

基于小半径曲线隧道盾构施工的 Peck 公式修正及其工程应用

杨令航

(中铁十四局集团隧道工程有限公司, 250013, 济南)

摘 要 [目的] 在城市轨道交通线路规划中, 因受建筑物地基、地下管道和软弱土层等因素影响, 通常会选用曲线隧道乃至小半径曲线隧道。与直线隧道相比, 小半径曲线隧道盾构施工加大了地面沉降失控风险。因此, 需对小半径曲线隧道盾构施工中地面沉降控制进行研究。[方法] 通过计算曲线隧道盾构施工过程中的超挖间隙, 推导出曲线段内每一环的超挖量; 又通过引入地层损失率得出隧道半径与地层损失率的关系; 根据现有 Peck 公式的适用性统计分析结果, 结合基础地层损失率、总地层损失率、超挖导致额外地层损失率, 以及沉降体积切片计算得出了适用于小半径曲线隧道盾构施工的修正 Peck 公式。以太原某地铁线路的工程实例为研究背景, 将修正 Peck 公式计算结果与现场监测数据进行对比, 验证了修正 Peck 公式的适用性。[结果及结论] 工程实例验证结果表明, 修正 Peck 公式对小半径曲线隧道盾构施工具有较好的适用性。

关键词 地铁; 盾构隧道; 小半径曲线; 地面沉降; Peck 公式

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.04.008

Peck Formula Modification of and Engineering Application in Small Radius Curve Shield Tunneling Construction

YANG Linghang

(Tunnel Engineering Co., Ltd., China Railway 14th Bureau Group, 250013, Jinan, China)

Abstract [Objective] In the urban rail transit line planning, curved tunnels, and even small radius curved tunnels are often chosen due to influencing factors such as building foundations, underground pipelines, and weak soil layers. Compared to straight tunnels, the shield tunneling construction in small radius curved tunnels increases uncontrolled land subsidence risk. Therefore, it is necessary to study land subsidence control in shield tunneling construction on small radius curved tunnels. [Method] By calculating the over-excavation gap during curved tunnel shield tunneling construction, the over-excavation quantity for each ring within the curved section is derived.

Furthermore, the relationship between tunnel radius and formation loss rate is obtained by introducing formation loss rate. Based on the applicability statistical analysis of existing Peck formula, a modified Peck formula suitable for shield tunneling construction in small radius curved tunnels is derived considering the base formation loss rate, total formation loss rate, additional formation loss rate due to over-excavation, and the calculation of settlement volume slices. Using an engineering of a metro line in Taiyuan as research background, the results of the modified Peck formula calculation are compared with the on-site monitoring data to validate its applicability. [Result & Conclusion] The verification results from the case study demonstrate that the modified Peck formula is applicable for shield tunneling construction on small radius curved tunnels.

Key words metro; shield tunnel; small radius curve; land subsidence; Peck formula

盾构法施工在城市轨道交通建设中应用广泛,但是在进行小半径曲线隧道开挖时,隧道的上覆土层会无可避免地被扰动,从而引发地面沉降,对隧道的周边环境造成影响。此外,在城市轨道交通规划中,由于地下管道、线路以及地面建筑物等因素的制约,小半径曲线隧道被越来越频繁使用。而小半径曲线隧道盾构施工所引起的地面沉降更为严重,对环境的影响也更为复杂。因而对小半径曲线隧道盾构施工的研究具有重要的理论与工程应用价值。

文献[1]在 Peck 公式的基础上,提出了一种结合插值法的地面沉降预测模型,并将该模型应用于预测地面沉降。结果表明,该预测模型能较好地预测非极值监测数据条件下的地面沉降。文献[2]通过研究西安市区富水砂层地铁盾构施工,提出了地面沉降修正系数和沉降槽宽度修正系数,并对 Peck 公式进行了修正。文献[3]通过对长沙市地铁盾构施工监测数据的分析,提出了沉降槽宽度系数和地

表沉降修正系数,继而得出了与长沙地区地质条件相符合的 Peck 公式。许多学者也对不同地区地铁盾构施工中的地面沉降及安全性问题进行了研究^[4-5]。

本文通过理论分析探讨,对 Peck 公式进行修正,并依托工程应用实例对修正后的 Peck 公式进行验证,还对修正后的 Peck 公式对不同半径、地层损失率、隧道埋深等因素的敏感程度进行了分析讨论。

1 基于曲线隧道盾构施工的 Peck 公式修正

Peck 于 1969 年提出沉降槽体积与地层损失相等,推出地面沉降槽分布曲线和最大沉降量,计算公式为:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_l}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

式中:

$S(x)$ ——距离隧道轴线 x 处地面沉降量;

S_{\max} ——地面最大沉降量;

i ——沉降槽宽度;

V_l ——盾构机实际行程 l 下的地层损失率。

有研究者通过数据回归法,分析了沉降槽宽度的取值范围,得出了隧道埋深与沉降槽宽度的关系,并且还推导出了地面沉降槽宽度的计算式:

$$i = Kz_0 \quad (3)$$

$$W = 2.5i \quad (4)$$

式中:

K ——沉降槽宽度系数;

z_0 ——隧道埋深;

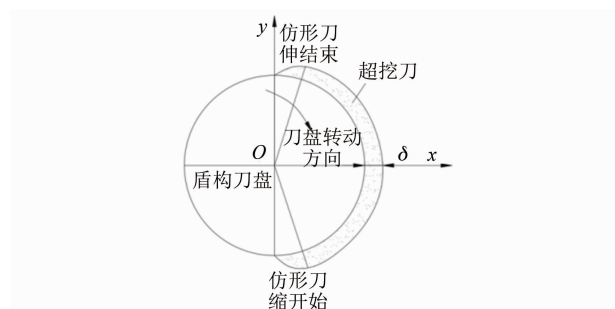
W ——沉降槽的总宽度。

由此得出:地面的最大沉降值取决于多种因素,包括地层损失、隧道埋深、土层条件等,而地层损失又与盾构开挖直径、施工水平等因素有关;沉降分布曲线的形状取决于沉降槽宽度。

1.1 超挖引起的地层损失变化

在小半径曲线隧道盾构施工过程中,常见的盾构机调整机身姿态方式有两种:一是通过与土体挤压进行调整,二是通过超挖刀超挖进行调整。GB 50446—2017《盾构法隧道施工与验收规范》指出:盾构施工在穿越曲线段时,应尽量配合超挖刀的使用,以达到更好的施工效果。其主要原理是使用仿

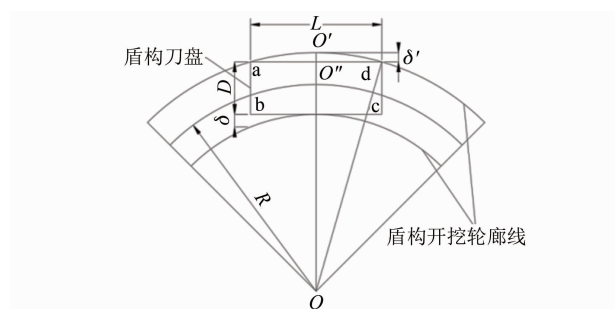
形刀可以在盾构穿越曲线段时在曲线内侧额外挖出一定空间,实现盾构机偏转的同时还能减小其与土体的挤压和摩擦,减少对土层的扰动,降低施工风险,同时减少对刀盘扭矩、推力等参数的干预。现对曲线盾构施工中的超挖量进行计算。盾构机超挖产生间隙示意图如图 1 所示。小半径曲线隧道盾构施工超挖量计算示意图如图 2 所示。



注: δ —盾构机内侧超挖间隙。

图 1 盾构机超挖产生间隙示意图

Fig. 1 Diagram of gap generated by shield machine over-excavation



注: R —隧道曲线半径; D —盾构机刀盘直径; L —盾构机长度; δ —盾构机内侧超挖间隙; δ' —盾构机中部理论间隙; O —盾构曲线圆心; O' —开挖轮廓线外侧中点; O'' —盾构机外侧中点; 矩形 $abcd$ —盾构机模型。

图 2 小半径曲线隧道盾构施工超挖量计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of over-excavation amount calculation for small radius curved tunnel shield construction

由图 1 和图 2 中的几何关系可得:

$$\left(R + \frac{D}{2} + \delta\right)^2 = \left(R + \frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (5)$$

则超挖间隙为:

$$\delta = \frac{\sqrt{(R + \frac{D}{2})^2 + L^2} - (R + \frac{D}{2})}{2} \quad (6)$$

由此可得曲线段内每一环超挖量 $Q_{\text{超}}$ 为:

$$Q_{\text{超}} = l \frac{\pi}{4} [(D + \delta)^2 - D^2] \quad (7)$$

1.2 公式修正

本文定义盾构开挖过程中总地层损失率为 V_l ,

且总地层损失率为基础地层损失率 $V_{基l}$ (不考虑曲率时的地层损失率) 与超挖导致额外地层损失率 $Q_{超l}$ 之和, 即:

$$V_l = V_{基l} + Q_{超l} \quad (8)$$

由地层损失率的定义可知:

$$Q_{超l} = \frac{4Q_{超}}{\pi d^2} \quad (9)$$

在没有充足的试验段沉降样本估计数量情况下, 根据 Peck 公式的适用性统计分析结果, 建议土压平衡盾构地层损失率在 0.03% ~ 3.79%, 平均值为 0.96%, 沉降槽宽度系数的平均值为 0.50。考虑到山西太原汾河漫滩地区地层特征多为粉质黏土、粉细砂构成, 根据我国现有 Peck 公式地层适用性统计资料沉降槽宽度系数取 0.6; 不考虑曲线段超挖的(直线段地层损失率) $V_{基l}$ 取土压平衡盾构机平均值 0.96%。

一般盾构机的盾构部分长约 9 m, 假设盾构机长为 9 m, 考虑到其为两到三段式铰接机身, 因此实际计算中取其折算值 4.5 m。根据式(6)一式(9)可知: 超挖间隙 δ 会随着曲线半径的增加而减小, 超挖量 $Q_{超}$ 随之减少, $V_{超l}$ 也随之减小, 且减小的趋势越来越平缓。

将式(9)代入式(8)中, 再将式(8)代入式(2)中, 得:

$$S_{max} = \frac{D^2 V_l}{4\sqrt{2/\pi} K z_0} \quad (10)$$

则 Peck 公式变形为:

$$S_0(x) = \frac{D^2 V_l}{4\sqrt{2/\pi} K z_0} \exp\left(\frac{-x^2}{2K^2 z_0^2}\right) \quad (11)$$

虽然一般情况下管片拟合所导致的地层土体损失量十分微小, 但地面沉降曲线不再沿隧道的中轴线平均分布。现假设基于曲线隧道盾构施工的修正 Peck 公式为 $S(x)$, 在距离隧道轴线 x 处, 沿隧道掘进方向的沉降切片体积相等, 则 $S(x)$ 与 $S_0(x)$ 有如下关系:

$$S(x) R \theta dx = S_0(x) (R - x) \theta dx \quad (12)$$

式中:

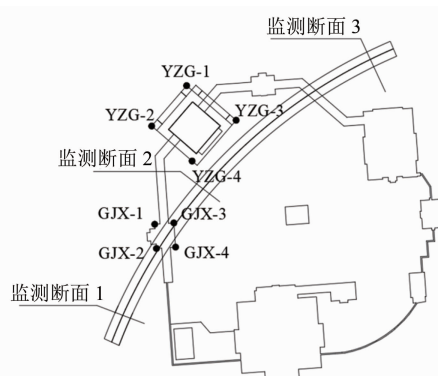
θ ——曲线段中两管片的夹角。

将式(12)代入到式(11)中可得到曲线条件下的修正 Peck 公式:

$$S(x) = \frac{R V_l}{4(R - x) \sqrt{2/\pi} K z_0} \exp\left(\frac{-x^2}{2K^2 z_0^2}\right) \quad (13)$$

2 修正 Peck 公式的验证及其应用

以太原某地铁线路小半径曲线隧道盾构施工为例。所研究盾构段线路的风险等级为 II 级, 结合周边环境, 对施工环境范围内的地面及建(构)筑物进行监测。监测方法为人工监测, 监测项目包括地面沉降、房屋沉降及不均匀沉降。沿该线路中心线纵向每 50 m 设置 1 个监测断面, 在盾构始发和接收段, 适当加密检测断面。监测点布置示意图如图 3 所示。

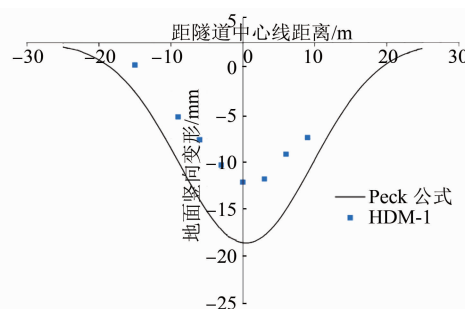


注: YZG、GJX—监测点名称。

图3 监测点平面布置示意图

Fig. 3 Layout diagram of monitoring points

为进一步分析前文中所提出的小半径曲线下修正 Peck 公式对于实际数据的拟合程度, 在给定隧道半径 200 m、隧道埋深 15 m、地层损失率 1.475 8%、沉降槽宽度系数 0.6 情况下, 利用 Origin 软件作出沉降槽曲线的函数图, 并分别与太原某地铁线路监测横断面 HDM1—HDM3 的监测数据进行对比, 结果如图 4—图 6 所示。



注: 横轴—地面线; 纵轴—隧道中心线; 地面竖向变形正值表示隆起, 负值表示沉降。下图同。

图4 修正 Peck 公式与 HDM-1 对比

Fig. 4 Comparison of modified Peck formula and HDM-1

图 4 中, 监测数据的分布趋势与修正 Peck 公式的计算结果大致吻合, 但最大沉降值(14.54 mm)监测点位于隧道中轴线附近。经分析, 可能是 HDM-1

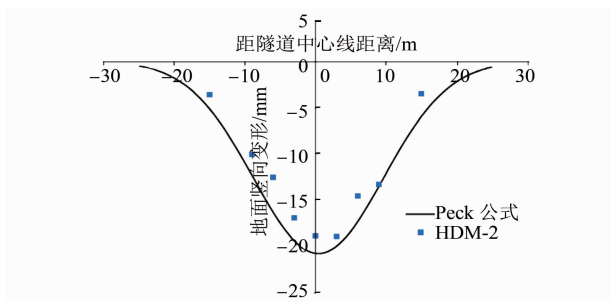


图5 修正 Peck 公式与 HDM-2 对比

Fig. 5 Comparison of modified Peck formula and HDM-2

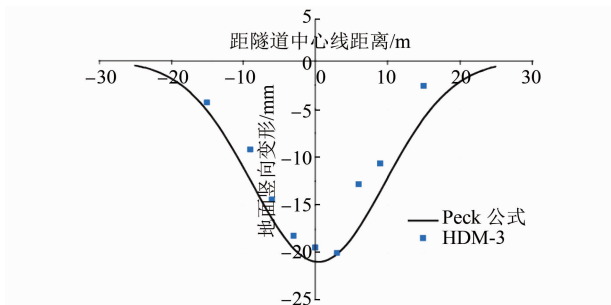


图6 修正 Peck 公式与 HDM-3 对比

Fig. 6 Comparison of modified Peck formula and HDM-3

设置在隧道入口附近,此处为盾构机的始发阶段,盾构机还未调整姿态,也未发生右侧超挖,因此最大沉降向曲线内侧偏移并不明显。而该最大沉降值比理论数据(20.87 mm)减少了 30.3%,考虑该地铁线从明挖段转入盾构段时,在始发段,为防止发生涌水涌泥等事故,保障破除洞门施工安全,对端头进行了 3 m 长冻结与 9 m 长三重管旋喷桩加固(见图 7),提高了土体强度,故 HDM-1 监测值整体偏小。由图 5 与图 6 可见:HDM-2 监测数据中的最大沉降值为 19.01 mm,比理论数据 20.87 mm 减少了 8.9%;HDM-3 监测数据中的最大沉降值为 19.95 mm,比理论数据 20.87 mm 减少了 4.4%。整体来看,这两个断面的监测数据趋势与修正 Peck 公式计算结果大致吻合,近似符合高斯分布。但监测值比 Peck 公式预测值均偏小,考虑为修正 Peck 公式的参数取值的精度尚不够,以及施工现场工艺成熟、所采

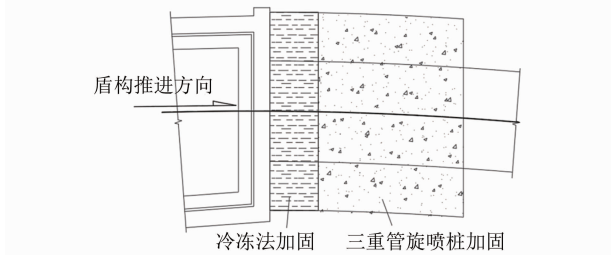


图7 盾构机始发端加固示意图

Fig. 7 Diagram of shield machine originating end reinforcement

取的控制土体沉降措施效果较好。HDM-3 监测数据中的最大沉降值比 HDM-2 的增加了 4.7%,除误差原因外,也可能是断面 3 的埋深相比断面 2 略浅导致。

3 结语

1) 通过对曲线隧道盾构施工过程中超挖间隙的计算,推导出曲线段内每一环的超挖量。又通过引入地层损失率得出隧道半径与地层损失率的关系。根据现有 Peck 公式的适用性统计分析结果,取基础地层损失率为 0.96%,又由 $V_l = V_{基} + V_{超}$,结合沉降体积切片计算得出了适用于小半径曲线隧道盾构施工的修正 Peck 公式,公式中含隧道半径、隧道埋深以及地层损失率等参数。

2) 基于太原某地铁线路小半径曲线隧道盾构施工监测数据,通过本修正 Peck 公式计算结果与监测数据对比发现,断面测点监测数据趋势与 Peck 公式计算结果大致吻合,近似符合高斯分布,并且最大沉降值均在隧道曲线内侧,与理论分析具有一致性。证明该修正 Peck 公式对小半径曲线隧道盾构施工具有较好的适用性。

参考文献

- [1] 方恩权,杨玲芝,李鹏飞.基于 Peck 公式修正的盾构施工地表沉降预测研究[J].现代隧道技术,2015,52(1):143.
FANG Enquan, YANG Lingzhi, LI Pengfei. Prediction of ground settlement induced by metro shield construction based on the modified peck formula[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 143.
- [2] 胡长明,冯超,梅源,等.西安富水砂层盾构施工 Peck 沉降预测公式改进[J].地下空间与工程学报,2018,14(1):176.
HU Changming, FENG Chao, MEI Yuan, et al. Modifying of peck's settlement calculation formula related to metro tunnel construction in Xi'an water-rich sand[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(1): 176.
- [3] 段绍伟,黄磊,鲍灶成,等.修正的 Peck 公式在长沙地铁隧道施工地表沉降预测中的应用[J].自然灾害学报,2015,24(1):164.
DUAN Shaowei, HUANG Lei, BAO Zaocheng, et al. Application of modified Peck formula in surface subsidence prediction of Changsha subway tunnel construction[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 164.
- [4] 谭文辉,于江,孙宏宝,等.地铁 7 号线车站地表施工沉降的 Peck 公式修正[J].地下空间与工程学报,2015,11(增刊 1):200.

(下转第 50 页)

辆运行的平稳性及安全性, v_{tr} 应小于 60 km/h, 当 $u_m = 10$ m/s 时, v_{tr} 应小于 50 km/h; 当 $u_m = 15$ m/s 时, v_{tr} 应小于 40 km/h; 当 $u_m = 20$ m/s 时, v_{tr} 应小于 30 km/h。

5 结论

1) 在横风作用下, 地铁车辆的车速、风速均会对车辆的运行平稳性及安全性有显著影响。当车辆高速运行时, 风速对车辆横向振动的影响更为突出。

2) 对比 3 种风载模型, 非定常随机风载模型对车辆的平稳性影响最明显。

3) 根据 3 种风载模型对应风速下的车辆限速结果, 采用工况 4 (即非定常随机风载模型) 作用下的车辆限速值更符合安全设计要求。列车在直线上运行时, 当风速分别为 10 m/s、15 m/s 及 20 m/s 时, 对应的车辆限速值分别为 80 km/h、60 km/h 及 50 km/h。列车在半径为 600 m 的曲线上运行时, 车辆通常应限速 60 km/h, 当风速分别为 10 m/s、15 m/s 及 20 m/s 时, 对应的车辆限速值分别为 50 km/h、40 km/h 及 30 km/h。

参考文献

- [1] 赵思和. 轻轨车辆-有砟轨道-高架桥梁振噪特性分析[D]. 北京交通大学, 2022.
ZHAO Sihe. Vibration and noise characteristics analysis of light rail vehicle-ballasted track-elevated bridge[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [2] 郝艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 8.
XI Yanhong, MAO Jun, GAO Liang, et al. Research on the limit-

- ed safe speed of a high-speed train under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 8.
- [3] 任尊松, 徐宇工, 王璐雷, 等. 强侧风对高速列车运行安全性影响研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 46.
REN Zunsong, XU Yugong, WANG Lulei, et al. Study on the running safety of high-speed trains under strong cross winds[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6): 46.
- [4] 彭伟恺. 高速列车侧风安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
PENG Yikai. Study on cross-wind safety of high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [5] 阎石, 郑伟. 简谐波叠加法模拟风谱[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(1): 1.
YAN Shi, ZHENG Wei. Wind load simulation by superposition of harmonic[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 2005, 21(1): 1.
- [6] 谢小山, 王为林, 陈彦恒. 阵风下地铁列车曲线通过安全性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 38.
XIE Xiaoshan, WANG Weilin, CHEN Yanheng. Study on metro train safety when passing through curved section under gust[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 38.
- [7] 周劲松. 铁道车辆振动与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
ZHOU Jinsong. Vibration and control of railway vehicles[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.

- 收稿日期:2023-06-12 修回日期:2023-08-11 出版日期:2024-04-10
Received:2023-06-12 Revised:2023-08-11 Published:2024-04-10
- 第一作者:龙苒, 硕士研究生, 2133466@tongji.edu.cn
通信作者:周劲松, 教授, jinsong.zhou@tongji.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 43 页)

- TAN Wenhui, YU Jiang, SUN Hongbao, et al. Modification of peck formula for surface settlement of Metro Line 7 station during construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 200.
- [5] 王国富, 孙捷城, 路林海, 等. 曲线盾构隧道施工稳定性及致险水平研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 575.
WANG Guofu, SUN Jiecheng, LU Linhai, et al. Study on stability influential factors and risk level classification of shield tunnel with small radius curve[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 575.
- [6] 韩煊, 刘赅伟, STANDING J R. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 134.
HAN Xuan, LIU Chengwei, STANDING J R. Structural settlement of existing tunnel caused by new tunnel excavated under-

- neath[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 134.
- [7] 吴昌胜, 朱志铎. 不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 19.
WU Changsheng, ZHU Zhiduo. Statistical analysis of ground loss ratio caused by different tunnel construction methods in China[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(1): 19.

- 收稿日期:2023-09-13 修回日期:2023-12-15 出版日期:2024-04-10
Received:2023-09-13 Revised:2023-12-15 Published:2024-04-10
- 作者:杨令航, 高级工程师, 95339270@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license