

地铁盾构隧道同步注浆地表沉降控制效果 影响因素的现场试验研究*

颜 静¹ 王 飞² 付春青³ 刘 维¹ 史培新¹

(1. 苏州大学轨道交通学院, 215131, 苏州; 2. 苏州轨道交通集团公司, 215004, 苏州;

3. 北京住总集团有限责任公司, 100101, 北京//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 地铁盾构隧道施工中采用同步注浆来抑制地层损失引起的地层沉降。以苏州轨道交通 1 号线为工程背景, 选择地层特性、埋深等外部条件相似的 3 个试验段, 分别研究同步注浆量、注浆压力和注浆材料等因素对地表沉降产生的影响, 提出适用于苏州地区的盾构同步注浆参数及地层沉降控制措施。研究表明: 建议注浆量采用 $3.5 \text{ m}^3/\text{环}$, 注浆量超过 $3.5 \text{ m}^3/\text{环}$ 时, 地表沉降控制效果不再明显; 地表沉降受注浆压力波动影响较大, 建议注浆压力保持在 $0.35 \sim 0.40 \text{ MPa}$ 范围内, 不宜超过 0.40 MPa , 注浆压力过大会导致劈裂、跑浆, 不利于沉降控制; 可硬性浆液对地表沉降的控制效果比惰性浆液要好。

关键词 地铁盾构隧道; 同步注浆; 地表沉降; 现场试验

中图分类号 U455.43; U456

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.010

Field Experiment on Influencing Factors of Surface Settlement Control Effect Induced by Shield Tunnel Synchronous Grouting

YAN Jing, WANG Fei, FU Chunqing, LIU Wei, SHI Peixin

Abstract In shield tunneling, the synchronous grouting method is adopted to control the ground settlement caused by ground loss. Suzhou rail transit Line I is taken as the engineering background, 3 test sections with similar external conditions like formation characteristics and buried depth are selected, to study the influencing factors of grouting amount, grouting pressure and grouting materials on ground settlement respectively. On this basis, synchronous grouting parameters of shield and stratum settlement control measures suitable for Suzhou area are proposed. The research shows that when the grouting amount per loop is more than 3.5 m^3 , the effect of surface settlement control is no longer obvious; since the surface settlement is greatly influenced by the fluctuation of grouting pressure, it is

recommended that the grouting pressure be controlled within $0.35 \sim 0.4 \text{ MPa}$ range, or the higher pressure will cause the splitting and slurry running, not conducive to settlement control; the cement grout performs better on ground settlement inhibition than the ordinary grout without cement.

Key words shield tunneling; synchronous grouting; ground settlement; field experiment

First-author's address School of Rail Transportation, Soochow University, 215131, Suzhou, China

盾构法施工因其安全快速的优点, 已广泛应用于各大城市地下隧道的修建。盾构法施工时, 由于盾壳自身厚度、超挖等因素的影响, 盾尾脱离管片后, 地层与管片之间会形成盾尾间隙, 土体将向这一间隙产生位移, 从而引起地面沉降^[1]。盾尾间隙一般在 $8 \sim 16 \text{ cm}$ 左右^[2], 并随盾构直径的增大基本成线性增大。当隧道直径达到 14 m 以上时, 盾尾间隙可达 20 cm ^[3]。目前, 通常采用同步注浆的方式填充间隙, 以减小地表沉降。

为了达到良好的控制效果, 需要合理地使用注浆系统, 选择好注浆材料、注浆压力及注浆量等参数, 且应按照施工工况, 因地制宜进行调整。注浆浆液要有较好的填充性、流动性及抗离析性, 且满足一定的早期强度、硬化后体积收缩率低等要求^[4]。目前, 同步注浆一般分为双液浆和单液浆两大类。其中, 单液浆包括可硬性浆液和惰性浆液。同步注浆要求地层中的注浆压力大于该点的静止水压及土压力之和, 避免注浆压力过大, 做到尽量填补而不劈裂, 一般控制在 $0.25 \sim 0.40 \text{ MPa}$ 。注浆量在实际工程中往往根据工程经验和监测数据来确定。在软土地层, 注浆率一般介于 $180\% \sim 250\%$

* 国家自然科学基金项目(51978430, 51778386)

的范围内^[5-6]。

现有对同步注浆地层沉降控制效果影响因素的研究手段多集中于数值计算^[7-9]和理论分析^[10-11],通过现场试验开展研究的较少。但现场监测试验恰能真实反映隧道周边土体特性、同步注浆施工参数和地表沉降的实际情况。通过合理的现场试验设计所得出的沉降影响规律能更符合实际。本文依托苏州轨道交通 1 号线(以下简为“1 号线”)隧道建设实例,选择与周边环境相似的区段建立注浆量、注浆压力、注浆材料等影响因素的现场试验段,结合现场监测数据,分析不同影响因素对同步注浆地层沉降控制效果的影响规律,提出合理的同步注浆施工参数,为后续类似地层盾构法施工提供有益参考。

1 工程概况

1 号线呈东西走向,全长 25.74 km,共设 24 个车站。隧道区间采用盾构法施工。盾构采用统一尺寸的土压平衡盾构机,外径为 6.34 m,主长为 8.58 m;衬砌管片外径为 6.2 m,环宽为 1 200 mm。

1 号线沿线区域广泛分布有杂填土、黏土、粉土、粉质黏土及粉砂土等类型土。地表水常水位在 1.10~1.30 m,其年变幅在 1.0 m 以内。盾构在富水软土中掘进时,施工参数难以控制,地表沉降容易超标。盾构掘进中通常采用同步注浆来控制地层损失引起的瞬时沉降。1 号线主要采用惰性浆液和可硬性浆液作为同步注浆材料,材料用量如表 1 所示。

表 1 1 号线不同同步注浆材料用量

Tab.1 Mix proportion of synchronous grouting materials for Line 1

单位:kg/m³

浆液类型	不同材料的用量				
	水泥	砂	粉煤灰	膨润土	水
可硬性浆液	90~100	500~550	350~400	90~100	440~550
惰性浆液		668~680	400~420	90~100	340~400

为研究同步注浆量、注浆压力、注浆材料等参数单因素变化对地表沉降控制的影响,在 1 号线选择隧道线形、地层分布及周边环境等条件相似的试验段进行现场试验。在单个区间中,随盾构掘进距离加大,隧道线形、穿越地层、埋深等均会发生较大变化,故试验段在多个区间中选取。

2 现场试验

在 1 号线沿线选取 3 个试验段,分别进行注浆量、注浆压力和注浆材料等参数对地表沉降影响规律的现场试验研究。各试验段同步注浆施工参数如表 2 所示。

表 2 1 号线各试验段同步注浆施工参数

Tab.2 Construction parameters of synchronous grouting in each test section on Line 1

试验段	管片环数	注浆量/ (m ³ /环)	注浆压力/ MPa	注浆材料
I	R340—R360	2.6~2.8	0.30~0.34	可硬性浆液
	R361—R380	3.2~3.6	0.30~0.35	
	R381—R330	3.6~3.9	0.30~0.35	
II	R270—R290	3.4~3.6	0.27~0.40	可硬性浆液
	R291—R310	3.4~3.6	0.35~0.45	
	R311—R330	3.4~3.6	0.35~0.39	
III	R120—R170	3.5~4.0	0.35~0.40	惰性浆液

如图 1 所示,试验段 I 位于汾湖路站—玉山公园站区间;试验段盾构共掘进 60 环(340~400 环),其中,R340—R360 环注浆量为 2.6~2.8 m³/环,R361—R380 环注浆量为 3.2~3.6 m³/环,R381—R400 环注浆量为 3.6~3.9 m³/环;试验段注浆压力保持在 0.30~0.35 MPa 范围内;注浆材料采用可硬性浆液。盾构隧道主要穿越⑤₃粉质黏土层和部分④₂粉砂夹粉土层,上覆地层主要为①杂填土、③₁黏土、③₂粉质黏土、④₁粉土及④₂粉砂夹粉土。盾构埋深为 13 m 左右。试验段地层分布较为均匀,随盾构掘进,地层变化不大。在其他沉降影响因素相似的前提下,通过改变同步注浆量,结合现场监测数据分析其对沉降控制效果的影响。

试验段 II 位于狮子山站—塔园路站区间。盾构共掘进 60 环(R270—R330 环),其中,R270—R290 环注浆压力为 0.27~0.40 MPa,R291—R310 环注浆压力为 0.35~0.45 MPa,R311—R330 环注浆压力为 0.35~0.39 MPa;试验段注浆量保持在 3.4~3.6 m³/环范围内;注浆材料为可硬性浆液。试验段 II 主要穿越⑤₃层和部分④₂层,上覆地层主要为①杂填土、③₁黏土、③₂粉质黏土、④₁粉土及④₂粉砂夹粉土。隧道埋深为 13 m 左右。试验段 II 主要研究同步注浆压力变化对地表沉降控制的影响。

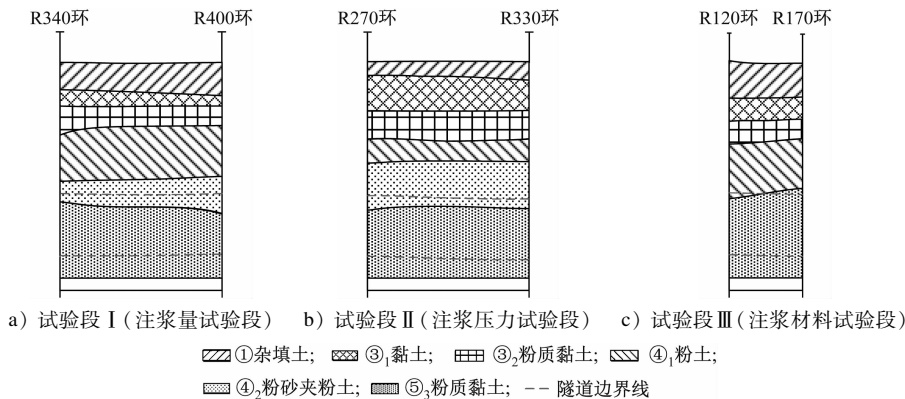


图 1 1 号线现场试验段地质情况图

Fig. 1 The geological situation of field test section on Line 1

试验段Ⅲ位于临顿路站—相门站区间。盾构共掘进 50 环(R120—R170 环),其中,试验段注浆量保持在 3.5 ~ 4.0 m³/环范围内,注浆压力为 0.35 ~ 0.40 MPa,注浆材料为惰性浆液。试验段Ⅲ主要穿越⑤₃层,上覆地层为①杂填土、③₁黏土、③₂粉质黏土和④₁粉土。隧道埋深为 13 m 左右。与试验段Ⅰ、Ⅱ相比,试验段Ⅲ地层分布稍有变化,但其物理力学性质指标相似。对试验段Ⅲ,以及与试验段Ⅲ注浆量、注浆压力类似的试验段Ⅱ中 R311—R330 环的监测数据进行对比,分析注浆材料对地表沉降控制效果的影响。各试验段地质情况如图 1 所示。各试验段地层物理力学性质如表 3 所示。

表 3 1 号线现场试验段地层参数

Tab.3 Formation parameters of field test section on Suzhou metro Line 1

土层	重度/ (kN/m ³)	压缩模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	静止土压 力系数
①杂填土	18.5	4.2	4.0	12.0	0.55
③ ₁ 黏土	19.0	8.0	8.0	13.4	0.50
③ ₂ 粉质黏土	19.1	4.3	28.0	14.3	0.60
④ ₁ 粉土	19.0	5.6	27.5	14.4	0.53
④ ₂ 粉砂夹粉土	19.7	14.2	8.4	29.1	0.47
⑤ ₃ 粉质黏土	19.1	5.5	11.3	14.5	0.50

3 现场试验结果分析

3.1 注浆量对地表沉降控制效果的影响

以盾尾建筑空隙量为基础,结合地层、线路及掘进方式等因素,同时考虑适当的注浆率确定注浆量,以达到充填密实的目的。1 个行程注浆量的理论估算公式为:

$$Q = \alpha_1 \left[\frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \right] L \tag{1}$$

式中:
Q——注浆量,m³/环;
D₁——盾构外径,m;
D₂——盾构管片外径,m;
L——行程长度,m;
α₁——注浆率,%。

注浆量试验段的注浆量及地表沉降变化如图 2 所示。R340—R360 环、R361—R380 环、R381—R400 环试验段每环平均注浆量分别为 2.71 m³、3.46 m³ 和 3.77 m³。试验段盾构外径为 6.34 m,管片外径为 6.2 m,行程长度即环宽为 1.2 m,由此计算可得 R340—R360 环、R361—R380 环、R381—R400 环试验段平均注浆率分别为 163%、209% 和 228%。

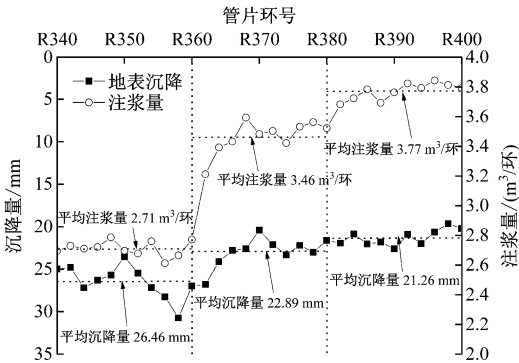


图 2 注浆量对地表沉降的影响曲线

Fig. 2 Influence curve of grouting amount on surface settlement

由图 2 可知,随着同步注浆量的增加,相应的地表沉降减小;前期 R340—R360 环试验段地表沉降较大,最大值达到 30.73 mm,平均沉降值为 26.64

mm,主要原因是同步注浆量偏少;当注浆量增加,注浆率增大到 209% 后,R361—R380 环试验段地表平均沉降量减小至 22.89 mm,减小了 13%;注浆率继续增大到 228%,R381—R400 环试验段地表平均沉降量减小至 21.26 mm,减小了 19%。

对注浆量试验段典型断面 R350、R370、R390 地表沉降规律进行分析,利用 PECK 公式拟合地表沉降曲线计算地层损失量^[13]:

$$\delta(x) = \delta_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

(2)

$$V_s = \sqrt{2\pi i} \delta_{\max} \approx 2.5 i \delta_{\max}$$

(3)

式中:

- x ——距隧道轴线的横向水平距离,m;
- $\delta(x)$ ——地面沉降量,m;
- δ_{\max} ——隧道轴线上方的最大地面沉降量,m;
- V_s ——隧道单位长度的土体损失量,m³/m;
- i ——地面沉降槽宽度系数,m。

监测断面沉降槽曲线及特征值如图 3 和表 4 所示。注浆量试验段地面沉降槽宽度系数为 5.44 ~ 5.64 m,地层损失为 0.264 ~ 0.355。

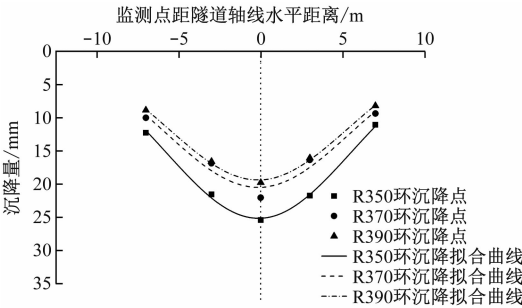


图 3 注浆量试验段地表沉降曲线

Fig. 3 Surface settlement curve of grouting amount test section

表 4 注浆量试验段沉降槽特征值

Tab. 4 Characteristic value of settling tanks in grouting amount test section

监测断面	i/m	δ_{\max}/mm	$V_s/(m^3/m)$	$\eta_2/\%$
R350	5.64	25.21	0.355	74
R370	5.59	20.54	0.287	79
R390	5.44	19.42	0.264	81

浆液对盾尾间隙的填充效果用间隙填充率 η_2 表示:

$$\eta_2 = \frac{V_K}{V_G}$$

(4)

式中:

- V_G ——理论开挖空隙;
- V_K ——开挖空隙内的浆液量。

式(4)中,单位长度理论开挖空隙为 1.378 m³/m。假定间隙填充率为 100% 时,地层损失为 0,则 $V_K = V_G - V_s$ 。

由表 4 可知,随着注浆量增大,沉降槽宽度和地层损失减小,填充率得到提高。由此可见,通过优化同步注浆量参数可以降低盾构施工对周围环境的影响。当平均注浆量为 2.71 m³/环、注浆率为 163% 时,填充率为 74%;当平均注浆量为 3.46 m³/环、注浆率为 209% 时,填充率接近 80%;此时继续增大注浆量,填充率变化不明显。由上述分析可知,增大同步注浆量有助于控制地表沉降,但注浆量在 3.5 m³/环、注浆率在 210% 以上时,对沉降控制效果变化不显著。因此,建议施工中同步注浆量为 3.5 m³/环、注浆率为 210%。

3.2 注浆压力对地表沉降控制效果的影响

如图 4 所示,由于施工原因,注浆压力试验段中 R270—R290 环、R291—R310 环注浆压力波动范围较大,R311—R330 环注浆压力较为稳定。地表沉降变化与注浆压力变化趋势大致相反,随着注浆压力增大,地表沉降得到有效抑制。平均注浆压力由 0.314 MPa 增加到 0.365 MPa 时,地表平均沉降由 23.56 mm 减小到 20.72 mm,减小了 2.84 mm。值得注意的是,在 R291—R310 环试验段,注浆压力超过 0.4 MPa 后,由于注浆压力过大,出现跑浆现象,地表沉降反而增加。

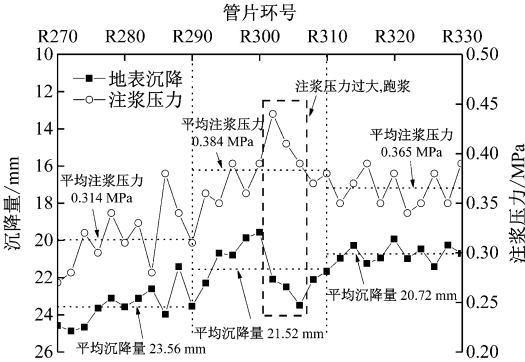


图 4 注浆压力对地表沉降的影响曲线

Fig. 4 Influence curve of grouting pressure on surface settlement

在 R270—R290 环、R291—R310 环试验段,注浆压力波动范围为 0.27 ~ 0.40 MPa,波动幅度超过 0.1 MPa,地表沉降波动超过 5 mm;在注浆压力分

布较为均匀的 R311—R330 环试验段,地表沉降波动小于 2 mm。地表沉降受注浆压力的波动影响较大。

注浆压力试验段典型断面 R280、R306、R320 沉降槽曲线及特征值分别如图 5 和表 5 所示。

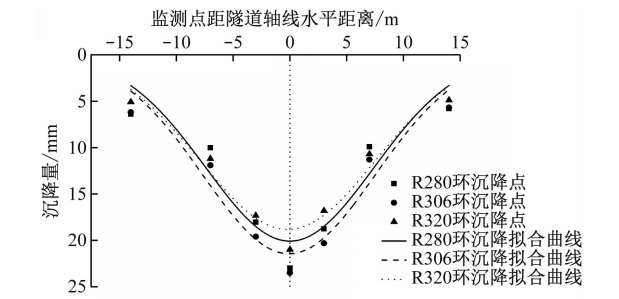


图5 注浆压力试验段地表沉降曲线

Fig. 5 Surface settlement curve of grouting pressure test section

表 5 同步注浆压力试验段沉降槽特征值

Tab. 5 Characteristic value of grouting pressure test section

监测断面	i/m	δ_{\max}/mm	$V_{\text{S}}/(\text{m}^3/\text{m})$	$\eta_2/\%$
R280	7.39	20.08	0.371	73
R306	7.56	21.43	0.405	71
R320	7.71	18.81	0.362	74

由表 5 可知,试验段Ⅱ沉降槽宽度系数为 7.39~7.71 m,地层损失为 0.362~0.405;注浆压力增大对填充率的影响不大。在一定范围内,增大注浆压力可以减小地表沉降;但注浆压力过大会导致劈裂、跑浆,进而增大地层损失。由此可见,当注浆压力小于 0.40 MPa 时,受注浆压力单因素影响,注浆压力增大时地表沉降减小,建议将注浆压力保持在 0.35~0.40 MPa 范围内。地表沉降受注浆压力波动影响较大,为控制地表沉降平稳发展,施工时注浆压力应尽量保持均匀。

3.3 注浆材料对地表沉降控制效果的影响

试验段Ⅲ典型断面 R143、R148、R153 与试验段Ⅱ典型断面 R320 沉降槽曲线及其特征值如图 6 和表 6 所示。

试验段Ⅲ沉降槽宽度系数为 6.36~6.92 m,地层损失为 0.435~0.479。如图 6 所示,采用可硬性浆液的试验段Ⅱ的 R320 断面地表最大沉降量为 20.98 mm;而采用惰性浆液的试验段Ⅲ的 3 个典型断面地表最大沉降量均大于 25 mm,最大为 30.10 mm,填充率不足 70%。

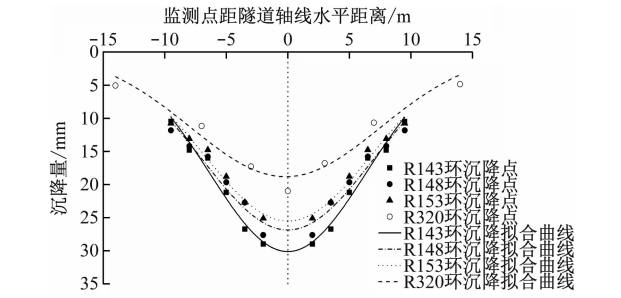


图 6 注浆材料对地表沉降的影响曲线

Fig. 6 Grouting material influence on surface settlement

表 6 注浆材料试验段沉降槽特征值

Tab. 6 Characteristic value of settling tanks in grouting material test section

监测断面	i/m	δ_{\max}/mm	$V_{\text{S}}/(\text{m}^3/\text{m})$	$\eta_2/\%$
R143	6.36	30.10	0.479	65
R148	6.92	26.84	0.464	66
R153	6.83	25.49	0.435	68
R320	7.71	18.81	0.362	74

3 个试验段地层主要为富水软土,围岩较为软弱、自稳性差。在水、土压力的作用下,惰性浆液凝结时间长、初期强度低、保水性差,会产生较大变形,并更易向周围土体渗透、流失,导致填充率降低。而可硬性浆液凝结时间短,初期强度高,可以在较短时间内和周围土体形成有一定承载力的结实体,增强地层稳定性。因此,可硬性浆液对地表沉降的控制效果明显比惰性浆液要好,建议同步注浆材料采用可硬性浆液。

4 盾构施工地层沉降控制措施

综上所述,为减小盾构施工引起的地表沉降,可从同步注浆量、注浆压力、注浆材料等方面提出相应的控制措施:

- 1) 地表沉降较大时,可增大同步注浆量,提高间隙填充率,减小地层损失,从而控制地表沉降。
- 2) 地表沉降起伏较大时,可控制同步注浆操作中注浆压力,使注浆压力保持平稳,控制注浆压力大小,做到尽量填补而不造成劈裂,从而减小地表沉降起伏。
- 3) 地表沉降较大,且在富水软土地层中掘进时,可采用凝结时间短、初期强度大,保水性好的注浆材料,以便短时间内增强地层稳定性,控制地表沉降。

5 结论

1) 随着注浆量的增大,地表沉降减小;注浆量增大到一定程度后,地表沉降的控制效果不再明显。对于类似工程,建议施工中同步注浆量为 $3.5 \text{ m}^3/\text{环}$ 、注浆率为 210%。

2) 当注浆压力小于 0.4 MPa 时,地表沉降随注浆压力增大而减小;当注浆压力过大,超过 0.4 MPa 时,对地表沉降控制不利,容易造成劈裂、漏浆,导致地表沉降增大,建议注浆压力保持在 0.35 ~ 0.40 MPa 范围内。地表沉降受注浆压力波动影响较大,为控制地表沉降平稳发展,施工时注浆压力应尽量保持均匀。

3) 在富水软土地层中,可硬性浆液对地表沉降的控制效果比惰性浆液要好,建议采用可硬性浆液。

参考文献

- [1] 张云,殷宗泽,徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(3): 388.
ZHANG Yun, YIN Zongze, XU Yongfu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(3): 388.
- [2] 叶飞,朱合华,何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009(5): 1307.
YE Fei, ZHU Hehua, HE Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(5): 1307.
- [3] 宋天田,周顺华,徐润泽,等. 盾构隧道盾尾同步注浆机理与注浆参数的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2008(1): 130.
SONG Tiantian, ZHOU Shunhua, XU Runze, et al. Mechanism and determination of parameters of synchronous grouting in shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008(1): 130.
- [4] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.

ZHANG Fengxiang, ZHU Hehua, FU Deming. Shield tunnelling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

- [5] 王冠琼,刘干斌,邓岳保. 盾构壁后注浆对地表沉降影响模拟研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2014(3): 97.
WANG Guanjiong, LIU Ganbin, DENG Yuebao. Numerical simulation of ground settlement considering slurry hardening effect after grouting of wall formation[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2014(3): 97.
- [6] 雷泽鸿. 盾构法地铁隧道施工关键技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013(8): 2283.
LEI Zehong. The key technology study on shield of subway tunnel construction[J]. Science Technology and Engineering, 2013(8): 2283.
- [7] KASPER T, MESCHKE G. A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(14): 1441.
- [8] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(2): 160.
- [9] 雷华阳,仇王维,吕乾乾,等. 盾构施工中注浆因素对地表沉降的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015(5): 1303.
LEI Huayang, QIU Wangwei, LYU Qianqian, et al. Study on the impact of the grouting factors on surface subsidence in the process of shield construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015(5): 1303.
- [10] 叶飞,苟长飞,陈治,等. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报, 2014(4): 618.
YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, et al. Ground surface deformation caused by synchronous grouting of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014(4): 618.
- [11] 梁禹,阳军生,王树英,等. 考虑时变性影响的盾构壁后注浆浆液固结及消散机制研究[J]. 岩土力学, 2015(12): 35.
LIANG Yu, YANG Junsheng, WANG Shuying, et al. A study on grout consolidation and dissipation mechanism during shield back-filled grouting with considering time effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(12): 35.

(收稿日期:2019-11-17)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com