

DOI: 10.11779/CJGE201608006

堆石料动力残余应变模型研究

王庭博^{1, 2}, 傅中志^{2, 3}, 陈生水^{2, 3}, 韩华强^{2, 3}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 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: 采用大型静动三轴压缩试验仪, 对某面板堆石坝筑坝材料进行了动残余变形试验, 研究了砂砾石料和开挖料在循环荷载作用下的残余变形特性及其影响因素。试验资料表明, 动荷载作用下第一次循环振动诱发的残余剪应变最大, 随着振次增长, 剪应变持续增加, 在试验设定的振次内, 未出现收敛趋势。与之不同, 残余体应变在循环荷载作用下有明显的收敛趋势。基于试验结果建立了残余变形与循环振动周次和动剪应变振幅的关系, 提出了计算模型。模型共8个参数, 均可通过动三轴试验确定, 能较好地反映残余应变发展规律。

关键词: 堆石料; 循环荷载; 残余剪应变; 残余体应变

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)08-1399-08

作者简介: 王庭博(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事高土石坝方面的研究工作。E-mail: 1310176@tongji.edu.cn。

Residual deformation model for rock-fill materials

WANG Ting-bo^{1, 2}, FU Zhong-zhi^{2, 3}, CHEN Sheng-shui^{2, 3}, HAN Hua-qiang^{2, 3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: Large scale triaxial shear tests on rock-fill materials are performed to study the residual deformation behaviors of rock-fill materials by using the large-scale triaxial apparatus. The characteristics of residual deformation of cushion material, excavated material and main rock-fill with two different densities are the focuses of this study. Based on enough test results, it is revealed that the generated shear strain after the application of the first cycle of loading is the main part of the residual shear strain, and its development relates to the accumulation rate of the residual shear strain as the loading cycle increases. In the set test vibration times, the convergence trend does not appear. In contrast, the rock-fill materials have asymptotic volumetric behaviors under cyclic loading. On the basis of test data, a residual deformation model with eight parameters is proposed, which can well reflect the development of the residual strain. And the parameters can be calibrated by dynamic triaxial tests.

Key words: rock-fill material; cyclic loading; residual shear strain; residual volumetric strain

0 引言

土石坝的震害调研资料表明, 坝体的地震裂缝、滑坡, 面板和接缝等防渗系统的拉压和剪切破坏等均与堆石体的地震残余变形有关^[1-2]。汶川地震中, 紫坪铺面板堆石坝坝顶防浪墙沉降68.4 cm, 加上防浪墙与坝顶堆石料之间的脱空值, 坝顶沉降达到90~100 cm^[3]。碧口心墙堆石坝上游坝壳最大沉降量24.9 cm, 坝体整体向内收缩。自汶川大地震后, 堆石体的地震残余变形受到重视, 陈生水等建议将高土石坝的地震残余变形作为极限抗震能力评价的重要内容, 并在分析震害案例的基础上分别针对面板坝和心墙坝提出安全评价标准^[4-5]。

国内外有关高土石坝地震残余变形的计算方法有

滑体变形分析^[6]、整体变形分析^[7]和弹塑性分析3种方法。Newmark最早建议了基于刚塑性假定的滑块位移分析法, 通过对滑块加速度和屈服加速度差值的积分求解假定滑动体的地震位移。基于Newmark滑块原理, Markdisi等^[8-9]进行了改进, 提出将整个土石坝作为弹性体考虑, 运用有限单元法计算坝坡的地震滑移量。但Newmark滑体变形分析法忽略了竖向加速度的影响^[10], 且由于地震作用中材料抗剪强度会随超静孔隙水压力的产生而降低^[11], 采用刚塑性假定与实际情

基金项目: 国家自然科学基金项目(51539006, 51379130); 水利公益性行业科研专项经费项目(201501035); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y314011, Y315005)

收稿日期: 2015-07-24

况不符, 计算结果不可靠。弹塑性分析法的核心是筑坝材料的弹塑性模型^[12-14], 由于弹塑性模型可以直接模拟残余应变积累, 故可以直接计算得到坝体的残余变形。该方法理论上比较严密, 但是计算过程中通常存在加卸载判断和收敛性问题, 且本构模型参数确定较为复杂, 工程应用较少^[15]。

随着数值计算技术的发展, 基于连续介质力学理论的整体变形分析法在土石坝等土工建筑物地震永久变形分析中得到了广泛应用^[16]。整体变形分析方法是在一定初始应力条件下, 施加一定大小的循环应力, 得到在一定周数时产生的残余应变, 借取不同途径应用于岩土体的变形分析中^[17]。沈珠江等^[18]对新疆吉林台面板堆石坝的灰岩主堆石和垫层两种坝料开展动力试验, 提出了描述残余变形与振次关系的半对数型永久变形模型。邹德高等^[19]应用自行研制的高精度中型动三轴仪, 对某筑坝堆石料的动力残余变形特性进行试验研究, 着重研究了应力水平对残余剪切变形的影响, 并对沈珠江计算模型进行了改进和验证。朱晟等^[20]结合室内大型动三轴试验资料, 对粗粒料的动力变形特性进行研究, 认为粗粒料的动残余变形特性与初始密度、静应力状态、动荷载、振动持续时间等因素密切相关, 在沈珠江残余变形模型基础上, 建立了考虑初始固结围压影响的粗粒料残余变形与动剪应力之间的关系。

沈珠江残余变形模型提出于 20 世纪 90 年代, 在中国土石坝地震残余变形计算中得到了广泛应用^[19]。但近年来积累的大量试验结果表明^[21-23], 该模型中残余变形随振次的对数变化关系有时并不能很好地模拟堆石料的残余变形特性, 特别是当围压和动应力比较大时模型与试验结果偏离较大。此外, 半对数型残余体变模型不能模拟堆石料体变随振次增加趋于收敛的变化特点, 在振动次数较大时, 会高估堆石体的残余体积变形。本文对某面板坝主要筑坝材料开展大型振动三轴排水试验, 研究堆石料的振动残余变形特性及其影响因素, 提出一个新的残余变形计算模型。

1 试验简介

1.1 试验设备

试验研究所采用的设备是南京水利科学研究院自行研制的高土石坝堆石料抗震特性多功能试验仪。其最大轴向静荷载为 1500 kN(3 档: 300, 800, 1500 kN), 最大轴向动荷载为 500 kN, 最大周围压力为 4 MPa, 最大轴向行程为 210 mm, 动荷载频率 0.01~5 Hz, 动荷载波形有正弦波、三角波和矩形波等。

1.2 试样制备

试验的石料采用某混凝土面板堆石坝筑坝堆石

料, 分别记为堆石料 I、堆石料 II 和堆石料 III。堆石料 I 和堆石料 II 为砂砾石料, 岩性以中细砂岩为主; 堆石料 III 为爆破开挖料, 系弱风化砂岩和弱风化板岩的混合料 (质量比为 7:3)。试验用料级配采用等量替代法进行缩制, 试验最大粒径为 60 mm, 3 种试料的颗粒组成见表 1。

试样尺寸为 $\Phi 300 \times 700$ mm, 分 10 层, 每层按照试验级配配料, 搅拌均匀后装入成型筒内, 每层用表面振动器振实至预定干密度。在试样底部充水, 成型筒外抽气, 使试样逐渐饱和。饱和后逐级施加固压和轴向压力直至试验预定压力和固结应力比, 对试样进行固结。

表 1 试样颗粒组成

Table 1 Grain composition of samples

(%)

试样名称	颗粒组成/%				
	60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm
堆石料 I	10	19	16	13	42
堆石料 II	16	24	18	15	27
堆石料 III	18.8	25.4	17.3	13.6	24.9

1.3 试验方案

试验参照《土工试验规程》^[24]进行, 采用计算机对试验数据进行采集和处理。先使试验在特定固结应力比下固结, 然后对每个试样控制一定的动应力进行试验, 激振波形采用正弦波, 振动频率为 0.1 Hz, 对每个试样进行 30 次循环荷载试验, 记录每个荷载循环的轴向变形量 Δh_d 和体积变形量 ΔV_d 。具体试验方案见表 2。

表 2 动力残余变形试验方案

Table 2 Schemes of residual deformation tests

材料	K_c	$R_d = \frac{\sigma_d}{\sigma_3}$	围压 σ_3 /MPa	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)
堆石料 I	—	—	—	2.25
堆石料 II	1.5	0.3, 0.5, 0.8	0.4, 0.8, 1.2,	2.20
	2.5	0.3, 0.6, 1.0	2.0, 3.0	2.26
堆石料 III	—	—	—	2.23

2 试验结果与分析

将采集的轴向动变形量 Δh_d 和排水量 ΔV_d 分别除以固结后的试样高度 H_c 和体积 V_c , 即可得到试样在动荷载作用下的轴向应变 ε_d^p 和体应变 ε_v^p 。对于同一种堆石料, 动力残余应变主要与初始围压、固结应力比、动应力以及初始密度等因素有关, 本节以试验堆石料 II ($\rho_d = 2.20$ g/cm³) 为例, 分别研究这些因素对残余应变的影响。每组试验结果曲线用三部分内容标识, 分别为围压 σ_3 , 固结应力比 K_c 和动应力比 R_d 。例如

DT2000-1.5-0.3, 分别代表试验围压 $\sigma_3 = 2000$ kPa, 固结应力比 $K_c = 1.5$, 动应力比 $R_d = 0.3$ 。

2.1 围压的影响

图 1 为不同围压下堆石料 II 轴向应变和体应变随振动持续时间的部分试验结果。从图中可以看出, 在相同固结应力比和动应力比条件下, 围压越大, 轴向应变振幅越大, 残余体应变和轴向应变也越大, 这是因为围压和动剪应力越大, 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, 体积收缩行为越明显, 相应的轴向应变也越大。

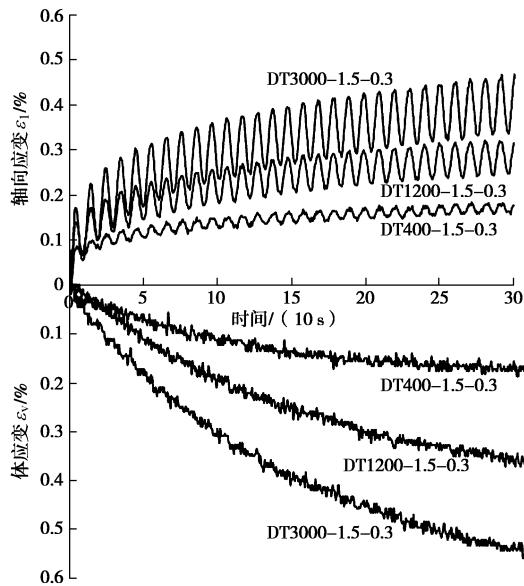


图 1 不同围压下堆石料 II 的累积应变

Fig. 1 Residual strains under different confining pressures

2.2 固结应力比的影响

图 2 为两种固结应力比下堆石料 II 累积应变的典型试验结果。相同围压下, 初始应力比越大, 动荷载作用产生的残余轴向应变越大, 材料越容易达到破坏(以轴向应变为破坏标准)。但堆石料的残余体变随着初始应力比的增加而略有减小, 这可能是因为初始应力比较大时堆石料震前较为密实, 动荷载作用过程中产生的颗粒破碎较少。

2.3 动应力比的影响

图 3 为不同动应力比试验条件下堆石料 II 的累积应变典型试验结果。从图中可以看出, 相同初始应力状态下, 动应力越大, 轴向应变幅值越大, 试样受到的扰动越大, 相应的残余轴向应变和残余体变也越大。

2.4 密度的影响

图 4 为两种密度下堆石料 II 的累积应变典型试验结果。从图中可以看出, 材料密度越大, 动力试验产生的残余变形, 无论是轴向应变还是体应变, 均小于材料密度较小时的试验结果。残余变形小对高土石坝抗震是有利的。因此, 高土石坝施工过程中, 残余变

形集中的部位, 宜适当提高碾压标准。

另外, 无论何种试验条件下, 纵观图 1~4 的试验结果, 材料轴向应变和体应变的发展过程均可视为周期性循环应变和单调增加残余应变的合成; 且在最初几次动荷载作用下, 轴向应变和体积应变累积增长迅速, 但随着振次增加, 应变累积速率逐渐降低, 表示材料在荷载作用下发生硬化。

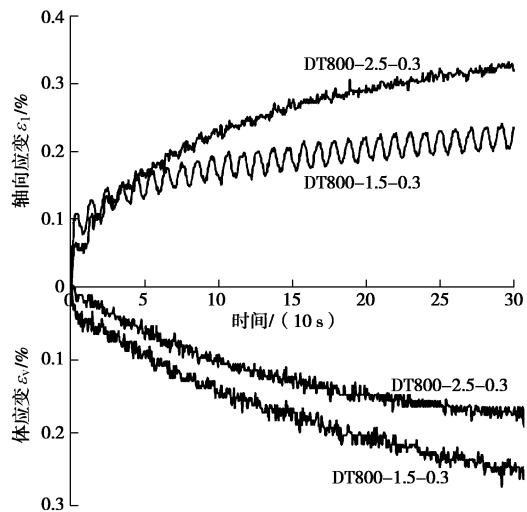


图 2 不同固结应力比的累积应变

Fig. 2 Residual strains under different K_c

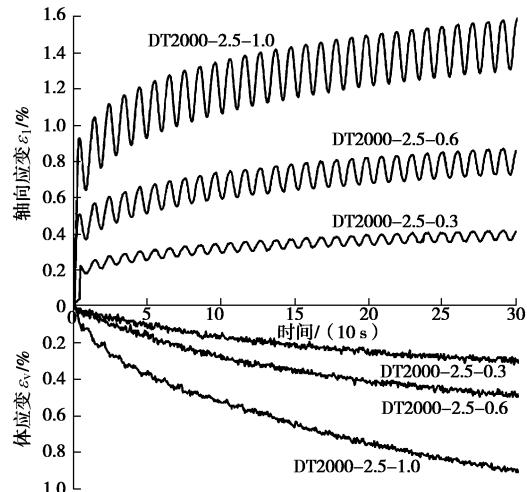


图 3 不同动应力比的累积应变

Fig. 3 Residual strains under different R_d

3 动力残余应变模型

3.1 残余剪应变

图 5,6 分别为堆石料 I 和堆石料 III 在某级围压下残余剪应变 γ^p 与振次 N 在双对数坐标下的关系曲线。残余剪应变由下式计算:

$$\gamma^p = \frac{2}{3}(\varepsilon_1^p - \varepsilon_3^p) = \varepsilon_1^p - \frac{1}{3}\varepsilon_v^p \quad . \quad (1)$$

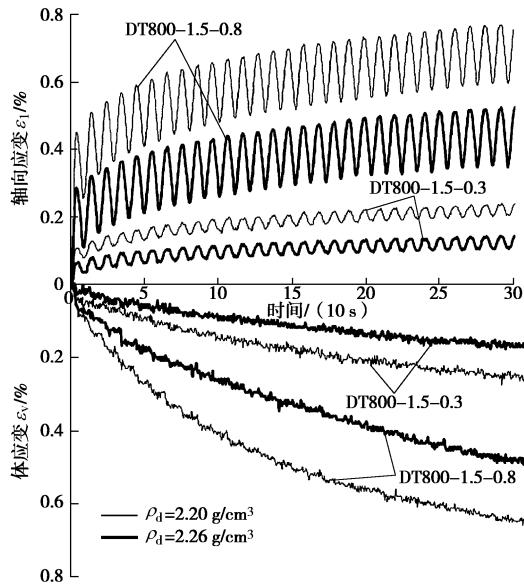
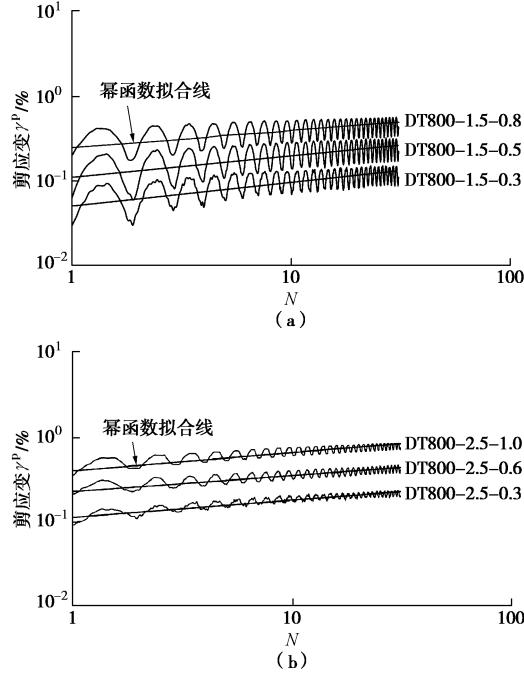


图 4 不同密度下的累积应变

Fig. 4 Residual strains under different densities

图 5 堆石料 I $\sigma_3 = 800$ kPa 时 $\gamma^p - N$ 关系曲线Fig. 5 Relationship between γ^p and N for rockfill material I ($\sigma_3 = 800$ kPa)

从图中可以看出, 不同试验条件下的试验曲线均可近似拟合成斜率和截距不同的直线。为此, 关于残余剪应变随振次的发展变化, 建议采用以下幂函数来描述:

$$\gamma^p = \gamma_1^p \cdot N^{n_\gamma} , \quad (2)$$

式中, γ_1^p 可以理解为施加第一次循环动荷载产生的残余剪应变, n_γ 是振动次数 N 的幂次, 大小与残余剪应变的累积速率有关。显然, 式(2)预测的残余剪应变是随着持续施加的动荷载始终累积增长的, 表明式(2)可以反映出在施加足够多次的动荷载作用下, 堆石料

终将发生剪切破坏这一特点。

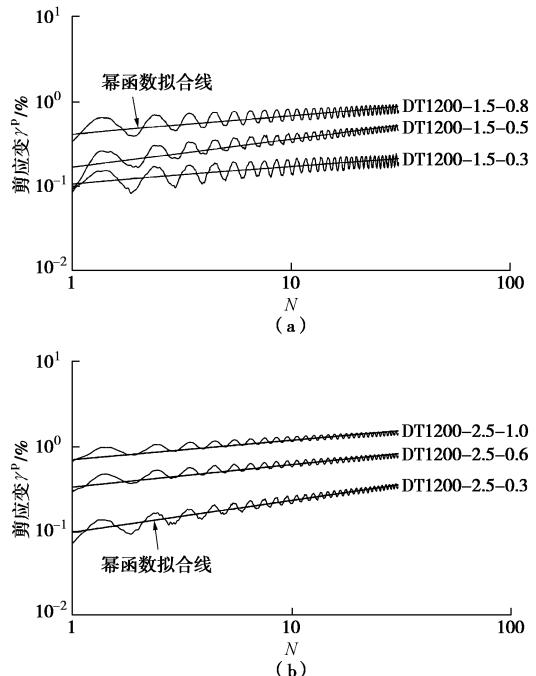
图 6 堆石料 III $\sigma_3 = 1200$ kPa 时 $\gamma^p - N$ 关系曲线Fig. 6 Relationship between γ^p and N for rockfill material III ($\sigma_3 = 1200$ kPa)

图 7(a) 中以堆石料 II 的试验结果为例, 绘制了 γ_1^p 值与动剪应变振幅 γ^c 的关系。在整理资料时, 动剪应变振幅 γ^c 取第 10 次循环之后的平均动剪应变振幅值。从图中大致可以看出: ① γ_1^p 的大小与静力状态下初始固结应力比 K_c 有关。比如在动剪应变振幅 γ^c 一样的情况下, $K_c = 2.5$ 时的 γ_1^p 值大于 $K_c = 1.5$ 时的 γ_1^p 值; ② γ_1^p 的大小与初始围压 σ_3 有关。如 K_c 值相等, 围压 σ_3 大, γ_1^p 值相对较小。

基于上述考虑, 建议采用下式描述 γ_1^p 与动剪应变振幅 γ^c 的关系:

$$\gamma_1^p = c_\gamma \cdot (\gamma^c)^{\alpha_\gamma} \cdot \frac{\eta_0}{\sqrt{p_0 / p_a}} , \quad (3)$$

式中, c_γ 和 α_γ 是两个参数, p_0 是平均正应力, p_a 是大气压力, η_0 为静力状态下的初始应力比, 由下式计算:

$$\eta_0 = \frac{\sqrt{3s_{0ij}s_{0ij}/2}}{p_0} , \quad (4)$$

其中, s_{0ij} 是偏应力张量。对式(3)中的 γ_1^p 作归一化处理, 并绘制于双对数坐标中, 试验点则大体上集中在一条直线上, 见图 7(b)。由图中拟合公式可得出参数 c_γ 和 α_γ , 数值整理于表 3。

图 8(a) 为不同动剪应变幅值 γ^c 所对应的幂次 n_γ 的值。整体上看, n_γ 随着动剪应变振幅 γ^c 的增大呈减小趋势。这说明随着动剪应变振幅 γ^c 的增大, 对试样的扰动越大, 残余变形 γ^p 的累积速率则减小。此外,

γ^c 一致的情况下, 若平均正应力 p_0 较小, 则 n_γ 值相对较小。

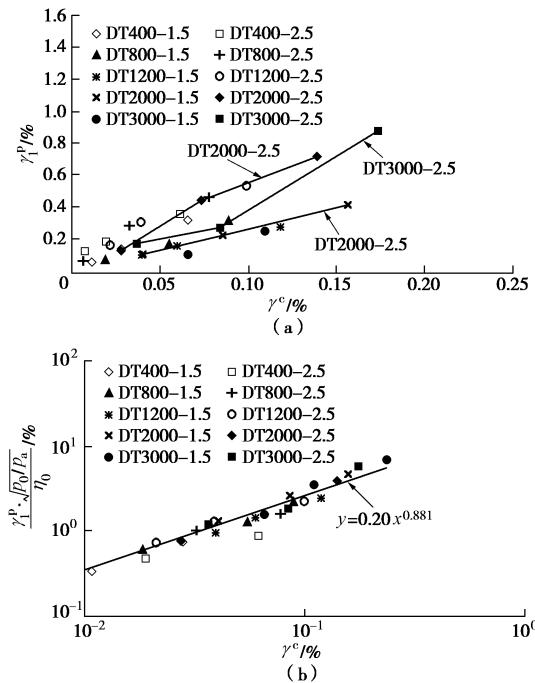


图 7 $\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$ 的堆石料 II $\gamma_i^p - \gamma^c$

Fig. 7 Relationship between γ_i^p and γ^c for rockfill material II
 $(\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3)$

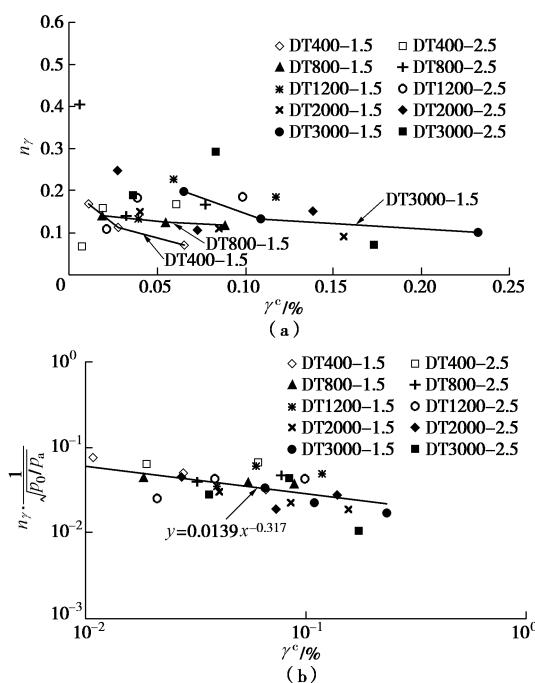


图 8 $\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$ 的堆石料 II $n_\gamma - \gamma^c$

Fig. 8 Relationship between n_γ and γ^c for rockfill material II
 $(\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3)$

基于上述分析, 建议采用下式描述 n_γ 与动剪应变振幅 γ^c 的关系:

$$n_\gamma = d_\gamma \cdot (\gamma^c)^{-\beta_\gamma} \cdot \sqrt{p_0 / p_a} \quad , \quad (5)$$

式中, d_γ 和 β_γ 是两个参数。对式(5)中的 n_γ 作归一

化处理, 并绘制于双对数坐标中, 试验点则大体上集中在一条直线上, 见图 8 (b)。由图中拟合公式可得出参数 d_γ 和 β_γ , 数值整理于表 3。

表 3 残余剪应变相关参数

Table 3 Parameters of residual shear strain

试验材料	c_γ	α_γ	d_γ	β_γ
堆石料 I	0.192	0.952	0.0225	0.262
堆石料 III	1.205	1.468	0.0151	0.434
堆石料 II	0.200	0.881	0.0139	0.317
$(\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3)$				
堆石料 II	0.167	0.976	0.0202	0.201
$(\rho_d = 2.26 \text{ g/cm}^3)$				

3.2 残余体应变

图 9 为堆石料 II 的残余体应变 ε_v^p 与循环振动周次 N 的关系曲线。与残余剪应变曲线不同, 体应变曲线在动荷载作用下的振幅明显小于剪应变的振幅, 且随着振次增加, 残余体应变具有明显的收敛趋势。因此, 建议采用下列指数函数描述残余体应变 ε_v^p 随振次 N 的累积变化:

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v^f \left[1 - \exp \left(-\frac{N}{N_v} \right) \right] \quad , \quad (6)$$

式中, ε_v^f 定义为极限残余体应变, 即在足够多次的循环荷载作用下, 材料已被振动的足够密实, 此时继续施加动荷载, 体积也不会再发生变化, 这种状态下的体积变形量可理解为体积变化的极限值。 N_v 是一个与残余体应变的累积速率有关的参数。式(6)反映了堆石料在循环荷载作用下有渐近体变的特性。

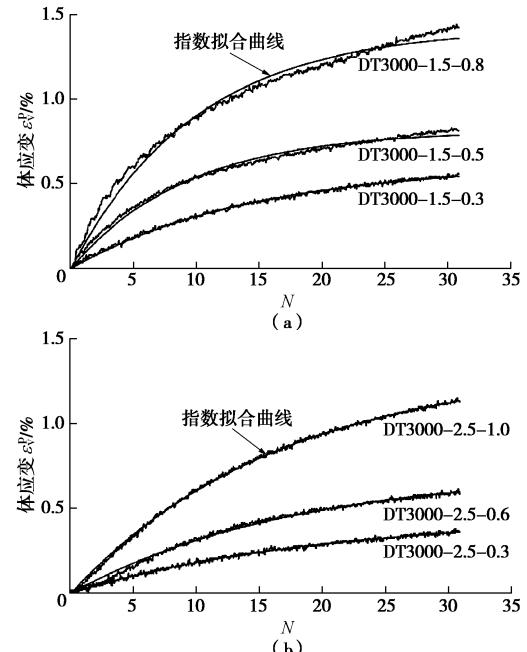


图 9 $\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$ 的堆石料 II $\varepsilon_v^p - N$ 关系曲线

Fig. 9 Relationship between ε_v^p and N for rockfill material II
 $(\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3)$

图 10 (a) 给出了试验堆石料 II 的极限残余体应变 ε_v^f 与动剪应变振幅 γ^c 的关系。从图中可以看出, 大部分试验数据点集中在某一直线附近。若重新绘制于双对数坐标中, 则试验点大致成线性分布。因此, 建议采用下列幂函数来反映极限残余体应变 ε_v^f 与动剪应变振幅 γ^c 的关系,

$$\varepsilon_v^f = c_v (\gamma^c)^{\alpha_v}, \quad (7)$$

式中, c_v 和 α_v 是两个参数, 其值整理于表 4。式 (7) 反映出, 动应变幅值 γ^c 的大小对极限残余体应变 ε_v^f 的影响显著。动应变幅值越大, 最终累积产生的体应变越大。

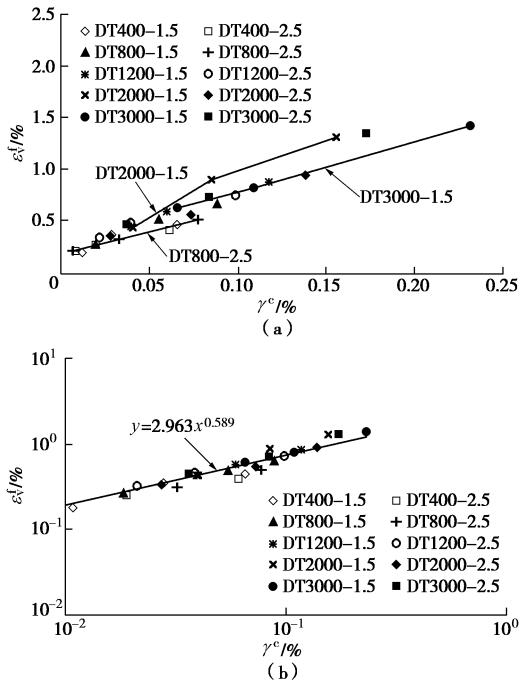


图 10 $\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$ 的堆石料 II $\varepsilon_v^f - \gamma^c$

Fig. 10 Relationship between ε_v^f and γ^c for rockfill material II ($\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$)

同样地, 图 11 (a) 给出了式 (6) 中 N_v 与动剪应变振幅 γ^c 的关系。从图中可以看出: ①整体上看, N_v 随着动剪应变幅值 γ^c 的增大呈减小趋势; ② γ^c 一致的情况下, N_v 的值随着平均正应力 p_0 的增大而增大。 N_v 值增大, 说明随着动荷载的持续施加, 体变的累积速率越来越慢。这可能与高应力状态下颗粒渐进破碎现象有关。类似式 (2) 中幂次 n_γ 的归一化处理, 并将试验数据绘制于双对数坐标中, 同样地, 试验点大体上集中在一条直线上, 见图 11 (b)。因此, 采用下式计算 N_v :

$$N_v = d_v \cdot (\gamma^c)^{-\beta_v} \cdot \sqrt{p_0 / p_a}, \quad (8)$$

式中, d_v 和 β_v 是两个参数, 其值见表 4。

3.3 模拟结果

图 12 (a)、(b) 分别为按上述残余应变模型整理的高围压或高应力比试验条件下堆石料 II 的残余剪应变和残余体变随振次 N 的变化曲线, 图中公式为按式

(2) 或式 (6) 拟合的参数表达式。图 12 (c)、(d) 为按沈珠江残余应变经验公式整理的残余应变随振次 $1+N$ 在半对数坐标系下的变化曲线, 图中公式为拟合的参数表达式。

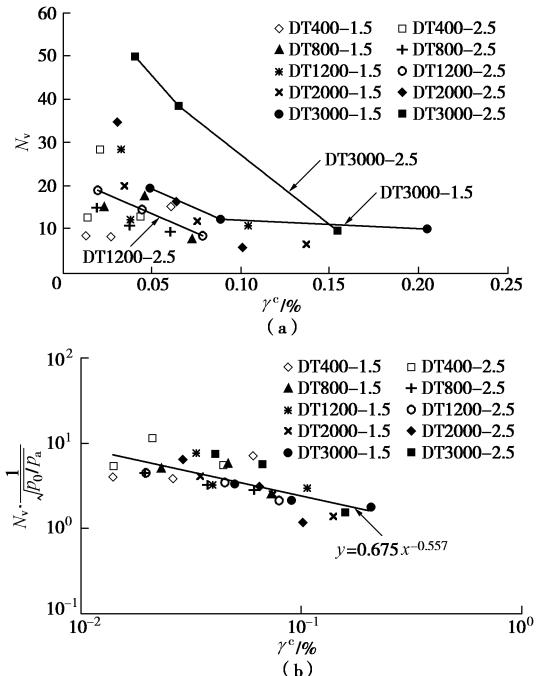
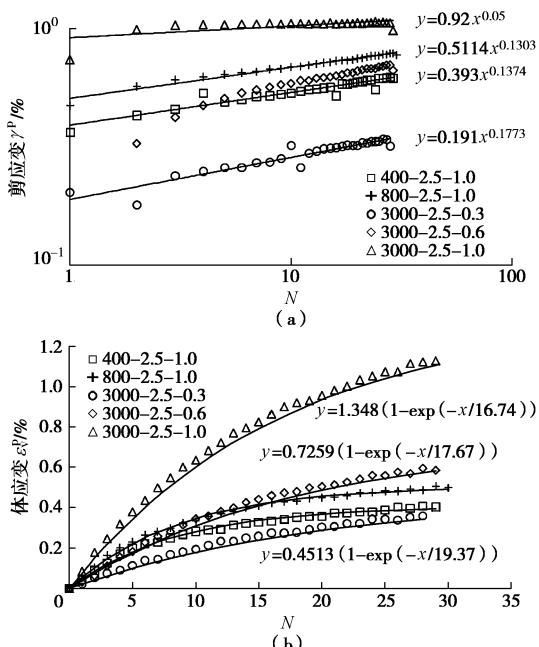


图 11 堆石料 III $N_v - \gamma^c$

Fig. 11 Relationship between N_v and γ^c for rockfill material III
表 4 残余体应变相关参数

Table 4 Parameters of the residual volumetric strain

试验材料	$c_v/\%$	α_v	d_v	β_v
堆石料 I	2.873	0.587	3.126	0.195
堆石料 III	10.165	0.871	0.675	0.557
堆石料 II ($\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$)	2.963	0.589	1.323	0.304
堆石料 II ($\rho_d = 2.26 \text{ g/cm}^3$)	2.599	0.607	2.146	0.205



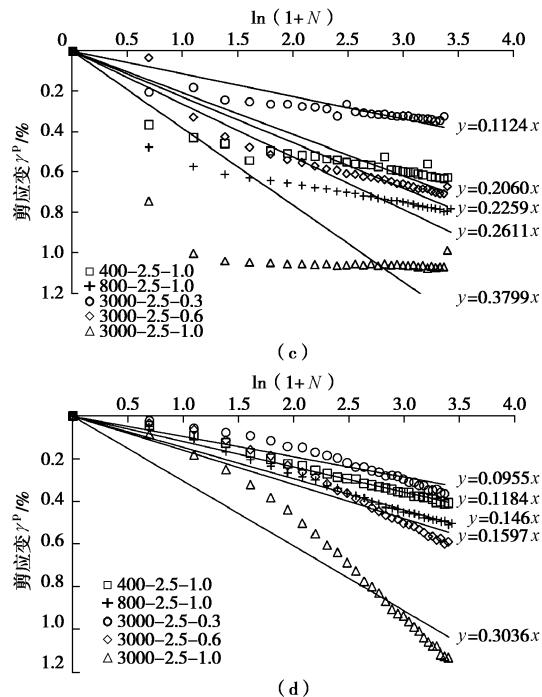


图 12 $\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$ 的堆石料 II $\varepsilon_v^p / \gamma^p - N$ 关系曲线

Fig. 12 Relationship between $\varepsilon_v^p / \gamma^p$ and N for rockfill material II ($\rho_d = 2.20 \text{ g/cm}^3$)

从图 12 (c)、(d) 中可以看出, 按沈珠江半对数经验公式整理残余应变, 体积应变 ε_v^p 初期发展慢于半对数规律, 而剪切应变 γ^p 的发展则是初期快、后期慢; 在围压和动应力比较大时, 与试验结果偏差较大。由图 12 (a)、(b) 可见, 按本文建议的残余应变模型, 在高围压和高动应力比试验条件下, 均模拟地较好。因此, 剪切应变 γ^p 的发展规律可以按幂函数式 (2) 描述, 而体积应变 ε_v^p 则可以按指数函数式 (6) 描述。

4 结 论

利用高土石坝堆石料抗震特性多功能试验仪研究了堆石料的残余变形特性, 分析了围压、固结应力比、动应力比和密度等因素对残余变形特性的影响, 分别建立了残余剪应变和残余体应变与循环振动周次和动剪应变的计算关系表达式。得到的主要结论如下:

(1) 密度对残余变形的影响较大。材料越密实, 振动荷载作用下, 残余变形越小。因此, 在坝体填筑施工过程中, 堆石料的填筑密实度应该是一个严格控制的施工质量指标。

(2) 在施加第一次循环振动荷载下产生的残余剪应变最大, 其后随着振次增长, 大小变化与应变累积速率有关。

(3) 残余剪切变形随振动次数的累积变化可以用幂函数来描述; 而残余体应变与振次的变化关系可以用指数函数来反映。

(4) 残余体应变在循环荷载作用下有渐近体变

值, 并不会随荷载的持续施加而无限增大。

(5) 本文提出的残余变形计算模型共有4组计算参数, 均可通过动三轴排水剪切试验确定, 能更好地模拟残余应变发展规律。

参 考 文 献:

- [1] 陈生水. 土石坝地震安全问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (CHEN Sheng-shui. Research on seismic safety of earth rockfill dam[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 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))
- [4] 陈生水, 方绪顺, 钱亚俊. 高土石坝地震安全评价及抗震设计思考[J]. 水利水运工程学报, 2011(1): 17 - 21. (CHEN Sheng-shui, FANG Xu-shun, QIAN Ya-jun. Thoughts on safety assessment and earthquake-resistance for high earth-rock dams[J]. Hydro-science and Engineering, 2011(1): 17 - 21. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] NEWMARK N M. Effects of earthquake on dams and embankments[J]. Géotechnique, 1965, 15(2): 139 - 160.
- [7] SERFF N, SEED H B, MAKDISI F I, et al. Earthquake induced deformation of earth dams[R]. Berkeley: University of California, 1976.
- [8] MAKDISI F I, SEED H B. Simplified procedure for evaluating embankment response[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(12): 1427 - 1434.
- [9] MAKDISI F I, SEED H B. Simplified procedure for estimating

- dam and embankment earthquake-induced deformation[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, **104**(7): 849 - 867.
- [10] SRBULOV M. Geotechnical earthquake engineering, simplified analyses with case studies and examples[M]. Springer, 2008, **11**(30): 1341 - 1344.
- [11] SEED H B. Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams[J]. Géotechnique, 1979, **29**(3): 215 - 263.
- [12] FU Zhong-zhi, CHEN Sheng-shui, PENG Cheng. Modeling cyclic behavior of rockfill materials in a framework of generalized plasticity[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2014, **14**(2): 191 - 204.
- [13] 李万红, 汪闻韶. 无粘性土非线性动力剪应变模型[J]. 水利学报, 1993(9) : 11 - 17. (LI Wan-hong, WANG Wen-shao. A model for cyclic shear strain of cohesionless soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(9): 11 - 17. (in Chinese))
- [14] 赵剑明, 汪闻韶, 常亚屏, 等. 高面板坝三维真非线性地震反应分析方法及模型试验验证[J]. 水利学报, 2003(9): 12 - 18. (ZHAO Jian-ming, WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping, et al. 3-D authentic nonlinear method for dynamic analysis of high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(9): 12 - 18. (in Chinese))
- [15] 刘汉龙. 土动力学与土工抗震研究进展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(4): 148 - 164. (LIU Han-long. A review of recent advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(4): 148 - 164. (in Chinese))
- [16] 李湛, 栾茂田. 土石坝地震永久变形计算方法[J]. 水力发电学报, 2009, **28**(4): 63 - 70. (LI Zhan, LUAN Mao-tian. Computation method for seismically-induced permanent deformation of earth-rock dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, **28**(4): 63 - 70. (in Chinese))
- [17] 刘汉龙. 土体地震永久变形分析述评[J]. 水利水电科技进展, 1995, **15**(4): 23 - 29. (LIU Han-long. Review on the seismically permanent deformation of soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1995, **15**(4): 23 - 29. (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(2): 143 - 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock material under cyclicloading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996, **6**(2): 143 - 150. (in Chinese))
- [19] 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): 807 - 812. (ZHOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 807 - 812. (in Chinese))
- [20] 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 Jiang-bo. Deformation behavior of coarse grained materials under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1375 - 1380. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 董威信, 孙书伟, 于玉贞, 等. 堆石料动力特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 296 - 301. (DONG Wei-xin, SUN Shu-Wei, YU Yu-zhen, et al. Large scale triaxial shear test on dynamic properties of rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 296 - 301. (in Chinese))
- [23] 巩斯熠, 黄斌. 堆石料动力残余变形特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(1): 47 - 51. (GONG Si-yi, HUANG Bin. Experimental study on the dynamic residual deformation property of rock-fill materials[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, **30**(1): 47 - 51. (in Chinese))
- [24] SL237—1999 土工试验规程 [S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))