

软土地基随机震陷分析

22-24

顾长存 刘汉龙

[收稿日期]

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘要 通过静力分析和随机地震反应分析,在确定性震陷分析的基础上,建立软土地基随机震陷计算方法,并对某码头软土地基进行数值计算,其结果符合一般规律。

关键词 软土地基 随机分析 震陷 抗震设计

根据唐山、邢台等地地震灾害的调查分析,软土地基的震陷是导致建筑物破坏的直接原因之一。因此,确定未来可能产生的震陷成为软土地基抗震设计的一个重要内容。目前一般用静动力结合的软化模量^[1]或等价结点力法^[2]对某一地震波进行确定性数值计算。然而,现有的研究表明,土体的地震反应与输入的地震波形有密切的关系^[3]。对某一建筑物地区,要想准确地估计出今后若干年可能遇到的地震波形是不可能的。因此,研究者选取的另一途径是将地震震动作为随机过程看待,经过场地地震危险性分析,从统计平均的角度对软土地基抗震性能进行评价。

本文通过对软土地基静力分析和随机地震反应分析,在文献[2]确定性震陷计算的基础上,将地震震动模拟为平稳高斯过滤白噪声过程,建立一种软土地基随机震陷计算方法。作为实例,对某码头地基进行了随机震陷分析。

1 软土地基静力计算

地基中初始静应力对地基在地震荷载作用下的性状有很大影响,尤其是破坏面上的初始法向应力及相应的初始应力比对动力性状影响更大。因此,为了改进计算精度,这里采用邓肯-张非线性弹性模型,其切线模量为

$$E_t = kP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\theta)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \quad (1)$$

式中 σ_1, σ_3 分别为大、小主应力; c, φ 分别为土的凝聚力和内摩擦角; k, n 分别为土的模量系数和模量指数; R_f 为破坏比; P_a 为大气压力。

静力平衡方程用中点增量法求解,计算中考虑拉伸和剪切的修正以及固结压力 σ_3 的作用历史和卸荷的影响。

2 软土地基随机地震反应分析

对于高阻尼土料,一般可假设地震动输入为平稳过程,地基的随机反应也近似为平稳过程。因此,在确定地震输入时,假设其为平稳高斯白噪声过程,其谱密度用金井清谱表示

$$S(\omega) = \frac{1 + 4\lambda_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\lambda_g^2(\omega/\omega_g)^2} \quad (2)$$

式中 ω_g, λ_g 分别为土层过滤器的圆频率和阻尼比,由地震烈度和场地条件确定。

根据场地地震危险性分析,确定地基输入地震动过程中若干模型参数,并从土料单元动力试验和现场波速测试中确定各类土的等价线性动应力和应变模型参数,然后按照

文献[4]介绍的土体平稳随机地震反应分析方法,可以求出地基内各单元的随机地震响应。对于地基的震陷来说,主要关心的是各单元的剪应力响应过程的各阶谱矩、平均穿零率和峰值概率密度等。因此,地震随机反应结束后,根据剪应力峰值分布,推求出剪应力峰值概率密度函数为

$$P(\tau_p) = \sqrt{\frac{1-a^2}{2\pi\sigma_\tau^2}} \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{2\sigma_\tau^2(1-a^2)}\right) + \frac{a\tau_p}{2\sigma_\tau^2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\tau_p}{\sigma_\tau \sqrt{2a^2-2}}\right)\right] \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{2\sigma_\tau^2}\right) \quad (3)$$

式中 a 为带宽参数, $a = \frac{\sigma_\tau^2}{\sigma_\tau \sigma_{\dot{\tau}}}$; $\sigma_\tau, \sigma_{\dot{\tau}}$ 分别为剪应力及剪应力速度的标准差。由式(3)可见,该分布受带宽参数 a 控制,当 $a \rightarrow 1$ 时, $P(\tau_p)$ 退化为瑞利分布,其均值为

$$E[\tau_p]_2 = \int_0^\infty \tau_p \frac{\tau_p}{\sigma_\tau^2} \exp\left[-\frac{\tau_p^2}{2\sigma_\tau^2}\right] d\tau_p = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_\tau \quad (4)$$

当 $a \rightarrow 0$ 时, $P(\tau_p)$ 退化为高斯分布,其均值为

$$E[\tau_p]_1 = \int_{-\infty}^\infty \tau_p \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \exp\left[-\frac{\tau_p^2}{2\sigma_\tau^2}\right] d\tau_p = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_\tau \quad (5)$$

实际上,土体反应介于以上两种分布之间,即带宽参数介于 0 与 1 之间。因此,可用如下方法确定土体的等价剪应力。

$$\tau_{eq} = E[\tau_p]_1 + a(E[\tau_p]_2 - E[\tau_p]_1) \quad (6)$$

由式(6)计算的 τ_{eq} 反映了在随机地震作用下剪应力响应的平均振动幅值,这种平均包含了对大量历时曲线统计的平均,其值比单一的历时曲线响应分析得出的结果更具代表性和普遍性,与之相应的平均振动次数为

$$N_{eq} = VT \quad (7)$$

式中 V 为平均穿零率, $V = \sigma_{\dot{\tau}}/2\sigma_\tau$; T 为平稳运动总历时。

3 软土地基随机震陷分析

软土地基随机震陷分析是在上述静力分

析、随机地震反应分析和确定性震陷分析方法的基础上进行的。

3.1 计算随机等价结点力

由前述剪应力平均振动幅值,按如下方法求出地基内某单元等价结点力响应的平均振动幅值(见图 1)。

$$F_h = \frac{1}{2} \tau_{eq} (x_i - x_{i+1}) \quad (8)$$

$$F_v = \frac{1}{2} \tau_{eq} (y_i - y_{i-1}) \quad (9)$$

将地基内每个结点周围单元结点力叠加,可以得到总的等价结点力响应的平均振动幅值。

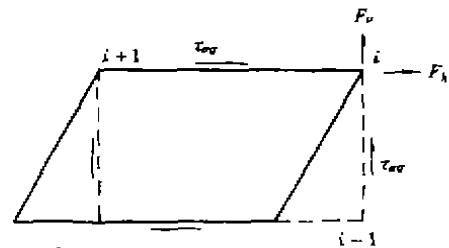


图 1 等价结点力

3.2 计算地基的震陷量

在求出了等价结点力的平均振动幅值后,以静力计算迭代结束时的模量为初始模量,将等价结点力的平均振动幅值作用到地基内单元各结点上,采用以下 Taniguchi 动应与残余应变关系:

$$\frac{q_d}{p_0} = \frac{\gamma_R}{a + b\gamma_R} \quad (10)$$

式中 $q_d = \tau_d = \sigma_d/2$; $p_0 = \frac{1}{2}(\sigma_{10} + \sigma_{30})$, σ_{10}, σ_{30} 为初始主应力; γ_R 为残余剪应变, σ_d 为动应力幅值; a, b 为与初始应力比和振动周数有关的参数,由试验确定。

通过迭代计算的竖向变形即为软土地基的随机震陷。根据以上分析编制了相应的有限元计算程序,其流程见图 2。

4 实例分析

选择一典型码头软土地基进行分析。地基土为软粘土,且完全饱和,饱和容重为 1.8 kN/m^3 ,泊桑比为 0.45,根据场地条件和地震烈度,选取金井谱参数为 $\omega_g = 12.56 \text{ s}^{-1}$, λ_g

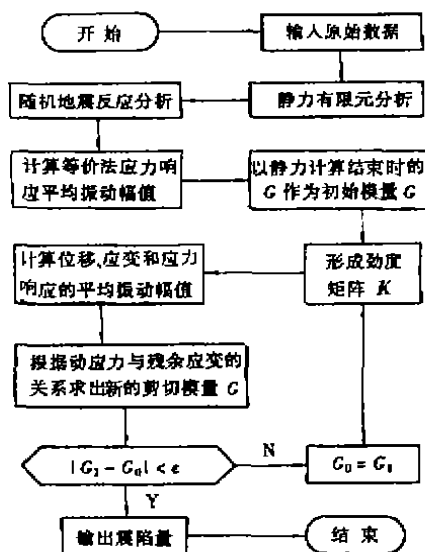


图2 计算流程图

$\gamma = 0.6$, 平均最大地震加速度 $a_m = 0.15g$, 地震持续时间为 $10s$, 最大剪切模量系数 $K_m = 20$ 。静力计算参数及土料的 $G/S_u - \gamma$ 和 $\lambda - \gamma$ 关系曲线按文献[2]提出的方法选取, 残余变形参数 a 和 b 由试验确定, 见附表。

附表 残余变形参数

K_c	a			b		
	$N_{eq} = 5$	$N_{eq} = 10$	$N_{eq} = 20$	$N_{eq} = 5$	$N_{eq} = 10$	$N_{eq} = 20$
1.5	0.364	0.573	0.782	4.000	3.923	3.823
2.0	0.291	0.474	0.657	3.932	3.871	3.809
2.5	0.218	0.375	0.553	3.863	3.819	3.795

按以上参数进行软土地基震陷计算。图3为地震作用下码头地基最终轮廓变形图。图中同时列出了4个控制点的具体沉降数值, 该值与文献[5]中模型试验结果相符, 表明了计算方法的合理性。由图3结果可见, 在 $1.47m/s^2$ 地震作用下, 坡顶高程沉陷了近

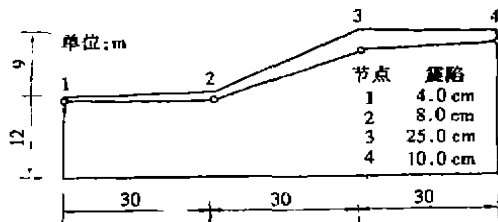


图3 最终轮廓变形

25 cm, 这些不均匀变形将对上部结构的安全和使用带来不利影响。

以上分析某码头地基震陷仅是随机地震作用下的平均震陷。如果将其按一般正态分布考虑, 则在 $a_m = 1.47m/s^2$ 地震作用下, 将有 50% 的可能使坡顶产生 5 cm 的震陷。如果变形的离散性较大。当取震陷的标准差等于均值时, 如控制震陷为 50 cm, 则超越概率为 16%; 如控制震陷为 70 cm, 则超越概率为 4%, 从而可以进一步进行软土地基的地震危险性分析, 以便从安全和经济的角度进行最优化设计。

5 结 语

我国是一个多地震国家, 而软土地基分布又极为广泛, 因此, 有必要进行软土地基的抗震研究。地震动过程的随机性又表明了进行随机振动分析的必要性。因此, 本文通过静力分析和随机地震反应分析在确定性震陷计算的基础上, 建立了软土地基随机震陷计算方法, 从平均意义上对某码头软土地基震陷进行计算和分析, 并以模型试验结果进行了验证, 为软土地基抗震设计计算提供了有益的参考。

参考文献

- 1 王建华. 软土地基震陷分析. 见: 朱向荣主编. 岩土力学与工程的理论与实践. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 391 ~ 393
- 2 Liu Hanlong. Earthquake-induced permanent deformation on Soft soil foundation. In: Proc of Int Conf on soft Soil Engineering, Guangzhou, 1993. 910 ~ 914
- 3 Makdisi F I, Seed H B. Simplified procedure induced deformation. In: Proc ASCE JGED, 1978, 104(GT7): 849 ~ 869
- 4 刘汉龙. 土体地震永久变形分析: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1994
- 5 吴再光等. 考虑岸坡变形影响的高桩码头抗震模型试验研究. 见: 第三届全国地震工程会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 1990. 339 ~ 342

(收稿日期: 1995 - 11 - 22)