文章编号:1009-6582(2021)02-0071-07

DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2021.02.009

现代推进技术 上软下硬地层地铁隧道安全覆岩厚度研究

张自光1,2 曹广勇1,2 李建立3 翟朝娇1,2

(1安徽建筑大学建筑结构与地下工程安徽省重点实验室,合肥230601;2安徽建筑大学安徽省城市建设和地 下空间工程技术研究中心,合肥 230601;3 安徽四建控股集团有限公司,合肥 230088)

上软下便土岩复合地层地铁隧道拱顶以上覆岩厚度对围岩自稳起关键控制作用,然而目前关于隧道 安全覆岩厚度及其一般规律尚无统一的认识和标准。基于此,文章首先采用有限元强度折减法对不同软弱地层厚 度 H_s 和开挖跨度D下的地铁隧道安全覆岩厚度进行研究,得到了地铁隧道临界安全覆岩厚度 H_s 与软弱地层厚度 H。间的数学拟合方程,并绘制了临界安全覆岩厚度、软弱地层厚度与开挖跨度"H。-H。-D"三维空间分布图;然后 通过对青岛地铁隧道施工过程监测数据进行统计分析,验证了隧道围岩自稳性及对周边环境影响的程度与安全覆 岩厚度具有良好的相关性。

关键词 地铁隧道 安全覆岩厚度 上软下硬地层 开挖跨度 监测数据

中图分类号:U455 文献标识码:A

1 引言

岩质隧道围岩一般具有较强自稳能力,而土质 隧道围岩自稳能力往往较差。在上软下硬土岩复合 地层条件下修建地铁隧道,将隧道洞室置于下覆岩 层中并满足安全覆岩厚度条件,可以大大降低隧道 开挖施工风险和施工难度,减少对周边环境的影响, 灵活选择开挖工法,减少支护措施,节约建设成本。 我国《铁路隧道设计规范》叫指出, I 级围岩长期稳 定,Ⅱ级围岩基本稳定,Ⅲ~Ⅳ级围岩暂时稳定,Ⅴ ~ VI级围岩不稳定。《工程岩体分级标准》²¹指出, I 级围岩可长期稳定(洞径≤20 m), Ⅱ级围岩基本稳 定(洞径10~20 m)或长期稳定(洞径≤10 m), **Ⅲ**级 围岩能稳定数日至1个月(洞径10~20 m)或数月 (洞径5~10 m), Ⅳ级围岩一般无自稳能力, Ⅴ级围 岩无自稳能力。《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技 术规范》引指出,毛洞跨度为5~10m时, I级围岩长 期稳定,Ⅱ级围岩能较长时间(数月至数年)维持稳

定,Ⅲ级围岩自稳时间1个月以上,Ⅳ级围岩毛洞跨 度5m以下时自稳时间为数日至1个月, V级围岩自 稳时间很短。上述成果对定性认识和判定隧道围岩 自稳提供了依据,然而没有考虑上软下硬土岩复合 地层隧道上覆岩层厚度因素的影响。

上软下硬地层隧道拱顶覆岩厚度对围岩自稳起 关键控制作用。20世纪90年代,方玉树、郑颖人四、 张先锋[5]等依据工程经验指出拱顶上覆5~6m的坚 硬完整岩体的大跨度地铁车站隧道可满足围岩自稳 要求。近年来,迟建平6引用岩跨比指标对土岩组 合地层浅埋暗挖隧道覆盖层合理性进行分析评价, 并指出合理岩跨比是控制暗挖车站隧道围岩安全稳 定的关键;胡智民四指出土岩组合地层浅埋暗挖隧 道顶部岩层厚度是围岩安全最敏感的因素;张自光 等图基于经验公式和数值计算并结合工程实例,探 讨了上软下硬地层暗挖隧道围岩自稳合理岩跨比问 题;彭祖昭等四以成拱临界板厚度为判据建立了水 下隧道合理覆岩厚度预测回归模型。以上成果为本

修改稿返回日期:2020-01-20

基金项目:安徽省自然科学青年基金项目(1708085QE104);安徽建筑大学校引进人才及博士启动基金项目(2019QDZ24). 作者简介:张自光(1980-),男,博士,讲师,工程师,主要从事城市地下空间开发与利用研究工作,E-mail:907791108@qq.com.

第58卷第2期(总第397期),2021年4月出版

71

MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

文研究提供了思路,然而上软下硬土岩复合地层中 地铁隧道安全覆岩厚度及其一般规律,目前国内外 尚无统一的标准和认识。随着青岛、大连、厦门等上 软下硬地层城市地铁建设如火如荼地展开,深入开 展地铁隧道安全覆岩厚度及其变化一般规律研究具 有重要的科学研究意义和工程实用价值。

本文以充分发挥围岩自稳能力为目的,首先采 用基于有限元强度折减法的安全系数作为评判指 标,通过对不同软弱地层厚度 H_s 和开挖跨度D下地 铁隧道安全覆岩厚度的研究,得到了地铁隧道临界 安全覆岩厚度 H_{r} 与软弱地层厚度 H_{s} 之间的数学拟 合方程,并绘制了地铁隧道临界安全覆岩厚度 H. 软弱地层厚度 H_s 与开挖跨度D的三维空间分布图; 然后通过青岛上软下硬地层6座单拱大跨地铁车站 隧道237个地表沉降监测统计数据与其对应的覆岩 厚度相关性分析,验证了安全覆岩厚度所得结论的 合理性。本文成果为上软下硬土岩复合地层地铁隧 道合理埋深设置及地铁线路纵断面合理设计和深度 规划设计提供了理论支撑和理论依据。

安全覆岩厚度判别方法

2.1 基于有限元强度折减的安全系数法

有限元强度折减法是基于传统的极限分析法而 提出,采用严格的理想弹塑性数值计算手段。有限 元强度折减法通过不断折减岩土体强度指标粘结力 c和内摩擦角因素 $\tan\varphi$, 直至使其处于破坏状态, 此 时的强度折减系数 ω 即为安全系数K,如式(1)、图1 所示。

$$c' = \frac{c}{\omega}, \quad \varphi' = \operatorname{arc}\left(\frac{\tan\varphi}{\omega}\right)$$
 (1)

式中, ω 为折减系数。

隧道围岩稳定性分析一般可看作平面应变问 题,本文选用理想弹塑性本构模型,采用莫尔-库伦

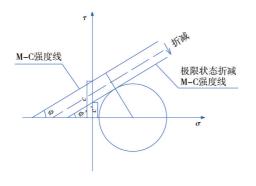


图1 强度折减原理

Fig.1 Strength reduction method principle

第58卷第2期(总第397期),2021年4月出版 Vol.58, No.2 (Total No.397), Apr.2021

(M-C)条件下的内切圆 DP4 屈服准则[10],如式(2)所

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \tag{2}$$

式中:11,12分别为应力张量的第一不变量和应力偏张 量的第二不变量; α,k 分别是与岩土材料粘结力c和 内摩擦角 φ 相关的常数,其中, α =- $\sqrt{3(3+\sin^2\varphi)}$

$$k = \frac{3c\cos\varphi}{\sqrt{3(3+\sin^2\varphi)}}$$

2.2 失稳判据的确定

目前数值计算中关于隧道围岩稳定性失稳判据 的确定方法主要有通过计算不收敛、塑性区贯通、特 征点位移突变3种方式[11,12]。

计算不收敛准则通过事前设定计算时步或最小 不平衡力,在数值过程中若无法得到收敛结果,则说 明模型无法达到平衡。塑性区贯通准则以塑性区从 内部贯通至临空面作为判据。特征点位移突变指在 岩体达到极限破坏状态以后,特征点位移将处于一 种流动状态,位移突然增加[13-15]。本文选用特征点 位移突变作为隧道围岩失稳判据。

2.3 临界安全覆岩厚度安全系数

有限元强度折减法本质上是极限平衡法,当安 全系数为1.0时,围岩处于极限稳定状态。考虑到保 留一定的安全储备,本文取1.05作为上软下硬土岩 复合地层地铁隧道临界安全覆岩厚度 Hr. 的划分标 准。

地铁隊道拱顶安全覆岩厚度 3

3.1 计算模型

上软下硬地层地铁隧道覆岩厚度通用分析模型 如图2所示,图中,用为隧道埋深,D为洞室开挖跨 度, h 为洞室开挖高度, H。和 H. 分别为软弱土层厚度 和坚硬岩层厚度。

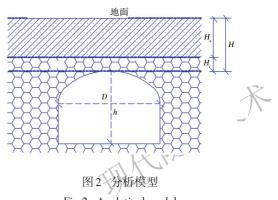


Fig.2 Analytical model

数值计算地层均按理想弹塑性材料平面应变问题考虑,采用 ANSYS 数值计算软件和 DP4 屈服准则,全断面一次性开挖。计算模型上边界取至地表,下边界取至开挖断面拱底以下 3.5 倍开挖高度以上,左右侧边界距离 7 倍开挖跨度以上。初始地应力应仅考虑岩土体自重应力,地面施加 20 kPa 均布荷载,隧道周边网格纵横向间距为 0.5 m,外围单元网格纵横向间距设定为 1.0 m,如图 3 所示。

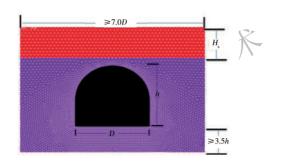


图 3 计算模型 Fig.3 Computational model

结合青岛地铁沿线地质条件及地层分布特征, 在计算过程中将第四系地层和强风化层统称为软弱 土层,中风化层和弱风化层统称为坚硬岩层。根据 青岛地铁沿线岩土体土工试验结果统计分析,地层 参数如表1所示。

表1 计算参数 Table 1 Calculation parameters

地层类型	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /GPa	泊松 比	重度 /(kN/m³)
软弱土层	0.032	20	0.05	0.38	22.5
较坚岩层	0.60	35	5.0	0.25	24.5

3.2 地铁车站隧道安全覆岩厚度

依托青岛地铁车站隧道工程实际,上软下硬土岩复合地层地铁车站隧道安全覆岩厚度研究取软弱地层 $12 \, \mathrm{m}$,开挖跨度 $20.8 \, \mathrm{m}$ 、高度 $18.37 \, \mathrm{m}$ 的单拱直墙结构(图 2)。有限元强度折减法以隧道拱顶竖向位移 S 突变作为安全系数确定判据^[16]。隧道拱顶覆岩厚度为 $1.0 \sim 2.2 \, \mathrm{m}$ 时,隧道拱顶竖向位移 S 随折减系数 ω 的变化曲线如图 $4 \, \mathrm{m}$ 示,安全系数计算结果如表 $2 \, \mathrm{m}$ 示。

采用中间插值法,可推算地铁车站隧道软弱地 层厚度为12 m、安全系数为1.05时的覆岩厚度为 1.75 m,即隧道拱顶临界安全覆岩厚度 $H_{r_{er}}$ 为 1.75 m。不同软弱地层厚度 H_{s} 时的地铁车站隧道临界安全覆岩厚度 $H_{r_{er}}$ 计算结果如表 3 所示。

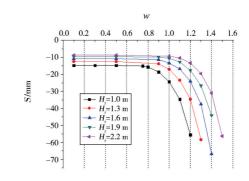


图 4 拱顶竖向位移 S随折减系数 ω 的变化曲线 Fig. 4 Curves of vertical vault displacement S varying with the reduction factor ω

表2 安全系数计算结果

Table 2 Calculation results of safety factors

覆岩厚度 <i>H</i> ,/m	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2
安全系数K	0.85	0.90	1.00	1.10	1.20

表3 地铁车站隧道临界安全覆岩厚度 H.

Table 3 Critical safe thicknesses $H_{r_{cr}}$ of overlying rock of metro station tunnels

软弱地层厚度H _s /m	6	9	12	15	18	21	24
临界安全覆岩厚度 $H_{r_{cv}}/m$	0.72	1.22	1.75	2.12	2.63	3.07	3.46

从表 3 中可见, 地铁车站隧道临界安全覆岩厚度 H_{cc} 随软弱地层厚度 H_{sc} 是近似线性增大的变化特征, 如图 5 所示。这是因为在上软下硬土岩复合地层条件下修建地铁隧道, 将隧道洞室置于下覆岩层中并保持安全临界覆岩厚度 H_{cc} 条件时, 上覆软弱

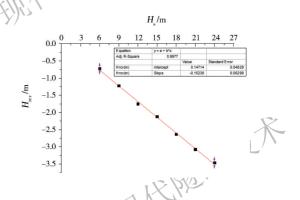


图5 地铁车站隧道出。随出。变化曲线

Fig. 5 Curves of $H_{r_{eq}}$ varying with H_s in metro station tunnels

第58卷第2期 (总第397期), 2021年4月出版 Vol.58, No.2 (Total No.397), Apr.2021







MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

地层作为荷载的成分较多, Hr. 作为结构的成分较 多,隧道洞周围岩力学行为类似组合梁的受力模 式[17]。上覆软弱地层H。厚度越大,相应的荷载越大, 对应的H。厚度越大。

利用线性拟合对 H_{r_o} 进行预测,如式(3)所示, 校正决定系数(Adj.R-square)为0.9977,证明了该 式(3)的合理性。应用该式可以得到地铁车站隧道 不同软弱地层 H_s 下的临界安全覆岩厚度 $H_{r_{co}}$ 。

$$H_{\rm r_{cv20.8}}$$
=0.147 14-0.152 38 $H_{\rm s}$ (3)

3.3 地铁隧道安全覆岩厚度一般规律

上软下硬土岩复合地层地铁隧道安全覆岩厚度 一般规律研究以车站隧道为基础,保持原有断面形 状及高跨比不变,仅对隧道断面尺寸等比例缩放,如 图6所示。开挖跨度为10.4 m和31.2 m时不同软弱 地层厚度 H_s 下的地铁隧道临界安全覆岩厚度 H_{r_s} 计 算结果如表4所示。

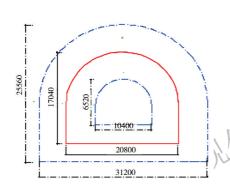


图6 地铁隧道断面

Fig.6 Cross-section of a metro tunnel

表4 地铁隧道临界安全覆岩厚度 $H_{r_{ex}}$ (单位:m)

Table 4 Critical safe thicknesses $H_{r_{op}}$ of overlying rock of metro tunnels(Unit: m)

软弱地层厚质	6	12	18	24	
开挖跨度	10.4	0.13	0.72	1.28	1.76
D/m	31.2	1.76	3.22	4.62	6.13

地铁隧道临界安全覆岩厚度用。随软弱地层厚 度 H_s 的变化特征如图7所示。开挖跨度为 $10.4 \,\mathrm{m}$ 和 $31.2 \,\mathrm{m}$ 时的地铁隧道临界安全覆岩厚度 H_{re} 与软弱 地层厚度H。两者间的数学拟合方程分别如式(4)和 式(5)所示。

$$H_{r_{\text{ev}10.4}} = 0.39 - 0.090 \, 83H_{\text{s}}$$
 $\gamma = 0.996 \, 83$ (4)
 $H_{r_{\text{ev}31.2}} = 0.305 - 0.241 \, 83H_{\text{s}}$ $\gamma = 0.999 \, 71$ (5)

地铁隧道临界安全覆岩厚度、软弱地层厚度与

开挖跨度" $H_{r,s}$ - H_s -D"三维空间分布如图 8 所示。从 图8可以看出,对不同软弱地层厚度H。和开挖跨度 D下的地铁隧道,覆岩厚度H.是否满足临界安全覆 岩厚度 H_{ro} 要求做出如下判断:

- (1) 当H.位于界面图下方时,表示H.不能满足 H_{-} 要求:
- (2) 当 H_r 位于界面图上时,表示 H_r 刚好能满足 $H_{r,v}$ 要求;
- (3) 当H.位于界面图上方时,表示H.不能满足 $H_{r_{ev}}$ 要求。

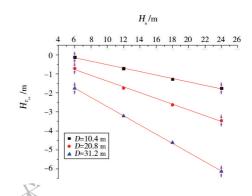


图7 地铁隧道H。随H。变化曲线

Curves of $H_{r_{ev}}$ varying with H_s in metro tunnels

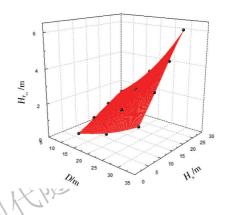


图 8 地铁隧道"H_{r,},-H,-D"三维空间关系

Fig. 8 Three-dimensional spatial relationship of $H_{r_{cs}}$ - H_s -D in metro tunnels

上软下硬土岩复合地层隧道上覆岩层厚度对围 岩能否满足自稳条件起控制作用。在上软下硬业岩 复合地层条件下修建地铁隧道,将隧道洞室置于下 覆岩层中并满足安全覆岩厚度 H. 条件, 理论上隧 道围岩自身即可满足隧道开挖安全稳定要求,简易 的支护措施即可保障隧道施工过程安全,且工期短, 成本少,环境影响小,综合效益好;反之,则需要采取



较强的辅助工程措施,工期长,成本高,环境影响大,综合效益差。

4 工程实例分析

地铁浅埋隧道的地表沉降能反应工程施工对周 围岩土体及周边环境的影响程度,对工程安全尤为 重要[18]。本文统计了青岛地铁6座单拱大跨暗挖车站隧道(断面尺寸、开挖深度、开挖工法、支护措施等基本相同),分析软弱地层厚度、隧道覆岩厚度及其是否满足临界安全覆岩厚度要求,如表5所示,隧道开挖过程中的237个地表沉降现场监测数据统计分析结果如表6所示。

表 5 地铁车站隧道基本特征

Table 5 Basic characteristics of metro station tunnels

	序号 名称 跨/m×高/m	吹/ √音/	埋深 <i>H</i> /m		软层厚度H/m		覆岩厚度H,/m		临界安全覆岩	H _r 满足
厅与		分布范围	均值	分布范围	均值	分布范围	均值	厚度H _{rev} /m	$H_{\mathrm{r_{ev}}}$ 与否	
1	湛山路站	20.52×18.18	13.0 ~ 15.1	14.0	13. ~ 20.5	16.8	0.0	0.0	1.80~2.50	不满足
2	江西路站	20.60×15.50	8.9 ~ 10.5	9.7	9.1 ~ 14.0	11.5	0.0	0.0	1.12~2.10	不满足
3	中山公园站	19.20×16.20	10.0 ~ 12.0	11.0	8.5 ~ 16.5	11.6	0.0 ~ 1.6	0.8	1.10~2.25	不满足
4	君峰路站	20.80×18.37	7.4 ~ 15.6	11.5	0.7 ~ 6.8	3.2	4.7 ~ 9.8	7.3	0.03~0.80	满足
5	海川路站	22.66×18.80	13.3 ~ 19.0	16.1	0.8 ~ 8.3	4.3	7.0 ~ 11.0	9.0	0.03~0.90	满足
6	芝泉路站	23.76×19.13	13.2 ~ 17.0	15.1	6.1 ~ 16.5	8.9	8.2 ~ 14.3	11.2	0.50~0.90	满足

表 6 地表沉降监测数据统计分析

Table 6 Statistical analysis of monitoring data of surface settlement

序号	名称	样本数	范围/mm	均值/mm	变异系数	标准差/mm
1	湛山路站	41	21.19 ~ 80.96	54.75	0.31	16.97
2	江西路站	68	16.79 ~ 76.98	46.33	0.27	12.69
3	中山公园站	61	17.31 ~ 71.54	37.58	0.35	13.30
4	君峰路站	19	2.03 ~ 12.59	6.37	2.09	3.05
5	海川路站	28	0.18 ~ 9.97	4.59	1.87	2.45
6	芝泉路站	19	1.37 ~ 6.22	2.29	0.36	1.18

由此可见,地铁隧道上覆岩层不满足临界安全 覆岩厚度要求的中山公园站、江西路站和站山路站 3座暗挖车站隧道,隧道开挖过程中引起的地表沉 降平均值处于 37.5~54.75 mm 之间,最大值处于 71.54~80.96 mm 之间;说明隧道开挖对周边环境影响较大,围岩稳定程度较差。隧道上覆岩层厚度平均 7.3~11.2 m,满足安全覆岩厚度要求的芝泉路站、海川路站和君峰路站 3座暗挖座车站隧道,地表沉降平均值处于 2.29~6.37 mm 之间,最大值处于6.22~12.59 mm 之间;说明隧道开挖对周边环境影响较小,围岩稳定程度较好。地铁车站隧道地表沉降均值随隧道覆岩厚度总体变化特征如图 9 所示。上述地铁隧道施工过程监测数据统计分析表明,上软下硬地层地铁隧道对周边环境影响程度及围岩自稳性程度与安全覆岩厚度具有良好的相关性。

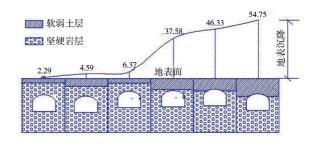


图9 地表沉降随覆岩厚度变化特征(单位:mm)

Fig.9 Variation characteristics of surface settlement with thickness of overlying rock (Unit: mm)

5 结论

(1)上软下硬土岩复合地层隧道拱顶覆岩厚度 对围岩自稳起关键控制作用,软弱地层厚度 H_s越 大,开挖跨度 D越大,则地铁隧道临界安全覆岩厚度

第58卷第2期(总第397期),2021年4月出版



Vol.58, No.2 (Total No.397), Apr.2021



H_{r_c}越大;上软下硬地层将地铁隧道洞室置于下覆岩层中并满足H_{r_c}临界深度,可大大降低地铁建设施工风险和周边环境影响,减少支护措施,节约建设成本。

(2) 得到了上软下硬土岩复合地层地铁隧道临界安全覆岩厚度 *H*_{re} 与软弱地层厚度 *H*_s 之间的数学拟合方程,并绘制了地铁隧道临界安全覆岩厚度、软

弱地层厚度与开挖跨度 " $H_{r_{ev}}$ – H_s –D"三维空间分布图。

(3)通过对青岛地铁隧道施工过程监测数据统计分析,验证了上软下硬土岩复合地层地铁隧道围岩自稳性及对周边环境影响的程度与安全覆岩厚度具有良好的相关性。

参考文献

References

- [1] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003-2016/J449-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

 National Railway Administration of People's Republic of China. Code for Design of Railway Tunnel: TB 10003-2016/J449-2016
 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体分级标准: GB/T 50218-2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
 - Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Engineering Classification of Rock Mass: GB/T 50218–2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
 - Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Engineering of Ground Anchorages and Shotcrete Support: GB 50086–2015[S]. Beijing: Chinese Planning Press, 2015.
- [4] 方玉树, 郑颖人. 重庆市轻轨—号线工程埋置深度的工程地质研究[J]. 工程地质学报, 1994, 2 (1): 73-81. FANG Yushu, ZHENG Yingren. Engineering Geological Research on the Layout Depth of Light Rail Line 1 in Chongqing City[J]. Journal of Engineer Geology, 1994, 2(1): 73-81.
- [5] 张先锋. 青岛地铁暗挖车站埋深的探讨[C]//中国铁道学会. 中国土木工程学会隧道及地下工程学会第九届年会论文集. 北京: 中国铁道学会, 1996.
 - ZHANG Xianfeng. Discussion on Buried Depth of Qingdao Metro Station by Underground Tunneling[C]// Proceedings of the 9th Annual Meeting of Tunnel and Underground Engineering Society of Chinese Civil Engineering Society. Beijing: China Civil Engineering Society, 1996.
- [6] 迟建平. 浅埋暗挖法在青岛地铁车站施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17 (2): 129-133.

 CHI Jianping. Application of Shallow Excavation Tunnelling Method at Qingdao Metro Station[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17 (2): 129-133.
- [7] 胡智民. 土岩组合地层浅埋隧道埋深确定方法研究[J]. 隧道建设, 2015, 35 (4): 322–327.

 HU Zhimin. Study on Determination of Cover Depth of Shallow-Covered Tunnel in Soil-Rock Strata[J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (4): 322–327.
- [8] 张自光, 仇文革. 上软下硬地层暗挖地铁隧道合理岩跨比探讨及实例分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (6): 28-35+42. ZHANG Ziguang, QIU Wenge. Discussion and Case Study of the Rational Ratio of Rock Mass Thickness and Tunnel Span of Mined Subway Tunnels in Upper-Soft and Lower-Hard Ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (6): 28-35+42.
- [9] 彭祖昭, 封 坤, 肖明清, 等. 基于压力拱理论的水下隧道合理覆岩厚度研究[J]. 岩土力学, 2018, 39 (7): 2609–2616. PENG Zuzhao, FENG Kun, XIAO Mingqing, et al. Reasonable Overlying Thickness of Subaqueous Tunnels Based on Pressure Arch Theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (7): 2609–2616.
- [10] 郑颖人, 朱合华, 方正昌. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. ZHENG Yingren, ZHU Hehua, FANG Zhengchang. The Stability Analysis and Design Theory of Surrounding Rocks of Underground Engineering[M]. Binjing: China Communications Press, 2012.
- [11] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28 (1): 97–101+106. ZHANG Liming, ZHENG Yingren, WANG Zaiquan, et al. Application of Strength Reduction Finite Element Method to Road Tun-
 - 76 第58卷第2期(总第397期),2021年4月出版

- nels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (1): 97-101+106.
- [12] 孙 辉, 苏永华, 梁 斌, 基于强度折减法的围岩自稳能力量化方法[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43 (3): 73–78. SUN Hui, SU Yonghua, LIANG Bin. Quantization Methods of Surrounding Rock Self-Stability Based on Strength Reduction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43 (3): 73–78.
- [13] 苏永华, 何新亮, 罗正东. 基于强度折减法的隧道围岩稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (1): 48-53.
 - SU Yonghua, HE Xinliang, LUO Zhengdong. Research on the Stability of Surrounding Rocks Based on the Strength Reduction Method[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41 (1): 48–53.
- [14] 李 杰, 司君岭, 仲 恒, 等. 基于强度折减法的双孔大跨隧道围岩稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50 (增 2): 198–202. LI Jie, SI Junling, ZHONG Heng, et al. A Study of the Rock Mass Stability of Two-tube Large-Span Tunnels Based on Strength Reduction Method[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (S2): 198–202.
- [15] 陈林杰, 梁 波. 基于强度折减法的地铁车站交叉段稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (1): 260–265. CHEN Linjie, LIANG Bo. Stability Analysis of Subway Station Intersections Based on Strength Reduction Method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (1): 260–265.
- [16] 赵文娟, 吴 波. 上软下硬地层隧道围岩稳定性量化评价标准研究[J]. 建井技术, 2017, 38 (1): 35-38+47. ZHAO Wenjuan, WU Bo. Study on Stability Quantitative Evaluation Standard of Surrounding Rockalong Tunnel with Top Soft and Bottom Hard Stratum[J]. Mine Construction Technology, 2017, 38 (1): 35-38+47.
- [17] 张自光. 土岩二元地层地铁隧道合理埋深研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. ZHANG Ziguang. Study on the Reasonable Buried Depth of Metro Tunnel in the Two Element Strata of Soil and Rock[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911-2013[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
 - Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Monitoring Measurement of Urban Rail Transit Engineering: GB 50911–2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Riess, 2013.

Research on Safe Thickness of Overlying Rock Layer above Subway Tunnels in Upper-soft and Lower-hard Stratum

ZHANG Ziguang¹ CAO Guangyong¹.² LI Jianli³ ZHAI Chaojiao¹.²

(1 Anhui Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601; 2 Anhui Research Center for Urban Construction and Underground Space Engineering Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601; 3 Anhui Sijian Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088

Abstract The thickness of the overlying rock above the vault of a funnel in the upper-soft lower-hard soil-rock composite stratum plays a key role in maintaining the self-stability of the surrounding rock. However, there has not been a unified understanding or standard on the safe thickness of the overlying rock of tunnels and its general laws. Based on this, this paper first investigates the safe thickness of the overlying rock of metro tunnels with different thicknesses of weak stratum H_s and excavation spans D through the finite element strength reduction method, obtains the mathematical fitting equation between $H_{r_{cs}}$, the critical safe thickness of the overlying rock, and H_s , the thickness of weak stratum in metro tunnelling, and draws the " $H_{r_{cs}} - H_s - D$ " three-dimensional spatial distribution map of the critical safe thickness of the overlying rock, the thickness of weak stratum and the excavation span Then, through the statistical analysis of the monitoring data during the construction process of Qingdao metro tunnels, it is verified that the self-stability of the tunnel surrounding rock and the degree of its influence on the surrounding environment are positive correlated with the safe thickness of the overlying rock.

Keywords Metro tunnel; Safe thickness of overlying rock; Upper-soft lower-hard stratum

77