

# 高水压条件下泥水盾构隧道开挖面支护压力特性分析

陈孟乔<sup>1</sup>, 刘建坤<sup>1</sup>, 肖军华<sup>2</sup>, 田泽野<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:** 高水压条件下, 泥水盾构隧道施工过程中开挖面支护压力对开挖面稳定性和地层变形的影响很大。结合南京地铁3号线浦珠路站—滨江路站区间过江隧道工程, 建立了模拟盾构隧道开挖面失稳过程的数值模型, 研究了开挖面支护压力与土体变形之间的关系以及相关参数对其影响。研究表明, 相比于无水压的情况, 高水压条件下开挖面前方土体发生较小位移时开挖面支护压力就达到极限值, 且极限值增大约一个量级, 开挖面更易失稳。随着内摩擦角、水位和隧道直径的增大, 开挖面极限支护压力比增大, 开挖面稳定性降低, 但变化趋势逐渐变缓, 开挖面极限支护压力比与内摩擦角、水位呈抛物线形式, 与隧道直径呈幂函数形式。随着黏聚力、埋深的增大, 开挖面极限支护压力比减小, 开挖面稳定性升高, 但变化趋势逐渐变缓, 呈抛物线形式。弹性模量对开挖面稳定性几乎没有影响。研究结果可为高水压条件下盾构隧道施工中合理确定支护压力提供参考。

**关键词:** 盾构隧道; 开挖面稳定; 支护压力; 高水压

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0163-07

**作者简介:** 陈孟乔(1985-), 男, 河北秦皇岛人, 博士研究生, 主要从事城市轨道交通工程方面的研究。E-mail: mengqiaochen@126.com。

## Face supporting pressure of slurry shield tunnel under high hydraulic pressure

CHEN Meng-qiao<sup>1</sup>, LIU Jian-kun<sup>1</sup>, XIAO Jun-hua<sup>2</sup>, TIAN Ze-ye<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Face supporting pressure has great influence on face stability and ground deformation under high hydraulic pressure during slurry shield tunneling. Based on the under-river tunneling project of Nanjing Metro Puzhulu-Binjianglu interval, a numerical model is established to simulate the process of instability, the relation between face supporting pressure and soil deformation and the impact of relevant parameters are studied. The results show that, compared the case without no hydraulic pressure, the limit supporting pressure is reached when smaller soil displacement has occurred and the value the much greater under high hydraulic pressure. The ratio of the limit supporting pressure increases and the face stability decreases with the increase of the internal friction angle, water level and tunnel diameter. The relation curve of the limit supporting pressure and the internal friction angle (water level) is parabola, and that of the limit supporting pressure and tunnel the diameter is power function. The ratio of the limit supporting pressure decreases and the face stability increases with the increase of the cohesion and tunnel depth. The relation curve of the limit supporting pressure and cohesion (tunnel depth) is parabola (power function). The elastic modulus has almost no effect on the face stability. The research may provide a reference for the determination of face supporting pressure during slurry shield tunneling under high hydraulic pressure.

**Key words:** shield tunnel; face stability; supporting pressure; high hydraulic pressure

## 0 引言

随着我国地下空间的大规模开发利用, 盾构隧道工程的环境条件越来越复杂多样, 施工中出现了诸多问题, 其中较为突出的是支护压力不足造成的开挖面失稳及地层变形过大。特别是当盾构在水底掘进时, 由于覆土厚度一般较浅、水压较大, 开挖面稳定难以

控制, 稍有不慎就有可能发生开挖面坍塌和水体倒灌等事故。因此, 在泥水盾构施工过程中, 最重要的问题之一就是合理确定泥浆压力以保证开挖面的稳定。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171064); 国家基础研究计划“973”项目(2012CB026104)

收稿日期: 2013-06-07

表1 开挖面极限支护压力对比

Table 1 Comparative analysis of limit supporting pressure

	隧道直径 /m	上覆土深 /m	土体重量 /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	极限支护压力/kPa		
						Chambon 离心 试验	本文数值 模型	梯形楔形体 模型
模型1	5	10	16.1	0	38	4.0	4.49	8.40
模型2	10	10	16.0	0	38	7.4	10.32	16.47

许多学者通过理论分析、模型试验和数值模拟等手段,研究了盾构隧道开挖面稳定性问题。Anagnostou等<sup>[1-2]</sup>采用楔形体计算模型等理论对泥水盾构和土压平衡盾构开挖面稳定性相关问题进行了研究。Chambon等<sup>[3]</sup>利用干砂开挖面稳定性离心试验得出了开挖面支护压力与位移关系曲线及地表横断面沉降曲线。朱伟等<sup>[4]</sup>、黄正荣等<sup>[5-6]</sup>、方勇等<sup>[7]</sup>利用数值模拟的方法研究了开挖面稳定性问题。本文在已有研究成果基础上,结合南京地铁3号线浦珠路站—滨江路站区间过江隧道工程,采用数值模拟方法研究了高水压条件下泥水盾构隧道由于开挖面支护压力不足导致的土体位移与支护压力之间的关系,以及土体参数和环境条件对其影响。

## 1 模型建立

### 1.1 模拟过程

为了准确确定开挖面极限支护压力,模拟过程中采用“应变控制”边界条件,模拟过程如下:

(1) 建立地层模型,在模型四周和底部施加位移边界条件,在模型顶部施加应力边界条件(高水压作用),迭代计算使模型达到平衡状态,生成初始应力场。

(2) 挖掉盾构隧道部分土体单元,设置盾构管片结构单元,锁定开挖面各节点沿隧道轴向位移,模拟位移为0的应变控制初始状态,迭代计算使模型达到平衡状态,将各节点位移归零。

(3) 逐级施加位移。解除开挖面各节点轴向位移锁定,给开挖面各节点设定沿Y轴负向的微小速度(本文计算中取 $1 \times 10^{-5}$  m/步),施加位移,数值计算中最小分级取0.01 m,需迭代1000步。施加该级位移后,锁定开挖面各节点轴向位移,迭代计算使模型达到平衡状态,记录开挖面各节点轴向节点力、土体应力和位移。

(4) 重复步骤3,直至开挖面前方土体达到极限状态(随开挖面各节点位移逐级增加,开挖面支护压力保持不变)。

### 1.2 模型验证

为了验证本文数值模拟过程是否合理、结果是否可信,结合Chambon等<sup>[3]</sup>离心试验参数,建立图1所

示的数值模型,将数值模拟结果与离心试验结果、梯形楔形体理论模型计算结果<sup>[8]</sup>进行对比,如表1。

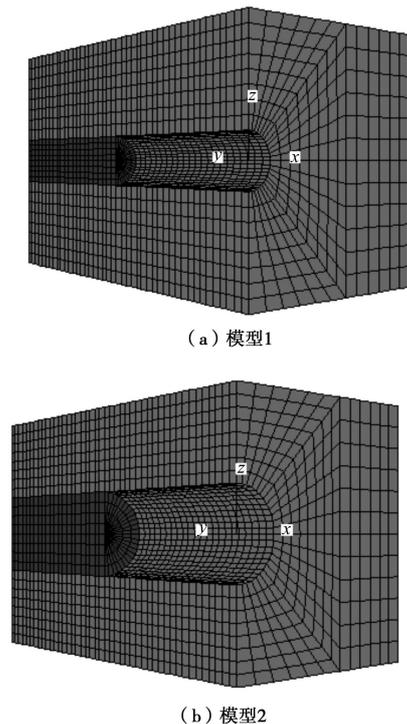


图1 模型网格划分

Fig. 1 Model meshing

由表1可知,与梯形楔形体理论模型相比,本文数值模拟分析结果更接近离心试验结果。

### 1.3 数值模拟模型

参考南京地铁3号线浦珠路站—滨江路站区间过江隧道详勘报告及设计资料,本文在数值模拟计算中采用的模型尺寸如下:长44.0 m,宽27.5 m,高33.0 m,隧道直径 $D=11.0$  m,上覆土层厚 $H=11.0$  m,水位位于模型顶部以上11.0 m,模型尺寸及网格划分如图2所示。除模型顶部为自由面外,四周及底部采用变形约束条件。

计算中土体材料服从Mohr-Coulomb剪切破坏准则。盾构管片材料为C50钢筋混凝土,厚0.5 m,采用shell单元模拟。材料参数如表2所示。

## 2 开挖面极限支护压力

高水压条件下开挖面支护压力与开挖面前方土体

沿隧道轴向位移之间的关系如图 3 所示。图中横轴为开挖面前方土体沿 Y 轴负向位移  $\delta$ ，纵轴为某一位移下的开挖面支护压力  $P$  与开挖面处相应位置原始地层土体侧压力  $P_0$  之比。 $P_{cr}$  为开挖面极限支护压力。 $P$  和  $P_{cr}$  均为隧道轴心处对应的支护压力。

表 2 模型材料参数

Table 2 Parameters of model material

材料	密度 $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	侧压力系数 $K_0$
粉细砂	1930	9	30	29.4	0.3	0.43
管片	2450	—	—	34500	0.2	—

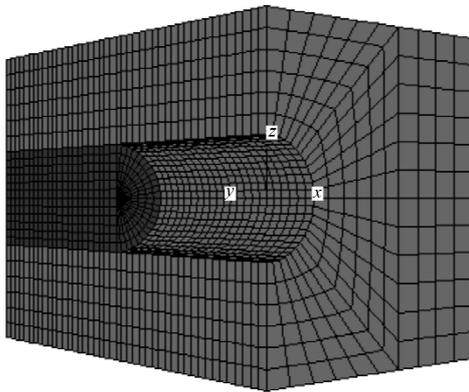


图 2 模型网格划分

Fig. 2 Model meshing

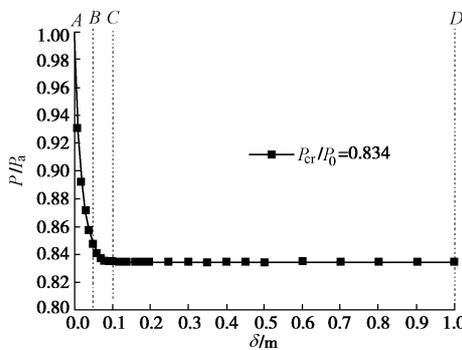


图 3 高水压条件下开挖面支护压力比与位移的关系

Fig. 3 Face supporting pressure ratio vs. displacement under high hydraulic pressure

由图 3 可知，在本文采用的土体参数和埋深比条件下，开挖面前方土体位移为 0.10 m 时，开挖面支护压力达到极限值  $P_{cr}$ ，其与开挖面处原始地层土体侧压力  $P_0$  之比为 0.834。

根据图 3 所示的  $P/P_0 - \delta$  曲线特征，可以将开挖面前方土体从开始发生变形到失稳的过程分为 3 个阶段：第一阶段 A-B，开挖面前方土体位移  $\delta$  缓慢增加，支护压力  $P$  迅速降低。该阶段为弹塑性小变形阶段，且弹性变形占有较大的比重，土体抗剪能力逐步发挥，

但是尚未达到极限平衡状态。第二阶段 B-C，随着  $\delta$  的增加， $P$  的降低速率逐渐变小，该阶段结束时，支护压力达到极限值  $P_{cr}$ 。该阶段开挖面附近土体首先达到极限平衡状态，然后达到极限平衡状态的土体范围迅速扩大并向地表扩展，使得位移增加较快。当  $P$  降低到极限值  $P_{cr}$  时，开挖面前方及上部土体整体达到极限平衡状态。第三阶段 C-D，随着  $P$  的略微降低， $\delta$  急剧增加，开挖面前方土体整体失去稳定性。

在上述土体参数和埋深比条件下，当不考虑水压时，开挖面支护压力比与开挖面前方土体沿隧道轴向位移之间的关系如图 4 所示。

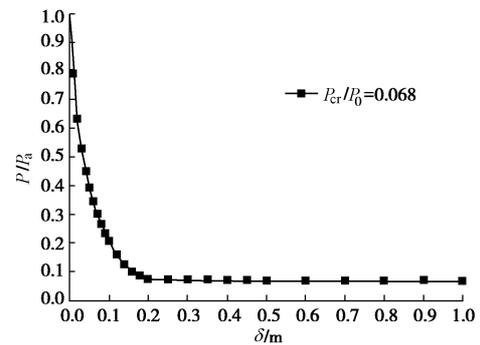


图 4 无水压条件下开挖面支护压力比与位移的关系

Fig. 4 Face supporting pressure ratio vs. displacement under no hydraulic pressure

由图 4 可知，在不考虑水压的条件下，开挖面前方土体位移为 0.35 m 时，开挖面支护压力达到极限值  $P_{cr}$ ，其与开挖面处原始地层土体侧压力  $P_0$  之比为 0.068。对比图 3 和图 4 可以发现，在其他条件相同时，高水压条件下开挖面支护压力达到极限值  $P_{cr}$  时开挖面前方土体位移由 0.35 m 降低到 0.10 m，开挖面极限支护压力  $P_{cr}$  与开挖面处原始地层土体侧压力  $P_0$  之比由 0.068 上升到 0.834。可知在高水压条件下，开挖面前方土体发生较小位移时，开挖面支护压力就达到极限值，且极限值增大一个量级。因此，在高水压的条件下，开挖面更易发生失稳，盾构掘进过程中开挖面支护压力的波动范围控制要求更为严格。

### 3 开挖面支护压力影响因素分析

#### 3.1 土体参数的影响

##### (1) 内摩擦角

在研究内摩擦角对开挖面支护压力的影响时，保持模型其它参数不变，内摩擦角分别取  $15^\circ$ ， $20^\circ$ ， $25^\circ$ ， $30^\circ$ ， $35^\circ$ ， $40^\circ$ 。不同内摩擦角条件下的开挖面支护压力比与开挖面前方土体位移之间的关系如图 5 所示。开挖面极限支护压力比与内摩擦角之间的关系如图 6 所示。

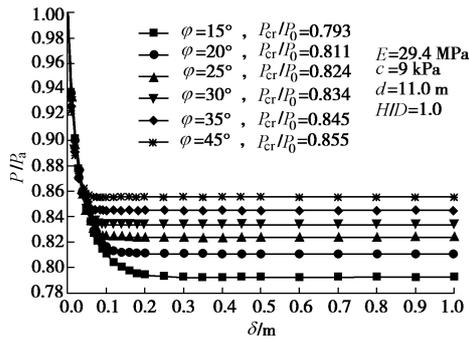


图5 不同内摩擦角条件下开挖面支护压力比与位移的关系  
Fig. 5 Face supporting pressure ratio vs. displacement under different internal friction angles

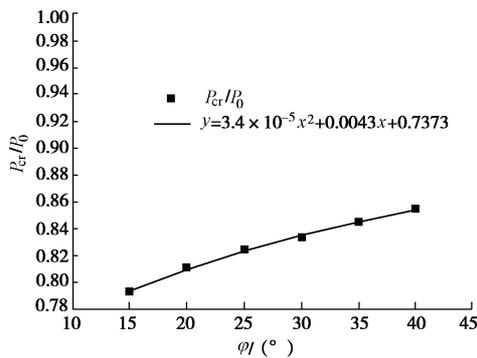


图6 开挖面极限支护压力比与内摩擦角的关系  
Fig. 6 Face limit supporting pressure ratio vs. internal friction angle

由图5及图6可知，土体位移较小时，开挖面支护压力比随位移的变化趋势基本一致，但内摩擦角越大，达到极限支护压力时土体位移越小。随着内摩擦

角的增大，开挖面极限支护压力比不断增大，开挖面稳定性降低，但变化趋势逐渐变缓，呈抛物线形式。这与无水压条件下有所不同，主要是由于高压条件下内摩擦角对开挖面破坏状态影响较大，如图7所示，内摩擦角越大，开挖面支护压力达到极限值时土体变形越小，达到极限平衡状态的土体范围越小，土体抗剪能力的发挥越小，导致开挖面极限支护压力随内摩擦角增大而增大。

(2) 弹性模量

在研究弹性模量对开挖面支护压力的影响时，保持模型其它参数不变，弹性模量分别取 25.4, 29.4, 33.4, 37.4, 41.4 MPa。不同弹性模量条件下的开挖面支护压力比与开挖面前方土体位移之间的关系如图8所示。开挖面极限支护压力比与弹性模量之间的关系如图9所示。

由图8,9可知，土体位移较小时，弹性模量越大，开挖面支护压力比随位移的变化趋势越陡，达到极限支护压力时土体位移越小。随着弹性模量的增大，开挖面极限支护压力几乎保持不变，弹性模量对开挖面稳定性的影响很小。

(3) 黏聚力

在研究黏聚力对开挖面支护压力的影响时，保持模型其它参数不变，黏聚力分别取 0, 3, 5, 7, 9 kPa。不同黏聚力条件下的开挖面支护压力比与开挖面前方土体位移之间的关系如图10所示。开挖面极限支护压力比与黏聚力之间的关系如图11所示。

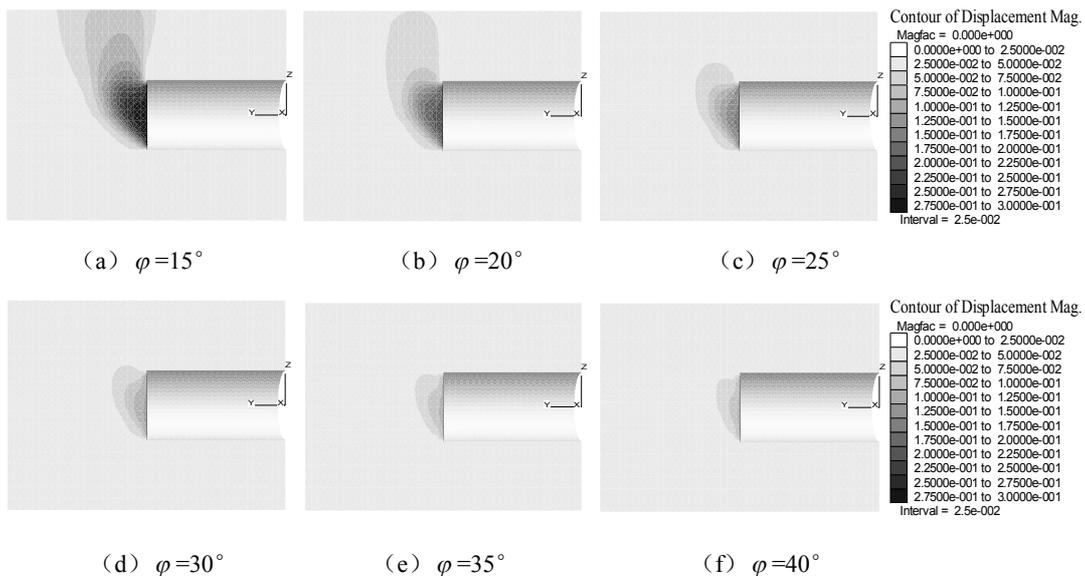


图7 不同内摩擦角条件下开挖面破坏形态

Fig. 7 Face failure patterns under different internal friction angles

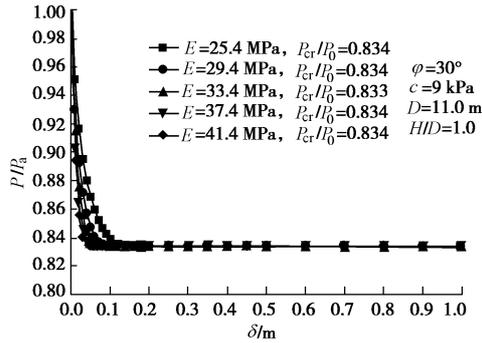


图 8 不同弹性模量条件下开挖面支护压力比与位移的关系  
Fig. 8 Face supporting pressure ratio vs. displacement under different elastic moduli

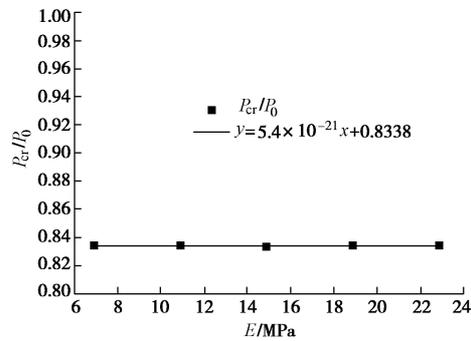


图 9 开挖面极限支护压力比与弹性模量的关系  
Fig. 9 Face limit supporting pressure ratio vs. elastic modulus

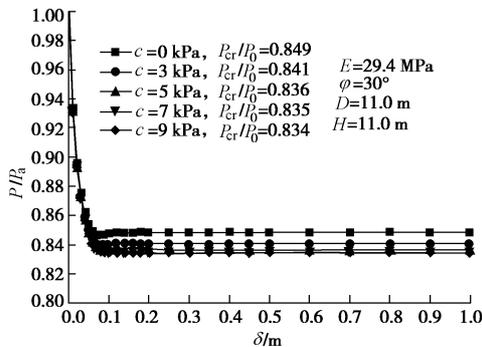


图 10 不同黏聚力条件下开挖面支护压力比与位移的关系  
Fig. 10 Face supporting pressure ratio vs. displacement under different cohesions

由图 10 及图 11 可知, 土体位移较小时, 开挖面支护压力比随位移的变化趋势基本一致, 达到极限支护压力时土体位移均为 0.10 m 左右。随着黏聚力的增大, 开挖面极限支护压力不断减小, 开挖面稳定性升高, 但变化趋势逐渐变缓, 呈抛物线形式。

### 3.2 隧道埋深的影响

在研究埋深对开挖面支护压力的影响时, 保持模型其它参数不变, 埋深分别取 5.5, 11, 16.5, 22, 33 m。不同埋深条件下的开挖面支护压力比与开挖面前

方土体位移之间的关系如图 12 所示, 图中为了消除埋深不同所导致的开挖面处原始地层土体侧压力不同的影响, 仍采用支护压力比的形式进行无量纲化。开挖面极限支护压力比与埋深之间的关系如图 13 所示。

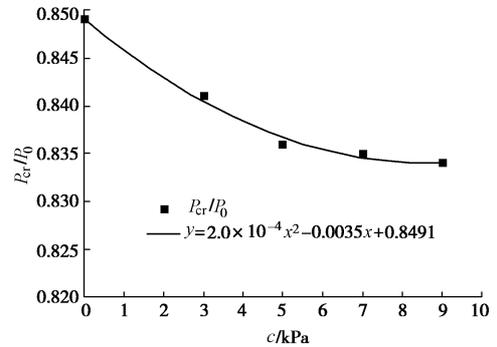


图 11 开挖面极限支护压力比与黏聚力的关系  
Fig. 11 Face limit supporting pressure ratio vs. cohesion

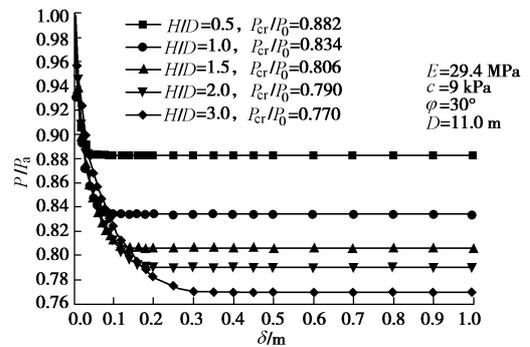


图 12 不同隧道埋深条件下开挖面支护压力比与位移的关系  
Fig. 12 Face supporting pressure ratio vs. displacement under different tunnel depths

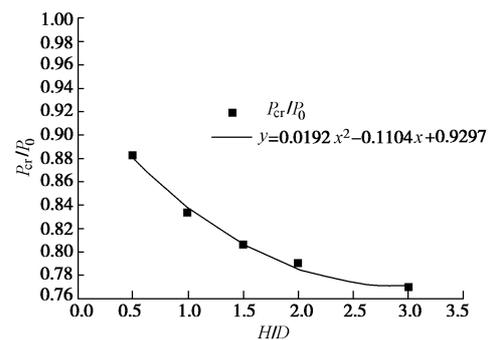


图 13 开挖面极限支护压力比与隧道埋深的关系  
Fig. 13 Face limit supporting pressure ratio vs. tunnel depth

由图 12 及图 13 可知, 土体位移较小时, 开挖面支护压力比随位移的变化趋势基本一致, 埋深越大, 达到极限支护压力时土体位移越大。随着埋深的增大, 开挖面极限支护压力比不断减小, 开挖面稳定性升高, 但变化趋势逐渐变缓, 呈抛物线形式。

### 3.3 隧道直径的影响

在研究隧道直径对开挖面支护压力的影响时, 保

持模型其它参数不变, 隧道直径分别取 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0 m。不同隧道直径条件下的开挖面支护压力比与开挖面前方土体位移之间的关系如图 14 所示。开挖面极限支护压力比与隧道直径之间的关系如图 15 所示。

由图 14 及图 15 可知, 土体位移较小时, 隧道直径越小, 开挖面支护压力比随位移的变化趋势越陡, 达到极限支护压力时土体位移越小。随着隧道直径的增大, 开挖面极限支护压力不断增大, 开挖面稳定性降低, 但变化趋势逐渐变缓, 呈幂函数形式。当隧道直径较大 (>5.0 m) 时, 开挖面极限支护压力比的上升不大 ( $P_{cr}/P_0=0.832\sim 0.841$ )。

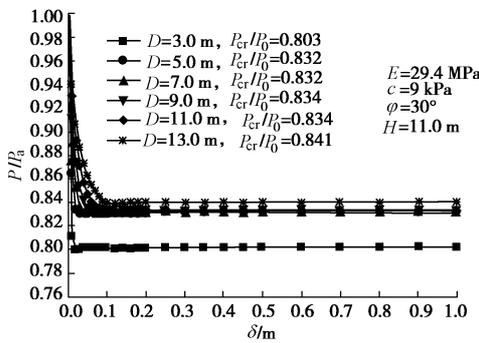


图 14 不同隧道直径条件下开挖面支护压力比与位移的关系  
Fig. 14 Face supporting pressure ratio vs. displacement under different tunnel diameters

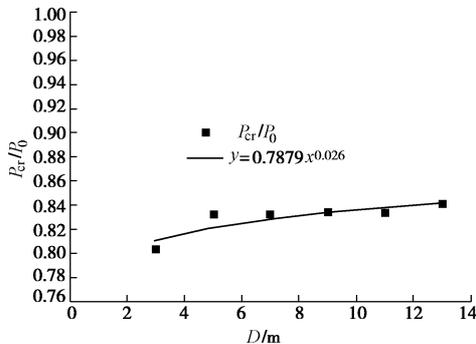


图 15 开挖面极限支护压力比与隧道直径的关系

Fig. 15 Face limit supporting pressure ratio vs. tunnel diameter

### 3.4 水位的影响

在研究水位对开挖面支护压力的影响时, 保持模型其它参数不变, 水位分别取 5.0, 11.0, 15.0, 20.0, 25.0 m。不同水位条件下的开挖面支护压力比与开挖面前方土体位移之间的关系如图 16 所示, 图中为了消除水位不同所导致的开挖面处原始地层土体侧压力不同的影响, 仍采用支护压力比的形式进行无量纲化。开挖面极限支护压力比与水位之间的关系如图 17 所示。

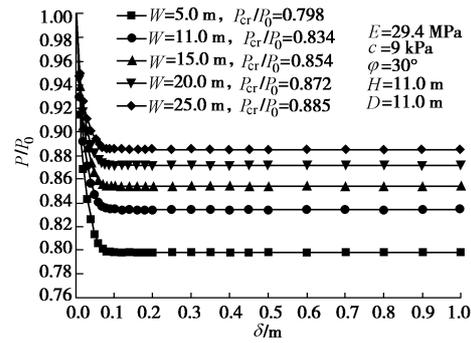


图 16 不同水位条件下开挖面支护压力比与位移的关系  
Fig. 16 Face supporting pressure ratio vs. displacement under different water levels

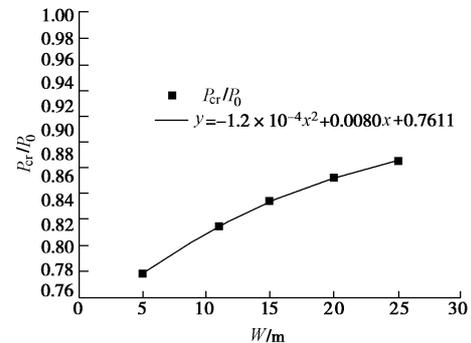


图 17 开挖面极限支护压力比与水位的关系

Fig. 17 Face limit supporting pressure ratio vs. water level

由图 16, 17 可知, 土体位移较小时, 开挖面支护压力比随位移的变化趋势基本一致。随着水位的升高, 开挖面极限支护压力比不断增大, 开挖面稳定性降低, 但变化趋势逐渐变缓, 呈抛物线形式。

## 4 结 论

采用数值模拟分析的方法对高水压条件下盾构隧道开挖面稳定性进行了分析, 得到如下结论:

(1) 高水压条件下, 开挖面前方土体发生较小位移时, 开挖面支护压力就达到极限值, 且极限值比无水压时增大约一个量级, 开挖面更易失去稳定性。开挖面支护压力比与开挖面前方土体位移之间的关系曲线可以分为 3 个阶段。

(2) 随着砂土内摩擦角的增大, 开挖面极限支护压力比增大, 开挖面稳定性降低, 但变化趋势逐渐变缓, 呈抛物线形式。这主要是由于高水压条件下内摩擦角对开挖面破坏状态影响较大, 内摩擦角越大, 开挖面支护压力达到极限值时土体变形越小, 达到极限平衡状态的土体范围越小, 土体抗剪能力的发挥越小。

(3) 随着黏聚力、埋深的增大, 开挖面极限支护压力比减小, 开挖面稳定性升高, 但变化趋势逐渐变缓, 呈抛物线形式。随着隧道直径、水位的增大, 开

挖面极限支护压力比增大, 开挖面稳定性降低, 但变化趋势逐渐变缓, 分别呈幂函数、抛物线形式。弹性模量对开挖面稳定性几乎没有影响。

本文研究结果可为高水压条件下泥水盾构隧道开挖面支护压力及盾构机推力的确定提供依据, 对于施工过程中保证开挖面稳定和控制地层变形具有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] ANAGNOSTOU G, KOVARI K. The face stability of slurry shield driving tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, **9**(2): 165 - 174.
- [2] ANAGNOSTOU G, KOVARI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, **11**(2): 166 - 173.
- [3] CHAMBON P, CONE J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **120**(7): 1148 - 1165.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 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): 2005 - 2009. (HUANG Zheng-rong, ZHU Wei, LIANG Jing-hua, et al. Study on limit supporting pressure and stabilization of excavation face for shallow shield tunnels in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(11): 2005 - 2009. (in Chinese))
- [6] 黄正荣, 朱 伟, 梁精华, 等. 盾构法隧道开挖面极限支护压力研究[J]. *土木工程学报*, 2006, **39**(10): 112 - 116. (HUANG Zheng-rong, ZHU Wei, LIANG Jing-hua, et al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(10): 112 - 116. (in Chinese))
- [7] 方 勇, 何 川. 土压平衡式盾构掘削面支护压力特性分析[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(11): 3528 - 3532. (FANG Yong, HE Chuan. Analysis of cutting face support pressure for earth pressure balance shield tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(11): 3528 - 3532. (in Chinese))
- [8] 魏 纲. 顶管工程土与结构的形状及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. (WEI Gang. Theoretical study on properties of soil and structure during pipe jacking construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)