

地表地震反应的理论计算

尹心方 钟孟邻 周炳荣

(云南省地震局)

摘 要

本文在“水平假定”的前提下,将具多层土的建筑场地看作一单位横截面的层状土柱,并简化为集中质量块的剪切梁计算模型。考虑到土壤的非线性特性,采用稳定的Wilson- θ 法计算从基岩到地表的各层土地震反应。最后还指出了本文的工程意义。

一、引 言

历次地震宏观现场调查发现,地震烈度分布一般都有异常现象。究其原因,除了地质构造,地形地貌和地下水位等因素外,场地土的影响是很明显的。

近年来一些工程设计单位从震害实际出发,要求地震部门给出场地土对地表地震反应影响的估计。为此目的,地震工程界的一些同志作了深入的研究并已取得了一些较为满意的结果^[1,2],既合理地介释了震害异常现象又引出了抗震措施。

地表地震反应分析认为,地表运动主要是来自下卧岩石的剪切液通过土层垂直向上传播所引起的,而在土柱基底处的岩石运动性质是已知的^[8],见图1,2。根据这一

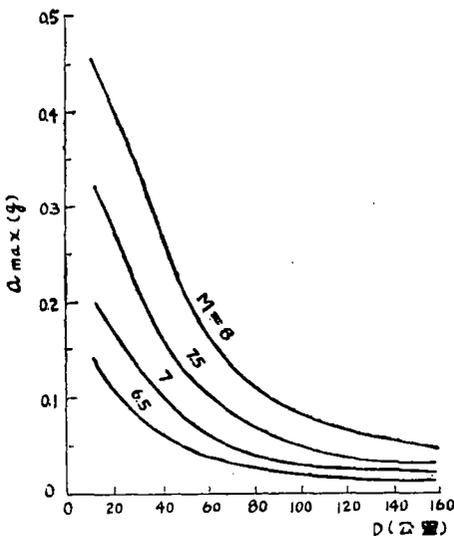


图1 基岩最大加速度与发震断层距的关系

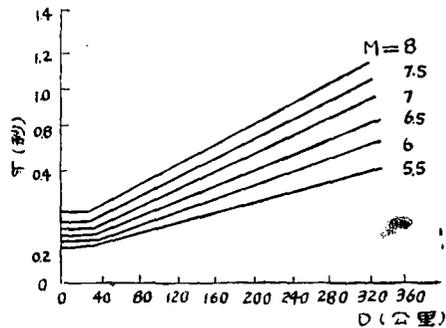


图2 基岩最大加速度的卓越周期与发震断层距的关系

假设已经提出了分析地表地震反应的几种方法：波传播法、有限元法和集中质量法。无论采用那种方法，在计算过程中都必须考虑土壤剪应变—模量—阻尼的非线性特性。因此运动方程中的系数是剪应变的函数，从而给求介地表地震反应带来很多困难。本文采用多次逐步逼近法求介土层的非线性反应较之一些人采用等效线性模型求介更为精确。

为了比较精确的估计场地地表反应，还必须详细的知道场地土各层的物理参数以及它们在动荷载作用下的非线性特征。这就要求工程设计单位事先收集整理好建筑场地各土层的性能，越详细越好，以便根据计算机容量和要求精度合理分层。当设计地震确定时，就可以根据本文最终导出的公式计算建筑场地的地表反应参数，为工程设计单位提供设计依据。

二、计算模型和运动方程

地震时地表运动主要来自下卧岩石的剪切波通过各土层向上传播所引起的。若各土层为倾斜边界的或同一水平层上的材料是不均匀的，则地震反应比较复杂，须用有限元法求介。若各土层为水平边界且同一层的材料均匀、延伸较远，则可取一单位横截面的土柱采用集中质量的剪切梁计算模型，如图 3, 4 所示。各集中质量块间用弹簧和阻尼相连。弹簧表示集中质量块间阻止横向变形的土壤的刚度性能，是土壤剪切模量的函数。阻尼表示运动过程中集中质量块的能量消耗。

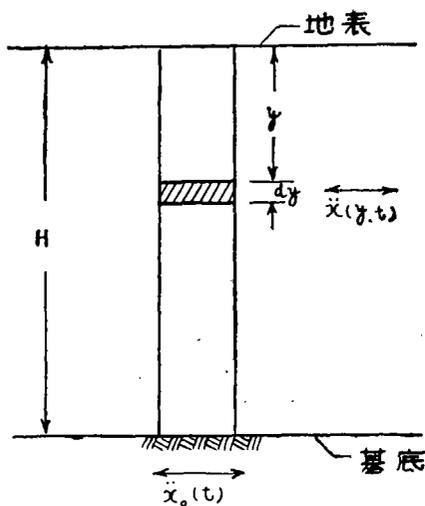


图 3 单位横截面土柱剪切变形

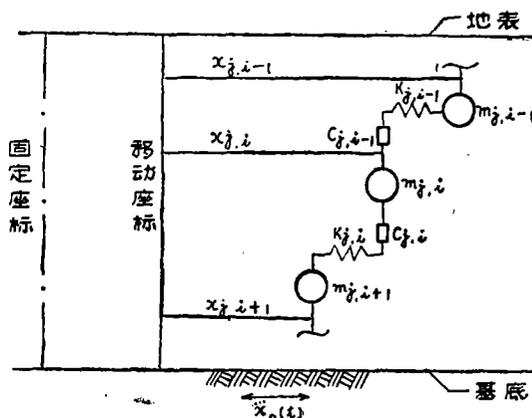


图 4 集中质量块剪切计算模型

土柱集中质量系在基底输入一个水平地震加速度作用下的运动方程为

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = -M\ddot{x}_0(t) = P(t) \quad (1)$$

式中M为主对角线质量矩阵；K为三对角型刚度矩阵；C亦为三对角型阻尼矩阵，它是质量矩阵和刚度矩阵的线性组合，即

$$C = \alpha_j M + \beta_j K$$

而 $\alpha_j = \lambda_j \omega_j$, $\beta_j = \lambda_j / \omega_j$, $\omega_j = \frac{\pi}{2H_j} \sqrt{G_j/g/r_j}$

其中, H_j 、 r_j 、 \bar{G}_j 、 λ_j 、 ω_j 分别为第j层土的厚度、容重、平均剪切模量、阻尼比和圆频率; $\ddot{X}(t)$ 、 $\dot{X}(t)$ 、 $X(t)$ 分别为在时刻t集中质量块相对基底的速度、速度和位移列向量; $\ddot{X}_0(t)$ 为在时刻t输入土柱基底的水平地震加速度向量; $P(t)$ 为在时刻t集中质量块的等效地震荷载向量,应当指出, M 、 C 、 K 都是N阶矩阵,而N为土柱集中质量的数目。

三、关于M、C、K的建立

建立M 根据实际情况并考虑计算方便,将土柱分成L层,其中某一层j又可分为 N_j 个集中质量,所以整个土柱集中质量的数目为

$$N = \sum_{j=1}^L N_j$$

N_j 的确定取决于计算精度和计算机容量。理论上认为, N_j 愈大,计算精度愈高,但计算量愈大。在通常情况下,根据土层的基本周期和计算精度,可用图5确定 N_j 值。土层周期可粗略根据

$$T_j = \frac{4 H_j}{\sqrt{G_j g / r_j}}$$

确定。其中 G_j 为土柱中第j层土的最大剪切模量, g 为重力加速度, H_j 、 r_j 的意义同前。

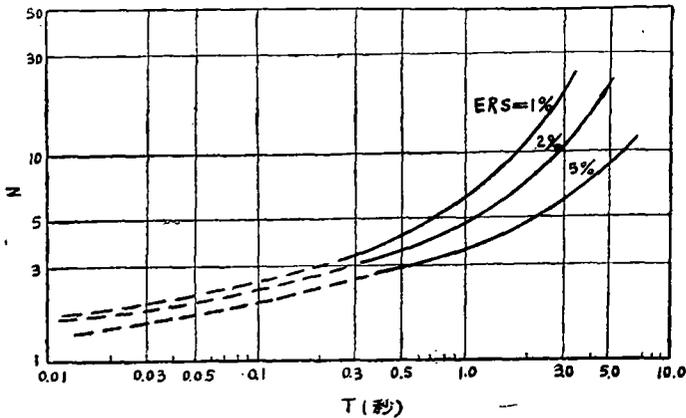


图5 N与T的关系

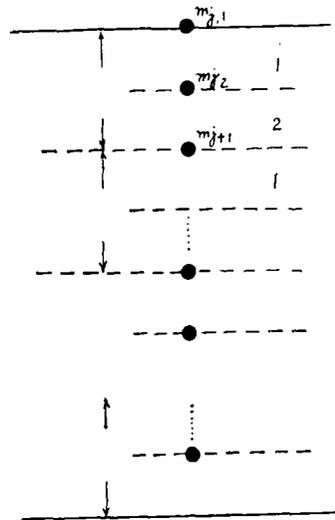


图6 质量往上集中示意图

每层土的质量块往哪里集中,原则上是任意的。一般来说,可以往上,往下或向中间集中。本文采用往上集中的方式,即分层界面处的集中质量块是下一层往上集中的第一个集中质量块,如图6所示。知道了分层土的容重和每层集中质量块的数目 N_j ,就很容易形成主对角线型N阶质量矩阵

回到中点，以保证其运算过程的无条件稳定。

由图10，令 $\tau = (t + \Delta t) - (t - \Delta t) = 2 \Delta t$ 。设 $\ddot{X}(A')$ 在区间 τ 内按线性分布，即

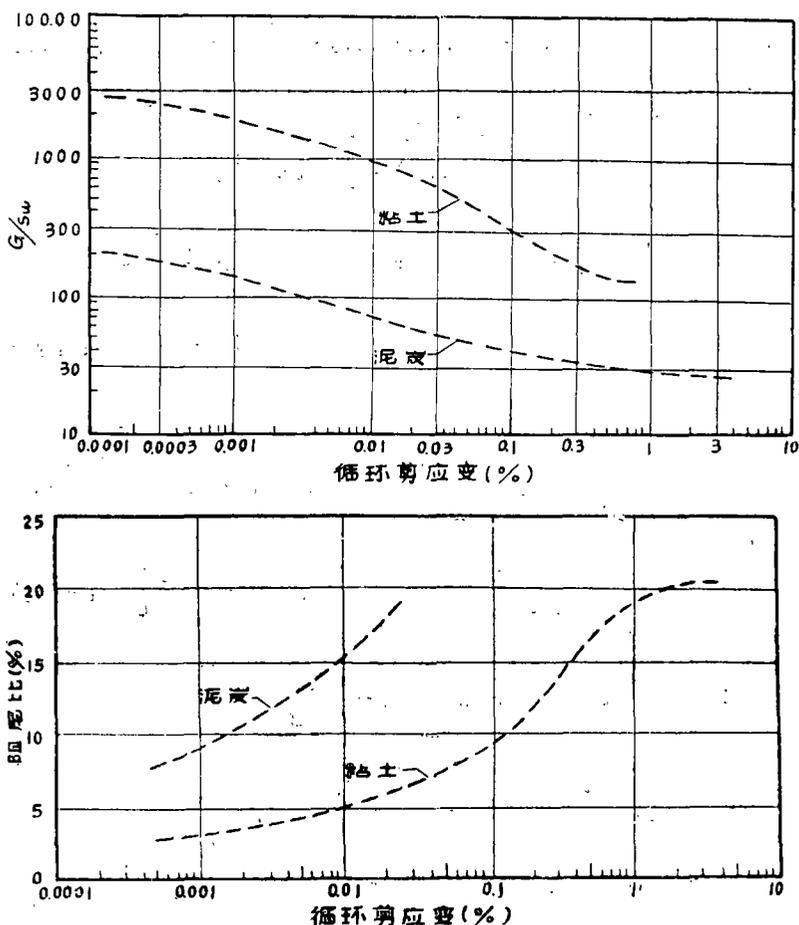


图9 饱和粘土和泥炭的模量和阻尼比

$$\ddot{X}(t') = \ddot{X}(t - \Delta t) + \frac{\ddot{X}(t + \Delta t) - \ddot{X}(t - \Delta t)}{\tau} t' \quad (5)$$

应当指出，这里的 t' 是相对于 $t - \Delta t$ 点的时间坐标，是变量。对(5)式连续积分二次，并当时间增量 t 增至 $t + \Delta t$ 点时，即时间增量为 τ 时，得

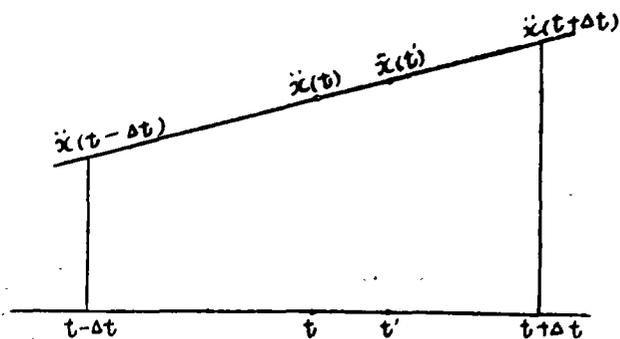


图10

$$\dot{X}(t + \Delta t) - \dot{X}(t - \Delta t) = \ddot{X}(t - \Delta t) \tau + \frac{\ddot{X}(t + \Delta t) - \ddot{X}(t - \Delta t)}{2} \tau \quad (6)$$

为 $(t - \Delta t)$ 至 $(t + \Delta t)$ 间的中点, 与运动方程(1)中的时刻 t 有所区别*。

到此, 已全部导出了 $\ddot{X}(t)$ 、 $\dot{X}(t)$ 和 $X(t)$ 的表达式(17)、(18)、(19)。这样就可以完全获得地震作用下土柱各层的加速度、速度和位移时程曲线, 特别是获得了在地震作用下的地表加速度、速度和位移时程曲线。

五、本文的工程意义

本文导出了剪切波从土柱基底通过各层土传至地表产生的各层土及地表的加速度、速度和位移反应计算公式, 对某一特定场地的烈度计算以及如何选择有利场地和采取抗震措施具有如下的工程意义。

1. 根据算出的地表运动参数, 可以直接给工程设计单位提供建筑场地的加速度、速度和位移峰值, 作为其场地烈度的定量指标。

2. 计算过程表明, 地表运动除与基底输入的地震加速度特征(如幅值、频率和持续时间)有关外, 包括地表在内的土柱各土层的性质(如层厚、容重、剪切模量和阻尼比)都有严重的影响。若改变地表层厚度, 采用夯实或桩基等措施(这些措施主要是用来提高地基的强度)来变化地表层性质, 则可以通过反复计算、修改, 直到获得预期的地表运动参数。

3. 从计算过程中, 可以看出土柱中哪一层起主要作用。因此, 假若算出的地表运动参数不满足设计要求而又不能采用其他变化措施, 则可避开这种类型的场地另行选择。

4. 对计算所得的地表加速度, 速度和位移时程曲线进行频谱分析, 就可以得到建筑场地的加速度、速度和位移谱。这样, 设计人员可以根据实际需要, 任意选用合适的谱曲线进行工程设计。

(1980年2月6日收到)

参 考 文 献

- [1] 兰州地震大队抗震组, 地形条件对震害影响问题的理论分析与探讨, 1975。
- [2] 田启文等, 砂土液化对地震动的影响, 中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告, 1976。
- [3] H.Bolton Seed, I.M.Idriss, F.W.Kiefor, Characteristics of Rock Motion During Earthquakes, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol.95, No.SM5, 1969。
- [4] H.Bolton Seed and I.M.Idriss, Analyses of Ground Motions at Union Bay, Seattle During Earthquakes and Distant Nuclear Blasts, BSSA, vol.60, No.1, 1970。
- [5] K.J.Bathe and E.L.Wilson, stability and Accuracy Analyses of Direct Integration Methods, EESD, vol.1, No.3, 1973。

THEORERICAL COMPUTATION OF GROUND SEISIC RESPONSE

Yin Xinfang

Zhong Menglin Zhou Bingrong

(Seismological Bureau of Yun Nan province)

abstsact

On the basis of horizontal assumption, the building site with mnlti-layer soil is regarded as a layered soil column ^{W. E. S.} of an unit cross section and is simplified as the she^{ay}rebeam computing model of the lumped-mass. Taking account of the non-linear characteristics of soils, ~~we~~ ~~have~~ use^Sd the method of stable wilson- θ to compute the seismic response of every layer soil from ~~from~~ base rock to ground. Finally, it is pointed out that this paper is of some significance in engineering.