第 29 卷　第 1 期　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　Vol. 29　No. 1
2016 年 3 月　JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)　Mar. 2016

三孔小净距隧洞下穿铁路干线地表沉降控制基准研究

付书锋

(中铁六局集团 石家庄铁路建设有限公司,河北 石家庄　050010)

摘要:以南水北调中线一期工程下穿京九铁路隧洞工程为背景,以铁路轨道静态容许偏差管理值和容许高低倾斜值为基础,结合工程特点,通过对比经验公式及数值计算结果,提出了三孔小净距隧洞下穿铁路干线地表沉降控制标准,并采用总控制指标与分阶段控制指标相结合的方式建立监控量测管理标准。实际工程通过采用系列控制措施,施工全过程可控,实测地表沉降小于控制标准值,保证了铁路正常运营安全、隧洞施工安全和施工质量。

关键词:三孔小净距隧洞;下穿铁路;地表沉降;控制基准

中图分类号:TU94　文献标志码:A　文章编号:2095-0373(2016)01-0033-05

0　引言

随着各种基础设施工程的发展,以隧道方式下穿各种既有建(构)筑物的近接工程越来越多,工程也日趋多样化和复杂化。这类工程具有覆土埋深浅、地层松散破碎、对地表沉降要求特别严格等普遍特点。如工程措施或施工控制不到位往往会造成巨大的经济损失和极不利的社会影响。根据不同工程特点制定适应具体工程的地表沉降控制基准,是制定工程措施的依据,也是工程安全的保证。目前国内大多类似工程中往往是根据工程经验笼统地确定地面沉降控制值为 30 mm[1]。实际上,具体工程环境条件不同,工程本身条件不同,其地表沉降的控制值应有所不同。

以隧道(洞)方式下穿既有铁路,主要矛盾集中在隧道(洞)开挖施工及工后沉降对既有铁路运营安全的影响,如地表沉降过大,将引起路基下沉、道床下沉、轨道下沉、轨道不平顺,进而影响到既有铁路的运营安全[2]。轨道下沉及不平顺是影响铁路运营的直接指标,洞室、地表、路基及道床位移控制均应服从于轨道结构位移控制指标,从而保证列车运行安全。因此,在制定控制标准时,应以轨道结构的要求出发。

铁路安全部门要求施工期间应每天对线路进行检查和保养,因此对铁路线路的变形控制可按《铁路线路修理规则》(铁运[2006]146 号)[3]规定取值。该规则规定了经常保养状态下轨道静态几何尺寸允许偏差管理值,该管理值可作为工程施工日变形量限值,也即轨道变形控制指标限值。不同线路等级和设计时速条件下,其允许偏差值不同。

1　依托工程概况

南水北调中线一期工程天津干线工程在 XW88+133 处下穿京九铁路(120 km/h),隧洞轴线与铁路轴线夹角 87°。隧洞断面形式为分离式小净距三孔暗挖隧洞形式,单孔洞身长 42 m,其中暗挖段长 32 m,明挖段长 10 m。每孔断面形式最大跨度为 7.5 m,高 9.95 m。每两孔中间净土柱宽度 10 m。隧道拱顶至地面最小高度仅为 1.69 m,距铁路路肩高度为 4.33 m。工程区域内主要位于粉、细、中砂层等,隧洞拱顶处填土层结构松散,土体自稳能力差,围岩分级为Ⅵ级。结构上方铁路线列车行车频繁,路基震动大,隧道开挖多次扰动有可能导致铁路路基沉降超标,影响既有线设备的正常运营。如图 1 为单孔隧洞结构

收稿日期:2015-03-15　责任编辑:车轩玉　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2016.01.06
作者简介:付书锋(1975-),男,高级工程师,主要从事于土木工程施工现场技术管理的研究。E-mail:
付书锋.三孔小净距隧洞下穿铁路干线地表沉降控制基准研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):33-37.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

形式及地质柱状图。

2 既有线轨道变形允许的偏差及沉降变形倾斜率

下穿既有铁路线路的隧道施工引起地表沉降对既有铁路线路的影响主要表现在:一是可能引起轨道相对高差超限(即线路两股钢轨顶面的相对高差,也即水平偏差);二是有可能引起钢轨沿线路方向的竖向平顺性超限(高低偏差:指沿线路方向的竖向平顺性,10 m 弦测量的最大矢度值)。隧道正交或较大角度斜交下穿铁路施工时,一般情况下,沿线路方向前后高低偏差是主要控制因素[4-6]。

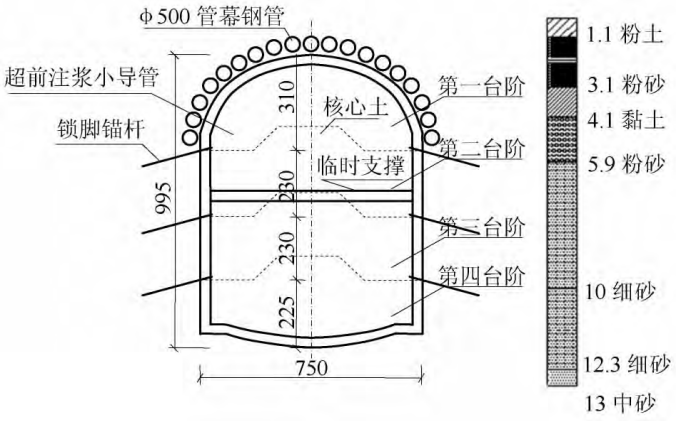

图 1 单孔隧洞结构形式及地质柱状图(单位:mm)

一般情况下,当水平偏差超限时,可能引起车辆运行过程中左右摆动和钢轨受力不均,从而引起钢轨不均匀磨损;三角坑的存在将引起一侧车轮悬空或减载。而当高低不平顺时可能引起车辆运行过程中的上下起伏,其危害性更大,其破坏作用与高低偏差值成正比,与不平顺长度成反比,一般要求以 10 m 弦长的高低偏差和轨向偏差值来确定。

《铁路线路修理规则》(铁运[2006]146 号)[3]规定了轨道静态和动态的几何尺寸容许偏差管理值。

通常情况下,轨道结构可视为沿线路方向的无限长柔性结构,轨道结构的变形规律与地表变形规律是一致的,因此认为对轨道结构的变形控制值与对地表的变形控制值是一致的。

根据铁路线路的不平顺值,以铁路轨道允许的倾斜值来表达

$$[f]=[\delta]/L \tag{1}$$

式中,$[f]$为轨道允许的高低倾斜值;$[\delta]$为铁路轨道允许弦长量测的最大矢度值;L 为量测弦长。

根据《铁路线路修理规则》中轨道静态和动态经常保养的容许偏差管理值代入式(1),可得轨道静态和动态的高低和水平倾斜值,如表 1。

表 1 铁路轨道容许的高低和水平倾斜值

线路允许速度/(km·h^{-1})	静态		动态	
	高低倾斜率	水平倾斜率	高低倾斜率	水平倾斜率
≤120	0.000 6	0.004 3	0.000 8	0.005 7
120～160	0.000 6	0.004 3	0.000 6	0.004 3
>160	0.000 5	0.003 6	0.000 5	0.003 6

由表 1 可见,不同等级和不同设计时速铁路容许的高低倾斜值及水平倾斜值不同,静态条件和动态条件不同,静态条件下容许的倾斜值要求高于动态条件下容许的倾斜值要求。隧道下穿施工中对轨道水平偏差和轨向偏差的影响很小,因此以静态条件下轨道容许的高低倾斜值(0.000 6)为控制基准,从而进一步确定地表沉降控制基准。

3 经验公式及数值计算结果

墨西哥学者 Peck 根据工程经验提出的隧道施工引起的地表沉降曲线,可作为地表沉降规律分析的对比方法之一。Peck 曲线呈下态分布,其曲线近似描述如图 2 所示。其方程为

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

式中,x 为距隧道中心线地距离;S 为距隧道中心线为 x 的地表沉降量;$S_{\max}$为隧道中心线处最大沉降量;i 为沉降槽宽度系数,可由下列经验公式计算

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$i=\frac{H+R}{\sqrt{2\pi}\mathrm{tg}\left(45-\frac{\varphi}{2}\right)} \tag{3}$$

式中，H 为覆土厚度；R 为隧道水力半径。

图 2 中 W 为沉降槽宽度，Cording（美国）等人根据莫尔-库仑理论，推导出 W 与 i 满足 $W=5i$ 的关系。

根据本工程三孔小净距隧洞的实际情况，采用开挖面积等效法换算单个隧洞水力半径 $R=4.67$ m，地层加权平均内摩擦角 $\varphi=22.5°$，隧洞洞顶覆土层厚度 $H=4.33$ m，由式(3)得单个隧洞沉降槽宽度系数 $i=5.37$ m，则沉降槽宽度为 26.85 m。对于三孔隧洞可采用叠加方法，将 $i=5.37$ m 代入式(2)，得

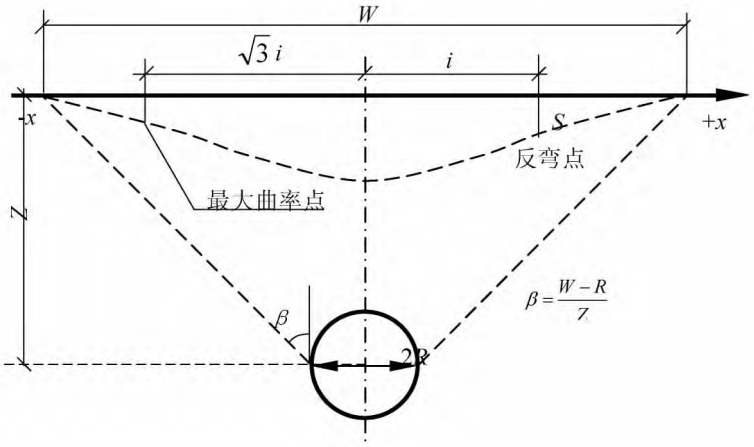

图 2　地表沉降横向预测示意图

$$S=S_{\max}\exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)+S_{\max}\exp\left(-\frac{(x+17.5)^2}{2i^2}\right)+S_{\max}\exp\left(-\frac{(x-17.5)^2}{2i^2}\right) \tag{4}$$

式中，$S_{\max}$ 为单孔隧洞中心线处最大地表沉降量，17.5 为相邻隧洞中心间距(m)。

如图 3 为按 Perk 经验公式，单孔隧洞与三孔隧洞叠加后地表沉降曲线。因单孔隧洞影响半径(13.43 m)小于相邻隧洞中心间距(17.5 m)，故叠加后的地表沉降最大值与单孔隧洞的地表沉降值 $S_{\max}$ 基本相当，边洞及中洞的最大地表沉降值分别为 $1.005S_{\max}$、$1.010S_{\max}$，三孔叠加后地表沉降影响范围约为 68 m。

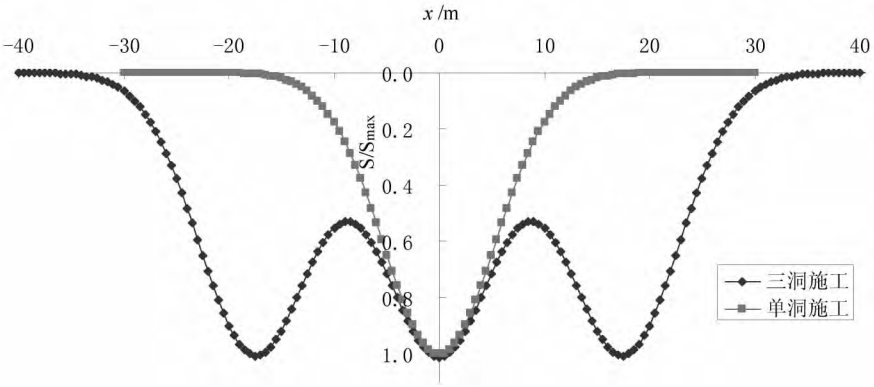

图 3　按经验公式计算三孔隧洞地表沉降曲线

为研究三孔隧洞开挖施工引起的既有铁路地表沉降分布规律，研究中建立三维有限元模型，采用有限元程序对施工实际工况（边洞超前中洞 20 m 施工）进行模拟分析，地表计算地表沉降分布规律如图 4 所示。计算结果显示，地表最大沉降为 7.9 mm，沉降槽宽度约 94 m。

4　暗挖隧洞下穿铁路干线地表沉降控制基准

通过上述分析，暗挖隧洞下穿铁路干线地表沉降控制基准应以轨道静态容许高低倾斜值为控制基准。根据式(2)的数学意义，曲线在 $x=i$ 处为反弯点位置，此处斜率取得最大值，其最大值为

$$S'|_{x=i}=\left(-\frac{2x}{2i^2}\cdot\exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)\cdot S_{\max}\right)\Bigg|_{x=i}=-\frac{-0.61S_{\max}}{i}。$$

如前所述，由于单孔隧洞影响半径小于相邻隧洞中心间距，故三孔叠加后地表沉降曲线最大斜率与单孔隧洞最大斜率相等。最大斜率值不应大于表 1 中静态容许高低倾斜值$[f]$，即 $f=\frac{0.61S_{\max}}{i}\leqslant[f]$，则铁路轨道允许的最大沉降量$[S_{\max}]$满足$[S_{\max}]\leqslant\frac{i}{0.61}[f]$。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

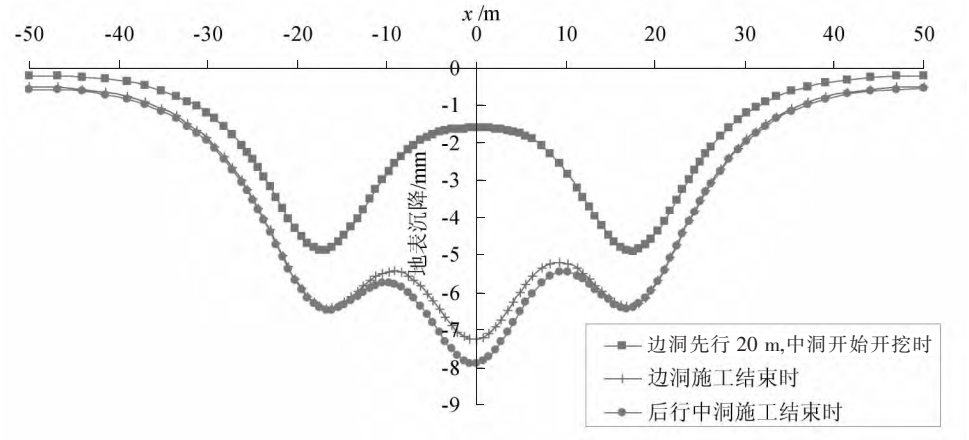

图4 计算地表沉降分布规律

可得$[S_{max}]\leqslant 5.3$ mm。

实际上按式(2)计算的地表沉降的影响范围偏小,造成三孔隧洞施工基本上不存在相互影响,这与工程实际不相符。

如采用模拟计算结果,由单个隧洞$W=5i$,则$i=(94-35)/5=11.8$ m,则得到$[S_{max}]\leqslant 11.6$ mm。

以上计算结果是在假定轨道完全平顺的情况下得出的,如考虑轨道初始不平顺性,上述计算指标应适当折减。研究中根据既有铁路的修建年限、地层条件及既有轨道的平顺程度,最终暗挖隧洞的地表沉降的控制值取为10 mm。

结合具体工程,在确定地表沉降控制基准的基础上,建立如表2所示的监控量测控制标准;并采用总控制指标与分阶段控制指标相结合的方式建立Ⅲ级监控量测管理标准,如表3所示。

表2 监控量测控制标准表

序号	监测项目	允许值
1	地表沉降	10 mm
2	地表隆起	6 mm
3	拱顶下沉	10 mm
4	底部隆起	10 mm
5	净空收敛	20 mm
6	轨顶位移	6 mm/10 m

表3 监控量测管理标准

项目		管理等级			控制措施
		Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
分阶段控制指标	管幕施工	<3	3~6	>6	调整工作气压、夯击频率、夯进速度、夯击顺序,钢管外涂材料减少摩擦等
	地表加固	<3	3~6	>6	调整注浆压力、注浆顺序及浆液配比等
	开挖支护	<5	5~10	>10	调整掌子面喷混凝土封闭、预留核心土、掌子面及边墙注浆加固、台阶高度及长度、水平横撑、锁脚锚杆等参数
总控制指标		<5	5~10	>10	—
施工状态		正常施工	加强措施	停工	—

注:(1)管幕施工及地表加固阶段控制项目包括地表隆起及轨顶位移;
(2)开挖支护及总控制项目包括地表沉降、轨顶位移、拱顶下沉、边墙位移、底部隆起。

如表2及表3,在信息化施工过程中,监控量测所得数据应及时进行分析整理,与上述标准进行对比分析,判定结构稳定性和铁路运营安全性,将监测结果及时反馈到施工中,以便及时采取相应措施。在表3中Ⅲ级管理标准对应以下安全等级:

Ⅲ级管理:可正常施工。

Ⅱ级管理:加强监测,适当调整施工步序,并采取加强措施。

Ⅰ级管理:停止施工,加强监测,调整施工计划,必要时进行设计变更。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5　施工控制效果分析

实际施工中采用了 Φ500 超前管幕与注浆小导管联合预支护技术、地层注浆加固技术、线路加固技术、四台阶预留核心土辅以水平横撑开挖技术等施工控制技术措施。施工时对地表沉降、轨面高程、地层位移、电气化网杆的倾斜和沉降、隧洞内拱顶下沉、洞内收敛、底部隆起监测进行不间断测量监测。通过及时的信息反馈,施工全过程可控。施工结束后实测最大地表沉降值 6.2 mm,最大拱顶下沉 7.5 mm,最大水平收敛 11.9 mm,最大轨面隆起 5 mm,最大轨面沉降 8 mm。监测结果均在控制范围以内,施工安全和施工质量得以保证,同时保证了铁路的正常行车安全。

参　考　文　献

[1]朱永全,宋玉香. 地下铁道[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.

[2] 娄国充. 铁路隧道下穿既有路基沉降规律及控制标准研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.

[3] 中华人民共和国铁道部. 铁运[2006]146 号 铁路线路修理规则[S]. 北京:中国铁道出版社,2008.

[4] 李文江,刘志春,朱永全. 铁路站场下暗挖隧道地表沉降控制基准研究[J]. 岩土力学,2005,26(7):1165-1169.

[5] 王剑晨,张顶立,张成平,等. 北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(5):947-956.

[6] 尚淑萍,胡玉娇,徐彦妮. 基于既有线平顺性浅埋暗挖隧道地面沉降控制标准[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(2):95-99.

Research on the Surface Subsidence Control Standard of Small Spacing Three-hole Tunnels Underneath-crossing Trunk Railway

Fu Shufeng

(Shijiazhuang Railway Construction Co., Ltd., China Railway 6th Engineering Bureau Group, Shijiazhuang 050010,China)

Abstract: Based on the tunnel of south-to-north water transfer first-stage project underneath-passing Beijing-Kowloon railway, the surface subsidence control standard of small spacing three-hole tunnels is studied. According to the engineering characteristics and tolerance and inclination value of railway track, comparing the empirical formula result and numerical calculation result, the author puts forward the proposal of surface subsidence control standard of small spacing three-hole tunnels underneath-passing trunk railway and monitoring management standards of general and staged control indicators. In practical engineering, construction monitoring indicators are controlled by systematic technical control measure, and thus the railway operation safety and tunnel construction safety are ensured.

Key words: three pipes small spacing tunnels; underneath pass railway; surface subsidence; control standard

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net