

重庆市朝天门两江隧道越江段盾构法 合理覆盖层厚度研究

蒋树屏¹, 刘元雪^{1,2}, 谢锋³, 王培勇²

(1. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067; 2. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041;
3. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要: 江底隧道的覆盖层厚度十分重要。一方面, 如果覆盖层厚度太小, 江底隧道工作面就有面临严重的失稳问题和江水涌入的危险, 会使辅助工法的投入增大。另一方面, 覆盖层厚度太大将增加江底隧道的长度、坡度与造价。首先将重庆朝天门两江隧道与国内外一些知名海底隧道进行比较, 得出其在盾构施工方法下的覆盖层厚度建议。然后根据公路隧道施工技术规范, 提出标准隧道新概念。结合重庆朝天门两江隧道的工程实际情况, 分别比较在不同覆盖厚度下朝天门两江隧道与标准隧道拱顶位移和主拉应力, 最后得出该隧道的合理覆盖层厚度。

关键词: 隧道工程; 水下隧道; 覆盖层厚度; 工程类比法; 数值模拟

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)06 - 1188 - 06

STUDY ON REASONABLE COVER THICKNESS FOR SUBMARINE TUNNEL OF CHAOTIANMEN IN CHONGQING BY SHIELD CONSTRUCTION

JIANG Shuping¹, LIU Yuanxue^{1,2}, XIE Feng³, WANG Peiyong²

(1. *Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, China;*

2. Department of Architecture and Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The determination of the cover thickness of the submarine tunnel is very important, because it will be very dangerous if the cover thickness is too small, whereas the length, slope gradient and cost will be increased after a larger cover thickness is chosen. At first, the reasonable cover thickness for submarine tunnel of Chaotianmen in Chongqing is proposed by comparing this tunnel with some domestic and foreign well-known submarine tunnels. According to the Technical Specification for Construction of Highway Tunnel, a new concept of standard tunnel is put forward. Based on the actual situation of Chongqing Chaotianmen tunnel, by comparing the crown displacement and the principal tensile stress of standard tunnel and this tunnel in different cover thicknesses, the reasonable cover thickness is finally put forward.

Key words: tunnelling engineering; submarine tunnel; cover thickness; engineering analogism; numerical simulation

收稿日期: 2006 - 08 - 28; **修回日期:** 2006 - 10 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309017); 重庆市科学技术委员会资助项目

作者简介: 蒋树屏(1951 -), 男, 博士, 1978年毕业于重庆建筑工程学院港湾工程专业, 现任研究员, 主要从事与公路隧道和地下工程等方面的研究工作。E-mail: jiangshuping@ccrdi.cmhk.com

1 引言

水下隧道处于水的包围之中, 由于孔隙水压力降低了隧道围岩的有效应力, 从而使得地层的成拱效应降低。如果覆盖层厚度过薄, 隧道在施工时就会发生塌方、泥石流和涌水事故的发生。这不仅影响隧道的稳定性, 还会严重影响隧道的工期。在丹麦海峡海底隧道修建过程中, 海水冲破了隧道 12 m 厚的冰川风化黏土层, 致使隧道的结构和洞内的掘进机遭到严重的损坏。在该涌水事故所引起的修复工作持续了 8 个月, 共花费了 3 200 万美元^[1]; 日本东海道干线旧丹那隧道, 开工后曾经遭遇 6 次大的突水事故, 水压高达 1.4~4.2 MPa, 突水量最大达到了 134.4 m³/min, 造成了严重的伤亡, 贯通后总涌水量 145 152 m³/d, 致使工期延误 16 个月之久^[2]; 在大瑶山隧道涌水事故中, 竖井和洞内设备被水淹没造成了较大的经济损失, 中断施工长达 1 个月之久。

从以上涌水事故中可以看出, 隧道覆盖后厚度严重影响隧道的稳定性和施工工期。水下隧道通常处于无穷无尽的水源中。如果水下隧道发生了涌水事故, 其产生的后果将是不堪设想的。因此, 对于水下隧道最小覆盖厚度的确定将有较大工程意义。

2 重庆朝天门两江隧道工程概况

重庆朝天门两江隧道隧址区布设于扬子准地台重庆台坳重庆陷褶束华盖山穹褶束的解放碑向斜核部及南东翼。解放碑向斜的核部轴展布于重庆市渝中区解放碑至江北城一带, 核部地层层位为侏罗系上沙溪庙组第三段(鹅岭砂岩段)(J_{2s}³)的砂质泥岩夹厚层长石砂岩, 两翼地层层位由新至老从上沙溪庙组第三段→第二段→第一段→下沙溪庙组(J_{2xs})→新田沟组(J_{2x})地层层位依次发育、出露。解放碑向斜轴向 NE5°~15°, 核部岩层平缓; 两翼走向 NE5°~15°, 倾角 8°~15°, 而南岸一带的向斜南东翼, 岩层走向 NE10°~20°, 倾向 NW, 倾角 45°~70°。

在朝天门两江隧道隧址区南岸慈云寺上游 120.00~200.00 m 的砂岩岩盘外江一侧的长江河床中发育有一处江底深槽, 该深槽呈长轴状, 长宽比为 3:1, 长轴方向与岩盘方向平行, 走向为 NE20°。

深槽两侧江底地形不对称, 具东陡西缓、南陡北缓特点。

在朝天门两江隧道隧址区嘉陵江朝天门段也发育有江底深槽, 嘉陵江的江底深槽主要沿朝天门码头岸坡分布, 分别由一串长轴状江底洼地组成, 此次测量段有 3 个江底洼地, 洼地长轴方向主要为北北西和北北东方向, 长轴连线与嘉陵江岸坡走向平行, 洼地长、宽比为(1:5)~(1:10), 呈线型分布, 洼地地势东陡西缓。

重庆朝天门两江隧道工程由朝天门地下立交、嘉陵江隧道、长江隧道、望龙门隧道组成, 3 座隧道呈“Y”字型将渝中半岛、江北城、弹子石连接。拟建的重庆朝天门两江隧道工程采用城市主干道 I 级标准、设计车速 50 km/h。为双向分离式隧道, 系单洞三车道大断面隧道, 拟采用三心圆断面, 净高 8 m、净宽 14.45 m、净空面积 95.45 m², 全长 7.8 km。

3 工程类比法

从目前隧道发展趋势看来, 在水下修建隧道都趋向于采用盾构^[3~12], 不仅可以节省投资, 也可以获得较快的掘进速度。由于在硬岩地区修建隧道时, 掘进机是靠前面的刀盘进行切割岩石, 从而实现向前推进。因此, 采用盾构掘进机法施工时, 一方面对隧道围岩的扰动较小; 另一方面隧道的洞形较好, 所以使其所需要的覆盖层厚度相比钻爆法就减小了。现根据国内、外的一些工程实例对盾构掘进机法施作重庆朝天门两江隧道进行分析。

3.1 工程实例

3.1.1 国外海底隧道

1994 年竣工的英法海峡隧道是连接英、法两国的海底隧道, 全长 50.5 km。由于该隧道的地质条件较好, 地址调查工作很详细, 因此施工开展比较顺利。由于在该隧道路线方向上, 地质变化较小, 开挖顺着地层。因此, 用掘进机开挖最合适。海底段 37.5 km, 隧道最大埋深 100 m。海峡隧道由 2 条外径 7.6 m 的铁路隧道和 1 条外径 5.6 m 的服务隧道组成。隧道掘进施工共采用 11 台盾构掘进机。盾构机型有两种, 一是土压平衡盾构掘进机, 一是混合型双护盾全断面掘进机。英国一侧的隧道埋深为 21~70 m, 平均埋深 40 m。这里埋深包括海底松散沉积物的厚度。

日本东京湾横断公路隧道是目前世界上最长的海底公路隧道，长 9.5 km，由 2 条外径 13.9 m 的单向公路隧道组成，最大埋深为 50 m，采用 8 台 $\phi 14.14$ m 的泥水平衡盾构掘进机施工。隧道位于海底平坦地层中，最小覆盖层厚度 11 m，平均覆盖层厚度为 15 m 左右，约 $1D$ (D 为盾构机直径) 左右。隧道区段主要是软弱的冲积、洪积黏性土层(标准贯入度 N 值仅有 0~12)。

3.1.2 国内水下隧道

已经建成并投入使用的重庆主城排水过江隧道是采用混合型盾构施工。该隧道长 925 m，盾构隧道内径 5.5 m。在越江段，该隧道覆盖层厚度为 21~33 m(包括江底松散沉积物的厚度)。但是该隧道在越江段最小覆盖层厚度为 8.5 m，约为 1.5 倍的洞径。

上海延安东路北线越江隧道施工中，超大型网格挤压盾构过江穿越的土层是淤泥质粉质黏土，隧道顶部覆盖层厚度最小处为 5.8 m，相当于 $(5.8/11.3)D = 0.51D$ 。上海延安东路隧道复线位于已建成的延安东路隧道南侧约 60~100 m，圆形隧道采用 $\phi 11\ 220$ mm 泥水平衡式盾构掘进施工，隧道内径 9.9 m，外径 11 m。江底最小覆盖层厚度为 7 m，约 $0.64D$ 。

3.2 工程类比法确定隧道最小覆盖层厚度

根据以上工程实例看来，盾构掘进机施工的水下隧道的最小覆盖层厚度(除开水底松散沉积物厚度)一般都控制在 $(1\sim 2)D$ 。在软土地层中，我国已经修建成功了几条越江盾构公路隧道，其最小覆盖层厚度都在 $(0.6\sim 0.7)D$ 。再根据重庆朝天门两江隧道的具体地质，参考已建成的重庆主城排水过江盾构隧道。该排水过江盾构隧道与本工程相距不到 2 km，位于相同的工程地质和水文地质区域内，其最小覆盖厚度为 1.5 倍的洞径。因此，综合考虑，重庆朝天门两江隧道的最小覆盖层厚度取 1 倍洞径，采用单向双车道方案，最小覆盖层厚度为 11 m。

4 合理覆盖层厚度的数值模拟

4.1 力学参数与计算模型

在本工程中，由于围岩为砂岩和泥岩，而砂岩的渗透性较大。因此，在施工中为了减小江水的渗透量，对围岩在 5 m 范围内采取了止水措施。再结合盾构掘进机法，当掘进机(TBM)对隧道进行管片拼装完成时，要进行盾尾注浆。由于其水泥砂浆不

能及时提供足够的强度，故在管片外 15 cm 范围内采取等代层进行计算模拟^[13]。根据该隧道的地质断面图，该隧道越江段的最小覆盖层位于拟建区的 K1+680 处。由于该处为 III 级围岩，结合本工程的勘测和设计，可确定出其围岩及其他材料力学参数(见表 1)。

表 1 围岩及其他材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock and other materials

材料	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
III 类围岩	2 550	15.000 0	0.250	0.800	39
土	1 800	0.010 0	0.300	0.021	16
管片	2 500	29.000 0	0.167	2.000	55
等代层	2 100	0.001 2	0.200	-	-

根据以上围岩力学参数和隧道的断面形式(见图 1)，可建立如下计算模型(见图 2)。

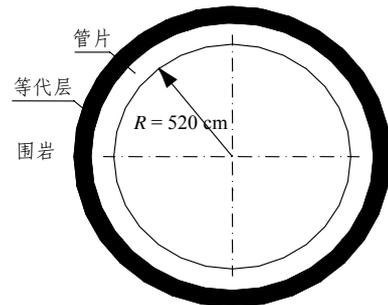


图 1 隧道断面形式

Fig.1 Cross-section shape of tunnel

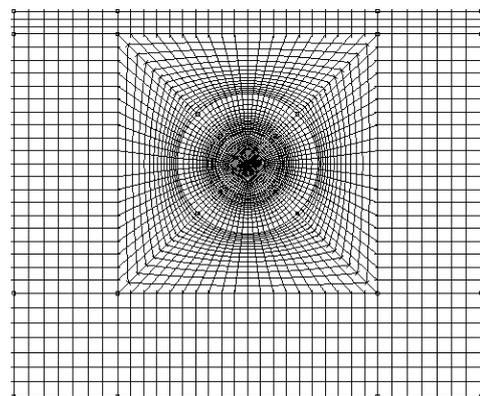


图 2 隧道计算模型

Fig.2 Computation model of tunnel

由于岩土材料采用 Drucker-Prager 屈服准则在数值计算中效果较好，并且该准则能较好地描述岩土材料的破坏行为，在岩土领域内得到了广泛的应

用。因此, 本文的计算中采用 Drucker-Prager 屈服准则模拟隧道的围岩。塑性屈服准则采用与莫尔 - 库仑等面积圆等效的 Drucker-Prager 准则, 其屈服函数为

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (1)$$

式中: I_1 , J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量; α , k 分别为与岩土材料内摩擦角 φ 和黏聚力 c 有关的常数。其表达式如下:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$$

$$\alpha = \frac{2\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{2\sqrt{3} \pi(9 - \sin^2 \varphi)}}$$

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

在该模型中, 围岩(5 m 止水区除外)采用多孔介质四节点实体单元模拟, 围岩 5 m 止水区采用不透水四节点实体单元模拟, 管片和等代层采用线弹性材料四节点实体单元模拟。在隧道顶部采用水压力模拟静水压力对隧道的影响。其网格划分见图 2。

4.2 合理覆盖厚度的确定方法

根据隧道施工规范^[14]及唐益群等^[15, 16]的研究成果可知: 当陆地隧道的围岩为 III 级或 III 级以下的围岩, 隧道的覆盖层厚度为 $2D$ 时(这里称为标准隧道), 隧道是稳定的。因此在本次计算中, 分别计算该水下隧道在不同厚度覆盖层的应力和位移, 再将这些位移和应力与标准隧道进行比较分析, 从而确定重庆朝天门两江隧道合理覆盖层厚度。

4.3 根据标准隧道围岩拱顶位移来确定合理覆盖层厚度

由表 1 的围岩力学参数和以上的建模方法可计算出标准隧道围岩拱顶位移为 0.63 mm(见图 3)。

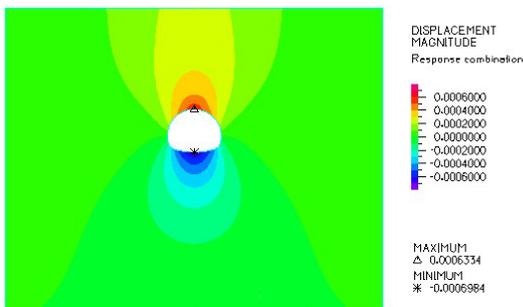


图 3 标准隧道位移云图(单位: mm)

Fig.3 Nephogram of vertical displacement for standard tunnel (unit: mm)

由图 3 可知, 该隧道的位移均较小。但是, 从总体看来: 随着覆盖层厚度的减小, 由开挖所引起位移影响区逐渐扩展, 当覆盖层厚度为 7.7 m 时, 影响区已经贯通整个覆盖层。隧道在不同覆盖层厚度时, 隧道围岩拱顶的位移见表 2。

表 2 不同覆盖层厚度下的围岩拱顶位移
Table 2 Crown displacement of surrounding rock with different cover thicknesses

断面位置	覆盖厚度/m	围岩拱顶位移/mm
K1+680	24.7	0.75
K1+680	19.7	0.68
K1+680	15.7	0.63
K1+680	11.7	0.54
K1+680	7.7	0.72

根据表 2, 可绘制出该水下隧道的覆盖层厚度与围岩拱顶位移的关系图(见图 4)。

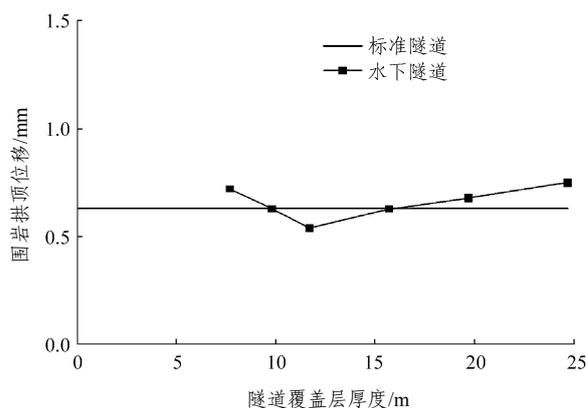


图 4 不同覆盖层厚度的围岩拱顶位移

Fig.4 Crown displacement of surrounding rock in different cover thicknesses

由图 4 可知, 当以标准隧道的拱顶位移为基准时, 该隧道的合理覆盖层厚度为 10 m。

4.4 根据标准隧道围岩拱顶拉应力确定合理覆盖层厚度

由以上步骤可同理计算出标准隧道围岩最大拉应力为 0.22 MPa(见图 5)。

从不同覆盖层厚度的水下隧道的第三主应力计算结果可知: 由于隧道开挖后, 围岩的应力将进行释放, 再经过调整重新达到稳定状态; 隧道开挖后在拱顶和底拱将出现小范围的拉应力, 随着覆盖层

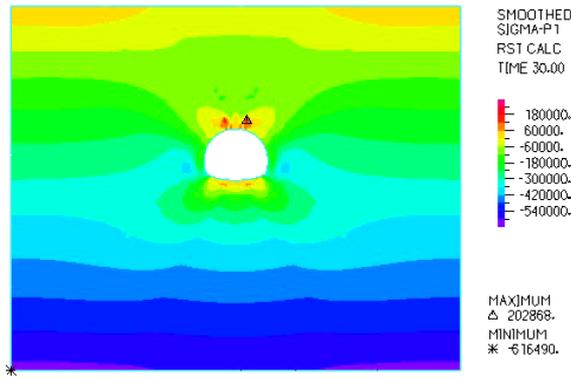


图5 标准隧道拉应力分布云图(单位: MPa)

Fig.5 Nephogram of the third principal stresses for standard tunnel(unit: MPa)

厚度的递减, 应力扰动区逐渐增大。水下隧道在不同覆盖层厚度的围岩拱顶拉应力见表 3。

表 3 不同覆盖层厚度下的围岩拱顶拉应力

Table 3 Tensile stresses of surrounding rock with different cover thicknesses

断面位置	覆盖厚度/m	围岩拱顶拉应力/kPa
K1+680	24.7	14.2
K1+680	19.7	14.6
K1+680	15.7	14.9
K1+680	11.7	15.4
K1+680	7.7	14.8

由表 3 的结果, 可绘制出该水下隧道的覆盖层厚度与围岩拱顶拉应力的关系曲线(见图 6)。

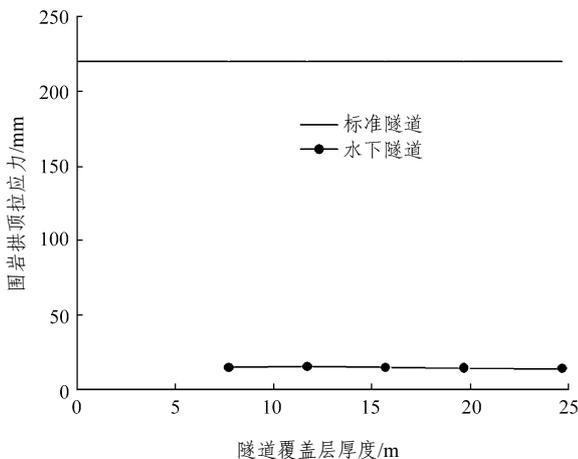


图 6 不同覆盖层厚度下的围岩拱顶拉应力

Fig.6 Tensile stress of surrounding rock with different cover thicknesses

结合标准隧道的围岩拱顶第三拉主应力, 从图 6 可得出该水下隧道覆盖层厚度为 10 m 时, 从围岩拱顶拉应力的角度来看, 该隧道是稳定的。

4.5 计算结果比较

在本次计算中, 根据隧道施工规范, 分别计算了围岩为 III 级、覆盖层厚度为 2D 的陆地隧道和不同覆盖层厚度的水下隧道。并以陆地隧道的围岩拱顶位移和第三拉主应力为基准, 将水下隧道所对应的物理量与之比较。当以隧道拱顶位移控制该隧道的合理厚度时, 该水下隧道合理覆盖层厚度应为 10 m; 当以隧道拱顶第三拉主应力为基准时, 该隧道的覆盖层厚度为 10 m 时, 该隧道满足标准隧道相应物理量的要求。因此, 综合以上因素, 当用盾构法施作时, 该水下隧道的合理覆盖层厚度为 10 m。

5 结 论

(1) 采用工程类比法表明重庆朝天门隧道使用盾构法施工时, 该隧道的最下覆盖层厚度为洞径的 1 倍, 最小覆盖层厚度为 11 m。

(2) 通过有限元数值分析表明, 重庆朝天门两江隧道盾构法施工时的合理覆盖层厚度应为 10 m。

(3) 笔者认为, 工程类比法确定的结果一般趋于保守, 故合理覆盖层厚度采用数值模拟方法结果, 确定为 10 m。

参考文献(References):

[1] WAGNER H, SCHULTER A. Tunnel boring machines[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996: 161 - 162.

[2] 刘继国, 朱光仪, 郭小红, 等. 厦门海底隧道涌水量流固耦合计算[C]// 2005 年全国公路隧道学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2005: 26 - 34.(LIU Jiguo, ZHU Guangyi, GUO Xiaohong, et al. Drainage computation of submarine tunnel in Xiamen by fluid-solid coupling[C]// Proceedings of Conference of Highway Tunnel in China, 2005. Beijing: China Communications Press, 2005: 26 - 34.(in Chinese))

[3] 王明年, 李 强. 历时 50 a 的海底隧道——关门隧道健全性的调查[J]. 隧道译丛, 1993, (6): 27 - 33.(WANG Mingnian, LI Qiang. The health survey of Guanmen submarine tunnel which served fifty

- years[J]. Journal of Tunnel Translations, 1993, (6): 27 - 33.(in Chinese))
- [4] 张民庆. 青函隧道的技术发展[J]. 隧道译丛, 1988, (8): 46 - 55. (ZHANG Mingqing. Technology development of Qinghai submarine tunnel[J]. Journal of Tunnel Translations, 1988, (8): 46 - 55.(in Chinese))
- [5] 陈志良. 法国修建海底隧洞的经验[J]. 隧道译丛, 1988, (8): 7 - 9.(CHEN Zhiliang. French experiences for construction of submarine tunnel[J]. Journal of Tunnel Translations, 1988, (8): 7 - 9.(in Chinese))
- [6] 徐成光. 日本海下隧道[J]. 隧道译丛, 1990, (5): 54 - 56.(XU Chengguang. Japanese submarine tunnel[J]. Journal of Tunnel Translations, 1990, (5): 54 - 56.(in Chinese))
- [7] 王明年, 李 强. 挪威的海底隧道[J]. 隧道译丛, 1990, (5): 28 - 34.(WANG Mingnian, LI Qiang. Submarine tunnel in Norway[J]. Journal of Tunnel Translations, 1990, (5): 28 - 34.(in Chinese))
- [8] 胡益华. 挪威海底隧道的设计与施工[J]. 隧道译丛, 1996, (3): 25 - 33.(HU Yihua. Design and construction of submarine tunnel in Norway[J]. Journal of Tunnel Translations, 1996, (3): 25 - 33.(in Chinese))
- [9] 王 成, 姚会明. 挪威施工法[J]. 隧道译丛, 1993, (7): 1 - 17.(WANG Cheng, YAO Huiming. Construction methods of Norway tunnel[J]. Journal of Tunnel Translations, 1993, (7): 1 - 17.(in Chinese))
- [10] 文 珂. 挪威隧道及地下工程近况[J]. 隧道及地下工程, 1999, (2): 62 - 63.(WEN Ke. The recent development of Norway tunnel and underground engineering[J]. Tunnel and Underground Engineering, 1999, (2): 62 - 63.(in Chinese))
- [11] PALMSTROM A. The challenge of subsea tunneling[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 145 - 150.
- [12] TORE S, DAHL O, NILSEN B. Stability and rock cover of Norwegian hard rock subsea tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 151 - 158.
- [13] 刘元雪, 施建勇, 许 江, 等. 盾构法隧道施工数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 343 - 346.(LIU Yuanxue, SHI Jianyong, XU Jiang, et al. Numerical simulation of shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 343 - 346.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ042 - 94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ042 - 94 Construction criterion for highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 1994.(in Chinese))
- [15] 唐益群, 宋永辉, 周念清, 等. 土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 52 - 56.(TANG Yiqun, SONG Yonghui, ZHOU Nianqing, et al. Experimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 52 - 56.(in Chinese))
- [16] 程远方, 王京印, 赵益忠, 等. 多场耦合作用下泥页岩地层强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 912 - 1 916.(CHENG Yuanfang, WANG Jingyin, ZHAO Yizhong, et al. Strength analysis of formation rock for porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 912 - 1 916.(in Chinese))