

富水地层盾构掘进引起地铁隧道地表沉降规律研究^{*}

韩文君¹ 严红霞² 欧建军²

(1. 常州市轨道交通发展有限公司, 213022, 常州;

2. 常州工程职业技术学院建筑工程学院, 213164, 常州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以常州地铁1号线工程为依托,对盾构隧道施工过程中的盾构掘进参数和地表沉降监测结果进行分析,得到了常州地区典型土层情况下盾构施工引起的沉降量、地层损失率、沉降槽宽度系数变化规律,并分析了隧道埋深、拱顶覆土、注浆参数等对地表沉降规律的影响。研究结果表明:盾构掘进引起的地表沉降曲线符合Peck曲线,平均沉降值在10 mm以内,平均地层损失率为0.68%;地表最大沉降量随隧道埋深的增大而减小;隧道拱顶覆土为粉质黏土时的地表沉降和地层损失率明显大于拱顶覆土为粉砂;地表最大沉降量、地层损失率均随着同步注浆量、土仓压力增加而减小,但是沉降槽宽度系数随之增大,且拱顶覆土为粉砂时较粉砂夹粉土变化更显著。

关键词 盾构隧道;地表沉降;地层损失率;沉降槽宽度

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.08.008

Research on Metro Tunnel Formation Subsidence Pattern Caused by Shield Tunneling in Water-rich Stratum

HAN Wenjun, YAN Hongxia, OU Jianjun

Abstract Based on Changzhou metro Line 1 project, the monitoring results of shield tunneling parameters and ground subsidence during tunnel construction are analyzed, the changing law of settlement, formation loss rate and width coefficient of settlement tank caused by shield tunnel construction in the typical stratum area of Changzhou City are summarized, the influencing factors of tunnel depth, dome soil, grouting parameters on surface settlement are analyzed. The results show that the surface settlement curve caused by shield tunneling accords with the Peck curve, the average settlement value is within 10 mm, and the average formation loss rate is 0.68%; the maximum settlement value of the surface decreases with the increase of the tunnel buried depth; the settlement and formation loss rate of tunnel arch covered with clay is obviously larger than that covered with silt; with the increase of synchro-

nous grouting and soil pressure, the maximum settlement of the ground surface and formation loss rate decreases, but the width coefficient of settlement tank increases. The changes are more significant in tunnel arch covered with clay than those in tunnel arch covered with silt.

Key words shield tunnel; surface settlement; formation loss rate; settlement tank width

First-author's address Changzhou Rail Transportation Development Limited Company, 213022, Changzhou, China

对于盾构掘进引起的地表沉降,国内外学者大多采用经验公式法、理论解析法和数值分析法^[4-5]进行研究,而经验公式法的应用相对较多。目前,在研究盾构掘进引起地表变形的经验方法中,Peck于1969年基于大量实测数据分析所提出的经验公式的应用最为广泛,此后国外的众多学者相继对Peck公式加以研究及论证^[5-8]。

虽然现有的关于盾构施工引起地表沉降的研究成果较多,但是针对常州地层特点的相关研究还极少。本文以常州地铁1号线黄河路站—龙虎塘站区间的实际监测数据为基础,分析了在不同因素影响下地铁隧道区间地表的沉降量、地层损失率及沉降槽宽度系数的变化规律,得到常州地区地层条件下地铁隧道开挖对地表沉降影响的特点。

1 工程背景

常州地铁1号线黄河路站—龙虎塘站区间从黄河路站起,沿通江中路前行,连续下穿沪宁高速匝道及主线桥梁和京沪高铁连续桥梁,以曲线(曲线半径为435 m)下穿拟建的常州高级中学新北校区操场看台,进入辽河路,后进入龙虎塘站。区间隧道长为1 423 m,埋深为15~25 m。

^{*} 住房和城乡建设部科学技术项目(2018-K4-008);江苏省建设系统科技项目(2018ZD200);江苏省大学生创新创业训练计划项目(201913102025Y)

区间所处地层自上而下为杂填土、淤泥质黏土、粉质黏土、黏土、粉质黏土、粉砂夹粉质黏土、粉砂、粉砂夹粉土、黏质粉土、粉质黏土。区间隧道基本在粉砂中穿越,其拱顶覆土为粉砂夹粉土或粉质黏土。

盾构掘进主要参数:掘进速度为 30~50 mm/min,盾构推力控制在 6 000~15 000 kN,刀盘扭矩控制在 2 500 kN·m 以内,刀盘转速控制在 1.3~1.8 r/min,同步注浆量控制在 4.5~5.2 m³/环,上部土仓压力控制在 60~150 kPa。在实际施工过程中,同步注浆量为 2.16~2.21 m³/环;局部注浆量增大,平均值为 8.09 m³/环。XD101 环至 XD 1101 环注浆量分布如图 1 所示;土仓压力在 103~280 kPa 之间,土仓压力在 XD 101 环至 XD 1101 环的分布如图 2 所示。

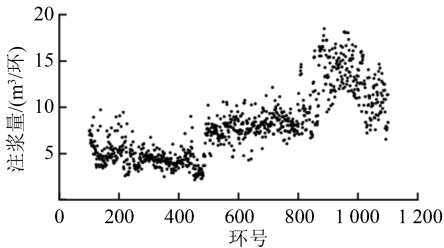


图 1 XD101 环至 XD1101 环注浆量分布图

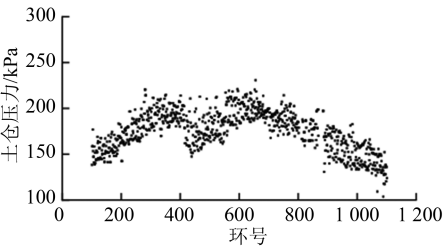


图 2 XD101 环至 XD1101 环土仓压力分布图

沿线路走向地表沉降监测点间距为 6 m(约每 5 环布置一个点)。由于施工现场环境复杂,不能保证每个断面的监测数据完整可用,故本文选用黄河路站—龙虎塘站区间共 15 个数据较为完整的监测断面进行分析。

2 单线隧道地表沉降分析

2.1 监测数据沉降曲线

利用 Peck 曲线的正态函数公式进行监测数据分析,其计算公式为:

$$S(x) = S_{\max} \exp[-x^2/(2i^2)] \tag{1}$$
$$S_{\max} = A/i \tag{2}$$

式中:

- $S(x)$ ——地表沉降量;
- S_{\max} ——地表最大沉降量;
- x ——距隧道中心线的距离;
- i ——沉降槽宽度系数;
- A ——中间参数,其值为 $V/\sqrt{2\pi}$, V 为地层损失。

通过公式(1)对 15 个检测断面沉降数据进行分析,通过 A 换算得到地层损失 V ,地层损失除以隧道开挖面积即为地层损失率 P_v 。监测点及沉降拟合示意图如图 3 所示,地表沉降参数计算结果及监测断面相关参数如表 1 所示。

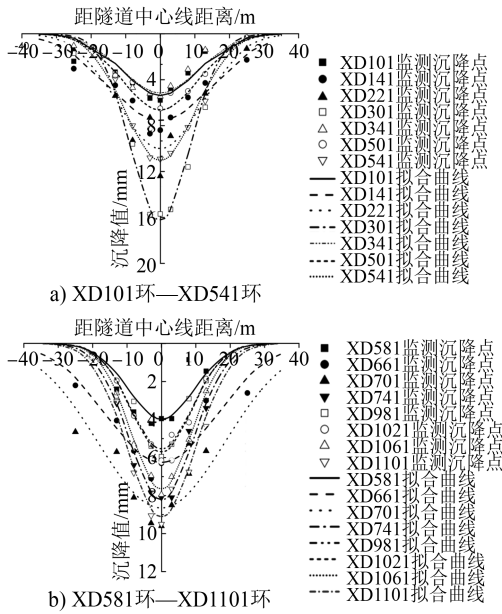


图 3 黄河路站—龙虎塘站区间监测点沉降拟合示意图

由图 3 及表 1 可知:盾构隧道施工过程中,地表总体沉降基本上在 5~10 mm 之间(占采集断面的 80%),沉降量相对较小。在 XD301 环处拱顶覆土变化为粉质黏土,使该处产生了 16.2 mm 的地表沉降,远大于沉降的一般水平;在拱顶覆土为粉砂时,沉降最大值也仅为 11 mm。沉降槽宽度系数除个别断面,基本分布在 9~11 m 左右,分布较为稳定,具有一般性。地层损失率在 0.30%~1.23%之间,平均地层损失率为 0.68%。

2.2 埋深对沉降的影响分析

利用 XD1101、XD1061、XD501、XD661 4 个断面的监测数据分析埋深对沉降的影响,其拱顶覆土均为粉砂夹粉土,同步注浆量及盾构掘进参数相近,具体数据对比如表 2 所示。

表 1 地表沉降参数计算结果及监测断面相关参数表

| 环号 | S_{\max}/mm | i/m | $V/(\text{m}^3/\text{m})$ | $P_V/\%$ | G/m^3 | 平均土仓压力/kPa | 线路平面 | 盾构姿态 | 拱顶覆土 |
|--------|----------------------|--------------|---------------------------|----------|----------------|------------|------|------|-------|
| XD101 | 5.38 | 10.75 | 0.145 | 0.45 | 7.39 | 138.06 | 曲线 | 下坡 | 粉砂夹粉土 |
| XD141 | 7.54 | 14.83 | 0.280 | 0.87 | 3.78 | 160.72 | 曲线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD221 | 9.99 | 12.12 | 0.304 | 0.94 | 6.31 | 165.57 | 曲线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD301 | 16.20 | 8.60 | 0.349 | 1.09 | 4.15 | 189.61 | 曲线 | 下坡 | 粉质黏土 |
| XD341 | 5.14 | 11.10 | 0.143 | 0.44 | 4.09 | 185.5 | 曲线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD501 | 6.62 | 11.07 | 0.184 | 0.57 | 8.83 | 167.83 | 曲线 | 下坡 | 粉砂夹粉土 |
| XD541 | 11.00 | 10.22 | 0.282 | 0.88 | 5.98 | 186.37 | 曲线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD581 | 3.97 | 9.56 | 0.095 | 0.30 | 4.62 | 182.12 | 直线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD661 | 6.25 | 15.82 | 0.248 | 0.77 | 7.31 | 193.72 | 直线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD701 | 8.65 | 18.26 | 0.396 | 1.23 | 7.88 | 199.66 | 直线 | 下坡 | 粉砂 |
| XD741 | 8.21 | 9.39 | 0.193 | 0.60 | 9.85 | 194.23 | 直线 | 上坡 | 粉砂 |
| XD981 | 5.53 | 9.00 | 0.125 | 0.39 | 15.61 | 133.61 | 直线 | 上坡 | 粉砂 |
| XD1021 | 5.69 | 8.93 | 0.127 | 0.40 | 12.84 | 0 | 直线 | 上坡 | 粉砂 |
| XD1061 | 7.63 | 8.85 | 0.169 | 0.53 | 9.18 | 0 | 直线 | 上坡 | 粉砂 |
| XD1101 | 9.10 | 9.85 | 0.225 | 0.70 | 8.36 | 123.84 | 直线 | 上坡 | 粉砂夹粉土 |

注：G 为注浆量

表 2 不同埋深断面地表沉降量变化规律

| 环号 | S_{\max}/mm | i/m | $P_V/\%$ | G/m^3 | 埋深 h/m |
|--------|----------------------|--------------|----------|----------------|-----------------|
| XD1101 | 9.10 | 9.85 | 0.70 | 8.36 | 16.96 |
| XD1061 | 7.63 | 8.85 | 0.53 | 9.18 | 17.84 |
| XD501 | 6.62 | 11.07 | 0.57 | 8.83 | 23.23 |
| XD661 | 6.25 | 15.82 | 0.77 | 7.31 | 24.17 |

注：h 为隧道埋深

由表 2 及图 3 可知,随着区间隧道埋深 h 的增加,盾构掘进所引起的地表沉降最大值呈减小趋势,但是地层损失率与埋深的相关性不大。沉降槽宽度系数与埋深线性拟合关系为 $i = -2.6 - 0.68 h$ (式中 i 和 h 均以 m 为单位)。

2.3 拱顶覆土对沉降的影响分析

选用埋深、盾构姿态、线路状态相近的断面进行对比分析,结果如表 3 所示,纵向沉降如图 4 所示。

表 3 不同拱顶覆土断面地表沉降量变化规律

| 环号 | S_{\max}/mm | i/m | $P_V/\%$ | 拱顶覆土 | h/m |
|-------|----------------------|--------------|----------|------|--------------|
| XD221 | 9.99 | 12.12 | 0.94 | 粉砂 | 20.4 |
| XD301 | 16.20 | 8.60 | 1.09 | 粉质黏土 | 20.9 |
| XD341 | 5.14 | 11.10 | 0.44 | 粉砂 | 21.4 |

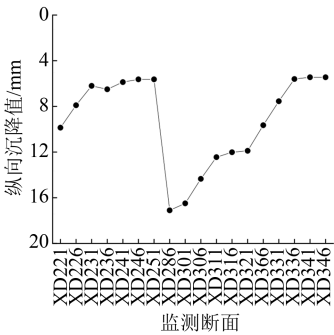


图 4 XD221 环—XD341 环纵向沉降曲线

由表 3 及图 4 可知,隧道拱顶覆土为粉质黏土时,相较于拱顶覆土为粉砂的断面,其地表最大沉降值、层损失率明显增大。在拱顶覆土发生变化时,其地表沉降值也发生突变。这是因为在地质断面处,施工控制工程处理不当导致的。拱顶覆土为粉质黏土时,沉降槽宽度系数 i 较拱顶覆土为粉砂时小,前文拟合公式不再适用,可采用 $i = -2.6 - 0.53 h$ (式中 i 和 h 均以 m 为单位)。

2.4 线路平面对沉降的影响分析

取表 4 所示的 6 个断面分析线路平面对沉降的影响,其埋深相近,盾构姿态、拱顶覆土基本相同。

表 4 不同线路平面断面地表沉降量变化规律

| 环号 | 线路平面 | S_{\max}/mm | i/m | $P_V/\%$ | h/m |
|-------|------|----------------------|--------------|----------|--------------|
| XD341 | 曲线 | 5.14 | 11.10 | 0.44 | 21.40 |
| XD501 | 曲线 | 6.62 | 11.07 | 0.57 | 23.23 |
| XD541 | 曲线 | 11.00 | 10.22 | 0.87 | 23.50 |
| XD581 | 直线 | 3.97 | 9.56 | 0.29 | 23.77 |
| XD661 | 直线 | 6.25 | 15.82 | 0.77 | 24.17 |
| XD701 | 直线 | 8.65 | 18.26 | 1.23 | 24.28 |

由表 4 可知：

- 1) 线路平面为曲线的 3 个断面的地表沉降 S_{\max} 平均值为 7.58 mm,线路平面为直线的 3 个断面的地表沉降 S_{\max} 平均值为 6.29 mm。可见当线路平面为曲线时,其施工造成的地表沉降值更大。
- 2) 由表 4 及表 1 可知,除去 XD701 断面这个地层损失率较为异常的点,线路平面为曲线段的地层损失率要高于直线段的。
- 3) 由表 4 的数据无法得出沉降槽宽度系数 i 随线路平面变化的特点。

2.5 同步注浆量对沉降的影响分析

以 XD221、XD1061、XD1021、XD981 4 个断面为第一组断面,以 XD541、XD701、XD501 3 个断面为第二组断面。两组断面的拱顶覆土除 XD501 断面处为粉砂夹粉土外,其余均为粉砂,埋深大致相同。各断面数据对比见表 5。注浆量与断面地表最大沉降关系如图 5 所示。注浆量与地层损失率关系如图 6 所示。

| 表 5 不同注浆量断面地表沉降参数对比表 | | | | | |
|----------------------|----------------|----------------------------|--------------|----------|--------------|
| 环号 | G/m^3 | S_{max}/mm | i/m | $P_v/\%$ | h/m |
| XD221 | 6.31 | 9.99 | 12.12 | 0.94 | 20.40 |
| XD1061 | 9.18 | 7.63 | 8.85 | 0.52 | 17.84 |
| XD1021 | 12.84 | 5.69 | 8.93 | 0.39 | 18.71 |
| XD981 | 15.61 | 5.53 | 9.00 | 0.38 | 19.42 |
| XD541 | 5.98 | 11.00 | 10.22 | 0.87 | 23.50 |
| XD701 | 7.88 | 8.65 | 18.26 | 1.23 | 24.28 |
| XD501 | 8.83 | 6.62 | 11.07 | 0.57 | 23.23 |

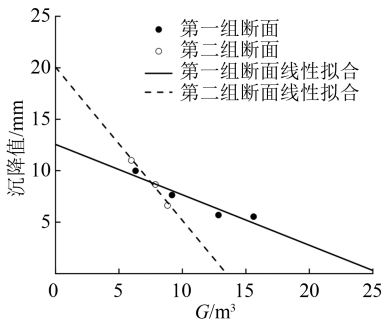


图 5 注浆量与断面地表最大沉降关系图

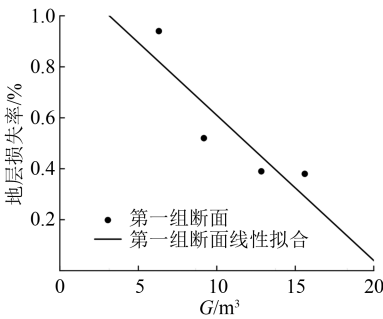


图 6 注浆量与地层损失率关系图

由表 5 及图 5、图 6 可知:

1) 随着注浆量的增加,埋深大致相同断面的地表最大沉降相应减小。对注浆量和地表最大沉降进行线性拟合,对于第一组断面,得到: $S_{\text{max}} = 12.56 - 0.49 G$;对于第二组断面,得到 $S_{\text{max}} = 20.06 - 1.49 G$ (其中 S_{max} 以 m 为单位)。

由图 5 可见,在不同埋深区段,注浆量与地表最大沉降有较好的线性相关性。

2) 由图 6 可见,注浆量与地层损失率也有较好线性相关性。除 XD701 断面地层损失率异常外,随注浆量增加,地层损失率逐步减小。对第一组断面的注浆量和地层损失率进行线性拟合,得到: $P_v = 1.18 - 0.057 G$ 。

2.6 土仓压力对沉降的影响分析

不同土仓压力时的地表沉降如表 6 所示。其中,XD1101 与 XD101 断面拱顶覆土为粉砂夹粉土,XD541 与 XD741 断面拱顶覆土为粉砂,断面埋深接近,注浆量大致相同。

| 表 6 不同土仓压力断面地表沉降参数对比表 | | | | | |
|-----------------------|------------|----------------------------|--------------|----------|--------------|
| 环号 | 平均土仓压力/kPa | S_{max}/mm | i/m | $P_v/\%$ | h/m |
| XD1101 | 123.84 | 9.10 | 9.85 | 0.69 | 16.96 |
| XD101 | 138.06 | 5.38 | 10.75 | 0.45 | 17.04 |
| XD541 | 186.37 | 11.00 | 10.22 | 0.87 | 23.50 |
| XD661 | 193.72 | 6.25 | 15.82 | 0.77 | 24.17 |

由表 6 及表 1 可知:

1) XD1101 断面地表最大沉降值比 XD101 断面地表最大沉降值大 3.72 mm,增加了 67.9%; XD541 断面地表最大沉降值比 XD741 断面地表最大沉降值大 4.75 mm,增加了 76%。由此可见,地表沉降量受土仓压力的影响较大,随着土仓压力的增大而减小。

2) 当监测断面拱顶覆土为粉砂夹粉土时,土仓压力由 123.84 kPa 增加到 138.06 kPa,地表最大沉降值由 9.10 mm 减少到 5.38 mm,平均土仓压力每增加 1 kPa,沉降值减少 0.26 mm;当监测断面拱顶覆土为粉砂时,平均土仓压力由 186.37 kPa 增加到 193.72 kPa,地表最大沉降值由 11.00 mm 减少到 6.25 mm,平均土仓压力每增加 1 kPa,沉降值减少 0.64 mm。可见,当土仓压力改变时,拱顶覆土为粉砂较粉砂夹粉土更易产生地表沉降。

3) 随着土仓压力增大,沉降槽宽度系数也随之增大,地层损失率相应减小。

3 结论

本文以常州地铁 1 号线工程为依托,对盾构隧道施工过程中的盾构掘进参数和地表沉降监测结果进行统计,得到了常州地区典型土层情况下盾构施工引起的沉降量、地层损失率、沉降槽宽度系数变化规律,并分析了隧道埋深、拱顶覆土、注浆参数等对地表沉降规律的影响,得到以下结论:

(下转第 39 页)

失值的困难。本文提出对风险发生的概率与损失采用区间值表示,并基于信息熵理论,提出区间熵概念,推演了区间熵理论计算式,并依据专家调查法中各位专家为工程风险分析评价指标提供信息量的多少,计算各评价指标的权重区间,确定评价对象的风险值的区间表达,实现了与现行国家标准中风险分级采用区间表达相统一。

参考文献

- [1] CASAGRANDE A. Role of the calculated risk in earthwork and foundation engineering[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1965(4): 1.
- [2] EINSTEIN H H, VICK S G. Geological model for a tunnel cost model. [J]. Proc Rapid Excavation and Tunneling Conf, 1974(2): 1701.
- [3] EINSTEIN H H. Risk and risk analysis in rock engineering. [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996(11): 131.
- [4] 胡群芳. 基于地层变异的盾构隧道工程风险分析及其应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [5] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006(1): 13.
- [6] 黄宏伟, 顾雷雨. 基坑工程风险管理研究进展[J]. 岩土工程

学报, 2008(增刊1): 651.

- [7] HO K, LEROI E, ROBERDS B. Quantitative Risk Assessment: Application, Myths And Future Direction[C]//International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM International Symposium. Melbourne, Australia; ISRM. 2000.
- [8] BADRI A, NADEAU S, GBODOSSOU A. A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013(6): 1145.
- [9] 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [10] 李俊伟, 黄宏伟. 熵度量法在地下工程风险分析中的应用初探, 地下空间与工程学报, 2005(6): 925.
- [11] 黄玉洁, 唐作其, 梁静. 基于信息熵与三参数区间的信息安全风险评估[J]. 计算机工程, 2018(12): 178.
- [12] 汤永利, 徐国爱, 姐心忻, 等. 基于信息熵的信息安全风险分析模型[J]. 北京邮电大学学报, 2008(2): 50.
- [13] JAYNES E T. Information theory and statistical mechanics[J]. The Physical Review, 1957(4): 620.
- [14] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948(1): 379.
- [15] 杨姗姗. 信息安全风险分析方法与风险感知实证研究[D]. 北京: 中央财经大学, 2015.

(收稿日期: 2020-02-07)

(上接第34页)

1) 在常州地层条件下, 盾构掘进引起的地表沉降曲线符合 Peck 曲线, 单线施工沉降在 3.97~16.20 mm 之间, 平均沉降值在 10.00 mm 以内; 地层损失率在 0.30%~1.23% 之间, 平均地层损失率为 0.68%。

2) 地表最大沉降量随隧道埋深的增大而减小, 沉降槽宽度系数与隧道埋深线性相关。

3) 隧道拱顶覆土为粉质黏土断面的沉降和地层损失率明显大于拱顶覆土为粉砂的断面, 但是沉降槽宽度系数较拱顶覆土为粉砂时的小。

4) 隧道同步注浆量和土仓压力对地表沉降影响较大, 地表最大沉降量、地层损失率均随着同步注浆量增加而减小; 地表最大沉降量和地层损失率随着土仓压力增加而减小, 但是沉降槽宽度系数随之增大, 且拱顶覆土为粉砂时较粉砂夹粉土变化更显著。

参考文献

- [1] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望

[J]. 西南交通大学学报, 2015(1): 97.

- [2] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010(9): 1354.
- [3] 朱才辉, 李宁. 地铁施工诱发地表最大沉降量估算及规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(1): 3543.
- [4] 胡长明, 冯超, 梅源, 袁一力. 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(1): 176.
- [5] 郑鑫, 麻凤海. 长春地层地铁隧道施工的 Peck 公式改进[J]. 地下空间与工程学报, 2017(3): 732.
- [6] 杨子奇, 葛克水, 李皓. 北京地区浅埋隧道开挖引起地表沉降的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016(1): 225.
- [7] 丁智, 王凡勇, 魏新江. 软土双线盾构施工地表变形实测分析与预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019(1): 61.
- [8] 冯慧君, 俞然刚. 双线隧道盾构掘进对地表沉降影响的数值分析[J]. 铁道工程学报, 2019(3): 78.

(收稿日期: 2020-04-12)