

天津滨海新区地基土工程地质分区的可拓学评价

宋盛渊¹, 王清¹, 孙涛², 鲍硕超¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 天津滨海建设投资集团, 天津 300191)

摘 要: 采用可拓学理论, 建立了以软土层埋深、厚度、孔隙比、液性指数、压缩模量为评价指标的土体沉降的预测和评价模型, 并以定量的形式表示评定结果. 该方法的优点就是所选取评价指标的数量和种类不受限制, 既适用于不同工程地质条件的地基土, 又可最大限度地合理利用工程地质勘察成果. 将该方法应用于天津滨海新区地基土的沉降评价, 评价结果与现场观测的结果吻合, 且影响研究区土体沉降的主要因素为压缩模量、软土层厚度. 最后, 根据沉降等级对研究区进行工程地质分区, 得到了科学合理的分区结果.

关键词: 地基沉降; 工程地质分区; 可拓学; 层次分析法; 软土

中图分类号: TU 433

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)10-1502-05

Extenics Evaluation of Engineering Geological Zoning of Foundation Soil in Tianjin Binhai New Area

SONG Sheng-yuan¹, WANG Qing¹, SUN Tao², BAO Shuo-chao¹

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Tianjin Binhai Construction Investment Group, Tianjin 300191, China. Corresponding author: WANG Qing, E-mail: wangqing@jlu.edu.cn)

Abstract: Based on the extenics, a prediction and evaluation model for soil settlement was established when the soft clay depth, thickness, void ratio, liquidity index and modulus of compression are regarded as evaluating indexes. The advantages of this model is that the evaluation results were expressed by the quantitative data and there is no limit for the number and variety of evaluation factors. Hence, this model can not only be applied to the soil of different engineering geological conditions, but also maximize the utilization of engineering geological exploration. The new method was applied to the sedimentation evaluation regarding foundation soil in Tianjin Binhai New Area. The extenics evaluation results are consistent with the in-situ measurements. Furthermore, soft soil thickness and compression modulus are the main factors influencing the sedimentation of study area. Finally, the obtained engineering geological zoning is scientific and reasonable according to the settlement level.

Key words: foundation settlement; engineering geological zoning; extenics; analytic hierarchy process; soft soil

随着经济的快速发展,建筑用地成为了制约城市发展的主要因素. 为了缓解城市建筑用地的紧张,沿海城市采用从近海疏浚出来的淤泥和泥沙进行吹填造陆. 为了使吹填土尽快地从泥浆状态固结成为具有一定承载力的地基,真空预压法在加固吹填土地基中得到了广泛的应用. 但是,人们逐渐认识到,吹填土固结的不均匀性会导致地

基产生不均匀沉降,在其地基上修建的建筑物也会出现各种因大变形而引起的病害^[1]. 因此,研究吹填土体的不均匀沉降具有十分重要的意义.

吹填土在固结过程中发生的沉降变形随时间可分为:瞬时沉降、主固结沉降、次固结沉降. 吹填土主固结沉降量大,经历时间短;传统的观念认为次固结沉降是在主固结沉降完成之后发生的,次

固结沉降量相对较小,经历时间较长^[2].而事实上,土体的工后沉降量较大,如何合理地预测工后沉降及对其进行分级成为了地基处理过程中的一大难题.鉴于此,笔者以天津滨海新区中心渔港的地基土为研究对象,运用可拓学理论对其工后沉降进行分级,并根据沉降等级对研究区进行工程地质分区.

1 可拓学的基本理论

可拓学是以不相容问题为研究对象,去寻求事物矛盾的内在机制,然后将各个矛盾的事物转化为一种相容的问题.建立物元模型,通过各种变换去寻求事物的解是物元分析解决不相容问题的一般方法^[3].

可拓学是以物元理论和可拓论为理论基石.其中,物元理论是利用物元模型解决实际问题,既可以利用物元可拓性的物元方法,又可以采用可拓集合理论,通过关联函数进行定量计算.物元理论的逻辑细胞是物元 R ,以事物 N 、事物特征 c 和该特征的量值 v 所组成的三元组,记作 $R = (N, c, v)$ ^[4].一般情况下,事物 N 具有多个特征,则

$$R = (N, c, v) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix}.$$

当 N_{or} 为标准事物,关于特征 c_i 量值范围 $v_{oti} = \langle a_{oti}, b_{oti} \rangle$ 时,经典域和节域的物元矩阵可分别表示为

$$R_{or} = (N_{or}, c_i, v_{or}) = \begin{bmatrix} N_{or} & c_1 & \langle a_{or1}, b_{or1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{or2}, b_{or2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{orn}, b_{orn} \rangle \end{bmatrix},$$

$$R_p = (N_p, c_i, v_p) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix}.$$

式中: R_{or} 为经典域物元, R_p 为节域物元. 而 $v_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 为节域物元关于特征 c_i 的相应标准扩大了量值范围. 显然有 $\langle a_{oti}, b_{oti} \rangle \subset \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle (i = 1, 2, \dots, n)$.

请若干专家根据实际情况对某物质单元 N_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 的各种特征值做出评价,并根据给定的标准进行评分,从而获得待评物元.

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix}.$$

某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联函数为

$$\left. \begin{aligned} k_{ij}(v_{ti}) &= \frac{-\rho(v_{ji}, v_{oti})}{|v_{oti}|}, \\ \rho(v_{ji}, v_{pi}) &= \rho(v_{ji}, v_{oti}); \\ k_{ij}(v_{ti}) &= \frac{\rho(v_{ji}, v_{oti})}{\rho(v_{ji}, v_{pi}) - \rho(v_{ji}, v_{oti})}, \\ \rho(v_{ji}, v_{pi}) &\neq \rho(v_{ji}, v_{oti}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, l$;

$$\left. \begin{aligned} \rho(v_{ji}, v_{oti}) &= \left| v_{ji} - \frac{1}{2}(a_{oti} + b_{oti}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oti} - a_{oti}); \\ \rho(v_{ji}, v_{pi}) &= \left| v_{ji} - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}); \\ |v_{oti}| &= (b_{oti} - a_{oti}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中: v_{pi} 为评价指标 c_i 所确定的取值范围,即节域 $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$; v_{ji} 为 N_j 关于评价指标 c_i 所确定量值范围,即经典域 $\langle a_{oti}, b_{oti} \rangle$; v_{oti} 为经典域某个等级隶属度范围的差值.

$k_{ij}(v_{ti})$ 为第 j 个物质单元的第 i 个特征关于标准物元等级 t 的关联度. 对于每个特征 c_i 取权系数 W_i ,则某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联度 $k_{ij}(N_j)$ 为

$$k_{ij}(N_j) = \sum W_i k_{ij}(v_{ti}), \quad (3)$$

若 $k_{j_0}(N_j) = \max \{ k_{ij}(N_j) | t = 1, 2, \dots, l \}$, 则此物质单元等级为 t_0 .

2 应用可拓学理论对土体的不均匀沉降进行评价

本文以天津滨海新区中心渔港地基土为例,对土体的不均匀沉降等级进行了可拓学理论评价,为工程稳定性分析、基础的合理设计等提供可靠的依据.

2.1 工程概况

中心渔港地基土处理工况较为复杂,主要分为 3 大区域:北起海滨大道至平水五路,东起经二路至经三路,约 1.3 km^2 区域为经过真空预压处理的吹填地基土,真空预压时塑料排水板间距为 0.8 m ,插板深度为 8 m ;北起纬二路至滨海大道,东起垂汉三路至垂汉七路,约 1.8 km^2 区域为未经过真空预压处理的吹填地基土;北起津汉高速

公路至滨海大道,东起汉蔡路至垂汉七路,约 8 km²区域为人工素填土.

该场地共有 41 个钻孔,对每个钻孔的土样进行了物理力学性质的测试,并对其中 9 个钻孔进行了沉降观测. 因此,本文首先选取 9 个具有观测结果的钻孔点 (D3, D13, D16, D48, D49, D72, D83, D86, D87) 的土体进行不均匀沉降等级可拓学评价,钻孔分布见图 1.

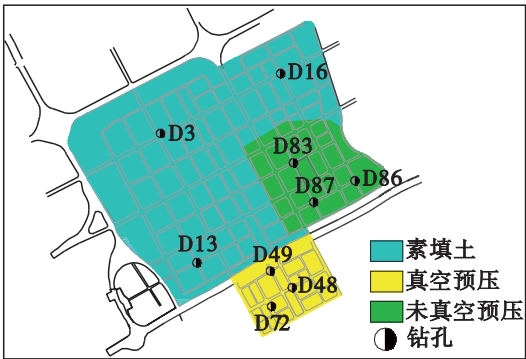


图 1 研究区平面图
Fig. 1 View of studied area

2.2 评价指标的选取

影响土体沉降的因素众多,为了体现出评价指标的选取具有全面性、代表性、科学性和实用性的原则,本文综合考虑研究区的工程地质条件、软土的分布特征,从软土的埋藏条件、土的物理性质指标、土的变形指标为基本出发点,提取了软土层埋深 H 、软土层厚度 h 、孔隙比 e 、液性指数 I_L 、压缩模量 E_s 共 5 个因素作为土体沉降的评价指标.

1) 软土的埋藏条件:地基发生沉降的主要因素是由软土层的分布造成的,而软土层的埋深和厚度是造成不均匀沉降的关键因素. 在一定深度范围内,软土层在自重应力作用下,埋深越浅、厚度越大,沉降则越大.

2) 土的物理性质指标:土的三相物质组成是土存在的物质基础. 其中,固相的土粒构成土的骨架,而土中固相、液相间的相互作用会引起土性质的变化,直接影响土的力学性质. 土的孔隙比越大,土体越松散,沉降则越大;土的液性指数越大,土的稠度越大,沉降则越大^[5].

3) 土的变形指标:土的压缩模量是指土在侧限条件下受压时竖向附加应力与相应的压缩应变的比值,是判断土的压缩性和计算地基压缩变形量的重要指标之一. 因此,压缩模量越小,沉降则越大^[6].

根据每个钻孔土样物理力学性质的测试结果及规范^[7-8],用单因素法将天津中心渔港地基土

土体沉降分为 5 个等级,即轻微沉降 (I)、较小沉降 (II)、中等沉降 (III)、较大沉降 (IV)、严重沉降 (V),如表 1 所示. 具有观测数据的 9 个钻孔点土样的物理力学性质指标如表 2 所示.

表 1 土体沉降等级各评价指标值
Table 1 Values of evaluation indexes for soil settlement degree

等级	H/m	h/m	e	I_L	E_s/MPa
I	18 ~ 20	1 ~ 2	0.6 ~ 0.7	0.5 ~ 0.8	8 ~ 10
II	16 ~ 18	2 ~ 3	0.7 ~ 0.8	0.8 ~ 0.9	7 ~ 8
III	14 ~ 16	3 ~ 4	0.8 ~ 0.9	0.9 ~ 1.0	6 ~ 7
IV	12 ~ 14	4 ~ 5	0.9 ~ 1.0	1.0 ~ 1.1	5 ~ 6
V	10 ~ 12	5 ~ 6	1.0 ~ 1.1	1.1 ~ 1.4	3 ~ 5

表 2 钻孔各评价指标值
Table 2 Values of evaluation indexes for drilling

工况	钻孔	H/m	h/m	e	I_L	E_s/MPa
素填土	D3	12.30	2.00	0.90	1.05	3.96
	D13	14.75	3.55	0.87	0.99	5.62
	D16	14.55	3.05	0.87	1.03	3.95
真空预压	D48	16.25	1.85	0.91	1.02	4.88
	D49	16.75	4.65	0.94	1.02	6.14
	D72	16.45	5.05	0.86	1.04	7.46
未真空预压	D83	14.35	4.15	0.87	0.87	5.51
	D86	17.60	4.60	1.09	0.95	6.30
	D87	14.95	4.15	0.84	0.87	8.63

2.3 评价指标的归一化

为了便于计算,需将量纲不同的指标进行归一化处理. 评价指标分为成本型指标和效益型指标,成本型指标越小越好,归一化时采用公式 (5);效益型指标越大越好,归一化时采用公式 (6). 对表 1 和表 2 归一化后所对应的值如表 3、表 4 所示.

$$x' = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (5)$$

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (6)$$

2.4 确定经典域和节域

经典域的表达式为 $\mathbf{R}_{or} = (N_{or}, c_i, v_{or}) = [N_{or}, c_i, <a_{oti}, b_{oti}>]$. 式中: N_{or} 为土体沉降等级 ($t = 1, 2, \dots, 5$); c_i 为评价指标 ($i = 1, 2, \dots, 5$); v_{oti} 为 N_{or} 关于评价指标 c_i 所确定的取值范围,即经典域 $<a_{oti}, b_{oti}>$. 各评价指标和对应的土体沉降等级的经典域见表 3.

表 3 土体沉降等级各评价指标标准化值
Table 3 Normalized values for evaluation indexes of soil settlement

等级	埋深	厚度	孔隙比	液性指数	压缩模量
I	0.8~1	0.8~1	0.8~1	0.67~1	0.71~1
II	0.6~0.8	0.6~0.8	0.6~0.8	0.56~0.67	0.57~0.71
III	0.4~0.6	0.4~0.6	0.4~0.6	0.44~0.56	0.43~0.57
IV	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~0.4	0.33~0.44	0.29~0.43
V	0~0.2	0~0.2	0~0.2	0~0.33	0~0.29

节域的表达式为 $R_p = (N_p, c_i, v_p) = [N_p, c_i, <a_{pi}, b_{pi}>]$. 式中: N_p 为土体沉降的全部等级; $<a_{pi}, b_{pi}>$ 为评价指标 c_i 所确定的取值范围, 即节域. 由于所有的评价指标都进行了归一化处理, 因此所有评价指标的节域为 $<0, 1>$.

2.5 确定待评物元

待评物元的表达式为 $R_j = (N_j, c_i, v_{ji})$. 式中: N_j 为第 j 个待评钻孔; v_{ji} 为第 j 个待评钻孔对应于评价指标 c_i 的归一化后的量值, 该量值见表 4.

表 4 钻孔各评价指标标准化值
Table 4 Normalized values for evaluation indexes of drilling

工况	钻孔	埋深	厚度	孔隙比	液性指数	压缩模量
素填土	D3	0.23	0.80	0.41	0.39	0.14
	D13	0.48	0.49	0.47	0.46	0.37
	D16	0.46	0.59	0.47	0.41	0.14
真空预压	D48	0.63	0.83	0.37	0.42	0.27
	D49	0.68	0.27	0.31	0.42	0.45
	D72	0.65	0.19	0.48	0.40	0.64
未真空预压	D83	0.44	0.37	0.47	0.59	0.36
	D86	0.76	0.28	0.02	0.50	0.47
	D87	0.50	0.37	0.53	0.59	0.80

2.6 用层次分析法确定评价指标的权系数

层次分析法是由美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代初提出的, 其特点是在对复杂决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分

析的基础上, 利用较少的定量信息, 把决策者的决策思维过程数学化的方法^[9]. 由于各评价指标权重的确定人为因素很大, 而考虑到层次分析法将定性判断与定量推断相结合, 增强了科学性与实用性, 因此采用层次分析法确定评价指标的权系数. 根据已确定的 5 个评价指标的相对重要程度构造判断矩阵, 本文采用数字 1~9 及其倒数作为标度来构造评价指标之间相对重要程度的两两比较矩阵 S .

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 & 1 & 1/5 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1/2 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 5 & 1 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

根据矩阵理论, 求出判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.1273$, 对其相应的特征向量进行归一化处理, 得到评价指标的权重集 $W = (0.112\ 7, 0.270\ 7, 0.155\ 5, 0.108\ 6, 0.352\ 6)$. 为了保证采用层次分析法得到合理的结论, 需对构造矩阵进行一致性检验. 一致性比率 $C_R = 0.028\ 4 < 0.1$, 认为构造矩阵的一致性是可以接受的.

2.7 计算待评物元的关联度

根据式(1)和式(2), 计算待评钻孔关于各沉降等级的关联度; 然后根据式(3)和求出的权系数 W_i , 计算待评钻孔关于各沉降等级的综合关联度; 最后根据式(4), 计算出每个待评钻孔所属的沉降等级; 计算结果如表 5 所示.

表 5 土体沉降等级评判结果表
Table 5 Evaluation results of soil settlement degree

工况	钻孔	$K_1(P)$	$K_2(P)$	$K_3(P)$	$K_4(P)$	$K_5(P)$	可拓评价结果	现场观测结果
素填土	D3	-0.484 6	-0.417 7	-0.425 6	-0.300 3	-0.113 0	严重沉降	严重沉降
	D13	-0.417 0	-0.249 0	0.190 2	0.068 3	-0.285 5	中等沉降	中等沉降
	D16	-0.528 9	-0.361 5	-0.143 4	-0.271 6	-0.076 9	严重沉降	严重沉降
真空预压	D48	-0.337 5	-0.296 0	-0.311 9	-0.218 5	-0.317 6	较大沉降	较大沉降
	D49	-0.475 0	-0.280 3	-0.100 1	0.116 9	-0.275 7	较大沉降	较大沉降
	D72	-0.403 6	-0.042 6	-0.161 3	-0.173 1	-0.297 1	较小沉降	较小沉降
未真空预压	D83	-0.451 9	-0.267 8	-0.008 1	0.158 3	-0.281 3	较大沉降	较大沉降
	D86	-0.490 4	-0.345 6	-0.119 0	-0.138 6	-0.248 7	中等沉降	中等沉降
	D87	-0.152 8	-0.222 5	-0.105 5	-0.269 8	-0.487 0	中等沉降	中等沉降

由表 5 可以看出,中心渔港地基土沉降等级可拓评价结果与现场观测结果吻合,证明了应用可拓学对地基土沉降等级进行评价是可行的。因此,利用该方法对其余钻孔点的土体进行沉降等级评价,并根据评价结果对研究区进行工程地质分区。

2.8 工程地质分区

工程地质分区是根据工程地质条件相同或相近的原则,将研究区划分为一些独立的场地单元,为城市的规划、工程的设计提供依据^[10]。在工程地质分区的过程中应根据工程类型、场地的工程地质性质选取合理的指标进行划分。天津中心渔港场地是由围海造陆形成的,在地层中分布有不同厚度的软土层,且处理工况不同,工后沉降是该场地的核心问题。因此,根据沉降等级对研究区进行分区。研究区的工程地质分区图如图 2 所示。

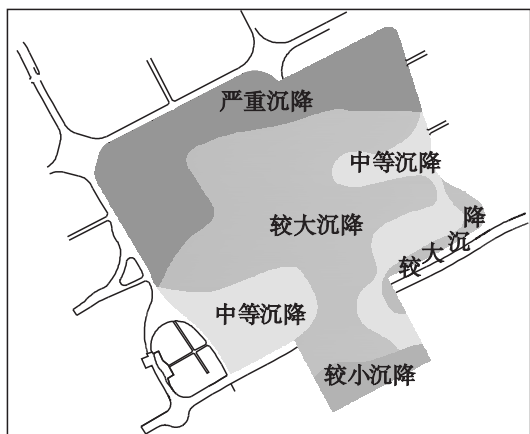


图 2 研究区的工程地质分区图

Fig. 2 Engineering geological zoning map of studied area

由图 2 可知:该场地工后沉降量大,大部分区域会发生中等沉降、较大沉降、严重沉降,只有局部区域会发生较小沉降,没有区域会发生轻微沉降;该场地中间区域沉降比较均匀,而周围沉降变化比较大,说明工后沉降受边界效应的影响;同一处理工况下,土体的沉降等级不同,说明同一处理工况区域内下覆的软土层埋深和厚度不同。

3 结 论

1) 天津中心渔港地基土中分布有不同厚度的软土层,软土的孔隙小而多,并具有可塑性。因此,选用软土层埋深 H 、软土层厚度 h 、孔隙比 e 、液性指数 I_L 、压缩模量 E_s 共 5 个因素作为土体沉降的评价指标。

2) 可拓评价结果与现场观测结果吻合,影响

研究区土体沉降的主要因素为压缩模量、软土层厚度,且根据沉降等级进行工程地质分区是科学合理的。

3) 土体不均匀沉降的可拓学方法可以从多角度、多因素出发,所选取评价指标的种类和数量不受限制,既可以适用于不同工程地质条件的地基土,又可以最大限度地合理利用工程地质勘察成果,最终来指导上部建筑物的规划与设计。

参考文献:

- [1] Liang X, Wu W F, Cai Y Q, et al. Settlement analysis of granular fill on soft soil under circular load[J]. *Journal of Zhejiang University: Science*, 2001, 2(2): 186–191.
- [2] Anagnostopoulos C A, Grammatikopoulos I N. A new model for the prediction of secondary compression index of soft compressible soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 2011, 70(3): 423–427.
- [3] 蔡文,杨春燕,何斌. 可拓学基础理论研究的新进展[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(2): 80–87.
(Cai Wen, Yang Chun-yan, He Bin. New development of the basic theory of extenics[J]. *Engineering Science*, 2003, 5(2): 80–87.)
- [4] 康志强,周辉,冯夏庭,等. 大型岩质边坡岩体质量的可拓学理论评价[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(12): 1770–1774.
(Kang Zhi-qiang, Zhou Hui, Feng Xia-ting, et al. Evaluation of high rock slope quality based on theory of extenics[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2007, 28(12): 1770–1774.)
- [5] Tang Y Q, Zhou J, He X J, et al. Theoretical and experimental study of consolidation settlement characteristics of hydraulic fill soil in Shanghai[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(5): 1397–1405.
- [6] Dalmatov B I, Chikishev V M. Determination of foundation settlements with allowance for variation in compression modulus of clayey soil as function of stressed state[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1984, 21(1): 37–42.
- [7] 中国建筑科学研究院. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2002: 4.
(China Academy of Building Research. GB50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: Ministry of Construction P. R, China, 2002: 4.)
- [8] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
(The Compile Committee of Geotechnical Engineering Manual. *Geotechnical engineering manual* [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994.)
- [9] Golden B L, Wasil E A, Harker P T. The analytic hierarchy process, applications and studies [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [10] Ondrasik R, Matys M, Viskup J. Engineering geological zoning and seismic micro zoning[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1992, 46(1): 89–92.