

修正 Peck 公式在南昌地区富水砂土地层 地铁盾构施工中的应用*

周诚华¹ 汪顺敏² 林晓琼² 许开成² 陈梦成² 张 季²

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌)

摘 要 [目的]受地质条件、隧道埋深、隧道直径及上覆土层性质等因素影响,Peck 公式在南昌地区富水砂土地层地铁盾构施工实际使用过程中计算结果的误差较大,需要对公式进行修正。[方法]依托南昌地铁 3 号线某区间盾构施工的现场实测数据及其他实测数据,综合考虑了隧道埋深、隧道半径及上覆土体内摩擦角这 3 个地面沉降的主要影响因素,得到了适用于南昌地铁富水砂土地层地铁盾构施工的地面沉降槽宽度计算公式。通过 Peck 公式逆运算,得到了地层损失率的取值范围。引入最大沉降值修正系数,对 Peck 公式进行了线性回归修正。[结果及结论]基于修正后 Peck 公式得到的预测地面沉降曲线与实测沉降曲线吻合度良好。该公式能够有效预测因地铁盾构施工引起的地面沉降。

关键词 城市轨道交通; 盾构施工; 地面沉降; 富水砂土地层; Peck 公式修正

中图分类号 U455.43;U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245735

Application of Modified Peck Formula for Metro Shield Tunneling Construction in Water-bearing Sandy Soil Layers in Nanchang
ZHOU Chenghua¹, WANG Shunmin², LIN Xiaoqiong², XU Kaicheng², CHEN Mengcheng², ZHANG Ji²

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., 330038, Nanchang, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China)

Abstract [Objective] Due to the influence of geological conditions, tunnel burial depth, tunnel diameter, and properties of the overlying soil layer, the Peck formula exhibits significant deviations when applied to the shield tunneling construction in water-bearing sandy soil layers in Nanchang area. Therefore, a modification of the formula is necessary. [Method] Based on the field-measured data from a shield tunneling construction in a interval on Nanchang Metro Line 3, along

with other measured data, the tunnel burial depth, tunnel radius, and internal friction angle of the overlying soil 3 primary factors that affect land subsidence are comprehensively considered. A calculation formula for land subsidence trough width applicable to Nanchang Metro shield tunneling in water-bearing sandy soils is derived. The range of formation loss rate is determined through inverse calculation using Peck formula. A correction coefficient for maximum subsidence is introduced to perform linear regression modification of Peck formula. [Result & Conclusion] The land subsidence curves predicted by the modified Peck formula closely match the measured subsidence curves, indicating that the formula can effectively predict land subsidence caused by metro shield tunneling construction.

Key words urban rail transit; shield tunneling construction; land subsidence; water-bearing sandy soil layer; Peck formula modification

南昌地区地下水资源丰富,地层中广泛分布着富水砂土地层。在地铁盾构施工掘进过程中,若施工控制不当,易引起大范围的地面沉降。为确保盾构隧道掘进的安全性,需建立一种适合南昌地区富水砂土地层的地面沉降预测方法。

目前,针对盾构施工引起的地面沉降,其计算方法主要有经验公式法^[1]、模型试验法^[2]及数值模拟法^[3]。其中,以 Peck 公式为代表的经验公式法具有合理、简便等优点,在地面沉降预测中得到了广泛应用。

受地质条件、隧道埋深、隧道直径等因素的影响,Peck 公式在使用过程中需要对相关参数进行修正^[4-5]。富水砂土地层是一种性质不稳定地层,其结构松散、孔隙率大,针对此地层条件下盾构隧道施工引起的地面沉降预测问题,已有学者开展了相关研究^[6-8]。然而,目前针对南昌地区富水砂土地层的相关研究较少,且文献[6-8]在对沉降槽宽度

* 国家自然科学基金项目(52278180)

进行取值时,均未综合考虑隧道埋深、隧道半径、上覆土体内摩擦角三者共同作用的情况。文献[9-23]则从不同的角度,对富水砂土砂层的地铁盾构隧道或地铁车站进行了研究。在这些文献及文献[24]的基础上,本文提出了适合在南昌地区富水砂土地层中应用的地面沉降槽宽度取值公式,并通过引入最大沉降值修正系数对 Peck 公式进行修正,以期对南昌地区富水砂土地层因地铁盾构掘进引起的地面沉降预测提供参考。

1 区域概况

1.1 工程概况

南昌地铁3号线区间隧道某标段采用盾构法施工。盾构刀盘直径为6.25 m,管片内径为5.4 m,外径为6.0 m,隧道顶覆土厚度为9.8~17.6 m。场地内的主要含水层为赋存孔隙潜水的砂砾石层,埋深为7.0~11.0 m。区间主要场地从上至下各土层的物理力学参数如表1所示。区间地层土体内摩擦角的加权平均值为28.66°。

表1 盾构隧道区间主要场地土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of key site soil layers in shield tunnel interval

土层	平均厚度/m	密度/(g/cm ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	2.25	1.80	10.0	10
粉质黏土	5.25	1.98	39.5	16
细砂	4.75	1.89		30
砾砂	9.25	1.96		35
圆砾	7.10	2.00		36
强风化泥质粉砂	2.40	2.20	40.0	25

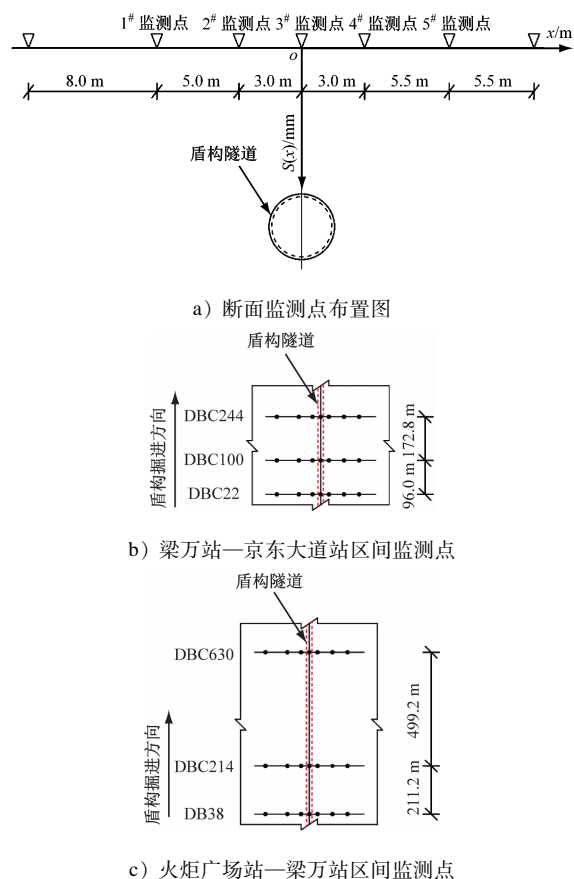
1.2 监测点布置

为了对地面沉降进行监测,在盾构始发段、到达段60 m范围内每19.2 m设置1个监测断面,其余线路区段则每9.6 m设置1个监测点,每57.6 m设置1个监测断面。本工程地面监测点的布置方式为:从隧道中心线正上方开始横向水平布点,采用间距为3.0~8.0 m的不对称布点方式。地面监测点布置如图1所示。

2 Peck 公式预测分析

2.1 Peck 经验公式

Peck 经验公式是在不考虑土体排水固结和蠕



注: x —地面沉降点与隧道中心线的水平距离,单位 m; $S(x)$ —距离隧道中心线 x 处的地面沉降值,单位 mm。

图1 地面监测点布置图

Fig.1 Layout diagram of ground monitoring points

变的理论基础上,得出的沉降槽宽度近似值回归模型。采用该公式计算得到的隧道开挖引起的断面沉降曲线近似于正态分布。基于地面沉降槽体积等于地层损失体积的假定,Peck 经验公式可表示为:

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

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_{\text{loss}}}{2.5i} \quad (2)$$

$$V_{\text{loss}} = \eta\pi R^2 \quad (3)$$

式中:

S_{\max} ——隧道中心线上方的最大地面沉降值,单位 mm;

i ——地面沉降槽宽度,单位 m;

V_{loss} ——隧道施工引起的单位长度土体损失量,单位 m³/m;

η ——地层损失率,单位 %;

R ——隧道半径,单位 m。

2.2 地面沉降槽宽度取值

i 的主要影响因素为隧道埋深、隧道半径及上覆土体内摩擦角。文献[24]综合考虑这 3 个影响因素,提出了 i 的计算式:

$$i = m \left[R + Z \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + n \quad (4)$$

式中:

m, n ——拟合参数;

Z ——隧道中心线处埋深,单位 m;

φ ——土体的内摩擦角,单位($^\circ$)。

对于非均质土体, φ 取各种土体内摩擦角的加权平均值。选取南昌地区富水砂土地层 19 组地铁线路实测沉降数据,这些数据的 φ 均为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。由此反演出各自的 i 并通过线性拟合得到 m, n 的取值。此时 i 的计算式为:

$$i = 0.424\,71 \left[R + Z \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] + 0.808\,51 \quad (5)$$

将 $R = 3.1\text{ m}$ 、 $Z = 14.1\text{ m}$ 、 $\varphi = 28.66^\circ$ 代入式(5),得到 $i = 5.677\text{ m}$ 。

2.3 地层损失率取值

η 的取值可通过对 Peck 经验公式进行逆运算求得,联立式(1)、式(2)及式(3),可得:

$$\eta = \frac{S_{\max} i \sqrt{2\pi}}{\pi R^2} \quad (6)$$

基于式(5),以及南昌地铁 3 号线 50 组监测断面处的实测地面沉降数据,通过 Peck 公式逆运算,可得到各监测断面处的 η 。统计各监测断面处 η 的分布情况,其结果如表 2 所示。由表 2 可知:南昌地区富水砂土地层的 η 在 $0.2\% \sim 0.6\%$ 之间的概率为 72%。本文取 η 的平均值(0.532%)作为该类地

表 2 地层损失率统计分布

Tab. 2 Statistical distribution of ground loss rates

η 的取值范围/%	在该范围内的断面数量/个	在该范围内的监测断面数量与监测断面总数的比值/%
[0.1,0.2)	1	2
[0.2,0.3)	6	12
[0.3,0.4)	7	14
[0.4,0.5)	13	26
[0.5,0.6)	10	20
[0.6,0.7)	4	8
[0.7,0.8)	6	12
[0.8,0.9)	2	4
[0.9,1.0]	1	2

层的地层损失率。

2.4 Peck 公式预测曲线与实测数据的对比

如图 1 c) 所示,选取南昌地铁 3 号线火炬广场站—梁万站区间的 3 个地面监测断面,将 DBC38 命名为断面 1,DBC630 命名为断面 2,DBC214 命名为断面 3。将这 3 个断面的沉降实测值与基于 Peck 经验公式计算得到的沉降预测曲线进行对比,其结果如图 2 所示。

由图 2 可知:基于 Peck 经验公式计算得到的预测曲线与断面 2 的实测值比较吻合;断面 3 实测的最大沉降为 16.64 mm ,与 Peck 经验公式预测的最大沉降(11.28 mm)相比,二者的误差达 47.5% 。因此,需要对 Peck 经验公式进行修正。

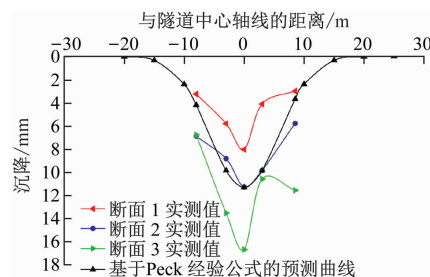


图 2 3 个断面实测沉降值与基于 Peck 经验公式计算得到的沉降预测曲线的对比

Fig. 2 Comparison between measured subsidence values at three cross-sections and subsidence predicted curves calculated using Peck empirical formula

3 Peck 公式的回归分析

3.1 线性回归方法

采用最小二乘法对 Peck 经验公式进行拟合和修正。对式(1)两边同时取对数,可得:

$$\ln S(x) = \ln S_{\max} + \frac{1}{i^2} \left(-\frac{x^2}{2} \right) \quad (7)$$

令 $y = \ln S(x)$ 。以 $\ln S(x)$ 和 $-x^2/2$ 为回归变量进行求解,令 $\ln S_{\max}$ 为回归后的常数项, $1/i^2$ 为回归后的线性系数,则有:

$$L_{xx} = \sum \left(\frac{-x_j^2}{2} \right) - \frac{1}{n} \left(\sum \frac{x_j^2}{2} \right)^2 \quad (8)$$

$$L_{xy} = \sum \left[\left(\frac{-x_j^2}{2} \right) \ln S(x_j) \right] - \frac{1}{n} \sum \left(\frac{-x_j^2}{2} \right) \sum \ln S(x_j) \quad (9)$$

$$L_{yy} = \sum \ln^2 S(x_j) - \frac{1}{n} \left[\sum \ln S(x_j) \right]^2 \quad (10)$$

式中:

L_{xx} —— $-x^2/2$ 的离差平方和;

L_{xy} —— $\ln S(x)$ 和 $-x^2/2$ 的离差和积;

L_{yy} —— $\ln S(x)$ 的离差平方和;

n ——样本点总数;

x_j ——第 j 个沉降监测点与隧道中心线的距离。

设 \hat{a} 为回归方程的常数项, \hat{b} 为回归后的线性系数。令 $\hat{a} = \ln S(x) - \hat{b}(-x^2/2)$, $\hat{b} = L_{xy}/L_{xx}$, 则回归后的方程为:

$$\ln S(x) = \hat{a} + \hat{b}(-x_j^2/2) \quad (11)$$

联立式(7)和式(11), 可进一步求得线性回归计算式为:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{\hat{b}x^2}{2}\right) = (\exp \hat{a}) \left[\exp\left(-\frac{\hat{b}x^2}{2}\right)\right] \quad (12)$$

3.2 实测地面沉降数据回归分析

对断面1—断面3的实测沉降数据进行回归分析, 3个断面的实测沉降值如表3所示。3个断面各回归参数的取值如表4所示。3个断面实测沉降值与拟合沉降值的对比结果如图3所示。

表3 3个断面的实测沉降值

Tab.3 Measured subsidence values at three cross-sections

断面	x/m	$S(x)/mm$	$\ln S(x)$
断面1	-8.0	3.24	1.18
	-3.0	5.79	1.76
	0	8.01	2.08
	3.0	4.11	1.41
	8.5	2.99	1.10
断面2	-8.0	6.88	1.93
	-3.0	8.80	2.17
	0	11.25	2.42
	3.0	9.84	2.29
	8.5	5.78	1.75
断面3	-8.0	6.76	1.91
	-3.0	13.49	2.60
	0	16.64	2.81
	3.0	10.57	2.36
	8.5	11.54	2.45

表4 3个断面各回归参数的取值

Tab.4 Values of each regression parameter at three cross-sections

断面	L_{xx}	L_{xy}	L_{yy}	\hat{a}	\hat{b}
断面1	179.862 5	24.387 75	0.674 32	1.824 835	0.020 670
断面2	179.862 5	17.837 25	0.294 08	2.345 222	0.015 120
断面3	179.862 5	15.159 00	0.448 92	2.624 182	0.012 848

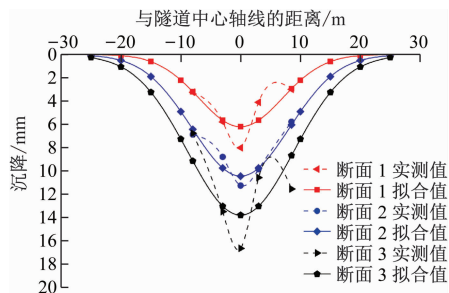


图3 3个断面实测沉降值与拟合沉降值的对比结果

Fig.3 Comparison results of the measured and fitted subsidence values at three cross-sections

由图3可知:① 实测地面沉降曲线与拟合地面沉降曲线的误差在2 mm以内,具有较好的一致性。这表明本文提出的回归方法可以有效预测南昌地区富水砂土地层地铁盾构施工引起的地面沉降。② 拟合后各断面出现地面沉降的范围在 x 值为 $[-25 \text{ m}, 25 \text{ m}]$ 区域,这与采用式(5)计算得到的Peck预测曲线的地面沉降范围一致,这也表明了本文拟合得到的 i 的取值公式具有合理性。

4 Peck经验公式修正及其适用性分析

4.1 Peck经验公式修正

根据上文分析,以 $\eta = 0.532\%$ 、 $i = 5.677$ 为预测参数的Peck经验公式不能很好地预测南昌地区富水砂土地层中因地铁隧道施工引起的地面沉降规律,需要运用回归分析的方法,对Peck公式进行修正。设 α 为地面最大沉降值修正系数,修正后的计算式为:

$$S(x) = \alpha S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (13)$$

对式(13)进行线性转换,两边同时取对数,可得:

$$\ln S(x) = \ln \alpha S_{\max} + \left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (14)$$

由式(11)和式(14)可得 α 的计算式为:

$$\alpha = \frac{\exp \hat{a}}{S_{\max}} \quad (15)$$

选取南昌地铁3号线的56组实测地面沉降数据,经过对实测数据的回归分析,计算得到各组数据对应的 \hat{a} ,其分布情况如表5所示。由表5可知: \hat{a} 的取值主要分布区间为 $[1.5, 3.5]$,该区间 \hat{a} 的数量占实测数据总数的80.4%。

将 \hat{a} 的取值代入式(15),可得 α 的取值范围为 $[0.397, 1.780]$ 即:对修正后的Peck公式,取 $\alpha = 0.397$ 为地面最大沉降值修正系数的修正上限值,

表 5 \hat{a} 值分布情况Tab.5 Distribution of \hat{a} values

\hat{a} 的取值范围	该范围内 \hat{a} 的数量	该范围内 \hat{a} 的数量与实测数据总数的比值/%
[0.1,0.5)	2	3.6
[0.5,1.0)	4	7.1
[1.0,1.5)	4	7.1
[1.5,2.0)	8	14.3
[2.0,2.5)	24	42.9
[2.5,3.0)	13	23.2
[3.0,3.5)	0	0
[3.5,4.0]	1	1.8

取 $\alpha = 1.780$ 为地面最大沉降值修正系数的修正下限值。将修正后的 Peck 值(含上限值及下限值)与 3 个断面实测沉降值进行对比,其结果如图 4 所示。由图 4 可知:实测地面沉降曲线均在修正后的 Peck 公式预测曲线范围内。由此可认为: α 的取值范围是合理的;修正后的 Peck 公式可以较好地预测南昌地区富水砂土地层中因地铁盾构施工引起的地面沉降。

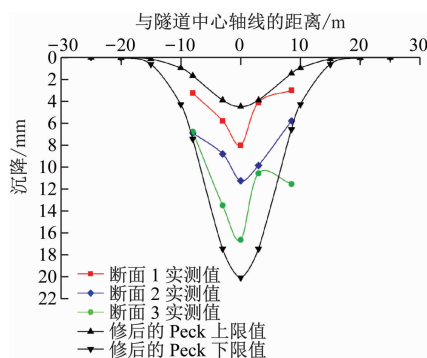


图 4 修正后的 Peck 值与 3 个断面实测沉降值的对比

Fig.4 Comparison between modified Peck values and measured subsidence values at three cross-sections

4.2 修正后 Peck 公式在不同埋深下的适用性

本文选取的监测时期为 2019 年的 5 月份和 6 月份,该时期属南昌地区的丰水期,监测区间的地下水位变化不大,因此本文仅讨论修正后的 Peck 公式在不同埋深下的适用性。

如图 1 b) 所示,选取梁万站—京东大道站区间的另外 3 个地面监测断面,将 DBC22 命名为断面 4,将 DBC100 命名为断面 5,将 DBC244 命名为断面 6。断面 4 的埋深为 12.0 m,断面 5 的埋深为 13.5 m,断面 6 的埋深为 16.0 m。不同埋深断面的地面实测沉降值如表 6 所示。

表 6 不同埋深断面的地面实测沉降值

Tab.6 Land measured subsidence values at cross-sections of different burial depths

x/m	断面 4 沉降/ mm	断面 5 沉降/ mm	断面 6 沉降/ mm
8.0	5.35	4.27	6.73
3.0	8.80	9.18	12.39
0	10.20	12.89	19.12
3.0	9.88	8.34	11.44
8.5	4.94	3.33	5.76

将不同埋深断面处修正后 Peck 值(含上限值及下限值)与 3 个断面实测沉降值进行对比,其结果如图 5 所示。由图 5 可知:不同埋深处的地面实测沉降曲线均位于修正后的 Peck 公式预测曲线范围内,这表明修正后的 Peck 公式在不同埋深工程中的预测结果具有有效性。

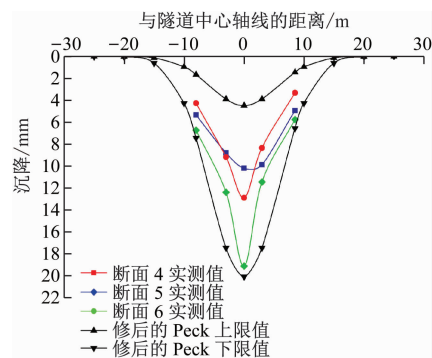


图 5 不同埋深断面处修正后 Peck 值与 3 个断面实测沉降值的对比

Fig.5 Comparison between modified Peck values at cross-sections of different burial depths and measured subsidence values at three cross-sections

5 结语

1) 本文综合考虑了隧道埋深、隧道半径及上覆土体内摩擦角这 3 个因素,由此得到地面沉降槽宽度 i 的计算方法,该算法与常规算法相比更为合理。

2) 在南昌地区富水砂土地层中,地层损失率 η 的取值范围在 0.2% ~ 0.6% 之间较为合理。以 $\eta = 0.532\%$ 、 $i = 5.677$ 为预测参数的 Peck 公式中,地面最大沉降值修正系数取值为 0.397 ~ 1.780 时,修正后的 Peck 公式可以较好地预测因地铁盾构施工引起的地面沉降。

3) 本文修正后的 Peck 公式可应用于隧道埋深变化较大的盾构隧道工程中,为地面沉降预警提供参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王海涛, 苏鹏, 孙昊宇, 等. 软岩地层盾构隧道施工引起的地层沉降预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3549.
WANG Haitao, SU Peng, SUN Haoyu, et al. Prediction of ground settlement caused by shield construction in soft rock ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3549.
- [3] 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, 36(3): 78.
FENG Huijun, YU Rangang. Numerical analysis of influence of double-line tunnel shield tunneling on ground surface settlement [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 78.
- [4] 刘俊杰, 刘俊伟, 任晓敏, 等. 土岩复合地层隧道盾构开挖地表沉降 Peck 公式修正[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 171.
LIU Junjie, LIU Junwei, REN Xiaomin, et al. Modification of Peck formula for ground settlement caused by shield tunneling in soil-rock composite stratum [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(2): 171.
- [5] 路林海, 孙捷城, 周国锋, 等. 黏性土地层曲线盾构施工地表沉降预测研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(5): 99.
LU Linhai, SUN Jiecheng, ZHOU Guofeng, et al. Research on the surface deformation prediction for curved shield construction in clay stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(5): 99.
- [6] 杨峰峰, 晏红波, 田力, 等. Peck 修正公式在富水砂卵石地层盾构隧道地表沉降预测中的适用性研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(11): 72.
YANG Fengfeng, YAN Hongbo, TIAN Li, et al. Research on the applicability of Peck modified formula in surface subsidence prediction of shield tunnel with water-rich sand and pebble formation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(11): 72.
- [7] 张为社, 王渭明, 贺广良, 等. 青岛地铁穿越富水弱胶结地层支护方案优化研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(10): 81.
ZHANG Weishe, WANG Weiming, HE Guangliang, et al. Optimization of supporting scheme for water-rich and weakly consolidated strata tunnel of Qingdao Metro [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(10): 81.
- [8] 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.
- [9] 陈志敏, 范长海, 张常书. 地铁盾构下穿建筑群施工地面建筑沉降控制方案及富水砂-黏土层沉降预测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 39.
CHEN Zhimin, FAN Changhai, ZHANG Changshu. Building subsidence control in metro shield tunneling under construction ground of buildings and water-rich sand-clay stratum subsidence prediction method [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 39.
- [10] 刘银环. 近海富水地铁车站基坑管井降水技术[J]. 城市道桥与防洪, 2022(11): 182.
LIU Yinhan. Dewatering technology of tube well for foundation pit of offshore water-rich metro station [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(11): 182.
- [11] 赵凯, 罗富荣, 郝志宏, 等. 富水地铁车站大管幕隔水工法研究[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(3): 67.
ZHAO Kai, LUO Furong, HAO Zhihong, et al. Superpipe roof water-isolating method for metro station in water-rich strata [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(3): 67.
- [12] 卢福聪, 索潇, 吴波, 等. 承压富水地层地铁车站基坑降水与回灌施工渗流稳定性及地面变形研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 155.
LU Fucong, SUO Xiao, WU Bo, et al. Seepage stability and ground surface deformation in metro station foundation pit dewatering and recharge construction in confined water-rich stratum [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 155.
- [13] 王伟敏. 超前帷幕全断面注浆法在富水地铁暗挖隧道中的应用[J]. 科技视界, 2016(12): 222.
WANG Weimin. Application of full-face grouting method with advanced curtain in underground excavation tunnel of water-rich subway [J]. Science & Technology Vision, 2016(12): 222.
- [14] 于忠波, 李世君, 施龙焱. 平旋喷技术在软岩富水地铁隧道中的应用及优化[J]. 隧道建设, 2012, 32(3): 377.
YU Zhongbo, LI Shijun, SHI Longyan. Application and optimization of horizontal jet grouting piles in construction of tunnels in water-rich soft rock ground [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(3): 377.
- [15] 庄心文. 富水砂土地层地铁隧道注浆止水技术研究[J]. 科学技术创新, 2023(27): 133.
ZHUANG Xinwen. Research on grouting and sealing technology for tunnels in water rich sandy soil layers [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(27): 133.
- [16] 张跃明, 钟久强, 余金, 等. 渗流条件下富水砂层盾构隧道开挖面临界支护压力计算分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 100.
ZHANG Yueming, ZHONG Jiuqiang, YU Jin, et al. Calculation and analysis of critical supporting pressure for shield tunnel excavation face in water-rich sandy stratum under seepage condition [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): 100.

(下转第 56 页)

- sis of mechanical behaviors of lining of large-diameter metro shield tunnel in soft ground[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S2): 151.
- [15] 黄昌富, 龙文, 宋棋龙, 等. 加固范围对软土浅埋超大直径盾构掘进地表沉降的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊2): 76.
- HUANG Changfu, LONG Wen, SONG Qilong, et al. Influence of reinforcement range on surface settlement of shallow-buried super-large diameter shield tunneling in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 76.
- [16] 刘念. 软土地区超大直径盾构穿越运营地铁桥梁数值分析[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增刊1): 494.
- LIU Nian. Numerical analysis of super-large diameter shield crossing subway bridge in soft soil area[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(S1): 494.
- [17] 杨仕彬. 软土地层大直径泥水盾构施工地表沉降及预防控制研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(6): 192.
- YANG Shibin. Research on ground settlement and prevention control of large-diameter slurry shield construction in soft soil stratum[J]. Railway Construction Technology, 2023(6): 192.
- [18] 高翔. 天津软土地层运营盾构隧道纵向不均匀沉降分析及应对措施探讨[J]. 路基工程, 2019(3): 135.
- GAO Xiang. Analysis of longitudinal uneven settlement of shield tunnel operated in Tianjin soft ground and the countermeasures[J]. Subgrade Engineering, 2019(3): 135.
- [19] 唐小君. 软土地区超大直径盾构穿越运营地铁隧道数值分析[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(6): 131.
- TANG Xiaojun. Numerical analysis of large-diameter shield tunneling beneath subway tunnel[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(6): 131.
- [20] 彭元栋, 刘爽, 曾仕琪, 等. 珠海松洲海域软土超大直径盾构隧道建设关键技术[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(2): 50.
- PENG Yuandong, LIU Shuang, ZENG Shiqi, et al. Key techniques for super-large diameter shield tunnel constructed in marine super-soft soil in Mangzhou Zhuhai[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2022, 29(2): 50.
- 收稿日期:2024-12-25 修回日期:2025-02-27 出版日期:2025-07-10
Received:2024-12-25 Revised:2025-02-27 Published:2025-07-10
· 通信作者:李潇,高级工程师,373053418@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
- ~~~~~
- (上接第 49 页)
- [17] 杜明芳, 张鹏, 易领兵, 等. 富水砂层地铁盾构区间机械法联络通道施工影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 88.
- DU Mingfang, ZHANG Peng, YI Lingbing, et al. Impact of metro shield interval mechanical method connecting passage construction in water-rich sandy stratum[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(7): 88.
- [18] 韩旭, 刘俊城, 张建辉, 等. 深厚富水砂土地层深基坑开挖降水变形研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊2): 2246.
- HAN Xu, LIU Juncheng, ZHANG Jianhui, et al. Study on dewatering deformation of deep foundation pit excavation in deep water-rich sandy soil stratum[J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 2246.
- [19] 赵宝华, 谭鑫, 王光辉, 等. 富水砂土地层中水平全方位高压喷射(MJS)桩施工环境影响的数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 65.
- ZHAO Baohua, TAN Xin, WANG Guanghui, et al. Numerical analysis of environmental impact of horizontal MJS pile construction in water-rich sandy stratum[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 65.
- [20] 李忠诚, 王烨晟, 韩少泽. 富水砂土地层中基坑围护结构缺陷对周边环境的危害分析及预防应对措施[J]. 中国标准化, 2021(22): 149.
- LI Zhongcheng, WANG Yesheng, HAN Shaoze. Hazard analysis and preventive measures of foundation pit retaining structure defect in watered sand stratum to surrounding environment[J]. China Standardization, 2021(22): 149.
- [21] 郭振欣. 富水砂土地层中深长基坑开挖变形的研究[J]. 交通世界, 2018(33): 34.
- GUO Zhenxin. Study on excavation deformation of deep and long foundation pit in water-rich sandy soil stratum [J]. TranspoWorld, 2018(33): 34.
- [22] 李开艳. 富水砂土地层中泥水平衡式顶管施工技术[J]. 江西建材, 2015(11): 86.
- LI Kaiyan. Construction technology of mud-water balanced pipe jacking in water-rich sandy soil stratum[J]. Jiangxi Building Materials, 2015(11): 86.
- [23] 宋战平, 张丹锋, 曲建生, 等. 承压富水砂土地层桩洞法施工变形控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 33.
- SONG Zhanping, ZHANG Danfeng, QU Jiansheng, et al. Study on the deformation control of PBA construction method in pressure water sand stratum[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 33.
- [24] ZHANG Z, CHEN J, ZHANG M, et al. Modified Peck method of evaluating tunnelling-induced ground movements based on measured data[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(9): 862.
- 收稿日期:2024-08-04 修回日期:2024-11-04 出版日期:2025-07-10
Received:2024-08-04 Revised:2024-11-04 Published:2025-07-10
· 第一作者:周诚华,正高级工程师,834347787@qq.com
通信作者:张季,教授,jizhang@ecjtu.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