

砂土振动液化危险性分析方法比较研究

钟贻军 牟崇元

(广东省地震局 广州 510070)

摘要 介绍了4种砂土振动液化分析的概率方法: (1) 均匀泊松模型, (2) 综合概率方法, (3) 全概率公式, (4) 液化临界加速度法。后两种方法可直接应用地震危险性分析的成果, 减少了大量计算, 十分简便。算例分析结果表明, 采用10%的液化超越概率作为设防标准, 与目前常用的风险指数及常用的液化判别方法给出的结果相一致。

关键词 砂土, 液化, 概率分析

分类号 TU 441+. 2

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)01-0087-03

1 前言

若用概率分析方法给出砂层在所考虑的潜在震源影响下, 不同年限的液化超越概率, 工程可按其重要程度选用不同的风险指标, 克服了定值法中“是”与“否”的跃变缺点。这种方法能考虑各种不确定性因素的影响, 能与采用概率方法进行的地震危险性分析和结构可靠性分析相协调, 是一种很必要和有实用意义的方法^[1]。

本文介绍了几种液化的概率分析方法, 其中一些是在前人研究的基础上, 演化与开拓应用的。其计算步骤与地震危险性分析基本相同, 首先确定潜震区、地震模型和地震动衰减规律, 然后分析其影响作用。因为所分析的作用效应是液化现象, 因此除考虑传播到场址的地震动强度外, 还必须同时考虑砂层的抗剪强度。本文提出了两种能直接应用地震危险性分析成果的计算方法: 全概率分析法和液化临界加速度法, 减少了大量计算, 十分方便。

2 方法1——均匀泊松模型

参照地震危险性分析, 以 $\mu_{ij}(M \cdot R)$ 表示震级为 M_i , 震源距为 R_j 的地震年发生率。则 μ_{ij} 为

$$\mu_{ij}(M \cdot R) = \sum_{k=1}^k [n_k(M_i - \Delta M/2) - n_k(M_i + \Delta M/2)] \Delta A_{jk} \quad (1)$$

震源是否引起场址砂层液化, 通常用抗液化系数 F_l 来判别, 抗液化系数定义为砂层的抗剪强度 τ

与地震剪应力 τ_c 之比, 若采用平均剪应力法计算 τ_c , 则

$$F_l = \frac{\tau}{\tau_c} = \frac{\tau g}{0.65 C_d \gamma h a_m} \quad (2)$$

式中: C_d 为深度折减系数, γ 为土体容重, h 为砂层深度, a_m 为地面震动最大加速度, g 为重力加速度, τ 可由室内动三轴试验或现场标贯确定。当 $F_l < 1$ 时判为液化, 当 $F_l \geq 1$ 时判为不液化。令 $F_l = \tau_c$, 由式(2)求得之地面运动最大加速度为使该场点产生液化的最小地面运动强度, 本文称为液化临界加速度, 记为 a_{mc} , 则

$$a_{mc} = \frac{\tau g}{0.65 C_d \gamma h} \quad (3)$$

由液化临界加速度, 并根据该场地的加速度衰减规律, 可求出产生液化的有效影响半径 R_e 为

$$R_e = \left[\frac{\exp(b_l + bM)}{a_{mc}} \right]^{1/b_3} - 25 \quad (4)$$

引起场地液化的地震年发生率为

$$\mu(L) = \sum_{i=0}^{I_u} \sum_{j=0}^{J_e} \mu_{ij}(M \cdot R) \quad (5a)$$

$$I_u = M_u / \Delta M \quad J_e = R_e / \Delta R \quad (5b)$$

按泊松模型, 在 T 年内液化危险性的超越概率 $P(L)$ 为

$$P(L) = 1 - \exp[-\mu(L)T] \quad (6)$$

3 方法2——综合概率法

方法1给出的超越概率主要反映了地震活动年

发生率的影响, 在判别场地砂层是否发生液化时, 认为法 $Fl = 1$ 时不产生液化, 即取其概率为 0; 当 $Fl < 1$ 时产生液化, 即概率为 1。可见它还是一种确定性的判别方法。事实上, 由于受到各种不确定性因素的影响, 无论是砂层的抗力 τ 或是地震作用效应 τ_e 都有一定的离散性, 不同的抗液化系数 Fl 将具有不同程度的液化可能性。以条件概率 $P(L/a_m)$ 反映这种影响, 它表示在给定地震动强度平均值 a_m 条件下液化发生概率。假定砂层抗力 τ 与地震作用效应 τ_e 均服从对数正态分布, 则

$$P(L/a_m) = 1 - \psi \left[\ln \frac{Fl \sqrt{1 + \delta^2}}{\sqrt{1 + \delta^2}} / \sqrt{\ln(1 + \delta^2)(1 + \delta^2)} \right] \quad (7)$$

式中: δ_r, δ_e 分别为抗力和作用效应的变异系数。

另一种方法是根据震例判别结果进行统计, 给出 $P(L/a_m)$ 的分布曲线。有关文献对大量液化震害统计的结果给出, 当 $Fl = 1$ 时, $P(L/a_m) = 50\%$; $Fl = 0.5$ 时, $P(L/a_m) = 1$; $Fl = 1.7$ 时, $P(L/a_m) = 0^{[2]}$ 。

考虑上述液化条件概率影响后, 引起场地液化的地震年发生率应为

$$\mu(L) = \sum_{i=0}^{I_u} \sum_{j=0}^{J_e} P(L/a_m) \mu_{ij}(MR) \quad (8a)$$

$$J_u = R_u / \Delta R \quad (8b)$$

液化危险性的超越概率仍按式(6)计算。

4 方法 3——全概率公式

根据均匀泊松模型的基本假定, 在同一时间、地点发生两次地震的概率为零, 可以认为各微小地震事件是互不相容的, 应用全概率公式

$$P(L) = \sum_n P(L/a_m) P(a_m) \quad (9)$$

$$P(a_m) = P(a_m > a_{0n}) - P(a_m > a_{0(n-1)}) \quad (10)$$

$P(a_m > a_0)$ 为地面运动最大加速度的超越概率。可见该法能直接应用地震危险性分析的成果。在已有或同时进行地震危险性分析的场地, 可减少许多工作量。

这种方法等效于方法 2。

5 方法 4——液化临界加速度法

把液化条件概率 $P(L/a_m)$ 仍取为当 $Fl < 1$ 时为 1, 当 $Fl = 1$ 时为 0, 并以 N_c 表示对应于 $Fl = 1$ 的序号, 则式(9)变为

$$P(L) = \sum_{n=0}^{N_c} P(a_{mn}) \quad (11)$$

把式(10)代入式(11)展开得

$$P(L) = P(a_m > a_{0N_c}) - P(a_m > a_{0(N_c-1)}) + P(a_m > a_{0(N_c-1)}) - P(a_m > a_{0(N_c-2)}) + \dots + P(a_m > a_{01}) - P(a_m > a_{00}) = P(a_m > a_{mN_c}) - P(a_m > a_{00}) \quad (12)$$

式中: a_{00} 为该场地可能出现的地面运动最大加速度的上限值, 即最大震级 M_u 的震中加速度, 显然大于该值的超越概率为 0, 即 $P(a_m > a_{00}) = 0$ 。而且 $a_{mN_c} = a_{mc}$, 则式(12)变为

$$P(L) = P(a_m > a_{mc}) \quad (13)$$

式(13)表明, 砂土振动液化的超越概率等于该砂层液化临界加速度的超越概率。也就是说, 对所考虑砂层, 只要根据其抗液化强度 τ 按式(3)求出其液化临界加速度 a_{mc} , 查出其对应的超越概率 $P(a_m > a_{mc})$, 即为液化危险性的超越概率 $P(L)$ 。在已有地震危险性分析成果的场地, 这是工作量最少, 最简便的方法。这种方法等效于方法 1。

6 算 例

以某水下隧道地基砂垫层为例, 采用上述 4 种方法对砂垫层地震液化的危险性进行了分析。计算了两个位置, 隧底 A 点和隧侧 B 点。

砂垫层是一层人工砂层, 根据灌砂试验结果, 估计隧底砂垫层可能达到的平均相对密度 D_r 为 0.59, 隧侧离灌砂孔远, 取小一些, 为 0.50。对应这种相对密度, 砂垫层在地震影响作用下不同年限的液化超越概率见表 1。由于隧道是一种空腹结构, 使砂垫层有效上覆压力明显减少, 所以隧底 A 点的液化超越概率明显大于隧侧 B 点的超越概率。

另外, 还按砂垫层不同的相对密度值计算了其液化的超越概率, 计算结果见表 2 和图 1。从所得结

表 1 某隧道砂垫层液化危险性分析成果

Table 1 Results of padding-sand liquefaction analysis of a tunnel

位置	隧底 A 点				隧侧 B 点					
	D_r	超越概率/%				超越概率/%				
年限/a	Fl	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	Fl	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1		2.6	3.0							
25	1.17	6.4	7.3		8.0	2.00	0.8			1.1
50	0.83	12.4	14.0	16.5	15.3	1.52	1.6		3.8	2.5
100	0.66	23.2	26.0	29.6	26.0	1.19	3.1		5.9	5.0
150	0.58	32.7	36.3		36.2	1.06	4.6			7.5
200	0.54	41.0	45.2		48.0	0.98	6.0			9.8
300	0.49	54.7	59.4		60.0	0.89	8.9			13.5
500	0.43	73.3	77.8		77.0	0.80	14.4			21.0

表 2 不同密度垫砂液化危险性分析成果

Table 2 Results of different density padding-sand liquefaction analysis

位置 D_r	平均应力法		50 a 超越概率/%				
	F_l	结果	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	
隧底 A 点	0.40	0.52	液化	33.3	34.3	36.1	35.0
	0.50	0.68	液化	19.9		24.1	23.2
	0.55	0.76	液化	15.7			18.8
	0.59	0.83	液化	12.4	14.0	16.5	15.3
	0.65	0.96	液化	8.6			11.5
	0.70	1.10	不液化	5.8		9.4	7.8
	0.75	1.23	不液化	3.7	4.9	6.9	5.0
隧侧 B 点	0.10	0.29	液化	62.9		72.4	
	0.20	0.59	液化	26.3		30.3	29.2
	0.30	0.88	液化	10.1	11.8	15.2	13.8
	0.40	1.17	不液化	4.1		7.9	6.8
	0.50	1.52	不液化	1.6		3.8	2.5
	0.60	1.92	不液化	0.5		1.6	0.8
	0.70	2.46	不液化	0.1		0.5	0.2
	0.80	3.11	不液化	0.0		0.1	

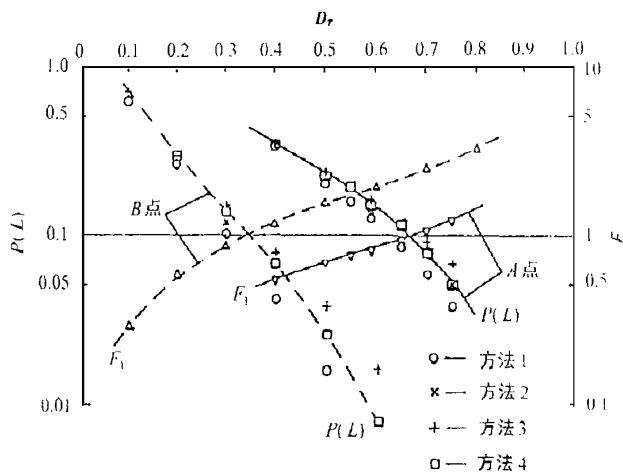


图 1 50 a $P(L)$, F_l 与 D_r 关系

Fig. 1 Relation of $P(L)$, F_l with D_r in 50 years

果可以看出, 对应于抗液化系数 $F_l > 1$ 的情况, 液化超越概率 $P(L)$ 绝大部分都小于 10%; 同样, 当 $F_l < 1$ 时, 绝大部分 $P(L) > 10\%$ 。两者基本上在 $F_l = 1$ 时, $P(L) = 10\%$ 处相交。因此, 取液化超越概率为 10% 作为设防标准是合理的, 并与常用的液化判别方法相一致。

7 结 语

砂土液化危险性分析的概率方法能更广泛处理各种影响因素, 更合理地给出液化危险性指标, 既能与地震危险性概率分析相一致, 又能与结构可靠性分析相适应, 是一种很有应用价值的方法。本文介绍了四种实用方法, 其中方法 1 和方法 4 忽略了确定性因素的影响, 但可减少计算工作量, 特别是方法 4, 在已有地震危险性分析成果的场址, 是十分简便的方法。方法 2 和方法 3 可以考虑变异系数的影响, 能进一步适应可靠度分析的要求。

根据本文分析的结果, 取砂土震动液化超越概率 10% 作为设防标准是合理的。

参 考 文 献

- 1 龚思礼, 周锡元, 符圣聪等. 建筑抗震设计新发展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
- 2 Tosdjo Iwasaki, Tadashi Arakawa, Ken-Ichi Tokida. Simplified procedures of assessing soil liquefaction during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, (2): 925~ 931

PROBABILITY ANALYSIS OF SAND LIQUEFACTION

Zhong Yijun, Mou Chongyuan

(Guangdong Seismological Bureau, Guangzhou 510070 China)

Abstract The four probability methods of sand liquefaction analysis are introduced: (1) homogeneous poisson model, (2) comprehensive probability, (3) total probability, (4) critical acceleration. The later two methods can be used in earthquake hazard analysis directly, and the result is similar to usual methods, as the example indicates

Key words sand, liquefaction, probability analysis