软土地层土压平衡盾构法施工的模型试验研究

徐前卫[1,2]，朱合华[3]，廖少明[3]，郑七振[1]，周 奎[1]

（1. 上海理工大学土木工程系，上海 200093；2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海 200030；
3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092）

摘 要：我国沿海地区以及许多内陆城市的地下广泛分布着很深的软黏土沉积层，目前该区域的许多城市都已兴建或正在筹建地铁。为确保在这种软弱地层中能采取与之相适应的盾构工法、减少对周围环境的影响以及降低工程造价，以上海地铁 M8 线某区间隧道工程为研究背景，采用室内模型试验的方法，进行了土压平衡盾构针对软土地层的适应性试验研究。为此，首先根据相似理论和模型试验方法建立了土体－盾构机器之间的相似系统；随后，针对上海地区特定的软土地层，进行了人工模型土壤的配制和模型试验方法的设计，并利用直径 400 mm 的模型盾构机模拟直径 6340 mm 的原型盾构机；最后，进行盾构不同工作参数组合的掘削试验，并记录下试验过程中机器工作参数及土体内应力和变形变化的有关试验结果，通过对试验数据的整理与分析，得出了软土地层中土压平衡盾构法施工的一些有用的规律。

关键词：软土地层；模型试验；土压平衡盾构机；土体-盾构系统

中图分类号：U455.43 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2007)12－1849－09

作者简介：徐前卫(1973－)，男，安徽巢湖人，博士，主要从事软土地下工程领域的研究工作。E-mail: xuqwtju@126.com。

Experimental study on EPB shield tunnel construction in soft ground

XU Qian-wei[1,2]，ZHU He-hua[3]，LIAO Shao-ming[3]，ZHENG Qi-zhen[1]，ZHOU Kui[1]

(1. Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The very deep sedimentary deposits of soft clay are widely distributed over the underground of coastal areas and many interior cities of China. At present, in many cities of such regions, subways have been constructed or have beeing prepared for construction. In order to guarantee the practical use of the shield tunnel method in this kind of weak stratum, and to reduce environmental influence as well as the project construction cost, the interval tunnel of Shanghai subway line M8 was taken as research background, and model tests were carried out to simulate tunneling excavation with EPB shield machine. Therefore, according to the similarity theory and model test method, the similar system between the soil body - shield machine had been established. Afterwards, the artificial soil was configured to formulate the soft soil of Shanghai area and similarity model experiment procedures were designed for tunneling in such ground. In addition, the prototype shield machine with diameter of 6340 mm was simulated by a microtunneling machine with diameter of 400 mm. Finally, working parameters of various machines were combined for tunneling tests while the test results of machine and soil body were recorded simultaneously. Based on the analysis of test results, some useful conclusions were drawn for EPB shield machine tunneling in soft ground.

Key words: soft ground; model test; earth pressure balance shield machine; soil body-shield machine system

0 引 言

上海地处东海之滨，地下广泛分布着很深的软黏土沉积层，它具有土壤颗粒细（一般在 0.1～0.002 mm）、抗剪强度低、含水率高（w=40%以上）、天然孔隙比大（e=1.5）、灵敏度高（S_t=4~5）、高压缩性和流变性等显著的工程特性，而且土体经扰动后强度明显降低，且在长时间内存在固结和次固结沉降[1]。我国沿海其它地区以及许多内陆城市（如武汉、南京等地）也广泛分布着这种类似的软黏土沉积层，目前该区域的许多城市都已兴建或正在筹建地铁。盾构工法因其先进的施工工艺和不断完善的施工技术，以及

基金项目：国家 863 计划项目（2006 AA11Z102）；上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金；上海理工大学博士科研启动基金
收稿日期：2006－11－21

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在施工过程中对周围环境影响小、自动化程度高、施工快速、安全、不受气候及地面交通影响等优点而受到重视，成为城市地下隧道的主要修建方法之一。

由于受地质条件和施工工艺的限制，盾构推进过程中掘削参数的变化难免会对地层产生扰动影响，诸如地表沉降、分层土体移动以及土体内应力、孔隙水压力、强度和承载力等物理力学参数的变化都是不可避免的；而土体的扰动往往又引发一系列环境病害，如造成周围建筑物开裂、倒坍、邻近管线的破损等[2]。为确保在这种软弱地层中能够采取与之相适应的盾构工法和降低工程造价，本文以上海轨道交通 M8 线某区间隧道工程为研究背景，采用室内模型试验的方法，进行了土压平衡盾构不同工作参数组合的掘削试验，研究土压平衡盾构法在这种地层中施工的适应性。

目前，关于盾构法施工的模型试验主要分为两类，一类是以离心场模型试验为代表[3-5]，另一类则是以重力场模型试验为代表[6-10]，上述试验多属于检验盾构机械的掘削性能和工法选择合理与否的验证性试验。笔者开展了砂土地层土压平衡盾构法施工的系列地层适应性模型试验研究[11-13]。

1 土体－盾构系统的相似理论

1.1 土体－盾构系统的概念

盾构法施工实质上是一种土体与盾构机器之间相互作用的过程。因此，如果要想通过模型试验的方法来研究盾构对地层的适应性，就必须将土体与盾构机器作为一个系统即“土体－盾构系统”来加以研究，并确定哪些参量是影响系统性能的主要因素，在此基础上再建立起模型与原型之间的联系桥梁[14-15]。

所谓土体－盾构系统，是指建立土体性状与盾构工作参数之间的平衡体系，并研究系统参量的改变对平衡体系的影响。从本质上来说，土体－盾构系统主要是研究土体与盾构机器之间相互作用的规律，它属于研究土体与机器相互作用的土体－机器系统的一种。该系统的特点是主要研究土体与机器部件之间的相互作用，并通过实物或模型试验来研究其各自的性能[16]。

1.2 土体－盾构系统的相似准则[16]

（1）系统参量的确定

在早期的研究中，曾提出土压平衡盾构掘进模型试验所涉及的全部物理量有 17 个[14-15]，但是变量越多，试验的复杂程度越高、精度越难控制。故此，从便于试验的角度出发，重新界定的系统参量为：

土体特性：土体变形模量 E、黏聚力 c、内摩擦角 φ，土体密度 ρ。

土体－机械系统：覆土厚度 H、直径 D、盾构推进速度 v、螺旋器转速 n、刀盘开口率 ξ。

因变量：刀盘驱动扭矩 T、推进力 P、土体内部应力 σ、土体变形量 δ。

（2）相似准则的推导

根据相似第 2 定理，选取三个待求物理量为独立的基本量，此时 n = 13，m = 3，$n-m$ = 10，即无量纲因子的个数为 10，它们分别是：$\pi_1=\dfrac{T}{EH^3}$，$\pi_2=\dfrac{P}{EH^2}$，$\pi_3=\dfrac{\sigma}{E}$，$\pi_4=\dfrac{\delta}{H}$，$\pi_5=\dfrac{D}{H}$，$\pi_6=\dfrac{\rho v^2}{E}$，$\pi_7=\dfrac{nH}{v}$，$\pi_8=\dfrac{c}{E}$，$\pi_9=\varphi$，$\pi_{10}=\xi$。

根据 Buckingham 定理，若要求模型与原型相似，则应有 $(\pi_i)_{\mathrm{p}}=(\pi_i)_{\mathrm{m}}$（$i$＝1，…，10）。

由于模型与原型都处于同一引力场中，因而重力加速度是相等的，应用量纲分析法确定结构模型的相似条件，可得如下的比例关系：$C_{\mathrm{T}}=C_{\mathrm{E}}C_{\mathrm{l}}^3$，$C_{\mathrm{P}}=C_{\mathrm{E}}C_{\mathrm{l}}^2$，$C_\sigma=C_{\mathrm{E}}$，$C_\delta=C_{\mathrm{l}}$，$C_{\mathrm{H}}=C_{\mathrm{D}}=C_{\mathrm{l}}$，$C_\rho C_{\mathrm{v}}^2=C_{\mathrm{E}}$，$C_{\mathrm{n}}C_{\mathrm{l}}=C_{\mathrm{v}}$，$C_{\mathrm{c}}=C_{\mathrm{E}}$，$C_\varphi=1$，$C_\xi=1$，式中，$C_n$ 为转速的相似常数，其余皆类推。从中可见，只要选定 C_{l}，C_{E} 和 C_ρ，就可确定其它的相似关系。本次模型试验所选取的几何相似比为 C_{l}=16。

2 模型土层的制备

在进行正式试验前，须进行原状土的土工试验，以获取土体材料的相关物理力学指标，并作为相似试验模型土配制的参照依据。模型试验所参照的原型土取自具有代表性的上海地区第④层淤泥质黏土层，表 1 列出了这种土的实验结果。

按照式（3），要求原型土体材料与模型土体材料的强度相似比 C_σ、重度相似比 C_γ 以及几何相似比 C_{l} 满足关系式 $C_\sigma=C_\gamma C_{\mathrm{l}}$，根据上述相似关系，就可以进行模型土的配制。选择模型材料除了满足材料选取的一般原则外，主要应使其在试验载荷作用下，具有适宜的应变值和位移值。经过大量的试验反复验证，最终确定采用如下的方法来配制[16]：重晶石粉、粉煤灰、铁粉、高岭土、红粉砂、黏土粉、机油及水，按照一定的配合比经过拌和均匀后加压，再静置一段时间后，就可以得到性能比较稳定的人工模型土，其各项性能指标参见表 1。

表 1 土的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil

土层名称	密度 /(kg·m^{-3})	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	抗压强度 /kPa
原状土	1730	22	10.5	31.4
模型土	1856	1.88	11.3	3.876

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　模型试验的设计

3.1　模拟试验台

整个试验系统包括试验土箱、模型盾构、驱动系统和测试系统 4 部分组成，如图 1 所示。

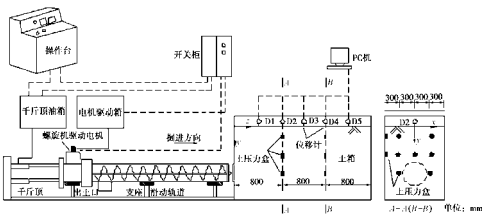


图 1　试验原理图

Fig. 1 General view of the model test

本次试验所用模型土箱呈长方体状，其尺寸为 2.4 m×2.4 m×1.2 m。箱体一端开孔，孔径为 42 cm，以便模型盾构进入；顶部呈敞口，便于测量地表变形。

模型盾构为土压平衡式盾构，直径 40 cm。为保持开挖面的土压平衡状态，一方面在模型盾构的尾部设置阀门，控制排土量；另一方面还要在盾构机前方土舱内布置 4 个微型压力传感器来控制土舱压力值。

模型盾构的推进装置采用电动控制系统；切削刀盘的转动采用液压传动系统，并可实现自动调速。

盾构推进杆上设有位移传感器，用来记录推进行程；利用埋设在土体中的应变式压力传感器可以记录盾构推进过程中对土体产生的施工压力；地表变形测试采用在土体表面放置玻璃片，其上再接位移计，如图 2 所示；刀盘转速、盾构推进速度和千斤顶顶进推力可以通过安装在盾构机上的相关设备自行给出。

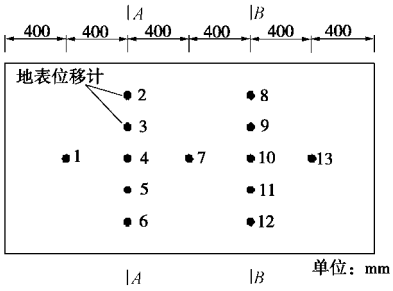


图 2　地表位移计布置图

Fig. 2 Arrangement of surface displacement sensors

3.2　试验内容设计

表 2 给出了本次试验的主要内容（H 表示覆土厚度，D 为盾构直径），试验共进行了四次，分别改变埋深直径比 H/D、刀盘开口率 ξ、螺旋器转速 n 以及盾构推进速度 v。

表 2　试验内容

Table 2 Content of model test

试验组别	埋深直径比 H/D	刀盘开口率 ξ/%	刀盘转速 n/(rpm)	推进速度 v/(cm·min^{-1})	土层性质
No. 1	2	36	2 3	2 2	软黏土
No. 2	3	36	4 5	2 2	软黏土
No. 3	4	36	2 4	2 2	软黏土
No. 4	4	54	3 6	3 4	软黏土

4　试验结果及分析

将试验结果分为地表隆起和地表沉降两大类来分析，限于篇幅的缘故，除特别说明外，本文主要以 No. 1 次试验结果即地表隆起的情形为例加以介绍。

4.1　螺旋器转速与推进速度

由图 3 可以看出，在推进的前半段（0～92 cm），刀盘转速相对固定在 2 r/min，而后半段则变为 3 r/min，即后半段排土速度加快。虽然按照试验设计的要求，盾构推进速度在整个过程中都应该保持在 3 cm/min，但是实测结果主要集中在 2～4 cm/min 之间。

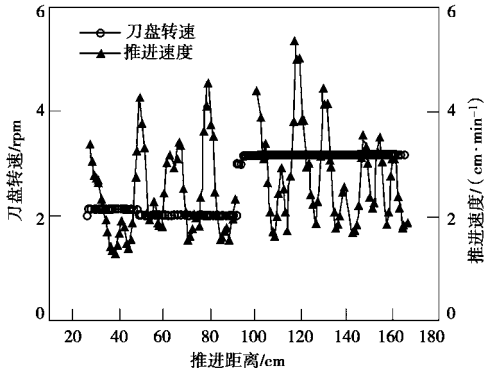


图 3　刀盘转速与推进速度

Fig. 3 Rotation speed of cutter vs. driving speed

理论上讲，只要盾构推进速度与刀盘转速组成的平衡体系得以满足时，就会保持盾构在土压平衡状态下工作。通常刀盘转速是易于固定的，而盾构推进速度则取决于土体掘削的难易程度和千斤顶推力大小。当刀盘转速相对固定时，推进速度将直接影响单位时间排出土的重量，图 4 表示的是单位时间排土量与盾构推进速度的关系，二者之间近似成线性关系。

4.2　排土效率与土舱压力

图 5 表示的是整个推进过程中，排土效率与土舱压力随推进距离的变化关系。可以看出，在刀盘到达 70 cm 之前，虽然排土效率一直是呈上升趋势，但是均低于 100%，故此，舱内土体受到挤压，土舱压力也呈现出上升趋势。此后，一旦排土效率过高（大于

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

100%），亦即排土速度过快时，对应的土舱压力就会下降；反之，当排土效率重新降低到 100%以下时，土舱压力又会重新上升。确切地说，由于螺旋器转速相对固定，而推进速度始终在变化中，推进速度慢则排土效率高，反之则排土效率低，因此排土效率主要受推进速度的影响。再者，由图 5 还可看出，在推进的后半段由于转速加大，故排土效率总体上是较高的，此时对应的土舱压力是呈下降趋势。

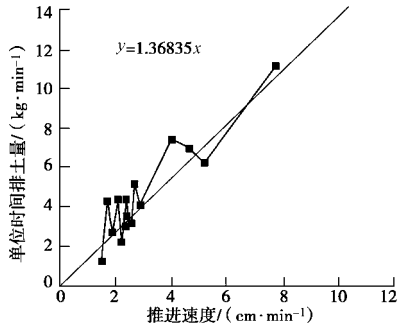


图 4 单位时间排土量与推进速度

Fig. 4 Soil dumping volume per minute vs. driving speed

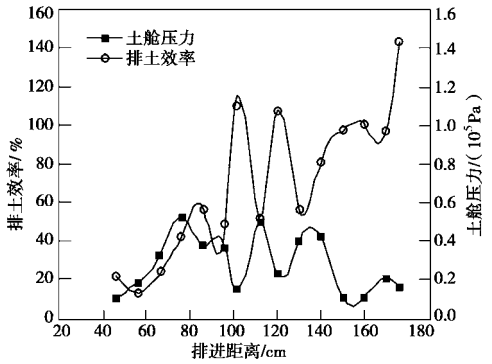


图 5 土舱压力与排土效率随推进距离的变化

Fig. 5 Chamber pressure and soil dumping efficiency vs. propelling distance

将图 5 中每点处对应的土舱压力和排土效率绘制成图，如图 6 所示。可以看出，土舱压力随着排土效率的增大而呈负指数减小。

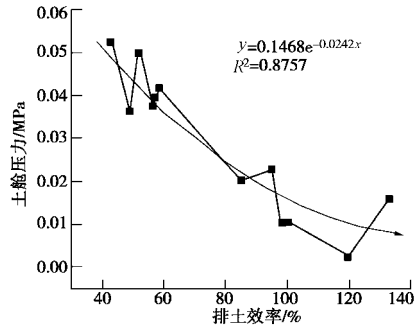


图 6 土舱压力与排土效率

Fig. 6 Chamber pressure vs. soil dumping efficiency

4.3 推进速度与土舱压力

图 7 表示的是在推进过程中，推进速度与土舱压力的对应关系。可以看出，推进速度的增大或减小，同样对应土舱压力的增大或减小，这是因为在刀盘转速相对固定的情况下，推进速度的变化直接关系到排土效率的大小（如图 8 所示），而排土效率的变化又是导致土舱压力变化的直接原因。

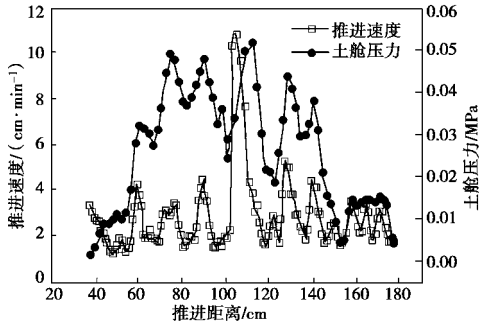


图 7 推进速度与土舱压力随推进距离的变化

Fig. 7 Driving speed and chamber pressure vs. propelling distance

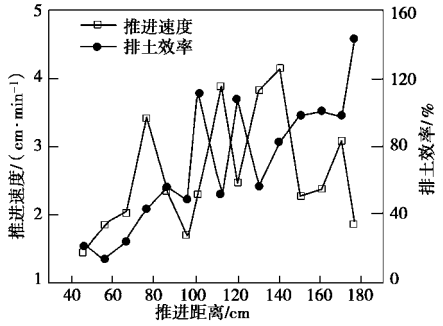


图 8 推进速度与土舱压力

Fig. 8 Driving speed vs. chamber pressure

4.4 排土效率与地表位移

图 9 表示的是在推进过程中，地表#7 点的位移与排土效率随盾构掘进距离的变化情况。总的来说，在排土效率没有达到 100%之前，地表各点的位移呈隆起现象，而当排土速度加快，排土效率超过 100%时，地表位移又呈逐渐下降趋势。但由于在掘进过程的绝大部分时间内，排土效率都低于 100%，故地表点的位移主要表现为隆起。

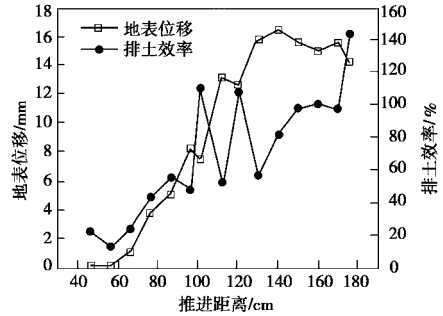


图 9 排土效率与#7 点位移

Fig. 9 Soil dumping efficiency vs. the displacement of point No. 7

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.5　地表位移

（1）No. 1 次试验地表隆起

图 10 和 11 分别表示的是推进过程中 *A-A* 截面和 *B-B* 截面上各点位移随掘进距离而变化的情况。其中，*A-A* 截面距离盾构始发端 80 cm 处，*B-B* 截面距离盾构始发端 160 cm。从这两个图可以看出，*A-A* 截面在刀盘通过约 1*D* 距离后位移开始下降，而 *B-B* 截面在刀盘距其前方约 2.5*D* 距离时就开始出现明显的地表隆起。由此可见，当排土效率较低导致地表隆起时，刀盘前方 2.5*D* 和刀盘后方 1*D* 范围内的地表土体均在位移影响范围内，同时也说明由排土效率低而引起的位移主要集中在刀盘前方。

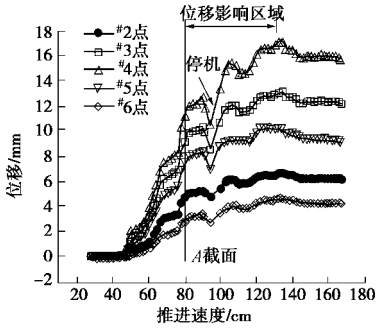


图 10 *A-A* 截面上各点位移

Fig. 10 Displacement of points on section *A-A*

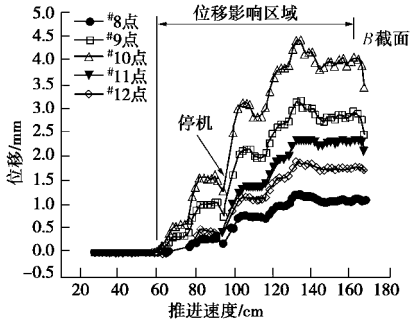


图 11 *B-B* 截面上各点位移

Fig. 11 Displacement of points on section *B-B*

图 12 和 13 分别表示 *A*，*B* 两横截面上各点在盾构推进到不同位置处的竖向位移曲线。结合图 10 和图 11，可以看出，在掘进过程中，截面中点（如#4，#10 点）的位移最大并高于两侧各点的位移。此外，还可看出在盾构轴线附近，左侧点（#3，#9 点）的位移要相应高于右侧对应位置点（#5，#11 点）的位移，这可能是由于刀盘顺时针旋转使得左侧土体有着向上的趋势所致，同时也说明刀盘的旋转方向对土体的位移有影响。

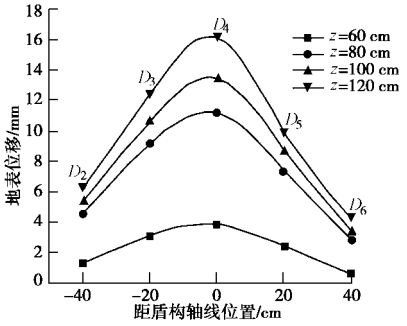


图 12 *A-A* 截面竖向位移曲线

Fig. 12 Vertical displacement of cross section *A-A*

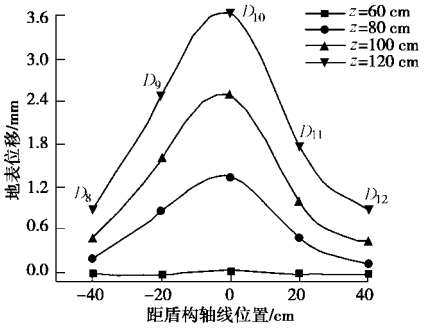


图 13 *B-B* 截面竖向位移曲线

Fig. 13 Vertical displacement of cross section *B-B*

图 14 表示的是沿盾构轴线方向的各点（#1，#4，#7，#10，#13）在盾构推进至不同位置时盾构轴向的位移变化情况，从中可以看出，随着刀盘的前移，地表隆起位移以波峰的形式向前移动。比较图 10～14 还可以看出，沿盾构推进轴线方向，同一时刻 *A* 截面上各点的位移均高于 *B* 截面上各点的位移，这说明由于排土效率低导致在刀盘前方形成一椭球冠状的隆起，并且沿着推进的纵向和横向都可近似认为服从正态分布。

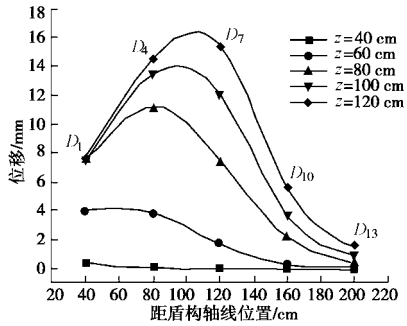


图 14 不同时刻轴向位移

Fig. 14 Longitudinal subsidence of earth surface at different time

（2）No. 2 次试验地表沉降

图 15 和 16 分别表示 *A* 截面上各点在整个推进过程中的位移变化情况以及 *A* 截面在不同时刻的横向沉

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

降曲线。在推进的前半段（0～88 cm），由于排土效率不高，故盾构轴线上土体略有隆起，而在后半段，由于排土效率较高，故此地表土体表现为下沉。

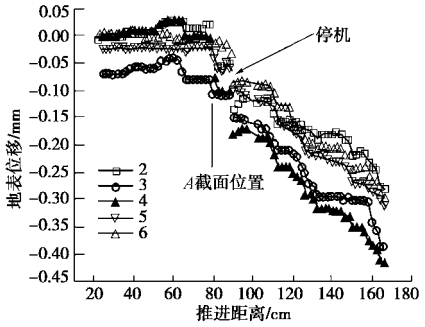


图 15 *A-A* 截面上各点位移

Fig. 15 Displacement of points on section *A-A*

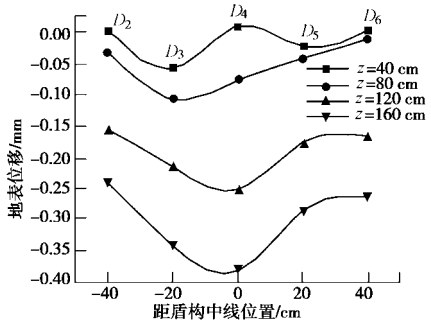


图 16 *A-A* 截面竖向位移曲线

Fig. 16 Vertical displacement of cross section *A-A*

需要注意的是，由于中间停机的缘故，导致地表土体在停机期间会产生很大的沉降（如图 15 所示），并且中间点的沉降量要高于轴线两侧点的沉降量，这是因为盾构在施工过程会对土体产生扰动，因此当停机后扰动土体将产生固结并进一步蠕动，从而导致地表进一步下沉。当刀盘通过 *A* 截面后，*A* 截面上各点仍然下沉，除与排土效率过高有关外，还与土体的进一步固结有关，并且中间点的沉降值仍然要大于两侧点的沉降值。

图 17 和 18 表示 *B* 截面上各点在整个推进过程中的位移变化情况以及 *B* 截面在不同时刻的横向沉降曲线。比较图 15～18 可知，可以看出，沿盾构推进轴线方向，同一时刻 *A* 截面上各点的沉降量均大于 *B* 截面上各点的沉降值，这说明由于排土效率较高导致在刀盘前方形成一椭球冠状沉降，并且沿着推进的纵向和横向都可近似认为服从正态分布。

4.6 附加土压力

（1）*A-A* 截面盾构顶部轴向附加土压力

附加土压力是指盾构推进过程中的测定土压减去静止状态土压力的值。图 19 表示的是在推进过程中，*A* 截面盾构上方同一高度处（y =−600 mm）的 3 个土压力盒的附加土压力值。可以看出，在刀盘到达前均增大得较快，并在刀盘刚好通过时压力值最大，而当刀盘到达 120 cm 处，即离开 *A* 截面 1*D* 距离时，土压力值才基本稳定。此外，在刀盘到达前，三个点测出的附加压力值大致相等，但是当刀盘通过后，两侧的附加土压力值下降较快，而中间的则相对较高，并且在整个过程中，中间压力盒的土压力值始终保持最大，这说明盾构正上方土体受到的扰动较大，而轴线两侧受到的扰动相对较小。

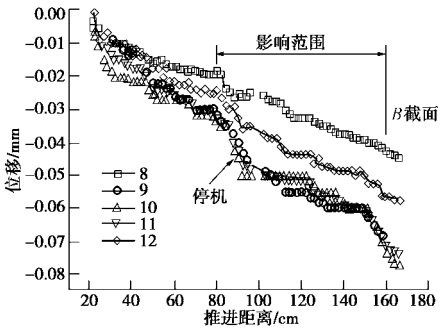


图 17 *B-B* 截面上各点位移

Fig. 17 Displacement of points on section *B-B*

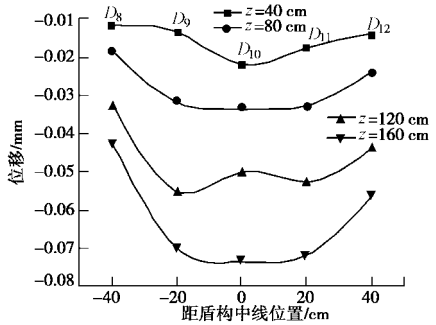


图 18 *B-B* 截面竖向位移曲线

Fig. 18 Vertical displacement of cross section *B-B*

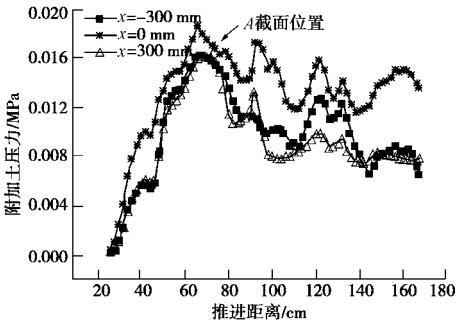


图 19 *A-A* 截面盾构顶部附加土压力

Fig. 19 Additional earth pressure at the same level on section *A-A*

（2）*A-A* 截面盾构左侧轴向附加土压力

图 20 表示的是 *A* 截面左侧（x=−300 mm）不同深

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度处的 3 个土压力盒的附加土压力值。可以看出，当盾构刀盘到达前，土压力值是一直上升的，并在到达时达到最大；在刀盘通过后，土压力值逐渐下降，并在通过约 1*D* 距离时土压力值趋于稳定，但是要高于起始状态的静止土压力值。此外，随着深度加大，其对应的轴向附加土压力值也越大。再者，还可看出在刀盘到达前受到扰动最大的土压力，则在刀盘通过后其对应的土压力变化值也是最大。

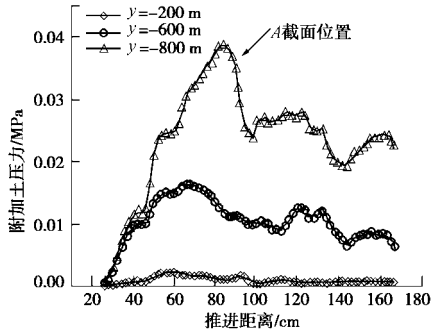


图 20 *A-A* 截面盾构左侧附加土压力

Fig. 20 Additional earth pressure at the left side of shield machine on section *A-A*

（3）*A-A* 截面箱壁侧向附加土压力

图 21 表示 *A* 截面左侧箱壁 y=−200，−600 mm 处在掘进过程中受到的垂直于盾构掘进方向的附加土压力值。可以看出，随着盾构的临近，土压力值逐渐增大，并在刀盘到达时最大。需要注意的是，y =−200 mm 处在刀盘通过后，压力趋于稳定变化不大，而 y =−600 mm 处则在刀盘通过后压力下降幅度大，并在推进至 140 cm 以后才有所平稳；同时，在 91 cm 处的停机反映在土压力的变化上，也是 y =−600 mm 处变化较明显，这说明离盾构掘削扰动区越近的点处，其侧向附加土压力值受到的影响也是越大。

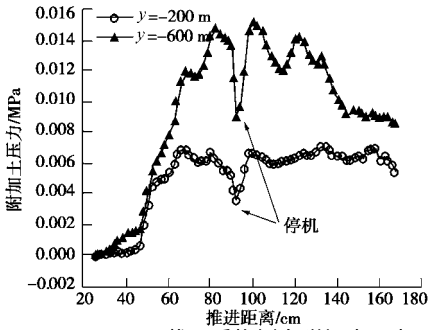


图 21 *A-A* 截面盾构侧向附加土压力

Fig. 21 Additional lateral earth pressure on section *A-A*

（4）*B-B* 截面盾构顶部轴向附加土压力

图 22 表示的是在推进过程中，*B* 截面盾构上方同一高度处（y =−600 mm）的 3 个土压力盒的附加土压力值的变化情况。可以看出，在刀盘推进至 40 cm 时，土压力出现明显地上升。在刀盘到达至 140 cm 之前，土压力总体来说是上升的，但在此之后，土压力值呈下降趋势，而并没有在到达 *B* 截面时达到最大，这是因为此时的排土效率较高，基本维持在 100%或 100%以上所致，这一点可以通过图 23 看出。由此可见，一方面，盾构机的掘进对其前方 2*D* 范围内的土体应力产生影响；另一方面，盾构机的排土效率对刀盘前方土体的附加应力值也有着重要的影响。

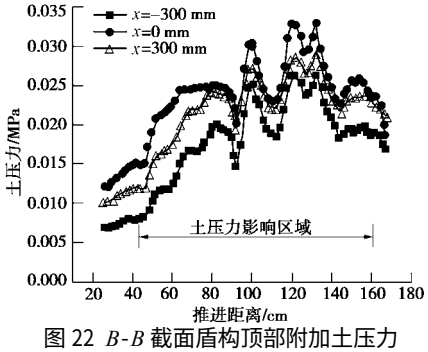


图 22 *B-B* 截面盾构顶部附加土压力

Fig. 22 Additional earth pressure at the same level on section *B-B*

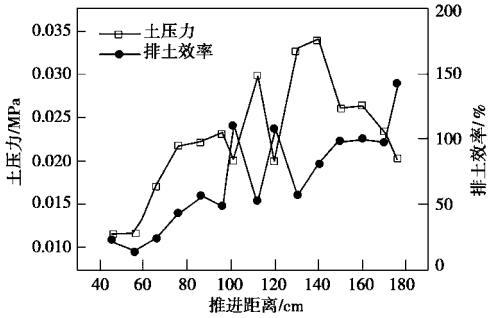


图 23 排土效率土压力

Fig. 23 Soil dumping efficiency vs. additional earth pressure

4.7　千斤顶推力

图 24 表示的是在推进过程中千斤顶推力的变化情况。在掘进的前半段即是 0～90 cm 这段，推力增长较快，而在停机后重新推进时，动态摩阻力由停机前的 8.76 kPa 降为 4.3 kPa，这与砂土地层中因停机而导致动态摩阻力增加的趋势刚好相反[11-13]。这里的动态摩阻力实质上就是单位面积盾壳上受到的摩擦阻力。之所以在这两种土层中会有截然不同的结果，一方面是由于砂土地层的孔隙较大，土体受施工扰动后将形成超静孔隙水压力区，在长时间停止顶进后，超孔隙水压力下降，孔隙水消散，土体发生固结作用，引起土层固结沉降，这样四周松土就会坍落在管壁上并抱实，故而导致土体与管壁之间摩擦阻力的增大；另一方面过高的孔隙水压力的消散，将会导致直接作用在盾构外壳上的有效应力增加，从而使得摩擦阻力增大，土体－盾壳面上的抗剪强度得以提高。而软黏土地层由于孔隙小，且停机时间较短，盾构推进产生的过高孔隙水压力来不及消散，导致作用在盾壳上的有效应力相对减少，从而使得摩擦阻力相对减小。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

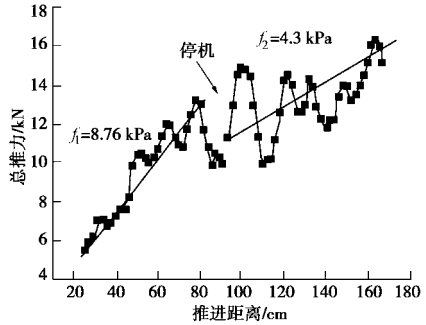


图 24 总推力随推进距离的变化

Fig. 24 Total thrust force vs. propelling distance

事实上，盾构机是一种具有一定长度的圆柱状机器，因此在推进过程中，如果埋深和地层条件不变的话，那么作用在刀盘正面的推力和盾壳上的摩擦力将是稳定的，相应的千斤顶推力也将是稳定的。为了试验方便，所用的模型盾构机长度与原型盾构机长度之间并不是按照一定的比例缩小，而是远远超出其对应的比例长度。故此，在刀盘正面推力相对维持稳定的情况下，随着模型盾构的推进，盾构外壳与土体的接触面积将越来越大，导致盾壳与土体之间的摩擦力越来越大，相应的千斤顶总推力也越来越大。为了消除试验过程中模型盾构长度过长导致的摩擦力越来越大的影响，将千斤顶总推力减去对应的摩擦阻力就得到作用在盾构上的相对稳定的正面推力，如图 25 所示。

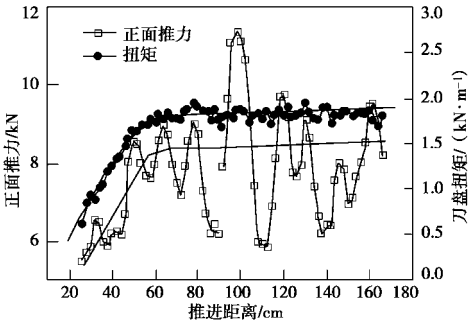


图 25 正面推力与扭矩随推进距离的变化

Fig. 25 Frontal thrust force and torque vs. propelling distance

4.8 扭矩

图 25 表示的是扣除摩擦力影响后的刀盘正面推力与扭矩随掘进距离的变化情况，可以看出，二者之间有着直接对应关系，并都在增加到一定值以后却趋于平缓。将正面推力和扭矩作图，如图 26 所示，二者之间存在明显的分段线性的对应关系，可见影响扭矩的主要因素还是刀盘正面推力的大小。现场实测结果表明，千斤顶推力与扭矩之间存在确实这种分段线性的关系[16]，这再次说明试验结果是可信的。

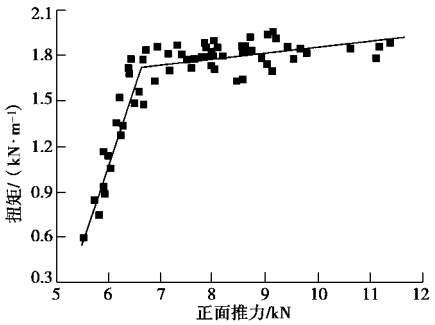


图 26 正面推力与扭矩的关系

Fig. 26 Frontal thrust force vs. cutter torque

5 结 论

以上海地区的软土地层为参照原型，根据相似理论和模型试验的原理进行了土压平衡盾构掘进的模型试验设计，在此基础上，进行盾构机工作参数在不同地层条件下的适应性研究。鉴于四次试验所反映出规律具有共性，故此本文主要以其中的一次试验结果为例来讨论，并得出了如下结论：

（1）当盾构推进速度与螺旋器转速组成的平衡体系得以满足时，就会保持盾构在土压平衡状态下进行工作。试验中，刀盘转速是易于固定的，但是盾构推进速度则取决于土体掘削的难易程度和千斤顶推力的大小，尤其是千斤顶推力的影响最甚。因此，推进速度的变化将影响平衡的稳定，并造成推进过程中土舱压力的变化和地表变形的变化。

（2）在软土地层中，当排土效率较低导致地表隆起时，地表位移主要集中在刀盘的前方，并且地表的隆起沿盾构推进的轴线方向和垂直于轴线方向都呈正态分布，并可认为由于排土效率较低将导致在刀盘前方形成一椭球冠状的隆起。当排土效率较高导致地表沉降时，将会在刀盘前方形成一椭球冠状的沉降槽，并且沿着推进的纵向和横向也都可近似认为服从正态分布。当推进过程中出现停机的话，将导致地表土体在停机期间产生很大的沉降，且盾构轴线位置点的沉降量要高于轴线两侧点的沉降量。

（3）在软土地层中，盾构推进过程中将会对周边土体产生沿推进轴向、横向的附加土压力，并且沿着轴线方向，在刀盘面板处的压力值始终最高。土体中的附加土压力值随着刀盘的临近、到达及离开而呈现渐增、达到最大值、再递减、最终趋于稳定的变化规律，并且最终稳定后的总土压力值均明显高于起始状态的静止土压力值。此外，盾构机的排土效率对刀盘前方土体的附加应力值也有着重要的影响，排土效率高则相应的土体内部附加土压力值就会相对较低。

（4）扣除盾壳表面摩擦力影响后的刀盘正面推力与扭矩之间存在明显的分段线性对应关系。

致谢：本次试验是在国家盾构试验技术中心试验室内完成的，在此期间得到了傅德明所长、张冠军高工、李向红高工等人的大力支持，在此一并表示感谢。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield tunnel method[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese))

[2] 徐前卫, 尤春安, 李大勇. 盾构近距离穿越已建隧道的施工影响分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(1): 95－98. (XU Qian-wei, YOU Chun-an, LI Da-yong. Analysis on construction influence of shield tunnel machine passing over old nearby tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(1): 95－98. (in Chinese))

[3] IMAMURA Shinichiro, HAGIWARA Toshiyuki, MITO Kenji, et al. Settlement trough above a model shield observed in a centrifuge[C]// Centrifuge 98, Tokyo, Japan, 1998: 317－719.

[4] 杉山博一, 後藤茂. 砂質地盤における泥水式シールドの下限値泥水圧に関する遠心模型実験[C]//トンネル工学研究論文•報告集. 1997: 63－68. (SUGIYAMA Hirokazu, GOTO Shigeru. Centrifuge test on the face stability of slurry shield tunnel in sandy ground[C]// Tunnel Engineering Research Dissertation, 1997: 63－68. (in Japanese))

[5] 周小文, 濮家骝. 砂土中隧洞开挖引起的地面沉降试验研究[J].岩土力学, 2002, **23**(5): 559－562. (ZHOU Xiao-wen, PU Jia-liu. Centrifuge model test on ground settlement inducedby tunneling in sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(5): 559－562. (in Chinese))

[6] 松本嘉司, 新井时夫, 波多腰明.多円形断面シールドの掘削特性に関する実験的研究[C]// 土木学会论文集. 1989: 291 － 300. (MATSUMOTO Yoshiji, ARAI T okio, HATAKOSHI Akiira. An experiment study of multi-circular face shield tunneling[C]// Civil Society Papers. 1989: 291－300. (in Japanese))

[7] 後藤茂など. MSD 工法（メカニカル•シールド•ドッキング工法）開発－その 2 シールド機の掘削性能に関する模型実験[C]// 土木学会第 42 回次学術講演会. 1987: 566－567. (GOTO Shigeru, et al. Development of MSD construction method and model experiment on excavation efficiency of these two types shield machines[C]// 42nd Academic Lecture of Civil Society. 1987: 566－567. (in Japanese))

[8] KASHIMA Y, KONDO N, INOUE M. Development and application of the DPLEX shield method: results of experiments using shield and segment models and application of the method in tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, **11**(1): 45－50.

[9] 近藤纪夫, 富迟勉, 宫本克谚, 等. 泥土加压シールド工法の耐水压实证实验[C]// 土木学会第 45 回年次学术讲演会, 1990: 98－99. (KONDO Norio, TOMISAWA Tutomu, et al. Study on water resistant pressure test of mud adding pressure balance shield tunneling method[C] 45th Academic Lecture of Civil Socitety, 1990: 98－99. (in Japanese))

[10] 細川勝己, 滨田大辅, 奥山键一, 等. 泥水式シールドの開口率が砂地盤の間隙水圧とカッター圧に及ぼす影響[C]// 东京: 土木学会第 55 回次学術講演会, 2000: Ⅲ－B162. (HOSOKAWA Katsumi, et al. Influence of slurry shield’s open ratio on the relation between the cutting pressure in chamber and the pore pressure in sand stratum[C]// 45th Academic Lecture of Civil Society, Tokyo: 2000: Ⅲ－B162. (in Japanese))

[11] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(1): 2902－2909. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on stratum adaptability of tunnel excavation with EPB shield machine in sand stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(1): 2902－2909. (in Chinese))

[12] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土压平衡盾构法施工参数的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **25**(5): 553－557. (ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on working parameters of EPB shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **25**(5): 553－557. (in Chinese))

[13] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土压平衡盾构施工的顶进推力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1587－1594. (ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on thrust force during tunnel excavation with earth pressure balance shield machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1587－1594. (in Chinese))

[14] 朱合华, 徐前卫, 廖少明, 等. 土体－盾构机器系统的相似理论研究[J]. 岩土工程界, 2004, **7**(增): 185－188. (ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming, et al. Research on the similitude theory of soil-shield machine system[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, **7**(S): 185－188. (in Chinese))

[15] 朱合华, 徐前卫, 傅德明, 等. 地层适应性盾构模型试验设计方法初探[J]. 岩土力学, 2006, **27**(9): 1437－1441. (ZHU He-hua, XU Qian-wei, FU De-ming, et al. Study on design principle of shield machine applicable to different strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(9): 1437－1441. (in Chinese))

[16] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (XU Qian-wei. Study on the simulated model test of shield machine’s working parameters applicable to different stratum and its theoretical investigation[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net