

基于数量化理论 I 的双护盾 TBM 掘进速度预测研究

延艳彬¹, 许健¹, 陈剑², 陆丽娟¹

(1. 甘肃农业大学 工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省水利水电勘测设计研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以甘肃引洮一期工程 9# 隧洞为例, 引入数量化理论 I 的建模原理和方法, 建立了定性数据包括围岩类别和地下水情况 2 个解释变量, 定量数据包括单轴抗压强度、抗拉强度、泊松比和变形模量 4 个解释变量的预测模型, 研究了双护盾 TBM 施工掘进速度的影响因素, 并从理论上证实了该预测模型的可靠性。结果表明: 在同等围岩力学参数条件下, 围岩稳定性越好越有利于 TBM 的施工, 反之则会阻碍施工进度, 且阻碍效应会随着地下水的增多而增强; 岩石的泊松比、抗拉强度对 TBM 掘进速度呈显著正效应, 而单轴抗压强度和变形模量呈负效应。通过对实测值和预测值的比较发现, 二者掘进速度的相对误差绝对值为 0.23% ~ 5.38%, 平均值为 0.39%, 说明预测模型用于双护盾 TBM 掘进速度的预测是可靠的, 并可用于同类工程施工进度的预测和工程进度的控制管理。

关键词: 水利施工; 长隧洞; 双护盾 TBM; 掘进速度; 数量化理论 I; 引洮工程

中图分类号: TV672.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0200-06

Research on forecast of driving speed of double – shield TBM based on quantitative theory I

YAN Yanbin¹, XU Jian¹, CHEN Jian², LU Lijuan¹

(1. The Engineering College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Irrigation and Hydroelectricity Survey and Designing Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking the 9# tunnel of Tao River diversion project phase one in Gansu province for example, the paper introduced the modeling principle and method of quantitative theory. It set up the qualitative data including two explanatory variables of classification of surrounding rock and groundwater conditions, and the quantitative data including four explanatory variables of uniaxial compressive strength, tensile strength, Poisson's ratio and deformation modulus so as to study the influence factors of driving speed of TBM in double shields and verify the reliability of the prediction model in theory. The results showed that under the same condition of mechanical parameters of surrounding rock, the better the stability of surrounding rock, the more favorable the construction of TBM, otherwise it will hinder the construction schedule and the negative effect of the uniaxial compressive strength enhanced with the increase of groundwater; the tensile strength index and Poisson's ratio of rock has significant positive effect to driving speed of TBM, the uniaxial compressive strength and deformation modulus shows a negative effect. By comparing the measured driving speed with the predicted one, it found that the absolute value of relative error between them is 0.23% ~ 5.38%, the average value is 0.39%, which illustrated that the prediction of driving speed for double-shield TBM by the forecast model is reliable. The model can be used to forecast the construction progress and control management of project progress of similar projection.

Key words: construction of conservancy project; long tunnel; double-shield TBM; driving speed; quantitative theory I; Taohe river water diversion project

收稿日期: 2015-01-08; 修回日期: 2015-04-02

基金项目: 国家批复引洮工程科学研究基金 (YT374-ZX33-09107)

作者简介: 延艳彬 (1990-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事水工结构方面的研究。

通讯作者: 许健 (1968-), 男, 甘肃靖远人, 高级工程师, 副教授, 主要从事水利水电工程方面的研究工作。

长隧洞是铁路、公路、水利等工程项目控制工期的关键。合理预测和有效控制长隧洞的工期是各类工程施工进度管理的核心工作之一。近年来,随着隧洞及地下工程的快速发展,机械化隧洞掘进技术得到了广泛的应用、发展。全断面隧洞掘进机(tunnel boring machine, TBM)因其施工效率高、隧洞成型好、对周边环境影响小及作业安全等优点成为国内外深埋长隧洞施工的首选^[1-2]。但采用 TBM 施工长隧洞要合理预测其工期十分困难^[3]。工程实践和理论研究表明,影响 TBM 掘进速度的主要因素有地质条件和机械参数^[4-6]。其中,工程地质条件又包括岩石力学参数、地质构造和水文地质环境等。目前掘进速度 PR 的预测模型种类繁多,但各类模型都有其自身的局限性。一类典型代表为完全经验模型和半理论半经验模型^[7],两者都依托于现场施工资料,以岩石力学参数和机械参数为参考变量进行掘进速度(penetration rate, PR)的预测模拟。所选参数均为定量数据,故其在复杂工程条件下有一定的局限性^[8]。另一类典型代表则通过岩体质量分类来预测 TBM 的掘进速度。传统的岩体质量分类系统包括 RMR 和 RSR,其初衷是通过整合各类基础数据来评价围岩机构稳定性从而设计围岩支护,虽然与 PR 存在着联系,但预测过程过分强调岩体所处稳定性环境这一地质构造条件所产生的变异,而忽略了岩体力学参数和水文地质环境所造成的影响,导致 PR 与岩体质量分数值的相关性很低,相同分数值岩体对应 PR 的离散性很大^[9]。王旭等^[10]学者以 Maen、Pieve、Cogolo 和 Varzo 4 条隧道为例,说明了尽管岩体稳定性对 TBM 的掘进速度有着重要的影响,但并不能预测 TBM 掘进速度 PR 的原因:影响岩体可掘进性的因素与评价岩体稳定的岩体分类系统的影响因素不一样。

可以看出,无论是完全经验模型和半理论半经验模型,还是岩体分类预测模型,在建模过程中都只考虑了影响 TBM 掘进速度的单方面因素:或定量参数,或定性参数。两类参数指标同等重要,而丢掉部分信息,对揭示其内在规律无疑是不利的。针对以上存在问题,本文以甘肃引洮一期工程 9#隧洞为例

引入数量化理论 I,选取包括定性和定量数据在内的典型参量建立了对 TBM 掘进速度的预测模型。通过预测模型和实例应用两方面比较研究了双护盾 TBM 施工掘进速度,为同类工程掘进速度和施工进度合理预测提供参考。

1 基于数量化理论 I 的建模方法

数量化理论是多元分析的一个分支,根据研究问题的目的不同可分为 I~V 型数量化理论,本文主要应用数量化理论 I。该方法从统计原理出发,将不能用数值表示的资料通过数学处理,使其成为能用数值表示的参量,进而通过不同的分析方法,达到预测、分类等不同目的^[11]。该方法由日本林知已夫于 20 世纪 50 年代提出,目前已在农业、林业、经济、遥感等领域内得到广泛应用,但在工程施工领域,尤其是在对 TBM 掘进速度的建模、预测研究中的应用并不多见。

数量化理论 I 与多元回归分析相对应。回归分析研究的说明变量和基准变量均为定量变量,而数量化理论 I 中的基准变量为定量变量,说明变量为定性变量或兼有定量变量。两者的研究目的相同,即解决预测和控制问题。

在数量化理论中把定性说明的变量称为项目(Item),每个项目下根据研究内容的不同又会设多个分项,每个分项又称为该项目下的一个类目(Category)。例如,在某个具体问题中共考察了 m 个项目 $X_1, X_2, \dots, X_m$,第 j 个项目又设 r_j 个类目 $X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jr_j}$,那么总共有 $\sum_{j=1}^m r_j = p$ 个类目。将 n 个样本的观察值排成 $n \times p$ 阶矩阵 $[\delta_i(j, k)]_{m \times n}$,其中 $\delta(j, k)$ 是第 i 个样品在第 j 个项目的第 k 个类目上的反应值,该值按照下式确定:

$$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个样品属于第 } j \text{ 个项目} \\ & \text{的第 } k \text{ 个类目。} \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \tag{1}$$

当同时考虑 m 个定性变量、 h 个定量变量,观测样本数为 n 时,则有对应的反应矩阵 X_1 :

$$X_1 = \begin{bmatrix} \delta_1(1, 1) & \cdots & \delta_1(1, r_1) & \cdots & \delta_1(m, r_m) & x_{11} & \cdots & x_{1h} \\ \delta_2(1, 1) & \cdots & \delta_2(1, r_1) & \cdots & \delta_2(m, r_m) & x_{21} & \cdots & x_{2h} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ \delta_n(1, 1) & \cdots & \delta_n(1, r_1) & \cdots & \delta_n(m, r_m) & x_{n1} & \cdots & x_{nh} \end{bmatrix} \tag{2}$$

假定基准变量与各项目、类目的反应存在线性对应关系,第*i*个样品观测的定量数据为 $x_i(u)$,则有数学模型:

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j,k) b_{jk} + \sum_{i=1}^h b_i x_i(u) + \varepsilon_i$$

$i = 1, 2, \cdots, n$

(3)

式中: b_{jk}, b_i 是待定的常数; ε_i 是第*i*次抽样的随机误差,且满足以下条件:

- (1) 各个 $\varepsilon_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 相互独立;
- (2) ε_i 的数学期望 $E(\varepsilon_i) = 0$;
- (3) 诸 ε_i 具有相同的方差 $D(\varepsilon_i) = \sigma^2$ 。

由公式(1) ~ (3),根据最小二乘法估计 b_{jk}, b_i ,令

$$q = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$
$$= \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} b_{jk} \delta_i(j,k) - \sum_{i=1}^h b_i x_{iu} \right)^2$$
$$= (Y - \hat{X}b)^T (Y - \hat{X}b) = \min$$

(4)

其中: X 是说明变量的反应矩阵

$$Y = [y_1, y_2, \cdots, y_n]^T$$
$$\hat{b} = [b_{11}, \cdots, b_{1r_1}, b_{21}, \cdots, b_{m1}, \cdots, b_{mr_m}, \cdots, b_1, b_2, \cdots, b_h]^T$$

欲使*q*达到最小的必要条件是:

$$\frac{\partial q}{\partial b} = -2X^T(Y - \hat{X}b) = 0$$

即: $X^T \hat{X} b = X^T Y$

(5)

数量化理论作为定性数据向定量数据转化的依据,其精度检验及预测评价同多元线性回归模型。

2 实例应用

2.1 工程及地质概况

甘肃省引洮供水一期工程总干渠 9#隧洞是本工程最长的一条隧洞,全长 18 275 m(桩号 67+369~85+644),设计横断面型式为圆型,净断面尺寸(直径) $D=4.96$ m,设计纵坡为 1/1650。工程采用一台全新的硬岩双护盾全断面掘进机,标定开挖直径 5.75 m。隧洞穿越薄层黄土覆盖的中低山岭梁区,最大埋深 444 m。

工程区位于秦岭东西向构造带之西秦岭褶皱带与河西构造体系两大构造体系的复合部位。工程围岩类别为 II ~ V 类,其中 II、III 类围岩长度为 8 240 m,IV、V 类围岩长度为 10 035 m,IV、V 类围岩占隧洞总长的 54.91%;地下水类型多样,水文地质条件复杂,隧洞绝大部分地段处于区域地下水位以下。

2.2 模型变量选取

对于数量化理论模型,最重要的就是合理设置评价的项目和类目^[12]。参考已有研究成果,在考虑岩石主要力学参数的基础上,收集、整理了反应隧洞地质构造和水文地质环境的典型定性参数:围岩类别和地下水情况。岩石力学参数是影响 TBM 施工效率的主要因素之一^[13],其数值大小又受地下水环境的影响而变化;围岩稳定分类是包含围岩节理、裂隙性状在内的结构稳定性表征,不同的稳定性环境对应了不同的掘进方案,能显著改变岩石力学参数对 PR 产生的影响。在假定施工过程中能对 TBM 实施科学、有效的操作并进行参数调整的前提下,以上参数又很好的对应特定盾构机的掘进参数,而无需再次引入机械参数的参量^[14]。模型中初始考虑的影响因素设置如表 1。

表 1 TBM 掘进速度的预测的影响因素初始设置

目标变量	参量	项目	类目(反应矩阵中形式)
掘进速度 Y (PR)	定性参量	围岩类别	II (0,0)
		(围岩 1,	III (1,0)
		围岩 2)	IV (0,1)
			V (1,1)
			滴渗(0)
	定量参量	地下水情况	线流(1)
		单轴抗压强度	
		泊松比	
		抗拉强度	实值
		变形模量	
		弹性模量	

2.3 模型建立及求解分析

试验数据采集为电子采集与人工采集相结合的方式。现自隧洞进口至出口随机抽取 9 个试验段实测数据资料作样本展示(如表 2)。其中,因隧洞处于区域地下水位以下,故直接考虑地下水对岩石力学参数的影响,表中所列举的参数均为饱和水状态下对应的数值。

根据数量化理论 I 的原理进行数据预处理,采用 Spss 多元线性回归求解工具,以最小二乘法理论为依据,在初始设置解释变量的基础上,逐步删除不显著的解释变量,求解正则方程(式 6),最终得到定性参数包括围岩类别和地下水情况 2 个解释变量,定量参数包括单轴抗压强度、泊松比、抗拉强度和变形模量 4 个解释变量的预测模型(式 6),得到的模型参数估计结果如表 3、4 所示:

$$Y(\text{PR}) = \beta_0 + \beta_1(\text{Rock1}) + \beta_2(\text{Rock2}) + \beta_3(\text{Rb}) + \beta_4(\text{groundwater}) + \beta_5(\text{P. ratio}) + \beta_6(c) + \beta_7(\text{Eb}) \quad (6)$$

a. 因变量: $Y(\text{PR})$

得到系数矩阵:

$$\hat{b} = [3.613, -0.028, -2.806, -0.050, -0.268, 5.406, 0.748, -0.196]^T \quad (7)$$

表 2 研究区部分试验段资料

组编号	重复	围岩类别	地下水情况	单轴抗压强度/MPa	泊松比	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	抗拉强度/ MPa	变形模量/ 10 ⁴ MPa	掘进速度/ (m·h ⁻¹)
1	1	Ⅲ	滴渗	58.50	0.23	2.25	1.00	1.40	2.46
	2			58.50	0.23	2.25	1.00	1.40	2.74
	3			58.50	0.23	2.25	1.00	1.40	2.86
2	1	Ⅳ	线流	1.00	0.30	2.30	1.00	1.40	2.69
	2			1.00	0.30	2.30	1.00	1.40	2.60
	3			1.00	0.30	2.30	1.00	1.40	2.50
3	1	Ⅳ	滴渗	1.50	0.30	1.70	0.20	0.07	2.11
	2			1.50	0.30	1.70	0.20	0.07	2.42
	3			1.50	0.30	1.70	0.20	0.07	2.83
4	1	Ⅲ	滴渗	64.00	0.22	2.30	1.20	1.60	1.99
	2			64.00	0.22	2.30	1.20	1.60	2.38
	3			64.00	0.22	2.30	1.20	1.60	2.16
5	1	Ⅴ	滴渗	1.50	0.32	1.00	0.10	0.012	2.34
	2			1.50	0.32	1.00	0.10	0.012	2.72
	3			1.50	0.32	1.00	0.10	0.012	2.38
6	1	Ⅴ	线流	2.00	0.32	1.00	0.10	0.012	2.23
	2			2.00	0.32	1.00	0.10	0.012	2.20
	3			2.00	0.32	1.00	0.10	0.012	2.25
7	1	Ⅲ	线流	62.00	0.20	2.30	1.20	1.60	1.92
	2			62.00	0.20	2.30	1.20	1.60	1.90
	3			62.00	0.20	2.30	1.20	1.60	1.97
8	1	Ⅴ	滴渗	11.00	0.33	1.20	0.12	0.01	1.93
	2			11.00	0.33	1.20	0.12	0.01	2.29
	3			11.00	0.33	1.20	0.12	0.01	2.33
9	1	Ⅱ	滴渗	62.00	0.20	3.15	1.50	3.80	2.10
	2			62.00	0.20	3.15	1.50	3.80	2.05
	3			62.00	0.20	3.15	1.50	3.80	1.92

注:隧洞处于区域地下水位以下,故直接考虑地下水对岩石力学参数的影响,表中所列举的参数均为饱和水状态下对应的数值。

表 3 模型预测精度参量

模型	R	R^2	调整 R^2	剩余标准差 s
1	0.897	0.804	0.782	0.175

从 TBM 掘进速度完整模型的参数估计结果来看,其预测变量与初始设置比较,剔除了不显著解释变量:弹性模量(E);模型的各个参数表征显著性水平的 P 值均小于 0.05,模型整体拟合度对应的调整 R 方值为 0.782,剩余标准差为 0.175,说明完整模型中各解释变量的显著性及模型整体拟合程度良

表 4 TBM 掘进速度完整模型参数估计结果

变量	B 值	标准误差	标准系数	T 值	Sig.
(常量)	3.613	0.829		4.359	0
围岩 1	-0.028	0.088	-0.050	-1.317	0.025
围岩 2	-2.806	0.526	-5.062	-5.330	0
单轴抗压强度	-0.050	0.008	-5.170	-6.304	0
地下水情况	-0.268	0.071	-0.433	-3.768	0
泊松比	5.406	2.020	1.002	1.790	0.009
抗拉强度	0.748	0.172	1.529	4.359	0
变形模量	-0.196	0.052	-0.976	-3.741	0

a. 因变量 Y(PR)

好,基于数量化理论模型进行 TBM 掘进速度的研究分析是可靠的。其中,变形模量(E_b)与弹性模量(E)在定义的表达式上是一致的,都是应力与应变的比值。前者拟合度更好,从而剔除后者,其根本原因是变形模量(E_b)是通过现场载荷试验求得,精度较好;弹性模量需通过实验室试验求得,对于部分软岩段隧洞,很难具备完整采样进行实验室试验的条件,其值多通过换算得到,精度较差。

由预测模型(6)式及系数矩阵(7)式可以看出,双护盾 TBM 掘进速度与围岩稳定性分类、地下水情况、岩石单轴抗压强度、泊松比、抗拉强度和变形模量密切相关;综合考察模型中常量、地下水条件与围岩类别的参数估计结果,并将其看作不同围岩地质条件对应岩石的初始掘进速度。滴渗条件下:II 类围岩 3.613 m/h ($3.613 + [0, 0] [-0.028, -2.806]^T = 3.613\text{ m/h}$), III 类围岩 3.585 m/h ($3.613 + [1, 0] [-0.028, -2.806]^T = 3.585\text{ m/h}$), IV 类围岩 0.807 m/h ($3.613 + [0, 1] [-0.028, -2.806]^T = 0.807\text{ m/h}$), V 类围岩 0.779 m/h ($3.613 + [1, 1] [-0.028, -2.806]^T = 0.779\text{ m/h}$)。可以看出,II~V 类围岩的初始掘进速度呈递减趋势,III 类围岩与 IV 类围岩作为主要分界点,初始掘进速度下降明显,说明在同等围岩力学参数及地下水情况条件下,好的围岩稳定性更有利于 TBM 的施工,反之则会阻碍施工进度。线流条件下对应系数为 -0.268 ,表明地下水的增多会降低同等条件下 TBM 的掘进速度。

考察各岩石力学参数的估计结果。可以看出,岩石的泊松比、抗拉强度对 TBM 掘进速度呈显著正效应,而单轴抗压强度和变形模量呈负效应,这与前人研究经验相符,且自变量系数分别为 5.406 、 0.748 和 -0.050 、 -0.196 ,这与卢瑾等^[15]通过计算机模拟及实际工程检测结果趋于一致,这充分说明该模型的合理性,同时佐证了卢瑾等人采用的三维离散元程序 3DEC 对 TBM 掘进速度模拟的可行性。

3 模型检验

为考察依据多层线性模型原理建立模型的预测能力,在样本预留检测数据中随机抽取 15 组进行掘进速度的预测,分析掘进速度预测值与实测值之间的残差和相对误差(表 5)。

由表 5 可以看出,基于数量化理论 I 建立的 TBM 掘进速度预测模型残差绝对值范围为 $0.005 \sim 0.141\text{ m/h}$,残差平均值为 0.055 m/h ;相对误差范

围为 $0.23\% \sim 5.38\%$,平均值为 2.85% ;随机抽样预测值对实测值的预测精度良好,能够达到准确的预测效果。

表 5 实测与预测结果对比

编号	掘进速度 实测值/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	掘进速度 预测值/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	预测残差/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	预测相对 误差/%
1	2.290	2.223	(0.067)	(2.938)
2	2.100	2.014	(0.087)	(4.133)
3	2.630	2.489	(0.141)	(5.375)
4	2.339	2.427	0.088	3.746
5	2.381	2.427	0.046	1.930
6	1.903	1.940	0.037	1.943
7	2.163	2.180	0.017	0.764
8	2.263	2.377	0.114	5.015
9	2.445	2.434	(0.011)	(0.443)
10	2.147	2.153	0.005	0.252
11	2.389	2.373	(0.016)	(0.684)
12	2.415	2.489	0.074	3.051
13	2.047	2.014	(0.034)	(1.641)
14	1.923	2.014	0.091	4.732
15	2.334	2.329	(0.005)	(0.225)

4 结 语

(1)基于数量化理论 I 的建模原理和方法,引入工程实例,对双护盾 TBM 的掘进速度进行了研究,建立了定性数据包括围岩类别和地下水情况 2 个解释变量,定量数据包括单轴抗压强度、抗拉强度、泊松比和变形模量 4 个解释变量的预测模型,并从理论上证实了该预测模型的可靠性。

(2)预测模型显示,II~V 类围岩的初始掘进速度呈递减趋势,III 类围岩与 IV 类围岩作为主要分界点,初始掘进速度下降明显,说明在同等围岩力学参数条件下,好的围岩稳定性更有利于 TBM 的施工,反之则会阻碍施工进度。

(3)岩石的泊松比、抗拉强度对 TBM 掘进速度呈显著正效应,而单轴抗压强度和变形模量呈负效应,这与前人研究经验相符,且自变量系数分别为 5.406 、 0.748 和 -0.050 、 -0.196 。与卢瑾等学者通过计算机模拟的结果基本一致,系数的些许差异可能是由于本文更全面的考虑了岩体稳定性及地下水情况对 TBM 掘进速率的影响。

(4)利用模型预测了甘肃引洮供水一期工程 9#

隧洞 TBM 施工掘进速度,通过与实测数据比较发现,二者的相对误差值为 0.23% ~ 5.38%,平均值为 2.85%,说明预测模型用于施工进度预测和控制管理是可靠的。

参考文献:

- [1] 王梦恕,李典璜,张镜剑,等.岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M].北京:中国铁道出版社,2004.
- [2] Voerckel M. Tunnelling with TBM, state of the art and future development. Progress in Tunnelling after 2000, Proceedings of the AITES – ITA 2001 World Tunnel Congress Milan – Italy 10th – 13th June 2001, Volume II, 493 – 500.
- [3] 尹俊涛,尚彦军,傅冰骏,等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J]. 工程地质学报,2005,13(3):389 – 397.
- [4] Sanio H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985,22(3):153 – 161.
- [5] 何於琰. TBM 施工进度的科学预测方法[J]. 铁道工程学报,1999(2):94 – 98.
- [6] 温森,赵延喜,杨圣奇. 基于 Monte Carlo – BP 神经网络 TBM 掘进速度预测[J]. 岩土力学,2009,30(10):3127 – 3132.
- [7] Rostami J, Ozdemir L. A new model for performance pre-

diction of hard rock TBM [C]//. Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference. Las Vegas; Bowerman L D, 1993.

- [8] Rostami J, Ozdemir L, Nilson B. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models [C]//. Proceedings of the Annual Conference of the Institution of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, 1996.
- [9] Sapigni M, Berti M, Bethaz E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6):771 – 788.
- [10] 王旭,李晓,李守定. 关于用岩体分类预测 TBM 掘进速率 AR 的讨论[J]. 工程地质学报,2008,16(4):470 – 475.
- [11] 袁志发,孟德顺. 多元统计分析[M]. 陕西:天则出版社,1991.
- [12] 黄炎和,林敬兰,蔡志发,等. 影响福建省水土流失主导因子的研究[J]. 水土保持学报,2000,14(2):36 – 40 + 54.
- [13] 黄平华. 岩石掘进机(TBM)刀具消耗预测研究[J]. 隧道建设,2008,28(3):373 – 375.
- [14] 宋克志,孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2092 – 2096.
- [15] 卢瑾,高捷,梅稚平. 岩石力学参数对 TBM 掘进速率的影响分析[J]. 水电能源科学,2010,28(7):44 – 46.

(上接第 199 页)

参考文献:

- [1] 解家毕,孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术,2009,40(12):124 – 128.
- [2] 徐耀,张利民. 土石坝溃口发展模式研究[J]. 中国防汛抗旱,2007(Z1):18 – 21 + 71.
- [3] 解家毕,孙东亚. 水库大坝溃决模拟方法研究进展[J]. 中国防汛抗旱,2007(Z1):13 – 17 + 56.
- [4] 张建云,李云,宣国祥,等. 不同粘性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学(E 辑),2009,39(11):1881 – 1886.
- [5] 陈生水,钟启明,任强. 土石坝漫顶破坏溃口发展数值模型研究[J]. 水利水运工程学报,2009(4):53 – 58.
- [6] 黄金池,何晓燕,张葆蔚. 土石坝溃口流量计算模型的比较研究[J]. 中国防汛抗旱,2007(Z1):8 – 12.
- [7] Franca M J, Almeida A B. A computational model of rock-fill dam breaching Caused by overtopping (RoDaB) [J].

Journal of Hydraulic Research, 2004, 42(2):197 – 206.

- [8] 王立辉,潘存鸿,鲁海燕,等. 堆石坝溃口流量过程计算[J]. 水电能源科学,2010,28(9):48 – 51.
- [9] 王兆印,黄金池,苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲刷率[J]. 泥沙研究,1998(1):1 – 11.
- [10] Fread D L,刘晓伟. 土坝失事洪水演算模型——Breach 模型[J]. 水文科技情报,1991(4):48 – 50
- [11] Fread D L. A breach erosion model for earthen dams, National weather service (NWS) report[R]. Nation Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, 1984.
- [12] 蒋跃楠,吴继敏. 基于能量原理的均质土坡临界坡高计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(6):693 – 697.
- [13] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:441 – 459.
- [14] 谢任之. 溃坝水力学[M]. 济南:山东科学技术出版社,1993.