

文章编号:1672-3961(2008)05-0031-05

基于可拓学的砂土液化等级评价研究

黄增彦¹, 王广月², 李倩², 赵明²

(1. 菏泽市公路局, 山东 菏泽 274000; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:砂土液化等级的判别方法多种多样,考虑的因素有多有少.但不同判别方法中考虑的因素,由于评分标准的不同不可以任意相互选用,导致了传统砂土液化等级判别方法的局限性.可拓评判则从可拓集合理论出发,建立多指标性能参数的等级评定模型,通过定量的数值表示评价结果,这样可以使评价指标最优化地接近实际的土质情况,评价结果自然比传统评价方法更加准确.结合改进的层次分析法(The Analytic Hierach Process),应用可拓理论对砂土的液化等级进行评价,较好地解决了工程中的实际问题.

关键词:砂土液化;层次分析法;可拓学;评价

中图分类号:TU441 **文献标志码:**A

Rank evaluation of sand liquefaction based on Extenics

HUANG Zeng-yan¹, WANG Guang-yue², LI Qian², ZHAO Ming²

(1. Highway Management Department of Heze, Heze 274000, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: There are various methods having different factors for the evaluation of sand liquefaction. Those different factors of different methods can not be employed together due to the difference in the evaluation standard for different methods, which cause the limitation of the traditional evaluation methods. Based on extension, a quantitative evaluation model for sand liquefaction of multiple parameters was developed, of which the evaluation indexes can come optimally near to the actual situation, and the solution is more efficient than traditional evaluation. Based on the improved analytic hierarchy, the actual problem in the project was better solved by using Extenics to evaluate the ranks of sand liquefaction.

Key words: sand liquefaction; analytic hierarchy process; Extenics; evaluation

0 引言

砂土液化实际是较松散的饱和砂土在地震作用下,瞬时失去强度而成液态的过程^[1].因此,砂土液化问题开始成为地震工程学和土动力学领域研究的焦点.判定其产生条件,建立合理的砂土液化等级评价模型,对于城市规划、建筑场地选择以及制定液化区建筑物防护措施有着重要的意义.多年的理论和试验研究发展了从经验到高度理论分析的多种评价方法,如 Seed 简化分析法、经验公式法、概率与统计方法、土层反应分析法^[2-4].然而,影响砂土液化的因素具有复杂性、多样性和非线性的特点,很难提出准确的判别公式,特别是很难考虑多方面的因素.常常得不到令人满意的预测结果.如何建立一种多参数综合评价模型,至关重要.众所周知,影响砂土地震液化的因素是相互联系、相互依存、相互作用的,同时被评价砂土地震液化等级对象具有随机性和模糊性以及不同条件下的可变性,故砂土地震液化等级评价问题实质上是一个不相容问

收稿日期:2007-11-01

作者简介:黄增彦(1956-),男,山东菏泽人,高级工程师,主要从事公路桥梁方面的管理与研究工作.

E-mail: li54069686@126.com

题,应将单项指标评定结果的不相容问题转化为相容性.八十年代我国学者蔡文^[5]创立的可拓学就是用形式化的工具,从定性和定量两个角度去研究解决矛盾问题的规律和方法,在许多领域得到成功应用,因此也为砂土液化等级综合评价分析提供了新的途径.为了能给出比较科学的具有一定精度的评价结果,本文将可拓方法和改进 AHP(The Analytic Hierach Process)^[6]方法结合起来,建立砂土液化等级的可拓综合评价模型,以期从另一个角度探求砂土液化等级的综合分析方法.

1 砂土液化等级的可拓综合评价模型

1.1 可拓集合

经典集合用 0 和 1 两个数来描述事物具有某种性质或不具有某种性质,可拓集合则用取自 $(-\infty, +\infty)$ 的实数来表示事物具有某种性质,正数表示具有该性质的程度,负数表示不具有该性质的程度,零则表示既具有该性质又不具有该性质.

设论域为 U ,若对 U 中任一元素 $u, u \in U$,都有一实数 $K(u) \in (-\infty, +\infty)$ 与之对应,则称 $A = \{(u, y) | u \in U, y = K(u) \in (-\infty, +\infty)\}$ 为论域 U 上的一个可拓集合.其中 $y = K(u)$ 为 A 的关联函数, $K(u)$ 为 u 关于 A 的关联度.

在可拓集合中,通过关联函数可以定量地描述论域中的元素具有性质 P 的程度极其变化.同属于正域或负域的元素,可由关联函数值的大小分出不同的层次,通过关联函数值的变化定量地描述元素与集合的关系的变化.

1.2 同征物元矩阵

可拓学的理论支柱是物元理论和可拓集合论,其逻辑细胞则是物元.为此,可拓学引进了把质与量有机结合起来的物元概念,它是以事物、特征及事物关于该特征的量值 3 者所组成的 3 元组,记作 $R = (\text{事物}, \text{特征}, \text{量值})$.物元的概念正确地反映了质与量之间的关系,可以更贴切地描述客观事物变化的过程.不同的物体可以具有相同的特征元,用同征物元表示.为了研究和应用方便,将诸多同征物元用简便的方法表示出来.

$$R = \begin{vmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C & V_1 & V_2 & \cdots & V_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C_1 & V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1m} \\ C_2 & V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & V_{n1} & V_{n2} & \cdots & V_{nm} \end{vmatrix}.$$

N 表示事物 N_1, N_2, \dots, N_m 的全体, $(V_{ij})_{n \times m}$ 称为同征物元矩阵,式中符号意义参见文献【1】.

1.3 可拓评价

可拓评价方法的具体步骤:

a. 确定经典域与节域

$$R_0 = \begin{vmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C & V_1 & V_2 & \cdots & V_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} N & N_1 & N_2 & \cdots & N_m \\ C_1 & \langle a_{11}, b_{11} \rangle & \langle a_{12}, b_{12} \rangle & \cdots & \langle a_{1m}, b_{1m} \rangle \\ C_2 & \langle a_{21}, b_{21} \rangle & \langle a_{22}, b_{22} \rangle & \cdots & \langle a_{2m}, b_{2m} \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & \langle a_{n1}, b_{n1} \rangle & \langle a_{n2}, b_{n2} \rangle & \cdots & \langle a_{nm}, b_{nm} \rangle \end{vmatrix}.$$

其中 N_j 表示所划分的第 j 个评价类别, C_i 表示第 i 个评价指标, $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 分别为 N_j 关于指标 C_i 所规定的量值范围,即各类别关于对应的评价指标所取的数据范围经典域.

$$\text{令 } R_p = (P, C, V_p) = \begin{vmatrix} P & C_1 & V_{1p} \\ & C_2 & V_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{np} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P & C_1 & \langle a_{1p}, b_{1p} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{2p}, b_{2p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{np}, b_{np} \rangle \end{vmatrix}, \text{其中 } P \text{ 表示类别的全体, } V_{1p} \text{ 为 } P \text{ 关于 } C_i$$

所取的量值范围,即 P 的节域.

b. 确定待评物元

对待评事物 p ,把所检测得到的数据或分析结果用物元
$$\begin{pmatrix} p & C_1 & v_1 \\ & C_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_n \end{pmatrix}$$
 表示,称为事物 p 的待评物元,其

中 v_i 为 p 关于 C_i 的量值,即待评事物检测所得的具体数据.

c. 确定待评事物关于各类别等级的关联度

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \frac{\rho(v_i, V_{ij})}{\rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij})}, & \rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij}) \neq 0. \\ -\rho(v_i, V_{ij}) - 1, & \rho(v_i, V_{ip}) - \rho(v_i, V_{ij}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\rho(v_i, V_{ij}) = \rho(v_i, \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle) = \left| v_i - \frac{(a_{ij} + b_{ij})}{2} \right| - \frac{(b_{ij} - a_{ij})}{2}$.

d. 计算待评事物 p 关于等级 j 的关联度

$$K_j(p) = \sum_{i=1}^n w_i K_j(v_i). \quad (2)$$

其中 w_i 为指标权系数.

当 $K(P) \geq 0$ 时, $p \in P_0$; 当 $-1 \leq K(P) \leq 0$ 时, $p \in P$, 但 $p \notin P_0$; 当 $K(p) \leq -1$ 时, $p \notin P_0$ 和 $p \notin P$.

2 指标权重的确定

层次分析法 AHP,最早由美国学者 T.L.Saaty 在 1980 年提出,是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法.它把复杂问题中的各种因素通过划分为相互联系的有序层次使其条理化,根据一定客观现实的判断对每一层次的相对重要性给予定量表示,用数量表达每一层次元素的相对重要性次序的权值.AHP 方法确定指标权重,最关键的环节是建立各层次上的判断矩阵,但在实际应用中,由于人为判断的片面性,两两比较的结果不一定具有客观一致性,因此通常需要一致性检验,若不能通过检验,常规的做法是用估计来调整判断矩阵,带有主观性和盲目性,有时需要经过多次调整才能通过一致性检验.为此,本文采用 3 标度法,对常规的层次分析法进行改进,通过相应两两方案指标比较,建立比较矩阵,计算最优传递矩阵,进而确定一致矩阵(即判断矩阵),该方法自然满足一致性要求,不需要进行一致性检验,与其他标度相比具有良好的判断传递性与标度值的合理性,有利于决策者在两两比较判断过程中提高准确性.基本步骤如下:

(1) 首先,由专家给出在每一层次上各元素之间重要性程度的 3 标度比较矩阵

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

其中 $a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示 } i \text{ 比 } j \text{ 重要;} \\ 0 & \text{表示 } i \text{ 与 } j \text{ 同等重要;} \\ -1 & \text{表示 } i \text{ 不如 } j \text{ 重要;} \end{cases}$

(2) 计算 A 的最优传递矩阵 R

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1k} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2k} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ik} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nk} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

其中 $r_{ik} = \sum_{i=1}^n (a_{ik} + a_{kj})$.

把矩阵 R 转化为一致矩阵 D

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中 $d_{ik} = \exp(r_{ik})$.

一致性矩阵 D 也称为判断矩阵

(3) 层次排序计算——权重计算

根据判断矩阵 D 计算该层要素关于相邻上一层次要素 G_k 的优先权重,称为层次单排序.层次单排序可以归结为计算 D 中最大特征值所对应的特征向量,即满足

$$DW = \lambda_{\max} W.$$

的特征向量 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$, 作为该层次 n 个要素的优先权重向量.常用的计算特征向量的方法有求和法和方根法.本文采用方根法,即

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n]^T \text{ 式中 } W_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n d_{ik}} / \sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n d_{ik}}.$$

3 实例分析

济荷高速公路工程砂土液化指标 M 为地震震级, a_{\max} 为地面加速度, N 为标贯基数, σ_0 为土层粘粒含量, F 为有效应力.液化等级类别 m_1 为非液化, m_2 为弱液化, m_3 为中液化, m_4 为强液化.

砂土液化等级的同征物元体为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} m & m_1 & m_2 & m_3 & m_4 \\ M & \langle 5.0, 6.0 \rangle & \langle 6.0, 7.0 \rangle & \langle 7.0, 8.0 \rangle & \langle 8.0, 9.0 \rangle \\ a_{\max} & \langle 0, 0.1 \rangle & \langle 0.1, 0.2 \rangle & \langle 0.2, 0.3 \rangle & \langle 0.3, 0.4 \rangle \\ N & \langle 15, 20 \rangle & \langle 10, 15 \rangle & \langle 6, 10 \rangle & \langle 0, 6 \rangle \\ \sigma_0 & \langle 120, 180 \rangle & \langle 60, 120 \rangle & \langle 30, 60 \rangle & \langle 0, 30 \rangle \\ F & \langle 10, 15 \rangle & \langle 6, 10 \rangle & \langle 3, 6 \rangle & \langle 0, 3 \rangle \end{bmatrix}.$$

砂土液化等级节域为:

$$R_p = (P, C_j, V_{pj}) = \begin{bmatrix} \text{液化等级} & H & \langle 5.0, 9.0 \rangle \\ & a_{\max} & \langle 0, 0.4 \rangle \\ & N & \langle 0, 20 \rangle \\ & \sigma & \langle 0, 180 \rangle \\ & F & \langle 0, 15 \rangle \end{bmatrix}.$$

待评同征物元体为:

$$R = \begin{bmatrix} & n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & n_6 & n_7 & n_8 & n_9 & n_{10} & n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} \\ M & 6.8 & 6.8 & 6.8 & 6.8 & 6.8 & 6.5 & 6.5 & 6.5 & 5.9 & 5.9 & 5.9 & 6.3 & 6.3 & 6.3 & 6.3 \\ a_{\max} & 0.18 & 0.19 & 0.17 & 0.18 & 0.20 & 0.30 & 0.24 & 0.28 & 0.21 & 0.14 & 0.21 & 0.23 & 0.21 & 0.28 & 0.27 \\ N & 18 & 20 & 14 & 12 & 16 & 18 & 11 & 13 & 8 & 7 & 16 & 9 & 16 & 8 & 16 \\ \sigma_0 & 167.2 & 86.3 & 46.8 & 55.9 & 38.4 & 29.8 & 135.7 & 76.4 & 56.1 & 21.8 & 31.3 & 69.3 & 31.3 & 27.9 & 36.8 \\ F & 2.5 & 3.5 & 1.5 & 4.5 & 6.0 & 2.5 & 1.5 & 2.0 & 3.5 & 3.0 & 4.0 & 2.5 & 4.0 & 4.5 & 6.5 \end{bmatrix}.$$

确定指标权重,通过对过去工程资料的分析、专家咨询、理论计算,确定指标层的判断矩阵,即

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

根据式(6)确定最优传递矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0 & \frac{4}{5} & \frac{2}{5} & \frac{8}{5} & \frac{6}{5} \\ -\frac{4}{5} & 0 & -\frac{2}{5} & \frac{4}{5} & \frac{2}{5} \\ -\frac{2}{5} & \frac{2}{5} & 0 & \frac{6}{5} & \frac{4}{5} \\ -\frac{8}{5} & -\frac{4}{5} & -\frac{6}{5} & 0 & \frac{2}{5} \\ -\frac{6}{5} & -\frac{2}{5} & -\frac{4}{5} & -\frac{2}{5} & 0 \end{bmatrix}.$$

把矩阵 R 转化为一致矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} 2.718 & 2.226 & 1.492 & 4.953 & 3.320 \\ 0.449 & 2.718 & 0.670 & 2.226 & 1.492 \\ 0.670 & 1.492 & 2.718 & 3.320 & 2.226 \\ 0.202 & 0.449 & 0.301 & 2.718 & 1.492 \\ 0.301 & 0.670 & 0.449 & 0.670 & 2.718 \end{bmatrix}.$$

用方根法计算,特征向量为:

$$W = [0.362 \quad 0.172 \quad 0.257 \quad 0.091 \quad 0.098].$$

砂土液化等级评价

通过公式(3)计算出各类型的单指标关联度,然后把计算结果和权重值代入公式(4)便可计算出 15 个钻孔土样对各种砂土液化等级的综合关联度.最后参照判别准则判定各钻孔砂土的所属类型,如表 1 所示,计算结果与实测值基本一致.

表 1 砂土综合关联度及判别结果
Table 1 Sand synthetic degree of association and appraisal result

样本代号	K_1	K_2	K_3	K_4	评价结果	实测值
1	-0.154 58	-0.154 58	-0.348 56	-0.517 16	非液化	非液化
2	-0.299 36	-0.299 36	-0.323 20	-0.554 83	弱液化	弱液化
3	-0.262 80	-0.015 36	-0.177 63	-0.476 22	弱液化	中液化
4	-0.381 36	0.175 69	-0.052 59	-0.419 15	弱液化	弱液化
6	-0.262 80	-0.015 36	-0.177 63	-0.476 22	弱液化	弱液化
7	-0.259 28	-0.173 03	-0.314 77	-0.382 61	弱液化	中液化
8	-0.304 28	0.111 55	-0.140 62	-0.324 65	弱液化	弱液化
9	-0.373 90	0.140 86	-0.169 69	-0.054 04	弱液化	弱液化
10	-0.270 78	-0.156 36	-0.029 91	-0.405 65	中液化	中液化
11	-0.297 55	-0.162 80	-0.214 31	-0.349 95	弱液化	弱液化
12	-0.114 92	-0.180 51	-0.304 72	-0.517 88	非液化	弱液化
13	-0.368 88	0.009 75	-0.040 80	-0.338 10	弱液化	弱液化
14	-0.427 92	-0.092 63	0.083 13	-0.301 03	中液化	中液化
15	-0.221 76	-0.028 55	-0.214 12	-0.474 50	弱液化	弱液化

4 结语

利用基于多指标非线性可拓数学综合评价方法,将砂土液化等级评价中多参数因子目标(下转第 56 页)

(上接第35页) 评价归结为单目标决策,克服了单因子评价法不能全面反映砂土液化等级综合状况的不足.采用改进层次分析法来确定各评价指标的权重,具有较强的逻辑性、实用性和系统性,并能准确地得出各评价指标的权系数,丰富了可拓学的应用.本文实例选取了济荷高速公路砂土地基(待评物元)进行多指标可拓综合评价,实例分析表明,多指标可拓综合评价方法的评定结果具有明确的物理意义,可以直观地反映出济荷高速公路砂土地基的液化等级,为砂土液化等级的综合评价提供了一条新的思路.

参考文献:

- [1] 孙敬东,邵萍萍,张柏山.砂土液化的防范措施[J].岩土工程界,2001,4(6):29.
SUN Jing-dong, SHAO Ping-ping. The measures of preventing sand liquefaction[J]. Geotechnical Engineering World, 2001, 4(6):29.
- [2] 李顺群,王丽君.对地基土液化判别方法的探讨[J].辽宁工学院学报,2002,22(2):29-30.
LI Shun-qun, WANG Li-jun. Discussion on the judgment of the base soil s liquidation[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2002, 22(2):29-30.
- [3] 陈文化,门福录,孙谋.建筑物地基动力液化的两相介质动力有限元分析[J].水利学报,2002(11):89-94.
CHEN Wen-hua, MEN Fu-lu, SUN Mou. Simulation of seismic liquefaction of subsoil of building based on the theory of two-phase dynamics[J]. Shuili Xuebao, 2002(11):89-94.
- [4] 余跃心.砂土液化判别方法可靠性评价[J].岩土力学,2004,25(5):803-807.
SHE Yue-xin. Probability evaluation of liquefaction distinguishing method of sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5):803-807.
- [5] 蔡文,杨春燕,林伟初.可拓工程方法[M].北京:科学出版社,2000.
CAI Wen, YANG Chun-yan, LIN Wei-chu. Extension method[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 王广月.基于改进的AHP方法进行地基处理方案的优选[J].水文地质工程地质,2003(5):98-101.
WANG Guang-yue. Improved AEIP method for optimization of foundation treatment scheme[J]. Hydrogeology And Engineering Geology, 2003(5):98-101.

(编辑:孙广增)