

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.008

铁路立体交叉隧道相互影响阈值

于鹤然¹,周晓军¹,胡鸿运²

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,成都 610031;

2. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,成都 610017)

摘要:针对铁路双线立体交叉隧道结构,通过数值模拟和回归分析等方法对不同围岩级别条件下既有隧道受新建隧道施工的影响情况进行了研究。运用数值模拟方法建立了多种净距、多种围岩条件和上跨及下穿既有隧道的工序下的力学模型,通过对48种工况下既有隧道底板变形计算结果的回归分析,得出了既有隧道围岩与道床变形预测公式,根据现有高速铁路运营期间允许的道床变形标准,对既有隧道运营不受影响的最小净距给出了建议值。同时对既有隧道围岩压力受新建隧道施工影响的变化情况进行了分析,以围岩压力变化幅度为评价准则,对铁路双线立交隧道间相互影响的净距临界值给出了推荐值。研究发现,新建隧道上跨的修建形式与下穿相比,对既有隧道影响略小。

关键词:隧道工程;影响阈值;数值分析;立体交叉隧道;回归分析

中图分类号:U459.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0044-08

Influence Threshold Analysis on Railway Over-Cross Tunnels

Yu Heran¹, Zhou Xiaojun¹, Hu Hongyun²

(1. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;

2. Southwest Institute of China Petroleum Group Engineering, Chengdu 610017, P. R. China)

Abstract: Double-track railway over-cross tunnels were studied by numerical simulation and regression analysis. A series of research on the influence of the construction of newly built tunnel to the existing one in different surrounding rock grades was carried out. According to the numerical simulation, 48 mechanical models were established, which considered various clearance, rock conditions and different construction sequences (building above or beneath existing one). Based on regression analysis on the calculation results from the 48 models, the deformation prediction formulas for the existing tunnel's surrounding rocks and ballast bed were deduced. According to the high-speed rail allowed standard of roadbed deformation during operation, the minimum clear distance value by which the existing tunnel's operation would not be affected was recommended. Some analysis on the surrounding rock pressure's variation of the existing tunnel caused by new tunnel construction was done. Taking the variation amplitude as the evaluation criteria, a critical value of influenced clearance for railway over-crossing tunnels project is provided. Meanwhile, the results found that the tunnel cross the building had a smaller impact on itself compared with that of the tunnel which goes through the building.

Key words: tunnel engineering; influence threshold; numerical simulation; over-cross tunnels; regression analysis

收稿日期:2013-03-01

基金项目:中央高校基本科研业务专项(SWJTU11ZT33)

作者简介:于鹤然(1983-)男,博士生,主要从事隧道与地下工程研究,(Email)heranyu@163.com。

随着铁路运输向着高速、快捷方向不断发展,运输网络逐渐加密,难免会遇到隧道工程的立体交叉现象。新建隧道近接既有隧道施工时,不可避免地将对周围地层进行位移扰动,从而引起既有隧道的变形并产生附加应力^[1]。

目前近接隧道工程实例很多,如新加坡高速公路交通系统采用四孔重叠隧道穿越回填土和海相粘土冲积层^[2],日本 Tozai 地铁线与既有 Keishin 线相连而采用了类似于四孔麻花型的线路形式^[3],上海地铁二号线与一号线在人民公园站附近空间立体交叉,隧道垂直净距仅 1.0 m^[4]等。关于施工过程中近距离隧道相互影响的研究开展较早,Wen 等^[5]、Pan 等^[6]等对隧道相互影响问题进行了理论研究及经验分析,并总结出实用型的经验公式,Zheng 等^[7]、Hage 等^[8]通过数值模拟方法对隧道施工的影响进行了分析,获得定量或半定量的成果,Kim^[9]、Lo 等^[10]通过模型试验与监测来分析隧道间相互影响激励,获得定性的结果。但是已有研究成果大多针对个别工点,普遍性研究较少。目前中国正大力发展高速铁路运输,现有成果鲜有涉及大断面隧道,很难可以照搬套用,在此背景下,本文开展了具有一定的针对性及普遍性的研究。

1 数值模型

着重研究双线隧道上、下立体交叉状况下隧道结构的力学状态,涉及的围岩条件、隧道净距较多,以数值模拟手段作为主要的研究方法,即通过隧道开挖-支护过程的数值模拟,研究支护结构的应力、应变特征。采用有限差分软件 FLAC^{3D} 进行建模分析。对于常规单洞隧道工程,数值计算模型的范围一般取隧道开挖断面 3~5 倍最大洞径,上部用地层压力(重力)来代替。通过前人大量的计算分析表明,这样的模型忽略了模型上部岩土体的重力扩散作用,夸大了地层压力的影响^[11],不能准确地反映隧道的受力特征。故本文建立出全部埋深范围内的岩土体单元,进而能够模拟深埋隧道中上部围岩地层压力的扩散作用。而且,笔者通过反复试算发现,在对多洞隧道工程的数值模拟中,简单的以 3~5 倍最大洞径(B)来确定模型范围是偏小的,因为第二座隧道的存在,交叉点处围岩受到二次施工扰动,先前已扰动范围会继续扩大。为保证计算结果的精确,建议类似模拟计算应取 6~10 倍最大洞径作为模型范围。参照中国高铁设计资料,所选取的典型开挖断面几何尺寸如图 1 所示。模型总体布置为长方体,上隧道埋深设置为 100 m ($6.67B$),上下隧道结构外边缘到边界最小距离 100 m(模型最小一维

尺寸总长 ≥ 215 m)。前后左右边界水平位移约束,下底边界竖向位移约束,上边界为自由表面,两隧道垂直立体交叉。

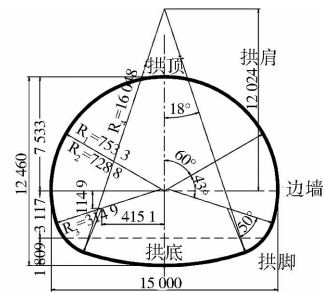


图 1 典型开挖断面

依据日本《既有铁路隧道近接施工指南》,计算两隧道最小净距取 0~3.5B 范围^[12],但未根据具体的围岩条件进行细化。在此基础上本文各工况最小净距布置如表 1。为了使净距布置能覆盖到完整的研究范围,也为了使数据具有很高的完整性和可对比性,最小净距取为 0。这在市政立交隧道中较为常见,例如新建地铁区间隧道紧贴既有车站施工掘进修建,以后也可能会随着选线自由度的逐渐变小而较多地出现在铁路隧道工程中。本文根据不同围岩级别、不同间距及不同施工顺序共计建模 48 个,各种净距模型示意图见图 2。

表 1 最小净距设置

等效间距/ B	实际间距/m
0.0	0.2
0.2	3.0
0.5	7.5
1.0	15.0
1.5	22.5
2.0	30.0
2.5	37.5
3.5	52.5

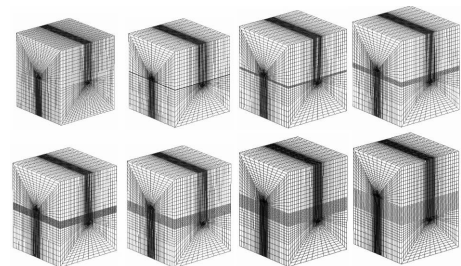


图 2 净距为 0~3.5B 模型示意图

施工模拟中,因重点研究后建隧道施工对既有隧道影响,故待先建隧道二次衬砌支护完毕后,再施

工后建隧道,后建隧道全断面法施工,进尺 3~5 m,只用初支结构进行支护,各个围岩级别条件下支护材料及尺寸见表 2。岩土体采用实体单元模拟,选用能很好地表征岩土体剪切破坏的 Mohr-Coulomb 本构模型。初次支护、二次衬砌采用壳体结构单元来建立,围岩参数及支护结构力学参数参照《铁路隧道设计规范》及相关工程经验选取如表 3。

表 2 支护结构材料及厚度

围岩级别	初支厚度/cm	初支材料	二衬厚度/cm	二衬材料
Ⅲ	12	C25	40	C30
Ⅳ	25	C25	45	C35
Ⅴ	28	C25	50	C35

表 3 围岩及支护结构力学参数

材料	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E / GPa	ν	c / MPa	$\varphi / (^\circ)$
Ⅲ级围岩	24.0	13.00	0.275	1.10	44.5
Ⅳ级围岩	21.5	3.65	0.325	0.45	33.0
Ⅴ级围岩	18.5	1.50	0.4	0.13	23.5
初支结构	22.0	23.00	0.2		
C30 衬砌	23.0	31.00	0.2		
C35 衬砌	25.0	32.20	0.2		

2 既有隧道结构位移分布特点

分别假定下穿既有隧道及上跨既有隧道两种工序进行模拟。在后建隧道施工的影响下,由于围岩二次扰动,既有隧道会产生朝后施工隧道的位移,由于两隧道的上下位置关系,这种位移在竖直方向

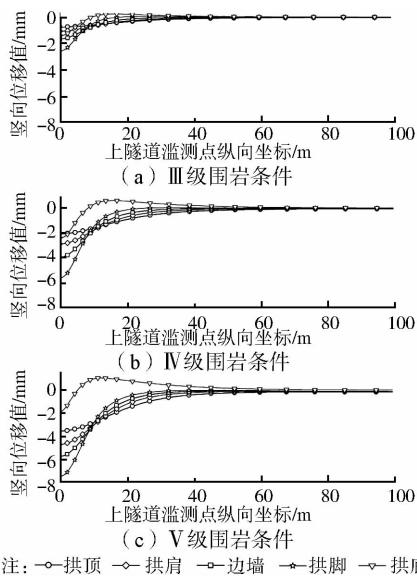
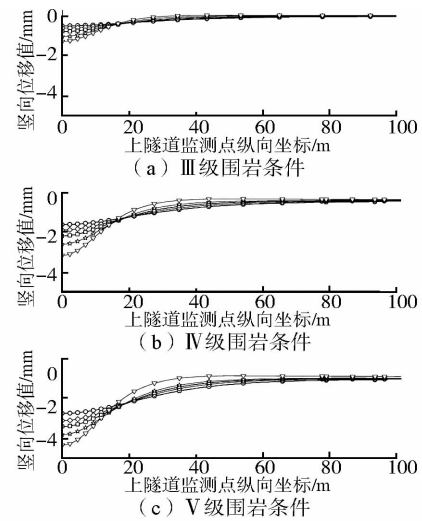
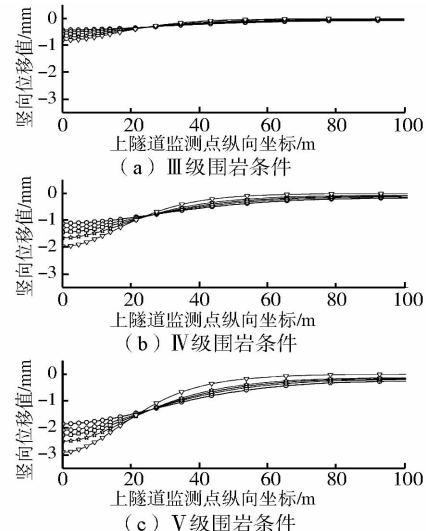


图 3 B 净距下既有隧道竖向沉降曲线



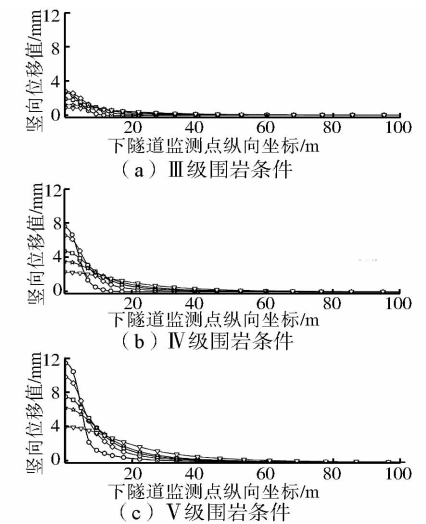
注: ○—拱顶 ◇—拱肩 □—边墙 ▲—拱脚 ▼—拱底

图 4 1B 净距下既有隧道竖向沉降曲线



注: ○—拱顶 ◇—拱肩 □—边墙 ▲—拱脚 ▼—拱底

图 5 2B 净距下既有隧道竖向沉降曲线



注: ○—拱顶 ◇—拱肩 □—边墙 ▲—拱脚 ▼—拱底

图 6 0B 净距下既有隧道竖向沉降曲线

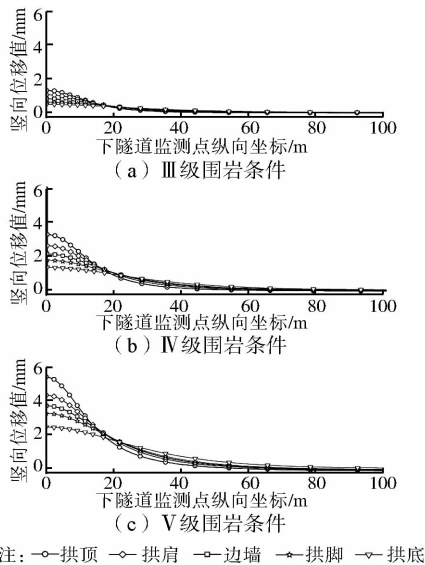


图7 1B净距下既有隧道竖向沉降曲线

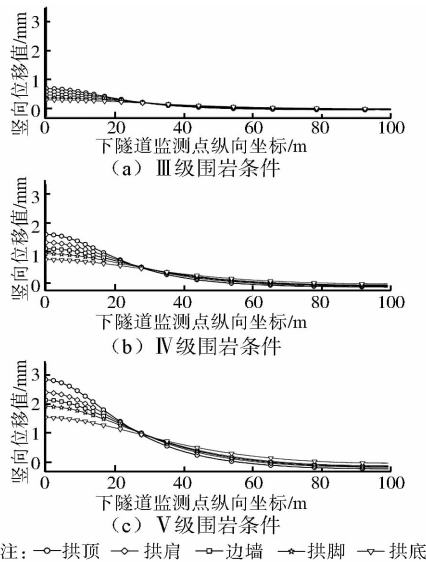


图8 2B净距下既有隧道竖向沉降曲线

最为显著。III、IV、V级围岩条件下，下穿隧道开挖对上部既有隧道各个部位竖向位移影响有如下结果，限于篇幅只罗列了0、1B及2B净距的计算结果(图3~5)，其他净距略。

假定下方隧道为既有隧道，上跨隧道开挖对既有隧道竖向位移影响有如下特点(图6~8)。

3 道床位移回归分析

近接隧道开挖引起既有隧道结构变形对铁路线路的影响主要表现在可能造成纵向(沿线路方向)高差超限。对于无砟道床,轨面高低调节较为困难,加之高铁运营期间空窗期时间较短,这无疑加大了轨面高低控制的难度,故对既有隧道道床变形的影响程度的研究彰显其重要意义。计算结果表明既有隧道竖

向位移最大,纵向位移次之,横向最小,且纵向、横向位移值远远小于竖向位移,而竖向位移又直接导致了轨道纵向的高低不平顺。可见既有隧道的控制变形为竖向位移。故以既有隧道运营安全为出发点,对受新建隧道影响所发生的结构竖向位移进行重点分析。

用每一横断面拱脚和拱底部位竖向位移中的较大值来表征该断面处道床的变形情况,各工况既有隧道道床最大竖向位移值见表4。

表4 既有隧道道床最大竖向位移值 mm

净距/m	新建下穿隧道			新建上跨隧道		
	III	IV	V	III	IV	V
0.2	-2.60	-5.66	-7.48	1.20	3.50	6.22
3.0	-1.92	-4.33	-6.16	0.99	2.88	5.34
7.5	-1.71	-3.84	-4.85	0.79	2.30	4.26
15.0	-1.30	-3.05	-4.20	0.60	1.72	3.21
22.5	-1.01	-2.42	-3.54	0.47	1.33	2.54
30.0	-0.81	-1.96	-2.91	0.37	1.06	1.99
37.5	-0.68	-1.65	-2.37	0.31	0.86	1.59
52.5	-0.50	-1.22	-1.70	0.21	0.56	1.03

对表4数据进行回归分析,根据反复试算,发现对数的形式可以很好的描述样本点的分布情况,最大竖向位移值 Z_{max} 可以用式(1)表示。

$$Z_{max} = a \cdot \ln(d_i + b) + c \quad (1)$$

式中: d_i 为两隧道最小净距, m; a 、 b 、 c 为常数,根据围岩级别的不同,取值见表5。

表5 道床最大竖向位移值预测公式参数

围岩	新建下穿			新建上跨		
	a	b	c	a'	b'	c'
III	0.642	1.948	-3.064	-0.355	3.096	1.627
IV	1.465	2.636	-7.113	-1.063	3.182	4.803
V	1.957	2.948	-9.681	-2.110	4.445	9.496

其中在新建隧道下穿既有隧道情况下,样本点与回归曲线关系见图10。

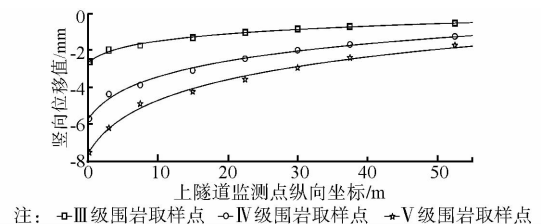


图9 样本点与回归曲线

既有隧道道床最大竖向位移值预测公式(式(1))决定系数(R^2),见表6。

表 6 最大竖向位移值预测公式决定系数

围岩	新建下穿	新建上跨
Ⅲ	0.993	0.999
Ⅳ	0.993	0.999
Ⅴ	0.994	0.999

在式(1)的基础上,为进一步得到道床沉降曲线,将各个计算工况下的道床沉降值按与立交点距离(纵向坐标)整理出来,以Ⅲ级围岩条件下新建隧道下穿既有隧道为例,既有隧道道床沉降数值(部分)如下(表 7)。

表 7 既有隧道道床竖向位移值

	净距/m								mm
	0.2	3	7.5	15	22.5	30	37.5	52.5	
0.00	-7.48	-6.16	-4.85	-4.20	-3.54	-2.91	-2.37	-1.70	
2.31	-7.10	-5.91	-4.71	-4.11	-3.49	-2.89	-2.36	-1.70	
5.77	-5.36	-4.77	-4.07	-3.68	-3.26	-2.76	-2.29	-1.67	
9.23	-3.35	-3.32	-3.19	-3.03	-2.88	-2.54	-2.16	-1.62	
15.00	-1.30	-1.57	-1.89	-1.84	-2.12	-2.07	-1.87	-1.48	
21.30	-0.44	-0.69	-1.01	-0.91	-1.52	-1.57	-1.50	-1.30	
30.74	-0.12	-0.22	-0.40	-0.23	-0.90	-1.06	-1.08	-1.02	
38.79	-0.03	-0.10	-0.21	-0.03	-0.57	-0.73	-0.80	-0.81	
48.23	-0.03	-0.06	-0.12	0.04	-0.34	-0.48	-0.55	-0.60	
59.07	-0.05	-0.06	-0.09	0.03	-0.20	-0.30	-0.36	-0.41	
71.32	-0.09	-0.08	-0.09	0.01	-0.14	-0.20	-0.24	-0.27	
100.00	-0.12	-0.10	-0.10	0.00	-0.10	-0.13	-0.15	-0.15	

根据 Peck 沉降曲线的形式,继续对表 7 数据回归分析得到道床沉降曲线预测式(2)。

$$Z(x) = Z_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{d_i^2 + d}\right) \quad (2)$$

式中, d 为常数,根据不同围岩级别,取值见表 8(下穿既有隧道取 d ,上跨既有隧道取 d')。

表 8 路基沉降曲线预测公式参数

围岩	d	d'
Ⅲ	62.310	367.288
Ⅳ	84.546	324.770
Ⅴ	126.812	316.256

既有隧道道床沉降(隆起)变形预测公式(式(2))决定系数(R^2)见表 9。

表 9 路基沉降曲线回归分析决定系数

围岩	新建下穿	新建上跨
Ⅲ	0.987	0.971
Ⅳ	0.985	0.968
Ⅴ	0.985	0.968

4 位移回归与工程实例比较

为了以实际工程对上文提出的既有结构道床(底板)最大竖向位移值预测公式(式(1))及道床(底板)竖向位移曲线预测公式(式(2))进行验证比对,本文搜集了大量立体交叉地下工程的文献资料,部分比对结果如下:

某市地铁工程中新建隧道下穿既有隧道^[13],盾构法施工,净距约 1.3 m,上隧道底板竖向位移实测值与预测曲线见图 10。

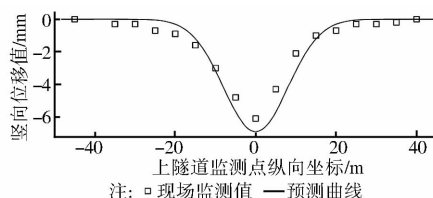


图 10 竖向位移实测值与预测曲线

在北京地铁 4 号线西单车站上穿既有 1 号线区间隧道工程中^[14],新建上部车站暗挖法施工,下方隧道底板竖向位移实测值与预测曲线见图 11。

其他工程对比结果见表 10。

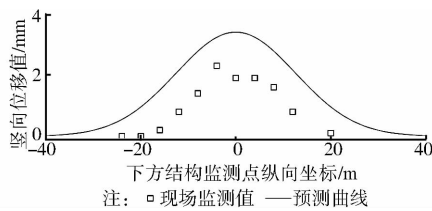


图 11 竖向位移实测值与预测曲线

表 10 竖向位移最大实测值与预测值比较

工程名称	围岩级别	净距/m	施工方法	监测值/mm	预测值/mm
上海外滩通道上跨地铁 2 号线 ^[15]	V	1.4	盾构	10	5.8
北京地铁 4 号线上穿 9 号线隧道 ^[16]	V	1.4	盾构	6	5.8
某地铁隧道下穿既有车站 ^[17]	V	3.7	暗挖	-3.9	-6.0
广州旅客自动输送隧道下穿 1 号线 ^[18]	V	2.3	盾构	-5.5	-6.4
深圳 2 号线东延线区间下穿 4 号线隧 ^[19]	V	1.8	盾构	-6.3	-6.6
深圳 2 号区间隧道下穿 4 号线隧道 ^[20]	V	1.6	盾构	-7.1	-6.7
南水北调总干渠输水隧道下穿北京地铁 1 号线五棵松站 ^[21]	V	3.7	暗挖	-4.7	-6.0
重庆 1 号线区间下穿小龙坎铁路隧道 ^[22]	IV	5	矿山	-2.4	-4.1
广州珠江新城集运隧道下穿地铁 1 号线 ^[23]	V	1	盾构	-8.8	-7

5 立交隧道影响阈值判定

根据式(1),隧道间最小净距与既有隧道最大竖向变形及围岩等级关系为

$$d_i = \exp\left(\frac{z_{\max} - c}{a}\right) - b \quad (3)$$

按照《铁路线路修理规则》^[24]线路轨道静态几何尺寸容许偏差管理值中规定,在 $V_{\max} \geq 160 \text{ km/h}$ 一档的最严标准,轨道高低偏差不得大于 3 mm。现在中国客运专线最高时速甚至达到 350 km/h 以上,如令 $Z_{\max} = [Z] = \pm 2 \text{ mm}$,可以推导出在新建双线隧道近接施工既有双线隧道工程中,不影响既有隧道运营安全的最小容许净距,计算结果见表 11。

表 11 双线隧道近邻施工最小净距建议值

工况	下穿既有线路	上跨既有线路
III	0.2B	无限制
IV	2.0B	0.7B
V	3.2B	2.0B

从表 11 可见,新建隧道上跨修建方式的选线自由度明显要高于下穿方式。这是隧道衬砌断面的上下几何不对称性及道床在断面中偏向下方的位置关系导致的,即类似工程可优先考虑上跨的修建方式。

狭义上讲隧道的荷载即为隧道支护结构所承受的围岩压力^[25]。通过对立体交叉隧道在 III 级、IV 级和 V 级围岩条件下净距为 0.0、1.0B、2.0B、2.5B、3.5B 时围岩压力的计算与分析,研究发现,在立交点一定范围内,既有隧道围岩有着显著下降的现象,尤其是在紧邻新建隧道一侧更为明显。限于篇幅只列出 0.5B 净距下多种围岩条件下既有隧道围岩压力变化情况,见图 12。

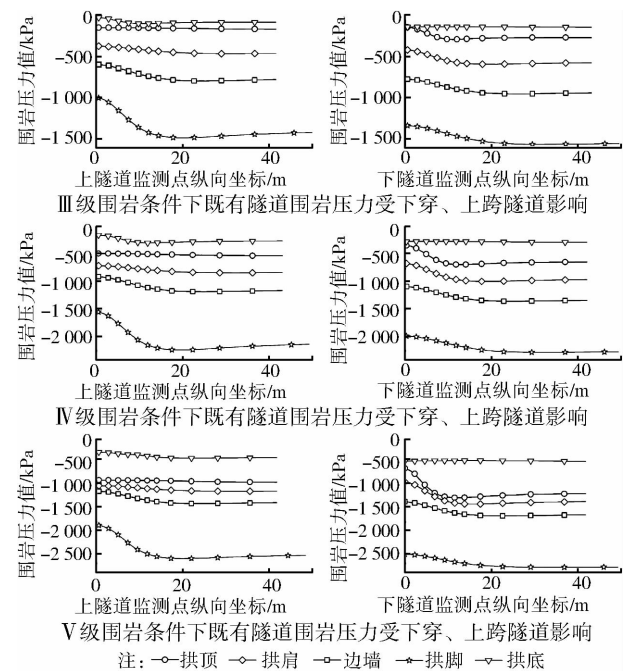


图 12 既有隧道围岩压力变化

为了对影响程度的描述定量化,假定当某断面全部监测位置围岩压力变化幅度在 5.0% 以内时,即认为该断面不受新建隧道影响,引起既有隧道围岩压力增减 5% 以上为弱影响区,引起既有隧道围岩压力增减 15% 以上为强影响区。据此得出了两座隧道处于立体交叉时相互影响的净距临界值,如表 12 所示。

表12 立交隧道相互影响净距临界值

立交形式	围岩级别	弱影响区	强影响区
新建隧道下穿既有隧道	III	(1.0 ~ 2.5)B	(0 ~ 1.0)B
	IV	(1.0 ~ 2.5)B	(0 ~ 1.0)B
	V	(1.0 ~ 3.0)B	(0 ~ 1.5)B
新建隧道上跨既有隧道	III	(0.5 ~ 2.0)B	(0 ~ 0.5)B
	IV	(1.0 ~ 2.5)B	(0 ~ 1.0)B
	V	(1.0 ~ 2.5)B	(0 ~ 1.0)B

当立交隧道净距大于弱影响区时,可不考虑相互影响作用,按常规支护参数进行设计;当净距小于弱影响区时,应对支护参数进行加强;当净距小于强影响区时,应结合工程实际进行计算分析,特殊设计。

6 结 论

采用三维数值模拟、回归分析及工程实测等方法,对立交隧道结构影响阈值进行了相关研究,获得结论如下:

1)得到了以两隧道最小净距、立交段围岩条件、两隧道先后修建顺序为变量,既有隧道的道床最大变形预测公式和道床沉降曲线预测公式。

2)针对目前我国大力建设的高速铁路,对新建隧道上跨或下穿既有双线隧道的不影响正常运营安全的最小净距给出了建议值。

3)针对隧道衬砌结构受力状况,以既有隧道围岩压力变化幅度为准则,得出了以围岩级别为变量的两座隧道相互影响的净距临界值。

4)由于双线隧道衬砌断面的上下不对称性及道床在断面中偏向下方的布置位置,新建隧道上跨的修建形式与下穿相比,对既有隧道道床竖向变形、围岩压力变化影响较小,受限制的最小净距要求相对宽松,类似工程宜优先考虑上跨新线的修建方式。

参考文献:

[1] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling induced ground movement in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.

[2] 曾小清. 多孔隧道施工的研究进展[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 373-378.

Zeng X Q. Research progress of porous tunnel construction [J]. Underground Space, 1999, 19(5): 373-378.

[3] Yamaguchi I, Yamazaki Y, Kiritan I. Study of ground tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, In relation to design and construction of parallel shield tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289-304.

[4] 白廷辉, 尤旭东, 李文勇. 盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 311-316.

Bai T H, You X D, Li W Y. The protection technique during passing of shield through the operating metro tunnel [J]. Underground Space, 1999, 19(4): 311-316.

[5] Wen J P, Ng Y W. Design considerations for bored tunnels at close proximity [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(4): 468-469.

[6] Pan J K L, Plumbridge G, Storry R B, et al. Back analysis of cut and cover tunnels in close proximity to an operating railway in Hong Kong [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(3): 453-454.

[7] Zheng Y C, Qiu W G. 3-D FEM analysis of closely spaced vertical twin tunnel [C]// ITA2005 WTC, Proceedings. Balkema Press, 2005.

[8] Hage C F, Hahrour I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels; Influence of the relative position and construction procedure [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 210-214.

[9] Kim S H. Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay [D]. Oxford: University of Oxford, 1996.

[10] Lo K W, Lee S L, Makino H. Tunnels in close proximity [C]// Proc. Singapore MRT Conf. Singapore, 1987: 275-281.

[11] 靳晓光, 李晓红, 杨春和, 等. 深埋隧道围岩-支护结构稳定性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1473-1476.

Jin X G, Li X H, Yang C H, et al. Stability of surrounding rock-supports structure of deep buried tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1473-1476.

[12] 铁道综合技术研究所. 既設トンネル近接施工対策マニュアル[M]. 平成8年9月.

Railway Comprehensive Technology Research Institute. Construction countermeasures manual for construction close to existed tunnel [M]. September 1996.

[13] 戴仕敏. 土压平衡盾构上穿运营中地铁隧道上浮控制[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(Sup1): 1459-1464.

Dai S M. Anti-floating control of running subway for

- above-crossing EPB shield [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(Sup1): 1459-1464.
- [14] 李兆平,汪挺,郑昊,等. 盾构隧道近距离小角度上穿已建暗挖隧道方案[J]. 都市轨道交通, 2008, 21(6): 64-68.
- Li Z P, Wang T, Zheng H, et al. Option for a shield tunnel driving across above an existing bored tunnel in close proximity with a small intersection angle [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21(6): 64-68.
- [15] 李硕. 地铁隧道下穿既有线地铁车站的施工技术[J]. 施工技术, 2010, 39(Sup): 189-194.
- Li S. Subway tunnel construction beneath the existing metro station [J]. Construction Technology, 2010, 39(Sup): 189-194.
- [16] 张凯,贺婷. 盾构近距离下穿地铁运营隧道施工技术[J]. 隧道建设, 2008, 28(4): 483-488.
- Zhang K, He T. Construction technology for shield-bored tunnel crossing underneath adjacent operating metro tunnel [J]. Tunnel Construction, 2008, 28(4): 483-488.
- [17] 谢银龙. 盾构始发期间小间距下穿既有运营地铁大断面隧道施工[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 161-165.
- Xie Y L, Shield launching within a short distance of an operating metro [J]. Modern Tunneling Technology, 2013, 50(1): 161-165.
- [18] 周明亮,白雪梅. 近距离下穿运营地铁隧道的关键技术[J]. 都市轨道交通, 2011, 24(3): 90-94.
- Zhou M L, Bai X M. Key techniques for a metro tunnel closely underpassing an existing metro tunnel in operation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(3): 90-94.
- [19] 张振营. 隧道下穿引起的既有地铁结构沉降规律分析[J]. 市政技术, 2011, 29(6): 75-83.
- Zhang Z Y. Settlement patterns analysis for tunneling underneath the existing subway structures [J]. Municipal Engineering Technology, 2011, 29(6): 75-83.
- [20] 袁竹,仇文革,龚伦. 小龙坎隧道受下穿区间隧道近接施工影响研究[J]. 铁道标准设计, 2009, 12: 99-102.
- Yuan Z, Qiu W G, Gong L. Study on the impact on Xiaolongkan tunnel exerted by construction of a underpass tunnel [J]. Railway Standard Design, 2009, 12: 99-102.
- [21] 房明,刘镇,周翠英,等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(1): 67-72.
- Fang M, Liu Z, Zhou C Y, et al. 3-D numerical simulation of influence of undercrossing shield construction on existing tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(1): 67-72.
- [22] 铁运[2006]146号 铁路线路修理规则[S]. 2006.
- [23] TB 10003-2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [24] Itasca Consulting Group, Inc. Fast Language Analysis of continua in 3 dimensions, version 3.0, user's manual [M]. Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [25] 郑应亨,任宏. 施工顺序对隧道围岩稳定性的影响分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(Sup): 85-90.
- Zheng Y H, Ren H. Influence Analysis construction of Different Sequences Surrounding Rock Stability [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(Sup): 85-90.

(编辑 王秀玲)