

# 盾构隧道壁后注浆浆体变形特性

范昭平<sup>1</sup>,袁小会<sup>2</sup>,韩月旺<sup>1</sup>,钟小春<sup>1</sup>

(1. 河海大学岩土工程科学研究所,南京 210098; 2. 华北水利水电学院土木与交通学院,郑州 450011)

**摘要:**利用浆体变形单元体模型试验装置,研究了不同浆体压力、不同围岩土质条件以及不同地下水压作用下的盾构壁后注浆体的变形规律。试验研究表明,较高的浆体压力有利于加快浆体排水固结速率并增大浆体的最终变形量。土体的渗透系数是影响浆体变形的重要因素。在砂性土体中,地下水压对浆体的变形影响较大,在粘性土体中,浆体压力对浆体的变形影响较大。该装置可以用于研究浆液注入盾尾空隙后的受力状态、浆体的变形特性,有助于更深入地明确壁后注浆控制地层应力释放和地层变形作用。

**关键词:**注浆;盾构隧道;浆体变形;模型试验

中图分类号:U455.43 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0065-04

## Deformation Properties of Backfill Grouting in Shield Tunnel

FAN Zhao-ping<sup>1</sup>, YUAN Xiao-hui<sup>2</sup>, HAN Yue-wang<sup>1</sup>, ZHONG Xiao-chun<sup>1</sup>

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, P. R. China)

**Abstract:** Utilizing the self-made unit-body model test apparatus, the deformation laws of backfill grouting were studied under different grouting pressures, different soil conditions and different ground water pressures. It was shown that high grout pressures can accelerate the consolidation rate of grout drainage and increase final deformation amount. And soil permeability coefficient was an important factor to grout deformation. The ground water pressure was more important for sand soil while the grout pressure was for clay soil. The proposed apparatus can truly reflect stress status of grout injected to tail void. And grout deformation properties were helpful to clarify the stratum stress release and stratum deformation of backfill grouting.

**Key words:** grouting; shield tunnel; grout deformation; model test

盾构隧道施工工法已广泛应用于各大城市地铁及重大过江隧道的修建<sup>[1-4]</sup>。然而,盾构施工对地层的扰动、地层的变形沉降始终是困扰施工技术人员的核心问题。盾构壁后注浆是减小地层损失、控制地层应力释放和地层变形的重要手段,是盾构施工的必备及关键工序<sup>[5-6]</sup>。

浆液注入盾尾空隙后,注浆体初期仍处于液相流动状态,并具备一定的浆体压力。随施工进行和时间推移,在浆体压力作用下,浆体向土体排水,逐

渐固结硬化,浆体发生收缩变形,并在管片外围形成环形保护层,最终围岩土压力通过浆体层传递到管片。浆体变形会直接影响土体应力释放及土体位移,因此研究浆体的变形规律对于合理的控制壁后注浆参数具有重要意义。

Kuwahara等学者<sup>[7-9]</sup>在未考虑壁后注浆作用的前提下,利用离心模型试验研究了由于盾尾空隙的闭合引起管片上作用的土压力、地层位移以及隧道围岩土压力变化规律。离心模型试验是利用橡皮筒

收稿日期:2009-05-16

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金新教师课题(20070294029)

作者简介:范昭平(1978-),男,博士生,主要从事岩土工程研究,(E-mail)fanzhaoping@gmail.com。

钟小春(联系人),男,副教授,主要从事岩土工程研究,(E-mail)xchzhong@tom.com。

模拟隧道,并通过逐步减小橡皮筒气压,使橡皮筒产生一定量的体积收缩来模拟地层损失,未能考虑浆液的注入及浆体固结硬化过程中浆体体积变形对地层位移的影响。盾尾空隙闭合引起的地层损失主要是由于注浆体排水固结硬化而产生的体积收缩,所以有必要研究壁后注浆体固结硬化过程中的体积收缩变形。Thomas 和 Kasper 等学者<sup>[10-13]</sup>建立的三维数值模型能够比较系统地模拟盾构施工过程,并将注浆材料考虑为刚度、渗透系数随时间变化的材料,在浆液未完全固结硬化时采用应力边界来模拟注浆压力的作用,在浆体完全固结硬化后则采用位移边界来模拟。在数值仿真计算中虽然考虑了浆体材料性质在固结硬化过程中的变化,但浆体力学参数的取值及应力边界的取值是基于假设的前提,缺乏试验结果的支撑。

为此,根据浆液在盾尾空隙中的受力状态及受力环境,设计了单元体模型试验装置,可以分别考虑不同土质条件,不同浆体压力、不同地下水压对浆体变形的影响,可以更为明确的反映浆体注入在盾尾空隙后的固结硬化过程中浆体的变形特性。

## 1 浆体变形试验装置及方案

### 1.1 试验装置设计

盾尾脱出管片后,对土体与管片间产生的盾尾空隙进行注浆填充,浆体排水固结硬化,如图 1 所示。管片认为不透水,浆体在土水压力作用下,发生固结硬化,浆体中一部分水分在注浆初期向土体中渗透,体积发生收缩变形。

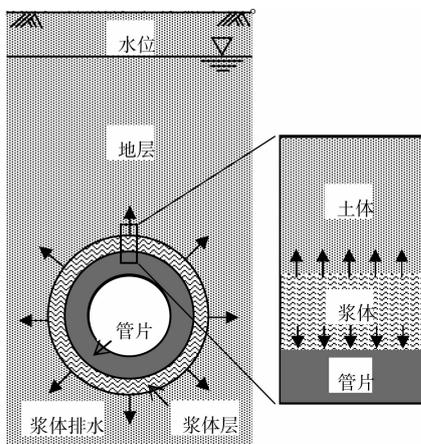


图 1 模型概化示意图

根据以上分析,设计了如图 2 和图 3 所示的浆体变形试验装置。浆体压力通过活塞上方堆载砝码施加,中间为浆体,最下方为土体,土体中水分在超过预先设定的压力后排水,浆体产生压固缩水,逐渐

固结硬化,浆体体积发生收缩变形。

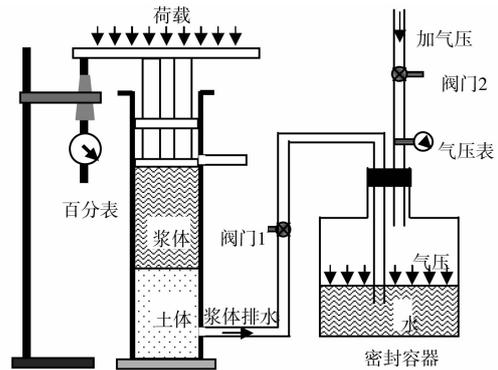


图 2 试验装置示意图



图 3 试验装置实物图

### 1.2 试验方法与步骤

试验前将土体进行饱和。将排水管充满水后关闭阀门 1,打开阀门 2,对密封容器进行加压,使气压等于地下水压后,关闭阀门 2。将土体装入圆筒底部,根据所设定的浆体压力对活塞进行堆载加压,使土体固结完成后,再将活塞取出。然后把浆体装入圆筒内,对活塞进行堆载加压,该压力即为浆体压力。同时架好百分表,读取初始读数,并量取浆体的长度。打开阀门 1,浆体排水,并实时记录百分表读数。忽略土体的变形量,活塞下降高度与浆体高度之比即为浆体的体积收缩率。

### 1.3 试验方案设计

利用浆体变形模型试验装置,分别在不同浆体压力、不同土质条件和不同地下水压条件下,进行浆体体积收缩变形试验。梁精华<sup>[14]</sup>对不同配比的壁后注浆材料进行了大量试验,提出了一种较好的配合比,浆液配比见表 1,浆液基本性能见表 2。土体分别采用南水北调中线穿黄隧道的中细砂土(颗粒分析曲线见图 4,)和南京地铁珠江路站的粉质粘

土,材料参数见表3。浆体压力分别采用0.15 MPa,0.2 MPa,0.25 MPa,0.3 MPa。地下水压分别采用0 MPa,0.05 MPa,0.1 MPa。

表1 试验所用浆液配比表

	各组分配比/(kg·m <sup>-3</sup> )					
	水泥	粉煤灰	膨润土	砂	水	减水剂
硬性浆	187	313	37.5	770	375	4.25

表2 试验所用浆液基本性能表

流动度/cm	稠度/cm	泌水率/%	凝结时间/h	1天无侧限抗压强度/kPa
18.8	8.4	0.5	8.5	58

表3 砂土材料参数表

	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c$ /kPa	$\varphi$ /o	$\nu$	$k$ /(cm·s <sup>-1</sup> )
砂土	17.21	10	38	0.3	$1.16 \times 10^{-3}$
粘土	19.3	12.9	29.3	0.38	$6.3 \times 10^{-3}$

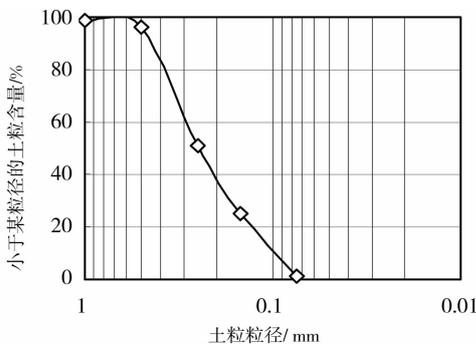


图4 砂土颗粒分析试验曲线

## 2 浆体变形试验结果分析

### 2.1 土质条件对浆体变形的影响

图5、图6为砂土条件和粘土条件,浆体在排水压力( $P_w$ )为0 MPa,浆体压力( $P_g$ )分别为0.15 MPa,0.2 MPa,0.25 MPa,0.3 MPa的条件下的变形曲线。可以看出,在浆体压力与地下水压一定的情况下,在砂土土质条件下,浆体变形曲线在3~4 h前变形速率较快,曲线较陡,在4 h后变形曲线趋于平缓稳定。在粘土条件下,浆体变形曲线表现为平缓上升趋势,且浆体变形趋于稳定的时间较长。砂土条件与粘土条件相比,砂土条件下,浆体变形速率快,浆体最终变形量较大;粘土条件下,浆体变形速率慢,浆体最终变形量小。这主要是由于砂土的渗透率远大于粘土的渗透率,促使浆体的排水速率加快,浆体能够快速压密,同时也使浆体的水灰比变小,增强了浆体中水泥的水化作用,从而加快浆体的

固结硬化进程,说明土体的渗透性是影响浆体变形的重要因素。

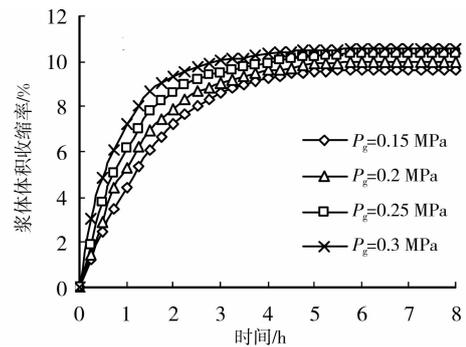


图5 砂土中  $P_w=0$  MPa 时浆体压力的影响曲线

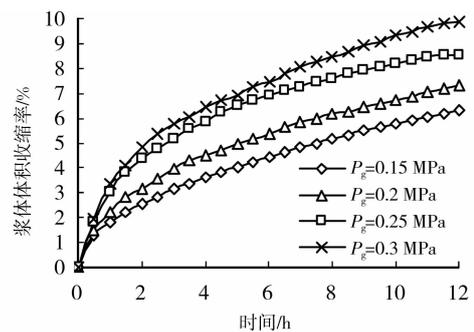


图6 粘土中  $P_w=0$  MPa 时浆体压力的影响曲线

### 2.2 浆体压力对浆体变形的影响

图7、图8是土质条件为砂土和粘土,地下水压为0.05 MPa时,浆体压力对浆体变形的影响曲线。随浆体压力的增大,浆体的排水速率加快,并使浆体的变形量增大。在砂土条件时,在初期浆体压力的增大对浆体变形影响较大,当时间达到3~4 h后,浆体压力对浆体变形的影响逐渐减小。当土质条件为粘土时,浆体压力对浆体变形的影响较为明显,随浆体压力的增大,不仅明显加快了浆体的变形速率,而且加大了浆体的变形量。

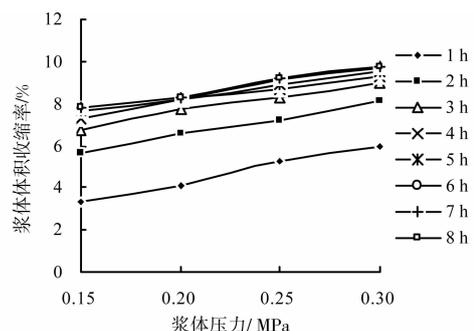


图7 砂土  $P_w=0.05$  MPa 时浆体压力对浆体变形的影响曲线

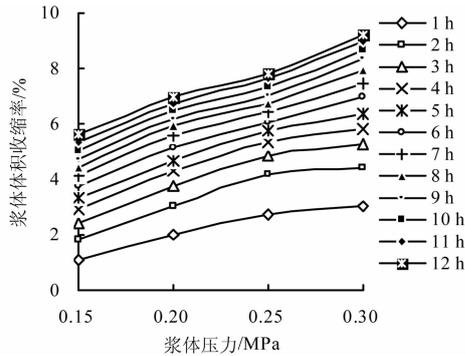


图 8 粘土  $P_w=0.05$  MPa 时浆体压力对浆体变形的影响曲线

### 2.3 地下水压对浆体变形的影响

图 9、图 10 是土质条件为砂土和粘土,浆体压力为 0.3 MPa 时,地下水压对浆体变形的影响曲线。随地下水压的增大,浆体的体积变形速率呈减缓趋势,且浆体的最终变形量也随之降低。在砂土条件时,地下水压为 0.05 MPa 与地下水压为 0 MPa 相比,具有明显降低浆体变形量的效果,而地下水压 0.1 MPa 与地下水压为 0.05 MPa 相比降低浆体变形量的效果不明显,地下水压对于砂土中浆体的变形速率及最终变形量都具有明显影响。而在粘土条件下,地下水压的增大对浆体的变形影响较小,呈线性减小趋势。表明地下水压具有阻碍浆体排水的作用,在砂土条件下表现的更为明显。

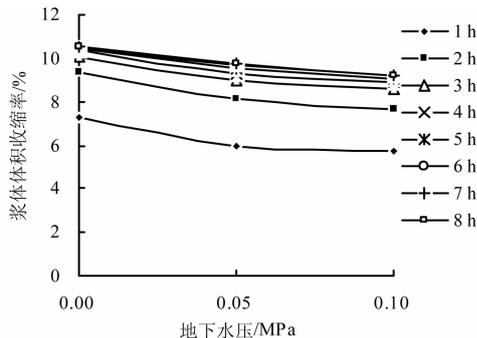


图 9 砂土  $P_g=0.3$  MPa 时地下水压对浆体变形的影响曲线

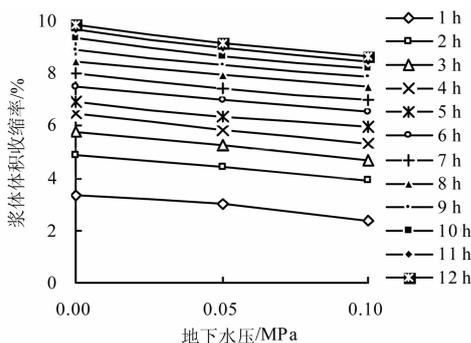


图 10 粘土  $P_g=0.3$  MPa 时地下水压对浆体变形的影响曲线

## 3 结论

壁后注浆是盾构施工中主动控制地层应力释放和地层位移的重要手段。浆体从液体状态向固体状态逐渐固结硬化的过程是浆体发生体积收缩的主要阶段,是影响土体应力释放和土体变形的主要因素。

1)较高的浆体压力不仅加快了浆体的排水速率,使浆体的变形速率加快,且增大了浆体最终变形量。在粘土条件中,浆体压力对浆体变形的影响要明显大于砂土条件。因此在砂性土条件下进行壁后注浆应尽量选用保水性好的浆体。

2)土体的渗透率对于浆体的变形具有较大的影响。由于砂土的渗透率远大于粘土,故在砂土条件下,浆体的变形速率明显快于粘土条件,浆体变形趋于稳定的时间也较短。在粘土条件下浆体的变形速率及最终变形量较小,说明在渗透率较低的地层中,壁后注浆对控制地层应力释放及地层变形具有较好的效果。

3)在粘土条件下,地下水压对浆体变形的影响较小,而在砂土条件下,地下水压的增大不仅明显的减缓了浆体的变形速率,导致浆体的最终变形量明显减小。说明地下水压具有阻碍浆体排水的作用,尤其在高渗透性土体中表现的更为明显。

4)在高渗透性地层中进行盾构施工,壁后注浆可采用较高的注浆压力,以提高注浆量,降低浆体因排水固结收缩引起的地层损失。在低渗透性土体中,浆体的排水速率低,可适当降低注浆压力,因浆体中的胶凝材料可充分进行水化作用,提高浆体强度,有利于减小对地层的扰动,减小地层应力释放。

### 参考文献:

- [1] 日本土木协会. 盾构标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟,译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 王克忠. 地铁隧道开挖过程三维物理模型动态试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5):42-46. WANG KE-ZHONG. Real simulation of 3-D physical model testing for metro station tunnel construction[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(5): 42-46.
- [4] 梁宁慧, 刘新荣, 曹学山, 等. 中国城市地铁建设的现状和发展战略[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(6):81-85. LIANG NING-HUI, LIU XIN-RONG, CAO XUE-SHAN, et al. Present situation and developing strategy of urban subway construction in P. R. China [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(6): 81-85.

(下转第 80 页)

- HUANG BEN-CAI. The simplified method and computing tables for MOE [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(3): 46-51.
- [10] 黄本才. 高层民用建筑钢结构人体舒适度验算[J]. *建筑结构*, 1998(6): 34-37.  
HUANG BEN-CAI. Checking computations on human comfort of high-rise occupancy types steel building [J]. *Building Structure*, 1998(6): 34-37.
- [11] WILSON E L. Three dimensional dynamic analysis for structures with emphasis on earthquake engineering [M]. *Computers and Structures, Inc., Berkeley, Calif*, 1997.
- [12] WILSON E L, FARHOOMAND I, K J. Nonlinear dynamic analysis of complex structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1973(1): 241-252.
- [13] 韩小雷, 何伟球, 陈学伟, 等. 中洲中心二期观光门架基于性能的建筑结构抗震超限设计可行性报告[R]. 广州: 华南理工大学高层建筑结构研究所, 2009.  
HAN XIAO-LEI, HE WEI-QIU, CHEN XUE-WEI, et al. Performance-based design on the HUB. II sightseeing gate [R]. *Tall Building Structure Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou*, 2009.
- [14] 谢壮宁, 石碧青. 广州中洲观光门风荷载特征风洞试验数据图表[R]. 汕头: 汕头大学大气边界层风洞实验室, 2008.  
XIE ZHUANG-NING, SHI BI-QING. Data and figures of wind tunnel test on the HUB. II sightseeing gate [R]. *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Shantou University, Shantou*, 2008.
- [15] 何光渝, 雷群. Delphi 常用数值算法集 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 黄本材, 黄国砚, 林颖儒, 等. 体育场屋盖结构静动力风荷载实用分析方法 [J]. *空间结构*, 2006, 6(3): 33-39.  
HUANG BEN-CAI, HUANG GUO-YAN, LIN YING-RU, et al. Analytical methods of static and dynamic wind loading on cantilever roof structures for stadium [J]. *Spatial Structures*, 2006, 6(3): 33-39.

(编辑 王秀玲)

(上接第 68 页)

- [5] 朱伟, 秦建设, 卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8): 897-902.  
ZHU WEI, QIN JIAN-SHE, LU TING-HAO. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 897-902.
- [6] 朱伟, 陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望 (第 2 讲): 盾构隧道技术和施工管理 [J]. *岩土工程界*, 2001, 4(12): 14-16, 20.  
ZHU WEI, CHEN REN-JUN. Present state and perspectives of shield construction techniques (2): shield techniques and construction management [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2001, 4(12): 14-16, 20.
- [7] KUWAHARA H, YAMAZAKI T, KUSAKABE O. Ground deformation mechanism of shield tunneling due to tail void formation in soft clay [C] // Proc, 14th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Engrg, Kalkema, Rotterdam, The Netherlands, 1997: 1457-1460.
- [8] ZHOU XIAO-WEN, PU JIA-JU, BAO CHENG-GANG. Effect of shield tail void closure on lining earth pressure [C] // Proceedings of 15th Int. Cont. on soil Mech. and Geotech. Engrg, San Francisco, 2001: 1441-1444.
- [9] 刘元雪, 施建勇, 许江, 等. 盾构法隧道施工数值模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2): 239-243.  
LIU YUAN-XUE, SHI JIAN-YONG, XU JIANG, et al. Numerical simulation of excavation of shield tunnel [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(2): 239-243.
- [10] KASPER THOMAS, MESCHKE GUNTHER. 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.
- [11] KASPER THOMAS, MESCHKE GUNTHER. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33(4-5): 234-247.
- [12] SWOBODA G, ABU-KRISHA A. Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(3): 327-333.
- [13] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H, et al. Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground [J]. *Geotechnique*, 2001, 51(10): 835-846.
- [14] 梁精华. 盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006.

(编辑 胡英奎)