

水泥固化漳州滨海风积砂液化特征试验研究*

涂兵雄¹, 胡舜娥², 刘士雨¹, 蔡燕燕¹, 俞缙¹

(1. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 泉州信息工程学院 土木工程学院, 福建 泉州 362000)

摘要:利用 GDS 动三轴仪对水泥固化漳州滨海风积砂进行液化强度试验, 分析水泥固化漳州滨海风积砂在不同水泥剂量、不同龄期、不同基准应变和不同等幅循环应变幅值下的液化特性。试验结果表明: 砂样的抗液化能力随水泥掺量的增加近似呈线性提高; 随龄期增长而增强, 但基准应变越高, 增强越弱; 随循环应变幅值的减小而显著增强; 基准应变对砂样抗液化能力的影响受水泥掺量的制约。孔压半对数模型可以较好的反应水泥固化漳州滨海风积砂土的孔压发展规律; 存在一个临界基准应变, 使得抗液化能力随水泥剂量的增加得到最大化提高。

关键词:漳州滨海风积砂土; 水泥固化; 动三轴试验; 液化强度; 孔压

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0402-07

Experimental Study on Liquefaction Characteristics of Cement Solidified Zhangzhou Coastal Aeolian Sands

Tu Bingxiong¹, Hu Shune², Liu Shiyu¹, Cai Yanyan¹, Yu Jin¹

(1. Fujian Engineering Technology Research Center for Tunnel and Underground Space, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, P.R.China; 2. Civil Engineering Department, Quanzhou University of Information Engineering, Quanzhou, Fujian 362000, P.R.China)

Abstract: A series of liquefaction strength tests were carried out by the GDS dynamic triaxial apparatus, in order to study the dynamic performance of cement solidified Zhangzhou coastal aeolian sands with different cement dosage, different ages of hardening, different datum strain and different cyclic strain amplitude. Experimental results show that liquefaction resistance of sample approximate linearly with the increase of the dosage of cement; it increases along with the age growth. And the higher the reference strain is, the weaker the enhance is; it increases with the induction of cyclic strain amplitude; benchmark strain effect on the liquefaction resistance ability of the sample is the restriction of the cement. Semilog model of pore pressure can better reflect cement solidification of Zhangzhou coastal aeolian sandy soil pore pressure law of development. Existed critical benchmark strain could make the enhancement of liquefaction resistance maximized with cement dosage increase.

Keywords: Zhangzhou coastal aeolian sands; cement solidified; dynamic triaxial tests; liquefaction strength; pore water pressure

* 收稿日期: 2018-10-23(修改稿)

作者简介: 涂兵雄(1984-), 男, 湖北人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事岩土力学与地基基础方面的教学与科研工作。E-mail: tubingxiong@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51874144, 51774147, 51679093, 51408242); 福建省自然科学基金(2017J01094); 教育部海外留学归国人员科研基金

0 引言

水泥固化技术是通过水泥的水化、凝固作用使砂土的土工特性得到改善的砂土改良技术,近年来,被广泛用于建筑地基处理、路基改良和加固、国防等各类工程中。研究表明,在静荷载如建筑荷载等作用下,水泥的胶结作用对水泥固化砂土的变形和静力学特性有显著的影响^[1-8]。Wang 等^[1]通过三轴试验,得出了水泥剂量对水泥固化砂土的内摩擦角、黏聚力等宏观力学参数有显著影响^[1]。蔡燕燕等^[2]通过三轴固结排水试验研究了不同水泥掺量及不同有效围压下,水泥固化滨海风积砂的力学特性。试验表明,水泥掺量对固化风积砂的黏结破坏数、配位数等有显著影响。Consoli 等^[3-6]对水泥胶结砂进行了大量静力学试验,得到以孔隙率、养护时间、胶凝掺量为参数的无侧向抗压强度表达式。然而在较多情况下,土体在地震、车辆和机械振动等动荷载下产生动应力且变形破坏,甚至发生液化。杨广庆^[9]对水泥土进行列车重复荷载作用下的三轴试验,论证了水泥土作为高速铁路路基基层填料的可能性。孙树林等^[10]对掺入脱硫灰和石灰来改良的粉砂土进行动三轴试验。研究发现,常规砂土可液化、混合土样不会液化。张向东等^[11]对粉煤灰、石灰改良土进行动强度、动弹模试验,定性给出石灰改良土对动载作用下路基强度参数的变化规律。王天亮等^[12]对冻融作用下不同掺和率的水泥及石灰改良土进行了动三轴试验。研究发现,反复冻融作用下水泥土的改良效果要优于石灰土,相对于素土的力学性能均有明显的改善。

风积砂作为一种特殊不良地质体,现阶段也主要采用水泥作为固化剂^[13-14],滨海地区风积砂土天然含水量高、结构松散、自稳能力差,特别是在循环动荷载作用下更容易发生振动液化现象,其水泥固化后的抗液化能力尚未见研究报道。本文以漳州沿海大通道(滨海一级疏港公路)漳浦段试验段工程为依托,利用 GDS 动三轴系统,对水泥固化漳州滨海风积砂进行固结不排水试验和液化强度试验,分析不同水泥掺量、不同龄期、不同等幅循环应变幅值下水泥固化漳州滨海风积砂的液化特性。

1 试验介绍

1.1 试样材料

试验砂取自福建漳州沿海大通道地基场地内。试验前除杂、烘干及冷却待用,漳浦风积砂的物理参数见表 1。不均匀系数 $C_u = 1.59 < 5$, 曲率系数 $C_c = 0.96 < 1$, 可知砂的级配极差,这与级配良好的福建标准砂差异很大。风积砂在不同压实度下的直接剪切试验结果见表 2, 可得:①砂的黏聚力很小,一般在 15 kPa 以内,波动性较大。②内摩擦角在 $29^\circ \sim 40^\circ$ 之间变化,在干燥状态与湿润状态之间相差不大。其主要原因是:砂样抗剪强度的形成因素除了砂颗粒间相互滑动摩擦产生的阻力外,更为重要的是砂颗粒间的镶嵌作用产生的阻力,其大小受砂颗粒的大小、表面粗糙度和密实度等因素共同影响决定,受含水率影响不大,因此干砂与湿砂的内摩擦角相差不大。③随着压实度的提高,内摩擦角有一定程度的提高,内摩擦角与压实度大致呈正相关关系。

表 1 风积砂的物理参数

Table 1 Physical parameters of coastal aeolian sand

最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	比重 G_s	极限孔隙比		颗粒粒径/mm			不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
		e_{max}	e_{min}	d_{10}	d_{30}	d_{60}		
1.69	2.57	0.81	0.52	0.17	0.21	0.27	1.59	0.96

表 2 不同压实度下砂样直剪试验结果

Table 2 Results of direct shear test under different compaction degree

压实度/%	96			94			92		
含水率/%	0	12	15	0	10.3	14.7	0	10.2	14.5
内摩擦角/ $^\circ$	31.74	39.28	37.77	34.37	32.60	32.85	29.50	30.56	31.33
黏聚力/kPa	7.38	0	1.64	0	11.48	5.74	2.87	11.89	0

1.2 试验方案

试验仪器采用 GDS 动三轴仪,水泥采用 P.O325,选取 4 种水泥剂量(水泥与干砂质量的百分比)分别为 0%(纯砂)、2%、4%、6%,加水率(水占水泥和干砂总质量的百分比)为 15%,控制相对密实度为 90%。均匀混合拌合物后,采用机械搅拌,且分 5 层击实,每层按预定的干密度击实到要求的高度,各层表面刮毛以便上下面接触良好,试样成型后静置 24 h 再用保鲜袋封装于养护箱养护,养护龄期为 7 d 和 28 d。试样尺寸 $D=50\text{ mm}$ 、 $H=100\text{ mm}$ 。

试样采用通 CO_2 、水头饱和及反压饱和三者相结合来提高饱和度。反压饱和是目前最有效的饱和手段之一,其原理是在高压条件下使试样中的空气压缩溶解在孔隙水中,从而提高试样的饱和度。理论上说,反压取值越大,试样的饱和度越大,但是考虑到仪器的轴力传感器量程,综合以往的研究经验,反压饱和的反压、围压取值分别为 300 kPa 和 400 kPa。为了减小对试样的扰动,反压和围压保持同速率线性增长到预定值。饱和完成后进行 B 值检测,B 值达到 0.96 以上方可视为试样饱和,B 值没达到要求的需要进行二次饱和直到 B 值达到要求。然后进行等向固结,固结反压、围压也分别取值 300 kPa 和 400 kPa。加载时采用应变控制加载方式,试验荷载参数见表 3,荷载施加路径如图 1,先线性施加静载至基准应变模拟砂样在外荷载作用下的初始变形,再施加等幅循环动载模拟动荷载,动荷载施加频率为 1 Hz。为了便于表述,本文用 n 表示水泥剂量, T 表示龄期, ε_{ov} 表示基准应变, ε_{dv} 表示循环应变幅值, N_f 动荷载振次, u_d 表示动孔隙压力, σ'_0 表示固结围压。

表 3 动三轴试验荷载参数

Table 3 Loading parameters in dynamic triaxial tests				
编号	水泥剂量 $n/\%$	龄期 T/d	基准应变 $\varepsilon_{ov}/\%$	循环应变幅 值 $\varepsilon_{dv}/\%$
M-1	/	/	3	0.5
M-2	/	/	6	0.5
M-3	/	/	9	0.5
M-4	/	/	6	0.25
M-5	2	7	3	0.5
M-6	2	7	6	0.5

续表3

编号	水泥剂量 $n/\%$	龄期 T/d	基准应变 $\varepsilon_{ov}/\%$	循环应变幅 值 $\varepsilon_{dv}/\%$
M-7	2	7	9	0.5
M-8	4	7	3	0.5
M-9	4	7	6	0.5
M-10	4	7	9	0.5
M-11	6	7	3	0.5
M-12	6	7	6	0.5
M-13	6	7	9	0.5
M-14	6	7	6	0.25
M-15	2	28	3	0.5
M-16	2	28	6	0.5
M-17	2	28	9	0.5
M-18	4	28	3	0.5
M-19	4	28	6	0.5
M-20	4	28	9	0.5
M-21	6	28	3	0.5
M-22	6	28	6	0.5
M-23	6	28	9	0.5
M-24	6	28	6	0.25

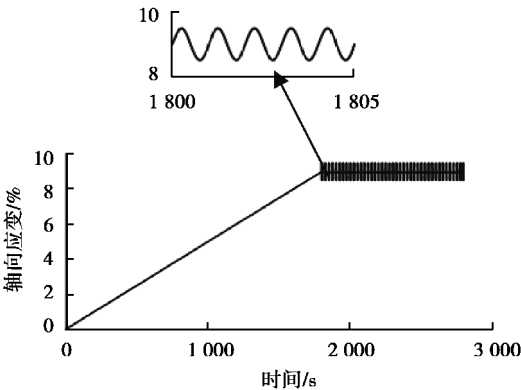


图 1 加载路径 ($\varepsilon_{ov}=9\%$, $\varepsilon_{dv}=0.25\%$)
Fig. 1 Loading path ($\varepsilon_{ov}=9\%$, $\varepsilon_{dv}=0.25\%$)

2 试验结果及分析

目前常用的初始液化破坏标准为:动孔隙水压力 u_d 达到固结围压 σ'_0 或双幅轴向应变达到 5%, 但是本文试验中部分孔压达不到围压 400 kPa, 却基本能稳定在 398 kPa 多, 孔压比(孔隙水压力与围压的比值)超 0.995, 因此本文以动孔隙水压力首次达到 398 kPa 为初始液化破坏标准。

2.1 孔压发展规律

整理试验数据,取每个振次刚要振动时的动孔压值 u_d 及其振次 N , 得到 u_d-N 曲线。取典型试样(如试样 M-3、M-7、M-10 和 M-13)的孔压曲线如图 2 所示,从图中可以看出,施加静载后,由于砂样先剪缩后剪胀,使得施加动载前孔隙水压力为负孔压,试样在受等幅循环应变作用后,试样中的孔隙水压力随振次的发展近似呈双直线分布规律,可以用 2 个阶段进行描述:

(1)孔压骤增发展阶段:施加循环荷载后,砂样有产生较大体变趋势,由于孔隙水无法排出,体变得不到实现,孔隙水受压导致孔压骤增,且孔隙水压力随振次近似呈线性增长,至孔压比约 0.75~0.90 止。

(2)孔压缓增液化阶段:此阶段为高孔压比缓慢发展阶段,孔隙水压力水平很高,但孔隙水压力随振次的增长十分缓慢,近似呈线性规律,直至砂样液化破坏。

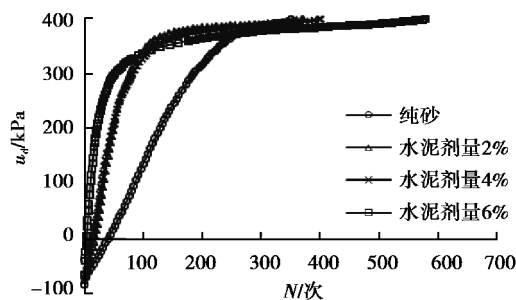


图 2 $T=7$ d, $\varepsilon_{ov}=9\%$, $\varepsilon_{dv}=0.5\%$ 时
不同水泥剂量的孔压曲线

Fig. 2 Pore pressure-cycle number curves of various
cement dosage with $T=7$ d, $\varepsilon_{ov}=9\%$
and $\varepsilon_{dv}=0.5\%$

2.2 水泥剂量的影响

选取试样 M-3、M-7、M-10 和 M-13 对比

分析水泥掺量对砂样抗液化性能的影响,如图 2 所示。从图中可以看出,在孔压陡增阶段,水泥掺量越高,孔压随振次增加的速度越快;但是,此阶段的孔压最大值随水泥掺量的增加而减小。在孔压缓增液化阶段,孔压比处于较高水平,水泥掺量越高,孔隙水压力随振次增加的越缓慢,初始液化所需动载振次越大,砂样抗液化能力越强。

主要原因可能是因为掺入水泥后,水泥水化生成凝胶体部分吸附在砂颗粒表面,部分填充了砂颗粒间的缝隙,把局部连成一体,使砂颗粒间的大孔隙减少,微孔隙增加,孔隙率降低,且水泥掺量越多,孔隙率降低越多。施加等幅循环荷载后,由于掺有水泥的砂样孔隙率低,使得孔隙水压力上升速度大大高于纯砂样。而由于水泥增强了砂样的黏聚力和强度,使得后期孔压增长变得缓慢。

2.3 基准应变的影响

将试样 M-8、M-9 和 M-10 作对比,其结果如图 3 所示。可知,在龄期、水泥剂量和循环应变幅值都相同情况下,基准应变越大,受等幅循环荷载作用时孔隙水压力在线性骤增阶段发展得越缓慢,且在初始液化时需振次越高,砂样抗液化能力有所增强,但抗液化能力增加的幅度随基准应变的增加呈较弱趋势。主要原因是基准应变采用的是施加静载,基准应变越大,砂样剪胀越显著,初始负孔隙水压力越大;另外,基准应变越大,试样损伤破坏程度越为严重,内部裂缝发展越多,孔隙率增大,试样的渗透性随着孔隙率的增大而有所增大。因此,基准应变越大,孔隙水压力增加越缓慢,砂样的抗液化能力得到增强。

2.4 龄期的影响

对比试样 M-9 和 M-19,如图 4 所示,水泥剂量、基准应变和循环应变幅值都相同时,相比龄期 7 天试样,龄期 28 天的试样孔压在孔压骤增阶段增长较快,这可能是由于龄期越长,水泥水化越充分,强度越高,且砂样内部孔隙填充越密实,在动荷载作用下,孔隙水压力随振次增幅越显著。但在孔压缓增液化阶段基本一致,掺入水泥的龄期对砂样的最终抗液化能力影响不大。

2.5 应变幅值的影响

为研究循环应变幅值 0.5% 和 0.25% 对砂样液

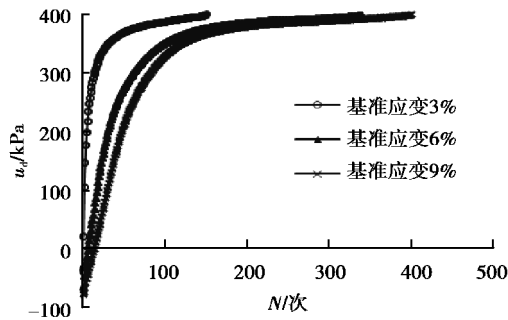


图 3 $T=7$ d, $n=4\%$, $\varepsilon_{dv}=0.5\%$ 时不同
基准应变的孔压曲线

Fig. 3 Pore pressure-cycle number curves of various datum
with $T=7$ d, $n=4\%$ and $\varepsilon_{dv}=0.5\%$

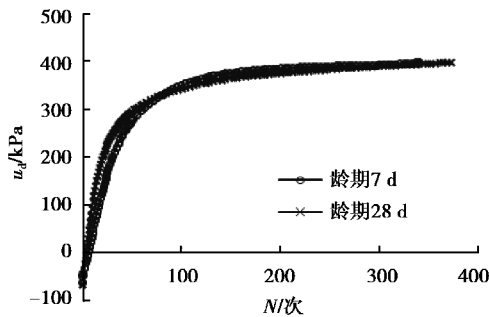


图 4 $n=4\%$, $\varepsilon_{ov}=6\%$, $\varepsilon_{dv}=0.5\%$ 时不同
龄期的孔压曲线

Fig. 4 Pore pressure-cycle number curves of various age
with $n=4\%$, $\varepsilon_{ov}=6\%$ and $\varepsilon_{dv}=0.5\%$

化性能的影响,挑选砂样 M-2 和 M-4,液化时振次分别为 130 次和 7870 次;砂样 M-12 和 M-14 液化时振次分别为 500 次和 9755 次;砂样 M-22 和 M-24 液化时振次分别为 565 次和 10005 次。可以明显看出,在相同条件下,采取循环小应变幅值动载时,砂样液化时所需振动循环次数大大增加,抗液化能力显著提升。主要原因是在小应变作用下,砂样变形主要是弹性变形,由于弹性变形引起的孔隙水压力是可恢复的,导致孔隙水压力发展缓慢,需显著增加振次才能使孔隙水压力达到初始有效应力液化,从而使得砂样在小应变时的抗液化能力显著提升。

3 抗液化能力的评价

为了定量评价砂样抗液化能力增强效果,采用开始液化的振次 N_l 来替代动应力的大小,同时引入抗液化能力增强系数,并定义该增强系数为:

$$\alpha = \frac{N_{f,n} - N_{f,0}}{N_{f,0}} \quad (1)$$

式中: α 为增强系数, $N_{f,n}$ 为水泥掺量为 n 的初始液化振次; $N_{f,0}$ 为相同加载条件的纯砂样的初始液化振次。

不同水泥掺量对砂样抗液化能力的影响如图 5 所示,图中图例 M-7-3 表示龄期 7 d 和基准应变 3% 的试验,其他依次类推。可明显看出:

(1) 在龄期和基准应变相同的条件下,砂样的抗液化能力随水泥的掺量的增加而提高,近似呈线性增长规律;且该提高趋势整体随基准应变的增加呈先增大后减小规律。在基准应变为 6% 时,水泥掺量对砂样的抗液化能力提高最为显著。

(2) 在水泥掺量和基准应变相同的条件下,砂样的抗液化能力随龄期增长而增强,但这种增强作用随基准应变的增加而减弱;当基准应变为 3% 时,龄期对抗液化能力的增强效果比较明显;而当基准应变为 9% 时,龄期对抗液化能力的增强可忽略不计。

(3) 相同龄期条件下,水泥掺量为 2% 时,抗液化能力随基准应变的增加而减弱;水泥掺量为 4% 和 6% 时,抗液化能力随基准应变的增加呈先增强后减弱的趋势。

(4) 根据上述分析,可以判定在基准应变 3% 和 9% 之间,必定存在一个临界基准应变,在临界基准应变时,随水泥掺量的增加,砂样的抗液化能力提高最为显著。

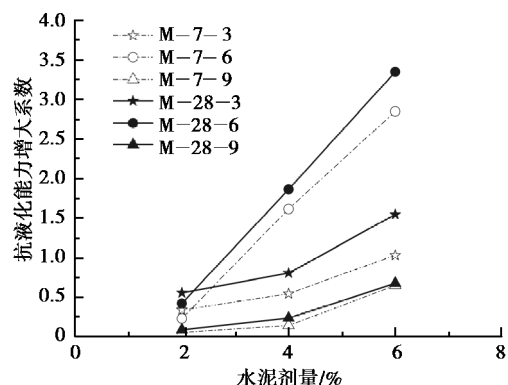


图 5 水泥剂量对抗液化能力的影响

Fig. 5 Effects of cement amount on
capacity of anti-liquefaction

4 孔压模型

动孔隙水压力增长,有效应力降低,是土体在振动作用下强度下降和变形发展的根本原因。因此,研究孔压发展模型对进行土体动力分析具有重要的意义。本文根据试验结果的数据分析,对孔压随振次的变化规律采用半对数模型进行描述,该模型具有较好的线性规律,其具体表达式为:

$$\frac{u_d}{\sigma'_0} = a \ln\left(\frac{N}{N_f}\right) + b \tag{2}$$

式中: u_d 是振动次数 N 对应的瞬时孔压; σ'_0 是固结围压; N_f 是试样初始液化时的振动次数; a 、 b 是试验常数。

图 6 以试样 M-9 为例,对以 $\ln(N/N_f)$ 为横坐标, u_d/σ'_0 为纵坐标的数据点进行线性拟合,此时 a 即为直线斜率, b 为直线截距,从而得到 $a = 0.225$, $b = 1.072$, $R^2 = 0.922$ 。半对数模型拟合简单,效果较好。用对数模型对所有试样的试验孔压曲线进行拟合,得到各自的模型参数 a 、 b 以及皮氏积矩相关系数 R ,将液化振次 N_f ,模型参数 a 、 b ,相关系数 R 列于表 4。

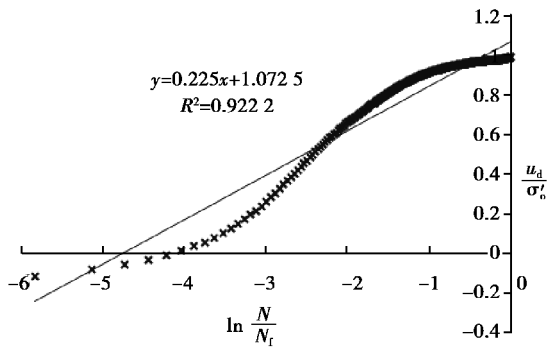


图 6 试样 M-9 $\frac{u_d}{\sigma'_0} - \ln \frac{N}{N_f}$ 关系

Fig. 6 $\frac{u_d}{\sigma'_0} - \ln \frac{N}{N_f}$ curve of sample M-9

表 4 各试样的液化振次及其模型拟合参数
Table 4 Vibration liquefaction time of each sample and parameters of model fitting

编号	$N_f/(次)$	a	b	R
M-1	97	0.17	1.06	0.98
M-2	130	0.24	1.06	0.95

续表4

编号	$N_f/(次)$	a	b	R
M-3	350	0.32	0.92	0.90
M-4	7870	0.18	1.00	0.70
M-5	130	0.1	1.03	0.95
M-6	160	0.2	1.04	0.94
M-7	370	0.26	1.08	0.93
M-8	150	0.12	1.02	0.97
M-9	340	0.2	1.05	0.94
M-10	400	0.24	1.06	0.93
M-11	197	0.13	1.02	0.98
M-12	500	0.15	1.05	0.92
M-13	578	0.14	1.03	0.94
M-14	9755	0.12	0.96	0.97
M-15	151	0.11	1.02	0.94
M-16	185	0.20	1.07	0.93
M-17	381	0.26	1.08	0.93
M-18	175	0.12	1.02	0.98
M-19	372	0.17	1.04	0.96
M-20	433	0.278	1.08	0.94
M-21	247	0.13	1.02	0.98
M-22	565	0.14	1.02	0.97
M-23	587	0.15	1.01	0.96
M-24	10005	0.13	0.95	0.97

5 结论

(1)砂样的抗液化能力随水泥的掺量的增加近似呈线性提高;随龄期增长而增强,且基准应变越高,增强越弱;随循环应变幅值的减小而显著增强;基准应变对砂样抗液化能力的影响受水泥掺量的制约。

(2)采用试验孔压发展的半对数模型,拟合结果较好,且能简单便捷地描述试验孔压的发展

趋势。

(3)存在一个临界基准应变,在临界基准应变时,增加相同的水泥掺量,可使砂样的抗液化能力得到最大提高。

参考文献(References)

- [1] Wang Y H, Leung S C. Characterization of cemented sands by experimental and numerical investigations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(7): 992-1004.
- [2] 蔡燕燕, 江浩川, 俞缙, 等. 水泥固化滨海风积砂力学特性试验及细观数值仿真[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1973-1980. (Cai Yanyan, Jiang Haochuan, Yu Jin, et al. Experimental study of mechanical property and mesoscopic numerical simulation of cement solidified coastal sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 1973-1980. (in Chinese)).
- [3] Consoli N C, Foppa D, Fesugato L, et al. Keyparameters dictating for strength control of artificially cemented soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(2): 197-205.
- [4] Consoli N C, Cruz R C, Floss M F. Variablescontrolling strength of artificially cemented soil; Influence of curing time [J]. Materials in Civil Engineering, 2011, 136(5): 692-696.
- [5] Consoli N C, Cruz R C, Floss M F, et al. Parameters controlling tensile and compressive strengthof artificially cemented soil [J]. Journal of Geotechnicaland Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(5): 759-763.
- [6] Consoli N C, Rosa A D, Corte M B, et al. Porosity-cement ratio controlling strength of artificiallycemented clays [J]. Materials in Civil Engineering, 2011, 23(8): 1249-1254.
- [7] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473-477. (Li Jianjun, Liang Renwang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 473-477. (in Chinese)).
- [8] 王军, 丁光亚, 潘林有, 等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1407-1412. (Wang Jun, Ding Guangya, Pan Linyou, et al. Study of mechanics behavior and constitutive model of cemented soil under static triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1407-1412. (in Chinese)).
- [9] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1156-1160. (Yang Guangqing. Study of dynamic performance of cement-improved soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1156-1160. (in Chinese)).
- [10] 孙树林. 固废改良土及其环境影响的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (Chen Shulin. Experiment research on improved solid waste soil and environmental impact [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)).
- [11] 张向东, 曹启坤, 潘宇. 二灰改良土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2560-2564. (Zhang Xiangdong, Cao Qikun, Pan Yu. Experiment research of lime-fly ash soil's dynamics characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2560-2564. (in Chinese)).
- [12] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1733-1737. (Wang Tianliang, Liu Jiankun, Tian Yahu. Dynamic properties of cement- and lime-improved soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1733-1737. (in Chinese)).
- [13] 李德超. 水泥加固风积沙路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2005, 2(1): 24-27. (Li Dechao. Study on road performance of cement stabilized Aeolian sand [J]. Technology of Highway and Transport, 2005, 2(1): 24-27. (in Chinese)).
- [14] 杨廷玉, 周宇, 赵莹莹, 等. 水泥固化土强度特性试验研究[J]. 黑龙江工程学院学报(自然科学版), 2012, 26(3): 6-9. (Yang Tinyu, Zhou Yu, Zhao Yingying, et al. Experimental study on strength characteristics of cement solidification soil [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(3): 6-9. (in Chinese)).