



基于内时理论的饱和黄土孔压增长模型的试验研究

刘红玫^{1,3}, 袁中夏^{1,2,3}, 王峻^{1,3}

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 中国地震局黄土地震工程开放实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080 3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本文进行了基于内时理论的动荷载下饱和黄土孔压增长模型的试验研究, 结果表明: 饱和黄土地液化过程中其孔压的增长与土的干密度、饱和度以及动应力有着一定的相关关系。

关键词: 黄土 液化 孔压;

中图分类号: TU411.7; P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)04-0371-03

0 引言

黄土液化的研究目前是一个热点方向, 也是一个尚需深入研究的领域。黄土是一种特殊的粘质粉土, 在研究中出现了一些在砂土液化研究中不曾遇到的新现象和新问题。这既是黄土液化研究的难点也是其潜在的价值所在。本文基于内时理论的饱和黄土孔压增长模型, 通过试验建立了饱和黄土地液化过程中孔压增长和动应力、干密度及饱和度之间的关系, 并对黄土液化的机理进行了讨论。

1 黄土液化的特征及其主要影响因素

由于黄土的特殊的组成和结构, 黄土液化具有许多不同于砂土液化的特征。大量的动三轴研究已经证明, 黄土液化时其孔压比不能上升到接近 1 的程度, 随着黄土种类的不同液化时的孔压比的浮动范围大体在 0.3~0.8 之间^[1]。这是因为与砂土相比较, 黄土的结构稳定性差。砂土结构是颗粒接触, 在液化前所能达到的饱和度一般都接近 100%, 而且在液化过程中这种结构基本不会发生太大的变化。所以孔压可以稳步发展, 直到上升至有效应力时, 砂土呈现“悬浮”状的流态性质。黄土的液化则表现出“剪切流滑”和“结构再生”两方面的性质。在这些过程中, 黄土的低抗剪强度、多孔隙弱胶结结构、粘粒、粉粒和砂粒的相互比例、易溶盐的含量等都起了一定的作用。因此, 要更好地理解 and 认识黄土液化的机理必须综合分析这些因素。黄土液化时经常出现大剪切形变。黄土液化试验试样经常出现“鼓肚子”现象, 就是这种剪切变形的表现。在黄土液化过程中, 黄土结构容易遭到破坏。黄土微孔隙中的部分中小孔隙在饱和时是“气封闭”的, 这样使得黄土的饱和度较低, 一般都在 82%~90% 之间。图 1 表明, 如果试验条件比较理想的话, 当原状黄土的干密度增加时, 黄土的饱和度也相应增大, 这是因为干密度大的黄土其微孔隙结构中的“气封闭”微孔隙含量比较少。但在动应力和饱和作用下, 黄土的结构以部分溶解、剪切甚至崩塌的形式发生变化, 此时原先封闭的孔隙进水, 这一原因阻止了孔压的上升。饱和黄土试样尚有 18%~10% 的孔隙未被水充填, 这一比例是很大的, 因为原状黄土的孔隙比都在 0.8 以上。

2 基于内时理论的饱和黄土孔压增长模型的试验

2.1 试样和试验条件

本项试验用的是 DSD-160 型电磁式振动三轴剪力仪试验系统, 采用的是正弦往返荷载下的加荷方案。

试样的主要参数如表 1 所示。

2.2 饱和黄土液化过程中孔压与应变的关系

以往对饱和黄土液化的研究中, 对孔隙水压力的增长及残余应变的增长模型都是与振次不可分的。为了将孔隙水压力的增长与残余应变的增长结合起来进行研究, 我们借助于 Valanis 于 1971 年提出来的内时理论^[3-4], 该理论后来被 Zienkiewicz, Finn 等用于描述土在周期荷载作用下的应变以及砂土的孔压与体应变。应变表征了土体内部组织结构的不可逆变性, 同时它的变化也表征了其在受荷积累过程中材料内部结构的变化。找出孔压变化与应变之间的关系, 就可以找出土体在具体试验条件下特定的演变途径。

收稿日期: 2003-10-10

基金项目: 地震联合基金资助(批准号: 604016); 中国地震局兰州地震研究所青年基金资助(批准号: A0133); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20040014.

作者简介: 刘红玫(1971-), 女(汉族), 甘肃敦煌人, 工程师, 主要从事黄土动力学研究工作。

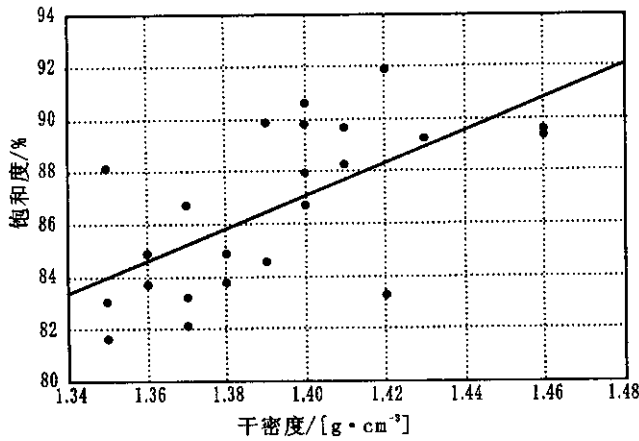


图1 干密度与黄土饱和度的关系

Fig.1 Relationship between dry density and saturation degree of loess.

分析试验结果,我们总结出液化过程当中两者之间有以下的关系:

$$U_r = A + B \cdot \varepsilon^{0.001} \quad (1)$$

这一结果显示,循环荷载下饱和黄土的孔压增长与应变有很好的相关性 ($R > 0.93$) 并存在一个极限应变,当 $\varepsilon < 2\%$ 时试样内不会产生残余孔压。土在承受逐级增大的动荷载作用下,它的变形、强度或孔压总要经历轻微变化、明显变化、急速变化这三个发展阶段^[2]。如图2所示:当 $\varepsilon < 2\%$ 时,土体结构处于弹性阶段,此时结构尚未被破坏;“气封闭”的孔隙中未进水,所以孔压上升很快;当 $2\% < \varepsilon < 6\%$ 时,部分“气封闭”的孔隙中开始进水,孔压随应变的增加缓慢地、稳步地上升; $\varepsilon > 6\%$ 时,结构被完全破坏,这时由于剪应变增长很快,因此出现了“鼓肚子”的现象,但此时孔压却不会明显增加。

进一步的研究发现公式(1)中的参数 A, B 自相关(图3)。如果能合理地确定 A, B 值,便可以用应变来表征液化过程中孔压的发展变化。由于二者的相关性很好,因此我们只对其中一个加以分析即可。我们选用 B 值研究其与黄土本身的材料特性、动力条件和饱和度的关系。参数 B 与试样的动应力 (σ_d)、干密度 (ρ) 以及饱和度 (S_r) 的关系,可表示为

$$B = c + d \cdot [(\lg \sigma_d + \rho^4) \cdot 5^{(1-S_r)}] \quad (r = 0.9827) \quad (2)$$

令 $[(\lg \sigma_d + \rho^4) \cdot 5^{(1-S_r)}] = K$, 则可用下式表示:

$$B = c + d \cdot K$$

拟合系数 (c, d) 和拟合曲线见图4。

表2 试样的 A, B 值

试样名称	A 值	B 值
SH-1	-4.914 962	5.011 127
SH-3	-11.741 103	11.781 137
SH-4	-16.332 883	16.523 520
SH-5	-7.955 848	8.026 117
SH-6	-10.391 280	10.644 177
SH-7	-11.800 300	11.936 283
SH-8	-10.999 776	11.194 097
SH-9	-7.632 043	7.792 026

表1 试样的主要参数

试样编号	含水量 /%	孔隙比	干容重 $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	饱和度 /%	固结压力 /Kpa
SH-1	10.5	0.9220	1.41	88.24	200
SH-3	14.17	0.9781	1.37	83.18	200
SH-4	6.84	0.9085	1.42	83.25	200
SH-5	8.4	0.9781	1.37	82.12	140
SH-6	8.84	0.8562	1.46	89.61	140
SH-7	7.22	0.9496	1.39	84.59	140
SH-8	1.63	0.8311	1.48	89.38	80
SH-9	2.71	0.8951	1.43	89.25	80

当土体受振动荷载作用使原有稳定的结构遭到破坏时,原来由土颗粒所承担的压力就要传给孔隙中的水分来承担,因而引起孔隙水压力的增高。同时,试样中最初“气封闭”未被水填充的孔隙由于土颗粒的位置的移动,不再封闭,从而消耗了部分孔隙水压力。

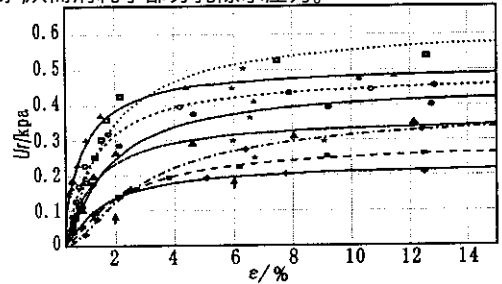


图2 应变与孔压的关系曲线

Fig.2 Relationship between strain and pore water pressure.

因而,黄土的孔隙水压力增长模型可以用下式表示,而式中 B 值则包含了土的材料特性、所受动力条件以及液化前孔隙水条件的关系:

$$U_r = (0.070 14 - 0.993 01 \cdot B) + B \cdot \varepsilon^{0.01}$$

3 黄土液化机理的再认识

将黄土液化过程中的孔压增长规律与应变结合起来进行研究,则进一步证实了黄土液化的机理。饱和黄土在受到一定动荷载时,由于其所施加动应力的作用使试样产生变形。起初(见图2中段)变形较小,孔压增长很快,是由于土样中“气封闭”的孔隙未进水;后来土的结构被破坏,虽然变形增加很快,但由于原先未充水的孔隙充满了水,从而消散了部分孔压,所以孔压不象开始时增长的那么迅速;最后,当应力超过一定的数值时(见图2中段),土的结构被完全破坏了,虽然此时变形很大,但孔压已不会再有明显的变化了。

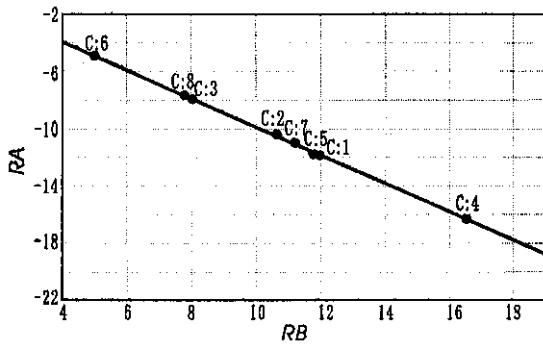


图3 A、B 值的关系曲线

Fig. 3 Relationship between A, B values.

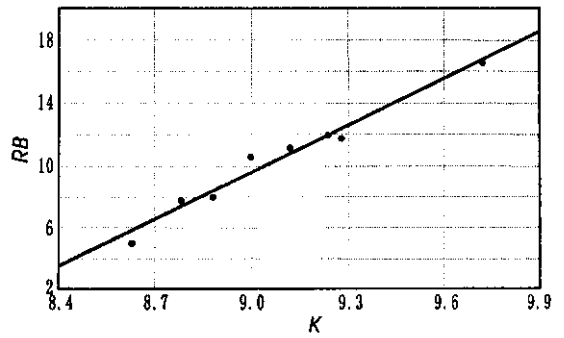


图4 B 值研究曲线

Fig. 4 The relationship between B and K values.

4 结语

- (1) 试验证明,用累积塑性应变描述黄土的液化过程中孔压增长是可行的;
- (2) 所得的孔压增长模型非常简洁;
- (3) 我们所建立的模型中的参数 K 同时反映了黄土液化的决定性因素:材料特性、动力条件和其饱和度。
- (4) 对其它场地的黄土的液化试验研究表明:我们所建立的孔压增长模型均适用,只是模型中的常数(a 、 b 值)需要重新确定。

研究表明,饱和黄土液化中孔压的变化过程与应变的变化有一定的规律性,所提出开发的模型切实可用,不足之处是其中的一些细节问题尚需通过大量的试验,进一步做更深层次的研究。

[参考文献]

- [1] 石兆吉,王兰民. 土壤动力特性、液化势及危害性评价[M].北京:地震出版社,1999.
- [2] 谢定义.土动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.
- [3] 龚晓南.土塑性力学[M].杭州:浙江大学出版社,1990.
- [4] 蒋彭年.土的本构关系[M].北京:科学出版社,1982.
- [5] 孙崇绍,段汝文,等.利用动三轴试验结果判断饱和砂土的液化势[J].西北地震学报,1997,19(4):1-6.
- [6] 王兰民,王峻,等.城市黄土场地液化的预测方法[J].西北地震学报,1997,19(4):7-12.

LABORATORY STUDY BASED ON ENDOCHRONIC THEORY FOR PORE WATER PRESSURE INCREASE OF SATURATED LOESS

LIU Hong-mei^{1,3}, YUAN Zhong-xia^{1,2,3}, WANG Jun^{1,3}

1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, CEA, Harbin 150080, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China

Abstract Based on the endochronic theory, the experiment and study on the model of pore water pressure of saturated loess increasing under dynamic load are done. The results show that the increase of pore water pressure of saturated loess has correlate relationship with the dry density, saturation degree of soil samples as well as the dynamic load.

Key words: Loess; Liquefaction; Pore water pressure.