

水平向振动作用下干砂体积变形的试验研究

陈竹昌

(同济大学岩土工程系, 上海)

提 要

本文介绍在振动台上输入水平向振动荷载时所进行的干砂体积变形试验。文中给出了不同振动时间的干砂体积变形随振动加速度变化的基本特性及相应的界限值。文中还分析了不同振次下的干砂体积变形与振动加速度之间关系, 以及振动频率对这关系的影响。对比不同振动时间与不同振次的试验资料表明, 可用振动时间来综合表示振次和频率对砂土体积变形的效应。此外, 还将试验的结果同其它试验和理论计算的结果进行比较。

一、前 言

人们已经注意到, 在动力荷载作用下砂土的沉降或体积变形主要是由于水平向的剪切振动所引起的。与水平剪切振动的作用相比, 竖向振动的作用所产生的砂土沉降要小得多。

干砂体积变形性能的研究, 不仅对地震、机器振动及打桩等动力荷载作用下所引起的基础沉降等工程问题有重要的作用, 而且对于土动力学基础理论的发展也有重要的意义。芬(Finn)等人^[1,2]提出的土有效应力动力反应分析方法被认为是土动力学和地基抗震工程的重要发展。该法正是建立在干砂体积变形规律的基础上, 即通过干砂在剪应力作用下的体积变形来反推饱和土中孔隙水压力增长, 从而建立土有效应力分析的方法。这就是人们重视干砂体积变形研究的原因之一。

本文根据在振动台上输入水平向动力荷载所得到的干砂体积变形的试验资料, 分析了干砂体积变形的性能。文中还将试验结果与理论计算结果进行比较。

二、试验设备与方法

试验是在尺寸为 $2465\text{mm} \times 1220\text{mm}$ 的小型振动台上进行的, 并用等幅正弦波输入水平向振动。

干砂置放在外尺寸为 $1825\text{mm} \times 465\text{mm} \times 640\text{mm}$ 的试验槽(图1示出试验槽安放在振动台上)内, 试验槽与振动台之间用螺栓固定。图2给出振动试验前砂土的断面。为使振动台的水平向振动仅通过槽底面传递给砂土层, 靠近槽两端的砂土铺设成斜坡面。

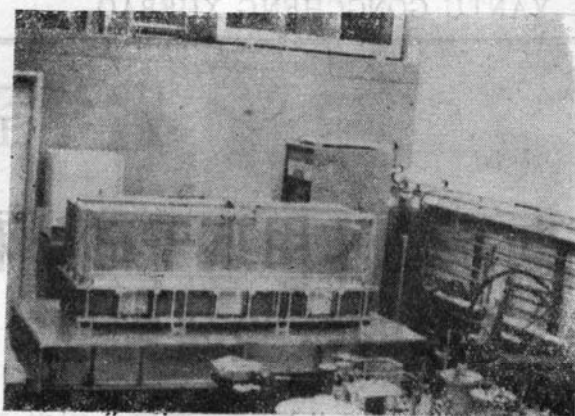


图1

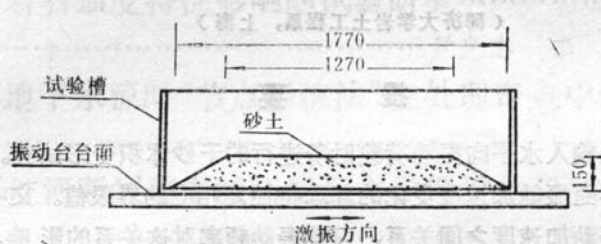


图2

在振动台上安放一加速度计,测量振动台输入的水平加速度。在砂土表面中点处安置一个沉降标点,用LVDT量测砂土表面的沉降。振动台激振开始时,由光线示波仪记录输入加速度和砂土沉降,并用双线示波仪监测。每次试验的激振时间为10s。输入加速度在 $1.0 \sim 11.8 \text{ m/s}^2$ 范围内变化,输入频率为6, 10, 14和18Hz。

控制砂土密度均匀是试验的重要环节。这里用铺砂机来铺设砂土,它在试验槽的两侧板顶面以固定速度行驶,当行走至试验槽两端时由自动转向开关使它转向行驶。铺砂机下部的砂槽内装有砂,砂沿槽底的漏斗向下流(见图3),随着铺砂机匀速移动则可铺设均匀厚度的砂层。在铺设过程中要尽可能保持漏斗口至砂层面之间的距离不变,为此随着砂层面高度的上升需不断地调整砂槽的高度,以得到较均匀的砂土密度。

总共进行了30次试验。使用 D_{50} 为0.5mm的渥太华砂,并控制其相对密度 $D_r = 55\%$ 左右。

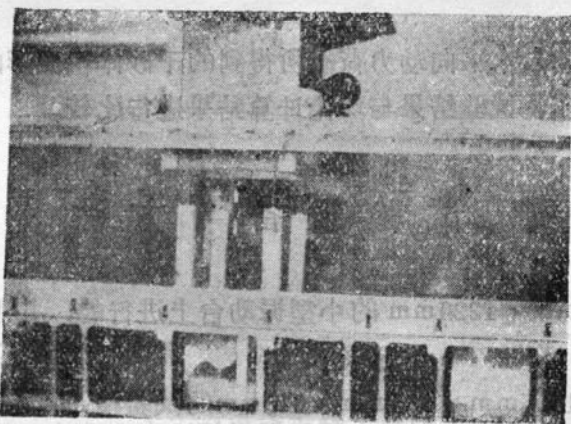


图3

三、试验结果

(一) 振动时间为10s时砂土沉降与加速度之间关系

图4给出振动10s时砂土沉降 S_{10} 或体积变形(砂土沉降与体积变形指标之间可相互换算, 文中提供的数据均用沉降表示)与输入加速度 a 的试验资料, 从图中可看出下列基本特性:

1. 当 $a < 1.0 \text{ m/s}^2$ 时, 砂土不发生沉降。
2. 在 $1.0 \text{ m/s}^2 < a < 2.5 \text{ m/s}^2$ 范围内, 砂土沉降很小。
3. 当 $a \geq 2.5 \text{ m/s}^2$ 时, 不同输入频率的砂土沉降 S_{10} 都开始急剧增大。这进一步证实了尤德(Youd)和巴肯(Barken)的能量界限或界限加速度的观点^[8,4]。但是本试验所得到的界限加速度为 2.5 m/s^2 , 它要比尤德所提供的数值小。

4. 在 $2.5 \text{ m/s}^2 \leq a < 8.3 \text{ m/s}^2$ 范围内, 不同输入频率的砂土沉降 S_{10} 随着 a 值增加而增大。但 a 在 $4.0 \sim 8.3 \text{ m/s}^2$ 区段, S_{10} 随 a 的增长率看来比 a 在 $2.5 \sim 4.0 \text{ m/s}^2$ 区段要大些, 可用两段直线近似地表达(见图4)。值得注意的是各种不同输入频率所得到的试验数据都集中在很狭窄的区域内。这说明 S_{10} 与输入频率几乎无关, 而主要取决于输入加速度。

5. 当 $a \geq 8.3 \text{ m/s}^2$ 时, S_{10} 继续增大。但不同输入频率的砂土沉降 S_{10} 与 a 的试验数据很分散。

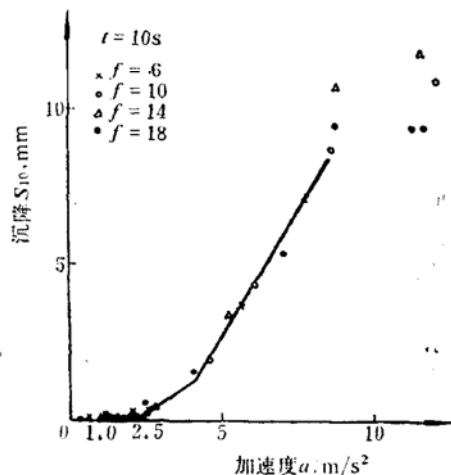


图4

(二) 不同振动时间的砂土沉降与加速度之间关系

图5分别给出振动时间为5, 3和1s时的试验资料。由图可看出, 对于不同振动时间, 其结果与振动时间为10s一样, 上述的五点分析都成立。特别值得注意的是, 对于不同振动时间, 各种输入频率时的沉降与加速度的试验量测值都落在较狭窄的区域内。这说明用振动

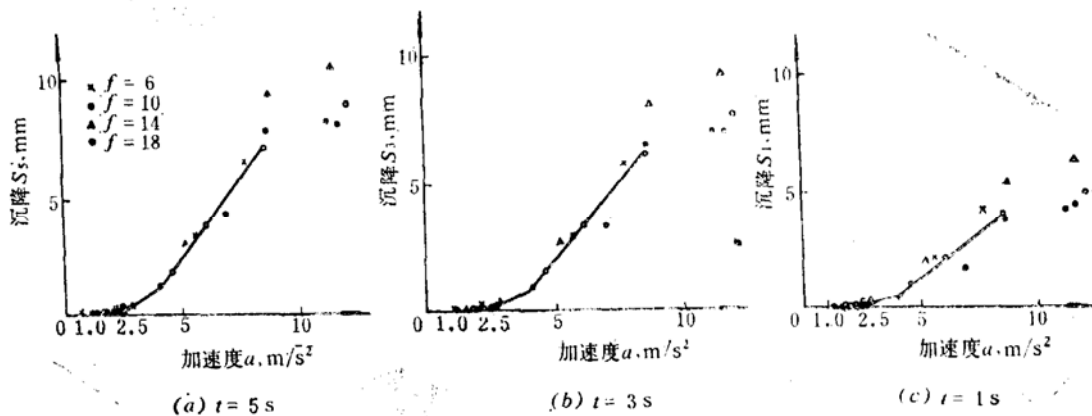


图5

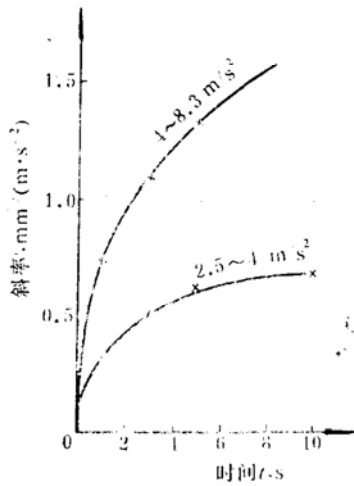


图6

时间和加速度两个因素能较全面地描述砂土沉降或体积变形。

图6提供了 $a = 2.5 \sim 8.3 \text{ m/s}^2$ 范围内的两段直线斜率随振动时间的变化曲线, 可作为估计不同振动时间的松砂体积变形。

(三)不同振次时砂土沉降与加速度之间关系

图7分别给出振次为5, 10, 20, 40, 60和100的试验资料。由图可看出, 与不同振动时间的试验资料一样, 不同振次下各种频率的砂土沉降与加速度之间的基本特性也是以1.0, 2.5和 8.3 m/s^2 作为其划分界限的。除了涉及到频率因素的影响外, 各界限内的其余基本特性均与上述第(一)、(二)点相同。

从图7中还可看出, 在同一振次和加速度的条件下, 不同频率的沉降量有显著的差别, 而且沉降量随频率的增大而减少(图中分别标出频率为6, 10和18Hz的试验结果, 由于 $f = 14 \text{ Hz}$ 的数据同 $f = 10 \text{ Hz}$ 很接近, 合并在一起分析)。试验结果表明, 如以振次作为影响砂土体积变形的因素, 要用加速度、振次和频率三个因素才能全面表达砂土的体积变形。前面的分析已知, 只要用振动时间和加速度就能表达砂土的体积变形。由此可以推论, 振动时间可综合表示振次和频率的效应。

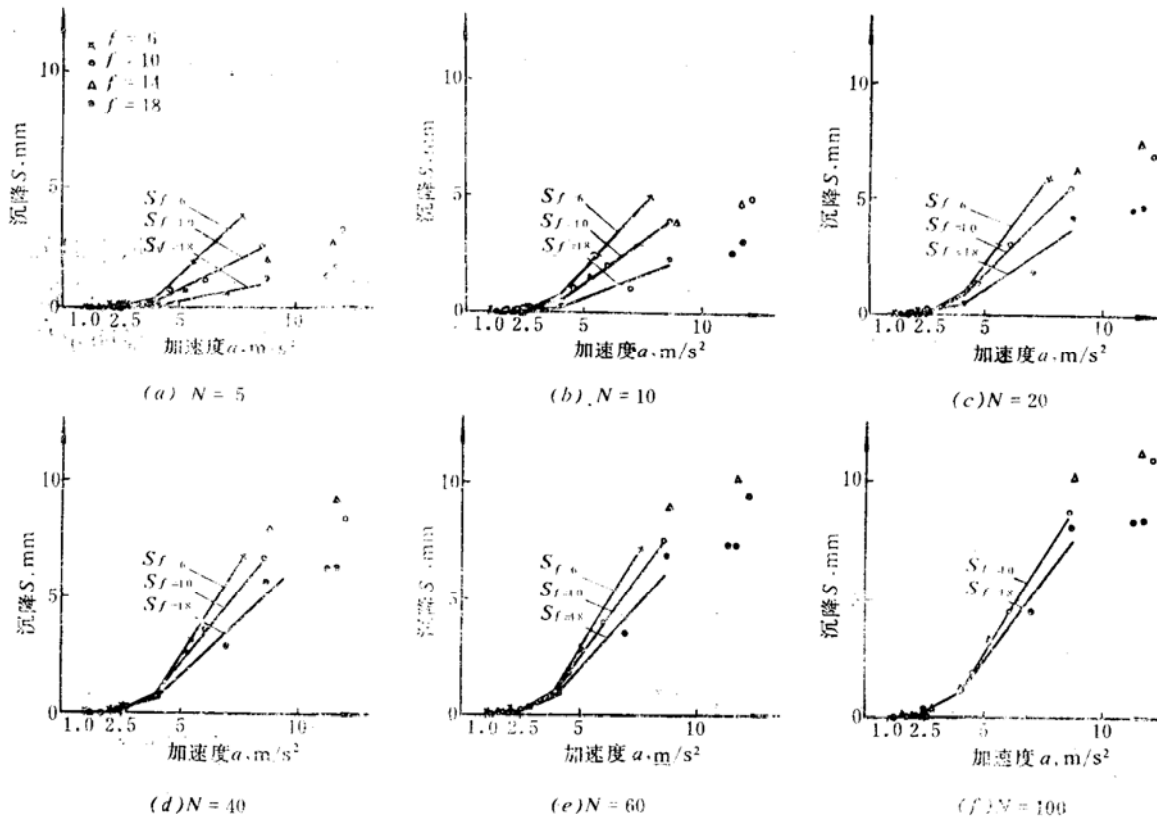


图7

图8给出了不同频率时 $a = 2.5 \sim 8.3 \text{ m/s}^2$ 范围内的两段直线斜率随振次的变化曲线, 可作为估计不同振次的松砂体积变形。

现行的饱和砂土有效应力动力反应分析方法, 是建立在水平动剪力作用下干砂体积变形试验资料的基础上的, 即建立在干砂体积应变 ϵ_{vd} 随剪应变幅 γ 和振次 N 变化的试验资料基础上的(图9示出其典型的结果)。该资料可整理为每一振次的体积应变增量 $\Delta\epsilon_{vd}$ 同 ϵ_{vd} 和 γ

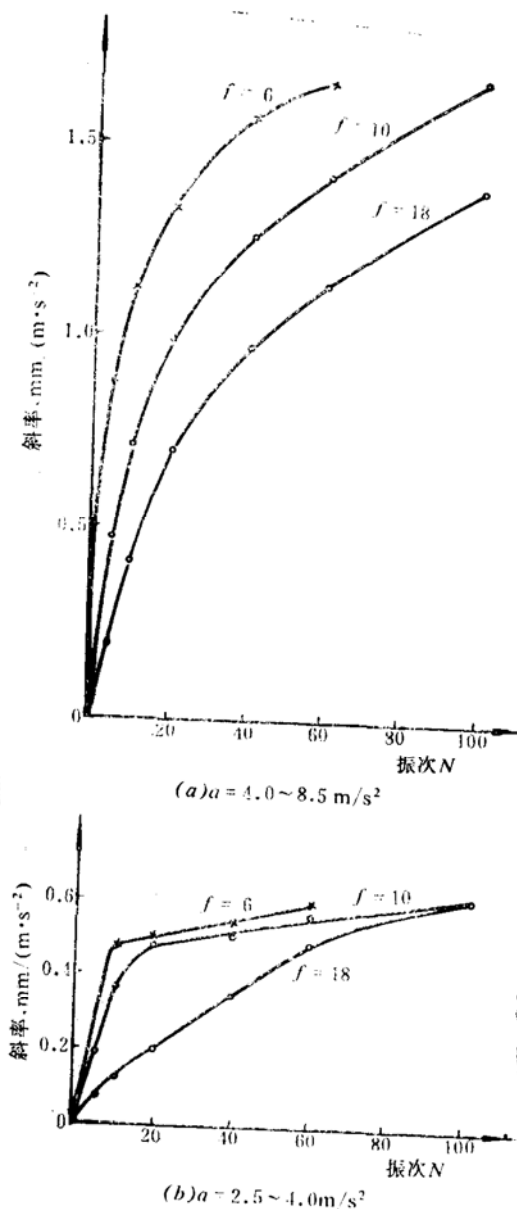


图8

之间的关系式, 即

$$\Delta\epsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2\epsilon_{vd}) + \frac{C_3\epsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4\epsilon_{vd}} \quad (1)$$

这里 C_1, C_2, C_3, C_4 为试验常数。剪应变幅在一定条件下相当于加速度的效应, 故式(1)所表

示的体积变形规律实际上只考虑了加速度和振次两因素,而忽略了频率的影响。

(四) 给定加速度下砂土沉降随时间的变化

图10示出在某一输入加速度下砂土的相对沉降(t 时间的沉降量 S_t 与10s时沉降量 S_{10} 的比值)随振动时间的试验曲线。

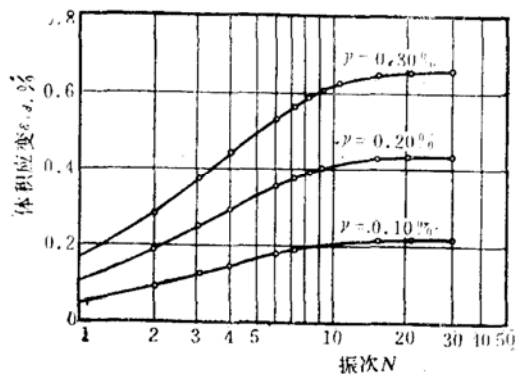


图9

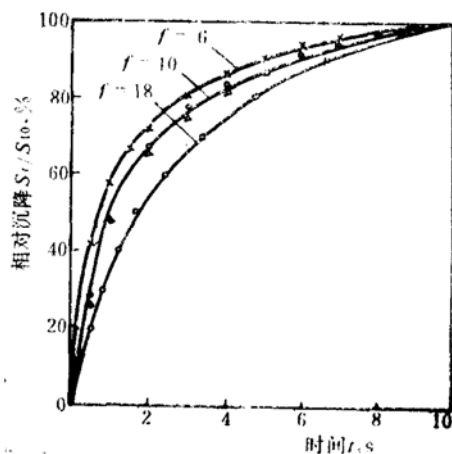


图10

(五) 给定加速度下砂土沉降随振次的变化

对于输入频率 $f = 18\text{Hz}$, 图11示出在加速度分别为 4.0 , 6.9 和 8.5m/s^2 时砂土沉降随振次(对数坐标)的试验曲线。这些曲线的后半部分呈现线性变化, 锡德(Seed)等人^[5]在大型振动台上进行的干砂体积变形试验也得到相同的线形。但是, 与此不同的是, 按式(1)所得到的体积应变与振次曲线(见图9)的后半部分则趋近于水平线。

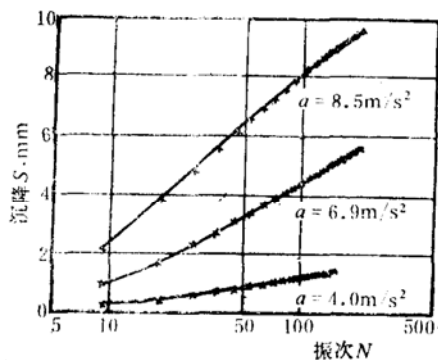


图11

如上所述, 干砂在剪应力(或剪应变)作用下的体积应变的变化规律(即式(1))是分析饱和砂土在动力荷载下孔压增长的基础, 它将对孔压增长有较大的影响。我们和其他研究者的试验结果与式(1)有些出入, 因此,

对式(1)的可靠性和适用范围要作进一步的探讨。

四、试验与计算的比较

芬等人^[6]提出的有效应力动力反应分析程序(DESRA-1), 不仅可用于计算饱和砂土的

孔压变化，还可用于计算干砂的体积变化。现叙述该程序的计算结果，并与试验作比较。

(一) 振动时间为10s时砂土沉降与加速度之间的计算结果

图12给出了频率分别为5, 10和20Hz时的砂土沉降 S_{10} 与加速度 a 的计算结果。与试验相比，主要差别是：

1. 不同频率的计算值 S_{10} 相差很大，例如 $f = 5 \text{ Hz}$ 的计算值 S_{10} 要比 $f = 20 \text{ Hz}$ 的大1~2倍。
2. 频率愈小，则计算的 S_{10} 愈大。
3. 当 $a > 8.3 \text{ m/s}^2$ 时，各种频率下所计算的 S_{10} 均随着 a 的增加而增大，但是在 $a = 8.3 \text{ m/s}^2$ 前后计算的 S_{10} 无明显的突变。

(二) 阻尼值对振动时间10s时砂土沉降量的影响

图13示出了在计算中取用不同粘性阻尼值 β 对振动时间10s时砂土沉降 S_{10} 与加速度 a 之间关系曲线的影响。图中表明，取用的 β 值大小对于计算的 S_{10} 影响很大， $\beta = 0.0002$ 与 $\beta = 0.005$ 的 S_{10} 可相差30倍以上。

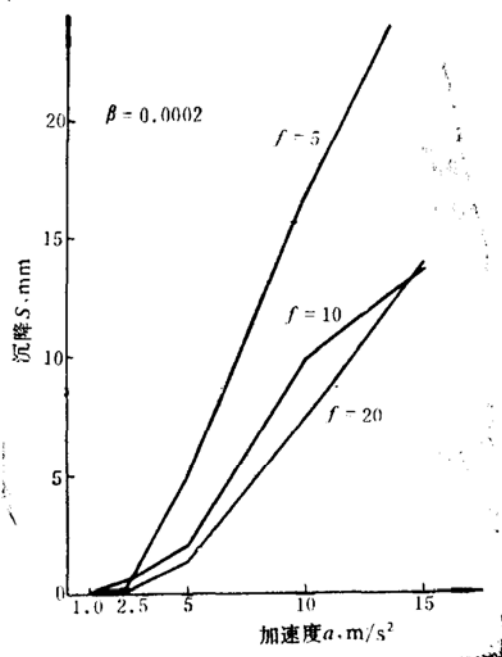


图12

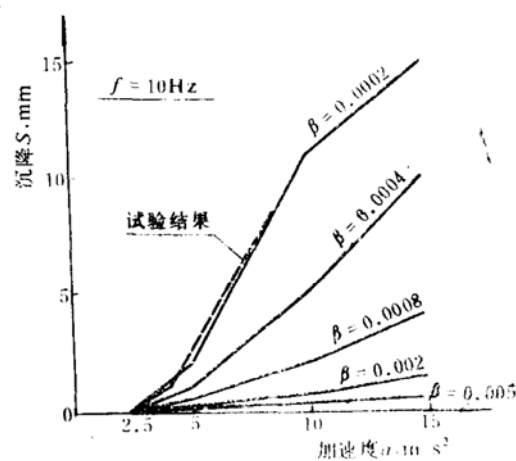


图13

(三) 计算结果的分析讨论

计算表明，输入频率的大小及阻尼值对于计算沉降量影响很大。这可能同在非线形动力反应分析中频率的降低使得砂土的剪应变值显著增大有关。图14和图15示出 β 分别为0.0002和0.005时所计算的前5次循环剪应力与剪应变的反应曲线。

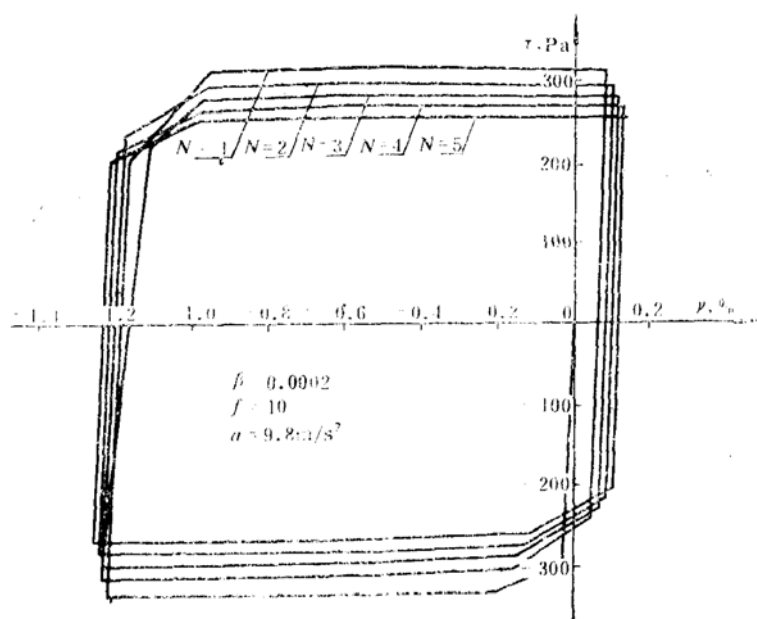


图14

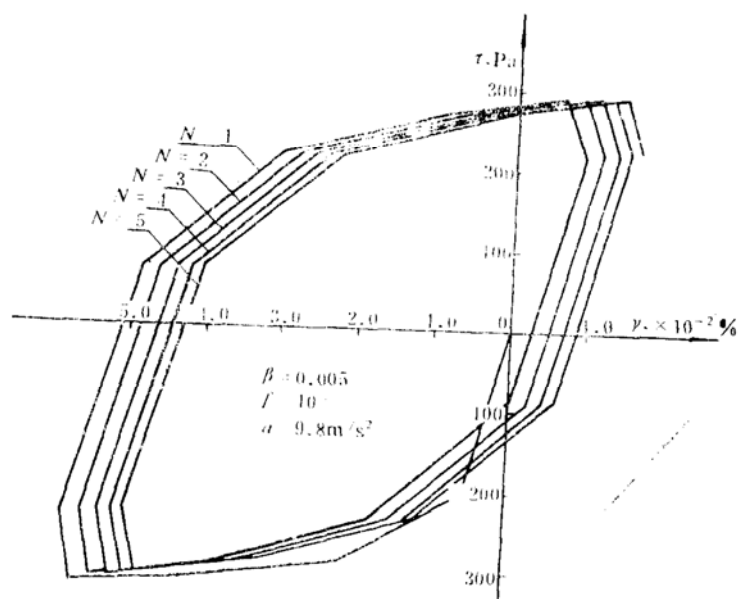


图15

图中可看出, 在第1次循环荷载作用下 $\beta = 0.0002$ 的剪应变已达1.21%, 而 $\beta = 0.005$ 的剪应变只有0.058%, 两者相差约20倍。输入频率对剪应变的影响可参见表1。至于剪应变对沉降的影响, 只要注意到式(1)就很清楚了。

表 1

频 率 (Hz)	1	5	10	备 注
第一次循环荷载下的 剪应变(%)	12.57	2.54	1.21	计算条件: $\beta = 0.0002$ $a = 9.8\text{m/s}^2$

五、结 论

1. 不管对不同振动时间而言, 还是对不同振次而言, 振动台试验所得到的砂土体积变形与加速度之间的基本特性都用1.0, 2.5和8.3m/s² 作为其划分的界限。文中给出各界限范围内的基本特性。

2. 试验表明, 不同振动时间的砂土体积变形与加速度的关系大体上不受输入频率的影响; 不同振次的砂土体积变形与加速度的关系则同输入频率有关, 并且频率愈低其体积变形愈大。由此可推论, 在分析体积变形时可用振动时间来综合表示振次和频率的效应。

3. 在给定水平加速度作用下, 本试验所得到的体积变形与振次的曲线同式(1)提供的规律不一致。式(1)作为饱和砂土有效应力动力反应分析的基础, 还忽略了输入频率的影响。

4. 用DESRA-1程序计算得干砂体积变形随频率增大而减少, 这与试验结果不符。

郑大同教授对本文提出了宝贵的意见, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Martin, G.R., Finn, W. D. L. and Seed, H. B., Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. GT5, May, 1975, pp. 423~438.
- [2] Finn, W. D. L., Lee, K. W. and Martin, G. R., An Effective Stress Model for Liquefaction, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT6, June, 1977, pp. 517~533.
- [3] Youd, T. L., Densification and Shear of Sand during Vibration, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, No. SM3, May, 1970, pp. 863~880.
- [4] Barkan, D. D., Dynamics of Bases and Foundations, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1962.
- [5] Seed, H. B., Pyke, R. M. and Martin, G. R., Effect of Multidirectional Shaking on Pore Pressure Development in Sands, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT1, January, 1978, pp. 27~43.
- [6] Lee, K.W. and Finn, W.D.L., Program for the Dynamic Effective Stress Response Analysis of Soil Deposits Including Liquefaction Evaluation, Soil Mechanics Series, No. 36, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada.

The Volumetric Deformation Characteristics of Dry Sand under Horizontal Vibration

Chen Zhuchang

(Tongji University, Shanghai)

Abstract

A series of tests for determining volumetric deformation of dry sand under horizontal cyclic loadings on shaking table were carried out.

The basic characteristics for variation of the volumetric deformations of dry sand with the input acceleration for different duration of vibratory motion and the corresponding limits are presented.

The relationship between the volumetric deformations of sand for different number of cycles of vibratory motion and input accelerations and its dependence on input frequency are investigated. It is shown by the comparison between test data for different duration and different number of cycles of vibratory motion that the duration of vibratory motion can be used to represent the comprehensive effects of both number of cycles and frequency on volumetric deformation of dry sand. Besides, the comparison of test results with those obtained by other authors and those calculated is also discussed.