

# 变位分配原理在十字交叉地铁站施工中的应用

戴文亭,王宇放,王 振,王 琦

(吉林大学交通学院,吉林 长春 130022)

**摘 要** 目的 制定长春地铁解放大路换乘车站主体结构分步施工沉降控制标准,以保证施工及地面建筑物和地下管线的安全,为类似工程提供技术支持. 方法 依据变位分配原理,将理论方法与实践相结合,采用 FLAC<sup>3D</sup>模拟分析换乘车站施工全过程,并将实际施工中出现的总沉降细化到各个施工阶段中. 结果 在十字换乘车站施工中关键的三个步骤分别为主体导洞开挖阶段、顶拱扣拱完成阶段、开挖单层结构导洞阶段,以上三步的地表沉降分别占地表总沉降的 22.41%、17.89% 和 41.01%;在采用主体结构分步施工沉降控制标准的情况下,累计控制的以上三阶段的沉降量分别为 25.52 mm、51.61 mm 和 103.05 mm,总地表沉降监测值严格控制在 118 mm 之内. 结论 变位分配原理在十字交叉换乘车站主体结构的施工过程中具有较好的实用性,有利于施工安全的控制与管理.

**关键词** 十字交叉;数值模拟;沉降控制标准;变位分配原理

中图分类号 TU94;U455

文献标志码 A

## Research on Applying the Principle of Displacement Distribution to Constructing the Road Cross Subway Station

DAI Wenting, WANG Yufang, WANG Zhen, WANG Qi

(School of Transportation, Jilin University, Changchun, China, 130022)

**Abstract:** Research and development of Changchun subway Jiefang Road transfer, to ensure the safety of construction and ground and underground pipelines, to provide technical support for similar projects. According to the principle of displacement allocation, using the combination of theoretical calculation and construction experience, According to the optimal construction scheme, the whole construction process of the transfer station is numerically simulated and the total settlement occurring in the actual construction is refined to the construction stage. The key steps in the construction of the transfer station are the construction phase of the main guide hole, the completion stage of the arch, the three stages of the single, the proportion of surface subsidence accounted for 21.41%, 17.89% and 41.01% respectively. Cumulative of 24.80mm, 51.89mm and 102.61mm,

收稿日期:2017-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51178204)

作者简介:戴文亭(1964—),男,教授,主要从事隧道及地下工程方面研究.

the total surface settlement monitoring value strictly controlled within 118 mm. The principle of displacement distribution has good practicability in the construction process of the main structure of the crossroads, is conducive to the construction safety control and management.

**Key words:** cross; numerical simulation; settlement control standard; distribution displacement principle

长春地铁解放大路换乘车站是国内在建的第三座大型十字交叉换乘车站,在换乘车站主体附近有较多的高层建筑物和地下防空洞,地质条件非常复杂,并且车站的施工会对土层造成多次扰动,产生群洞效应,会加倍影响到交叉结构的施工安全.目前,国内外学者已开展较多变位分配原理在大跨度暗挖地铁车站施工中的应用研究.赵菁菁<sup>[1]</sup>基于地层变位分配控制原理,根据既定控制值,及时变更施工方法及支护措施,实现了大跨度暗挖车站地表沉降值远低于控制目标值;扈世民<sup>[2]</sup>基于变位分配法原理对PBA施工引起的施工变形进行分段研究,认为“小导洞开挖”和“拱部土体开挖与扣拱”为控制地层变形的关键步骤;李积栋<sup>[3]</sup>以北京地铁10号线在建的公主坟站为背景,采用自动化与人工相结合的方式,将控制标准按照施工步骤分解使用,成功保证了既有车站的沉降变形.

上述研究多是针对变位分配原理在地铁上穿工程中既有线的变形控制应用而进行的,而对于施工技术复杂、沉降控制十分严格的新建十字交叉换乘车站的研究很少.因此,笔者基于长春地铁解放大路站工程,采用理论与经验相结合的方法,研究以变位分配原理<sup>[4]</sup>为核心的地下工程施工安全风险管理制度在十字交叉换乘车站施工中的具体应用.结果表明,在十字交叉换乘车站施工中最关键的三个步骤分别是主体导洞开挖阶段、顶拱扣拱完成阶段、单层结构导洞施工阶段,并在应用变位分配原理后成功地将总地表沉降控制在118 mm以下.

1 工程概况

长春地铁解放大路站地处城市交通中

心,结合长春地层地质条件及北京地铁工程实际经验,笔者认为采用6导洞PBA工法进行换乘站的施工最为合适,采用该工法可减少导洞开挖所产生的群洞效应,可有效控制地面沉降,且有利于大空间作业<sup>[5-6]</sup>.具体结构如图1所示.

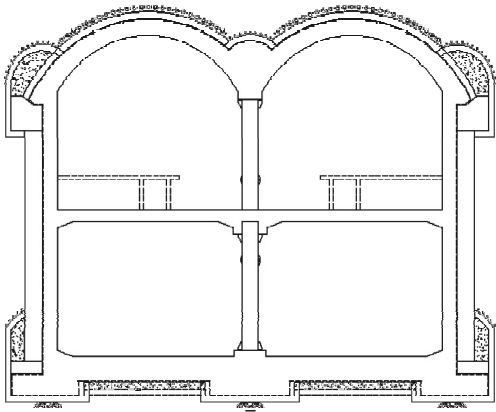


图1 2号线车站主体结构图

Fig.1 Line 2 main station structure

采用侧洞法施工地铁1、2号线的十字交叉单层结构,先开挖左右两个侧洞(做好防水),再开挖中间的洞室,待单层结构主体已形成较为稳定的封闭环之后,再施作中柱、底板等构件.具体结构见图2,其中交叉结构细节见图3.

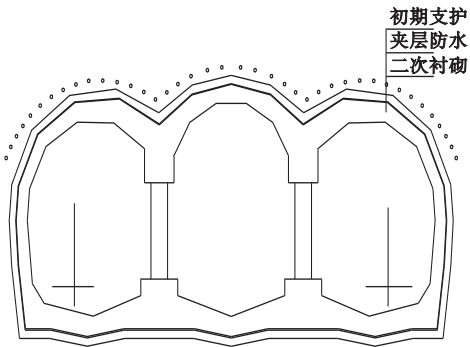


图2 单层结构图

Fig.2 Single-layer structure

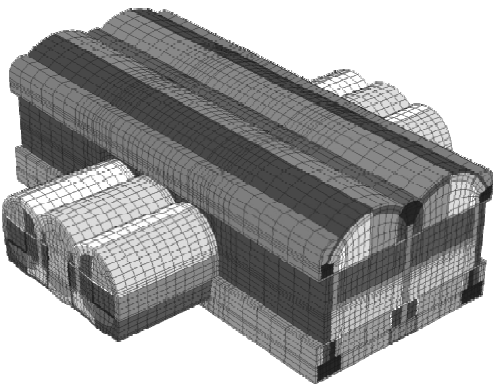


图 3 交叉节点细节图  
Fig. 3 Cross-node detail diagram

2 变位分配原理

在隧道暗挖过程中,每一个施工步骤都会影响到隧道主体的总变形<sup>[3]</sup>.变位分配原理在十字交叉地铁站施工中的应用就是利用暗挖施工中隧道主体沉降具有多方位累积的特点,在建立分步施工的沉降控制标准后,将总的主体沉降控制值分配到每一步的施工中,并通过加强阶段控制来实现整体控制的目标<sup>[7]</sup>.总体框架如图 4 所示.

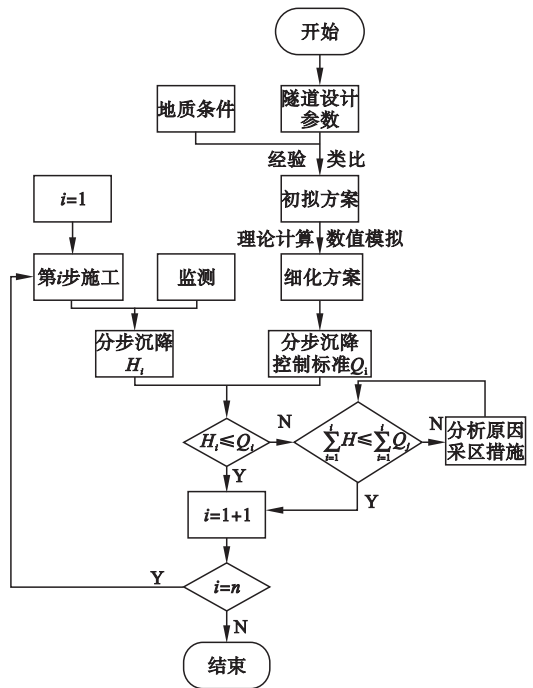


图 4 总体框架图  
Fig. 4 Overall frame map

图中, $H_i$  指第  $i$  步施工导致的主体结构变位检测值, $Q_i$  指第  $i$  步施工导致的主体结构变位设计值.采用变位分配原理管理地铁车站的施工有利于整体的规划,且能够避免风险积累.

为保证十字交叉换乘车站施工中既有结构的安全,对既有结构的抗变形能力进行评估,并对隧道施工造成的地表变形进行预测评价,将标准计算值与每一步序的报警值和极限值进行比较分析,实施动态控制<sup>[8]</sup>.对于超出安全报警值的施工步骤及时采取有效措施,使每一步施工步骤都有可靠的安全保障.

3 模型建立及关键施工环节

3.1 模型建立

模型共 174 227 个节点,165 593 个单元,整体网格模型如图 5 所示.其中土体材料采用摩尔库伦准则进行计算,混凝土结构采用弹性材料模拟,采用 1.8 m 的注浆加固层来模拟导管注浆和超前支护过程,并自动生成自重应力形成地应力场.材料力学参数见表 1.

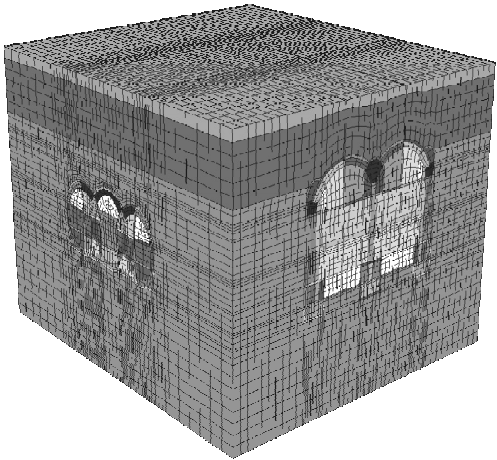


图 5 交叉节点模型图  
Fig. 5 Cross-node model diagram

采用 FLAC<sup>3D</sup>有限差分程序对十字交叉换乘车站 6 导洞 PBA 工法施工进行数值模拟,为便于对隧道施工所引起的地表沉降进

表1 材料的力学性能参数

**Table 1** Mechanical properties of the material

模型材料	杨氏模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/ $10^3$ (kN·m <sup>-3</sup> )
填土	5.2	0.35	15	20	1.7
黏土	8.3	0.35	42	25	2.1
泥岩	230	0.35	81	30	2.0
初期支护	$1.4 \times 10^4$	0.25	—	—	2.3
二衬	$2.4 \times 10^4$	0.25	—	—	2.3
加固区	230	0.25	—	—	2.3

行预测规划,在车站主体结构周围布置三条地表沉降监测线.其中1号监测线采集分析单层结构处的地表沉降数据,2号监测线采集分析2号线主体结构处的地表沉降数据,3号监测线采集分析2号线与单层结构交叉处的沉降数据(即共同作用最大处).监测点具体布置情况如图6所示.

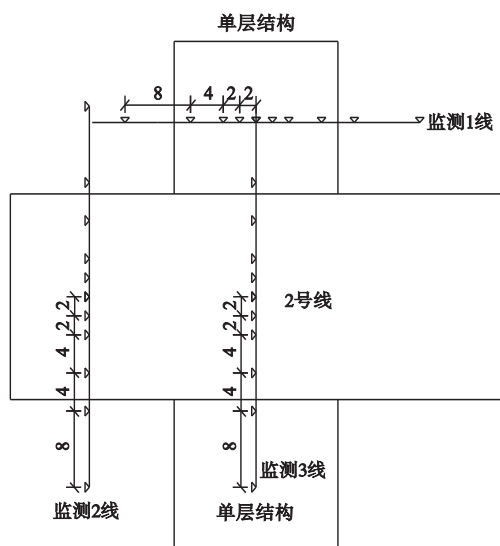


图6 监测点布置示意图

**Fig. 6** Layout diagram of monitoring points of ground subsidence table of model

### 3.2 关键施工环节

单层结构处的地表沉降监测曲线如图 7 所示。从图中可以看出 2 号线主体的前期施工对于单层结构的影响并不大,这是由于在 2 号线主体二衬结构上施作单层结构时并没有完全破坏整体的受力结构。

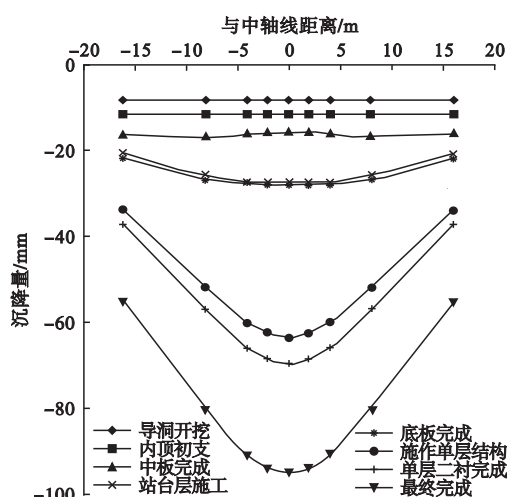


图7 单层结构处的地表沉降监测曲线

**Fig. 7** Surface surrounding monitoring curves at single layer structure

2 号线主体结构处的地表沉降监测曲线如图 8 所示. 可以看出单层结构的施工对于 2 号线的影响很大, 这是由于在 2 号线的主体二衬结构上施作单层结构时, 此时整体稳定结构受到破坏.

十字交叉处的沉降监测曲线如图 9 所示.可以看出在施作单层结构后,沉降趋势增加明显,说明 2 号线与单层结构十字交叉处受单层结构施工的影响非常大,应引起足够重视.

统计数据并总结出各分步施工阶段的沉降值占到总沉降值的比例,结果见表 2。分析表中数据,当 2 号线主体导洞开挖完成时,由于土体开挖面积过大,在临时初支保护下产生的沉降值为 24.80mm,占到总沉降的

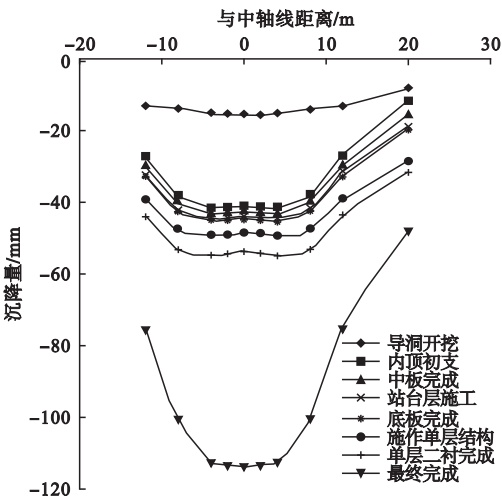


图 8 2 号线主体结构处的地表沉降监测曲线

Fig. 8 Surface surrounding monitoring curves at main structure of line2

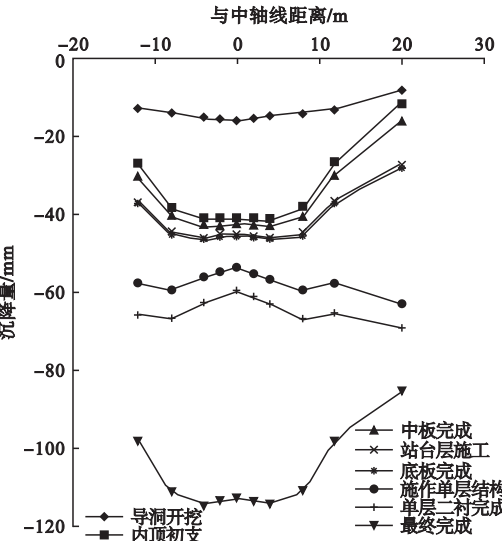


图 9 十字交叉处的沉降监测曲线

Fig. 9 Settlement surveillance curves at cross

表 2 分步施工引起的沉降占到总沉降的比例

Table 2 Proportion of the settlement caused by each stage

施工分步	各分步沉降所占的比例/%
开挖 2 号线主体的导洞	22.41
施作中柱、边桩和纵梁	3.83
完成顶拱扣拱	17.89
施作底板及站台层	2.11
开挖单层结构的导洞	41.01
二衬施工	3.79
整体结构完成	8.96

22.41%。当边桩、中柱及纵梁施作完成后,此时与 2 号线主体导洞形成基本的受力结构,剩余的施工步序沉降量得到了有效的控制。当拱顶扣拱与二衬全部施作完成时,此时的整体结构与中柱及边桩形成较为完整的受力结构<sup>[9-11]</sup>,此后施作的底板及站台层所产生的沉降量仅占到总沉降量的 2.11%,以上结构对换乘站整体的施工过程起到了有效的保护作用。

当在 2 号线的主体二衬上施作单层结构时会破坏整体的受力结构,此时单层结构施工所引起的地表沉降值为 102.61 mm,占到地表总沉降的 41.01%,影响较大,是整个换乘车站施工中的关键环节。

4 变位分配控制标准

表 3 为各分步施工所产生的沉降量和累计沉降量及其各自在预计总沉降量中所占的比例,其中换乘车站主体结构的预测最大沉降量为 -115.13 mm。在结构允许沉降量范围之内根据分步施工累计沉降比例,再分别乘以主体结构沉降控制允许值,便得到分步施工沉降控制标准<sup>[12-15]</sup>。统计沉降控制标准与沉降预测值,得到各分步施工沉降控制标准曲线与主体结构累计沉降量的设计曲线(见图 10)。观察图 10 与表 3 发现既有结构的沉降变形是分步累积的,每一步的施工都会对最终的总沉降产生影响。

从表 3 可以看出,在开挖 2 号线主体结构导洞时所产生的群洞效应较为明显,此时的累计沉降量占到总沉降的 22.2%。故在开挖隧道主体导洞阶段,为有效控制导洞的变形与地表沉降,应尽量在快速开挖导洞的同时及时做好初期支护<sup>[16]</sup>,以保证地表沉降值变化在安全值范围内,使后续施工得以安全进行。

表 3 基于变位分配原理的控制标准

Table 3 Displacement distribution control standards

序号	施工步序	累计预测沉降/mm	累计相对沉降/%	分步沉降值/mm	报警值/mm	极限值/mm
1	开挖 1、3 导洞	-9.059	8.01	-9.059	-9.546	-11.504
2	开挖 2 导洞	-10.263	9.02	-1.204	-11.315	-13.824
3	开挖 4、6 导洞	-22.075	19.20	-11.812	-23.601	-26.157
4	开挖 5 导洞	-25.523	22.20	-3.448	-26.312	-32.515
5	边桩	-30.263	26.34	-4.74	-32.887	-37.710
6	初期支护(外顶)	-35.103	30.52	-4.84	-38.217	-45.557
7	初期支护(内顶)	-51.415	45.03	-16.312	-52.903	-65.891
8	二衬施工	-51.614	45.32	-0.199	-53.176	-66.099
9	单层边 1 洞开挖	-54.892	47.33	-3.029	-56.656	-70.875
10	单层边 2 洞开挖	-56.367	49.56	-1.357	-58.132	-72.537
11	单层边 3 洞开挖	-58.136	50.57	-1.769	-59.484	-74.705
12	单层边 4 洞开挖	-60.009	51.96	-1.873	-61.587	-77.201
13	单层边 5 洞开挖	-60.335	82.87	-0.326	-97.766	-122.034
14	单层边 6 洞开挖	-97.431	85.37	-37.096	-100.061	-125.987
15	中上部土体开挖	-110.270	95.65	-7.220	-113.971	-142.002
16	中中部土体开挖	-113.710	98.88	-3.440	-115.534	-144.421
17	中下部土体开挖	-115.130	100.00	-1.420	-117.800	-148.000

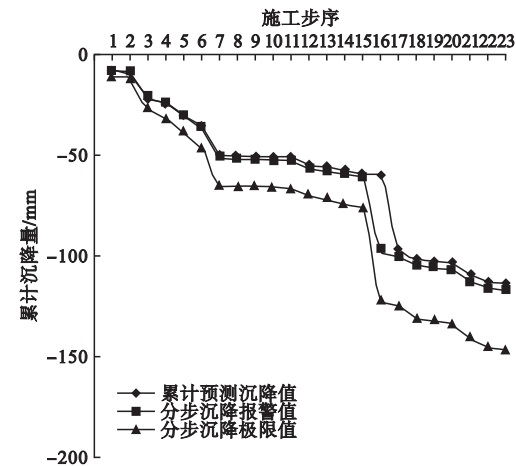


图 10 分步沉降控制标准曲线图

Fig. 10 Standard curves of distribution settlement control

待 2 号线主体在底板、拱顶、二衬等施作完毕后,此时的累计沉降量占到总沉降量的 44.83%,这得益于由桩-梁-拱三部分组成的受力体系,使主体地表沉降得到有效控制<sup>[17-18]</sup>.其中,车站二衬结构在实际施工过程中应注意以下 3 点:

(1)为了完成导洞初期支护到二次衬砌的受力转换,应将导洞初期支护结构逐段依次破除.

(2)在破除导洞初期支护的过程中,为保证在初期支护壁后注浆回填密实,应及时采用动态跟踪注浆.

(3)在施工过程中应及时监控测量结果,并根据监控结果指导设计施工,以保证施工安全.

在采用侧洞法施作单层结构时,由于 1 号洞室支护的建立较为及时,1 号导洞开挖所引起的地表沉降值较小,仅为 2.029 mm,且在随后的导洞开挖过程中沉降速率逐渐下降.在 6 号导洞开挖完成后,地表沉降增加了 37.1 mm,这是由于侧洞竖向隔壁并没有完全封闭,此时未能形成稳定的受力结构,造成地表沉降速率增加.侧洞开挖完成后,由于支护措施建立不及时,在中洞中部土体开挖完成后地表沉降增大到 113.71 mm,之后随着中洞支

护体系的建立,地层沉降逐渐趋于稳定.

需注意的是,侧洞结构会受到中跨部分开挖的影响,产生一定的偏载作用.若此时地表沉降量超出预警值,则需马上停止施工,通过及时调整导洞开挖进尺或设置顶梁钢等技术来抵消偏载作用,以保证施工安全.

5 监测结果分析

图 11 为 2 号线主体隧道施工过程监测数据曲线,其中 2013 年 5 月底在 2 号线导洞开挖完成后的主体结构最大沉降值为 32.35 mm,在主体隧道二衬完成后实测的最大沉降量为 48.58 mm,均未超过分配控制值(图中 38a~45a 为 2 号线主体上的 8 个监测点编号).

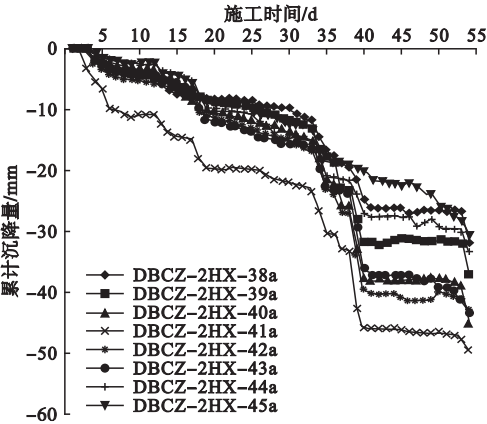


图 11 2 号线主体施工完成后地表沉降监测曲线

Fig. 11 Monitoring curves of surface subsidence after construction of No. 2 main tunnel

图 12 为主体结构的分步沉降预测值与实际监测值的对比曲线.可以看出预测沉降值略大于实际监测值,这是由于数值计算的参数是在比较理想的情况下得出的结果,而实际工程较为复杂,施工中会根据现场的情况而增加防护措施.

两条曲线的整体趋势基本一致,实际差值均小于 4 mm 的控制值,施工监测结果与预测值具有较好的一致性.这验证了过程控制的有效性,采用变位分配控制原理对十字交叉地铁换乘车站施工预测是切实可行的.

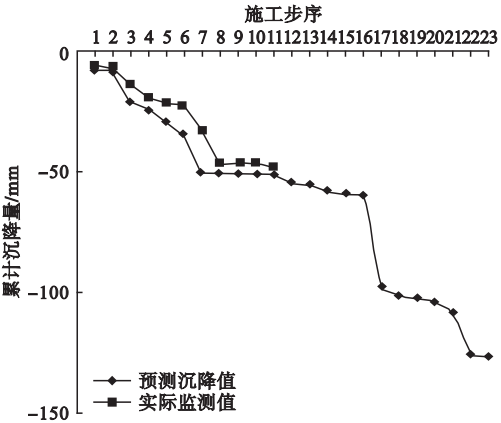


图 12 车站主体沉降预测值与实际监测值的对比曲线

Fig. 12 Contrast curves between the predicted value of the main body and the actual monitoring value

6 结 论

(1)采用 FLAC<sup>3D</sup>模拟分析换乘车站施工全过程,结果得到十字交叉在十字换乘车站施工中关键的三个步骤分别为主体导洞开挖阶段、顶拱扣拱完成阶段、开挖单层结构导洞阶段,以上三步的地表沉降分别占到地表总沉降的 22.41%、17.89% 和 41.01%.

(2)依据变位分配原理,制定了长春地铁解放大路车站主体结构分步施工沉降控制标准,在施工中关键施工步骤的累计控制沉降量分别为 25.20 mm、52.09 mm 和 100.61 mm,这有利于地铁主体结构的施工安全实施控制与管理,保证施工及地面建筑物和地下管线的安全,并为今后十字交叉工程的安全实施提供参考性的建议.

参考文献

[1] 赵菁菁,宿文姬.深圳地铁接近隧道暗挖施工地表沉降控制[J].隧道建设,2014,34(11): 1055-1061.  
(ZHAO Jingjing, SU Wenji. Study on control of ground surface settlement; case study on adjacent tunnel tubes of Shenzhen metro [J]. Tunnel construction, 2014, 34 (11): 1055 - 1061.)  
[2] 扈世民,王梦恕,张丽,等.基于变位分配法地

- 铁车站变形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 265 – 271.  
(HU Shimin, WANG Mengshu, ZHANG Li, et al. Study on deformation law of subway station based on displacement assignment method [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(2): 265 – 271. )
- [3] 李积栋, 陶连金, 汪国峰, 等. 变位分配原理在地铁密贴穿越工程中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(4): 68 – 75.  
(LI Jidong, TAO Lianjin, WANG Guofeng, et al. Application of displacement distribution principle in subway close sticky engineering [J]. Journal of railway science and engineering, 2013, 10(4): 68 – 75. )
- [4] CHEN W T, CHEN T T, LIN Y P, et al. Using factor analysis to assess route construction priority for common duct network in Taiwan[J]. Journal of marine science and technology, 2008, 16(2): 77 – 89.
- [5] 张顶立, 李鹏飞, 侯艳娟, 等. 浅埋大断面软岩隧道施工影响下建筑物安全性控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 95 – 102.  
(ZHANG Dingli, LI Pengfei, HOU Yanjuan, et al. Experimental study on safety control of buildings during construction of shallow – buried soft rock tunnel with large – section [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(1): 95 – 102. )
- [6] MICHALOWSKI R L. Limit analysis and stability charts for 3D slope failures[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, 2010, 136(4): 583 – 593.
- [7] CHOU C C, CHEN P J. Compressive behavior of central gusset plate connections for a buckling-restrained braced frame [J]. Constr. steel res. , 2009, 65(5): 1138 – 1148.
- [8] 贾少春. 北京地铁7号线双井站PBA工法数值分析[J]. 铁道建筑, 2013, 27(2): 80 – 83.  
(JIA Shaochun. Numerical analysis on PBA method of Beijing metro line 7 Shuangjing station [J]. Railway engineering, 2013, 27(2): 80 – 83. )
- [9] WEI Gang, HU Huihui. Study on the influence of construction of shallow – buried underground excavation tunnel on adjacent framework buildings [J]. Disaster advances, 2013, 6 ( S4 ): 149 – 156.
- [10] SAMUEL J R, LINDSAY J S, DAVID R D, et al. Quantification of wastewater sludge de – watering [J]. Water research, 2015, 32: 2 – 13.
- [11] YANG Z, SU C, FAM K S. Dealing with institutional distances in international marketing channels: governance strategies that engender legitimacy and efficiency [J]. Journal of marketing, 2012, 76(3): 41 – 55.
- [12] 李鹏飞, 张顶立, 房倩. 变位分配原理在隧道穿越建筑物施工中的应用研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(10): 1344 – 1349.  
(LI Pengfei, ZHANG Dingli, FANG Qian. Application of displacement distribution principle in tunnel construction through tunneling [J]. Journal of Beijing university of technology, 2009, 35(10): 1344 – 1349. )
- [13] 易小明, 张顶立, 李鹏飞. 隧道下穿时地表房屋变形开裂的定量评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2288 – 2294.  
(YI Xiaoming, ZHANG Dingli, LI Pengfei. Quantitative assessment of deformation and cracking of surface houses during tunnel entry [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(11): 2288 – 2294. )
- [14] 宋建, 樊赞赞. 复杂条件下地铁车站施工关键技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(1): 143 – 147.  
(SONG Jian, FAN Yunyun. Key construction technologies for a subway station under complex conditions [J]. Modern tunnelling technology, 2012, 49(1): 143 – 147. )
- [15] 何历超, 王梦恕, 李宇杰. 地铁隧道暗挖施工对地表密集建筑物的影响研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 311 – 315.  
(HE Lichao, WANG Mengshu, LI Yujie. Study on the influence of subway tunnel excavation on surface-dense buildings [J]. Chinese journal of civil engineering, 2015, 48(1): 311 – 315. )
- [16] WANG Z, WANG L, LI L, et al. Failure mechanism of tunnel lining joints and bolts with uneven longitudinal ground settlement [J]. Tunnelling and underground space technology, 2014, 40(1): 300 – 308.
- [17] DIKMEN I, BIRGONUL M T, FIDAN G. A risk and vulnerability ontology for construction projects [J]. International journal of engineering manage, 2009, 1(1): 63 – 70.
- [18] 赵俭斌, 张志强, 晏可奇, 等. 辐射井在沈阳地铁一号线降水中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(3): 501 – 504.  
(ZHAO Jianbin, ZHANG Zhiqiang, YAN Keqi, et al. Application of radiation-well in de-water of Shenyang subway line one [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25(3): 501 – 504. )