) 1-7	
第 26 卷 第 2 期	カ	学	学	报	Vol. 26, No.2
1994 年 3 月	ACTA MECHANICA SINICA			Mar., 1994	

饱和砂土对地震的动力响应。

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

P315

分 提要 本文用"工程近似"方法研究了饱和砂土对地震的动力响应。根据饱和砂土对循环荷载动态响应的机理建立了简化模型,给出了描述动态响应的动力方程和描述孔 压产生与消散的扩散方程。用 Newmark 方法与有限差分数值求解这些方程。求得了饱 和砂土层对地震的动力响应,包括孔压、剪应力与表面加速度的变化,并对数值结果进行 了分析、讨论。

关键词 土动力学、饱和砂土,地震动力响应

1. 引言

75-1-756

2

۰.

ţ

饱和砂土对地震荷载的动力响应是非线性土动力学中一个重要而又困难的问题. 最近几十年来,工程师和地质学家对饱和砂土在地震荷载作用下的液化问题极为关 注,特别是在 1964 年 Alaska 和 Niigata 地震之后,由于土的液化所引起的多种破坏现 象更加促使人们加强了对饱和砂土地震液化的研究.在巨大工程结构物的建设中, 例如在大坝、核反应堆、海洋平台的设计中,地震液化问题的研究都是一个重要课 题.

Seed 等采用迭代逼近的方法分析了 Sheffield 坝的地震液化问题 ^[1]. 他们规定剪 切模量为零时就发生液化,按照这个办法预言了液化过程的发展、但是在他们的分 析中没有考虑孔隙水压力对剪切模量的影响,

Streeter 等^[2] 提出了考虑孔隙水压力影响的动态响应数值方法、但是在他们的 方法中,孔隙水与土骨架是作为非耦合问题而分开处理的、孔隙水压力的影响由引 进特殊的准循环与永久体积变形的变化来解决,但对于体积变化的计算没有建立起 一种方法。

本文采用了"工程近似"方法研究了饱和砂土层对循环荷载的动力响应,首先 分析了饱和砂土层对循环荷载响应的机理,分析中考虑了孔隙水与土骨架的耦合效 应,建立了描述孔隙水压力产生与消散过程的扩散方程,然后用非线性弹簧连接集 中质量系的离散模型来描述砂土层对循环荷载的动力响应.用 Newmark 方法与有限 差分法分别求解动力方程与扩散方程,求得了实际地震波输入时饱和砂土层动力响 应的数值结果,并对数值计算结果进行了分析讨论。

2. 饱和砂土对循环荷载响应的机理

1) 国家自然科学基金资助项目。

本文于 1993 年 6 月 7 日收到第一稿, 1993 年 10 月 25 日收到修改稿。

维普资讯 http://www.cqvip.com

ŧ

地震产生的剪应力与剪应变引起晶粒接触面的滑移.结果,对于干砂引起体积的压缩.对于饱和砂,砂的体积变化意味着相应量的流体流出,但这是一个依赖于时间的过程.饱和砂土中,由于水不能瞬态地排出以适应体积压缩的变化,砂的体积压缩将被推迟.结果,松弛的砂骨架会将部分晶粒之间的作用力即有效应力转送给孔隙水,导致孔隙水压力的增加.相应地,有效应力减少,砂的骨架结构就产生回弹.所以,饱和砂在循环荷载作用下的剪切压缩过程中同时存在着两种机制:排水和逐渐地体积压缩;变形和孔隙水压力的增加.

饱和砂土在单剪循环加载条件下,由于晶粒接触面之间的相对滑移导致体积的 压缩,所以体积应变的改变量是剪应变幅值的函数.对于小剪应变幅值的循环加载, 其加载过程中产生的孔压增加相对于初始孔压来说是个小量.于是,可以假设:不 论是排水还是不排水情况,循环加载过程中所引起晶粒接触面之间的作用力是相同 的;由晶粒接触面之间的相对滑移所引起的体积应变增量也是相同的.如果令 Δε_{ud} 表示排水条件下循环加载过程中发生体积减少对应的纯体积应变增量.在不排水条 件下,由于部分有效应力转送给了孔隙水,引起孔压的增加和有效应力的减少会产 生部分的体积回弹.纯体积应变增量等于滑移变形引起的体积减少与回弹变形引起 的体积增加这两部分之差.在循环加载过程的末端,我们有:孔隙流体的体积变化 等于砂结构纯的体积变化.即

$$\frac{\Delta u n_e}{K_w} = \Delta \varepsilon_{vd} - \frac{\Delta u}{E_\gamma} \tag{1}$$

上式中, K_w 是孔隙水的体变模量, n_e 是孔隙率, Δu 是循环加载过程中孔压的增加, E_γ 对应于某个初始垂直有效应力卸载曲线的切向模量, $\Delta \epsilon_{vd}$ 是由于滑移变形引起的砂结构的体积减少.

对于饱和砂土来说,由于 $K_w >> E_\gamma$,故由式 (1) 可得到

$$\Delta u = E_{\gamma} \Delta \varepsilon_{vd} \tag{2}$$

循环加载条件下关于体积应变变化的实验研究表明^[3,4]:体积应变增量 Δε_{vd} 是 总体积应变 ε_{vd} 和剪切应变幅值 γ 的函数,即

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + C_3 \varepsilon_{ud}^2 / (\gamma + C_4 \varepsilon_{vd})$$
(3)

上式中实验常数 C1, C2, C3, C4 依赖于砂的类型与相对密度.

对任何给定的有效应力 σ', ,回弹模量可以表示成 🖻

$$E_{\gamma} = (\sigma_{\nu}')^{1-m} / m K_2 (\sigma_{\nu 0}')^{n-m}$$
(4)

其中 σ'_{v0} 是初始有效应力, 而 K_2 , m 和 n 是实验常数, 由不同初始有效应力的卸载曲线得到.

如果饱和砂土在循环加载的过程中能排水,则将同时存在着孔隙水压力的产生 与消失.这样,孔隙水压力的增长比完全不排水的情况要小.在任意时刻 t 孔隙水

252

253

J

٩,

ļ

٠

压力的分布由下列方程给出

$$\frac{\partial u}{\partial t} = E_{\gamma} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + E_{\gamma} \frac{\partial \epsilon_{vd}}{\partial t}$$
(5)

上式中, u 是孔隙水压力, K 是渗透率, yu 是水的容重, 而包含 evd 的项表示孔 隙水压力的内部产生,在循环加载过程中,各个不同地点产生的孔隙水压力不能瞬 态达到平衡,孔压的瞬态梯度存在会导致孔隙水不断流动,所以方程 (5)表示了同 时存在孔压产生和重新分布的纯的效应,

3. 饱和砂土对地震荷载响应的力学模型

考虑置于水平岩床之上具有某个厚度在水平方向无限伸展的饱和砂层. 土层的 性状仅在垂直方向发生变化. 外加的地震荷载是从岩底垂直向上传播的水平剪切波. 在这种情况下, "工程近似"等价于剪切梁,可以用由非线弹性弹簧连接的集中质 量系 (*m*₁, *m*₂,...,*m*_n)的力学模型来描述. 集中质量由非线性弹簧来连接. 弹簧常数 *K*_i 可以写成

$$K_i = G_i / h_i \tag{6}$$

这里 G_i 是 i 层的剪切模量. 剪切模量 G 可以表示成平均法向有效应力 σ'_m 的函数 ^[6]

 $G = 1000K_2(\sigma'_m)^{1/2} \tag{7}$

上式中 K₂ 是随剪应变"变化的参量,如 图 1 所示.

于是, 土层系统的运动方程就可以写 成

 $[M]\{\ddot{Z}\} + [c]\{\dot{Z}4\} + [K]\{Z\} = \{R(t)\} \quad (8)$



上式中, [M] 是对角质量矩阵, [C] 是粘性阻尼矩阵, [K] 是三对角对称非线性刚 度矩阵, $\{R(t)\}$ 是外加激震力, $\{Z\}$, $\{Z$

当加载矢量是加速度 $\{\ddot{u}_g\}$ 的情况, $\{R(t)\}$ 可以表示为

$$\{R(t)\} = -[M]\{\ddot{u}_g(t)\}$$
(9)

阻尼矩阵、在仅考虑 Rayleigh 阻尼的情况,阻尼与刚度成正比,可写成

$$[C] = a_1[K] \tag{10}$$

上式中 a_1 与阻尼比 ξ ,非凝聚土土层的自然频率相关^[7],即

$$a_1 = \xi/\omega_n \tag{11}$$

而土层的自然频率 ω_n 又与土的剪切模量 G、密度 ρ 、厚度 H 相关· 对于典型情况,剪切模量 G 可以表示为深度 Z 的函数: $G = AZ^3$.此时土的自然频率 ω_n 可以写 d^[8]

$$\omega_n = 1.751 \sqrt{A/\rho} / (1.2) (H)^{5/6} \tag{12}$$

由上述非线性弹簧和阻尼器所连接的集中质量体系的模型,能近似地描述饱和 砂土对地震荷载的动力响应。饱和砂土主要本构特征是非线性、滞回和应变相关, 这些特征由上面所引入的依赖于应变的剪切模量和粘性阻尼可以得到恰当的描述。

4. 数值结果的分析讨论

动力方程 (8) 和描述孔压分布的方程 (5) 都用数值方法来求解。解动力方程 (8) 采用无条件稳态积分计算的 Newmark 方法 ^[9]. 解描述孔压分布的方程 (5) 采用有限 差分法 ^[10].

输入的地震荷载的波形如图 2 所示、最大加速度为 0.16g. 饱和砂土层的土性参数分别为:砂层厚度为 15m,相对密度 45%,剪阻角 40°,饱和砂容重 1.95,浮容重 0.962,砂比重 2.65(单位为 g/cm³).



数值计算时将整个土层分成 10 层,积分时间步长取成 0.01s,采用显式与隐式 两种差分格式计算了不同阻尼比 (分别为 0.01, 0.1, 0.15) 情况下砂层的动力响应. 下列图中所画的都是隐式差分的数值结果.

土层对于地震荷载的动力响应,土层表面的加速度随时间的变化如图 3 所示, 首先液化土层中剪应力随时间的变化如图 4 所示,土层中孔隙水压力沿深度分布随 时间变化如图 5 所示.

计算结果表明,阻尼比增加时,液化的时间也增加,最大表面加速度和剪应力也 随着阻尼比的增加而减少,阻尼比的增加总体上有着减少土床的动力激震的效应,

计算中,采用显式差分格式会得出与隐式差分格式不同的结果,显式差分要将 时间的步长取得很短才能得到收敛的结果,但时间步长的选择要依赖于入射激震波 的频率而不能任意减少的,所以计算中最好采用隐式差分格式, ż

1

1



图 4 对地震输入,首先液化土层中剪应力 随时间的变化 (ξ = 0.02)





上述的"工程近似"方法虽然能近似地模拟饱和土层对地震荷载的动力响应与 地震引起的液化现象,但还是存在着较大的缺陷.这主要是:孔隙水压力的变化与 土性的改变是同时发生的,但"工程近似"方法并没有如实地模拟这一点.并且, 这种方法所处理的问题只允许土性在纵向有所变化,具有很大的局限性.此种方法 需要输入大量的土性试验资料,而要在现场取得大量土性资料,其耗费是相当昂贵 的.所以,如何克服现有的"工程近似"方法的缺点,发展一种更完善、更实用的模 拟土的动力响应的方法,将是今后土动力学发展的一个重大的研究课题.

参考文献

- Seed HB, Lee Kenneth K and Idriss IM. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. 1969, 95, (SM6): 1453-1490
- [2] Streeter VL, Wylie EB and Richart FE. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100, No. (GT3): 247-263
- [3] Silver ML and Seed HB. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. 1971, 97, (SM8): 1081-1098
- [4] Silver ML and Seed HB. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1971, 97, (SM9): 1071-1082
- [5] Martin GR, Finn WDL, and Seed HB. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101, (GT5): 423-438
- [6] Seed HB and Idriss IM. Report No. EERC 70-10, Berkeley: University of California Earthquake Engineering Research Centre, December 1970
- [7] Clough RW and Penzien J. Dynamics of Structure, New York: McGraw-Mill Inc, 1975
- [8] Das BM. Fundmentals of Soil Dynamics, New York: Elsevie Science Publishing Co Inc. 1983
- [9] Newmark M. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1959, 85, (EM3): 67-94
- [10] Gerald Curtis F. Applied Numerical Analysis', California: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1980

255

力

维普资讯 http://www.cqvip.com

ì

DYNAMIC RESPONSE OF SATURATED SANDS TO EARTHQUAKE

学

报

Zhang Gende

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract The dynamic response of saturated sand deposits to earthquake loading is investigated through an "Engineering Approach". Considering the mechanism of dynamic response of saturated sands to cyclic loading, a simplified model is constructed, and the equation for describing the response and the diffusion equation for describing generation and dissipation of porewater pressure are given. These equations are solived numerically by the Newmark's method and finite differences method. The dynamic response of a saturated sand layer, including pore pressure, shear stress and surface acceleration variations under earthquake loading conditions are obtained, and the numerical results are analyzed and discussed.

Key words soil dynamics, saturated sand, earthquake response