

浅析盾构隧道模型试验的现状与发展

叶 飞^{1,2} 何 川¹ 王士民¹

(1 西南交通大学 地下工程系,成都 610031; 2 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,西安 710064)

摘 要 模型试验是盾构隧道相关研究工作中常用的研究手段。文章对目前盾构隧道模型试验所涉及到的问题进行了系统总结分析,将其归结为管片结构的受力问题、隧道结构本身的分析模型问题、结构与围岩的相互作用问题、开挖面稳定问题、结构与邻近结构物的相互作用问题、隧道施工扰动与控制问题,以及其他问题等。通过典型模型试验实例,对每类问题进行了分析阐述,系统归纳了模型试验在盾构隧道相关研究工作中的进展和成果。针对盾构隧道模型试验经常涉及到的诸如结构模型、模型土、模型箱等材料的选择,加载方案的设计,以及试验方案的综合设计等问题进行了阐述分析,并针对性地提出了意见和建议。

关键词 盾构隧道 模型试验 管片 结构

中图分类号:U451+.5 **文献标识码**:A

1 引 言

模型试验,它以相似原理为理论基础,是一种发展较早、应用广泛、形象直观的岩土介质、工程结构物理力学特性的研究方法。模型试验可以模拟各种相对复杂的边界条件,能较全面而又形象地呈现工程结构与相关岩土体共同作用下的应力和变形机制、破坏机理、形态及失稳阶段的全貌。长期以来,模型试验方法一直是研究解决大型复杂岩土与结构工程课题的重要手段^[1]。

隧道工程的相关力学问题,是介质性质、受力条件和边界条件都很复杂的三维问题,时至今日,数学力学方法只能为一些形状和边界条件都相对简单的地下工程提供应力场和位移场的理论解,许多分析性结论大多来自现场实测、数值模拟分析,以及模型试验研究成果^[2]。而且,一些经简化分析后的理论成果也需要现场或实验室模型试验结果的验证与支持。

总而言之,物理模型由于是真实的物理实体,当它在满足相似原理的条件下,能避开数学和力学上

的困难,真实、全面、直观、准确地反映岩土体及支护体系的力学特性,使人们更容易全面把握岩体工程的整体受力特征、变形趋势及稳定性特点。它一方面可以与数学模型相互验证,另一方面也为发现一些新的力学现象和规律,为建立新的计算理论和数学模型提供重要的依据^[3]。

2 盾构隧道模型试验的研究问题

对于盾构隧道来说,模型试验早已成为相关研究工作中不可或缺的研究手段,模型试验已渗透到各个环节涉及到的诸多问题。

2.1 管片结构的受力问题

主要是基于荷载结构法,取盾构隧道的一块或几块(一环或几环)管片进行试验,用以研究管片本身及接头的受力性能。

(1) 管片接头性能试验

盾构隧道管片间多以螺栓连接,由于接缝受力的复杂性,工程上经常采用试验的方法为设计计算和接头改进提供依据。

修改稿返回日期:2010-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808020);中国博士后科学基金资助项目(20080440183)。

作者简介:叶 飞(1977-),男,副教授,博士后,主要从事隧道工程相关理论与技术研究, E-mail: xianyefei@sohu.com。

图 1 所示为某大型水工盾构隧洞管片衬砌的荷载试验示意图(采用了 1:1 足尺预制管片试件),试验取一定偏心距进行加载,然后测出偏心距不变条件下接缝转角与接缝弯矩的关系曲线,用以确定接头的抗弯刚度^[4]。

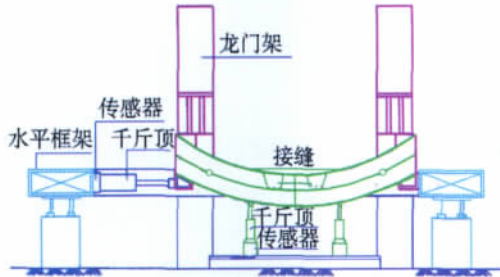


图 1 接头荷载试验加载示意^[4]
Fig.1 Loading test of segment joint^[4]

预应力管片,是近年来出现的一种新型管片结构,对于其接头性能的研究尚刚起步,理论上基本是无章可循,因而其接头抗弯刚度一般也是通过模型试验来确定。图 2、图 3 分别为日本和国内做预应力管片接头性能研究时做接头试验的图片^[5,6]。

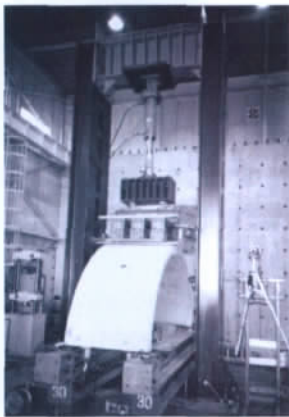


图 2 预应力管片接头试验^{[5](1)}
Fig.2 Joint test of PC segment(1)

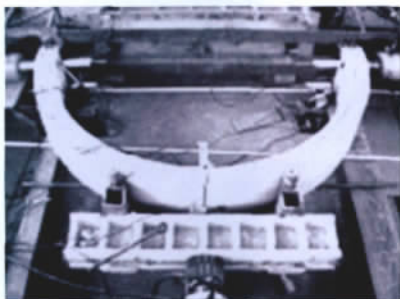


图 3 预应力管片接头试验^{[6](2)}
Fig.3 Joint test of PC segment(2)

(2) 单块管片抗弯试验

为更好地模拟管片环在隧道土体中的受力情况,检验管片的极限抗裂强度及抗破坏能力是否能够承受隧道土体的土压力及地下水压力的作用,工程实践中还经常对单块管片进行加载试验,如图 4 所示。



图 4 管片抗弯试验
Fig.4 Bending test of single segment

(3) 管片整体承载力及稳定性试验

为研究管片衬砌在施工荷载及围岩压力(及水压力)作用下的结构受力与变形特性,验证衬砌管片的承载能力和稳定性,经常对一些大型或重要盾构隧道工程开展整环加载试验。

作为世界第一大断面盾构隧道,上海长江隧道在研究管片力学性能过程中,采用了比例为 1:1 的整环模型试验(管片外径达 15 m,见图 5)^[7]。

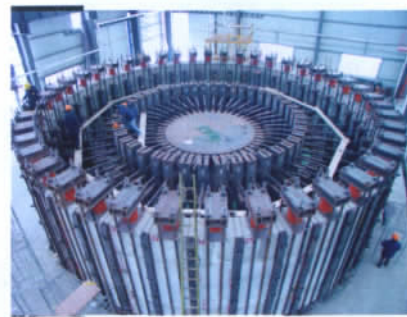


图 5 上海长江隧道 1:1 模型试验
Fig.5 Whole scale model test of Shanghai Changjiang Tunnel

上海轨道交通杨浦线(M8 线)施工中,在我国第一次采用了双圆盾构工法,为详细研究其衬砌结构的受力性能,先后进行了两次模型试验(图 6、图 7)^[8]。

(4) 管片抗渗性能试验

为验证管片经受隧道土体中地下水渗透压力作用的情况,检验管片抵抗渗漏的能力,进而从一个侧

面反映管片内部结构的密实性, 工程实践中经常采用管片抗渗试验的方式进行研究, 如图 8 所示。



图 6 双圆盾构隧道管片模型试验^①(1)

Fig.6 Structural test of segment of DOT tunnel



图 7 双圆盾构隧道管片模型试验^①(2)

Fig.7 Structural test of segment of DOT tunnel



图 8 管片抗渗试验

Fig.8 Permeability resistance test of segment

(5) 管片吊装孔螺栓抗拔试验

为模拟管片在吊运和在隧道内施工安装过程中吊装孔螺栓的受力情况, 进而检验管片吊装孔螺栓抵抗被拔出破坏的能力是否能满足设计及施工要求, 工程实践中还经常进行管片吊装孔的抗拔试验, 如图 9 所示。

2.2 隧道结构本身的分析模型问题

针对现有的盾构隧道结构分析模型, 设计相应

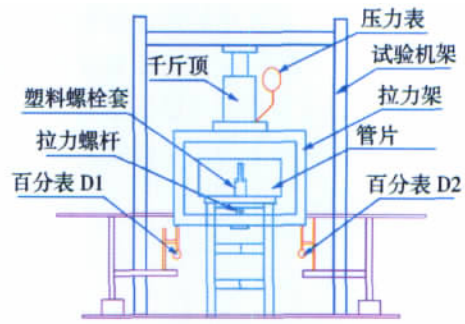


图 9 管片吊装孔螺栓抗拔试验示意^①

Fig.9 Pullout resistance test of bolt hole of segment

的模型试验, 对模型中的部分参数的取值或经验公式进行分析研究, 也是盾构隧道模型试验经常涉足的方向。如上海同济大学的黄宏伟教授及其课题组针对修正惯用法所做的横向刚度有效率的模型试验研究, 及该课题组所做的有关盾构隧道纵向性能的模型试验研究^[10,11]; 西南交通大学何川教授及其课题组所做的管片衬砌纵向结构力学特征的模型试验研究等^[12]。

2.3 隧道结构与围岩的相互作用问题

隧道结构与周围岩土的作用问题, 一直是隧道工程领域研究的热点问题。

为研究南京长江盾构隧道 $\phi 14.5\text{ m}$ 超大断面单层装配式管片衬砌在高水压条件下的力学行为特征, 以及结构与周围土体的相互作用关系, 西南交通大学何川教授课题组采用相似模型试验方法进行了卓有成效的专题研究^[13]。

为研究地铁盾构隧道衬砌在地裂缝带影响下的应力应变特征, 以及衬砌周边土体受力情况和沉降特征等, 西安地铁也采用了 1:5 的大型结构模型试验^[1,14], 采用的隧道模型如图 10 所示。



图 10 西安地铁隧道 1:5 结构模型^①

Fig.10 Structure model of shield segments of Xian metro

在隧道结构与围岩的相互作用问题的研究中,离心试验也是经常用到的模型试验方法^[15]。

2.4 开挖面稳定问题

开挖面稳定问题,可谓盾构隧道研究工作中的经典问题,模型试验在该问题的研究中也起着举足轻重的地位,诸多的学者针对该问题都进行过相关模型试验的尝试^[16]。

为研究上海长江隧道所用泥水盾构的开挖面平衡机理,以及盾构推进时的沉降分布规律,同济大学李昀博士、张子新教授等进行了相应模型试验研究^[17],试验装置如图 11 所示。

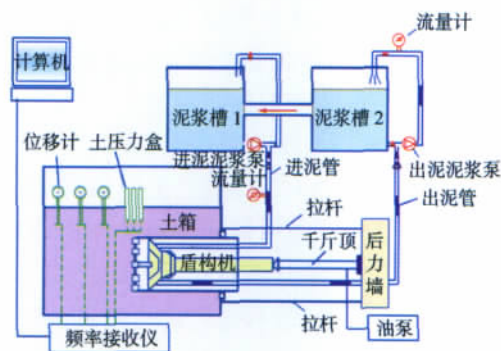


图 11 模型试验装置^[17]
Fig.11 Installation of model test

2.5 隧道与邻近结构物的相互作用问题

近些年来,盾构隧道与邻近其他工程结构物的相互作用问题,已成为工程实践中经常遭遇的不可回避的问题。对于这些问题的研究,模型试验已成为不可忽视的重要研究手段。

南京地铁 1 号线在下穿玄武湖公路隧道时,与玄武湖公路隧道底板的最小净距仅为 1.004 m,属典型“超近接施工”问题。为将盾构掘进对玄武湖隧道的影响减小到最低限度,并在施工前探明两隧道间的相互影响关系,研究者特别设计了相似模型试验进行研究^[18]。

广州地铁三号线大塘—沥滘区间因存在重叠下穿问题,为研究新建地铁盾构隧道重叠下穿施工所引起的上部已建隧道的变形和附加内力,也进行了室内相似模型试验^[19,20]。

上海轨道交通 9 号线 R413 标段工程,为上、下行线和东出入段线三线并行地段(均为直线段),上下行线间距为 20 m,而东出入段线位于上、下行

线中间,三线间隧道净距仅为 3.8 m。研究者采用室内离心模型试验为主体的方法,对三管并行盾构隧道的近接施工时衬砌周围土体无加固圈和有加固圈的情况下,对围岩压力、衬砌结构的受力特征和地表沉降进行了研究^[21]。

2.6 隧道施工扰动与控制问题

设计开发盾构掘进机模型,研究不同土质条件下盾构掘进造成的施工扰动,进而分析掘进过程的施工控制,是近年来国内常采用的研究手段。

何川教授课题组以我国城市地铁区间盾构隧道为背景,研制了 $\phi 52$ cm 的土压平衡式模型盾构及模拟试验平台,运用该模拟平台,实现了掘削面开挖、出土、盾构机推进、管片拼装和盾尾脱环全过程的室内模拟,进而研究了土压平衡式盾构掘进过程对地层的影响及控制^[22,23]。

同济大学的徐前卫博士、朱合华教授等以上海地铁 M8 线某区间隧道工程为研究背景,基于国家 863 项目试验平台,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,得到了软土地层中土压平衡盾构掘进施工过程中土体扰动的一些规律^[24],其试验系统原理图如图 12 所示。采用同样试验系统和类似试验手段,该课题组还进行了砂土地层的相关研究^[25,26]。

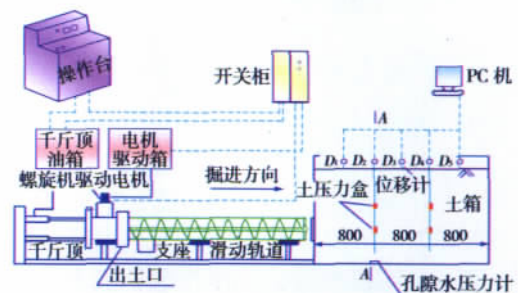


图 12 模型试验原理(单位: mm)^[16]
Fig.12 Principle diagram of model test

2.7 其他问题

(1) 泥水喷涌试验

泥水盾构是跨江河、跨海峡等水底隧道施工中常选用的盾构类型。针对泥水盾构施工时泥水压力过大可导致开挖面前方地层劈裂,引发泥水喷发、河(海)水倒灌事故等问题,北京交通大学袁大军教授课题组结合模型试验,对地层劈裂发生、伸展机制及

不同泥水压力对地层劈裂的影响等问题进行了系统研究^[27]。

(2) 注浆试验

壁后注浆是盾构隧道施工过程中为及时有效填充盾尾间隙而进行的一道关键工序, 众多的盾构隧道有关施工方面的研究都围绕壁后注浆而展开, 模型试验在该方面也发挥着重要作用。

河海大学韩月旺博士等, 利用自制壁后注浆单元体模型试验装置, 研究了不同的注浆压力、注浆材料及围岩土质条件对注浆体变形及注浆压力消散的影响规律^[28,29], 其采用的试验装置如图 13 所示。上海交通大学的学者针对砂砾地层, 通过模型试验方法, 对盾构施工中壁后注浆的浆液作用效果进行了研究^[30]。

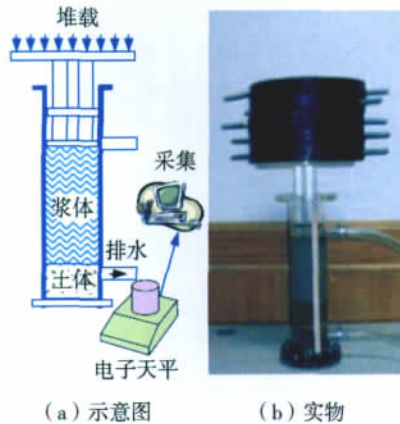


图 13 浆体变形试验装置^[28]

Fig.13 Schematic of experimental set-up for grout deformations

上海隧道工程股份有限公司的林家祥等学者, 针对隧道同步注浆与隧道抗浮稳定性的密切关系, 运用模型试验方法, 研究了隧道结构同步注浆材料特性和隧道抗浮稳定性的变化规律^[31]。

3 盾构隧道模型试验相关问题探讨

由前面的分析可见, 模型试验在盾构隧道众多的研究领域都发挥着越来越重要的作用, 但与此同时, 模型试验本身也存在着一些问题。

3.1 模型材料

(1) 结构模型材料

① 树脂橡胶、聚氯乙烯、聚乙烯或树脂管

日本某沉管隧道的振动模型试验使用了硅树

脂橡胶来模拟隧道结构; 日本东京湾高速公路隧道的模型试验, 则采用了聚氯乙烯管作为管片环材料, 用以研究施工阶段盾尾间隙对结构受力及变形的影响^[32]。

为了利用环氧树脂优良的应力-光学灵敏性来测量管片环结构的应力场及其变化, 国内也有学者采用光弹性材料——环氧树脂来制作盾构隧道三维管片环的先例^[33]。上海同济大学的黄宏伟教授课题组, 在研究盾构隧道纵向性能时, 采用了聚乙烯(PE管)来模拟隧道结构, 用螺丝+薄塑料片(PE片)模拟环向及纵向接头^[10,11]。

该类结构模型, 若为连续模型, 则无法模拟接头的存在及其由此而带来的影响, 只能用连续化理论将其均匀化; 若采用分块分片的非连续模型, 则也存在环向与纵向接头较难相似问题。

② 按一定比例缩放的混凝土管片

前已提及, 上海长江隧道、上海轨道交通杨浦线、西安地铁 2 号线等盾构隧道施工前期研究工作中, 均采用了混凝土管片进行模型试验。

该种模型试验, 一般均为大比例试验, 模型相似性及边界条件均满足实际状况较好, 试验结果可信度较高。但模型本身的制作成本相对较高, 诸多的传感器等数据采集设备一般都需预埋于结构中, 重复利用率较低, 而且加载时需要大型的试验台架, 经济性较差。

③ 特种石膏管

西南交通大学何川教授课题组在研究工作中, 管片混凝土结构多采用一定水膏比的特种石膏材料^[13], 通过预制加工的方法模拟, 管片混凝土主筋则采用一定直径的铁质材料, 通过原型与模型等效抗弯刚度的方法模拟。

该种结构模型与原型具有较好的相似性, 且经济性较佳。利用该方法, 对国内诸多的大型过江盾构隧道及城市地铁盾构隧道等都进行了成功试验。但是采用特种石膏预制管片对于制作过程和制作环境要求较高, 且目前均是整环浇注, 采用刻槽方法模拟环向接头, 对于接头的力学行为尚难准确模拟。

④ 特制模型管

文献^[12]通过将定制生产的聚氨酯板和 PVC 软板卷成满足几何相似条件的圆筒来对隧道结构进行模拟, 并在定制的聚氨酯板中沿隧道纵向放入环向钢丝以提高环向刚度, 以保证环向接头刚度的相似。

该种结构模型可以通过调整环向钢丝的间距来

改变其环向刚度,与结构总体具有较好的相似性,但依然有较大改进空间,如将平板卷成圆筒结构优化为浇注成圆筒结构。

(2) 模型土材料

在研究结构与土体共同作用,或施工对土体的扰动作用时,通常需要配制模型土。用单一的天然材料作为模型土材料适应面相当有限,经常都无法满足相似条件。通常的做法是用若干材料(铁精粉、重晶石粉、石膏粉、粉煤灰、石灰粉、石英砂、河砂、粘土、高岭土、红粉砂、粘土粉、机油、木屑、水泥、氧化锌、石蜡、松香、酒精、白乳胶、树脂、水等)按照一定的比例配制而成。

显然,相似材料一般是多种材料的混合物,而混合物的成分和配比要经过大量的配比试验才能满足。

(3) 模型箱

在使用模型箱进行模型试验时,模型土与模型箱之间的作用常常使得边界条件无法满足。除考虑必要的技术措施,如涂油脂等材料减小摩擦之外,还须在模型箱设计方面做适当改进,针对不同的研究重点、理论模型,需要做相应的调整,显然模型箱不能太小。

3.2 加载方案

众多的针对盾构管片受力和变形性能研究的模型试验中,都是通过加载系统来模拟实际工程中管片结构所受到的土压力、水压力、注浆压力,以及浆液浮力等各种荷载作用,此时的加载方案及所模拟的工况设计就显得举足轻重。一些创新思维,如西南交大何川教授课题组所对水压力进行的试验模拟^[34],在该方向上可谓是较大的突破。

对于部分荷载结构试验装置而言,加载装置与土体及不同方向加载装置之间的摩擦问题,导致加载装置输出荷载与实际作用在结构上的荷载存在一定的差异,在一定程度上影响了试验数据的准确性。因此,对于加载装置及加载方式(例如增加位移加载)改进和加载精度的提高,将有助于减小或消除试验中的误差。

3.3 试验方案

总体来说,对盾构隧道的模型试验研究分为几

个方面:

(1) 基于荷载结构法,将隧道问题视为平面应变问题,对部分管片进行加载试验,进而分析研究管片结构的受力和变形性能。本文前面所提到的接头性能试验、单块管片抗弯试验,以及管片整体承载力及稳定性试验均为此类。

(2) 将结构模型置于模型土中,考虑一定受荷载条件下结构与周围土体或周围结构共同作用下的受力及变形性能。

(3) 施工荷载和施工扰动作用下岩土体及隧道结构的受力及变形性能,如注浆荷载、泥水压力、掌子面压力荷载,以及其他施工荷载及综合扰动等。

试验方案设计时,通常的做法都是针对研究工作的侧重点,尽量满足相似条件,尽可能真实反应实际情况。但实际操作中,模型试验方案受诸多因素制约,不能很好满足相似条件和边界条件,致使试验结果并不能真实反应实际情况,如结构模型本身的相似问题、盾尾间隙问题、模拟掘进过程的各种施工荷载问题,以及由盾尾注浆而带来的浆液渗透和浆液凝固的时间效应问题等。所以,合理的试验方案应该抓住对应研究问题这个主要矛盾,简化后仍需反应研究问题的本质。

4 结 语

盾构隧道涉及到诸多问题,包括管片结构的受力问题、隧道结构本身的分析模型问题、结构与围岩的相互作用问题、开挖面稳定问题、隧道与邻近结构物的相互作用问题、隧道施工扰动与控制问题,以及其他问题(如泥水盾构的泥水压力问题,盾尾间隙的注浆充填问题)等,模型试验都是这些问题的重要研究手段。

盾构隧道试验方案设计理论基础的选用、结构模型的选择、模型土材料的选择和配制、加载方案及模拟工况的确定,以及边界条件的简化等诸多问题,是一复杂的系统工程。

盾构隧道模型试验方案设计时,需抓住研究问题的实质,进而在此基础上确定相似关系,如有的结构模型看似相似,实则不相似;反之,有些模型则看似不相似,但本质上相似。

参考文献

References

- [1] 黄强兵. 地裂缝对地铁隧道的影响机制及病害控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2009
Huang Qiangbing. Study of Effect of Active Ground Fissure on Metro Tunnel and Its Hazards Control [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009
- [2] 杨 雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构相似模型试验与数值分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007
Yang Xiong. Model Test and Numerical Simulation of Segmental Lining of Nanjing Yangtze River Tunnel with Super-large Cross-section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007
- [3] 汪成兵. 软弱破碎隧道围岩渐进性破坏机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
Wang Chengbin. Study on the Progressive Failure Mechanism of the Surrounding Rock of Tunnel Constructed in Soft Rock[D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [4] 张厚美, 傅德明, 过 迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 28~33, 41
Zhang Houmei, Fu Deming, Guo Chi. Study on Load Test of Segment Joint in Shield Driven Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39 (6): 28~33, 41
- [5] Kazuyoshi Nishikawa. Development of a prestressed and precast concrete segmental lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003(18): 243~251
- [6] 于 宁, 白廷辉, 朱合华. 盾构隧道预应力管片接头的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 439~444, 449
Yu Ning, Bai Tinghui, Zhu Hehua. Model Experimental Study on Joints Stiff of Precast and Prestressed Concrete Lining in Shield Tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5 (3): 439~444, 449
- [7] 王 彪. 上海长江隧道衬砌结构整环试验与研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
Wang Biao. Analysis and Test for Lining Whole Wreath of Shanghai- Chongming Tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [8] Bob Chow. Double-O-tube shield tunneling technology in the Shanghai Rail Transit Project[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006(21): 594~601
- [9] 罗云峰, 李菱, 封其坚, 等. 地铁管片的力学性能及抗渗性试验方法的探讨[J]. 混凝土与水泥制品, 2006,(3): 33~35
Luo Yunfeng, Li Ling, Feng Qijian, et al. Discussion on Mechanical Property and Permeability -Resistant Test method of Metro Segments [J]. China Concrete and Cement Products, 2006, (3): 33~35
- [10] 黄宏伟, 徐凌, 严佳梁, 等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 11~18
Huang Hongwei, Xu Ling, Yan Jialiang, et al. Study on Transverse Effective Rigidity Ratio of Shield Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (1): 11~18
- [11] 徐 凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2005
Xu Ling. Study on the Longitudinal Settlement of Shield Tunnel in Soft Ground (Doctoral Degree Thesis)[D]. Shanghai: Tongji University, 2005
- [12] 何应道. 铁路隧道管片衬砌纵向结构力学特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009
He Yingdao. Research on Longitudinal Mechanical Characteristics of Segment Lining in Railway Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009
- [13] 何 川, 封 坤, 杨 雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2260~2269
He Chuan, Feng Kun, Yang Xiong. Model Test on Segmental Lining of Nanjing Yangtze River Tunnel with Super-large Cross-section [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (11): 2260~2269
- [14] 李文阳. 西安地裂缝对地铁盾构隧道衬砌影响的模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2008
Li Wenyang. Model Test Study on the Shield Tunnel Lining of Metro affected by Xi'an Ground Fissure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008
- [15] 周小文, 濮家骝, 殷昆亭, 等. 南水北调穿黄隧洞衬砌土压力离心试验研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30(5): 58~60
Zhou Xiaowen, Pu Jialiu, Yin Kuntong, et al. A Study of Earth Pressure on a Tunnel under Yellow River by Centrifuge Testing [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30 (5): 58~60
- [16] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2005
Qin Jianshe. Study on Face Deformation and Collapse of Earth Pressure Shield Tunnel [D]. Nanjing: Hohai University, 2005
- [17] 李 昀, 张子新, 张冠军. 泥水平衡盾构开挖面稳定模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1074~1079
Li Yun, Zhang Zixin, Zhang Guanjun. Laboratory Study on Face Stability Mechanism of Slurry Shields [J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1074~1079
- [18] 李 围, 何 川. 盾构隧道近接下穿地下大型结构施工影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1277~1282
Li Wei, He Chuan. Study on Construction Influence of Shield Tunnels Traversing Adjacently under Underground Large-scale Structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1277~1282
- [19] 何 川, 苏宗贤, 曾东洋. 盾构隧道施工对已建平行隧道变形和附加内力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2063~2069
He Chuan, Su Zongxian, Zeng Dongyang. Research on Influence of Shield Tunnel Construction on Deformation and Secondary Inner Force of Constructed Parallel Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2063~2069
- [20] 何 川, 苏宗贤, 曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 91~98
He Chuan, Su Zongxian, Zeng Dongyang. Influence of Metro Shield Tunneling on Existing Tunnel Directly Above [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 91~98
- [21] 李树锋. 软土地铁三管并行盾构隧道近接施工离心模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006
Li Shufeng. Study on Three-tube Parallel Shield Tunnel of Subway Approaching Constructed in Mollisol by Centrifugal Model Test[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006
- [22] 赵强政. $\phi 520$ mm 土压平衡式模型盾构机研制及试验性掘进控制模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2007
Zhao Qiangzheng. The Design of $\phi 520$ mm EPB Model Shield Machine and the Simulation of the Tunneling Test Control[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007
- [23] 方 勇. 土压平衡式盾构掘进过程对地层的影响与控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2007
Fang Yong. Influence of EPB Shield Tunneling Process on the Ground and Control [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007
- [24] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 软土地层土压平衡盾构法施工的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1849~1857
Xu Qianwei, Zhu Hehua, Liao Shaoming, et al. Experimental Study on EPB Shield Tunnel Construction in Soft Ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (12): 1849~1857
- [25] 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 (增 1): 2902~2909
Xu Qianwei, Zhu Hehua, Liao Shaoming, et al. Model Experimental Study on Stratum Adaptability of Tunnel Excavation with EPB Shield Machine in Sandy Stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2902~2909
- [26] 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 Qianwei. Study on the Simulated Model Test of Shield Machine's Working Parameters Applicable to Different Stratums and Its Theoretical Investigation [D]. Shanghai: Tongji University, 2006
- [27] 袁大军, 黄清飞, 小泉淳, 等. 水底盾构掘进泥水喷发现象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2296~2301
Yuan Dajun, Huang Qingfei, Koizumi Atsushi, et al. Study on Slurry-water Gushing during Underwater Shield Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2007, 26 (11): 2296~2301
- [28] 韩月旺, 梁精华, 袁小会. 盾构隧道壁后注浆体变形模型及土体位移分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (增 2): 3646~3652
Han Yuewang, Liang Jinghua, Yuan Xiaohui. Deformation Model of Backfill Grouting and Ground Movement Analysis of Shield Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (Supp.2): 3646~3652
- [29] 韩月旺, 钟小春, 虞兴福. 盾构壁后注浆体变形及压力消散特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1142~1147, 1175
Han Yuewang, Zhong Xiaochun, Yu Xingfu. Experimental Research on the Backfill Grout Deformation and Grout Pressure Dissipation of Shield Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1142~1147, 1175
- [30] 於昌荣, 周 松, 黄醒春. 砂砾地层中盾构隧道衬砌后背回填注浆效果的试验研究[J]. 铁道建筑, 2009, (4): 61~64
Yu Changrong, Zhou Song, Huang Xingchun. Experimental Study on Backfill Grout Effect of Shield Tunnel in Sand and Gravel Stratum [J]. Railway Engineering, 2009, (4): 61~64
- [31] 林家祥, 段创峰, 赵艳鹏, 等. 模型隧道新型浆液抗浮试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2008, (8): 157~160
Lin Jiaxiang, Duan Chuangfeng, Zhao Yanpeng, et al. Study of New Mortar Anti-floating Model Experiment of Tunnel [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2008, (8): 157~160
- [32] 冯卫星(译). 模拟盾尾空隙影响的盾构隧道实验研究[J], 地铁与轻轨, 1993, (2): 38~42
Feng Weixing (Translate). Test Research on Shield Tunnel of Simulating the Influence of Voids in Shield Tail [J]. Metro and

Light Rail, 1993, (2): 38~42

- [33] 鞠 杨, 徐广泉, 毛灵涛, 等. 盾构隧道衬砌结构应力与变形的三维数值模拟与模型试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 157~165
Ju Yang, Xu Guangquan, Mao Lingtao, et al. 3D Numerical Simulation of Stress and Strain Properties of Concrete Shield Tunnel Lining and Modeling Experiments [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 157~165
- [34] 杨 征. 武汉长江隧道大型管片衬砌结构力学特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007
Yang Zheng. Study on the Mechanical Characteristics of Segment Lining for Wuhan Yangtze River Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007

Discussion on Present Situation and Development of Model Test of Shield Tunnelling

Ye Fei^{1,2} He Chuan¹ Wang Shimin¹

(1 Department of Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2 Chang'an University, Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridges & Tunnels, Xi'an 710064)

Abstract Model test has been a common approach in the research work of shield tunnelling. The problems related to model test of shield tunnelling are summarized and classified as follows: load conditions of segments, analysis model of tunnel structure, interaction of tunnel structure and surrounding rock, stability of excavation face, interaction of tunnel and neighboring structures, disturbance and control of shield tunnel construction, etc. The research progress and achievements in model test of shield tunnelling are summed up with typical examples. Problems often met in model tests of shield tunnelling are expounded, such as structure model, modeling soil, model boxes selection, loading method, general programming of experiment proposal. Advices for tackling those problems are proposed at the same time.

Key words Shield tunnelling; Model test; Segments; Structure

(上接第 65 页)

Mechanical Analysis of TBM Disc Cutter Damage Mechanism and Its Application

Zhang Houmei

(Guangzhou Municipal Dunjian Underground Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510030)

Abstract This paper studies the damage conditions of TBM disc cutters, the main forms and causes of disc cutter damages and the mechanical mechanism of cutter damages. CSM model was applied to solve the rock breaking load by a cutter, thereby a formula was obtained for the maximum critical penetration when the cutter damaged and a formula for the minimum critical penetration when the cutter can not turn around (partial wear). Various factors influencing the rock breaking load by cutter and critical penetrations were also analysed. For convenience of field application, curve diagrams and application examples are presented in the paper. The research results show that partial wear of cutter ring and bearing damage are the most common forms of cutter damages in hard rocks and cutter overload is the main cause of cutter damage. In tunneling process, the range of penetration should be adjusted between minimum critical penetration and maximum critical penetration according to the changes of rock strength and cutter wear condition. The research results provide guidelines for TBM construction.

Key words Shield; Disc cutter; Disc cutter damage; Cutter ring partial wear; Critical penetration; Cutting force