

基于未确知测度理论的基坑边坡稳定性评价

刘汉露¹, 李新生¹, 谢冬洲¹, 毛明浩², 曹伟忠³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院 陕西 西安 710000; 2. 西安铁一院工程咨询监理有限责任公司 陕西 西安 710016;

3. 陕西长嘉工程建设有限公司 陕西 西安 710001)

摘要: 影响基坑边坡稳定的不确定性因素较多, 如基坑规模、场地岩土体性质、施工质量、环境因素等。为了探索科学合理的基坑边坡的稳定性评价方法, 本文基于未确知测度理论, 选取了基坑深度、支护方式、主要土层粘聚力、主要土层内摩擦角、地下水及地表水作用、邻近荷载、邻近荷载坑边距、施工质量八个因素作为评价指标, 利用三标度法结合层次分析法确定各指标权重, 建立基坑边坡稳定性评价模型。将此模型应用于两个基坑工程实例, 对比实际监测结果, 评价结果的可靠度较高。结果表明, 基于未确知测度理论的基坑边坡稳定性评价模型具有可行性。

关键词: 基坑边坡; 稳定性; 未确知测度理论; 评价模型

中图分类号: P642

文献标识码: A

Stability Evaluation of Foundation Pit Based on Unascertained Measure Theory

LIU Hanlu¹, LI Xinsheng¹, XIE Dongzhou¹, MAO Minghao², CAO Weizhong³

(1.College of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710000, China

2.Xi'an Engineering Consultancy& Supervision Co. Ltd. FSDI, Xi'an Shaanxi 710016, China

3. Shaanxi Changjia Construction Engineering Co., Ltd. Xi'an Shaanxi 710001, China)

Abstract: There are many uncertainties affecting the stability of the foundation pit, such as the size of the foundation pit, the soil properties of the site, construction quality, and environmental factors. In order to explore a scientific and rational method for evaluating the stability of foundation pit slopes, based on the unascertained measure theory, this paper selects the depth of foundation pits, supporting methods, main soil layer cohesion, main soil internal friction angle, groundwater and surface, water effect, adjacent load, adjacent load pit margin, and construction quality as evaluation indicators. The weight of each index is determined by using the three-scale method combined with the analytic hierarchy process. The stability evaluation model of the foundation pit is established. This model is applied to two examples of foundation pit engineering. Compared with actual monitoring results, the reliability of evaluation results is credible. The results show that the foundation slope stability evaluation model based on unascertained measurement theory is feasible.

Key words: foundation pit slope; stability; unascertained measure theory; evaluation model

随着城镇化建设步伐的加快, 尤其近几年棚户区改造项目的快速增多, 基坑工程的周边环境也更复杂, 其邻近建筑物、道路动荷载、地下管线的分布等均对基坑边坡稳定造成影响。而今基坑边坡的支护设计理论体系不尽完善^[1], 设计参数选取时对

施工中的一些具有复杂性与不确定性的因素如岩土体性质、施工质量、施工环境等没有事先考虑, 造成了在实际的开挖与支护结构施工过程中依旧存在发生事故的风险的现象, 也出现很多严重事故^[2]。

基坑工程中土性参数、荷载值、支护结构的作

收稿日期: 2018-12-02

基金项目: 国家自然科学基金 (41372330)

作者简介: 刘汉露 (1993-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 从事岩土工程及环境工程地质方面的研究。

用机理、施工工艺、施工建设环境或条件等都具有不确定性,并且相互影响^[3]。未确知测度理论可以考虑多种复杂、不确定性的因素对基坑边坡稳定性的影响,进而构建相应的数学模型^[4-6]。

本文应用未确知测度理论来综合考虑基坑边坡稳定性评价过程中定量及定性指标的影响,建立多评价指标之间的相关关系,提高评价精度与可靠度。进一步结合基于三标度法的层次分析法建立评价模型,结合西安地区的某基坑工程实例得出评价结果,对比基坑监测结果,验证该模型的有效性及其可行性。

1 未确知测度理论

假设有 n 个评价对象,那么评价对象的集合为 $S=[S_1, S_2, \dots, S_n]$, 每个评价对象 $S_i(i=1, 2, \dots, n)$ 有 m 个评价指标,评价指标集合为 $I=\{I_1, I_2, \dots, I_m\}$, a_{ij} 表示第 i 个评价对象 S_i 对第 j 个评价指标 I_j 的测量值,构成 m 维向量 $S_i=[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ 。假设对于每一个子项 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$, 由 p 个评价等级 $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 构成,则评价集合 $U=\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$, $C_k(k=1, 2, \dots, p)$ 为第 k 级评价等级。

1.1 单指标测度

若 $u_{ijk}=u(x_{ij} \in C_k)$ 为响应值 x_{ij} 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度,并且满足以下条件:

$$0 \leq u(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

归一性:

$$u(x_{ij} \in U) = 1 \quad (2)$$

可加性:

$$u\left[x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l\right] = \sum_{l=1}^k u(x_{ij} \in C_l) \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

则称 u 为未确知测度。

1.2 单指标未确知测度矩阵

由各指标测度值 u_{ijk} , 得到评价矩阵 A :

$$A = (u_{ijk})_{m \times p} = \begin{pmatrix} u_{i11} & \dots & u_{i1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{im1} & \dots & u_{imn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

1.3 指标权重的确定

应用基于三标度法的层次分析法^[7-9]确定各指标权重,可以将复杂系统的决策过程数量化,关键

在于根据专家意见在各层次上建立比较矩阵。

三标度理论通过比较两两影响因子之间的重要程度来获取权重,比传统层次分析法的九标度法的更客观、合理,其比较矩阵的构造为:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中 b_{ij} 的计算方法为:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{表示 } i \text{ 比 } j \text{ 重要} \\ 0, & \text{表示 } i \text{ 和 } j \text{ 同等重要} \\ -1, & \text{表示 } i \text{ 不如 } j \text{ 重要} \end{cases} \quad (6)$$

为降低在使用层次分析法时主观因素对判断矩阵和权重计算的不良影响,在此利用最优传递矩阵来得到综合判断矩阵。最优传递矩阵为:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中, $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (b_{in} + b_{nj})$ 则综合判断矩阵为:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, $d_{in} = \exp(r_{in})$ 。

权重的计算值代表了评价指标在评价系统中的重要程度,在此采用“乘积方根法”来进行权重值的计算。

$$\omega_i = \frac{\left(\prod_{n=1}^n d_{in}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{n=1}^n \left(\prod_{n=1}^n d_{in}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (9)$$

则指标权重向量为:

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T \quad (10)$$

1.4 多指标综合测度评价向量

令 $u_{ik}=u(R_i \in C_k)$ 为评价样本, R_i 属于第 k 个评价类 C_k 的程度,则有:

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^m \omega_j u_{ijk} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n; k=1, 2, \dots, p) \quad (11)$$

又因为 $0 \leq u_{ik} \leq 1$ 及 $\sum_{k=1}^p u_{ik} = 1$, 所以式(11)也

是未确知测度, $(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})$ 被称为 R_i 的多指标

综合测度评价向量。

1.5 置信度识别准则

根据置信度识别准则对最终的计算结果进行评价。设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$)^[7], 若 $C_1 > C_2 > \dots > C_n$, 且令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{l=1}^k u_{il} \geq \lambda, (k = 1, 2, 3, \dots, p) \right\} \quad (12)$$

则认为评价样本 R_i 属于第 k_0 个评价类 C_{k_0} 。

1.6 稳定性程度排序

在判别 S_i 的评价等级之后, 还要对各基坑边坡 S_i 的稳定性程度进行排序^[10]。

若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 令 C_i 的分值为 I_i , 则 $I_i > I_{i+1}$, 且有

$$q_{S_i} = \sum_{l=1}^p I_l u_{il} \quad (13)$$

式中 q_{S_i} 为评价对象 S_i 的未确知重要度, 因此 $q=(q_{S_1}, q_{S_2}, \dots, q_{S_n})$ 被称为未确知稳定性程度向量, 可按 q_{S_i} 的大小对评价对象 S_i 的稳定性程度进行排序。

2 基坑边坡评价模型的建立

影响基坑边坡稳定的因素多且复杂, 并且相互影响, 包括工程地质条件、岩土体性质、场地周边环境、施工工艺、水的作用等。本文选取基坑深度^[11]、支护方式^[12]、主要地层粘聚力、主要地层内摩擦角^[13~14]、地表水及地下水影响^[11~16]、邻近荷载^[17]、邻近荷载坑边距^[18]、施工质量^[19]八项影响因素作为评价指标, 分别用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 来表示, 其中支护方式、地表水及地下水影响、施工质量属于定性指标, 采用半定量化的方法进行取值; 基坑深度、主要地层粘聚力、主要

地层内摩擦角、邻近荷载、附加荷载坑边距于定量指标, 用实测值进行评价, 分级标准见表 1。

上述定性指标的赋值与分级主要结合工程实际和经验进行划分。基坑深度等定量指标的取值与分级源于已有的文献资料数据^[11~20]。基坑边坡稳定性影响程度评判集合为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 即 I, II, III, IV 级, 分别表示“稳定”、“较稳定”、“一般稳定”、“不稳定”。

3 基坑工程实例应用

3.1 工程实例

(1) 西安某基坑工程 1

以西安某基坑工程 1 为例, 深度 8.35 ~ 10.83 m, 地貌单元为渭河一级阶地, 地层从上到下依次为填土、黄土状土、粉质黏土 (局部夹中砂透镜体), 鉴于黄土状土与粉质黏土的力学性质差异不大, 在此认为, 场地主要地层为黄土状土 (基坑工程 2 中同理)。由场地勘察报告中, 黄土状土 $C=22$ kPa, $\phi=21^\circ$ 。基坑工程不涉及降水问题。基坑周边环境: 西侧 (支护段 S_1) 有垃圾堆载, 距离 1.3 m; 南、东侧 (支护段 S_2) 周围无建筑物, 距公路边缘线 5.0 m, 动荷载取 30 kPa。

支护方案: 综合考虑基坑工程地质条件和基坑周边的环境条件, 南、东支护段采用复合土钉墙, 西支护段采用排桩支护形式。

(2) 西安某基坑工程 2

西安某基坑工程 2, 深度 10.66 ~ 11.56 m, 地貌单元为皂河一级阶地与二级阶地结合部, 地层从上到下依次为填土、黄土状土、中砂、粉质黏土, 主要地层为黄土状土与粉质黏土, 砂层相对较薄。基坑支护工程不涉及降水问题。基坑周边环境: 西侧、南侧 (支护段 S_3) 有邻近建筑, 距离 1.5 m。北侧和

表 1 基坑边坡稳定性评价指标分级标准

Tab.1 Qualitative evaluation indexes grading standard of foundation pit stability

影响 程度 分级	影响因素							
	基坑深度 X_1/m	支护方式 X_2	主要土层 粘聚力 X_3/kPa	主要土层 内摩擦角 $X_4/^\circ$	地表水及 地下水影响 X_5	邻近荷载 X_6/kPa	邻近荷载 坑边距 X_7/m	施工质量 X_8
I 级 (C_1)	< 4	合理 (1)	> 30	> 30	不严重 (1)	< 30	> 15	好 (1)
II 级 (C_2)	4~6	较合理 (2)	20~30	20~30	较严重 (2)	30~100	10~15	较好 (2)
III 级 (C_3)	6~13	一般合理 (3)	8~20	10~20	严重 (3)	100~200	5~10	一般 (3)
IV 级 (C_4)	> 13	不合理 (4)	< 8	< 10	很严重 (4)	> 200	< 5	差 (4)

东侧(支护段 S_4)周围无堆载及建筑物。

支护方案:综合考虑基坑工程地质条件和基坑周边的环境条件,西、南支护段采用护坡桩+锚索支护形式,北、东支护段采用复合土钉墙(土钉墙+锚杆)。

以上基坑工程的各支护段的实测数据见表2。

3.2 单指标测度函数的构建

根据前文中单指标测度函数的定义,以及表1的数据得单指标测度函数,得出各评价指标的测度值。基坑深度、主要地层粘聚力、主要地层内摩擦角、附加荷载、附加荷载坑边距、使用时间、支护方式、地表水及地下水影响、施工质量的单指标测度函数见图1。

根据表2中的各因素取值以及单指标测度函数可求2个基坑工程4个支护段的单指标测度评价矩阵。以支护段 S_2 为例,结合表2中的各影响因素的取值,以及图16个的单指标测度函数,计算可得基坑2南、西支护段(S_3)的单指标评价矩阵,见式(14)。

$$(u_{jk})_{9 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.58 & 0.42 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

表2 基坑各支护段的边坡稳定性评价指标统计
Tab.2 Statistics of each foundation pit slop stability evaluation indexes

支护段	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
S_1	8.35	2	22	21	2	60	1.8	2
S_2	10.83	3	22	21	4	30	5.0	4
S_3	10.66	2	28	21	1	160	1.5	2
S_4	11.56	2	28	21	1	10	23.0	2

表3 基坑边坡稳定性评价结果
Tab.3 Results of the foundation pit slope stability evaluation

支护段	综合未确知测度 C_1	判别结果 C_2	稳定性程度 C_3	稳定性程度排序 C_4	判别结果	稳定性程度	稳定性程度排序
S_1	0.010 3	0.544 9	0.149 7	0.295 1	Ⅱ	2.975 3	3
S_2	0.000 0	0.084 3	0.360 9	0.554 8	Ⅳ	1.974 7	4
S_3	0.227 2	0.426 0	0.185 8	0.161 0	Ⅱ	3.558 4	2
S_4	0.395 7	0.426 1	0.114 2	0.064 0	Ⅱ	4.089 5	1

3.3 多指标测度评价矩阵

根据式(5)~式(9)的计算结果,则评价指标权重向量为:

$$\omega^T = (0.156\ 1, 0.156\ 1, 0.044\ 7, 0.073\ 8, 0.200\ 4, 0.073\ 8, 0.094\ 7, 0.200\ 4) \quad (15)$$

根据以上的单指标测度矩阵及式(15)可以得到四个支护段边坡稳定的多指标综合测度评价向量,见表3。

3.4 置信度识别及重要程度排序

以西安基坑1西支护段(S_3)为例,取置信度 $\lambda=0.50$,由多指标综合测度评价向量式(11)和置信度评价准则式(12),从小到大,且 $k_0=0.653\ 2>\lambda$,即基坑2南、西支护段边坡稳定性等级为Ⅱ级,稳定性等级属于较稳定。同理可对其他三个支护段进行评价。

根据式(13),因为 $C_1>C_2>C_3>C_4$,令 $C_1=4$, $C_2=3$, $C_3=2$, $C_4=1$,计算其稳定性程度,则有 $q=(qS_1, qS_2, qS_3, qS_4)=(2.975\ 3, 1.974\ 7, 3.558\ 4, 4.089\ 5)$ 。所以稳定性程度从大到小依次为 S_4, S_3, S_1, S_2 。

3.5 结果分析

由表3可知,支护段 S_1 、 S_3 、 S_4 的稳定性等级为Ⅱ级,支护段 S_2 的稳定性等级为Ⅳ级。根据两基坑的变形监测数据, S_1 、 S_3 、 S_4 坡顶的最大水平位移分别为13.0 mm、7.6 mm、11.4 mm,表明基坑

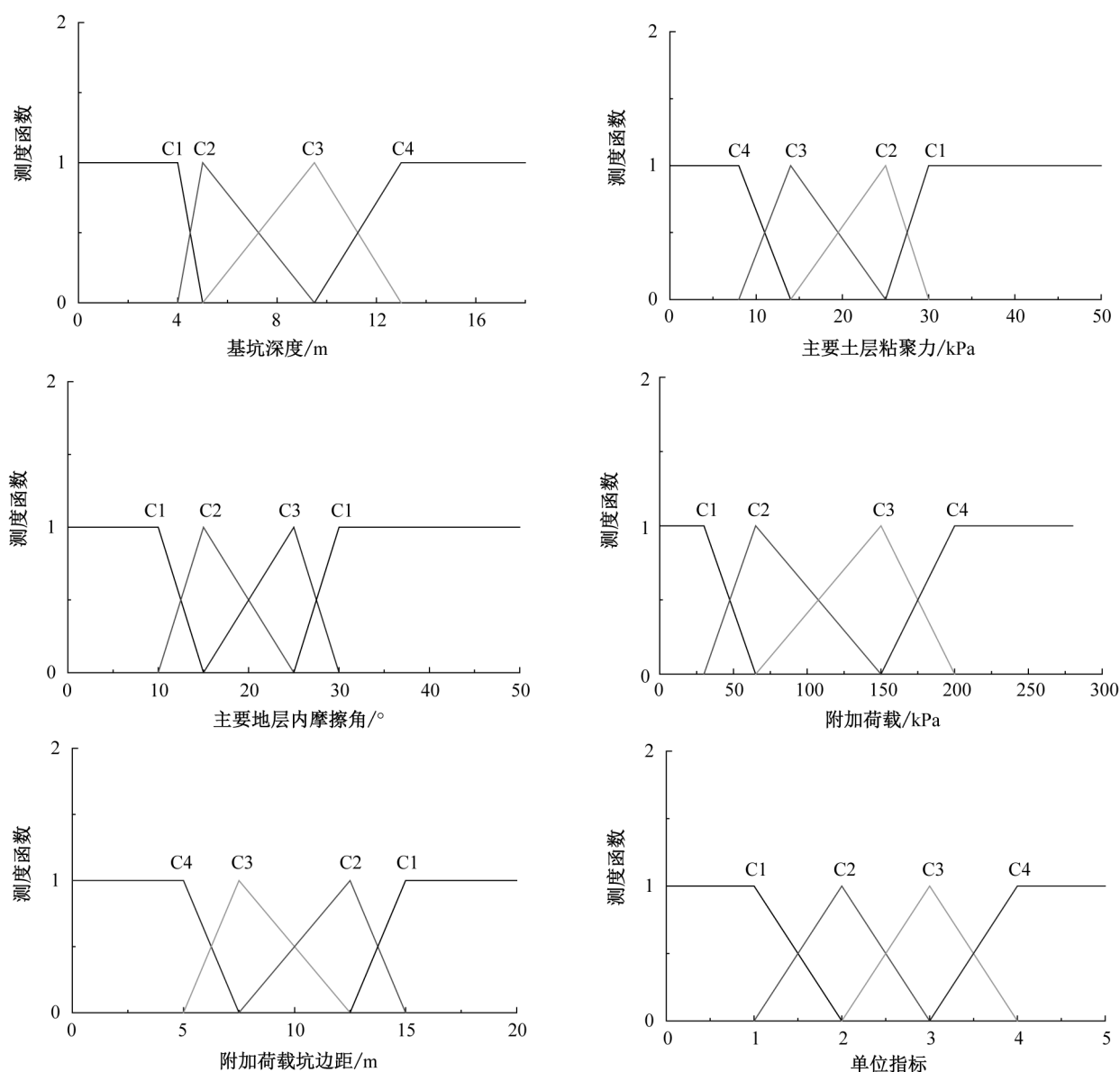


图 1 各指标的测度函数

Fig.5 Single index measure funstion of the indok

处于稳定状态，符合安全使用要求并已竣工。由于极端天气影响，加之施工质量问题，S2 局部土钉墙出现坍塌，后经过采取应急措施采用护坡桩方案保证安全施工。评价结果与监测数据等实际情况基本相符，表明了基于未确知测度理论的基坑边坡稳定性评价模型是可行的。

地下水及地表水影响、支护结构施工质量对基坑边坡稳定性影响较大。

将置信度从 0.5 增加至 0.8 的过程中，除 S4 外，基坑边坡稳定性程度都有所降低，符合理论规律，表明该模型评价结果的可靠度较高。

4 结论

1) 地下水及地表水影响属于敏感性评价指标，因此在基坑支护工程的设计与施工中，应严格控制地下水与地表水。做好截水、排水措施，在基坑支护施工之前，应采用物探等手段严查场地及其周围地下管线的分布，并提前制定极端天气下的应急预案。

2) 评价结果和工程实际相符，表明该数学模型应用于基坑边坡稳定性分析是可行的，且可靠度较高。

参考文献：

- [1] 刘国彬，王卫东. 基坑工程手册 (第二版) [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.

- [2] 杨子胜. 深基坑事故分析与防范措施[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2004, 25(4): 71-74.
- [3] 杨子胜. 基坑工程项目风险管理研究[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(9): 205-207.
- [4] 商丽. 基于未确知测度理论与 Midas/GTS 模拟的边坡稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(8), 56-60.
- [5] 陈占锋, 向娟, 胡毅夫. 基于未确知测度的边坡稳定性评价研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(增刊), 621-624.
- [6] 刘晓云. 基于未确知测度理论的巷道稳定性评价[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1), 26-31.
- [7] 吴刚, 张鑫, 李娜, 等. 基于层次分析法的基坑开挖引起地表沉降风险评价[J]. 绍兴文理学院学报, 2017, 37(9), 24-29.
- [8] 刘保县, 戴佳伟, 舒志乐. 变权层次分析法在深基坑支护方案优选中的应用[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35(6)51-56.
- [9] 张航. 基于三标度法的层次分析法在储层分类评价中的应用[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2015, 17(6), 30-32.
- [10] 刘开第. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999(12): 52-58.
- [11] 付文光. 基坑深度分级及不同深级支护技术适用性的探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 99-103.
- [12] 卢一凡. 武汉地区深基坑工程支护结构安全评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [13] 张社荣. 地基土抗剪强度设计值取值[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12), 69-72.
- [14] 孙宏伟, 姜玮, 杨启安. 黏性土抗剪强度参数勘察试验值与基坑工程设计取值初步分析[C]. 第三届全国岩土与工程学术大会论文集, 成都, 2009: 145-148.
- [15] 傅志峰. 基于安全预警分级的基坑安全模糊评价研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12), 3693-3700.
- [16] 谢北成. 试论“地表水”对深基坑支护工程的影响及其对策[J]. 施工技术, 2003, 23(6), 82-83.
- [17] 赵羚伊. 邻近荷载位置对基坑变形稳定影响规律的分析[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [18] 李青青. 邻近建筑物对基坑工程影响的研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [19] 吴凤平. 基坑工程施工质量风险管理研究与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [20] 李淑. 基于变形控制的北京地铁车站深基坑设计方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

(责任编辑 李新)

(上接第 5 页)

- 梁早期受力性能的试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2006, 23(3): 85-88.
- [10] 徐仲卿, 袁泉, 杨振坤, 等. 早龄期混凝土力学性能试验及其单轴本构模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(1): 92-96.
- [11] 熊维, 丁红岩. 早龄期张拉对预应力混凝土梁徐变的影响[J]. 建筑结构, 2014(14): 24-27.
- [12] 金贤玉, 田野, 金南国. 混凝土早龄期性能与裂缝控制[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 204-212.
- [13] 沈毅. 早龄期混凝土若干性能的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [14] SAUL A G A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure[J]. Magazine of concrete research, 1951, 2(6): 127-140.
- [15] 刘宏伟, 谢丽, 吴胜兴. 混凝土早龄期弹性模量无损检测初探[J]. 混凝土, 2008(6): 36-38.
- [16] FATTUHI N, AIMUTAIRI N M, AISHALEH M S. Assessment of fire-damaged kuwaiti structures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(2): 7-14.
- [17] 谢军. 早龄期混凝土强度和变形特性的试验分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(6): 19-21.
- [18] LEW H S, REICHARD T W. Mechanical properties of concrete at early ages[M]. ACI J, 1978. 75(10): 533-542.
- [19] 杨晓明, 李小妮. 浅谈重载对软土地基基础影响的数值模拟分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(24): 79-80.
- [20] 关秋枫, 刘文华, 陈清冰, 等. 软弱地基上大型预制场的规划与建设[J]. 中国港湾建设, 2005(增刊 1): 92-95.
- [21] HAMMONS M I, SMITH D M. Early-time strength and elastic modulus of concrete with high proportions of fly ash[C]//Serviceability and Durability of Construction Materials. Virginia: ASCE, 2015.

(责任编辑 李新)