

文章编号: 1000-7598 (2012) 04-1061-06

# 粗粒土卸载一再加载力学特性试验研究

褚福永<sup>1,2</sup>, 朱俊高<sup>1,2</sup>, 贾 华<sup>3</sup>, 安淑红<sup>1,2,4</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098;  
3. 南通中房建筑设计研究院有限公司, 江苏 南通 226000; 4. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

**摘 要:** 进行了 3 种不同粗粒土的常规三轴加载—卸载一再加载的剪切试验, 对粗粒土的卸载一再加载的力学特性进行了分析。结果表明: 粗粒土存在卸载体缩现象, 且随着应力水平的增加, 卸载体缩量增加; 随着围压的增加, 卸载体缩量减小。根据试验数据总结了卸载体缩量与应力水平、围压之间关系式。回弹模量随应力水平的增加呈驼峰型曲线, 即应力水平在 0.7 左右时最大, 小于或大于 0.7 时的弹性模量均较小。平均回弹模量与单调加载时的初始弹性模量的比值随围压呈幂函数降低, 母岩硬度大的土料, 该比值较大, 相反, 母岩较软的土料, 该比值较小。由单调加载得出的邓肯模型参数  $k$ 、 $n$  和卸载回弹确定的  $k_{ur}$ 、 $n_{ur}$  的大致关系为  $k_{ur}=(2.64\sim 4.60)k$ 、 $n_{ur}=(0.540\sim 0.885)n$ 。

**关 键 词:** 粗粒土; 三轴试验; 卸载体缩; 回弹模量

中图分类号: TU 411.5

文献标识码: A

## Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading

CHU Fu-yong<sup>1,2</sup>, ZHU Jun-gao<sup>1,2</sup>, JIA Hua<sup>3</sup>, AN Shu-hong<sup>1,2,4</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nantong Zhong Fang Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Nantong, Jiangsu 226000, China; 4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shangdong 271018, China)

**Abstract:** The test results of three different coarse-grained soils are obtained with conventional triaxial cyclic loading test. Based on these results, some useful conclusions are drawn from the discussion and analysis of the phenomenon of volume-contraction in unloading of coarse-grained soils: The phenomenon of the volume-contraction in unloading of coarse-grained soil is more obvious with the increasing of stress level and with the decreasing of confining pressure. According to the test data, a relationship formula among volume contraction in unloading and stress level and confining pressure is obtained. Rebound modulus presents the curve of hump shape with the increasing of stress level and the maximum is obtained when stress level is 0.7. The ratio of average rebound modulus and initial elastic modulus with monotonic loading present decrease of a power function, this ratio of soil material whose mother rock is high hardness is larger and the ratio of soil material whose mother rock is soft is smaller. The general relationship between  $k_{ur}$  and  $n_{ur}$  which is obtained from rebound in unloading and  $k$  and  $n$  which is obtained from monotonic loading is that  $k_{ur}$  is approximately from 2.46 times to 4.60 times of  $k$  and  $n_{ur}$  is approximately from 0.540 times to 0.885 times of  $n$  respectively.

**Key words:** coarse-grained soil; triaxial tests; volume-contraction in unloading; rebound modulus

## 1 引 言

土工建筑物一般受力条件比较复杂, 在填筑及运行过程中, 其局部甚至大部可能会遇到卸载或再加载情况。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。

国内外有一些学者对黏土及砂土的卸载一再加载力学特性进行了研究<sup>[1-6]</sup>, 发现黏土和砂土存在卸载体缩现象, 相关研究也取得了一定成果。矫德全等<sup>[1]</sup>认为其卸载体缩源于土的各向异性; 张建民<sup>[2]</sup>利用试验验证了剪胀的可逆性; 李广信等<sup>[3-4]</sup>认为

收稿日期: 2010-09-30

基金项目: 水利部公益性行业科研专项“高心墙堆石坝安全性评价技术研究”(No. 200801133); 国家自然科学基金(No. 50809023); 国家杰出青年科学基金(No. 50825901)。

第一作者简介: 褚福永, 男, 1976 年生, 博士研究生, 主要从事堆石等粗粒土工程特性及本构关系方面的研究工作。E-mail: cfy1976@hhu.edu.cn

通讯作者: 朱俊高, 男, 1964 年生, 教授, 主要从事土体本构关系、土石坝工程方面的研究工作。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

密砂的卸载体缩是剪胀可恢复性的宏观表现, 松砂的卸载体缩则由加载初期的塑性体缩和可恢复性剪胀两部分组成, 而黏土的卸载体缩完全是塑性体缩。陈愈炯<sup>[5]</sup>探讨了黏性土卸载弹性模量随围压及卸载时的应力水平的变化规律。但上述研究成果大多是在砂或黏土的试验基础上得到的, 针对粗粒土的卸载一再加载力学特性的研究较少。

近几十年, 人们对粗粒土普通三轴加载条件下及轴对称三轴仪复杂应力路径条件下的强度变形性质研究较多<sup>[7-9]</sup>, 相比之下, 对粗粒土卸载一再加载的力学性质的专门研究很少。目前用于有限元计算的回弹模量常按经验取值, 如邓肯在砂和黏土试验的基础上, 认为卸载 $n_{ur}$ 与加载 $n$ 时的基本一致,  $k_{ur} = (1.2 \sim 3.0)k$ , 对于松砂和软土 $k_{ur} = 3.0k$ , 对于密砂 $k_{ur} = 1.2k$ , 一般土介于其间。这些规律是否适用于粗粒土需要进一步研究。

本文进行了 3 种不同粗粒料的反复卸载一再加载三轴固结排水剪试验, 重点分析了粗粒土卸载一再加载的强度和变形特性、回弹模量主要影响因素及适用于粗粒土的卸载一再加载模量数 $k_{ur}$ 的合理取值范围。同时, 为研究卸载一再加载对试样强度的影响, 又进行了 3 种料常规三轴单调加载固结排水剪试验。

## 2 试验用料和试验方案

固结排水剪三轴试验在中型三轴仪上进行, 试样直径为 101 mm、高度为 200 mm。试验采用 3 种不同的粗粒土, 分别是双江口心墙坝堆石料、长河坝堆石坝覆盖层砂卵石料和糯扎渡坝壳粗粒料 (分别简称 SJK 料、CHB 料和 NZD 料)。

SJK 料为砾石料, 为似斑状黑云母钾长花岗岩, 岩石呈灰白色, 由斑晶和基质 2 部分组成, 似斑状结构, 块状-片麻状构造, 部分具有由斑晶定向排列组成的流线构造, 岩石抗压强度 90~100 MPa。CHB 料为卵砾石料, 且卵石含量较多, 颗粒圆滑, 少有棱角, 不易破碎。NZD 料为正长石花岗岩, 岩性新鲜和微风化, 粒度均匀, 棱角尖锐, 许多成片状, 高压易破碎, 新鲜岩石抗压强度为 85~101 MPa。但石料取出已有 3~4 年, 有一定程度风化。3 种粗粒料的级配曲线见图 1, 其基本性质指标见表 1, 3 种料试样相对密度均为 0.9。

三轴固结排水剪切试验所采用的围压 $\sigma_3$ 分别为 200、500、800、1 200 kPa。对卸载一再加载试验, 首先进行常规三轴固结排水剪切试验, 同时达到预定的应力水平 $S=0.25、0.5、0.7、0.9$ 时, 将试

样轴向附加应力卸载至 0 附近。然后, 进行再加载试验。

因此, 在相同围压下, 每个试样需在达到设计的 4 个应力水平 (即 $S$ 达到 0.25、0.5、0.7、0.9) 时分别进行卸载一再加载试验, 最后加载至试样破坏或轴向应变到 15% 时试验结束。

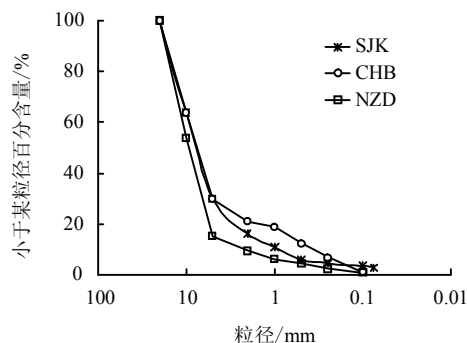


图 1 粗粒料级配曲线

Fig.1 Grading curves of coarse-grained soil

表 1 试样基本性质指标

Table 1 Indexes of basic properties of samples

| 土料  | 制样干密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | <5mm<br>含量/% | 最大允许粒径<br>/mm | 不均匀<br>系数 $C_u$ | 曲率系数<br>$C_c$ |
|-----|--------------------------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| SJK | 1.97                           | 30.0         | 20            | 10.2            | 3.0           |
| CHB | 2.17                           | 30.0         | 20            | 25.1            | 5.3           |
| NZD | 1.90                           | 15.4         | 20            | 5.4             | 1.9           |

## 3 反复加卸载试验及结果分析

图 2 给出了 3 种粗粒料的常规三轴反复加卸载试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线与 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线。

### 3.1 应力-应变-强度特性

从图 2 中 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线可以看出, 3 种土料的卸载一再加载的应力应变均有明显的回滞环产生, 回滞环随着应力水平的增高, 表现越明显, 卸载一再加载的应力应变曲线明显比初次加载的要陡, 各应力水平的回滞环近似平行。SJK 料与 NZD 料的软化现象均不明显, 围压增加时, 试样应力-应变关系由软化型逐渐向硬化型过渡。较之 SJK 料和 NZD 料, CHB 料的应力-应变有明显的软化现象。

笔者同时对 3 种粗粒料进行单调加载的三轴固结排水剪试验, 其强度指标列于表 2。将 3 种粗粒土反复进行加卸载试验和单调加载试验进行对比后发现: 3 种粗粒土的反复加卸载试验的峰值偏应力均比单调加载的峰值偏应力高, 内摩擦角略有增加。3 种粗粒土的线性强度指标如表 2 所示, 可以看出, 经历了反复加卸载后, 其黏聚力和内摩擦角均有不同程度的提高。

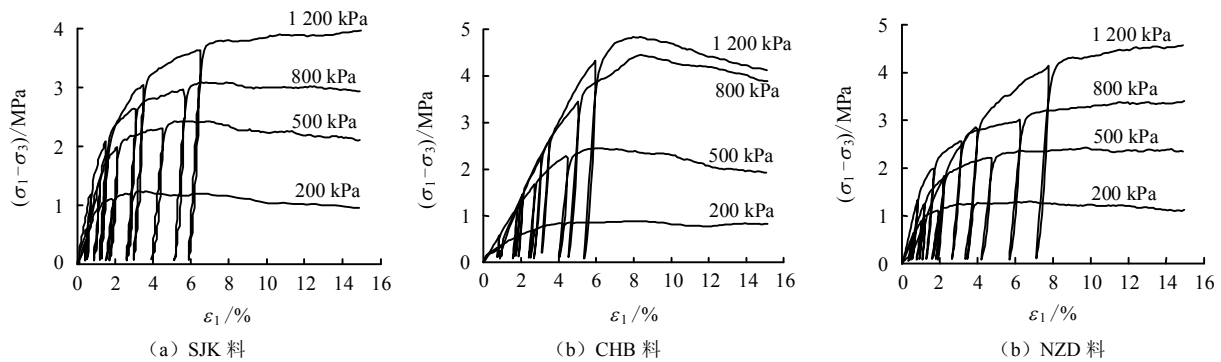
图2 常规三轴反复加卸载 $(\sigma_1-\sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 关系曲线Fig.2 Relationships of  $(\sigma_1-\sigma_3)$ - $\varepsilon_1$  in loading and unloading cycle of conventional triaxial test

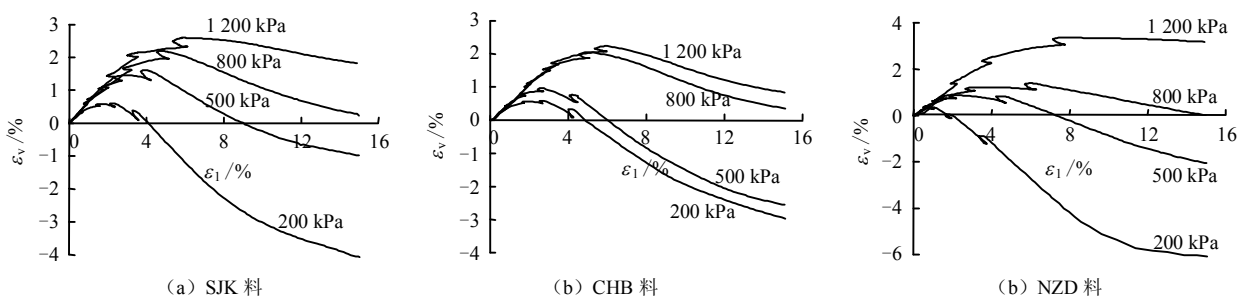
表2 三轴试验线性强度指标对比

Table 2 Comparison of linear strength index of triaxial test

| 试验方式  | SJK 料     |                 | CHB 料     |                 | NZD 料     |                 |
|-------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
|       | $c$ / kPa | $\varphi$ / (°) | $c$ / kPa | $\varphi$ / (°) | $c$ / kPa | $\varphi$ / (°) |
| 单调加载  | 92.5      | 38.7            | 80        | 41.4            | 145       | 38.9            |
| 多次加卸载 | 177.0     | 40.4            | 157       | 43.0            | 204       | 40.2            |

### 3.2 体积变形特性

图3中 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 关系曲线显示, SJK料、NZD料在低围压时, 表现出剪胀特性。围压增高时, 剪胀逐渐减弱, 并最终变为剪缩; 而CHB料具有明显的剪胀性, 即使在围压为1200 kPa时, 仍表现出较强的剪胀趋势。

图3 常规三轴反复加卸载 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 关系曲线Fig.3 Relationships of  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$  in loading and unloading cycle of conventional triaxial test

对试验的3种粗粒土, 当轴向附加应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 从预定的值减小到0时, 试样的体积有时表现为体缩, 有时表现为体胀。是体缩还是体胀, 主要与试样围压及应力水平有关。

根据试验结果整理出每个试样在不同围压不同应力水平时卸载到0后的试样体积应变变化。3种粗粒土不同围压各应力水平卸载体缩量(即体积应变减小量)列于表3。同时, 图4给出了不同围压

下3种土料的卸载体缩量随应力水平的变化情况(“+”表示体缩, “-”表示体胀)。

从图4及表3可以看出, 粗粒土的卸载体缩规律受回弹时应力水平和围压的影响明显。低应力水平( $S=0.25$ )卸载时, 试样体积表现为轻微的体胀或保持不变, 但随着应力水平的增加, 卸载体缩增加。表3中试验数据显示, 相同应力水平下, 卸载体缩量随着围压的增大而减小。

表3 3种粗粒土不同围压各应力水平时卸载体缩量 $\Delta\varepsilon_v$ (单位: %)

Table 3 Volume contraction during unloading under different confining pressures and stress levels (unit: %)

| 应力水平 | 不同围压 (kPa) 下 SJK 料 |        |        |        | 不同围压 (kPa) 下 CHB 料 |       |        |        | 不同围压 (kPa) 下 NZD 料 |        |        |        |
|------|--------------------|--------|--------|--------|--------------------|-------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|
|      | 200                | 500    | 800    | 1200   | 200                | 500   | 800    | 1200   | 200                | 500    | 800    | 1200   |
| 0.25 | -0.010             | -0.013 | -0.014 | -0.015 | 0.000              | 0.000 | -0.018 | -0.023 | -0.013             | -0.019 | -0.037 | -0.045 |
| 0.50 | 0.038              | 0.032  | 0.026  | 0.019  | 0.025              | 0.007 | -0.007 | -0.013 | 0.043              | 0.036  | 0.033  | 0.025  |
| 0.70 | 0.087              | 0.081  | 0.054  | 0.041  | 0.076              | 0.061 | 0.035  | 0.028  | 0.137              | 0.106  | 0.081  | 0.069  |
| 0.90 | 0.296              | 0.245  | 0.181  | 0.151  | 0.225              | 0.160 | 0.113  | 0.081  | 0.313              | 0.279  | 0.243  | 0.231  |

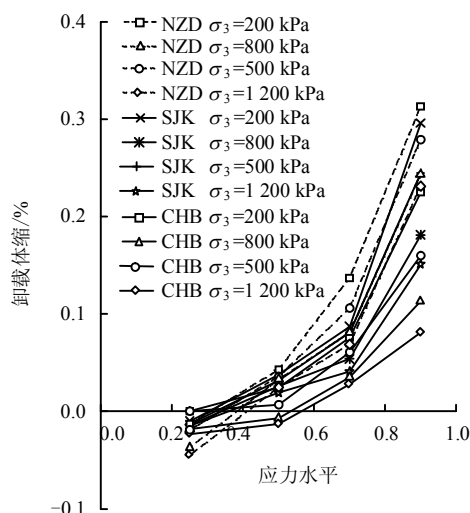


图4 3种粗粒土的卸载体缩

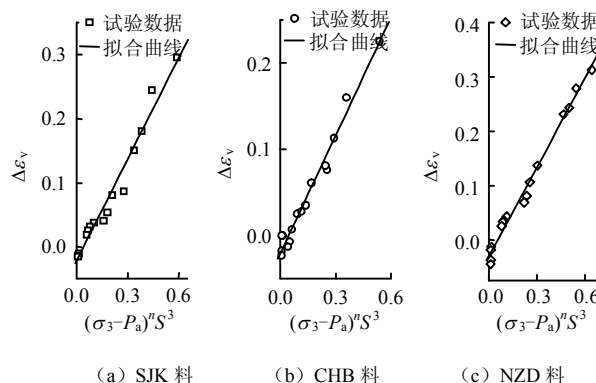
Fig.4 Volume-contraction during unloading of three different coarse-grained soils

不同围压各应力水平时, CHB 料的卸载体缩量明显小于 NZD 料和 SJK 料, 其中, NZD 料的卸载体缩量在 3 者中最大, 不同土料的卸载体缩量的差别可能主要与石料硬度有关, 其相关机制有待进一步研究。

对表 3 数据分析后发现,  $\Delta\varepsilon_v$  与  $S^3$  之间有较好的线性关系。不同围压下其拟合直线的截距变化不大, 但其斜率有明显变化, 而且斜率与围压之间有良好的幂函数关系。因此, 可以用下式拟合

$$\Delta\varepsilon_v = a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n S^3 + b \quad (1)$$

式中:  $n$ 、 $a$  和  $b$  为拟合参数;  $S$  为应力水平;  $P_a$  为大气压力。对 SJK 料,  $n$ 、 $a$  和  $b$  值分别为 -0.310、0.529 和 -0.021 3, CHB 料分别为 -0.442、0.456 和 -0.020 7, NZD 料分别为 -0.179、0.542 和 -0.029 2。为表明式 (1) 的合理性。利用表 3 数据及参数  $n$  整理出  $(\sigma_3/P_a)^n S^3$ , 并画出  $\Delta\varepsilon_v - (\sigma_3/P_a)^n S^3$  的关系, 如图 5 所示, 线性关系较好。

图5  $\Delta\varepsilon_v - (\sigma_3/P_a)^n S^3$  关系曲线  
Fig.5 Relationships of  $\Delta\varepsilon_v - (\sigma_3/P_a)^n S^3$ 

#### 4 卸载—再加载回弹模量分析

利用卸载和再加载时的轴向应力  $\sigma_1$  和轴向应变  $\varepsilon_1$  的比值求得卸载回弹模量, 按式 (2) 计算。由于卸载—再加载过程中出现回滞环, 故用回滞环两交点连线的斜率作为卸载—再加载模量。依据式 (2) 计算得 3 种土料不同围压下不同应力水平对应的回弹模量, 对同一围压下不同应力水平时回弹模量差异较小, 取平均值  $E_{ur}$ , 结果列于表 4。

$$E_{ur} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_1} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\sigma_1$  和  $\Delta\varepsilon_1$  分别为回滞环对角线两端点间轴向应力增量和轴向应变增量。

为研究回弹模量与初始弹性模量  $E_i$  (定义为三轴试验中刚开始剪切的切线弹性模量) 关系, 利用试验数据整理的各围压下的  $E_i$ , 并计算  $E_{ur}/E_i$ , 如表 4 所示。可以看出, 在 2.4~6.3 范围内, 对较硬石料 (SJK、CHB),  $E_{ur}/E_i$  基本均大于 3; 对较软的 NZD 料,  $E_{ur}/E_i$  在 2.5 左右。另外, 随着围压增大,  $E_{ur}/E_i$  有逐渐减小趋势。

表4 3种粗粒料平均回弹模量  $E_{ur}$  及初始弹性模量  $E_i$ Table 4 Average values of  $E_{ur}$  and  $E_i$  of three different coarse-grained soils

|               | 不同围压 (kPa) 下 SJK 料 |      |      |       | 不同围压 (kPa) 下 CHB 料 |      |      |       | 不同围压 (kPa) 下 NZD 料 |      |      |       |
|---------------|--------------------|------|------|-------|--------------------|------|------|-------|--------------------|------|------|-------|
|               | 200                | 500  | 800  | 1 200 | 200                | 500  | 800  | 1 200 | 200                | 500  | 800  | 1 200 |
| $E_{ur}/MP_a$ | 316                | 428  | 501  | 564   | 390                | 513  | 631  | 728   | 345                | 454  | 525  | 587   |
| $E_i/MP_a$    | 81                 | 125  | 156  | 189   | 62                 | 113  | 154  | 200   | 134                | 183  | 215  | 246   |
| $E_{ur}/E_i$  | 3.90               | 3.42 | 3.21 | 2.98  | 6.29               | 4.54 | 4.10 | 3.64  | 2.57               | 2.46 | 2.44 | 2.39  |

##### 4.1 应力水平对回弹模量的影响

根据卸载—再加载试验整理出了 SJK 料、CHB

料和 NZD 料在不同围压不同应力水平时的回弹模量, 如图 6 所示。由图可知: 3 种粗粒料的回弹模量

在不同围压下均表现出随应力水平的增大呈现驼峰状曲线, 回弹模量在应力水平为 0.7 左右时最大。

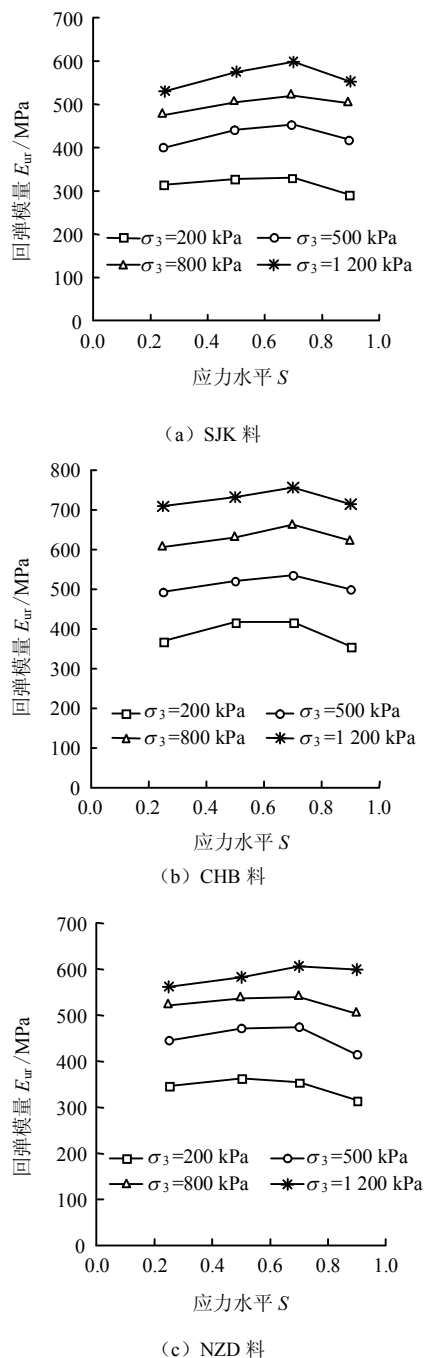


图 6  $E_{ur}$ - $S$  关系曲线  
Fig.6 Relationships of  $E_{ur}$ - $S$

低应力水平时, 随着剪切进行, 试样逐渐被压实, 颗粒间的孔隙得到充填。此时试样的变形主要是颗粒间的接触变形和可恢复性剪胀变形 (颗粒未完全翻越相邻颗粒, 卸载后可回落到原位), 属于弹性变形。因此, 随着应力水平的增大, 回弹模量增大。高应力水平时, 试样被进一步压实。此时, 低围压下试样的变形主要以不可恢复性剪胀 (颗粒已翻越相邻颗粒获得稳定) 为主, 而高围压主要以

颗粒破碎为主, 均为塑性变形, 这可能是回弹模量在较高应力水平时降低的主要原因。

#### 4.2 围压对回弹模量的影响

3 种粗粒料的围压和回弹模量之间的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,  $\lg(\sigma_3/p_a)$  与  $\lg(E_{ur}/p_a)$  具有良好的线性关系, 拟合程度都很好, 说明邓肯-张模型中用  $E_{ur} = k_{ur} p_a (\sigma_3/p_a)^{n_{ur}}$  表示回弹模量是合理可行的。

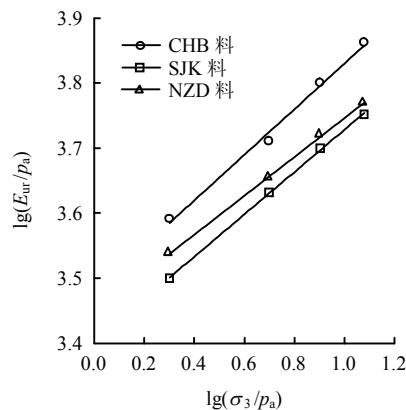


图 7  $\lg(E_{ur}-p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$  关系曲线  
Fig.7 Relationships of  $\lg(E_{ur}-p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$

#### 4.3 回弹模量与单调加载初始弹性模量的关系

根据试验结果, 整理出不同围压下应力水平对应的回弹模量平均值  $E_{ur}$  与单调加载初始模量  $E_i$  的比值  $N$ , 并点绘出  $N$  与围压  $\sigma_3$  的关系, 如图 8 所示。用幂函数拟合它们之间的关系, 发现试验点与拟合曲线吻合较好。幂函数表式可表达为

$$N = \alpha \sigma_3^\beta \quad (3)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  为拟合参数。

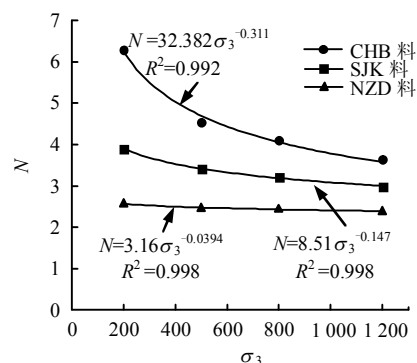


图 8  $N$ - $\sigma_3$  非线性拟合曲线  
Fig.8 Nonlinear fitting curves between  $N$ - $\sigma_3$

从图 8 可以看出: 3 种粗粒土的  $E_{ur}$  与单调加载初始弹性模量  $E_i$  的比值均不是定值, 而是随着围压的降低而呈幂函数降低。其中, CHB 料的  $N$  值在围压从 200 kPa 提高到 500 kPa 时降低程度较大, 此后

随着围压的再增大,  $N$  值降低逐渐趋缓。SJK 料和 NZD 料则在不同围压下的  $N$  值变化不大。同围压下, CHB 料比 SJK 料、NZD 料的  $N$  值较大。

上述 3 种料的回弹模量与初始模量比值随围压变化关系差异可能与这 3 种粗粒土的母岩特性密切相关。CHB 料中卵砾石硬度较大, SJK 料、NZD 料则硬度较小, 尤其是 NZD 料, 从现场取到试验已经过了几年, 有一定程度的风化, 石料较软。至于粗粒料母岩的软硬影响  $N$ - $\sigma_3$  关系的机制, 还有待进一步研究。

#### 4.4 卸载变形参数 $K_{ur}$ 的取值分析

由图 7 中拟合的直线的斜率和截距, 分别得出 3 种土料邓肯模型参数中的卸载一再加载模量数  $k_{ur}$  和指数  $n_{ur}$ , 以此与单调加载条件下的  $k$  和  $n$  值相比较, 比较结果见表 5。

表 5 加载—卸载条件下的变形参数比较  
Table 5 Comparison of deformation parameters for loading and unloading

| 土样名称  | $k_{ur}$ | $k$   | $k_{ur}/k$ | $n_{ur}$ | $n$   | $n_{ur}/n$ |
|-------|----------|-------|------------|----------|-------|------------|
| SJK 料 | 2 526    | 743   | 3.40       | 0.326    | 0.473 | 0.689      |
| CHB 料 | 3 015    | 655   | 4.60       | 0.351    | 0.650 | 0.540      |
| NZD 料 | 2 797    | 1 060 | 2.64       | 0.300    | 0.339 | 0.885      |

表 5 表明:  $n_{ur} < n$ , 两者有较大的差别; SJK 料、CHB 料及 NZD 料的  $k_{ur}$  值分别为各自初始加载荷条件下  $k$  值的 3.4、4.6、2.64 倍, 由此可见, 以往用砂和黏土的经验来取粗粒土的  $k_{ur}$  值, 在很大程度上低估了粗粒土的  $k_{ur}$  值。

## 5 结 论

(1) 粗粒土在低应力水平 ( $S=0.25$ ) 卸载时, 试样表现轻微体胀, 在较高应力水平 ( $S=0.5$ 、 $0.7$  和  $0.9$ ) 卸载时, 表现出不同程度的体缩。卸载体缩量随应力水平的增加而增加、随围压的增加而减小。

(2) 粗粒土的卸载体缩与应力水平、围压的关系密切。通过对试验数据的分析总结出了卸载体缩与应力水平、围压之间的关系式。

(3) 回弹模量随应力水平增大呈现驼峰状曲线, 在应力水平为  $0.7$  左右时最大。 $\lg(\sigma_3/p_a)$  与  $\lg(E_{ur}/p_a)$  具有良好线性关系, 说明邓肯—张模型中用  $E_{ur} = k_{ur} p_a (\sigma_3/p_a)^{n_{ur}}$  表示回弹模量合理可行。

(4) 回弹模量  $E_{ur}$  与单调加载初始弹性模量  $E_i$  的比值  $N$  随着围压的降低呈幂函数降低。对不同土料, 比值  $N$  的大小及其与围压的关系有差异, 这种差异可能与粗粒料母岩硬度有关, 需要深入研究。

(5) 由单调加载得出的  $k$ 、 $n$  和卸载回弹中得到

的  $E_{ur}$  拟合的  $k_{ur}$  可知, 粗粒土  $k_{ur}$  的范围在  $(2.64 \sim 4.60)k$  之间。

## 参 考 文 献

- [1] 矫德全, 陈愈炯. 土的各向异性卸荷体缩[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 9—15.  
JIAO De-quan, CHEN Yu-jiong. The characteristics of anisotropy and unloading of soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(1): 9—15.
- [2] 张建民. 砂土的可逆与不可逆剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 158—161.  
ZHANG Jian-min. The invertible and irreversible shear dilatancy rules of sand soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 158—161.
- [3] 李广信, 武世锋. 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.
- [4] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩的试验研究及与可恢复剪胀[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.
- [5] 陈愈炯. 土的卸荷弹性模量[J]. 工程勘察, 1988, (5): 6—9.  
CHE Yu-jiong. The unloading elastic modulus of soil[J]. **Engineering Investigation**, 1988, (5): 6—9.
- [6] 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. The testing research of modulus of resilience of compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 748—759.
- [7] 魏松, 朱俊高. 粗粒土料湿化变形三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1609—1615.  
WEI Song, ZHU Jun-gao. Study of wettig behavior of coarse grained soil in triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1609—1615.
- [8] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 29(2): 205—211.  
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study of shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 29(2): 205—211.
- [9] 杨光, 孙逊, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1118—1121.  
YANG Guang, SUN Xun, YU Yu-zhen, et al. The testing research of mechanical properties of coarse-grained soil in different stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1118—1121.