

循环荷载下砂质混合土孔隙水压力特性研究

Study on excess pore water pressures of sands mixed with clays under cyclic loading

王桂萱¹, 桑野二郎², 竹村次朗²

(1. 大连大学 土木建筑系, 辽宁 大连 116622; 2. 东京工业大学, 日本 东京, 152)

摘要:通过对各种细颗粒含量的土实施从小到大应变水平的动力循环荷载试验, 采用累积损失能量的观点, 分别考察了土的细颗粒成分含量、围压、加载频率、加载形式及荷载的不规则性对孔压的影响, 提出了孔隙水压力和累积损失能量的归一化方法, 建立了砂质混合土的孔隙水压力上升模型, 并探讨了模型参数和土的细颗粒成分含量的关系。

关键词:细颗粒成分含量; 循环荷载试验; 孔隙水压力; 累积损失能量; 孔隙水压力模型

中图分类号:TU 441 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4548(2004)04-0541-05

作者简介:王桂萱(1960-), 男, 工学博士, 大连大学教授, 主要从事土的动力性质, 地基和建筑物相互作用方面的研究。

WANG Gui-xuan¹, Jiro Kuwano², Jiro Takemura²

(1. Department of Civil and Architectural Eng., Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 152)

Abstract: Dynamic cyclic loading tests of the soils with various fine content are carried out with different strain level from low to high. Based on the viewpoint of total energy dissipation, the effects of the following factors on the excess pore water pressure are studied: fine content, confining pressure, loading frequency, loading step and irregularity of loading. A normalization method is put forward for the excess pore water pressure and total energy dissipation. An excess pore water pressure rising model is established for the sandy clay. Relationships between model parameters and fine content of soil are discussed finally.

Key words: fine content; cyclic loading; excess pore water pressure; total energy dissipation; excess pore water pressure model

0 前言*

人们对砂土的动力特性进行了较为细致的研究, 取得了一系列的研究成果。但最近的震害调查表明, 由砂质混合土构成的地基经常发生液化、产生永久变形, 造成地基或地面建筑物危害很大。比如 1974 年营口海城地震, 1978 年唐山地震, 1983 年日本千叶县东方冲地震, 1995 年日本阪神地震等。为有效预防震害, 人们需要认识砂质混合土的孔压水压力上升特性。对于砂土, 很多学者提出了根据土体损失能量预测孔隙水压力的方法^[1-4]。Davis^[1,2]、Law^[4]等还将它用于砂土地基的液化判别中。Towhata^[5]等根据中空动扭剪试验结果, 得出砂土的损失能量和孔隙水压力的关系不受初始剪应力, 加荷波形的影响。Igarashi^[6]假定土体的塑性变形为土颗粒骨架局部滑移所引起, 采用摩擦角表示土体的损失能量, 推导了砂土的损失能量和孔隙水压力的关系。Okada^[7]从土体结构的观点说明了用损失能量来预测孔隙水压力的合理性。Wang^[8]通过动三轴实验, 研究了孔压和初始剪切应力对砂质混合土变形特性的影响。本文采用能量的观点, 通过对人工调制各种粒径含量的砂质混合土进行室内循环荷载试验, 探讨建立孔隙水压力随损失能量的变化规律

及各种因素对孔隙水压力和损失能量关系的影响, 以求建立砂质混合土的孔隙水压力上升模型的途径。

1 土样制备及试验方法

1.1 砂质混合土的试验室制备

为保证试验用土样的均一性, 试验用砂质混合土采用纯净的丰浦砂和川崎粘土混合的办法人工采取^[9]。研究采用的四种不同细颗粒含量混合土的基本物理特性见表 1(M2 和 M5 的塑性指数为推测值)。对应的颗粒级配曲线见图 1。丰浦砂的颗粒级配曲线也表示在图 1 中。

表 1 混合土的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of mixed soil

土类型	比重 G_s	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_P / \%$	塑性指 数 I_P	粉粒含 量/ $\%$	砂混 合比
M2	2.65	19.2		(2)	8	0.78
M5	2.65	20.5		(5)	12	0.69
M10	2.66	27.4	17.5	9.9	16	0.54
M30	2.69	54.5	25.0	29.5	37	0

1.2 试验条件

试验在日本东京工业大学土木工学科土质力学研

* 收稿日期: 2003-06-20

究室的动三轴和动扭剪设备上, 这些设备传感器精度为: 荷载仪 4 kPa/mv; 大变形仪 4 μm/mv; 微小变形仪 0.2 μm/mv; 孔隙水压力仪 0.1 kPa/mv。试样先进行等向固结, 确认固结期间排水量, 然后施加等向循环荷载或随机动荷载。随机动荷载为幅值经过调整的实际地震记录波形, 等向循环荷载的周期区间为 0.02~1 s。试验时需调整各波形幅值以便观测到从小到大的各种应变(10⁻⁶~10⁻¹)的动力反应情况。

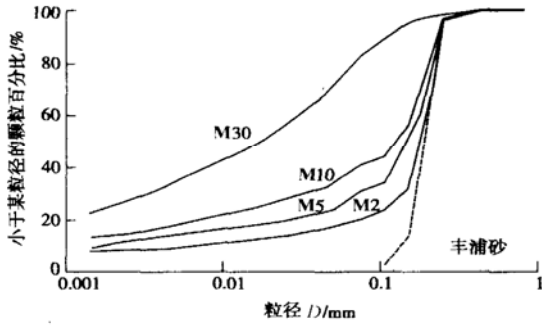


图 1 混合土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution of mixed soil

2 损失能量的计算和孔隙水压力的计算方法

在循环荷载作用下, 土体内积存的能量一部分释放, 一部分被土体吸收, 这种被土体吸收的能量称之为损失能量。损失能量和孔隙水压力密切相关。等向循环荷载下, 单位土体内第 *i* 循环损失能量按下式计算:

$$W_{hi} = \oint \sigma_d d\varepsilon_a, \quad (1)$$

式中 σ_d 为轴向循环应力幅值, ε_a 为轴向应变。土体总的损失能量为各循环损失能量之和, 第 *i* 循环内的孔隙水压力为该循环内的平均值, 分别按下式计算:

$$W_p = \sum W_{hi}, \quad (2)$$

$$\Delta u = (\Delta u_{max} + \Delta u_{min}) / 2. \quad (3)$$

3 孔隙水压力和损失能量的关系

3.1 孔隙水压力和损失能量的关系

图 2 和图 3 分别给出了初始固结应力为 392 kPa 时, M2 M5 M10 和 M30 的孔隙水压力和损失能量的关系。

由图可见, 随着土的累积损失能量增加, 孔隙水压力不依赖循环应力振幅单调增加。细颗粒含量较少的 M2 和 M5 土的孔隙水压力积累较小的损失能量后即开始急剧增加, 并同砂质土一样, 其大小可以达到初始围压(液化)。到液化时积累的损失能量较小。但是细

颗粒含量较多的 M10 和 M30 土, 不但最终孔隙水压力达不到初始围压, 而且孔隙水压力最大时积累较大的损失能量。这些结果表明土的细粒含量越高, 孔隙水压力上升所需要耗损的能量越大。

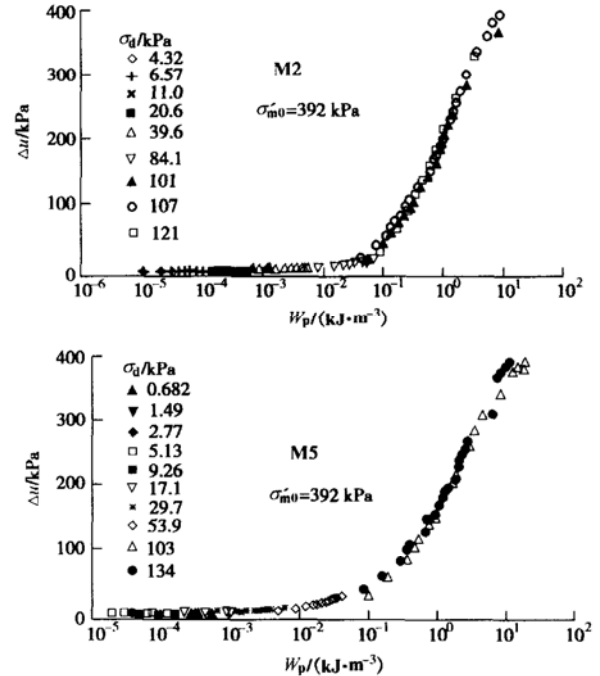


图 2 M2 和 M5 的孔隙水压力和损失能量的关系

Fig. 2 Relationship between excess pore water pressure and total energy dissipation of M2 and M5

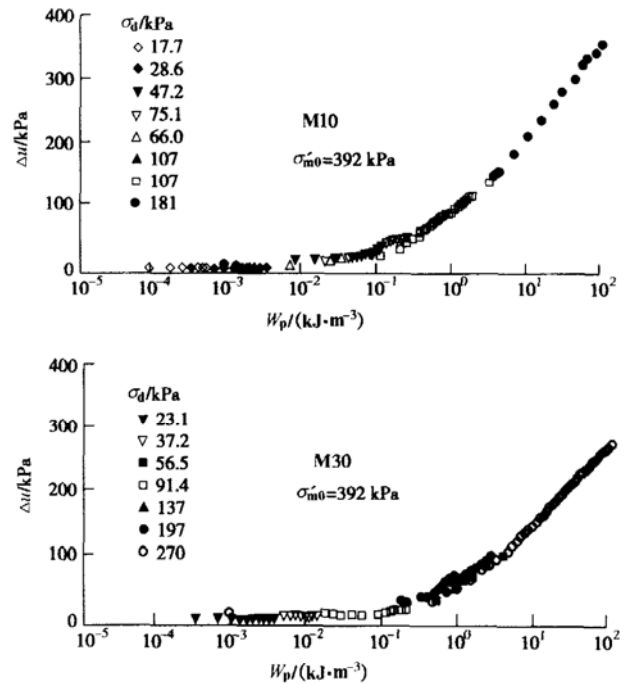


图 3 M10 和 M30 的孔隙水压力和损失能量的关系

Fig. 3 Relationship between excess pore water pressure and total energy dissipation of M10 and M30

另外, 从图 2 和图 3 中我们还可以看出, 不管那种土类, 孔隙水压力上升曲线形状相似, 说明孔隙水压力

和损失能量之间确实存在某种密切关系。

3.2 影响孔隙水压力和损失能量关系的因素

(1) 围压的影响

图 4 和图 5 分别给出了不同初始固结应力时, M2 M5 M10 和 M30 的孔隙水压力和损失能量的关系曲线。各图中同一围压曲线包含不同的循环应力振幅。从图中我们发现不同的围压对应不同的孔隙水压力上升最大值, 根据土的细颗粒含量差异, 孔隙水压力达到最大值时所耗损的能量亦不同, 细粒含量越高, 孔隙水压力上升所需要耗损的能量越大。当孔隙水压力达到一定数值后, 损失能量即使增加, 孔隙水压力基本维持不变。但不论那一种情况, 孔隙水压力都伴随损失能量的增加而增大, 区分不同的围压和细颗粒含量, 基本上都可以分组用双曲线来表示。

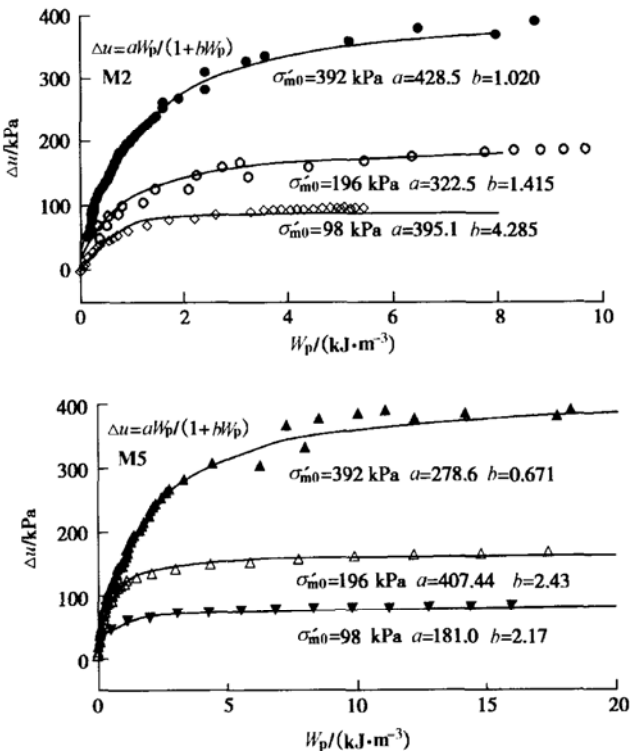


图 4 M2 和 M5 的孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 4 Relationship between excess pore water pressure and total energy dissipation of M2 and M5

(2) 频率的影响

地震波浪等动力荷载的主要频率多集中在 0.1~10 Hz 之间。本文等幅振动荷载试验采用 0.2 Hz 的振动频率。为了研究振动频率的影响, 以 M2 为例, 探讨了 1, 0.1, 0.01 Hz 频率对孔隙水压力和损失能量关系的影响。图 6 表示了部分试验结果, 从图中结果看出, 振动频率对孔隙水压力和损失能量关系的影响较小, 可以忽略。

(3) 荷载不规则性的影响

为了研究荷载的不规则性对孔隙水压力和损失能

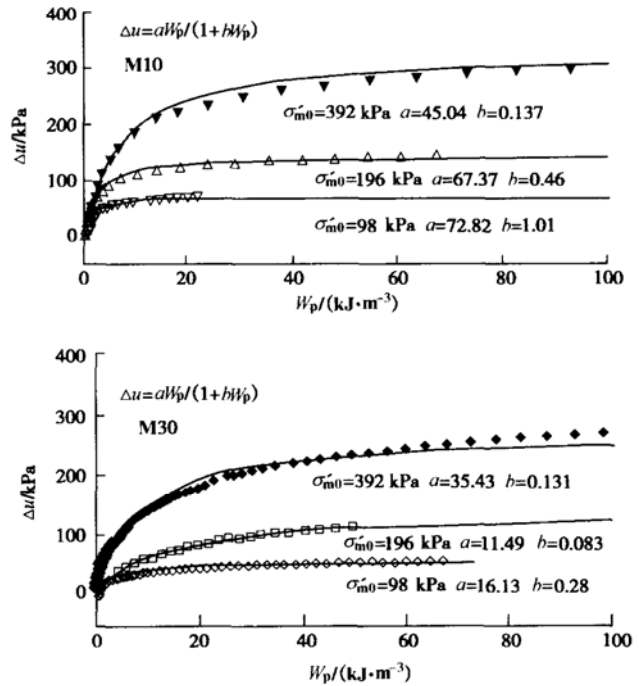


图 5 M10 和 M30 的孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 5 Relationship between excess pore water pressure and total energy dissipation of M10 and M30

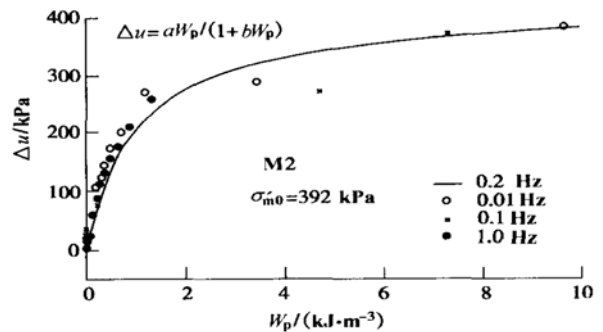


图 6 不同频率的孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 6 Relationship between excess pore water pressure with different frequency and total energy dissipation

量关系的影响, 我们选用了神户地震时在神户气象台观测到的加速度波形作为动荷载波形施加到三轴试样中, 图 7 给出了围压 392 kPa 情况下规则波和不规则波的孔隙水压力和损失能量关系的试验结果。尽管不规则波的试验结果多少有些波动, 但其结果基本和规则波的结果一致, 因而可以用规则波的孔隙水压力和损失能量关系的结果, 预测不规则波的孔隙水压力上升情况。

(4) 荷载形式的影响

只有很少的自然地基的应力状态符合动三轴试验设定的情况。为了研究荷载形式对孔隙水压力和损失能量关系的影响, 我们以 M2 土样为例, 进行了中空动扭剪试验, 图 8 给出了围压 392 kPa 情况下动扭剪试验的孔隙水压力和损失能量关系的试验结果, 相同围压

条件下动三轴试验结果也表示在同图中。图中显示动三轴试验与动扭剪试验的结果基本一致。可以认为荷载形式不影响孔隙水压力和损失能量的关系。

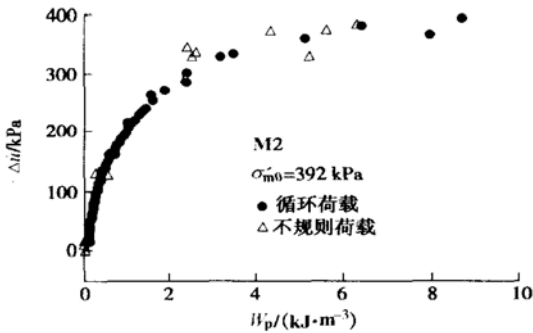


图7 不规则荷载的孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 7 Relationship between excess pore water pressure and total energy dissipation under irregular loading

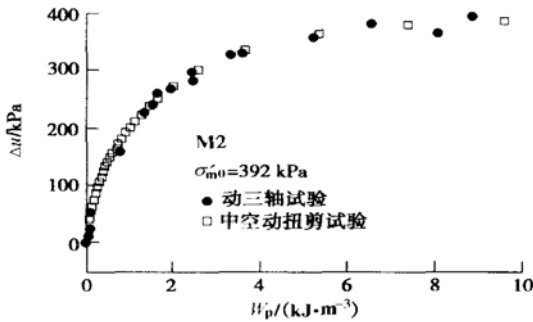


图8 不同荷载形式的孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 8 Relationship between excess pore water pressure and total energy dissipation with different loading mode

4 孔隙水压力的模型化

通过以上讨论,我们发现砂质混合土的孔隙水压力和损失能量关系不受振幅、频率、荷载形式等的影响,按围压和细颗粒含量都可以分组用双曲线来近似。

4.1 围压影响和损失能量的归一化

土的滞回圈大小(损失能量)和土的软硬程度(剪切模量)有关,剪切模量和围压的 n 次方成比例(根据 Wang^[8] 的试验结果, M2 M5 M10 M30 的 n 值与土的细颗粒含量关系不大,可取 0.67),因而土的损失能量也可以近似认为和围压的 n 次方成比例。为了表示不同围压对孔隙水压力的影响,将得到的孔隙水压力用初始围压进行归一,累积损失能量用围压的 n 次方归一(初期拘束压需采用 1 kPa 应力进行无因次化)。图 9~ 10 分别给出了不同土不同围压的归一化曲线。结果表示归一化的孔隙水压力和损失能量关系不受围压影响,基本符合同一曲线变化规律。尽管曲线的形状与土的细颗粒含量有关,但都可以用如下的双曲线模型表示:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u / \sigma'_{m0} &= a_u W_R / (1 + b_u W_R), \\ W_R &= W_p / \{ \sigma_{mr} (\sigma'_m / \sigma_{mr})^n \}, \\ \sigma'_m &= \sigma'_{m0} - \Delta u, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 W_R 为归一化损失能量; σ'_{m0} 为初始有效应力; σ'_m 为振动过程中的有效应力; σ_{mr} 为单位应力。

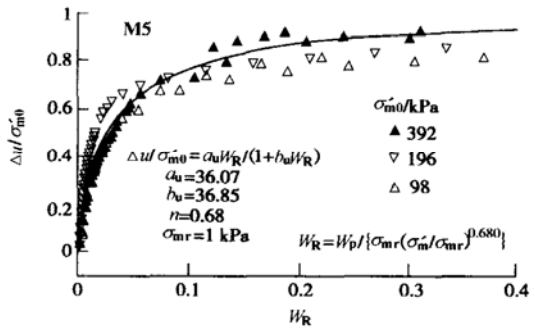
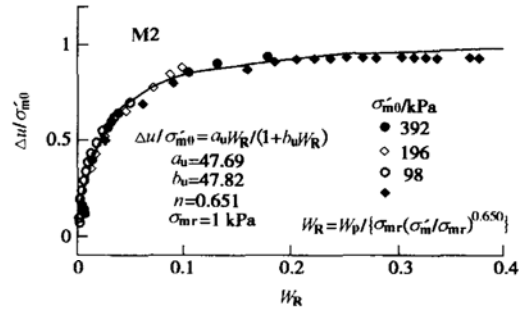


图9 M2和M5的归一化孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 9 Relationship between W_R and $\Delta u / \sigma'_{m0}$ (M2 and M5)

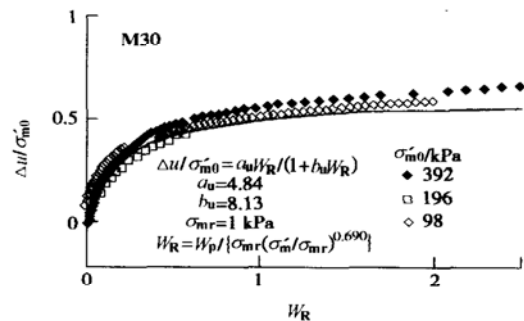
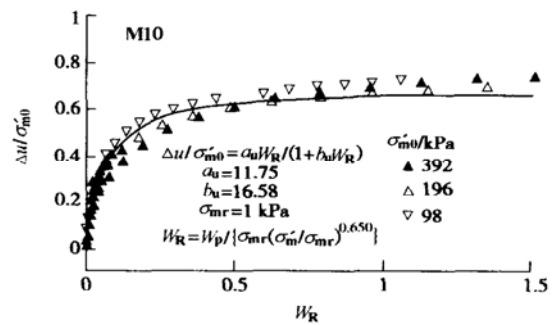


图10 M10和M30的归一化孔隙水压力和损失能量的关系
Fig. 10 Relationship between W_R and $\Delta u / \sigma'_{m0}$ (M10 and M30)

4.2 细颗粒含量与模型参数的关系

由式(4)可知,最大孔隙水压力比可以表示为

$$(\Delta u / \sigma_{m0}')_{\max} = a_u / b_u \quad (5)$$

图 11 表示了土的细颗粒含量与最大孔隙水压力比的关系。最大孔隙水压力比在细颗粒含量小于 30% 时变化趋势不十分明显, 以后随细颗粒含量增加而显著减少。参数 a_u (初始曲线斜率) 随细颗粒含量的变化曲线见图 12。 a_u 越大表示孔隙水压力增长越快。由图可见土的细颗粒含量越高, 孔隙水压力上升速度越慢。

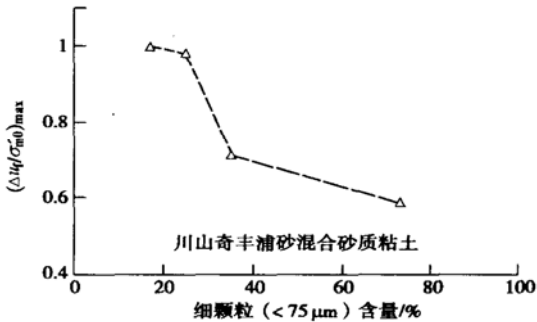


图 11 土的细颗粒含量与最大孔隙水压力比的关系
Fig. 11 Relationship between maximum pore water pressure ratio and fine content of soil

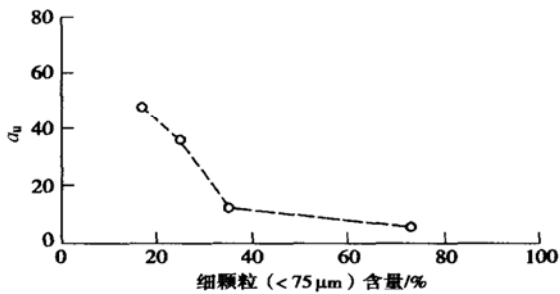


图 12 土的细颗粒细含有量与 a_u 的关系
Fig. 12 Variations of a_u with fine content of soil

5 结 论

通过对各种细颗粒含量的土实施从小到大应变水平的动力循环荷载试验, 考察了土的细颗粒含量、围压、加载频率、加载形式及荷载的不规则性对孔压的影响, 可得出以下结论:

(1) 归一化的孔隙水压力和损失能量关系不受振

幅、频率、荷载形式及荷载的不规则性等的影响, 依据土的细颗粒含量不同, 都可以用双曲线模型表示。

(2) 孔隙水压力上升速度与土的细颗粒含量密切相关。土的细颗粒含量越小, 孔隙水压力上升幅度速度越快。当细颗粒含量大于 20% 时, 孔隙水压力上升不到初始围压。

(3) 土的累积损失能量因土的细颗粒含量而表现出很大差异, 土的细颗粒含量越大, 达到孔隙水压力最大值时所需要的累积损失能量越大。

致谢: 本研究得到了东京工业大学木村孟教授和日下部教授的指导与帮助, 在此表示感谢。

参考文献:

[1] Davis R O, Berrill J B. Energy dissipation and seismic liquefaction in sands[J]. Earthquake Eng and Structural Dynamics, 1982, 10: 59- 68.

[2] Berrill J B, Davis R O. Energy dissipation and seismic liquefaction of sands: Revised model[J]. Soils and Foundations, 1985, 25 (2): 106- 118.

[3] 片田敏行, 阿部幸树, 东山晃. ひずみエネルギー- 蓄积効果を用いた飽和砂地盤の液状化過程の考察[J]. 土木学会論文報告集, 1987, (388): 43- 50.

[4] Law K T, Cao Y L, He G N. An energy approach for assessing seismic liquefaction potential[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27, (3): 320- 329.

[5] Towhata I, Ishihara K. Shear work and pore water pressure in undrained shear[J]. Soils and Foundations, 1985, 25(3): 73- 84.

[6] Igarashi S. Dislocation energy of liquefaction[J]. J Geotech Eng, 1993, (481/ - 25): 175- 186.

[7] Okada N, Nemat- nasser S. Energy dissipation in inelastic flow of saturated cohesionless granular media[J]. Geotechnique, 1994, 44(1): 1- 19.

[8] Wang G X, Kuwano J. Modelling of strain dependency of shear modulus and damping of clayey sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake engineering, 1999, 18(6): 463- 471.

[9] Kimura T, Takemura J, Hiro- oka A, et al. Mechanical behaviour of intermediate soils[A]. Proc Int Conf Centrifuge94[C]. Singapore, 1994. 13- 24.