

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.008

# 厦门地铁盾构区间下穿厦深高速铁路路基变形 分析与控制技术

程巧建

(中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:**盾构隧道下穿既有铁路施工不可避免地会对周边岩层产生扰动,导致铁路线路的不平顺而危及行车安全。该文以厦门地铁2号线盾构下穿厦深线高速铁路路基工程为依托,通过Peck沉降公式和PLAXIS-2D、MIDAS-GTS有限元软件进行数值模拟,分析盾构施工对高速铁路路基与轨道变形影响的时空分布规律;同时在盾构下穿前设立100 m试验段,通过对深层位移孔、地表沉降点监测得到岩层变形规律和盾构合理推进参数,为盾构下穿高速铁路路基提供理论支持。下穿过程中,通过对高速铁路路基和轨面变形的自动化监测,实时调整盾构推进参数以减小引起的沉降,盾构穿越后实测路基最大沉降0.97 mm,确保了高铁运营安全。

**关键词:**盾构隧道;高速铁路;路基变形;有限元分析

随着城市轨道交通的大规模建设,盾构隧道下穿铁路工程逐渐增多,盾构穿越既有线施工不可避免会对周边岩体产生扰动,引起沉降、变形等病害,影响结构安全。目前盾构施工工艺成熟,但也发生多起工程事故,如南京地铁、广州地铁3号线、上海地铁、西安地铁和台湾高雄地铁施工中,多次引起地面塌陷和地表构造物破坏,造成较大经济损失。在此背景下,对盾构下穿高速铁路路基的变形分析与控制技术研究显得尤为重要。该文依托厦门轨道交通2号线项目,就东孚站~马銮北站盾构区间下穿厦深高速铁路路基沉降变形与控制、监控量测及数据分析等方面进行研究,分析岩层

沉降规律,确保高铁运营安全。

## 1 工程概况

厦深高速铁路的盾构影响段为路基形式,设计速度为200 km/h,双线电气化铁路,采用有砟轨。东孚站~马銮北站盾构区间线路与铁路线路的交角为70°,距铁路路肩的垂直距离为24.5~24.6 m。铁路路基施工时下方土体采用搅拌桩加固,加固深度为中粗砂层以下1 m。线路位置关系见图1,下穿段岩层参数如表1所示。

表1 东孚站~马銮北站盾构区间下穿厦深高速铁路岩层参数

岩层类型	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/ $\text{kPa}$	卸载再回弹 性模量/ $\text{kPa}$	泊松比	不排水抗剪 强度/ $\text{kPa}$	标贯修正击数/ [击·(30 cm) $^{-1}$ ]
素填土	18.1	48 960	146 880	0.25	40.8	6.8
粉质黏土	18.6	81 360	244 080	0.40	67.8	11.3
中粗砂	19.0	26 800	80 400	0.30	—	18.5
凝灰熔岩残积土	20.2	205 920	617 760	0.25	171.6	28.6
全风化凝灰熔岩	20.2	205 920	617 760	0.25	171.6	28.6
散体装强风化凝灰熔岩	24.6	342 720	1 028 160	0.20	285.6	47.6
水泥土搅拌桩	19.0	100 000	300 000	0.20	—	—

收稿日期:2020-05-21(修改稿)

基金项目:中交第四航务工程局有限公司科技课题(编号:2016A-02-I-01)

作者简介:程巧建,男,高级工程师, E-mail: cqiaojian@cccc.com

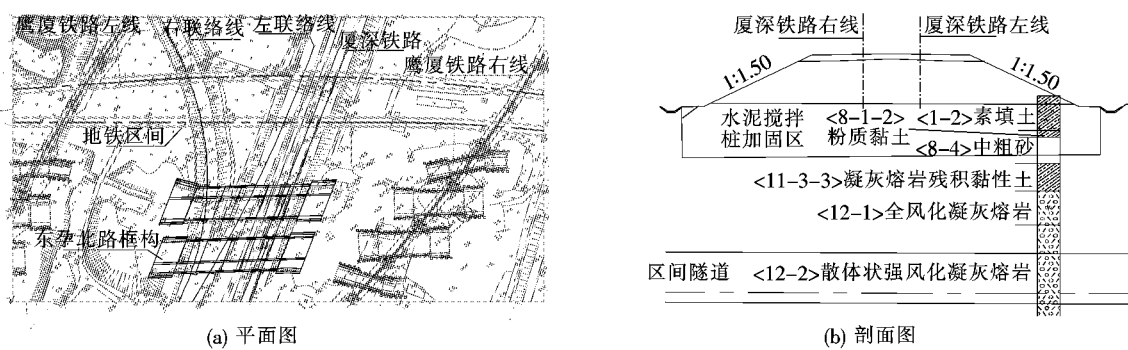


图 1 盾构区间与厦深高铁位置关系

2 仿真模拟

为计算盾构施工对厦深高速铁路路基的沉降影响,分别采用 Peck 经验公式和 PLAXIS-2D、MIDAS-GTS 有限元软件进行模拟计算,得到盾构穿越后最大沉降量,同时根据地层变形规律布设试验段监测点。

2.1 Peck 经验公式沉降槽计算

横向地表沉降及最大地表沉降根据 Peck 经验公式计算如下:

$$s(x) = s_{\max} \exp\left(\frac{x^2}{2i^2}\right) \tag{1}$$

$$s_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \approx \frac{V_s}{2.5i} \tag{2}$$

式中: $s(x)$ 为距离隧道中线  $x$  处的地面沉陷量(mm); $s_{\max}$ 为隧道中线的地面沉陷量; $i$ 为沉陷槽的宽度系数。

由散体状凝灰熔岩参数  $\varphi=30^\circ$ ,可得沉陷槽的宽

度系数为:

$$i = \frac{z}{\sqrt{2\pi} \cdot \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \tag{3}$$

式中: $\varphi$ 为隧道周围地层内摩擦角。

$$V_s = V_i \pi r_0^2 \tag{4}$$

式中: $V_i$ 为地层损失率; $r_0$ 为盾构外轮廓半径。

根据表 1 和厦门地区相关施工经验取地层损失率为 0.54%,得到区间隧道施工时引起的厦深高速铁路路基的沉降最大为 4.21 mm。

2.2 盾构区间仿真模拟

有限元仿真模拟本构模型见表 2。根据表 1、2 参数,采用 PLAXIS-2D 有限元软件进行数值模拟,分析总体盾构下穿高速铁路路基的整体沉降量;采用 MIDAS-GTS 模拟盾构掘进施工过程对厦深高速铁路路基的影响。整体沉降模拟计算结果如图 2 所示,盾构掘进施工过程模拟计算结果如图 3 所示。

表 2 有限元仿真模拟本构模型

软件类型	项目	本构模型	备注
PLAXIS-2D	岩层	摩尔-库仑弹-塑性本构模型	设置地层损失率
	盾构管片	弹性本构模型	设置地层损失率
	岩层	线弹性、实体单元	采用卸载再回弹性模量
	盾构管片	线弹性、壳单元	采用初始加载弹性模量
MIDAS-GTS	注浆体	线弹性、壳单元	采用初始加载弹性模量
	盾构机	线弹性、壳单元	采用初始加载弹性模量
	同步注浆	线弹性、壳单元	采用初始加载弹性模量
	壁后注浆	线弹性、壳单元	采用初始加载弹性模量

由图 2、3 可知:

- (1) 盾构穿越后铁路路基最大沉降量为 4 mm,与 2.1 节 Peck 经验公式计算结果一致,参数选取合理。
- (2) 先行盾构通过时铁路路基的沉降已发生总沉

降的 75%,说明在岩层的原始地应力被扰动时,对地层的沉降影响最大。

- (3) 在距离隧道 40 m 处发生了明显的位移拐点(图 2),即路基沉降的影响范围为隧道埋深的 2 倍。

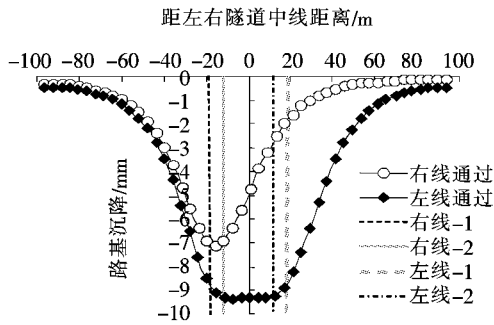


图 2 路基沉降横向影响范围

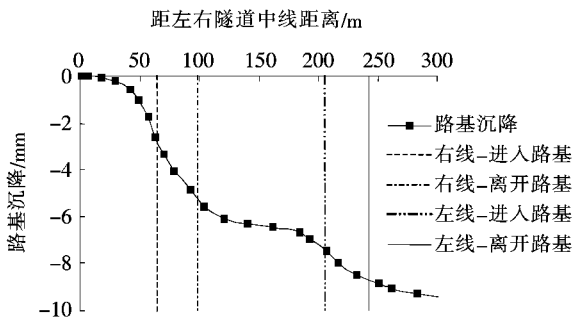


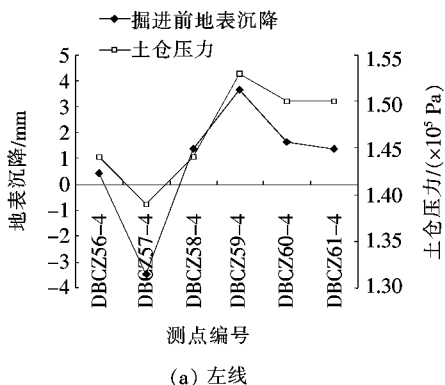
图 3 盾构掘进过程路基沉降变化

(4) 双线盾构通过铁路路基后产生的沉降为 9.4 mm, 沉降曲线在距铁路路基边坡坡脚 26 m 处出现明显拐点, 掘进过程对路基的影响程度明显增加。

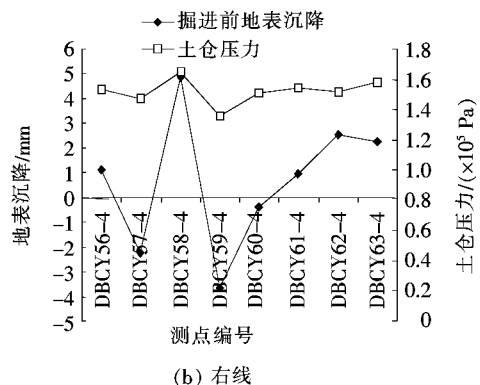
### 3 试验段施工过程地层变形分析与参数控制

#### 3.1 试验段布设

根据仿真模拟计算结论, 为得到盾构掘进过程实际沉降量和研究盾构推进参数、同步注浆和二次注浆对岩层变化的影响, 在盾构下穿高铁路基前设置 100 m 试验段, 分析得到盾构下穿高铁路基盾构最佳推进参数。试验段布设如图 4、5 所示。



(a) 左线



(b) 右线

图 6 土仓压力与地表沉降关系

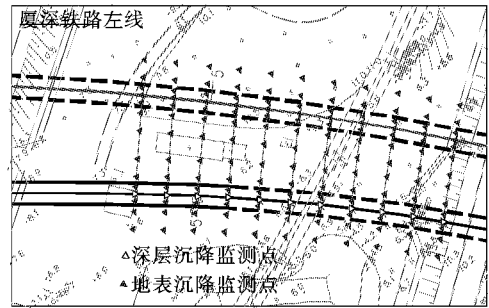


图 4 盾构掘进试验段平面布置

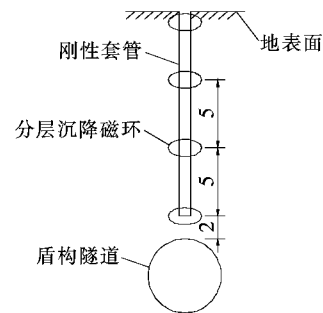


图 5 盾构掘进试验段深层沉降监测布置(单位:m)

#### 3.2 试验段过程控制及监测结果

试验段施工过程中, 在保持 35~40 mm/min 推进速度的前提下, 根据试验段监测数据, 得到刀盘前方地表沉降与盾构土仓压力关系如图 6 所示, 盾构掘进过程中(同步注浆完成)地表沉降速率与盾构注浆压力关系如图 7 所示。

(1) 由图 6 可知: 左右线土仓压力分别在 1.45、 $1.55 \times 10^5$  Pa 可使盾构刀盘前方土体出现约 1.0 mm 微隆起, 为推荐土仓压力参数。

(2) 由图 7 可知: 左右线同步注浆压力在  $2.5 \sim 3.0 \times 10^5$  Pa、终压  $3.0 \sim 3.3 \times 10^5$  Pa 可使掘进过程中产生的地层损失得到较好补偿。

(3) 根据监测数据选取盾构下穿厦深高速铁路路基推进参数如表 3 所示。

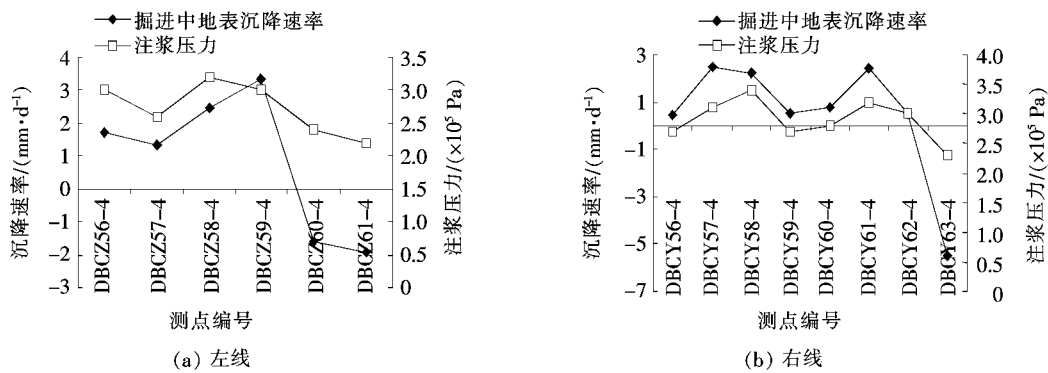


图7 注浆压力与地表沉降速率关系

表3 盾构下穿厦深高速铁路路基参数

项目	土仓压力/ ( $\times 10^5$ Pa)	千斤顶总 推力/kN	推进速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	刀盘转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	同步注浆压力/ ( $\times 10^5$ Pa)	同步注 浆量/m <sup>3</sup>	出土量/ m <sup>3</sup>
左线	1.45	15 000~17 000	35~40	1.20	3.0~3.2	5.2~5.4	51~53
右线	1.55	18 000~20 000	35~40	1.20	3.0~3.2	5.2~5.4	51~53

4 高速铁路路基变形控制措施

- (1) 严格按照表3推进参数施工,主要控制土仓压力、千斤顶总推力和掘进速度,使刀盘前方土体出现约1.0 mm微隆起。
- (2) 严格控制盾构掘进出土量,当出土量出现3%误差时,需进行异常分析并采取紧急处理措施。
- (3) 结合图2、3的沉降曲线,同步注浆采取注浆压力(终压 $3.2 \times 10^5$  Pa)与注浆量双控原则,紧密结合施工监控量测的反馈信息,使注浆后地表沉降变化速率出现正值,以补偿掘进过程中产生的地层损失。
- (4) 二次注浆采取2~3次补注浆措施,直至监测数据稳定,日变化速率小于0.2 mm/d。
- (5) 在施工期间对线路实施全天24 h的监控,如沉降或位移变化无异常时监测频率为1次/(4 h)。在盾构切口进入道床下方至盾尾脱出之间监测频率为1次/(2 h)。监测点布置见图8。

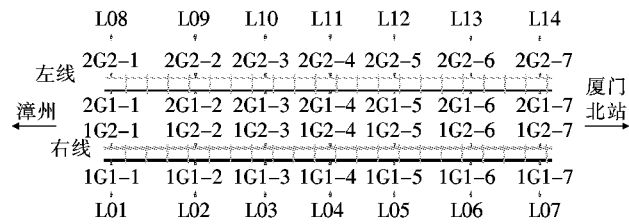


图8 盾构下穿厦深高速铁路路基监测点平面布置

5 沉降变形控制效果及分析

通过前文确定的盾构推进参数和各项控制措施,可得到盾构下穿厦深高速铁路路基、轨面时间—沉降曲线如图9、10所示。

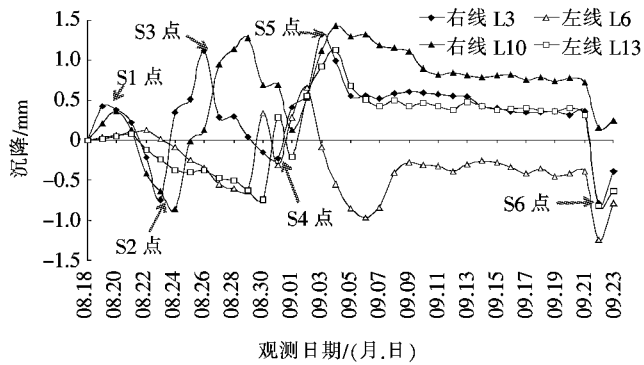


图9 厦深高速铁路路基的时间—沉降曲线(2018年)

- (1) 由图9、10可知:高速铁路路基最大隆起为1.43 mm、最大沉降为0.97 mm,引起铁路轨面最大隆起0.7 mm、最大沉降0.41 mm,满足铁路运营要求。
- (2) 以图9中右线L3时间—沉降曲线为例,适当调高土仓压力使刀盘前方土体微隆起出现S1点,掘进完成后出现较快沉降值S2点,同步注浆和二次注浆完成后路基出现隆起至S3点,由于浆液凝固后自收缩出现二次沉降值S4点,根据监测数据的变化采取补浆措

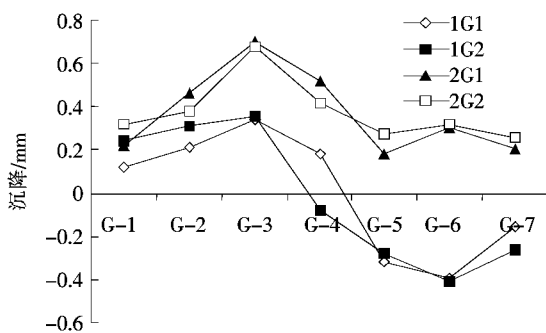


图 10 厦深高速铁路轨面的时间—沉降曲线

施至 S5 点,后续沉降趋于稳定;图中 S6 点为盾构通过后铁路部门大机养护扰动导致。

(3) 由图 2、3 理论沉降曲线与图 9 实测沉降曲线对比可知,通过试验段选取的盾构推进参数合理,通过多次补浆措施有效地减少了后期地表沉降。

(4) 将实测结果与 Peck 公式、仿真模拟结果进行分析,Peck 公式由于计算内容较为单一,没有考虑其他过程控制措施带来的减少沉降,使最终计算结果相对较大。

竖向位移监测数据随时间变化历程变化图中,实际监测结果为一段时间隆起一段时间沉降,但总体表现趋势为下沉,数值模拟结果为先隆起后随时间逐渐沉降,因为在数值模拟中把盾构注浆简化为使隧道周围土体的物理力学参数改变,没有考虑注浆量对轨面竖向位移的影响,所以并没有监测结果中的起起伏伏。

实测结果与仿真模拟结果总体的变化趋势一致,均为随着盾构的掘进,竖向位移表现为下沉,且由于在正式穿越过程中,增加了同步注浆、二次注浆等措施,有效地防止了地表沉降,使实际监测的结果更保守,更安全。

## 6 结论

结合盾构下穿厦深高速铁路路基的工程实例,采

取数值模拟、试验段、现场监测等手段,分析了盾构穿越施工对既有线路路基沉降的影响规律,总结出盾构施工参数优化和沉降控制措施。得到以下结论:

(1) 采用有限元数值模拟结果可以有效预判、评价施工风险,根据数值模拟沉降变化规律,调整施工参数和工艺,可为路基沉降控制提供理论支持。

(2) 双线盾构隧道施工,先行盾构引起的地表沉降大于后行盾构引起的地表沉降。

(3) 通过试验段选取合理的盾构参数是控制路基沉降的关键,穿越前适当调高土仓压力使刀盘前方土体微隆起约 1.0 mm,并采取多次补浆措施直至沉降日变化速率小于 0.2 mm/d,最终使沉降结果小于 Peck 计算公式及模拟分析结果,对控制路基沉降效果明显。

## 参考文献:

- [1] 竺维彬,鞠世健,史海鸥. 广州地铁三号线盾构工程施工技术研究[M]. 广州:暨南大学出版社,2017.
- [2] 张鹏. 地铁隧道下穿高速铁路地表沉降控制标准研究[J]. 地下空间与工程学报,2014(S1).
- [3] 冯超,高志刚. 地铁盾构隧道下穿宁启铁路的变形影响规律及控制技术[J]. 隧道建设,2015(10).
- [4] 白延辉,刘树佳,等. 软土地区盾构掘进速度对地层扰动现场试验研究[J]. 岩土力学,2016(7).
- [5] 任建喜,李庆园,等. 盾构诱发的地表及邻近建筑物变形规律研究[J]. 铁道工程学报,2014(1).
- [6] 杨成永,马文辉,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(7).
- [7] 谭文,易觉,等. 首例盾构在灰岩地区近距离下穿高速铁路基段技术[J]. 都市轨道交通,2018(2).
- [8] 刁伟铁. 轨道交通盾构隧道下穿铁路保护技术分析[J]. 地下工程与隧道,2015(2).
- [9] 刘鑫榕. 地铁隧道长距离下穿高速公路施工扰动影响及控制技术研究[J]. 中外公路,2019(4).
- [10] 陈彬科,陈林杰,吴建辉,等. 新建地铁下穿既有轨道车站施工方案研究[J]. 中外公路,2018(6).