

盾构下穿群楼桩基施工数字模拟沉降控制技术研究

张健

中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司

摘要: 随着国民经济的发展,全国各大城市的地铁建设均被提上日程,盾构法作为一种先进的工法在地铁工程中得到了广泛应用。然而,如何制定合理的方案以控制盾构隧道工程的施工风险,是盾构隧道施工过程中需重点研究的问题。本文依托成都地铁10号线二期土建4标段工程盾构下穿时代广场群楼桩基工程,以多软件联合建立数值模型并导入有限差分软件FLAC^{3D}中进行数值模拟,对地表累积沉降量进行监测,并制定相应的风险控制方案,得到以下结论:①未采取施工风险控制方案时,数值模拟盾构下穿时代广场建筑群桩基时地表累积最大沉降达26mm,接近30mm的预警值;②采取制定的风险控制方案后,数值模拟盾构下穿时代广场建筑群桩基时地表累积最大沉降为8.8mm,现场监测数据显示,盾构下穿时代广场建筑群桩基时地表累积最大沉降为12.8mm;③数值模拟得到的结果较为可靠,可为后续工程方案的制定提供一定的参考。

关键词: 地铁盾构隧道;下穿;桩基;数值模拟;控制方案;沉降

一、引言

随着国民经济的快速发展,地铁建设正在我国各大城市如火如荼的展开。盾构工法作为一种较为先进的隧道掘进工法,其具有掘进速度快、掘进安全性高等优点,因此在地铁建设中得到了广泛应用。而盾构隧道施工时,势必会打破原有土体的应力状态,导致地表发生沉降或隆起,进而影响城市地面建、构筑物的安全。因此,采取合理的施工风险控制技术,确保地表沉降、隆起数值在安全范围之内,是盾构地铁隧道建设过程之中的重中之重。

依托计算机技术的长足发展,数值模拟技术在工程方案的制定过程中得到了广泛应用。本文以成都地铁10号线二期土建4标段工程盾构下穿时代广场群楼桩基为背景,以多软件(Rhinoceros-Griddle)联合建模的方式建立数值模拟模型,后采用FLAC^{3D}有限差分软件进行数值模拟,结合施工现场监测数据,提出合理的施工风险控制技术方案,其经验可为类似的工程提供参考。

二、工程概况

成都地铁10号线二期土建4标段工程分两站(五津站、儒林路站)三区间(花桥站~五津站区间(含512m明挖段及645m盾构区间)、五津站~儒林路站区间、儒林路站~刘家碾站区间),全长3.584Km,主线里程桩号YCK32+554.633~YCK36+138.438。

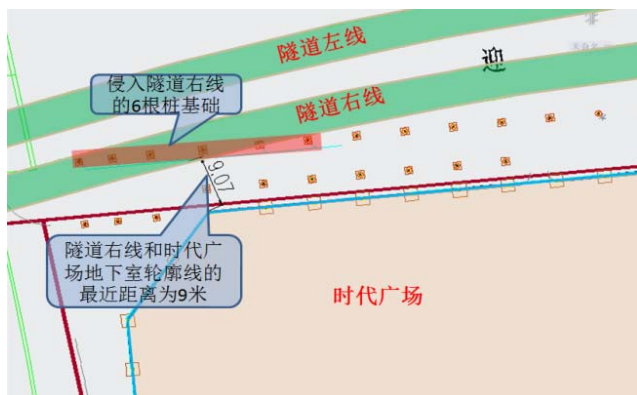


图1 盾构隧道与群楼桩基位置关系

其中,花桥站~五津站盾构区间在里程YCK33+180~YCK33+245范围内下穿时代广场南侧建筑附属平台板桩基,如图1,图2所示。根据时代广场施工图资料可知,盾构右线隧道下穿时代广场主体结构与大件路连接的平台板的桩基础,其中6根已施工的基础桩基侵入右线隧道开挖范围约1.5m,已经破除(人工挖孔桩),其中,右线隧道与时代广场地下室最小净距约9m。

三、数值模拟模型构建

(一) 模型构建

采用多软件联合建模^[1]的方式建立的数值计算模型如图3所示。地铁盾构隧道外径D=6m,管片厚度300mm,宽度1500mm。盾构隧道开挖循环进尺为1.5m。考虑到边界效应对数值计算结果的影响^[2],模型边界至开挖隧道边界取3~5倍隧道直径,模型宽度(X方向)取48m,长度(Y方向,沿隧道轴线方向)取78m,高度(Z方向)取24.1m。考虑地铁盾构隧道的施工实际情况,模型左、右两侧面施加位移边界条件,前、后两侧面施加位移边界条件,底面施加位移边界条件,而顶面为自由面,不施加边界条件。同时,参考地铁施工地表沉降监测点布置方式,在模型顶面分7排6列共布置42个沉降监测点。为保证计算结果的精确性,在盾构隧道周围对网格进行了加密,共划分150096个节点,872023个实体单元。

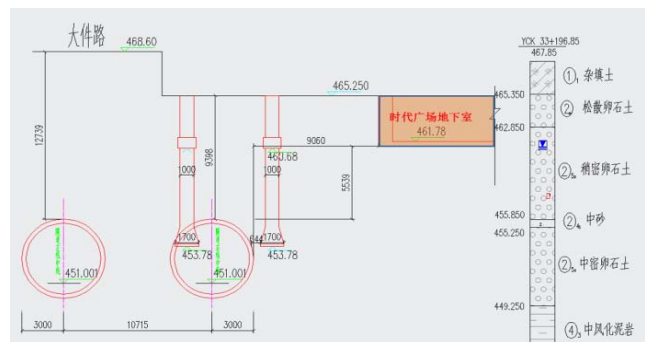


图2 桩基侵入盾构隧道示意

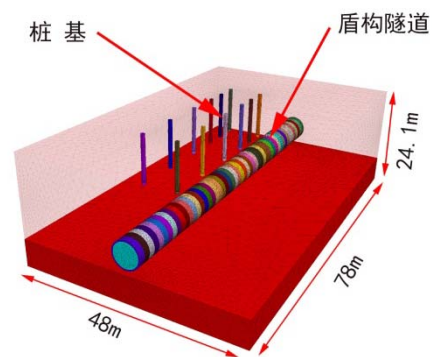


图3 数值计算模型示意

(二) 模型参数选取

参考施工地质勘测报告,在保证数值模拟结果可靠的前提下,将模型简化为5个平行地层,而盾构隧道主体位于中密卵石土地层之中。岩土体、桩基、管片本构模型均选用Mohr-Coulomb模型^[3,4],并以实体单元进行模拟。模型具体计算参数如表1所示。

表1 地铁盾构隧道数值模拟参数

地层与材料	密度 (kg·m ⁻³)	体积模量 (MPa)	剪切模量 (MPa)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)
松散卵石土	2100	21	17.9	12	38
稍密卵石土	2150	22	18.7	16	40
中砂	1735	27	15	14	25
中密卵石土	2200	16.7	16.7	20	35
中风化泥岩	2300	67	43	40	36
C15群桩	2325	1078.4	1666.7	3180	54.9
管片	2500	2000	1500	2000	56

四、数值模拟结果分析

(一) 未采取控制方案结果分析

未采取控制方案时，数值模拟得到的地表沉降量云图如图4所示。从云图中可以看出，地表累积沉降量最大达到了26mm。而根据施工设计方案，该段隧道下穿时代广场建筑群桩基时，地表最大沉降量应控制在30mm以内，26mm的沉降值已非常接近最大允许沉降值，若施工过程中控制不当，可能会造成时代广场建筑群变形量过大，从而影响建筑群的正常使用，甚至导致安全事故。因此，势必要制定适用于现场情况的施工风险控制方案，控制地表沉降，从而保证地铁盾构隧道下穿时代广场建筑群时，时代广场建筑群的安全正常使用。

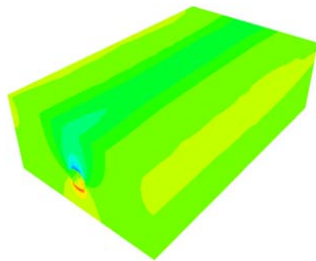


图4 未采取控制措施时地表沉降

(二) 施工风险防控方案

参考有关标准规范与条件类似工程的处置方案，针对成都地铁10号线二期土建4标段工程下穿时代广场群桩基施工制定如下施工风险防控方案：

(1) 设计防控措施：

① 盾构右线施工下穿时代广场前，已经将侵入隧道范围内的柱基础破除完成，并采用C15混凝土回填，其中隧道范围内的人工挖孔桩护壁采用玻璃纤维筋；

② 盾构通过后，对右线洞周2m范围内地层进行二次补偿注浆，加固范围：YDK33+180~YDK33+245。洞内二次注浆要求：在盾构通过段里程YDK33+180~YDK33+245的管片上增设注浆孔，根据地质及掘进情况，盾构通过后从洞内对隧道周围2m范围内进行二次注浆，加固土体。二次注浆采用单液浆，注浆材料采用P.042.5级普通硅酸盐水泥，注浆压力控制在0.3~0.4MPa之间，稳压时间不小于30分钟。

(2) 施工防控措施：

① 通过前准备：盾构掘进通过时代广场群桩基之前，对盾构机进行检修，确保盾构机的各功能构件完好，垂直、水平运输后配套设施齐全，加强各流程间的施工衔接，保证施工连续

性和盾构匀速、快速通过，减少开挖过程中对土体的扰动。

② 掘进控制：

a. 土仓压力控制：土压力的设定值要与地层实际地质情况、隧道埋深相匹配，以弥补盾尾沉降损失；

b. 掘进速度控制：砂卵石地层中正常推进时速度控制在40~60mm/min之间。若速度异常，应及时分析原因，避免盲目掘进导致刀盘及刀具的损坏等意外事故发生；

c. 姿态控制：掘进中，及时控制盾构掘进方向，及时进行掘进纠偏，调整好掘进状态；

d. 对渣土进行良好的改良，采用泡沫剂+水混合液方式，并严格控制出渣量。

e. 掘进参数异常或掘进困难时，要及时停机分析原因并采取相应措施，避免盲目施工造成更坏影响；

盾构机具体掘进参数如表2所示

③ 控制同步注浆：同步注浆采用水泥、砂子、膨润土、粉煤灰和水混合浆液，初凝时间控制在6h，结实率大于95%，终凝强度不小于3MPa，注浆压力0.25~0.35MPa。为保证同步注浆质量，对注浆设备、材料及配合比进行严格控制，过程中制定专人负责记录。

④ 后期补浆：盾构通过后，根据掘进情况及沉降监测值，利用管片预留的注浆孔对地层进行补浆，必要时可在隧道线路上方重新钻孔注浆。

(三) 采取控制方案结果分析

在数值模拟中，通常以改变岩土体物理力学参数的方式模拟施工中的注浆体。参考有关文献并考虑到等效影响，本次数值模拟取注浆体的密度为2929kg/m³（在原基础上增加50%），体积模量取67MPa（在原基础上增加50%），剪切模量取43MPa（在原基础上增加50%），内聚力取40MPa（在原基础上增加50%），内摩擦角取29°（保持不变）。

采取施工风险控制方案后，数值模拟得到的地表沉降量如图5所示。从图中可以看出，在采取施工风险控制方案后，地表累积沉降的最大值由之前的26mm减小至8.8mm，远小于施工设计中30mm的地表沉降预警值，施工风险控制方案取得了明显的效果。

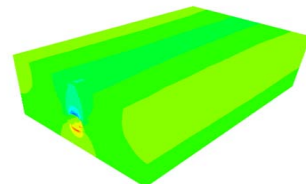


图5 采取控制措施时地表沉降

表2 盾构掘进参数取值

推力 (t)	扭矩 (t·m ⁻¹)	刀盘转速 (rpm)	土仓压力 (Bar)	注浆压力 (Mpa)	出土量m ³	每环注浆量 (m ³)	掘进速度 (mm·min ⁻¹)
800~1400	100~450	1~1.2	0.8~1.1	0.25~0.35	56	6~8	40~60

采取施工风险控制方案后，从数值计算模型监测点提取的地表监测点沉降历时曲线与施工现场实测得到的监测点沉降历时曲线如图6所示。分析图5可以得出，盾构隧道施工过程中，现场监测到的地表最大累积沉降值为12.8mm，较数值模拟监测到8.8mm最大累积沉降值大4mm。这是因为与数值模拟过程相比，现场施工存在较多扰动，且有许多不确定因素，会造成地表沉降量较数值模拟值偏大^[5]。同时，从图5可以看出，数值模拟得到的地表累积沉降历时曲线与现场实测得到的地表累积沉降曲线走向趋势大致相同，数值模拟与现场检测得到的曲线均呈“V”字型对称分布，这说明数值模拟得到的结果与施工现场实测得到的结果较为接近，误差在可以接受的范围之内。因此，在后续施工过程中，可参照数值模拟的结果，制定相应的施工风险控制方案并预测方案实施后得到的预期效果，为安全、高效施工提供一定保障。

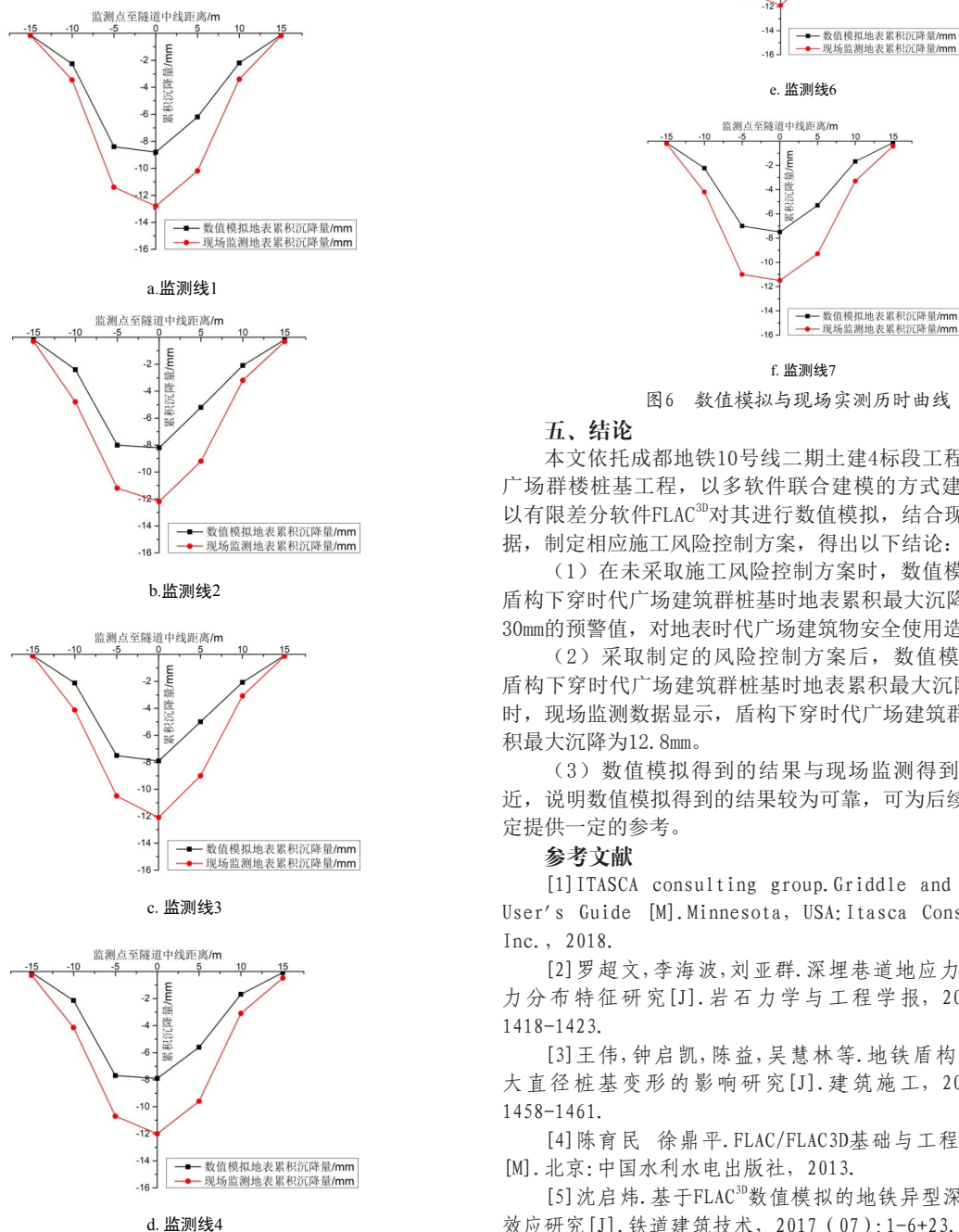


图6 数值模拟与现场实测历时曲线

五、结论

本文依托成都地铁10号线二期土建4标段工程盾构下穿时代广场群楼桩基工程，以多软件联合建模的方式建立数值模型并以有限差分软件FLAC^{3D}对其进行数值模拟，结合现场施工实测数据，制定相应施工风险控制方案，得出以下结论：

(1) 在未采取施工风险控制方案时，数值模拟结果显示，盾构下穿时代广场建筑群桩基时地表累积最大沉降达26mm，接近30mm的预警值，对地表时代广场建筑物安全使用造成较大威胁。

(2) 采取制定的风险控制方案后，数值模拟结果显示，盾构下穿时代广场建筑群桩基时地表累积最大沉降为8.8mm；同时，现场监测数据显示，盾构下穿时代广场建筑群桩基时地表累积最大沉降为12.8mm。

(3) 数值模拟得到的结果与现场监测得到的结果较为接近，说明数值模拟得到的结果较为可靠，可为后续工程方案的制定提供一定的参考。

参考文献

[1] ITASCA consulting group. Griddle and Block Ranger User's Guide [M]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc., 2018.

[2] 罗超文, 李海波, 刘亚群. 深埋巷道地应力测量及围岩应力分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (07): 1418-1423.

[3] 王伟, 钟启凯, 陈益, 吴慧林等. 地铁盾构施工对隧道间大直径桩基变形的影响研究[J]. 建筑施工, 2018, 40 (08): 1458-1461.

[4] 陈育民 徐鼎平. FLAC/FLAC3D基础与工程实例(第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[5] 沈启炜. 基于FLAC^{3D}数值模拟的地铁异型深基坑开挖阳角效应研究[J]. 铁道建筑技术, 2017 (07): 1-6+23.