

DOI: 10.11779/CJGE201809021

堆石料动力变形特性试验研究

吕小龙^{1, 2}, 迟世春^{*1, 2}, 贾宇峰^{1, 2}

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工程抗震研究所, 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用大型静动力简单剪切仪, 对某面板堆石坝灰岩堆石料进行了动剪切模量阻尼比试验和动残余变形试验。试验资料表明, 堆石料的模量阻尼特性采用修正等价黏弹性模型描述可取得较好效果。考虑到在围压和动应力比较高时, 残余应变与振次的关系和半对数规律偏差较大, 采用幂函数描述残余应变的发展, 建立了以平均主应力、固结应力比和动剪应变为自变量的残余变形计算模型。通过拟合不同堆石料的试验结果, 表明该模型具有较好的适用性。
关键词: 动力简单剪切仪; 堆石料; 非线性黏弹性模型; 残余变形

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)09-1729-07

作者简介: 吕小龙(1989-), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 从事高土石坝抗震研究工作。E-mail: lvxiaolong@mail.dlut.edu.cn。

Experimental study on dynamic deformation behavior of rockfill materials

LÜ Xiao-long^{1, 2}, CHI Shi-chun^{*1, 2}, JIA Yu-feng^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Large-scale cyclic simple shear tests on rockfill materials of limestone are performed to study the characteristics of dynamic moduli, damping ratios and residual deformations. The experimental results show that the curves of $G_d/G_{dmax} \sim \gamma_d$ and $\lambda/\lambda_{max} \sim \gamma_d$ are described by the modified nonlinear viscoelastic dynamic constitutive model. When the confining pressure and dynamic stress ratio are higher, the relationship between residual strain and numbers of cycles diverges the semilog rules evidently. Based on the test data, a power function is adopted to describe the development of residual strain. Then a residual strain model is proposed, which is a function of the average main stress, consolidation ratio and dynamic shear strain. By analyzing the collected test results, the feasibility of this model is validated.

Key words: cyclic simple shear apparatus; rockfill material; nonlinear viscoelastic model; residual deformation

0 引言

“5.12 汶川大地震”后, 强震区高坝的安全问题倍受关注^[1-2]。对于高堆石坝而言, 堆石料的动力特性是关系到坝体抗震安全性的关键。关于堆石料的动力本构模型, 国内外学者进行了广泛的研究。以 Hardin-Drnevich 模型^[3]为代表的黏弹性模型, 由于是试验结果的直接归纳, 形式简单直观, 在参数确定和工程应用方面积累了丰富的经验。

关于堆石料的模量阻尼特性, 沈珠江等^[4]对应力-应变骨干曲线采用双曲线假定, 提出了适用于堆石料的修正等价黏弹性模型; 孔宪京等^[5]对十余种堆石料进行动力试验, 给出了最大等效动剪切模量的估算式和等效剪切模量、等效阻尼比随归一化动剪应变幅值变化的取值范围; 刘汉龙等^[6]通过动三轴试验结果, 建议了一个综合反映固结应力比、孔隙比和试验级配特性的最大动剪切模量计算公式。在堆石料的

动力残余变形研究方面, 国内比较主流的是以动应力为自变量的水科院模型及以动应变为自变量的沈珠江模型。由于堆石料动残余变形特性的复杂性, 国内学者进行了大量动力三轴试验, 并针对上述模型提出了相应的修正模型^[7-14]。

由于三轴仪易于控制应力状态和排水条件, 量测的孔压和变形精度高, 因而得到了广泛应用。上述研究成果大多基于室内大型动力三轴仪获得。然而三轴仪在试样上施加的动力循环荷载与现场地震应力条件存在一定差异。地震引起堆石料的动力变形是由于从基岩向上传递的剪切波引起的。对于坝体内部的堆石体单元, 地震前只受到竖向应力 σ_0 和水平向应力

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0201001)

收稿日期: 2017-06-21

*通讯作者 (E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

$K_c\sigma_0$ ，初始剪应力为零。由于地震作用，在水平面上受到一个往复剪应力，且竖向应力仍保持不变。而动三轴仪是对不同固结应力条件下的试样施加竖向动应力 σ_d ，以试样 45° 剪切面上的应力状态来模拟地震时的应力状态。且在进行动弹性模量与动剪切模量换算时，需假定动泊松比为定值。为了在实验室内真实地模拟堆石料在地震荷载作用下的应力条件，大连理工大学工程抗震研究所自行研制了微机控制电液伺服粗粒土静动力简单剪切仪。本文采用该试验机对某面板堆石坝灰岩堆石料的动力变形特性开展试验研究，相关的成果如下。

1 试验简介

1.1 试验设备

微机控制电液伺服粗粒土静动力简单剪切仪见图 1。该试验机在施加轴向和环向静荷载时，可同时在试样底部施加水平动荷载。试验过程中，加载模式可采用位移控制、应力控制、应变控制及过程中的相互切换。同时，采用高精度传感器实时量测试样的轴向和水平向变形、排水量、孔压等。动力试验时，轴向最大静载荷为 1000 kN，围压为 3 MPa。水平向最大设计动荷载为 500 kN，频率范围为 0.1~3 Hz，波形可采用正弦波、三角波、方波和随机波。

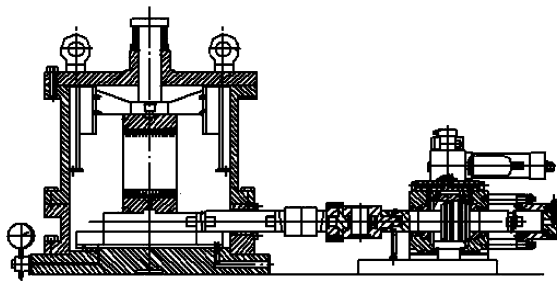


图 1 动力简单剪切仪

Fig. 1 Cyclic simple shear apparatus

1.2 试样制备

本次试验采用某面板堆石坝的筑坝堆石料，试样允许的最大粒径为 60 mm。由于设计级配的最大粒径超过允许的最大粒径，因此对设计级配采用相似级配法和等量替换法相结合的方法进行缩尺。试验采用的级配见表 1。

表 1 试验堆石料的颗粒级配

Table 1 Grain-size composition of rockfill materials

坝料名称	颗粒组成/%				
	60~40	40~20	20~10	10~5	<5
	mm	mm	mm	mm	mm
堆石料	24.5	29.8	17.5	13.5	14.7

试样尺寸为 $\Phi 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ ，采用分层振捣

法，共分 3 层，每层 10 cm，采用控制干密度成型。采用水头饱和法，在试样装好后通入二氧化碳，提高试样中气体的溶解度，然后通入无气水快速饱和。饱和后，逐级施加围压和轴向压力至预定值进行固结。

1.3 试验方案

动剪切模量与阻尼比试验时，振动频率采用 0.33 Hz，采用应变控制方式，每一级动应变振动 6 圈，选取第三圈求相应的动剪模量和阻尼比。动残余变形时，振动频率采用 0.1 Hz，每个试样进行 30 次循环荷载试验，记录每个荷载循环的剪应变和体应变。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes

动剪切模量与阻尼比		动残余变形试验		
试验				
K_c	σ_3/kPa	K_c	σ_3/kPa	$R_d = \frac{\sigma_d}{\sigma_3}$
2.0	400, 800	2.0	400, 800,	0.4, 0.6,
	1200, 1600		1200	0.8

2 动剪模量与阻尼比试验结果及分析

根据每一级动荷载下动剪应变 γ_d 与动剪应力 τ_d 的关系，可以确定试样的动剪切模量 G_d 。试验所得的动剪切模量倒数 $1/G_d$ 与动剪应变 γ_d 之间的关系曲线见图 2，可近似用直线拟合。

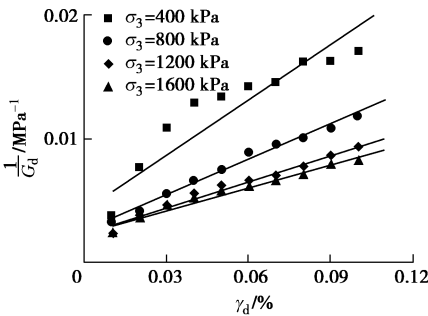


图 2 堆石料 $1/G_d$ 与 γ_d 关系

Fig. 2 Relationship between $1/G_d$ and γ_d

设 a 和 b 为拟合直线的截距和斜率，则

$$1/G_d = a + b\gamma_d \quad (1)$$

当 γ_d 趋近零时， $1/a$ 即代表最大动剪模量 G_{dmax} 。将最大动剪模量 G_{dmax}/p_a 与平均主应力点绘在坐标系下 (图 3)，用幂函数拟合效果较好，即

$$G_{dmax} = k_1 p_a \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 可得

$$G_d/G_{dmax} = \frac{1}{1 + k_2 \gamma_d} \quad (3)$$

式中, k_2 为试验参数, $\bar{\gamma}_d$ 为归一化的动剪应变。

$$\bar{\gamma}_d = \frac{\gamma_d}{\left(\frac{\sigma_m}{p_a}\right)^{1-n}} \quad (4)$$

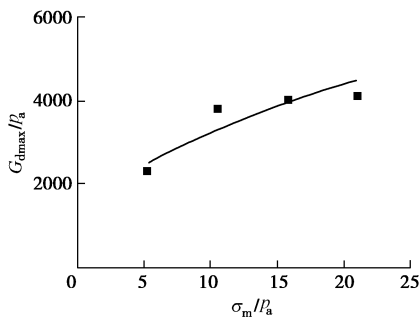


图 3 G_{dmax} 与 σ_m 关系

Fig. 3 Relationship between G_{dmax} and σ_m

修正黏弹性模型假定阻尼比随动应变满足

$$\lambda/\lambda_{max} = \frac{k_2 \bar{\gamma}_d}{1 + k_2 \bar{\gamma}_d} \quad (5)$$

式中, λ_{max} 为最大阻尼比。本文采用试验方法确定 λ_{max} , 即随着 $\bar{\gamma}_d$ 的增长, 阻尼比 λ 趋于平缓, 取其逼近常数为 λ_{max} 。

将 G_d/G_{dmax} 和 λ/λ_{max} 与归一化动剪应变 $\bar{\gamma}_d$ 的关系绘制于图 4, 5, 并分别按式 (3) 和 (5) 进行拟合。由图可知, 不同应力条件下的试验点分布在拟合曲线附近狭窄的范围内。说明堆石料的模量阻尼特性采用修正的黏弹性模型进行描述可取得较好效果。堆石料的动本构模型参数见表 3。收集文献[10, 11]中的动三轴仪试验参数列于表 3, 对比分析可知, 模型参数具有较好的可比性, 说明动力简单剪切仪的试验结果是可靠的。

表 3 动力模型参数

Table 3 Parameters of dynamic model

坝料名称	k_1	n	k_2	λ_{max}
堆石料	1210	0.43	42	0.28
堆石料 ^[10]	1242	0.42	18.5	0.22
堆石料 ^[11]	2212	0.48	39.9	0.24

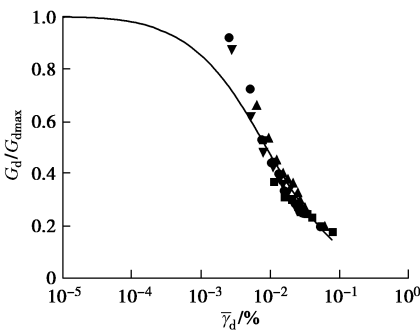


图 4 G_d/G_{dmax} 与 $\bar{\gamma}_d$ 关系

Fig. 4 Relationship between G_d/G_{dmax} and $\bar{\gamma}_d$

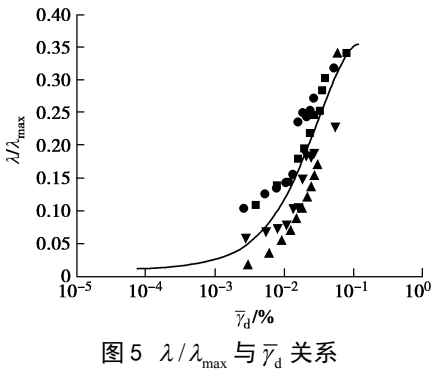


图 5 λ/λ_{max} 与 $\bar{\gamma}_d$ 关系

Fig. 5 Relationship between λ/λ_{max} and $\bar{\gamma}_d$

3 残余变形试验结果及分析

动荷载作用下堆石料的残余变形与初始围压、动应力、固结应力比及初始密度等因素密切相关。图 6, 7 为不同试验条件下, 堆石料动残余变形试验典型结果。从图中可以看出, 相同应力条件下, 体应变的振幅远小于剪应变的振幅。在相同固结应力和动应力比条件下, 围压越大, 动剪应变越大, 残余剪应变和残余体应变也越大。相同的初始应力条件下, 动应力比越大, 剪应变幅值越大, 试样受到的扰动越大, 相应的残余剪应变和残余体应变也越大。

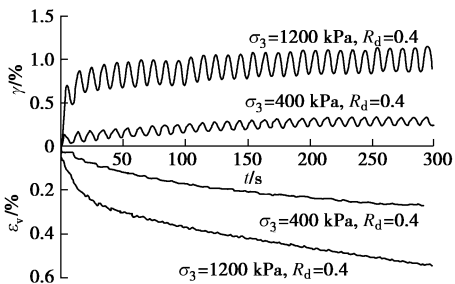


图 6 不同围压下的试验曲线

Fig. 6 Test curves under different σ_3

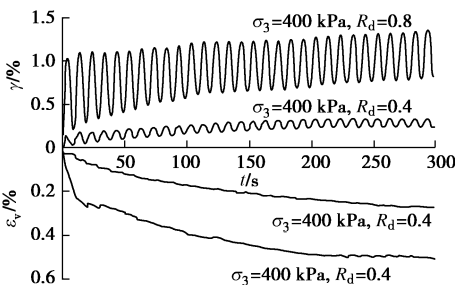


图 7 不同动应力比下的试验曲线

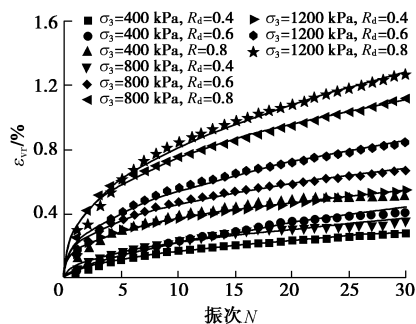
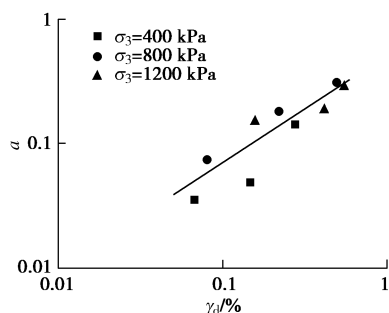
Fig. 7 Test curves under different R_d

3.1 残余体应变

图 8 为堆石料残余体应变与振次的关系曲线。如图所示, 在不同的应力条件下, 残余体应变随振次的发展基本符合幂函数规律。建议采用下式描述:

$$\epsilon_{vr} = aN^b \quad (6)$$

式中, a , b 为模型参数。

图8 ε_{vr} 与 N 关系Fig. 8 Relationship between ε_{vr} and N 图9 a 与 γ_d 关系Fig. 9 Relationship between a and γ_d

模型参数 a 可近似看作试样在第一次循环荷载作用下产生的残余体应变。动剪应变 γ_d 一般开始几周较大, 后期迅速收敛, 在整理资料时, 采用第 10 次循环的动剪应变幅值。将模型参数 a 与动剪应变 γ_d 绘制于双对数坐标系下, 试验点大体上集中在一条直线上, 见图 9。基于上述分析, 建议采用下式描述模型参数 a 与动剪应变幅值 γ_d 的关系:

$$a = c_1 \gamma_d^{c_2} \quad (7)$$

模型参数 b 是一个与残余体应变的累积速率相关的参数。在相同的剪应变作用下, 围压较高时, 堆石料颗粒在循环剪切过程中产生的棱角颗粒破碎越显著, 体积收缩越明显。因此, 对模型参数 b 用 $(\sigma_m / p_a)^n$ 进行归一化处理, 并绘制于双对数坐标系下, 见图 10。如图所示, 归一化的 b 与动剪应变 γ_d 也基本满足幂函数关系, 即

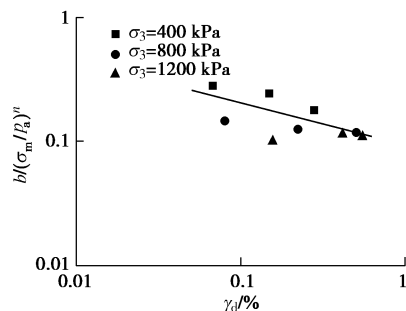
$$b = c_3 \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \gamma_d^{-c_4} \quad (8)$$

式中, $\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 为平均主应力, p_a 为大气压力, n 为最大剪切模量幂次。 c_1, c_2, c_3, c_4 为模型参数, 根据残余变形试验结果拟合确定, 见表 4。

表4 残余体应变参数

Table 4 Parameters of residual volume strain

坝料名称	c_1	c_2	c_3	c_4
堆石料	0.498	0.848	0.092	0.335
堆石料 ^[15]	0.880	1.144	0.091	0.273

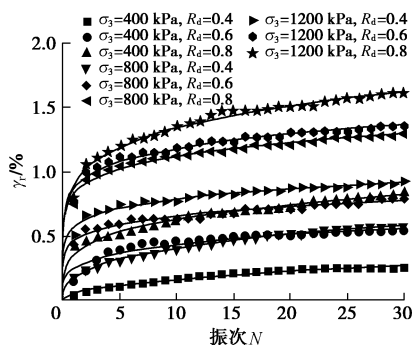
图10 $b/(\sigma_m/p_a)^n$ 与 γ_d 关系Fig. 10 Relationship between $b/(\sigma_m/p_a)^n$ and γ_d

3.2 残余剪应变

图 11 为堆石料残余剪应变与振次的关系曲线。如图所示, 在不同的应力条件下, 残余剪应变随振次的发展基本符合幂函数规律。建议采用下式描述:

$$\gamma_r = cN^d \quad (9)$$

式中, c, d 为模型参数。

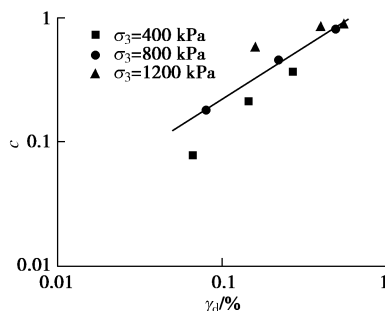
图11 γ_r 与 N 关系Fig. 11 Relationship between γ_r and N

将模型参数 c 与动剪应变 γ_d , 用 $(\sigma_m / p_a)^n$ 归一化的参数 d 与动剪应变 γ_d , 分别绘制于图 12 和图 13。如图所示, 在双对数坐标系下, 试验点都基本集中在一条直线上。因此, 采用下式描述模型参数 c 和 d 与动剪应变 γ_d 的关系:

$$c = c_5 \gamma_d^{c_6} \quad (10)$$

$$d = c_7 \left(\frac{\sigma_m}{p_a} \right)^n \gamma_d^{-c_8} \quad (11)$$

式中, c_5, c_6, c_7, c_8 为模型参数, 根据残余变形试验结果拟合确定, 见表 5。

图12 c 与 γ_d 关系Fig. 12 Relationship between c and γ_d

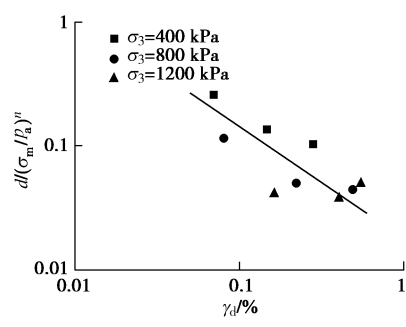


图 13 $d/(\sigma_m/p_a)^n$ 与 γ_d 关系

Fig. 13 Relationship between $d/(\sigma_m/p_a)^n$ and γ_d

表 5 残余剪应变参数

Table 5 Parameters of residual shear strain

坝料名称	c_5	c_6	c_7	c_8
堆石料	1.534	0.839	0.018	0.899
堆石料 ^[15]	1.727	1.189	0.014	0.680

4 残余变形模型验证

考虑到上述模型是根据一组试验结果整理所得,为进一步考虑固结比的影响,验证模型的适应性,本文收集了糯扎渡堆石料的试验结果^[15]进行了对比验证。

图 14 分别是固结比为 1.5 和 2.5 时残余体应变随振次的累积曲线。如图所示,采用幂函数拟合效果较好。将模型参数 a 和 b 与 γ_d 点绘于双对数坐标系下(图 15, 16),分别采用式(7)和(8)的形式进行拟合,拟合结果较为理想。模型参数见表 4。

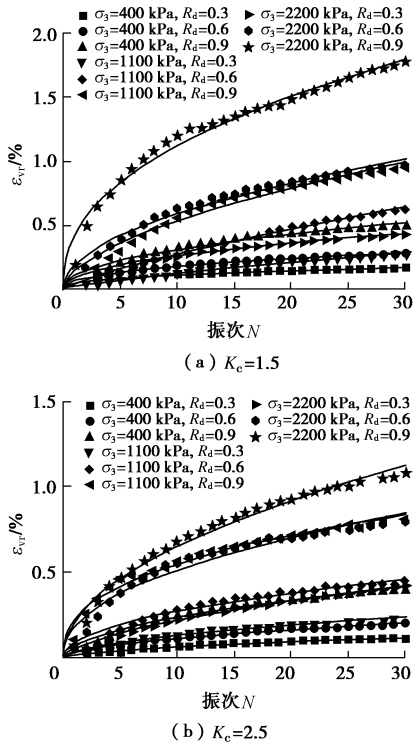


图 14 ϵ_{vr} 与 N 关系

Fig. 14 Relationship between ϵ_{vr} and N

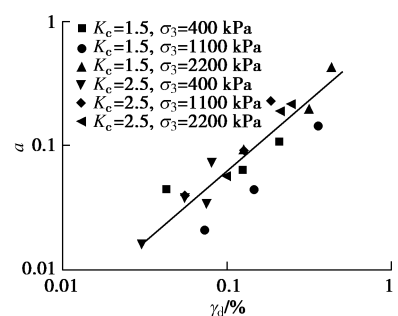


图 15 a 与 γ_d 关系

Fig. 15 Relationship between a and γ_d

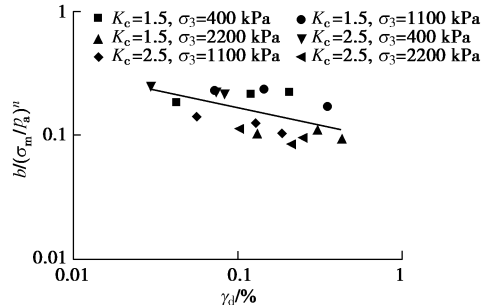


图 16 $b/(\sigma_m/p_a)^n$ 与 γ_d 关系

Fig. 16 Relationship between $b/(\sigma_m/p_a)^n$ and γ_d

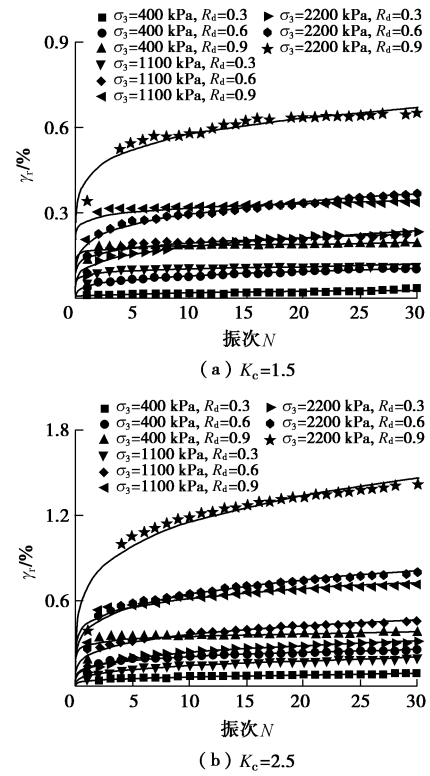


图 17 γ_r 与 N 关系

Fig. 17 Relationship between γ_r and N

残余剪应变随振次变化的试验曲线如图 17 所示,采用式(11)拟合效果较好。根据以往的研究成果^[8],固结应力比对残余剪应变的影响较大。本文采用 $(K_c - 1)^n$ 对模型参数 c 进行归一化,将归一化后的模型参数与动剪应变 γ_d 绘制于双对数坐标系下(图 18),

试验点大体上集中在一条直线上。因此,模型参数 c 与动剪应变 γ_d 的关系应修正为

$$c = c_5 \gamma_d^{c_6} (K_c - 1)^{n_k} \quad (12)$$

式中, n_k 为固结应力比的影响因子,通过对试验资料的回归分析,其最优拟合结果与最大动剪切模量的幂次较为接近,建议直接取为 n 。

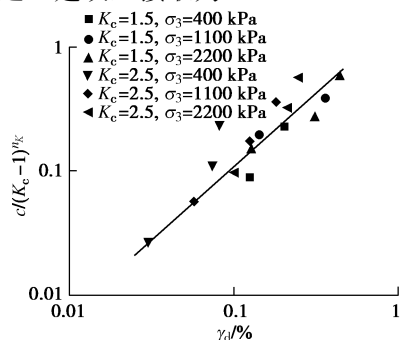


图 18 $c/(K_c - 1)^{n_k}$ 与 γ_d 关系

Fig. 18 Relationship between $c/(K_c - 1)^{n_k}$ and γ_d

采用公式 (11) 拟合模型参数 d 与动剪应变的关系, 见图 19。可以看出, 拟合效果较为理想。模型参数的拟合结果见表 5。

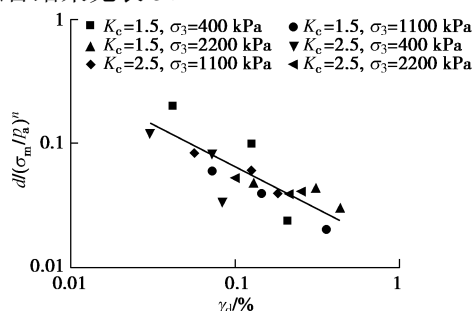


图 19 $d/(\sigma_m / p_a)^n$ 与 γ_d 关系

Fig. 19 Relationship between $d/(\sigma_m / p_a)^n$ and γ_d

综上, 采用建议的模型对糯扎渡堆石料残余变形试验结果进行分析, 参数拟合度较高。表明本文建议的公式能较好地反映不同试样的动力永久变形特性。

本文提出的残余变形模型共有 8 个参数, 均可通过动力排水剪切试验直接获得。与动三轴仪试验^[16]结果对比分析, 试验曲线规律基本一致, 模型参数较稳定 (表 4 和 5), 说明采用动力简单剪切仪进行动力残余变形试验是可行的。值得注意的是, 对于式 (8) 和 (11), 反映残余变形发展速率的模型参数 b 和 d 与动剪应变的拟合过程中, 幂次 c_4 和 c_8 前均带有负号。即随着动剪应变的发展, 残余变形的累积速率趋缓。此时, 在动荷载作用下, 堆石料已被振动的足够密实, 继续施加动荷载, 残余变形有收敛趋势。表明, 本文建立的模型适用于残余变形收敛的情况。

5 结 语

利用自行研制的微机控制电液伺服粗粒土静动力

简单剪切仪研究了堆石料的动力变形特性。堆石料的动应力 - 应变关系与动剪应变密切相关。动剪模量随剪应变的增加发生衰减, 阻尼比则随剪应变增加而增大。修正的黏弹性本构模型可以较好地描述堆石料的模量阻尼特性。

通过分析动残余变形试验结果, 发现围压和动应力比较高时, 用沈珠江半对数规律拟合残余应变与振次的关系将造成较大误差。本文采用幂函数描述残余应变随振动次数的累积变化取得了较好的效果, 并建立了以平均主应力、固结比、动剪应变为自变量的残余变形计算模型。本文提出的模型试验参数拟合度较高, 可为强震区超高堆石坝的抗震研究提供依据。

参考文献:

- [1] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 59 - 65. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [2] 赵剑明, 刘小生, 杨玉生, 等. 高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2254 - 2261. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, YANG Yu-sheng, et al. Criteria for seismic safety evaluation and maximum aseismic capability of high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2254 - 2261. (in Chinese))
- [3] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 6: 603 - 624.
- [4] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水电科学, 1996, 6(2): 143 - 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock material under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996, 6(2): 143 - 150. (in Chinese))
- [5] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001(8): 20 - 25. (KONG Xian-jing, LOU Shu-lian, ZOU De-gao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of rockfill material for dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(8): 20 - 25. (in Chinese))
- [6] 刘汉龙, 杨 贵, 陈育民. 筑坝反滤料动剪切模量和阻尼比影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2030 - 2034, 2039. (LIU Han-long, YANG Gui, CHEN Yu-min.

- Experimental study of factors influencing dynamic shear modulus and damping ratio of dam inverted filler[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(7): 2030 - 2034, 2039. (in Chinese))
- [7] 王昆耀, 常亚屏, 陈 宁. 往返荷载下粗粒土的残余变形特性[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(3): 48 - 53. (WANG Kun-yao, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Residual deformation characteristics of coarse-grained soils under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(3): 48 - 53. (in Chinese))
- [8] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 808 - 812. (ZOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 808 - 812. (in Chinese))
- [9] 凌 华, 傅 华, 蔡正银, 等. 坝料动残余变形特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, **38**(5): 532 - 537. (LING Hua, FU Hua, CAI Zheng-yin, et al. Experimental study on dynamic residual deformation characteristics of dam materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, **38**(5): 532 - 537. (in Chinese))
- [10] 朱 晟, 周建波. 粗粒筑坝材料的动力变形特性[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1375 - 1380. (ZHU Sheng, ZHOU Jian-bo. Deformation behavior of coarse grained materials under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1375 - 1380. (in Chinese))
- [11] 于玉贞, 刘治龙, 孙 逊, 等. 面板堆石坝筑坝材料动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(4): 909 - 914. (YU Yu-zhen, LIU Zhi-long, SUN Xun, et al. Experimental study of dynamic properties of materials of a faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 909 - 914. (in Chinese))
- [12] 傅 华, 韩华强, 凌 华, 等. 堆石料动永久变形特性试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, **34**(增刊 1): 460 - 468. (FU Hua, HAN Hua-qiang, LING Hua, et al. Experimental study on dynamic permanent deformation of rockfill material[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, **34**(S1): 460 - 468. (in Chinese))
- [13] 迟世春, 吕小龙, 贾宇峰. 堆石料的动力残余应变模型[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 370 - 376. (CHI Shi-chun, LÜ Xiao-long, JIA Yu-feng. Model for dynamic residual strain behavior of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 370 - 376. (in Chinese))
- [14] 王庭博, 傅中志, 陈生水, 等. 堆石料动力残余应变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1399 - 1406. (WANG Ting-bo, FU Zhong-zhi, CHEN Sheng-shui, et al. Residual deformation model for rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1399 - 1406. (in Chinese))
- [15] 李国英. 糯扎渡水电站心墙堆石坝坝料动力特性试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (LI Guo-ying. Study on dynamic characteristics of materials in Nuozhadu core wall rockfill dam[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))

勘 误

发表于本刊2018年第8期短文栏目的“水平地震作用下双级加筋土挡墙格栅应变及破裂面分析”一文(作者:蔡晓光,李思汉,黄鑫)有如下4处错误:

- (1) 第1530页图6的中英文图名分别应改为“输入地震动时程”和“Input earthquake waves”。
- (2) 第5页3.2(1)潜在破裂面中,“ $\varphi=38^\circ$ ”应改为“ $\varphi=41^\circ$ ”,“ $D_1=43.9\text{ cm}$ ”应改为“ $D_1=41.02\text{ cm}$ ”。
- (3) 第1533页3.2(2)潜在破裂面计算方法对比中,“破裂面位置为自变量 x ,墙高为因变量 y ”应改为“破裂面位置为因变量 x ,墙高为自变量 y ”。
- (4) 第1533页3.2(2)中破裂面计算公式应改为

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{3h_u + D + d}{h_l} y, \quad y \in (0, h_l), \\ x &= \frac{D}{h_u} y + B, \quad y \in (h_l, h_l + h_u), \\ B &= \frac{D(h_u - h_l) + h_u d + 0.3h_u^2}{h_u} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

特此更正,并向读者致歉。

(本刊编辑部)