均匀软质地层条件下土压平衡盾构施工的合理顶进推力分析

徐前卫[1,2]，朱合华[3]，廖少明[3*]，郑七振[2]，周 奎[2]

（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：应用数学和力学方法，从土压平衡盾构的掘削工作机理入手，研究顶进推力的计算方法及其影响因素。开展土压平衡盾构的掘削模型试验，研究在不同埋深、不同刀盘开口率以及不同土性时的千斤顶顶进推力的变化规律，并对前述理论研究成果加以验证。结合地铁隧道工程实例，应用推导的推力计算公式预测盾构推进过程中的顶进推力，取得了较为满意的结果。

关键词：土压平衡；盾构机；顶进推力；模型试验；地下工程

中图分类号：U455.43 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－4548(2008)01－0079－07

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。

Analysis of reasonable thrust force during tunnel excavation in homogeneous soft ground by use of earth pressure balance shield machine

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

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

Abstract: The reasonable calculation method of thrust force and its influencing factors were studied by applying mathematics and mechanics based on the working mechanism of EPB shield machine. Model experiments on thrust force during tunnel excavation with EPB shield machine under different conditions of burying depth, cutter opening rate and soil property were carried out. The aforementioned theoretical results were also verified. Combining with a subway tunneling case, the derived formula was used to forecast the values of thrust force in the course of shield tunneling, and satisfactory results were achieved.

Key words: earth pressure balance; shield machine; thrust force, model test; geotechnical engineering

0 引 言

盾构机作为一种专门用于隧道工程的大型高科技综合施工设备，自20世纪60年代以来在我国得到了巨大的发展。目前，已在软土地层内使用网格盾构、网格气压盾构、土压平衡盾构、加泥式土压平衡盾构及泥水平衡盾构等建造了众多的越江公路隧道、地铁区间隧道、输水管道和电缆隧道等工程。尤其是土压平衡盾构自引进以来，在软土地层中得到了极大的应用，上海地区除个别超大直径如过江隧道使用泥水平衡盾构以外，其它隧道大多采用土压平衡盾构。土压平衡盾构工法具有对地面、地下环境影响小、掘进速度快、地表沉降小等特点，因此被越来越多地应用于城市地铁隧道施工领域。

土压平衡盾构是一种掘土密闭型结构，由盾构外壳、推进系统、出土系统和拼装系统组成。在盾构的掘削过程中，盾构顶进推力是一个重要的施工参数，不仅决定着千斤顶的数量和布置方式，而且还影响盾尾管片的厚度、掘削扭矩的大小及施工速度的快慢等。

目前，国内外一些学者已经进行了不少有关盾构顶进推力的研究，如葛野恒夫等[1]曾进行过降低盾构外周摩擦阻力的注浆试验；松下雅行等[2]曾进行过大断面、浅覆土的盾构周边摩擦关系的模型试验研究；

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：2007－02－02

*通讯作者

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

西林聖武等[3]曾研究了泥水盾构掘进时千斤顶推力与刀盘扭矩的变化情况；Pellet-Beaucour 等[4]曾开展微型顶管掘进的土体－顶管管壁摩擦力的现场测试，并得出了一些有益的结论。凌京蕾[5]对国外盾构公司有关土压平衡盾构的推力和扭矩的计算公式进行了总结，指出刀盘切土所需推力只占机器总推力的 14.5%～18.5%，而盾壳和土体之间的摩擦阻力却占了总推力的 53.5%～73%，可见摩擦损耗是盾构机能量损耗的主要部份。朱合华等[6]研究了模型试验条件下土压平衡盾构顶进推力的变化规律，尤其是对土体与盾壳之间摩擦作用的机理及其影响因素作了阐述。

鉴于盾构顶进推力参数的重要性，但是目前国内使用的推力计算方法大都引自国外的经验公式。因此，本文的主要工作就是应用数学和力学方法，从土压平衡盾构掘削工作机理入手，研究顶进推力的计算方法及其影响因素；随后，开展了土压平衡盾构的掘削模型试验，研究在不同埋深、不同开口率及不同土性时的千斤顶顶进推力的变化规律，对前述理论研究加以验证；最后，结合地铁隧道工程实例，将上述研究成果用于预测盾构推进过程中的顶进推力，并与实测结果加以对比，取得了较为满意的结果。

1 土压平衡盾构的工作原理

土压平衡盾构的开挖土仓由刀盘、切口环、隔板及添加剂注入系统组成。土压平衡盾构的工作原理在于将刀盘切削下来的碴土填满土仓室，借助盾构推进油缸的推力通过隔板进行加压，这一压力通过碴土及刀盘作用于整个作业面使作业面稳定；同时，利用螺旋输送机进行排土，使得排出土量与盾构掘削土量相适应，即掘进过程中始终维持掘削土量与排出土量相平衡，从而维持土仓内的土压力稳定在预定范围内。螺旋输送机的排出土量可通过土仓压力值的变化得到反应，而土仓压力又可通过设在土仓壁上的土压传感器进行测量，并通过控制推进力、推进速度、螺旋输送机的转速来控制，从而实现土压平衡。鉴于上述考虑的土压平衡盾构的工作原理如图 1 所示。

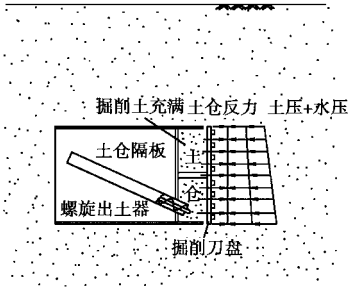


图 1 土压盾构工作原理图

Fig. 1 Working mechanism of EPB shield machine

2 土压平衡盾构的顶进推力分析

对于土压平衡盾构来说，盾构千斤顶的推力就是推进过程中盾构遇到的全部阻力之和。这里以土压平衡处于最理想状态时为例进行分析，假设土仓内的土体处于均匀受压状态，流塑性好，并且始终能保持匀速地向后移动。为了研究盾构千斤顶的推力，首先取盾构机作为研究对象，如果在不考虑盾尾管片的摩擦阻力、后接台车的牵引阻力、盾构变向阻力等影响的情况下，千斤顶顶进推力 P 主要包括周围土层对盾构外壳的摩擦阻力 F_1、盾构自重产生的摩擦阻力 F_2 及盾构推进时的正面阻力 F_3，如图 2 所示[7]。因此，在理想状态下，应该有：

$$P = F_1 + F_2 + F_3 \quad 。 \tag{1}$$

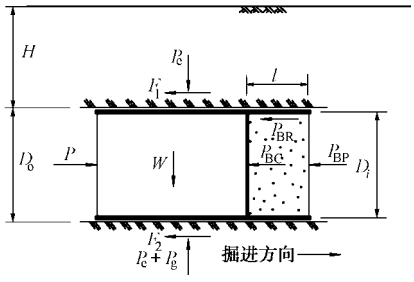


图 2 盾构掘进时所受荷载

Fig. 2 Load developed during tunneling operation

土压平衡盾构的正面阻力 F_3 主要由作用在刀盘面板部分的抵抗阻力 P_{BP}、作用在土仓隔板上的正面土压力 P_{BC}、克服土仓内圆柱形土体与土仓内壁之间的移动摩擦阻力 P_{BR} 等 3 部分构成。

2.1 盾构外壳与地层之间的摩阻力 F_f 计算

盾构外壳与地层之间的摩阻力 F_f 包括周围土层对盾构外壳的摩擦阻力 F_1、盾构自重产生的摩擦阻力 F_2。盾构横断面上作用土压的模型如图 3 所示，这里假定地层为单一土性，且不考虑地下水的影响。通常，可以认为作用在盾构外壳整个上顶部位（对应 AB 弧段）弧长为 1/4 圆周（即 $\pi R/2$）区域内的径向土压（即竖直土压）均为 p_e，即

$$p_e = \gamma H \quad , \tag{2}$$

式中，γ 为土的重度（kN/m^3），H 为覆土厚度（m）。

显然，盾构外壳底部 1/4 圆周弧段（弧长 $\pi R/2$）内的地层的反压强度也为 p_e。设盾构的自重力 W 在外壳底部产生的反作用力强度为 p_g，则

$$p_g = \frac{2W}{\pi RL} \quad , \tag{3}$$

式中，L 为盾构机外壳长度。

设两侧面（即 AD，BC 弧段）的水平作用土压的

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

平均强度为 q_e，可表达为

$$q_e = K(p_e + \frac{\gamma D}{2}) \quad , \tag{4}$$

式中，K 为静止土压力系数，$K = 1 - \sin\varphi$，φ 为土体内摩擦角。

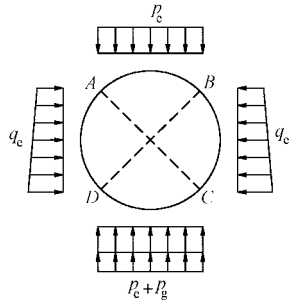


图 3 土压模型及计算示意图

Fig. 3 Earth pressure model and its calculation

因盾构的外壳是光滑的，故盾构推进时作用在盾构外壳上的土体摩阻力强度 f 为

$$f = \frac{1}{2}(c + N\tan\varphi) \quad , \tag{5}$$

式中，c 为土体的黏聚力（kN/m^2），φ 为土体的内摩擦角（°），N 为作用在圆形外壳上的法向静止土压力强度（kN/m^2）。

为了简化计算，对 N 作如下简化：对于上顶部（AB 弧段）而言，$N = p_e$；对于下底部（CD 弧段）而言，$N = p_e + p_g$；对于两侧面（AD，BC 弧段）而言，$N = q_e$[8]。由式（5）可见，f 不仅与弧段所处的位置有关，而且还与土体参数 c，φ 值有关。

综上所述，可得盾构推进时作用在盾构机外壳上的土体摩阻力 F_f 为

$$F_f = f_a S_a + 2 f_s S_s + f_b S_b \quad , \tag{6}$$

式中，f_a 为顶部土体的摩阻力强度（kN/m^2），f_s 为侧面土体的摩阻力强度（kN/m^2），f_b 为底部土体的摩阻力强度（kN/m^2），S_a 为顶部外壳（对应 AB 弧段）的面积（m^2），S_b 为侧面外壳（对应 BC 弧段）的面积（m^2），S_c 为底部外壳（对应 CD 弧段）的面积（m^2）。

由式（2）～（6）可知，当盾构埋深 H 越大、土体强度（c，φ）越大时，则摩阻力 F_f 就相应越大。

2.2　盾构推进的正面阻力 F_3

为了确定F_3，首先对土仓内圆柱状土体形成的过程进行研究。当盾构向前推进时，前方土体挤入土仓形成圆柱状土芯并向后移动，由于土体与钢板之间的摩擦作用产生了土体移动的阻力，随着土芯沿圆柱套筒向前移动，相应的阻力也会增大。在盾构顶进力增大的同时，开始强制新的部分土体进入套筒内，从而引起土芯压实及在套筒内壁上的土体侧压力的提高，由此增大了摩擦力，同样摩擦力也增大了土芯沿着套筒移动的阻力，从而引起所必须的顶进推力的增大[9]。如果此时排土速度恰当的话，即进、出土量达到某种平衡，就会使得土仓隔板土压力 P_{BC} 稳定在一定范围内，从而使得盾构正面阻力得以与前方土压平衡。

（1）计算假定

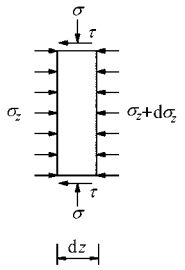


图 4 土仓内微段受力图

Fig. 4 Load model of soil unit in chamber

为研究土芯的形成过程，以刀盘中心作为坐标原点沿盾构轴线取一微段，微段的受力如图4所示。图中 σ，τ 分别为土仓内壁对微段作用的正应力和剪应力，σ_z 为微段受到的轴向应力。为了分析方便，作如下的假设：①土仓内土体为线弹性理想材料；②盾构壳壁是绝对刚性的；③仓内土体与土仓内壁之间的界面满足无黏结力的库仑准则；④仓内土体截面上的应力 σ_z 为均匀分布；⑤土仓内土体处于轴对称状态。

（2）微段平衡方程

$$\frac{\sigma_z \pi D^2}{4} = (\sigma_z + d\sigma_z)\frac{\pi D^2}{4} + \tau \pi D \mathrm{d}z \quad , \tag{7}$$

经过简化处理，可得

$$\mathrm{d}\sigma_z + \frac{4\tau}{D}\mathrm{d}z = 0 \quad 。 \tag{8}$$

（3）仓内土体与盾构内壳之间的界面上满足无黏聚力的库仑条件

$$\tau = \sigma\tan\varphi \quad 。 \tag{9}$$

（4）微段的物理方程

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}\left[\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)\right] \quad , \tag{10}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}\left[\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)\right] \quad , \tag{11}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)\right] \quad , \tag{12}$$

式中，E 为土体弹性模量，ν 为土体泊松比。

由于盾构壁是绝对刚性的，因此微元体沿径向产生的应变 $\varepsilon_r = 0$，又根据假设④和⑤，故有环向应变 $\varepsilon_\theta = 0$，将其带入式（10）、（11），可得

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z \quad 。 \tag{13}$$

将式（9）、（13）带入式（8）中，可得

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_z}{\mathrm{d}z} + \frac{4\tan\varphi}{D}\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z = 0 。 \tag{14}$$

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

令 $A=\dfrac{4\tan\varphi}{D}\dfrac{\nu}{1-\nu}$，可得

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_z}{\mathrm{d}z}+A\sigma_z=0 \quad , \tag{15}$$

解此方程得

$$\sigma_z=B\mathrm{e}^{-Az} \quad , \tag{16}$$

式中，B 为任意实常数。

（5）边界条件

利用边界条件 $z=l$ 时，位于土仓壁上的压力值为 $\sigma_z=p_0$，即

$$p_0=B\mathrm{e}^{-Al} \quad , \tag{17}$$

由此可得

$$B=p_0\mathrm{e}^{Al} \quad , \tag{18}$$

这里，l 表示土仓轴向长度。

所以，可得轴向应力分量：

$$\sigma_z=p_0\mathrm{e}^{A(l-z)} \quad , \tag{19}$$

则作用于土仓内壁上的径向应力 σ 及剪应力 τ 分别为

$$\sigma=\frac{\nu}{1-\nu}p_0\mathrm{e}^{A(l-z)} \quad , \tag{20}$$

$$\tau=\frac{\nu}{1-\nu}p_0\mathrm{e}^{A(l-z)}\tan\varphi \quad 。 \tag{21}$$

（6）正面阻力F_3的确定

因此，作用于土仓内壁上的移动摩擦阻力 P_{BR} 为

$$P_{\mathrm{BR}}=\int_0^l\tau\pi D\mathrm{d}z=\frac{\pi Dp_0}{A}\frac{\nu}{1-\nu}(\mathrm{e}^{Al}-1) \quad ; \tag{22}$$

作用在土仓隔板上的正面土压力 P_{BC} 为

$$P_{\mathrm{BC}}=\frac{\pi D^2}{4}p_0 \quad ; \tag{23}$$

作用在刀盘面板部分的抵抗阻力 P_{BP} 主要是克服刀盘前方的土压力，理想状态下按静止土压力计算，即

$$P_{\mathrm{BP}}=(1-\xi)\frac{\pi D^2}{4}K\gamma(H+D/2) \quad , \tag{24}$$

式中，ξ 为刀盘开口率。

由此可得，土压平衡盾构的正面阻力 F_3 为

$$F_3=(1-\xi)\frac{\pi D^2}{4}K\gamma(H+D/2)+\frac{\pi D^2}{4}p_0+\frac{\pi Dp_0}{A}\frac{\nu}{1-\nu}(\mathrm{e}^{Al}-1) \quad 。 \tag{25}$$

2.3 盾构千斤顶顶进推力 P

由式（1）、（6）和（25）可得盾构推进的总推力 P：

$$P=(1-\xi)\frac{\pi D^2}{4}K\gamma(H+D/2)+\frac{\pi D^2}{4}p_0+\frac{\pi Dp_0}{A}\frac{\nu}{1-\nu}(\mathrm{e}^{Al}-1)+f_{\mathrm{a}}S_{\mathrm{a}}+2f_{\mathrm{s}}S_{\mathrm{s}}+f_{\mathrm{b}}S_{\mathrm{b}} \quad 。 \tag{26}$$

由式（2）～（6）可知，当土性、盾构埋深确定时，盾构所受到的摩擦阻力是定值，再结合式（26）可知，此时盾构推进的总推力 P 主要取决于土仓隔板压力 p_0，并与之成线性关系；在 p_0 不变的情况下，刀盘开口率越大，则对应的正面阻力越小，相应的总推力 P 也会减小。

此外，由式（26）还可以看出，总推力P与D^2成正比例关系。国外根据盾构施工的实践，曾提出下列经验公式作为确定盾构总推力时的参考值[10]，即

$$P=(70\sim100)\frac{\pi D^2}{4} \quad 。 \tag{27}$$

根据日本在盾构施工方面的资料统计，盾构总推力按开挖面积计，其中以500～1000 kN/m^{2}范围为多数，极少数也有超过1500 kN/m^{2}的。

3 盾构顶进推力的模型试验

3.1 试验设备

为研究在不同埋深、开口率及不同土性时的千斤顶顶进推力的变化情况，故开展了砂土地层中土压平衡盾构的掘削模型试验。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，见图5。

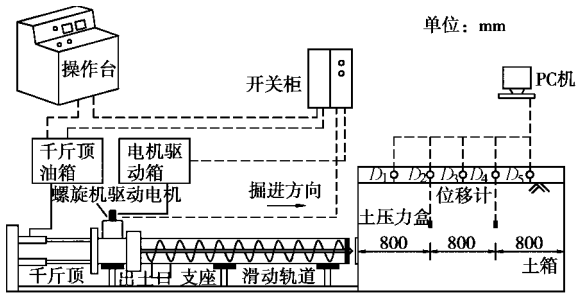


图 5 试验原理图

Fig. 5 Sketch map of model test

试验所用土箱长×宽×高为2.4 m×1.2 m×2.4 m，箱体一端开孔以便安装模型盾构，顶部呈敞口，以便堆放模型地层。模型盾构为直径D=400 mm的土压平衡式盾构，采用双壳单螺旋结构，内外两层壳之间可作为量测元件数据线的通道。为了保持开挖面的土压平衡状态，需要对排土量及掘进速度进行管理与控制，为此，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仓内布置4个微型压力传感器来量测掘进面前方的土压力。考虑到刀盘对不同性质土体掘削的难易程度，故在土仓壁上设置注浆孔，其管路沿盾构内外壳之间空隙敷设至盾尾接注浆泵，如图6所示。模型盾构的推进装置采用电动控制系统，顶进推力可以通过安装在千斤顶上的相关设备自行给出。此外，在盾构推进杆上还设有位移传感器，用来记录其推进的行程。

3.2 试验方法

试验地层分为软、硬两种，其中硬土地基完全用砂制成，软土地基则是在砂土中掺入30%的黏土颗粒。模型地层所用的砂采用上海本地购买的标准石英砂，

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

为了使所获地层与原状地层具有相同的重度和强度，可通过控制砂土堆放的密实度实现。密实度的控制可采用“沙雨法”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（该高度事先通过室内试验确定）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[11]。

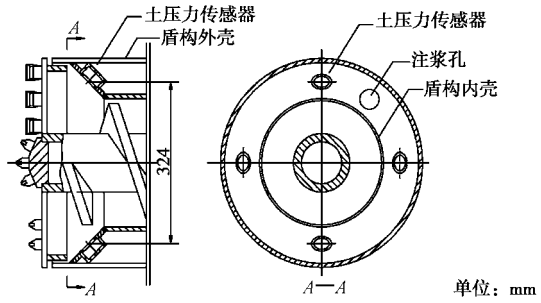


图 6 模型盾构图

Fig. 6 Sketch of model shield machine

3.3　试验结果分析

由于试验所用模型盾构是长圆筒状的，其长度并非依实物按比例盾构缩小。在埋深和地层条件不变的条件下，刀盘正面阻力F_3将是定值，盾壳外表面上的摩阻应力也将是定值，但是随着模型盾构机身进入土体中长度的增加，盾构外壳与土体的接触面积将越来越大，则作用在盾壳上的摩阻力将是线性增加的，并最终导致总推力会越来越大。因此，可认为所获得的随掘进距离而变化的总推力曲线中的最小总推力就相当于刀盘正面阻力F_3，而总推力曲线中相应于掘进距离增加而增加的部分则是土体与盾壳的摩擦阻力F_f。也就是说，土体-盾壳摩擦曲线将大致通过总推力的最低点，该最低点值就对应正面阻力F_3，而摩擦曲线的斜率便对应盾壳的摩阻应力f。

（1）不同埋深时的顶进推力比较

图7表示的是在同一刀盘开口率（ξ=68%）、不同埋深（H/D=2，3，4）条件下顶进推力的试验结果。3次试验均是在硬土地基中进行的，其中，盾构掘削过程的前半段是在干砂中进行的，而后半段则是在注水饱和的模型地层中进行的，从图中可得如下结论：①当盾构推进至相同位置处，总推力随着埋深的增加而相应增大；②3种埋深下的刀盘正面阻力F_3随着埋深的增加而相应加大；③无论注水与否，摩阻应力（曲线斜率）都随着埋深的增加而相应增大。但是，注水后的摩阻应力 f' 小于相应的注水前的摩阻应力f。

综上可见，上述试验规律与式（26）所反映的推力 P 与盾构埋深 H 的关系较为吻合。

（2）不同开口率时的顶进推力比较

图8表示的是同一埋深下（H/D=2）、不同刀盘开口率（ξ=68%，36%）时的顶进推力试验结果，2次试验均在软土地基中进行的，从中可得如下结论：①在埋深相同时，当盾构推进至相同位置处，总推力随着刀盘开口率的减小而相应增大；②在相同埋深条件下，由于两次推进的刀盘开口率不同，故起始推进时的推力不同，即开口率越大，则对应的刀盘正面阻力F_3相对较小；③推进过程中，摩阻应力 f 随着刀盘开口率的减小而略有增大，此处，两次试验的摩阻应力 f 不尽相同，可能是由于试验过程中的误差所致。

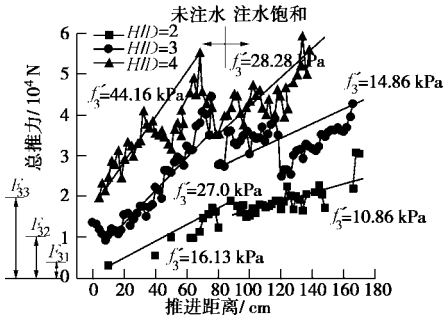


图 7 不同埋深时的总推力

Fig. 7 Thrust force under different burying depths

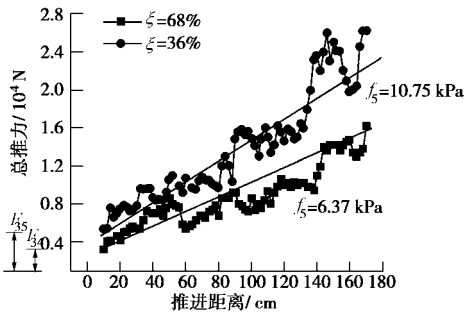


图 8 不同开口率时的总推力

Fig. 8 Thrust force under different cutter opening rates

综上可见，开口率对顶进推力的影响主要表现在刀盘正面阻力F_3的变化，即开口率越大，则对应的推力值相对较小，这一点与式（26）所反映的推力 P 与刀盘开口率 ξ 规律也较为吻合。

（3）不同土质时的顶进推力比较

图9表示的是在相同埋深、相同开口率、不同土质条件下的顶进推力试验结果。其中，可以发现，软土地基中的刀盘正面阻力F_3要小于其对应在硬土地基中的值；同样，软土地基中的摩阻应力 f 也同样小于其对应在硬土地基中的值。

由试验结果分析可知，土体重度和强度的提高，分别导致刀盘正面阻力F_3和摩阻应力 f 的提高，这与式（26）所反映的规律也较为吻合。

（4）正面推力与土仓压力

将千斤顶总推力减去对应的摩擦阻力就得到作用在盾构刀盘上的正面推力F_3。图10表示的是No.5次试

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

验推进过程中对应的正面推力与土仓压力随推进距离的变化情况，可以看出，正面推力与土仓压力的合力之间有着很好的对应关系，即同时增大或减小。由图11也可以看出，二者之间有着很明显的线性相关性，这与式（26）所反映的规律也较为吻合。

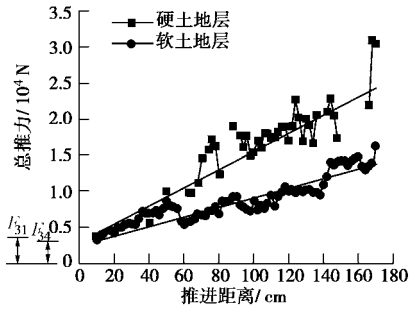


图 9 不同土性时的总推力

Fig. 9 Thrust force under different soil masses

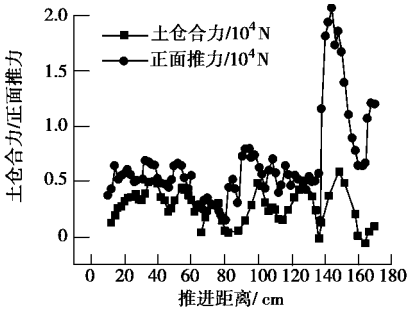


图 10 正面推力与土仓合力

Fig. 10 Frontal thrust force and total chamber pressure

4 应用实例

上海地铁 M8 线某区间隧道工程是上海市轨道交通杨浦线一期工程的一个重要组成部分。本工程的上、下行线隧道分别采用法国 FCB 和日本小松土压平衡式盾构施工。其中，下行线所用盾构尺寸为Φ6340 mm×6540 mm，重量约 235 t，土仓长度为 0.8 m。两台盾构分别从曲阳路东端头井下井，沿大连西路往东推进，穿密云路、天宝路，到达四平路站西端头井。该段隧道的底板标高在−10.789～−17.256 m，地面平均标高为+3.70 m，盾构主要穿越②$_{3\text{-}2}$灰色砂质粉土层、④灰色淤泥质黏土层及⑤$_1$灰色粉质黏土层，各土层的主要物理力学性质如表 1 所示。

表 1 土的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil

土层层号	土层厚度/m	重度/(kN·m^{-3})	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
②$_{3\text{-}2}$	2.8~11.8	18.3	6	49.5	8.22
④	4.0	16.6	12	9.5	2.15
⑤$_1$	5.4~7.75	17.9	17	17.5	3.74

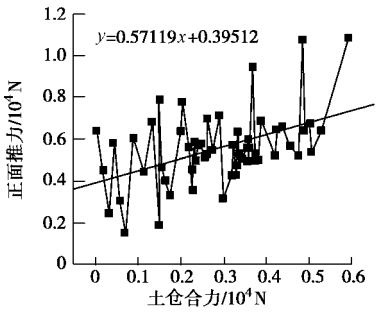


图 11 正面推力与土仓合力

Fig. 11 Frontal thrust force vs. total chamber pressure

这里以盾构推进至XX52截面至XX78截面之间为例，进行千斤顶顶进推力的计算分析。此时，盾构中心埋深在−11.0～−14.0 m，盾构主要穿越④灰色淤泥质黏土层。为计算简便，将整个上覆土层均按第④层土，即单一土层处理。利用式（1）～（26），可以计算出盾构掘削至各相应位置时的推力值，并与实测总推力值相比较（见图12），可以看出，二者有着较好的吻合性，并且都随着盾构埋深的增加而呈上升趋势。但是，推力计算值要略高于实测值，这是由于将上覆土层都简化为第④层土及没有考虑地下水影响所致。

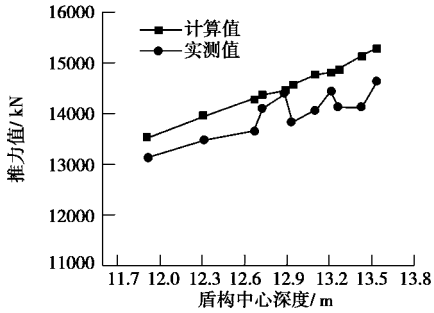


图 12 实测推力值与计算推力值比较

Fig. 12 Comparison between measured and predicted values of thrust force

5 结 语

研究了各推力分量的计算方法，并得出了如下结论。

（1）盾构顶进推力 P 随盾构埋深 H 的增大、土体强度（c，φ）的提高而增大。

（2）总推力 P 与 D^2 成正比例关系。

（3）总推力 P 与土仓隔板压力 p_0 成线性关系。

（4）在土仓压力 p_0 不变的情况下，刀盘开口率 ξ 越大，则对应的正面阻力 F_3 越小，相应的总推力 P 也会减小。

随后，开展了土压平衡盾构的掘削模型试验，研究了盾构在不同埋深、不同开口率及不同土性情况下千斤顶顶进推力的变化情况，试验结果与前述理论研

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

究较为吻合。

最后，结合上海某地铁隧道工程实例，应用本文推导的推力计算公式预测千斤顶推力，取得了较为满意的结果。但是，本文所给理论计算公式是在均匀地层条件下得出的，并没有考虑到复合地层及地下水位的影响，因此在应用时需注意其适用性。

致　谢：本次试验是在国家盾构试验技术研究中心试验室内完成的，期间得到了傅德明总工程师、张冠军高级工程师、吴兆羽、李向红高级工程师等的大力支持，在此一并表示感谢。

参考文献：

[1] 葛野恒夫, 仲井信雄, 橋本正. シールドマシン外周への摩擦低減材注入効果について[C]// 土木学会第 49 回年次学術講演会, 1994. (TSUNENO Kuzuno, NOBUO Nakai, TADASHI Hashimoto. Study on the effect of injecting frictional decrease material into the outside surface of shield machine[C]// 49th Academic Lecture of Civil Society, 1994. (in Japance))

[2] 松下雅行, 小森和男, 白井孝典. シールドマシンと地山の摩擦に関する模型実験[C]// 土木学会第 49 回年次学術講演会, 1994. (MASAYUKI Matsushita, KAZUO Komori, TAKANORI Shirai. Model experiment on the frictional relation between soil mass and shield machine[C]// 49th Academic Lecture of Civil Society, 1994. (in Japance))

[3] 西林聖武, 腾木育雄, 等. 泥水式シールドの掘進時におけるジャッキ推力とカッタートルクについて[C]// トンネル工学研究論文•報告集第 6 巻, 1996. (NORITAKE Nishibayshi, IKUO Fujiki, SATOSHI Takahshi, et al. A study on jack thrust and cutter torque for excavation with slurry shield[C]// Tunnel Engineering Research Dissertation, 1996. (in Japance))

[4] PELLET-BEAUCOUR A L, KASTNER R. Experimental and analytical study of friction forces during micro-tunneling operations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **17**: 83－97.

[5] 凌京蕾, 樊丽珍. 盾构技术及其在广州地铁的应用[J]. 广重科技, 2000: 25－32. (LING Jing-lei, FAN Li-zhen. Shield tunnel technology and its application to Guangzhou subway[J]. Guangzhong Technology, 2000: 25－32. (in Chinese))

[6] 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). (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). (in Chinese))

[7] 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))

[8] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004, **9**: 89－99. (ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming. Shield tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2004, **9**: 89－99. (in Chinese))

[9] 张　鼏. 具有套筒岩芯形成体的顶管顶进力的计算[J]. 隧道译丛, 1992(11): 51－53. (ZHANG Zhen. Calculation on the thrust force of pipe jack with column shape soil core in the chamber[J]. Journal of Tunnel Translations, 1992(11): 51－53. (in Chinese))

[10] 徐开达, 何维亨, 周杜鑫, 等. 软土地基盾构推进力和衬砌摩阻力的测试研究[J]. 建筑施工, 1995, **17**: 30－33. (XU Kai-da, HE Wei-heng, ZHOU Du-xin, et al. The experiment and research of shield force and lining friction under soft foundation[J]. Building Construction, 1995, **17**: 30－33. (in Chinese))

[11] CHUNGSIK Yoo, HYUN-KANG Shin. Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes-labortatory and numerical investigation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, **18**: 303－319.

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