

土层特性及注浆对盾构上穿引起既有 隧道变形影响分析

尹子豪

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200000)

摘要:基于宁波轨道交通5号线上穿既有运营2号线的工程实例,采用Flac^{3D}软件建立隧道叠交计算模型,研究在盾构掘进过程中土层特性和注浆情况对既有隧道竖向与水平变形的影响。结果表明:当隧道开挖所在土层厚度改变时,对既有隧道的竖向变形产生了较大影响,而对水平位移的影响较小;当隧道开挖所在土层内摩擦角改变时,既有隧道竖向沉降值随内摩擦角的增大而减小,管片之间的相对水平位移增加;当隧道开挖所在土层黏聚力增大时,既有隧道竖向与水平位移值均减小,但管片之间的相对位移均增大;注浆可有效加固土体,减小既有隧道的变形,提升土体参数。

关键词:盾构隧道;隧道上穿;结构变形;土层特性;注浆

1 引言

近年来,随着城市轨道交通规模不断扩大,盾构隧道施工不可避免要穿越邻近既有地铁隧道,为新建盾构隧道施工带来巨大的潜在风险^[1]。许多学者对不同的盾构穿越情况以及不同的影响因素进行了研究。

王超东等^[2]通过室内模型试验模拟了盾构上穿施工,分析了不同穿越角度对既有隧道稳定性的影响,发现随着交叠角度增大,沿既有隧道纵向的土层受扰动影响越小;付钊等^[3]通过有限元数值模拟,分析了深埋小净距盾构隧道施工时的相互影响,得到了随着后行隧道的开挖,先行隧道管片的变形增量变化基本呈双峰特征;崔允亮等^[4]采用分布式光纤监测了盾构施工对管廊结构的影响,并结合数值模拟进行了分析,发现双线盾构隧道施工导致的管廊最大沉降发生在双线隧道之间;应宏伟等^[5]提出了基坑开挖下邻近既有隧道响应的简化计算方法,并针对主要参数进行了分析,得出了提高隧道纵向抗弯刚度可以有效减小隧道的最大位移等结论;房倩等^[6]建立了下穿既有有线工程中地层、既有结构变形与盾构掘进参数的关系,发现地层沉降槽宽度受隧道埋深、地层加固措施以及盾构机尾部注浆的综合影响;Li等^[7]通过推导由土体损失及施工荷载引起的地层竖向变形的计算公式,研究了隧道曲率

半径对地层沉降的影响,得到了总的沉降峰值和偏移量均随隧道曲率半径的减小而增大等结论。

在盾构掘进时,不同的地层情况需要不同的应对方法,因此,许多学者在各种土层条件下研究了土体特性对盾构穿越的影响。张世豪等^[8]提出了一种表征掘进效率的特征参数,分析了各影响因素和掘进效率的关系,提出了针对不同地层的掘进效率控制措施;路开道^[9]对盾构下穿典型水下圆砾地层管片结构受力以及水压力进行数据监测采集,研究了管片受力的影响因素,并发现同步注浆对管片内力的影响较为显著;朱向阳等^[10]通过离散元软件研究了隧道埋深等因素对滨海孤石地层盾构掘进的稳定性影响,发现随着隧道埋深的增大,地层扰动范围及地表沉降都呈减小趋势,衬砌土压力整体上呈现增大趋势等规律;Chakeri等^[11]通过对两条软土盾构隧道开挖过程中隔岩柱及围岩变形监测,提出了小净距隧道开挖过程对围岩变形的影响规律。

在上海等地区,盾构穿越地层大多为软土地层,地下水位高,常常需要利用注浆技术改善土体性质,以减小盾构施工对周围环境的影响。国内外众多学者研究了不同注浆技术、参数等对盾构穿越的影响。罗鑫等^[12]采用理论计算结合数值模拟的方法,研究了基坑开挖时下卧盾构隧道的隆起变形,发现压力注浆+水泥土搅拌桩综合加固控制措施对减小下卧盾构隧道的

隆起变形和横断面收敛变形的效果良好;李培楠等^[13]通过理论推导得到了软土地区类矩形盾构隧道同步注浆环向填充与纵向扩散的力学模型及计算方法,发现软土地区类矩形盾构同步注浆压力沿环向整体呈现上小下大的分布特征;杨龙等^[14]利用数值模拟方法,研究了不同软土地质分布下盾构施工沉降规律,发现对于软土深厚区段洞内注浆加固能显著改善地面沉降;韩鑫等^[15]根据室内渗透试验,分析了浆液在地层中的扩散机理,并提出了 4 种典型浆液扩散类型;K. Soga 等^[16]利用黏土补偿灌浆抬升机理试验系统进行了地下开挖过程中黏土补偿注浆室内试验,研究了开挖区域内注浆抬升长期效果的影响因素。

从已有研究可以发现,针对土层特性及注浆,对盾构上穿引起既有隧道水平与竖向变形的影响分析较为匮乏。基于此,该文依托宁波轨道交通 5 号线上穿运营的宁波轨道交通 2 号线区间隧道,建立 Flac^{3D} 模型,探究在盾构掘进过程中不同的土层特性和注浆对既有隧道的变形影响,为工程实践提供理论参考。

2 工程概况

宁波轨道交通 5 号线在鄞县大道与雅戈尔大道交叉口以 76°角斜交上穿运营的宁波轨道交通 2 号线。沿掘进方向按提前 50 m 为影响范围考虑^[17],5 号线

上行线的盾构穿越影响区为 904~985 环,5 号线下行线的盾构穿越影响区为 917~995 环,对应 2 号线上行线的影响范围为 743~818 环,下行线为 747~822 环。上穿区间的平面示意图如图 1 所示。此处土层及物理力学指标如表 1 所示,盾构穿越土层主要为 5-1a 黏土,勘察期间测得的地下水稳定水位埋深为 0.3~2.9 m。由于工程地处宁波,大多为软土地层,地下水位高,在实际工程中,必须提前考虑管片拼装点位选择,保证盾尾间隙良好。由于盾构穿越净距远小于盾构机直径,属于超近距离,可通过同步注浆和二次注浆加固土体,以减少对土体的扰动。

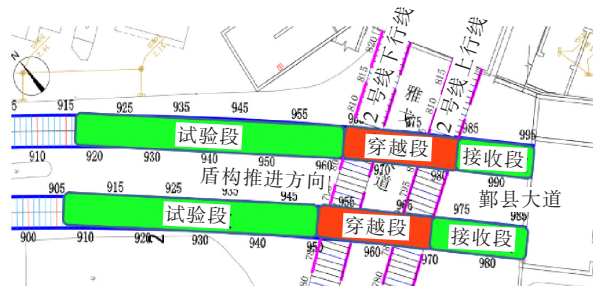


图 1 隧道上穿区域平面示意图

5 号线上跨 2 号线施工时,为保证 2 号线运营安全,对 2 号线本体进行了全自动化结合人工监测,范围为 5 号线上穿 2 号线的投影并向两侧各延伸 50 m。

表 1 土层及物理力学指标

土层	厚度/ m	泊松比	压缩模 量/MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	密度/ (g·cm ⁻³)
1-1 填土	2.7	0.25	3.0	15.0	8.0	2.00
1-3b 淤泥质黏土	3.5	0.42	2.3	11.2	11.2	1.74
2b 淤泥质黏土	2.0	0.42	2.0	8.6	9.2	1.73
2a 淤泥	3.0	0.42	2.2	10.5	11.0	1.73
5-1a 黏土	8.2	0.35	6.2	14.3	37.4	1.93
5-1b 粉质黏土	8.4	0.35	6.0	13.4	29.3	1.93
5-4a 黏土	9.7	0.35	5.1	11.4	22.9	1.93
6-1 黏土	10.6	0.35	6.4	14.3	42.6	1.93

3 数值分析

3.1 数值模型的建立

建立数值分析模型以进一步分析上述影响因素对上穿既有隧道施工的影响。为减少其他因素的影响,仅对 5 号线上穿 2 号线进行模拟,数值计算采用

Flac^{3D} 软件模拟。为简化计算,假定盾构推进方向为直线,采用摩尔库仑模型模拟盾构隧道掘进的施工过程。根据有关规范^[17]选取模型边界,模型尺寸为 100 m×91 m×46 m,盾构隧道外径为 6 200 mm,管片宽度为 1 200 mm,管片厚度为 350 mm。盾尾空隙采用厚度为 0.35 m 的均质弹性等代层进行模拟,材料具体参数如表 2 所示。区间隧道上、下行线隧道中

心线相距 16 m。

表 2 材料物理力学计算参数

结构名称	体积模量/ GPa	泊松比	重度/ (kN·m ⁻³)
盾构管片	35.00	0.2	25
盾尾空隙等代层	0.15	0.2	23

3.2 模型验证

利用上穿区域中的结构沉降和水平位移监测点与数值模拟开挖结果进行对比,以验证模型的正确性。

图 2 为隧道施工引起的 2 号线上行线结构位移对比结果。图中横坐标为隧道的位移监测点编号;其中 SJ 表示上行线,c 表示竖向沉降,w 表示水平位移,数字表示隧道管片的环号。后文 XJ 表示下行线,其他符号意义与图 2 相同。

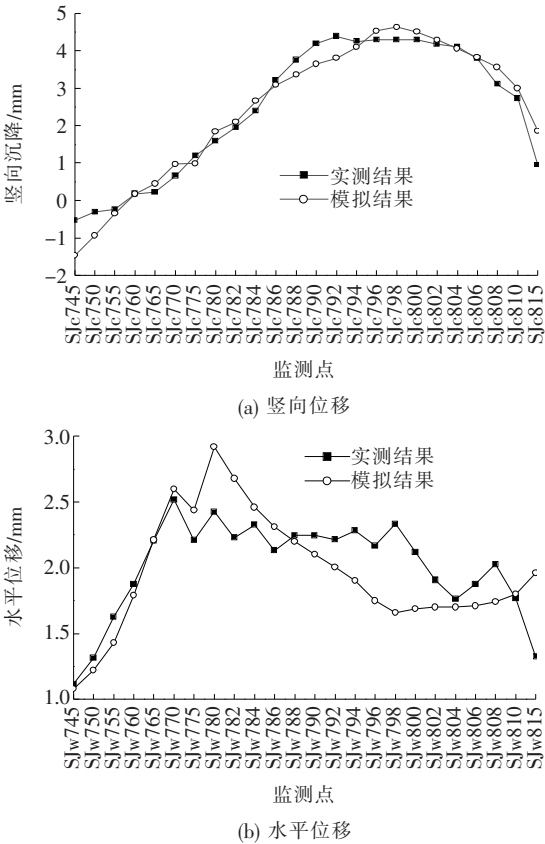


图 2 隧道施工引起的 2 号线上行线结构位移

从图 2(a)可知:沿 2 号线上行线纵向的沉降值表现出两端隆起小、穿越区隆起大的特点,即出现了明显的向上挠曲变形;由图 2(b)可知:沿 2 号线上行线纵向,水平位移值表现出两端小、中间大的特点。对比发现,数值模拟和实测结果的最终沉降值和水平位移值较为接近,但边界处有一定差异,这与实际工程中 2 号线站台的连接情况有关。

4 不同工况下数值模拟结果分析

4.1 土层特性对既有隧道竖向沉降的影响

盾构掘进过程中,由于开挖卸载作用,土体应力不断进行重分布,既有隧道也因此产生变形。为分析在盾构掘进过程中土层特性对既有隧道的变形情况产生的影响,该文分别选取不同软土层厚度、黏聚力及内摩擦角对既有隧道的竖向沉降和水平位移进行对比研究,具体计算工况如表 3 所示,其中 S1 为实际工况。

表 3 计算工况

工况	5 号线所在土层参数		
	厚度/m	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
S1	8.2	14.3	37.4
S2	6.2	14.3	37.4
S3	10.2	14.3	37.4
S4	8.2	9.3	37.4
S5	8.2	19.3	37.4
S6	8.2	24.3	37.4
S7	8.2	14.3	20.0
S8	8.2	14.3	54.8
S9	8.2	14.3	72.2

在 S1~S3 工况下,既有隧道 2 号线的竖向沉降如图 3 所示。

从图 3(a)可知:在 SJc745~SJc755 区间,2 号线上行线发生了沉降,且此时沉降值 $S1 < S2 < S3$,在 SJc760~SJc775 区间,S1 工况下 2 号线上行线出现了隆起,而 S2、S3 工况下 2 号线上行线的竖向位移仍然为负值,在 SJc780~SJc798 区间,3 种工况下结构竖向位移不断增加,其后,S1 工况下结构竖向位移开始减小,而 S2、S3 工况下结构竖向位移曲线逐渐趋于稳定,但在 SJc810~SJc815 区间出现下降。从图 3(b)可知:S1 工况下,2 号线下行线沉降值从 XJc750 开始变为正值,而 S2、S3 工况下 2 号线下行线沉降值仍然为负值且不断增大,并从 XJc775 开始变为正值,此后 3 种工况下结构竖向沉降值不断增大,最终在 XJc804 达到峰值,此后逐渐减小。减小 5 号线所在土层厚度后,既有隧道沉降变大,但隆起变小;增大 5 号线所在土层厚度后,既有隧道沉降增大,上行线的隆起值也有所增加,而下行线的隆起值有一定减小。

在 S1、S4~S6 工况下,既有隧道 2 号线的竖向沉降如图 4 所示。

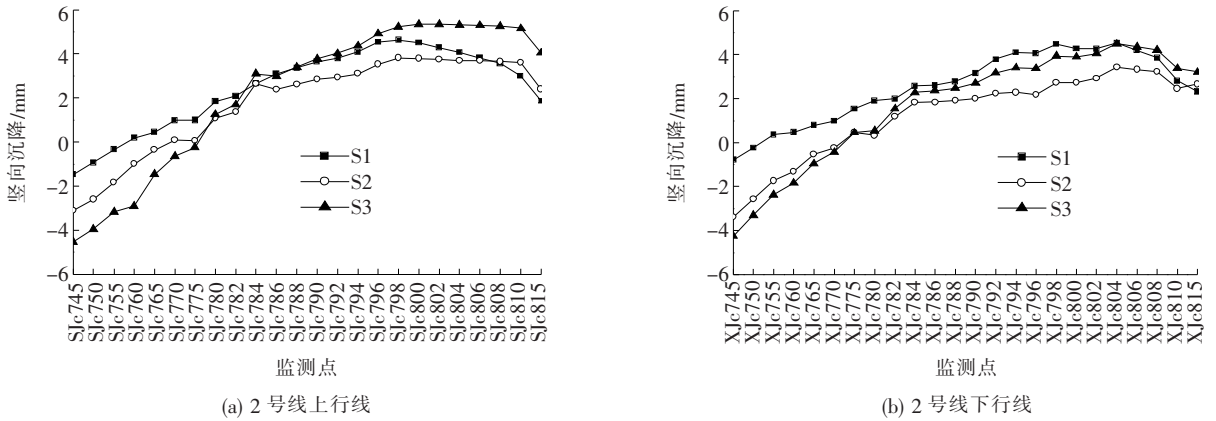


图 3 S1~S3 工况下隧道主体结构竖向沉降情况

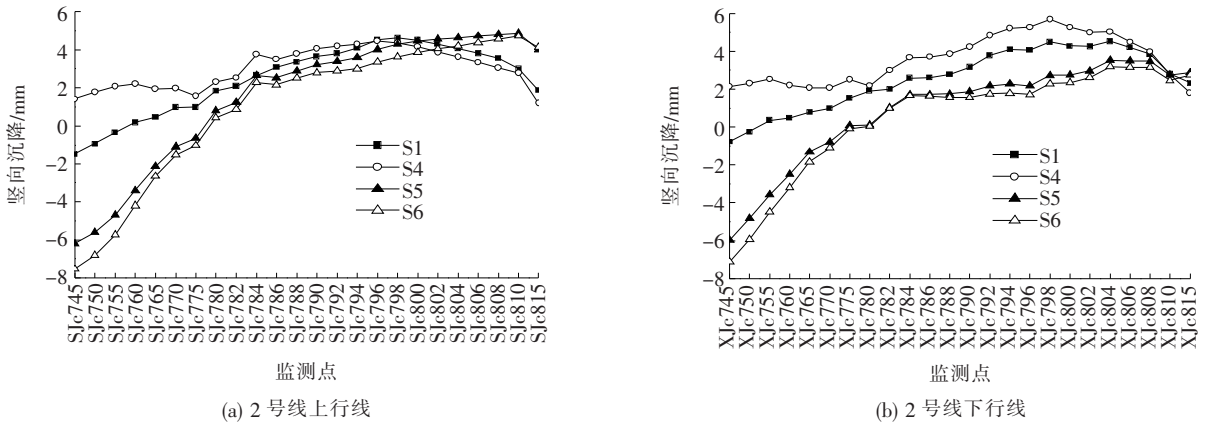


图 4 S1 与 S4~S6 工况下隧道主体结构竖向沉降情况

从图 4(a)可知:S4 工况 2 号线上行线的竖向沉降值一直为正值,而其余工况下,主体结构沉降值由负值逐渐增加为正值,S1 与 S4 工况下,2 号线上行线主体结构竖向沉降曲线在 SJc784 后开始趋于稳定,而在 S5、S6 工况下,2 号线上行线主体结构竖向沉降曲线仍不断小幅增加,最终在 SJc810 处到达峰值,此后稍有下降。从图 4(b)可知:在 XJc745~XJc780 区间,2 号线下行线竖向沉降曲线趋势与 2 号线上行线基本一致,之后,各工况下 2 号线下行线沉降值不断增大,S1 与 S4 工况的竖向沉降曲线在 XJc798 处达到峰值后开始下降,而 S5 与 S6 工况的竖向沉降曲线在 XJc808 处达到峰值后稍有下降。这是由于该环管片位于两条隧道之间,受到扰动程度较大,因此结构竖向沉降值增大明显。5 号线所在土层内摩擦角增大后,既有隧道的沉降增大,而隆起的数值在整体上有所减小;5 号线所在土层内摩擦角减小 5° 后,既有隧道只发生了隆起而没有沉降,且数值在整体上大于实际工况,这是颗粒间内摩擦力以及由于颗粒物的嵌入、连锁和脱离咬合状态而移动所产生的咬合摩擦作用减小导致。

在 S1、S7~S9 工况下,既有隧道 2 号线的竖向沉降如图 5 所示。

从图 5 可知:各工况下 2 号线上、下行线的竖向沉降曲线趋势基本一致。整体上看,既有隧道主体结构的竖向位移值随 5 号线所在土层黏聚力的增大而减小。这是由于土粒间的毛吸力、静电引力等土体内部相邻各部分之间的相互吸引力增大,隧道主要位于土层土体黏聚力增大,土体强度上升,土与结构界面抗剪强度增加,沉降发展很快稳定。

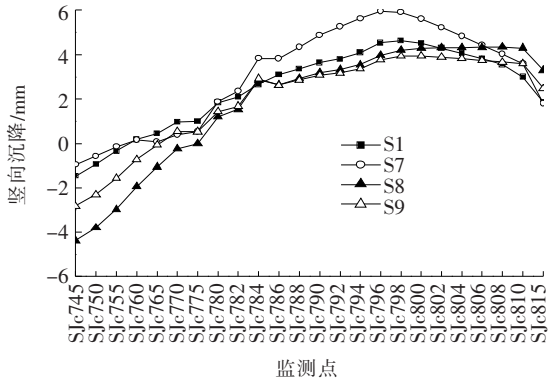
4.2 土层特性对既有隧道水平位移的影响

在 S1~S3 工况下,既有隧道 2 号线的水平位移如图 6 所示。从图 6(a)可知:2 号线上行线的水平位移值在 SJw745~SJw770 区间不断增大,而后稍有减少,之后在 SJw780 处到达峰值,其后,水平位移曲线再次开始下降,在 SJw796 之后趋于稳定,从总体数值上来看,S1 工况下 2 号线下行线隆起最大,而 S2 最小。从图 6(b)可知:S1~S3 工况下,2 号线下行线沉降曲线趋势基本一致,但从总体数值上来看,S2 工况下 2 号线下行线隆起最大,而 S1 最小。减小 5 号线所在土层

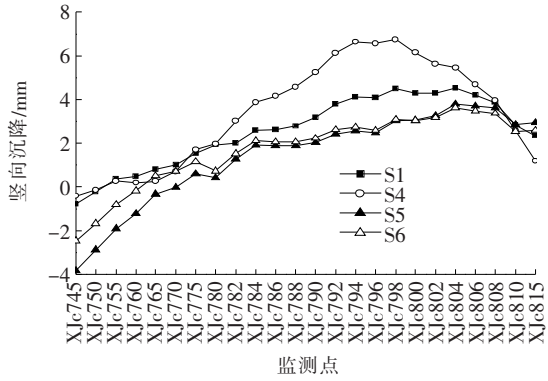
厚度后,2号线上行线的水平位移明显减小,而下行线明显增大;增大5号线所在土层厚度后,2号线上行线的水平位移稍有减小,而下行线明显增大,但数值较

S2 工况更小。

在 S1、S4~S6 工况下,既有隧道 2 号线的水平位移如图 7 所示。

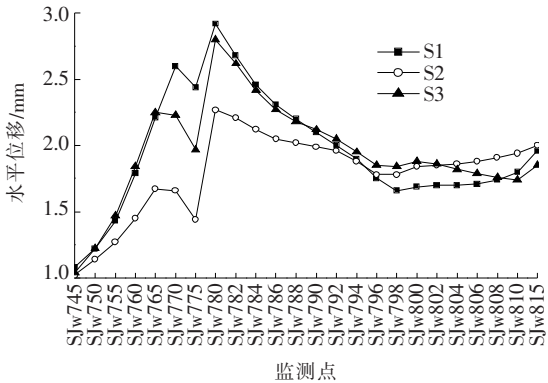


(a) 2号线上行线

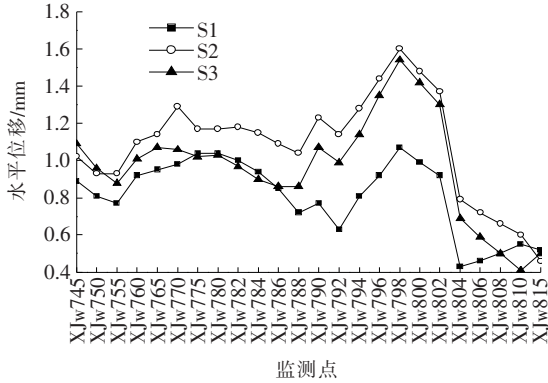


(b) 2号线下行线

图5 S1与S7~S9工况下隧道主体结构竖向沉降情况

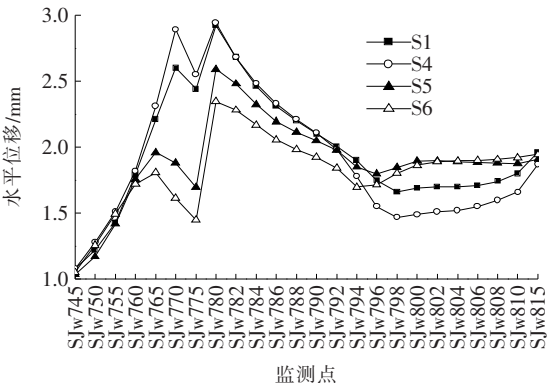


(a) 2号线上行线

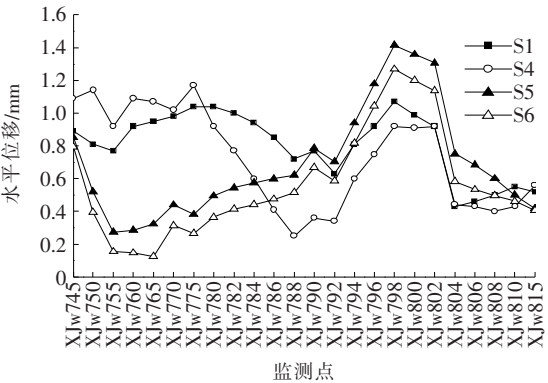


(b) 2号线下行线

图6 S1~S3工况下隧道主体结构水平位移情况



(a) 2号线上行线



(b) 2号线下行线

图7 S1与S4~S6工况下隧道主体结构水平位移情况

从图 7(a)可知:各工况下 2 号线上行线的水平位移曲线趋势基本一致。从图 7(b)可知:S1 与 S4 工况下的 2 号线下行线的水平位移曲线趋势基本一致,而

S5 与 S6 工况下 2 号线下行线的水平位移曲线则是先有明显下降,在达到最小值之后不断上升,直到在 XJw798 处达到峰值后再继续下降。5 号线所在土层

内摩擦角减小 5°后,2 号线的水平位移变化规律与实际工况基本一致,但是管片之间的相对位移增加;5 号线所在土层内摩擦角增大后,2 号线上行线的水平位移整体上看有所减小,而下行线管片之间的相对位移增加。

在 S1、S7~S9 工况下,既有隧道 2 号线的水平位移如图 8 所示。

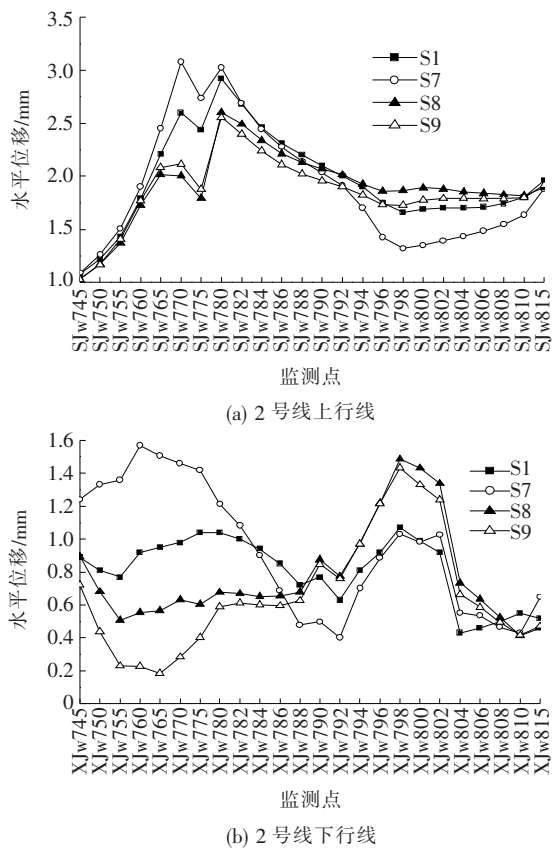


图 8 S1 与 S7~S9 工况下隧道主体结构水平位移情况

从图 8(a)可知:各工况下 2 号线上行线的水平位移曲线趋势基本一致。从图 8(b)可知:S1、S8、S9 工况下 2 号线下行线的水平位移曲线趋势基本一致,而 S7 工况下 2 号线下行线的水平位移曲线则是先上升,在 XJw760 处达到峰值,其后出现明显下降,在 XJw792 处达到最小值后,其水平位移曲线趋势与其余工况基本一致。整体上看,2 号线上行线主体结构的水平位移随 5 号线所在土层黏聚力的增大而减小,2 号线下行线管片之间的相对位移增加。

4.3 注浆对隧道变形情况的影响

盾构掘进过程中,为减小对周围环境的扰动,可采用同步注浆和二次注浆的方式以加固土体。为分析注浆对既有隧道变形产生的影响,通过改变注浆范围的土体参数来体现注浆的加固效果,具体计算工况如表

4 所示。

表 4 注浆计算工况

工况	注浆情况	土体参数
S1	无	不提高
S2	弱	土体参数提高 10%
S3	中	土体参数提高 20%
S4	强	土体参数提高 30%

在 S1~S4 工况下,既有隧道 2 号线的竖向沉降如图 9 所示,水平位移如图 10 所示。

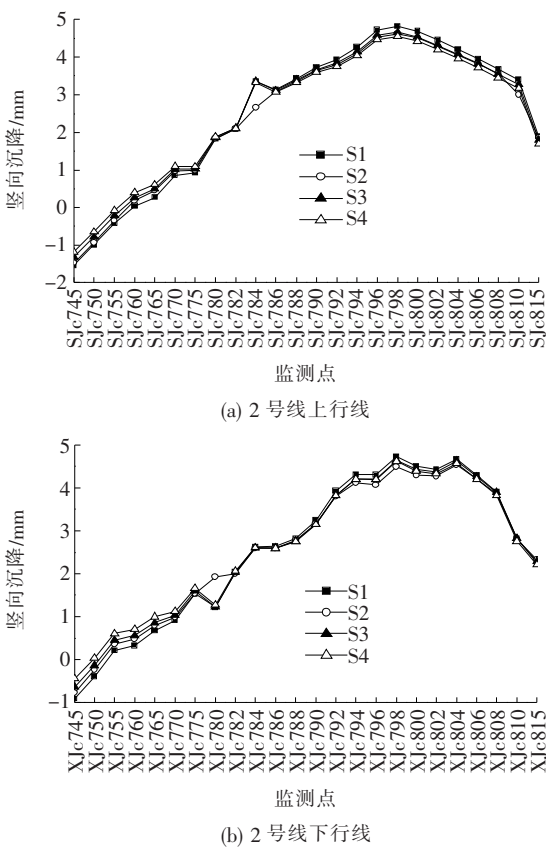


图 9 S1~S4 工况下隧道主体结构竖向沉降情况

从图 9、10 可知:各工况下 2 号线的竖向沉降曲线与水平位移曲线趋势基本一致,在数值上也极为接近。考虑到注浆对隧道主体结构位移的改善效率以及对整体位移的控制效果,以土体参数提高 10%时为最优。

5 结论

利用 Flac^{3D} 软件建立了宁波轨道交通 5 号线上穿既有运营隧道 2 号线的三维数值模型,针对盾构掘进过程中土层特性和注浆对既有隧道的竖向沉降、水平

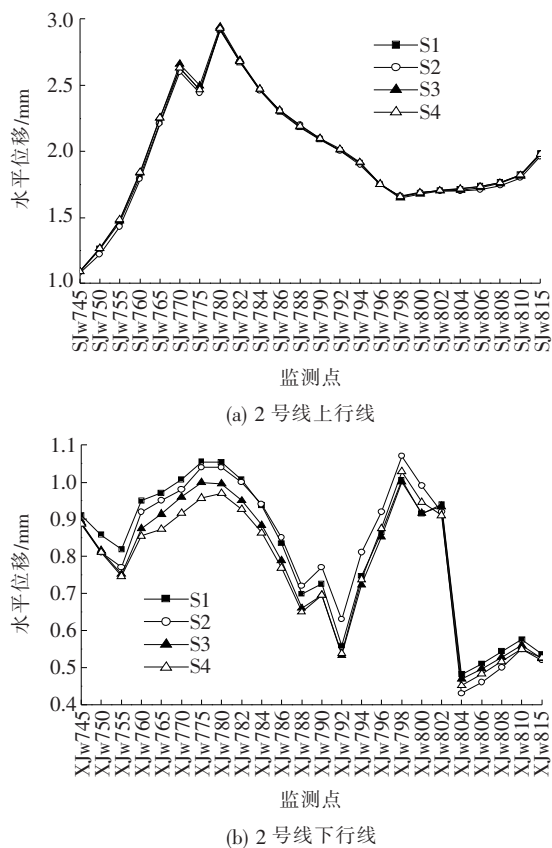


图10 S1~S4工况下隧道主体结构水平位移情况

位移产生的影响进行分析研究,得到如下结论:

(1) 当隧道开挖所在土层厚度改变,对既有隧道的竖向变形产生较大影响,而对水平位移影响较小。

(2) 当隧道开挖所在土层内摩擦角改变,既有隧道竖向沉降值随内摩擦角的增大而减小,管片之间的相对水平位移增加。

(3) 当隧道开挖所在土层黏聚力增大,既有隧道竖向与水平位移值均减小,但管片之间的相对位移均增大。

(4) 注浆可有效加固土体,减小既有隧道的变形,提升土体参数,考虑到注浆对隧道主体结构位移的改善效率以及对整体位移的控制效果,以土体参数提高10%为最优。

参考文献:

- [1] 魏新江,张默爆,丁智,等.盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J].岩土力学,2020(S2):1-20.
- [2] 王超东,赖鹏安,曹洋,等.滨海软土地层盾构近接穿越角度对既有隧道影响的模型试验研究[J].现代隧道技术,2021,58(1):168-174.

- [3] 付钊,柯宁静,卢康明,等.深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析[J].水文地质工程地质,2021,48(2):44-54.
- [4] 崔允亮,李志远,魏纲,等.上跨拟建隧道的地下综合管廊预保护效果[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(2):330-337.
- [5] 应宏伟,程康,俞建霖,等.考虑地基变形连续的基坑开挖诱发邻近盾构隧道位移预测[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(2):318-329.
- [6] Fang Qian, Du Jianming, Li Jianye, et al. Analysis of Ground Settlement Induced by Construction of Large Diameter Shield Tunnel Adjacent to Existing Metro[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(3):882-897.
- [7] Li Shaohua, Zhang Mingju, Li Pengfei. Theoretical Analysis of Ground Settlement Caused by Soil Loss and Construction Load in Curved Shield Tunnel Construction[J]. Journal of Zhejiang University—Science A (Applied Physics & Engineering), 2021, 22(4):296-314.
- [8] 张世豪,李彤,李璇,等.花岗岩地层中盾构掘进效率影响因素研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(4):105-111.
- [9] 路开道.水下圆砾地层盾构隧道施工荷载实测及其力学响应研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(1):44-51.
- [10] 朱向阳,钱伟丰,朱和跃,等.滨海孤石地层盾构掘进的稳定性数值分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):172-183.
- [11] Hamid Chakeri, Yilmaz Ozcelik, Bahtiyar Unver. Investigation of Ground Surface Settlement in Twin Tunnels Driven with EPBM in Urban Area[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9):7 655-7 666.
- [12] 罗鑫,王冰洁,尹燕良,等.基坑开挖影响下下卧盾构隧道变形及控制措施研究[J].安全与环境工程,2021,28(2):86-94.
- [13] 李培楠,石来,刘俊,等.软土地区类矩形盾构隧道同步注浆填充扩散压力空间分布模式[J].中国铁道科学,2021,42(2):77-87.
- [14] 杨龙,徐海清,李长冬,等.武汉软土地区盾构施工地面沉降与注浆加固研究[J].人民长江,2021,52(3):131-136.
- [15] 韩鑫,叶飞,梁晓明,等.盾构隧道壁后注浆地层及浆液颗粒特性分析[J].现代隧道技术,2020,57(S1):191-202.
- [16] Soga K, Bezuijen A, Eisa K. The Efficiency of Compensation Grouting in Sands[M]. Viggiani G, 2012:403-410.
- [17] GB 50446—2017 盾构法隧道施工及验收规范[S].