比 C_r	1	时间比 C_t	10000

根据以上相似比, 地层填料选用原状土, 且对土层分布做了简化(如图 11), 物理力学参数同前。

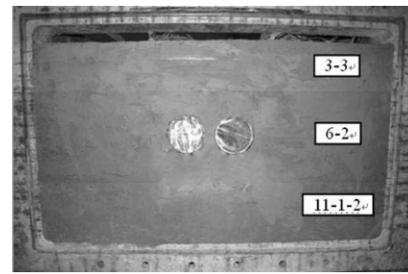
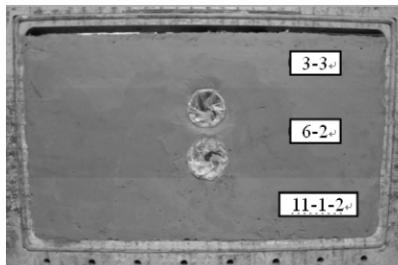


图 11 模型正面图

Fig. 11 Front view of models

为监测土体内部应变, 将电阻应变片贴在接近或略小于土体弹性模量的塑料片上, 再埋于土中。监测点布置见图 12。

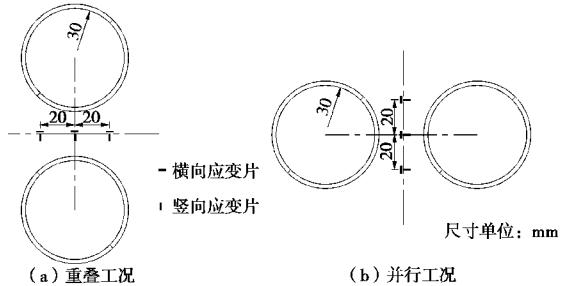


图 12 试验测点布置

Fig. 12 Arrangement of measuring points

4.2 试验结果

分别提取开挖完单洞和双洞后的夹岩应变, 换算为应力后如图 13~15 所示。

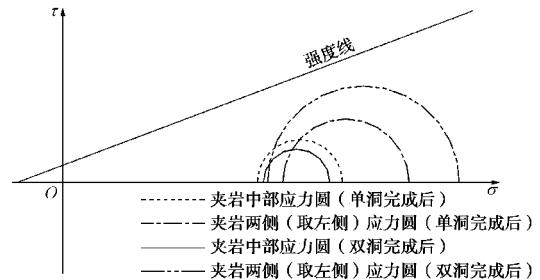


图 13 重叠工况的夹岩应力圆

Fig. 13 Stress circle for shared rock of overlap tunnels

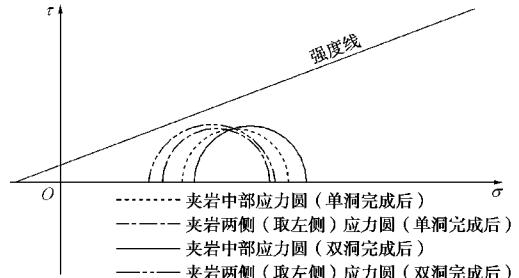


图 14 水平并行工况的夹岩应力圆

Fig. 14 Stress circle for shared rock of parallel tunnels

从图 13~14 可以看出, 上下重叠和水平并行两种工况均为夹岩两侧的应力圆比夹岩中部的应力圆更接近强度线; 且从单洞到双洞的过程中, 夹岩两侧应力圆靠近强度线变化, 夹岩中部应力圆远离强度线变化,

变化幅度重叠工况大于水平并行工况。图 15 显示同等条件下, 重叠工况受力优于水平并行工况。

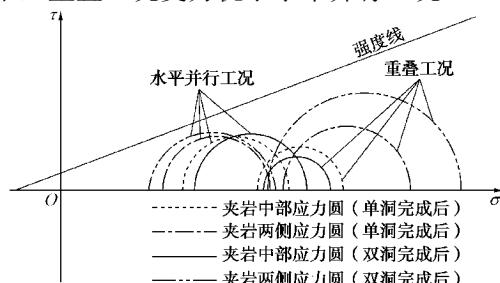


图 15 水平和重叠工况的夹岩应力对比

Fig. 15 Comparison of stresses of shared rock between overlap tunnels and parallel tunnels

试验结果与计算结果较为吻合。

5 结 论

(1) 小净距隧道中间夹岩由于受到隧道施工的多次扰动, 受力复杂。应用简单的基于单轴抗拉或抗压强度为基础的评价指标已显不足。建议采用“屈服接近度”来量化夹岩土体的应力危险性。

(2) 对于遵循 Mohr-Coulomb 强度准则的材料, 其屈服接近度函数如式(5)所示。当屈服接近度 $YAI = 0$ 时, 应力点在屈服面上, 发生屈服, 当 $YAI = 1$ 时, 应力点处于相对最安全状态。屈服接近度值越小, 越趋于不稳定。同种材料, 强度包络线一定, 屈服接近度值取决于应力圆的“半径”和“圆心”。

(3) 对于城市浅埋隧道, 由于初始状态竖向应力大于水平应力, 在同等静力学条件下, 上下重叠隧道夹岩的受力优于水平并行隧道, 特别对于能有效控制应力释放的盾构隧道。

(4) 无论是上下重叠还是水平并行隧道, 都出现了夹岩中间部分屈服接近度值大于两侧的现象, 但原因侧重点不同。重叠工况主要是由于夹岩中间部分大主应力减小, 小主应力增大, 导致应力圆“半径”减小; 而并行工况夹岩中间部分出现了大、小主应力都增大, 致使应力圆“圆心”外移, 从而一定程度上改善了受力状态。

参考文献:

- [1] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理及对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003. (QIU Wen-ge. The study on mechanics principle and countermeasure of approaching excavation in underground works[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese))
- [2] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. Key point anthology for design of tunnel engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 吴明生, 杨转运. 小净距隧道中央岩柱的力学特性分析[J]. 内蒙古公路与运输, 2005(2): 11 - 14. (WU Ming-sheng, YANG Zhan-yun. Analysis on the mechanical performance of rock pile between twin tunnels with small-interval[J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2005(2): 11 - 14. (in Chinese))
- [4] 姚 勇, 何 川, 谢卓雄. 双线小净距隧道中岩墙力学特征及加固措施研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1883 - 1888. (YAO Yong, HE Chuan, XIE Zhuo-xiong. Study of mechanical behavior and reinforcing measures of middle rock wall of parallel tunnel with small interval[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1883 - 1888. (in Chinese))
- [5] 张传庆. 基于破坏接近度的岩石工程安全性评价方法的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2006. (ZHANG Chuan-qing. Study on method of safety evaluation for rock engineering based on failure approach index[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [6] 郑余朝, 仇文革. 重叠隧道结构内力演变的三维弹塑性数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(3): 376 - 380. (ZHENG Yu-chao, QIU Wen-ge. 3-D elasto-plastic numerical simulation of evolving regularity of structural internal force of overlapped tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006, 41(3): 376 - 380. (in Chinese))
- [7] 陈先国, 高 波. 重叠隧道的施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 606 - 610. (CHEN Xian-guo, GAO Bo. Research on construction mechanics of overlap tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 606 - 610. (in Chinese))
- [8] 何 川, 苏宗贤, 曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 91 - 98. (HE Chuan, SU Zong-xian, ZENG Dong-yang. Influence of metro shield tunneling on existing tunnel directly above[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 91 - 98. (in Chinese))
- [9] SOLIMAN E, DUDDECK H, AHRENS H. Two- and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1993, 8(1): 13 - 18.
- [10] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289 - 304.
- [11] CAI M, KAISER P K. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 301 - 310.