

DOI: 10.11779/CJGE201502021

胶凝砂砾石料静、动力三轴剪切试验研究

傅 华^{1, 2, 3}, 陈生水^{1, 2, 3}, 韩华强^{1, 2, 3}, 凌 华^{1, 2, 3}, 蔡 新⁴

(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 210029; 4. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 通过不同掺量胶凝材料的静动力三轴试验, 研究了胶凝砂砾石料的静、动力力学和变形特性, 试验结果表明随着胶凝材料掺入量的增加, 胶凝砂砾石试样的应力应变曲线逐渐由非线性向线弹性转变, 其力学特性宏观上由弹塑性逐渐转变为线弹性, 因此采用土工试验测试方法开展其力学特性的研究工作是适宜的。胶凝砂砾石的静、动力力学指标随着胶凝材料掺入量和养护天数的增加产生一定的提高, 但增加量随着胶凝材料掺入量的提高而逐渐减缓; 胶凝砂砾石的动态残余变形发展过程曲线宏观上与纯砂砾石保持相似, 大体上仍符合半对数衰减规律, 随围压、固结应力以及动应力的提高, 其动永久变形量相应增大, 仍可采用沈珠江提出的动态残余变形公式进行描述。

关键词: 胶凝砂砾石料; 测试方法; 静力特性; 动力特性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)02-0357-06

作者简介: 傅 华 (1977-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事粗颗粒土的试验研究。E-mail: hf@nhri.cn。

Experimental study on static and dynamic properties of cemented sand and gravel

FU Hua^{1, 2, 3}, CHEN Sheng-Shui^{1, 2, 3}, HAN Hua-qiang^{1, 2, 3}, LING Hua^{1, 2, 3}, CAI Xin⁴

(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 of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry

of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The static and dynamic triaxial shear tests and deformation tests on CSG (cemented sand and gravel) with different amounts of added cementing materials are performed. The mechanical indexes and parameters obviously increase with mixing of cementing materials and accumulation of curing days. However, the increase will become mild with further adding of the cementing materials. The deformation curve of CSG test sample is similar to that of sand-gravel sample without mixing with any cementing materials, and they both follow the trend of semi-logarithmic attenuation law. The dynamic permanent deformation of CSG increases with the increase of confining pressure, consolidation stress and dynamic stress. Thus this deformation still can be calculated using the constitutive model for dynamic residual deformation proposed by Shen Zhujiang.

Key words: cemented sand and gravel; test method; static property; dynamic property

0 引 言

胶凝砂砾石料是一种采用胶凝材料和砂砾石料拌合而形成的固结体, 胶凝砂砾石料中的胶凝含量主要包括水泥、粉煤灰以及一些添加剂等, 随着胶凝材料的掺入, 胶凝砂砾石料的力学特性逐渐由散粒体材料向混凝土材料转变^[1]。采用胶凝砂砾石料建坝兼有混凝土面板堆石坝和混凝土重力坝两者优点, 具有断面小、施工速度快、节省用料、便于施工导流、抗震性能好、适应较软弱地基等特点, 具有很好的安全性、可靠性和经济性, 具备很强的竞争力和推广应用前景^[2-3]。这种新坝型在国外已有成功应用^[4-9], 但在国内起步较晚^[10-15]。相对于胶凝砂砾石坝近几年的快速发展, 目前对于胶凝砂砾石料力学特性的认识尚不充分, 国

内外大多基于混凝土的理论采用单轴抗压试验开展胶凝砂砾石料的研究工作^[16], 显然并不能如实反映胶凝砂砾石料由散粒体材料向混凝土材料转变的特性, 笔者认为应用土工试验测试方法开展其力学特性的研究工作是适宜的, 然而目前这方面的工作较少且仍不深入^[17-18], 而胶凝砂砾石料动力特性方面的试验研究工作尚未见报道。本文通过不同掺量胶凝材料的静、动力三轴试验, 系统研究了胶凝砂砾石料的静、动力力学特性和变形特性, 分析了采用土工试验测试方法研

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91215301); 国家自然科学基金青年基金项目 (51309161); 国家科技支撑计划课题 (2012BAD10B02)

收稿日期: 2014-05-20

究胶凝砂砾石料的适用性, 讨论了不同掺量对胶凝砂砾石料力学特性的影响。

1 试验方案

本次试验采用天然砂砾石料作为骨料, 骨料的级配如表 1, 骨料的制样密度控制为 2.29 g/cm^3 。为准确把握砂砾料掺入胶凝材料后力学性能的提升程度, 静力试验胶凝材料按不掺胶凝材料及 $60, 80, 90\text{ kg/m}^3$ 3 种掺入量进行对比试验, 胶凝材料为水泥和粉煤灰, 水泥采用 P.O.42.5R 水泥, 粉煤灰采用二级灰, 水泥和粉煤灰按重量比 $6:4$ 掺入, 水灰比控制为 0.8 。按上述方法将胶凝材料配好后, 按设定的重量比与天然砂砾石骨料进行人工搅拌掺合, 试验搅拌均匀后共分 5 层采用表面振动法分层进行装样, 试样尺寸均为 $\phi 300\times 700\text{ mm}$, 试样装好后进行人工养护, 养护天数为 28 d , 对胶凝材料掺入量 80 kg/m^3 的试样增加养护天数为 90 d 龄期的对比试验; 动力三轴试验进行不掺胶凝材料及掺入 40 kg/m^3 P.O.42.5R 水泥, 水灰比控制为 0.8 , 养护天数为 28 d 对比试验。试样达到设定的养护天数后, 吊装至三轴试验仪上, 采用静水头法对试样进行饱和, 试样饱和后即施加围压, 对试样进行固结, 固结完成后按要求开展各项试验, 试验过程中由计算机采集试样的轴向荷载、轴向变形和排水量。

表 1 骨料级配表

Table 1 The aggregate gradation						
名称	各粒径范围百分含量/%					
	60~40	40~20	20~10	10~5	5~1	1~0
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
砂砾石料	25.8	24.8	16.5	11.4	9.0	12.5

2 测试方法探讨

对于胶凝堆石料的试验目前还没有专门的试验规范可参考, 土工试验规程主要按骨料的最大粒径来确定试件的尺寸, 试验时是以整个试件的变形作为试样的变形量, 而混凝土试验规程是以试件的中部变形作为试件的变形量, 对于弹性材料, 二个结果应该是较接近的, 而对于胶凝堆石料, 性质是介于堆石料与混凝土材料之间, 并不是完全的弹性材料。挑选多个代表性试样进单轴抗压试验, 均出现如图 1 所示的破坏现象, 即胶凝试件在垂直应力的作用下, 试样主要沿顶部破坏, 中部近乎完好, 按照试样受力示意图, 如图 1 所示, 试件在垂直应力的作用下, 最终是试样上部 AB 段出现破坏, 此时垂直力出现屈服, 试验结束, 这时试样下部 CD 段的变形非常小, 按混凝土规范是用总应力除以 CD 段应变来计算模量, 结果就会明显的偏大, 因此, 笔者认为只有胶凝材料掺入量达到一定程度, 试件由弹塑性变成线弹性, 其实也就是变成混凝土试件, 此时通过测试胶凝材料试样的中部的变

形作为整个试件变形量是合适的, 否则, 按土工试验规程测试整个试样的变形作为试件变形量较合适。考虑到本次胶凝材料试验峰值应变最小为 1.38% , 因此最小采用精度为 0.01 mm 的光栅位移传感器作为位移测量工具。

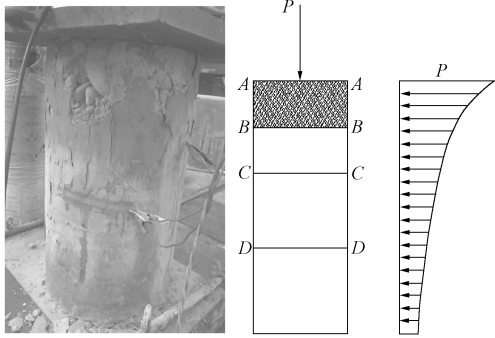


图 1 试件变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deformation of a sample

3 试验结果及分析

3.1 静力三轴试验结果及分析

本次共进行了 $300, 600, 1000, 1500\text{ kPa}$ 共 4 级围压下静力三轴试验研究。通过试验得到所得曲线见图 2。

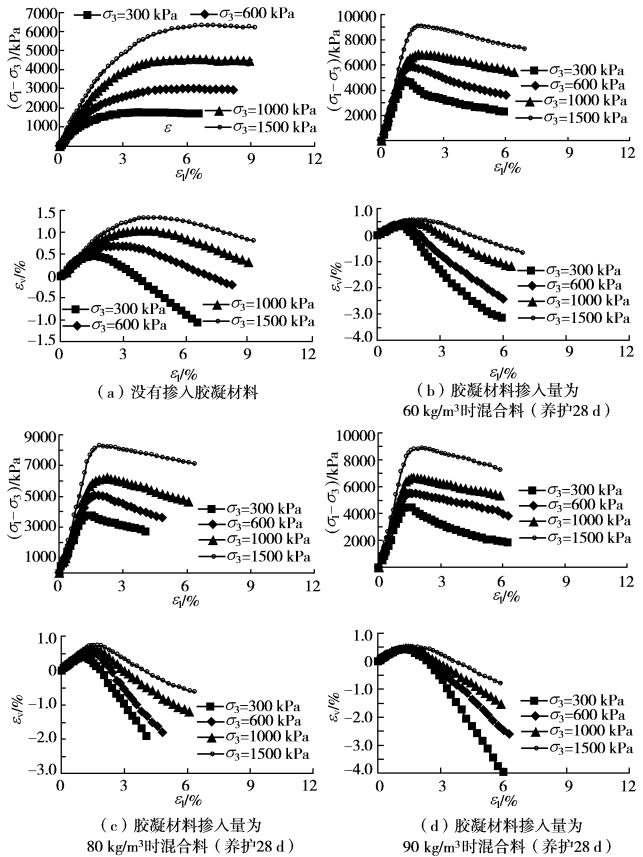


图 2 静力三轴试验曲线

Fig. 2 Results of static triaxial tests

表 2 三轴剪切试验邓肯模型参数表

Table 2 Parameters of Duncan model in triaxial shear test

试样 名称	掺入量 /(kg·m ⁻³)	养护 时间 /d	强度指标				邓肯模型参数							
			<i>c</i> /kPa	<i>φ</i> /(°)	<i>φ</i> ₀ /(°)	<i>Δφ</i> /(°)	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>R_f</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>K_b</i>	<i>m</i>
砂砾料	0	—	163.2	40.9	52.3	8.2	1220.2	0.32	0.64	0.39	0.12	7.25	743.3	0.22
	60	28	617.8	40.6	68.0	18.0	2641.7	0.28	0.14	0.37	0.08	13.25	1881.0	0.18
胶凝 砂砾料	80	28	766.9	40.2	71.1	20.0	3369.5	0.24	0.13	0.38	0.09	13.20	2251.4	0.27
		90	842.1	40.5	71.9	19.8	3644.2	0.26	0.10	0.40	0.10	15.00	2435.6	0.28
	90	28	842.3	39.9	72.0	20.3	3742.5	0.23	0.11	0.38	0.09	13.95	2488.3	0.26

对于胶凝材料参数整理直接按线性（弹性）整理肯定是不合适的，对于非线性切线弹性模量按公式：

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \times (1 - R_f S_t)^2$$
 进行计算，当破坏比参数 R_f 减小为 0 时，公式就变成线弹性模量公式 $E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$ ，非线性的特殊情况其实包含了线性（弹性），为了便于与未掺胶凝材料砂砾料力学特性的对比，因此本次试验结果按弹性非线性邓肯模型来整理参数，试验参数见表 2。

上述试验结果显示：

(1) 随着胶凝材料的掺入，固结灌浆后的破坏峰值产生显著提高，但表现为线性强度指标 φ 值总体产生一定的降低，相应于 φ 值， c 值发生明显的提高，究其原因，主要由于胶凝材料掺入凝固后使得砂砾石料粗细颗粒胶结在一起，材料的咬合力明显增强，材料的自身强度产生明显的提高，材料自身强度增高，破坏峰值受围压影响的敏感性会降低，对比每一级围压下的破坏峰值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与强度指标 φ 见表 3，在围压为 300 kPa 下破坏峰值提高了 1969~3153 kPa，随着围压提高到 1500 kPa，破坏峰值只提高了 1988~3035 kPa，破坏峰值随围压的敏感性降低，由于高、低围压下峰值增加的较接近，从而表现为线性指标则是 φ 值降低， c 值提高。

表 3 破坏峰值与强度指标

Table 3 Peak values of damage and intensity indexes

试样 名称	掺入量 /(kg·m ⁻³)	养护 时间/d	破坏峰值/kPa			
			围压 300 kPa	围压 600 kPa	围压 1000 kPa	围压 1500 kPa
砂砾料	0	0	1794	3011	4587	6331
	60	28	3763	5067	6276	8319
胶凝 砂砾料	80	28	4483	5538	6690	8892
		90	4768	5962	7233	9275
	90	28	4723	5883	6881	9095

(2) 随着胶凝材料的掺入量由 0 kg/m³ 提高至 60 kg/m³，其破坏峰值增加了 31.4%~109.7%，模型参数

K 增加了 116.5%；掺入量由 60 kg/m³ 提高至 80 kg/m³，其破坏峰值增加了 6.9%~19.1%，模型参数 K 增加了 27.6%；掺入量由 80 kg/m³ 提高至 90 kg/m³，其破坏峰值增加了 2.3%~5.3%，模型参数 K 增加了 11.1%。试验结果宏观显示，随着胶凝材料掺入量的增加，胶凝砂砾料的力学特性指标呈增加趋势，但增加量呈逐渐减缓。

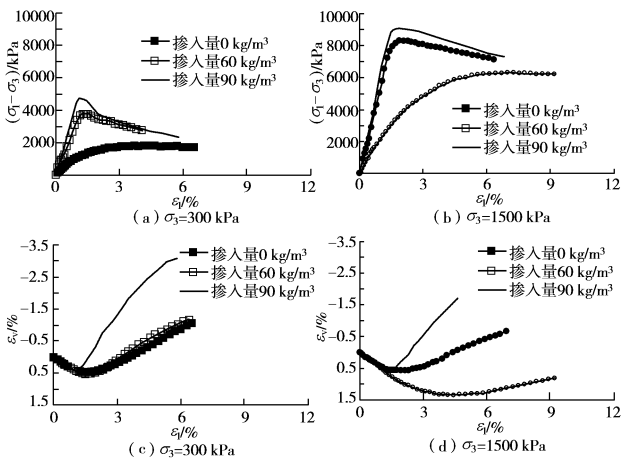


图 3 掺入不同量后胶凝材料的三轴试验曲线对比图

Fig. 3 Comparison of deformations of static triaxial tests

(3) 对掺入量为 80 kg/m³ 的胶凝砂砾料进行了不同养护天数的对比试验，试验结果显示，随着养护天数由 28 d 增加至 90 d，其破坏峰值增加了 3.0%~8.2%，模型参数 K 增加了 8.2%~13.5%，即养护天数为 28 d 时，其强度已达到破坏强度的 92.5%~95.8%。

(4) 对比不同方量胶凝材料掺入后的应力应变曲线，如图 3 所示，在没有掺入胶凝材料的情况下，砂砾料应力应变曲线呈应变硬化型，在应变为 4%~7% 范围内达到破坏峰值，随着胶凝材料的掺入，应力应变曲线逐渐由应变硬化向应变软化转变，当胶凝材料掺入量达到 90 kg/m³ 时，在应变为 1%~1.5% 范围内就达到破坏峰值，表现为邓肯模型参数 K 值则均产生了明显的提高；对应于体变曲线，则是，随着胶凝材料的掺入量的增加，胶凝砂砾料的剪胀性逐渐增强、排水量逐渐减小，表现为邓肯模型参数 K_b 值则均产生

了明显的提高。

(5) 对于非线性切线弹性模量按公式：

$$E_t = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \times (1 - R_f S_1)^2$$
 进行计算，当破坏比参数

R_f 减小为 0 时，公式就变成线弹性模量公式。试验成果显示，砂砾料经过掺入不同的胶凝材料处理后，参数 R_f 值由 0.64 降低为 0.11，产生了大幅度的降低，试样的应力应变曲线也由非线性逐渐向线弹性转变，表明随着胶凝材料掺入量的增加，胶凝堆石料的力学特性宏观上由弹塑性逐渐向线弹性转变。

3.2 动力三轴试验结果及分析

按要求进行动模量和动力残余变形特性试验，其中动模量、阻尼比振动频率采用 0.33 Hz，输入波形采用正弦波，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，输入波形采用正弦波，试验固结应力比 K_c 为 1.5 和 2.0；固结应力比为 1.5 时分别为 $\pm 0.4\sigma_3$ 、 $\pm 0.8\sigma_3$ ，当固结应力比为 2.0 时分别为 $\pm 0.5\sigma_3$ 、 $\pm 1.0\sigma_3$ ，各级轴向动应力施加 30 振次。

对于动剪切模量 G_{dmax} 和平均主应力 σ_m 有如下关系：

$$G_{dmax} = Kp_a \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \tag{1}$$

整理出动参数 K ， n 见表 4。

表 4 动模量试验结果

Table 4 Test results of dynamic modulus

试样名称	掺入量/(kg·m ⁻³)	养护时间/d	K	n
砂砾料	0	0	2312	0.36
胶凝砂砾料	40	28	3771	0.24

表 4 显示，砂砾料掺入 40 kg/m³ 的胶凝材料后，动力特性指标产生明显的提高，对应于动剪切模量参数 K 值提高了 1.63 倍，由于材料的自身强度产生明显的提高，动剪切模量受平均主应力 σ_m 影响的敏感性会降低，因此动剪切模量系数 n 值产生一定的降低。

对于动力残余变形试验，试验得出的砂砾料掺入 40 kg/m³ 的胶凝材料后典型轴向动应变与动体积应变随振次变化曲线，如图 4 所示，表 5 为试验得出的不同围压固结比 $K_c=1.5$ 时不同动应力条件下试验得出的最终动体积应变与轴向动应变。

由图 4 及表 5 可以看出随围压、固结应力以及动应力的增大，掺入 40 kg/m³ 胶凝材料后砂砾料的振动永久变形均显著增大。表现为随着围压的增加，动永久轴向变形、不同振次下的动变幅值以及动永久体积变形均相应增大；随固结应力的增加，动永久剪切变形增加，动应变幅值变小；在同一围压，同一固结应力状态下，对材料施加的动应力越大，动永久轴向变

形、动剪应变幅值以及动永久体积变形均相应增大。

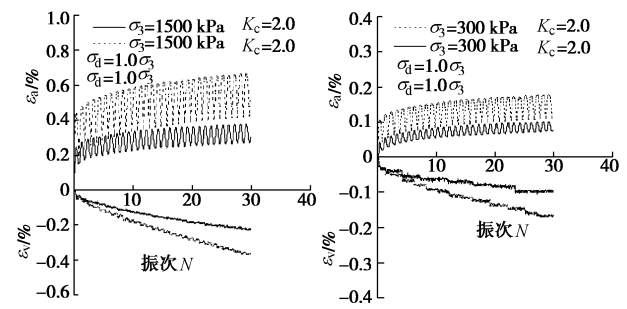


图 4 动永久变形试验曲线

Fig. 4 Curves of dynamic permanent deformation

表 5 掺入 40 kg/m³ 胶凝材料后砂砾料最大动永久体积应变与最大轴向动永久应变($K_c=1.5$)

Table 5 Maximum axial dynamic strains and dynamic permanent volumetric deformations of CSG with cementing materials of 40 kg/m³ ($K_c=1.5$)

围压 σ_3 /kPa	动应力比 τ_d / σ_3	最大轴向动应变 /%	最大动体积变 /%	动应力比 τ_d / σ_3	最大轴向动应变 /%	最大动体积变 /%
300	0.4	0.05	0.10	0.5	0.11	0.09
	0.8	0.10	0.19	1.0	0.16	0.17
600	0.4	0.11	0.14	0.5	0.18	0.12
	0.8	0.21	0.27	1.0	0.28	0.23
1000	0.4	0.15	0.19	0.5	0.26	0.19
	0.8	0.33	0.34	1.0	0.48	0.31
1500	0.4	0.22	0.22	0.5	0.36	0.22
	0.8	0.50	0.39	1.0	0.66	0.36

对比固结灌浆前后的残余变形曲线如图 5 所示，砂砾料掺入 40 kg/m³ 的胶凝材料后残余应变的发展曲线宏观上与没有掺入胶凝材料砂砾料保持相似，大体上仍符合半对数衰减规律，因此参数整理仍按沈珠江院士提出的动力残余变形本构模型进行整理^[19]。动力残余体积应变增量 $\Delta\varepsilon_v$ 和残余剪切应变增量 $\Delta\gamma_s$ 可按下式计算：

$$\Delta\varepsilon_v = c_1 (\gamma_d)^{c_2} \exp(-c_3 S_1) \frac{\Delta N_L}{1 + N_L} \tag{2}$$

$$\Delta\gamma_s = c_4 (\gamma_d)^{c_5} S_1 \frac{\Delta N_L}{1 + N_L} \tag{3}$$

式中， ΔN_L 和 N_L 为等效振动次数的增量和累加量， c_1 ， c_2 ， c_3 ， c_4 ， c_5 为 5 个动力残余变形计算参数。整理出参数见表 6。

表 6 残余变形模型参数对比表

Table 6 Comparison of parameters of dynamic residual deformation model

试样名称	掺入量 / (kg·m ⁻³)	养护时间 / d	c_1 /%	c_2	c_3	c_4 /%	c_5
砂砾料	0	0	0.41	0.72	0	5.23	0.81
胶凝砂砾料	40	28	0.21	0.60	0	3.14	0.50

砂砾料掺入 40 kg/m^3 的胶凝材料后, 动力残余变形特性产生了明显的改善, 图 5 显示, 在同样的应力条件下, 残余轴向变形和残余体积变形均产生明显降低, 表现为模型参数则是动残余轴向应变参数 c_1 降低了 48.8%, 动残余体积应变参数 c_4 降低了 40.0%。

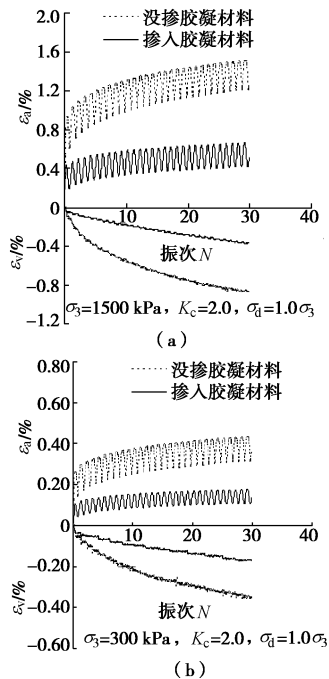


图 5 掺入胶凝材料前后动残余变形对比曲线

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

4 结 论

本文通过不同掺量胶凝材料的静、动力三轴试验, 研究胶凝砂砾石料的力学和变形特性, 得出以下 4 点结论。

(1) 对于胶凝材料测试目前还没有专门的试验规范可参考, 随着胶凝材料掺入量的变化, 试样的变形特性均会产生变化, 因此仅采用混凝土测试方法研究其力学特性是不全面的, 应兼顾到土工试验方法进行研究;

(2) 随着胶凝材料掺入量的增加, 胶凝砂砾石的破坏峰值显著提高, 但表现为线性强度指标 φ 值总体则是产生一定的降低, 相应于 φ 值, c 值则产生明显的提高; 随着胶凝材料掺入量的增加, 胶凝砂砾石的力学特性指标呈增加趋势, 但增加量呈逐渐减缓; 随着养护天数由 28 d 增加至 90 d, 其力学特性均产生一定的增加;

(3) 随着胶凝材料掺入量的增加, 胶凝砂砾石的应力应变曲线软化特性也越来越明显, 表现为破坏比

参数 R_f 值则产生了大幅度的降低, R_f 值降低宏观上表明, 随着胶凝材料掺入量的增加, 胶凝砂砾石的力学特性逐渐由弹塑性向线弹性转变。

(4) 胶凝砂砾石料动力特性试验结果表明, 掺入胶凝材料的砂砾石料动力残余应变发展曲线宏观上与没有掺入胶凝材料砂砾石料保持相似, 大体上均符合半对数衰减规律; 围压、固结应力以及动应力对其动永久变形具有重要影响, 随围压、固结应力以及动应力的提高, 胶凝材料的动永久变形相应增大。

参考文献:

- [1] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam, rapid construction of concrete dams[C]// ASCE. New York, 1970.
- [2] LONDE P, LINO M. The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC[J]. International Water Power & Dam Construction, 1992, 44(2): 19 - 24.
- [3] 陆述远, 唐新军. 一种新坝型 - 面板胶结堆石坝简介[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 54 - 56. (LU Shu-yuan, TANG Xin-jun. Brief introduction to a new type of dam called face plate cementing rockfill dam[J]. Journal of Yangtze RIVER Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 54 - 56. (in Chinese))
- [4] 杨世华. 林一山治水文集[M]. 北京: 新华出版社, 1981: 562 - 575. (YANG Shi-hua. Water control collections of Lin Yishan[M]. Beijing: Xinhua Publishing House, 1981: 562 - 575. (in Chinese))
- [5] BATMAZ S. Clidere dam-107m high roller compacted dam(RCHD) in Thrkey[C]// Proceedings 4th international Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Madrid, 2003: 121 - 126.
- [6] GURDIL A F, BATMAZ S. Structural design of Cindere Dam[C]// Proceedings 4th international Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Madrid, 2003: 439 - 446.
- [7] HATTORI Y. Construction of a sediment trap Dam using CSG concrete[J]. Dam Technology, 1993, 150(3): 50 - 58.
- [8] NAGAYAMA I. Development of the CSG construction method for sediment trap dams[J]. Civil Engineering Journal, 1999, 41(7): 6 - 17.
- [9] 腾忠明. 梯形 CSG 大坝与 CSG 材料特性[J]. 国际水利发电, 2005(3): 39 - 42. (TENG Zhong-ming. Ladder CSG dam and characteristic of CSG materials[J]. International Hydropower, 2005(3): 39 - 42. (in Chinese))
- [10] 贾金生, 马锋玲, 李新宇, 等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 578 - 582. (JIA

- Jin-sheng, MA Feng-ling, LI Xin-yu, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(5): 578 - 582. (in Chinese))
- [11] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(2): 97 - 103. (YANG Shou-long. Characteristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(2): 97 - 103. (in Chinese))
- [12] 肖 兰, 何蕴龙, 张艳锋. CSG 技术在围堰工程中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, **6**(2): 15 - 18. (XIAO Lan, HE Yun-long, ZHANG Yan-feng. Application of CSG method in construction of cofferdam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, **6**(2): 15 - 18. (in Chinese))
- [13] 杨朝晖, 赵其兴, 符祥平, 等. CSG 技术研究及其在道塘水库的应用[J]. 水利水电技术, 2007, **38**(8): 46 - 49. (YANG Zhao-hui, ZHAO Qi-xing, FU Xiang-ping, et al. Study on CSG dam construction technique and its application to Daotang reservoir project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, **38**(8): 46 - 49. (in Chinese))
- [14] 黎学皓, 刘 勇. CSG 筑坝技术在洪口过水围堰中的应用[J]. 水利水电施工, 2009(3): 15 - 20. (LI Xue-hao, LIU Yong. Application of CSG dam construction technique in Hongkou overtopped cofferdam[J]. Water Conservancy and Hydropower Project, 2009(3): 15 - 20. (in Chinese))
- [15] 孙明权, 刘运红, 陈姣姣, 等. 胶凝砂砾石材料本构模型研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2012(5): 13 - 15. (SUN Ming-quan, LIU Yun-hong, CHEN Jiao-jiao, et al. Study on constitutive model of cemented sand and gravel material[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012(5): 13 - 15. (in Chinese))
- [16] 何蕴龙, 彭云枫, 熊 堃. Hardfill 坝筑坝材料工程特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, **5**(4): 1 - 6. (HE Yun-long, PENG Yun-feng, XIONG Kun. Analysis on material property of Hardfill Dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2007, **5**(4): 1 - 6. (in Chinese))
- [17] 孙明权, 彭成山, 李永乐, 等. 超贫胶结材料三轴试验[J]. 水利水电科技进展, 2007(4): 40 - 41, 45. (SUN Ming-quan, PENG Cheng-shan, LI Yong-le, et al. Triaxial test of over lean cemented material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007(4): 40 - 41, 45. (in Chinese))
- [18] 武颖利. 胶凝堆石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究[D]. 南京: 河海大学, 2010. (WU Ying-li. Study on the mechanical properties and the working behavior of CSG dams[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))
- [19] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究所, 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))