

核心土留设对隧道工作面稳定性的影响

皇甫明, 孔 恒, 王梦恕, 姚海波
(北京交通大学 土建学院隧道中心, 北京 100044)

摘要: 针对深圳地铁一期工程部分暗挖区间隧道地表沉降远超过控制基准的问题, 通过三维有限元法系统地分析了台阶长度和核心土长度对隧道工作面的内空水平位移、工作面前方土体的地层沉降及其主应力分布等的影响, 得出了一些对浅埋暗挖法隧道具有实践指导意义的结论。

关键词: 隧道工程; 台阶长度; 工作面; 核心土留设

中图分类号: U 45; TU 942 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6915(2005)03-0521-05

EFFECT OF KEEPING CORE SOIL ON STABILITY OF TUNNEL WORKING FACE

HUANGFU Ming, KONG Heng, WANG Meng-shu, YAO Hai-bo
(College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the fact that the vertical displacements of ground surface are much greater than the permissible value in the period of the 1st Shenzhen urban tunneling operation and by means of the three-dimensional finite element method, the effect of the length of bench and core soil on the squeezing of tunnel working face, the displacement ahead of the face and stress distribution on the face are analyzed. Some valuable conclusions for the shallow tunnel construction are proposed.

Key words: tunnel engineering; bench length; working face; keeping core soil

1 引 言

近年来,我国特大城市加速推进地铁建设,具有中国特色的浅埋暗挖法在城市地铁隧道施工中正发挥着日益重要的作用。基于台阶法简单易行,可适用于各种地质条件,具有适合各种断面形式和变化断面的高度灵活性,且上、下台阶可以同时开挖等优点,我国目前的浅埋暗挖隧道多普遍采用台阶法施工。台阶长度和形状的合理选取无疑是应用台阶法的关键。

就目前而言,为保证隧道工作面的稳定以及控制地表沉降,地层预加固技术是必不可少的技术措

施。通常,稳定隧道工作面的方法可分为超前加固和正面加固 2 种。其中,超前加固使用锚杆、小导管注浆、管棚、水平旋喷注浆及预衬砌等方法;正面加固则有喷混凝土、玻璃钢锚杆、设置临时仰拱以及留设核心土等方法。正面土体加固在国内多采用留设核心土并喷混凝土技术,而国外多采用玻璃钢锚杆(管)技术^[1]。

大量的工程实践表明,对于在地质条件差、埋深浅的情况下进行施工的隧道而言,核心土留设的合理与否,对隧道工作面稳定性影响甚为显著。对于台阶法,尽管有一些与控制隧道围岩变形相关的施工技术^[2,3]和作用机理^[4-6],但台阶长度对工作面稳定性影响的分析,特别是核心土对隧道工作面稳

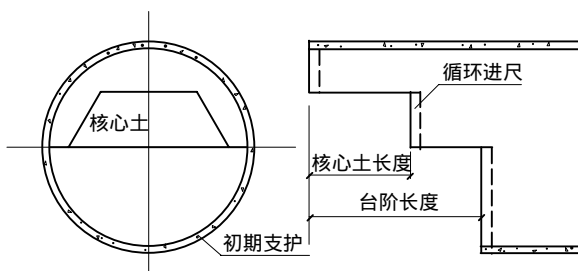
收稿日期: 2003-06-25; **修回日期:** 2003-08-30

作者简介: 皇甫明(1974-),男,1997年毕业于西南交通大学地下工程专业,现为博士研究生,主要从事隧道方面的科研与设计工作。E-mail: hfm009@sina.com。

定性影响的专门研究却较少^[7, 8]。针对深圳地铁施工过程中出现的问题, 本文依据三维有限元法, 对核心土留设对工作面稳定性的影响进行了系统研究。

2 有限元模型的建立

为了分析台阶长度和形状与隧道围岩变形之间的相互关系, 本文运用有限元软件 ANSYS5.7 进行数值分析, 其中土体采用 8 节点实体单元 (solid45), 初期支护喷射 C15 混凝土, 厚度 0.3 m, 采用壳单元(shell63)。分析时, 考虑土体服从 Drucker-Prager 屈服准则。ANSYS 程序中有单元“生”与“死”的功能, 可用于模拟分步开挖。开挖循环进尺为 1 m, 其步骤为: (1) 开挖上半断面环形部分; (2) 支护上台阶并开挖下台阶和核心土部分; (3) 对下台阶部分进行初期支护。台阶和核心土留设示意图见图 1。



注: 虚线部分表示隧道开挖循环进尺

图 1 核心土留设和开挖示意图

Fig.1 Sketch of leaving core and driving tunnel

为了利用结构的对称性减少运算时间, 采用 1/2 模型计算, 计算范围为 32.5 m×45.5 m×52 m(宽×高×长), 其中拱顶地层厚度为 13.0 m, 隧道形状为圆形, 直径为 6.5 m, 初始地应力按自重应力场考虑, 计算模型如图 2。计算中, 采用表 1 所示的几种计算工况, 地层及初期支护的参数见表 2。

3 有限元分析结果

3.1 留设核心土对工作面内空水平位移影响

(1) 无核心土

对于不同的台阶长度和形状, 隧道工作面中心线的内空水平位移如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 若不留设核心土, 则台阶愈长, 工作面的内空水平位移愈小。如与全断面的最大内空位移相比,

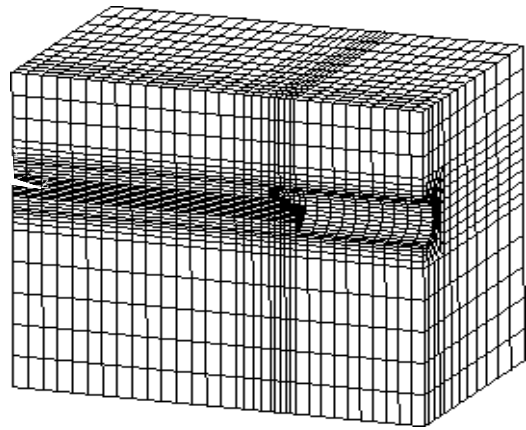


图 2 三维有限元模型

Fig.2 3D FEM model

表 1 有限元分析计算工况

Table 1 Cases studied by means of finite element method

计算工况	台阶长度/m	核心土长度/m
	0	0
	0.25D	0
	0.5D	0
	0.75D	0
	1D	0
	0.5D	0.2D
	0.5D	0.35D
	0.5D	0.5D

注: $D = 6.5$ m, 上、下台阶高均为 $D/2$, 核心土高 2.2 m。

表 2 地层及支护的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock and support

名称	E/MPa	μ	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
围岩	0.6×10^2	0.35	35	20	19.5
初期支护	2.1×10^4	0.20	3 000	50	23.0

台阶长 0.25D 时可减小 25.7%; 长 0.5D 时减小 29.6%; 长 0.75D 时减小 30.8%; 而长 1.0D 时仅减小 31.2%。可见, 当台阶长度大于 0.5D 时, 台阶长度对工作面内空水平位移的影响变化很小, 且最大值在上台阶。

(2) 留设核心土

如图 3 所示, 在相同的台阶长度条件下, 核心土留设很大程度地减小了工作面内空水平位移量。

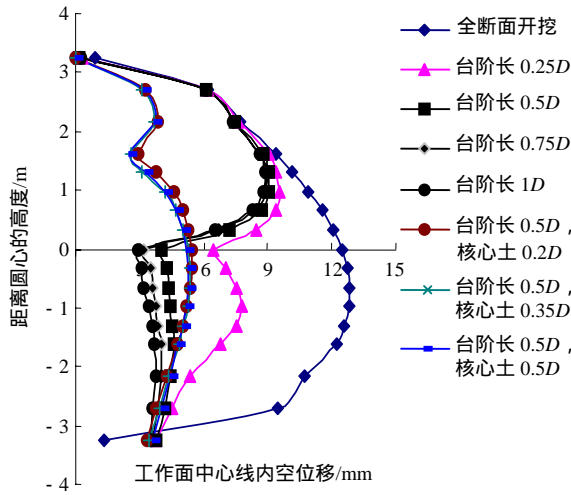


图 3 工作面土体向隧道内空的位移分布
Fig.3 Distribution of squeezing at the workface

但随核心土长度的增大，其抑止水平位移效果并不明显。例如，全断面开挖时，工作面最大的内空水平位移为 12.90 mm；台阶长为 0.5D，且不留设核心土时，最大值为 9.08 mm；台阶和核心土的长度均为 0.5D 时，最大值仅为 5.30 mm。值得一提的是，最大的内空水平位移处于下台阶。

3.2 核心土对工作面前方地层下沉的影响

图 4 表明了在不同台阶长度和核心土长度下，工作面前方地层下沉的变化趋势。

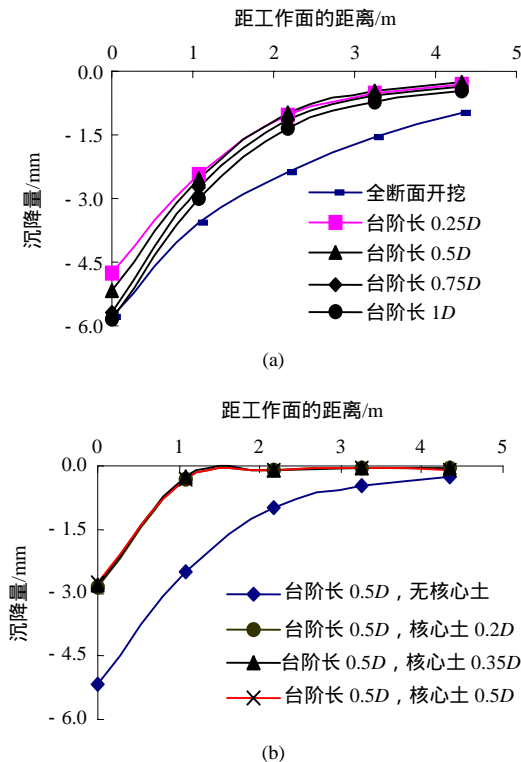


图 4 工作面前方地层沉降量与距离的关系
Fig.4 Settlement of ground in front of the work face vs. distance from the work face

(1) 无核心土

不留设核心土时，如图 4(a)所示，适宜的台阶长度对控制地层下沉有一定的作用，但效果不如抑止水平位移明显。台阶长度为 0.5D 时的抑止地层下沉效果不如台阶长度为 0.25D 时。而台阶长度为 1D 时，工作面拱顶的沉降量大于全断面开挖所引起的沉降量，分析其产生的原因，很可能与工作面到初期支护闭合的距离长有关。以上分析表明，尽管台阶的留设对地层下沉有一定的控制作用，但作用甚微。值得注意的是，台阶长度过短或过长均不利于开挖面的稳定，而是存在一个合理值。

(2) 留设核心土

如图 4(b)所示，留设核心土可有效地减小工作面前方土层的下沉，故可增强工作面的稳定性。

在台阶长度为 0.5D 的情况下，留设长度为 0.5D 核心土的抑止地层下沉曲线和长度为 0.2D 的基本重合。此外，图 4(b)也表明，在不考虑施工扰动的情况下，留设核心土可以减小对前方土体扰动的范围。研究表明，当留设的核心土长度和台阶长度相同时，也可以得出类似的结论，即台阶长度和核心土长度皆存在最佳值。

3.3 对工作面大、小主应力分布的影响

很显然，若无核心土，则隧道工作面的土体为平面应力状态。如果主应力较大，则很可能因土体松弛而发生破坏。对于不同台阶长度和台阶形状的情况，隧道工作面中心线的大、小主应力分布如图 5 所示。在全断面情况下，拱顶下面 1 m 和隧道底部上面 1 m 的范围属于双向受力状态，因此很可能在这一部分发生破坏；当台阶长度为 0.25D 时，拱顶下面 1 m 至上台阶底部上面 1 m 的范围属于双向受力状态，故可能在这一部分发生破坏；随着台阶长度的变化，这个范围基本相同。但当留设核心土时，从图中可看出，工作面大、小主应力的分布得到显著改善，且最小主应力较大。这使得工作面的土体易于维持三向应力状态，从而保证了工作面的稳定。

4 工程应用

为合理确定核心土(台阶)长度，针对深圳地铁一期工程 6 标段前期施工台阶长度偏小(一般为 2~3 m)，核心土形同虚设，出现了一系列类似于全断面开挖所带来的问题(洞内坍塌不断，进尺不足 1

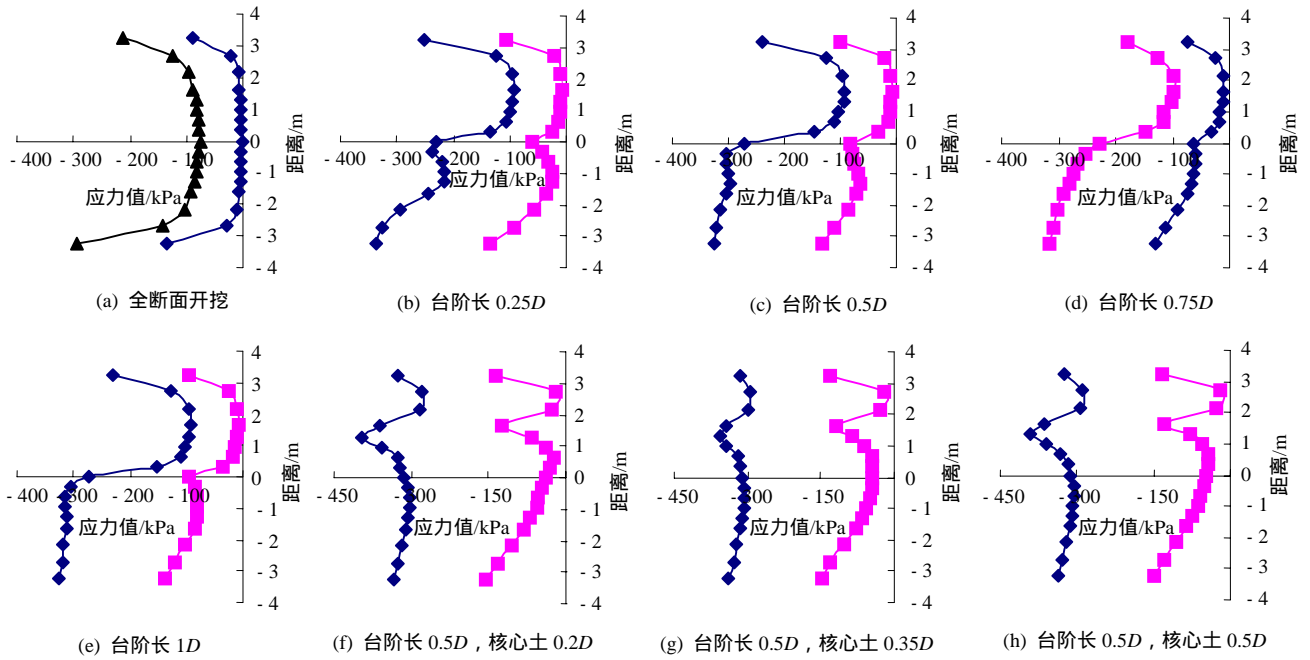


图 5 工作面大、小主应力的分布

Fig.5 Distribution of major and minor principal stresses on workface

m/d，且地表沉降量过大，一般为 200 ~ 400 mm)。利用数值分析的结果，提出了一个全新的核心土留设方法：即在可能的条件下，使台阶长度与核心土长度保持一致，并控制为(0.5 ~ 1.0)D，且确保一定的核心土高度和宽度。

为此，在分析现场实测地表沉降资料^[9]的基础上，依据 ANSYS 数值模拟分析的结果，针对 6 标段的地质条件，确定核心土(台阶)长度控制在 6 ~ 8 m(不大于 1B, B 为隧道开挖跨度)。核心土参数调整后，应用表明：不但工作面进尺提高到 4 m/d，而且地表沉降也控制在 100 ~ 200 mm，取得了明显的技术经济效果。核心土参数调整前后地表沉降对比结果见表 3。

表 3 地表沉降测量结果

Table 3 Vertical displacements of ground surface

测点	地层	台阶长度/m	地表沉降/mm	备注
1	砂质粘土	2 ~ 3	- 235.2	参数调整前
2	砂质粘土	2 ~ 3	- 280.1	参数调整前
3	砂质粘土	6 ~ 8	- 175.8	参数调整后
4	砾质粘土、全风化花岗岩	2 ~ 3	- 78.4	参数调整前
5	砾质粘土、全风化花岗岩	6 ~ 8	- 165.1	参数调整后

值得一提的是，由于改变核心土参数并不额外增加成本，因此对这项技术手段，施工单位乐于接受。截止目前，该技术措施已在深圳多标段施工中得到推广。

5 结 论

(1) 核心土的正确留设能显著改善隧道工作面的稳定性，但核心土长度存在最佳值。相应地，台阶长度也存在最佳值。研究表明，台阶长度一般应控制在 1D(或隧道开挖宽度)以内为宜。

(2) 在可能的条件下，尽量使核心土的长度和台阶长度相等，并保证一定的宽度和高度。现场实践表明，这是一个简单易行的技术措施，值得推广应用。

(3) 留设核心土能显著地减小地层的水平位移，同时也有抑止工作面前方地层的垂直位移的作用。

(4) 留设核心土可使工作面前方土体处于三向应力状态，因此核心土的留设可有效降低工作面土体的松弛范围。这一点已被现场实测所证实。

参考文献(References)：

[1] Lunardi P, Bindi R. The evolution of reinforcement of the advance

- core using fiber glass elements for short and long term stability of tunnels under difficult stress-strain conditions : design , technologies and operating methods[A]. In : Proc.12th Int. Conf. AITES-ITA 2001 World Tunnel[C]. Milan : MILAN-ITALY Press , 2001. 309 – 322.
- [2] 王梦恕. 北京地铁浅埋暗挖法施工[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(1) : 52 – 61.(Wang Mengshu. The boring excavation method and construction in Beijing metro[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1989 , 8(1) : 52 – 61.(in Chinese))
- [3] 刘昌用, 蒋中庸, 王梦恕. 试论城市地下工程浅埋暗挖技术[J]. 现代隧道技术, 2002, (增刊) : 10 – 26.(Liu Changyong ,Jiang Zhongyong , Wang Mengshu. Study on the boring excavation method and construction in the urban underground engineering[J]. Modern Tunneling Technology , 2002 , (Supp.) : 10 – 26.(in Chinese))
- [4] 常艏东. 管棚法超前预支护作用机理的研究[博士学位论文][D]. 成都 : 西南交通大学, 1999.(Chang Shaodong. Research on pre-brace mechanism of pipe umbrella method[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu : Southwest Jiaotong University , 1999.(in Chinese))
- [5] 王明年, 张建华. 工程措施对控制隧道围岩变形的力学效果研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5) : 27 – 30.(Wang Mingnian ,Zhang Jianhua. Mechanical effects of engineering measures in controlling the deformation in the surrounding rock of the tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1998 , 20(5) : 27 – 30.(in Chinese))
- [6] 陶龙光, 侯公羽. 超前锚杆的预支护机理的力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3) : 242 – 249.(Tao Longguang , Hou Gongyu. Study on the mechanical model in pre-support mechanism of foreboding bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1996 , 15(3) : 242 – 249.(in Chinese))
- [7] 铁道部第十六工程局. 城市松散含水地层中复杂洞群浅埋暗挖施工技术研究[R]. 北京 : 铁道部第十六工程局, 1999.(China 16th Bureau Group Limited Company. Study on the boring excavation method and construction technique of multi-tunneling at shallow depth in loose ground containing water[R]. Beijing : China 16th Bureau Group Limited Company , 1999.(in Chinese))
- [8] Seki J ,Noda K ,Washizawa E ,et al. Effect of bench length on stability of tunnel face[J]. Tunneling and Ground Conditions , 1994 , 10(2) : 21 – 31.
- [9] 北京交通大学隧道及地下工程试验研究中心. 地层大变形机理与控制措施研究中期报告[R]. 北京 : 北京交通大学, 2002.(Research Center of Tunneling and Underground Engineering , Beijing Jiaotong University. Mechanism of stratum deformation and its control practice of the stage report[R]. Beijing : Beijing Jiaotong University , 2002.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章：

- (1) 基于随机 – 模糊理论的岩石抗剪强度参数的确定；
- (2) 基于模式 – 遗传 – 神经网络的流变参数反演；
- (3) 岩体 p 型自适应块体单元法研究；
- (4) 结构性黄土的本构模型；
- (5) 岩石类非均质脆性材料破坏过程的数值模拟；
- (6) 下凹地形下采空区处理方案的相似模拟研究；
- (7) 风化岩石的破碎分形及其工程地质意义；
- (8) 金口垃圾填埋场内大型建筑物地基基础及安全性研究；
- (9) 研究进展与工程与实录。