

最优化法在砂土液化势评价中的应用*

Application of optimization method to assessment of sand liquefaction potential

汪明武 罗国煜

(南京大学地球科学系, 南京, 210093)

文 摘 探讨了应用 Fibonacci 最优化法评价砂土液化势的理论和原理, 给出了相应算法和流程, 并建立了评价模型, 实例应用表明基于 Fibonacci 最优化法来判别及评估砂土液化势是有效可行的, 且取得了理想的结果。

关键词 砂土液化, 最优化法, Fibonacci 数列, 算法, 地震

中国法分类号 TU 447

作者简介 汪明武, 男, 1972 年生, 南京大学博士研究生, 主要从事城市环境岩土工程、工程物探和计算机应用的研究工作。

Wang Mingwu Luo Guoyu

(Dept. of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract Theory and principle of assessment of sand liquefaction using Fibonacci optimization method (FOM) are investigated in this paper. The algorithm and the program flowchart are also proposed, moreover, the assessing model is developed. The practical example has shown that the Fibonacci optimization method is feasible and effective to assess and determine sand liquefaction potential, and the result is good.

Key words Sand liquefaction, optimization method, Fibonacci sequence, algorithm, earthquake

1 前 言*

地震引起的砂土液化可导致大面积地面变形、滑坡、侧移和喷砂等危害, 它们构成对人类生命财产安全的潜在危险, 故砂土液化的评价对于减轻地震灾害和抗震设计有着重要意义^[1]。砂土液化的产生、发展和消散受诸多因素控制, 则可靠的砂土液化评价模型应考虑各影响因素及影响水平, 以及相互间的关系^[2]。

本文探讨了基于最优化法应用现场实测 SPT 记录评价砂土液化势的原理及工作步骤, 并实际应用于镇江至扬州长江公路大桥工程两桥址砂土液化势的评价, 以及同规范判别法的分析结果作了对比。

2 理论基础

最优化理论是应用数学的一个重要分支, 广泛应用于各行业的系统管理、设计和决策。最优化 (optimization) 一般是指在某种状况下作出最好的决策或从几个候选方案中选出最佳的, 其中适于非光滑及导数表达式复杂或写不出等情形的优化搜索法, 是通过试取点函数值的比较来使包含极值的搜索区间缩小, 并当其缩至一定程度时, 区间上各点都接近所需要求的极值, 则可看作极值的近似, 其有黄金分割优选法和 Fibonacci 最优化法 (Fibonacci optimization method, 缩写 FOM)^[3~5]。

Fibonacci 最优化法是 Kiefer 于 1953 年提出的, 又称分数法, 其是基于 Fibonacci 数列选择试取点的优化

搜索法。Fibonacci 数列满足

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad (n = 2, 3, 4, \dots, N) \quad (1)$$

其中 $F_0 = 1, F_1 = 1$ 。若所有可能试验总数为某个 $F_n - 1$, 先选取 F_{n-1}, F_{n-2} 两点作为试取点并比较结果, 如果第 F_{n-1} 点好, 则舍去第 F_{n-2} 点以下的试验范围; 若第 F_{n-2} 点好, 则划去第 F_{n-1} 点以上试验范围, 故新试验范围内还剩下 $F_{n-1} - 1$ 个试验点。重新编号后, 第 F'_{n-2} 或第 F'_{n-1} 是上步留下的好点, 另一个是新试验点, 比较结果并作同上选择。重复以上步骤直至试验范围内没有该选的点。

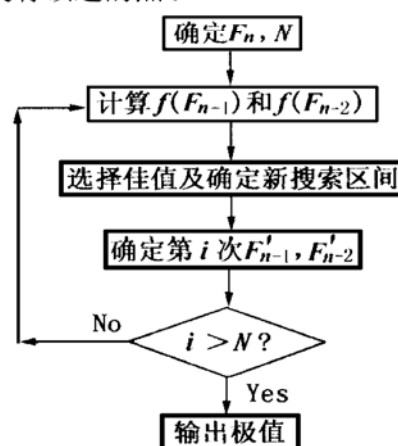


图 1 一维 FOM 程序框图

Fig. 1 Program of one dimension FOM

若所有可能试验总数大于某一个 F_{n-1} 而小于 $F_{n+1} - 1$, 则先虚设几个试验点, 凑成 $F_{n+1} - 1$ 个试验

* 国家教育部 97 博士点基金资助项目

到稿日期: 1998-12-23

点即可化为前种情况,且设虚设点的试验结果比其它试验取点效果差,可见增加虚设点并未增加试验次数。图 1 给出了求解一维函数 $f(x)$,极值在 $\{1, 2, 3, \dots, M\}$ 整数集中的 FOM 程序框图。

3 基于 FOM 的砂土液化势评价

3.1 评价指标

理论研究和实地调查表明地震砂土液化受诸多因素控制,如砂土的平均粒径和相对密度、地下水水位、地震级数及持续时间等,且每个因素的影响水平是不同的。本文选取了现场易于获取的、可靠的主要因素为评价指标,即地震级数 M 、地面水平加速度 $a_{\max}$ 、粘粒含量 F 、平均粒径 D_{50} 、上覆垂直有效应力 σ'_v 、实测标贯击数(SPT) N 。

3.2 评价模型

前人研究表明砂土液化势指数是基于经验的液化灵敏度指数,即是各影响因素的线性或非线性函数^[2,6],则砂土液化的评价可看作一个多元函数最小值的最优化问题^[7],并用多因素的 FOM 法来求解,即

$$y = \sum_{i=1}^N |P_{ij} - \varphi_i| \tag{2}$$

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{kj} - X_{ij}}{X_{kj} - X_{\min j}} & X_{ij} < X_{kj} \\ 1 + \frac{X_{ij} - X_{kj}}{X_{\max j} - X_{kj}} & X_{ij} \geq X_{kj} \end{cases} \tag{3}$$

$$X_{ij} = k_{1j}g_{Mi} + k_{2j}g_{\sigma'_v i} + k_{3j}g_{Ni} + k_{4j}g_{a_{\max} i} + k_{5j}g_{Fi} + k_{6j}g_{D_{50} i} \tag{4}$$

式中 y 为目标函数; P_{ij} 为砂土液化预测值; φ_i 为砂土是否液化实际值; X_{kj} 为优化搜索值; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 为 $\{1, 2, 3, \dots, N\}$ 正整数集合中的点; $g_{Mi}, g_{a_{\max} i}, g_{\sigma'_v i}, g_{D_{50} i}, g_{Fi}, g_{Ni}$ 为评价点的 $M, a_{\max}, \sigma'_v, D_{50}, F, N$ 经

数据预处理后的数值。并求每个优化搜索的临界 X_{kj} 的成功判别率

$$P_L = \frac{\int_{X_k}^{\infty} f_L(z) dz}{\int_0^{\infty} f_L(z) dz} \tag{5}$$

$$P_{NL} = \frac{\int_0^{X_k} f_{NL}(z) dz}{\int_0^{\infty} f_{NL}(z) dz} \tag{6}$$

式中 P_L, P_{NL} 为液化、未液化情况判别成功率,则误判率为

$$P'_L = 1 - P_L, P'_{NL} = 1 - P_{NL} \tag{7}$$

式中 P'_L, P'_{NL} 为液化、未液化情况判别误判率。

3.3 数据预处理及求解

因砂土液化的影响因素有不同的因次和离散,可采用一组新变量来代替,以便加快优化速度,即用一定分级标准将原始数据进行预处理(表 1)。

最优化原始数据取自文献[8, 9],总共 87 个数据,液化和未液化分别为 42 个、45 个,则 $F_n = 89$,即 $N = 10$ 。用多元 FOM 求解得 $k_1 = 42, k_2 = 16, k_3 = 60, k_4 = 60, k_5 = 29, k_6 = 5, X_{kj} = 329, y_{\min} = 4$,评价成功率 $P_L = 92.86\%, P_{NL} = 97.78\%$ 。

FOM 求解结果也反映了各影响因素对砂土液化的相对重要性,可见影响水平相对高的是 SPT 值和地面水平加速度峰值,其次是地震级数等。

4 实例

为了验证所建立评价模型的可行性和正确性,利用基于最优化法的评价模型对检验样本进行评价与验证。实例为拟建镇扬长江公路大桥两桥址区砂土液化判别,表 2 给出了桥址区钻孔资料初判可能液化砂土层的基本资料。检验样本的评价指标值 FOM 预报结果及规范法评价结果见表 3。可见建立的 FOM 砂土液化评价模型具有相当高的准确性,预报结果与规范法的评价结果吻合。

表 1 地震砂土液化影响因素分级标准

Table 1 Grading standard of factors of earthquake induced sand liquefaction

影 响 因 素	级 别			
	0	1	2	3
M	$M < 6.0$	$6.0 \leq M < 7.0$	$7.0 \leq M < 8.0$	$M \geq 8.0$
$a_{\max}/(m \cdot s^{-2})$	$a_{\max} < 0.10g$	$0.10g \leq a_{\max} < 0.20g$	$0.20g \leq a_{\max} < 0.30g$	$a_{\max} \geq 0.30g$
σ'_v/kPa	$\sigma'_v \geq 120.0$	$60.0 \leq \sigma'_v < 120.0$	$30.0 \leq \sigma'_v < 60.0$	$\sigma'_v < 30.0$
$F/\%$	$F \geq 10.0$	$6.0 \leq F < 10.0$	$3.0 \leq F < 6.0$	$F < 3.0$
N	$N \geq 15$	$10 \leq N < 15$	$6 \leq N < 10$	$N < 6$
D_{50}/mm	中粗砂	$D_{50} \geq 2.00$	$1.00 \leq D_{50} < 2.00$	$0.50 \leq D_{50} < 1.00$
	粉细砂	$D_{50} \leq 0.005$	$0.005 < D_{50} \leq 0.01$	$0.01 < D_{50} \leq 0.05$
				$0.05 < D_{50} \leq 0.10$

表 2 桥址区可能液化层的基本研究资料

Table 2 Basic data of possible liquefaction strata in bridge region

桥位	岩土名称	底板埋深 / m	地下水位埋深 h_w / m	平均粒径 D_{50} / mm	粘粒含量 F / %	容重 γ / (kN·m ⁻³)
世	粉砂	3.8~ 10.0	0.0~ 2.07	0.110	3.50	19.9
业	亚砂土	20.0~ 24.5	0.0~ 2.07	0.025	5.83	20.4
洲	粉砂	10.5~ 32.8	0.0~ 2.07	0.120	4.10	20.1
渡口	亚砂土	11.8~ 35.5	0.0~ 1.30	0.080	9.48	18.7

注: D_{50} , F , γ 均取平均值。

表 3 检验样本评价指标值 FOM 预报结果及其方法评价结果

Table 3 Values of indices and results from forecast by FOM and assessment using different methods

No.	钻孔号	M	σ'_v / kPa	N	$a_{\max}$ / (m·s ⁻²)	F / %	D_{50} / mm	FOM (预报)	规范法		备注
									GBJ11-89	JTJ004-89	
1	Z7	7.0	56	3	0.1698 g	6.0	0.030	L	L	L	渡口桥位
2	Z10	7.0	112	6	0.1698 g	9.0	0.018	NL	NL	L	
3	ZKC6	7.0	145	19	0.1698 g	5.0	0.080	NL	NL	NL	
4	ZKC7	7.0	137	12	0.1698 g	8.3	0.075	NL	NL	NL	
5	ZKC7	7.0	153	15	0.1698 g	7.6	0.120	NL	NL	NL	
6	Z1	7.0	34	7	0.1672 g	3.0	0.150	NL	NL	NL	一世业洲桥位
7	Z1	7.0	34	7	0.1672 g	3.0	0.180	L	L	L	
8	Z3	7.0	139	9	0.1672 g	6.5	0.100	NL	NL	L	
9	Z4	7.0	46	8	0.1672 g	5.0	0.120	NL	NL	NL	
10	G3	7.0	121	9	0.1672 g	0.0	0.140	NL	NL	NL	
11	G7	7.0	121	9	0.1672 g	1.5	0.160	L	L	L	桥位
12	G9	7.0	253	25	0.1672 g	2.0	0.320	NL	NL	NL	

注: 表中“L”代表液化; “NL”代表不液化。

5 结 语

本文成功地将 Fibonacci 最优化法应用于砂土液化势的评价, 实例应用表明建立的评价模型是有效的和可行的, 且避免了传统评价方法理论假设或室内实验引起的误差。

参 考 文 献

1 罗国煜, 李生林. 工程地质学基础. 南京: 南京大学出版社, 1990

2 刘颖, 谢君斐. 砂土震动液化. 北京: 地质出版社, 1984

3 Walsh G E. Methods of optimization. New York: John Wiley & Sons Inc, 1975. 84~ 91

4 Bergum G E, Philippou A N, Horadam A F. Applications of Fibonacci numbers. London: Kluwer Academic Publishers, 1991

5 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法. 北京: 科学出版社, 1997. 69~ 75

6 郁寿松, 石兆吉. 水平土层液化势的判断分析. 地震工程和工程震动. 1980. 试刊(1)

7 Zhang Lianyang. Assessment of liquefaction potential using optimum seeking method. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(8): 739~ 748

8 Anthony T C. Seismic liquefaction potential assessed by neural networks. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(9): 1467~ 1480

9 刘恢先. 唐山大地震震害(一). 北京: 地震出版社, 1983. 301 ~ 429