

击实黄土孔压增长及循环软化特性试验研究

余跃心^{1,2}, 刘汉龙¹, 高玉峰¹, 王兰民³

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098; 2. 淮阴工学院, 江苏淮安 223001; 3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 通过室内饱和击实黄土液化试验研究, 探讨了击实黄土孔压增长规律. 结果表明: 击实黄土在一定条件下, 受动荷载作用能够发生液化; 击实黄土的孔压增长曲线与原状黄土的孔压增长曲线类似; 击实黄土在循环荷载作用下具有典型的循环软化特征. 工程上强夯处理的黄土若处于饱和或近饱和状态, 在动荷载的作用下会发生液化并引起较大的变形.

关键词: 击实黄土; 孔压模式; 循环软化

中图分类号: P642.13⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2002)02-0123-06

0 概述

1989年塔吉克斯坦5.5级地震在半干旱地区近乎平坦的地貌条件下, 在风成黄土中引起了广泛的液化, 造成了一系列灾难性的流滑^[1]. 这次地震灾害其工程意义在于拓宽了可液化土的范围和产生的条件, 引起了世界岩土工程界对于干旱地区黄土液化的重视. 中国西北覆盖着厚层黄土, 其岩性与粉土较为类似. 由于西北地区处于干旱地区, 长期以来并没有认识到黄土可液化特性, 有关抗震规范中也没有考虑风成黄土的液化问题. 关于黄土能否液化在岩土工程界仍然存在着不同意见.

曾有一些学者对中国1920年海原地震时产生于黄土地区的滑坡的成因、机理作过推断, 认为不是“液化”就是“气化”所致^[5,7,8]. 王兰民在20世纪90年代中期就黄土可液化特征作了较为详细地研究, 指出:“饱和黄土、击实黄土在一定条件下是可以液化的”^[2,3]. 黄土液化试验初步结果表明: 黄土包括击实黄土在一定条件下是可以液化的, 且其抗液化能力在某种程度上还较砂土弱. 但关于击实黄土孔压增长模式, 国内并没有多少研究, 至于饱和击实黄土的动本构关系特别是黄土循环软化特性和液化后大变形特征很少有人涉足.

本文尝试通过室内击实黄土的动力液化试验, 来揭示黄土的动力液化特性及其循环软化特征, 并对海原黄土低角度液化滑移进行了反演, 以期引起岩土工程界对黄土液化的重视, 并为工程抗震和震害预防提供理论依据.

收稿日期: 2001-09-24

基金项目: 教育部骨干教师基金资助项目(2000506033)

作者简介: 余跃心(1964-), 男(汉族), 江苏淮阴人, 博士研究生. 目前主要从事动力学和深基坑支护方面的教学和科研工作.

1 试验仪器、试样和试验方案

采用河海大学与日本联合制造的静动扭剪三轴仪进行试验.该系统由主机、电控系统、静压控制系统和微机系统等组成.微机系统通过电控系统将数字信号转换成轴向激振力;测量系统则将振动过程的力、位移、孔隙水压力记录下来;试验数据再由微机进行处理.黄土试样为兰州彭家坪、崔家崖 Q_3 马兰黄土,其物性指标、粒径分布见表 1.

表 1 试验用的黄土物性指标

采样点	含水量/%	容重/[$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]	孔隙比	塑性指数	粒径分布/%		
					粘粒	粉粒	砂粒
彭家坪	7.80~9.13	13.7~14.9	0.865~1.069	8~10	10	78	12
崔家崖	11.4~15.7	14.2~16.5	0.713~0.949	9~11	13	72	14

为模拟强夯处理的黄土,采用击实试验确定黄土的最优含水量,如图 1 所示.在最优含水量条件下,按不同密实度配制试样,采用抽气饱和的方法进行饱和.试验中 B 值表明试样的饱和度大于 95%,说明该饱和方法是适用的.

试验中将固结比、干密度、固结应力作为试验参数,以研究这些参数对黄土孔压增长及循环软化的影响.固结比分别为 1、2 及 3,试样的干密度在 1.534~1.623 之间,固结应力分别为 100 kPa、200 kPa 及 300 kPa.在其它参数给定情况下,试验中还采用不同的动应力以模拟不同强度地震波的剪应力.

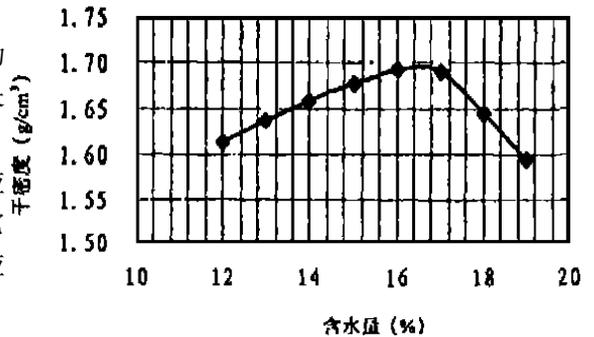


图 1 兰州黄土击实试验

Fig. 1 Compaction test of Lanzhou loess.

2 击实黄土孔压增长模式

前人对饱和砂土和粉土的液化、孔压增长已做过大量研究.一般来讲,均采用孔压达到有效围压或全幅应变达 5% 作为液化标准.为研究循环软化特性,本文在试验中将单幅应变定义为破坏应变,其意并不是改变液化判别标准,而是将焦点放在液化后黄土的动应力应变关系上.根据 Seed 建议的不同震级地震时程等效循环次数,在试验中将液化振次限定在 30 次以下,以模拟 IX 度以下的地震动应力.更高振次的孔压增长曲线模拟持时较长的小幅振动时程作用下孔压增长更为合适,因此在试验中不作重点研究.张振中等^[2]所作的试验研究表明,振次较高的孔压增长曲线将由 A 型转向类似于 Seed 型.

张建民、谢定义等^[11]通过 20 多个孔压模式的考察研究,将孔压增长曲线分为 A 型、B 型和 C 型曲线三类,用来模拟地震荷载的大幅值波在整个地震时程中处于前部、中部和后部所形成的孔压曲线.

$$\left. \begin{aligned}
 u &= u_f(1 - e^{-\beta \frac{t}{t_f}}) && \text{(A 型)} \\
 u &= \frac{2}{\pi} u_f \sin^{-1} \left(\frac{t}{t_f} \right)^{\frac{1}{2\alpha}} && \text{(B 型)} \\
 u &= u_f \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{t}{t_f} \right) \right]^b && \text{(C 型)}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

图 2 为围压 100 kPa、 $K_c = 1$ 饱和击实黄土孔压增长曲线. 看出, 击实黄土孔压增长曲线与饱和原状黄土孔压增长曲线在形态上是相似的. 两者丰满程度有所差异, 实际上反映了饱和原状黄土和击实黄土在动荷载作用下体积变形特性差异, 后面将加以阐述. 图 2 中击实黄土孔压曲线, 当振次比为 0.2 时, 孔压比已达 0.4; 振次比为 0.4 时, 孔压比在 0.75 以上; 当振次比为 0.6 时, 孔压比在 0.8 ~ 0.90 之间. 击实黄土孔压增长曲线与饱和原状黄土孔压曲线的差异在于后者具有较大震陷性, 在动荷载作用下处于准稳态的结构受损, 震陷性为动应力所诱发并于剪缩耦合, 造成较大体积变形, 使得饱和原状黄土在振动早期孔压就迅速增长. 而击实黄土由于黄土独特的大孔结构已遭到破坏, 但中孔隙、盐类物质等并没有因击实破坏或损失, 在动应力作用下, 盐类物质的溶解和中孔隙结构的破坏, 使振动早期体积变形虽没有饱和原状的体变大, 但有较大的体变, 使得孔压增长较为迅速. 显然, 这与典型饱和砂土的体积变形机理有一定的区别.

在均压固结条件下, 饱和击实黄土的孔压增长可以用 A 型曲线来拟合, 图 2 中 A 型曲线 ($\beta = 2.8$) 清楚地展示了击实黄土的孔压增长的趋势. 即:

$$\frac{U_d}{U_f} = (1 - e^{-\beta \frac{N}{N_f}}) \quad (2)$$

式中, U_f 为破坏或液化时最大孔压, β 为曲线拟合参数, N_f 为破坏振次, $N_f \leq 30$. β 与等幅正弦的动应力幅值、饱和度以及中孔隙、盐类物质等有关, 表征了振动前期体变的大小. 动应力愈大, 中孔隙和盐类物质愈大; β 愈大, 曲线形态愈丰满.

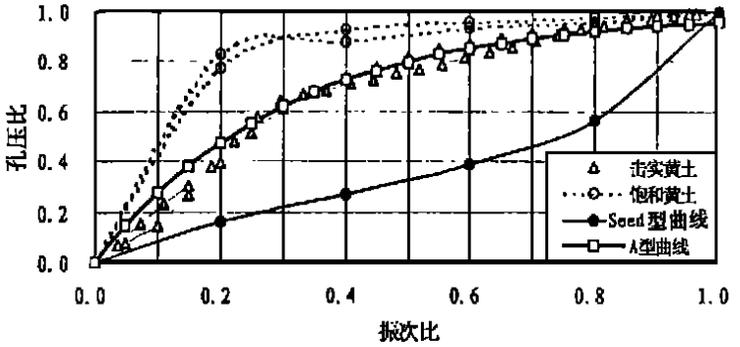


图 2 饱和击实黄土孔压增长曲线

Fig. 2 Pore-water pressure increasing curve of saturated compaction loess.

3 击实黄土的循环软化特性

大量黄土动力试验研究表明: 黄土的动应力-动应变关系可以用类似双曲线的模型来表示. 原状黄土、击实黄土的动本构关系也可以用双曲线来表示. 由于饱和黄土在动荷作用下孔压增长, 而使结构受到损伤. 因此, 可用孔压比作为损伤参数或骨架曲线退化参数来反映孔压对土的损伤或软化. 其动本构关系如下式表示:

$$\tau^* = f^*(\gamma) = \frac{G_{mt}^* \gamma}{1 + \beta \left(\frac{G_{mt}^* \tau}{\tau_{mt}^*} |\gamma| \right)^s} \quad (3)$$

$$G_{mt}^* = G_{m0}^* \sqrt{\frac{(\sigma'_{vc} - \mu)}{\sigma'_{vc}}} = G_{m0}^* \sqrt{1 - \mu^*} \quad (4)$$

$$\tau_{mt}^* = \tau_{m0}^* \frac{\sigma'_{vc} - \mu}{\sigma'_{vc}} = \tau_{m0}^* [1 - (\mu^*)^v] \quad (5)$$

其中: $\tau_{m0}^* = \tau_{m0} / \sigma'_{vc}$; $G_{m0}^* = G_{m0} / \sigma'_{vc}$; σ'_{vc} 为约束围压. 试验的约束围压分别为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa, 固结比等于 1. G_{m0} 为第一滞回圈初始切线剪切模量; τ_{m0} 为饱和击实黄土的剪切强度. 从图 3 中可以看出, 饱和和击实黄土在 $10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ 剪应变范围内呈双曲线形态, 因此可用 Kondor 和 Zelasko 模型来描述. 但 KZ 模型参数较少, 不能准确地拟合试验数据. Matasovic^[4]

对KZ模型进行了修正,引入了两个曲线形态拟合参数 β 和 s .本文采用修正的KZ模型即MKZ模型来描述饱和击实黄土动本构关系,试验数据拟合结果如下式表示:

$$\tau^* = f^*(\gamma) = \frac{G_{mt}^* \gamma}{1 + \beta \left(\frac{G_{mt}^*}{\tau_{mt}^*} |\gamma| \right)^s} = \frac{G_{mt}^* \gamma}{1 + 1.47 \left(\frac{G_{mt}^*}{\tau_{mt}^*} |\gamma| \right)^{0.88}} \quad (6)$$

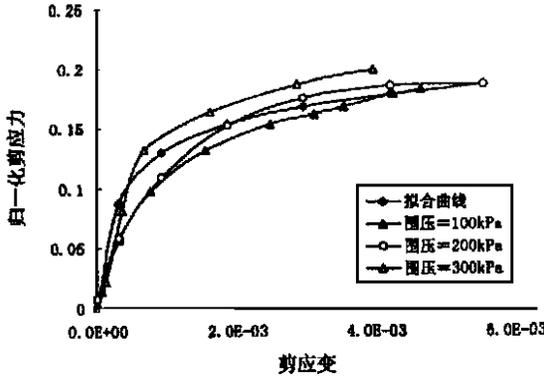


图3 饱和击实黄土初始骨架曲线

Fig. 3 Initial backbone curve of saturated compaction loess.

以上,说明土已开始液化.在试验中我们尝试在土样液化后持续施加循环荷载,研究液化后土样的动应力应变关系.图6为图4滞回曲线液化后几周应力应变曲线.图中曲线有较长的平坦段,反映了土液化后应力应变关系发生了突变.从一周加载过程来看,表明了土样在荷载作用下持续变形,结构重组,发生剪胀,孔压转而下降,抗剪强度恢复.平坦段应变变化区间达17%,这与液化后加静力荷载发生的剪应变在同一个量级上,说明了研究液化后静荷载引起的大变形可以由动力液化后继续施加动循环荷载进行研究.

4 工程意义

由于强夯法处理湿陷性黄土地基的主要作用是提高黄土的密实度,而黄土液化的微观机理与黄土中粉粒含量、中孔隙含量、盐类弱胶结有密切关系,所以不能利用强夯法有效消除黄土的液化势.在工程中,对于强夯处理后的地基应当考虑采用一些抗液化措施,才能保证建筑物的安全.

击实黄土的循环软化现象说明对于饱和及近饱和击实黄土,在动荷载作用下孔压上升到0.5~0.6以上时,其变形是相当大的.且在孔压接近0.7~0.8时,击实黄土已破坏.液化后较低的抗剪强度和大变形对工程安全有着较大的影响.

击实黄土孔压增长规律说明了饱和或近饱和的黄土液化势是相当大的.且孔压发展相当

图4、图5为循环荷载作用下动应力应变试验曲线和孔压、轴向应变时程曲线(围压=200 kPa, $K=1$),试验中动应力采用反馈补偿方式加载.从图中可以看出,应力应变关系随着循环周数的增加,剪切模量在逐渐减小,抗剪强度不断降低.当孔压比小于0.5时,应力应变曲线可以用上述公式来拟合,不同孔压比时的剪切模量和极限抗剪强度则采用公式(4)和(5)来计算.随着孔压的进一步增加,有效应力降低,土软化现象较为显著,S效应更为显著,此时上凸的双曲线拟合精度较差.当孔压比在0.7~0.85左右时,轴向应变开始放大,应变达5.0%

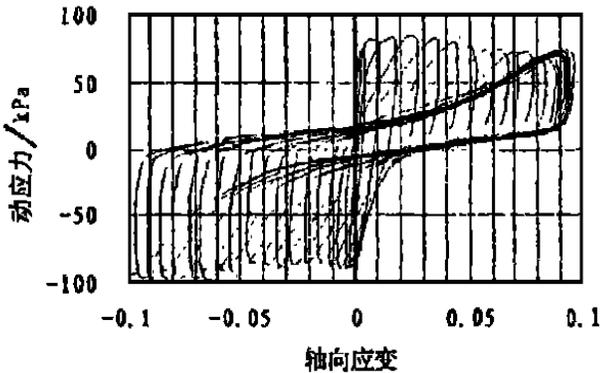


图4 击实黄土滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curve of compaction loess.

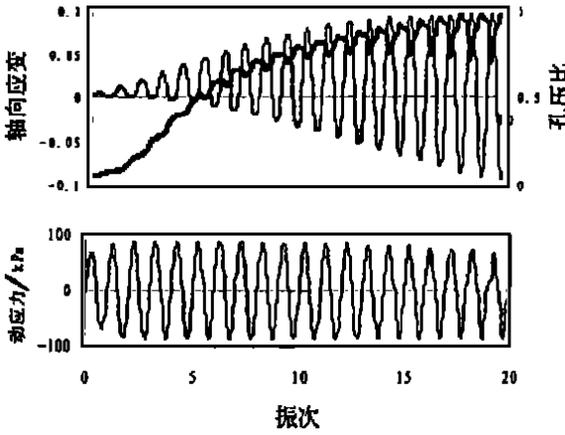


图 5 饱和击实黄土动应变、孔压和动应力历程

Fig.5 Dynamic strain pore pressure and dynamic stress curve of compaction loess.

移的根本原因。

5 结论

(1) 击实黄土孔压增长模式可以用指数曲线来拟合。β 参数控制了孔压曲线的形态。在饱和和近饱和状态下, 地震动强度超过一定强度时, 就可以触发黄土液化。

(2) 由于黄土独特的结构、物质和弱胶结等特点, 使得黄土的孔压增长模式与砂土的增长模式有所不同, 主要区别在地震时程早期黄土孔压可达 0.6 以上, 强度迅速降低。震动末期地震动和静剪应力的共同作用可造成黄土大变形。

(3) 饱和击实黄土骨架曲线可以用修正的 KZ 模型来描述。但由于黄土的循环软化特性, 当孔压比在 0.5 以上时, 修正模型拟合精度较差。

(4) 研究饱和黄土液化后大变形可以通过常规的动三轴试验在土液化后继续施加循环荷载进行。液化后击实黄土具有典型的软化特征。变形幅值可达 10% 以上。

迅速, 引起土的软化。由于黄土独特的液化机理, 往往震级不大就可以触发黄土的液化。

1920 年宁夏海原 8.5 级地震除了使地下水水位短时迅速上升以外, 孔压的增加加速了黄土盐类胶结物的溶解, 黄土颗粒间粘结强度减弱。高峰值动应力诱发了黄土的震陷体积变形, 其体应变高达 6%。震陷与剪缩的耦合使孔压迅速上升, 导致黄土残余变形很大, 强度迅速降低。时程末的地震波与静剪应力的共同作用使阶地上黄土沿着平缓的坡面高速下滑。1.5 km 的滑距若仅是由缓坡面重力分量而没有地震动力作用是难以想象的, 远距离的滑移恰恰证明了黄土在地震时程前期的孔压已达到相当高的值, 土体已软化, 时程末的地震波和沿坡面的重力分量是长距离滑

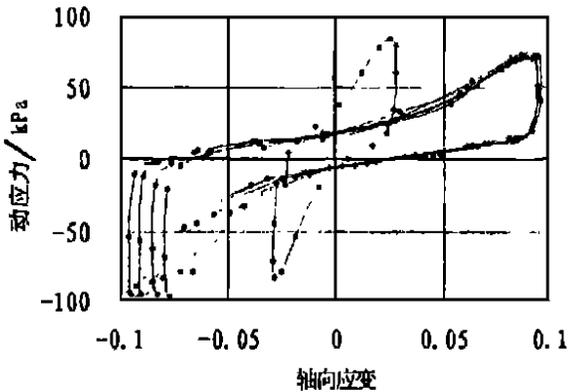


图 6 饱和击实黄土液化后滞回曲线

Fig.6 Postliquefaction hysteresis curve of saturated compaction loess.

[参考文献]

[1] Ishihara K et al. Liquefaction-induced flow slide in the collapsible loess deposit in Soviet Tajik [J]. Soils and Foundations, 1990, 30 (4): 73-87.

[2] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1997. 112-130.

[3] 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, 1997.

[4] Matasovic N et al. Cyclic characterization of liquefiable sands [J]. J. Geotech. Engrg 1994, 119(11): 1805-1822.

[5] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995. 61-66.

- [6] 王兰民, 刘红炎, 李兰, 孙崇绍. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 89—94.
- [7] 白铭学, 张苏明. 高烈度地震时黄土地层的液化移动[J]. 工程勘察, 1990, (6): 1—5.
- [8] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273—284.
- [9] 李兰. 饱和黄土动力特性的几何探讨[A]. 见: 第五届全国土动力学学术会议论文集[C]. : 1998. 138—133.
- [10] , , . [A]. : [C]. : , 1998. 144—148.
- [11] , . [A]. : [C]. : , 1990. 231—235.

STUDY ON PORE-WATER PRESSURE MODE AND CYCLIC SOFTENING OF SATURATED COMPACTED LOESS

SHE Yue-xin^{1, 2}, LIU Han-long¹, GAO Yu-feng¹, WANG Lan-min³

(1. *Research Institute of Geoenvironment, Hehai University, Nanjing 210098, China;*

2. *Civil Department, Hhaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China;*

3. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The increasing rhythm of pore-water pressure and cyclic softening behavior is discussed by tests on saturated compacted loess. The results indicate that saturated compacted loess can liquefy subjected to dynamic loads, the curve of pore-water pressure of it is similar to that of initial loess, and it displays softening nature subjected to cyclic loads. In engineering, reconstituted loess, if it is saturated or almost saturated, can liquefy and deforms strongly.

Keywords: **Compacted loess; Pore-water pressure increasing mode; Cyclic softening**