

地铁土压平衡式盾构隧道施工安全评价模式研究

游鹏飞, 牟瑞芳

(西南交通大学 交通运输学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对地铁土压平衡式盾构隧道施工的特点, 首先运用系统工程学的思想对盾构隧道施工存在的危险因素进行辨识, 对地铁盾构隧道施工进行层次分析, 然后构造安全评价指标体系, 运用泛函理论确定指标层和准则层的权重, 使用安全检查表法和作业条件危险性评价法等不同评价方法对指标层的款项进行评价, 得出指标层、准则层的危险等级, 最后使用模糊综合评判法对准则层进行评价得出目标层的危险等级, 形成安全评价模式, 该模式可为类似工程施工的安全评价提供参考。

关键词: 隧道工程; 土压平衡式盾构; 泛函理论; 模糊综合评判; 危险等级

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增1 - 2663 - 06

SAFETY ASSESSMENT MODEL OF METRO EPB SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION

YOU Pengfei, MOU Ruifang

(College of Traffic and Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: For the characteristics of metro earth pressure balance(EPB) shield tunnel construction, first of all, the risk factors of shield tunnel construction by using the idea of system engineering are identified, and its levels are analyzed, and safety assessment index system is structured. Then the weights of indicators and criteria layer are determined by functional theory. Using SCL and LEC to assess items of guide line layer, carrying out risk levels of the target and guide line layer, using fuzzy comprehensive assessment theory to assess risk level of guide line layer to reach the risk level of the target, these are used to form a safety assessment model, which can provide reference for similar projects construction.

Key words: tunnelling engineering; earth pressure balance shield; functional theory; fuzzy comprehensive evaluation; dangerous level

1 引言

目前国内大型城市相继开始修建地下铁道, 由于城市大部分属于软土地质, 地下施工安全问题成为施工单位关心的最重要的问题之一。本文通过先进的安全评价理论及其相互关系建立地铁土压平衡式盾构隧道施工安全评价模式, 盾构隧道施工发生

的主要事故有地表沉陷、路面坍塌、支架坍塌、机械伤害、触电等事故; 盾构掘进期间存在的危险因素有土压平衡式盾构正面阻力过大、正面平衡压力的过量波动、螺旋机出土不畅、盾构掘进轴线偏差、盾构过量地自转、盾构后退、盾尾密封装置泄漏、盾构切口前方底层过量变形及运输过程中管片受损等^[1]。

国外现有一些方法和工具用于评价施工隧道,

收稿日期: 2008 - 11 - 17; **修回日期:** 2009 - 01 - 22

基金项目: 四川省科技攻关项目

作者简介: 游鹏飞(1980 -), 男, 2004年毕业于沈阳航空工业学院安全工程专业, 现为博士研究生, 主要从事隧道施工安全、轨道交通安全及安全评价等方面的研究工作。E-mail: youpengfei123@163.com

但还没有一个统一的标准或可应用于各个领域的现成方法^[2]。国内外对地铁土压平衡式盾构法隧道施工的安全评价也都比较浅显，没有形成完整的模式和理论体系，而施工企业主要是使用安全检查表对现场安全状况进行检查，目前还没有有效的方法对地铁施工安全条件和施工危险等级进行评价。

本文采用安全检查表和作业条件危险性评价法对各个安全状况进行检查和评价，得出现场危险程度，再使用加权平均法、泛函理论及模糊综合评判法评价各个层次的危险等级。首先使用不同评价方法对系统的各个子系统进行评价，对作业条件危险性评价法进行了改进，实现了作业条件危险性评价法与泛函理论之间的结合使用，探讨了不同安全评价方法之间的联系，另外绕开了以往学者们使用的主观性较强的层次分析法，运用泛函理论确定指标层和准则层的权重，减少了主观性，使得在实际应用中更具有可操作性。

本文有针对性地采取安全对策措施，可以对施工单位日常安全管理提供参考，对安全监督机构提供一个较为有效的评价地铁施工单位安全状况的方法，对同类型的施工单位现场安全管理有一定参考意义。

2 土压平衡盾构法隧道施工系统

盾构施工时，先在隧道的某一端建造竖井或基坑，以供盾构安装就位。盾构从竖井或基坑的墙壁开孔处出发，在地层中沿着设计轴线，向着另一竖井或基坑的设计孔洞推进^[3]。土压平衡盾构机是一种掘土密闭型结构，由盾构外壳，推进系统，出土系统和拼装系统组成^[4]。具有对地面、地下环境影响小、掘进速度快、地表沉降小等特点，因此越来越多地被应用于城市地铁隧道施工领域。

土压平衡盾构掘进机是利用安装在盾构最前面的全断面切削刀盘，将正面土体切削下来进入刀盘后面的贮留密封舱内，并使舱内具有适当压力与开挖面水土压力平衡，以减少盾构推进对地层土体的扰动，从而控制地表沉降，在出土时由安装在密封舱下部的螺旋输送机向排土口连续的将土渣排出^[3]。

土压平衡盾构法隧道施工系统主要可以分为盾构施工准备系统、盾构施工系统、盾构拆除系统以及相关辅助工程系统；施工准备主要包括盾构竖井

修建、盾构拼装、临电、通风设备安装和人员准备；盾构施工主要包括盾构进出洞作业、盾构推进、防水工程、管片拼装及堆放、衬砌背后压浆；盾构拆除主要指盾构机的拆除工程；辅助工程主要包括盾构机械、盾构作业外运输、隧道运输、施工用电和通风等。

3 危险源辨识

运用系统工程学的思想及事故发生机制对地铁土压平衡式盾构隧道施工过程中存在的危险因素进行辨识，任何一种事故的发生原因总是离不开“人-机-环境”系统，限于篇幅，本文以盾构推进过程为例进行辨识(见表 1)，其余作业过程及施工过程的危险源辨识依据系统工程学的理论方法进行，可以比较完整地辨识出危险因素。

表 1 盾构推进危险源辨识表

Table 1 Identification table of danger factors on shield advancement

事故发生因素	基本事件	事故结果
人	盾构在地层中没有按照设计轴线推进	隧道沉降
	没有及时向衬砌背后的空隙注浆，从而导致地层移动或影响固定衬砌环位置	隧道沉降
	安装或拆除盾构操作不当引起工作井被损坏	隧道沉降
	衬砌拼装不规范	隧道沉降
	隧道衬砌强度的安全系数核算错误	隧道沉降
	在盾尾空隙的衬背灌浆不充分	隧道沉降
	蛇行修正、曲线施工等场合过大的超挖	隧道沉降
	更换刀具时，开挖面不稳定，未采取有效措施	物体打击
	更换刀具时，土仓内使用非安全电压而防护又不够，违规在土仓内动火	触电、火灾
	机	盾构千斤顶推力不均匀
刀具更换时刀盘非期望旋转		机械伤害
更换刀具时，吊运工具的葫芦、吊绳、吊环等质量不合格或磨损后未及时更换		物体打击
环境		地层含水量过大
	隧道上方重力过大	隧道沉降
	由于地层中的应力变化而发生的地基变形	隧道沉降
	开挖面围岩的凹陷和扰动	隧道沉降
	盾构掘进时岩土体的扰动	隧道沉降
	装刀具时，刀座空间狭小，不合理使用工具	机械伤害
	机械、电器维修时未按规定挂警示标志，派人看护	机械伤害、触电
	测量移站时与操作手欠沟通，未停止皮带机的运行	机械伤害

4 评价模式构建

4.1 评价模式结构

一个系统由 n 个子系统组成, 要想得到系统的危险程度, 就需要先得到 n 个子系统的危险程度, 而不同工艺的子系统适用的安全评价方法有可能不同。根据 LEC 法及安全检查表法的分值结合加权平均法推出指标层的分值, 再结合泛函理论推出目标层的分值(危险等级), 运用泛函理论结合模糊综合评判法上推目标层的危险等级。

把盾构法隧道施工系统分为 3 个层次和 1 个基础项(款项), 3 个层次分别为: 目标层 B 、准则层 B_i 及指标层 B_{ij} , 基础项为指标层 B_{ij} 的所属款项, 即危险因子或安全检查条款, 评价模式见图 1。

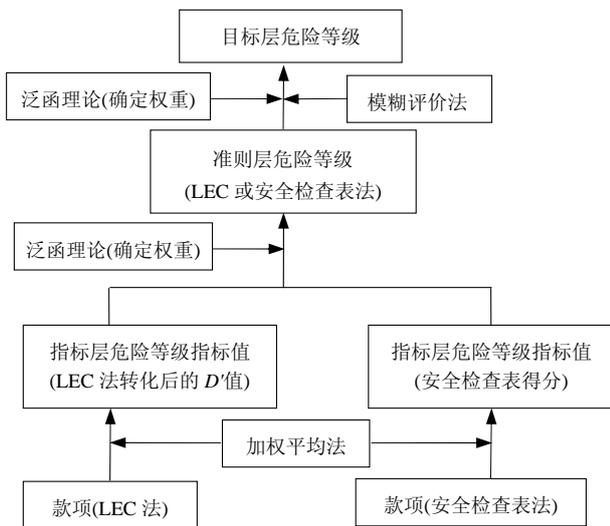


图 1 评价模式框图

Fig.1 Block diagram of assessment model

4.2 泛函理论确定权重

本文运用泛函分析理论确定指标权重, 在确定评价指标的基础上建立评价模型, 并将评价指标体系空间化, 即建立希尔伯特指标空间, 通过权重计算将指标向量与安全指数向量相联系。

(1) 指标空间的标准化

指标层包括 14 项基本指标, 考虑到希尔伯特空间具有良好的数乘性, 建立一个十四维希尔伯特指标空间 H^{14} , 其每一维对应一项评价指标。设 $i = \{i_1, i_2, \dots, i_{14}\}$ 是 H^{14} 的一组标准正交基, 指标向量 Z 是原始指标在 H^{14} 上的分布, 向量 T 是考虑各指

标权重后的空间。则指标向量 Z 可表示为

$$Z = \lambda_1 i_1 + \lambda_2 i_2 + \dots + \lambda_{14} i_{14} \tag{1}$$

且存在映射 ∇ (权重向量)使得

$$T = \nabla Z = \nabla_1 \lambda_1 i_1 + \nabla_2 \lambda_2 i_2 + \dots + \nabla_{14} \lambda_{14} i_{14} \tag{2}$$

(2) 准则层因子权重的确定

准则层包括盾构施工准备、盾构施工、盾构拆除、施工过程公用工程 4 个准则层指标, 4 个准则层指标权重的确定方法为: 将一个地铁土压平衡盾构隧道施工安全状况的判别归结为此 4 个准则层指标, 准则层指标的权重系数 c_k [5] 为

$$c_k = \frac{\sum_{j=1}^4 \sum_{s=1}^n l_{kjs}}{\sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{s=1}^n l_{kjs}} \tag{3}$$

式中: B 为准则层类型(施工阶段), 一般取 1~4, 分别对应盾构施工准备、盾构施工、盾构拆除、施工过程公用工程; j 为 B 阶段事故的级别数, 一般取 1~4, 分别对应特大事故、重大事故、大事故、一般事故; s 为 B 阶段第 j 级事故的件数; l_{kjs} 为 B 阶段第 j 级事故中第 s 起事故的综合经济损失额(人员伤亡也折算成经济额)。

(3) 指标层因子权重的确定

各指标相对于准则层的权重可根据事故经济损失率予以确定, 最终确定的指标层因子相对应准则层因子的权重为

$$\nabla_n = S_{B_{ij}} / T_{B_i} \quad (n = 1, 2, \dots, 14) \tag{4}$$

式中: ∇_n 为第 n 项指标对于目标层的权重, $S_{B_{ij}}$ 为第 B_{ij} 指标相对应 B_i 施工阶段的事故经济损失量, T_{B_i} 为第 B_i 施工阶段的经济总投入量。

4.3 评价方法改进

(1) 作业条件危险性评价法改进

作业条件危险性评价法又称 LEC 评价法, 应用于一般作业、施工作业、检修、维修等, 主要适用于局部作业的评价, 不适用于对整个系统的安全评价, 故在根据准则层推导目标层时不使用 LEC 法的分值, 对现有 LEC 评价法进行改进并应用到实际评价中。

针对地铁隧道施工的实际情况, 发生重大事故最不利情况为可能, 但不经常, 此时事件发生的可能性大小 L 取 3; 作业人员在每天工作时间内暴露, 此时暴露于危险环境的频率 E 取 6; 重大事故可造

成数人死亡,此时发生事故产生的后果 C 取 40;因此 D 为 720,即设定地铁隧道施工危险性分值满分为 720(针对其他行业可以设置最不利情况下的 D 的总分),把原作业条件危险性评价法中危险性分值(D)按照总分 720 进行归一化后得到转化后危险性分值(D'),见表 2。

表 2 危险性等级划分表
Table 2 Danger grading table

D	危险程度	D'	危险等级
≥ 320	极危险,不能继续作业	0.44~1.00	极危险
160~320	高度危险,须立即整改	0.22~0.44	较危险
70~160	显著危险,需要整改	0.10~0.22	临界危险
20~70	比较危险,需要注意	0.03~0.10	较安全
< 20	少有危险,可以接受	< 0.03	很安全

注: $D' = D/720$ 。

根据加权平均法对指标层 B_{ij} 里的款项进行权重 e_i 分配,即: $e_i D' = D'_{B_{ij}}$ 。再运用泛函理论对指标层 B_{ij} 进行权重分配,得到 B_i 的 D'_{B_i} ,即得 B_i 的危险等级。

(2) 安全检查表划分危险等级

评价指标体系中使用安全检查表法进行评价的内容是以检查得分来确定危险等级的,可以安全检查表得分划分危险等级,如 91~100 为很安全,71~90 为较安全,60~70 为临界危险,50~59 为较危险,49 及以下为很危险。

5 实例分析

现以盾构法隧道施工为例进行安全评价,建立安全评价模式,准则层以隧道施工为例,指标层以盾构推进为例,具体款项以盾构推进为例进行分析。

5.1 建立评价指标体系

参考大量盾构法隧道施工方面的文献,可以把盾构法隧道施工确定为目标层,准则层可以分为盾构施工准备,盾构施工,盾构拆除和施工过程公用工程等,各个准则层又分为若干个指标层,建立评价指标体系见表 3^[6, 7],其中对盾构施工准备 B_1 和盾构施工 B_2 进行 LEC 评价。其余 2 层则采用安全检查表法评价。

5.2 权重计算

以准则层的盾构施工进行 LEC 评价,评价指标及各款项见表 4^[8~14]。 B_{ij} 层次以盾构推进为例运用

LEC 法结合加权平均进行评价,得到盾构推进的危险性分值(转化后)为 0.169,属于“临界危险”状态;

表 3 盾构法隧道施工风险层次表^[6, 7]

Table 3 Risk level table of shield tunnel construction^[6, 7]

准则层	指标层及所使用的评价方法
盾构施工准备 B_1	盾构竖井修建 B_{11}
	盾构拼装(吊装作业) B_{12}
	临电、通风设备安装 B_{13}
	人员准备 B_{14}
盾构施工 B_2	盾构进出洞作业 B_{21}
	盾构推进 B_{22}
	防水工程 B_{23}
	管片拼装及堆放 B_{24}
盾构拆除 B_3	衬砌背后压浆 B_{25}
	B_{31}
施工过程公用工程 B_4	盾构机械自身安全 B_{41}
	运输(包括盾构作业外运输和隧道运输) B_{42}
	施工用电 B_{43}
	通风 B_{44}

假设运用同样的方法计算得到盾构进出洞作业、防水工程、管片拼装及堆放、衬砌背后压浆的危险性分值(转化后)分别为 0.20, 0.11, 0.06, 0.40。即得: $D_{B_{2j}} = U_2 = \{0.20, 0.169, 0.11, 0.06, 0.40\}$;再运用泛函理论得出 B_{ij} 的权重,以盾构施工为例(采用专家打分法), B_2 各指标权重为 $A_2 = \{0.142, 0.142, 0.287, 0.142, 0.287\}$,准则层权重为 $A = \{0.24, 0.40, 0.20, 0.16\}$ 。同理可以使用安全检查表法的得分划分危险等级,由于安全检查表法评价比较常用,限于篇幅,这里不作详细举例评价。

5.3 模糊综合评判

通过地铁施工企业的经验人士进行打分,结合隶属度函数可确定 U_2 的评价矩阵 R_2 :

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.1 \\ 0.0 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.0 \\ 0.0 & 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

U_2 的一级模糊评价为

$$A_2^0 R_2 = \{0.057, 0.214, 0.400, 0.243, 0.086\} \quad (6)$$

因此, 盾构施工属于“临界危险”状态。同样可得

$$A_1^0 R_1 = \{0.06, 0.35, 0.24, 0.13, 0.22\} \quad (7)$$

表 4 盾构施工 LEC 法款项示例评价表^[8~14]

Table 4 Sample assessment form of items in shield construction by method of LEC^[8~14]

指标层及得分	款项及权重	L	E	C	D	D'
盾构进出洞作业, 0.200	-	-	-	-	-	-
	盾构千斤顶推力不均匀, 权重为 0.05	3.0	6	3	54	0.075
	盾构在地层中没有按照设计轴线推进, 权重为 0.05	1.0	6	7	42	0.058
	没有及时向衬砌背后的空隙注浆, 从而导致地层移动或影响固定衬砌环位置, 权重为 0.10	1.0	6	40	240	0.333
	安装或拆除盾构操作不当引起工作井被损坏, 权重为 0.02	0.5	6	7	21	0.029
	地层含水量过大, 权重为 0.05	3.0	3	40	360	0.500
	衬砌拼装不规范, 权重为 0.03	1.0	6	7	42	0.058
	隧道上方重力过大, 权重为 0.05	1.0	3	40	120	0.167
	隧道衬砌强度的安全系数核算错误, 权重为 0.05	0.5	6	7	21	0.029
	由于地层中的应力变化而发生的地基变形, 权重为 0.05	1.0	6	40	240	0.333
	开挖面围岩的凹陷和扰动, 权重为 0.05	1.0	6	40	240	0.333
盾构推进, 0.169	盾构掘进时岩石的扰动, 权重为 0.05	3.0	6	7	126	0.175
	在盾尾空隙的衬背灌浆不充分, 权重为 0.05	3.0	6	7	126	0.175
	蛇行修正、曲线施工等场合过大的超挖, 权重为 0.05	1.0	6	40	240	0.333
	刀具更换时刀盘非期望旋转, 权重为 0.05	1.0	3	7	21	0.029
	更换刀具时, 开挖面不稳定, 未采取有效措施, 权重为 0.05	1.0	3	15	45	0.063
	更换刀具时, 土仓内使用非安全电压而防护又不够, 违规在土仓内动火, 权重为 0.05	3.0	3	15	135	0.188
	更换刀具时, 吊运工具的葫芦、吊绳、吊环等质量不合格或磨损后未及时更换, 权重为 0.05	1.0	3	7	21	0.029
	装刀具时, 刀座空间狭小, 不合理使用工具, 权重为 0.05	3.0	3	7	63	0.088
	机械、电器维修时不按规定挂警示标志, 派人看护, 权重为 0.05	3.0	3	3	9	0.013
	测量移站时与操作手欠沟通, 未停止皮带机的运行, 权重为 0.05	3.0	6	3	54	0.075
防水工程, 0.110	-	-	-	-	-	-
管片拼装及堆放, 0.060	-	-	-	-	-	-
注浆, 0.400	-	-	-	-	-	-

$$A_3^0 R_3 = \{0.06, 0.13, 0.41, 0.30, 0.10\} \quad (8)$$

$$A_4^0 R_4 = \{0.10, 0.26, 0.32, 0.22, 0.10\} \quad (9)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.060 & 0.350 & 0.24 & 0.130 & 0.220 \\ 0.057 & 0.214 & 0.40 & 0.243 & 0.086 \\ 0.060 & 0.130 & 0.41 & 0.300 & 0.100 \\ 0.100 & 0.260 & 0.32 & 0.220 & 0.100 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A^0 R = \{0.064, 0.237, 0.352, 0.224, 0.123\} \quad (11)$$

所以盾构法隧道施工风险属于“临界危险”状态。

6 结 论

(1) 本文运用系统工程学的思想对地铁土压平衡式盾构法隧道施工系统进行危险源辨识。

(2) 目前, 地铁施工行业对安全评价研究很少, 土压盾构法隧道施工系统及子系统的安全程度的评价还没有现成的模式, 本文通过多种安全评价方法的综合利用, 建立了地铁土压平衡式盾构法隧道施工安全评价模式。

(3) 初次尝试综合运用安全检查表法、作业条件危险性评价法、泛函理论及模糊综合评判法等多个评价方法进行评价, 得到指标层及准则层的危险程度, 定性得到目标层的危险等级; 泛函理论的应

用减少了主观性,并使得在实际应用中更具可操作性。

(4) 不同安全评价方法的综合运用,弥补了不同子系统或指标适合不同安全评价方法而又较难向上一层次进行评价的缺点。

(5) 通过对地铁土压平衡式盾构法隧道施工安全评价模式的研究,减少了施工企业安全评价的主观性和随意性,在定量评价施工企业安全状况方面有一定的借鉴意义。

(6) 本文针对整个土压盾构法隧道施工系统建立的评价模式,较为宏观,仅提供一个安全评价的思路,对该评价模式开发系统管理软件,在评价时只需要输入相关数据即可得到评价结果,在实际应用中更具可操作性,具体系统软件开发有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 高秀霞. 土压平衡式盾构施工要点及质量通病的分析防治[J]. 施工技术, 2006, (5): 100 - 102.(GAO Xiuxia. Main points of construction with earth pressure balance shield machine and analysis of quality trouble along with its solution[J]. Construction Machinery, 2006, (5): 100 - 102.(in Chinese))
- [2] 李光晓, 李孜军, 王宁. 施工隧道安全性的模糊综合评价[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(6): 60 - 62.(LI Guangxiao, LI Zijun, WANG Ning. Fuzzy-based appraisal of constructed tunnel safety[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(6): 60 - 62.(in Chinese))
- [3] 谢君琦, 刘双全. 浅谈盾构施工中的地面沉降[J]. 山西建筑, 2008, 34(17): 331 - 332.(XIE Junqi, LIU Shuangquan. Discussion ground setting in the shield construction[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(17): 331 - 332.(in Chinese))
- [4] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 均匀软质地层条件下土压平衡盾构施工的合理顶进推力分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 79 - 85.(XU Qianwei, ZHU Hehua, LIAO Shaoming, et al. Analysis of reasonable thrust force during tunnel excavation in homogeneous soft ground by use of earth pressure balance shield machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 79 - 85.(in Chinese))
- [5] 郭政政, 唐优华. 单司机值乘安全性评价模型[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 107 - 113.(GUO Zizheng, TANG Youhua. Safety evaluation model for the on-duty operation of single locomotive driver[J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 107 - 113.(in Chinese))
- [6] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(ZHOU Wenbo. Shield tunnel construction technology and application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [7] 陈小雄. 现代隧道工程理论与隧道施工[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.(CHEN Xiaoxiong. Modern theory of the tunnel and the tunnel construction project[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006.(in Chinese))
- [8] 边金, 陶连金, 郭军. 盾构隧道开挖引起的地表沉降规律[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 247 - 254.(BIAN Jin, TAO Lianjin, GUO Jun. The ground settlement monitoring of a shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 247 - 254.(in Chinese))
- [9] 晁东辉, 张得焯, 罗春泳. 检测盾构施工中注浆效果的模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 62 - 65.(CHAO Donghui, ZHANG Dexuan, LUO Chunyong. Model test on the grouting effect in shield construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 62 - 65.(in Chinese))
- [10] 周诗俊, 王金安. 曲线隧道盾构引起地表沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 909 - 913.(ZHOU Shijun, WANG Jin'an. The surface settlement analysis of curved tunnel shield[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 909 - 913.(in Chinese))
- [11] HURRELL M R. The empirical prediction of long-term surface settlements above shield-driven tunnels in soil[C]// Proceedings of the Second International Conference of Ground Movements and Structures. London: Pub. Pentech Press, 1984: 161 - 170.
- [12] FANG Y S, LIN S J, LIN J S. Time and settlement in EPB shield tunnelling[J]. Tunnels and Tunnelling, 1993, 25(11): 27 - 28.
- [13] 魏纲. 盾构施工引起地面长期沉降的理论计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2960 - 2966.(WEI Gang. Research on theoretical calculation of long-term ground settlement caused by shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2960 - 2966.(in Chinese))