

下穿大型铁路站场的地铁车站施工对线路 变形影响的监测分析

李兆平¹, 黄庆华², 马天文²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中铁第19工程局 南京地铁公司, 江苏 南京 210037)

摘要: 受南京铁路站场的制约, 地铁南京站主体结构被分割为南侧明挖区、过站区和北侧明挖区等三个部分, 过站区在既有南京铁路站场下方, 其结构型式为双线分离式隧道, 隧道跨度大、埋深浅、线间距小, 采用暗挖矿山法构筑。在既有铁路线下修建地铁车站, 必须严格控制线路沉降。通过在地表线路和便梁支墩上布置沉降测点并跟踪施工进度进行监测, 探讨地铁过站隧道施工对地表线路变形的影响。监测结果表明: 铁路线路加固措施和过站隧道施工方案是合理可靠的。同时也通过对监测数据的分析, 提出关于类似工程施工的一些建议。

关键词: 地铁隧道工程; 下穿既有铁路站场; 矿山法; 线路沉降监测

中图分类号: U 231

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5569 - 07

MONITOR AND ANALYSIS OF RAILWAY LINE SETTLEMENT CAUSED BY CONSTRUCTION OF SUBWAY TUNNELS BENEATH A CLUSTER OF EXISTING RAILWAY LINES IN THE NANJING RAILWAY STATION

LI Zhao-ping¹, HUANG Qing-hua², MA Tian-wen²

(1. Institute of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Nanjing Subway Corporation, China Railway 19th Engineering Bureau, Nanjing 210037, China)

Abstract: Constrained by the Nanjing railway station, the Nanjing subway station of Nanjing metro No.1 is subdivided into three parts as following: (1) the southern cutting part; (2) the northern cutting part; and (3) the connecting tunnels part. The connecting tunnels as a part of main structure for the Nanjing subway station are just beneath a cluster of existing railway lines of the Nanjing railway station, which includes two separated tunnels. The connecting tunnels constructed with mining method have the features of large span, shallow coverage, and little distance between the two lines. Railway line settlement must be restricted to insure the safety of railway lines during construction. A large numbers of settlement points are placed on the railway roadbed and the beam support foundation. The railway roadbed settlement induced by tunnels construction is discussed and the settlement monitored results indicate that the rail reinforcement method and the connecting tunnels construction technique are reliable. At the same time, with the analysis of settlement data, some suggestions on similar engineering construction are presented.

Key words: subway tunnel engineering; beneath a cluster of existing railway lines; mining method; monitor of railway line settlement

收稿日期: 2004 - 10 - 17; **修回日期:** 2005 - 02 - 21

作者简介: 李兆平(1966 -), 男, 博士, 1988年毕业于安徽理工大学工程地质与水文地质专业, 现任北京交通大学特聘岗教授, 主要从事地下结构设计以及地下工程施工的环境影响研究等方面的教学与研究工作。E-mail: lizhaoping@263.net.

1 引言

南京地铁 1[#] 线的南京站是国内首次在既有铁路站场下采用矿山法施工的地铁车站，受南京铁路站场制约，地铁南京站被分割为南区、北区和过站区 3 个部分(见图 1)，南区、北区为双层明挖箱型框架结构，过站区在既有南京铁路站场下方，下穿铁路南京站三个站台和第 I~VIII 股道线共 8 条股道，其中 II 道和 VIII 道为京沪铁路上下行正线，其余则为站线。过站区结构型式为双线分离隧道，隧道跨度大、埋深浅、线间距小，采用暗挖矿山法构筑。国外也有在既有铁路站场下修建地铁车站的例子，但是并不是采用暗挖法施工^[1]。国内只有广州地铁 2[#] 线(火车站—三元里)隧道下穿广州火车站站场的工程^[2]与本工程有类似之处，但是广州地铁 2[#] 线区间隧道下穿广州火车站站场采用的是盾构法穿过，从施工难度和施工风险程度来看均小于本工程。由于南京站为大型铁路枢纽站场，京沪铁路又是国内最重要的 I 级繁忙铁路运输干线之一，每天通过和到发列车达 170 对，因此在过站区施工过程中，必须严格控制线路路基沉降，确保南京铁路站场正常运营和通过列车的行车安全。而掌握过站区施工对线路影响最直接的手段是对线路路基和便梁支墩的沉降变形进行监测，根据监测结果可及时调整施工进度和支护参数。

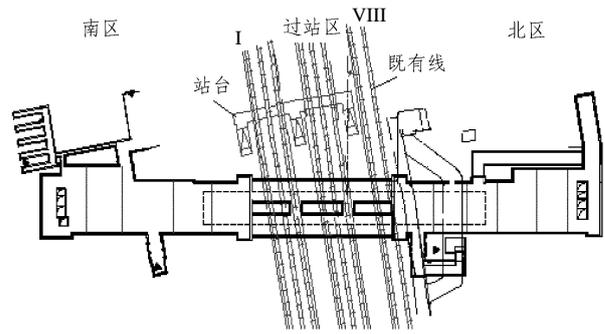


图 1 地铁南京站平面图

Fig.1 Layout of Nanjing subway station

2 工程概况

2.1 过站区隧道结构型式

地铁南京站过站区结构型式为暗挖双线分离式车站隧道，设计范围 K14+200.32~K14+266.88，埋深 6.69~8.06 m，单洞长度均为 66.56 m，隧道开挖高度 9.546 m，跨度 11 m，2 条隧道中心线间距 15.46 m，中间设有两条横通道相连。地层自上而下主要为：杂填土、粉土、粉质粘土、混合土、强风化和中风化闪长岩。但是过站区洞身主要穿越混合土、强风化和中风化闪长岩地层，围岩主要为 II~III 类围岩，过站区隧道采用复合式衬砌结构，过站区隧道断面形式见图 2。

2.2 隧道施工前线路加固措施和隧道施工方法简介

过站区隧道施工前，对隧道地表铁路线均采用

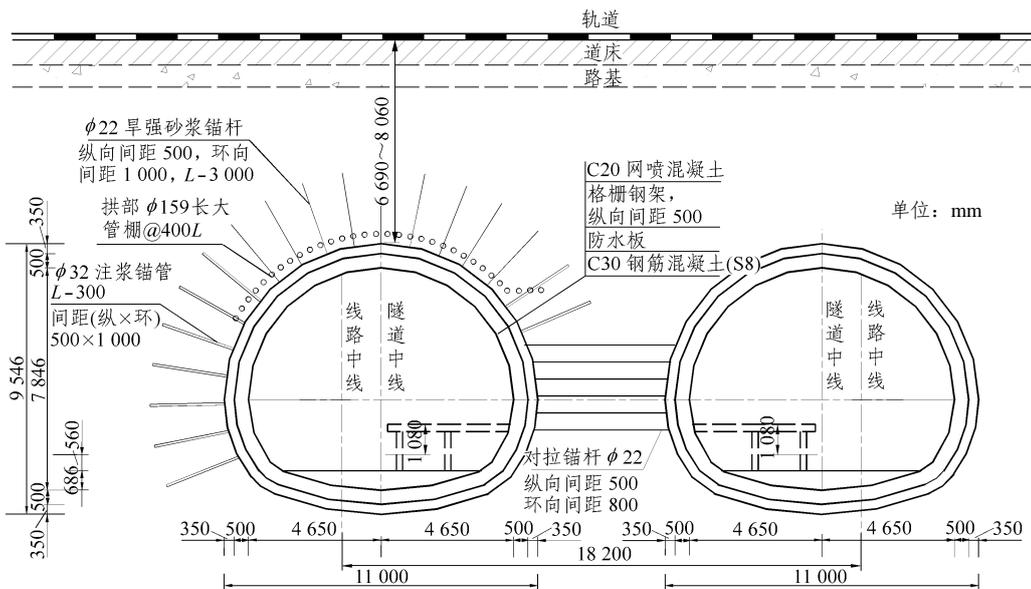


图 2 过站区隧道断面图

Fig.2 Cross-section of the connecting tunnels

D24 型便梁进行加固。两隧道外侧便梁支墩采用钢筋混凝土扩大基础；两隧道间的便梁支墩采用 $1 - 2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 箱形涵，并在箱形涵内设置静压钢筋混凝土方桩，钢筋混凝土方桩压深至隧道底部 $\pm 0.00 \text{ m}$ 处(见图 3)。隧道开挖前在南、北两端超前施作 $\phi 159 \text{ mm}$ 长大管棚。隧道施工方法为 CRD 法，每个断面分四部开挖^[3]。开挖时从北向南单向推进，先左线后右线，并且左线超前右线 $15 \sim 20 \text{ m}$ 。关于线路加固的安全性检算及详细的过站区施工技术见文[4]。

3 便梁支墩和线路的沉降监测系统布置

尽管在隧道开挖之前用 D24 型便梁将线路托起加固，并且在隧道开挖前于隧道拱顶位置打入大管棚加固地层。有关研究表明：在既有铁路站场下进行如此大断面的隧道施工在国内尚属首次。为确保行车安全和地表铁路站场的正常运营，必须严格控制过站区隧道开挖引起的地层沉降和线路沉降。为此，过站区施工期间，在线路股道中间和便梁支墩上均布置了沉降测点。随隧道开挖进程对地表线路沉降和便梁两侧的支墩沉降进行跟踪监测，并根据监测结果实时调整开挖进尺和支护参数。

根据线路股道、便梁架设情况和隧道位置，每股道布置 11 个测点，其中在便梁的三座支墩顶面设置 3 个测点(编号为：GC802, GC806 和 GC810)，另外编号为 V 和 VII 的股道路基测点位置正好与左右线隧道拱顶位置上下相对应。监测系统布置详见图 4。其中测点编号说明如下：GC801~GC811 表

示第 VIII 股道由北京至上海方向的股道沉降测点编号，其中“GC”表示股道沉降，后面第 1 位数字表示第 VIII 股道，再后面的两位数字表示该点在本股道的编号，其他股道依次类推。

4 隧道掘进与地表沉降分析

过站双线隧道采用 CRD 法分步施工，左线优先，右线滞后。监测数据表明：随着隧道掘进断面的加大，地表沉降量及其沉降速率也随之增加。以隧道拱顶对应的地表第 VIII 股道 GC805 和 GC807 测点为例，沉降量和速率见表 1。

虽然在隧道施工过程中，监测的拱顶地表最大沉降速率曾一度达 2.5 mm/d (2003 年 7 月 30 日~7 月 31 日)，但仍远小于线路变形预警值(15 mm/d)，加上有便梁防护，该沉降并不直接影响到线路变形，所以对铁路行车安全性影响不大。但是为确保线路运营安全，在随后的隧道掘进时，采用了缩小开挖进尺、架立密排格栅等措施，地表沉降速率得到了控制。

5 便梁支墩沉降和线路沉降的监测结果分析

5.1 监测结果

以第 VIII, VII 股道测线上的便梁支墩(GC802, GC806 和 GC810)和左、右线隧道拱顶(GC805, GC807)的 5 个测点的沉降为代表，将沉降数据和隧道掘进进度之间的关系如表 2, 3 所示。

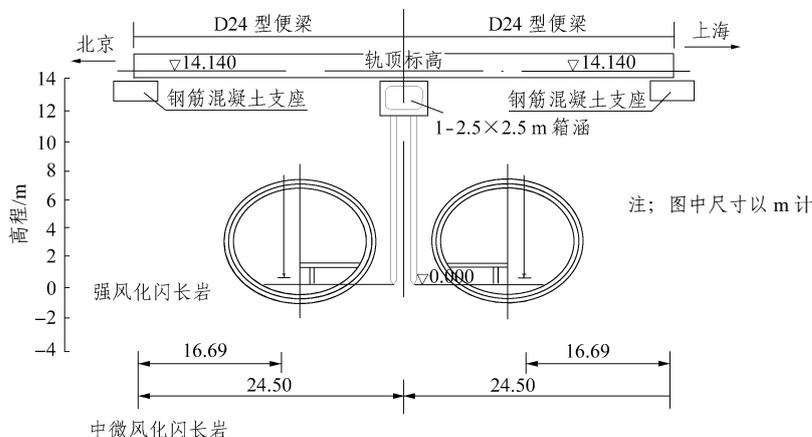


图 3 南京站线路加固横剖面图

Fig.3 Cross-section of railway reinforcement for Nanjing subway station

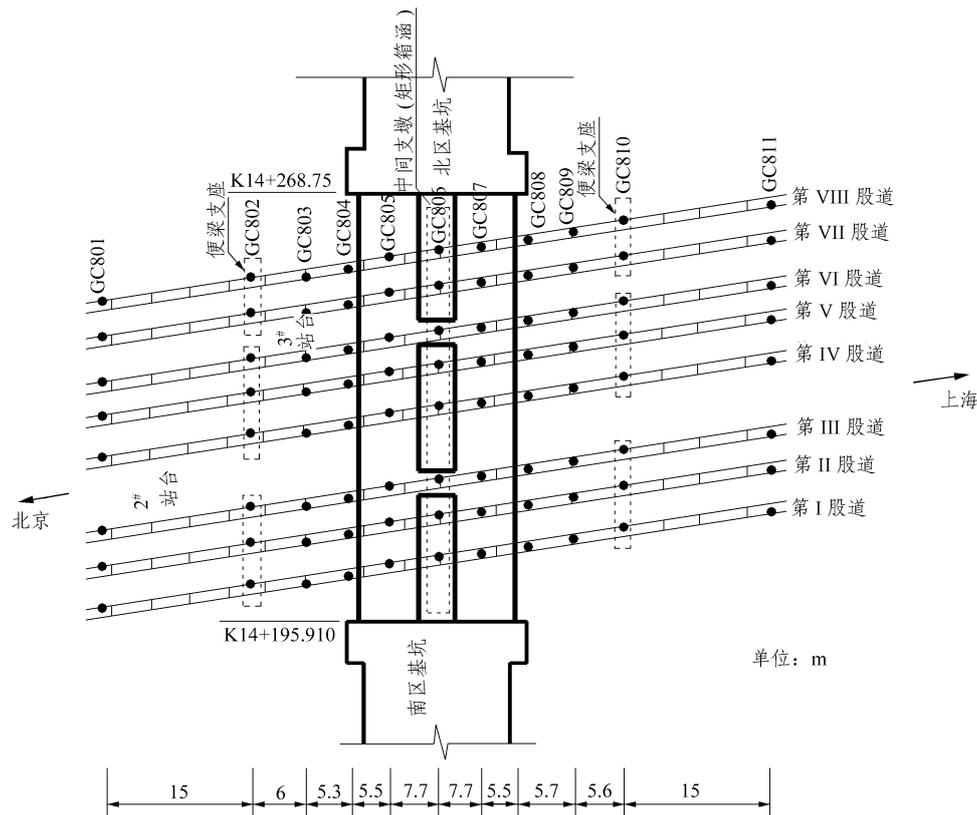


图 4 线路沉降监测系统布置图

Fig.4 Layout of monitor system arrangement for railway settlement

表 1 隧道掘进与地表沉降关系

Table 1 Relation between tunnel excavation and settlement

掘进日期	隧道掘进部位	测点				
		GC805		GC807		
		沉降量/mm	速率/(m · d ⁻¹)	沉降量/mm	速率/(m · d ⁻¹)	
7 月 18 日~7 月 23 日	左线	拱部开挖	5.5~9.2	0.75	1.4~1.9	0.10
7 月 28 日~8 月 3 日		全断面开挖	9.4~17.0	1.26	2.4~4.2	0.36
8 月 14 日~8 月 19 日	右线	拱部开挖	18.8~20.0	0.24	7.5~11.5	0.78
8 月 27 日~9 月 1 日		全断面开挖	20.7~20.1	0.08	19.1~19.8	0.14

注：表中时间为 2003 年。

表 2 第 VIII 股道上支墩和线路沉降监测结果

Table 2 Monitoring results of support foundation and line settlement for railway VIII

掘进日期	隧道掘进部位	第 VIII 股道测线/mm					
		GC802 边支墩	GC805 左线拱顶对应地表点	GC806 中间支墩	GC807 右线拱顶对应地表点	GC810 边支墩	
7 月 23 日	左线	拱部开挖	3.0	7.5	3.5	1.9	—
8 月 1 日		全断面开挖	5.0	14.0	8.0	3.7	—
8 月 14 日	右线	拱部开挖	5.0	19.0	12.0	7.9	1.7
8 月 27 日		全断面开挖	5.4	20.7	14.7	19.1	2.8
9 月 14 日	基本稳定沉降量	6.0	20.8	15.9	20.6	3.3	

注：表中的掘进时间为 2003 年。

表3 第VII股道上支墩和线路沉降监测结果

Table 3 Monitoring results of and line settlement for railway VII

掘进日期	隧道掘进部位	第VII股道测线/mm					
		GC702 边支墩	GC705 左线拱顶对应地表点	GC706 中间支墩	GC707 右线拱顶对应地表点	GC710 边支墩	
7月29日	左线	拱部开挖	1.8	10.2	4.1	2.2	-
8月8日		全断面开挖	6.2	19.0	10.5	4.7	-
8月26日	右线	拱部开挖	6.3	24.4	12.6	21.2	1.6
9月4日		全断面开挖	6.8	23.8	13.7	21.4	1.9
9月21日	最终沉降量		7.6	23.8	14.5	21.3	2.7

注：表中的掘进时间为2003年。

5.2 监测结果分析

(1) 由上述关系表可知：左线隧道完成拱部掘进后，在相应的拱顶地表产生的沉降值约占该测点最终稳定沉降值的36%~42%，左线隧道完成全断面掘进，在相应的拱顶地表产生的沉降值约占该测点最终稳定沉降值的67%~80%；在滞后的右线隧道完成拱部掘进后，该测点增加的沉降值约占24%~23%，而待滞后的右线隧道完成全断面掘进，该测点增加的沉降值仅占8%。

可见在便梁防护下，双线隧道掘进时，先掘进的左线隧道在地表产生的沉降值占了总沉降值大部分，而在滞后的右线隧道完成拱部掘进后，地表沉降就接近最终的稳定沉降值。

(2) 便梁支墩沉降分析

监测数据表明：便梁中间支墩的沉降值均大于便梁两边支墩的沉降值，但沉降量和沉降速率均未达预警值，说明便梁支墩是安全的。

中支墩的箱涵基础虽然强于边支墩扩大基础，但其受两侧隧道开挖影响，因此其地基受隧道掘进影响远大于边支墩，所以防止双洞隧道间的岩土柱

失稳坍塌对安全至关重要。

(3) 这里需要说明的是：在隧道施工至第III道时，却出现了例外情况，左支墩沉降值(17 mm)大于中支墩沉降值(14.6 mm)，其沉降速率达1.2 mm/d，而中支墩沉降速率仅0.11 mm/d。由于荷载、线路加固与施工方法基本相同，推测应系地质情况造成(便梁支墩位置未进行地质勘探)。所以建议今后类似工程的施工中，应查明便梁支墩位置的地质情况，以确保便梁支墩安全。

6 线路沉降基本稳定后的沉降量和沉降曲线

当线路股道沉降基本稳定后(沉降速率 <0.1 mm/d)各测点的沉降值见表4。

以第VIII股道和第II股道正线为例，绘制沉降曲线图，如图5，6所示。

(1) 从表4和图5，6中可见，各股道的地表沉降与隧道拱顶相对应出现马鞍状的双峰值，且在列车荷载基本相同，支墩形状和尺寸一样的情况下，

表4 线路股道沉降基本稳定后的各测点沉降值

Table 4 Railway settlement result after lines subside stabilize

股道编号	测点沉降值/mm										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
第VIII股道	1.8	3.5	7.0	13.2	20.9	15.9	20.8	16.0	8.0	6.2	1.6
第VII股道	1.0	2.3	6.0	13.5	21.3	14.0	23.8	21.1	13.0	7.3	2.8
第VI股道	1.1	1.5	2.5	4.4	8.6	7.8	22.4	16.6	10.3	6.0	1.7
第V股道	1.3	3.2	4.5	8.9	18.8	7.8	24.9	15.5	9.0	6.0	3.1
第IV股道	2.1	3.1	4.2	6.4	17.7	8.6	23.1	15.2	8.7	7.4	4.3
第III股道	2.8	4.7	4.1	2.7	20.1	14.9	29.6	23.8	18.8	17.2	8.5
第II股道	2.5	3.8	1.9	2.8	16.8	10.1	29.6	23.7	14.2	4.1	4.1
第I股道	3.6	5.7	6.6	5.0	15.1	6.0	20.5	8.7	5.2	3.4	3.2

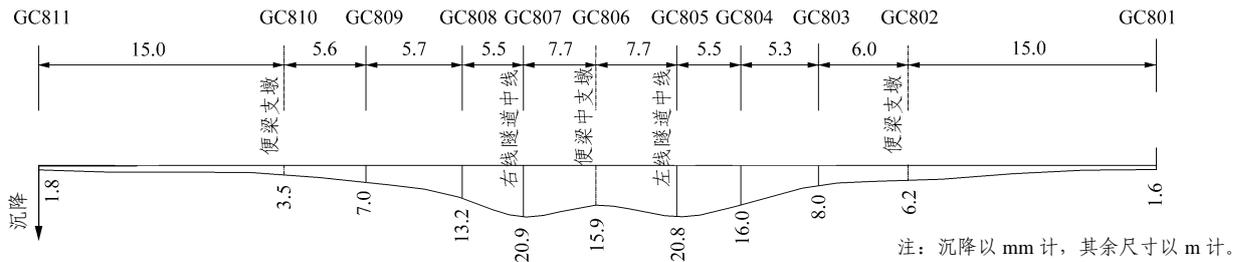


图5 南京站 VIII 道地表沉降基本稳定后的沉降曲线
Fig.5 Curves of final settlement for railway VIII line

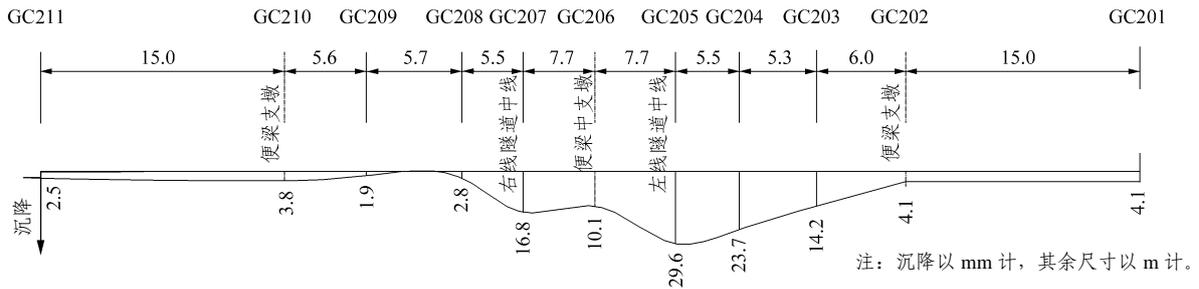


图6 南京站第 II 股道地表沉降基本稳定后的沉降曲线
Fig.6 Curves of final settlement for railway II line

各股道的沉降值差异很大，分析其原因，本文认为主要是各股道的地质情况差异造成的。

(2) 在同一股道，左右线隧道的沉降峰值也差异很大，监测资料表明：地表沉降峰值除第 VIII 股道左右线基本相等外，其他各股道均呈现左线隧道地表沉降大于右线隧道地表沉降(约大 110%~230%)，其原因主要是先掘进左线隧道后掘进右线隧道(滞后约 15~20 m)。

7 地表沉降监测数据和理论计算(工程类比推算)数据比较

2002年8月南京地铁有限责任公司曾委托同济大学对过站区隧道施工对京沪铁路行车安全性的影响从理论上进行分析研究，计算出在便梁防护下的地表和便梁支墩最大沉降值；同时北京交通大学学科教研组采用工程类比法对地表和便梁支墩最大沉降值进行推算，见表5。

(1) 从表5中可见，无论是理论计算还是工程类比推算值与实测值都相差较大，分析其原因由于南京站地区地质情况复杂，差异大，再加上地质报告中土的物理力学参数本身离散性较大。

(2) 在列车荷载、施工工艺与线路加固基本相同的情况下，初期支护完成后各股道沉降的实测值

表5 地表沉降数据的比较

Table 5 Comparison of surface settlement

方法	沉降槽 宽度/cm	最大沉降量/mm		
		两端支墩	中间支墩	地表
理论计算值	40~60	2.4	7.6	17.9
工程类比推算值	60~70	4~5		50~60
实测值	80	6.3~17.0	7.8~16.4	21.1~30

离散度较大，说明由于地质情况不同使地表沉降差异较大，所以确保安全性的关键在于施工中加强监测，采取信息化施工，以确保铁路行车和隧道施工安全。

8 结论

(1) 因隧道施工造成的地表和便梁支墩沉降，由于有便梁防护，隧道拱顶地表产生的最大沉降量及其速率并不直接影响轨道的几何状态和行车安全，实践证明线路加固方案是合理的。

(2) 支墩沉降量随隧道施工工序和进度逐渐增大并达到峰值，这是一渐变过程，通过 D24 便梁加固只要保证其支墩的安全性，同时加强对便梁及其

线路的监测和养护,便可以确保铁路行车安全和隧道施工安全的。

(3) 在下穿既有线施工过程中,要重视支墩沉降和轨道线路的沉降监测,并根据监测结果及时调整施工工序和隧道支护参数。

参考文献(References):

- [1] Seishi S, Shoichi F. Construction of a subway tunnel just beneath a conventional railway by means of large-diameter long pipe-roof method[J]. *North American Tunneling*, 1996, (1): 473 - 481.
- [2] 洪开荣. 盾构隧道穿越广州火车站站场的设计与施工[J]. *现代隧道技术*, 2002, 39(6): 34 - 37.(Hong Kairong. Design and construction of shield driven tunnel crossing the station yard of Guangzhou railway station[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2002, 39(6): 34 - 37.(in Chinese))
- [3] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.(Shi Zhongheng. *The Design and Construction for Metro*[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002.(in Chinese))
- [4] 李兆平, 李铭凯, 黄庆华. 南京地铁车站下穿既有铁路站场施工技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(6): 1 061 - 1 066.(Li Zhaoping, Li Mingkai, Huang Qinghua. A study for the construction technology of the Nanjing subway station under the Nanjing railway station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 1 061 - 1 066.(in Chinese))