

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1897-05

基于投影寻踪插值模型的围岩稳定性分类研究

陈广洲^{1,2}, 徐晓春², 汪家权², 解华明¹

(1. 安徽建筑工业学院 环境工程系, 合肥 230022; 2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 由于受到多种因素的综合作用, 因此对围岩稳定性进行准确分类是一个难题。选取影响围岩分类的 5 个主要因素, 根据分类标准, 采用在每级标准中随机内插的方法, 得到 50 个标准样本, 用于构建分类模型。针对上述复杂优化模型, 采用遗传算法进行优化, 以获得的最佳投影方向为基础, 得到围岩稳定性分类的投影寻踪插值模型。实例分析表明: 该模型分类结果是准确和可靠的, 与采用其他几种分类方法所得结论一致。此外, 该模型可以得出每个样本的具体得分值, 即使对属于同一级的样本也可以排出它们的优劣顺序, 因而具有较高的分类精度, 是一种更具有应用前景的新方法。

关 键 词: 围岩稳定性分类; 投影寻踪插值模型; 遗传算法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Classification of surrounding rock stabilities based on projection pursuit interpolation model

CHEN Guang-zhou^{1,2}, XU Xiao-chun², WANG Jia-quan², XIE Hua-ming¹

(1. Department of Environmental Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Because of multifactor synthetic effect, accurate classification of surrounding rock mass stability has always been a difficult problem. Five key factors are chosen to construct the model. In addition, because of few standard samples, fifty standard samples are produced by the way of stochastic interpolation on basis of classification standard. Aiming at the above complex optimization, genetic algorithm is used to get the optimal projection direction. On the basis of the direction, projection pursuit interpolation model is given. Subsequently, five unknown samples are classified based on the model. The classification results are consistent with that from other methods. Therefore, it is effective and reliable. Moreover, particular score of each sample could be computed by the model; so it has more precise classification and is a more promising method.

Key words: surrounding rock stability classification; projection pursuit interpolation model; genetic algorithm

1 引 言

围岩作为工程中的一类特殊岩体, 它的稳定状况将直接影响到生产和安全问题。由于受到多种因素的综合影响, 因而对其进行准确的分类具有重要的工程指导意义。早期的单指标分类大多是从岩石的物理力学性质出发, 而不能充分反映自然界中岩体的综合特征, 导致评价结果与实际有偏差。自 20 世纪 50~60 年代开始, 工程岩体分类问题引起了国外岩土工程界的广泛关注。国外学者提出了许多工程岩体分类方法, 以巴顿等国外学者提出的以岩体质量为依据的新围岩分类, 综合考虑了多种影响围

岩稳定的因素和岩体力学的特征参数, 并且综合考虑了衬砌设计和施工方法、处理措施等, 从而能较好地工程服务^[1]。20 世纪 70 年代以后, 国内岩土工程人员也开始研究工程岩体分类方法, 并系统地总结了国内外的研究成果及工程经验, 制定了一些工程岩体分类的国家规范, 修订了相关的行业标准。影响工程岩体稳定性的因素是多种多样的, 目前在国内外的工程岩体分级方法中常考虑的因素有: 岩石的物理力学性质、结构面发育情况、地下水环境条件、地应力环境条件、工程类别等^[2]。因此, 多种因素综合分类的方法日益受到重视。

传统的多因素评价方法一般是通过对大量数据

收稿日期: 2009-02-23

基金项目: 安徽省高等学校优秀青年人才基金项目(No. 2010SQRL090); 安徽省教育厅自然科学基金项目 (No. 2006KJ002C)。

第一作者简介: 陈广洲, 男, 1978 年生, 博士研究生, 讲师, 主要从事环境评价, 资源、环境信息技术方面的研究。E-mail: chgzha@ai.ai.edu.cn

进行回归分析、聚类分析等来求得分类模式,得出的结果不是很好^[3]。近年来,随着模糊数学方法^[4]、灰色系统方法^[5]、神经网络方法^[6]、物元可拓方法^[7-8]、支持向量机^[3]、距离判别法^[9]等在工程中的应用,使得围岩分类更科学化、合理化。

上述评价方法在实践中都取得了一定的成果。围岩稳定性分类问题实质是对围岩稳定性与各影响因素间的函数关系的逼近问题,这种关系是一种非常复杂的非线性关系。因此,采用有效的处理方法就显得非常重要。投影寻踪方法^[10]是近年来出现的用于处理高维数据,尤其是来自非正态总体的一类统计方法,目前已广泛地应用于预测、评价、模式识别、遥感分类、过程优化控制、图像处理等领域。基于此,本文采用投影寻踪插值模型对围岩稳定性分类进行了研究。

2 投影寻踪插值模型

设投影寻踪插值问题的多指标样本集为 $\{x(i, j) | i=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$, 其中, m 为样本的个数, n 为指标个数。设根据已知样本信息产生的经验等级值为 $y(i)$, 对应的样本属性值为 x_{ij} , 建立投影寻踪插值模型的步骤如下。

(1) 数据预处理

对于正向指标, 本文采用 $x_{ij}^* = x_{ij} / \max(x_{ij})$; 对于负向指标, 采用 $x_{ij}^* = 1 - x_{ij} / \max(x_{ij})$, 将指标值变换到 $[0, 1]$ 区间。

建立等级评价模型就是建立 x_{ij} 与 $y(i)$ 之间的数学关系, 即把 n 维数据 $\{x(i, j) | i=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$ 合成以 $a = (a(1), a(2), \dots, a(n))$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$, 即 $z(i) = \sum_{j=1}^n a(j)x_{ij}^*$, 然后根据 $z(i) \sim y(i)$ 的散点图建立适当的数学模型, 其中 a 为单位长度向量。

(2) 构造投影指标函数

关于具体的目标函数构造详见文献^[10-12]。

(3) 求取最佳投影方向

通过求解下面的优化模型来计算最佳投影方向:

$$\left. \begin{aligned} \text{目标函数: } \max Q(a) &= S_z |R_{zy}| \\ \text{约束条件: } \sum_{j=1}^n a_j^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(4) 投影寻踪插值模型

得到近似最佳投影方向后, 计算各等级样本点的投影值, 根据第 i 个样本的计算的投影值 $z^*(i)$ 与经验等级 $y(i)$, 建立 $z^*(i) - y(i)$ 的散点图, 根据散点图建立投影寻踪插值模型。

3 围岩稳定性分类模型

3.1 评价标准和待分类样本

在目前的围岩稳定性分类中, 考虑的独立因素通常有围岩质量、围岩的完整性和地下水的影响。依据文献^[7], 选取了实测岩体质量指标 D 、反映岩石的强度指标——单轴抗压强度 R_c 、反映岩体完整程度的岩体完整性指数 K_v 、反映地下水影响的地下水渗水量 W 和反映节理性状的节理状况 J 等 5 个因素作为评价的指标, 并采用 5 级分类, 各指标的分类标准列于表 1。

采用文献^[7]中的分类标准和数据, 将围岩的稳定性分为稳定 I、较稳定 II、基本稳定 III、不稳定 IV、极不稳定 V 等 5 个等级, 实例围岩的实测数据见表 2。表 1 中的岩体质量指标 D 是连建发等通过对辽宁 LPG 地下洞储工程钻孔岩块裂隙的分析, 发现其中裂隙的分布具有很好自相似性, 利用分形理论提出的一种用分维数来评价岩体质量的新方法, 并给出了相应的岩体质量的评价标准。

3.2 投影寻踪插值模型构建

3.2.1 数据预处理

为消除指标的量纲和统一指标的变化方向, 进行了数据预处理。在上述各评价标准等级范围内按均匀分布随机产生 10 个样本, 对于每个指标采用同一组随机数值, 共形成 50 个评价样本, 将稳定 I、较稳定 II、基本稳定 III、不稳定 IV、极不稳定 V 分别赋予经验等级 5、4、3、2、1 共 5 个等级, 具体如表 3 所示。

表 1 围岩稳定性分类标准^[7]
Table 1 Standard of surrounding rock mass stability classification^[7]

围岩稳定情况	围岩稳定类别	岩体质量 D	单轴抗压强度 R_c /MPa	岩体完整性指数 K_v	地下水渗水量 $W/L \cdot (\min \cdot 10 m)^{-1}$	节理状况 J
稳定	I	0.00~0.10	200~300	0.75~1.00	0~5	9~10
较稳定	II	0.10~0.25	100~200	0.55~0.75	5~10	7~9
基本稳定	III	0.25~0.40	50~100	0.30~0.55	10~25	4~7
不稳定	IV	0.40~0.60	25~50	0.15~0.30	25~125	2~4
极不稳定	V	0.60~1.00	0~25	0.00~0.15	125~250	0~2

表 2 样本的特征值

Table 2 Characteristics of samples

样本 编号	岩体质量 指标 D	单轴抗压强 度 R_c/MPa	岩体完整 性指数 K_v	地下水渗水量 W $/\text{L} \cdot (\text{min} \cdot 10 \text{ m})^{-1}$	节理状 况 J
1	0.12	185.5	0.89	6	8
2	0.27	176.4	0.80	8	7
3	0.08	158.2	0.94	6	7
4	0.04	201.1	0.97	5	9
5	0.24	181.9	0.92	9	8

表 3 预处理后的标准样本

Table 3 Preprocessed standard samples

岩体质量 指标 D	单轴抗 压强度 R_c	岩体完整 性指数 K_v	地下水渗 水量 W	节理状况 J	经验 等级
0.971	0.909	0.977	0.999	0.987	5
0.966	0.900	0.973	0.998	0.959	5
0.966	0.892	0.966	0.997	0.946	5
0.950	0.852	0.951	0.997	0.944	5
0.947	0.826	0.929	0.996	0.939	5
0.936	0.818	0.863	0.995	0.937	5
0.934	0.814	0.818	0.995	0.934	5
0.918	0.784	0.814	0.987	0.931	5
0.918	0.718	0.808	0.983	0.912	5
0.910	0.695	0.780	0.980	0.904	5
0.857	0.576	0.732	0.979	0.874	4
0.849	0.566	0.729	0.978	0.818	4
0.849	0.559	0.723	0.977	0.792	4
0.826	0.518	0.711	0.977	0.788	4
0.820	0.493	0.693	0.976	0.779	4
0.803	0.485	0.640	0.975	0.773	4
0.801	0.481	0.605	0.975	0.768	4
0.777	0.451	0.601	0.967	0.763	4
0.777	0.385	0.596	0.963	0.724	4
0.765	0.361	0.574	0.960	0.708	4
0.707	0.288	0.527	0.957	0.661	3
0.699	0.283	0.523	0.955	0.577	3
0.699	0.279	0.516	0.950	0.538	3
0.676	0.259	0.501	0.950	0.532	3
0.670	0.246	0.479	0.949	0.518	3
0.653	0.242	0.413	0.946	0.510	3
0.651	0.240	0.368	0.946	0.502	3
0.627	0.226	0.364	0.922	0.494	3
0.627	0.192	0.358	0.909	0.436	3
0.615	0.181	0.330	0.900	0.411	3
0.542	0.144	0.286	0.880	0.374	2
0.532	0.142	0.284	0.869	0.318	2
0.532	0.140	0.280	0.832	0.292	2
0.501	0.130	0.271	0.830	0.288	2
0.493	0.123	0.257	0.824	0.279	2
0.471	0.121	0.218	0.807	0.273	2
0.468	0.120	0.191	0.804	0.268	2
0.436	0.113	0.188	0.644	0.263	2
0.436	0.096	0.185	0.562	0.224	2
0.420	0.090	0.168	0.502	0.208	2
0.284	0.061	0.136	0.475	0.174	1
0.264	0.058	0.134	0.461	0.118	1
0.263	0.056	0.130	0.415	0.092	1
0.201	0.046	0.121	0.413	0.088	1
0.186	0.040	0.107	0.405	0.079	1
0.142	0.038	0.068	0.384	0.073	1
0.136	0.037	0.041	0.380	0.068	1
0.073	0.029	0.038	0.180	0.063	1
0.071	0.013	0.035	0.078	0.024	1
0.040	0.007	0.018	0.003	0.008	1

3.2.2 最佳投影方向的确定

对于上述复杂的非线性优化问题，传统的优化方法很难求解。近年来，随着人工智能的发展，许多智能算法不断出现，如遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、粒子群算法、鱼群算法等。它们相对于传统优化方法，在求解一些复杂的、多维的和目标函数的依赖性方面具有独特的优势。关于如何应用上述方法进行优化求解，具体的建模和求解过程可参考文献[13—14]。本文采用遗传算法进行计算，对约束条件采用惩罚函数进行处理。经过优化，得到相应的最佳投影方向 $\mathbf{x}=[0.435\ 1, 0.443\ 2, 0.467\ 9, 0.364\ 0, 0.512\ 9]$ 。

3.2.3 分类模型的建立

以此方向为基础，计算上述 50 个样本的投影值分别如下：2.152 5, 2.129 8, 2.115 6, 2.082 9, 2.057 1, 2.015 9, 1.991 3, 1.965 0, 1.921 2, 1.889 3, 1.774 9, 1.737 1, 1.716 7, 1.681 1, 1.654 2, 1.615 4, 1.593 3, 1.562 6, 1.509 4, 1.474 1, 1.369 0, 1.318 3, 1.290 8, 1.261 8, 1.235 7, 1.190 5, 1.163 8, 1.132 0, 1.080 1, 1.041 0, 0.945 8, 0.906 4, 0.876 5, 0.851 9, 0.832 3, 0.794 3, 0.776 4, 0.697 0, 0.638 3, 0.590 8, 0.476 4, 0.431 6, 0.398 2, 0.360 1, 0.336 6, 0.287 5, 0.267 9, 0.160 2, 0.093 7, 0.034 0。以经验等级值为纵坐标，以投影值为横坐标，得到两者的散点图，具体见图 1。

从图 1 中可以看出， $z^*(i)$ 与 $y(i)$ 的图形为阶梯形、上升曲线，用 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 、 i 、 j 分段线性插值，得到围岩稳定性分类的投影寻踪插值等级模型，具体如下：

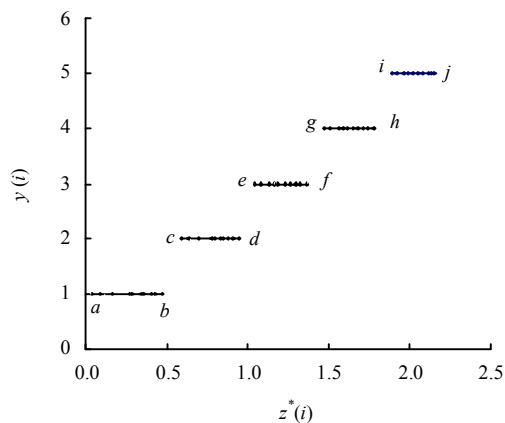


图 1 投影值与经验等级值的散点图

Fig.1 Scatter dots of projection value and its grade

$$y^*(i) = \begin{cases} 1, z^*(i) \leq 0.476 \\ 1 + (z^*(i) - 0.476)/(0.591 - 0.476), & (2) \\ 0.476 < z^*(i) < 0.591 \end{cases}$$

$$y^*(i) = \begin{cases} 2, 0.591 \leq z^*(i) \leq 0.946 \\ 2 + (z^*(i) - 0.946)/(1.041 - 0.946), & (3) \\ 0.946 < z^*(i) < 1.041 \end{cases}$$

$$y^*(i) = \begin{cases} 3, 1.041 \leq z^*(i) \leq 1.369 \\ 3 + (z^*(i) - 1.369)/(1.474 - 1.369), & (4) \\ 1.369 < z^*(i) < 1.474 \end{cases}$$

$$y^*(i) = \begin{cases} 4, 1.474 \leq z^*(i) \leq 1.775 \\ 4 + (z^*(i) - 1.775)/(1.889 - 1.775), & (5) \\ 1.775 < z^*(i) < 1.889 \end{cases}$$

$$y^*(i) = 5, 1.889 \leq z^*(i) \quad (6)$$

将待测样本归一化, 以上述最佳投影方向为基础, 计算的投影值为 1.839、1.664、1.788、1.987、1.791。对应的分类等级分别为: 4.56、4.00、4.11、5.00、4.14, 根据距等级的接近程度, 判定 5 个样本的稳定性分类结果依次为: I、II、II、I、II, 与其他方法的结果比较见表 4。

表 4 不同评价方法的结果
Table 4 Assessment results of different methods

样本	稳定状况				
	模糊模式识别法 ^[15]	可拓评价方法 ^[7]	模糊可变集合法 ^[15]	基于粗集的模糊综合法 ^[16]	本文的方法
1	I	II	II	I	I
2	II	II	II	II	II
3	I	II	II	II	II
4	I	I	I	I	I
5	II	II	II	II	II

由表 4 结果可知, 本文的分类方法与其他评价方法的结果大体相同, 与基于粗集的模糊综合法的分类结果一致。对于样本 1, 与可拓评价法、模糊可变集合法的结果存在差别, 但可拓评价法的结果也是由 II 级偏向于 I 级的^[7]。样本 1 的投影值处于 I 级与 II 级之间, 从计算结果看, 略微偏向 I 级, 故本文将其定为 I 级。通过本文的方法, 可以精确地刻画出样本的具体投影值, 因而本文的方法具有更好的分类精度。

此外, 最佳投影方向各分量绝对值的大小实质上反映了各指标对围岩稳定性分类的影响程度, 各分量绝对值越大, 则对围岩稳定性分类时的影响就

越大, 据此可以进一步找出主要影响因素, 指导工程设计。

4 结 论

(1) 针对围岩稳定性分类中的复杂非线性关系, 利用投影寻踪模型较强的非线性数据处理能力, 构建了围岩分类的投影寻踪插值模型, 该模型可以把多维指标综合成一维指标, 解决了单项评估指标结果不相容的问题。

(2) 针对标准样本量少的问题, 在每级标准之间随机内插构建标准样本集, 对某工程围岩的稳定性分类进行了研究。结果表明: 基于投影寻踪插值模型的识别结果与用其他方法的分类结果基本一致, 该模型是合理、可靠的, 对围岩分类具有很好的适用性。此外, 利用该模型可以得到一个具体的数值, 即使对同属于一类中的不同样本也可以排出优劣顺序, 因而具有较高的分类精度, 是一种更具有应用前景的新方法。

(3) 限于资料, 分类中未能考虑地应力环境等因素的影响。若条件允许, 可以上述分类为基础, 再考虑其他因素的影响, 根据其影响程度, 对结果作一定的修正, 使分类结果更加科学、合理。

参 考 文 献

- [1] 吴继敏. 工程地质学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 臧秀平, 阮含婷, 李萍, 等. 岩体分级考虑因素的现状与趋势分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2245—2248.
ZANG Xiu-ping, RUAN Han-ting, LI Ping, et al. Status and trends analysis of factors considered in rock mass classification methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2245—2248.
- [3] 赖永标, 乔春生, 刘开云. 支持向量机在围岩稳定性分类中的应用[J]. 水利学报, 2006, 39(7): 1092—1096.
LAI Yong-biao, QIAO Chun-sheng, LIU Kai-yu. Application of support vector machine in classification of surrounding rock stability[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, 39(7): 1092—1096.
- [4] 彭振华. 锦州天桥 LPG 洞库场地岩体质量评价研究[硕士学位论文 D]. 北京: 中国地质大学, 2002.
- [5] 赵卫国. 灰色关联分析法在围岩分类中的应用[J]. 山西建筑, 2007, 33(12): 100—101.
ZHAO Wei-guo. Application of grey-related-analysis in wall rock classification[J]. **Shanxi Architecture**, 2007, 33(12): 100—101.

- [6] 董武斌, 胡建华, 张文平. 基于 BP 神经网络的巷道围岩稳定性分级识别[J]. 矿业工程, 2006, 4(6): 14—16.
DONG Wu-bin, HU Jian-hua, ZHANG Wen-ping. Identify the stability classification of the surrounding rock through BP neural network in the mine tunnel[J]. **Mining Engineering**, 2006, 4(6): 14—16.
- [7] 连建发, 慎乃齐, 张杰坤. 基于可拓方法的地下工程围岩评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1450—1453.
LIAN Jian-fa, SHEN Nai-qi, ZHANG Jie-kun. Research on surrounding rock evaluation of underground engineering based on extension method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1450—1453.
- [8] 黄祥志, 余成学. 基于可拓理论的围岩稳定分类方法的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1800—1804.
HUANG Xiang-zhi, SHE Cheng-xue. Research on methods of surrounding rock masses stability classification based on extension theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1800—1804.
- [9] 宫凤强, 李夕兵, 张伟. 隧道围岩分级的距离判别分析模型及应用[J]. 铁道学报, 2008, 30(3): 119—123.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, ZHANG Wei. Study and application on distance discriminant analysis model in tunnel surrounding rock classification[J]. **Journal of The China Railway Society**, 2008, 30(3): 119—123.
- [10] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [11] 刘卫林, 董增川, 童芳. 地下水环境脆弱性评价的遗传投影寻踪插值模型[J]. 水电能源科学, 2006, 24(3): 21—24.
LIU Wei-lin, DONG Zeng-chuan, TONG Fang. Genetic projection pursuit interpolation model of groundwater environmental vulnerability evaluation assessment[J]. **Water Resources and Power**, 2006, 24(3): 21—24.
- [12] 陈广洲, 汪家权. 基于投影寻踪插值模型鉴别化合物毒性的研究[J]. 计算机与应用化学, 2009, 26(1): 121—124.
CHEN Guang-zhou, WANG Jia-quan. Study on identification of toxicity of compound based on projection pursuit interpolation model[J]. **Computers and Applied Chemistry**, 2009, 26(1): 121—124.
- [13] 陈广洲, 汪家权. 模拟退火算法在投影寻踪模型优化中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然版), 2008, 31(8): 1315—1317.
CHEN Guang-zhou, WANG Jia-quan. Application of simulated annealing in the projection direction optimization[J]. **Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)**, 2008, 31(8): 1315—1317.
- [14] 陈广洲, 解华明, 鲁祥友. MATLAB 遗传算法工具箱在非线性优化中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(3): 246—248.
CHEN Guang-zhou, XIE Hua-ming, LU Xiang-you. Nonlinear optimization based on genetic algorithm toolbox of MATLAB[J]. **Computer Technology and Development**, 2008, 18(3): 246—248.
- [15] 陈守煜, 韩晓君. 围岩稳定性评价的模糊可变集合工程法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 23(9): 1857—1861.
CHEN Shou-yu, HAN Xiao-jun. Engineering method of variable fuzzy set for assessment of surrounding rock stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 23(9): 1857—1861.
- [16] 张继宝, 汪明武, 谢慧敏. 基于粗糙集理论的围岩稳定性模糊综合评价[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然版), 2008, 16(2): 85—88.
ZHANG Ji-bao, WANG Ming-wu, XIE Hui-min. A fuzzy assessment method of surrounding rock stability based on rough set theory[J]. **Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry(Natural Science)**, 2008, 16(2): 85—88.

上接第 1896 页

- [13] AUSILIO E, CONTE E. Settlement rate of foundations on unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36(5): 940—946.
- [14] CONTE E. Consolidation analysis for unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2004, 41(4): 599—612.
- [15] DAKSHANAMURTHY V, FREDLUND D G, RAHARDJO H. Coupled three-dimensional consolidation theory of unsaturated porous media[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils. New York: Society of Civil Engineering, 1984: 99—103.
- [16] CONTE E. Plane strain and axially symmetric consolidation in unsaturated soils[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2006, 6(2): 131—135.
- [17] QIN A F, CHEN G J, TAN Y W, et al. Analytical solution to one-dimensional consolidation in unsaturated soils[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2008, 29(10): 1329—1340.