

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.1612

# 高聚物堆石料回弹特性试验

杨 贵<sup>1,2</sup>, 孙 欣<sup>1,2</sup>, 王阳阳<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 安全与防灾工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 基于中型三轴仪开展了高聚物堆石料回弹模量试验, 分析了高聚物堆石料卸载一再加载的力学特性和回弹模量变化规律。结果表明: 围压和应力水平对体积变化规律有明显影响, 随着试验围压的增大, 试样由初始状态的剪胀逐渐变为剪缩; 高围压下, 随着应力水平的增大, 试样的卸载体缩量呈非线性增大; 而围压在 100 kPa 下, 卸载时表现为体胀, 不同应力水平下的卸载体缩量相近且较小。平均回弹模量与初始模量的比值大约在 3.9~4.2 之间, 应力水平为 0.7 条件下对应的回弹模量与平均回弹模量较为接近。高聚物堆石料的回弹模量满足邓肯-张模型关系, 数值计算过程中回弹模量系数近似为初始模量系数的 4.0~4.2 倍。

**关 键 词:** 高聚物堆石料; 卸载体缩; 三轴试验; 回弹模量

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)05-1669-06

## Tests on resilient behaviour of polymer rockfill materials

YANG Gui<sup>1,2</sup>, SUN Xin<sup>1,2</sup>, WANG Yang-yang<sup>1,2</sup>

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

2. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The resilient modulus tests of polymer rockfill materials were performed using a middle-scale triaxial instrument. Mechanical properties of polymer rockfill materials and their evolution laws of resilient modulus were analysed under unloading and reloading conditions. The results showed that the volume-contraction was influenced by the confining pressure and stress level significantly. The specimen gradually changed from the initial state of shear dilation to shear contraction with the increase of confining pressure. Under high confining pressure, the unloaded volume-contraction increased nonlinearly with the increase of the stress level. At the confining pressure of 100 kPa, the specimen presented a volume-dilation during unloading, and the values of unloaded volume-contraction were similar and smaller at different stress levels. The ratio of the average resilient modulus to initial Young's modulus was approximately between 3.9 and 4.2 under different confining pressures. The corresponding resilient modulus at the stress level of 0.7 was similar to the average resilient modulus. The Duncan-Chang model was applied to simulate the resilient modulus of the polymer rockfill materials, and the resilient modulus coefficient was approximately 4.0 to 4.2 times of the initial Young's modulus coefficient in the numerical calculation process.

**Keywords:** polymer rockfill materials; volume-contraction in unloading; triaxial tests; resilient modulus

## 1 引 言

随着我国西部大开发的发展, 在我国西南地区建立了许多高土石坝, 筑坝的主要用料为堆石料。由于所建的土石坝都很高, 对堆石料力学性质的深入了解提出了更高的要求。例如, 土石坝正常运行时会受蓄水和水位下降的作用, 坝体内有些部位会经历加载、卸载的受力过程, 因此需要考虑不同应力水平对坝体的影响。国内外学者对黏性土或砂土

回弹特性研究较多, 发现黏土和砂土存在卸载体缩的现象<sup>[1-6]</sup>。相比之下, 对堆石料的卸载一再加载力学特性研究相对较少, 研究发现堆石料同样存在卸载体缩现象, 其抗剪能力比单调加载有所提高<sup>[7-8]</sup>。

目前, 加筋土已经广泛应用于水利和土木工程领域, 筋材与土体之间的界面摩擦能提高土体抗剪能力、减小土体变形等<sup>[9-10]</sup>。双组份聚氨酯 A、B 料混合发泡剂是高聚物的一种, 高强度、轻质、膨胀性好、具有黏结力, 若将其灌浆到坝体内, 会在

收稿日期: 2016-07-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51479059); 中央高校基金 (No. 2017B12514)。

This work was supported by Program of National Natural Science Foundation of China (51479059) and the Funds for the Central Universities (2017B12514).

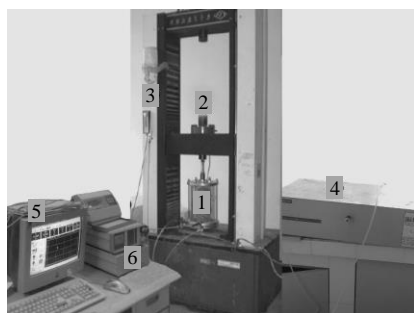
第一作者简介: 杨贵, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事土石坝抗震及抗震措施方面的研究工作。E-mail: ygheitu@163.com

堆石料中形成不规则的连续体或不连续体, 体积膨胀填充土体中的孔隙、提高土颗粒黏结力, 从而修正不均匀沉降、提高坝体的抗剪能力和减小坝体的变形<sup>[11]</sup>。目前, 研究人员已进行了聚氨酯泡沫注浆加固铁路路基、锚固边坡等的研究<sup>[12-13]</sup>, 开展了高聚物堆石料常规力学特性的研究<sup>[14-15]</sup>, 研究结果表明, 加入高聚物后增加了堆石料的黏结力, 提高了堆石料的抗剪能力。但针对加入高聚物的堆石料的卸载—再加载力学特性的研究尚不多见。

基于此, 本文采用中型三轴剪切仪进行高聚物堆石料回弹模量试验, 分析高聚物堆石料卸载—再加载的变形特性, 并结合邓肯—张模型, 研究回弹模量的变化规律。

## 2 试验仪器、用料及试验方案

静力三轴试验设备采用河海大学电子万能试验机(如图 1 所示), 试样直径为 10 cm、高为 20 cm, 最大轴向荷载为 50 kN, 最大围压为 1 200 kPa。



1—压力室 2—轴向压力、加压、位移量测系统 3—体变管  
4—围压控制器 5—计算机 6—数据采集盒

图 1 电子万能试验机

Fig.1 Electronic universal testing machine

试验所采用的堆石料级配参照某心墙堆石坝坝料级配, 按照相似级配法进行缩尺, 并剔除粒径小于 2 mm 的颗粒(使试样制备完成后有较大的孔隙, 便于高聚物在堆石料内部的充填)所得的级配曲线如图 2 所示。堆石料的干密度为  $1.61 \text{ g/cm}^3$ , 相对密实度  $D_r = 0.70$ , 试样分 5 层填筑, 每层高 4 cm。高聚物采用双组份聚氨酯 A、B 料混合发泡剂, 混合搅拌后表面不黏结时间为 10 min, 约 1 h 完成固化, 使用温度为  $25 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。三轴试样中高聚物质量为堆石料质量的 4%。按照所需质量称取每层的堆石料与高聚物, 先将 A、B 料按 1:1 配比混合搅拌, 使其发生化学反应, 再将称好的堆石料与其混合, 搅拌均匀, 并进行击实, 按照《土工试验规程》<sup>[16]</sup> 进行三轴试验的制样。试验过程中为减小高聚物堆

石料与制样设备之间的黏结力, 在对开模内侧包裹一层保鲜膜, 该膜强度对试验结果的影响完全可以忽略。待试样制备完成后, 静置 2~3 h, 再进行真空抽气饱和, 试验过程中测试的饱和度达到 95% 以上, 但这并不完全意味着其真实的饱和度已经达到 95%, 其原因在于高聚物和堆石颗粒之间可能存在部分封闭气体, 由于高聚物本身的渗透系数较低, 采用常规的抽气饱和和反压饱和方法也难以将其排出(如图 3 所示)。

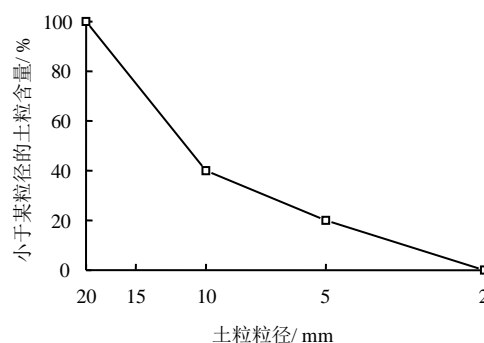


图 2 堆石料级配曲线

Fig.2 Grading curve of rockfill materials

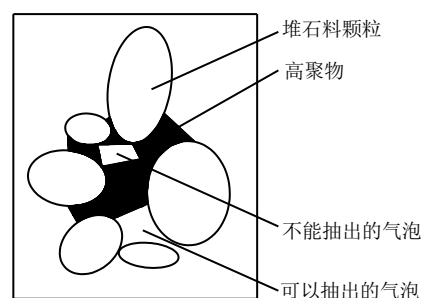
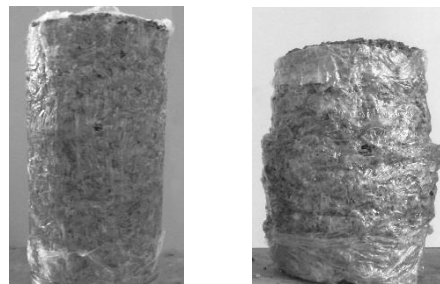


图 3 高聚物堆石料试样局部示意图

Fig.3 Local schematic of polymer rockfill specimen

图 4 为试样加载前后对比图, 从中可以看出, 堆石料由于掺入了高聚物使其具有黏结力, 能够自我稳定, 加载结束后试样变形与常规黏土的破坏特征基本一致, 呈鼓胀形。

试验采用固结排水剪试验, 加载到设定的应力水平后开始卸载, 待偏应力卸载到 0 再重新加载至下一个应力水平。试验过程中采用的加载与再加载阶段剪切速率为  $0.6 \text{ mm/min}$ , 卸载阶段速率为  $0.3 \text{ mm/min}$ 。所谓的卸载是指试样加载到一定应力水平后, 轴向荷载逐渐减小; 再加载指荷载减小到一定应力水平后再加载, 但未超过前期应力水平。试验围压  $\sigma_3$  分别为 100、300、500 和 700 kPa。加卸载应力水平  $s$  分别为 0.3、0.5、0.7 和 0.9。



(a) 轴向应变为 0%

(b) 轴向应变为 25%

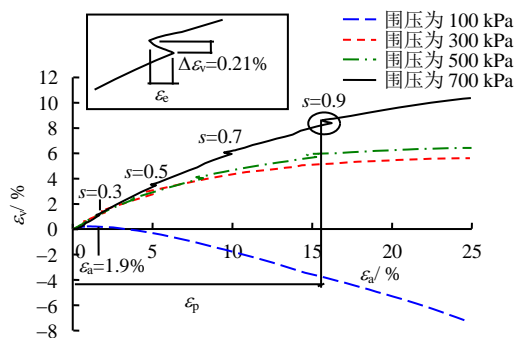
图 4 高聚物堆石料三轴试样 (700 kPa)

Fig.4 Triaxial specimens of polymer rockfill materials (700 kPa)

### 3 试验结果分析

#### 3.1 应力水平和围压对体变的影响

图 5 给出了不同围压和应力水平下卸载一再加载体积应变  $\varepsilon_v$ -轴向应变  $\varepsilon_a$  曲线。图中,  $\varepsilon_e$  和  $\varepsilon_p$  分别为回弹弹性应变和塑性应变。由图可以看出: 高聚物堆石料的体积应变规律与常规堆石料的体积应变规律基本一致。随着试验围压的增大, 试样由初始状态的剪胀逐渐变为剪缩<sup>[17]</sup>。在围压  $\sigma_3$  分别为 300、500 和 700 kPa 下, 试样总体上表现为剪缩; 围压为 100 kPa 时, 试样主要表现为剪胀, 即先剪缩后剪胀, 其转折点为当体变达到峰值时对应的轴向应变  $\varepsilon_a = 1.9\%$ , 并且在卸载时没有明显的体缩现象。其原因可能是高聚物填充了颗粒之间的孔隙, 在高围压作用下, 颗粒之间的摩擦力较大, 颗粒很难翻越相邻颗粒完成重新排列, 从而使试样更容易剪缩。在较低围压下, 颗粒之间的摩擦力较小, 试样经过不断的卸载一再加载后, 颗粒会容易翻越相邻颗粒获得一次重新排列的机会, 使试样更加密实, 剪胀性增强。

图 5  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_a$  关系曲线Fig.5 Relationships between  $\varepsilon_v$  and  $\varepsilon_a$ 

卸载体缩是土体常见的性质<sup>[2, 18]</sup>, 分析高聚物堆石料的卸载体缩对了解高聚物堆石料在复杂应力

路径工况下的应力变形特性有重要作用。卸载体缩量  $\Delta\varepsilon_v$  为

$$\Delta\varepsilon_v = \varepsilon_u - \varepsilon_l \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_u$  和  $\varepsilon_l$  分别为剪切过程中达到一定应力水平后对应的体积应变和轴向偏应力卸载至 0 对应的体积应变。

图 5 给出了围压 700 kPa 下, 应力水平  $s = 0.9$  时的卸载体缩量  $\Delta\varepsilon_v = 0.21\%$ 。

不同围压、应力水平条件下, 卸载后的体缩量如表 1 所示 (“+” 为体缩, “-” 为体胀)。从表中可以看出, 围压和应力水平对卸载体缩量有较大影响。在围压 300、500 和 700 kPa 下, 随着应力水平的增大, 试样的卸载体缩量呈非线性增大, 在应力水平  $s = 0.5$  时呈现一个转折点。在低应力水平 ( $s = 0.3$  和  $0.5$ ) 时卸载, 卸载体缩量缓慢增大; 在高应力水平 ( $s = 0.7$  和  $0.9$ ) 时卸载, 卸载体缩量显著增大, 相同应力水平条件下卸载体缩量随着试验围压的增大而表现为先减小后增大; 相同围压下, 卸载体缩量随着应力水平的提高而增大。而围压在 100 kPa 下, 卸载时表现为体胀, 卸载体缩量相近且较小, 即应力水平对卸载体缩量影响较小。

表 1 高聚物堆石料卸载体缩量 (单位: %)

Table 1 Volume-contraction of polymer rockfill materials (unit: %)

应力水平 $s$	体缩量			
	100 kPa	300 kPa	500 kPa	700 kPa
0.3	-0.013	0.019	0.005	0.026
0.5	-0.013	0.064	0.013	0.045
0.7	-0.019	0.141	0.077	0.115
0.9	/	0.205	0.192	0.211

#### 3.2 应力水平和围压对回弹应变的影响

回弹应变是指试样在卸载时轴向应变的变化量, 研究回弹应变也是了解堆石料应力变形特性的一个重要方面。为了研究回弹应变的相对大小, 图 6 给出了不同围压和应力水平下回弹应变占回弹开始前总应变的百分比, 称为回弹应变比  $R_e$ 。计算公式如下:

$$R_e = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_e$  和  $\varepsilon_p$  分别为回弹弹性应变和塑性应变。

从图 6 中可以看出, 回弹应变比整体上表现为随着应力水平的提高而逐渐减小; 在相同应力水平条件下随着围压的增加而逐渐减小。对于围压为

100 kPa 条件下的结果,其规律略有所不同,应力水平对其影响并不显著。其原因可能是在低围压作用下,轴向偏应力的峰值较小,在轴向位移较小时便完成了 4 种不同应力水平的卸载—再加载过程,由于轴向位移较小和测试精度的限制,导致回弹应变比较小。

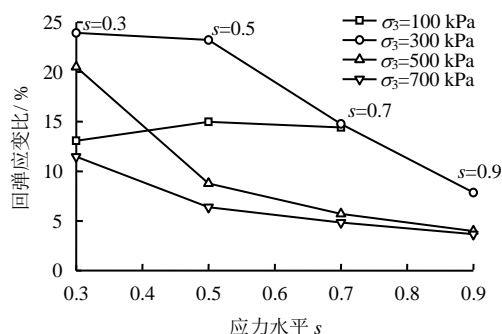


图 6 回弹性应变比与应力水平关系

Fig.6 Relationships between the ratio of resilient strain and stress level

### 3.3 回弹模量分析

针对堆石料,最常用的本构模型是邓肯-张模型,其回弹模量  $E_{ur}$  为

$$E_{ur} = k_{ur} p_a (\sigma_3 / p_a)^{n_{ur}} \quad (3)$$

式中:  $k_{ur}$ 、 $n_{ur}$  分别为回弹模量系数和指数;  $p_a$  为大气压力。实际应用中,回弹模量的计算多是参考一般黏土或砂土将回弹模量取为初始弹性模量的 1.2~3.0 倍<sup>[19]</sup>。其中,初始弹性模量表示为

$$E_i = k p_a (\sigma_3 / p_a)^n \quad (4)$$

式中:  $k$ 、 $n$  分别为模量系数和模量指数,即  $k_{ur} = (1.2 \sim 3.0)k$ ,  $n_{ur} = n$ 。

图 7 为不同围压条件下加卸载循环轴向偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ -轴向应变  $\varepsilon_a$  关系曲线。

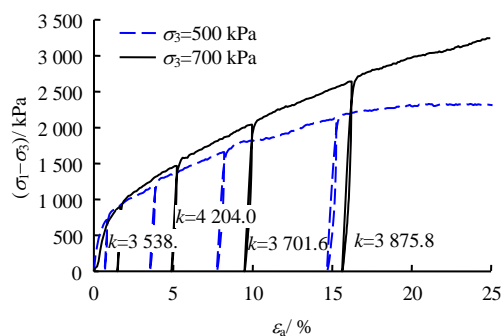


图 7  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_a$  关系曲线

Fig.7 Relationships between  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  and  $\varepsilon_a$

从图 7 中可以看出,加卸载循环过程中,卸载应力路径与再加载应力路径并不完全重合而形成一个滞回圈。堆石料颗粒与高聚物材料之间的黏结力,在竖向偏应力的作用下会发生部分破坏,堆石料颗粒同时也会发生运动和破碎,试样从而达到一个新的稳定状态。当竖向偏应力卸载时,在围压作用下,部分颗粒会恢复到卸载之前状态。

计算过程中,用滞回圈范围内测得的试验点进行线性拟合,将其直线斜率作为回弹模量。从图中可以看出,不同应力水平下的回弹模量曲线基本平行,两种围压条件下的应力-应变曲线比较接近。这主要是由于试验过程中采用的级配剔除了部分细小颗粒,试样中的孔隙率较大、高聚物含量较高,颗粒之间的黏结力较大而导致的。根据该方法整理出高聚物堆石料在不同围压和应力水平下的回弹模量,如图 8 所示。

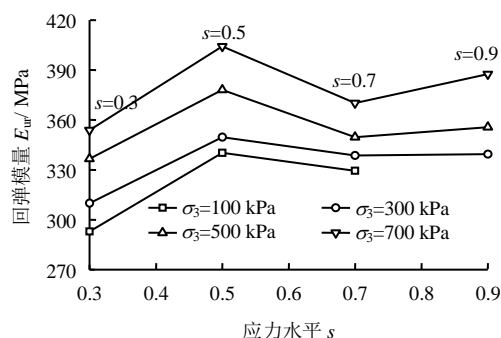


图 8  $E_{ur}$ - $s$ - $\sigma_3$  关系曲线

Fig.8 Relationships between  $E_{ur}$ ,  $s$  and  $\sigma_3$

从图 8 中可以看出,围压和应力水平对回弹模量均有一定的影响,回弹模量随着围压的增大而增大,随着应力水平的增大整体表现为先增大后减小。原因可能是,在加载过程中,高聚物与堆石料之间的黏结力会受到破坏、堆石颗粒的运动及破碎,从而使得试样整体达到一个新的平衡状态。该平衡状态与加载应力水平有关,在应力水平  $s = 0.5$  时,该状态相对较稳定,在卸载过程中试样的弹性变形较小,从而导致回弹模量较大。

为简化数值分析过程中回弹模量的计算,可取不同应力水平下的回弹模量平均值进行计算,各种工况下的回弹模量计算结果见表 2。从表中可以看出,不同围压和应力水平下的平均回弹模量与初始模量的比值在 3.9~4.2 之间,其变化范围与一般堆石料比值的范围<sup>[19]</sup>相比较小,误差最大值为 8.4%;同时可以看出,应力水平  $s = 0.7$  条件下对应的回弹模量计算误差与平均值较为接近(回弹模量

与初始模量比在 3.9~4.4 之间, 最大误差为 9.3%), 在没有试验条件的情况下, 可以采用该应力水平的回弹模量作为平均回弹模量进行计算。

图 9 为高聚物堆石料回弹模量与围压关系曲线。从图中可以看出, 二者具有良好的线性关系, 线性相关系数  $R^2 = 0.98$ , 表明高聚物堆石料的回弹模量同样满足邓肯-张模型关系, 回弹模量和回弹参数见表 3。

表 2 高聚物堆石料回弹模量与初始模量  
Table 2 Resilient modulus and initial Young's modulus of polymer rockfill materials

围压 / kPa	初始 模量 / MPa	平均值			应力水平为 0.7		
		模量 / MPa	误差 / %	模量比	模量 / MPa	误差 / %	模量比
100	74.9	310.9	4.19	4.2	329.4	4.7	4.4
300	82.2	342.8	4.13	4.2	338.6	9.3	4.1
500	85.2	358.1	4.12	4.2	349.6	8.4	4.1
700	95.6	376.2	4.04	3.9	370.1	8.4	3.9

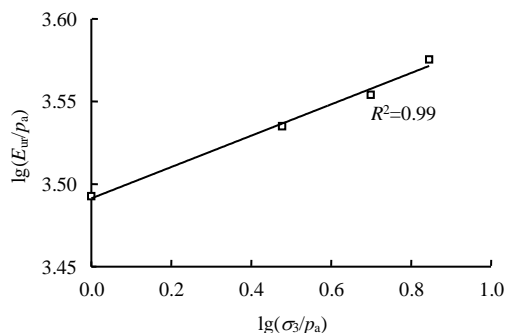


图 9  $\lg(E_{ur}/p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线  
Fig.9 Relationship between  $\lg(E_{ur}/p_a)$  and  $\lg(\sigma_3/p_a)$

表 3 高聚物堆石料回弹模量和初始模量参数  
Table 3 Parameters of resilient modulus and initial Young's modulus of polymer rockfill materials

$k_{ur}$	$k$	$k_{ur}/k$	$n_{ur}$	$n$	$n_{ur}/n$
3 090.3	741.3	4.20	0.10	0.11	0.91

从表 3 中可以看出,  $n_{ur}$  与  $n$  数值相差很小,  $k_{ur} = 4.20k$ 。若令  $n_{ur} = n$ , 通过  $k_{ur}$  与  $n_{ur}$  的关系式得到  $k'_{ur} = 4.05k$ , 在堆石料的取值范围 (2.64~4.60) 内<sup>[7]</sup>。因此, 用邓肯-张模型进行有限元计算时, 可以直接由初始模量系数  $k$  得到回弹模量系数  $k_{ur}$ , 对于本文高聚物堆石料可取  $k_{ur} = (4.0 \sim 4.2)k$ 。当然, 该数值范围与高聚物含量及高聚物组成有关, 需要进一步开展相关研究。

为验证单个试样开展不同应力水平工况下获得的卸载模量与单个试样开展一个应力水平获得的卸载模量之间的差异。本文还进行了高聚物堆石料单

调加载三轴试验, 发现在轴向应变 15% 以内时, 几种不同工况下的应力-应变曲线基本吻合 (如图 10 所示), 表明前面的试验结果是基本可靠的, 采用多级 (有限次数) 加卸载曲线进行初始弹性模量的计算是合理的。

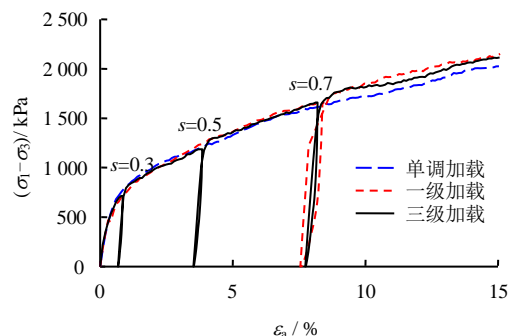


图 10 围压为 500 kPa 下多级加卸载应力-应变曲线  
Fig.10 Curves of multi-step loading and unloading stress-strain under confining pressure of 500 kPa

## 4 结 论

对高聚物堆石料进行了 4 种不同应力水平的加卸载回弹模量试验, 研究了高聚物堆石料的回弹特性及回弹模量的变化规律, 主要结论如下:

(1) 围压和应力水平对体积变化规律有较大影响。在围压为 300、500 和 700 kPa 下, 随着应力水平的增大, 试样的卸载体缩量呈非线性增大; 而在围压为 100 kPa 下, 卸载时表现为体胀, 应力水平变化对卸载体缩量影响不大。

(2) 回弹应变比整体上表现为随着应力水平的提高而逐渐减小, 在相同应力水平条件下随着围压的增加而逐渐减小。

(3) 不同围压和应力水平下的平均回弹模量与初始模量的比值在 4.0~4.2 之间, 比一般堆石料的比值范围小。应力水平为 0.7 条件下对应的回弹模量计算误差与平均值较为接近, 在没有试验条件的情况下, 可以采用该应力水平的回弹模量进行计算。

## 参 考 文 献

- [1] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土回弹模量试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 748—759.  
CHEN Kai-sheng, SHA Ai-min. Research on resilient modulus test of compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 748—759.
- [2] 李广信, 武世峰. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 47—50.  
LI Guang-xin, WU Shi-feng. The experimental study and



- mechanism study of volumetric contraction after unloading of soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(1): 47—50.
- [3] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 158—161.
- LI Guang-xin, GUO Rui-ping. The experimental study of volumetric contraction after unloading of soil and recover dilatancy[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 158—161.
- [4] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 12—17.
- ZHANG Jian-min. The invertible and irreversible shear dilatancy rules of sand soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 12—17.
- [5] LI Y, BOLTO M. Energy conservation validates deformation mechanisms around model cantilever wall excavations in sand[J]. **Geotechnique**, 2014, 64(6): 419—429.
- [6] CHEN S L, ABOUSLEIMAN Y N. Exact drained solution for cylindrical cavity expansion in modified Cam clay soil[J]. **Geotechnique**, 2012, 62(6): 510—517.
- [7] 褚福永, 朱俊高, 贾华, 等. 粗粒土卸载-再加载力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1061—1066.
- CHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, JIA Hua, et al. Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1061—1066.
- [8] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 950—954.
- ZHU Jun-gao, WANG Yuan-long, JIA Hua, et al. Experimental study on resilience behaviour of coarse grained soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(6): 950—954.
- [9] 王家全, 周岳富, 唐咸远, 等. 可视大模型加筋土直剪数采仪的研发与应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1533—1540.
- WANG Jia-quan, ZHOU Yue-fu, TANG Xian-yuan, et al. Development and application of large size direct shear test apparatus with visual and digital collection functions for reinforced soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1533—1540.
- [10] GRAY D H, AL-REFEAI T. Behavior of fabric versus fiber reinforced sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1986, 112(8): 804—820.
- [11] 石明生, 夏威夷, 王复明, 等. 高聚物锚固体与粉土间黏结性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 724—730.
- SHI Ming-sheng, XIA Wei-yi, WANG Fu-ming, et al. Experimental study on bond performance between polymer anchorage body and silt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 724—730.
- [12] BUZZI O, FITYUS S, SASAKI Y, et al. Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil[J]. **Mechanics of Materials**, 2008, 40(12): 1012—1021.
- [13] BUZZI O, FITYUS S, SLOAN S W. Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(6): 623—634.
- [14] 刘汉龙, 费康, 杨贵, 等. 高聚物胶凝堆石料技术及其抗震性能[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 60—70.
- LIU Han-long, FEI Kang, YANG Gui, et al. Use of polyurethane foam adhesive-reinforced rockfill material to improve seismic behavior of earth-rockfill dam[J]. **Advances in Science and Technology of Water Resources**, 2016, 36(1): 60—70.
- [15] 刘平, 刘汉龙, 肖杨, 等. 高聚物胶凝堆石料静力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 749—754.
- LIU Ping, LIU Han-long, XIAO Yang, et al. Experimental research on mechanical properties of PFA-reinforced rockfill materials[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 749—754.
- [16] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999.
- [17] SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, CHIU Chung-fai, et al. Strength and deformation behaviour of coarse-grained soil by true triaxial tests[J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2010, 17(5): 1095—1102.
- [18] 李晓俊, 白晓红, 黄仙枝. 土工带加筋碎石土本构关系的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 57—60.
- LI Xiao-jun, BAI Xiao-hong, HUANG Xian-zhi. Experimental study on constitutive relation of geobelt reinforced crushed gravel under triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.): 57—60.
- [19] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- YIN Zong-ze. Principle of soil mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.