

砂性地层地震反应离心模型试验研究

Dynamic centrifuge model test of sandy layer

章为民¹, 日下部 治²

(1. 南京水利科学研究院 土工研究所, 江苏 南京 210024; 2. 东京工业大学 土木工程系, 东京)

摘要: 介绍了离心模型试验技术在地震工程研究中的应用原理与方法。运用离心模型试验技术, 研究了砂性地层在地震作用下土层加速度反应、振动超静孔压的产生、消散过程, 真实地再现了地震时土层液化的主要特性。结果表明离心模型试验技术是研究地层地震反应的有效手段, 所得结论对进一步开展砂土地震反应与液化机理研究有积极借鉴意义。

关键词: 离心模型试验; 振动孔压; 砂土液化

中图分类号: TU 411; TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)01-0028-04

作者简介: 章为民, 男, 1959 年生, 南京水利科学研究院土工所教授级高工, 主要从事岩土力学方面的研究。

ZHANG Wei-min¹, O. KUSAKABE²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan)

Abstract: In recent years, because of the development of earthquake simulators, the technique of centrifuge modeling is getting attention widely in geotechnical engineering research area. In this paper the dynamic method of the centrifuge modeling is introduced and the centrifuge model tests are carried out to study the liquefaction and dynamic properties of sand deposits.

Key words: dynamic centrifuge model test; excess pore pressure; liquefaction

1 前言*

关于土的地震反应与砂土液化机理的研究已有 30 多年的历史。就砂土液化机理及各种影响因素而言, 人们认识还很浅。因此, 关于土的地震反应与砂土液化机理的研究一直持续进行着。在研究地震对建筑物、地基的破坏作用及建筑物、地基对地震的反应时, 主要采用的研究手段有: 震害调查、现场原型观测、常规振动台试验、单元土样试验、数值计算分析及离心模型试验技术。

震害调查和现场观测是研究地震工程问题的一个非常重要、非常有效的手段, 人类关于地震破坏及震害的大部分知识从此而来。目前世界上的发达国家在一些重要工程布设了多种监测观测仪器设备, 随着时间的推移, 人们可以逐步积累对地震影响的认识。然而自然界的地震无法控制, 人们只能从中获取一些零散的、片面的认识, 无法得到所需要的全部信息。模型试验的诱人之处在于可以根据需要设定振动参数, 它获得的信息远比原型观测获得的多, 还可用来验证数学模型及数值方法。常规振动台试验(1g)比较多的在结构试验中应用, 由于它不能满足模型与原型应力水平相同的相似性要求, 在岩土工程研究中常常使试验结果与实际偏差较大。数值分析方法是一门发展较快的技术, 但由于土的本构关系的复杂性, 目前只能得到一般性规律, 而其结果往往与实际有较大的出入。用离心模型试验技术研究地震动力问题最先由英国剑桥大学在 70 年代末期进行, 由于离心模型可以满足应力水平相同的关键

相似条件, 加上近年来激振技术的不断改进与提高, 使得离心模型试验技术的应用范围不断扩大, 也越来越受到工程设计、科学研究专家的关注与重视, 已逐步成为岩土工程研究技术中的重要手段之一^[1~3]。

我国的离心模型试验技术研究始于 80 年代中期, 目前已建成大中小土工离心机近十台, 由于无振动试验用的激振装置设备, 只能进行静态的试验研究。在国家自然科学基金、水利重点科技基金、交通部重点基金的支持下, 南京水利科学研究院新近研制的电液式离心机振动台即将投入使用。而本文的研究亦是在上述三项基金的支持下, 与日本东京工业大学合作完成的。

2 离心模型试验的相似原理

模型与原型的相似理论是模型试验的依据和准则。用模型来模拟原型时一般应该满足以下三类条件。

(1) 运动平衡条件 这是模型试验的主要控制条件。其目的是使模型的受力与原型一致。

(2) 土的本构条件 其目的是使模型在受到与原型相似外力作用时与原型有相似的反应。在试验中一般选用与原型相同材料制模即可满足此要求。而在数值模拟中, 这一条件却很难满足。

(3) 运动边界条件 它包括几何相似条件, 是模型

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59679012); 水利科技基金资助项目; 交通部青年基金资助项目

收稿日期: 2000-02-16

试验的必要条件。

用模型来模拟原型, 就应该使模型与原型有相同的力学表现, 有相同的力学表现就可以用同一个力学方程来描述。如用上标 p 表示原型, m 代表模型, 可把模型与原型动力学平衡方程分别写成

$$\text{原型: } \sigma_{ij}^p + \rho^p(g_i^p - \xi_i^p) = 0 \quad (1)$$

$$\text{模型: } \sigma_{ij}^m + \rho^m(g_i^m - \xi_i^m) = 0 \quad (2)$$

式中 σ 为应力; ρ 为单位质量; g 为场加速度; ξ 为位移。我们定义任一物理变量 η , 其模型值与原型值之比为

$$\bar{\eta} = \eta^m / \eta^p \quad (3)$$

把式(3)代入式(2), (1), 得到

$$\bar{\sigma} = \bar{\rho} \cdot \bar{g} \cdot \bar{l} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}^2 = \bar{\rho}^2 \quad (5)$$

式(4), (5)即为模型的相似控制条件。对线性问题来说, 只要合理设计模型使其满足式(4), (5)的条件, 即可达到用模型模拟原型的目的。在岩土工程中, 土的力学性质呈非线性, 且取决于土的应力水平, 即不同应力水平条件下土的工程特性不同。因此满足 $\bar{\sigma} = 1$, 即保证模型应力与原型应力相等是离心模型试验方法的目标也是其主要特点。从式(4)中看到, 一般可选择与原型相同的模型土料并控制与原型相同的密度, 即可满足 $\bar{\rho} = 1$ 。而满足 $\bar{\sigma} = 1$ 的条件则变成

$$\bar{g} \bar{l} = 1 \quad (6)$$

式(6)是离心模型试验中的最主要的相似的条件, 我们可以选择 $\bar{g} = n$, $\bar{l} = 1/n$, 即模型几何尺寸缩小 n 倍, 场加速度(离心加速度)增大 n 倍, 当 $\bar{\rho} = 1$ 时, 可得到 $\bar{\sigma} = 1$ 。同样从式(5), (6)可得到

$$\bar{l} = \bar{l} \quad (7)$$

式(7)表示动力平衡问题中, 时间比尺与模型几何比尺相同, 通过时间比尺便可获得周期及频率的相关关系。

有了以上的结果我们可以来比较一下常规模型与离心模型的区别。常规模型中无法施加加速度场, 场加速度是常数, 为 $1g$ 。此时 $\bar{g} = 1$, 代入式(4)得

$$\bar{\sigma} = \bar{l} \quad (8)$$

式(8)表明, 常规模型($1g$ 模型)的应力水平是随模型的大小而变化的, 通常模型只有原型的 $1/50 \sim 1/100$, 远小于原型, 而岩土类材料的主要力学特性是随应力水平而变化的, 由此可见 $1g$ 模型无法反应原型的真实状况。这也是 $1g$ 模型试验结果与实际相差较大而较少应用, 离心模型试验得到迅猛发展的原因。土是水土多相混合体, 还应考虑孔隙中的水与土的相互关系, 这种关系在土力学中用固结方程来描述, 即

$$c_v(\partial^2 u / \partial x_j^2) = \partial u / \partial t \quad (9)$$

通过式(9)可以得到

$$\bar{l} = \bar{l}^2 / \bar{c}_v \quad (10)$$

从式(7)我们得知, 动力过程中模型时间是原型的 $1/n$, 对孔隙水压力来说, 就是模型振动产生孔隙水压力的过程比原型要快 n 倍。而式(10)告诉我们当 $\bar{c}_v = 1$ 时, 模型的孔隙水压力消散过程却要比原型快 n^2 倍。使得我们在试验中有可能错过或漏过最大孔隙水压力的测量。

为解决此问题, 目前国际上一般通行做法是通过增加孔隙流体粘滞性来减小土的渗透性, 从而达到延缓消散的目的。从式(10)可见, 当 $\bar{c}_v = \bar{l}$ 时, 孔隙水压力的消散时间被扩大了 n 倍, 这样就使得模型孔隙水的产生和消散过程在模型时间上得到了统一, 更有利于对孔隙水压力变化规律的研究。改变液体的粘滞性主要有两种办法, 一是用硅油代替水, 二是在水中添加化工增稠剂, 来增加液体的粘滞性。试验研究^[4]表明, 不同粘度液体对砂土的强度、模量等主要力学特性影响不大。

3 离心模型试验

试验在日本东京工业大学离心机(Mark II)上进行。该机配置了电液式振动台。试验中采用了两种模型箱, 一种是常规模型箱, 为了防止箱体的边界影响, 在模型箱的两端加贴了两块吸波材料, 另一种模型箱是叠层模型箱(laminar box)。模型布置见图1。

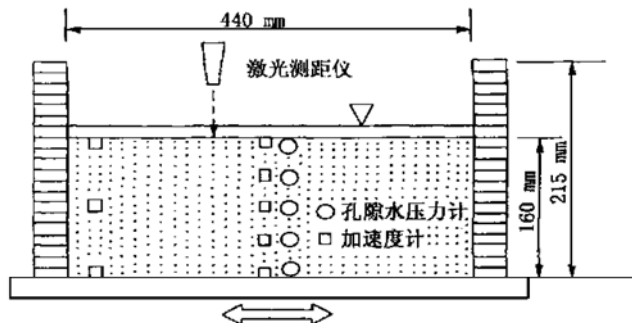


图1 模型布置示意图

Fig. 1 Layout of the model

采用日本丰浦标准砂, 用砂雨法制模。试验中用2%甲基纤维素水溶液作为孔隙液体, 粘度为50。

本文的试验进行了四组, 每组进行了2~5次振动, 输入振动频率为100 Hz, 离心加速度为50 g, 相当于原型2 Hz的振动, 输入振动波形为正弦波和日本阪神大地震的实测波形, 最大振动加速度为 $12g \sim 3g$, 见表1。

表1 模型组合特征

Table 1 Combination characteristic of model

试验组号	相对密度	1 st 振动	2 nd 振动	3 rd 振动	4 th 振动	5 th 振动
1	0.48	6sin(t)	12Kobe(t)			
2	0.65	10sin(t)	7Kobe(t)	8sin(t)	6sin(t)	4sin(t)
3	0.52	6sin(t)	8sin(t)	10sin(t)	12sin(t)	4Kobe(t)
4	0.51	8sin(t)	6sin(t)	3sin(t)		

4 试验结果与分析

4.1 地震加速度反应

图2、图3分别是模型1和模型4的地层加速度反应过程线。图2给出了输入波、土层底部、中部及顶部的加速度反应过程曲线。可以看出:底部的加速度反应基本与输入波相同;中间以上土层由于发生液化,只经历了几个波的振动后振幅很快大幅度衰减,形成了很小振幅的振动;而顶部土层的加速度则较中部土层更早地进入了小幅振动状态。图3是模型4经历小

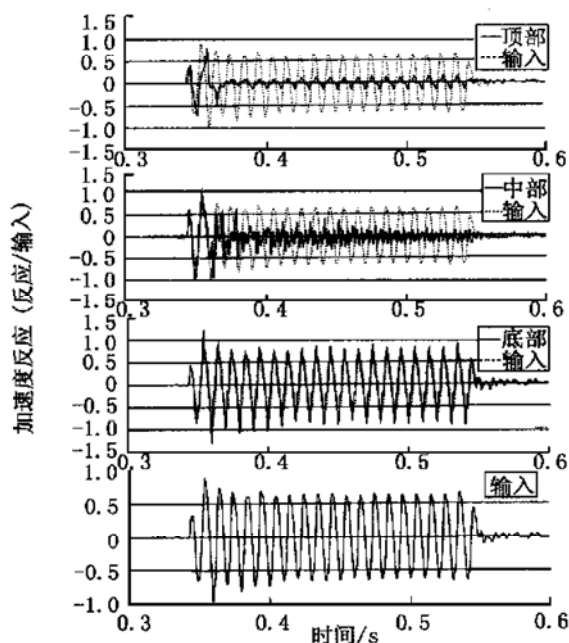


图2 液化土层加速度反应

Fig. 2 The acceleration response of soil layer after liquefaction

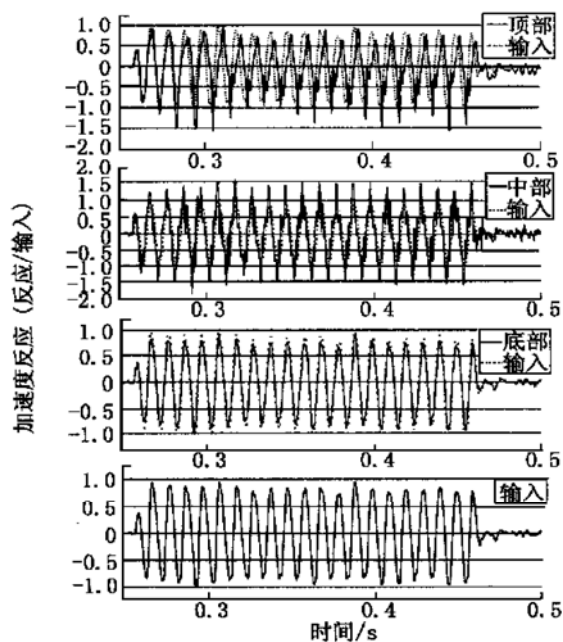


图3 未液化土层加速度反应

Fig. 3 The acceleration response of soil layer before liquefaction

振幅振动的情况,由于没有发生液化,没有发生振幅大幅度衰减的情况。模型1(图2)在液化前,有加速度放大现象,液化发生后,震动很快减小,同时反应波与输入波产生了明显的相位差,振动频率也发生很大变化。

4.2 振动超静孔隙水压力

图4是模型3的振动超静孔隙水压力过程线。从图中可看出,振动产生的超静孔隙水压力的大小与上覆土重密切相关,越靠近底部,上覆土重越大,产生的振动孔压亦越大。图5、图6是模型4的超静孔隙水压力的过程线,很显然,坡前a点的上覆土重比坡下b点的上覆土重小,虽然a、b两点处在同一高度,振动加速度亦相近,但它们的振动超静孔隙水压力却不同。

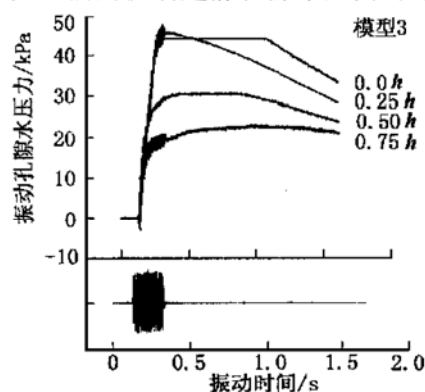


图4 振动孔隙水压力过程

Fig. 4 The excess pore water pressure

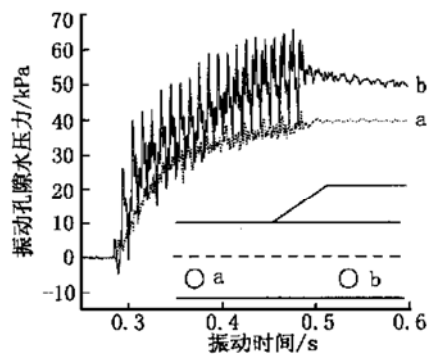


图5 振动孔隙水压力与上覆土重

Fig. 5 The excess pore water pressure and the overburden pressure

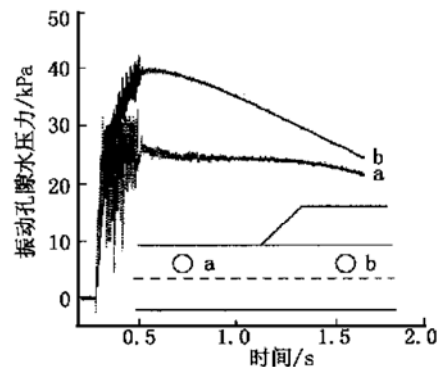


图6 孔隙水压力消散

Fig. 6 The dissipation of excess pore water pressure

4.3 液化时的超静孔隙水压力

图7是模型1中部土层的振动超静孔隙水压力过程线,图中纵轴是振动超静孔隙水压力与上覆土重之比,可以表示土层发生液化的程度。从图中可见超静孔隙水压力随着振动上升很快,在接近上覆土重时,超静孔隙水压力已不能再升高。上覆土重作为振动超静孔隙水压力界限的约束作用非常明显。

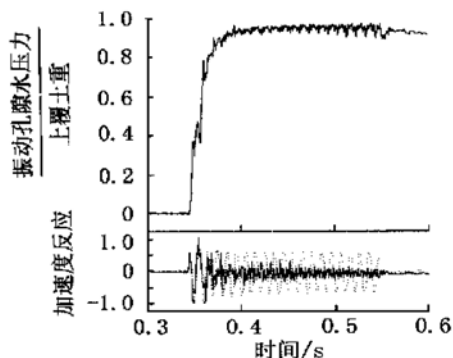


图7 液化时的孔隙水压力

Fig. 7 The pore water pressure during liquefaction

4.4 振动超静孔隙水压力的消散

图8是模型1的振动超静孔隙水压力过程线。可以看到在振动结束后,下部土层(0.0h)的超静孔隙水压力呈消散下降状态,中部土层(0.50h)由于下部土层孔压的消散转移,有相当长的时间维持在较高的液化水平上,而离排水层较近的顶部土层(0.75h)的孔压在振动结束时液化度只有0.6左右,在振动结束以后,由于顶部以下土层孔压的消散转移作用,顶部土层的超静孔压仍然继续上升,最后也接近了液化。

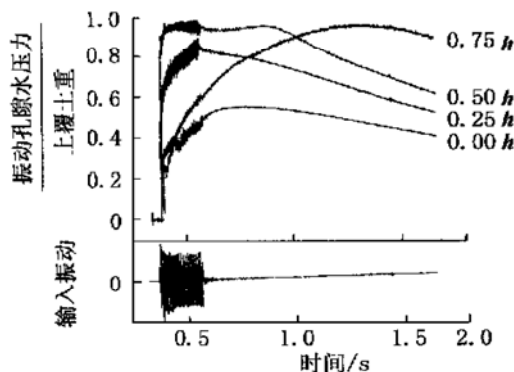


图8 振动孔隙水压力消散过程

Fig. 8 Dissipation of the excess pore water pressure

同样图6中a、b两点高度相同。在振动结束后,靠近排水层的a点孔压基本维持原有的孔压水平,而b点的孔压则下降很快。震后超静孔隙水压力的消散、重分布现象在工程实际中有非常重要的意义,它进一步证实土石坝等土工建筑物之所以往往在地震之后的某一段时间才发生破坏,其主要原因就是超静孔隙水压力的不利再分布(见图9)。由此可见,采用有效应力法

分析土石坝等土工建筑物的地震安全性是非常必要的,此外在分析坝坡安全时,仅仅分析地震过程中和地震结束时的安全性是不够的,在震后不同时段根据当时的超静孔压的分布来进行计算分析亦十分重要。

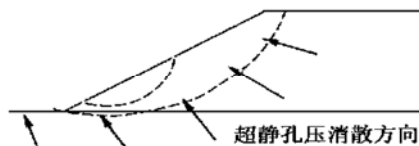


图9 超静孔压消散重分布引起的破坏

Fig. 9 The failure due to the dissipation of excess pore pressure

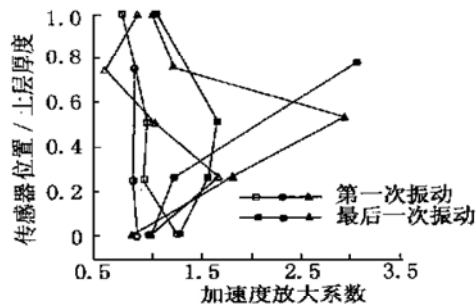


图10 加速度放大系数沿高度分布

Fig. 10 The distribution of acceleration

4.5 加速度反应分布

图10是加速度反应沿高程的分布,图中空心标志是模型经受第一次震动的反应情况,加速度放大系数在0.5~1.75之间,图中实心标志是模型经历了2~4次振动后的最后一次振动情况,此时土层的相对密度已有较大的提高,加速度放大系数变为1~3,有了明显的增大。

5 结 语

通过试验研究,得到以下几点认识:①离心模型试验是研究岩土工程地震动力问题非常有效的手段,它可以提供几乎所有的有用信息。动态离心模型试验的研究领域广阔,应大力推广。②地震动力离心模型试验研究历史还不长,应进一步加强对边界效应、微型传感器、模拟技术等关键问题的研究。

参考文献:

- [1] Kimure T J, Takemure A, et al. Mechanical behaviours of intermediate soils[A]. Keynote Lecture, Centrifuge' 94[C]. Singapore: Balkema, 1994.
- [2] Ko H-Y. Modeling seismic problems in centrifuges. Keynote Lecture, Centrifuge' 94. Singapore: Balkema, 1994.
- [3] Schofield A N. Dynamic and earthquake geotechnical centrifuge modeling[A]. Int Conf on Recent Adv in Geotech Earthquake Eng and Soil Dyn[C]. St Louis, Missouri, 1981. 1081~ 1100.
- [4] Zeng X, et al. Influence of viscous fluids on properties of sand [J]. Geotech Testing Journal, 1998, 21(1): 45~ 51.