

浅埋隧道围岩受施工扰动的时空变化规律研究

文吉英^{*,1)} 孙歆硕^{†,2)}

^{*}(湖北华亚建设工程有限公司, 武汉 430081)

[†](国家知识产权局专利审查协作中心, 北京 100190)

摘要 采用监测分析和数值模拟相结合的方法, 详细模拟了浅埋隧道施工的全过程, 得到不同施工情况下围岩的应力应变状态, 并深入分析围岩受施工扰动的应力变化规律和沉降变形趋势, 在此基础上, 采用非线性回归方法并考虑时间影响因素, 得到了地表沉降的时空变形规律。

关键词 地下隧道, 浅埋暗挖法, 数值模拟, 非线性回归, 地表沉降

中图分类号: O317+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)01-043-05

THE TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF SURROUNDING ROCK UNDER CONSTRUCTION OF SHALLOW TUNNEL

WEN Jiying^{*,1)} SUN Xinshuo^{†,2)}

^{*}(Hubei Huaya Construction Engineering Co. Ltd, Wuhan 430081, China)

[†](Patent Examination Cooperation Center of Sipo, Beijing 100190, China)

Abstract In order to reduce the negative impact of the environment due to shallow tunnel construction, the ground movement and deformation are estimated through simulating the entire process of the shallow tunnel construction, and the surrounding rock stress and strain in different situations are obtained. On this basis, the non-linear regression method for consideration of time factors is used to obtain the space-time deformation law of ground surface. This work provides a new way of estimating the effect of shallow tunnel construction on ground surface.

Key words underground tunnel, mining method for shallow tunnel, numerical simulation, nonlinear regression, ground subsidence

前 言

地下工程施工势必对岩土体产生扰动, 引起地表沉降和变形, 当沉降、变形发展到一定程度时, 将影响地表建筑和已有管线, 为减少由于隧道施工引起对周围环境的不良影响, 必须对地表移动和变形进行正确的预计, 特别是在地面建筑设施密集的城市中进行隧道施工的影响程度及范围研究, 一直是人们十分关心的课题^[1]。

对于隧道施工引起的地表沉降问题的研究, 起源于对煤矿等矿山巷道上方地表沉降现象的分析。

1958 年 Martos 提出隧道开挖所引起的地表沉降槽可由误差函数近似表示; 1969 年 Peck 系统地提出了地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法, 即 Peck 公式。随着我国大量城市隧道施工的进行, 也有学者对隧道施工的地表沉降问题进行了研究。刘宝琛等应用随机介质理论, 研究了近地表开挖引起的地表移动及变形问题^[2]。同济大学通过先后对上海地铁试验段等隧道进行了现场实测和监控, 对 Peck 公式进行了修正, 提出了考虑土体受到扰动后固结沉降的新的地表沉降计算公式^[3]。随着

2010-03-31 收到第 1 稿, 2010-08-25 收到修改稿。

1) 文吉英, 男, 1982 年生, 工程师, 一级建造师。E-mail: mosquitowjy@yahoo.com.cn

2) 孙歆硕, E-mail: sunxinshuo@sohu.com

计算机技术的发展,张弥等^[4]开发出了预计盾构法隧道施工地表沉降的专家系统。

但是上述方法均存在各自的局限之处,以 Peck 公式为代表的一些经验方法缺少理论依据,而数值分析方法由于缺乏合适的本构关系和准确的计算参数,同样使其应用受到限制。所以发展新方法以预计隧道施工所引起的地表移动与变形,并对周围环境的影响进行正确评价是十分必要的。针对上述问题,本文以西大望路改扩建工程为背景,针对该段隧道埋深较浅,四周均为高层商业写字楼,地下现状管线众多,且施工不中断交通的实际条件,采用监测分析和 FLAC3D 数值模拟相结合的方法,详细模拟了浅埋隧道施工的全过程,分析各种边界问题和不同施工情况下围岩的应力应变状态,并研究围岩受施工扰动的应力变化规律和沉降变形趋势。在此基础上,针对浅埋隧道施工的时空效应一般以地表和地层内各点的位移随空间和时间的变化规律为主要研究对象进行时空变化研究,采用非线性回归方法并考虑时间影响因素,得到了地表沉降的时空变形规律,为准确预计城市浅埋隧道施工对地表的影响提供了新的思路。

1 隧道掘进单测点地表下沉变化特征

西大望路位于朝阳区东三环和东四环之间,南起左安东路,北至朝阳公园南路,道路全长 6.9km,位于规划 CBD 中心区的东边界。为配合西大望路改扩建,保证车辆顺畅通行及行人过街安全,规划修筑地下隧道解决该地区交通拥堵问题。结合地下管线、周围建筑要求等因素,本文选取西大望路与建国路相交路口南北的地下人行隧道作为研究对象,该段隧道埋深较浅,四周均为高层商业写字楼,地下现状管线众多,且施工不中断交通,因此施工要求高、难度大,需要随时掌握地表的沉降变形情况,并依此作为评价工程稳定性的依据。图 1 为隧道纵向单测点随工作面推进的地表下沉变化趋势图,图中 L 表示工作面距测点的水平距离, D 为隧道跨度,沉降量为 U ,最大沉降量 U_{\max} 。

如图可知隧道开挖过程中地面沉降随着工作面的前移具有一定的变化规律,大致表现为:当工作面在测点前方 1~3 倍洞径位置时,地表先产生向上的位移,随着工作面的推进,随之转为向下沉降,开始速度缓慢,当工作面接近监测点距离小于 1 倍洞

径时,沉降速度显著增大,沉降趋势明显,这种趋势一直持续到工作面远离测点大于 3 倍洞径后,沉降速度趋缓,直至工作面超过测点大于 5 倍洞径后,沉降趋势平缓,变形趋于稳定。

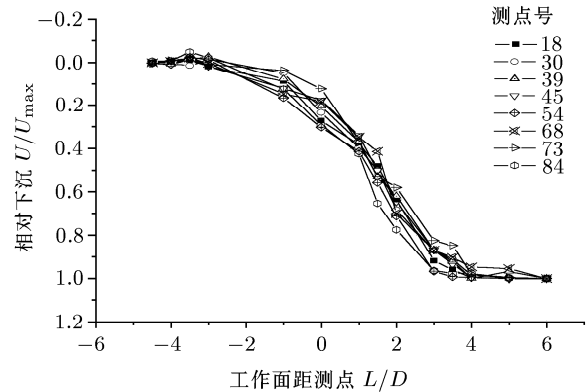


图 1 随工作面推进地表测点下沉变化趋势图

2 隧道施工的数值模拟研究

岩土体是极其复杂的非连续和非均质体,本文采用有限差分软件 FLAC^{3D} 开展研究,其特点是能够计算并直观显示出模型各节点主应力变化的趋势,既能模拟复杂力学与结构特征,又可分析各种边界问题和施工过程,并对工程进行预测和预报^[5-6]。

2.1 模拟范围

依照设计提供的地质资料,隧道位于浅埋黏土层,地基持力层从亚黏土②层过渡到细中砂③层,亚黏土容许承载力为 260 kPa,细中砂容许承载力为 300 kPa,采用天然地基。支护形式是复合式衬砌,见图 2。计算选取有代表性的马蹄形断面,隧道上覆土层平均厚度(计算模型中的 z 方向)为 6.2m,轴向(y 方向)取 30m,横向(x 方向)为 40m,下部土层取 20m,采用莫尔-库伦本构模型,并划分 57 270 个单元。

2.2 力学参数

根据钻探及土工试验结果分析,地层自上而下依次为:素填土、杂填土、亚黏土、粉砂、粗砂和粉质黏土。考虑不同应力路径影响,通过室内三轴试验,确定岩土力学参数如表 1,支护力学参数如表 2 所示。

2.3 模拟分析

施工采用中隔墙法(CD 工法),每步的台阶长度控制在 5~7m。其开挖方式如图 3 所示。

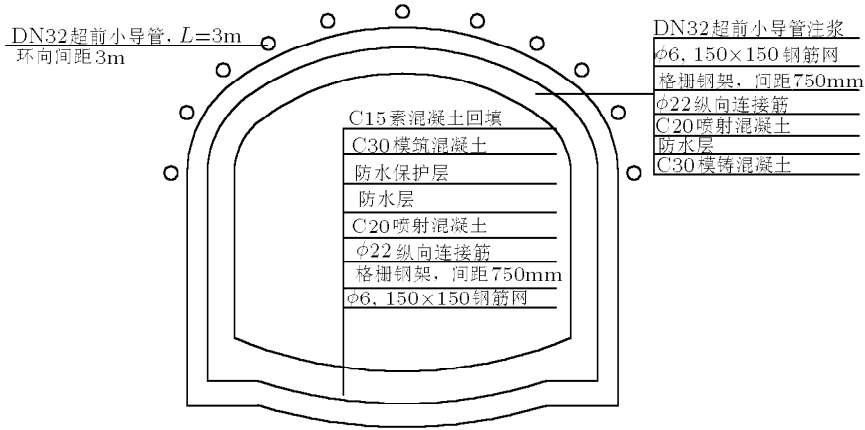


图 2 隧道断面衬砌示意图

表 1 岩土力学参数表

测点数	岩土层名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	平均层度 / m
①	Filled soil	1550	29.6	0.21	13.5 11.2	26.7 18.6	3.70
②	亚黏土	1786	30.2	0.26	14.6 12.3	66.2 53.2	5.15
③	粉土	1829	95	0.38	26.5 21.7	11.5 9.8	3.70
④	粉质黏土	1980	59	0.29	18.3 13.9	130.0 98.5	-

表 2 支护力学参数

岩土层名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	抗拉强度 / MPa	泊松比
注浆区岩土层	2200	3.9	33	300	0.5	0.23
初衬支护 (C20 钢筋砼)	2360	25.5	-	-	-	0.18

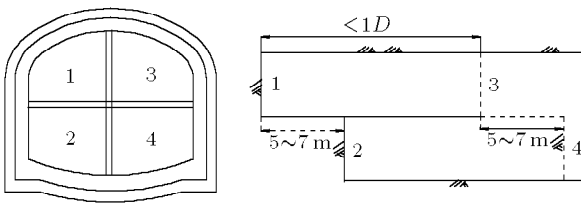


图 3 中隔墙法开挖方式

根据以上施工方式制定如下模拟过程：

(1) 边界条件与初始条件：模型的四周限制水平方向位移，底部限制竖直方向位移，地表自由。

(2) 开挖：模型隧道沿 Y 方向推进，首先在左侧洞顶部进行小导管注浆，随后开挖左上洞，并及时初衬支护（喷射 C20 混凝土，设置中隔墙及临时仰拱），进尺达 5m 后，开挖左下洞，边开挖边支护；随后进行右侧洞顶部注浆，并开挖支护右上洞，进尺 5m 后，开挖右下洞。每步开挖完成后，尽早封闭成环，浇筑仰拱，并拆除中隔墙等临时支护。开挖过程

中左右洞进尺距离始终保持一倍洞径左右。

(3) 监控：在整个运算过程中，始终监控地表沉降量和隧道拱顶、边墙和仰拱的收敛情况。

由图 4 所示，地表沉降量变化均匀，与现场监测值基本吻合，最大沉降值为 11.77mm。沿隧道轴向，变形量随开挖距离的增加而增大，但是在离开开挖面大于 5 倍洞径距离时，变形速度减慢，逐步趋

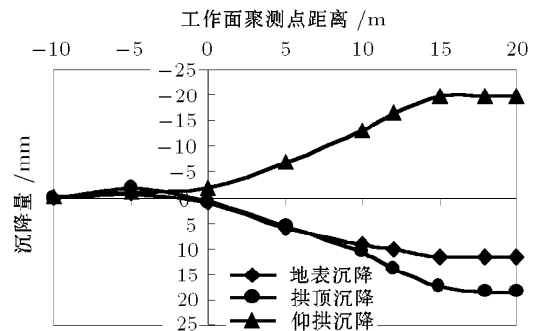


图 4 随工作面推进测点下沉变化趋势图

于稳定. 除仰拱产生向上的位移外, 拱顶和地表均发生竖直向下的沉降, 隧道围岩的变形均朝向洞内.

3 地表沉降随工作面推进的时空效应研究

地下结构开挖时, 开挖面前后一定范围内地层的受力变形状态随开挖面的向前进展而变化, 其变化规律称为空间效应; 同时地层受力变形又与时间有关, 这种地层受力变形相对于时间的变化规律称为时间效应. 空间效应和时间效应统称为时空效应, 浅埋隧道施工的时空效应一般以地表和地层内各点的位移随空间和时间的变化规律为主要研究对象.

进行时空变化研究, 需要找到地表沉降和时间函数之间的关系, 而隧道施工对地表沉降造成影响的主要原因是扰动, 因此简单的沉降-时间函数并不能准确反映沉降变化的本质. 而在施工中衡量扰动程度的时间因素主要是工作面的推进情况, 因此用工作面距测点距离作为一种衡量时间的参数, 更能反应地表沉降的本质.

图5是根据模拟结果得到的地表、拱顶和仰拱随工作面推进的沉降变形趋势图, 由于其变化多为非线性关系, 该曲线形式可采用 Logistic 曲线进行拟合 (Logistic 回归是确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法).

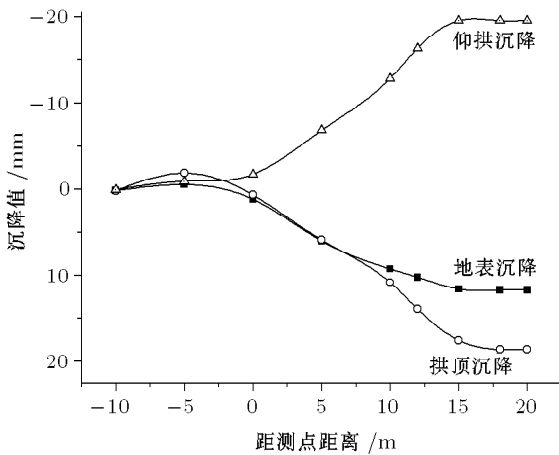


图5 随工作面推进测点下沉变化趋势

得到的地表沉降回归方程为

$$W = 12.89 - 11.74/[1 + (x/6)^2] \quad (1)$$

式中, W 为某位置沉降值, x 为工作面距该点的水平距离, 其回归曲线见图6.

通过与监测数据进行比对. 模拟结果与监测结果基本吻合, 模拟地表最大沉降值略小于实际监测

值, 而沉降影响范围略大, 但总体来说可以反映地表的沉降规律, 能够准确预测地表的沉降变形.

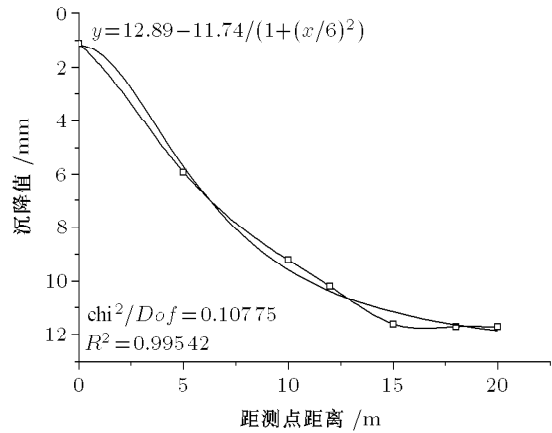


图6 地表沉降趋势及回归曲线

由图6分析可知地表各点沉降随工作面推进大致可分为4个阶段, 其发展阶段和产生原因如下:

(1) 超前扰动段

地面在开挖面到达之前就开始沉降, 其原因主要是围岩由于挤压作用而紧密, 孔隙水压力减少, 有效应力增加, 应力较原始应力增加, 而随着工作面推进, 应力降低, 沉降值与隧道洞径、覆土厚度、地层情况、支护是否及时、开挖面稳定情况有关, 因此在对地面沉降要求较高的地段施工时, 应采用分步开挖减小开挖面的距离和沉降量. 本例中当测点位于工作面前方大于2倍洞径 ($> 2D$) 的位置时, 地表受靠近工作面土体移动的影响产生向下的沉降, 该段沉降量为 1.1mm, 占总沉降量的 5%~10%.

(2) 急剧变形段

当工作面位于测量点前后一段距离的区域时, 围岩土体由三维受力状态转为二维受力状态, 受扰动而引起应力重分布, 此时在隧道顶板覆土中出现拉应力区和卸载区, 区域内二次应力值较原始应力值低, 土体由于弹性恢复自重作用使其向暴露空间方向移动, 土地由于卸载破坏从而产生较大的位移, 地表土体为弥补地层损失发生沉降变形, 该阶段沉降量与覆土厚度、支护封闭是否及时、开挖步距和地层情况密切相关. 本例中当隧道工作面在 $-1D \sim 3D$ 范围时, 此阶段地面变形速率增大, 变形量增加, 该段沉降量为 9.8mm, 占总沉降量的 70% ~ 80%, 本阶段是影响地表沉降的主要时期.

(3) 缓慢变形段

当工作面通过测量点一定距离后, 由于扰动效应减弱和衬砌的有效支护, 土体变形速率明显减缓,

变形量的增加也变缓，但由于在隧道支护封闭成环后，覆土进一步压密，因此仍产生部分变形，直至地面基本稳定。该阶段经历的时间沉降量与地层情况、覆盖厚度、支护刚度和背后填充注浆等因素有关。本例中当隧道工作面距测点 $3D \sim 4D$ 范围时，该段沉降量为约 1mm，占总沉降量的 5% ~ 10%。

(4) 稳定变形段

软土隧道上方地面变形常常是较长期的，如果地层具有明显的黏塑性，则该段时间相应增加。本例中当工作面大于 $4D$ 后，地层变形趋于稳定，沉降增长缓慢，其值很小，该段沉降量约占总沉降量的 5%~10%。

综上所述，空间效应是地下结构开挖后地层材料应力重分布引起的，施工过程不可避免导致前方地层土体损失，从而在一定范围地层内产生位移量变化。地层材料具有流变特性，其黏性和塑性屈服状态是产生时间效应的根本原因，地层内应力重分布后，地层材料的受力变形随时间而变化，出现了时间效应。

4 结 论

本文通过数据分析、数值采用和非线性回归分析，详细模拟浅埋隧道施工的全过程，研究施工过程中隧道和地表沉降变形趋势，得到了地表沉降的时空变形规律。结论有以下 3 点：

(1) 地表沉降量变化均匀，沉降槽沿隧道中心成轴对称分布，地表最大沉降值为 11.77mm，略小于监测数据，可见模拟数据与现场监测值基本吻合。除仰拱产生向上的位移外，拱顶和地表均发生竖直向下的沉降，隧道围岩的变形均朝向洞内。仰拱变形较拱顶和地表大，地表下沉小于拱顶下沉，因此在施工时应及早修筑拱顶和仰拱，并适当考虑预留变形量。

(2) 揭示了隧道上覆土层随工作面推进产生超前扰动段、急剧变形段、压密变形段和稳定变形段 4 个发展变化阶段及其影响因素，得到了隧道围岩在开

挖扰动条件下的区域性时空变形特点。

(3) 分析产生上述四阶段的机理和原因，得到随隧道开挖工作面推进，浅埋土层的应力变化规律。即土体首先由于挤压作用而紧密，孔隙水压力减少，有效应力增加，应力较原始应力增加；继而土体由三维受力状态转为二维受力状态，受扰动而引起应力重分布，在隧道顶板出现拉应力区和卸载区，区域内二次应力值较原始应力值低，土体由于弹性恢复自重作用使其向暴露空间方向移动，由于卸载破坏从而产生较大的位移，地表土体为弥补地层损失发生沉降变形；此后由于扰动效应减弱和衬砌的有效支护，覆土进一步压密，地面基本稳定，并在随后一段时间内，由于土体的黏塑性而进一步缓慢变形。

参 考 文 献

- 1 刘宝琛, 张家生. 近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法. 岩石力学与工程学报, 1995, 12(4): 289-295(Liu Baochen, Zhang Jiasheng. The stochastic medium of ground surface settlement caused by near-surface excavation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 12(4): 289-295 (in Chinese))
- 2 张向东, 孙国志, 穆琳. 隧道冻结法施工引起地表沉降的数值分析. 力学与实践, 2008, 30(2): 78-82 (Zhang Xiangdong, Sun Guozhi, Mu Lin. Numerical simulation of surface subsidence caused by freezing method construction in tunnel. *Mechanics in Engineering*, 2008, 30(2): 78-82 (in Chinese))
- 3 朱卫平. 盾构法隧道模型试验中的相似关系. 力学与实践, 2005, 27(4): 35-38(Zhu Weiping. Similarity formulae of model testing in advancing shield tunnels. *Mechanics in Engineering*, 2005, 27(4): 35-38 (in Chinese))
- 4 朱卫平, 胡珉, 郭平. 盾构立交隧道地层移动分析. 力学与实践, 2003, 25(4): 32-35 (Zhu Weiping, Hu Min, Guo Ping. Analysis of surface movement in advancing shield interchange tunnels. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(4): 32-35 (in Chinese))
- 5 Ishihara K. Soil behavior in earthquake geotechnics. New York: Oxford University Press Inc, 1996
- 6 Yang YB, Hung HH. A 2.5D finite/infinite element approach for modelling visco-elastic bodies subjected to moving loads. *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 2001, 51: 1317-1336

(责任编辑: 刘俊丽)