

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2255-06

泥水平衡盾构开挖面稳定性模型试验研究

刘泉维^{1,2}, 杨忠年³

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 青岛市市政工程管理处, 山东 青岛 266100;
3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 在泥水平衡盾构施工过程中, 如何确保施工安全并减少对周边环境的影响受到国内外学者的广泛关注, 地层土体稳定性问题显得尤为重要, 但对于砂质地层开挖面稳定性的失稳机制及其稳定性分析尚处于经验阶段。利用大尺寸模型试验, 研究了不同水头高度(无水、0.9 m 和 1.1 m)下两种地层中开挖面主动破坏的发展模式和受力情况。试验中分析了不同水头高度对开挖面主动破坏的影响, 研究结果表明: 砂质土层中盾构隧道开挖面失稳时, 存在土拱效应, 使得地表对开挖面主动破坏的响应存在滞后效应; 根据水头高度不同, 可将砂质地层中开挖面主动破坏发展模式划分为无水模式、低水头模式和高水头模式; 在形成泥膜和提供支护力的过程中, 会在砂质土层中产生超孔隙水压力, 在确定支护力时, 应在静止土压力和静水压力的基础上, 考虑超孔隙水压力的影响。研究结果对确定开挖面极限支护压力有重要的指导意义。

关 键 词: 泥水平衡盾构; 砂质地层; 主动破坏; 失稳发展模式; 土拱效应

中图分类号: TU 434

文献标识码: A

Model test research on excavation face stability of slurry balanced shield in permeable sand layers

LIU Quan-wei^{1,2}, YANG Zhong-nian³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Qingdao Municipal Project Management Office, Qingdao, Shandong 266100, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: In slurry balanced shield tunneling, how to ensure the safety of construction and to reduce the influence on the environment has arisen wide attention of scholars both at home and abroad. But now it is still in the stage of experience as to the instability mechanism of the slurry shield tunneling excavation and its stability analysis, especially to research on instability mechanism, judgment methods and calculation methods for the complex stratum cases. Regarding the excavation face in slurry balanced shield of the high permeable sand layers as research object, large-diameter modeling test are adopted to do systematical research on the excavation face instability features when properties of sand body and water head heights are different. The results show that: the ground settlement exists hysteresis effect, because it exists soil-arching effect at the same time of the excavation face active failure in the slurry balanced shield tunneling; the development mode of the excavation face active failure in the sandy stratum can be divided into three parts: anhydrous mode, lower water head mode and higher water head mode; it will induce excess pore water pressure during the slurry cake forming and the supporting force imposing; so that excess pore water pressure should be considered in process of the selection of supporting force. This research work has an important guiding sense to the stability of excavation face in the slurry balanced shield tunneling.

Key words: slurry balanced shield; sand body; active failure; instability developing model; soil arching

1 引 言

地下空间的开发利用已成为世界各国解决城市人口、资源、环境 3 大危机的重要措施和医治城市综合症、实施城市可持续发展战略的重要途径, 大直径盾构隧道也成为目前及将来隧道发展的主要方向之一^[1]。但目前由盾构土体应力释放引起的开挖面失稳仍是难题之一^[2], 如何减少施工过程对周围

环境的影响, 准确判断盾构开挖面稳定性和有效合理选取支护力已成为目前盾构施工中亟待解决的关键问题。

已有众多学者对盾构开挖面失稳展开了研究。Chambon 等^[3]通过离心试验模拟均质砂土层中开挖面支护力逐渐减小, 研究不同埋深情况下开挖面的破坏形式, 指出随着埋深的加大, 破坏面反应不到地表面, 极限最小支护力的大小与埋深关系不大;

收稿日期: 2014-03-31

第一作者简介: 刘泉维, 男, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程建设方面的研究工作。E-mail: 598552631@qq.com

Atkinson 等^[4]应用离心模型试验,研究了平面应变条件下砂土中无衬砌隧道发生坍塌的极限支护力问题;周小文等^[5]通过离心试验研究了砂土中隧洞开挖支护力与地面沉降关系;Lee 等^[6]利用二维离心模型研究了黏土中无衬砌隧道的支护力及土拱效应问题,指出土拱效应对盾构开挖面稳定性问题的研究具有重要意义;吴宏伟等^[7]针对开挖面被动破坏开展了离心机试验。试验中土体采用 Toyoura 砂模拟,模拟直径为 5 m 的隧道在埋深为 2 和 4 m 的情况下发生被动破坏时的土体变形以及开挖面支护力。

程展林等^[8]通过小尺寸模型试验(直径 0.2~0.3 m)提出了泥水平衡盾构在中粗砂地基中临界泥浆压力公式;李昀等^[9]利用小型盾构模型研究了动态开挖过程对泥水盾构开挖面稳定性的影响,并进行数值和理论方面的研究;陈仁朋等^[10]利用直径 1 m 的盾构模型,研究了干砂地层中不同埋深下盾构开挖面稳定性问题。综上所述,已有的研究多为离心机试验,且没有对开挖面前方土体应力状态变化进行观测。大尺寸物理模型试验虽然参数指标,特别是相似比不能完全准确地设置和还原,但根据工程实际情况,保证所研究参数的相似比正确合理,同样可以取得较好的试验效果达到研究目的,且试验技术相对简单,过程易于控制,是研究岩土工程中稳定性的有效手段。但这方面的研究报道很少。

本文结合南京长江隧道工程,对高透水性砂质地层大直径泥-水平衡盾构开挖面失稳过程中地表隆沉、土体强度、开挖面水土压力和泥水舱压力等分布特性进行模型试验研究。通过在泥水舱内部和开挖面上埋设水、土压力传感器,观测开挖面失稳过程中泥水舱压力和开挖面前方水、土压力的分布和发展情况。对观测结果和盾构掘进参数进行了研究,讨论了泥水舱压力、开挖面水、土压力和不同要素(覆土厚度、水头高度、泥浆配比和土体性质等)间的关系。

2 试验概况

2.1 模型制作及布置

本文试验采用独立设计研发的泥水平衡盾构试验系统进行。包括模型土箱、泥水平衡盾构模型机及其推力系统、泥浆循环系统、测试系统组成,具体布置见图 1。

根据相似比计算得到的模型箱尺寸数据,由 2 cm 厚有机玻璃板焊接而成,并用三角钢设置了横向和纵向的钢肋,以保证其有足够的刚度。盾构模型由前端细格栅、缓冲区和气液压力室组成,模型

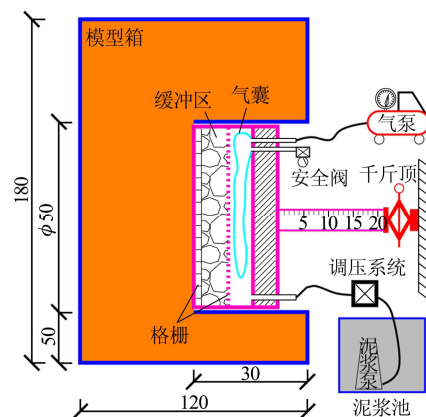


图 1 试验系统组成简图(单位: cm)
Fig.1 Sketch of experiment system(unit: cm)

盾构机直径为 50 cm。气液压力室内安设土压力计用以量测舱压,气液压力室与注浆管直接相连,进气管与出气管均与气囊相连。

泥浆循环系统由泥浆槽和调压组合阀组成,调压组合阀由 4 个阀门组成,可方便地通过调节调压组合阀将注浆压力调至所需压力,将泥浆池内泥浆注入到地层中。同时,舱压的稳定由位于气液压力室内的气囊进行调节。

试验测试系统由传感器和采集器组成。传感器包括微型土压力盒、YY-2B 型孔隙水压力计、GECO-16A 多路数据采集仪等,采集仪能够实现数据动态实时采集;地表土体位移采用高精度激光测距仪进行观测。在距离模拟开挖面大约 3 cm 左右的竖向平面布设孔、土压力传感器,监测开挖面土体的土压力和孔隙水压力变化情况,具体布置如图 2 所示。同时,在泥水舱内中间位置布设一个压力盒,用于监测舱压的变化情况。

试验中采用高精度激光测距仪进行了地表竖向位移的观测,共布设 5 个观测断面 28 个测点,测点分布如图 3 所示。

2.2 试验土样

本次试验采用了两种级配的砂来模拟地层,其中中粗砂取自青岛胶州,颗粒粒径在 0.5~2 mm 之间,占总量的约 80%,内摩擦角为 35°,黏聚力为 0.7 kPa;粉细砂以南京长江隧道粉细砂地层级配为基准配制而得,颗粒粒径小于 0.5 mm,占总量 95% 以上,内摩擦角为 28.7°,黏聚力为 18.7 kPa,如图 4 和表 1 所示。

2.3 试验过程

通过模型箱试验,模拟不同工况下开挖面主动破坏和被动破坏的情况,模型试验实施步骤如下:

(1) 布设传感器。先将孔隙水压力与土压力传感器固定于支架上,置于开挖面 3 cm 处。

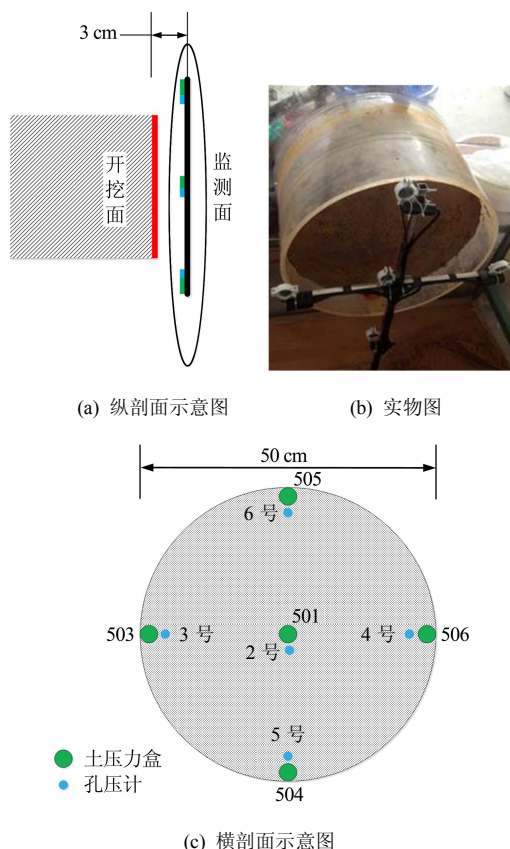


图 2 传感器布设图

Fig.2 The layout of sensors

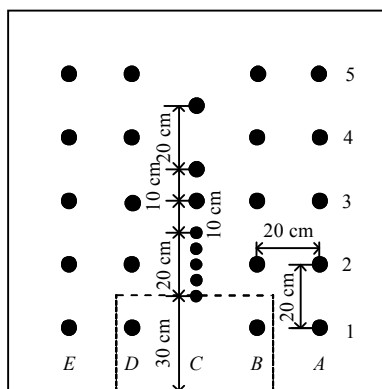


图 3 地表监测点分布

Fig.3 The layout of ground settlement monitoring points

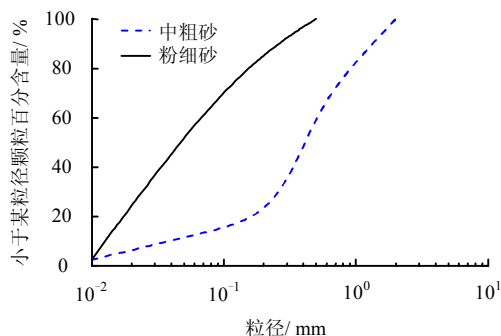


图 4 颗粒级配曲线

Fig.4 The grading curves of particles

表 1 地层基本性质

Table 1 Basic properties of stratum

地层种类	密度 /(g/cm ³)	压缩模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
中粗砂	2.12	25.0	0.33	0.7	35.0
粉细砂	1.91	13.8	0.30	18.7	28.7

(2) 制备地层。先将砂充分搅拌均匀, 然后往模型箱内填砂, 分层夯实, 20 cm 为一层, 并采用微型十字板剪切仪和普氏贯入仪进行土层均匀性测试, 每层土层表面剪切强度在 6 kPa 左右, 干密度为 1.5 g/cm³, 然后加水饱和和固结 48 h。

(3) 调节土层中水头高度, 同时按比例配置泥浆, 并将泥浆膨化 12 h。

(4) 开始试验, 通过调压开关, 以一定的压力将泥浆注入到泥水舱内, 透过格栅在砂层中形成泥膜。

(5) 由气压来维持舱压稳定, 缓慢后撤盾构机模型使其与开挖面脱离, 此时开挖面的舱压维持开挖面的稳定。

(6) 调节注浆压力来模拟开挖面失稳的两种情况, 降低舱压, 则开挖面主动破坏。

(7) 试验过程中进行舱压、开挖面土压、孔隙水压力等方面的动态监测; 模型试验前、中、后, 分别进行砂层贯入强度、微型十字板剪切强度、地表位移的观测。

(8) 最后将模型箱内土体进行剖切分层取样, 找出泥浆渗透范围及路径, 并对泥膜进行取样, 进行相关土工试验, 测试其物理力学性质。

按照以上方法, 在覆跨比 $C/D = 0.6$ 、1.0 (其中: C 为覆土厚度, D 为隧道直径), 水头高度 $h = 0$ 、0.9、1.1 m 时分别在两种土层中进行试验, 研究开挖面主动破坏和被动破坏时极限支护力、土拱效应及地表沉降发展规律。

3 试验结果

泥水平衡盾构开挖面失稳表现为两种状态, 即主动破坏和被动破坏。笔者通过泥水舱压力、土压力、孔隙水压力、地表隆沉和土体强度观测结果, 研究了覆跨比、水头高度和地层性质等因素对开挖面主动失稳状态下的影响。两种地层内的模拟结果在破坏形式和土拱效应等方面存在相似性, 本文选用了中粗砂土层进行了详细说明。

3.1 地表变化

模型试验模拟了 3 种水头高度下 (0、0.9、1.1 m) 开挖面主动破坏引起地表沉降的类型, 3 组试验对地表的影响完全不同。如图 5 所示, 在 1.1 m 水头 (即水位高于地表 0.1 m) 时, 随着支护力的

降低, 开挖面顶部地表明现直径约 30 cm 的圆形塌坑; 在 0.9 m 水头(即水位高度低于地表 0.1 m)时, 随着支护力的降低, 地表开始时并未出现沉降, 当支护力几乎为 0 时, 地表突然出现直径约 10 cm 的圆形塌坑, 透过塌坑可以看到, 地表下部已经形成一个直径约 25 cm 的塌坑; 在 0 m 水头(即无水)时, 地表自始至终均无明显变化, 将支护力降低至 0 后, 即开挖面已完全破坏后, 地表仍无明显变化, 于地表增加 30 kPa 荷载, 地表仍未出现明显沉降或裂缝。

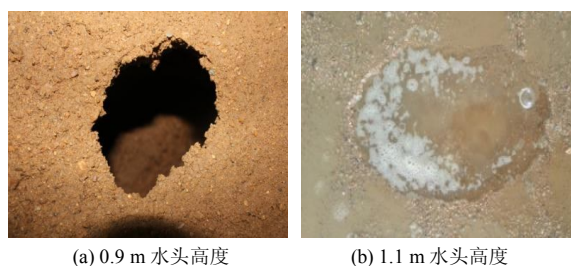


图 5 不同水头高度下主动破坏地表形态

Fig.5 Surface morphologies in the state of excavation face active failure under different water heads

3.2 超孔隙水压力变化规律

在模型试验中, 对开挖面失稳过程中的孔隙水压力进行了观测, 以水头高度为 1.1 m 中粗砂土层为例进行说明。从图 6 可以看出, 在 0~80 s 注浆阶段, 该阶段超孔隙水压力不断增大, 最大值约为 300 mm; 80~400 s 为维持舱压稳定阶段, 超孔隙水压力有所降低, 整个开挖面上超孔隙水压力基本稳定在 150~200 mm; 400 s 之后为主动破坏阶段, 2 250 s 时地表发生塌孔, 超孔隙水压力急剧减小, 孔压甚至出现了负值。

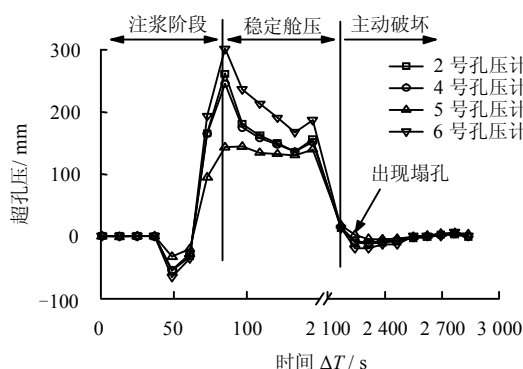


图 6 超孔隙水压力变化时程曲线

Fig.6 Time-history curves of excess pore water pressure

3.3 土压力变化规律

在模型试验中, 对开挖面失稳过程中的土压力进行了观测, 以水头高度为 0.9 m 的中粗砂土层为

例进行说明。从图 7 可以看出, 0~80 s 时间段为注浆阶段, 侧向土压力先增大, 达到峰值后基本稳定, 280 s 之后, 在主动破坏阶段, 侧向土压力急剧减小, 地表出现塌坑, 即土体发生主动滑动破坏后, 侧向土压力迅速下降。

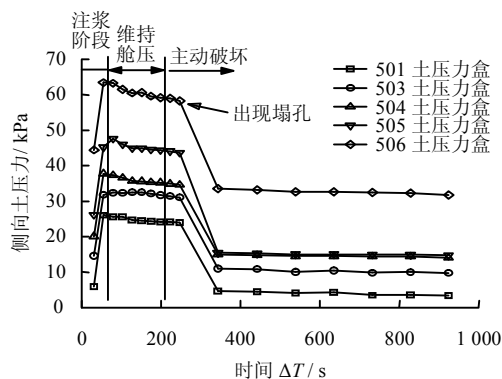


图 7 土压力变化时程曲线

Fig.7 Time-history curves of earth pressure

4 讨论

4.1 开挖面主动破坏发展模式

通过试验发现, 随着泥水舱压的降低, 开挖面局部土体达到极限剪切强度, 局部发生失稳塌落, 在开挖面后方土体中产生松动破坏区, 在土拱效应的作用下, 上部土体仍能维持稳定, 当泥浆压力进一步降低, 开挖面土体完全失稳, 此时土拱区向上发展, 松动破坏区也逐渐向地表发展。开挖面主动破坏后地表最大沉降点发生在开挖面正上方沿盾构掘进方向约 5 cm 处, 如图 8 所示。

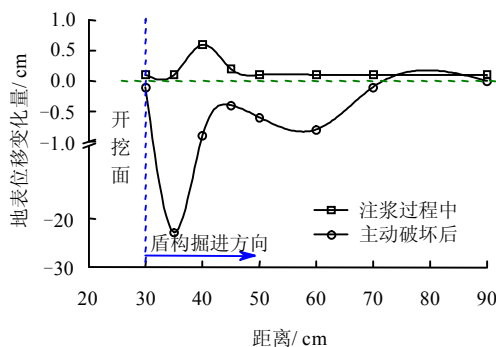


图 8 横断面各测点沉降值曲线

Fig.8 Settlement curves of monitoring points in the cross section

同时也发现, 在砂质土层中进行盾构隧道施工会对土层及周围环境产生影响, 水在其中扮演了一个很重要的角色^[11], 本文根据土层中水头高度不同, 将开挖面主动破坏发展模式分为 3 种情形。

第1种情形为无水模式:在无水条件下,砂层具有很强的结构性和自稳性,尽管隧道开挖面处土体已经完全破坏坍塌,但由于土拱效应的存在,维持了上部土体的稳定性,如图9(a)所示。

第2种情形为低水头模式:在水头高度位于地表以下时,开挖面土体完全失稳后,土拱区逐步向上发展,土体会发生整体向下滑动破坏,而到地下水位之上时土拱不再向上发展,在地下水位与地表之间重新形成土拱区,如图9(b)所示;

第3种情形为高水头模式:当水位高于地表时,土拱区会一直向上发展,上部土体发生整体向下滑动破坏,一直延伸到地表,如图9(c)所示。

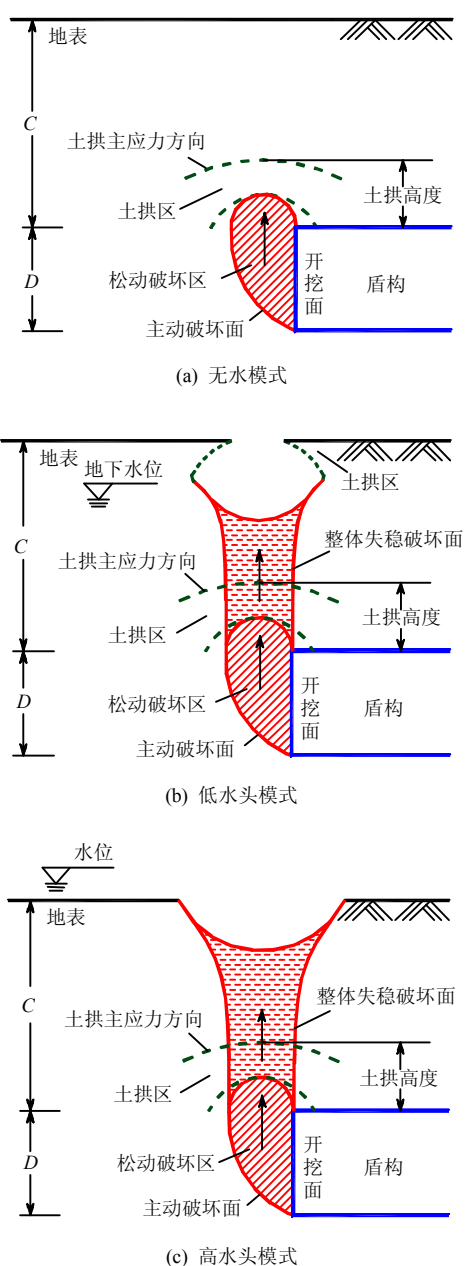


图9 开挖面主动破坏发展模式

Fig.9 Development modes of excavation face active failure

可以看出,砂质土层中开挖面失稳时,存在土拱效应,然而由于水的存在,从而产生渗流和超孔压等因素会致使土层强度大为降低,土拱效应被削弱,当开挖面土体破坏坍塌,出现土层损失时,土体会迅速形成滑动面向下滑动,甚至在地表出现塌坑。

4.2 开挖面失稳受力分析

在注浆阶段泥膜形成过程中,泥浆会沿土体颗粒间孔隙渗入到地层内一定范围,这种排水作用会在土层内迅速形成超孔隙水压力,在泥膜形成以后,泥浆压力会通过泥膜作用于土体,也会形成一定的超孔隙水压力。在不同水头高度的情况下,水头高度为1.1 m的超孔隙水压力为300 mm,要明显高于水头高度为0.9 m的106 mm,也就是说水头高度对超孔隙水压力的形成有影响。而对侧向土压力而言,在注浆阶段明显增长,最大高达60 kPa,高于由上覆土自重引起的静止侧向土压力,这同样是由于在泥膜形成以后,泥浆压力通过泥膜作用于土体,土体受到挤压变形产生被动土压力所致。

在稳定舱压阶段,超孔隙水压力会有不同幅度的降低,基本稳定在150~200 mm,这是由于在注浆阶段形成的超孔隙水压力在维持舱压稳定阶段发生了消散。在该阶段侧向土压力基本维持稳定。

在主动破坏阶段,400~2 100 s时段超孔隙水压力急剧减小,说明在这个过程中,开挖面已由局部破坏发展到完全破坏。而地表出现塌坑在2 250 s,这就证明了地表沉降滞后于开挖面主动破坏。而对于侧向土压力而言,在该阶段也会明显减小,这主要是由于泥水压力降低后,由注浆引起的被动土压力消失,进而土层产生主动滑动破坏,土层损失,从而导致侧向土压力有所降低。

上覆土层厚度为0.5 m、水头高度为1.1 m时,中粗砂土层模拟试验中,舱压与孔土压力的比较如图10所示,0~80 s注浆阶段,侧向土压力值大于舱压,此时开挖面的稳定由活塞承担,侧向土压力与舱压都迅速增加,从18 kPa左右上升到35 kPa左右;80~400 s阶段为通过气泵调节舱压稳定于37 kPa左右,舱压略高于侧向土压力约3 kPa,用以维持开挖面的稳定,让活塞与开挖面分离;2 250 s左右发生主动破坏,出现塌坑后,舱压迅速降为18 kPa左右。孔隙水压力的变化趋势与舱压的变化基本吻合,舱压和土压的变化明显,最大值与最小值相差25 kPa左右,舱压远大于孔压,是孔压的3~5倍。

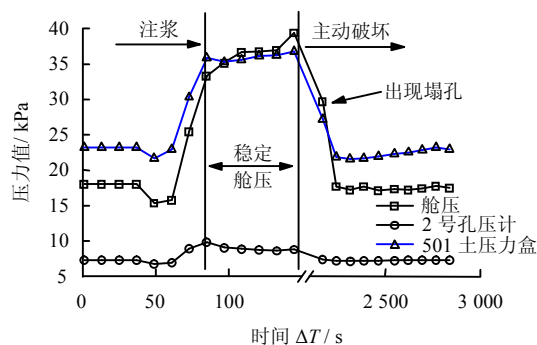


图10 泥水舱压与孔、土压对比曲线

Fig.10 Correlation curves of chamber pressure and earth pressure and pore-water pressure

5 结 论

(1) 砂质土层中盾构隧道开挖面失稳时, 存在土拱效应, 使得地表对开挖面主动破坏的响应存在滞后效应, 甚至于会消除对地表的影响。

(2) 根据水头高度不同, 将砂质土层中开挖面主动破坏发展模式划分为3种情形: 无水模式、低水头模式和高水头模式。

(3) 在形成泥膜和提供支护力的过程中, 会在砂质土层中产生超孔隙水压力, 在确定支护力时, 应在静止土压力和静水压力的基础上, 考虑超孔隙水压力的影响。

(4) 由于土拱效应的存在, 地表对开挖面主动破坏的响应存在滞后效应。

(5) 对砂质土层而言, 由于水的存在而产生的超孔隙水压力和渗流会减弱土体强度, 削弱土拱效应, 因此, 不能将土拱效应做为减小开挖面支护力的依据。

以上是对开挖面主动破坏试验结果的对比分析, 对盾构施工中确定合理开挖面支护力大小具有一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] 尹旅超, 朱振宏, 李玉珍. 日本隧道盾构新技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [2] MAID L B, HERRENKNECHT M, ANHEUSER L. Mechanised Shield Tunnelling[M]. Berlin: Ernst & Sohn, 1996.
- [3] CHAMBON P, CORTE J F. Shallow tunnels in cohesionless soil stability of tunnel face[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(7): 1148—1165.
- [4] ATKINSON J H, POTTS D M. Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. *Geotechnique*, 1977, 27(2): 203—215.
- [5] 周小文, 濮家骝. 砂土中隧洞开挖引起的地面沉降试验研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 559—563.
ZHOU Xiao-wen, PU Jia-liu. Centrifuge model test on ground settlement induced by tunneling in sandy soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 559—563.
- [6] LEE C J, WU B R, CHEN H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, (21): 119—132.
- [7] 吴宏伟, 周小文, CHUNG J K H. 浅埋平行隧道相互作用离心模型试验研究[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议. 北京: [s. n.], 2003.
- [8] 程展林, 吴忠明, 徐言勇. 砂基中泥浆盾构法隧道施工开挖面稳定性试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(5): 53—55.
CHENG Zhan-lin, WU Zhong-ming, XU Yan-yong. Experimental study on stability of tunnel excavation surface in sand foundation by slurry shield method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(5): 53—55.
- [9] 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 Zi-xin, ZHANG Guan-jun. Laboratory study on face stability mechanism of slurry shields[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(7): 1074—1079.
- [10] 陈仁朋, 李君, 陈云敏, 等. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(1): 117—122.
CHEN Ren-peng, LI Jun, CHEN Yun-min, et al. Large-scale tests on face stability of shield tunnelling in dry cohesionless soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(1): 117—122.
- [11] 易宏伟, 张庆贺, 朱忠隆. 静力触探在盾构施工对土体扰动研究中的应用[J]. *世界隧道*, 2000, (2): 7—10.
YI Hong-wei, ZHANG Qing-he, ZHU Zhong-long. Application of static cone penetration to studying the disturbance of soil induced by shield tunnelling[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2000, (2): 7—10.