

文章编号: 1005—0523(2005)05—0052—04

浅埋暗挖隧道对地表变形影响的三维数值分析

张银屏, 雷震宇, 周顺华

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200331)

摘要:随着地下空间的开发和利用,隧道结构将频繁下穿繁华街道及重要建筑物.为保护既有建筑物、管线,控制地表变形,选取合理的施工方案将至关重要.本文结合杭州市某大型地下通道工程实例,应用有限元程序的“生”、“死”单元方法,模拟了隧道开挖施工对地表变形影响的全过程,并对各施工方案进行了比较和论证,为类似工程施工方案、施工方法、注浆加固范围的选择提供了依据.

关 键 词:隧道开挖;CRD 工法;“生”、“死”单元;有限元

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

本文结合杭州某大跨度浅埋暗挖隧道实际工程,用大型有限元软件 Ansys 的生死单元法模拟多种隧道开挖方案对地表变形的影响,以便为同类工程的设计和施工提供科学依据和技术指导.

1 工程概况

该隧道地处杭州市中心,宽 11.2 m,高 9.3 m,全长 78 m,是主干道路连接线工程.杭州市某自来水厂高压配电房及一棵 700 年的香樟树刚好座落在隧道顶部,隧道施工过程中必须严格控制高压配电房的沉降,否则将直接影响到杭州市民的用水.

1.1 工程地质

隧道顶部覆土层:主要为杂填土及素填土层、砂质粉土层,该地层土体较疏松,自稳性较差;隧道洞身穿越土层:主要为砂质粉土夹粉砂,弱透水性,中密状为主,薄层状构造,下部多夹粉砂、细砂薄层,土体渗透性相对较好.隧道下卧层:主要为砂质粉土层.其主要物理力学指标见表 1.

1.2 施工方案

该段隧道采用暗挖 CRD 工法分部开挖,先在暗挖隧道的两侧施作旋喷桩和深孔地表注浆止水帷幕,截断隧道内的地下水补给;再在隧道的外侧和旋喷桩止水帷幕之间施作二排地表深井,由抽水泵设置高度不同实现分级控制降水(所以计算模拟过程中不考虑地下水的影响);然后施做 $\varnothing 299$ 大管棚超前预支护及全断面注浆加固地层,采用 CRD 工法开挖支护,主要支护参数见表 2.

表 1 土的主要物理力学指标表

土层名称	天然重度 (kN/m^3)	泊松比	压缩模量(Mpa)	土层厚度(m)	CU(kpa)	Φ_u (度)
杂填土	19.0	0.28	11.1	7	8	24
砂质粉土	19.4	0.25	11.8	12	12	25
砂质粉土夹粉砂	19.8	0.23	15.0	4	12	32
砂质粉土	19.0	0.25	13.2	5	10	26
粉质粘土	18.8	0.32	5.3	4	23	24

收稿日期:2005—08—18

作者简介:张银屏(1980—),吉林白山人,同济大学交通运输学院研究生.

表 2 隧道结构主要的支护参数表

初期支护结构					中间临时支 护喷砼厚	钢架间距	衬砌	
钢纤维喷混凝土		自进式注浆锚杆					拱墙 cm	仰拱 cm
拱墙 cm	仰拱 cm	位置	长度 m	间距 m	cm	m		
35	30	半边墙及仰拱	3	0.4×0.4	25(20)	@0.5		

具体开挖方案如下:
方案一:如图 1a 所示标志顺序分部开挖,部距为 3 m.
方案二:如图 1b 所示标志顺序开挖,部距为 3 m
方案三:如图 1a 所示标志顺序将 1、2、3、4 部先行开挖,部距 3m,当 4 部工作面与初始工作面相距 9 m 时,再开挖 5、6 部,部距同样为 3 m.

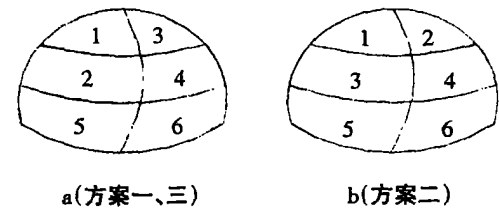


图 1 分部开挖示意图

2 数值模拟分析

2.1 计算模型

为模拟上述三种施工方案对隧道开挖所引起的地表沉降的影响,计算过程中采用三维有限元地层结构连续介质模型.有限元模型水平宽度取开挖洞室宽度的 4.5 倍,垂直高度取其 3 倍.整个地层与隧道共同作用的模型宽 50 m,高 32 m,深 30 m(见图 2),共划分了 28 680 个单元.在模拟时围岩及支护结构均采用 8 节点等参实体单元;因为计算主要关心地表沉降值,所以临时支撑的格栅钢架同样用实体单元模拟,这样有利于单元之间变形及受力的相互协调;锚杆对土体的加固,采用等效材料法近似处理;超前支护的大管棚通过提高围岩等级来近似模拟.左右及前后各侧面均约束水平向位移,底面约束竖直向位移.计算时水厂结构物作为地面超载考虑,按规范大小取为 20 kPa,半地下室处取为 15 kPa.

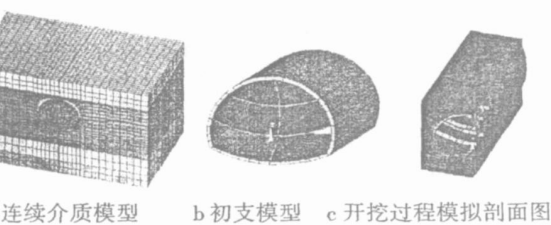


图 2 计算模型图

2.2 材料的本构方程

对于岩土体材料,其变形是极其复杂的,这不仅与岩土体的成分、成因、结构等因素有关,还与岩土体的历史、受荷状况等有关.岩石能够很好地承受压应力,但是只能承受很小的拉应力.岩石的应力~应变关系中几乎不存在弹性极限.因为岩石甚至在很小的荷载作用下,就出现显著的不可逆的塑性变形.所以,计算过程中采用 Drucker-Prager 弹塑性

的非线性本构模型.
D-P 模型是在考虑了静水压力影响的广义 Mises 屈服准则基础上建立起来的,表达式为

$$\alpha J_1 + \sqrt{J_2} = k \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}, k = \frac{\sqrt{3} \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$$

式中: J_1 —应力第一不变量, $J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$;
 J_2 —第二偏应力张量不变量,其表达式为:
 $J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]$

C —岩土类材料的内聚力(MPa);
 ϕ —岩土类材料的内摩擦角(度);

D-P 模型的优点是采用了简单的方法考虑了静水压力对屈服和强度的影响,参数少,计算简单,同时也考虑了岩土类的剪胀

2.3 计算参数

其地层模型参数主要按表 1 选取.初衬为 C20 钢纤维混凝土,其弹性模量为 28 000 MPa,泊松比为 0.2.临时支撑为 I16 工字钢,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3.

2.4 施工过程模拟

数值模拟分析运用了 Ansys 的“生”、“死”单元法来模拟开挖过程,其原理是当选择杀死单元时,程序将对这些单元的刚度、传导或其他分析特性矩阵乘以一个很小的因子,取该因子为 1.0E-6.死单元的单元荷载将为 0,从而不对荷载向量生效,同样死单元的质量、阻尼等其他类似效果也设为 0 值.死单元的这些性质可以有有效的模拟开挖掉的土体.所谓“生单元”,就是指没被杀死的单元以及激活的死单元,激活后的单元将恢复原来的质量和刚度等矩阵值,可以有有效的模拟开挖后施工的衬砌和临时支撑.

具体计算分析过程如下:1) 将所有材料都设为土层的材料,施加重力场,以模拟大地的初始应力状态;2) 通过改变材料参数以提高围岩等级来模拟管棚和锚杆加固区;然后利用 Ansys 特有的“生”、“死”单元法,以方案一为例,杀死 1 部要开挖的土体(纵向长度为 3 m);激活衬砌及临时支撑,同时将激活单元材料设置为混凝土和工字钢的材料参数.按照三种方案施工顺序,依次循环计算直至挖通模型.方案一、二循环计算 12 步;方案三循环计算 16 步,3 m 作为一开挖进尺.

3 计算结果分析

有限元模拟计算主要考察每种施工方案地表横、纵向沉

降,隧道拱顶地表下沉量.在此需要说明的是,两种施工方案具有不同的工序(前四步除外),且隧道断面的开挖在时间和空间上划分为多个不同的开挖步,因篇幅所限,在此仅选取了有代表性的断面和控制点进行分析.

为了表示隧道开挖过程对地表变形的影响,如图 3 所示分别选取 2 个横断面和 1 个纵断面(拱顶所对应的断面),绘制了各个开挖步所引起地表变形,并选取了拱顶对应的地面上的 1#、2#点作为控制点绘制了竖向位移时程变化曲线.

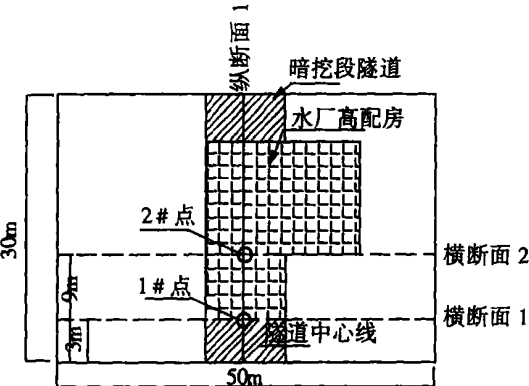
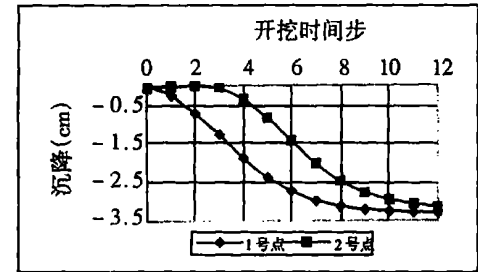
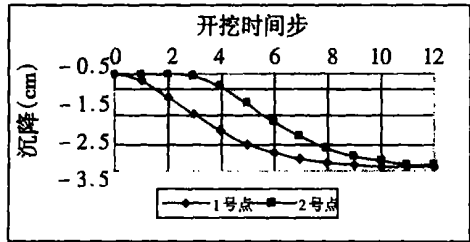


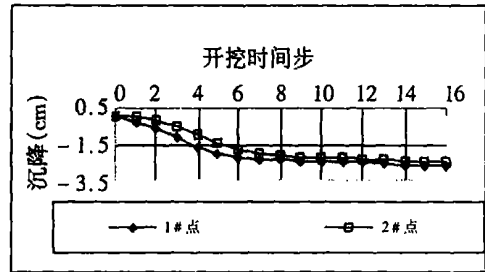
图 3 模型地表平面示意图



a 方案一



b 方案二



c 方案三

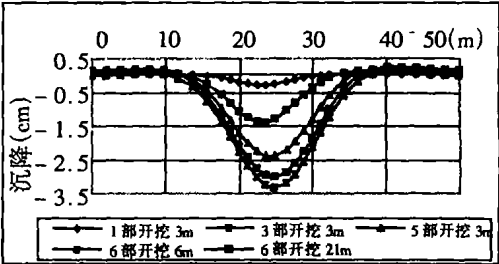
图 4 地表各点开挖时程曲线

3.1 地表各点沉降值随开挖程变化曲线

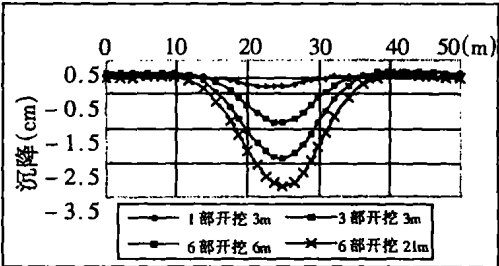
如图 3 所示,分别取拱顶地表中心线与横断面 1、2 的交点(1 号点、2 号点)进行分析.由图 4 可以看出,方案一、二中两点的变化规律基本相同,随着开挖掌子面的远离,关键点的沉降速率明显降低,当开挖进行到第 8 步时,即开挖 1 部掌子面离关键点 24m 左右时,该点的沉降已基本趋于稳定.对于方案三,可明显的看出沉降主要发生在掌子面 1~4 部开挖过程中,其大约占总沉降量的 90%;且总沉降在量值上要明显小于方案一、二.

3.2 地表横向沉降

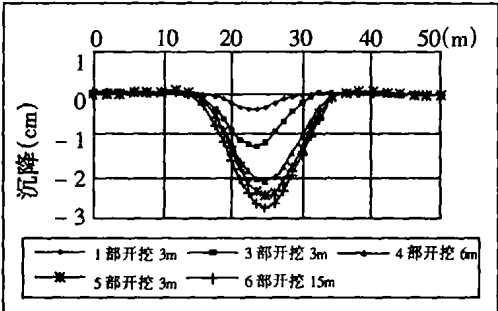
通过模拟计算,三种施工方案各开挖步骤所引起两个横断面的沉降曲线,如图 4、5 所示.由图 4 可知,隧道开挖过程中方案一、二、三在横断面 1 所引起地表最大沉降值分别为 3.31 cm、3.20 cm、2.75 cm;且各方案引起地表沉降规律基本相同,地表横向影响范围约为 30 m.对于横断面 1,方案一、二地表最大沉降值相差 1.1mm,而二者引起地表最大沉降值约比方案三大 20%.



a 方案一



b 方案二

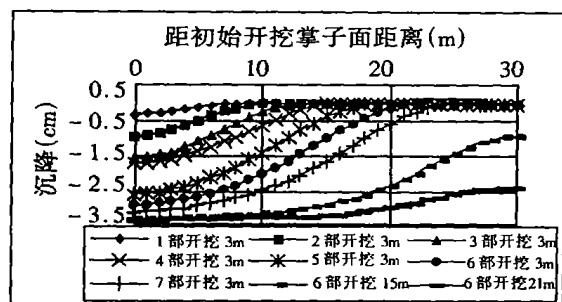


c 方案三

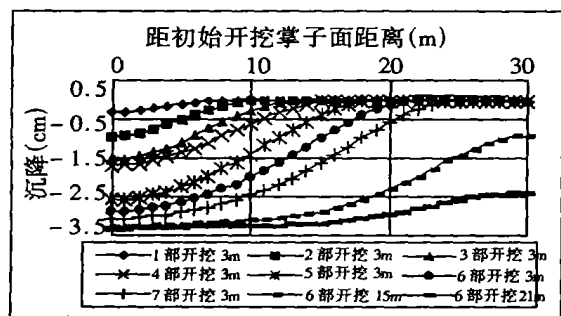
图 5 横断面 1 地表沉降曲线

3.3 地表纵向沉降

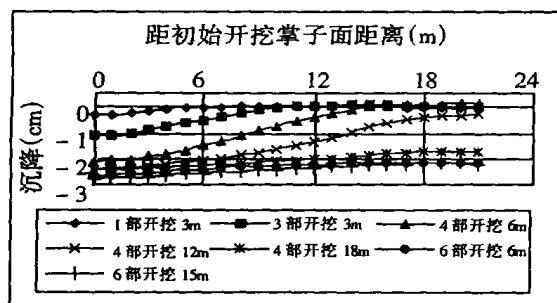
隧道开挖引起地表纵向的变化曲线如图 6 所示,各部开挖引起地表纵向沉降范围不等,其中 1 部开挖 3 m,其纵向影响范围约为 6 m.方案二、三的纵向沉降规律基本相同;对于方案三,5、6 部开挖引起地表纵向沉降变化很小.



a 方案一



b 方案二



c 方案三

图6 地表纵断面沉降曲线

显然,就对地表变形的影响来说,方案三所引起的最大地表沉降值明显小于前两种方案.这是由于隧道开挖后将引起一定范围内的围岩应力重新分布和局部地壳残余应力的释放.在重新分布的应力作用下,一定范围内的围岩产生位移,形成松弛.根据大量的监测数据分析来看,潜埋软岩隧道围岩变形~时间曲线通常符合指数模型,即在隧道刚开挖后的较短时间内迅速增加,但随着掌子面向前推进,围岩变形逐渐趋于稳定,变形速度逐渐减小,并逐渐收敛.由于

方案三在开挖1、2、3、4部后相距较长部距(9 m)再开挖5、6部,其初始开挖掌子面面积仅为方案一、二的60%,因此引起较小的围岩松弛,并产生较小的地表变形.当施工5、6部时,1、2、3、4部围岩与支护的变形与应力状态已基本稳定,只产生较小的变形,所以方案三产生的地表变形主要是由1、2、3、4部开挖引起的,其数值显然要小于方案一、二.

4 结论

通过有限元模型的数值模拟分析可以得到以下结论:

1) 方案一、二引起的地表变形差不多,而方案三由于地表沉降在前四部开挖的过程中已基本完成,5、6开挖仅引起很小的沉降,所以其引起的地表变形要比方案一、二小的多,建议采用方案三施工工序.

2) 隧道开挖将使地表产生一条沉降槽,其横向影响范围约为30m,约为隧道最大宽度的3倍.

3) 由计算分析可知,若采用方案三施工,所引起的地表最大沉降仅为2.74 cm,说明管棚支护配合注浆的施工方案在软土富水含砂底层隧道浅埋暗挖施工中能够有效的控制地表变形,该施工方案可行.

参考文献:

- [1] Lee K M, Rowe R K, Lo L Y. Subsidence owing to tunneling. I. Estimating the gap Parameter [J]. Can. Geotech. J., 1992, 29: 929—940.
- [2] Mair R J, Taylor R K. Bored tunneling in the urban environment [A]. Theme lecture to 14th Int. Conf on SMFE [C], Hamburg, 1997, V01.4.
- [3] 周顺华. 开挖理论[M]. 北京:中国铁道出版社,1997.
- [4] 刘涛杨, 凤鹏. 精通 ansys [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [5] 胡庆安, 夏永旭, 王文正. 双连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25 (1): 48—50
- [6] 魏江川, 李苍松. 潜埋隧道围岩变形机理及施工对策探讨[J]. 现代隧道技术, 2002(增刊): 193—197

3-D Numerical Analysis of Influence Caused by Shallow Tunnel Excavation on Deformation of Ground Surface

ZHANG Yin-ping, LEI Zhen-yu, ZHOU Shun-hua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: With the development of underground space utilization, tunnel structure will pass down the existing building frequently. Thus, it is very important to choose reasonable construction procedure for protecting overground structure and controlling ground surface deformation. This paper combined with certain actual underground chunnel project in Hangzhou, simulates influence caused by tunnel excavation on ground surface deformation through “Birth” and “Death” method of finite element. Meanwhile the study provides gist for construction procedure and grouting bound of similar project.

Key words: tunnel excavation; CRD; “Birth” and “Death” element; FEM