

文章编号: 1006-2106(2012)06-0065-06

盾构隧道管片设计若干问题研究与探讨^{*}

戴志仁^{**}

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要: 研究目的: 目前盾构隧道管片设计的随意性较大, 计算方法缺少相应的理论支撑, 计算模型的选取无法体现管片的实际受力情况, 无法体现地层与衬砌结构的相互作用, 计算参数的取值与实际情况出入较大等。为了进一步加强管片结构设计的准确性与可靠性, 对管片设计中涉及的一些主要问题进行研究。

研究结论: 通过分析得出, 对于管片结构, 应该采用梁-弹簧模型进行受力分析; 管片结构上受到的水压力应按径向加载, 隧道拱底反力应取浮力与竖向荷载的较大值, 管片与地层的相互作用应通过管片四周设置的径向与切向土弹簧来实现; 采用地层应力释放系数来模拟盾构施工对周围地层的扰动效应, 得出应利用浆液的最小屈服强度控制盾尾后方隧道的上浮趋势。

关键词: 盾构隧道; 管片; 计算模型; 地层荷载; 密封垫; 隧道上浮

中图分类号: U31.2.2 **文献标识码:** A

Study and Discussion on the Issues about Segment Design of Shield Tunnel

DAI Zhi-ren

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an, Shanxi 710043, China)

Abstract: Research purposes: In view of the relatively obvious randomness of segment design, such as the calculation method is lack of corresponding theoretic support, the calculation mode adopted can not reflect the actual force conditions of segment, the interaction between formation and segment can not be embodied, and obvious deviation dose exist between calculation parameters and actual situation, in order to enforce the reliability and accuracy of segment design, further study of some main issues related is required.

Research conclusions: Through comparison and analysis, as for lining structure, the beam-spring mode should be adopted in stress analysis. The load direction of groundwater pressure should align with tunnel radius, reaction force at the arch bottom should be determined through the comparison between buoyancy and the vertical total load, and the interaction between ground and segment should be modeled by radial and tangential springs. Furthermore, the dimension of sealing gasket in segment joints should be determined by numerical simulation, the release coefficient of ground stress can be adopted to simulate the disturbance of surrounding formation due to tunneling, and the control of the upward movement of tunnel lining should be realized by the minimum shield stress of grout.

Key words: shield tunnel; segment; computation model; formation load; sealing gasket; upward movement of segment

近年来, 随着国内各大城市地铁项目的陆续兴建, 机械化、自动化施工理念的逐步推广与运用, 劳动力成本

本急剧上升, 以及对施工风险控制要求的不断提升, 机械化程度较高的盾构法隧道在地铁工程中得到越来越

^{*} 收稿日期: 2011-12-24

^{**} 作者简介: 戴志仁, 1981年出生, 男, 工程师。

越广泛的应用。

目前的盾构法隧道,衬砌管片的投资约占工程总投资的 30%~40%,管片设计是否经济、合理与可行,不但直接关系到建设成本,更直接关系到工程的质量与安全。本文从设计者的角度,针对目前管片结构设计中广泛存在的一些问题进行探讨,如计算软件与计算模型的不足、地层荷载的选取问题、管片与地层的相互作用问题、计算参数的选取问题、管片结构的耐久性问题以及盾尾后方隧道的上浮问题等,期望能对目前管片设计中某些不合理的地方起到积极的引导作用,提高盾构法管片设计水平。

1 管片结构设计现状

目前,各设计单位主要利用 MIDAS/GTS 软件,采用二维荷载—结构模型与修正惯用法(等效刚度圆环模型)进行管片结构设计,但其中弯曲刚度有效率参数 η 与弯矩提高系数 ξ 的取值缺少相应的理论依据。地层抗力采用土弹簧模拟,地基抗力系数由垂直或平板载荷试验确定,地层荷载根据隧道埋深与地层条件采用全覆土柱或太沙基公式进行计算,隧道拱底地层反力由拱底水压力决定。

现有的管片设计理论与方法,存在以下明显不足:计算软件本身的缺陷导致计算精度难以保证、选取的计算模型与实际管片受力特点不符、地下水压力与地层反力的选取难以与实际情况吻合、没有考虑管片与地层接触面的影响、没有考虑地层参数的变化对衬砌

结构受力的影响,也没有考虑到盾尾后方隧道上浮的影响等。

2 管片结构设计

2.1 计算软件与计算模型

2.1.1 MIDAS/GTS 软件的不足

MIDAS 软件存在明显的不足,如三维壳单元的缺失增加了管片准确模拟的难度、预应力单元的缺失导致了螺栓预紧力施加的困难、接触面单元参数取值困难加大了管片与地层相互作用的模拟难度。因此 MIDAS 在衬砌结构细部构造的模拟计算方面不占优势,但在一些关键技术分析或重要工程的模拟计算时,可以将其作为检验校核的手段之一,若必须将其作为主要计算依据时,建议采用多种计算手段对比分析。

2.1.2 计算模型存在的问题

由于均质圆环模型采用梁单元模拟管片结构,无法考虑错缝拼装时环间剪力、不同拼装方式、接缝处不同螺栓刚度、不同的管片分块方式与管片环宽的影响。

为了充分说明该模型存在的问题,就其计算结果与同济曙光软件的计算结果进行对比分析,MIDAS 软件采用均质圆环模型,而同济曙光则采用梁—弹簧模型(纵向 22.5°错缝拼装),具体如下。

2.1.2.1 工程概况

某地铁工程隧道断面主要位于卵石土层,隧道拱顶埋深 -10.3 m,地下水位埋深 -7.6 m,场地各土、岩层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 地层物理力学参数表

地层	天然密度 $\rho/(g/m^3)$	变形模量 E_0/MPa	静止侧压 力系数 K_0	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	基床系数 (MPa/m)		地层厚度/m	
						K_v	K_h		
杂填土	1.70	5	0.60	10	12	20	15	1.20	
黄土状土	1.80	6.4	0.43	24	27	35	30	2.90	
中砂	1.90	15	0.37	0	35	50	45	1.60	
卵石	2.30	35	0.30	0	40	105	85	5.70	4.60
卵石	2.50	45	0.25	20	43	110	90	>30	隧道
									>30

2.1.2.2 水、土荷载计算方法

对于水压力,MIDAS 中等效成土压力形式加载,同济曙光则采用实际的径向水压力。对于拱底地层反力,MIDAS 采用隧道底部的实际水压力,而同济曙光则根据上覆荷载反力与隧道受到的浮力相比较后按不利情况取值。

2.1.2.3 计算结果分析

由表 2 可见,同济曙光计算出的管片内力值明显小于 MIDAS(拱顶处弯矩值减小 43.4%,拱肩处弯矩

值减小 65.3%),这是由于管片接头的存在导致了衬砌结构整体刚度相对较弱。

进一步分析发现,同济曙光计算得到拱底处弯矩值几乎为 MIDAS 计算结果的 5 倍,这主要是由不同的拱底反力计算模式导致的,表明 MIDAS 采用拱底处的实际水压力作为反力是不安全的。同时,同济曙光计算出的内力图并不是严格的左右对称图形,体现了环间螺栓的抗剪作用,进一步体现了错缝拼装的具体影响。

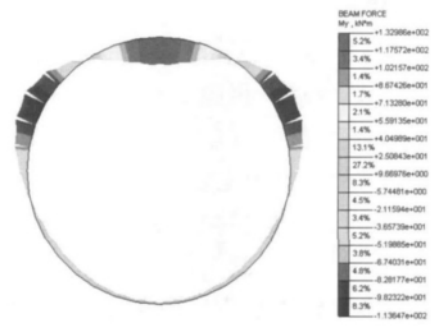


图 1 弯矩图(MIDAS)

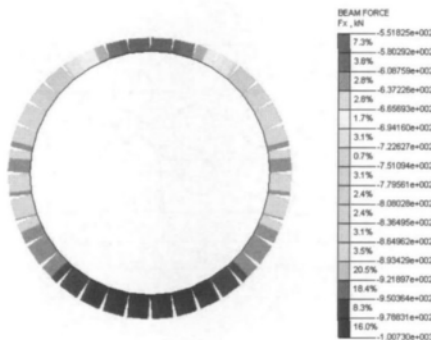


图 2 轴力图(MIDAS)

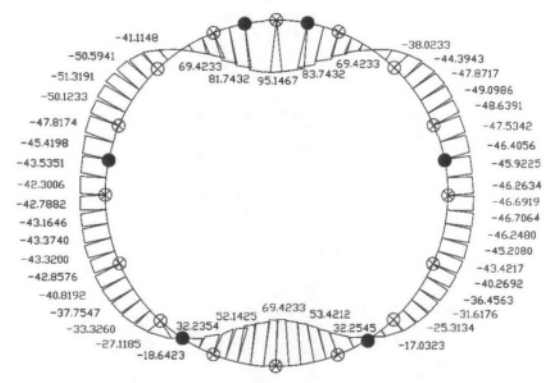


图 3 弯矩图(同济曙光)(单位:kN·m)

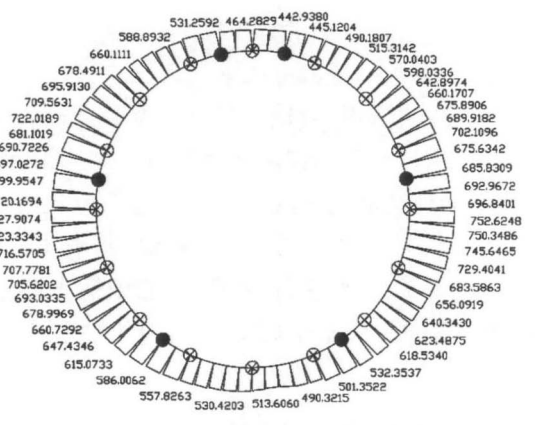


图 4 轴力图(同济曙光)(单位:kN)

表 2 计算结果对比

位置	项目	MIDAS	同济曙光	差异
拱顶	弯矩/ (kN·m)	167.92	95.15	-72.8(-43.4%)
拱肩		-147.75	-51.32	-96.4(-65.3%)
仰拱		17.21	88.49	71.3(414.2%)
拱顶		551.82	464.38	-87.4(-15.8%)
拱肩	轴力/kN	927.95	660.11	-267.8(-28.9%)
仰拱		991.28	470.67	-520.6(-52.5%)

由以上分析可见,均质圆环模型用于计算结果的校核是合适的,但作为管片内力计算与配筋设计的主要依据,其计算精度尚需提高,计算结果的可靠性尚需验证。

2.2 地层荷载

2.2.1 地层水压力

目前,对于作用在管片结构上的水压力,一般是将其折算成土压力进行考虑,作用在水平或竖直方向,但在高水压条件下,则不应这样计算,因为实际水压力的作用方向为隧道径向,否则将会使隧道结构出现剪力误差,进而影响计算结果的可靠性,如德国的盾构隧道管片衬砌设计都采用径向水压。

2.2.2 地层反力

拱底作用的地层竖向反力是用来平衡地面荷载、土压、水压以及结构自重的。通常认为拱底反力即为隧道底部作用的水压力,但实际,拱底反力必须要综合考虑隧道受到的浮力与竖向荷载总和的影响,二者进行比较后按不利原则取值。

2.3 隧道与地层的相互作用

2.3.1 隧道四周地层弹簧的设置

管片与地层间的相互作用,一般通过管片周边设置的土弹簧进行考虑,但土弹簧的设置有隧道径向的,也有水平方向与竖直方向的。实际,土弹簧的设置应充分考虑到管片的位移趋势,从作用力与反作用力角度出发,在管片四周设置径向与切向的土弹簧。

2.3.2 管片与地层接触面的设置

管片与地层间的剪切与摩擦作用需要通过设置接触面才能实现,就目前普遍采用的有限元软件,大都采用无厚度的 4 节点 8 自由度单元(Goodman 单元),涉及的主要参数为接触面的法向刚度 K_n 与切向刚度 K_s ,也有直接采用接触对模拟结构间相互作用的。

对于法向刚度 K_n ,为了有效避免接触面单元与其他单元发生相互嵌入的现象,其取值应尽量大($K_n = 1e9$ kPa)。对于切向刚度 K_s ,其取值应根据围岩条件、应力状态等综合确定。根据孙钧等人的研究,得出了管片混凝土与周围的(亚)黏土之间接触面的切向刚度计算公式,即:

$$K_s = a / (a + b \cdot \Delta u)^2 = (1 - b \cdot \tau_{1s}) / a \quad (1)$$

其中, 剪切应力 $\tau_{1s} = \tau_s - \tau_0$, 当 τ_s 超过起始剪应力 τ_0 时, 才开始出现剪切位移 Δu ; 系数 a 的倒数是初始切向刚度系数 K_{s0} , 系数 b 的倒数是 $\tau_s - \Delta u$ 曲线的渐近值; a, b 为常数。

2.4 管片结构的长期耐久性

管片结构的长期耐久性主要体现在两个方面, 一是管片结构体自身的劣化, 二是管片接缝防水材料的老化, 而管片接缝的防水效果一定程度上决定了管片

结构的长期耐久性^[8]。

目前, 接缝防水材料一般选取密封垫, 但密封垫断面主要参数的选取缺少相应的理论依据, 基本上以经验为主。为了避免传统方法试验周期过长、成本过大的问题, 应以数值计算为主要手段, 通过对密封垫在密封槽内的压缩过程进行模拟, 以接触应力和压缩密封垫所需压力作为主要控制指标, 对断面参数进行了调整^[9]。目前, 在地铁工程中广泛采用的几种密封垫类型如图 5 所示。

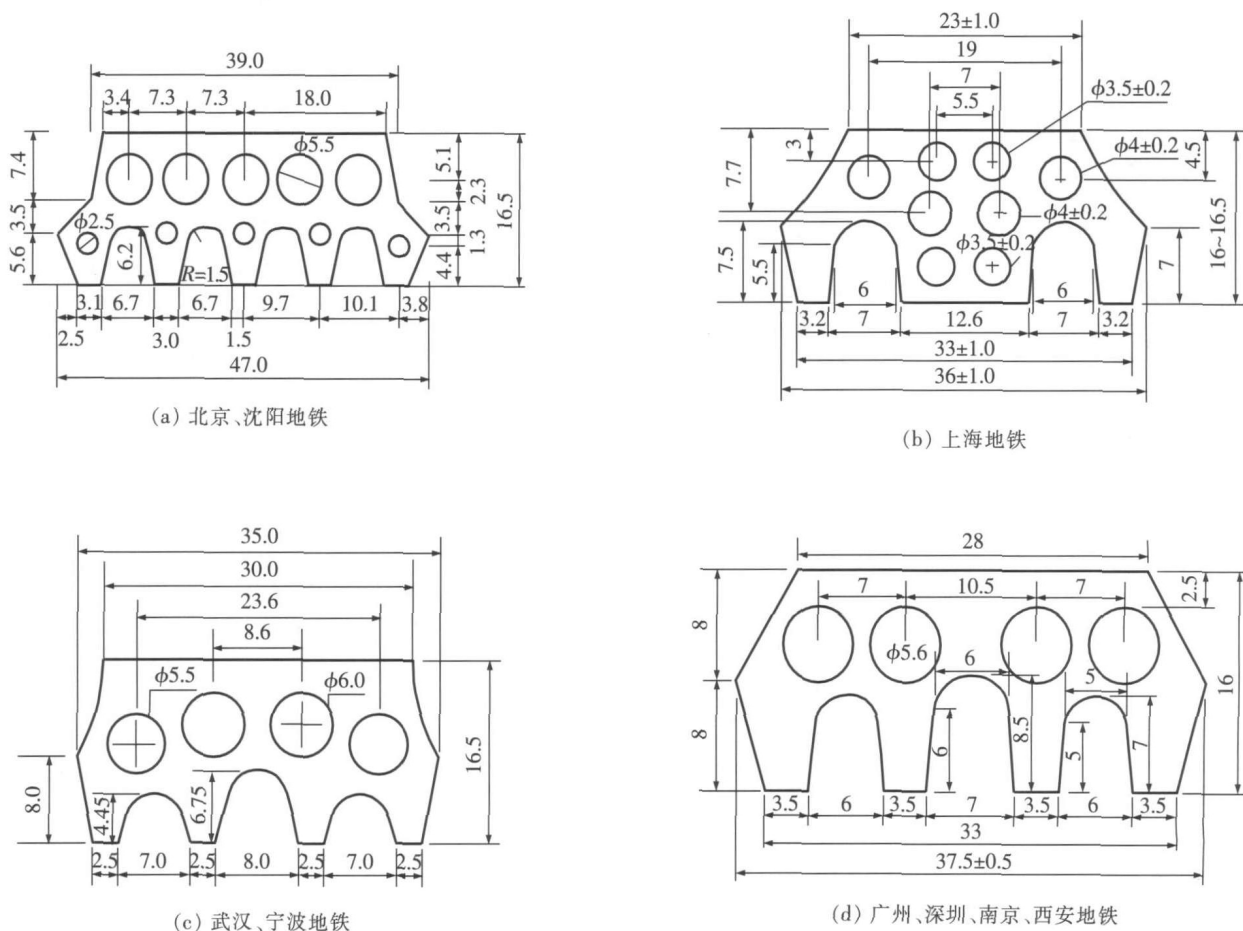


图 5 国内各主要地区管片接缝密封垫结构图(单位:mm)

2.5 地层、结构参数变化对计算结果的影响

有限元数值计算的结果是否可靠, 很大程度上取决于相关参数取值是否准确。一般而言, 地层与结构体的参数可从相关规范或地质勘察报告中查询, 但有些计算参数会随着施工过程或外界环境的变化而变化, 成为设计的难点之一。

2.5.1 地层参数的影响分析

盾构掘进会导致四周地层应力的释放, 以及土体力学参数的变化, 对此, 一般可以通过设置地层应力释放系数 ξ 来近似计算, 在有可靠工程数据或实验数据的条件下, 可采用统计的方法, 将各阶段的位移权重当

作各阶段的应力释放率进行计算。

2.5.2 结构参数的影响分析

对于盾构法隧道, 盾尾注浆十分重要, 但现有设计一般不考虑盾尾空隙与浆液压力对管片结构设计的影响, 浆液压力作为盾构法隧道的主要施工荷载之一, 对衬砌结构选型有很大影响。一般来说, 浆液压力可根据如下原则确定: 下临界压力 P_j^x 应能维持土体稳定, 使之不坍塌; 上临界压力 P_j^s 应能维持土体稳定, 使之不隆起, 即:

$$P_j^x = \gamma H \left[l + \frac{H}{D} \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 \frac{C_u}{D} \right] \quad (2)$$

$$P_J^s = \left(\gamma - 2 \frac{C_u}{D} \right) h \quad (3)$$

式中 γ ——隧道上覆土体平均重度;

l ——注浆管路长度;

H ——土体塌落拱高度;

D ——隧道直径;

φ ——土体内摩擦角;

C_u ——土体不排水抗剪强度;

h ——隧道埋深。

考虑一定的安全系数 n (1.5 ~ 2.5), 即可得到理想的注浆压力 P_J^n , 即:

$$n \times \gamma H \left[l + \frac{H}{D} \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 \frac{C_u}{D} \right] < P_J^n < \frac{1}{n} \times \left(\gamma - 2 \frac{C_u}{D} \right) h \quad (4)$$

根据上述原则确定的浆液压力的作用方向为隧道径向, 浆液压力是管片内力增长的主要因素, 会导致衬砌轴力明显增大, 而弯矩的变化则相对较小, 进而可使管片配筋率降低, 节约工程投资成本。

2.6 盾尾后方隧道上浮对管片结构设计的影响

盾尾后方一定范围内隧道的上浮是盾构法隧道中普遍存在的一种现象, 然而, 隧道上浮引起的管片结构内力加剧, 管片局部破碎、掉角, 以及管片的踏步、错缝等现象, 至今尚未引起应有的重视。

管片上浮主要可以分为整体上浮与局部上浮两种, 如图6、图7所示。整体上浮是由于地层水土压力与液态浆液包裹而引起的, 而局部上浮是由于管片背后二次注浆对应的局部应力集中引起的。

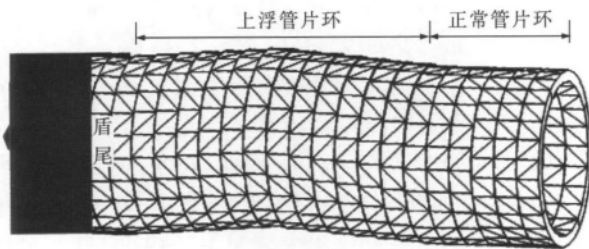


图6 管片整体上浮示意图

据相关研究表明, 由于盾尾三维环状建筑空隙厚度一般 ≥ 10 cm, 完全能给盾尾后方隧道的整体上浮提供空间。同时, 浆液重度越大, 地层水土压力越大, 盾尾空隙范围内隧道的整体上浮趋势就越大。要确保盾尾后方隧道的抗浮稳定, 必须从增大浆液屈服强度方面着手制定相关措施, 浆液屈服强度对隧道抗浮稳定起着决定性作用。为了确保隧道抗浮稳定所需的浆



图7 单环管片上浮示意图

液最小屈服强度 τ_{\min} 如式(5)所示:

$$\tau_{\min} = \frac{-2\gamma l \int_0^\pi h \cdot A \cdot R d\sin\alpha + \rho_g g \pi \cdot B \cdot l - \pi R_0^2 l \bar{\rho} g - C}{4R_0 \cdot l} \quad (5)$$

其中 $A = \cos^2\alpha + K_0 \sin^2\alpha$, $B = 2R_0^2 - R^2$, $C = (f_{\text{环}} + Q)\xi$,

$f_{\text{环}} = \mu \left(\sum_{i=1}^n N_i + N_j \right)$, $Q = [\tau] \cdot \frac{n\pi r_b^2}{2}$, $h = H + R(1 - \cos\alpha)$

式中 τ_{\min} ——确保盾尾后方隧道抗浮稳定所需的浆液最小屈服强度;

γ ——按厚度加权平均的土体重度;

l ——单环管片长度;

R_0 ——管片外径;

$\bar{\rho}$ ——管片范围内的平均密度;

ρ_g ——浆液密度;

R ——考虑注浆层厚度的隧道半径;

H ——隧道拱顶埋深;

$f_{\text{环}}$ ——管片环面上的摩阻力;

μ ——相邻管片环间的摩阻系数, 可取 0.3;

N_i ——对每个纵向螺栓施加的预紧力;

N_j ——千斤顶推力在环面上产生的压力;

$[\tau]$ ——螺栓的许用剪应力;

n ——螺栓根数;

r_b ——螺栓直径;

ξ ——环间纵向约束折减系数, 可取 0.5。

3 结论

通过对目前管片设计中存在的若干主要问题进行探讨, 揭示了计算软件、计算模型、地层荷载取值、隧道与地层的相互作用、管片结构的耐久性、相关参数随施工过程的变化以及隧道上浮等方面存在的问题与不足, 主要得到以下几点结论:

(1) 对于管片结构的荷载 - 结构法受力分析,在现有的技术水平下,可采用 MIDAS/GTS 软件作为结果的校核手段,如必须将其作为主要计算手段,建议采用多种计算方法对比分析,并用梁 - 弹簧模型进行管片受力分析,均质圆环模型仅用于计算结果的校核。

(2) 管片结构上受到的水压力应按径向加载,隧道拱底反力应根据竖向荷载总和与结构所受浮力的比较结果,按不利原则取值。

(3) 管片与地层的相互作用应通过管片四周设置的径向与切向土弹簧来实现,条件允许时,应设置接触面单元或接触对。

(4) 应采用数值方法,对不同工程条件下密封垫在密封槽内的压缩过程进行模拟计算,对密封垫的断面尺寸进行优化设计。

(5) 分析了地层参数、结构参数随施工过程的变化对管片结构计算的影响,建议采用地层应力释放系数来模拟盾构施工对周围地层的扰动效应,同时考虑浆液凝固前的浆液压力的有利影响。

(6) 在分析盾构后方隧道上浮模式的基础上,给出了隧道抗浮稳定的最小浆液屈服强度表达式,建议在设计中明确浆液初始屈服强度指标,减小管片错缝、踏步或局部裂缝与破碎等现象的发生几率。

参考文献:

- [1] 何川, 张建刚, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
He Chuang, Zhang Jiangang, Su Zongxian. Structural Mechanical Characteristics of Underwater Shield Tunnel with Large Cross Section[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 胡如军. 盾构隧道衬砌管片设计理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
Hu Rujun. Research of Design Theory of Lining Segment for Shield Tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [3] Atsushi K. On the Design Method of the Shield Tunnel Lining[J]. From Memories of the School of Science and Engineering, 1992(56): 125 - 177.
- [4] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 兰州市城市轨道交通 1 号线一期工程总体设计[Z]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2011.
China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd. The Overall Project Design of Lanzhou Metro Line 1 at the First Stage[Z]. Xi'an: China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd, 2011.
- [5] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A Model for the Mechanics of Jointed Rock[J]. J. Soil Mech. and Found., Engrg. Div., ASCE, 1968(5): 637 - 660.
- [6] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料的接触面的变形及数学模型[J]. 岩土工程学报, 1994(3): 14 - 22.
Yin Zongze, Zhu Hong, Xu Guohua. The Deformation and Mathematical Model of Contact Surface between Soil and Structure[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994(3): 14 - 22.
- [7] 孙钧, 汪炳鉴. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988.
Sun Jun, Wang Bingjian. Finite Element Method Analysis of Underground Structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1988.
- [8] 刘印, 张冬梅, 黄宏伟. 基于纵向不均匀沉降的盾构隧道渗漏水机理分析[J]. 铁道工程学报, 2011(5): 66 - 70.
Liu Yin, Zhang Dongmei, Huang Hongwei. Analysis of Mechanical of Water Leakage Induced by Longitudinal Uneven Settlement of Shield Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(5): 66 - 70.
- [9] 向科, 石修巍. 盾构管片弹性密封垫断面设计与优化[J]. 地下空间与工程学报, 2008(2): 361 - 364.
Xiang Ke, Shi Xiuwei. Design and Optimization of Elastic Gasket Section of Shield Tunnel Lining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008(2): 361 - 364.
- [10] 戴志仁. 软土地区盾构隧道同步注浆机理与工程应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
Dai Zhiren. Study on the Mechanism and Engineering Application of Simultaneous Backfill Grouting in Shield Tunneling in Soft Soils[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.

(编辑 吕 洁)