

粉土的动力特性及液化势研究

黄博¹, 陈云敏¹, 殷建华², 吴世明¹

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 香港理工大学土木及结构工程系, 香港)

摘要: 本文对典型的粉土进行了试验研究。结合共振柱和动三轴试验结果, 得到了 $G/G_{\max} \sim V/V_r$ 和 $D \sim V$ 曲线。在动三轴仪上, 安装了压电陶瓷弯曲元用以测试土样的 G_{\max} , 并通过先期振动控制试样 G_{\max} , 在土样密度和 G_{\max} 同时与现场土体一致的情况下, 进行了应变控制的动三轴液化试验。根据试验结果, 给出了粉土在不同的地震震级下的临界剪应变变化范围和均值。

关键词: 粉土; 重塑土; 液化; 先期振动

中图分类号: TU 41 **文献标识码:** A

Abstract Test and research on typical silt are conducted herein. $G/G_{\max} \sim V/V_r$ and $D \sim V$ curves are acquired by combining the test results of resonant column and cyclic triaxial tests. Bender element system is installed on the triaxial apparatus to measure the G_{\max} of soil sample. Strain controlled triaxial liquefaction tests are conducted under the condition when the density of soil samples and G_{\max} are both the same with those of soil mass in the field. The variation range and mean value of critical shear strain of silt during different seismic intensities are given based on the test results.

Key words silt; remoulded soil; liquefaction; preshearing

1 前言

粉土是一种具有特殊工程性质的土类, 由于其土体性质、颗粒组成与砂土有明显差异, 不能单纯地套用针对砂土得到的液化判别参数。因此, 进行粉土的动力特性和液化问题的研究, 探讨其规律性具有实际意义。

文中的液化试验同时控制重塑土样的密度和剪切波速, 使之与现场土体一致。并认为, 土体的剪切波速 (弹性剪切模量) 能够反应土的结构、应力应变和超固结应力历史对液化势的影响^{[1]-[3]}, 当重塑土样的剪切模量和密度同时都和现场土体相等时, 可以真正反映原位土体的抗液化能力。

本文利用作者在原有的动三轴仪上开发研制的压电陶瓷弯曲元仪器系统, 测试土样的剪切波速, 并通过先期振动控制土体的剪切波速。根据应变控制的液化试验结果, 给出了粉土在不同的地震震级下的临界剪应变幅 V_r 的变化范围和均值。这对研究粉土地基的液化问题具有参考价值。文中还结合共振柱和动三轴试验结果, 得到了粉土动力变形特性曲线 $G/G_{\max} \sim V/V_r$ 、 $D \sim V$, 并给出了用修正的 Hardin-Drnevich 双曲线模型拟合得到 $G/G_{\max} \sim V/V_r$ 曲线。

2 试验设备、试样及试验方法

(1) 试验设备

在 Drnevich 型共振柱基础上开发的新型共振柱系统^[5]上完成共振柱试验。

试样液化试验在 GDS 公司的动三轴仪上进行。为了测试土样的剪切波速, 得到剪切波速与原位一致的重塑试样, 在原有三轴仪上安装了压电陶瓷弯曲元。弯曲元测试法原理同超声波法一样, 也是测量弹性波通过某种介质的距离和时间, 计算波速。但使用时, 压电陶瓷晶体制成的弯曲元直接插入土体中, 以获得更清晰的信号。弯曲元-动三轴测试系统布置如图 1 所示。有关弯曲元-动三轴系统的改装研制试验原理及弯曲元特点等情况, 详见文献 [8]。

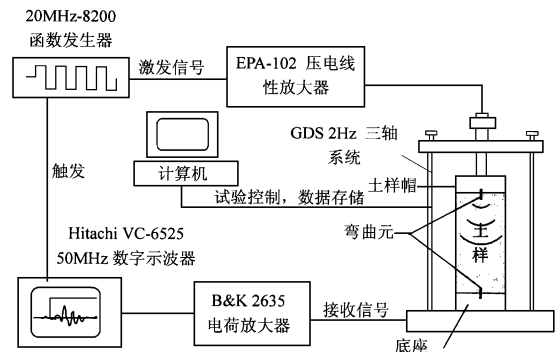


图 1 弯曲元-动三轴测试系统布置

收稿日期: 2000-06-23; 修订日期: 2000-08-31

基金项目: 香港理工大学资助项目 (S771)。

作者简介: 黄博 (1973-), 女 (汉族), 江苏南通人, 博士。

(2) 试样制备与试验方法

试验用土样取自钱塘江地区，是一种颇具代表性的粉土：比重 2.66，液限 32.70，塑性指数 9.70 土体的 D_{50} 为 0.027mm 不均匀系数为 3.98，曲率系数为 2.03 在现场同时用跨孔法测试了土体的剪切波速，以作为控制重塑试样剪切波速的标准。

共振柱试样直径 3.56cm，高度 7.45cm 采用多层湿捣法制备。根据现场土体平均干容重，控制粉土样干容重为 14.8kN/m² 给试样通循环排气水，反压饱和，在不同的围压下固结完毕后，进行扭振试验。

三轴试验试样直径 7.0cm，高度 14.0cm，试样制备同上。土样饱和固结后，用弯曲元方法测定土样剪切波速。如果重塑土样的剪切波速没有达到预定值，采用在排水条件下进行小应变幅的先期振动的方法提高土样的剪切波速，至达到预期的剪切波速。试样剪切波速控制的有关细节详见文献 [9] 土样再经过一定时间的固结，进行动三轴试验。循环三轴试验采用应变控制。振动波形为正弦波，振动频率为 2Hz。

3 粉土的动力特性

(1) 弹性剪切模量 G_{max}

图 2 给出了粉土弹性剪切模量 G_{max} 随有效固结围压 e'_3 的变化关系。试样的 G_{max} 是在等向固结情况下，用共振柱试验和压电陶瓷弯曲元试验测定的。共振柱试验对应的最小剪应变 $V \approx 5 \times 10^{-5}$ ，压电陶瓷弯曲元试验对应的剪应变 $V \leq 10^{-6}$ ，都属于弹性应变范围。压电陶瓷弯曲元试验点是对相同应力条件下的 4~7 个试样（还未对土样进行先期振动）取平均值。

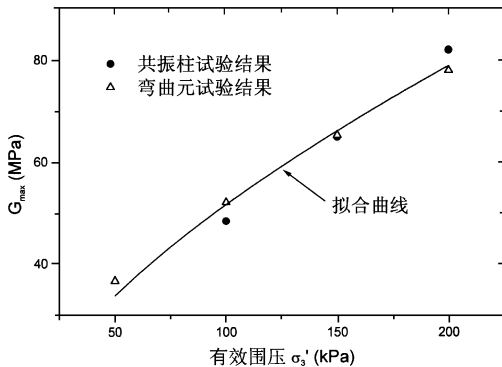


图 2 G_{max} 随 e'_3 的变化关系

从图 2 可见，在相同的应力条件下，两种不同试验方法的试验结果非常接近。此外，压电弯曲元方法还测试了分步施加固结围压 $e'_3 = 50$ kPa 时（土样已在该围压下固结完毕），土样的 G_{max} 、 G_{max} 随固结应力状态变化的影响函数可表示为：

$$G_{max} = AP_a^{1-n} (e'_3)^n \quad (1)$$

其中， A 为与土体性质和孔隙比有关的系数，式中引入大气压力 P_a 使 A 成为无量纲的系数，结果见表 1（拟合时， P_a 、 G_{max} 和 e'_3 都以 kPa 为统一单位）。

(2) 较大应变下的动力变形特性

由于动三轴试验直接测量的是杨氏模量 E_d 与轴向应变 X 的关系，假定泊松比 = 0.48，将 $E_d \sim X$ 结果转化为 $G \sim V$ 结合共振柱和动三轴试验结果，得到了较为完整的粉土和粉砂的动力变形特性曲线。对不同固结应力下的 $G \sim V$ 曲线用各自的 G_{max} 和参考剪应变 V_r 归一。如图所示，归一化之后，不同初始围

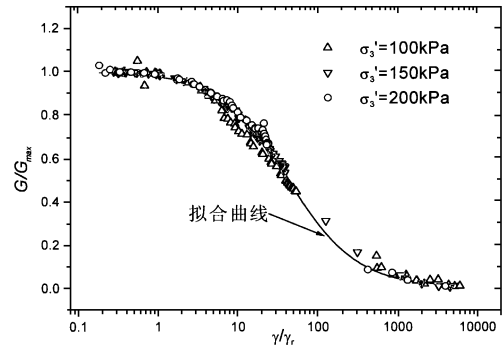


图 3 归一化动力变形曲线

压下的试验点都集中在一个很窄的条带内， $G/G_{max} \sim V/V_r$ 曲线基本重合。这样，所有试验结果均可用修正的 Hardin-Drnevich 双曲线模型来拟合，其形式为：

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{V}{V_r} (1 + ae^{-b\frac{V}{V_r}})} \quad (2)$$

式中， a 、 b 为因土性而异的常数。粉土归一化曲线的拟合参数结果如表 1 所示。

粉土的试验参数 表 1

土样	A	n	a	b	D_{max}	m
粉土	514.24	0.611	-0.976	-3×10^{-6}	0.23	1.53

(3) 阻尼特性

阻尼比随剪应变幅值的变化关系曲线 $D \sim V$ 如图 4 所示。与剪切模量相比，阻尼比在不同的固结应力下变化范围不大，总体呈固结压力越大，阻尼越小的趋势。阻尼比随 V 变化可用下式表示：

$$\frac{D}{D_{max}} = \left(1 - \frac{G}{G_{max}} \right)^m \quad (3)$$

式中， D_{max} 为最大阻尼比， m 为试验参数，其值如表 1 所示。

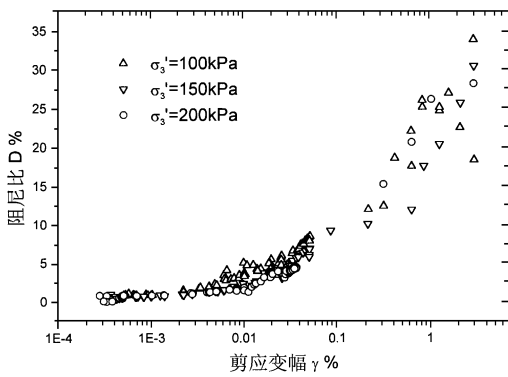


图4 阻尼比 D 随剪应变 γ 变化关系

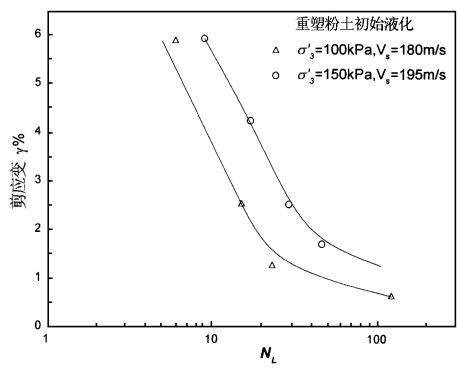


图5 初始液化时 γ 和 N_L 的关系曲线

4 粉土的液化临界剪应变幅 V_{cr}

Yokel和 Dobry 等人^[4]提出采用应变控制的循环三轴试验,以动剪应变幅代替动应力比作为判别土壤液化的指标。水平地面深度 h 处的等效地震动剪应变 V_e 可以表示为:

$$V_e = 0.65V_d \frac{a_{max}}{g} \frac{\xi}{G_{max} (G/G_{max})_{V_e}} \quad (4)$$

其中, V_d 为折减系数, 决定于土体的密度和深度。 g 、 a_{max} 分别为重力加速度和地面的最大水平地震加速度。 ξ 为深度 h 处土层上覆压力, $(G/G_{max})_{V_e}$ 为相应于剪应变 γ_e 时的动剪模量比。将 V_e 与液化时相应的土体临界剪应变 V_{cr} 相比, 当 $V_e < V_{cr}$ 时, 土体不会液化, 而当 $V_e > V_{cr}$ 时, 则该土体液化。

对于临界剪应变 V_{cr} 的取值, 工程界尚未达成共识。Yokel和 Dobry 以使试样内不产生超孔隙水压力的门槛剪应变值 V_t ($\approx 10^{-2}\%$) 来预估液化势。很明显, 该取值对于工程界普遍认同的初始液化判别标准 ($\Delta u / e'_{30} = 1$) 来说过于保守。而石兆吉等^[6]通过对已震场地的经验分析提出 $V_{cr} = 2\%$ 。该参数相差如此之大, 可见在土体抗震液化分析中, 临界液化剪应变的取值仍是一个难题。

本文由应变控制液化试验分析了剪应变 V 和达到初始液化时循环次数 N 之间的关系, 如图5所示。液化试验以初始液化作为液化判别标准。由于有时试样累积孔压值很接近围压, 但却始终达不到100%围压值, 在数据整理时, 当 $u / e'_{30} = 0.9$ 时, 就认为土已经液化。

V 和 N 之间是一种递减关系, 即随着循环次数的增大, 产生初始液化所需的剪应变就减小。这一规律和应力控制的液化试验的结果, 其规律完全一致。如同临界动应力比是液化循环次数 N 的函数一样, 临界剪应变也是液化循环次数的函数, 而不是一个

定值。不同的等效循环次数 N 对应于不同的地震震级。 N 越大, 表示相应的地震震级越高, 只需很小的剪应变土体就会液化。此外, 当 $N < 30$ 时, 曲线很陡, 临界剪应变变化率很大, 而当 $N > 100$ 后, 曲线明显变缓, 临界剪应变变化率大大减小。

在相同的 N 下, V_{cr} 与有效固结压力成正比。围压越高, 土体的抗液化能力也越大。这与实际地震中, 土体埋藏得越深, 愈不易液化的现象也是一致的。

由试验结果整理出不同循环次数液化时, 剪应变的变化范围和平均值, 见表2。 N 值为10, 20和30相当于地震震级为7, $7\frac{1}{2}$ 和8的情况^[7]。对于循环次数 N 不等于10, 20和30的情况, 可由图5直接查得其变化范围。

表2 临界剪应变 V_{cr} 变化范围和均值

N_L	粉 土	
	变化范围 V_{cr} (%)	平均值 V_{cr} (%)
10	3.79~ 5.86	4.80
20	2.20~ 3.31	2.71
30	1.60~ 2.38	1.94

石兆吉提出的2%的临界剪应变, 与粉质土在 $N_L = 30$ 时的临界剪应变平均值很接近, 即表明, 对于粉土而言, 2%的临界剪应变对应当于8级左右的地震。而大多数的液化分析中, 是以地震震级7度为标准的, 此时对应于表中 $N_L = 10$ 的情况, V_{cr} 比石提出的2%的固定值要大2~3倍。

5 结论

(1) 粉土中含有较多的粉质颗粒, 不能简单的视为砂土。粉土的归一化动力变形曲线 $G/G_{max} \sim V/V_{cr}$ 非常集中, 可用修正的 Hardin-Drnevich 双曲线模型来拟合。

(下转第17页)

清底系数

表 3

沉渣厚度 d /cm	< 5	5- 10	10- 20	20- 30	30- 50	> 50
m_s	1.0	1.0	0.9- 1.0	0.8- 0.9	0.6- 0.8	0.4- 0.6
m_d	1.0	0.9- 1.0	0.7- 0.9	0.5- 0.7	0.2- 0.5	0- 0.2

加强桩底沉渣的清理与检测工作。工程实践表明,超长桩采用反循环工艺、两次清渣(成孔及下笼灌注砼前)方案,效果较理想。在沉渣检测方法上传统的垂球检测法凭人的手感判断,精度较差,许多工程桩质检记录的沉渣厚度小,满足设计要求,而在检测时实际沉渣远大于记录的厚度,造成桩承载力严重偏低,给隐蔽工程桩的评价带来困难。因此,高效、实用的测渣仪的开发及普及是灌注桩设计、施工及评价中的重要内容。同时,在桩基施工中应限制成桩的最长周期,以保证桩基承载力能正常发挥。

据福州地区经验,桩长在 50m 以内的以砾卵石为持力层灌注桩总成桩时间宜控制在 40~ 60 小时以内,桩长在 65m 以内的以强风化岩或残积土为持力层的灌注桩,宜控制在 50~ 72 小时;桩长在 70m 以内,以中(微)风化岩为持力层的桩宜控制在 80~ 120 小时以内,才能保证桩承载力有较好的发挥。

4 结语

(1)影响大口径灌注桩承载力的因素除场地土层分布、性质及桩身混凝土质量外,直接影响因素尚有桩底沉渣厚度、桩侧泥皮厚度、孔壁形状等,间接因素有成孔时间长短、施工工艺、技术水平等。受上述因素影响,灌注桩承载力离散性较大,可靠度较低,非正常桩将导致侧阻、端阻严重损失,单桩承载力最大损失达 50~ 80% 以上。

(上接第 9 页)

(2)粉土含水量高,在运输和制样的过程中易扰动析水,很难得到真正的原状土。在这种情况下,研究土的液化性,可以考虑采用同时控制重塑土样的剪切波速和密度,使之与现场土体相一致,达到重现土体结构性的目的。

(3)液化临界剪应变 V_c 是液化循环次数 N 的函数,并不是一个固定的常量。地震震级越大,达到液化时的剪应变就越小。

致谢 本文的大部分试验工作是在香港理工大学土木及结构工程系完成的。第一作者在香港理工大学的学习和工作,得到香港理工大学的资助(项目编号 S771),对此表示感谢。共振柱试验部分在香港科技大学土木及结构工程系完成,在此对该系有关人员的帮助表示真诚的谢意。

参 考 文 献

[1] DeAlba, P., Baldwin, K., Janoo, V., Roe, G. and Celikkol, B. Elastic-wave Velocities and Liquefaction Potential. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 77-88, 1984.

(2)目前国标建筑桩基技术规范 JGJ94-94 中,在计算单桩承载力方法中没有考虑场地土层以外的影响因素,这是造成灌注桩设计值与实测值往往相差较大的主要原因之一,也是桩基设计理论需逐步完善的重要内容。本文提出在单桩承载力计算中引入清底系数以反应沉渣厚度对桩端阻、侧阻发挥的影响,引入成桩工艺系数反应不同成桩工艺、孔壁形状、泥皮厚度对桩承载力的综合影响,并应限制各类灌注桩最长成桩周期的方法,以较准确地评价各类灌注桩的承载力。而在工程勘察中提供的灌注桩设计指标应注明相应的成桩条件及清渣质量控制等指标。清底系数及成桩工艺系数尚有待进一步总结资料,积累经验加以确定。

参 考 文 献

[1] 刘俊龙. 桩底沉渣超长直径钻孔灌注桩承载力影响的试验研究. *工程勘察*, 2000 (3).

[2] 季沧江. 初探沉淤对灌注桩承载力的影响. 见: 刘金砺主编, 高层建筑桩基工程技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

[3] 王志玲等. 钻孔灌注桩的垂直性状试验研究. 见: 刘金砺主编, 桩基工程技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1996.

[4] 施峰. 某超高层建筑桩基检测结果分析. 见: 刘金砺主编, 桩基工程技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1996.

[5] 楼晓明等. 孔壁形状对钻孔灌注桩承载特性的影响. *工程勘察*, 1998 (2).

[6] 桩基工程手册编委会. 桩基工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. 56- 62, 789- 800.

[7] 史佩栋主编. 实用桩基工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 97- 100.

[8] 刘俊龙. 砾卵石层中大口径桩底高压注浆灌注桩的承载性状. *工程勘察*, 2000 (5).

[2] Tokimatsu, K., Yamazaki, T. and Yoshimi Y. Soil liquefaction evaluations by elastic shear moduli. *Soils and Foundations*, Vol. 26, pp. 23-35, 1986.

[3] 刘小生, 赵冬, 汪闻韶. 原状结构性对砂土动力变形特性的影响试验. *水利学报*, 第 2 期, 1993.

[4] Yokel F. Y., Dobry R., Powell D. J. and Ladd R. S. Liquefaction of Sands During Earthquakes-The Cyclic Strain Approach. *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea. pp. 571-580, 1980.

[5] Li, X. S., Yang, W. L., Shen, C. K. and Wang, W. C. Energy-Injecting Virtual Mass Resonant Column System. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 124, No. 5, pp. 428-438, 1998.

[6] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法. *岩土工程学报*, Vol. 15, No. 1, pp. 74-80, 1993.

[7] 刘颖, 谢君斐等. 砂土震动液化. 地震出版社, pp. 134, 1984.

[8] 黄博, 殷建华, 陈云敏, 吴世明. 压电陶瓷弯曲元法测试土样弹性剪切模量, *振动工程学报*录用.

[9] 黄博, 陈云敏, 殷建华, 吴世明. 控制试样初始剪切模量的动三轴液化试验, *岩土工程学报*录用.