

穿河地铁与河道堤防相互作用影响分析

陈晓静, 付东王

(南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210022)

摘要:以南京地铁3号线下穿秦淮新河段为例,采用正交优化算法与ABAQUS有限元计算相结合的方法,以盾构期及铺轨、运行初期的监测数据反演注浆圈等代层参数、铺轨荷载及等效行车荷载,根据反演参数预测隧道和堤防的长期沉降以及因上方河道修整引起的地铁隧道沉降,分析了隧道建设对河道渗流稳定性的影响。结果表明:反演得到的物理力学参数合理可信;隧道及堤防沉降在地铁运营1000d时趋于稳定,河道开挖对地铁运行无影响;修建地铁后河道的渗流稳定性满足要求。

关键词:地铁;堤防;反演;沉降;渗流

中图分类号:TU93

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)08-0037-05

Analysis on the interaction between subway and river embankment

CHEN Xiaojing, FU Dongwang

(Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210022, Jiangsu)

Abstract: Taking Nanjing NO. 3 subway passing under the new Qinhuai River as an example, combining orthogonal optimization algorithm with ABAQUS FEM, the equipollent layer parameters, track laying load and equivalent running load were inverted by monitoring data. The long-term settlement of the tunnels and the embankment, and settlement of tunnel caused by channel improvement were predicted based on the inversion parameters. The effect of tunnel construction on the channel seepage stabilization was also analyzed. The results showed that the physical and mechanical parameters obtained by the inversion were reasonable and credible; the tunnel and embankment settlement tend to be stable when the subway was operated for 1000 days, and the river excavation had no effect on the subway operation; the seepage stability of the river channel after the construction of the subway could meet the requirements.

Key words: subway; embankment; inversion; settlement; seepage

1 概况

南京地铁3号线的宏运大道站至胜太西路站区间在修建过程中两条隧道下穿秦淮新河,如图1(a)所示。隧道上部秦淮新河为人工开挖的秦淮河流域分洪道,堤顶标高不低于13.8 m,迎水坡坡比1:3。地铁隧道的施工采用地下盾构掘进的方式,隧道在此段范围为半径400 m的转弯圆曲线,穿越处地层主要为淤泥质粉质粘土和粉质粘土,隧道下

穿段地质结构详见图1(b);隧道顶部距河床底最低处约7.62 m,距河堤埋深约19~22 m。

穿河地铁的修建及地铁长期运营必将对隧道上方河道堤防产生影响^[1],同时河道又会反作用于穿河隧道而影响其沉降,此外当河道进行开挖整治时也会对穿河隧道产生影响。国内外对于隧道下穿既有建(构)筑物(如公路、铁路及房屋等)进行过许多研究,取得了一系列研究成果,但对于隧道近距离下穿河道的研究较为有限^[2]。由于河道底软

收稿日期:2019-07-18

作者简介:陈晓静(1985—),男,高级工程师,主要从事水利规划与设计工作。

粘土工程性质差,隧道下穿河道工程有可能引起严重的地面沉降^[3]、隧道上浮^[4]、流砂及大面积坍塌^[5]等问题,因此有必要对具体工程进行详细的研究。

本文采用正交优化算法与 ABAQUS 有限元计算相结合的方法,根据地铁隧道施工期的沉降监测数据反演隧道注浆圈力学参数、铺轨荷载及等效行车荷载,以反演参数预测隧道和堤防的长期沉降以及因上方河道修整引起的地铁隧道沉降,得出隧道建设对河道渗流稳定性的影响,从而分析该地铁下穿河道工程中穿河地铁与河道堤防间的相互影响作用。

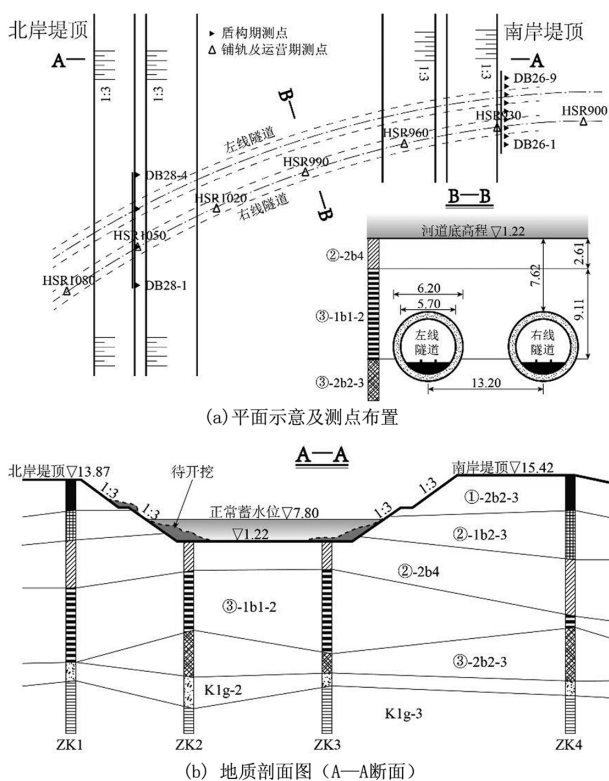


图1 秦淮新河地铁下穿段工程示意图(单位:m)

2 有限元模拟及参数反演

为了对堤防及隧道的长期变形进行模拟计算,对下穿段河道与隧道建模,采用正交优化算法与 ABAQUS 有限元计算相结合的方法,通过施工期的沉降监测数据反演隧道注浆圈力学参数、铺轨荷载及等效行车荷载。有限元模型如图2所示,土体采用 Mohr - coulomb 模型,隧道衬砌为弹性模型。

2.1 盾构施工期模拟

在实际地铁隧道盾构法开挖过程中,影响围岩稳定性的因素很多,其中土体及衬砌材料的力学性质可通过试验测定,难确定的是盾尾空隙、土体向



图2 秦淮新河地铁下穿段三维地质模型

盾尾空隙的自然填充及注浆后注浆的分布情况和隧道壁面受扰动程度和范围。在盾构法隧道的有限元计算中,为了量化这些因素的影响,采用等代层模型^[6]进行模拟,如图3所示,将实际的地层损失概化为均一、等厚、弹性的等代层。等代层厚度取 $\delta = \eta \Delta$, 式中, Δ 为盾尾空隙理论值; η 为折减系数。本文计算取值 $\Delta = (6.422 - 6.1)/2 = 0.161$ m, $\eta = 1.4$, 注浆圈厚度为 0.225 m。

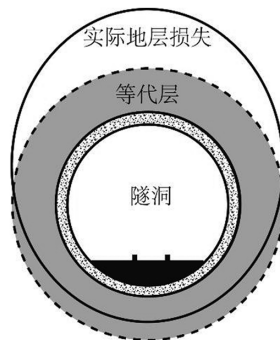


图3 盾构空隙等代层模型

2.2 铺轨期及运营期模拟

盾构施工期完成后,会对隧道内进行浇筑轨基以及铺轨等运行前的结构施工,此时隧道内受到的载荷为浇筑混凝土重量、铁轨重量及附属结构重量。此次研究采用在 ABAQUS 程序中通过改变衬砌重度的方法实现这种变化。初始重度计算如下:

$$\gamma' = \frac{M + M'}{A} \quad (1)$$

式中, γ' 为考虑铺轨荷载后的初始衬砌重度; M 为单位长度衬砌管片重量(本文计算取 12.38 kN/m); M' 为单位长度轨基及铁轨重量(本文计算取 3.47 kN/m); A 为衬砌管片截面积(本文计算取 4.67 m²)。

铺轨完成后的运营期,根据研究表明^[7],造成环境震动主要是列车竖向荷载,而列车横向及侧滚荷载往往可忽略不计。考虑列车系统的竖向动力响应时,忽略碰撞及接触等非线性因素,并且假定钢轨是完全刚性的。通常车体的纵向和横向都是

对称的,忽略轮轨之间的弹跳作用以及车体的摇摆与点头作用的影响,建立采用二系悬挂减振装置的列车三自由度简化计算模型,如图4所示。

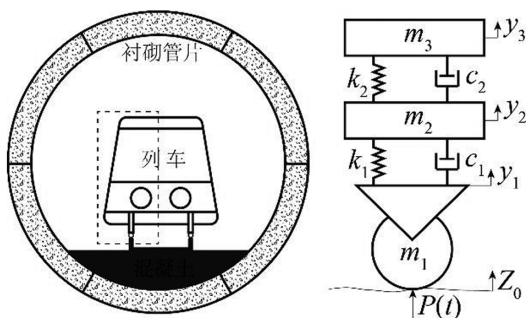


图4 列车竖向荷载计算模型

图3中, m_1 为轮对质量; m_2 为转向架质量; m_3 为车体质量; k_i 和 c_i 分别为车体悬挂刚度系数和悬挂阻尼系数; $P(t)$ 为轮轨间的作用力。假定车体的质量均匀分配给每个轮对且轮轨为绑定接触,即 $y_1 = Z_0$,可以得到列车的振动表达式为:

$$\begin{cases} m_3 \ddot{y}_3 + c_2 (\dot{y}_3 - \dot{y}_2) + k_2 (y_3 - y_2) = 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_1 (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c_2 (y_2 - y_3) = 0 \\ k_1 (y_2 - y_1) + k_2 (y_2 - y_3) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据约朗伯原理,得到轮轨作用力表达式为:

$$P(t) = (m_1 + m_2 + m_3)g + m_1 \ddot{y}_1 + m_2 \ddot{y}_2 + m_3 \ddot{y}_3 \quad (3)$$

本文计算所用地铁车辆参数见表1。

表1 地铁车辆参数

名称	数值
每节车体质量(满载)/t	41.80
转向架质量/t	7.46
轮对质量/t	1.80
一系悬挂系统刚度(每轴)/MN·m ⁻¹	1.05
一系悬挂阻尼(每轴)/MN·m ⁻¹	24.00
二系悬挂刚度(每转向)/MN·m ⁻¹	0.60
二系悬挂阻尼(每转向架)/MN·m ⁻¹	10.00

由于该模型为三自由度系统,采用 Matlab 的 Simulink 对该模型进行仿真模拟,设置仿真时间为 10 s,仿真参数中求解类型设置为 Fixed-step, size 为 1×10^{-2} ,得到列车荷载的仿真波形如图5所示,列车的载荷变化在 148~166 kN。同样通过将列车荷载折合入衬砌重度来模拟列车荷载。

2.3 参数反演

根据实测沉降数据反演盾构施工期的注浆圈

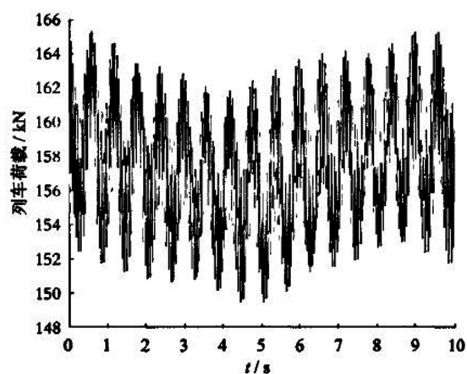


图5 列车荷载仿真模拟结果

参数、铺轨期的铺轨荷载及运营期的行车荷载。图1(a)显示了施工期沉降监测点的分布情况,在本文的反演计算中,选用典型的盾构施工期测点(DB26-1、DB26-2、DB26-3、DB26-9)和铺轨及运营期测点(HSR900、HSR930、HSR960、HSR1020、HSR1050、HSR1080)。该段河道地质分布(A—A断面)如图1(b)所示,计算所用地层参数如表2所示。

通过软件单元生死模块实现隧道开挖与衬砌添加的模拟。调整不同的注浆圈参数,应用正交优化算法,首先根据盾构施工期监测数据反演获得注浆圈的相关参数;然后,进一步利用注浆圈参数结合铺轨及运营期监测数据反演铺轨及地铁运行荷载。

反演计算得到注浆圈(28d龄期)的重度为 2.0 kN/m^3 ,弹模为 210 Mpa;铺轨等效荷载为 3.5 kN/m^3 ;地铁运行等效荷载为 5.0 kN/m^3 。

通过对比测点沉降的模型计算值与实测值,来验证反演结果的可靠性。图6、图7分别给出了盾构施工期和铺轨及运营期的对比结果,由于篇幅有限两个时期仅以一个测点为例(DB26-1和HSR960)。结果表明:盾构施工期,地表最大累计沉降量实测值为 23.8 mm,模型计算结果为 24 mm;地表最小累计沉降量实测值为 14.1 mm,模型计算结果为 15 mm;地铁运营初期,除隧道结构沉降测点 HSR1020 测点(实测为 4.1 mm,计算值为 5.8 mm)

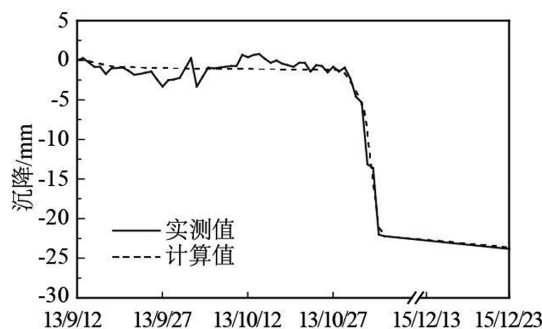


图6 盾构施工期测点沉降计算值与实测值对比(DB26-1)

表 2 秦淮新河下穿段各土层参数

编号	类型	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	弹模/ (Mpa)	泊松比	粘聚力/ (kPa)	摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
①-2b2-3	素填土	18.5	0.85	3.00	0.31	33.70	19.4	4500
②-1b2-3	粉质粘土	19.3	0.839	3.64	0.34	35.2	10.7	1.82
②-2b4	淤泥质粉质粘土	18.1	1.103	1.90	0.38	16	7.4	3.07
③-1b1-2	粉质粘土	20.2	0.669	6.60	0.3	53.7	13.9	0.83
③-2b2-3	粉质粘土	19.6	0.744	4.49	0.31	38.7	11.7	2.1
K1g-2	强风化泥质粉砂岩	21.0	0.8	11.67	0.25	300	35	7.5
K1g-3	中风化泥质粉砂岩	24.2	0.7	14860	0.16	2620	48.25	8

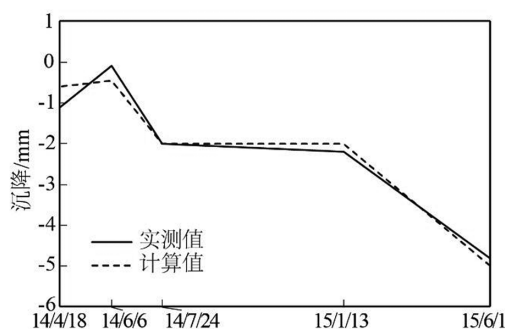


图 7 铺轨及运营期测点沉降计算值与实测值对比 (HSR960)
计算结果与实测值差异较大外,其余测点的误差都在 0.51 mm 以内。计算值与实测值在沉降过程与沉降量上都较为吻合,可以认为反演结果合理。

3 隧道长期沉降及河道开挖对隧道沉降影响分析

对地铁运营 1800 d 进行模拟计算,预测隧洞的沉降变化。图 8 为隧道右线测点累计沉降变化曲线,该图表明:沉降量主要发生在地铁运行后 1000 d 以内;随运行时间的增加,沉降速率逐渐减小,地铁运行 1000 d 以后,隧道结构变形趋于稳定。图 9 为地铁运行 1000 d 时模型段右线隧道沿线沉降分布,可以看出,运行 1000 d 时隧道右线最大沉降约

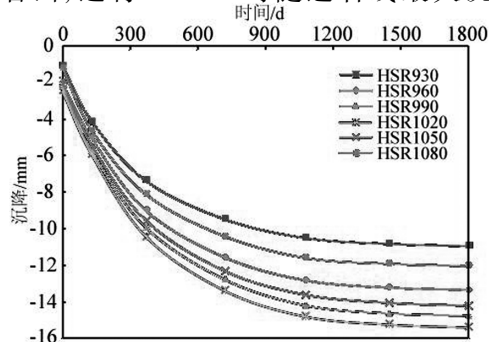


图 8 隧道右线测点累计沉降变化

-25 mm,最小沉降约 -8 mm。

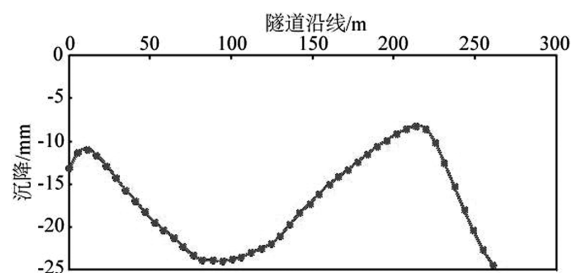


图 9 地铁运营 1000d 时模型段右线隧道沿线沉降分布

在地铁 3 号线建成并投入正常运营的情况下,秦淮新河如按规划断面进行整治,河道北岸需开挖土方断面 33 m^2 ,南岸需开挖土方断面 21 m^2 ,详见图 1(b)。采用一次开挖到位的施工方式进行计算分析,可得到整个分析范围的沉降变化。图 10 为河道开挖右线隧道沿线沉降分布曲线,可以看出右线最大上浮只有 1.0 mm,对地铁的正常运行基本没有影响。

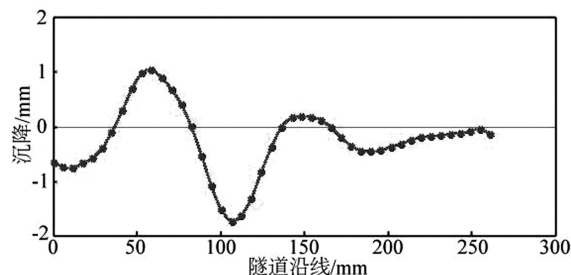


图 10 河道开挖右线隧道沿线沉降分布

4 地铁长期运营对堤防沉降影响分析

地铁长期运营 (1800 d) 计算工况下地表堤防沉降同样随时间逐渐稳定。图 11 为河道两岸堤防测点沿线 (DB26 与 DB28 测量断面,详见图 1(a)) 沉降变化曲线,可以看到地铁长期运营计算工况下地表堤防在秦淮新河段 DB26 测量断面中最大阶段

累计沉降测点 DB26-5 的值约 -19.5 mm ,与 3 号线施工前相比,累计沉降量为 40.1 mm 。

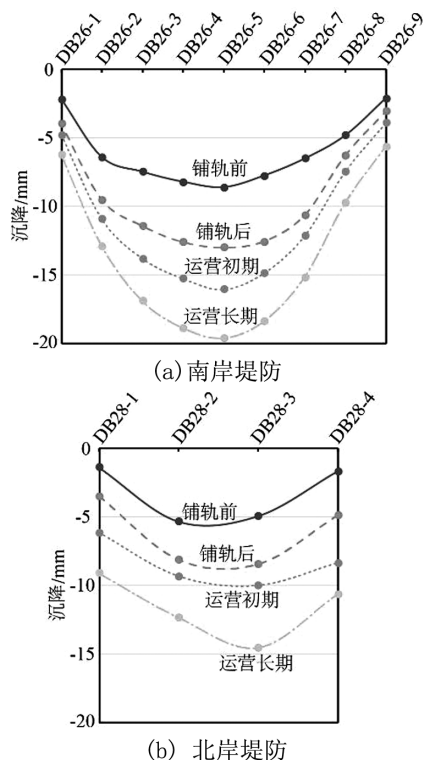


图 11 河道两岸堤防测点沿线沉降曲线

5 地铁修建对河道堤防渗流影响分析

地铁隧道的穿越对所在河段的河道及堤防的渗流场将产生影响。由于该地段两岸堤后 60 m 范围内地面高程均在 12.0 m 以上,高出此处 100 年一遇设计洪水位 11.55 m 和 200 年一遇设计洪水位 11.83 m ,因此洪水期堤防背水坡不会产生渗流逸出和渗透破坏。故对枯水期正常蓄水位 (7.8 m) 和河道放空期无水两种工况下迎水坡的渗流稳定进行分析计算,堤顶地下水位均取堤顶以下 1.5 m (即标高 12.0 m)。计算参数采用表 1 中的参数。

图 12、图 13 为溢出点位置水力梯度。计算结果表明:①当河道水位为枯水期正常蓄水位 7.8 m 、两岸堤顶以下地下水位为 12.0 m 时,河底最大水力梯度为 0.05 ,南岸坡面最大水力梯度为 0.25 ,北岸坡面最大水力梯度均为 0.45 ;河底的土体为淤泥质粉质粘土 (②-2b4),临界水力梯度 0.8 ,允许水力梯度为 0.4 ,南、北岸的土体均为粉质粘土 (②-1b2-3),临界水力梯度为 0.95 ,允许水力梯度为 0.5 ;河底及两岸的最大水力梯度均小于各自的允许水力梯度,满足要求;②当河道无水、两岸堤顶以下地下水位为 12.0 m 时,河底最大水力梯度

为 0.15 ,南岸坡面最大水力梯度均为 0.35 ,北岸坡面最大水力梯度均为 0.5 ,土体的渗流稳定也能够满足要求。

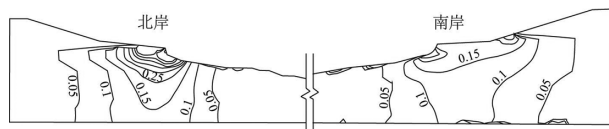


图 12 正常水位下溢出点位置水力梯度

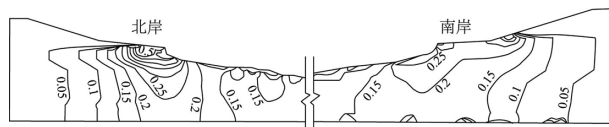


图 13 枯水期下溢出点位置水力梯度

6 结论

(1) 采用 ABAQUS 有限元计算与正交优化算法相结合的方式反演注浆圈参数、铺轨及行车荷载,基于此计算得到的沉降值与实测值吻合较好,该方法获得的反演参数是合理可靠的。

(2) 地铁长期运行工况下,隧道沉降在 1000 天时趋于稳定,最大沉降约为 25 mm ;地表堤防在 1000 天时的最大沉降为 19.5 mm 。若对河道按规划进行整治,一次性开挖条件下隧道最大上浮仅为 1 mm ,对地铁运营基本无影响。

(3) 地铁修建后,在河道为枯水期正常蓄水位和河道无水两种工况下,河底及两岸的最大水力梯度均小于各自的允许水力梯度,渗流稳定能够满足要求。

参考文献:

- [1] 李皓晖,左昌群,唐霞,等. 变质软岩隧道施工中地下水渗漏处治措施[J]. 铁道建筑, 2015(3): 76-79.
- [2] 彭思甜. 考虑流固耦合铁路隧道下穿河道的扰动及注浆加固研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(8): 61-65.
- [3] 黄龙. 地面沉降地区下穿河流隧道工程地质灾害危险性探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(4): 44-51.
- [4] 孟昭晖,裴书锋,王松,等. 电力盾构隧道下穿河道的安全施工技术[J]. 市政技术, 2012, 30(6): 99-101.
- [5] 林宝龙,贾晓云. 盾构近距离穿越桥梁及河流的施工效应分析[J]. 路基工程, 2010, 2010(5): 112-114.
- [6] Loganathan N, Poulos H G. Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.