

文章编号:1006-2106(2014)09-0083-05

# 小净距浅埋暗挖隧道下穿密集房屋安全性分析<sup>\*</sup>

张 航<sup>\*\*</sup>

(中铁第四勘察设计院集团有限公司厦门分院, 福建 厦门 361010)

**摘要:**研究目的:受城市复杂环境的影响,城市隧道的修建有时不可避免地要下穿房屋。为了达到减少房屋拆迁的目的,本文通过城市小净距软岩浅埋暗挖隧道的数值模拟,研究隧道下穿密集房屋施工过程中不同的施工方案所引起地表沉降量及洞顶建筑物沉降规律,进一步分析洞顶建筑物的安全性。

**研究结论:**(1)隧道施工引起地表沉降的程度主要取决于地质条件、隧道埋深、开挖跨度及施工方法等因素,其中施工方法的影响最为明显;(2)根据数值模拟计算及地表建筑物的实测结果,小净距浅埋暗挖隧道下穿房屋采用CD法施工+超前小导管注浆加固岩体,可以有效地控制地表沉降,保护地表建筑物的安全;(3)本研究成果主要应用在城市隧道工程领域,对今后类似工程的设计、施工具有借鉴意义。

**关键词:**浅埋暗挖隧道;下穿房屋;地表沉降;安全分析

**中图分类号:**U459.2 **文献标识码:**A

## Security Analysis of Neighborhood Shallow Undercut Tunnel Under – traversing Dense Buildings

ZHANG Hang

(Xiamen Branch of China Railway Siyuan Survey And Design Group Co. Ltd, Xiamen, Fujian 361010, China)

**Abstract: Research purposes:** Affected by the complex urban environment, sometimes the construction of urban tunnels inevitably traverse under buildings. In order to reduce the demolition of buildings, this paper studies the settlement volume of ground surface and settlement regularity of roof buildings in conditions of different construction methods by means of numerical simulation of neighborhood soft – rock shallow undercut tunnel, furthermore, it analyzes the security of buildings above the tunnel.

**Research conclusions:** (1) Settlement of ground surface caused by construction mainly depends on geological conditions, buried depth, excavation span of tunnel and construction method which is the most obvious. (2) On the basis of simulation and monitoring results, neighborhood shallow undercut tunnel under – traversing buildings adopts CD construction method as well as advanced small pipe to grout reinforcement of surrounding rock, the ground surface settlement can be effectively controlled, the safety of roof buildings can be protected. (3) The results of this study are mainly used in the field of city tunnel project, it can be referred by similar engineering's design and construction.

**Key words:** shallow undercut tunnel; under – traversing buildings; ground surface settlement; security analysis

## 1 研究背景

隧道施工引起的地表移动和变形,尤其是在地面

建筑设施密集的城市中进行隧道施工,一直是人们十分关心的课题。地下工程施工不可避免地对岩土体产生扰动,引起岩土体变形可能影响地表建筑和已有管

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-05-16

<sup>\*\*</sup> 作者简介:张航,1982年出生,男,工程师。

<sup>\*\*\*</sup> 本文由中国铁道学会工程分会地质与路基分专业委员会推荐

线设施,地表沉降到一定程度时,将对地面建筑物的安全和地下管线的正常使用造成危害。因此,隧道施工要与保护城市中有历史意义和经济、社会意义的设施协调起来。

本文依托厦门白城隧道,对复杂城市环境条件下,城市隧道下穿房屋进行研究,对设计施工提出合理化建议,为类似工程的建设提供借鉴意义。

## 2 工程建设条件

厦门白城隧道进、出洞口附近主要为居民密集区及厦大校园,楼高大部分在 15 m 以下,基础型式一般为浅基础,基础埋深为 3 ~ 5 m。

隧道下穿房屋段原始地貌类型主要为海岸阶地,局部为残丘坡地,地层主要由填筑土、中粗砂、亚黏土、淤泥质土,以及全~强风化花岗岩构成。隧道洞身所处的围岩级别为 V 级,围岩完整性差,属于含水地层,自稳差。

## 3 隧道施工沉降变形理论分析

### 3.1 隧道施工地层变形原因分析

隧道施工地表移动和变形的发生,主要是由于施工引起的地层损失和施工过程中隧道周围受扰动,或者受剪切破坏的重塑土的再固结所造成。主要原因可以归纳为:开挖引起应力状态的改变、隧道施工引起的扰动、初期支护的变形和变位、初期支护和围岩之间间隙的存在和补充注浆的不充分、地下水位下降和土体固结等。

### 3.2 隧道施工地表沉降变形分布规律分析

#### 3.2.1 地表沉降横向分布规律

在隧道施工引起的地表移动和变形中,地表沉降的大小和分布是最受关注的。对于隧道施工引起的地表沉降问题的研究,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使用方法,他假定地层损失在整个隧道长度上均匀分布,隧道施工所产生的地表沉降横向分布近似为一正态分布曲线。

#### 3.2.2 地表沉降纵向分布规律

地下工程开挖过程中地表沉降随开挖面掘进的纵向变化规律(时空效应)大致可以分为微小沉降、沉降剧增、沉降缓慢、沉降基本稳定四个区域。

## 4 隧道施工对地表建筑物影响分析

### 4.1 地表建筑物变形控制基准

对于地表建筑物安全性的评价,主要是根据建筑物在隧道施工过程中,所产生的沉降、倾斜、曲率和水

平变形四个方面考虑。

据调查,白城隧道地表建筑物以浅基础(扩展基础)为主,结构型式以砖混结构为主,建筑物高度小于 15 m。参考北京地区的建(构)筑物沉降控制标准,拟定了白城隧道地表建筑物的沉降控制标准,具体如表 1 所示。

表 1 白城隧道地表建筑物结构安全变形控制基准

破坏 (保护) 等级	地表变形值				处理 方式
	倾斜 $T$ / ( $\text{m}/\text{m}$ )	沉降 / $\text{mm}$	曲率 $K$ / ( $10^{-3}/\text{m}$ )	水平变形/ $E(\text{mm}/\text{m})$	
I	$\leq 0.003$	$\leq 20$	$< 0.2$	$\leq 2.0$	不修

### 4.2 隧道施工数值计算模型及参数选取

#### 4.2.1 设计概况

下穿房屋段,采用小净距隧道结构型式,如图 1 所示。单洞开挖宽度 12.0 m,单洞开挖高度 9.8 m,中夹岩土厚度 3 ~ 7 m,覆土厚度 10 ~ 15 m。

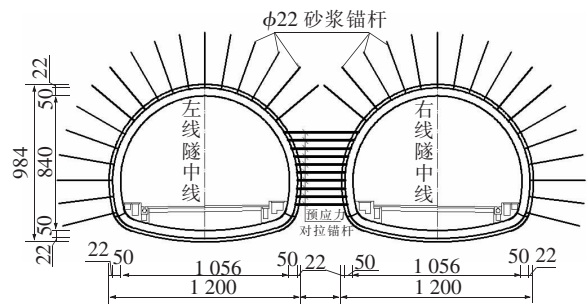


图 1 小净距隧道衬砌断面图

注:本图尺寸除锚杆直径以 mm 计外,其余均以 cm 计

设计采用复合式衬砌结构型式:初期支护网喷 C25 混凝土厚 22 cm + 钢筋网  $\phi 8$ (环)  $\times \phi 6.5$ (纵)(间距 20 cm  $\times$  20 cm) +  $\phi 22$  砂浆锚杆长 3.5 m(间距 100 cm  $\times$  100 cm),并采用 I16 工字钢加强;中夹岩采用  $\phi 22$  预应力对拉锚杆,间距 50 cm  $\times$  70 cm;二次衬砌模筑 C25 防水钢筋混凝土厚 50 cm;辅助施工措施采用  $\phi 50 \times 5$  mm 超前小导管,长 5 m,环向间距 50 cm,纵向间距 250 cm。

#### 4.2.2 模型尺寸的确定

鉴于白城隧道的实际工况,在进洞口端,沿线地表分布有 9 栋砖混结构房屋,取最不利的一栋房屋进行数值模拟计算。

根据工程概况,开挖断面左右范围各取 45.55 m;下方取约 3 倍洞高,即取 20 m 范围;上方取至地表(洞顶覆土厚 10 m),即 10 m 范围;小净距段的长度约 50 m,故在隧道开挖方向长度取 50 m;由此确定模型范围约为:长  $\times$  宽  $\times$  高 = 50 m  $\times$  118 m  $\times$  40 m,由于该

部分属于小净距渐变隧道,为表现该特征,其左右两隧道中心线的距离从 15 m 渐变到 19 m,具体如图 2、图 3 所示。

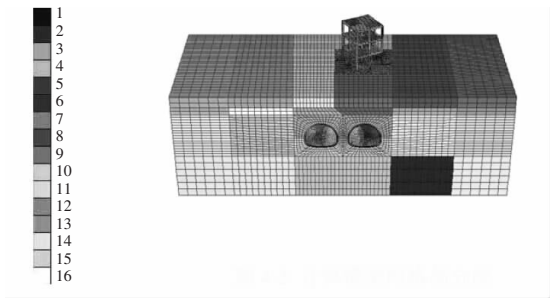


图 2 计算模型网格剖分图

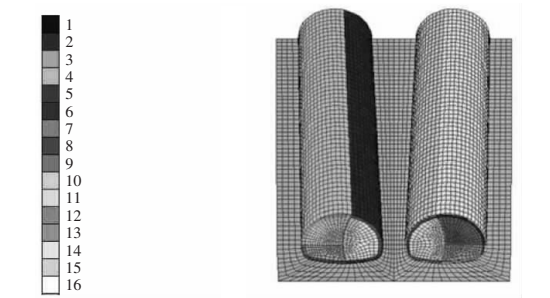


图 3 小净距渐变部分细图

4.2.3 模型物理参数的选取

本次数值计算所取计算参数主要以白城隧道设计相关参数为主,参考《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004),具体如表 2 所示。

表 2 模型物理参数表

项目	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$	粘聚力 $C/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	混凝土 标号
V 级围岩	0.37	0.40	0.15	25	2 000	—
锚杆加固	1.00	0.35	200	27	2 000	—
超前支护	0.55	0.45	50	20	2 100	—
初期支护	23	0.2	—	—	2 200	C25
二次衬砌	29.5	0.2	—	—	2 500	C25

4.2.4 开挖工法

根据洞顶建筑物与隧道空间位置关系,选取建筑物下方的断面进行分析,采用 CD 法开挖,各导坑编号如图 4 所示。

隧道施工引起地表沉降的程度主要取决于以下几个因素:工程地质条件、隧道埋深、开挖跨度、施工方法。施工方法的影响更为明显,同样的地质条件,不同的施工方法引起的地表沉降会有很大的差异。本次按

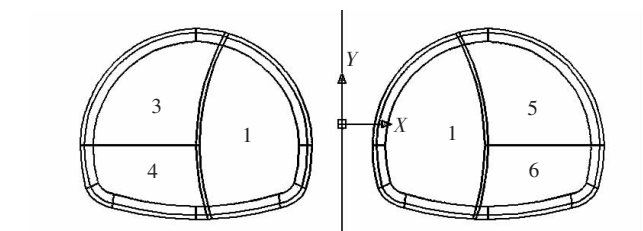


图 4 开挖导坑编号

照 3 种施工方案进行数值模拟计算:工况一(CD 法开挖 + 循环进尺 2.5 m)、工况二(CD 法开挖 + 循环进尺 1.0 m)、工况三(CD 法开挖 + 循环进尺 2.5 m + 超前支护)。

4.3 数值计算结果及分析

4.3.1 地表沉降结果及分析

在计算模型中,设计了三排横向沉降观测点,一排位于开挖起点,即两隧道中心距离为 15 m 的位置处,第二排布置在建筑物所处的区域内,第三排布置在开挖终点,即两隧道中心距离为 19 m 位置处,每排 45 个测点,两隧道中间的中心线为坐标零点,往右为正,往左为负,在左边 0 ~ 30 m 和 -30 ~ 0 m 每隔 2 m 取一个测点,在左边 30 ~ 65 m 和 -65 ~ -30 m 每隔 5 m 取一个测点,其横向观测点的布置位置如图 5、图 6 所示。

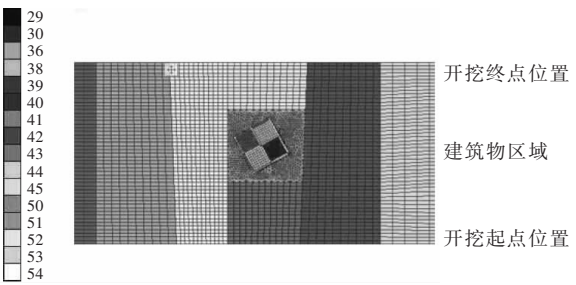


图 5 三排横向测点布置位置图

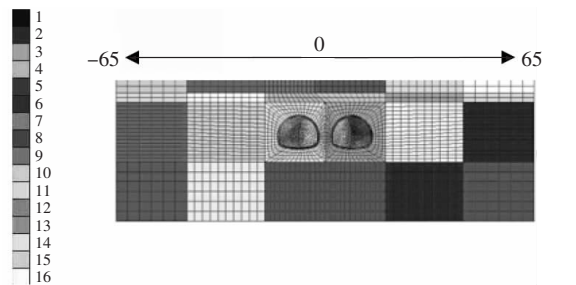





图 6 每排观测点位置图

4.3.1.1 三种工况地表沉降结果

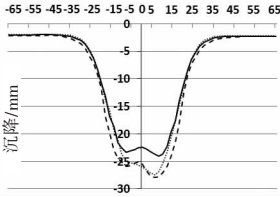
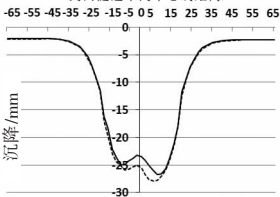
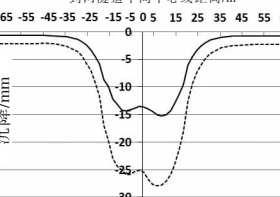
开挖完成后,地层的竖向位移云图如表 3 所示。

表 3 各工况地层竖向位移结果对比表

工况	竖向位移云图
工 况 一	<div><div><div>-4.655 1e-002 to -4.500 0e-002</div><div>-4.500 0e-002 to -4.000 0e-002</div><div>-4.000 0e-002 to -3.500 0e-002</div><div>-3.500 0e-002 to -3.000 0e-002</div><div>-3.000 0e-002 to -2.500 0e-002</div><div>-2.500 0e-002 to -2.000 0e-002</div><div>-2.000 0e-002 to -1.500 0e-002</div><div>-1.500 0e-002 to -1.000 0e-002</div><div>-1.000 0e-002 to -5.000 0e-003</div><div>-5.000 0e-003 to 0.000 0e+000</div><div>0.000 0e+000 to 5.000 0e-003</div><div>5.000 0e-003 to 8.269 8e-003</div></div></div>
工 况 二	<div><div><div>-4.169 2e-002 to -4.000 0e-002</div><div>-4.000 0e-002 to -3.500 0e-002</div><div>-3.500 0e-002 to -3.000 0e-002</div><div>-3.000 0e-002 to -2.500 0e-002</div><div>-2.500 0e-002 to -2.000 0e-002</div><div>-2.000 0e-002 to -1.500 0e-002</div><div>-1.500 0e-002 to -1.000 0e-002</div><div>-1.000 0e-002 to -5.000 0e-003</div><div>-5.000 0e-003 to 0.000 0e+000</div><div>0.000 0e+000 to 5.000 0e-003</div><div>5.000 0e-003 to 8.177 4e-003</div></div></div>
工 况 三	<div><div><div>-2.475 1e-002 to -2.250 0e-002</div><div>-2.250 0e-002 to -2.000 0e-002</div><div>-2.000 0e-002 to -1.750 0e-002</div><div>-1.750 0e-002 to -1.500 0e-002</div><div>-1.500 0e-002 to -1.250 0e-002</div><div>-1.250 0e-002 to -1.000 0e-002</div><div>-1.000 0e-002 to -7.500 0e-003</div><div>-7.500 0e-003 to -5.000 0e-003</div><div>-5.000 0e-003 to -2.500 0e-003</div><div>-2.500 0e-003 to 0.000 0e+000</div><div>0.000 0e+000 to 2.500 0e-003</div><div>2.500 0e-003 to 3.765 9e-003</div></div></div>

地表横向沉降槽如表 4 所示。

表 4 横向沉降结果对比表

工况	横向沉降结果
工 况 一	<div><div>到两隧道中间中心线距离/m</div><div>-65 -55 -45 -35 -25 -15 -5 0 5 15 25 35 45 55 65</div><div>..... 开挖起点位置; —— 建筑物区域; --- 开挖终点位置</div></div>
工 况 二	<div><div>到两隧道中间中心线距离/m</div><div>-65 -55 -45 -35 -25 -15 -5 0 5 15 25 35 45 55 65</div><div>---- 开挖进尺 2.5 m; —— 开挖进尺 1.0 m</div></div>
工 况 三	<div><div>到两隧道中间中心线距离/m</div><div>-65 -55 -45 -35 -25 -15 -5 0 5 15 25 35 45 55 65</div><div>---- 未施作超前注浆; —— 施作超前注浆</div></div>

4.3.1.2 三种工况地表沉降分析

在小净距渐变隧道,其沉降规律基本上与理论相符,随着隧道中心距离的增大,其地表的横向沉降槽范

围会有所扩大,最大沉降值亦增大,其位置仍在右洞上方,但当隧道上方存在建筑物时,建筑物的刚度会影响沉降槽范围和沉降量的大小,这从图中建筑物区域的横向沉降槽曲线可以看出。

工况一:在拱顶位置处产生最大的沉降,右洞拱顶的沉降范围略大于左洞洞顶,其最大沉降量为 -46.55 mm,超过了地表沉降控制值 30 mm,不能满足安全要求。

工况二:在拱顶位置处产生最大的沉降,右洞拱顶的沉降范围略大于左洞洞顶,其最大沉降量为 -41.69 mm,是工况一沉降量的 89%。缩短开挖进尺后,地表横向沉降槽范围以及沉降值均有缩小,但效果不明显,地表沉降值依然过大,也超过了地表沉降控制值,不能满足安全要求。

工况三:地层的最大沉降为 24.75 mm,为工况一沉降量的一半,效果良好。地表最大沉降值发生在隧道中心距离较大的位置处,地表最大沉降值为 15.25 mm。在施作超前小导管注浆后,地表横向沉降槽明显缩小,地表沉降值也降低,沉降控制措施效果良好,满足安全要求。

4.3.2 建筑物安全性分析

建筑物的沉降控制点位于基础处,共设置 9 个控制点,其倾斜方向和控制点位置如图 7 所示,所产生的倾斜与图 7 相同时为正,相反时为负。

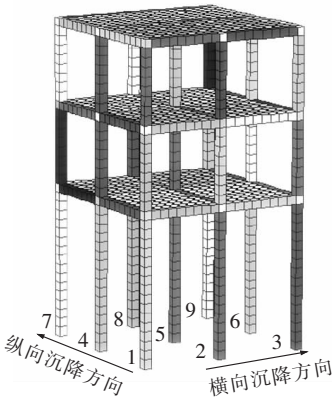


图 7 建筑物倾斜方向及沉降控制点位置

4.3.2.1 三种工况建筑物沉降结果

随着开挖面的推进,开挖面通过建筑物之前和通过建筑物之后,所产生的沉降值将有所不同。下面从该处入手,来分析建筑物的倾斜和控制点的沉降,沉降往上为正,往下为负,如表 5 所示。

表5 建筑物沉降结果对比表

工况	建筑物主要控制点沉降结果
工况一	
工况二	
工况三	

#### 4.3.2.2 三种工况建筑物安全性分析

工况一:通过表5可以看出,随着各导坑的开挖,建筑物的最大沉降值已经超过规范值20 mm,横向最大倾斜值为0.000 7,纵向最大倾斜值为0.000 3,未超过规范值,倾斜量满足要求,但由于建筑物的最大沉降不满足要求,故隧道开挖会影响建筑物的安全性,需采用一定的控制措施,来保证建筑物在隧道开挖过程中的安全。

工况二:随着各导坑的开挖,建筑物的最大沉降值也超过规范值20 mm,横向最大倾斜值为0.000 7,纵向最大倾斜值为0.000 3,与未缩短施工进尺相比变化不大,由于沉降超过控制标准,故建筑物仍有可能产生破坏。

工况三:施作超前小导管注浆后,建筑物最大沉降量为14.21 mm,为未施加超前小导管注浆时61%,且小于20 mm,满足要求。

综上所述,根据数值模拟计算可知,白城隧道在V级围岩地段,覆土10 m,下穿房屋段,采用小净距结构型式,施工方案采用CD法,并采用超前小导管注浆加固围岩,是可行的,能够保证洞顶房屋的安全,从而可以减少拆迁房屋,节省投资。

#### 4.4 白城隧道地表建筑物沉降实测结果

在白城隧道施工过程中,通过对地表建筑物监控量测,以指导施工,确保房屋安全。

图8为地表建筑物沉降监测结果,沉降监测最大值为14.26 mm,监测结果与计算结果较为接近,故采用超前小导管注浆措施,改善围岩土层物理参数,并形成“梁拱效应”,为开挖提供棚护作用,能有效的控制地表沉降量,保护地表建筑物的安全。

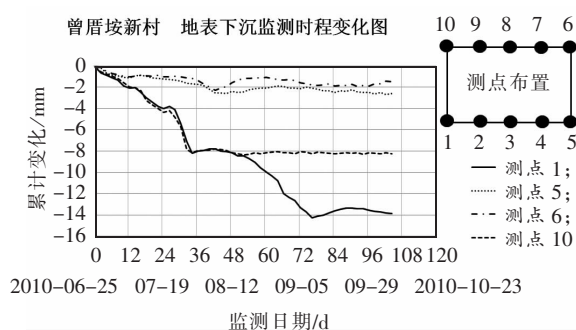


图8 房屋地表下沉监测结果

## 5 结论

通过对厦门白城小净距浅埋暗挖隧道下穿密集房屋数值模拟计算,对比施工期间的监测结果,经综合分析,得出以下结论:

(1)地表沉降控制的机理,即是保持或者加强原有地层的稳定性,维持其稳定的应力平衡状态。根据数值模拟计算及地表建筑物的实测结果,可以发现采用CD法施工+超前小导管注浆加固岩体,应用效果明显,有效地控制了地表沉降,保护了地表建筑物的安全。

(2)地表沉降控制因素主要有地质条件、隧道埋深、开挖跨度、施工方法等,应根据实际情况,从上述四个方面采取措施,来控制地表沉降,确保隧道及地表建筑的安全。

(3)隧道在开挖过程中及时施作仰拱,尽早封闭,进而对隧道初期支护整体受力更加合理,更有利于控制结构的整体沉降。

(4)隧道在进行开挖时,及时支护非常重要,同时打锁脚锚管更有利于控制地表沉降和侧墙变形。

(5)浅埋暗挖隧道,在初期支护变形速度基本稳定的情况下,应及时浇筑二次衬砌。

(6)加强监控量测,对于复杂环境条件下城市隧道的设计和施工具有重要的指导作用。

(7)目前制约城市道路修建的关键因素之一即是征地拆迁,而城市隧道的修建,通过工程措施可以减少征地拆迁工作量,具有很高的社会和经济意义。

## 参考文献:

- [1] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].  
JTG D70—2004, Code for Design of Road Tunnel[S].
- [2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社,2004.  
Wang Mengshu. General Theory of Underground Engineering Shallow Undercut Technology[M]. Hefei: Anhui Education Press,2004.

(下转第92页 To P.92)