

# 渗流条件下三维盾构隧道开挖面极限支护压力

吕玺琳<sup>1, 2</sup>, 李冯缔<sup>1, 2</sup>, 黄茂松<sup>1, 2</sup>, 焦齐柱<sup>3</sup>, 胡雯婷<sup>1, 2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 通过有限元数值模拟, 对水位变化条件下盾构隧道开挖面的孔压分布特性进行了研究, 并进一步分析了水位高度、隧道直径和隧道埋深对开挖面渗流力的影响, 结果表明开挖面平均渗流力与水位高度近似呈线性关系。基于梯形楔形体模型, 结合渗流数值模拟结果获得楔形体滑块边界上的平均渗流力, 建立了考虑渗流影响的隧道开挖面总极限支护压力计算公式。与不考虑渗流影响的支护压力对比表明, 总支护压力大部分用于平衡渗流力, 且总支护压力随水位高度近似呈线性增长。将建立的模型用于钱江隧道工程, 通过选取 5 个典型截面计算支护压力, 获得了钱江隧道极限支护压力的变化规律。

**关键词:** 盾构隧道; 开挖面稳定; 支护压力; 楔形体模型; 渗流

**中图分类号:** TU91      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)S1-0108-05

**作者简介:** 吕玺琳(1981-), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 从事岩土力学与工程方面研究。E-mail: xilinlu@tongji.edu.cn。

## 3D limit support pressure solution for shield tunnel face subjected to seepage

LÜ Xi-lin<sup>1, 2</sup>, LI Feng-di<sup>1, 2</sup>, HUANG Mao-song<sup>1, 2</sup>, JIAO Qi-zhu<sup>3</sup>, HU Wen-ting<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

**Abstract:** By adopting FE numerical simulation, the influence of water table line on the distribution of pore water pressure around the shield tunnel face is studied, and the influences of water table line, tunnel diameter, tunnel depth on the seepage force are obtained. The results show that the seepage force varies almost linearly with the water table line. By considering the average seepage force on the slide block, the face stability of shield tunnels is studied via trapezoidal wedge model, and a formula to calculate the limit support pressure under seepage condition is deduced. The seepage force shows great influence on the limit support pressure, and the total support pressure increases almost linearly with the water table line. The proposed model is used for the Qianjiang river shield tunnel project to calculate the limit support pressure of 5 selected typical sections, and the variation of support pressure is obtained.

**Key words:** shield tunnel; face stability; support pressure; wedge model; seepage

## 0 引言

盾构技术由于自动化程度高, 适应于复杂地层条件, 因而广泛用于软土地区中城市地铁及城际交通的建设。当盾构隧道穿越高渗透性砂层时, 地下水渗流常是影响隧道开挖面稳定的重要因素。在跨海、过江隧道工程中, 如何考虑高水压、潮汐水位变化等影响, 合理确定支护压力, 是确保工程建设安全的关键。

以往有关开挖面稳定性的研究大多基于二维简化分析进行<sup>[1]</sup>, 考虑到问题本身的三维性, 需从三维角度进行分析, 代表性的理论分析模型主要有楔形体模型等<sup>[2]</sup>。为分析渗流对开挖面稳定性的影响, 需在分析模型上考虑渗流的影响, 当前已开展过一些相关研

究。如 Anagnostou 等<sup>[3]</sup>基于楔形体模型研究了渗流对开挖面稳定性的影响。de Buhan 等<sup>[4]</sup>考虑渗流力对土压平衡盾构隧道开挖面进行了三维有限元数值模拟, 结果表明开挖面稳定系数主要取决于开挖面水平方向的渗透系数。Broere<sup>[5]</sup>考虑了泥水渗入地层的时间效应及地下水渗流产生的渗透力作用对开挖面稳定安全系数的影响。Schweiger 等<sup>[6]</sup>通过分析考虑渗流力影响的开挖面支护压力, 得出平衡渗流力是开挖面支护压力的重要组成部分。Lee 等<sup>[7]</sup>基于极限平衡、极限分析

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825803); 国家自然科学基金青年科学基金项目(50908171); 交通部科技项目(2009-353-333-340)  
收稿日期: 2013-03-03

上限法和有限元法计算了渗流条件下维持开挖面稳定的极限支护压力, 所得结果与 Schweiger 等的结论一致。高健等<sup>[8]</sup>采用数值模拟方法对渗流条件下的开挖面稳定性进行了研究, 也得出了与前述一致的结论。

以往研究隧道开挖引起的渗流对开挖面稳定性的影响时, 往往只关心渗流力大小而没有对其影响因素进行系统分析。此外, 目前仍缺乏临江潮汐引起的水位升降对开挖面稳定性的影响研究, 因而有必要针对跨江、海、河高水压环境及涌潮影响的开挖面稳定分析方法展开深入研究。

## 1 隧道开挖面渗流有限元数值模拟

由于难获得盾构隧道开挖引起的渗流场理论解, 一般采用有限元法进行数值模拟。分析网格如图 1 所示,  $C$  为隧道埋深,  $D$  为隧道直径,  $H$  为水位线至隧道顶的距离。为减少边界效应, 分析模型纵向长度取为  $10D$ , 横向取为  $6D$ , 深度方向取为  $8D$ 。土体天然重度为  $18 \text{ kN/m}^3$ , 饱和重度为  $23 \text{ kN/m}^3$ , 土体渗透系数为  $10^{-5} \text{ m/s}$ , 初始孔隙比为 1。除地表面为自由边界外, 其余边界均为固定位移边界, 假定隧道环形衬砌为不排水边界, 隧道前方开挖面为排水边界, 对隧道开挖面进行稳定渗流分析。

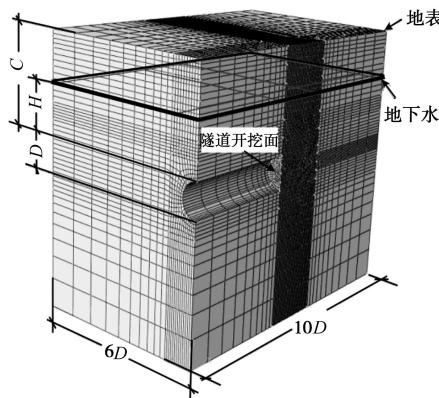


图 1 盾构隧道开挖面三维渗流数值分析模型

Fig. 1 Model of face stability analysis of shield tunnel under seepage condition

对不同水位高度 ( $H$ ) 下隧道开挖面进行渗流分析, 以获得孔隙水压力分布规律。计算模型隧道直径  $D=10 \text{ m}$ , 埋深  $C=30 \text{ m}$ , 水位高度  $H$  分别取 5, 10, 15, 20, 25 m, 且假设隧道开挖过程中地下水位不变。当  $H=25 \text{ m}$  时隧道开挖后的孔隙水压力分布如图 2 所示。对比自然状态下均匀层状分布的孔隙水压力, 隧道开挖面附近孔隙水压力等压线下凹现象明显, 表明隧道开挖后水头能量损失。随着水位线  $H$  的升高, 等压线下凹趋势越明显, 且影响范围也增大。为进一步分析, 获取孔压沿竖直方向、水平方向的变化如图 3

所示。

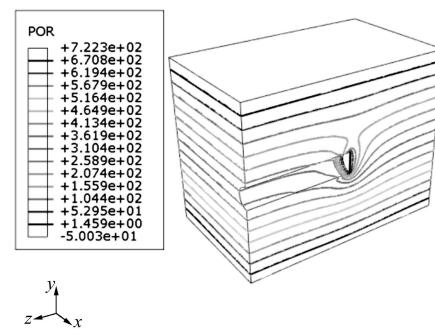


图 2 隧道开挖面孔隙水压力分布 ( $C=30 \text{ m}$ ,  $D=10 \text{ m}$ ,  $H=25 \text{ m}$ )

Fig. 2 Distribution of pore pressure after excavation ( $C=30 \text{ m}$ ,  $D=10 \text{ m}$ ,  $H=25 \text{ m}$ )

从图 3 (a) 中可看出, 当  $H=5 \text{ m}$  时, 最大孔压变化值为  $50 \text{ kPa}$ , 而  $H=25 \text{ m}$  时, 最大孔压变化值达到  $250 \text{ kPa}$ , 且在同一个位置, 孔压变化值随  $H$  升高而增大。从图 3 (b) 可看出, 水位高度  $H$  越大, 则需在距离隧道开挖面越远处孔压才能恢复到初始孔压, 因而隧道开挖对孔压分布影响范围越大。

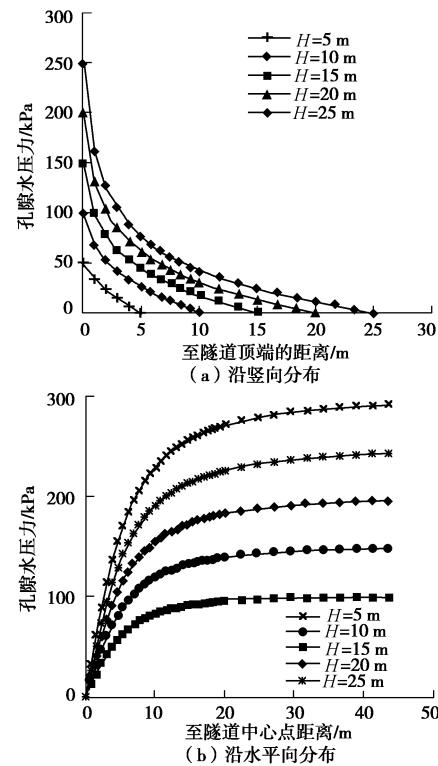


图 3 盾构隧道开挖面孔隙水压力分布特征 ( $C=30 \text{ m}$ ,  $D=10 \text{ m}$ )

Fig. 3 Distribution of pore pressure ( $C=30 \text{ m}$ ,  $D=10 \text{ m}$ )

## 2 渗流条件下开挖面极限支护压力

### 2.1 考虑渗流影响的梯形楔形体模型

对于渗流条件下开挖面支护压力, 这里通过土骨

架上的有效力、土体饱和重力及滑动边界上的孔隙水压力进行分析<sup>[9]</sup>，如图 4 所示。通过数值模拟得到开挖面处、滑动块顶面  $S_1$  及斜面  $S_2$  上孔隙水压力  $p$ ，并进行面积分，并视开挖面上孔压为 0，得到  $F_{S_1}$  和  $F_{S_2}$  为

$$\left. \begin{aligned} F_{S_1}(\alpha) &= \int_{S_1} p \cdot ds, \\ F_{S_2}(\alpha) &= \int_{S_2} p \cdot ds. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

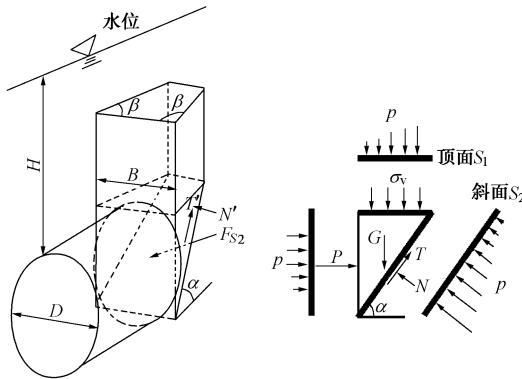


图 4 渗流条件下三维梯形楔形体极限平衡模型示意图

Fig. 4 Trapezoidal wedge limit equilibrium model under seepage condition

根据梯形楔形体滑动块受力分析<sup>[10]</sup>，滑动块水平方向及竖直方向的受力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} P_w &= N \sin \alpha - T \cos \alpha - 2T' \cos \alpha \sin \beta + F_{S_2} \sin \alpha, \\ P_v + G + F_{S_1} &= N \cos \alpha + T \sin \alpha + 2T' \sin \alpha \sin \beta, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， $P_w$  为考虑渗流的开挖面支护力， $P_v$  为松动土压力， $G$  为土体重力， $N$ 、 $T$  分别为滑动面上的法向作用力和摩阻力， $T'$  为楔形滑块侧面上的摩阻力。

得到考虑渗流的开挖面支护压力解  $\sigma_{tw}$ ：

$$\begin{aligned} \sigma_{tw} &= \frac{\varepsilon}{\tan \alpha} \left( \sigma_v + \frac{B\gamma_{sat}}{2} \right) \left( 1 - \frac{1}{\tan \alpha \tan \beta} \right) + \frac{\varepsilon B\gamma_{sat}}{6 \tan^2 \alpha \tan \beta} - \\ & c' \left( \varepsilon + \frac{1}{\tan \alpha} \right) \left( 1 - \frac{1}{\tan \alpha \tan \beta} \right) \frac{\cos \alpha + \varepsilon \sin \alpha}{\tan \alpha} - \\ & \left[ c' + K_0 \left( \sigma_v + \frac{B\gamma_{sat}}{3} \right) \tan \varphi' \right] + (\varepsilon F_{S_1} + F_{S_2} \sin \alpha) / B^2, \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $B = D \cdot \sqrt{\pi} / 2$ ， $\alpha$  为滑动块倾角， $\beta$  为梯形的底角，取为  $50^\circ$ ， $\sigma_v$  为用太沙基公式求得的上部土压力， $\gamma_{sat}$  为土体重度， $c'$  为有效土体黏聚力， $\varphi'$  为有效土体内摩擦角， $K_0$  为静止土压力系数，取为  $1 - \sin \varphi'$ ，计算因子  $\varepsilon = \tan(\alpha - \varphi')$ 。

与不考虑渗流影响的支护压力对比，增加了一项  $(\varepsilon F_{S_1} + F_{S_2} \sin \alpha) / B^2$ ，令开挖面上平均渗流力

$$F_w = (\varepsilon F_{S_1} + F_{S_2} \sin \alpha) / B^2. \quad (4)$$

## 2.2 渗流力影响因素分析

为分析  $F_w$  的影响因素，假设隧道直径  $D=10\text{ m}$ ，上覆土层  $C$  分别取  $10, 20, 30\text{ m}$ ，即埋深比  $C/D=1,$

$2, 3$  进行分析。通过有限元数值模拟，得到这 3 种情形开挖面平均渗流力  $F_w$  随水位高度变化如图 5 所示。

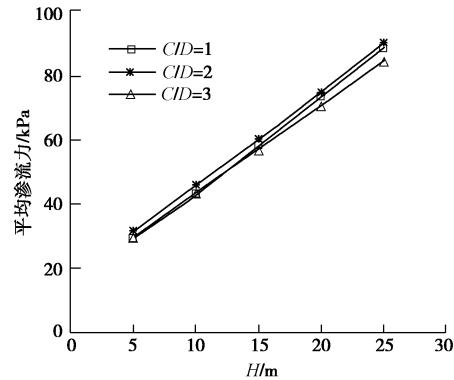


图 5 平均渗流力与水位高度的关系 ( $D=10\text{ m}$ )

Fig. 5 Relationship between average seepage force and water table line ( $D=10\text{ m}$ )

从图 5 中可看出，开挖面上平均渗流力大小随水位高度  $H$  增长呈线性变化。同时，在同一水位高度下，隧道埋深比对计算结果影响不大。进一步在同一隧道埋深 ( $C=10\text{ m}$ )，不同隧道直径 ( $D=5\text{ m}$ 、 $D=10\text{ m}$ 、 $D=15\text{ m}$ ) 条件下进行渗流分析，水位高度  $H$  由  $5, 10, 15, 20, 25\text{ m}$  依次变化。计算得到的平均渗流力  $F_w$  如图 6 所示，不同埋深隧道的平均渗流力随水位高度  $H$  均呈线性增长，且斜率大致相同。但在同一埋深、同一水位下，直径大的隧道平均渗流力较大。

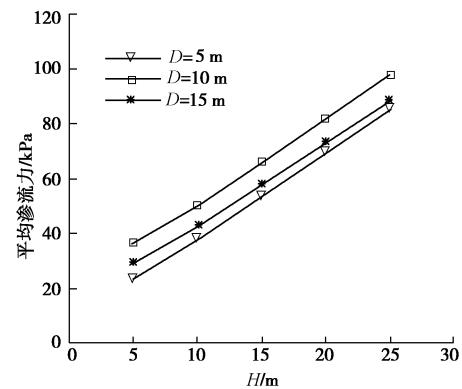


图 6 平均渗流力与水位高度的关系 ( $C=10\text{ m}$ )

Fig. 6 Relationship between average seepage force and ground water table ( $C=10\text{ m}$ )

将水位线设在地表，隧道直径  $D$  设为  $10\text{ m}$ ，埋深  $C$  按  $10, 15, 20, 25, 30\text{ m}$  依次逐渐变化。求解得出各组埋深下的开挖面平均渗流力  $F_{w1}, F_{w2}, F_{w3}, F_{w4}, F_{w5}$  如图 7 所示。结果表明，实际工程中，若在水位不变条件下开挖，作用在开挖面上的平均渗流力随隧道埋深呈线性增加。

从上述分析可看出，平均渗流力  $F_w$  与水头高度大致呈线性变化，在土性单一的砂质土盾构隧道工程中，可根据隧道中心点的静水压力大致估算作用在开挖面上的平均渗流力大小。

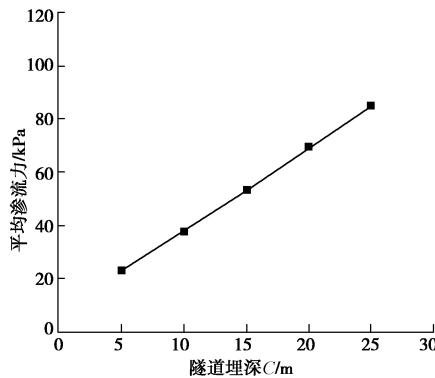
图 7 渗流力随隧道埋深的变化 ( $D=10$  m, 水位线位于地表)

Fig. 7 Relationship between seepage force and tunnel depth ( $D=10$  m, water table on ground surface)

### 2.3 开挖面总支护压力

接下来计算开挖面总支护压力, 计算模型如图 4 所示, 土体材料参数与第 1 节相同, 隧道直径  $D=10$  m、埋深  $C=20$  m。当不考虑渗流时, 按式 (3) 求得不考虑渗流的开挖面支护压力为 31.79 kPa。各水位条件下维持隧道开挖面稳定所需总支护压力如图 8 所示, 渗流条件下维持隧道开挖面稳定所需的总支护压力随水位高度成倍增长。当水位高度  $H=5$  m 时, 总支护压力为不考虑渗流时的 2 倍, 而当  $H=25$  m, 总支护压力为不考虑渗流时的 4 倍。因而在高水压地层条件下, 渗流力是影响开挖面稳定性的关键。

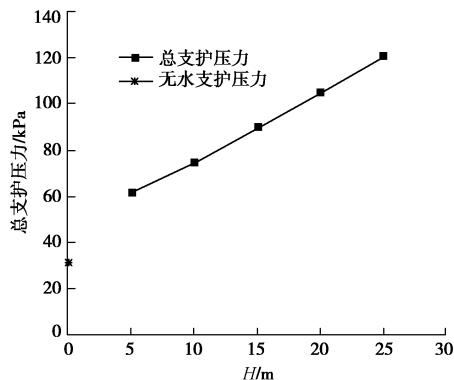


图 8 总支护压力随水头高度的变化

Fig. 8 Variation of total support pressure with water head

## 3 工程实例分析

钱江隧道工程位于海宁盐官镇上游 2.5 km, 北岸位于嘉兴海宁市辖地, 南岸位于杭州市萧山区辖地, 隧道与钱塘江河道呈垂直相交, 江中段长达 3.2 km, 隧址地层情况复杂, 尤其是穿越粉砂层时, 在高水压力下盾构掘进过程中易于引起渗流。此外, 钱塘江水位受潮汐影响, 变化幅度大, 施工期将跨越涌潮期, 因而计算支护压力时需考虑涌潮影响。钱塘江历年最高潮位 7.75 m, 历年最低潮位为 -2.34 m, 多年平均高潮位 3.87 m, 多年平均低潮位 0.67 m, 多年平均潮差 3.20 m, 历年最大潮差 7.26 m。根据钱江隧道地层分

布情况, 从南到北选取 5 个典型截面计算极限支护压力, 如图 9 所示, 土层参数情况见文献[11]。

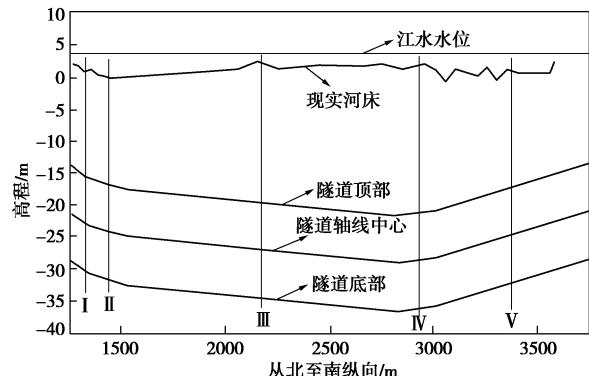


图 9 隧道越江河床截面图

Fig. 9 Section of river bed and cross-river tunnel

根据钱江水位情况, 取隧道常水位为 2 m, 分别取水位高度为 3.2, 4.7, 6.3, 7.26 m 分析涌潮高度的影响。通过有限元数值模拟, 获得楔形体滑块顶面及滑动面上的孔隙水压力, 并根据式 (4) 计算得到 5 个截面在各水位下平均渗流力  $F_{s_1}$  和  $F_{s_2}$ , 如图 10 所示, 埋深最大处截面 4 (23.145 m) 的平均渗流力最大, 埋深最小处截面 1 (16.235 m) 的平均渗流力最小。

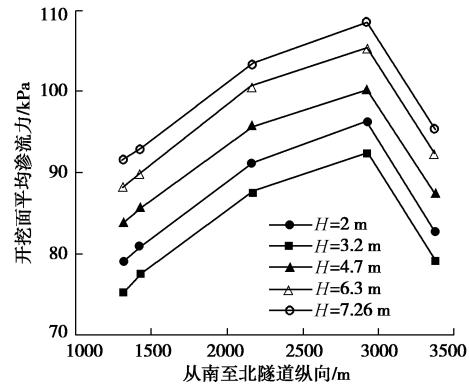


图 10 不同水位下开挖面的平均渗流力

Fig. 10 Seepage force under different water table lines

进一步计算得到钱江隧道 5 个截面上考虑涌潮影响的开挖面总支护压力如图 11 所示。开挖面总支护压力随水位变化近似呈线性增长。

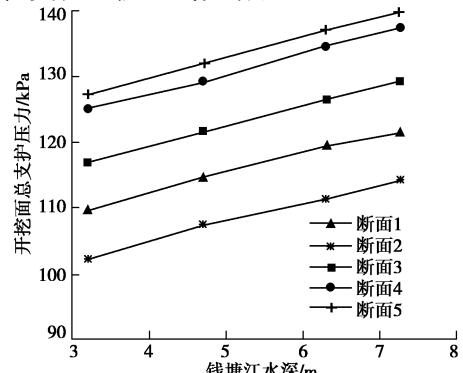


图 11 涌潮条件下开挖面稳定极限支护压力

Fig. 11 Limit support pressure under tidal condition

在涌潮最高水位 7.26 m 作用下和常水位情况下的隧道开挖面极限支护压力对比如图 12 所示。涌潮情况下 5 个截面上维持开挖面稳定所需的支护压力均增大, 土层最软弱的截面 5 上所需的支护压力最大, 埋深最深的截面 4 的支护压力次之, 最小为截面 2。

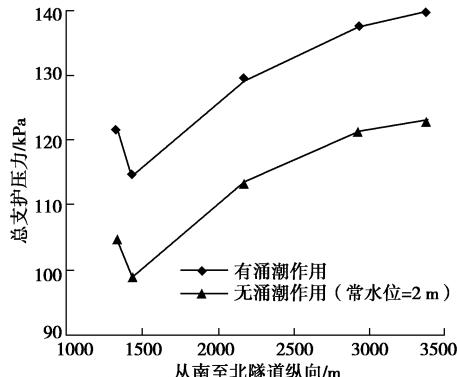


图 12 涌潮前后开挖面总支护压力对比

Fig. 12 Comparison of limit support pressures before and after tides

## 4 结语

采用有限元数值模拟, 获得了隧道开挖面孔隙水压力分布规律, 结合楔形体模型, 获得了开挖面滑动面上平均渗流力, 并得出维持开挖面稳定的极限支护压力计算公式。通过分析不同水位条件下盾构隧道开挖面渗流力的变化, 获得了极限支护压力随水位高度的变化规律。分析结果表明, 平衡渗流力部分的支护压力占总支护压力主要部分, 且平均渗流力和总支护压力随水位高度近似呈线性关系。将建立的计算模型用于钱江隧道工程分析, 结果表明涌潮导致水位提高将明显增大极限支护压力值, 因而在施工中应相应加大支护压力以维持开挖面的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 吕玺琳, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定性极限理论分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 57 - 62. (LÜ Xi-lin, WANG Hao-ran, HUNAG Mao-song. Study on the face stability of shield tunnel in limit theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 57 - 62. (in Chinese))
- [2] 吕玺琳, 李冯缔, 黄茂松, 等. 三维盾构隧道开挖面极限支护压力数值及理论解[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1469 - 1473. (LU Xi-lin, LI Feng-di, HUANG Mao-song, et al. Three-dimensional numerical and analytical solutions of limit support pressure at shield tunnel face[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(10): 1469 - 1473. (in Chinese))
- [3] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 165 - 173.
- [4] DE Buhan P, CUVILLIER A, DORMIEUX L, et al. Face stability of shallow circular tunnels driven under the water table: a numerical analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(1): 79 - 95.
- [5] BROERE W, VAN TOI A. Influence of infiltration and groundwater flow on tunnel face stability[C]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Tokyo, 2000: 339 - 344.
- [6] SCHWEIGER H F, POTTLER R K, Steiner H. Effect of seepage forces on the shotcrete lining of a large undersea cavern[C]// Int Conf Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1991: 1503 - 1508.
- [7] LEE I M, NAM S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 31 - 40.
- [8] 高 健, 张义同, 乔金丽. 渗透力对隧道开挖面稳定性影响分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1547 - 1553. (GAO Jian, ZHANG Yi-tong, QIAO Jin-li. Face stability analysis of tunnels with consideration of seepage force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1547 - 1553 (in Chinese))
- [9] 陈祖煜. 关于“渗流作用下土坡圆弧滑动有限元计算”的讨论之一[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 394 - 396. (CHEN Zu-yu. Comments on “Finite element calculation on circular slip of earth slope under seepage action” [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 394 - 396 (in Chinese))
- [10] 胡雯婷, 吕玺琳, 黄茂松. 盾构隧道开挖面极限支护压力三维极限平衡解[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 853 - 856. (HU Wen-ting, LÜ Xi-lin, HUANG Mao-song. Three-dimensional limit equilibrium solution of the support pressure on the shield tunnel face[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(5): 853 - 856. (in Chinese))
- [11] 胡雯婷. 考虑渗流的盾构隧道开挖面三维稳定分析[D]. 上海: 同济大学, 2012. (HU Weng-ting. Three dimentional stability analysis of shield tunnel excavation face with the consideration of seepage[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))