

# 砂土地层盾构法施工的地层适应性模型试验研究

徐前卫<sup>1, 2</sup>, 朱合华<sup>1</sup>, 廖少明<sup>1</sup>, 傅德明<sup>3</sup>, 于 宁<sup>1</sup>, 汪成兵<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系岩土工程重点试验室, 上海 200092; 2. 上海理工大学 土木工程系, 上海 200093;  
3. 上海隧道工程股份有限公司 技术中心, 上海 200233)

**摘要:** 随着地下空间开发需求的持续高涨, 盾构工法已越来越成为一种主要的施工方法。但是由于各地区土层特性的差异, 反映在盾构机工作参数的变化上也不尽相同, 所以, 很有必要开展盾构机工作参数针对特定地层的适应性研究。为此, 以上海地区的粉砂地层为参照原型, 将相似理论和模型试验的方法成功地应用于盾构模型试验方案的设计; 在此基础上, 进行了不同地层条件下, 盾构机不同工作参数组合的掘削试验, 并通过对试验结果的分析, 得出了一些有益的结论, 从而能更好地为盾构适应土层性质服务。

**关键词:** 地下工程; 相似理论; 模型试验; 土压平衡盾构机; 地层适应性理论

**中图分类号:** TU 47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 1 - 2902 - 08

## MODEL EXPERIMENTAL STUDY ON STRATUM ADAPTABILITY OF TUNNEL EXCAVATION WITH EPB SHIELD MACHINE IN SANDY STRATUM

XU Qianwei<sup>1, 2</sup>, ZHU Hehua<sup>1</sup>, LIAO Shaoming<sup>1</sup>, FU Deming<sup>3</sup>, YU Ning<sup>1</sup>, WANG Chengbing<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Department of Civil Engineering, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai 200093, China*;  
3. *Technology Center of Shanghai Tunnel Engineering Construction Co. Ltd., Shanghai 200233, China*)

**Abstract:** With the technology center of Shanghai Tunnel Engineering Construction Co. Ltd., development and utilization of underground space, the shield-tunneling method is used wildly as an important construction method. However, due to the regional difference of stratum properties, the working parameters of shield machine will vary in different ways. To better understand the interrelation between the machine working parameters and the variation characteristic of stratum, it is necessary to conduct the model experimental research on shield machine's working parameters applicable to stratum property. Therefore, the silty sand stratum in Shanghai area is taken as prototype, then the similitude theory and model test method have been applied successfully to the design of a special test scheme. Subsequently, in different types of ground, various working parameters of shield machine are combined to test. Based on the test results, some useful relationships can be deduced, which will provide good adaptability of shield machine to different strata.

**Key words:** underground engineering; similitude theory; model experiment; EPB shield machine; stratum adaptability theory

**收稿日期:** 2005 - 05 - 31; **修回日期:** 200 - 10 - 08

**基金项目:** 国家 863 计划项目(2002AA420020); 上海市重点学科(岩土工程)

**作者简介:** 徐前卫(1973 -), 男, 1996 年毕业于山东科技大学土木工程专业, 现为同济大学结构工程专业博士研究生, 主要从事盾构及地层适应性理论与试验方面的研究工作。E-mail: xuqwtju@126.com

## 1 引言

随着地下空间开发需求的持续高涨, 盾构施工法正越来越成为一种主要的施工方法, 尤其是在城市地区, 这种工法具有地层沉降小和对临近建筑物或设施影响小等特点。尽管盾构工法的施工技术有了很大发展, 但是由于各国及各地区地层特性的差异, 反映在盾构机工作参数上的变化也不尽相同, 而盾构机工作参数的变化往往又导致地层受扰动变形特性(如位移、应力、强度参数等)的变化。因此, 很有必要开展盾构机工作参数针对特定地层的适应性研究。而开展这方面的研究, 最有效的方法就是收集大量的现场实测数据进行综合性分析。但是, 限于现场地层条件的复杂多变、所用盾构机械的差异以及工期计划的影响, 往往不能随意改变相关的施工参数, 并得到预期的结果。作为现场试验的有效补充, 模型试验更能灵活地改变土层的性质与盾构机的工作参数, 从而有效地实现试验设计的目的和要求, 为研究盾构机工作参数的变化与土体的扰动变形特性之间的内在机制提供有效手段。

关于盾构掘进的模型试验, 国内外一些学者已经做了不少有益的探索, 如 S. Imamura 等<sup>[1]</sup>利用微型盾构机进行隧道开挖和衬砌脱出盾尾过程的离心模型试验, 研究在不同的隧道埋深和有盾尾间隙情况下衬砌顶部土压力及地面的沉降情况; 西村均等<sup>[2]</sup>利用离心模型试验, 研究了在冲积砂土地层中因盾构掘进而引起的土体内部附加土压力; 西林聖武和腾木育雄<sup>[3]</sup>通过对大量的施工经验的总结, 研究了大断面泥水盾构掘进时的千斤顶推力与刀盘扭矩的变化情况; 为研究多圆断面盾构的基本特性, 松本嘉司等<sup>[4]</sup>进行了检验掘削性能模型试验; 为了开发 DEPLX 盾构, Y. Kashima 等<sup>[5]</sup>制备了 4 种典型的模拟地层——松散细砂、压实细砂、砾石及夹有大卵石的砾石层, 并在其中进行了检验盾构开挖性能和切削面稳定性的模型试验; 为研究 MSD 工法, 进行了盾构机掘削性能模型试验<sup>[6]</sup>。通过试验研究了在饱和砂土地层中, 泥水盾构掘进时开挖面的稳定性, 及其对周边地层应力状态的影响<sup>[7]</sup>。通过试验研究了泥水式盾构的刀盘开口率变化对砂质地层的孔隙水压力的影响<sup>[8]</sup>。

虽然上述关于盾构掘削的模型试验已经做了不少, 但是针对盾构机工作参数对特定地层适应性的研究还并不多见。因此, 本文的目的在于, 针对上

海地区的砂质粉土, 依据相似理论和模型试验的原理进行了盾构掘进的模型试验设计, 随后在软、硬不同的地层条件下, 进行盾构机不同工作参数组合的掘进试验, 从而研究了盾构机工作参数对各种不同地层条件的适应性。

## 2 模型试验的相似关系

对于土体-盾构系统来说, 土体的变形与下面 6 个变量有关: (1) 土颗粒的惯性力; (2) 土颗粒间的摩擦力; (3) 土颗粒间的黏聚力; (4) 土的重力; (5) 土的弹性力; (6) 土与盾构机具间的黏聚力。多数情况下, 由于土的弹性力很小, 变形速度的影响也很小, 所以这两种因素都可以忽略。至于土与工具的黏接力, 若假定工具表面上的薄土层与工具黏接, 不作相对运动, 则黏聚力可以忽略。如此, 可得如下的支配现象的物理法则:

$$\left. \begin{aligned} F_i &= \rho v^2 l^2 && (\text{惯性力}) \\ F_g &= \rho g l^3 && (\text{重力}) \\ F_c &= c l^2 && (\text{黏聚力}) \\ F_f &= f N && (\text{内摩擦力}) \\ F &&& (\text{外力}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为土的密度;  $c$  为土的黏聚力;  $f = \tan \varphi$  为土的内摩擦因数,  $\varphi$  为土的内摩擦角, 假定它是与土的变硬程度、变形量及变形速度无关的常数;  $l$  为模型长度;  $v$  为土的变形速度;  $N$  为法向力;  $g$  为重力加速度。

由于本次试验研究的对象主要是针对上海地区粉砂地层, 因此试验的相似关系也主要是针对砂土层而言。考虑到该砂土层的颗粒粒径主要集中在 0.005~0.025 mm, 与黏土颗粒相比, 砂土颗粒粒径较大, 因此, 作用于颗粒间的黏聚力与重力及摩擦力相比可以忽略。为了使得模型土体的内摩擦因数与原型相等, 使用同一土体是上策, 然而, 这样做则使颗粒的大小就不相似。不过, 在土体变形过程中, 由于颗粒运动的集积效果才是研究的对象, 所以每个颗粒的大小不相似也可以。综合以上的考察结果, 对于砂土来说, 相似法则为

$$\pi_1 = f \rightarrow (f = f') \quad (2)$$

$$\pi_2 = \frac{F_i}{F_g} \rightarrow \frac{v^2}{gl} \quad (3)$$

$$\pi_3 = \frac{F}{F_g} \rightarrow \frac{F}{\rho g l^3} \quad (4)$$

由于采用的是同一土体材料，所以模型地层的摩擦因数  $f'$  等于原型地层的摩擦因数  $f$ ，故  $\pi_1$  项自动满足。此外，在盾构的掘进过程中，由于土体变形的速度很小，则所产生的惯性力小到可以忽略不计，故相似法则的  $\pi_2$  可以忽略。因为惯性力可以忽略，故只需考虑  $\pi_3$  项，所以这时若保持几何相似，则模型与原型应当相似。

### 3 模型土层的制作

模型试验所参照的原型砂土取自上海地区第②层土，这是因为该土层在上海市区的地表浅层内普遍存在，且获取比较方便，表 1 是这种原型砂质粉土取样 3 组后试验结果的平均值。

表 1 砂质粉土的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of sandy soil

土质	含水量 /%	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	抗压强度 /kPa	压缩模量 /kPa	孔隙比 $e$
砂土	35.7	1.91	2	35	90.6	2340	1.307

在进行模型地层的制作时，依照  $\pi_3$  项的要求，应使模型土层与原状土层具有相同的重度，并且二者还具有相近的颗粒级配曲线，为此，可通过控制砂土堆放的密实度来实现。密实度的控制可采用空中落法来实现，即将砂土始终在距离拟堆放的土体表面一定高度处(该高度应事先通过试验确定)以一定的速度水平运动，并均匀下落在已堆放好的土体表面<sup>[9]</sup>。

## 4 试验概述

### 4.1 试验设备

图 1 给出了本次试验的原理图，图中共包括四大部分，即模型盾构机、试验土箱、驱动系统以及数据采集系统。

试验中所用模型盾构为土压平衡式盾构，直径为 0.4 m。为了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；另一方面还在盾构机前方土舱内布置 4 个微型压力传感器

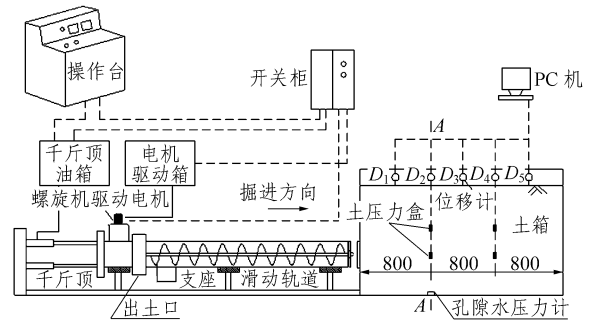


图 1 试验原理图(单位: mm)

Fig.1 Principle of the model test(unit: mm)

来控制土舱压力值。此外，考虑到刀盘对不同性质土体掘削的难易程度，故而在土舱壁面上设置注浆孔，其管路沿盾构内外壳之间空隙敷设至盾尾并与注浆泵连接，如图 2 所示。

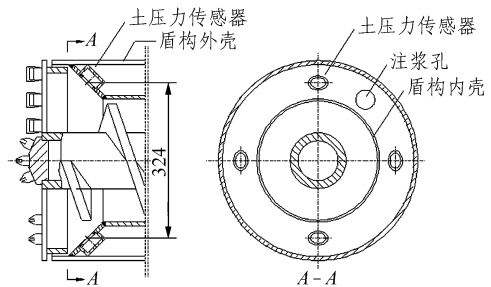


图 2 模型盾构图(单位: mm)

Fig.2 Sketch of model for shield machine(unit: mm)

模型土箱呈长方体状，其尺寸为 2.4 m×2.4 m×1.2 m，箱体一端开孔以便安装模型盾构，顶部敞开以便观测地表面变形。由于受盾构和土箱尺寸的限制，土体边界条件难免地会对试验结果有所影响。

模型盾构的推进装置采用电动伺服控制系统，使得掘进速度能够得到精确的控制；切削刀盘的转动采用液压传动系统，并可实现自动地调速。

刀盘扭矩、刀盘转速、盾构推进速度和顶进推力等盾构机工作参数可以通过安装在盾构机上的相关设备自行给出。此外，还在土层表面放置位移传感器，在土箱内部埋设压力计，用来记录推进过程中地表位移及土体内部的应力变化情况。

### 4.2 试验内容

表 2 给出了本次试验的主要内容( $H$ 为上覆土厚度， $D$ 为盾构直径)，试验地层分为软、硬两种，其中，硬土地层完全用细砂制成，软土地层则是在砂土中掺入 30%的淤泥质黏土颗粒。

表2 试验内容

Table 2 Contents of model test

试验组别	埋深/直径 (H/D)	刀盘开口率 $\xi$ /%	刀盘转速 n/rpm	土层类别
1	2	68	1	砂
2	3	68	1	砂
3	4	68	1	砂
4	2	68	1.6, 3.5	黏土+砂
5	2	36	1.3, 2.8, 3.3	黏土+砂

## 5 试验结果分析

### 5.1 刀盘转速与推进速度

根据土压平衡盾构的工作原理, 要维持土压平衡状态, 必须使得单位时间内所排出土的体积等于前方刀盘切削下来的土的体积, 而这种实际排土量与理论掘削土量之间的平衡, 又是通过掘削刀盘与螺旋出土器组成的平衡体系来实现:

$$V_t = v\pi D^2/4 \quad (5)$$

$$V_a = n\pi(d_2^2 - d_1^2)p/4 \quad (6)$$

式中:  $V_a$  为实际排土体积,  $V_t$  为理论排土体积,  $v$  为盾构推进速度,  $D$  为刀盘直径,  $n$  为螺旋器转速,  $d_2$  为螺旋器内径,  $d_1$  为螺旋器轴直径,  $p$  为螺旋器轴向螺距。

图3表示试验5中刀盘转速及盾构推进速度随掘进距离的变化情况。如图3所示, 转速在3个段内变化, 即1.2, 2.8和3.3 rpm; 而段内相应的盾构平均推进速度分别为1.8, 4.1和5.0 cm/min。由此

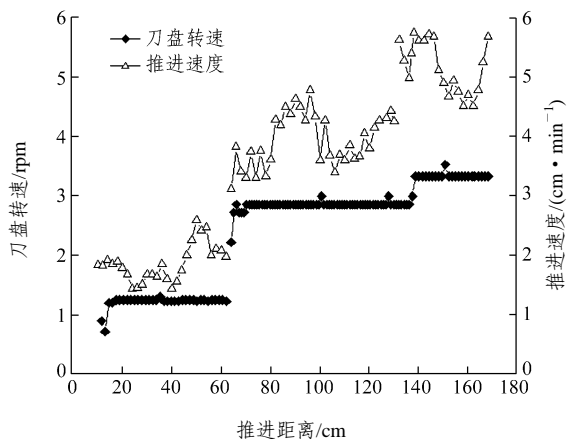


图3 试验5中转速与推进速度

Fig.3 Rotation speed and advance rate in the test No.5

可见, 盾构推进速度随着刀盘转速的增大而增大, 当转速恒定时, 推进速度也基本上稳定在某个值附近, 即二者之间存在参数上的匹配性。

### 5.2 土舱压力大小与排土效率

通常, 土压平衡盾构的土舱压力都设定与刀盘前方的静止土压力相接近, 但是施工参数(如推进速度、刀盘转速)的不匹配, 往往会造成理论排土量与实际排土量之间存在差异, 正是这种差异而造成了土舱压力的变化。当实际排土量偏低时, 就会因欠挖而导致土舱内土体压紧致密, 使得土舱压力升高; 反之, 如果实际排土量偏高, 舱内土体便会松散垮落, 从而土舱压力下降。

由图4, 5可见, 排土效率(实际排土量与理论排土量之比)随着土舱压力的增大而减小, 而且软土地层中排土效率的变化速率要明显高于其在硬土地层中的值; 在同一排土效率下, 盾构埋深越小、刀盘开口率越小, 则土舱压力越高。此外, 如果维持同一土舱压力, 则软土地层中排土效率要高于硬土地层中的效率。

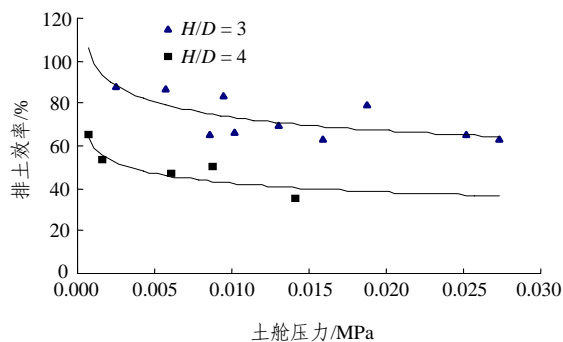


图4 硬土地层中排土效率

Fig.4 Soil discharge efficiency in hard soil

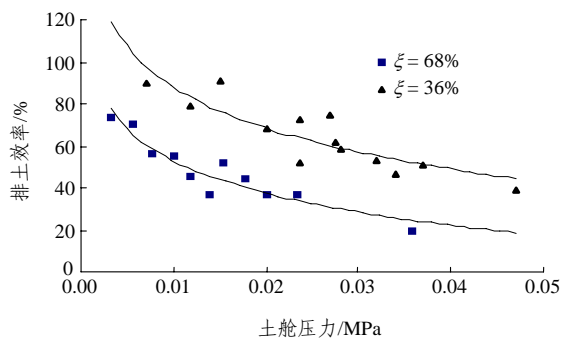


图5 软土地层中排土效率

Fig.5 Soil discharge efficiency in soft soil

### 5.3 地表位移与排土效率

图6所示的是在推进过程中, 盾构轴线位置上

的地表位移测点  $D_3$ (位置见图 1)的竖向位移与排土效率之间的对应关系。由图 6 可以看出,当排土效率大于或接近于 1 时,就会因超挖而导致地表沉降;相反,当排土效率偏低时,就会因为刀盘挤压前方土体,而使得地表局部产生隆起。

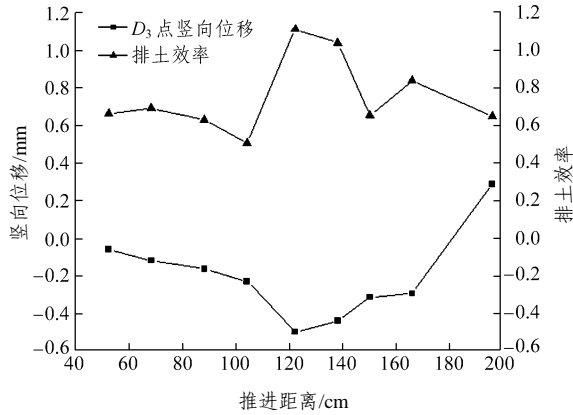


图 6 试验 2 中  $D_3$  点位移与排土效率

Fig.6 Displacement of point  $D_3$  versus soil discharging efficiency in the test No.2

### 5.4 孔隙水压力

图 7 所示的是在两种不同开口率 ( $\xi = 68\%$ ,  $\xi = 36\%$ )下, A - A 截面底部盾构轴线上的孔隙水压力在整个推进过程中的变化情况(位置见图 1)。由图 7 可以看出,在推进的初始阶段,孔隙水压力越来越大,尤其是当刀盘推进至 A - A 截面时,压力值达到最大;其次,当中间发生停机时,孔隙水压力会迅速下降,而且停机时间越长,下降越多,这均为孔隙水压力发生消散的缘故所造成的;再者,刀盘开口率越小,对应的孔隙水压力则越大,这说明开口率是一个重要的影响参数,施工中应该予以

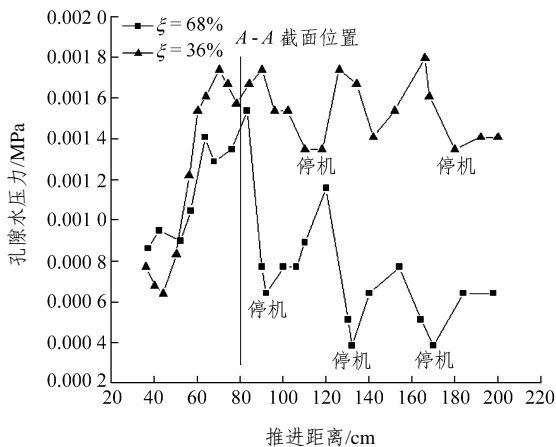


图 7 推进过程中的孔隙水压力

Fig.7 Scheme of pore water pressures during tunneling process

重视。

### 5.5 千斤顶推力的变化

在掘进过程中,盾构后方千斤顶的全部顶进推力  $P_T$ ,可以简单地理解为盾构刀盘正面的穿透阻力  $R_p$  与土 - 管壁之间的摩擦力  $F$  之和<sup>[10]</sup>,即

$$P_T = F + R_p \tag{6}$$

图 8 所示的是在同一刀盘开口率 ( $\xi = 68\%$ )、不同埋深条件下顶进推力的试验结果,3 次试验均是在硬土地层中进行的。盾构掘削过程的前半段是在干砂地层中进行的,而后半段则是在注水后的模型地层中进行的。对比 3 次试验,可得如下结论:

- (1) 当盾构推进至相同位置时,埋深越大,则相应的总推力也越大。
- (2) 埋深越大,则推进过程中相应的刀盘正面穿透阻力也越大。
- (3) 往地层中注水后,总推力增长的速度要明显小于未注水前的增长速度。总推力增长速度之所以在注水后有所减小,是由于孔隙水压力的作用,使得土体作用在盾构外壳上的法向有效应力减小,从而导致摩擦力减小的缘故。

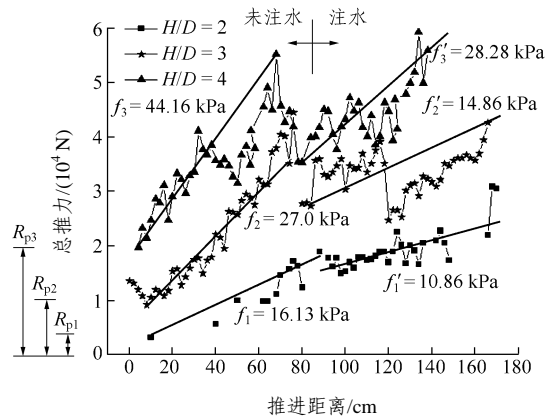


图 8 不同埋深时的总推力

Fig.8 Total jacking forces under different depths

图 9 所示的是同一埋深 ( $H/D = 2$ )、不同刀盘开口率下的顶进推力试验结果,2 次试验均是在软土地层中进行的,从中可得如下结论:

- (1) 当埋深相同时,盾构推进至相同位置处时,总推力随着刀盘开口率的减小而相应增大。
- (2) 刀盘穿透阻力随着开口率减小而增大,这是因为开口率越小,则刀盘面板与前方土体有效接触面积越多,从而使得直接作用在面板上的阻力越

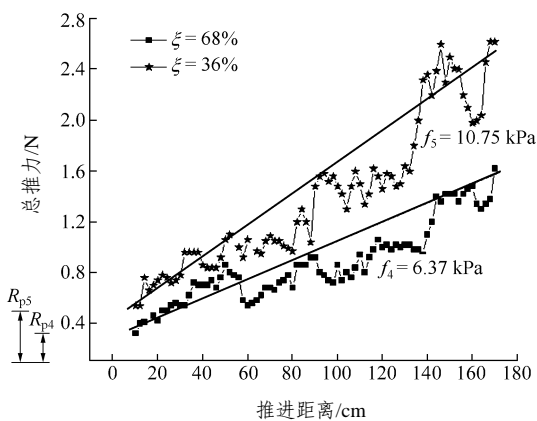


图9 不同开口率时的总推力

Fig.9 Total jacking forces under different open rates

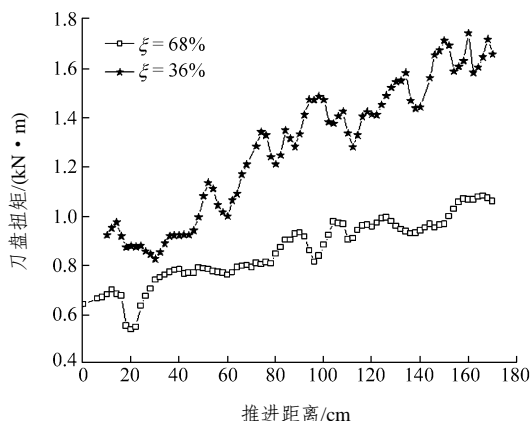


图11 不同开口率时的扭矩

Fig.11 Torques under different cutter open rates

大的缘故。

(3) 对比试验 1 和 4 这 2 次试验结果, 可以发现, 在相同埋深、相同刀盘开口率的情况下, 软土地层中的穿透阻力要小于其在硬土地层中的值。

### 5.6 刀盘扭矩的变化

图 10 所示的是在同一刀盘开口率( $\xi = 68\%$ )、不同埋深条件下刀盘扭矩的试验结果, 3 次试验均是在硬土地层中进行的。图 11 所示的是同一埋深下、不同刀盘开口率的刀盘扭矩试验结果, 2 次试验均是在软土地层中进行的。由图 10, 11 可见, 埋深越大, 则所需的刀盘掘削扭矩也越大; 其次, 向土层中注水对扭矩有着重要影响, 表现在注水后的地层变得易于被刀盘掘削, 因而扭矩相应减小; 再者, 刀盘开口率对扭矩同样有着重要影响, 即开口率大, 则所需的掘削扭矩相对较小, 这是因为刀盘的有效接触面积减少, 使得刀盘转动时相应的阻力较小, 同时开口部分相对较大, 故掘削下来的土体

易于进入土舱内并被排出的缘故; 此外, 对比在同样埋深( $H/D = 2$ )、同样刀盘开口率( $\xi = 68\%$ )情况下的 2 次试验(试验 1 和 4), 盾构分别在软、硬不同地层中掘进, 由此可以看出, 在软土地层中所需的扭矩要小于其在硬土地层中的值。

### 5.7 推力、扭矩与推进速度的关系

#### (1) 推力与推进速度的关系

图 12 所示试验 3 中的千斤顶推力与推进速度的关系, 图 13 则所示的是试验 4 和 5 中的结果。由此可以看出, 无论是在硬土地层中, 还是在软土地层中, 盾构推进速度与总推力之间近似成线性关系。此外, 刀盘开口率也有着重要的影响, 表现在当推力一定时, 开口率越大, 则推进速度相对较快, 这是由于开口率大, 则刀盘面板部分受到的阻力相对较小的缘故。

#### (2) 扭矩与推进速度的关系

图 14 所示试验 3 中的刀盘扭矩与推进速度的

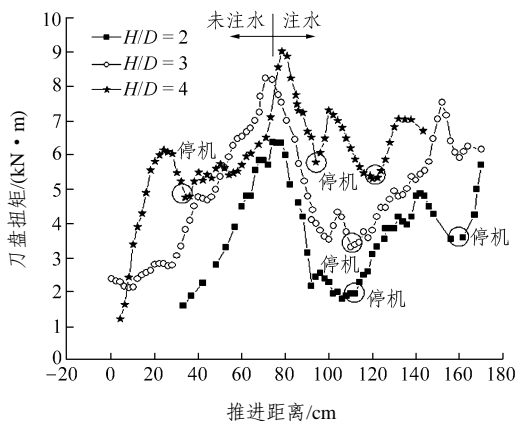


图10 不同埋深时的扭矩

Fig.10 Torques under different depths

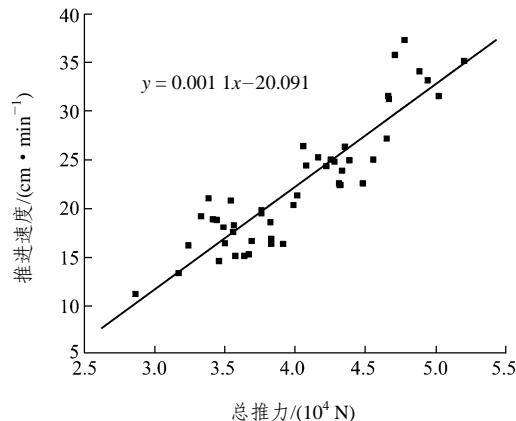


图12 硬土地层中推力与速度关系

Fig.12 Jacking force versus advance rate in hard soil

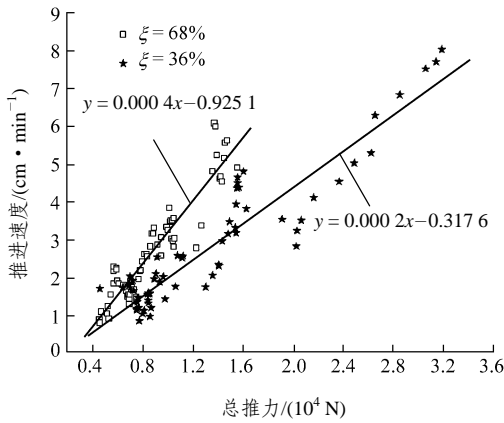


图 13 软土地层中推力与速度关系

Fig.13 Jacking force versus advance rate in soft soil

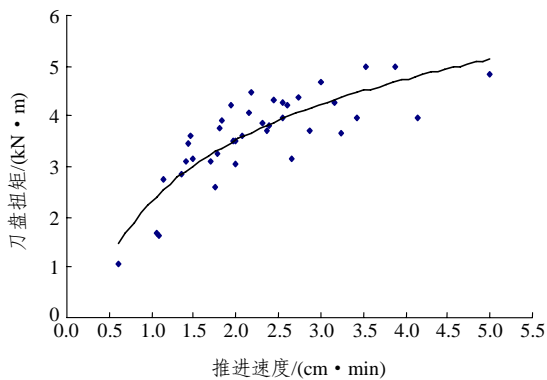


图 14 硬土地层中扭矩与推进速度关系

Fig.14 Torque versus advance rate in hard soil

关系，图 15 则所示的是试验 4 和 5 中的结果。由图 14 和 15 可知，刀盘扭矩与推进速度之间近似成指数形式增加，并且在同样的速度下，刀盘开口率越小，则对应扭矩越大。此外，扭矩在硬土地层中的增加速度要明显高于其在软土地层中的增加速度。

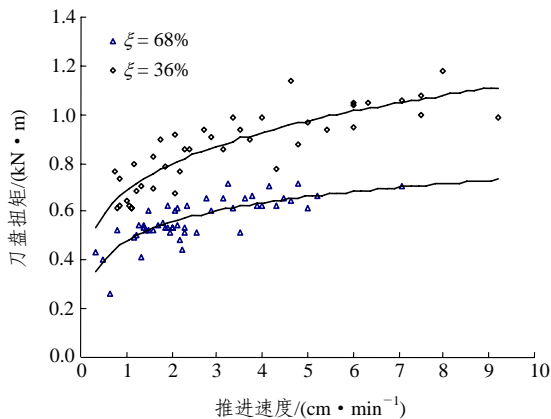


图 15 软土地层中扭矩与推进速度关系

Fig.15 Torque versus advance rate in soft soil

## 6 结 语

本文以上海地区的粉砂地层为参照原型，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，并在此基础上，对盾构机工作参数在不同地层条件下的适应性进行了研究，并得出了如下结论：

(1) 要维持土压平衡状态，必须使得单位时间内所排出土的体积应该等于前方刀盘切削下来的土体的体积，而这种实际排土量与理论掘削土量之间的平衡，又是通过掘削刀盘与螺旋出土器组成的平衡体系来实现的，亦即通过掘削刀盘与螺旋机转速之间的参数匹配性来满足。

(2) 盾构机工作参数的不匹配导致排土效率产生变化，即一方面会引起土舱压力的升高或降低，另一方面还会造成地表的隆起或沉降。

(3) 孔隙水压力受施工扰动的影响比较明显，在推进的初始阶段，孔隙水压力越来越大；当施工过程中发生停机时，孔隙水压力会迅速下降，而且停机时间越长，水压力下降的越多。

(4) 覆土厚度增加、刀盘开口率减小都会造成盾构顶进推力的增大。此外，掘进过程中向砂土地层中注水，有助于减小总推力。

(5) 刀盘扭矩随着覆土厚度增加、刀盘开口率的减小而增大。同样，向地层中注水，有利于刀盘的掘削，并能减小扭矩值。

(6) 在硬土地层中的千斤顶推力以及刀盘扭矩都要高于其在软土地层中相应的值，所以，土层的特性对盾构机工作参数的选取具有非常重要的影响。

(7) 刀盘的开口率大小是施工中的一个重要影响参数，其值的变化直接影响到土舱压力、孔隙水压力、千斤顶推力、刀盘扭矩以及推进速度等参数的大小。因此，在盾构机选型、设计及施工中应给予该参数足够的重视。

### 参考文献(References):

[1] Imamura S, Hagiwara T, Mito K, et al. Settlement trough above a model shield observed in a centrifuge[A]. In: Centrifuge 98[C]. Tokyo: [s. n.], 1998, 23 - 25.

[2] 西村均, 中桥贞雄, 黑川信子, 等. シールド掘進に伴う洪積砂

- 層における付加土圧発生機構の実験研究[R]. [s. l. ]: [s. n. ], 1997.
- [3] 西林聖武, 藤木育雄. 泥水式シールドの掘進時におけるジャッキ推カとカッタートルクについて[R]. [s. l. ]: [s. n. ], 1996.
- [4] 松本嘉司, 新井時夫, 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[R]. [s. l. ]: [s. n. ], 1989.
- [5] 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 method in tunnel construction[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(1): 45 - 60.
- [6] 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[R]. [s. l. ]: [s. n. ], 1999.
- [7] 瀬谷誠など. 飽和砂地盤の泥水シールド掘進時の切羽の安定と周辺地盤の応力状態に影響を及ぼす要因[R]. [s. l. ]: [s. n. ], 1989.
- [8] 細川勝己, 濱田大輔, 奥山健一, 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[R]. [s. l. ]: [s. n. ], 1990.
- [9] Yoo C, Shin H K. Deformation behavior of tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory and numerical investigation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18: 303 - 319.
- [10] Marshall M. Pipe-jacked tunneling: jacking loads and ground movement[Ph. D. Thesis][D]. London: Oxford University, 1998.