

# 广州地铁 CRD 法隧台车站施工变形规律研究

陆 跃

中铁上海工程局集团有限公司, 上海 201906

**[摘要]** 广州地铁 13 号线西场站便是基于交叉中隔墙法先隧后台挂厅的组合车站形式, 该站周边邻近既有居民楼、高架桥桩以及既有地铁站, 对施工变形控制要求高。本论文以广州地铁 13 号线西场站为工程背景, 通过现场监测、有限元数值模拟等方法, 研究交叉中隔墙法侧式隧台施工引起的地表变形规律, 重点分析左右洞室施工工序对地表变形时空分布规律的影响, 为优化 CRD 法施工变形控制提供科学依据。

**[关键词]** 交叉中隔墙法; 先隧后台; 地表变形; Peck 理论

DOI: 10.33142/sca.v8i3.15804

中图分类号: TU94

文献标识码: A

## Research on the Deformation Law of CRD Tunnel Platform Station Construction in Guangzhou Metro

LU Yue

Shanghai Civil Engineering Group Co., Ltd. of CREC, Shanghai, 201906, China

**Abstract:** Xichang Station on Guangzhou Metro Line 13 is a combination station form based on the cross partition wall method, with a tunnel platform and a hanging hall. The station is adjacent to existing residential buildings, elevated bridge piles, and existing subway stations, requiring high requirements for deformation control during construction. This paper takes the Xichang Station of Guangzhou Metro Line 13 as the engineering background. Through on-site monitoring, finite element numerical simulation and other methods, it studies the surface deformation law caused by the construction of the cross partition wall method side tunnel platform. The focus is on analyzing the influence of the left and right tunnel construction processes on the spatiotemporal distribution law of surface deformation, providing scientific basis for optimizing the deformation control of CRD method construction.

**Keywords:** cross partition wall method; first tunnel backend; surface deformation; Peck's theory

### 引言

在我国, 盾构法和浅埋暗挖法是修建地铁隧道的主要施工方法, 盾构法因其修筑速度快而被广泛采用。地铁车站的建设与地铁隧道的修建相辅相成密不可分, 地铁车站之间间距小, 盾构机掘进长度远大于车站间距, 若在两车站间设置盾构井不仅发挥不了盾构机优势且提高了线路工程造价。为此, 有学者创新性提出“先隧后站”施工方法, 区别于传统先修建地铁车站后开挖隧道, 该方法采用盾构先行, 将线路各区间段隧道进行盾构贯通, 再扩挖地铁车站的施工顺序, 因此也称为盾构扩挖法。该方法的优点在于减少了盾构机装拆、掉头等施工时间, 避免盾构掘进与车站修建互相干扰, 大大优化了线路施工组织设计。

但有些车站由于地层的特殊性及周边建筑环境的复杂性, 导致盾构法不适用, 只能选择浅埋暗挖法。广州地铁 13 号线西场站便是基于交叉中隔墙法先隧后台挂厅的组合车站形式, 该站周边邻近既有居民楼、高架桥桩以及既有地铁站, 对施工变形控制要求高。此外, 该站采用了先暗挖建站台、后明挖建厅、最后顶管施工建连接通道等多种工法组合施工, 对周边环境的影响机理其复杂。研究复杂敏感环境下基于交叉中隔墙法先隧后台挂厅组合车站建造关键技术, 不仅为保障本站施工安全提供支撑, 也可以为今后其他类似

的基于浅埋暗挖的先隧后厅车站提供科学依据。

通过调研国内外研究, 可以发现目前关于先隧后厅、先隧后站的研究, 主要集中在盾构隧道, 缺乏基于浅埋暗挖法的先隧后站研究, 亟需展开基于浅埋暗挖法先隧后站的关键技术研究, 为相关研究填补空白, 同时为相关工程提供科学依据和支撑。

本文以广州地铁 13 号线西场站为工程背景, 通过现场监测、Peck 理论、有限元数值模拟等方法, 研究交叉中隔墙法侧式隧台施工引起的地表变形规律, 重点分析左右洞室施工工序对地表变形时空分布规律的影响, 为优化 CRD 法施工变形控制提供科学依据。

### 1 工程概况

西场站位于东风西路如图 1 所示, 在环市西高架与德坭立交(广三铁路高架桥)两个高架引桥之间, 周边主要有广雅小学, 荔教大厦, 和平南小区, 和平新村等。线路与已运营的五号线十字相交。车站为地下二层侧式站台车站, 明暗挖结合施工, 站厅站台隧道分离设置, 与既有五号线西场站换乘。车站有效站台中心里程为 CK16+007.010, 设计起终点里程为 CK15+906.510~CK16+107.510, 全长 201m。站台隧道采用交叉中隔壁 CRD 法施工, 导洞施工顺序如图 2 所示。



图1 广州市轨道交通十三号线西场站地理位置示意图

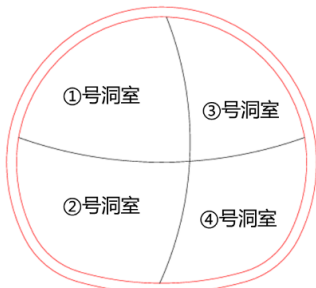


图2 CRD工法导洞开挖顺序图

南站厅、北站厅及南侧1号风亭组,均采用明挖法施工。北侧明挖站厅基坑长度为144.7m,宽度为19.1m~21.1m;南侧明挖站厅基坑长度为111.2m,宽度为20.7m~39.8m;南侧风亭基坑长度为32.1m,宽度为31.2m;3个明挖基坑深度均约为20.6m,南北站厅设置3个顶管通道。明挖结构拟采用地下连续墙+内支撑支护形式。地基承载力要求不小于180kPa。车站站台隧道采用暗挖法施工,隧道拱顶埋深约为10m,结构净宽约为10.7m,结构净高约为9.85m,采用复合式衬砌结构形式。

勘察时初见水位埋深为0.8~3.30m,标高为5.01~7.96m;混合稳定水位埋深为1.00~3.70,标高为4.61~7.66m。根据地下水位及揭示岩土层接触情况分析,本标段第四系松散层孔隙水、基岩裂隙水与地表水整体性存在一定的水力联系,具有同一自由水面,整体性而言均为承压水,但局部区段存在潜水,根据本次各孔观测到的水位综合考虑,其水头的水位高度可按地表以下1m考虑。

站台暗挖隧道及顶管通道顶板之上地层主要为残积土粉质黏土<5N-1>、<5N-2>及全风化层<6>;隧道洞身主要穿越残积土粉质黏土<5N-2>、全风化层<6>及强风化泥质粉砂岩<7-3>,局部为中风化泥质粉砂岩层<8-3>,隧道综合围岩分级为V级。隧道洞径范围内软硬不均匀,施工较为不利;顶管经过碎块状强风化砾岩<7-1>及强风化泥质粉砂岩时有一定困难。

根据现场地质勘察、现场测试及室内实验,隧台上下影响范围内土层分布及主要物理力学指标如表1所示。

表1 土层分布及主要物理力学指标

层号	地层名称	平均层厚(h)/m	容重( $\gamma$ )/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力(C)/kPa	内摩擦角( $\phi$ )/°
1-1	杂填土	1.2	18.0	13	12.0
1-2	素填土	1.1	18.7	13	12.0
2-1	粉质黏土	9.2	18.8	24.2	12.6
2-2	淤泥质粉质黏土 夹黏质粉土	7.3	18.1	15.5	12.0
2-3	砂质粉土	4.5	19.0	12.9	27.3
2-4	粉砂夹砂质粉土	9.4	19.4	9.1	32.1

## 2 CRD法车站地表变形监测

### 2.1 CRD法车站施工地表变形现场监测分析

为监测CRD法站台隧道施工过程中对地表变形的影响,对西场站左、右线隧道上方地表变形各设置了2个监测断面,共4个监测断面、12个监测点如图3所示。监测断面和监测点示意图如图3所示。左线①断面上测点为5D0603、5D0602、5D0601;左线②断面上测点为DC2001、DC2002、DC2003。右线③断面上测点为4DC402、4DC403、4DC404;右线④断面上测点为4DC503、4DC504、4DC505,两隧道轴线间距为15m。

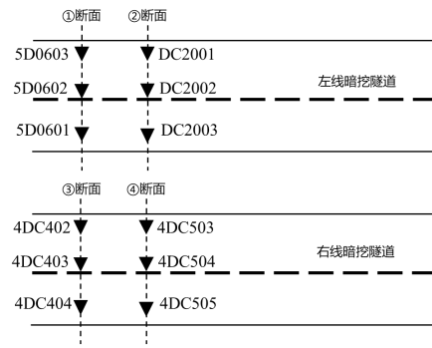


图3 西场站监测断面布置

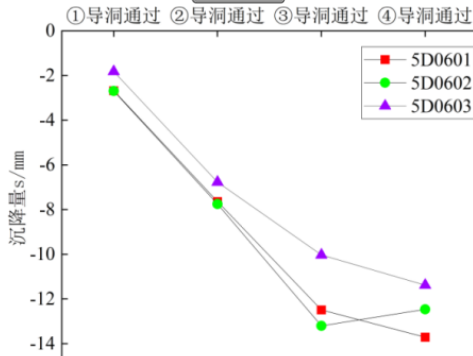
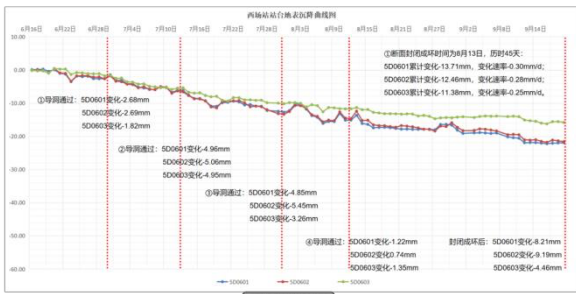


图4 西场站左线①号监测断面地表沉降曲线

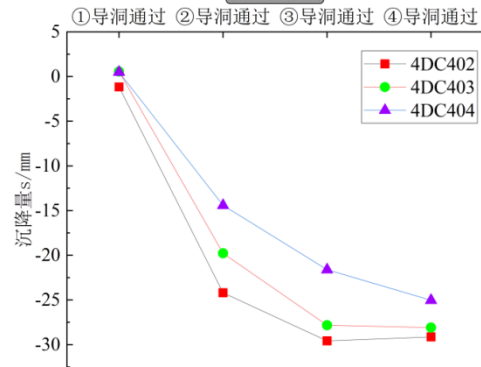
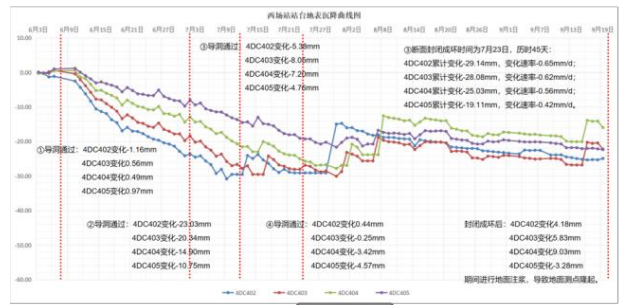


图6 西场站右线③号监测断面地表沉降曲线

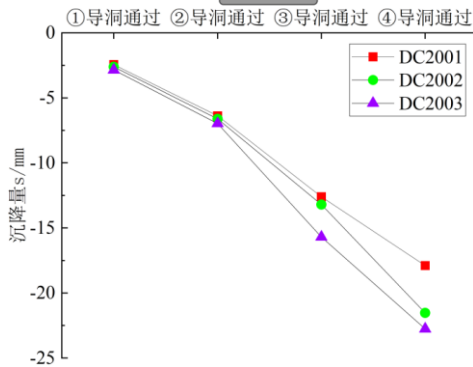
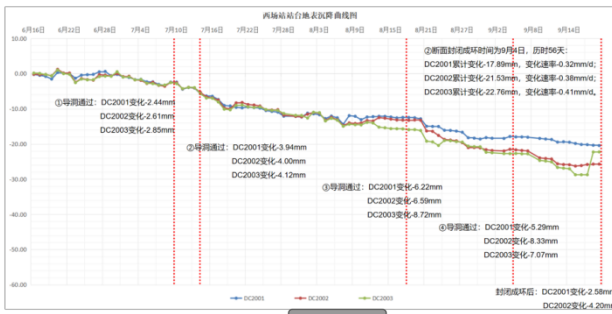


图5 西场站左线②号监测断面地表沉降曲线

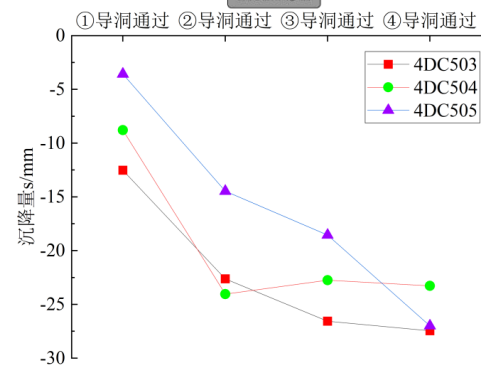
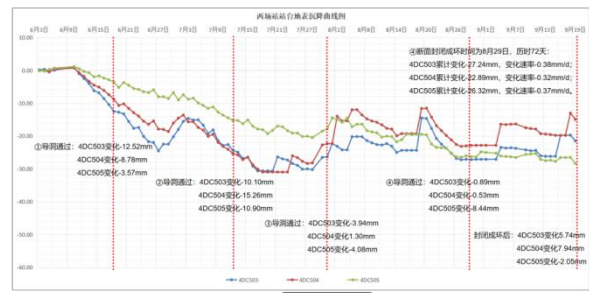


图7 西场站右线④号监测断面地表沉降曲线

图4、5分别为西场站左线监测①号、②号监测断面地表各个测点沉降变化曲线。在导洞施工过程中，西场站左线监测断面各个测点的沉降速率在0.25mm/d至0.41mm/d之间，随时间增加，由于注浆的影响，变形速率下降，变形曲线趋于平缓。测点最大累计沉降出现在左线②断面DC2003测点，为22.76mm。在断面封闭成环后，测点DC2001与测点DC2002沉降变形稳定。

图6、7分别为西场站右线监测③号、④号监测断面地表各个测点沉降变化曲线。在导洞施工过程中，西场站右线监测断面各个测点的沉降速率在0.32mm/d至0.65mm/d之间，大于左线监测断面的沉降速率测点最大累计沉降出现在右线③断面4DC402测点，为29.14mm，大于左线监测点最大沉降值。断面在断面封闭成环后沉降先趋于稳定而后有减小趋势。整理统计沉降数据，在④号



洞通过 4 断面后,各个断面地表监测沉降分布曲线如图 8,由于隧道掘进先后以及监测断面地层条件,监测误差等,最大地表沉降点偏离双线隧道轴线中心。

### 2.2 地表变形 Peck 公式预测

Peck<sup>[10]</sup>基于大量的实测地表沉降结果,认为土体的沉降是由于土体的损失导致的,土体在沉降时不排水,其损失体积等于沉降槽的体积,同时地表沉降槽近似成正态高斯分布:

$$S(x) = S_{\max} \bullet \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1.1)$$

式中  $x$  为隧道两侧横向上距隧道中心的水平距离;  $S(x)$  与  $S(\max)$  分别为测点距离隧道轴线  $x$  m 处的地表沉降量以及隧道中心处的最大沉降量;  $i$  为曲线反弯点距离隧道中心的距离。对 Peck 公式求对数可得:

$$\ln S(x) = \ln S_{\max} + \frac{1}{i^2} \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (1.2)$$

以  $\ln S(x)$  与  $-\frac{x^2}{2}$  作为回归变量,根据监测沉降数据进行回归分析,可得到断面①③与断面②④的线性回归方程。断面①③回归方程如下,对应  $S_{\max}$  为 21.69mm,  $i$  为 16.43m,

$$\ln S(x) = 3.0769 + 0.0037 \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (1.3)$$

拟合后 peck 曲线与实测沉降分布曲线对比如下图 8(c),

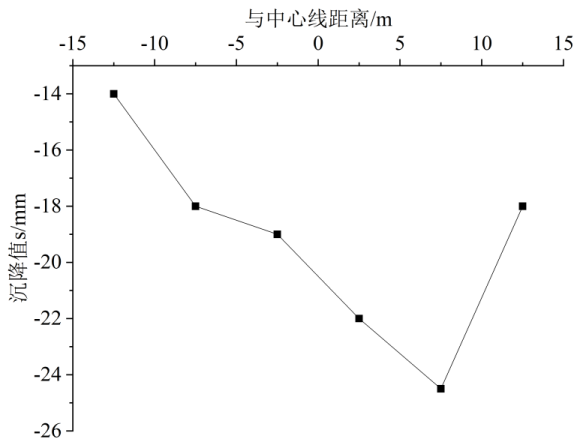
对于②④断面沉降槽分布进行回归拟合,断面②④的回归方程如下,对应  $S_{\max}$  为 24.46mm,  $i$  为 24.25m,

$$\ln S(x) = 3.1974 + 0.0017 \times \left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (1.4)$$

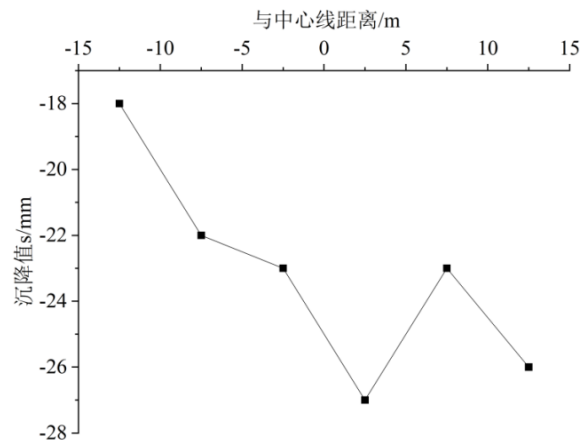
### 2.3 地表变形有限元数值分析

#### 2.3.1 有限元数值模型建立

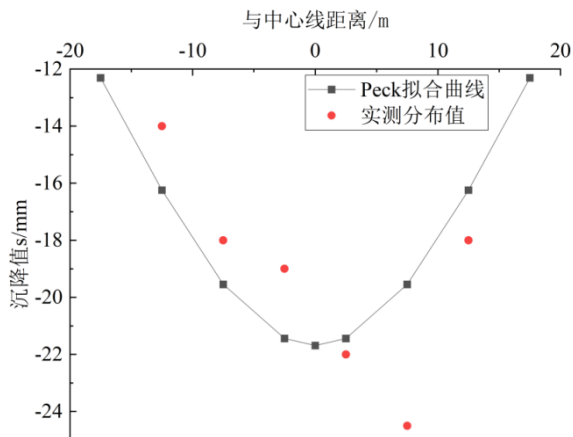
采用 ABAQUS 有限元分析软件建立西场站左、右线隧道开挖过程三维有限元数值模型并进行分析。数值模拟计算中,为减少模型边界对计算结果的影响,模型高度建议为隧道开挖深度的 3~5 倍,模型一侧距隧道距离为隧道开挖深度的 2~3 倍。隧道开挖深度为 9.8m,因此有限元模型的高度设置为 40m,模型边界距隧道开挖边界 20m,由此建立建模范围 156m×75m×40m 的计算模型。隧道开挖三维计算模型如图 2 所示。考虑土体重力荷载等,隧道开挖重力加速度取  $9.8\text{m/s}^2$ 。模型中土体为弹塑性材料,采用摩尔-库伦本构模型进行模拟。



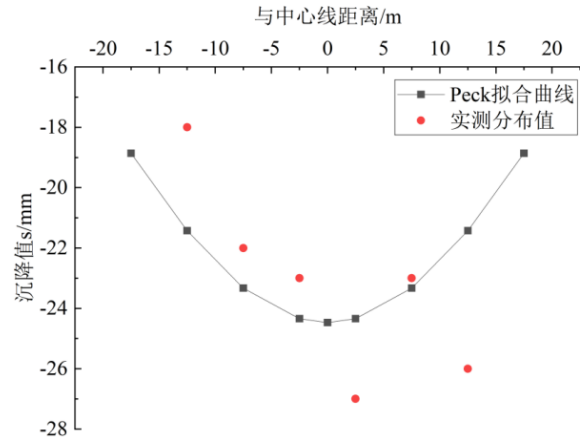
(a) 西场站①③断面沉降分布曲线



(b) 西场站②④断面沉降分布曲线



(c) 西场站①③断面沉降槽分布对比



(d) 西场站②④断面沉降槽分布对比

图 8 断面地表监测沉降分布曲线

ABAQUS 模型在继承传统有限元软件优点的同时，考虑了材料非线性、几何非线性和接触非线性等复杂问题。引入了先进的材料本构模型，可以较为全面地描述各种材料（如金属、塑料、橡胶、复合材料等）在不同荷载条件下的力学行为，包括弹塑性变形、损伤和断裂等。也可以模拟复杂的加载历史和应力路径，对于实际工程中各种复杂工况的模拟具有很高的准确性。本模型中土体参数采用西场站现场各土质参数进行取值<sup>[9]</sup>。

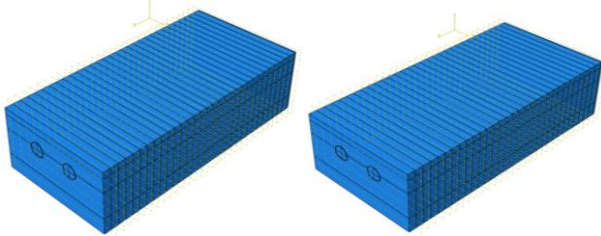


图9 隧道开挖有限元数值模型

### 2.3.2 有限元数值结果分析

#### ①土体位移以及应力状态计算结果

本模型隧道纵向长度 156m，开挖进尺为 5m。地应力平衡完成后开始进行开挖，下面我们对一些分析步时的位移和应力状态进行介绍，地应力平衡时分析步，左线开挖 40m，右线开挖 5m 时分析步，开挖长度 100m 时分析步和全部开挖完成时的分析步，三维有限元模型土体位移如图 10 所示。在右线开挖时，右线隧道拱顶沉降值逐渐增大，底部隆起量逐渐增大；采用 CRD 法开挖左线时，也会对右线拱顶沉降量产生影响，在两侧隧道同时开挖时，拱顶沉降量以及底板隆起量逐渐增大。

开挖过程中，土体应力状态变化如图 11 所示，在开挖左侧时，隧道；在开挖右侧时，隧道；两侧同时开挖时，开挖完成时。

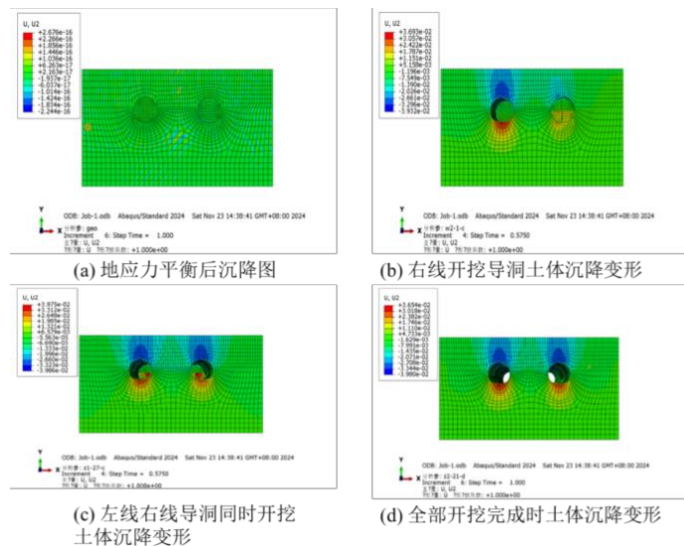


图 10 三维有限元模型土体沉降变形状态

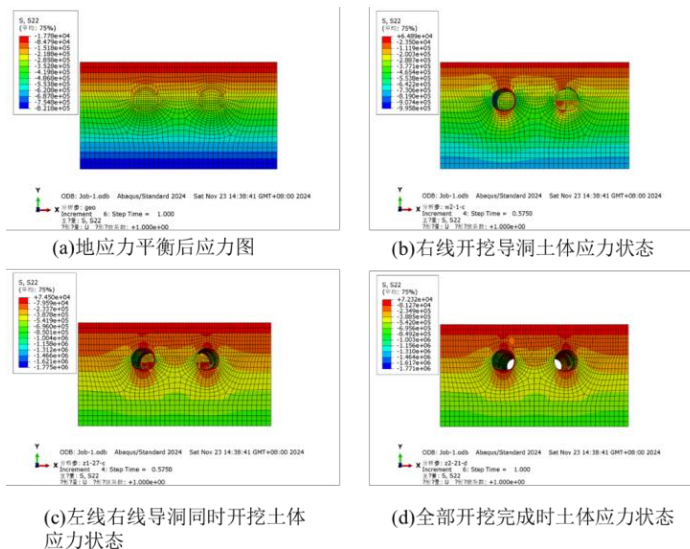


图 11 三维有限元模型土体应力状态

### ②沉降槽分布对比

图 12~13 为①③断面实际监测沉降分布曲线以及其 Peck 拟合沉降槽,与有限元模型计算的数值结果对比分析图。根据对比分析结果,对于①③断面,Peck 拟合曲线与实测分布值较为一致,数值计算结果整体上有一定偏差;对于②④断面,Peck 拟合曲线相比于数值计算结果更为接近于实测值。

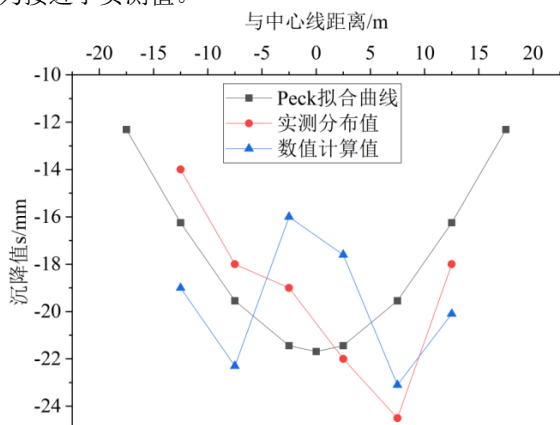


图 12 ①③断面沉降槽分布曲线对比

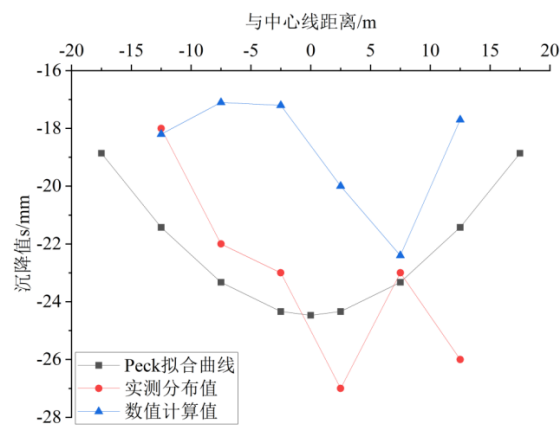


图 13 ②④断面沉降槽分布曲线对比

### 3 结论

通过数值模拟分析和工程监测分析,得出广州地铁西场站 CRD 法施工车站变形主要表现为拱顶沉降。广州地铁西场站左、右线隧道施工引起的地表沉降特征如下:(1)广州地铁西场站左、右线一号断面,二号断面,三号断面最终沉降均小于 60mm,大于某沉降值的累计发生频率曲线符合正态分布。分析结果为制定地表沉降控制标准提供

了依据。(2)结合本文的研究结论,可根据车站的埋深、跨度、开挖面积、支护措施和施工方法确定地表沉降槽曲线反弯点距离取值范围,综合考虑地层条件、施工水平和工程经验,进一步优化 CRD 法施工的开挖进尺、开挖顺序和施工面错距等参数,提高施工效率和质量,降低变形风险。(3)结合 Peck 公式对比分析,可以看出实际检测值与拟合值较为接近,但数值模拟结果有一定偏差,最大沉降位置与隧道中心线有一定偏离。

### [参考文献]

- [1]王卫东.《基坑工程手册》第二版[Z].上海市,华东建筑设计研究院有限公司,2009-12-01.
- [2]梅国雄,宋林辉,周峰,等.地下空间开发中的岩土工程关键技术[J].南京工业大学学报(自然科学版),2008(4):98-104.
- [3]吉泳安,孟舰.南京江北新区中心区地下空间一期基坑涌水事故处理与启示[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):94-99.
- [4]樊冬冬,刘祥勇,景旭成,等.南通富水砂性地层地铁深基坑墙体渗漏原因分析[J].隧道建设(中英文),2020,40(1):225-231.
- [5]杨宇,王奎,刘佑祥,等.某深厚软土基坑事故分析及抢险加固设计案例[J].岩土工程学报,2014,36(1):175-179.
- [6]王树和,郑政,张举兵,等.土钉墙支护基坑对邻近地下管线的影响[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):19-24.
- [7]李方明,陈国兴.江漫滩悬挂止水帷幕基坑地表沉降变形研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(1):33-40.
- [8]BENZ T.Small Strain Stiffness of Soils Its Numerical Consequences[D].Stuttgart:University of Stuttgart,2006.
- [9]罗敏敏,陈赞,周江.小应变土体硬化模型参数取值研究现状与展望[J].工业建筑,2021,51(4):172-180.
- [10]PECK R. Deep excavations and tunnelling in soft ground[Z]. 1969.

作者简介:陆跃(1984.7—),男,2006年6月毕业于东南大学-交通工程专业,任职中铁上海工程局集团有限公司,高级工程师。