

DOI: 10.11779/CJGE2016S2009

水泥胶凝砂土动力特性研究

韩华强^{1, 2, 3}, 陈生水^{1, 2, 3}, 傅 华^{1, 2, 3}, 郑澄锋^{1, 2, 3}, 凌 华^{1, 2, 3}, 石北啸^{1, 2, 3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘 要: 通过室内动三轴试验研究了砂土与水泥胶凝砂土在不同应力条件下的动力变形特性及抗液化特性, 结果表明: 胶凝材料的掺入显著提高了砂土在动荷载作用下抵抗变形的能力, 在较低水泥掺加量条件下, 胶凝砂土中砂土的动力特性仍占据主导地位, 其动力特性仍可用沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型来模拟; 胶凝砂土的动模量比砂土大 3 倍以上, 而抗液化动剪应力则为砂土的 2 倍以上, 但初始变形量及累计动残余变形量值均较砂土大幅降低; 胶凝作用对低应力状态更为敏感, 应力水平越低, 胶凝作用对砂土抵抗动力变形能力的提高越显著, 随着胶凝材料掺入, 浅层砂土已很难发生地震液化, 深层砂土的液化破坏主要为变形破坏, 但破坏时也累积了较大的动孔隙水压力。

关键词: 水泥胶凝砂土; 动三轴试验; 动力特性

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)S2 - 0054 - 07

作者简介: 韩华强 (1978 -), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程基本理论和应用研究。E-mail: hqhan@nhri.cn。

Experimental study on dynamic properties of cemented sand

HAN Hua-qiang^{1, 2, 3}, CHEN Sheng-shui^{1, 2, 3}, FU Hua^{1, 2, 3}, ZHENG Cheng-feng^{1, 2, 3}, LING Hua^{1, 2, 3}, SHI Bei-xiao^{1, 2, 3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic

Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: The dynamic properties and anti-liquefaction characteristics of sands and cemented sand (CS) are comparatively studied by using lab dynamic triaxial shear tests. It is shown that the capability of sand to resist deformation under dynamic load is significantly improved by adding cementing materials. Under lower adding of cementing materials, the dynamic properties of sands still play a leading role in CS, and they can be calculated using the dynamic constitutive model proposed by Zhujiang Shen. The dynamic modulus of CS is increased by more than 3 times and the anti-liquefaction dynamic shear stress by over 2 times than those of sand, while the initial deformation and the cumulative dynamic permanent deformation significantly decrease. Compared with high confining pressure and consolidation stress, the cemented action is more sensitive to lower stress state. The lower the stress state, the more obvious the effect of the cemented action to improve the capability of sand to resist deformation under dynamic load. With the adding of cementing materials, earthquake liquefaction of the shallow sand hardly occurs, and the liquefaction failure of deep sand is mainly deformation one with more cumulative dynamic pore water pressure.

Key words: cemented sand; dynamic triaxial test; dynamic property

0 前 言

水泥胶凝砂土是水泥浆体或水泥干粉与砂土通过渗透、搅拌、劈裂、压实等方式形成的混合物, 使水泥颗粒填充到砂土的孔隙中去, 从而达到改变砂土物理力学性能、提高工程应用性能的目的^[1]。美国于 1940 年代制定了水泥胶凝土体的相关规范与试验标准, 相较于美国, 日本在此方面虽然起步稍晚, 但是在 1970 年代以后也进行了大量试验研究与应用^[2-4]。我国于 1970 年代开始水泥胶凝土体的研究, 在水泥胶凝土体

的静力学特性以及微细观结构等方面取得了一系列重要研究成果^[5-11]。

我国是一个地震多发的国家, 在地震等周期性动荷载作用下, 饱和砂土极易液化, 从而造成饱和砂土地基失效, 对建筑物或其它地面设施造成损坏^[12]。目

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (91215301); 国家自然科学基金重点项目 (51539006); 国家自然科学基金青年基金项目 (51309161)

收稿日期: 2016 - 05 - 19

前, 胶凝砂土在饱和砂土地基抗液化处理中已得到成功应用, 其加固处理效果也已得到物理模型试验验证^[13-15]。胶凝改良砂土的力学性能主要体现在水泥的挤密与胶结作用, 但需要指出的是, 迄今为止针对胶凝砂土在循环荷载作用下应力变形特性和抗液化特性变化规律及其影响因素的试验研究工作开展得较少^[16]。因此, 本文利用 GDS 动三轴试验仪进行了多组砂土与胶凝砂土在不同应力条件下的动力变形特性及抗液化特性的比较试验, 以研究胶凝作用对循环荷载作用下砂土应力变形特性和抗液化特性变化规律的影响。

1 试验方案及试验过程

1.1 试样制备

试样尺寸均为 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 纯砂土制样密度为 1.60 g/cm^3 , 其中砂的级配曲线如图 1 所示。

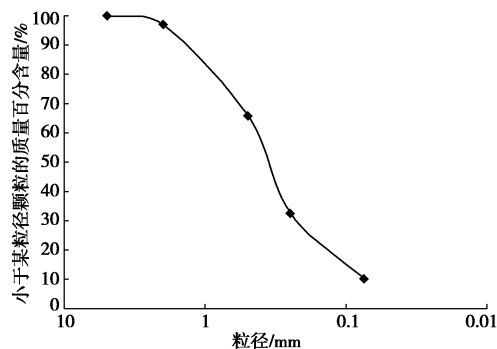


图 1 砂土的级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of sand

胶凝砂土是由砂和水泥加水混合搅拌而成。试验中胶凝材料按水泥和粉煤灰 6:4 的比例掺配而成, 试验用水泥为 P.O.42.5R, 粉煤灰采用二级灰, 水灰比控制为 0.8。按上述配比将胶凝材料配好后, 按 60 kg/m^3 的掺加量将水泥与砂土进行人工搅拌掺合, 试验搅拌均匀后共分 3 层填入三瓣模中压实, 为便于试样不同分层间更好地结合, 相邻两层界面用刮土刀刨毛, 成型后胶凝砂土的制样密度由纯砂土的 1.60 g/cm^3 提高到 1.66 g/cm^3 。胶凝砂土试样成型后人工养护 28 d。

1.2 试验条件

试验在 GDS 多功能静动三轴仪上完成, 试验围压分别为 300, 600, 1000, 1500 kPa, 输入波形采用正弦波。动模量、阻尼比振动频率采用 0.33 Hz, 试验固结应力比 K_c 为 1.5 和 2.0, 轴向动应力分 6~10 级施加, 各级动应力 3 振次; 动力残余变形试验振动频率采用 0.1 Hz, 试验固结应力比 K_c 为 1.5; 动应力分别为 $\pm 0.2 \sigma_3$, $\pm 0.4 \sigma_3$, $\pm 0.6 \sigma_3$, 各级轴向动应力施加 30 振次; 动强度试验振动频率采用 1 Hz, 试验固结应力

比 K_c 为 1.5 和 2.0, 轴向动应力分 3~4 级施加, 破坏标准为轴向应变等于 5% 或超静孔隙水压力等于围压。

1.3 试验过程

将砂土样或养护 28 d 的胶凝砂土样置于饱和器中, 放入抽气缸, 用 0.1 MPa 的压力抽真空约 2 h, 然后关闭真空泵, 充水浸没 12 h。试验时, 先在等固结压力下固结稳定, 然后在不排水条件下按预定的动应力逐级施加动荷载。

2 试验结果及分析

砂土与胶凝砂土的静力三轴试验表明: 胶凝材料掺入后, 胶凝砂土的凝聚力明显增强, 凝聚力 c 达到 206.5 kPa, 接近砂土凝聚力 31 kPa 的 7 倍, 由于破坏峰值受围压影响的敏感性降低, 线性强度指标内摩擦角略有降低, 胶凝砂土的内摩擦角为 33.2° , 比纯砂土 34° 略有降低。上述性质的变化与胶凝砂砾石料的静力特性一致^[17]。

2.1 胶凝砂土动模量及阻尼比试验结果

图 2 为不同围压不同固结应力条件下砂土和胶凝砂土的动应力 - 动应变关系试验曲线, 试验结果表明, 胶凝砂土的动应力 - 动应变关系曲线仍大体为双曲线与砂土的试验结果类似, 并且在较低水泥掺加量条件下, 胶凝砂土中砂的动力特性仍占据主导地位。因此仍可采用南水动力模型来拟合砂土与胶凝砂土的动模量试验结果。

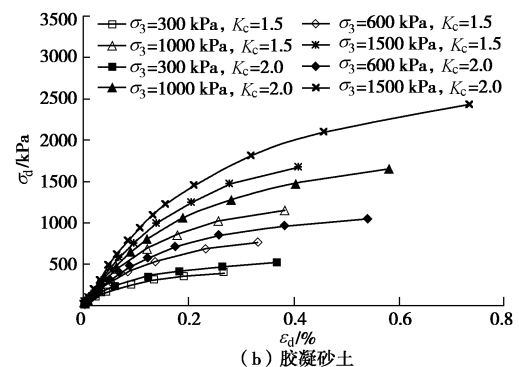
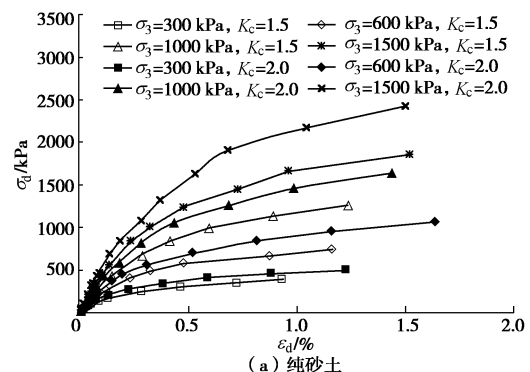


图 2 动应力 - 动应变关系曲线

Fig. 2 Dynamic stress-strain relationship curves

与 Hardin 一致,南水动力模型^[18]认为动剪切模量 G_{dmax} 和平均主应力 σ_m 为幂函数关系:

$$G_{dmax} = k p_a (\sigma_m / p_a)^n \quad (1)$$

对于三轴试验, $\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3) / 3$ 。根据试验结果可拟合得到相应的沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型动模量参数 k 、 n , 拟合曲线如图 3 所示, 按实测的阻尼比与动应变关系拟合试样的最大阻尼比 λ_{max} , 所得结果列于表 1 中。

表 1 动模量试验结果

Table 1 Test results of dynamic modulus			
	k	n	λ_{max}
胶凝砂土	1232	0.441	0.25
纯砂土	381	0.603	0.27

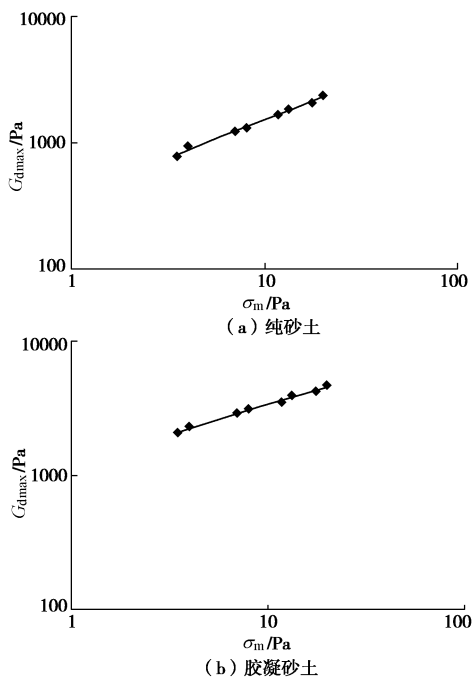


图 3 $G_{dmax} - \sigma_m$ 关系曲线

Fig. 3 $G_{dmax} - \sigma_m$ relationship curves

沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型采用归一化动应变来反映动模量、阻尼比随应变的衰减过程, 其中

$$\bar{\varepsilon}_d = \varepsilon_d (\sigma_m / p_a)^{n-1} \quad (2)$$

经整理, G_d/G_{dmax} 、阻尼比随归一化动应变的变化曲线如图 4 所示。

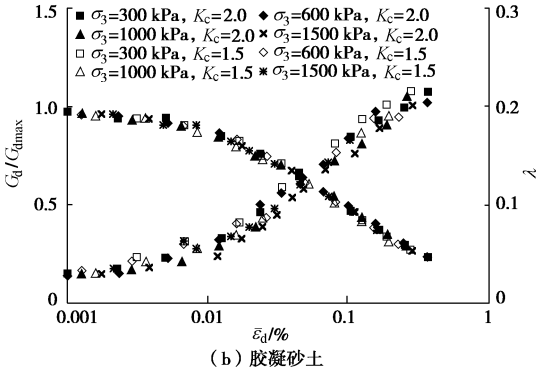
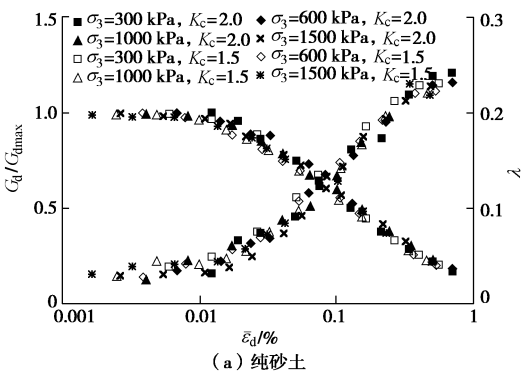


图 4 G_d/G_{dmax} 、阻尼比随归一化动应变的变化曲线

Fig. 4 Variation of G_d/G_{dmax} and damping ratio with normalized dynamic strain

试验结果表明胶凝砂土的动模量特性仍可用沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型来模拟, 从试验结果来看, 其拟合效果较好。随着胶凝材料掺入, 砂土抵抗动荷作用的能力显著提高, 主要表现为动模量大幅提高, 达到纯砂土的 3 倍以上。与纯砂土比胶凝砂土的 G_d/G_{dmax} 随归一化动应变变化曲线较左移, 胶凝砂土最大阻尼比略有降低, 但降低幅度不大。

已有试验结果表明^[17]: 随着胶凝材料掺入量的增加, 胶凝混合材料的力学特性指标增加趋势趋缓, 胶凝材料掺入量的多少应综合考虑经济效益和抗震等级需求。

2.2 胶凝砂土动力残余变形特性

图 5 为按 60 kg/m³ 掺胶凝材料的胶凝砂土典型轴向动应变与动体积应变随振次变化曲线。

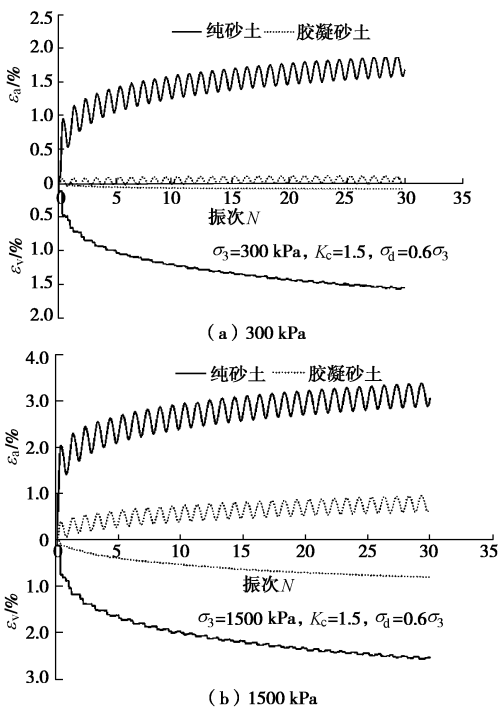


图 5 掺入胶凝材料前后砂土动残余变形对比曲线

Fig. 5 Comparison of dynamic residual deformations with and without cementing materials

表 2 纯砂土与胶凝砂土最大动永久体积应变与最大轴向动永久应变对比 ($K_c=1.5$)

Table 2 Maximum axial dynamic strains and dynamic permanent volumetric deformations of sands with or without cementing materials ($K_c=1.5$)

围压 σ_3 /kPa	动应力 σ_d σ_d / σ_3	最大轴向动应变			最大动体变		
		纯砂(1)	胶凝(2)	降幅(((1)-(2))/(1))/%	纯砂(1)	胶凝(2)	降幅(((1)-(2))/(1))/%
300	0.2	0.336	0.025	92.5	0.310	0.016	95.0
	0.4	1.015	0.068	93.3	0.930	0.034	96.4
	0.6	1.887	0.119	93.7	1.558	0.079	94.9
600	0.2	0.536	0.040	92.5	0.442	0.026	94.1
	0.4	1.354	0.133	90.2	1.055	0.075	92.9
	0.6	2.413	0.228	90.6	1.914	0.179	90.6
1000	0.2	0.689	0.076	89.0	0.558	0.048	91.4
	0.4	1.731	0.214	87.7	1.329	0.155	88.3
	0.6	2.884	0.372	87.1	2.106	0.315	85.0
1500	0.2	0.737	0.097	86.8	0.588	0.073	87.5
	0.4	1.975	0.505	74.4	1.305	0.299	77.1
	0.6	3.396	0.966	71.5	2.557	0.789	69.1

动力残余变形特性试验表明：胶凝砂土动力残余轴向变形及残余体积变形在振动开始的前几周发展非常快，随着循环荷载循环次数的发展，残余轴向变形及残余体积变形逐渐稳定。掺入胶凝材料的胶凝砂土残余变形过程曲线与没有掺入胶凝材料的砂土残余变形过程曲线保持相似，但初始变形量及累计残余变形量值较砂土均大幅降低，胶凝材料的掺入显著提高了砂土抵抗动力荷载的能力。沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型中残余变形^[18]采用半对数衰减规律来反映土体的地震动残余变形发展规律，但当土体初始动变形较大时，半对数曲线并不能很好地描述土体动力残余变形发展趋势，但从试验结果来看由于胶凝材料的掺入，胶凝砂土初始变形量及累计动力残余变形量值均大幅降低，反而使得胶凝砂土较砂土更符合沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型中动力残余变形模型的半对数衰减规律。

表2为试验得出的不同围压下固结比 $K_c=1.5$ 时不同动应力作用的砂土与胶凝砂土最终动体积应变与轴向动应变的大小及相应的降低幅值。由表2可以看出：由于胶凝材料的掺入，围压越低，土体对动应力的反应越不敏感，表现为经过30次动应力循环后胶凝砂土最终动体积应变与轴向动应变越小；相反，围压越高，土体对动应力的反应越敏感，经过30次动应力循环后胶凝砂土最终动体积应变与轴向动应变相应越大，胶凝的影响作用相对减弱。经过30次动应力循环后胶凝砂土相对纯砂土最大动残余变形降幅结果表明：围压越低，最大动残余变形降幅越大，随围压升高，降幅降低明显。本次试验过程中，围压1500 kPa较300 kPa降幅差值最大接近1/3，由此说明胶凝作用对低应力状态更为敏感，应力水平越低，胶凝作用对于提高砂土

抵抗动力变形的能力越为显著。基于砂土为散粒体材料的基本特性，进一步可以认为应力水平越低，胶凝作用对于提高散粒体材料抵抗动力变形的能力越显著。这也可以进一步解释在汶川地震后紫坪铺大坝震害调查中^[19-20]指出的浆砌片石护坡较干砌石护坡具有更优良的整体抗震性能的认识。

根据沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型^[18]，动力残余体积应变增量 $\Delta\varepsilon_v$ 和残余剪切应变增量 $\Delta\gamma_s$ 可按下列下式计算：

$$\Delta\varepsilon_v = c_1(\gamma_d)^{c_2} \exp(-c_3 S_1) \frac{\Delta N_L}{1 + N_L} \quad , \quad (3)$$

$$\Delta\gamma_s = c_4(\gamma_d)^{c_5} S_1 \frac{\Delta N_L}{1 + N_L} \quad . \quad (4)$$

式中， ΔN_L 和 N_L 为等效振次数的增量和累加量， c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 为5个模型参数。由试验结果整理出胶凝砂土与砂土动力残余变形模型参数列于表3。

表 3 残余变形模型参数对比表

Table 3 Model parameters of dynamic residual deformation					
材料	$c_1/\%$	c_2	c_3	$c_4/\%$	c_5
胶凝砂土	0.93	1.79	0	7.21	1.81
纯砂土	1.21	1.14	0	11.87	1.24

2.3 胶凝砂土液化特性

由于掺入胶凝材料的胶凝作用，本次试验过程中，固结比 $K_c=1.5$ 、围压为300及600 kPa时，在试验能达到最大卸载动应力比条件下，胶凝砂土试样超过200次振动仍未能达到预定的破坏标准。表明低应力状态低固结比的胶凝砂土试样已很难发生破坏。根据上述试验，取5%累积轴向动应变为破坏标准，得到砂土及胶凝砂土在不同围压下的动应力比与破坏振次

关系曲线。图6为试验得出的动剪应力比 τ'_d/σ'_0 、液化动孔压比 u'_d/σ'_0 与破坏振次 N_f 的关系曲线,其中 σ'_0 为振前试样 45° 面上的有效法向应力, $\sigma'_0=(K_c+1)\sigma_3/2$, K_c 为固结比。

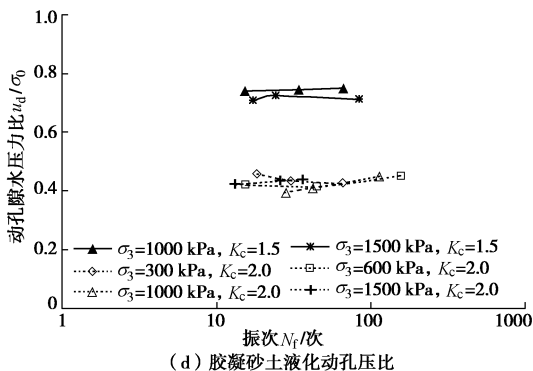
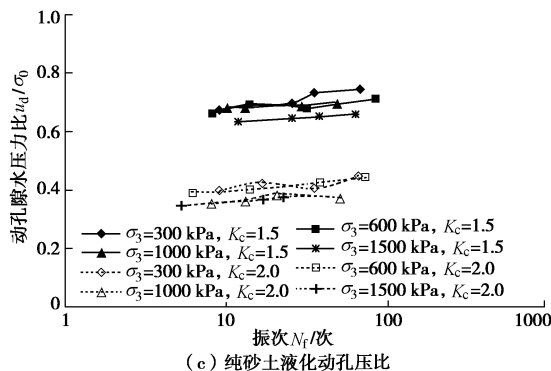
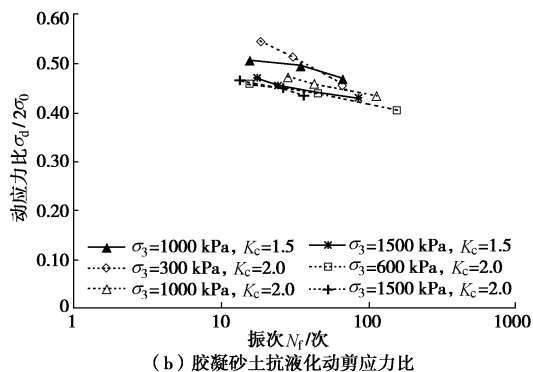
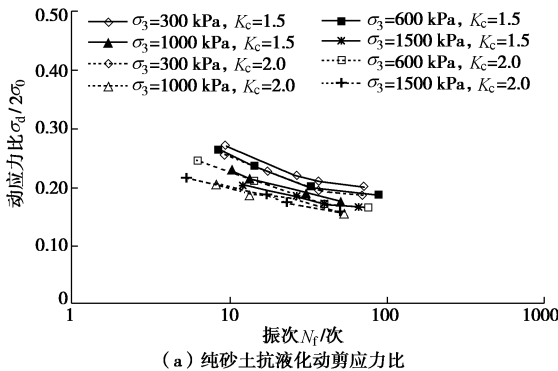


图6 动强度试验曲线

Fig. 6 Test curves of dynamic strength

根据上述试验成果可以看出,胶凝作用对砂土动强度的影响明显。掺加胶凝材料的砂土样,其动孔隙水压力在达到预定破坏动应变时相对纯砂土样略有增

加,表明胶凝砂土样在固结应力及动剪应力作用下,达到破坏时较砂土样累积了更高的孔压,随着胶凝材料掺入量的增加,砂土抗液化能力显著提高,主要表现为低应力状态下低固结比的胶凝砂土试样已很难发生破坏,而高应力状态下较大固结比胶凝砂土抗液化动剪应力则大幅提高,提高幅度达到砂土抗液化动剪应力的2倍以上。

随循环荷载次数的增加,砂土累积残余动应变比胶凝砂土材料更容易达到破坏动应变,这说明在地震作用下,胶凝材料掺入量越多的土体越不易液化。而随着胶凝材料掺入量增加,浅层砂土的抗液化能力大幅提高,已很难发生地震液化,深层砂土的破坏主要表现为变形破坏,且破坏时累积了较大的动孔隙水压力。

3 结 论

通过室内动三轴试验,对比研究了砂土样与胶凝砂土样在动荷载作用下的动强度及变形特性,主要结论如下:

(1) 胶凝材料的掺入显著提高了砂土抵抗动荷载的能力。在较低水泥掺加量条件下,胶凝砂土中砂的动力特性仍占据主导地位,试验结果表明胶凝砂土的动力变形特性仍可用沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型来模拟。尤其对于动力残余变形,胶凝砂土较砂土更符合沈珠江提出的砂土动力黏弹性模型中给出的动力残余变形半对数衰减规律。

(2) 胶凝砂土的动应力应变关系仍表现为双曲线型。随着胶凝材料掺入,砂土抵抗动荷载作用的能力显著提高,主要表现为动模量大幅提高,提高幅度达3倍砂土动模量以上,而最大阻尼比略有降低,但降低幅度不大。

(3) 胶凝砂土动力残余变形过程曲线与砂土动力残余变形过程曲线基本相似,但初始变形量及累计动残余变形量值较砂土均大幅降低。试验结果表明胶凝作用对低应力状态更为敏感,应力水平越低,胶凝作用对于提高砂土抵抗动力变形的能力越显著,并进一步解释了胶凝作用是导致紫坪铺大坝浆砌片石护坡较干砌石护坡更具有优良整体抗震性能的原因。

(4) 随着胶凝材料掺入,砂土抗液化能力显著提高,浅层砂土已很难发生地震液化。深层砂土的破坏主要表现为变形破坏,其抗液化动剪应力提高到纯砂土的2倍以上,但破坏时也累积了较大的动孔隙水压力。

(5) 已有研究表明随着胶凝材料掺入量的增加,胶凝材料的力学特性指标增加趋缓,胶凝材料掺入量

需综合考虑经济效益和抗震要求而定。

参考文献:

- [1] 徐静波. 水泥搅拌砂土强度特性及搅拌桩复合地基路基沉降研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014. (XU Jing-bo. Research on the strength characteristics of cement-sand-soil and settlement of mixing pile composite foundation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [2] 徐至钧, 曹名葆. 水泥土搅拌法处理地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. (XU Zhi-jun, CAO Ming-bao. Foundation treatment using mixed-in-place pile[M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese))
- [3] KAMATA H, AKUTSU H. Deep mixing method for site experience[J]. Pro of the Journal of Japanese Society of Soil Mechanical and Foundation Engineering, Tsuchi to Kiso, 1976, **24**(12): 43 - 50.
- [4] ALLEN J D, REESE L C. Small scale tests for the determination of p - y curves in layered soil[J]. OTC, 1980: 31 - 37.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GONG Xiao-nan, Theory of composite foundation and engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [6] WANG Y H, LEUNG S C. A particulate-scale investigation of cemented sand behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **45**(1): 29 - 44.
- [7] 王 丽, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, **24**(2): 133 - 143. (WANG Li, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. Experimental study on cementing properties of calcareous sand and its influence of mechanical properties[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, **24**(2): 133 - 143. (in Chinese))
- [8] 赵 灿. 人工胶结砂力学性能及其本构模型试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2013. (ZHAO Can. Experimental research on mechanics and constitutive model of artificially cemented sand[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [9] 汤怡新, 刘汉龙, 朱 伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 549 - 553. (TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 549 - 553. (in Chinese))
- [10] 王海龙, 申向东, 王萧萧, 等. 水泥砂浆复合土力学性能及微观结构的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 1): 3264 - 3269. (WANG Hai-long, SHEN Xiang-dong, WANG Xiao-xiao, et al. Experimental research of mechanical properties and microstructure for cement mortar composite soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S1): 3264 - 3269. (in Chinese))
- [11] 刘 忠, 朱俊高, 刘汉龙. 水泥砾质土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 2013 - 2020. (LIU Zhong, ZHU Jun-gao, LIU Han-long. Experimental study of cemented gravelly soil by triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 2013 - 2020. (in Chinese))
- [12] 曹友杰. 河南郑东新区可液化土的特征及抗液化措施研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012. (CAO You-jie. A study of the characteristics of liquefiable soils and anti-liquefaction measurements in the Zhengdang New District, Henan[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese))
- [13] 李华明. 高速铁路饱和粉土液化地基抗震加固试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (LI Hua-ming. Research on seismic reinforcement of saturated silt liquefied foundation of high-speed railway[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [14] 付恩怀, 高海涛. 金川水电站坝基砂层透镜体震动液化评价及工程措施[J]. 西北水电, 2014(1): 15 - 18. (FU En-huai, GAO Hai-tao. Assessment and engineering measures for vibration liquefaction of sand-layer lens in dam foundation, Jinchuan Hydropower Project[J]. Northwest Hydropower, 2014(1): 15 - 18. (in Chinese))
- [15] 高玉峰, 王庶懋, 王 伟. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土的动剪切模量衰减特性分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 1001 - 1004. (GAO Yu-feng, WANG Shu-mao, WANG Wei. Test study on deformation characteristics of lightweight sand-EPS beads soil under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 1001 - 1004. (in Chinese))
- [16] 胡舜娥. 水泥固化滨海风积砂动三轴试验与理论模型研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2014. (HU Shun-e. Dynamic triaxial experiment and theoretical model of cement stabilized coastal aeolian sand[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2014. (in Chinese))
- [17] 傅 华, 陈生水, 韩华强, 等. 胶凝砂砾石料静动力三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(2): 357 - 362. (FU Hua, CHEN Sheng-Shui, HAN Hua-qiang, et al. Experimental study on static and dynamic properties of cemented sand and gravel[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2015, **37**(2): 357 - 362. (in Chinese))
- [18] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996, **6**(2): 143 - 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1996, **6**(2): 143 - 150. (in Chinese))
- [19] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 795 - 801. (CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan Earthquake on Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 795 - 801. (in Chinese))
- [20] 赵剑明, 刘小生, 温彦锋, 等. 紫坪铺大坝汶川地震震害分析及高土石坝抗震减灾研究设想[J]. 水力发电, 2009, **35**(5): 11 - 14. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, WEN Yan-feng, et al. Analysis of earthquake damage of the Zipingpu Dam in Wenchuan Earthquake and the study proposal on the anti-earthquake and disaster reduction of high earth-rock dam[J]. Water Power, 2009, **35**(5): 11 - 14. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)