

文章编号: 1000-7598-(2012)09-2713-06

超大直径土压平衡盾构土舱压力和开挖面水土压力分布特性研究

侯永茂^{1,2}, 杨国祥², 葛修润¹, 郑宜枫², 顾沉颖²

(1.上海交通大学 土木工程系, 上海 200240; 2.上海隧道工程股份有限公司, 上海 200082)

摘要: 土压平衡盾构土舱压力的设定对于控制盾构掘进对周围环境影响意义重大。结合某超大直径隧道工程, 在土舱隔板和盾构掘进断面上埋设水、土压力计, 对土压平衡盾构土舱内和开挖面上的水、土压力的分布和变化情况进行研究。监测结果揭示了土压平衡盾构掘进过程中土舱压力和开挖面水、土压力分布和发展特性。结合盾构施工参数进行研究, 发现土舱压力增量可以通过螺旋机转速、盾构掘进速度等施工参数计算得到。开挖面上水、土压力无法完全传递至土舱隔板, 土舱压力增量约为开挖面总应力增量的76.3%。研究成果为超大直径土压平衡盾构的土舱压力设定提供了有价值的参考。

关键词: 土压平衡盾构; 开挖面水、土压力; 土舱压力

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Study of distribution properties of water and earth pressure at excavation face and in chamber of earth pressure balance shield with super-large diameter

HOU Yong-mao^{1,2}, YANG Guo-xiang², GE Xiu-run¹, ZHENG Yi-feng², GU Chen-ying²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: The chamber pressure control is a key operation for controlling the impact of the earth pressure balance (EPB) shield excavation on the environment. Based on the monitored data, the water and earth pressure distribution properties in chamber and at the excavation face of a super-huge diameter EPB shield tunneling are studied. According to the construction parameters analysis, it is found that the increment of chamber pressure could be calculated by the construction parameters, such as rotation speed of screw conveyor and advancement rate. In addition, the water and earth pressure at excavation face could not be transfer to the chamber completely, and the transmissibility is about 76.3%. The research results of this paper provide valuable references for the setting method of the chamber pressure of the super-huge diameter EPB shield.

Key words: earth pressure balance shield; water and earth pressure at excavation face; chamber pressure

1 引言

土压平衡盾构掘进过程中, 土舱压力的设定对于控制开挖面稳定、减少盾构施工对周围环境影响意义重大^[1-2]。传统的关于土压平衡盾构开挖面稳定的研究^[3]直接考虑开挖面支护压力对开挖面稳定的影响, 并未将开挖面支护压力与土舱压力联系起来。近几年随着对土压平衡盾构开挖面稳定特性认识的深入, 研究重点开始转向土舱压力控制以及开挖面压力、土舱压力和盾构施工参数关系方面。魏建华等^[4]结合现场观测数据阐述了土压平衡盾构开挖面稳定机制, 提出土舱压力的设定与控制方法。

刘东亮^[5]对土舱压力的影响因素和控制方法进行了分析, 提出了土舱压力控制流程图。王洪新等^[6-7]建立土压平衡盾构掘进的数理模型, 推导出总推力、土舱压力、螺旋机转速、掘进速度间关系的数学表达式, 在此基础上得出土压平衡盾构掘进平衡控制理论。朱合华^[8]、徐前卫^[9]等利用盾构掘进的模型试验得出土压平衡盾构掘进参数之间关系曲线。杨洪杰等^[10]在软土、砂土和砂砾土层中进行盾构机模型的掘进试验, 研究了试验模型周围土压力变化和刀盘开口率变化对密封舱内外土压力的影响, 提出土压平衡盾构土舱与开挖面间存在压力差。王洪新^[11]建立刀盘挤土的数学模型计算得到不同刀盘型式刀

收稿日期: 2011-05-16

基金项目: 上海市博士后基金项目资助 (No. 11r21421200)。

第一作者简介: 侯永茂, 男, 1981年生, 博士, 主要从事隧道工程和基坑工程方面的研究。E-mail: yongmaohou@yahoo.cn

盘前方土体附加应力, 并利用试验数据进行验证。上官子昌等^[12]基于数值方法提出土舱压力控制的参考模型, 反映土舱压力与盾构机推进速度和螺旋机转速间的映射关系。武力等^[13]利用离散元对土舱内土体压力分布模式进行研究, 得出土舱隔板上压力分布模式及开挖面压力与土舱压力的关系。施虎等^[14]建立了盾构总推力的数学计算模型, 反映了土舱压力与盾构总推力的关系, 并通过室内模型试验数据予以验证。

本文结合上海某超大直径土压平衡施工的隧道工程, 对开挖面水、土压力和土舱压力分布特性进行研究。通过在土舱内部和盾构掘进断面上埋设水、土压力传感器, 监测盾构掘进过程中其土舱压力和开挖面前方水、土压力的分布和发展情况。对监测结果和盾构掘进参数进行了研究, 讨论了土舱压力、开挖面水、土压力和施工参数间的关系。最后, 将监测结果与已有文献中的理论方法进行对比分析。

2 背景工程

2.1 工程概况

上海某地下公路隧道工程采用直径为 14.27 m 的超大直径土压平衡盾构施工, 隧道砌结构外径为 13.95 m, 内径为 12.75 m, 厚度为 0.6 m, 环宽为 2 m。隧道主线最大纵坡为 5.5%, 最小平曲线半径为 700 m, 隧道全长为 1 862.7 m。隧道管片采用螺栓连接, 错缝拼装。

工程采用的超大直径土压平衡盾构刀盘型式如图 1 所示。刀盘面板由辐条面板和边缘面板组成, 辐条面板和边缘面板各 8 副, 呈 45° 夹角。辐条面

板宽度为 0.9 m, 边缘面板距离刀盘中心距离为 3.7 m, 刀盘的开口率为 29%。盾构机采用轴式螺旋输送机出土, 螺旋输送机内径为 1 500 mm, 轴径为 406.5 mm, 翼片间距为 900 mm。

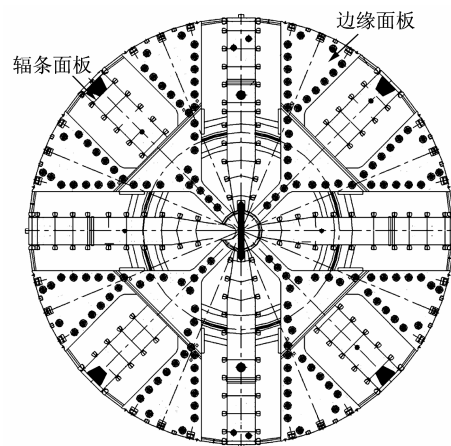


图 1 盾构机刀盘面板示意

Fig.1 Schematic diagram of cutter head

2.2 地质条件

根据地勘报告, 场地为古河道沉积区。在勘探深度范围内, 自上而下土层可分为 9 个大层, 13 亚层及 2 个夹层。其中①层为近代人工堆填土, ②~⑤层为第四纪全新世 Q_4 沉积层, ⑥~⑨层为第四纪上更新世 Q_3 沉积层。地下水位埋深为地表以下 0.40~2.00 m。图 2 为盾构穿越主要影响的土层分布情况, 图中揭示了土体重度 γ 、孔隙比 e 、直剪固快强度黏聚力 c 和内摩擦角 φ 、静力触探 P_s 值以及变形模量 E_s 沿深度的变化。

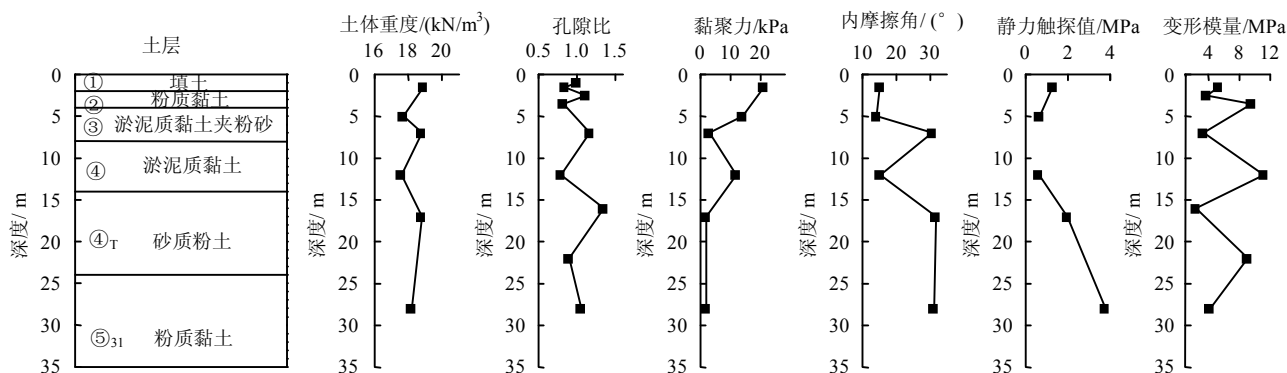


图 2 土体分层及岩土参数变化曲线

Fig.2 Soil profiles and variation of geotechnical parameters

3 土舱压力和水、土压力测点布置

为了研究超大直径土压平衡盾构开挖面水、土

压力以及土舱压力的分布特性, 在盾构始发试验段埋设水、土压力监测断面, 监测断面位于 H90 (隧道第 90 环管片处), 在盾构通过监测断面过程中记

录土舱压力和水、土压力测试数据。

3.1 土舱压力测点布置

为了全面监测盾构土舱压力的分布和变化情况,在土压平衡盾构土舱密封隔板上布设土压力传感器。图3为盾构土舱隔板上土压力传感器的布置情况,土舱隔板上共布置6个传感器,其中1[#]和6[#]、2[#]和5[#]、3[#]和4[#]土舱压力传感器距离盾构横截面轴线高度相同,分别为5.5、2.0、2.0 m。

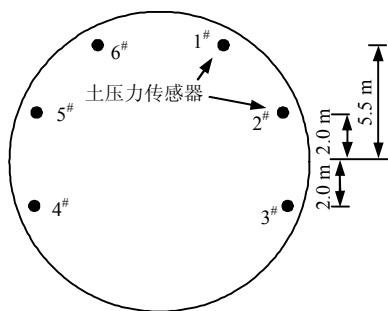


图3 土舱压力测点布置

Fig.3 Monitoring points of chamber pressure

3.2 开挖面水、土压力测点布置

图4为盾构掘进监测断面上水、土压力传感器的布置情况。监测断面处盾构轴线埋深为25.1 m。为了监测盾构开挖面上水、土压力的变化情况,孔隙水压力传感器P1[#]、P2[#]和土压力传感器E1[#]、E2[#]埋设于盾构刀盘正前方,埋深分别为24 m和29 m。孔隙水压力传感器P3[#]和土压力传感器E3[#]埋深为34 m,位于刀盘下方1 m左右。埋设的水、土压力传感器可以监测到刀盘切削破坏传感器前土体的水、土压力变化情况,其监测结果不仅可以描述盾构掘进过程中其前方土体的水、土压力变化规律,刀盘到达监测断面时的监测值亦可以反映开挖面土体的水、土压力情况。

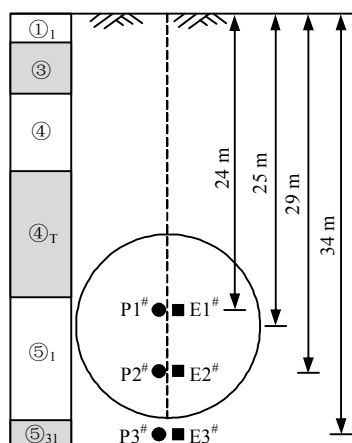


图4 开挖面水、土压力测点布置

Fig.4 Monitoring points at excavation face

4 盾构通过监测断面的施工参数

盾构施工参数对于开挖面受力特性有重要意义,因此,选取盾构切口从第75环管片至105环管片共30环盾构施工参数进行分析。盾构掘进过程中刀盘转速保持0.4 r/min不变。图5为各环盾构平均掘进速度和螺旋机平均转速,图6为各环盾构平均总推力和平均刀盘扭矩。由图可见,盾构掘进速度与螺旋机转速间存在一定的线性关系,而盾构总推力和刀盘扭矩间亦存在线性关系。盾构刀盘通过H90监测断面时盾构推进速度为26 mm/min,螺旋机转速为3.1 r/min,盾构总推力为78.773 MN,刀盘扭矩为8.745 MN·m。

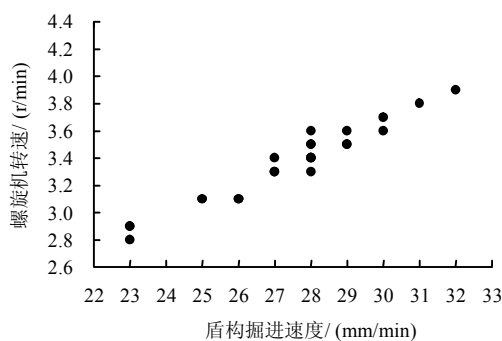


图5 盾构掘进速度和螺旋机转速关系

Fig.5 Advancement rate and rotation speed of screw conveyor

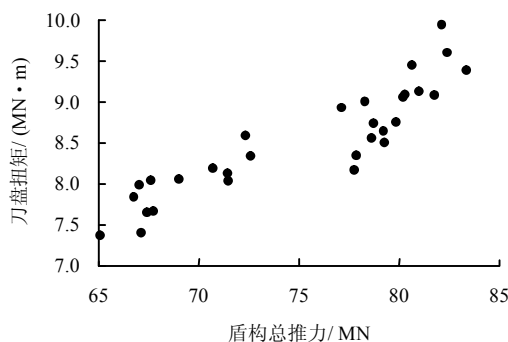


图6 盾构总推力和刀盘扭矩关系

Fig.6 Total thrust and torque of cutter head

5 监测结果分析

5.1 土舱压力

由于盾构掘进施工为线型循环过程,因此,每环盾构掘进和管片拼装过程土舱压力的变化规律基本相同。图7为盾构刀盘通过监测面过程中记录的土舱压力随盾构掘进施工的变化情况。由图可见,相同埋深的土舱压力计记录的数据相差不大,不同埋深的土舱压力计记录的数据发展规律相同。

盾构正常掘进过程中,土舱压力基本保持不变,当盾构非正常停推,土舱压力随停推时间呈指数降低,恢复正常推进后土舱压力在短时间内上升至设定值并保持不变。管片拼装阶段,由于盾构停止推进,土舱压力随时间呈指数下降。当该阶段持续时间过长,土舱压力降低至某一值后基本保持不变,此时的记录数据基本可以视为静止土压力。管片拼装完毕,下一环开始推进后,土舱压力在很短时间内增大至设定值,随后基本保持不变。

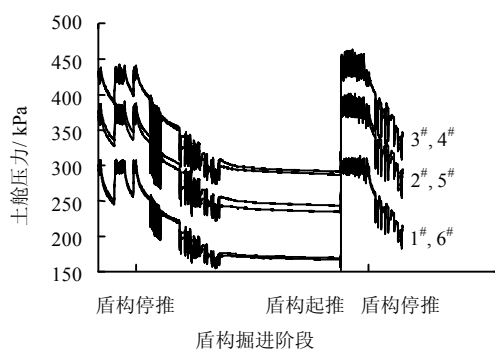


图7 土舱压力发展情况

Fig.7 Development of chamber pressure

由于盾构停推的时间足够长,因此,图中盾构停推阶段土压力曲线降低至一定值后基本保持不变,可以假定此时土舱压力记录值为静止土压力。不同埋深土舱静止压力和正常掘进时的土舱压力的差值如表1所示,可见压力增量随深度变化不大,压力增量的平均值约为133.5 kPa。

表1 土舱压力增量

Table 1 Increment of soil cabin pressure

土舱压力 传感器编号	土舱压力/kPa		
	静止	正常掘进	压力增量
1#, 6#	164.0	294.0	130.0
2#, 5#	248.0	382.5	134.5
3#, 4#	303.5	439.5	136.0

图8为选取一环盾构起推阶段螺旋机转速 N 和推进速度 v 的比值 N/v 随盾构推进行程的变化情况。由图可见,盾构起推阶段 N/v 随盾构行程增大呈线性增大,增大至一定程度 N'/v' (N'/v' 为稳定的螺旋机转速和推进速度的比值)基本保持不变。定义变量 L_a 为

$$L_a = \int \left(1 - \frac{N/v}{N'/v'} \right) dL_0 \quad (1)$$

统计各环管片盾构推进阶段土舱压力增量与

L_a 的关系,如图9所示。可见土舱压力增量与 L_a 可以用线性方程进行拟合。

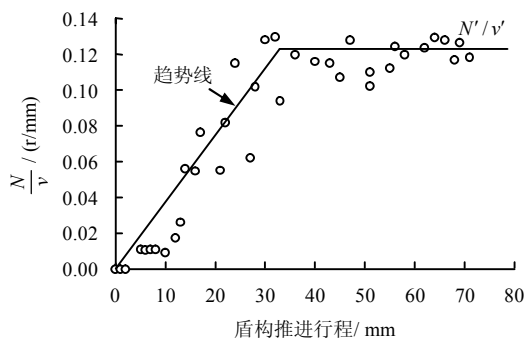


图8 盾构起推阶段 N/v 的变化情况

Fig.8 Development of N/v at the beginning stage

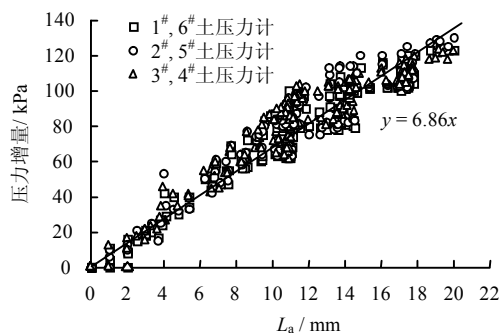


图9 L_a 与土舱压力增量的关系

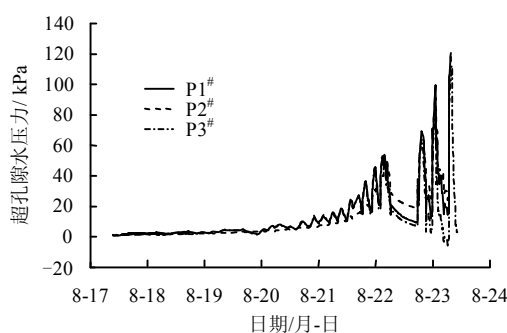
Fig.9 Relationship between L_a and the increment of chamber pressure

5.2 开挖面水、土压力

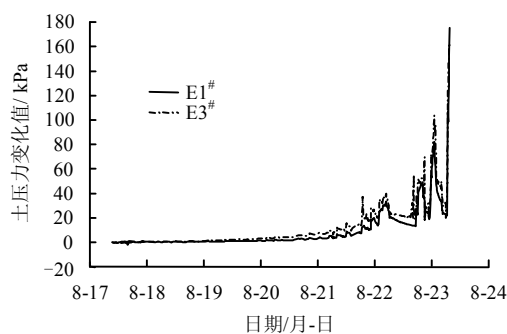
图10为监测得到的超孔隙水压力和土压力增量的发展情况。由图可见,超孔隙水压力对于盾构的掘进行为非常敏感,盾构向前掘进施工时,超孔隙水压力上升,管片拼装阶段盾构停推,孔隙水压力下降。因此,超孔隙水压力变化曲线的波谷代表盾构开始推进,而波峰代表盾构推进结束。盾构开挖面距离监测断面20 m时,3个测点的最大超孔隙水压力为12 kPa。盾构开挖面距离监测断面10 m时,3个测点的最大超孔隙水压力增为36 kPa。随着盾构开挖面与监测断面距离的减小,超孔隙水压力急剧上升,盾构开挖面到达监测断面时,P1#、P2#、P3#测点超孔隙水压力分别达到120.6、120.4、112.3 kPa。可见,开挖面土体超孔隙水压力与深度关系不大,为120 kPa左右,开挖面下方土体超孔隙水压力略小。

盾构开挖面距离监测断面10 m时,最大土压力增量达到36 kPa,与超孔隙水压力相差不大。可见,当距离盾构开挖面10 m左右的土体应力状态改变主要由孔隙水压力改变引起的。随着盾构开挖

面与监测断面距离的减小,土压力变化值急剧增大,盾构开挖面到达监测断面时, $E1^\#$ 、 $E3^\#$ 测点土压力增量分别达到 175.1、172.7 kPa。可见开挖面土压力变化值与深度关系不大,为 175 kPa 左右。由于开挖面超孔隙水压力约为 120 kPa,根据饱和土有效应力原理,土体有效应力增量为 54.5 kPa,远小于超孔隙水压力。与土舱压力对比可以发现,盾构掘进前行导致的开挖面总应力增量与土舱压力增量并不相同,土舱压力增量小于开挖面土体总应力增量,大于开挖面土体的超孔隙水压力。土舱压力增量约为开挖面总应力增量的 76.3%。



(a) 超孔隙水压力



(b) 土压力增量

图 10 开挖面水、土压力发展情况

Fig.10 Development of water and earth pressure at excavation face

文献[11]中给出了盾构正面附加接触压力的计算方法:

$$\Delta p = \frac{10.13(1-\mu)E_u\Delta\bar{l}}{(1+\mu)(3-4\mu)D} + \Delta p' \quad (2)$$

式中: μ 为泊松比,假定没有体积变形时取 0.5; E_u 为不排水变形模量,较软黏土时 $E_u = (36 \sim 80) \cdot E_{s0.1-0.2}$; $\Delta\bar{l}$ 为刀盘前方土体挤压变形; $\Delta p'$ 为切口切入土体产生的挤压力,一般取 10~25 kPa; D 为盾构直径。

根据本工程中刀盘的面板型式、刀盘转速和推进速度计算得到 $\Delta\bar{l}$ 为 15.6 mm,取 E_u 为 42 MPa,

$\Delta p'$ 为 20 kPa,则盾构推进时正面附加接触压力 Δp 为 175 kPa,与实际监测值相同。可见文献[11]建议的盾构正面附加接触压力计算公式有一定的精度,但需要注意的是,该公式受不排水变形模量 E_u 的影响很大。

6 结 论

(1) 土压平衡盾构掘进过程中,掘进速度与螺旋机转速基本呈线性关系,盾构总推力与刀盘扭矩间亦呈一定线性关系。

(2) 土舱压力受盾构施工的影响非常明显。盾构掘进前行过程中,土舱压力基本保持不变,且不同埋深的土舱压力增量基本相同,停推过程中土舱压力呈指数降低。

(3) 盾构起推阶段土舱压力增量与螺旋机转速和盾构掘进速度比值 N/v 随盾构掘进不断增大,至盾构掘进一定行程后基本保持不变,土舱压力增量与 N/v 的发展间存在一定关系。

(4) 盾构前方水、土压力随盾构推进呈波浪型增长,波峰代表盾构停推,波谷代表盾构起推。盾构开挖面上不同埋深的水、土压力增量基本相同。开挖面上水、土压力无法完全传递至土舱隔板,土舱压力增量约为开挖面总应力增量的 76.3%。

参 考 文 献

- [1] ANAGNOSTOU G, KOVARI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2): 165—173.
- [2] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(2): 160—171.
- [3] 乔金丽, 张义同, 高健. 考虑渗流的多层土盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1497—1502.
- [4] QIAO Jin-li, ZHANG Yi-tong, GAO Jian. Stability analysis of shield tunnel face in multilayer soil with seepage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1497—1502.
- [5] 魏建华, 丁书福. 土压平衡式盾构开挖面稳定机制与压力舱土压的控制[J]. *工程机械*, 2005, (1): 18—19.
- [6] WEI Jian-hua, DING Shu-fu. Excavating face stabilization mechanism of soil pressure balance shield and control of soil pressure in pressure cabin[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2005, (1): 18—19.

- [5] 刘东亮. EPB 盾构掘进的土压控制[J]. 铁道工程学报, 2005, (4): 45—51.
LIU Dong-liang. Soil pressure control for EPB shield excavation[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2005, (4): 45—51.
- [6] 王洪新, 傅德明. 土压平衡盾构掘进的数学物理模型及各参数间关系研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 86—90.
WANG Hong-xin, FU De-ming. A mathematical model and related parameters for EPD shield tunneling[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(9): 86—90.
- [7] 王洪新, 傅德明. 土压盾构平衡控制理论及实验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 61—68.
WANG Hong-xin, FU De-ming. Theoretical and test studies on balance control of EPB shields[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(5): 61—68.
- [8] 朱合华, 徐前卫, 廖少明. 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, 28(5): 553—557.
ZHU He-hua, XU Qian-wei, LIAO Shao-ming. Experimental study of working parameters of EPB shield machine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(5): 553—557.
- [9] 徐前卫, 朱合华, 廖少明. 软土地层土压平衡盾构法施工的模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1849—1857.
XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming. Experimental study of EPB shield tunnel construction in soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(12): 1849—1857.
- [10] 杨洪杰, 傅德明, 葛修润. 盾构周围土压力的试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 29(12): 1849—1857.
YANG Hong-jie, FU De-ming, GE Xiu-run. Experimental study and numerical simulation of earth pressure around shield machine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 29(12): 1849—1857.
- [11] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 113—118.
WANG Hong-xin. Effect of cutter head compressing the front soil and influence of head aperture ratio on contact pressure of EPB shield to the front soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(7): 113—118.
- [12] 上官子昌, 李守巨, 孙伟, 等. 土压平衡盾构机密封舱土压力控制方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 402—405.
SHANGGUAN Zi-chang, LI Shou-ju, SUN Wei, et al. Controlling earth pressure of head chamber of earth pressure balance (EPB) shield machine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(3): 402—405.
- [13] 武力, 屈福政, 孙伟, 等. 基于离散元的土压平衡盾构密封舱压力分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 18—23.
WU Li, QU Fu-zheng, SUN Wei, et al. Discrete numerical model for analysis of chamber pressure of earth pressure balance shield machine[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(1): 18—23.
- [14] 施虎, 龚国芳, 杨华勇, 等. 盾构掘进机推进力计算模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(1): 126—131.
SHI Hu, GONG Guo-fang, YANG Hua-yong, et al. Determination of thrust force for shield tunneling machine[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2011, 45(1): 126—131.

书 讯

GB 50307—2012 城市轨道交通岩土工程勘察规范

标准规范类, 北京市规划委员会编著, 大 32 开, 268 千字, 224 页, 平装, 定价: 54 元, 2012 年 7 月出版, 书号: 1580177·870。

本规范由中华人民共和国住房和城乡建设部第 1269 号公告批准, 编号为 GB50307—2012, 自 2012 年 8 月 1 日起实施。其中有 5 条强制性条文, 必须严格执行。原《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》GB50307—1999 同时废止。本规范适用于城市轨道交通工程的岩土工程勘察, 共分 19 章和 11 个附录。主要内容有: 总则, 术语和符号, 基本规定, 岩土分类、描述与围岩分级, 可行性研究勘察, 初步勘查详细勘察, 施工勘察, 工法勘察, 地下水, 不良地质作用, 特殊性岩土, 工程地质调查与测绘, 勘探与取样, 原位测试, 岩土室内试验, 工程周边环境专项调查, 成果分析与勘察报告, 现场检验与检测等。

读者对象: 城市轨道交通岩土工程勘察、设计、施工人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)