

基于弹性地基梁模型的交叠隧道衬砌变形研究

代春泉, 王 磊

(山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要:新线隧道近距离穿越既有隧道是城市地铁网开拓中的重点和难点,具有重要研究价值。根据交叠隧道的变形特点,提出了计算既有隧道衬砌变形和内力的理论模型,推导了新线隧道近距离开挖穿越时,既有隧道衬砌变形和内力的相关计算公式,并对既有隧道衬砌拱底变形槽反弯点处的沉降量和最大下沉坡度角的计算结果进行了分析。以青岛市地铁交叠隧道工程为背景,通过一系列数值仿真试验分析了理论公式计算结果的可靠性和合理性。

关键词:交叠隧道;弹性地基梁;隧道变形;数值模拟

中图分类号:U455

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)01-0039-06

Study on Lining Deformation in Overlap Tunnels Based on Elastic Foundation Beam Model

DAI Chunquan, WANG Lei

(Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: That new tunnels go across the old ones with short distance between them are the focus and difficult points in development of subway networks, which is of great significance of research. According to the characteristics of deformation in overlap tunnels, the theoretical model for calculating the lining deformation and internal forces in existing tunnels was proposed. The related formula for calculating the lining deformation and internal forces in existing tunnels while the new tunnels came to dig in close vicinity to old ones was derived, then, the calculating results of the settlements and maximum angles of subsidence slope at the point of deformed trough of lining arch abutments in existing tunnels were analyzed. The reliability and rationality of the computation with theoretical formula were verified through a series of numerical simulation tests against the background of Qingdao overlap tunnels.

Key words: overlap tunnel; elastic foundation beam; tunnel deformation; numerical simulation

根据国内 15 个城市的轨道交通规划,截止到 2011 年,我国计划新建城市地下轨道交通项目总长度约 1 300 km,其线网规划总里程将达 2 280 km。随着大量快速轨道交通的建设,势必会出现轨道线路的近距离交叠。近距离交叠施工的新线隧道会引起既有隧道附加变形,严重时将威胁既有隧道的安全。由于近距离交叠隧道工程的边界条件、几何形状以及受力状态相对复杂,对其研究多采用数值方法^[1-3],但鲜见成熟的理论研究成果。本研究在分析近距离正交既有隧道变形特征的基础上,提出了新的理论模型计算既有隧道变形,推出了相关计算公式,并通过系列数值仿真模拟验证计算公式的正确性和可靠性。

1 模型构建

1.1 交叠隧道的变形特征

如图 1 所示,当下层隧道近距离穿越既有隧道时,新线隧道开挖首先会引起隧道围岩和交叠区地层的变

收稿日期:2011-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51174128)

作者简介:代春泉(1978—),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要从事城市与矿山地下工程项目管理与风险分析方面的研究。

E-mail:dcqwin@163.com

形并逐渐向周围扩展,进而使上层既有隧道的围岩及衬砌产生新的变形。随着下穿新线隧道的开挖接近上层既有隧道,上下两隧道之间的围岩(既有隧道的地基)会首先产生变形,形成沉降槽。而后既有隧道的衬砌受沉降槽的影响,沉降槽地基的变形将伴随新的变形,既有隧道的地基反力将会产生重新调整,进而达到新的平衡。由于既有隧道衬砌的刚度大于周围围岩的刚度,并且既有隧道的变形是由于下部地层的初始变形引起的,因此变形后既有隧道衬砌与其下部地基层的变形将会互不协调^[4-5],下部地基的变形要大于既有隧道衬砌的变形,这样既有隧道衬砌与其下部的地基会有相互分离的趋势^[6]。

1.2 模型建立

针对近距离穿越隧道开挖时既有隧道的这种变形特点,建立如图 2 所示的受力模型,由此推出下穿新隧道开挖时引起既有隧道变形的计算公式。根据既有隧道围岩和衬砌的变形特性,假设下穿新隧道开挖引起既有隧道衬砌变形后,衬砌将会与其下部的地基发生相互分离,分离的范围假定为既有隧道衬砌变形槽曲线两端反弯点的中间部分,认为这部分地基将不再提供地基反力,只有变形槽曲线反弯点的外侧提供地基反力,并按照弹性地基梁理论进行计算。

为了简化计算,除上面进行的衬砌地基分离假设外,再做以下假设:①衬砌地基梁结构为均质、各向同性的线弹性体,且刚度较大(相对于衬砌围岩刚度大的多),新建隧道与既有隧道是正交的关系;②假设衬砌地基梁上部荷载恒定,即为上部土层及衬砌本身的重量之和,并不考虑衬砌周围围岩对其的摩擦力;③衬砌处于地层沉降槽最大沉降位置处,这时变形最大,为最不利位置;④在衬砌两侧结合区域变形计算时,模型符合弹性地基梁的有关假设;⑤既有隧道两端的变形为零,假设为固定支座。通过简化,确定计算模型及相关参数如图 3 所示。

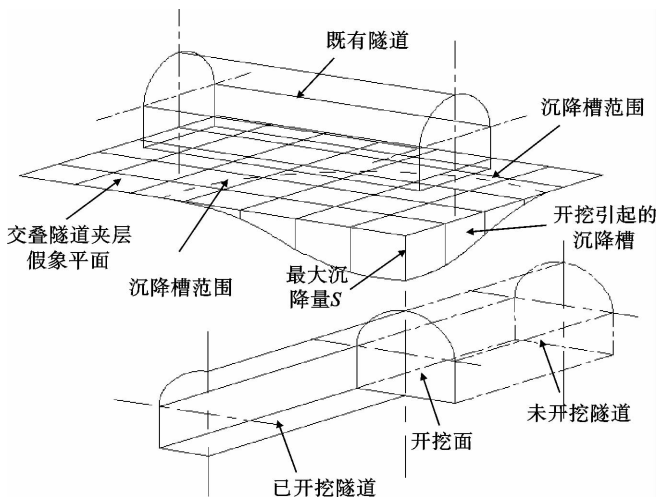


图 1 新线隧道开挖引起的地层变形示意图

Fig. 1 Stratum distortion caused by excavation of the new tunnel below

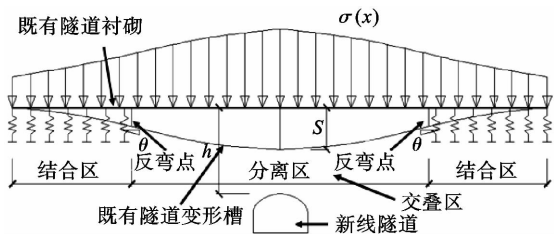


图 2 既有隧道模型简图

Fig. 2 Model diagram for the existing tunnel

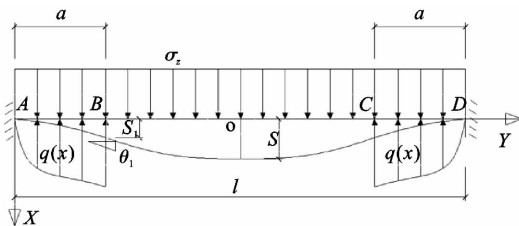


图 3 既有隧道计算模型图

Fig. 3 Calculation model diagram for the existing tunnel

2 模型计算

按照图 3 所示,对于中间分离区域(BC 段),挠曲微分方程为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = \sigma_z b. \quad (1)$$

对(1)式积分可得:

$$y = \frac{\sigma_z b}{24EI} x^4 + A_1 x^3 + A_2 x^2 + A_3 x + A_4, \quad \theta = \frac{\sigma_z b}{6EI} x^3 + 3A_1 x^2 + 2A_2 x + A_3,$$

$$M = -EI \left(\frac{\sigma_z b}{2EI} x^2 + 6A_1 x + 2A_2 \right), \quad Q = -EI \left(\frac{\sigma_z b}{EI} x + 6A_1 \right) \quad (a \leq x < l-a). \quad (2)$$

其中： σ_z —衬砌上部单位面积岩、土层的自重应力和衬砌自重之和，kPa； b —既有隧道衬砌的宽度，m； A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为积分常数。

由 BC 段边界条件： B 点 $y_B = S_1$ ， $\theta_B = \theta_1$ ； C 点 $y_C = S_1$ ， $\theta_C = \theta_1$ ；另外 $M_B = M_C$ ， $Q_B = -Q_C$ （对称），可得：

$$A_1 = -\frac{\sigma_z b}{12EI} l, \quad A_2 = \frac{\sigma_z b}{24EI} (l^2 + 2al - a^2) - \frac{\theta_1}{l-2a},$$

$$A_3 = -\frac{\sigma_z b}{12EI} al(l-a) + \frac{\theta_1 l}{l-2a}, \quad A_4 = \frac{\sigma_z b}{24EI} a^2(l-a)^2 - \frac{\theta_1}{l-2a} a(l-a) + S_1.$$

其中： S_1 —既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点处的沉降量，m； θ_1 —既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点处的转角，弧度； l —既有隧道衬砌总的计算长度，即变形槽影响范围，m； a —既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点到梁端的距离，即模型两端结合区的长度，m。

将 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 代入式(2)即可确定 BC 段既有隧道各点相应的变形、转角、弯矩和剪力。

对于结合区(取 AB 段进行研究)，挠曲微分方程为：

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = \sigma_z b. \quad (3)$$

结合 AB 段上的边界条件： $y_A = 0$ ， $\theta_A = 0$ ； $y_B = S_1$ ， $\theta_B = \theta_1$ ；应用弹性地基梁的有关公式^[4]可得：

$$y = -M_A \frac{2\alpha^2}{bk} \varphi_3 - Q_A \frac{\alpha}{bk} \varphi_4 + \frac{\sigma_z}{bk} (1 - \varphi), \quad \theta = -M_A \frac{2\alpha^3}{bk} \varphi_2 - Q_A \frac{\alpha^2}{bk} \varphi_3 + \frac{\alpha \sigma_z}{bk} \varphi_4,$$

$$M = M_A \varphi_1 + Q_A \frac{1}{2\alpha} \varphi_2 - \frac{\sigma_z}{2\alpha^2} \varphi_3, \quad Q = -M_A \alpha \varphi_4 + Q_A \varphi_1 - \frac{\sigma_z}{2\alpha} \varphi_2 \quad (0 \leq x < a). \quad (4)$$

其中： k —地基系数； α —弹性地基梁的特征系数； $\alpha = \sqrt[4]{\frac{kb}{EI}}$ ； $\varphi_1 = \text{ch}(\alpha x) \cos(\alpha x)$ ； $\varphi_2 = \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) + \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)$ ； $\varphi_3 = \text{sh}(\alpha x) \sin(\alpha x)$ ； $\varphi_4 = \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) - \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)$ 。

由对称边界条件： O 点 $y_0 = S$ ， $\theta_0 = 0$ ，代入(2)式可得：

$$S_1 = S - \frac{\sigma_z b}{32EI} l^2 (l-2a)^2 - \frac{\sigma_z b}{384EI} (l-2a)^4; \quad (5)$$

$$\theta_1 = \frac{\sigma_z b}{8EI} l^2 (l-2a). \quad (6)$$

其中： S —既有隧道衬砌拱底变形槽曲线中点处的最大沉降量，m。

由上所述，如果已知既有隧道模型的上部荷载 σ_z 、既有隧道衬砌拱底变形槽的最大沉降量 S 以及变形槽曲线的形态参数 l 和 α ，通过式(2)就可以完全确定模型分离段(即 BC 段)的各项值(变形、转角、弯矩和剪力)；由公式(4)—(6)就可完全确定模型结合段(即 AB 段)的各项参数。

3 数值计算分析

以拟建中的青岛市近距离交叠地下工程^[5]为模拟对象，根据实际情况制定多种模拟组合，分析计算模型的合理性。

3.1 工程概况

青岛市规划修建 5 条城市快速轨道交通线路，各线路的先后施工将会出现多处新线隧道近距离穿越既有隧道的情况。线路所处地带主要为燕山晚期崂山阶段侵入之崂山花岗岩和第四系全新统松散沉积层，其中岩层多为岩浆岩类，以中生代燕山晚期煌斑岩、正长花岗斑岩、闪长斑岩岩脉和中生代燕山晚期花岗岩岩基为主；区域内工程水文地质比较简单，地下水以松散岩类孔隙潜水、构造裂隙水为主，风化裂隙水次之，地下水对混凝土无侵蚀性。

3.2 参数确定

对近距离交叠隧道变形和受力的影响因素有很多,按照正交试验设计原理,综合考虑青岛地区的地质情况,结合其初步规划设计方案(隧道断面形状、开挖方式、支护形式及刚度已经初步确定),拟确定在五项主要影响因素数值改变的情况下模拟、验证理论模型的计算结果。五项主要影响因素^[7-9]有:隧道的埋深 H 、两条隧道的净距 h 、围岩的弹性模量 E 、围岩的粘聚力 c 和围岩的内摩擦角 φ ,各因素所代表的意义如图 4 所示;各因素所取的水平数值如表 1 所示。按正交试验设计安排数值模拟,每次模拟取各因素不同的水平进行,共进行 16 次数值模拟,如表 2 所列;模型的建立及网格划分如图 5 所示,为提高计算精度,模型的交叠区域网格被适当加密^[10-11]。模拟得到的既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点处的沉降量 S_1 和既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点处的转角 θ_1 (即变形槽最大下沉坡度角)如表 3 中所列。

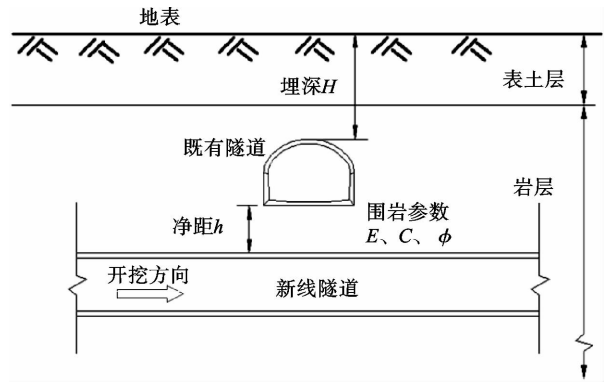


图 4 数值模拟参数确定示意图

Fig. 4 Scheme of parameters for numerical simulation

表 1 各主要模拟因素的水平取值表

Tab. 1 Value table of the simulation principal factors of different levels

因素 水平	A 埋深/m	B 净距/m	C 弹模/GPa	D 粘聚力/kPa	E 内摩擦角/(°)
1	10	2	0.5	0.2	27
2	15	4	1.5	0.7	33
3	25	6	4.0	1.5	38
4	35	8	9.0	2.1	42

表 2 模拟试验各因素水平安排表

Tab. 2 Horizontal arrangement table for each factor of the simulation

试验号	A 埋深/m	B 净距/m	C 弹模/GPa	D 内聚力/kPa	E 摩擦角/(°)
1	10	4	0.5	0.2	27
2	10	6	1.5	0.7	33
3	10	8	4.0	1.5	38
4	10	10	9.0	2.1	42
5	15	4	1.5	1.5	42
6	15	6	0.5	2.1	38
7	15	8	9.0	0.2	33
8	15	10	4.0	0.7	27
9	25	4	4.0	2.1	33
10	25	6	9.0	1.5	27
11	25	8	0.5	0.7	42
12	25	10	1.5	0.2	38
13	35	4	9.0	0.7	38
14	35	6	4.0	0.2	42
15	35	8	1.5	2.1	27
16	35	10	0.5	1.5	33

3.3 模型计算

既有隧道衬砌结构断面的宽度 $b=8.9\text{ m}$, 面积 $A=10.034\text{ m}^2$, 惯性矩 $I=148.408\text{ m}^4$, 弹性模量 $E=31.5\text{ GPa}$, 既有隧道上部土体及自重之和 $Z=f(H)$ (H 为隧道的埋深), 既有隧道衬砌拱底最大沉降量 S 、变形槽长度 l 和既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点到梁端的距离 a 的数值由数值模拟试验结果确定。按公式(5)、(6)计算的结果如表 3 中所列。

3.4 结果对比分析

公式和模拟计算的结果均列入表 3, 分析总结如下:

1) 由于数值模拟没有模拟隧道衬砌和其地基相互分离的趋势及状态, 导致计算结果过于保守, 而理论模型则假设既有隧道衬砌拱底变形槽曲线反弯点以内部分完全与地基相互分离, 因此采用公式计算得到的衬砌拱底变形槽反弯点处的沉降量 S_1 和最大下沉坡度角 θ_1 均大于数值模拟试验得到的数值, 公式的计算结果更加趋于安全。

2) 对于衬砌拱底变形槽反弯点处的沉降量 S_1 计算与试验的相对误差较小, 计算结果能够较好的预测既有隧道衬砌拱底变形槽反弯点处的沉降量 S_1 。

3) 既有隧道衬砌拱底变形槽最大下沉坡度角 θ_1 的计算公式虽有一定的误差, 但最大计算值都在 7% 弧度以内, 反映了工程实际状况, 因此公式(6)可以用于预测既有隧道衬砌拱底变形槽最大下沉坡度角 θ_1 。

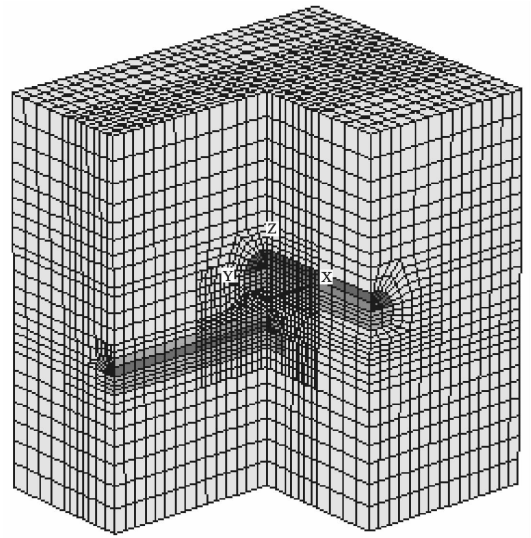


图 5 重叠隧道模型网格划分图

Fig. 5 The meshing diagram for the overlapping tunnels

表 3 理论模型和数值计算结果对比表

Tab. 3 Compare table of the theoretical results with the numerical calculation results

试验号	S/mm	σ_z/kPa	l/m	a/m	S_1/mm			$\theta_1/(\% \text{ 弧度})$		
					计算值	试验值	相对误差	计算值	试验值	相对误差
1	-30.31	217	48	17	29.72	20.10	47.9	2.108	2.067	2.0
2	-13.52	217	42	15	13.19	9.71	35.8	1.093	1.000	9.3
3	-3.52	217	36	10.5	1.58	1.48	6.8	1.004	0.370	171.3
4	-3.10	217	42	14	2.65	2.33	13.7	1.275	0.203	528.2
5	-9.77	342	48	18	9.09	6.66	36.5	2.250	0.653	244.6
6	-28.24	342	48	18	27.56	20.51	34.4	2.250	1.903	18.2
7	-18.95	342	54	21	18.09	13.52	33.8	2.848	2.663	6.9
8	-9.85	342	48	16.5	8.79	7.23	21.5	2.813	0.627	343.6
9	-3.34	592	36	12	2.68	2.42	10.6	2.191	0.320	584.7
10	-1.59	592	36	12	0.93	0.88	5.4	2.191	0.353	520.6
11	-39.68	592	42	14	38.45	30.15	27.5	2.479	2.600	33.8
12	-20.80	592	42	15	19.90	16.62	19.7	2.982	1.107	169.4
13	-1.02	842	36	13.5	0.49	0.33	51.2	2.337	0.247	846.2
14	-6.31	842	42	16.5	5.59	5.16	8.4	3.181	0.307	936.4
15	-22.53	842	48	16.5	19.91	18.25	9.1	6.925	0.960	621.5
16	-64.42	842	48	16.5	61.80	48.81	26.6	6.925	2.920	137.2

4 结论

结合近距离交叠隧道的变形特点,提出了计算既有隧道衬砌变形的理论模型,推导了有关计算公式,并与一系列数值模拟试验进行了比较分析,主要结论如下:

1)随着近距离下部新线隧道的穿越,刚度较大的既有隧道衬砌拱底与其地基(即交叠区围岩)的变形并不协调,有相互分离的趋势,根据交叠隧道的这一变形特征,提出了相应的模型,可用于有关既有隧道衬砌变形和受力的计算;

2)推导出了既有隧道衬砌变形和内力的有关公式,其中拱底变形槽反弯点处的沉降量 S_1 和最大下沉坡度角 θ_1 的计算公式比较简单,只与既有隧道衬砌变形槽最大沉降量 S 和变形槽曲线的形态参数 l 和 a 有关;另外如果已知 S_1 和 θ_1 就可利用公式(2)、(4)计算整个既有隧道衬砌上的变形和内力;

3)通过与一系列数值模拟试验的结果进行对比,发现 S_1 和 θ_1 的公式计算结果均大于数值模拟结果,即公式计算的结果更加趋于安全;

4)计算模型和计算参数有待现场监测分析后进行修正,但通过理论分析得出的交叠隧道衬砌结构变形计算公式、变形规律对这类隧道施工设计有重要的指导意义。

参考文献:

- [1]孙钧,刘洪州.交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟[J].同济大学学报,2002,30(4):379-385.
SUN Jun,LIU Hongzhou. 3-D numerical simulation of ground surface settlement under overlapped shield tunneling[J]. Journal of Tongji University,2002,30(4):379-385.
- [2]姚海波.大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[D].北京:北京交通大学,2005.
- [3]张海波,殷宗泽,朱俊高.近距离叠交隧道盾构施工对老隧道影响的数值模拟[J].岩土力学,2005,26(2):282-287.
ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. Numerical simulation of influence of new tunnel on short distance overlapped old tunnel during shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(2):282-287.
- [4]龙取球.弹性地基梁的计算[M].北京:人民教育出版社,1981.
- [5]铁路第二勘察设计院.青岛市轨道交通东西线工程预可行性研究报告[R].成都:铁路第二勘察设计院,2003.
- [6]SOLIMAN E, DUDDECK H & AHRENS H. Two and three-dimensional analysis of close spaced double-tube tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology,1993,8(1):13-18.
- [7]VERRUJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Geotechnique, 1996,46(4):120-129.
- [8]王渭明,黄明琦,吴克新.厦门翔安海底隧道 CRD 法施工数值分析[J].山东科技大学学报:自然科学版,2007,26(2):27-31.
WANG Weiming, HUANG Mingqi, WU Kexin. The numerical analysis of construction with CRD method in Xiamen Xiang'an submarine tunnel[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science,2007,26(2):27-31.
- [9]YAMAGUCHI I, YAMAACKI I, KIRILANI Y. 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.
- [10]CHEN B, WEN Z. Elastic-plastic analysis for the effect of longitudinal uneven settlement on shield tunnel[C]//Proceedings of the Ita World Tunnelling Congress 2003. Amsterdam, The Netherlands, 12-17, Apr., 2003:969-974.
- [11]NETZEL H. Review of the tensile strain method for predicting building damage due to ground movements[C]//Proceedings of the Ita World Tunnelling Congress 2003. Amsterdam, The Netherlands, 12-17, Apr., 2003:997-998.