

# 加筋堆石料的动残余变形特性试验研究

刘汉龙<sup>1,2</sup>, 林永亮<sup>1,2</sup>, 凌 华<sup>3</sup>, 傅 华<sup>3</sup>

(1. 河海大学岩土力学及堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 加筋措施在土石坝的抗震加固中得到了较为广泛的运用。采用高精度的大型动力三轴仪, 对两河口土石坝加筋堆石料的动力残余变形特性进行了试验研究, 探讨了围压、循环荷载条件及加筋间距等对堆石料动残余变形的影响。试验结果表明: 在循环荷载作用下, 加筋堆石料与素堆石料的残余变形的发展规律基本一致, 但加筋后堆石料的残余变形变小, 且随加筋层数增加残余变形的降低愈明显。因此, 扩大加筋范围、减少加筋间距是减小地震永久变形, 提高抗震稳定性的有效工程措施。还根据试验结果, 初步探讨了加筋对动残余变形影响的机理。

**关键词:** 残余变形; 加筋堆石料; 三轴试验; 循环荷载

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2010)09-1418-04

**作者简介:** 刘汉龙(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与地基基础工程教学与科研工作。E-mail: [hliuhhu@163.com](mailto:hliuhhu@163.com)。

## Residual deformation behaviors of reinforced rock-fill materials

LIU Han-long<sup>1,2</sup>, LIN Yong-liang<sup>1,2</sup>, LING Hua<sup>3</sup>, FU Hua<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.

Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The reinforcement technology is widely used in rock-fill dams in high seismic hazard zones. The evaluation of reinforcement on deformation and safety is concerned, and it is one of the major study objectives in rock-fill engineering. The residual deformation behaviors of reinforced rock-fill materials are experimentally studies by use of a triaxial apparatus. The effects of intervals of reinforcement layers, confining pressures and conditions of cyclic loading on the residual deformation are analyzed. The results show that reinforcement improves the residual deformation behaviors of rock-fill materials. Both the residual shear strain and the residual volumetric strain are deduced. Based on the test results, the mechanism of the influences of reinforcement on the residual deformation is proposed tentatively.

**Key words:** residual deformation; reinforced rock-fill material; triaxial test; cyclic loading

## 0 引 言

土石坝震害实例及模型试验结果表明: 地震荷载作用下堆石体颗粒之间咬合力降低, 由于“鞭鞘”效应的存在, 坝顶区域土体易发生松动, 有可能出现纵、横向裂缝, 严重时会导致大面积滑坡、溃坝等灾难的发生<sup>[1-2]</sup>。采取加筋措施具有施工简便, 价格低廉, 防止表层堆石体松动或滑落, 显著改善坝体整体稳定性等优点, 近年来在堆石坝抗震措施中得到了广泛地应用。1986年 Cascade 首次在土石坝上铺设土工格栅进行坝顶加固, 青峰岭水库<sup>[3]</sup>、冶勒沥青混凝土心墙堆石坝及拟建的长河坝心墙堆石坝<sup>[4]</sup>等均采用了堆石加筋措施进行坝顶抗震加固。

目前关于加筋堆石料的力学特性研究主要集中在

静力特性方面, 如文献[5~8]等采用大型三轴仪对加筋碎石土或堆石料的强度和变形特性进行了试验研究。土石坝的裂缝、震陷、滑坡等与地震的残余变形有关<sup>[9]</sup>, 本文采用大型动力三轴试验仪对加筋堆石料的动残余变形特性进行了试验研究。

## 1 试验方法

针对两河口土石坝堆石III区板岩堆石料, 在南京水利科学研究院大型动静三轴仪上开展了动残余

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50639050); 国家杰出青年科学基金项目(50825901); 水利部公益性行业专项经费项目(200801014)

**收稿日期:** 2010-04-07

变形特性试验研究。大型动静三轴仪试样尺寸  $\Phi 300 \times 700$  mm, 最大轴向静出力 1500 kN, 最大轴向动出力 500 kN, 最大围压 4.0 MPa。由设计级配知, 堆石料的最大粒径为 600 mm。采用等量替代法进行级配缩制, 使试验级配最大粒径为 60 mm, 试验级配: 60~40 mm 为 16.99%, 40~20 mm 为 25.48%, 20~10 mm 为 20.63%, 10~5 mm 为 19.41%, <5 mm 为 17.50%。试样干密度为  $2.099 \text{ g/cm}^3$ , 孔隙率为 23.9%, 相对密度为 0.90。加筋材料为  $\Phi 280$  mm 网状加筋体, 由 8 根钢带焊接而成。钢带截面尺寸为 25 mm  $\times$  5 mm, 表面有横向凸起的窄条以增加摩擦性, 窄条间距约 60 mm。加筋体横、纵向各 4 根钢带, 净间距为 45 mm。该加筋材料与文献[7, 8]中的加筋材料类似。

共开展了素堆石料、加筋 1 层和加筋 3 层堆石料共三组动残余变形特性试验研究, 加筋布置见图 1, 图中  $N_r$  为加筋层数。

试验所用的试样均处于自然风干状态。根据试验要求的干密度、试样尺寸和级配曲线, 采用表面振动法分 6 层进行制样。振动器底板静压为 14 kPa, 振动频率为 40 Hz, 电机功率为 1.2 kW。采用水头饱和和方式进行试样饱和后, 试样在预定压力下固结。各组试验分 4 级围压  $s_3$ , 分别为 0.5、1.2、1.8 和 2.5 MPa, 固结应力比  $K_c = s_1/s_3 = 2.5$ ,  $s_1$  为初始轴向应力。试样在初始围压和轴向应力条件下固结完成后, 在排水条件下施加轴向循环荷载。轴向动应力  $s_d$  分为两级, 约为  $0.5s_3$  和  $1.1s_3$ , 波形为正弦波, 振动频率为 0.1 Hz, 振次共 25 次。

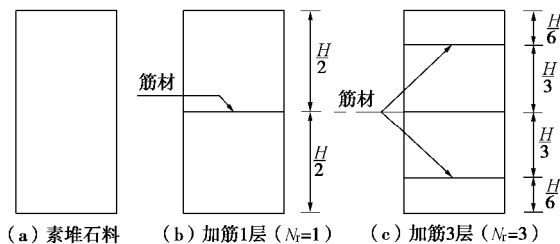


图 1 加筋布置示意图

Fig. 1 Layout of reinforcements in specimens

## 2 堆石料动残余变形特性

未加筋素堆石料的典型动残余变形特性试验曲线见图 2, 加筋堆石料的试验曲线见图 3, 4。

由图 2~4 可知: ①在循环荷载作用下, 堆石料的残余变形随振次的增加而增大, 在振动初期残余变形发展很快, 随振次的增大, 发展有所减缓; ②在同种初始应力条件下, 即围压和固结应力相同时, 堆石料的残余轴向变形和残余体积应变随动应力的增加而增大; ③当  $s_d/s_3$  或  $s_d/(s_1+s_3)$  相同或基本一致时, 堆

石料的动残余变形随围压的增大而增大; ④加筋堆石料和未加筋堆石料的动残余变形发展特点一致, 都符合上述几条规律, 但是加筋后堆石料的动残余变形变小, 且加筋层数越多抵御变形的能力越高。

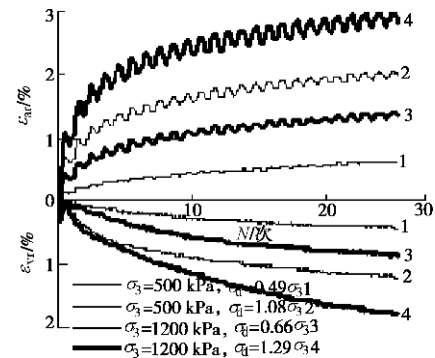


图 2 素堆石料残余变形试验曲线

Fig. 2 Residual deformation of rock-fill materials

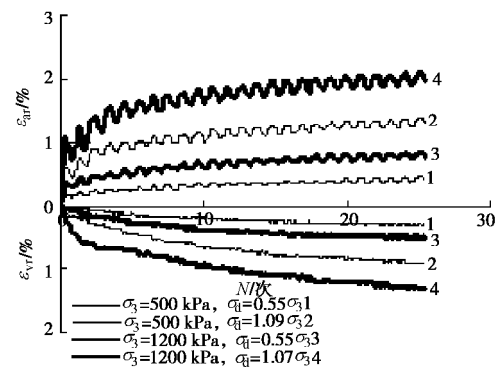


图 3 加筋堆石料残余变形试验曲线 ( $N_r=1$ )

Fig. 3 Residual deformation of reinforced rock-fill materials ( $N_r=1$ )

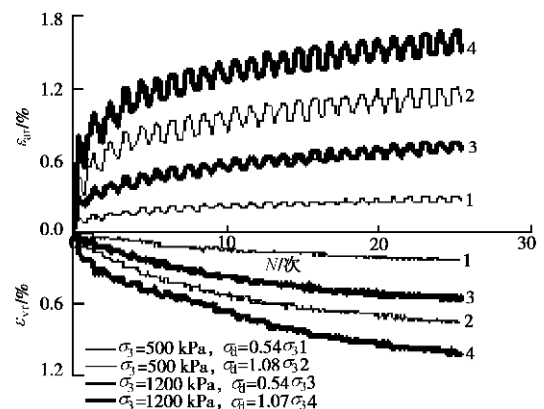


图 4 加筋堆石料残余变形试验曲线 ( $N_r=3$ )

Fig. 4 Residual deformation of reinforced rock-fill materials ( $N_r=3$ )

## 3 加筋对动残余变形的影响

### 3.1 加筋层数对动残余变形特性的影响

目前所采用的残余应变模型主要有沈珠江及其改进模型<sup>[10-11]</sup>、谷口及其改进模型<sup>[12-13]</sup>和水科院模型<sup>[9]</sup>。

其中, 沈珠江及其改进模型只需一套参数就可求得不同初始应力条件、不同动应变及不同应力水平下的残余变形, 参数获取也比较容易, 模型在土石坝动力计算中应用较为广泛。

沈珠江等<sup>[10]</sup>认为残余剪切应变  $g_r$  和体积应变  $e_{vr}$  的发展大体上符合半对数衰减规律, 即

$$e_{vr} = C_{vr} \lg(1+N) \quad (1)$$

$$g_r = C_{dr} \lg(1+N) \quad (2)$$

式中,  $C_{vr}$  和  $C_{dr}$  分别为  $e_{vr} - \lg(1+N)$  和  $g_r - \lg(1+N)$  关系曲线的斜率;  $g_r = (1+m_d)e_{ar}$ ,  $e_{ar}$  为残余轴向应变,  $m_d$  为动泊松比,  $m_d$  可取 0.33。

沈珠江模型未能较好地描述动剪切变形与固结应力比的关系, 邹德高等对此提出了改进<sup>[11]</sup>,

$$C_{vr} = c_1 g_d^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2) \quad (3)$$

$$C_{dr} = c_4 g_d^{c_5} S_1 \quad (4)$$

式中,  $c_1$  和  $c_2$  分别为  $C_{vr} - g_d$  双对数关系曲线  $g_d=1\%$  处的直线截距和拟合曲线的斜率;  $c_4$  和  $c_5$  分别为  $C_{dr}/S_1 - g_d$  双对数关系曲线  $g_d=1\%$  处的直线截距和拟合曲线的斜率。研究表明, 应力水平对  $C_{vr}$  影响很小, 故可假定  $S_1$  对  $C_{vr}$  无影响, 即式 (3) 中的  $c_3=0$ 。

素堆石料和加筋 3 层堆石料的  $e_{vr} - \lg(1+N)$  和  $g_r - \lg(1+N)$  关系曲线见图 5, 6。为清楚起见, 图中各点为每个振次残余变形的平均值。由式 (3)、(4) 整理得到的堆石动残余变形特性模型参数见表 1。由表 1 可以得到: 对于本文试验所用堆石料和加筋材料, 随着加筋层数的增加,  $c_1$ ,  $c_4$  有所降低, 而  $c_2$ ,  $c_5$  略有增大, 但总体显示随加筋层数增加堆石料抵御变形的能力增强。

表 1 加筋堆石料的动残余变形参数

Table 1 Residual deformation parameters of reinforced rock-fill materials

加筋方式	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
0 层	0.69	0.53	0	6.51	0.71
1 层	0.61	0.67	0	5.47	0.85
3 层	0.52	0.71	0	4.99	0.94

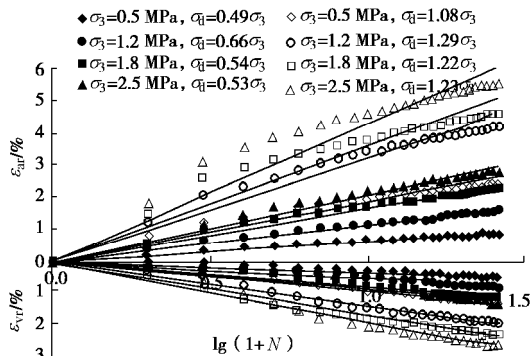


图 5 素堆石料残余变形与  $\lg(1+N)$  关系曲线

Fig. 5 Relationship between residual deformation and  $\lg(1+N)$  of rock-fill materials

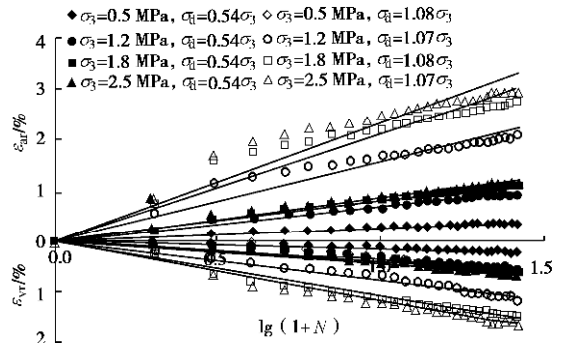


图 6 堆石料残余变形与  $\lg(1+N)$  关系曲线 ( $N_r=3$ )

Fig. 6 Relationship between residual deformation and  $\lg(1+N)$  of reinforced rock-fill materials ( $N_r=3$ )

残余变形与加筋层数的关系见图 7, 图中各点为循环荷载作用下最后 1 次即第 25 次的平均残余变形。由表 1 和图 7 可知, 加筋堆石料的残余应变比堆石料的明显降低, 并且 3 层加筋的效果要好于 1 层加筋。因此, 对于土石坝, 扩大加筋范围、减少加筋间距, 提高筋材本身的刚度和强度, 无疑是减小地震永久变形, 提高抗震稳定性的有效工程措施。

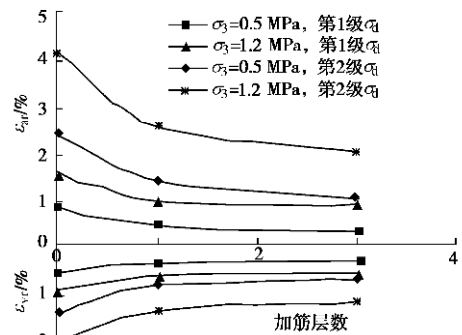


图 7 残余变形与  $N_r$  的关系

Fig. 7 Relationship between residual deformation and  $N_r$

### 3.2 加筋效果机理初探

加筋堆石料是由筋材、堆石颗粒及相应孔隙组成的多相体系, 是一种不连续介质。影响其力学特性的主要因素有: 加筋材料特性、堆石料特性、筋土界面特性和初始应力条件。

在初始应力状态下, 加筋堆石料内部堆石颗粒之间、筋材与堆石料之间存在接触。加筋堆石料的格肋会对其网孔内堆石颗粒的移动产生阻力, 加筋材料对其界面两侧碎石的位移也产生了阻力, 并产生联锁、咬合摩擦力。在循环荷载作用下, 剪切会使得筋土接触面附近颗粒破碎、转动并产生相对移动, 导致级配变化, 平均孔隙率减小及大孔隙消失, 从而提高了密度。格肋阻力和界面咬合摩擦力的双重作用限制了土样的侧向变形, 加筋类似于提高了围压, 可看成是等效围压, 提高了加筋堆石料抵御变形的能力。

## 4 结 论

(1) 堆石料和加筋堆石料残余变形随动应力、围

压和振次的增加而增大, 在振动初期残余变形发展很快, 但随振次的增大其发展有所减缓。

(2) 在动残余变形试验中, 加筋作用相当于等效附加围压的作用, 一定程度上限制了土体的侧向变形, 从而提高了堆石料抵御残余变形的能力。

(3) 加筋堆石料的残余应变比堆石料的明显降低, 并且三层加筋的效果要好于一层加筋。因此, 对于土石坝, 扩大加筋范围、减少加筋间距, 提高筋材本身的刚度和强度, 无疑是减小地震永久变形, 提高抗震稳定性的有效工程措施。

(4) 本文仅对加筋层数和荷载条件对动残余变形特性的影响进行了试验研究, 未涉及筋材表面粗糙程度和材料特性等筋材特性, 对这部分工作尚需作进一步深入地研究。

#### 参考文献:

- [1] 孔宪京, 邹德高, 邓学晶, 等. 高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J]. 水利学报, 2006, **37**(12): 1489 - 1495. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, DENG Xue-jing, et al. Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rockfill dams and effectiveness verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(12): 1489 - 1495. (in Chinese))
- [2] 韩国城, 孔宪京, 李俊杰. 面板堆石坝动力破坏性态及抗震措施试验研究[J]. 水利学报, 1990(5): 61 - 67. (HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing, LI Jun-jie. Study on dynamic failure and earthquake resistant measure of concrete-faced rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(5): 61 - 67. (in Chinese))
- [3] 李道田. 青峰岭水库土石坝加固技术及加筋砾石料的应力应变特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (LI Dao-tian. Research on the reinforcement technology and stress-strain behavior of geo-grid rock-fill for Qingfengling earth dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [4] 李红军, 迟世春, 林 皋. 心墙堆石坝坝顶加筋抗震稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(12): 1881 - 1887. (LI Hong-jun, CHI Shi-chun, LIN Gao. Aseismic stability analysis for reinforced slopes of high core rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(12): 1881 - 1887. (in Chinese))
- [5] 赵 川, 周亦唐. 土工格栅加筋碎石大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2001, **22**(4): 419 - 422. (ZHAO Chuan, ZHOU Yi-tang. Experimental study on polymer geogrid reinforced
- crushed gravel by large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(4): 419 - 422. (in Chinese))
- [6] 黄仙枝, 白晓红. 土工带加筋碎石土大型三轴试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, **26**(2): 124 - 128. (HUANG Xian-zhi, BAI Xiao-hong. Experimental study on geobelt reinforced gravel by large-scale triaxial test[J]. Journal of Building Structure, 2005, **26**(2): 124 - 128. (in Chinese))
- [7] 乐茂华, 高长胜, 赵维炳, 等. 加筋碎石复合体的大三轴试验研究[J]. 中国港湾建设, 2007(3): 42 - 44. (LE Mao-hua, GAO Chang-sheng, ZHAO Wei-bing, et al. Macro-triaxial testing and research of reinforced crushed-stone-soil mixture[J]. China Harbour engineering, 2007(3): 42 - 44. (in Chinese))
- [8] 傅 华, 凌 华, 蔡正银. 加筋土强度影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **28**(增刊 1): 481 - 484. (FU Hua, LIN Hua, CAI Zheng-yin. Experimental study of factors affecting strength of reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **28**(S1): 481 - 484. (in Chinese))
- [9] 王昆耀, 常亚屏, 陈 宁. 往返荷载下粗料土的残余变形特性[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))
- [10] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学学报, 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))
- [11] 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. (ZOU De-gao, MENG Fan-wei, KONG Xian-jing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 807 - 812. (in Chinese))
- [12] 贾革续, 孔宪京. 粗粒料动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 26 - 30. (JIA Ge-xu, KONG Xian-jing. Study on residual deformation characteristics of coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 26 - 30. (in Chinese))
- [13] 刘汉龙. 土体的永久变形[D]. 南京: 河海大学, 1994. (LIU Han-long. Permanent deformation induced by earthquake[D]. Nanjing: Hohai University, 1994. (in Chinese))