

荆江大堤下伏饱和粉细砂动力特性试验研究^①

江洎洧, 饶锡保, 张 伟, 潘家军, 王占彬

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:针对荆江大堤江陵段下伏地层广泛分布的饱和粉细砂,参照原位试验成果重塑粉细砂试样,按估算的固结应力比(K_c 约为 1.6)对试样动剪模量、阻尼比及总应力动强度进行测试,结果表明:(1)试样应力-应变骨干曲线与 Hardin-Drnevich 双曲线模型假设高度吻合,Hardin 公式可很好地拟合动模量/阻尼比与动应变的关系。在研究试样密实度范围内,最大动模量随围压和密实度的增加而增加,但围压对动模量的敏感性更高,且相同围压下动剪模量比与动应变关系曲线近乎重合。围压增大或密实度升高均会引起阻尼比的降低,1%应变对应的阻尼比分布在 0.15~0.21 之间;(2)偏压状态下以累积轴向应变 5%作为液化判别标准进行抗液化强度试验,随特征振次及测试围压的增大,液化动剪应力比相应减小,试样振动孔压比最高仅能达到 0.8~0.9;(3)由总应力法求取的动内摩擦角与黏聚力均随设定特征振次的增加而下降,且内聚力并非约等于 0,表明动力作用下该试样具有一定的黏滞性。

关键词:荆江大堤; 饱和粉细砂; 动模量及阻尼比; 液化动强度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0759-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0759

Experimental Study on Dynamic Properties of Saturated Fine Sand in Jingjiang Levees

JIANG Ji-wei, RAO Xi-bao, ZHANG Wei, PAN Jia-jun, WANG Zhan-bin

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: Saturated fine sand is widespread under the Jiangling section of the Jingjiang levees, so a system test of the levees' dynamical properties is necessary. Using specimens built with reference to in situ test results with an estimated consolidation stress ratio K_c (approximately 1.6), we conducted a series of dynamical triaxial tests to study the dynamical elastic modulus, damping ratio, and dynamical strength. The results are as follows: (1) The relationship curves of the dynamic stress-strain of the specimens and the Hardin-Drnevich hyperbolic model assumption match well, and Hardin's formula is also a good fit with the relationship between the dynamic modulus/damping ratio and dynamic strain. In the actual compactness range of the specimens, the maximum dynamic modulus increases with increase in the confining pressure and compactness, and the confining condition is more sensitive. Furthermore, with the same confining pressure but different compactness, the fitting curves of the shear modulus ratio and the dynamic strain nearly coincide. In addition, the damping ratio decreases with increase in the confining pressure and compactness, and when the dynamic strain is 1%, the corresponding damping ratio for specimens with different

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309029, 51109013); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(20140620164601)

作者简介: 江洎洧(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事土的工程性质试验研究及数值仿真分析。E-mail: jiangjw1023@163.com。

conditions ranges from 0.15 to 0.21. (2) Under bias-consolidation conditions, we set a cumulative axial strain of 5% as the liquefaction standard. With increases in the confining pressure and number of dynamic cycles, the dynamic shear stress ratio decreases, and the maximum dynamic pore pressure ratio can only reach 0.8~0.9. (3) The dynamic friction and cohesion obtained by the total stress method decrease with increases in the number of dynamic cycles. In addition, the cohesion of the specimens is not approximately equal to 0, which indicates a viscosity characteristic of saturated fine sand under dynamic action.

Key words: Jingjiang levees; saturated fine sand; dynamic modulus and damping ratio; liquefied dynamic strength

0 引言

长江荆江大堤江陵段下伏地层广泛分布着饱和粉细砂。在各种动荷载作用下(例如地震、码头货运列车动荷载等),饱和粉细砂有产生液化的可能,是堤防变形破坏的原因之一^[1],在堤防稳定性分析中对应作为一个控制目标进行考虑^[2]。因此,有必要对堤防下伏饱和粉细砂的动力特性进行研究。

河流两岸粉细砂层一般为冲洪积成因,陈国兴等对南京及邻近地区新近沉积土动力特性进行了系统试验,得到其对应的动弹模量和阻尼比的包络线范围^[3],并对振动过程中饱和粉细砂孔隙水压力的发展模式进行了拟合^[4];马德翠等^[5]对相似成因的黄河三角洲粉质土动力特性进行了测试,认为修正的 Hardin-Drnevich 模型能够较好拟合动弹模量及阻尼比与动应变之间的关系,得到了相应的归一化关系曲线。

本文将参照原位试验成果,合理估算试样的固结应力比以及实际赋存环境相应的围压范围,对试样动剪模量、阻尼比及总应力动强度进行测试,量化获取并拟合其动力特性参数。

1 试样基本特性及试验设计

样本为长江北岸荆江大堤下伏的饱和状粉细砂,分别采自沿大堤岸线 1.2 km 范围内的 6 个钻孔,采样深度约为 15 m。试样的基本物理特性参数见表 1。

表 1 饱和粉细砂基本物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the saturated fine sand

编号	标贯击数	密实状态	休止角/(°)	颗粒组成/%		
				0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm
1	19	中密	27.5	1.5	87.7	10.8
2	22	中密	29	1.5	83.1	15.4
3	16	中密	28	1.5	86.4	12.1
4	20	中密	28	0.3	80.5	19.2
5	17	中密	28	1.5	86.2	12.3
6	25	中密	27.1	1.5	90.9	7.6

据表 1 可以看出,饱和粉细砂层颗粒级配特征高度一致,各试样休止角接近。由休止角估算该饱和粉细砂静止土压力系数约为 0.625,在以下动力试验中,固结应力比 $K_c (K_c = \sigma'_1 / \sigma'_3)$ 应取 1.6。

试样位于水下,难以采集原状样本测试其相对密实度,但可用标贯击数进行经验估算。对于砂性土,Seed^[6]提出将不同试验设备实测标贯击数 N 统一修正为标准锤击数 N_{60} ,后根据其提出的上覆压力修正系数 C_N 曲线关系,将 N_{60} 换算为有效上覆压力为 100 kPa 时经修正的标贯击数 N_1 ,从而得到考虑原始赋存应力状态的标贯击数修正值。以上海勘察规范为代表的一些地方规范中亦采用此法^[7],如式(1)所示:

$$C_N = \frac{1.0}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \quad (1)$$

式中: σ'_{vo} 是以 100 kPa 为一个单位的参考基准,记为 $\sigma'_{vo} = 1$,以此类推。

粉细砂试样采集处常年地下水埋深 3~5 m,估算其上覆有效应力约为 200 kPa ($\sigma'_{vo} = 2$),按照式(1)进行修正,修正系数 C_N 为 0.707,则修正后的标贯数 $N_1 = 19.8 \times 0.707 = 14$ 。

对于砂土标贯击数与相对密度的统一关系,结合大量试验验证,国外学者通常按照式(2)进行估算,为室内试验制样提供依据。

$$D_r = \alpha \sqrt{N_1 + \Delta N_1} \quad (2)$$

式中:按粗砂 $\alpha = 12.5 \sim 13.2$ 、中砂 $\alpha = 13.3 \sim 13.9$ 、细砂 ($d < 0.075$ mm 含量小于 5%) $\alpha = 14.0 \sim 14.6$ 取值; ΔN_1 为 Seed^[6]提出的估算修正值,按表 2 选取。

表 2 Seed 提出的 ΔN_1 估计表

Table 2 Estimated values for ΔN_1 proposed by Seed

细粒($d < 0.075$)含量/%	10	25	50	75
ΔN_1	1	2	4	5

依照表 1 饱和粉细砂特性参数, α 取 14.0、

ΔN_1 取 1 是合适的。由式(1)、式(2)计算得出原状粉细砂的相对密度 D_r 为 0.54。动力测试试样按 0.50、0.54 和 0.60 三个相对密度制备,其对应的孔隙比及干密度如表 3 所示。

表 3 动力测试选取的粉细砂物性指标

Table 3 Physical indexes of fine sand specimens used in dynamic tests

试样指标	相对密度 D_r		
	0.5	0.54	0.6
孔隙比 e	0.879	0.854	0.804
干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.48	1.50	1.54

表 4 饱和和粉细砂动模量及动强度试验方案

Table 4 Test program for dynamic modulus and dynamic strength of the saturated fine sand

动模量			动强度			
试验工况		相对密度 D_r	试验内容			干密度/($g \cdot cm^{-3}$)
Kc	σ_3 /kPa		Kc	σ_3 /kPa	循环破坏次数	
1.5	200	0.50			10 次左右	
1.6	150、200、300	0.54	1.6	150、200、300	30 次左右	
-	200	0.60			100 次左右	

2 饱和粉细砂动模量及阻尼比特性

Hardin-Drnevich 模型假定动荷载作用下的应力-应变骨干曲线符合双曲线,可转换为动弹模量与应力应变的关系:

$$\frac{1}{E_d} = \frac{\epsilon_d}{\sigma_d} = a + b\epsilon_d \quad (3)$$

式中: a 、 b 为试验常数。绘制以动应变 ϵ_d 为横坐标、 $1/E_d$ 为纵坐标的关系图,模量倒数 $1/E_d$ 与动应变 ϵ_d 关系可近似用直线表示。同时,动弹模量与动剪模量满足:

$$G_d = E_d / 2 / (1 + \mu) \quad (4)$$

式中: μ 为泊松比,饱和粉细砂取 0.3。

最大动剪模量 G_{dmax} 与有效固结应力 σ'_m 的关系为

$$G_{dmax} = kP_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^n \quad (5)$$

式中: P_a 为大气压力; σ'_m 为平均有效固结应力, $\sigma'_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$; k 为直线在纵轴上的截距, n 为直线的斜率, k 和 n 都是试验常数。

图 1 展示了试样干密度为 $1.5 g/cm^3$ 时,不同围压下动应变与动剪模量倒数之间的关系曲线。不难看出,对于本文饱和粉细砂试样,采用 Hardin-Drnevich 假定的双曲线模型能够很好地拟合试验数据。

整理得到不同条件下饱和粉细砂最大动剪切如

动力试验在 GDS 动三轴试验机上进行,试样尺寸为 $\phi 39.1 mm \times H 80 mm$ 。鉴于在不同动荷载频率和波形条件下砂土动响应参数差别较大,为保证研究实用性,以土工试验规程 SL237-1999 为准(动荷载为 1 Hz 的正弦波)进行试验。动模量/阻尼比试验以及动强度液化试验设计见表 4。

试验过程中,采用水头饱和并结合反压饱和的方式,使试样孔隙水压力系数 B 值不小于 0.98 后施加偏压,并在应力应变及体变保持稳定后开始测试。

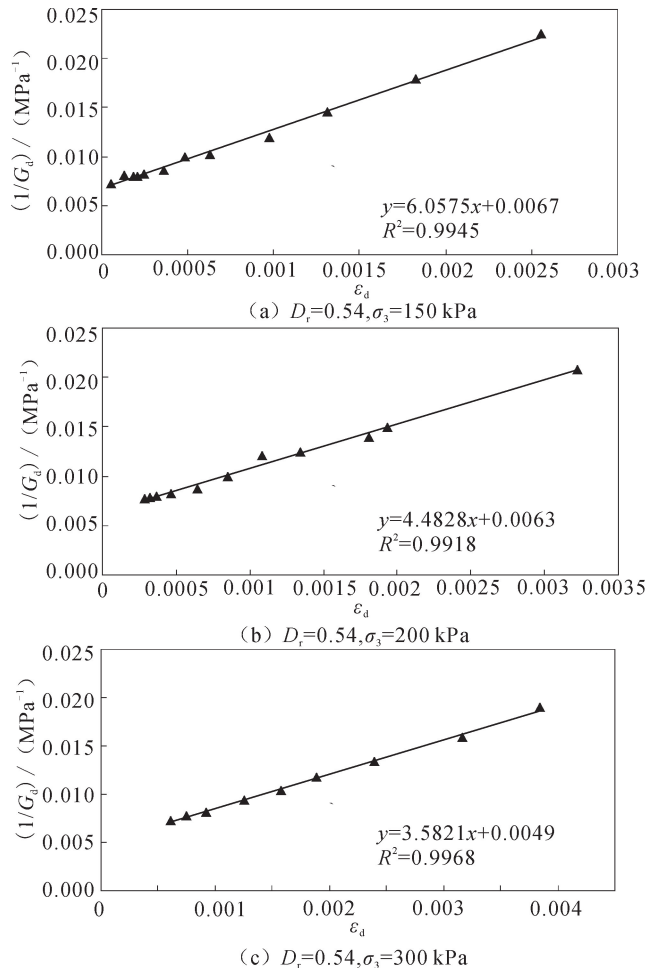


图 1 不同围压 $1/G_d$ 与轴应变 ϵ_d 实测数据及双曲线拟合
 Fig.1 Measured data of $1/G_d-\epsilon_d$ and the hyperbolic curve fitting under different confining pressures

表6所列。可以看出,在试样实际所处围压及密实度范围内,最大动剪模量随围压和密实度的增加而增加,且围压对动剪模量的敏感性更高,300 kPa围压下,试样最大动剪模量较200 kPa条件增加了近30%

表6 不同条件下试样最大动剪切模量

Table 6 Maximum dynamic shear modulus of specimens under different conditions

围压/kPa	相对密度 D_r	G_{max}/MPa
150	0.54	149.03
200	0.54	158.68
300	0.54	203.82
200	0.50	151.08
200	0.60	170.42

通过 Hardin 公式拟合得到动剪模量比 G_d/G_{dmax} 与动剪应变 γ_d 关系曲线以及阻尼比 λ_d 与动剪应变 γ_d 关系曲线。图2展示了不同密实度试

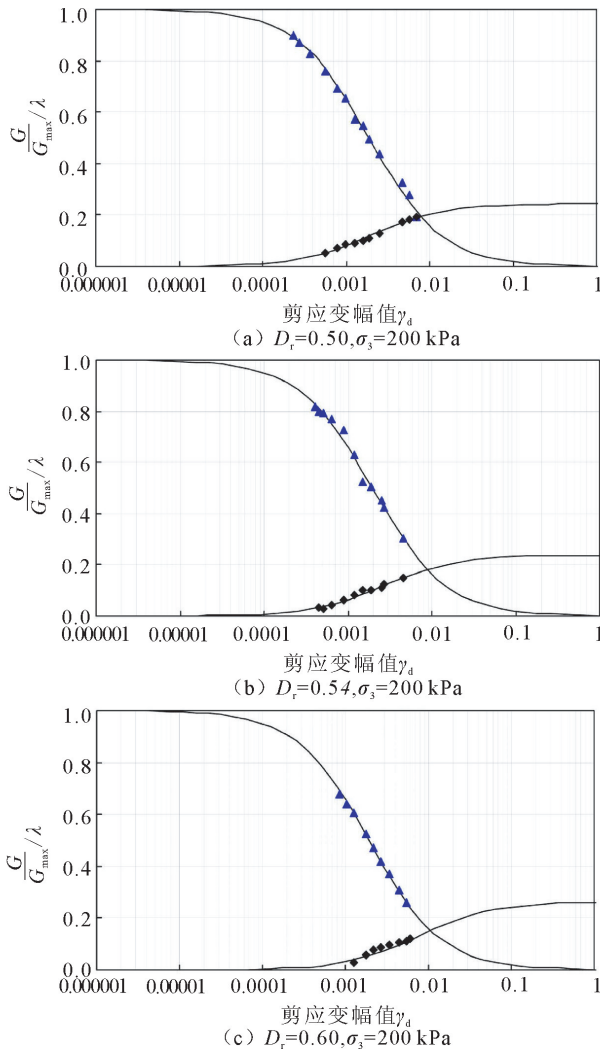


图2 动模量比及阻尼比与动剪应变关系曲线

Fig.2 Relation curves between dynamic modulus ratio (G/G_{max}), damping ratio (λ) and dynamic shear strain (γ_d)

样的试验拟合成果,可以看出,采用 Hardin 公式拟合试样动剪模量比及阻尼比与动应变的关系是合适的。

表7对各试样动剪应力比及阻尼比与动应变的关系进行了统计。可以看出:(1)在研究试样密实度范围内,不同围压下动剪模量比与动应变关系曲线近乎重合;(2)相同密实度下,围压越高,动剪模量比衰减越慢;(3)围压增大或密实度升高均会引起阻尼比的降低,1%应变对应的阻尼比分布在0.15~0.21之间。

3 试样的液化动强度特征分析

采用动剪应力比指标进行抗液化强度试验,其表达式为:

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_d}{2 \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right)} \quad (6)$$

图3为300 kPa围压下不同动剪应力比条件下振动孔压比与振次的关系。可以看出:(1)随着动剪应力比的增大,每一循环内孔压振幅迅速扩大;(2)在本文偏压固结条件下进行的抗液化强度试验,其

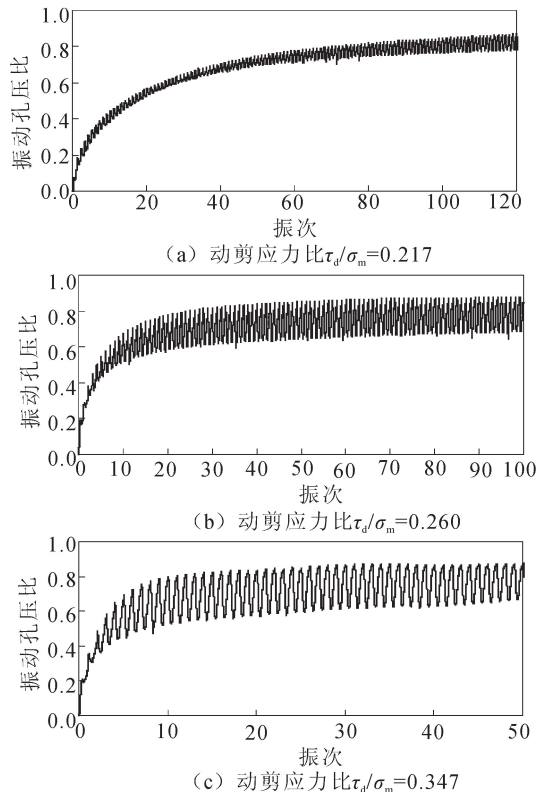


图3 振动孔压比与振次关系曲线($\sigma_3=300$ kPa)

Fig.3 Relation curves between dynamic pore pressure ratio and dynamic cycles ($\sigma_3=300$ kPa)

表 7 不同条件动模量比及阻尼比 λ 与动剪应变关系统计

Table 7 Relationship of dynamic modulus ratio (G/G_{max}), damping ratio (λ) and dynamic shear strain (γ_d)

固结比	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)	参数	围压/kPa	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}
1.6	1.5	G_d/G_{dmax}	150	0.994	0.939	0.608	0.134
			200	0.995	0.952	0.663	0.164
			300	0.996	0.958	0.696	0.187
		λ_d	150	0.001	0.012	0.083	0.211
			200	0.001	0.008	0.063	0.187
			300	0.001	0.007	0.056	0.167
	1.48	G_d/G_{dmax}	200	0.995	0.950	0.656	0.160
		λ_d	200	0.001	0.012	0.081	0.203
	1.54	G_d/G_{dmax}	200	0.995	0.950	0.657	0.161
		λ_d	200	0.000	0.003	0.031	0.150

振动孔压比在 0.8~0.9 之间即保持稳定而不再升高,与文献[8]中相关结论一致,可认为试样已进入液化状态;(3)动剪应力比由小到大其对应的特征振次分别为 10 次左右、30 次左右和 100 次左右,较好地满足了土工试验规程的试验质量要求。

参照土工试验规程(SL237-1999)整理得到动剪应力比与破坏振次之间的关系(图 4)。表 8 则对几个标准特征振次对应的动剪应力比进行了统计。可以看出:相同围压下,随特征振次的提升,所需动剪应力比显著下降,较大的动荷载条件下累积应变或振动孔压比能迅速达到试验终止条件;而相同特征振次下,随围压增加,所需动剪应力比也呈下降趋势。

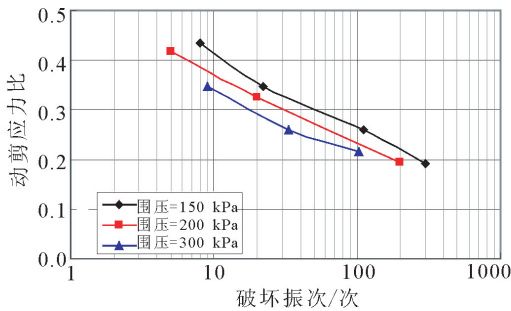


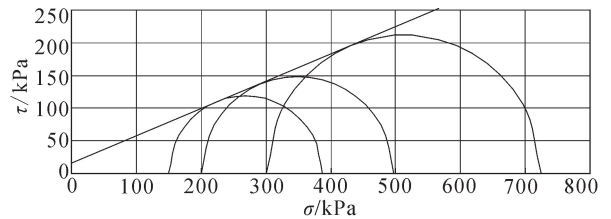
图 4 粉细砂动剪应力比(τ_d/σ_0)与破坏振次 $\lg N_f$ 关系
Fig.4 Relationship between dynamic shear stress ratio of fine sand and failure dynamic cycles ($\lg N_f$)

表 8 不同特征振次及围压下的动剪应力比
Table 8 Dynamic shear stress ratios with different dynamic cycles and confining pressures

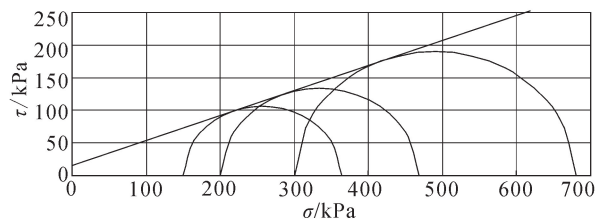
固结比	围压/kPa	特征振次/次		
		10	30	100
1.6	150	0.412	0.343	0.276
	200	0.373	0.308	0.242
	300	0.344	0.279	0.212

在此基础上,由总应力法整理得到不同特征振

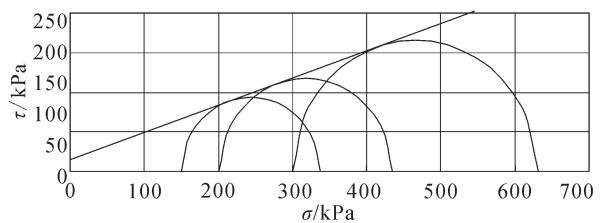
次下动强度破坏包线(图 5),并由此得到不同特征振次对应的动强度指标(表 9),分析可知:



(a) 特征振次=10次



(b) 特征振次=30次



(c) 特征振次=100次

图 5 不同特征振次下试样动强度破坏包线
Fig.5 Dynamic strength failure envelopes of specimens with different dynamic cycles

表 9 由总应力法得到的饱和粉细砂动强度参数
Table 9 Dynamic strength parameters of saturated fine sand obtained by total stress method

固结比	特征振次/次					
	10		30		100	
	c_d/kPa	$\varphi_d/(^\circ)$	c_d/kPa	$\varphi_d/(^\circ)$	c_d/kPa	$\varphi_d/(^\circ)$
1.6	16.2	22.66	15.8	20.95	15.4	18.92

(1) 利用不同围压下莫尔圆公切线可以很好地拟合并得到试样在相应特征振次下的动强度指标;

(2) 由总应力法求取的动内摩擦角与黏聚力均随设定特征振次的增加而下降;

(3) 此时饱和粉细砂内聚力并不约等于 0, 表明动力作用下该试样具有一定的黏滞性。

4 结论

本文以荆江大堤江陵段下伏饱和粉细砂为研究对象, 参照原位试验成果, 合理估算试样固结应力比及实际赋存环境相应的围压范围, 对试样动模量、阻尼比及总应力动强度进行系统测试, 得到以下结论:

(1) 试样应力-应变骨干曲线与 Hardin-Drnevich 双曲线模型假设高度吻合, Hardin 公式也可很好地拟合动模量/阻尼比与动应变的关系, 在研究试样密实度范围内, 求出了相应条件下试样的最大动剪切模量, 该指标随围压和密实度的增加而增加, 但围压对动剪模量的敏感性更高。

(2) 相同围压下动剪模量比与动应变关系曲线近乎重合, 而在相同密实度下, 围压越高动剪模量比衰减越慢; 另外, 围压增大或密实度升高均会引起阻尼比的降低, 1% 应变对应的阻尼比分布在 0.15~0.21 之间。

(3) 在偏压状态下以累积轴向应变 5% 作为液化判别标准的抗液化强度试验中, 随特征振次及测试围压的增大, 液化动剪应力比相应减小, 试样振动孔压比最高仅能达到 0.8~0.9。

(4) 由总应力法求取的动内摩擦角与黏聚力均随设定特征振次的增加而下降, 且内聚力并非约等于 0, 表明动力作用下该试样具有一定的黏滞性。

本研究充分考虑试样的实际赋存状态, 相应测试参数及判别标准也遵循土工试验规程, 研究成果可供实际工程参考。

参考文献 (References)

[1] 黄雨, 八崎厚, 杉户真太. 强震持时对流堤防液化特性的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 1313-1318.
HUANG Yu, YASHIMA Atsushi, SUGITO Masata. Effects of Strong Ground Motion Duration on Liquefaction Behavior of

River Levee[J]. Journal of Tongji University: Natural Sciences, 2009, 37(10): 1313-1318. (in Chinese)

[2] 王丽艳, 周顺新. 液化地基中堤防地震残余变形的动有效应力分析[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2011, 25(3): 209-213.

WANG Li-yan, ZHOU Shun-xin. Effective Stress Study on the Seismic Residual Deformations of Dike in Liquefied Foundation[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 25(3): 209-213. (in Chinese)

[3] 陈国兴, 刘雪珠. 南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 23(8): 1403-1410.

CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Testing Study on Ratio of Dynamic Shear Moduli and Ratio of Damping for Recently Deposited Soils in Nanjing and Its Neighboring Areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 23(8): 1403-1410. (in Chinese)

[4] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 79-82.

CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Study on Dynamic Pore Water Pressure in Silty Clay Interbedded With Fine Sand of Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 79-82. (in Chinese)

[5] 马德翠, 单红仙, 周其健. 黄河三角洲粉质土的动模量和阻尼比试验研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(5): 353-360.

MA De-cui, SHAN Hong-xian, ZHOU Qi-jian. Experimental Study on Shear Modulus and Damping Ratio Characteristics of Silty Soil in the Delta of Yellow River[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(5): 353-360. (in Chinese)

[6] Seed H B, Wong R T, Idriss I M, et al. Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, (11): 1016-1032.

[7] 王士杰, 何满潮, 张吉占. 用归一化标准贯入 N 值估算砂土的相对密度[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 682-685.

WANG Shi-jie, HE Man-chao, ZHANG Ji-zhan. Estimation of Relative Density of Sandy Soil by Normalized SPT-N Blow Count[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 682-685. (in Chinese)

[8] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

CHEN Guo-xing. Geotechnical Earthquake Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)