

# 局部破碎带渗水条件下海底隧道稳定性的有限元 极限分析

王在泉<sup>1</sup>, 王建新<sup>2</sup>, 郑颖人<sup>3</sup>, 张黎明<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266033; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084;  
3. 解放军后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041)

**摘要:** 以存在局部破碎带的青黄海底公路岩质隧道为例, 考虑到海水的渗透性, 采用有限元极限分析法分析海底隧道岩体注浆加固前、后的稳定性。计算结果表明, 隧道整体是安全的, 此种情况下, 隧道衬砌原则上可按无水压设计, 衬砌厚度与采用全水头设计相比可以大大降低。但当存在局部破碎带时, 隧道安全系数降低, 破碎带越宽, 注浆堵水圈厚度越小, 安全系数越小。与完整围岩破裂面位于两侧相比, 含倾角 45° 破碎带围岩的稳定性最差。因此, 必须做好破碎带的超前注浆堵水加固, 以减少其渗水量, 并对破碎带进行局部加固, 此种情况下, 隧道衬砌原则上可按有水压设计。

**关键词:** 隧道工程; 有限元极限分析; 海底隧道; 稳定性; 破碎带

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 3751 - 05

## LIMIT ANALYSIS OF SUBSEA TUNNEL STABILITY BY FINITE ELEMENT METHOD IN FAULT-RUPTURE ZONE WITH WATER PENETRATION

WANG Zaiquan<sup>1</sup>, WANG Jianxin<sup>2</sup>, ZHENG Yingren<sup>3</sup>, ZHANG Liming<sup>1</sup>

(1. School of Science, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266033, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Architecture Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

**Abstract:** Considering the sea water seepage, limit analysis by finite element method is used to study the stability of a subsea tunnel in which the fracture zone exists. Result shows that the tunnel is safe for the intact surrounding rock. Under the condition, the lining of the subsea tunnel can be designed without water pressure; and the lining thickness can be reduced remarkably. The calculation results show that the fault-rupture zone decreases the stability of tunnel obviously. The wider the fracture zone is, the smaller the safety factor is. The thicker the rock grouting ring is, the larger the safety factor is. Slip surface of intact surrounding rock appears at both sides of tunnel; and the stability of rock mass in fracture zone with angle of 45° is the most unfavorable. So the pregrouting treatment is necessary in order to cut down the seepage water. Under this condition, the tunnel lining can be designed according to principle with water pressure.

**Key words:** tunneling engineering; limit analysis by finite element method; subsea tunnel; stability; fracture zone

**收稿日期:** 2007 - 06 - 12; **修回日期:** 2007 - 07 - 30

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50674059); 山东省自然科学基金资助项目(Y2005A03)

**作者简介:** 王在泉(1964 -), 男, 博士, 1985 年毕业于山东冶金学院矿山工程系采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: zqwang4521@163.com

## 1 引言

目前,世界上已建成很多条海峡海底隧道,还有很多正在筹备中。泰晤士河底隧道是最早的水下隧道,修建于1825~1843年;日本关门隧道(1944年底修建)是世界上最早的海峡隧道。目前比较著名的还有日本青函隧道、英法海峡隧道、丹麦大海峡隧道、日本东京湾渡海公路隧道等。日韩海底隧道、直布罗陀海峡海底隧道、意大利墨西拿海峡海底隧道等也正在修建或规划中<sup>[1, 2]</sup>。我国穿江(湖、河)的水下交通隧道已有很多成功的工程范例,但海底隧道不同于一般的穿江隧道,有其自身的特殊性,许多设计和施工中的问题都需要进一步解决和完善。继我国第一条海底隧道——厦门海底隧道正式施工后,青岛的青黄海底公路隧道也已开工建设。本文以该海底隧道为研究背景,在考虑海水沿隧道上覆岩层破碎带加固后渗流不大的情况下,采用有限元极限分析法对海底隧道的整体稳定性和具有局部破碎带的隧道稳定性进行了分析。研究隧道全长6.17 km,设计为双洞双向六车道,海水最大深度40 m左右。初步地质勘测显示,大部分围岩情况良好,多为微风化花岗岩和火成岩,无大的断层和软弱结构面通过,岩体完整性好,地质条件良好。但是隧道通过线路内局部存在断层破碎带,需要在设计、施工中重点考虑,但是不良地段不长,不足100 m。

## 2 海水压力在海底隧道设计中的考虑

对海底隧道而言,围岩渗水对海底隧道的最大危害就是造成突发的顶板透水以及随之而来的顶板塌落事故,如挪威Oslofjord海底隧道。所以在对海底隧道通过线路地质条件勘测准确以后,如何确定作用在隧道围岩上的海水压力,是海底隧道设计、施工中需要重点考虑的问题。

海底隧道设计中,作用在隧道衬砌上的水压力究竟该取多大,工程界的意见尚不统一<sup>[3~7]</sup>。笔者认为,隧道衬砌设计中考虑全水头水压力的情况基本上有2种:(1)土质隧道以及上覆岩层较为破碎且渗透性较强的隧道,隧道衬砌周边很快达到全水头;(2)采用盾构法施工的隧道,施工工艺要求隧道设计为不排水。第2种情况下,即使隧道围岩完整性较好,隧道修建初期,虽然地下水沿裂隙渗入水量很少,但经过若干年以后,作用在隧道衬砌的

外水压力也会达到全水头压力,这种状况已被重庆市某长江水下隧道的试验所证实,也就是说,假如隧道设计为不排水,那么衬砌上必须考虑全水头压力。

显然,如果隧道上覆岩层完整性非常好,渗透性不大,围岩内裂隙分布范围很小,海水只是沿围岩裂隙少量流出,按挪威海底隧道规范,允许渗流量为300 L/(km·min)。这种情况下,没有必要进行堵水,隧道的整体稳定性问题不大,计算分析可以忽略水压力的作用,在此地段围岩构筑薄型衬砌就可满足隧道稳定性要求,甚至只进行混凝土喷面就可以保持隧道稳定,在这方面挪威的经验值得借鉴。

事实上,国内外许多工程实例表明,水底隧道开挖后,可采用“排堵结合”的措施来降低水的渗流,漏水是必然的、正常的,没有必要完全堵水,适量的排水对隧道衬砌有卸压的作用,有利于隧道稳定,所以隧道构筑衬砌时都会做相应的排水措施。

如果海底隧道整体地质条件良好,岩体内渗流作用非常小,少量渗入隧道的水,可采用排水沟排出,所以设计中没有必要考虑水头压力,可以采用较薄的衬砌。在不良地段区域内,海水渗流主要通过局部破碎带、断层及部分裂隙侵入隧道,因而必须对破碎带进行注浆堵水,降低渗水,加固围岩,而且在不良地段内适当加厚衬砌(考虑水压力影响),并增设钢拱架或长锚索等设施<sup>[8~12]</sup>。

## 3 海底隧道强度折减稳定性分析

### 3.1 强度折减理论及安全系数的转换

传统的边坡稳定极限平衡方法采用莫尔-库仑屈服准则,根据力的平衡来计算安全系数。安全系数定义为沿滑面的抗剪强度与滑面上实际剪力的比值,用公式表示如下:

$$w = \frac{s}{\tau} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

式中:  $w$ ,  $s$ ,  $\tau$  分别为传统的安全系数、滑面的抗剪强度和滑面上的实际剪应力;  $c$ ,  $\varphi$  分别为岩体的黏聚力和内摩擦角。

将式(1)两边同除以  $w$ , 则式(1)变为

$$1 = \frac{\int_0^l \left( \frac{c}{w} + \sigma \frac{\tan \varphi}{w} \right) dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c' + \sigma \tan \varphi') dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

其中,

$$c' = \frac{c}{w}, \quad \varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{w}\right)$$

由此可见, 传统的极限平衡方法是将土体的抗剪强度指标  $c$  和  $\tan \varphi$  分别减少为  $c/w$  和  $\tan \varphi/w$ , 使岩土体达到极限稳定状态, 此时的  $w$  即为安全系数。有限元强度折减法通常采用下式定义安全系数:

$$F = \frac{\alpha}{w_1} I_1 + \sqrt{J_2} = \frac{k}{w_1} \quad (3)$$

本文采用莫尔 - 库仑等面积圆屈服准则代替传统莫尔 - 库仑准则, 其面积等于不等角六边形莫尔 - 库仑屈服准则, 按此准则计算的塑性区能比较准确地反映围岩实际塑性区的大小, 其系数  $\alpha, k$  可分别按如下公式计算:

$$\alpha = \frac{2\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \varphi)}}, \quad k = \frac{6\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3}\pi(9 - \sin^2 \varphi)}} \quad (4)$$

### 3.2 计算模型及计算参数的确定

假设隧道开挖后, 对局部破碎带涌水处进行及时的封堵, 渗入的海水在破碎带内以静水状态存在, 并认为堵水圈基本不渗水, 因此计算中将隧道围岩破碎带内海水以静水压力直接作用在围岩注浆圈上。海水的自重以均布荷载形式加在模型顶部, 计算时作用在堵水圈上的静水压力取全水头(即 65 m)。有限元计算采用莫尔 - 库仑等面积圆屈服准则, 应用挪威方法最终确定海底隧道的上覆岩层厚 25 m, 双洞间距 1.5  $d$ ( $d$  为椭圆形断面宽度)。计算范围侧面取 4 倍隧道宽度, 下面取 4 倍隧道高度。计算假设围岩破碎带与海底平面成  $45^\circ$  和  $90^\circ$  两种倾角。图 1 为破碎带与海底平面成  $45^\circ$  倾角的计算示意图, 岩体力学参数见表 1。因勘测报告提供的是岩块强度, 参考有关资料, 计算时实际岩体强度大约为岩块强度的 1/6。

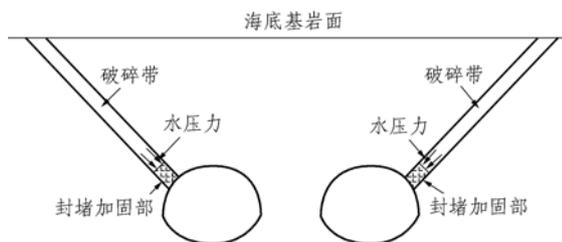


图 1 倾角  $45^\circ$  破碎带注浆封堵后计算示意图

Fig.1 Sketch of fracture zone with dip angle of  $45^\circ$  after grouting blockage

### 3.3 计算结果分析

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

岩体	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
围岩	25	0.25	3.00	40	26
破碎带	1	0.35	0.15	25	22
注浆圈	4	0.30	0.60	30	24

极限分析有限元法通过对岩土体强度参数的折减, 使岩土体处于极限状态, 从而使岩土体显示潜在的破坏面, 并求得安全系数。本文作者经过数值计算等研究<sup>[13, 14]</sup>得出, 隧道处于极限状态时围岩发生塑性应变突变时的情况就是围岩发生流动破坏的情况, 此时, 恰好计算不收敛, 因而可依据塑性应变和位移突变来确定潜在破坏面及对应的安全系数。利用强度折减有限元法求得安全系数与潜在滑动面, 不仅可以评价隧道的稳定性和设计的合理性, 还可以对支护参数和施工工艺提出改进建议。

在完整岩体/破碎带宽度分别为 1, 2 m, 注浆封堵圈厚度为 3, 5 m 条件下, 隧道的安全系数见表 2。计算结果表明, 隧道线路通过的区域内, 由于围岩的条件不同, 安全系数也有较大变化, 完整围岩的安全系数是 5.21, 最低的安全系数是模型 2, 即含 2 m 宽  $45^\circ$  破碎带且无堵水条件下, 安全系数仅为 1.94, 小于要求的安全系数。模型 3 的安全系数虽然大于安全系数, 但它仍需要保持破碎带的稳定, 保证破碎带不塌落, 对具有较大破碎带的地段进行局部加固或整体加固。

表 2 计算模型及安全系数

Table 2 Calculation models and factors of safety

模型编号	围岩状况	安全系数
1	完整围岩	5.21
2	围岩含 2 m 宽 $45^\circ$ 破碎带, 无堵水情况	1.94
3	围岩含 2 m 宽 $90^\circ$ 破碎带, 无堵水情况	2.20
4	围岩含 1 m 宽 $45^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 3 m	2.54
5	围岩含 1 m 宽 $45^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 5 m	2.90
6	围岩含 2 m 宽 $45^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 3 m	2.25
7	围岩含 2 m 宽 $45^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 5 m	2.57
8	围岩含 1 m 宽 $90^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 3 m	2.53
9	围岩含 1 m 宽 $90^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 5 m	2.61
10	围岩含 2 m 宽 $90^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 3 m	2.48
11	围岩含 2 m 宽 $90^\circ$ 破碎带, 注浆封堵厚度为 5 m	2.55

表 2 计算结果表明, 隧道上覆岩层破碎带的存

在大大降低了隧道的整体稳定性，应该做好超前堵水加固。破碎带的宽度越大，安全系数越小；堵水圈的厚度越大，安全系数越大。

不同厚度的注浆堵水圈及含不同宽度的 45°破碎带隧道围岩塑性区(见图 2)分布表明：破坏条件下塑性区主要集中在破碎带内堵水部分。含 2 m 宽破碎带的隧道安全系数较含 1 m 宽破碎带的小，塑性

区分布范围也小，但是区别不大；含 3 m 宽有堵水措施的隧道安全系数较 5 m 宽的小，塑性区分布范围也小；同样含 45°破碎带有堵水措施的隧道安全系数较无堵水措施安全系数大，塑性区分布范围也大。

与完整围岩破裂面存在于两侧相比，含有破碎带的隧道围岩破裂面位于破碎带底端承受静水压力处，水压力的存在使围岩的破裂面最先发生在水压力作用处围岩破碎带范围内。由此可见，在水压力作用下，破碎带堵水部分最先失稳，如果塌落涌水，会造成海底隧道施工过程中的重大灾难。因而设计中除确保围岩与衬砌整体安全外，还要确保破碎带下衬砌局部安全<sup>[15]</sup>。

### 4 水压力作用下隧道衬砌计算分析

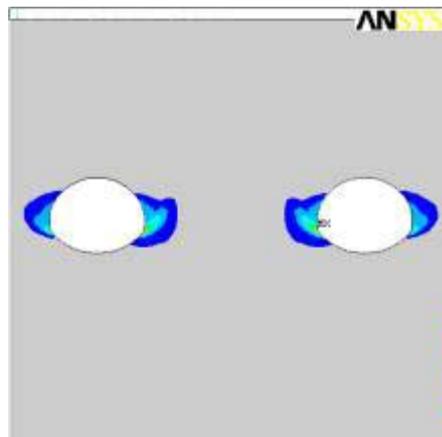
根据“荷载 - 结构法”，采用有限元法计算得出了衬砌的内力分布。作用在衬砌结构上的荷载主要为衬砌外水压力，大小取全水头压力 0.65 MPa；衬砌外表面用弹性约束来近似模拟围岩和衬砌的相互作用，弹性抗力的大小与衬砌的变形位移成正比，比例系数为弹性常数。有限元计算时，衬砌结构采用梁单元，围岩弹性抗力用弹性单元模拟。衬砌的材料参数如下：弹性模量  $E = 28 \text{ GPa}$ ，泊松比  $\nu = 0.17$ ，重度  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ 。

根据《公路隧道设计规范》(JTG D70 - 2004)结构计算规定，验算了 3 种不同厚度海底隧道衬砌结构在不排水条件下，承受围岩弹性抗力和外水压力两种荷载共同作用时的强度和安全系数。计算结果表明，当厚度  $h = 0.8 \text{ m}$  时，衬砌结构的安全系数为 2.38，稍低于规范要求，厚度  $h = 1.0, 1.2 \text{ m}$  时结构都有较高的安全系数。通过对比衬砌结构厚度可知，选取 1.0 m 就能满足强度要求。显然，它比不考虑水压的衬砌厚度增大很多；如果海底隧道全部按全水压设计，再考虑地层压力，衬砌厚度会很大。

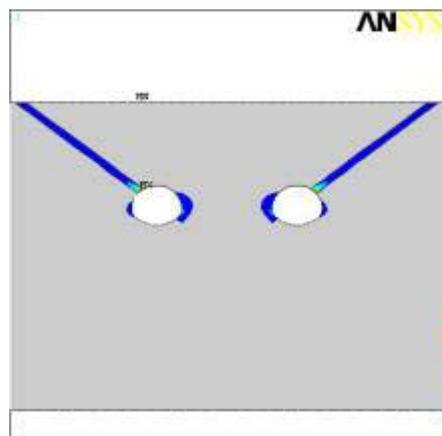
内力计算表明，外水压力作用下，衬砌拱角有较大的应力集中，最大正弯距  $M_a$  和最大轴力  $N$  均出现在拱角处，最大负弯距  $M_b$  出现在拱底处，隧道衬砌结构最不利位置为拱角，拱底次之，由此也可以看出椭圆形衬砌结构拱顶可以承受较大的静水压力。

### 5 结 论

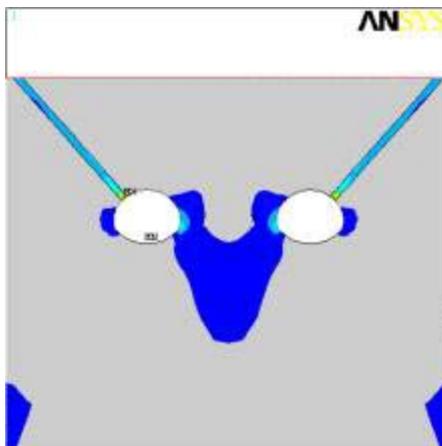
(1) 对岩石海底隧道而言，在岩性较好地段，可以不考虑水压力进行设计施工；在局部不良地段



(a) 完整条件下塑性区



(b) 围岩含 45°破碎带情况下塑性区



(c) 围岩含 45°破碎带且注浆堵水后塑性区

图 2 围岩塑性区分布

Fig.2 Distribution of plastic zone in surrounding rock

存在较大破碎带的情况下, 要对围岩进行超前注浆堵水, 并且设计排水措施, 在此条件下也可以不考虑水压力或只考虑部分水压力。按全水压力设计, 虽然偏于安全, 但势必会增加衬砌厚度, 成本增加。

(2) 计算结果表明, 所研究的海底隧道的整体安全系数较大, 隧道整体是安全的。但是对于局部破碎带而言, 隧道上覆岩层破碎带的存在大大降低了隧道的整体稳定性。在倾角一定的情况下, 破碎带的宽度越大, 上覆岩层的完整性就越差, 安全系数越小, 堵水圈的厚度越大, 安全系数越大。

(3) 与完整围岩破裂面存在于两侧相比, 含有  $45^\circ$  破碎带的隧道围岩破裂面位于破碎带底端承受静水压力处, 可见水压力的存在使围岩的破裂面最先发生在水压力作用处, 破碎带堵水部分最先失稳。与围岩含倾角  $45^\circ$  的破碎带比较, 围岩含倾角  $90^\circ$  的破碎带堵水部分较之  $45^\circ$  破碎带隧道更安全。

### 参考文献(References):

- [1] DAHLO T S, NILSEN B. Stability and rock cover of hard rock subsea tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 151 - 158.
- [2] EISENSTEIN Z D. Large undersea tunnels and the progress of tunneling technology[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 19(3): 283 - 292.
- [3] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 97 - 101, 106.(ZHANG Liming, ZHENG Yingren, WANG Zaiquan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 97 - 101, 106.(in Chinese))
- [4] 李廷春, 李术才, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 397 - 401.(LI Tingchun, LI Shucai, CHEN Weizhong, et al. Coupled fluid-mechanical analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 397 - 401.(in Chinese))
- [5] 李术才, 李廷春, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道最小顶板厚度三维弹塑性断裂损伤研究[J]. 岩石力学工程学报, 2004, 23(18): 3138 - 3143.(LI Shucai, LI Tingchun, CHEN Weizhong, et al. Application of 3D elastoplastic fracture damage model to determination of minimum roof thickness of Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3138 - 3143.(in Chinese))
- [6] 张胜军, 孙云志, 蒋小娟, 等. 厦门海底隧道工程岩体渗透稳定性试验研究[J]. 人民长江, 2005, 36(3): 22 - 23.(ZHANG Shengjun, SUN Yunzhi, JIANG Xiaojuan, et al. Test and study on the rock mass seepage stability of east-route sea bottom tunnel works in Xiamen city[J]. Yangtze River, 2005, 36(3): 22 - 23.(in Chinese))
- [7] 吕明, GRØVE, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学工程学报, 2005, 24(23): 4219 - 4225.(LU Ming, GRØVE, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4219 - 4225.(in Chinese))
- [8] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1651 - 1655.(LIU Caihua, CHEN Congxin, FU Shaolan. Study on seepage characteristics of a single rock fracture under shear stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1651 - 1655.(in Chinese))
- [9] 陈卫忠, 杨建平, 杨家岭, 等. 裂隙岩体应力渗流耦合模型在压力隧洞工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2384 - 2391.(CHEN Weizhong, YANG Jianping, YANG Jialing, et al. Hydromechanical coupled model of jointed rock mass and its application to pressure tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2384 - 2391.(in Chinese))
- [10] 张金才, 王建学. 岩体应力与渗流耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1981 - 1989.(ZHANG Jincai, WANG Jianxue. Coupled behavior of stress and permeability and its engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1981 - 1989.(in Chinese))
- [11] 王明洋, 宋华, 郑大亮, 等. 深部巷道围岩的分区破裂机制及“深部”界定探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1771 - 1776.(WANG Mingyang, SONG Hua, ZHENG Daliang, et al. On mechanism of zonal disintegration within rock mass around deep tunnel and definition of “deep rock engineering” [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1771 - 1776.(in Chinese))
- [12] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的高榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1513 - 1521.(SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1513 - 1521.(in Chinese))
- [13] 郑颖人, 赵尚毅, 孔位学, 等. 极限分析有限元讲座——I 岩土工程极限分析有限元法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 163 - 168.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, KONG Weixue, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 163 - 168.(in Chinese))
- [14] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91 - 98, 104.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 91 - 98, 104.(in Chinese))
- [15] 张明聚, 郜新军, 郭衍敬. 海底隧道突水分析及其在翔安隧道中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(3): 273 - 277.(ZHANG Mingju, GAO Xinjun, GUO Yanjing. Analysis of water inrush in undersea tunnel and its application in Xiang'an tunnel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(3): 273 - 277.(in Chinese))