

管片衬砌承担高内水压力的可行性分析

佘成学, 张 龙

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 双护盾掘进机掘进与管片衬砌几乎同时进行, 具有快速施工的特点, 但管片衬砌能否承受电站引水隧洞高内水压力作用, 是决定引水隧洞能否采用管片衬砌及 TBM 施工的关键之一。结合青松电站引水隧洞, 对管片衬砌在承受高内水压力作用下的应力与变形特性进行三维有限元计算, 对影响管片接缝张开的主要因素进行分析, 获得在高内水压力作用下的管片应力、变形分布, 深化对高内水压力作用下的管片衬砌特性的认识。计算发现在内水压力作用下, 管片衬砌具有柔性变形特征, 就青松电站而言, 在现有的接缝止水技术条件下, 管片衬砌可承受高水头内水压力作用, 这对推动管片衬砌及 TBM 在引水隧洞中的应用具有重要意义。

关键词: 水工结构工程; 管片衬砌; 有限元; 有压隧洞

中图分类号: TV 31

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)07 - 1442 - 06

FEASIBILITY ANALYSIS OF PREFABRICATED CONCRETE SEGMENT LINING IN TUNNEL UNDER HIGH INNER WATER PRESSURE

SHE Chengxue, ZHANG Long

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: With the special characteristics of fast tunneling, the double-shield TBM is suitable for long tunnel construction. But for pressure tunnel in hydropower engineering, the loading capacity of segment lining for tunnel under high inner water pressure is one of the keys to determine whether the segment lining is feasible and the double-shield TBM can be used for the tunnelling construction. Combined with the long pressure tunnel of the Qingsong Hydropower Project, the characteristics of deformation and stress distribution of segment lining are evaluated by calculation with 3D FEM; the important influential factors are analyzed; the stress and strain distributions in different conditions are obtained; and the knowledge for segment lining characters is deepened. It is found that the segment lining has the character of flexibility, and under the present technology of joint water-seal, as far as the Qingsong Hydropower Project is concerned, the segment lining can sustain the high inner water pressure. The conclusion is helpful for application of segment lining and double-shield TBM in hydropower engineering in China.

Key words: hydraulic structure engineering; segment lining; finite elements; pressure tunnel

1 引言

我国大量水电资源集中在西南部, 其中有许多引水式电站需要修建长引水隧洞。由于山高谷深,

如果用常规的钻爆法施工几乎难于进行。双护盾 TBM 施工则克服了钻爆法的弱点, 隧洞开挖与管片衬砌同时进行, 施工快速, 很适合西部地区长隧洞的施工。然而, 对于电站引水隧洞而言, 管片能否承受高内水压力作用而不渗漏, 是制约管片衬砌及

收稿日期: 2008 - 01 - 16; **修回日期:** 2008 - 03 - 03

基金项目: 国家自然科学基金委员会、雅砻江水电开发联合基金资助项目(50639100)

作者简介: 佘成学(1964 -), 男, 博士, 1986年毕业于武汉水利电力学院水建及施工系, 现任教授, 主要从事水工及岩石结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: cxshe@126.com

双护盾掘进机应用的关键因素之一。

因此, 在高内水压力作用下, 尤其在软弱围岩情况下, 管片衬砌的变形应力性态和接缝的张开量等是工程上最关心的问题。目前, 国内对常规钢筋混凝土衬砌的引水压力管道进行了很多研究^[1~4], 但管片衬砌结构形式完全不同, 不能简单类比; 尽管国内外对管片衬砌已经有较多的计算分析^[5~13], 但基本上是基于施工及外水作用情况, 青松电站引水隧洞受到最大内水压力水头 88.4 m, 在国际上没有先例, 人们对此缺乏认识, 因此很有必要对其进行研究。

本文结合青松水电站工程引水隧洞, 针对其软弱围岩段的管片衬砌进行三维有限元计算, 分析其高内水压力作用下的应力、变形特性, 对管片衬砌承受高内水压力的可行性进行探讨。

2 工程基本资料

青松水电站工程为闸坝引水式电站工程, 水库正常蓄水位为 897.00 m, 总库容为 $251.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, 引水隧洞长为 13 478 m, 电站装机 2 台, 单机容量为 50 MW, 总装机容量为 100 MW。

引水隧洞穿越的地层从寒武系、二叠系及第四系地层均有出露, 岩性较复杂, 主要有灰岩、白云岩、砂岩、泥质粉砂岩、黏土岩和炭质页岩等。根据前期地质资料, 引水隧洞 II, III 类围岩占隧洞总长度的 40.8%, IV, V 类围岩占隧洞总长度的 59.2%。各类围岩物理力学参数见表 1。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical properties of rock masses

围岩类别	容重 $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量 E_0/GPa	泊松比 μ	抗剪断强度	
				摩擦因数 f'	黏聚力 c'/MPa
II	27.0	12.0	0.25	1.3	1.00
III	26.5	7.0	0.30	1.1	0.80
IV	26.5	2.0	0.35	0.8	0.40
V	26.5	0.5	0.45	0.5	0.05

隧洞设计断面为圆形, 开挖直径为 5.08 m, 衬砌后内径为 4.4 m, 管片厚度为 25 cm, 豆砾石灌浆层平均厚度为 9 cm。衬砌为预制混凝土管片拼装式结构, 管片为六边形蜂窝状结构, 单片宽度为 1.4 m; 设明暗两道止水, 在洞内拼装后四片管片组成一环。管片与围岩之间的空隙用豆砾石充填并进行回填灌

浆, 管片与管片环缝之间用机械连接销锁定。图 1 给出了管片结构形式。

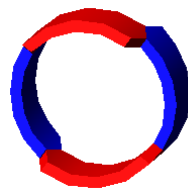


图 1 管片结构

Fig.1 Structure of segment lining

IV, V 类围岩洞段进行全断面固结灌浆, 固结灌浆孔呈梅花形布置, 灌浆孔深为 3 m, 排距为 2.8 m。在中 IV, V 类围岩洞段采用锚杆加固的工程措施, 利用固结灌浆孔设置锚杆, 梅花形布置, 锚杆直径为 20 mm, 长 $L = 3 \text{ m}$ 。

管片混凝土强度等级为 C40, 弹性模量为 $3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$, 抗压强度为 19.5 MPa, 抗拉强度为 1.80 MPa; 豆砾石回填灌浆混凝土强度等级为 C15, 弹性模量为 $2.2 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。

3 有限元计算模型

管片衬砌通过拼装形成整体衬砌, 管片与管片之间存在接缝, 接缝分两种: 一种沿隧洞轴线方向, 称纵向缝, 纵向缝为曲折形状; 另一种垂直于隧洞轴线, 称为横缝。纵、横缝形成空间的缝体系, 是三维空间结构。为了了解高内水压力作用下管片衬砌的应力、变形特征以及接缝的张开情况, 以三维有限元计算模型模拟。

围岩按弹塑性材料模拟, 以 D-P 准则模拟其屈服状态; 混凝土管片衬砌按弹性介质模拟。围岩及管片采用等参单元模拟, 而纵、横向接缝采用特殊的薄层单元模拟, 其中含一条节理或缝, 以模拟接缝的影响。在张拉作用下, 接缝的张拉弹性变形远小于张拉塑性变形, 一般情况下可以忽略, 这种简化对计算结果影响不大, 但可以省略接缝的切向和法向刚度 2 个参数。接缝可以承担压应力和屈服极限范围内的剪应力, 但不能承担拉应力。以 M-C 准则模拟接缝剪切屈服, 以最大拉应力准则模拟其张拉屈服, 其中接缝抗拉强度为 0; 由接缝的本构关系可以计算接缝的位移增量, 即张开量或错动量。关于含节理的薄层单元模拟方法读者可参见相关研究^[14, 15]。

对于豆砾石灌浆层, 一般用弹性介质模拟, 但

在管片接缝位置，由于受管片接缝拉开影响，也有可能拉开，因此在此位置也设置薄层单元；当拉应力大于豆砾石灌浆层拉应力时，豆砾石灌浆层发生开裂，并假定一旦开裂后垂直开裂方向不再承担拉应力。

隧洞衬砌后内径为 4.4 m，在隧洞的上下左右各取 25 m，隧洞外侧岩体厚度是隧洞洞径的 5 倍。沿隧洞线路方向取 4 个管片长度，以使中间有 2~3 个管片，能正确模拟接缝的变形情况。

垂直边界为链杆约束，即左、右边界采用水平向单链杆约束，沿隧洞线路方向也用水平向链杆约束；底面垂直向约束；在隧洞上方的边界按自由边界考虑，但考虑其上部岩体的压力作用，其压力值根据隧洞埋深情况确定。

引水隧洞区域地形起伏多变，隧洞埋深不等，不失一般性，本文介绍埋深为 120 m 情况的计算结果。有限元计算网格见图 2。

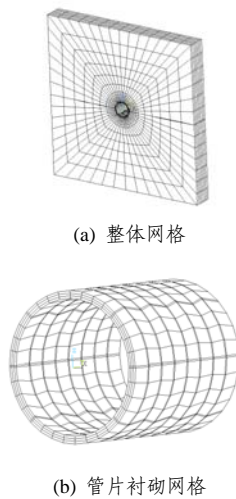


图2 有限元计算网格

Fig.2 Meshes for finite element calculation

4 影响管片变形应力的因素及分析

限于篇幅，本文介绍 V 类围岩中管片情况。由有限元计算分析管片衬砌的应力与变形特征、围岩固结灌浆的影响、围岩开挖应力释放荷载的影响以及管片衬砌与豆砾石垫层接触面间摩擦特性的影响等。

4.1 管片衬砌的应力与变形特征

假如在隧洞开挖阶段，围岩通过锚固等措施即处于稳定状态，则由围岩承受全部开挖应力释放荷载，管片衬砌和豆砾石灌浆层不承担开挖应力释放荷载的作用，在此条件下，管片只承受内水压力作用。

隧洞受内水压力作用后，由于管片接缝之间设置了止水，且管片渗透性很小，因此将管片衬砌按不透水处理。在模拟计算中，将内水压力全部作用在管片衬砌的内表面，洞顶水头为 84.0 m，洞底水头为 88.4 m。在计算内水压力作用时，不考虑外水压力同时作用。

在不考虑管片与豆砾石灌浆层之间相互错动的情况下，图 3 给出了管片衬砌变形分布情况，图 4 给出了管片衬砌最大主应力分布情况。

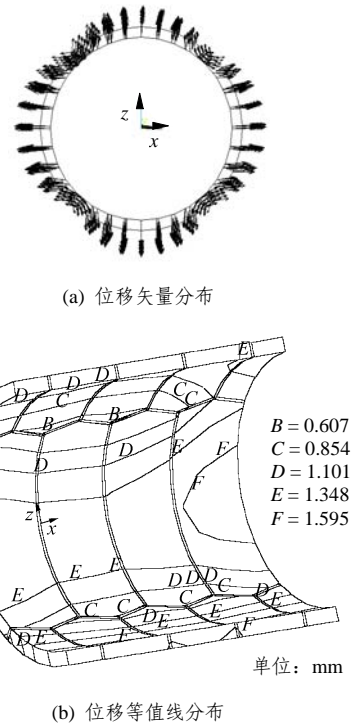


图3 管片衬砌变形分布

Fig.3 Deformation distribution of segment lining

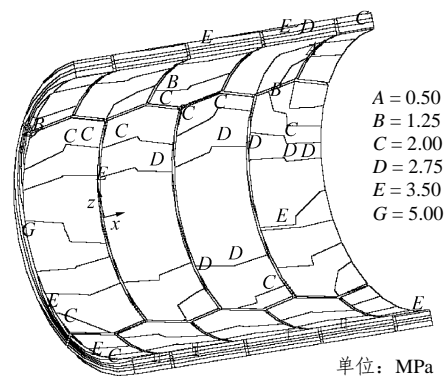


图4 管片衬砌最大主应力分布

Fig.4 Maximum principal stress distribution in segment lining

从图 3 可以看出，从圆周方向来看，一个圆周由 4 个管片组成，纵向接缝的存在影响了整个衬砌的变形。4 个管片各自变形，在管片的合力位置(一般在管片中部)变形最大，而在接缝位置

则变形相对较小, 导致管片接缝在洞内侧张开大, 围岩一侧张开小, 接缝不均匀变形。管片与豆砾石灌浆层及围岩一起变形, 隧洞向外变形导致围岩圆周方向的拉伸增长, 管片也受牵拉伸长。由于管片以向外鼓的方式变形, 一般来说, 管片中间外侧应力最大; 而在纵向接缝位置, 由于接缝的张开变形, 其拉应力几乎完全释放, 在纵向接缝两侧的混凝土管片中的拉应力也相应降低。

管片最大变形位置在管片底部中间, 变形量为 1.7 mm, 管片纵向接缝最大张开宽度为 1.6 mm, 横向接缝张开变形量微小; 最大拉应力位于底部管片, 为 6.5 MPa。

如果不考虑接缝的存在, 即按常规的钢筋混凝土衬砌计算, 则在同样内水压力条件下, 其最大变形、应力也位于衬砌的底部, 最大变形量为 0.54 mm, 最大拉应力为 6.8 MPa。

显然将管片衬砌与常规混凝土衬砌相比, 管片衬砌有如下特点:

(1) 由于纵向接缝的存在, 管片衬砌表现出柔性结构的特点, 其变形量比常规混凝土衬砌大得多。

(2) 纵向接缝的张开变形基本上释放了其周围的拉应力, 即使在管片中间位置, 其拉应力也得到一定程度的释放而相对较低。

4.2 固结灌浆效应的影响

V 类围岩一般进行固结灌浆, 充填围岩中的裂隙, 提高围岩的均匀性以及整体变形模量等力学性质。围岩灌浆深度按 3 m 考虑, 由试验及经验确定灌浆后灌浆层围岩的变形模量提高 20%。

在考虑固结灌浆效应的情况下, 管片应力、变形分布与上述计算结果类似, 但数值降低。最大变形量为 1.6 mm, 管片纵向接缝最大张开宽度 1.5 mm, 横向接缝张开变形量微小; 最大拉应力位于底部管片, 为 6.2 MPa。

显然, 对围岩进行固结灌浆, 提高了围岩的变形模量, 使管片向外扩张变形变小, 相应降低了接缝的张开变形和管片的拉应力, 但变化幅度不大。

4.3 围岩开挖地应力释放荷载的影响

在计算自重初始地应力场的基础上, 进行开挖计算。由于 TBM 全断面掘进, 所以隧洞按一次开挖成洞方式进行计算。考虑到围岩弹性变形瞬时完成, 而在隧洞开挖后管片衬砌需要延迟一

段时间后发挥作用, 因此, 围岩的弹性应力释放荷载应由围岩独自承担。由于围岩屈服, 需要进行塑性调整, 在调整过程中将部分压力施加到管片衬砌上。为了对比分析, 分别按下面两种塑性调整方式进行计算:

(1) 100% 的塑性调整由围岩与衬砌共同承担;

(2) 在管片衬砌发挥作用前, 占总塑性调整 50% 的调整量由围岩独自承担, 剩余 50% 由围岩与衬砌共同承担。

对于第一种调整方式, 在施工期管片内最大压应力为 21.2 MPa, 大于管片的抗压强度。

对于第二种调整方式, 在施加管片衬砌后, 衬砌、豆砾石灌浆层以及围岩共同承担围岩剩余塑性变形调整荷载。当塑性调整计算达到稳定时, 管片变形及围岩屈服区分布情况见图 5。

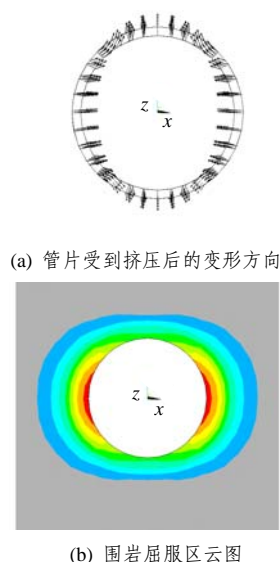


图 5 管片变形及围岩屈服区分布

Fig.5 Deformation of segment lining and yield zone of surrounding rock

在管片衬砌后, 由于围岩屈服, 围岩向洞内挤压管片, 导致衬砌内承担拉、压应力。在洞腰的管片内侧受到最大的拉应力, 约 0.7 MPa; 接缝处于受挤压状态, 没有屈服错动。在不考虑围岩固结灌浆效应情况下, 作用内水压力后管片变形及最大主应力等值线见图 6。从图 6 可以看出, 管片在底部变形最大, 约 0.70 mm, 在洞腰内侧受到最大的拉应力, 约 5.01 MPa; 纵向接缝最大张开变形量约为 0.24 mm, 横向接缝只有微量张开。

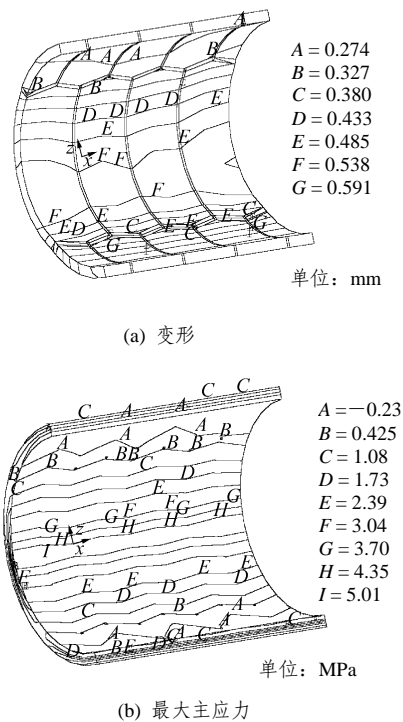


图6 管片变形及最大主应力等值线图

Fig.6 Deformation and maximum principal stress in segment lining

从上述计算结果可以看到，由于围岩塑性调整对管片的作用，管片中的应力分布发生了变化。围岩塑性调整使隧洞顶部与底部位置的管片产生很大的压应力，即使叠加运行期内水压力作用，其应力也基本上是压应力；而在洞腰位置，由于施工期产生了拉应力，与运行期内水压力作用产生的拉应力相叠加，使得该位置拉应力为最大。由于纵向接缝受到施工期围岩塑性调整挤压作用，使内水压力的张拉作用减弱，纵向接缝张开变形量很小。

由于管片只有 25 cm 厚，对于软弱围岩的塑性调整挤压的适应能力弱，如果管片承担的塑性调整作用过大，则有可能导致管片压应力过大而破坏，因此，在施工期应注意围岩的加固，以避免围岩对管片过大的挤压作用。当然，从上述第二种塑性调整情况的计算结果来看，适当的围岩挤压，有助于降低管片纵向接缝的张开变形量以及降低管片的拉应力。

4.4 管片与豆砾石灌浆层接触摩擦阻的影响

工程上可以采取的措施，改变管片与豆砾石灌浆层的接触摩擦特性，降低接触面摩阻力，使管片在随同豆砾石灌浆层及围岩向外扩张变形过程中，管片与豆砾石层在接触面发生少量的相对滑移。

用薄层单元模拟接触面。计算中不考虑接触面

的黏聚力，而改变摩擦角进行计算，其结果见表 2。

表2 管片与豆砾石灌浆层不同接触摩擦情况下的计算结果

Table 2 Calculation results under different frictions between lining segment and gravel grouting layer

摩擦角/(°)	管片最大拉应力/MPa	接缝张开量/mm
30	4.7	2.5
17	3.3	3.1

与前面计算结果对比可以看到，随着管片与豆砾石层接触面摩阻力降低，管片相对滑移，使得管片中的拉应力降低，这对管片的抗拉裂而言是有利的；然而，另一方面，由于管片的相对滑移，部分管片的张拉变形转移到了纵向接缝，使纵向接缝的张开变形量大大增加。

4.5 管片衬砌渗漏分析

通过上述计算可以看到，对于高内水压力作用，有两种情况起控制作用：一种是不考虑围岩的外部挤压以及固结灌浆作用，也不考虑管片与豆砾石灌浆层之间的相互错动，其结果是管片拉应力很大，但接缝张开变形量相对较小；另一种是考虑管片与豆砾石灌浆层之间的错动，其结果是管片拉应力大大降低，但接缝变形量增加很多。

考虑到管片应符合规范限裂要求，管片中过大的拉应力将导致管片裂缝超过限裂要求，因此，适当降低管片与豆砾石灌浆层之间摩擦特性，可以防止管片产生过大的裂缝。由此将导致管片纵向接缝张开变形增大，但就青松电站情况而言，其张开变形量不是太大。在管片接缝中设两道遇水膨胀止水条，从工程角度看，在这样的张开变形情况下，止水不会被拉裂，能满足防渗漏要求。

5 结 论

从上述计算可以得到如下结论：

(1) 相对于常规钢筋混凝土衬砌而言，在内水压力作用下，管片纵向接缝张开，一定程度上降低了管片中的拉应力，使整个衬砌表现出一种柔性结构特征。但如果管片与豆砾石灌浆层紧密黏结，则在高内水压力作用下，仍可使管片中产生过大的拉应力，管片有可能产生过大的裂缝。

(2) 围岩固结灌浆可以改善内水压力作用下管片的变形与应力分布，但一般而言，围岩的变形模量提高不是很大，这种改善很有限。因此，对于固结灌浆而言，主要的作用是提高围岩的抗

渗性能, 而不是对管片应力与变形的明显改善。

(3) 适当的围岩塑性调整作用有利于抵消高内水压力作用, 但过大的围岩塑性调整将使管片产生很大的压应力而破坏。因此, 对于软弱围岩, 一定要在施工期做好围岩的加固稳定工作, 而不能过多利用塑性挤压对高内水压力的抵消作用。

(4) 若通过工程措施, 降低管片与豆砾石层的摩阻力, 则可以大大降低管片中的拉应力, 这对管片的抗拉裂很有利, 但会增加管片纵向接缝的张开变形量。通过接触面材料试验, 控制接触面的摩阻, 可以协调管片应力与接缝张开变形。就青松水电工程引水隧洞管片衬砌而言, 在降低接触面摩阻情况下, 接缝张开量可能达到 3 mm 级的水平, 目前的止水技术可以满足防渗要求, 因此, 管片衬砌是可行的。

参考文献(References):

- [1] 陆晓敏, 刘启钊. 高压隧洞的设计及应力分析[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(2): 34 - 36.(LU Xiaomin, LIU Qizhao. Design and stress analysis of tunnels under high water pressure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997, 17(2): 34 - 36.(in Chinese))
- [2] 姜明杰, 李 伟, 王振军. 高压引水隧洞钢筋混凝土衬砌结构相关问题探究与建议[J]. 黑龙江水利科技, 2006, 34(6): 18 - 21.(JIANG Mingjie, LI Wei, WANG Zhenjun. Discussion and suggestion of engineering problems related to reinforced concrete lining of high pressure tunnel[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2006, 34(6): 18 - 21.(in Chinese))
- [3] 苏 凯, 伍鹤皋, 韩前龙. 高压透水隧洞工作机制探讨[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 61 - 64.(SU Kai, WU Hegao, HAN Qianlong. Discussion on working mechanism of high-pressure pervious tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(6): 61 - 64.(in Chinese))
- [4] 叶冀升. 广蓄电站水工高压隧洞设计施工的若干问题[J]. 水力发电学报, 1998, 6(2): 38 - 49.(YE Jisheng. Technological advancements of Guangzhou pumped storage power station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1998, 6(2): 38 - 49.(in Chinese))
- [5] 陈志刚, 肖石林. TBM 管片环在盾构推进时的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2007, (7): 48 - 49.(CHEN Zhigang, XIAO Shilin. Finite elements analysis of the shield lining thrust of TBM tunnel segment[J]. Machinery Design and Manufacture, 2007, (7): 48 - 49.(in Chinese))
- [6] 罗丽娟, 胡志平, 张志军. 盾构管片纵向接缝位置对结内力和变形的影响分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(10): 99 - 103.(LUO Lijuan, HU Zhiping, ZHANG Zhijun. Influence of segments joint position on structural inner force and deformation in shield tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(10): 99 - 103.(in Chinese))
- [7] 陈俊生, 莫海鸿. 盾构隧道管片施工阶段力学行为的三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(Supp.2): 3 482 - 3 489.(CHEN Junsheng, MO Haihong. Three-dimensional finite element analysis of mechanical behaviors of shield tunnel segment during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 482 - 3 489.(in Chinese))
- [8] 张厚美, 张正林, 王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4): 566 - 569.(ZHANG Houmei, ZHANG Zhenglin, WANG Jianhua. 3D FEM analysis of prefabricated segment joints of shield tunnel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(4): 566 - 569.(in Chinese))
- [9] 何 川, 封 坤, 杨 雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2 260 - 2 269.(HE Chuan, FENG Kun, YANG Xiong. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze River Tunnel with super-large cross-section[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2 260 - 2 269.(in Chinese))
- [10] 赵大洲, 景来红, 杨维九. 南水北调西线工程深埋长隧洞管片衬砌结构受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 679 - 3 684.(ZHAO Dazhou, JING Laihong, YANG Weijiu. Numerical analysis of segment linings in deep and long tunnels of West Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 679 - 3 684.(in Chinese))
- [11] 李 围, 何 川. 双车道公路盾构隧道管片衬砌结构力学特性分析[J]. 铁道建筑, 2007, (5): 38 - 40.(LI Wei, HE Chuan. Structural character analysis of segment lining of shield tunnel[J]. Railway Engineering, 2007, (5): 38 - 40.(in Chinese))
- [12] 胡爱宇. 隧道管片衬砌结构的有限元解析[J]. 水利水电工程设计, 2005, 24(2): 20 - 22.(HU Aiyu. FEM analysis of segment lining in tunnel[J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2): 20 - 22.(in Chinese))
- [13] KARINSKI Y S, YANKELEVSKY D Z. Dynamic analysis of an elastoplastic multisegment lining buried in soil[J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 317 - 328.
- [14] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(CHEN Shenghong. Stability analysis of complex rock foundation of high dam and rock slope[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [15] 余成学, 熊文林, 陈胜宏. 层状岩体的弹黏塑性 Cosserat 介质理论及其工程应用[J]. 水利学报, 1996, (4): 10 - 17.(SHE Chengxue, XIONG Wenlin, CHEN Shenghong. Elasto-viscoplastic Cosserat medium theory of layered rock mass and its application to engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (4): 10 - 17.(in Chinese))