

地铁大跨暗挖隧道下穿桥隧结构变形影响分析

宋 艺

(陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//工程师)

摘 要 以某地铁工程中单洞双线暗挖隧道下穿桥隧结构为例,通过实测数据分析及数值模拟验证,得出:在现有施工方法及地层条件下,上部既有桥隧结构的变形整体符合 Peck 单凹槽曲线,其中既有隧道结构沉降曲线比既有桥梁结构沉降曲线更接近 Peck 公式;地层损失率在 0.20% ~ 0.24% 之间。分析结果说明,三维数值模拟可较为准确地预测上覆既有桥隧结构的沉降趋势,模拟结果与实测值差异较小。

关键词 地铁隧道施工;既有桥隧结构;变形计算

中图分类号 U25;U24

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.029

Structural Deformation Effect of Large-span Underground Excavation Tunnel Crossing Bridge and Tunnel

SONG Yi

Abstract Focusing on the deformation characteristics of bridge and tunnel structure when the large-span underground excavation tunnel crossing under them simultaneously, based on a double-tracked single-bored metro tunnel, the measured data are analyzed and validated with numerical simulation. It is concluded that in the fixed conditions of construction and stratum, the whole deformation of the upper existing bridge and tunnel structure conforms to Peck single groove curve, in which the subsidence curve of tunnel structure is closer to Peck formula than that of the bridge structure; according to the fitting data, the ground loss ratio in this condition ranges from 0.2% to 0.24%. A three dimensional numerical simulation could predict accurately the settlement trend of the upper bridge and tunnel structure, and simulation result has only slight difference from the measured data.

Key words metro tunnel construction; existing bridge and tunnel structure; displacement calculation

Author's address Shaanxi Provincial Key Laboratory of Railway and Underground Traffic Engineering (FSDI), 710043, Xi'an, China

地铁区间隧道不可避免地要下穿既有隧道或桥梁,因此,在保证新建隧道施工安全的同时,更要严格控制已有桥隧结构的变形。结构变形过大将会影响既有隧道净空及桥梁内力,从而不能满足既有桥隧结构的正常使用^[1]。因此,正确分析和预测新建隧道施工引起的既有桥隧结构变形规律十分重要。

文献[2-3]认为近距离大断面暗挖隧道引起的上部既有地铁隧道位移以沉降为主,隧道扭转变形和横向变形都很小,最大沉降发生在变形缝处。文献[4]对浅埋暗挖区间隧道下穿既有盾构区间隧道引起的变形特性分析表明,盾构隧道呈现柔性变形,纵向柔性变形更为明显,既有结构的存在显著减小了暗挖隧道引起的地表沉降。文献[5]基于弹性地基梁模型,推导了既有隧道受新建隧道垂直下穿施工影响而产生的纵向沉降曲线表达式、纵向应力计算公式及既有隧道所能承受的极限沉降表达式,定量评价了新建隧道垂直下穿施工对上部既有隧道纵向变形和内力的影响。

文献[6]的研究结果表明,在合理的实施方案下,暗挖区间隧道下穿桥桩是可行的,有限元模型可合理地预测隧道下穿桥桩的变形。文献[7]通过数值模拟分析了地铁双线隧道在开挖和支护过程中,临近桩基内力与变形的变化规律;分析结果表明桩基轴力有明显的负摩阻增大,桩基负摩阻力急剧增长会造成桩基承载力降低,故新建隧道施工应采取对应措施。文献[8]就新建地铁工程对运营铁路桥的影响进行了数值模拟分析,为新建地铁区间隧道施工过程对铁路桥影响的预测评估提供了依据。

以上文献对新建区间隧道下穿既有隧道或桥梁结构的变形影响进行了详细分析和阐述,但尚未见到新建大跨暗挖隧道同时下穿既有桥梁和隧道方面的研究文献。

本文以某地铁区间单洞双线大跨暗挖隧道同时下穿既有桥隧结构施工为例,对既有桥梁与隧道

随着我国城市轨道交通建设的快速发展,新建

的结构变形进行实测数据分析及数值模拟验证,以期得出在现有条件下既有结构的沉降变形规律和特点,为今后类似工程提供参考。

1 工程概况

某新建地铁区间隧道位于城市主干道下方。由于受到地质条件和两侧建筑物的限制,隧道部分区段采用大跨浅埋暗挖单洞双线的形式,开挖宽度 14.10 m,内径宽 12.40 m,高 7.97 m,初支厚 0.30 m,二衬厚 0.55 m。在区间 YDK 21+880—YDK 21+920 处下穿既有市政匝道桥及隧道结构。匝道桥为跨度 30 m 简支梁桥、双车道,桥面宽 13.50 m,基础为直径 1.20 m 钻孔桩。市政隧道结构内径宽 13.76 m,采用端墙式洞门,明洞结构厚度 85 cm,二衬厚度 65 cm,平面线型由连续小半径曲线构成,隧道总长 111.07 m。地铁区间隧道距离既有桥桩基最近距离为 8.63 m,距离既有隧道结构最近距离为 23.90 m。各结构平面及纵断面位置关系如图 1 和图 2 所示。

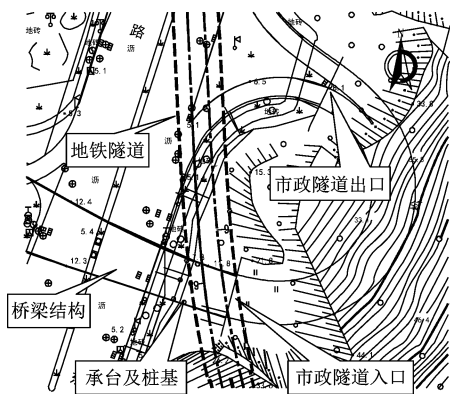


图 1 新建隧道与既有桥隧结构平面位置关系

所在区间地形大部分较平坦,地面标高 4~5 m,局部山地地形陡峭,最高点标高 71 m。区间覆盖层主要为近代人工填筑土层(Q_s)、第四系全新统海积层(Q_4^m)、海陆交互相沉积层(Q_4^{mc})、冲洪积层(Q_3^{al+pl})及残积层(Q_{el})等,各地层的厚度及性能变化较大;下伏基岩主要为燕山期侵入花岗岩(γ)及侏罗系上统南园组第二段火山岩(J_3^n)。根据现场实际详勘钻孔显示,地铁区间隧道穿越的地层为微风化花岗岩,上覆素填土,围岩等级为Ⅲ级。

该区段无地表水系。地下水按赋存介质可分为 3 类:赋存于第四系地层中的松散岩类孔隙水,赋存于残积层及全、强风化带中的风化残积孔隙裂

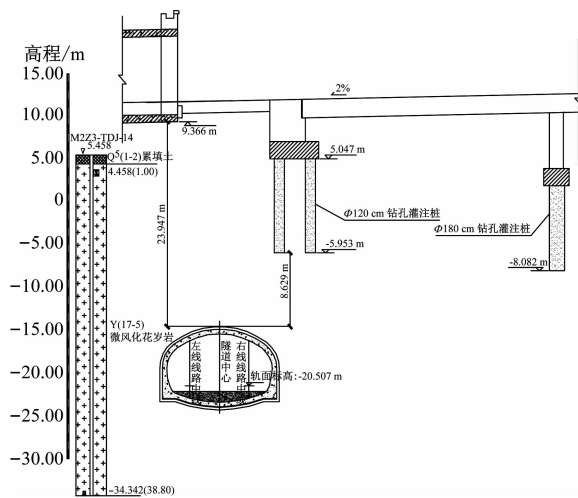


图 2 新建隧道与既有桥隧结构纵断面位置关系

隙水,赋存于碎裂状强风化带以下的基岩裂隙水。松散岩类孔隙水主要为赋存于表层人工填土中的上层滞水,补给主要来源为大气降水;风化残积孔隙裂隙水主要接受来自山岩体中基岩裂隙水的侧向补给;局部山体裸露高程较大的裸露基岩区完全接受大气降水补给,大气降水沿基岩裂隙下渗,汇集形成基岩裂隙水,延伸至沟谷洼地覆盖层下的基岩构造带中的裂隙水,由于补给区位置高,地下水多具承压性质。地下水的动态变化受年降水量变化规律的控制,地下水位年变幅一般 3~5 m。

2 新建地铁区间隧道施工

2.1 隧道衬砌结构

隧道下穿段具有地面交通车流量大,地下管线复杂等特点,且本身结构形式及受力情况复杂,施工工序多,地面沉降控制较为严格。隧道设计时采用复合式衬砌结构,拱墙及拱顶设置砂浆锚杆,按中隔壁法(CD法)进行施工。

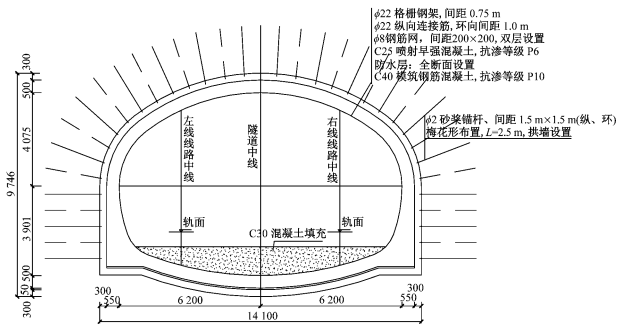
衬砌结构为:①初期支护——喷射混凝土为 C25 混凝土,厚度 30 cm;钢筋网为 $\phi 8$ mm 钢筋,间距 20 cm × 20 cm,全环双层设置;钢架采用 $\phi 22$ mm 格栅钢架,间距为 75 cm;②二次衬砌——采用 C40 防水混凝土,厚度为 55 cm,仰拱紧跟开挖面进行浇筑,其余段二次衬砌滞后 20 m 进行施工;③临时支撑,中隔壁临时支撑采用工 18 工字钢、 $\phi 8$ mm 钢筋网联合支护,支撑间距同初期支护钢架间距。

2.2 隧道施工措施及工法

(1) 系统锚杆。拱墙设置 $\phi 22$ mm 砂浆锚杆,纵向间距 1.5 m,环向间距 1.5 m,梅花型布设,长度

2.5 m, 砂浆强度不低于 M 20。

(2) 封闭裂隙水注浆。隧道开挖时如遇岩石裂隙发生面状或线状渗漏水, 采用封闭裂隙水注浆堵水。注浆孔孔口间距 1.0 ~ 1.5 m, 孔径采用 50 mm, 注浆压力采用 0.5 ~ 1.0 MPa。下穿段衬砌支护如图 3 所示。



注: 尺寸单位除注明者外均为 mm

图 3 新建隧道下穿段衬砌

(3) 根据详勘报告给出的地质围岩情况, 并结合周边环境情况, 确定隧道开挖采用中隔壁法 (CD 法) 6 步进行施工。开挖工序如图 4 所示。

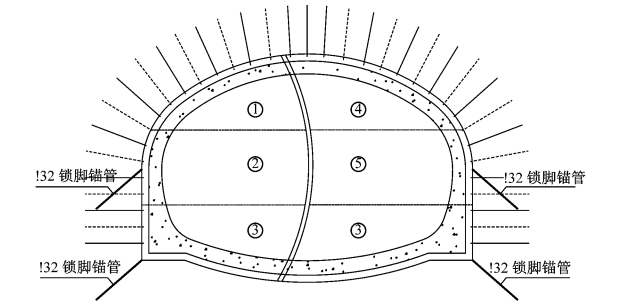


图 4 新建隧道下穿段施工工序

3 既有隧桥结构的变形规律分析

3.1 隧道开挖引起的上覆地层变形规律

1969 年, Peck 等^[9-11]对隧道施工引起的地表沉降问题进行了研究, 认为隧道开挖引起的底边沉降槽可以用高斯分布拟合, 并提出了著名的 Peck 公式。根据 Peck 公式, 单洞隧道开挖引起的地表沉降为:

$$s(x) = \frac{AV_1}{i\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \tag{1}$$

式中:

$s(x)$ ——距离隧道中心轴线处的地表沉降;

A ——开挖面积;

i ——从沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离;

V_1 ——地层损失率。

文献[12]提出的地层中任意深度 (z) 处沉降槽宽度表达式如下:

$$i(z) = K(z)(z_0 - z) \tag{2}$$

式中:

$K(z)$ ——沉降槽宽度系数, 与土的性质有关, 土质的黏聚性越强 K 值越大;

z_0 ——新建隧道轴线深度。

3.2 Peck 公式拟合既有结构变形

利用式(1)对新建隧道开挖后引起的既有隧道及桥面沉降进行拟合, 结果如图 5 ~ 7 所示。

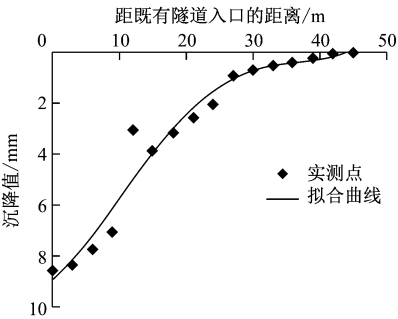


图 5 新建隧道下穿段施工引起的既有隧道结构沉降曲线

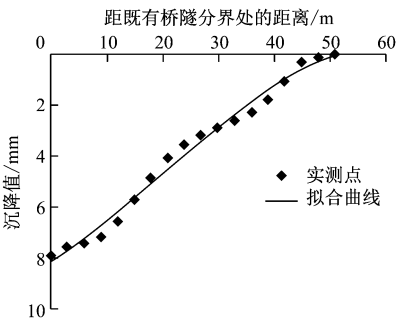


图 6 新建隧道下穿段施工引起的既有匝道桥桥面沉降曲线

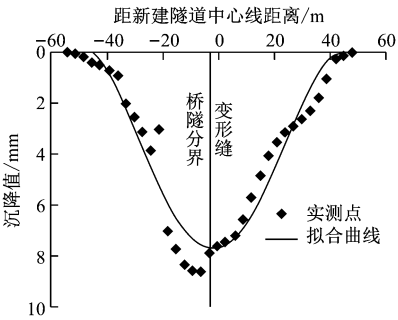


图 7 新建隧道下穿段施工引起的既有桥隧结构沉降曲线

由图 5 ~ 7 可以看出:

(1) 新建隧道开挖引起的上覆既有隧道最大沉降值为 8.61 mm, 引起的既有桥梁桥面最大沉降值

为7.88 mm。

(2) 利用 Peck 公式能够较好地拟合既有隧道的沉降值,拟合曲线呈现出明显的拐点及沉降槽宽度;匝道桥桥面沉降拟合曲线则未呈现出明显的拐点,曲线较为平直;将两组数据放在一起时,拟合曲线为明显的“单凹槽状”Peck 曲线。

(3) 在既有桥隧分界处的变形缝数值有明显的突变,说明两个结构会在变形缝处产生较明显的不均匀沉降,不均匀沉降值为 0.73 mm。

3.3 地层损失率及沉降槽宽度分析

根据实测结果及拟合曲线计算得到地层损失率为 0.204% ~ 0.237%。文献[13-14]中指出,在天然地层中地层损失率为 0.22% ~ 6.90%。新建隧道在粉质黏土层、中细砂层及卵石粒岩层中,不采用注浆等辅助措施时地层损失率为 0.76% ~ 0.97%,采用注浆加固等措施后地层损失率为 0.20% ~ 0.25%。实测计算得到的地层损失率为天然地层中较低的水平,且与加固后的地层损失率相符,说明新建隧道在Ⅲ级围岩中采用了锚杆支护和中隔壁法 6 步开挖,进尺短、支护及时,且采用了工字钢(工 18)作为临时支撑,有效地减小了隧道的沉降和收敛,将地层损失率控制在较低的水平。

既有隧道结构的沉降值拟合曲线平顺,沉降槽宽度($L/2$)大约为 45 m;既有桥梁的沉降拟合曲线没有表现出理想的 Peck 曲线形状,沉降槽宽度($L/2$)达到 50 ~ 60 m,这可能是隧道开挖引起桥桩沉降,带动刚性桥面沉降所致。将桥隧的实测点放在一起后,拟合得到的沉降槽宽度大约为 100 m,经计算沉降槽宽度系数 $K=4.8$,与文献[15]等计算的区间下穿地铁结构的沉降槽宽度系数相比偏大,其原因主要是该地区新建隧道主要穿越的地层为岩层,黏聚力比文献中的大得多。

4 数值模拟计算及结果分析

采用 MIDAS-GTS 有限元软件建立三维模型进行模拟分析,模型如图 8 所示。模型共划分 210 847 个单元,具体地层参数及结构主要参数见表 1 和表 2。

数值模拟开挖方式与实际工况一致,新建隧道长度取 100 m,隧道开挖完成后结构的竖向位移云图及数值如图 9 ~ 10 所示。

由图 9 ~ 10 可以看出,既有隧道最大沉降值为

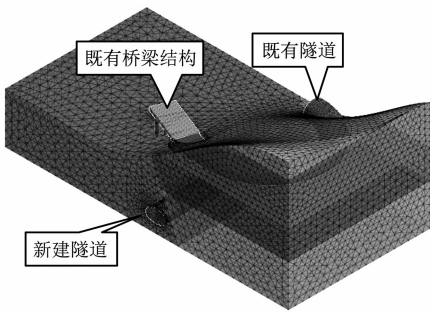


图 8 新建隧道下穿既有桥隧结构有限元模型

表 1 隧道下穿段地层主要物理力学参数

土层	重度/ (kN/m ³)	弹性模 量/MPa	泊松比	凝聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
残积砂质黏性土	1.86	50	0.30	24	23
散体状强风化花岗岩	1.96	150	0.25	30	27
碎裂状强风化花岗岩	2.21	1 300	0.20	(40)	(28)
中风化花岗岩	2.54	2 000	0.15	(50)	(30)
微风化花岗岩	2.61	50 000		(120)	(35)

注:括号内为岩体结构面的凝聚力及内摩擦角值

表 2 隧道下穿段地下结构主要参数指标

结构	尺寸参数	材料	本构关系
既有桥梁桩基	φ1 200	C35	弹性
既有桥梁结构	1 400 mm(梁高)	C35	弹性
既有隧道衬砌	厚 550 mm	C25	弹性
新建隧道初期支护	厚 300 mm	C25	弹性
新建隧道二次衬砌	厚 550 mm	C40	弹性
新建隧道临时支撑	采用工 18 钢	钢材	弹性

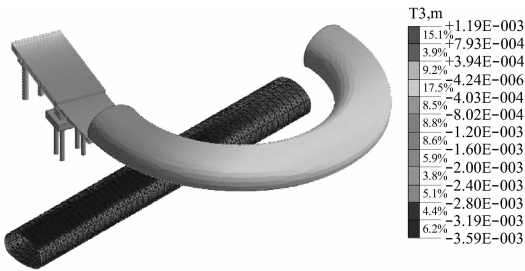


图 9 新建隧道开挖完成后各结构物的竖向位移云图

8.938 mm,既有桥梁结构的最大沉降值为 8.88 mm。既有隧道结构的变形为明显的平滑凹槽曲线,由于既有隧道结构平面为连续曲线,在出口端既有隧道结构又离新建隧道中线较近,因此位移曲

线在远离既有桥隧分界的地方再次下降。

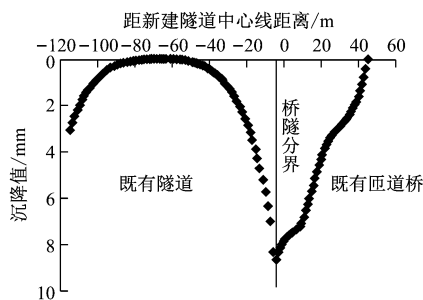


图10 新建隧道开挖完成后的既有桥隧竖向位移曲线

桥梁部分,由于仅桩基与土体接触,新建隧道开挖引起的地面沉降通过桩基传至桥面,因此桥面的沉降不像既有隧道结构沉降曲线那样平顺,但将2组沉降曲线放在一起时呈现的曲线与Peck曲线接近,这与实测结果是一致的。

对比实测值与模拟值可得:

(1) 最大沉降值差,既有隧道为0.328 mm(占实测值的3.80%),桥梁为1 mm(占实测值的12.69%)。

(2) 既有隧道的沉降均能较好地符合Peck公式,既有桥梁部分的沉降均为波浪形的曲线,由新建隧道中线向两端逐渐减小,数值模拟与实测结果趋势一致。这说明下穿段数值计算可以正确地模拟上覆结构的沉降趋势。

(3) 在地层损失率和沉降槽宽度方面,数值模拟的结果为 $V_1 = 0.227\%$, $K = 4.3$ 。这与实测结果计算的数值是基本相符的,说明模拟计算相对可靠,且基本可以确定该地质条件下,新建隧道开挖引起的地层损失率维持在0.20%~0.23%之间。

5 结论

(1) 在新建地铁区间隧道同时下穿既有市政桥隧中,Peck公式可以很好地拟合位于地层中的既有隧道结构的沉降,但对于既有梁结构的沉降则拟合得较不平顺。将既有隧道和桥梁的沉降放在一起时,则表现为很好的Peck单凹槽曲线。

(2) 新建隧道开挖引起的地层损失率在0.20%~0.23%之间,处于较低的水平,说明该种地质条件下新建隧道施工引起的地面沉降较小,上覆结构变形值均能够满足规范中变形控制的要求。

(3) 数值模拟的结果与实测值相比,在沉降方

面数值差异均不大,说明该条件下,三维数值分析可以较为准确地表现新建隧道开挖引起的上覆桥隧结构的沉降变形规律。

参考文献

- [1] 陈梦乔,杨广武.新建地铁车站近距离穿越既有地铁隧道的变形控制[J].中国铁道科学,2011,32(4):53.
- [2] 张成平,张顶立,王梦恕.大断面隧道施工引起的上覆地铁隧道结构变形分析[J].岩土工程学报,2009,31(5):805.
- [3] 张成平,张顶立,吴介普,等.暗挖地铁车站下穿既有地铁隧道施工控制[J].中国铁道科学,2009,30(1):69.
- [4] 李倩倩,张顶立,房倩,等.浅埋暗挖法下穿既有盾构隧道的变形特性分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3911.
- [5] 白海卫,何海健,李玲.正交下穿施工对上部既有隧道安全的影响研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(2):434.
- [6] 张晓光,剧亮,李菲.暗挖隧道下穿跨河桥部分桥桩的影响分析及对策——以北京地铁14号线北工大站—平乐园站区间为例[J].隧道建设,2015,35(7):692.
- [7] 杨广武,赵江涛,苏洁.地铁施工对既有桥梁桩基的影响研究[J].都市快轨交通,2014,27(3):40.
- [8] 马伟斌,付兵先,杜晓燕,等.地铁隧道下穿铁路桥施工变形分析及处理措施[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):896.
- [9] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s. n.], 1969:225.
- [10] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow:Blackie and Son,1986:10.
- [11] RANKIN W J. Ground movement resulting from urban tunnelling: predictions and effects. engineering geology of underground movements[C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on the Engineering Group of the Geological Society, UK. Nottingham:Nottingham University,1988:79.
- [12] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Geotechnique, 1993,43(2):315.
- [13] 韩焯,刘赧炜, JAMIE R. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J].土木工程学报,2012(1):134.
- [14] 韩焯,李宁, JAMIE R. 地铁隧道施工引起地层位移规律的探讨[J].岩土力学,2007,28(3):609.
- [15] 王剑晨,张顶立,张成平,等.浅埋暗挖隧道近距施工引起的上覆地铁结构变形分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):90.

(收稿日期:2017-08-14)