

文章编号:1005-0523(2016)01-0089-05

# 大直径泥水盾构穿江底深槽段开挖面稳定性研究

黄程侯,王炳龙

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:在大直径泥水盾构隧道施工中,开挖面稳定性问题显得尤为突出,但对于高透水性、砂质、浅覆土地层开挖面稳定的影响因素及其稳定性分析尚不成熟。利用有限元数值模拟,研究不同内摩擦角、水深、盾构埋深以及开挖面支护应力对开挖面稳定性的影响。讨论大直径泥水盾构开挖面稳定性各因素之间关系。研究表明,内摩擦角改变对于盾构开挖面影响显著,水深改变对开挖面影响不大,开挖面凹凸性在 $\lambda$ (应力支护比)=0.8~0.9之间改变,应力支护比在0.9~1之间时,变形量最小,可以为工程提供经验。

关键词:泥水盾构;开挖面;稳定性;支护应力比

中图分类号:TU4;U455.43

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.01.013

近年来,由于经济发展需要,国内出现多项大型跨江盾构隧道工程,如上海复兴东路越江隧道、南京地铁越江隧道等。这些隧道在修建过程中面临盾构机直径大、含水量高、自稳性差等重要问题,大型泥水盾构在开挖过程中容易出现地表变形和位移过大等情况,可能导致开挖面塌陷、泥浆喷发、突涌等严重事件的发生。

由于大直径越江隧道工程出现较晚,目前研究多借鉴常规直径泥水盾构的方法。针对盾构开挖面稳定性的分析方法主要包括:稳定系数法、极限平衡法、试验法、数值模拟法。稳定系数法是为描述盾构安全性,由Broms和Bennermark<sup>[1]</sup>提出粘性土稳定的确定方法,并总结经验公式,通过稳定系数法得出盾构埋深与直径的比值是一个重要影响因子的结论,描述了隧道开挖面的破坏机制。Romo和Diaz<sup>[2]</sup>在稳定系数的基础上提出安全系数法,其结果与Peck存在相关性,但仅对于当时的盾构发展而言,远不足以应用到当今采用的大直径浅覆土的工程中去;极限平衡法进一步考虑到土体参数对稳定性的影响。G Anagnostou和Kovari<sup>[3]</sup>应用Hom提出的楔形计算模型来研究开挖面稳定性,通过比较楔形体与主体的极限平衡得出开挖过程中需要的支持力大小。这种方法极大简化开挖面稳定的破坏机理,同时考虑到粘聚力 $c$ 内摩擦角 $\varphi$ 对支持力起到的关键作用,但这种模型只适用于粘性土,无法针对不同土性的土体进行模拟;近年来,大批学者通过试验对开挖面稳定性的影响因素有了进一步认识,其中程展林,吴忠明等<sup>[3]</sup>人通过模型试验,对中粗砂地基中泥水式盾构开挖面稳定性进行模拟,考虑内摩擦角与孔隙水压的影响,但对于作为土体另一个重要参数的粘聚力并未涉及在内。刘泉维,杨忠年<sup>[4]</sup>通过模型试验证明开挖面存在土拱效应;随着计算机技术的发展,数值模拟计算可以模拟盾构法复杂的地下开挖施工过程。秦建<sup>[5]</sup>用大型有限差分程序对土压平衡盾构开挖面变形与破坏进行了分析研究,将砂土与粘土进行对比。黄正荣<sup>[6]</sup>、韦良文等<sup>[7]</sup>人引入支护比的概念,通过模型试验探究开挖面稳定性影响参数。刘超等<sup>[8]</sup>人通过数值模拟法分析大直径泥水盾构对地表的影响,但并未直观体现到开挖面变形。徐明等<sup>[9]</sup>应用对比有限元计算结果与解析解,指出模型的局限性。李亚翠等<sup>[10]</sup>对大断面

收稿日期:2016-11-02

作者简介:黄程侯(1990—),男,硕士,研究方向为岩土工程。

通讯作者:王炳龙(1961—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为岩土工程。

浅埋隧道进行分析,认为大断面变形较常规隧道明显。

现有研究成果以盾构开挖机理及施工对环境的影响为主,研究对象多为常规尺寸盾构机,对本文所讨论的大直径泥水盾构开挖面变形缺乏研究。文章结合南京地铁三号线穿越长江段越江工程,对高透水性、砂质、浅覆土地层大直径泥水盾构开挖面变形进行有限元模型试验研究。通过有限元模拟,对试验结果进行分析,讨论了大直径泥水盾构开挖面支护应力和不同影响因素,包括水深、盾构埋深、土体性质之间的关系。

## 1 工程概况

以南京地铁三号线穿越长江段为研究对象,大直径盾构越江工程为该线路的重难点工程,施工风险高、难度大,其中盾构穿越江底的深切槽段又因为具有覆土厚度变化大,隧道埋深浅以及深槽冲刷摆幅大等特点,成为设计和施工中需要重点考虑的部分。着重研究的深切槽段穿越地层为②-5d2~1 粉细砂,中密~密实状,级配较差,自稳性相对稍好,其物理力学参数如表 1,具有透水性好,压缩性低的特性。采用有限元计算最小覆土里程处,其隧道顶部埋深仅有 5 m。深槽段上部土体为②-3b4~3 层淤泥质粉质粘土、②-4d3~2 层粉细砂,液化等级为轻微液化~严重液化,当其受到盾构掘进扰动后,易发生液化现象,易坍塌。施工采用复合式泥水气压平衡盾构。文章主要研究穿越江底河床深切槽段大直径盾构开挖面稳定性及控制标准。

表 1 隧道上覆土层特性及土压力参数

Tab.1 Tunnel overburden characteristics and soil pressure parameters

地层编号	名称	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	侧土压力 系数	含水率 /%	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	孔隙比
②-3b4~3	粉质黏土	11	31.4	0.47	24.8	19.50	0.717
②-4d3~2	粉砂、细砂	10	31.3	0.43	25.0	19.30	0.734
②-5d2~1	粉砂、细砂	11	31.5	0.42	23.9	19.50	0.705

## 2 有限元模型的建立

采用有限元模型模拟,模型尺寸:100 m×100 m×100 m,盾构直径( $D$ )11.2m,考虑到实际情况的对称性,几何模型如图 1,采用实体单元,保证边界条件,将 AD,BC,CD 设为模型边界,模型采用底边固定,左右水平固定,将大开挖面设在模型中间,掘进 50 m,其深度根据实验需要可更改,开挖面 EF 设面单元,加载压力,压力方向与盾构机掘进方向相同;土体采用土体硬化模型(HS),该二阶模型可用于模拟砂土、砂砾,也可用来模拟粘土和淤泥等软土类型,与常用的莫尔-库伦模型(MC)相比,更接近砂土的工程实际;隧道模型的计算范围:自上而下取水,土体,隧道,下层土体。

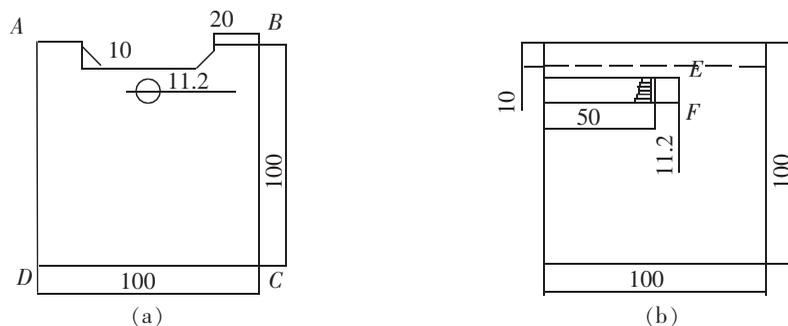


图 1 隧道模型横剖面图、纵剖面图(单位:m)

Fig.1 Cross-sectional and longitudinal section of the tunnel model(unit:m)

模型试验共 11 个实验组,如表 2 所示,结合工程实际情况,分别选取不同的水深、覆土厚度与盾构机直径比值(用  $H/D$  表示表示),泥浆压力(用有效泥浆压力表示)以及穿越土层的特性(用不同的粘聚力和内摩

擦角表示)。

EF 开挖面设置的泥浆压力分别为:60%,70%,80%,90%,95%,100%,120%倍的静止土压力(用有效重度计算)。在下文中用应力支护比  $\lambda$  表示,即分别取支护比  $\lambda$  为 0.6,0.7,0.8,0.9,0.95,1,1.2。

在模拟过程中,由于工程中盾构机上覆土土性与穿越段土性基本相同,为简化模型,取上覆土与穿越土体为同种参数。所建的每组有限元模型,分别取不同应力支护比的工况计算。

### 3 结果分析

#### 3.1 开挖面变形特性分析

内摩擦角是反映土材料的一个关键参数,本节主要分析砂土的内摩擦角对开挖面的变形(文章中所指变形均为盾构开挖面水平变形)影响。盾构直径  $D$  为 11.2 m,埋深(用  $H$  表示埋深) $H$  为 5.6 m(即 0.5  $D$ )。在研究内摩擦角对开挖面稳定性影响时,为了减小其他因素的影响,保持模型的其它参数不变,只改变内摩擦角的大小;这里本着与工程条件相对比的思想,选定粘聚力  $c=10$  kPa 情况下,分析了内摩擦角  $\phi$  分别为  $15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  时开挖面的变形规律。对于每种内摩擦角的土体,计算支护比  $\lambda$  为 1 的工况下的开挖面变形量,当  $\lambda=1$  时,内摩擦角  $15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  分别对应最大变形量为 14.2 mm,8.6 mm,0.2 mm 正值代表凸起(向盾构机掘进方向凸起)。对于不同的内摩擦角,盾构开挖面的变形量不同,内摩擦角较大时,土体自稳性好,不易发生变形,与程展林等人通过实验对于中粗砂中的研究结论一致。

表 2 有限元模型实验组

Tab.2 Experimental group of finite element model

实验组	内摩擦角/ $^\circ$	粘聚力/kPa	埋深	水深/m
第一对比组	1	15	0.5 D	5
	2	20	0.5 D	5
	3	30	0.5 D	5
	4	30	10	0.5 D
第二对比组	5	30	1 D	5
	6	30	2 D	5
	7	30	4 D	5
	8	30	10	0.5 D
第三对比组	9	30	0.5 D	10
	10	30	0.5 D	15
	11	30	0.5 D	20

由图 2、图 3 可知,土体性质改变时,在不同的支护应力情况下,开挖面变形是一致的,变形量最大位于盾构机中心线附近,这一现象符合泥膜变形规律;变形特性在盾构机外壳处发生改变,上部土体与下部土体变形,沿远离开挖面方向趋于缓和,这也验证了盾构机在施工时会对周围土体扰动,影响大小与距离有关;开挖面变形方向在实验中有明显变化,当支护压力较小时会凹陷,在一定范围内随着支护压力增加会变成凸起,分界线在  $\lambda=0.8\sim 0.9$  时发生,此现象说明支护应力会改变开

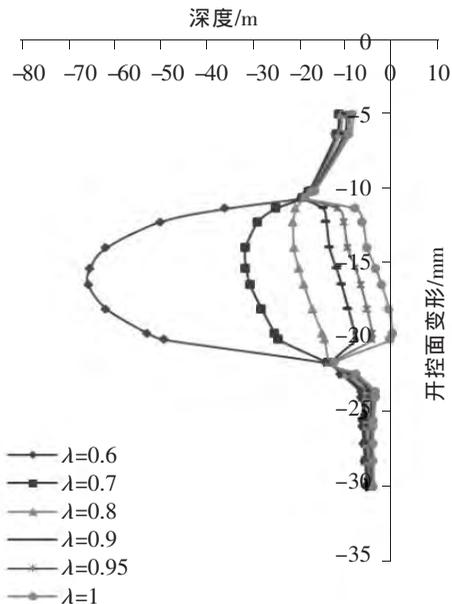


图 2 内摩擦角  $30^\circ$  开挖面变形

Fig.2 Excavation plane deformation with friction angle  $30^\circ$

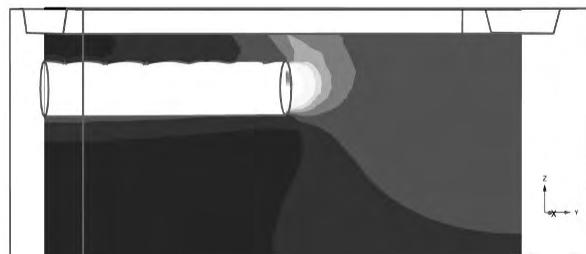


图 3 内摩擦角  $30^\circ$  开挖面变形数值模拟计算图

Fig.3 Numerical simulation diagram of excavation plane deformation with friction angle  $30^\circ$

挖面变形特性,直接影响开挖面稳定性,是需要考虑施工过程中重要参数。

针对深切槽段盾构施工,如果上覆土较厚,水的冲击及深度影响相比于土较弱,因此在浅覆土情况下讨论水深对于开挖面稳定性研究具有现实意义,文章取上覆土厚度 5 m,土体粘聚力  $c=10$  kPa,内摩擦角  $\phi=30^\circ$ ,分别取水深 5,10,15 和 20 m,进行数值模拟,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,其他条件保持不变,不同水深情况下开挖面变形趋势相同,随着支护应力比的增大变形量减少,并且同样应力支护比情况下,不同水深变形量差较小,在  $\lambda=0.95$  时,最大差异为 7.3 mm,相较于 15 m 差值的水深,变形改变量可以忽略不计。其主要原因是穿越江底段,砂土渗透性大,覆土浅,在开挖面形成的压力主要由土压与水压组成,随着水深增加,土压所占比例逐步减小,加上渗透性高,所以在水达到一定深度时,水压成为主导,加之水传导力的方式较土更为均匀,所以变形十分规律。因此可以判断,水深改变对于深切槽浅覆土段盾构开挖面变形规律影响不明显。

### 3.2 支护比对开挖面稳定性的影响

在研究支护应力比对开挖面稳定性的影响时,为研究方便,计算模型建立选择粘聚力为 10 kPa,内摩擦角为  $30^\circ$ ,隧道直径  $D$  为 11.2 m,埋深为 5.6,11.2,22.4 和 44.8 m。其中,横坐标为变形量,纵坐标为深度;正值代表凸起(向盾构机掘进方向凸起),负值代表凹陷。

取每种应力支护比下中心线的变形量,按支护应力比分类,如图 5,其中纵坐标为开挖面最大变形量。

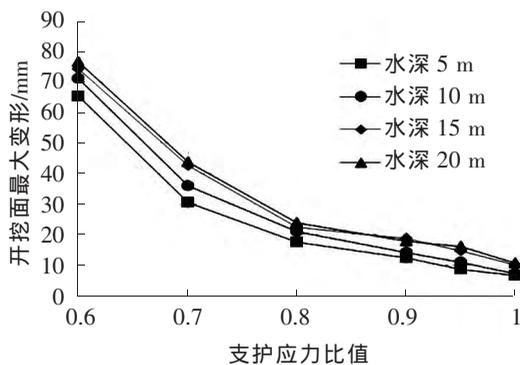


图 4 不同水深开挖面最大水平位移支护应力比  
Fig.4 Supporting stress of the maximum horizontal displacement at different depths

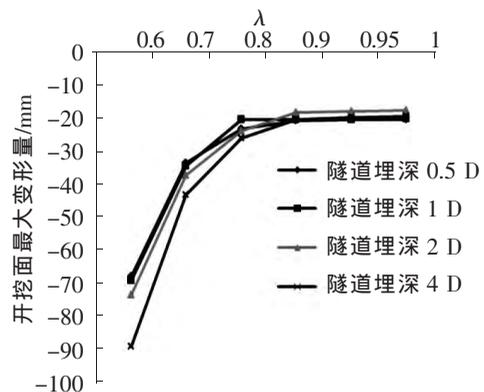


图 5 不同埋深盾构开挖面最大变形量  
Fig.5 Maximum deformation of excavation face shield at different depths

由图 5 可以明显看出随着埋深的影响不同,当应力支护比在 0.6~0.8 时随着埋深的加大变形也变大,变化速率迅速,可以认为这部分开挖面可能会出现失稳情况;在 0.8~1 时随着埋深的变小变形而变大,这部分变形比较稳定,可以认为泥膜可以形成并起到支撑作用。

分别取 3 组埋深相同(0.5 D 时),另取 4 组土性相同,改变埋深(0.5 D,1 D,2 D,4 D),按应力支护比的顺序,从开挖面变形明显看出,当取应力支护比在 0.9~1 之间时,变形量最小,可以为工程提供经验。

## 4 结语

结合南京地铁三号线穿越长江段越江工程,采用有限元模拟对大直径泥水盾构隧道在砂土地层中的开挖面稳定性进行研究,通过改变土体参数及应力支护比,总结不同要素与开挖面稳定性之间的关系。

研究结果表明,砂土中内摩擦角对开挖面变形影响显著;深槽段浅覆土情况下,不同水深对开挖面变形量的改变影响较小;在应力支护比  $\lambda$  取 0.8~0.9 时开挖面变形从凹陷变成凸起,凹凸性改变;当应力支护比在 0.9~1 之间时,开挖面变形量最小。

## 参考文献

- [1] 裴洪军,孙树林,吴绍明,等. 隧道盾构法施工开挖面稳定性研究方法评析[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(1):117-118.
- [2] ROMO M P, AND DIAZ C M. Face stability and ground settlement in shield thunneling[C]//Proc.Of the 10th Int'l Conf.on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981:357-360.
- [3] 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[R]. 长江科学院院报,2011(5):18.
- [4] 刘泉维,杨忠年. 泥水平衡盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(8):2255-2260.
- [5] 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,2005:56-58.
- [6] 黄正荣,朱伟,梁精华,等. 浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):2006-2009.
- [7] 韦良文,张庆贺,邓忠义. 大型泥水盾构隧道开挖面稳定机理与应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(1):87-91.
- [8] 刘超,张子新. 超大直径双线泥水盾构施工的三维数值模拟[J]. 土木工程学报,2011(S2):118-122.
- [9] 徐明,邹文浩,刘瑶. 超大直径泥水盾构在砂土中的开挖面稳定性分析[J]. 土木工程学报,2012,45(3):174-181.
- [10] 李亚翠,杨新安,郭乐. 大断面浅埋土质隧道施工工法优化分析[J]. 华东交通大学学报,2014,31(5):12-18.

## Study on Excavation Face Stability of Large-diameter Slurry Shield in Deep Groove

Huang Chengyu, Wang Binglong

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804,China)

**Abstract:** In large-diameter slurry shield tunnel construction, the excavation face stability problem is prominent, but the study on excavation face stability and relevant influence factors for sandy and shallow overburden soil with high water permeability layer has not been mature. Based on numerical simulation of finite element model, this study explores effects of such factors as different friction angles, depths of water, buried depth of shield and excavation surface supporting stress on the excavation face stability. Besides, it discusses the relationship between various factors for the large-diameter slurry shield tunnel excavation face stability. Results show that, friction angle change has significant effects on shield tunnel excavation face while the depth change of water shows no effect; the excavation surface deformation direction changes when  $\lambda$  is between 0.8~0.9, and excavation surface deformation reaches the minimum when  $\lambda$  is between 0.9 ~ 1.

**Key words:** slurry shield; the excavation face; stability; supporting stress ratio

(责任编辑 王建华)