

盾构下穿既有隧道扰动效应分析

肖果

(湖南省有色地质勘查局工程地质总队, 湖南 长沙 410000)

摘要: 新建隧道盾构下穿既有隧道易引起既有隧道结构产生附加沉降和内力, 严重时会影响既有隧道的正常运营。为研究新建隧道开挖对既有隧道的扰动效应, 以杭州某盾构下穿工程为背景, 采用有限差分软件构建新建隧道盾构开挖模型, 计算得到既有隧道结构沉降及内力变化, 并分析不同盾构推力、两隧道距离及新建隧道覆土厚度对既有隧道的扰动规律。结果表明, 新建隧道施工造成既有隧道不均匀沉降率达 0.05%, 超过规范要求, 应采取相应加固措施; 既有隧道最终沉降值随盾构推力、两线距离及新建隧道覆土厚度增加而减小, 增大盾构推力会引起开挖过程中既有隧道隆起变形增加。

关键词: 隧道; 下穿既有隧道; 盾构推力; 两隧道间距; 覆土厚度; 数值模拟

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0134-06

随着城市建设不断推进, 地铁线路越来越多, 线路空间交错情况越来越复杂, 其中新建隧道近距离下穿既有隧道的情况最为常见。下伏新建线路施工会扰动周边一定范围内土体, 破坏土层结构原有平衡, 导致既有线路结构产生附加内力和位移, 甚至影响既有隧道的正常使用。已有学者针对盾构正交和斜交下穿既有隧道的情况进行了研究, 如康佐等以西安某盾构隧道正交下穿既有隧道为背景, 采用有限元软件分析了既有隧道管片位移、内力及地表沉降规律; 杨成永等通过数值模拟结合现场监测数据及盾构施工参数, 研究了盾构隧道近距离下穿既有线路时既有隧道的沉降规律; 贺雪来等通过现场监测与数值模拟, 证明了盾构下穿工程采用 MJS 加固措施能显著控制地面沉降和既有隧道变形; 杨春山等以广州某盾构隧道工程为背景, 建立盾构下穿既有线路数值计算模型, 得到了盾构掘进对既有线路位移的影响规律; 来弘鹏等针对新建隧道小角度斜下穿既有隧道工程, 分析了土仓压力、注浆压力、注浆量等施工参数对既有隧道的扰动效应。但鲜有研究分析下穿隧道的不同设计施工因素对既有隧道的扰动效应。该文以杭州某盾构隧道下穿运营隧道为背景, 采用有限差分软件构建数值计算模型, 分析新建隧道在不同盾构推力、与既有隧道间距、上部覆土厚度情况下盾构施工对既有隧道的扰动效应。

1 工程概况

杭州某新建地铁线路近距离盾构下穿已运营地

铁隧道, 两隧道的位置关系见图 1。新建线路埋深 20.6 m, 与既有隧道距离仅 2.1 m, 为超近距离下穿工程。施工隧道结构采用预制钢筋砼管片, 管片外径 6.4 m, 厚度 0.4 m, 每环宽度 1.2 m。隧道穿越区域内地下水以上层滞水和承压水为主, 对隧道施工影响较小。区域内主要地层自上而下依次为杂填土、砂质粉土、粉砂、淤泥质粉质黏土, 各地层的物理力学参数见表 1。既有隧道主要位于淤泥质粉质黏土中, 这类土体强度低、压缩性高, 外界施工扰动易造成土体承载强度下降, 导致隧道产生变形, 影响正常运营。因此, 有必要分析新建隧道施工对既有线路的影响。

2 数值模拟计算

2.1 模型构建

为减小边界效应对计算的影响, 施工隧道左右

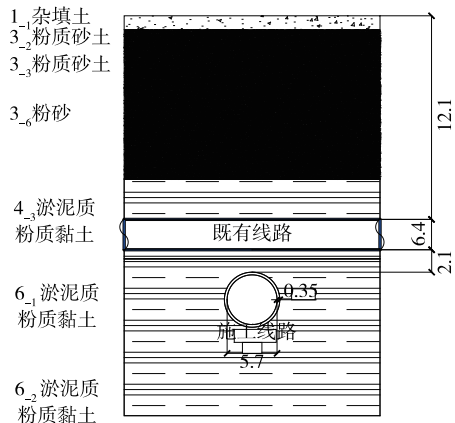


图 1 两隧道的位置关系(单位: m)

表 1 土层的物理力学参数

土层名称	天然重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	厚度/m
1- ₁ 杂填土	17.5	0.0	4.7	5	1.2
3- ₂ 砂质粉土	18.7	8.0	31.2	18	1.6
3- ₃ 砂质粉土	19.0	13.0	32.6	24	2.8
3- ₆ 粉砂	19.3	0.0	34.7	20	9.1
4- ₃ 淤泥质粉质黏土	17.0	12.1	10.6	22	7.8
6- ₁ 淤泥质粉质黏土	17.5	15.1	10.8	26	10
6- ₂ 淤泥质粉质黏土	18.1	16.0	13.9	28	—

两侧各取 4 倍洞径,上部边界至地表,下部深度取 3 倍洞径;数值计算模型考虑新建隧道开挖过程,沿开挖方向取 32 环长度,模型几何尺寸长、宽、高分别为 49.6、38.4、44.8 m。对于盾构隧道开挖模型,忽略其边界位移影响,分别约束模型 X、Y 方向及底部位移。划分网格时,隧道网格划分密集,周边土体划分稀疏,以减少数值计算时间,模型共划分 56 780 个单元(见图 2)。

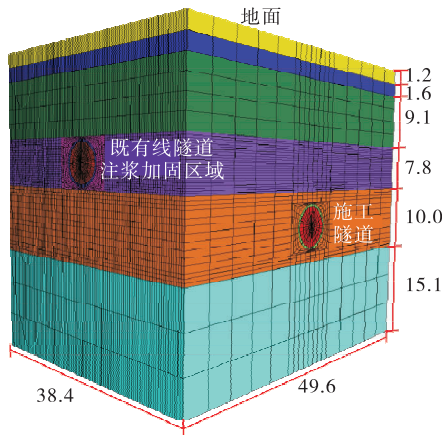


图 2 数值计算模型(单位:m)

2.2 材料属性

模型中所有土层服从 Mohr—Coulomb 准则,物理力学参数见表 1。盾构管片采用弹性模型实体单元模拟,模型计算中考虑到上部运营线路同步注浆加固效果,将既有隧道周边 0.3 m 范围内土层强度提高 1.2 倍,模拟同步注浆的加固效果。而新建隧道注浆时间较短,加固效果暂未达到,考虑最不利情况,不考虑施工隧道的同步注浆加固效果。管片及注浆加固层参数见表 2。

2.3 数值计算过程

(1) 固定模型边界,按照土层厚度赋予模型材料参数,在自重应力作用下使计算模型达到初始应力平衡。

(2) 将初始应力平衡的位移归零,同时将既有

表 2 管片及注浆加固层的材料属性

材料	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)
管片	27.6×10 ³	0.20	—	—	25.6
注浆区域	26.4	0.28	14.5	13.2	19.6

隧道土体一次性移除并赋予既有隧道管片参数,计算得到开挖既有隧道后的应力及沉降分布。

(3) 只研究下伏隧道开挖对既有隧道的影响,不考虑 1 号线开挖所引起的沉降,将上一步计算得到的沉降归零,随后移除下伏新建隧道 4 环土体(模拟 1 d 的开挖工作量),并赋予 4 环管片参数,在掌子面处施加盾构推力 p [推力大小由式(1)计算, $p = (380 \pm 20)$ kPa,计算中 $p = 380$ kPa] 并进行计算,每开挖 4 环计算一次并记录既有线路隧道的位移及内力分布情况,直到开挖完毕。

$$p = K_0 \gamma' H + p_w \pm 20 \text{ kPa} \quad (1)$$

式中: K_0 为静止土压力系数; γ' 为土的有效重度; H 为隧道上覆土厚度(m); p_w 为水压力; 20 kPa 是波动压力。

2.4 测线布置

下伏新建隧道开挖主要引起既有隧道结构产生竖向沉降及附加内力,针对这一现象,沿既有隧道方向在隧道底板和拱顶处共布置 38 个沉降监测点,其中 SD-1~SD-19 为拱顶测点, DB-1~DB-19 为底板测点(见图 3),同时通过编制 fish 语言监测施工过程中既有隧道管片的最大内力。

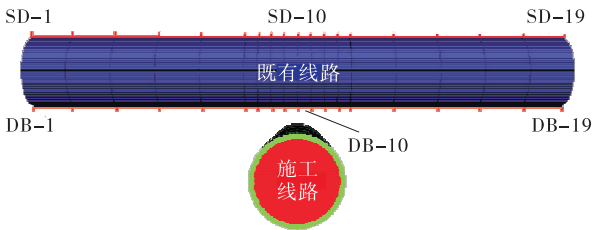


图 3 沉降及附加内力测点布置

3 计算结果与分析

3.1 既有隧道沉降

数值模拟计算结果见图4,开挖工况下变形曲线及隧底、拱底最大沉降曲线见图5、图6。

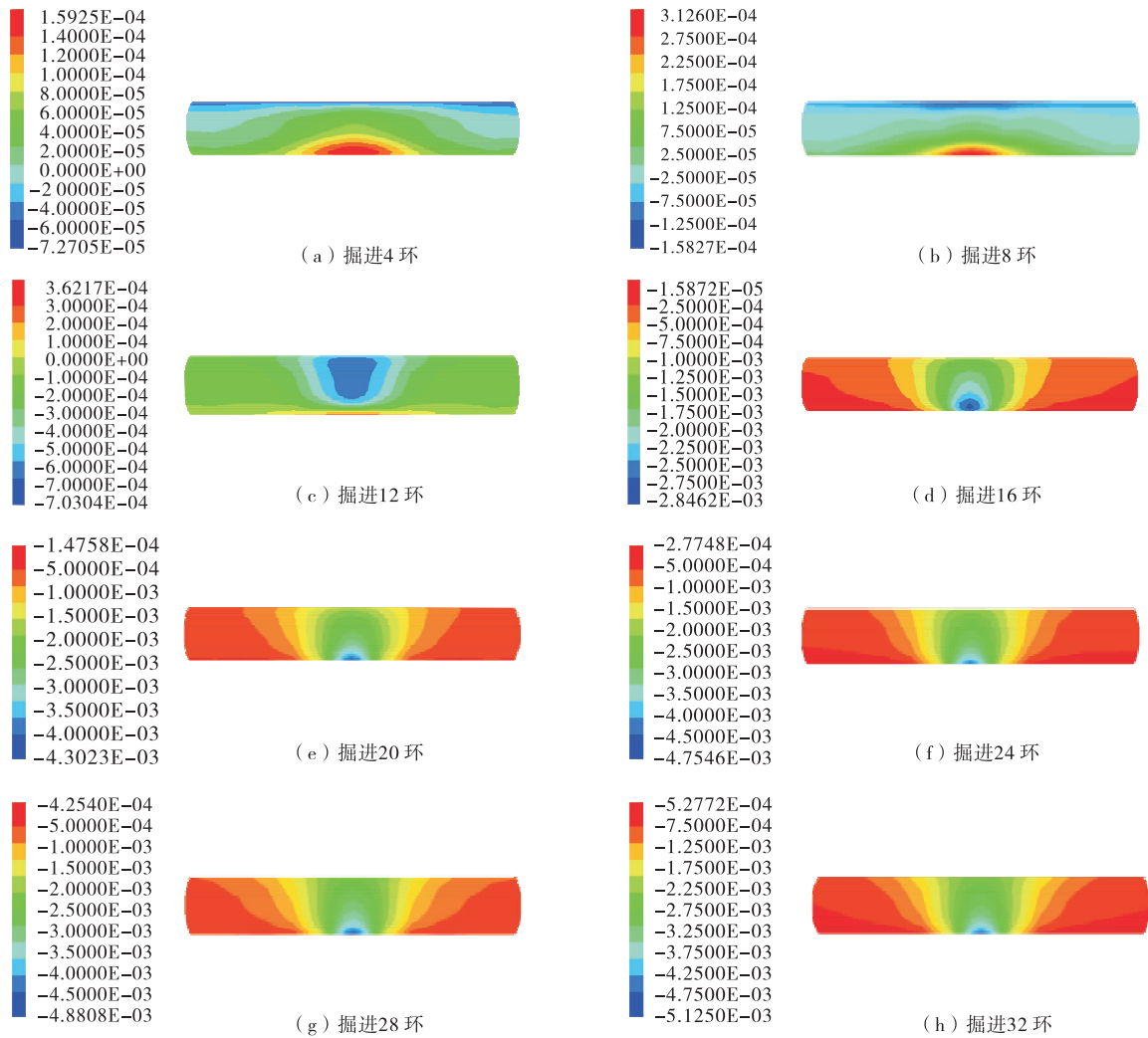


图4 既有隧道沉降云图(单位:m)

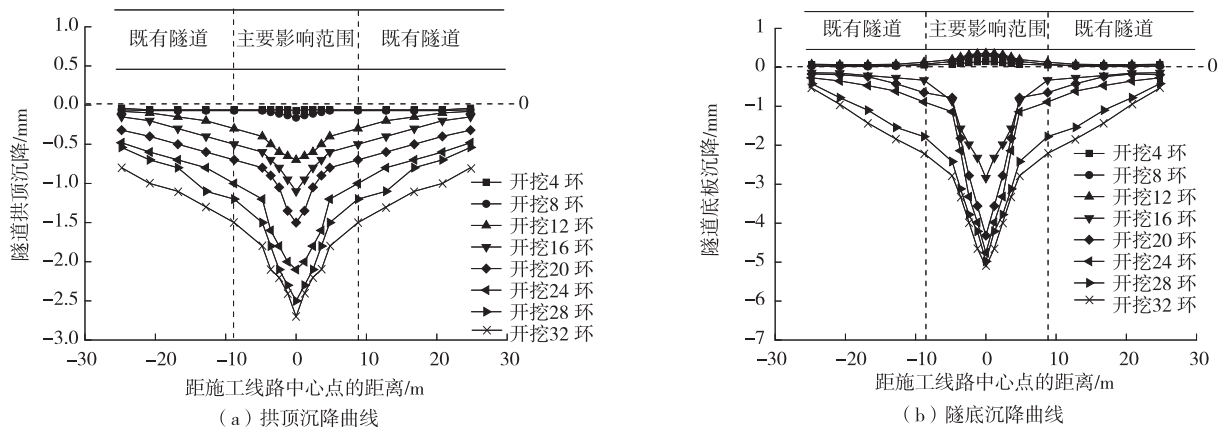


图5 既有隧道各工况拱顶及隧底沉降曲线

由图5、图6可知:既有隧道沉降呈V形对称分布,新建隧道掌子面未通过相交区域(开挖0~14环)时,隧底向上隆起,最大隆起量0.36 mm。这是由于在新建隧道盾构推力作用下,掌子面前方产生一个主动破坏的楔形滑动体,导致前方土体向上方

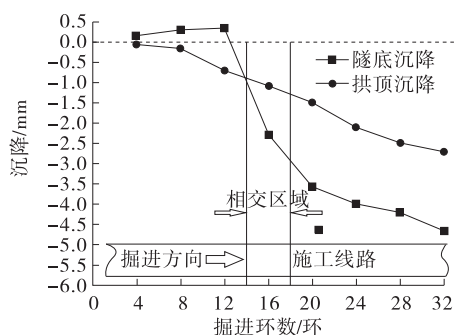


图6 既有隧道最大沉降变化曲线

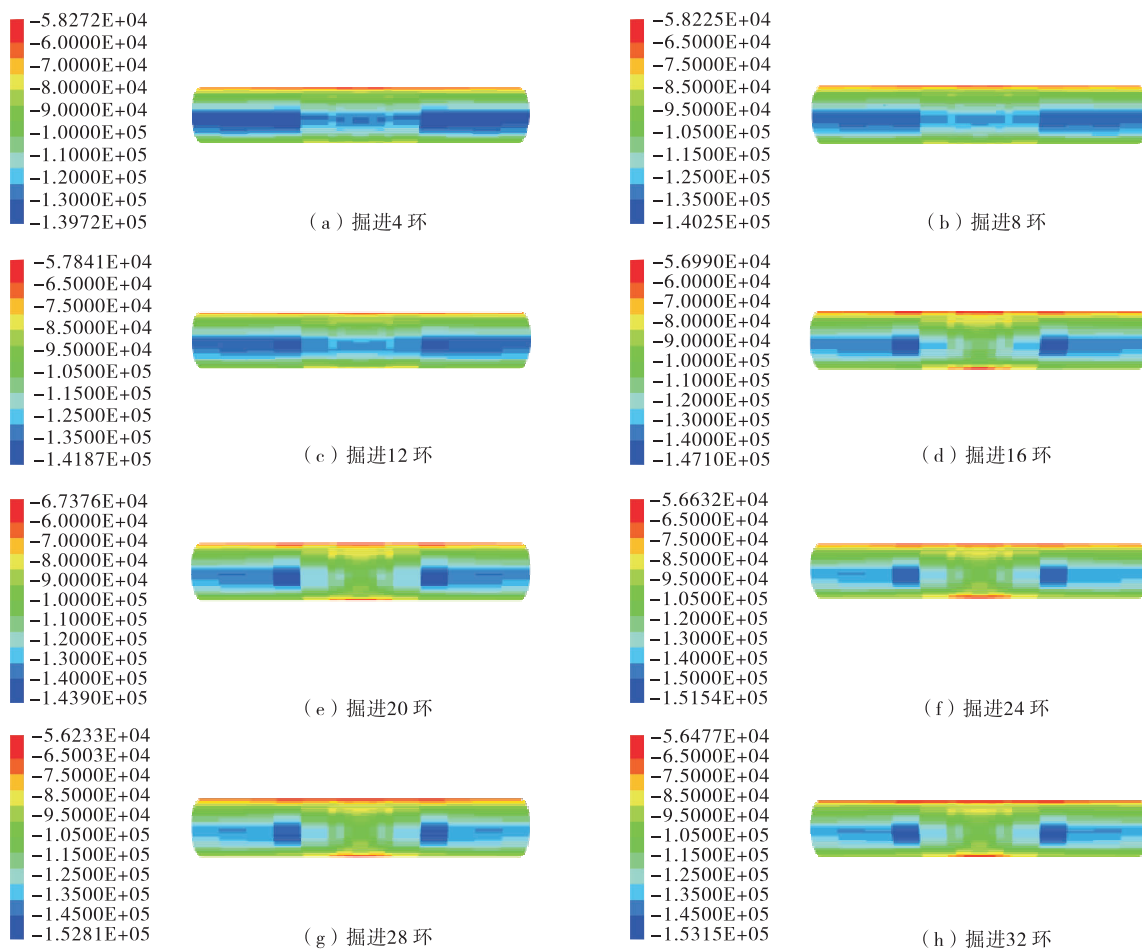


图7 既有隧道应力变化云图(单位:Pa)

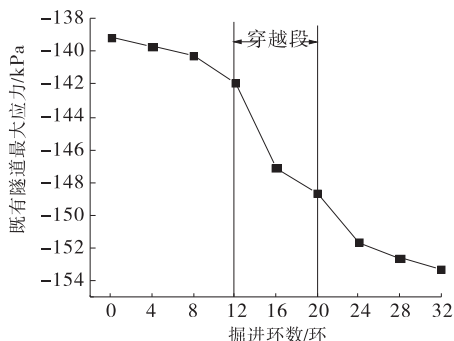


图8 既有隧道最大应力变化曲线

产生移动,引起既有隧道底部向上位移。新建隧道通过相交区域(开挖18~32环)后,因施工线路土体损失,应力释放,既有隧道底板向下沉降,最大沉降量5.12 mm,既有线隧道主要沉降区域位于左右两侧10 m范围,其余范围沉降量较小,主要影响范围内隧道不均匀沉降达0.05%,超过CJJ/T 202—2013限值($<0.03\%$),新建隧道施工前应采取加固措施。

3.2 既有隧道内力

既有隧道应力情况见图7、图8。

从图7可看出:新建隧道开挖未通过相交区域时,隧底的最大应力维持在75~80 kPa;隧道掘进通过后,隧底应力降至50~60 kPa。与隧底沉降规律一致。

从图8可看出:新建隧道开挖对既有隧道结构内力的影响较大,结构内部最大应力由未开挖前的139.2 kPa增至开挖后的153.2 kPa,增幅约10%,可能对既有隧道内部结构产生破坏,应采取相应加固措施并加强对既有管片应力监测。

4 敏感性因素分析

为探究不同盾构推力、新建隧道与既有隧道间距及新建隧道覆土厚度对既有隧道的扰动大小,基于前文构建的数值模型,分别修改这3个因素重新进行计算。因篇幅有限,主要分析不同因素对既有隧道底板沉降的扰动规律。

4.1 盾构推力

前文数值计算模型中盾构推力 $p = 380$ kPa,且存在 20 kPa 的波动压力未考虑。分别取盾构推力 p 为 360、370、380、390、400 kPa,分析既有隧道的沉降变化,结果见图 9。

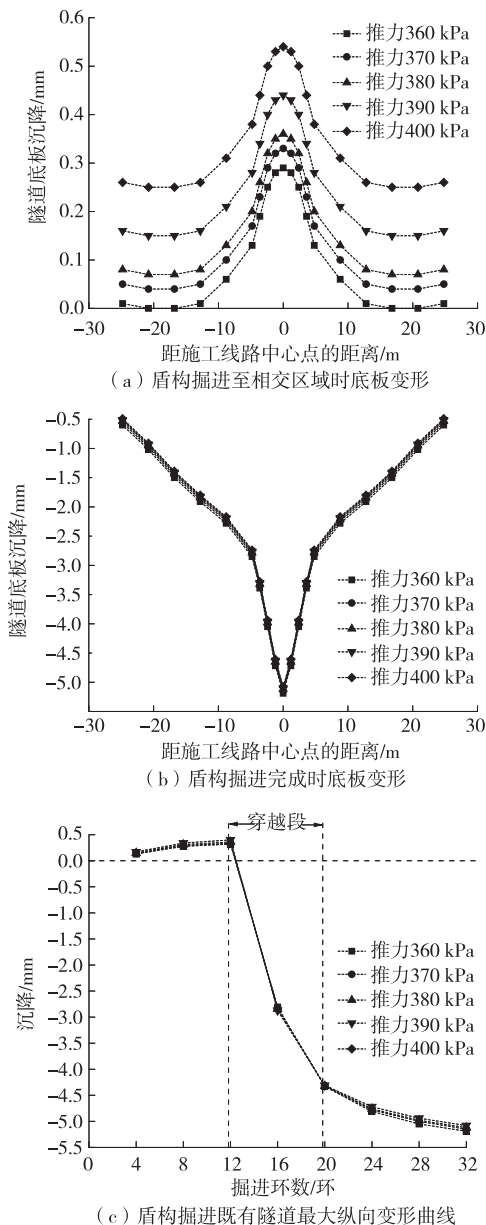


图9 不同盾构推力沉降曲线

从图 9 可看出:新建隧道开挖至 12 环时,既有隧道拱底隆起量随着盾构推力的增加而增大,且盾构推力增减幅度一致情况下,增加推力导致的隆起效果更明显;盾构推力越大,既有隧道的最终沉降越小,但效果不明显,主要原因可能是盾构推力越大,对掌子面前方土体的挤压作用越大,从而减小了应力释放导致的后续沉降。

4.2 与既有隧道的距离

原模型中,按照现场实际设计布置,新建隧道与既有隧道的距离为 2.1 m,该距离再减小的可能性较小。因此,重新构建两线距离为 4.1、6.1、8.1 m 的数值计算模型,分析既有隧道底板沉降的变化,结果见图 10。

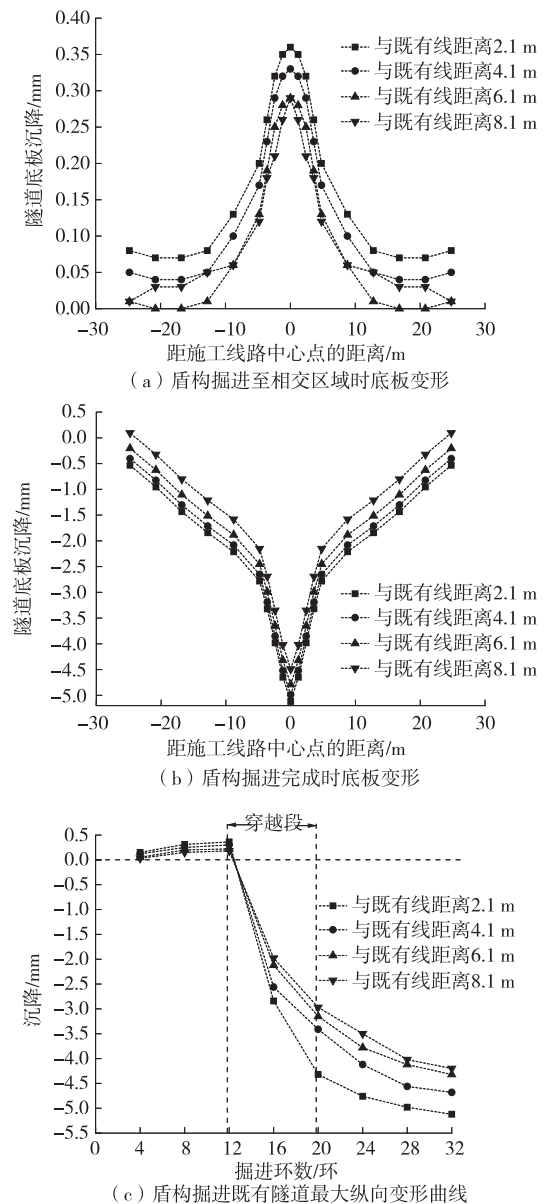


图10 不同两线距离沉降曲线

从图 10 可看出:两线距离越大,施工导致的沉降越小;两线距离小于 1 倍洞径($<6.4\text{ m}$)时,既有隧道沉降受两线距离变化较敏感;大于 1 倍洞径后,既有隧道沉降变化程度较小。

4.3 上层覆土厚度

原模型中新建隧道的覆土厚度为 20.1 m ,将上覆各土层按照厚度权重分别增加或减少相同比例,得到 16.1 、 18.1 、 22.1 、 24.1 m 覆土厚度模型,计算不同覆土情况下既有隧道沉降,结果见图 11。

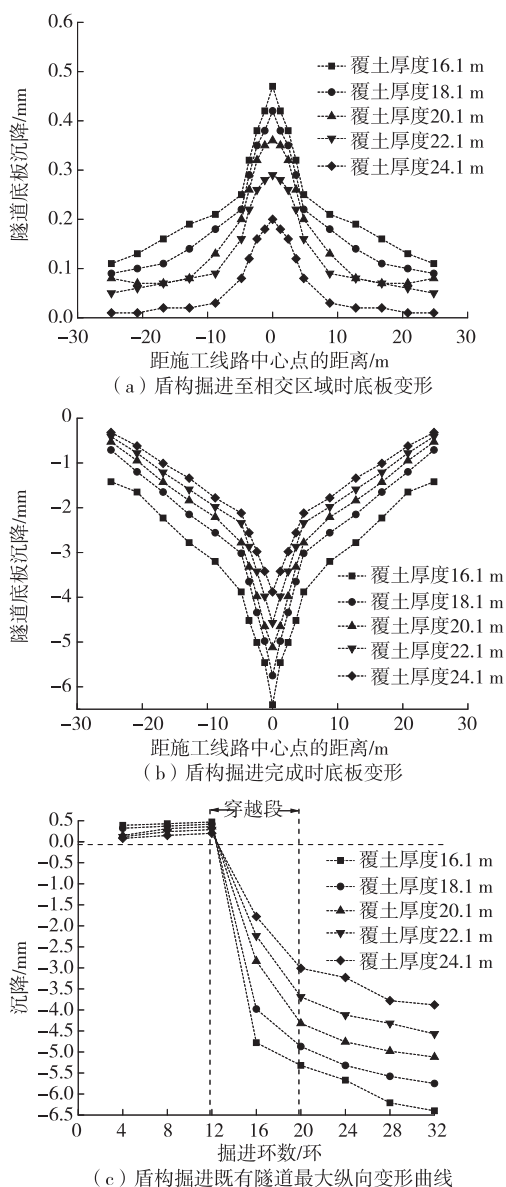


图 11 不同覆土厚度沉降曲线

从图 11 可看出:上覆厚度越大,既有隧道隆起和沉降越小。主要原因可能是土拱效应作用,在软土隧道中,隧道埋深越大,土拱效应作用越充分,开挖导致的土体释放荷载分推比例越大,既有隧道结

构所受荷载越小,从而减小了既有隧道的沉降。

5 结论

构建新建隧道下穿既有隧道数值计算模型,分析下穿既有隧道的扰动效应,得到以下结论:1) 新建隧道下穿会对既有隧道结构沉降和内力产生较大影响,应采取对应加固措施进行控制。2) 施工阶段,既有隧道隆起随盾构推力增加而增大,最终沉降随盾构推力增加而减小;既有隧道隆起和沉降随两线距离的增加而减小,且在小于 1 倍洞径时尤为显著;覆土厚度变化改变了土拱效应作用,厚度越大,土拱作用越明显,既有隧道受到的扰动荷载越小,沉降越小。

文中只构建了正交下穿计算模型,未考虑新建隧道斜下穿的情况,同时未考虑新建隧道同步注浆压力、盾壳摩阻力及盾壳空隙等因素对既有隧道结构沉降及内力的影响,有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 康佐,代光辉.地铁盾构法隧道正交下穿施工对既有隧道影响分析[J].隧道建设,2014,34(10):931-936.
- [2] 杨成永,马文辉,彭华,等.地铁双线盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J].铁道工程学报,2018,35(7):94-101.
- [3] 贺雪来,龙四春.盾构下穿既有地铁隧道沉降研究[J].矿业工程研究,2018,33(3):37-44.
- [4] 杨春山,莫海鸿,陈俊生,等.近距离下穿盾构隧道对上覆运营地铁隧道的影响研究[J].现代隧道技术,2015,52(5):145-151.
- [5] 来弘鹏,郑海伟,何秋敏,等.砂土地层盾构隧道小角度斜下穿既有隧道施工参数优化研究[J].中国公路学报,2018,31(10):134-144.
- [6] 陈艺元.盾构同步注浆复合水泥基-水玻璃双液浆材料特性研究及强度模拟试验[D].北京:北京交通大学,2017.
- [7] 傅鹤林,胡才超,林锐,等.曲线盾构隧道开挖面被动极限支护力分析[J].铁道工程学报,2018,35(11):48-54.
- [8] 广州地铁设计研究院有限公司.城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T 202-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [9] 陈越峰,张庆贺,季凯.盾构下穿越施工对已建隧道沉降的影响[J].地下空间与工程学报,2011,7(增刊1):1490-1494.

(下转第 144 页)

间,及时封闭成环;断面之间的变化尽量优化至最优,利用机械作业减少人工作业强度,加快施工进度、降低安全风险。

(4) 利用渐变施工分岔大跨段,拱架尺寸多,加工及施工过程中常出现乱用现象,后期如何做好加工及安装的准确把控是关键。

(5) 隧道小净距、大跨度、变断面处施工风险较高,易发生围岩失稳滑塌现象,施工前需加强超前支护,做好各项围岩加固措施。

(6) 在围岩破碎或稳定性较差时,超前帷幕注浆如何做到最优,需后续结合不同地质情况及断面布置形式进行考虑。

参考文献:

- [1] 王建.大跨度公路隧道交叉分岔段施工方案研究[J].公路交通技术,2009(1):98—101.

(上接第 133 页)

声波透射法相较于其他方法具有一定优越性,对桩基检测能起到指导作用。

参考文献:

- [1] 方锐.超声波透射法在基桩完整性检测中的应用[J].西南公路,2014(3):75—78.
- [2] 苏忠高.低应变法动测判断基桩桩端性状初探[J].公路交通科技(应用技术版),2010(4):112—114.
- [3] 尹秀杰,杨万里,鲍琪祥.声波透射法与低应变反射法检测基桩完整性的比对研究与统计分析[J].公路交通科技(应用技术版),2018(3):288—290.
- [4] 李鲁忠.采用钻芯法检测端承型大直径灌注桩承载力的探讨[J].建筑科学,2014,30(9):103—106.
- [5] 肖春喜.超声波透射法在检测大直径灌注桩完整性中

- [2] 李新刚.大跨度交岔点快速施工技术[J].矿山压力与顶板管理,2004,21(1):40—41.
- [3] 胡云鹏.大跨度小净距分岔隧道双向施工关键技术研究[J].铁道建筑技术,2018(12):77—80.
- [4] 毕强,吴金刚.大跨分岔式隧道结构设计关键技术研究[J].隧道建设,2011,31(6):668—677.
- [5] 林立华.分岔隧道大拱段衬砌结构受力分析[J].土工基础,2007,21(6):64—66.
- [6] 荆永军,樊至,欧阳刚杰,等.长沙营盘路湘江隧道分岔大跨施工技术[J].隧道建设,2013,33(3):231—236.
- [7] 尚江鹏.大跨分岔隧道分岔段施工方法优化[J].建筑工程技术与设计,2019(16):1620—1621.
- [8] 蔡东明.大跨分岔隧道分岔段施工方法研究[C]//中国公路学会隧道工程分会.2015年全国公路隧道学术年会论文集.重庆:重庆大学出版社,2015:349—358.

收稿日期:2020—06—10

的应用[J].岩土力学,2003(增刊1):169—171.

- [6] 黄海珍.声波透射法桩基检测在高速公路中的应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018(4):243—244.
- [7] 胡运兵,宋劲,徐宏武.声波透射法在桥桩安全检测中的应用[J].地下空间与工程学报,2005,1(5):800—803.
- [8] 李廷,徐振华,罗俊.基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J].岩土力学,2010,31(10):3165—3172.
- [9] 吴庆曾.论声参量波幅的应用[J].岩土工程界,2000(8):9.
- [10] 郑明燕,孙洋波.声波透射法在灌注基桩完整性检测中的应用研究[J].铁道建筑,2010(10):137—139.

收稿日期:2019—11—27

(上接第 139 页)

- [10] 王立新,汪珂,李储军.黄土地区地铁盾构隧道近距离下穿既有有线影响规律及控制标准研究[J].铁道标准设计,2019,63(10):124—130+158.
- [11] 徐伟忠,刘树佳,廖少明.盾构埋深对软土土拱效应影响分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):111—118.
- [12] 姜辉.横琴隧道主洞与匝道施工相互影响研究[J].公路与汽运,2020(2):147—150+155.
- [13] 刘五一,张健,周中.土仓压力对隧道近接既有隧道盾

构施工影响分析[J].公路与汽运,2018(4):145—149+171.

- [14] 仇文革.地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D].成都:西南交通大学,2003.
- [15] 李军,吕婧,刘瑞.新建隧道施工对近距离既有隧道的影响及安全风险评估[J].公路与汽运,2017(5):183—187.
- [16] 闻毓民.两孔平行盾构隧道近接施工的力学行为分析[D].成都:西南交通大学,2005.

收稿日期:2020—03—31