

文章编号: 1006—2106(2009)01—0072—05

浅埋暗挖法施工近接交叉地铁隧道 地表沉降监测分析^{*}

郑保才^{**} 程文斌 胡国伟

(中铁三局集团有限公司, 太原 030001)

摘要: 研究目的: 结合某城市地铁 5 号线与 6 号线近接交叉隧道施工现场监测, 对大跨度交叉隧道采用浅埋暗挖法施工的地表变形规律分析, 总结出交叉隧道地表沉降产生的原因。

研究结论: (1) 交叉近接隧道采用浅埋暗挖法施工的地表沉降曲线形状与合成的 Logistic 曲线比较吻合。

(2) 交叉结构开挖过程中的反复扰动和结构间的体系转换等是地表变形的主要原因。(3) 施工过程中合理的开挖步距、增设临时仰拱及注浆加固等措施对控制地表变形有比较显著的作用。研究结果对浅埋暗挖施工、优化施工顺序、合理利用和控制交叉隧道施工引起的变形叠加具有一定的实际参考价值。

关键词: 浅埋暗挖; 近接; 交叉; 地表沉降

中图分类号: U45 文献标识码: A

Analysis and Monitoring of Ground Subsidence Caused by Excavation of Adjacent and Crossing Metro Tunnel with Shallow—depth and Subsurface Excavation Method

ZHENG Bao—cai, CHENG Wen—bin, HU Guo—wei

(The Third Engineering Group Co. Ltd of China Railway Taiyuan, Shanxi 030001, China)

Abstract: Research purposes: According to the monitoring data on the adjacent and crossing tunnels of metro lines 5 and 6, the regularity of ground subsidence caused by excavation of large—span crossing tunnel with shallow—depth and subsurface excavation method is analyzed and the reason for ground subsidence is summarized.

Research conclusions: (1) The curve shape of ground subsidence induced by excavation of adjacent and crossing metro tunnel with shallow—depth and subsurface excavation method is identical to the Logistic curve shape. (2) Repeated intrusion in the excavation progress of crossing structure and system conversion between structures are the main reasons for the ground subsidence. (3) The appropriate excavation space, temporary invert arch and grouting reinforcement in the progress of construction play a comparatively notable role in control of ground deformation. The research results have some practical reference to construction of shallow tunnel in excavation, optimization of construction procedures, rational usage and control of superimposed deformation caused by construction of crossing tunnel.

Key words: shallow depth and subsurface excavation method; adjacent crossing; ground subsidence

浅埋暗挖是以加固和处理软弱地层为前提, 采用足够刚性的复合式衬砌结构, 选用合适的开挖方式, 应

用信息化量测反馈设计和施工, 因其具有灵活多变、不拆迁、不扰民、不影响交通、造价低等优点在城市地铁

^{*} 收稿日期: 2008—10—07

^{**} 作者简介: 郑保才, 1980 年出生, 男, 助理工程师。

隧道施工普遍采用^[1]。随着近几年国内地铁建设的开展,特别是一些大城市为了缓解交通压力,多条地铁线路和地下结构的立体交叉近接施工逐渐成为地铁建设的关键性工程。交叉近接隧道的结构更加复杂,施工中的地表沉降控制难度更大,交叉近接隧道施工对地表沉降控制提出了更高的要求 and 标准。关于浅埋大跨近距暗挖施工和群洞隧道施工的地表沉降监测分析研究已有报道^[2-3],但关于城市地铁 3 层立体交叉近接结构的地表沉降分析研究报道较少,因此有必要对交叉近接隧道施工引起的地表沉降规律进行研究。本文结合某城市地铁 5 号线与 6 号线交叉近接隧道施工变形监测,总结地表沉降变形规律,分析沉降产生的原因及控制地表沉降的措施,积累经验为后续工程提供参考。

1 工程概况

1.1 基本概况

某地铁在建车站是 5 号线与 6 号线换乘站。车站多处存在隧道重叠交叉,其中 5、6 号线重叠交叉隧道处对施工影响较大,此处从上至下共有 3 层隧道:第一层北站厅 3 号通道,第二层 5 号线主体隧道,5 号线站台 3 号通道,C 风道。第三层 6 号线北端隧道。其中 5 号线主体隧道距 6 号线隧道拱顶仅有 2.47 m,北站厅 3 号通道距 5 号线拱顶仅有 2.066 m,5 号线车站主体隧道埋深 19.7 m 左右,6 号线车站主体隧道分 B、C 2 种断面,拱顶覆土厚度为 23.5 m。具体交叉段隧道布置示意图如图 1 所示。

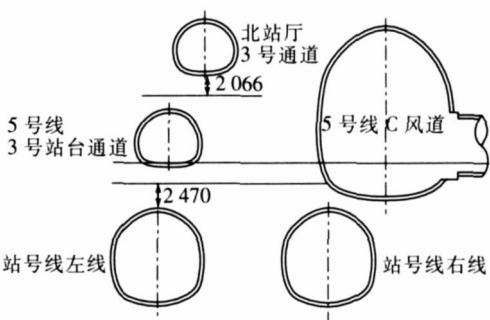


图 1 交叉段隧道布置示意图

1.2 交叉段隧道总体开挖部署和施工工艺

总体开挖部署:先行施工下层 6 号线隧道,待初支封闭成环,沉降趋于稳定后开挖上面 5 号线隧道。为了保证施工时上下隧道结构安全,减少相互影响,在交叉隧道重叠段前后 10 m 范围内对 6 号线拱顶范围注浆加固 6 号线隧道开挖过程中的扰动土体。开挖采用短台阶法施工,施作临时仰拱,局部硬岩采取爆破施工,采用预裂光面层光面爆破。初期支护主要包括初喷混凝土、安设锚杆、挂钢筋网、立格栅钢架、喷混凝土五道工序。

2 监控量测与数据分析

2.1 监控内容与测点布置

针对地铁工程施工的非线性特点,以地表沉降控制为目标,根据控制地表沉降和施工组织的安排,对交叉段隧道地表沉降进行观测,测点布置示意图如图 2 所示。

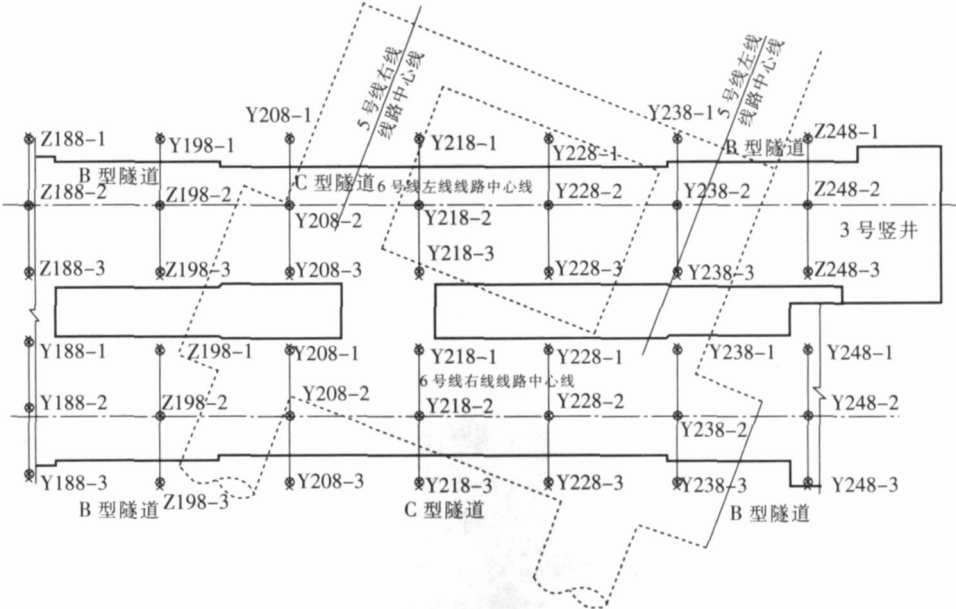


图 2 交叉段隧道地表沉降观测点布置示意图

在地表布设沉降观测点,测线与地铁 6 号线中轴线垂直,横向测点间距 10 m,纵向按照 6 号线左右线分别布置断面,每个断面布置 3 个点,测点间距 5 m,由南向北共布置 7 排。

2.2 数据分析

选取 Z228 观测断面的 3 个测点的监测数据进行分析,图 3 是地表沉降历时曲线,横坐标为开挖时间,纵坐标为测点的累积沉降量。图 4 为地表沉降速度变化曲线,横坐标为开挖时间,纵坐标为测点的下沉速度。

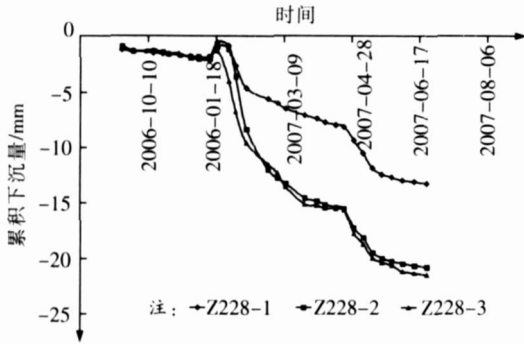


图 3 地表沉降历时变化曲线

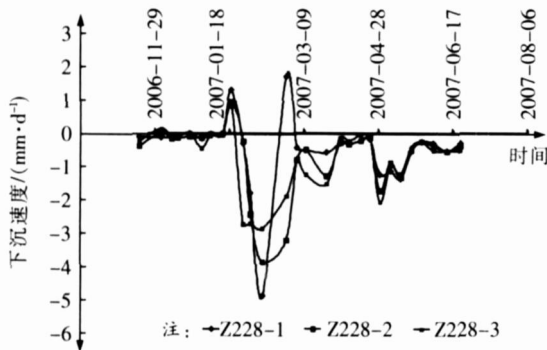


图 4 地表沉降速度变化曲线

2.2.1 地表沉降曲线与 Logistic 曲线的对比

Logistic 曲线最初是在研究人口增长规律时被提出来的,比利时数学家维哈尔斯特将其提炼成一般的数学表达式。

设人口的增长速度:

$$\frac{dp}{dt} = \tau p \left(1 - \frac{p}{k}\right) \quad (\tau \text{ 为比例常数}) \quad (1)$$

解此微分方程得:

$$p = \frac{k}{1 + m e^{-\tau t}} \quad (m \text{ 为常数}) \quad (2)$$

最简单的 Logistic 曲线与浅埋暗挖隧道工程施工中地表沉降随开挖工作面推进而变化规律都经历了 4 个不同的阶段,即缓慢发展期、加速发展期、发展速度衰减期和稳定期。并且该曲线的变化过程是从渗透

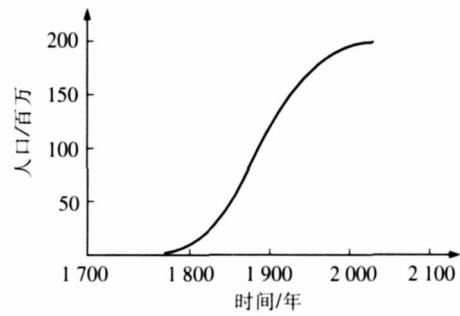


图 5 美国人口增长的 Logistic 曲线

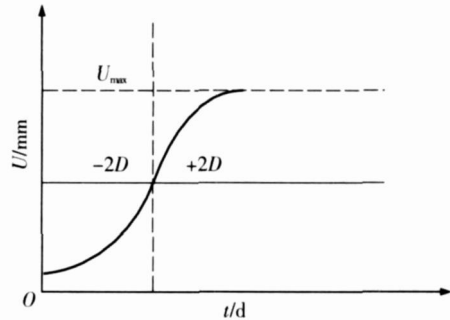


图 6 浅埋隧道施工过程中地表沉降随开挖工作推进而变化的时态曲线

渐增期开始,经过长期发展期而达到稳定期。但是,在这个过程中,如果有诸如技术革新这样大的结构变化出现,那么有可能从变化开始,重新进入成长发展期,这种情况在数学上一般被称为 Logistic 曲线的合成(图 7),该合成曲线与浅埋隧道短台阶开挖时,因某种原因而停顿一段时间后再行开挖时地表与拱顶沉降变化规律相似。

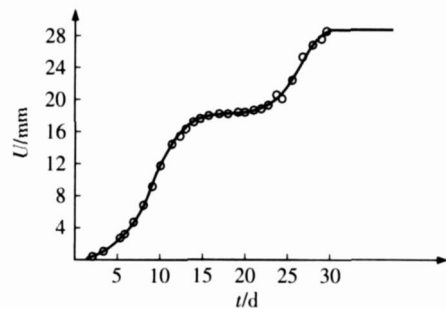


图 7 合成 Logistic 曲线的应用

郑鹏武^[4]等运用 Logistic 模型结合北京地铁十号线呼家楼站地表沉降实测数据进行模拟和预测,证明了采用 Logistic 模型进行地铁施工地表沉降分析的合理性。

鉴于上述类似特征,本文将地表沉降历时曲线与合成 Logistic 曲线进行比较,通过曲线的对比可得如下结论:

(1) 观测断面的 3 个测点的地表沉降变化历时曲

线与合成 Logistic 曲线变化趋势吻合。

(2) 图 3 中在 2007 年 4 月 28 日附近出现沉降明显增大现象, 结合现场施工日志 2007 年 4 月 26 日停止了 6 号线上台阶的开挖, 停工 2 日, 考虑到地表沉降具有一定的滞后性, 沉降曲线变化明显段在 28 日后得以体现。地表沉降曲线的这种变化情况与合成 Logistic 曲线浅埋隧道工程施工短台阶开挖时, 因某种原因而停顿一段时间后再行开挖造成沉降重新进入增长期的变化特点一致。

2.2.2 地表沉降规律分析

2.2.2.1 地表总体沉降规律

在沉降的初期阶段, 沉降量小且沉降曲线变化缓和。Z228 测线个别测点出现负沉降, 即测点位置出现隆起现象, 沉降速度变化起伏不大。缓慢沉降初期地表沉降量占总沉降量普遍小于 3%, 属于缓慢沉降阶段。缓慢沉降段过后是沉降加速发展阶段, 该段沉降量占总沉降量的最大百分比可达 65% ~ 85%, 属急剧沉降段, 图 3 中该段的沉降速度快且沉降量大, 同时从图 3 中也看出部分地表沉降观测点出现台阶式的沉降增加, 即沉降重新进入成长发展阶段。急剧沉降过后属于沉降发展速度衰减阶段, 在该段范围内地表的沉降量占总沉降量的 10% ~ 20% 左右, 沉降发展速度衰减阶段后为地表沉降稳定阶段, 在地表沉降稳定阶段内沉降量小, 呈现明显的沉降收敛特性。

2.2.2.2 地表沉降速度变化规律

从地表沉降速度图 4 中可知, 急剧沉降段速度变化幅度较大, 且速度变化在每条测线中均出现正值, 但出现正值的数值不大, 且时间较短。随着距开挖面距离的增大, 变化速度逐渐减小, 表明地表沉降速度呈逐渐收敛趋势, 地表沉降逐渐趋于稳定。

2.2.3 地表沉降原因分析

(1) 地表出现急剧沉降日期在 2007 年 1 月 20 日附近, 结合施工日志, 在 2007 年 1 月 14 日进行 B 型隧道 ZCK 16+246-243 段下部的开挖, 在 2007 年 1 月 23 日开挖至 Z228 测线下, 地表沉降观测点在掌子面经过前后均会产生较大沉降, 同时由于交叉隧道在重复开挖的作用下, 土体受到多次开挖扰动, 地表变形重叠, 导致地表在该段时间内发生较大沉降变形。同时开挖的超前影响和土体失水的滞后固结等作用导致在该时间的前后均出现大的变形。

(2) 由于测线位置处于隧道 B C 断面的转换附近, 地下结构体系转换导致的施工工艺复杂, 施工控制难度增大也是地表沉降表现明显的一个原因。在分部开挖过程中, 地表沉降主要是由下分部开挖引起的, 施工过程中要及时施作仰拱, 封闭成环, 加强初支背后注

浆, 控制拱顶下沉, 减小地表沉降。

3 地表沉降的影响因素

3.1 地下结构的分布

开挖隧道属于复杂近接 (最近处 2.066 m) 空间结构, 交叉与近接结构之间的相互影响施工会对结构的变形产生叠加, 每条隧道采用上下台阶开挖, 每个台阶开挖支护施工过程中均发生不同程度的沉降, 且土体受扰动的次数较多, 产生沉降叠加效应, 从而影响地表变形。

3.2 开挖支护方式

针对该段的实际情况, 采用短台阶加临时仰拱开挖, 增设临时仰拱可有效控制地表沉降, 顾问天^[5]等人研究认为临时仰拱在控制地表沉降方面和洞室水平径向收敛方面有比较显著的作用, 不仅有助于地表沉降的减少, 对隧道整体的稳定性也有很大帮助, 有助于施工的安全。本文研究的隧道在进行分部开挖过程中采用增设临时仰拱, 实践证明增设临时仰拱可有效减小变形, 控制地表沉降。

3.3 交叉隧道的开挖顺序

交叉隧道合理的开挖顺序从宏观层面直接决定着结构的安全与稳定。该交叉隧道为三层立体交叉, 必须保证后开挖隧道在不影响先前开挖隧道结构稳定的基础上才能施工, 先开挖隧道在确保隧道初支稳定, 隧道内拱顶沉降和边墙收敛的趋于稳定后才能进行后续隧道的开挖。

3.4 结构的体系转换

在 6 号线施工中由于 B C 断面处需进行结构的体系转换, 相应的施工组织和施工控制均要发生变化, 同一断面的连续施工控制会发生中断或改变, B C 断面交界处结构受力发生变化, 同时由于隧道施工的时空效应, 洞内拱顶沉降增大, 进而影响地表沉降。

3.5 地下水因素

隧道施工地区雨水丰沛, 地层中含水量大。在开挖排水后, 地下水因压力差的存在而不断渗出, 使地层失水, 土层空隙及节理裂隙固结收缩, 引起地层、地表的沉降。地层持续失水是引起地层变形、地表沉降的重要原因之一。吴波等人基于渗流-应力耦合分析理论研究表明, 地下水对地表沉降的影响是主要的, 降水或失水所引起地表沉降约占总沉降的 75%。研究结果会因地质条件的不同不具备可复制性, 但也充分说明了地下水是地表沉降的主要影响因素之一。

3.6 台阶法开挖的开挖步距

台阶法上下台阶的开挖步距是地表沉降的重要因素之一, 在开挖过程中上下台阶步距为 5 ~ 10 m 在交

叉段上台阶采用短进尺 0.75 m。实践证明步距拉开太大会造成整体初支不容易及时封闭,且不利于上下台阶协调施工和控制;步距没有拉开或同步施工,会造成开挖跨度大,不利于结构的整体稳定和变形控制,容易产生较大的地表沉降。

4 结论

(1)交叉近接隧道采用浅埋暗挖法施工的地表沉降曲线形状与合成的 Logistic 曲线比较吻合,一段时间的开挖停工会对地表沉降产生比较明显的影响。地表沉降曲线经历了缓慢沉降阶段,沉降加速发展阶段,沉降发展速度衰减阶段,沉降重新进入成长发展阶段,地表沉降稳定阶段。

(2)复杂近接地下结构的重复扰动引起的变形叠加是地表产生较大变形的主要原因之一。台阶法开挖过程中上下台阶的协调控制对地表沉降有重要影响,选择合理的上下台阶开挖步距能减小地表沉降。结构间体系转化对结构的整体受力产生不利影响,不利于地表的沉降控制。

(3)台阶法加临时仰拱法对控制地表沉降和水平收敛有比较明显的作用,但不利于上台阶拱顶沉降的

控制。采用浅埋暗挖台阶法施工中合理增设临时仰拱对控制近接交叉隧道产生的地表沉降有着重要的意义,符合信息化施工要求。

(4)交叉近接隧道开挖过程中的超前小导管、注浆加固等辅助施工方法对控制地表沉降有显著作用。施工五号线和六号线交叉段时,对重叠段前后 10 m 范围内注浆加固六号线拱顶范围后进行开挖,有效地控制了地表沉降,确保了交叉段的安全施工。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社, 2005
- [2] 孙巍, 杨会军, 焦苍, 等. 浅埋大跨超近距多洞室暗挖施工监测分析[J]. 铁道建筑技术, 2006(2): 26—28
- [3] 吴波, 高波. 复杂条件下城市地铁隧道施工地表沉降研究[J]. 中国铁道科学, 2006 11(6): 129—131
- [4] 顾问天, 顾问宇, 覃应华. 浅埋暗挖施工中用临时仰拱控制地表沉降有效性分析[J]. 铁道建筑技术, 2005(11): 34—36
- [5] 郑鹏武, 谭忠盛, 朱元生, 等. 地铁施工引起地表沉降的 Logistic 模型预测及应用[J]. 中国安全科学学报, 2006 3(3): 23—26 31.

(上接第 62页)

$$M_z = \frac{M_{\text{东}} - M_{\text{西}}}{2} = 9\,310\,11 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\varepsilon_{\text{实际}} = M_z / N = 0.071 \text{ m} \quad \mu_0 = M_z / (0.98NR) = 0.0072$$

4.4.1 在转体斜拉桥转体时,尤其是本桥转体重量达 16 500 t,为了确保转体安全,必须在转提前对转体结构部分进行称重试验。

4.4.2 实测不平衡重心偏向东侧即重心后移,保证跨铁路端桥下净空不减小,转体时由球铰和后撑脚承担部分重量,与设计相符,转体时不需要平衡配重。

4.4.3 通过称重试验有力的证明了施工过程中结构重心的控制措施得当,从而可以保证转体的顺利进行。

5 结论

经过严密的计算分析,现场施工控制,石环公路跨石太铁路转体斜拉桥转体施工最终实现了球铰每分钟

0.8 度的速度匀速转动,推动了重达 16 500 t 的桥体旋转,实现了 100 多 m 的稳定连续转体,主桥跨越铁路线与两端现浇梁实现了平稳对接,转体施工各项关键技术通过了实际检验,为后续同类工程施工积累了宝贵经验。

参考文献:

- [1] 陈光华, 刘淑琴. 大里营转体刚性索斜拉桥施工技术综述[J]. 铁道标准设计, 1998(9): 2—8
- [2] 肖佳鹏. 石景山南站斜拉桥转体系统施工要点[J]. 铁道标准设计, 2005(6): 42—44
- [3] 魏峰, 陈强, 马林. 北京市五环路斜拉桥转动体不平衡称重试验分析[J]. 铁道建筑, 2005(4): 4—6
- [4] 周庠天, 孙毅峰, 向宝城, 等. 北京石景山混凝土斜拉桥转体施工[J]. 预应力技术, 2004(1): 19—21