

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0036-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.008

## 不同方法缩尺后粗粒料强度和变形特性研究

王思睿<sup>1,2</sup>, 朱俊高<sup>1,2</sup>, 陈浩锋<sup>3</sup>, 翁厚洋<sup>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. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 河海大学, 南京 210098; 3. 常州市建筑科学研究院股份有限公司, 常州 213000; 4. 宏润建设集团股份有限公司, 上海 200235)

**摘要:** 对某原型级配堆石料采用剔除法(TC)和混合法(HH)两种缩尺方法进行缩尺, 对缩尺后的两种粗粒料试样(分别简称TC料和HH料)进行三轴固结排水剪切试验。结果表明: 围压相同时, TC料的峰值应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 与内摩擦角均高于HH料的相应值; TC料有着较强的剪胀性; 相同围压下, 与HH料相比, TC料具有较小的破坏应变 $\varepsilon_{af}$ 与相变处体变 $\varepsilon_{v0}$ 及较高的相变应力比 $M_0$ ; 同一粒径下, TC料割线弹性模量约为HH料的1.03~1.39倍。当颗粒最大粒径增大时, TC料的割线体积模量的增幅小于HH料的相应值。随着颗粒最大粒径的增大, 两种缩尺方法所得的弹性模量参数 $K$ 有所增大而变形模量指数 $n$ 减小。

**关键词:** 粗粒料; 缩尺方法; 三轴试验; 围压; 强度; 变形

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

## Study on Strength and Deformation Characteristics of Coarse Aggregate After Different Grading Scale Methods

WANG Sirui<sup>1,2</sup>, ZHU Jungao<sup>1,2</sup>, CHEN Haofeng<sup>3</sup>, WENG Houyang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098; 3. Changzhou Architectural Research Institute Co., Ltd, Changzhou 213000, China; 4. Hongrun Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200235, China)

**Abstract:** Two grading scale methods in the Chinese standard, exclusion method and hybrid method, are used to scale a kind of coarse aggregate. Triaxial consolidation drainage shear tests have been performed on samples of different particle sizes. The results show that when the confining pressure is the same, the peak stress  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  and friction angle  $\varphi$  obtained by the exclusion method are higher than that obtained by the hybrid method. Coarse-grained material acquired by the exclusion method has a stronger dilatancy. Besides, under the same confining pressure, compared with coarse-grained material obtained by the hybrid method, both  $\varepsilon_{af}$  and  $\varepsilon_{v0}$  obtained by the exclusion method are smaller and its  $M_0$  is higher. Lastly, under the same particle size, the secant elastic modulus obtained by the exclusion method is about 1.03 to 1.39 times higher than that obtained by the hybrid method. When the particle size increases, the bulk modulus obtained by the exclusion method increases less than that obtained by the hybrid method and the elastic modulus parameter  $K$  obtained by the two scale methods increases and the deformation modulus index  $n$  decreases.

**Key words:** coarse-grained material; grading scale methods; triaxial test; confining pressure; strength; deformation

目前广泛使用的粗粒料有块石、碎石等由粗颗粒组成的无黏性混合料, 或者黏性土中含有大量粗颗粒的混合土<sup>[1-3]</sup>。由于仪器尺寸限制, 无法直接对大粒径粗粒料进行室内试验。需要进行缩尺。目前

收稿日期: 2018-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479052); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404801)

作者简介: 王思睿(1995-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事土体基本性质与土石坝工程方面的研究。

常用的级配缩尺方法有剔除法、等量替代法、相似级配法和混合法<sup>[4]</sup>。但不论采用哪种方法，都存在缩尺效应。缩尺效应的研究主要集中在研发超大型的仪器和研究缩尺规律<sup>[8-11]</sup>。尽管国内外学者取得了许多有益的成果，但涉及缩尺方法对粗粒料试样的强度与变形特性方面影响的深入研究较少。本文采用大型及中型三轴仪，对双江口心墙堆石坝坝壳堆石料开展了三轴固结排水剪切试验，重点研究了不同缩尺方法对缩尺土料的应力应变关系、体积变形特性、割线模量及邓肯-张模型参数的影响。

### 1 试验介绍

本文试验的大、中型三轴仪的试样直径分别为 300 mm 与 101 mm，高度为 600 mm 和 200 mm。根据规范<sup>[4]</sup>，试验采用的径径比(试样直径 D 与最大粒径  $d_{max}$  的比值)取为 5，即对于大型三轴试验最大粒径为 60 mm，中型三轴试验最大粒径为 20 mm。

本文研究的土料为双江口土石坝的坝壳粗粒料。由于原级配土料颗粒最大粒径高达 600 mm，需对原级配土料进行缩尺，级配缩尺方法为混合法(HH)与剔除法(TC)。每种级配缩尺方法缩尺后土料的最大粒径  $d_{max}$  为 60 mm 与 20 mm。原级配以及缩尺土料的级配曲线如图 1 所示，图中 T20 表示采用剔除法缩尺所得颗粒最大粒径为 20 mm 的土料，其他编号类似。

对缩尺后的两种土料(分别简称 TC 料和 HH 料)进行三轴固结排水剪切试验。制样采用分层振捣法振捣密实，用水头饱和法进行饱和。对每个试样进行三组不同围压(500 kPa, 800 kPa 与 1 200 kPa)的试验，试验终止轴向应变均为 15%。为便于不同缩尺方法及不同最大粒径土料应力应变性质的比较，

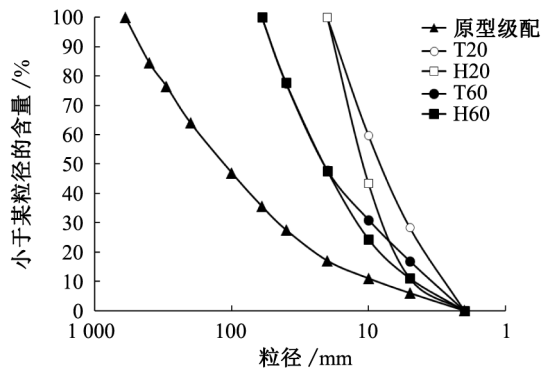


图 1 原型土料及试验土料的级配曲线  
Fig.1 Particle size distribution

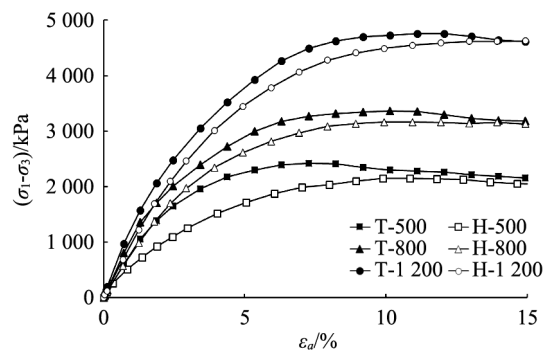
本文各试验的试样控制其相对密实度  $r=0.9$ 。

### 2 试验结果及分析

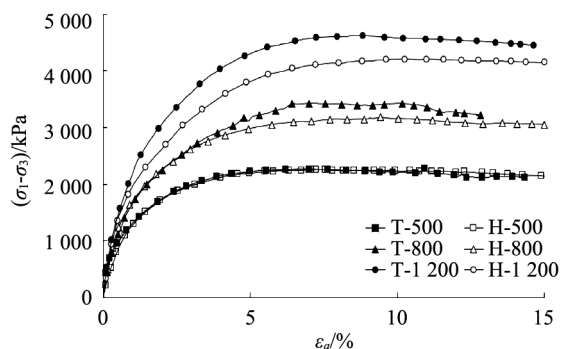
#### 2.1 应力应变关系及强度特性分析

不同方法缩尺所得土料在三种围压下的应力—应变  $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_a$  关系曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出，对应相同应力以及相同颗粒最大粒径，不同围压下 TC 料的主应力差值  $(\sigma_1-\sigma_3)$  均高于 HH 料的相应值。在低围压时，不同颗粒最大粒径下按两种方法缩尺所得的粗粒料均有不同程度的软化现象，且 TC 料的软化更为明显，但总体软化不显著。随着围压的增大，应力软化逐渐减弱。

表 1 列出了各试样在不同围压下的峰值偏应力，表中增大百分比为两种方法的峰值偏应力  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  的差值与混合法  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  的比值，用百分数表示。根据表 1 的数据，整理  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  与  $\sigma_3$  的关系曲线，并绘于图 3。由图 3 可知，试样的峰值偏应力  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  均随围压的增大而增大，且与围压近似成线性关系。相同围压下，TC 料的峰值偏应力  $(\sigma_1-\sigma_3)_f$  均高于 HH 料的相应值，但两者相差不大，最大不超过 10%。



(a)  $d_{max}=20$  mm



(b)  $d_{max}=60$  mm

图 2 两种缩尺土料的  $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_a$  关系曲线

Fig.2 The  $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_a$  relationship of tested rockfill with two scaling methods

此外,在同一围压,同一缩尺方法下,两种粒径的粗粒料的峰值偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 相差不大。

图4给出了各试样在不同围压下达至剪切破坏(即偏应力达到峰值 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ )时的轴向应变——简称破坏应变,用 $\varepsilon_{af}$ 表示。可以看出,对应同一种缩尺方法,随着围压的增大, $\varepsilon_{af}$ 逐渐增大。当颗粒最大粒径相同时,各围压下HH料的破坏应变 $\varepsilon_{af}$ 均高于TC料的 $\varepsilon_{af}$ 。随着颗粒最大粒径的增大,各围压下用两种方法缩尺所得的 $\varepsilon_{af}$ 均有着不同幅度的减少。总体而言,虽然用两种方法缩尺的试样在3种围压下的 $\varepsilon_{af}$ 有着相似的变化规律,但两种方法间的 $\varepsilon_{af}$ 值有较为显著的差异。

表2列出了各试样在不同围压下的内摩擦角值。

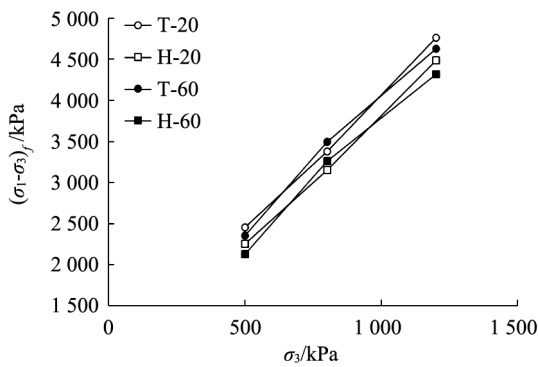


图3 峰值偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 与围压 $\sigma_3$ 的关系曲线

Fig.3 The relationship between peak strength and confining pressure

图5根据表2的数据,整理出了内摩擦角与 $\sigma_3$ 的关系曲线。可以看出,随围压 $\sigma_3$ 的增大,四组试验的内摩擦角值均有所减小。相同围压下,TC料的内摩擦角均高于同一最大粒径下HH料的值,两者最大相差13.57%。同一围压下T20的内摩擦角值平均约比H20的值大4.5°,而同一围压下T60与H60的值却相差较小,前者平均比后者大1.1°。此外,当试样颗粒最大粒径由20mm增大到60mm时,各围压下HH料的内摩擦角增幅较大,约为3°,而TC料的内摩擦角却相差不大。

总体而言,与混合法缩尺所得粗粒料试样相比,用剔除法缩制的粗粒料试样具有较大的主应力差值 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 、峰值偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 以及内摩擦角,故用剔

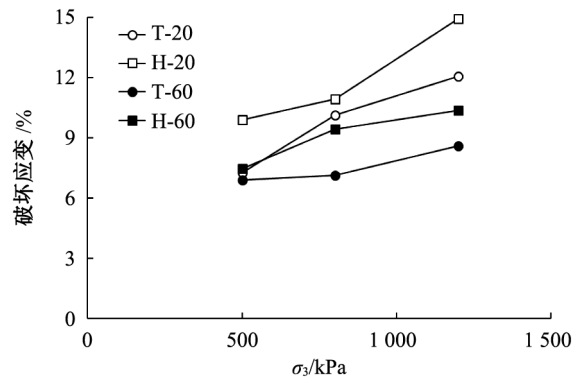


图4 各试样破坏应变

Fig.4 Axial strains of samples at failure

表1 不同围压下的峰值偏应力表

Tab.1 Peak stress of different confining pressure

围压 /kPa	最大粒径 /mm	峰值偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ /kPa		增大百分比 /%
		混合法	剔除法	
500	20	2 264.75	2 428.96	7.25
	60	2 261.19	2 281.18	0.88
800	20	3 165.43	3 364.89	6.30
	60	3 179.76	3 426.25	7.75
1200	20	4 628.63	4 759.22	2.82
	60	4 214.42	4 627.21	9.79

表2 不同围压下的内摩擦角表

Tab.2 Friction angle of different confining pressure

围压 /kPa	最大粒径 /mm	内摩擦角 /°		增大百分比 /%
		混合法	剔除法	
500	20	41.19	45.10	9.49
	60	43.90	44.35	1.03
800	20	38.03	42.68	12.23
	60	41.70	42.97	3.05
1 200	20	36.71	41.69	13.57
	60	39.58	41.18	4.04

除法缩制的粗粒料有着较大的抗剪强度。

### 2.2 体积变形特性分析

各试样在不同围压下的体积应变—轴向应变 ( $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ ) 关系曲线如图 6 所示。图中可见，用两种方法缩制的粗粒料有相似规律：即随着轴向应变  $\varepsilon_a$  的增长，试样  $\varepsilon_v$  由剪缩不断向剪胀发展；高围压下试样剪胀都较为明显。在最大粒径为 20 mm 时，两种方法缩制的粗粒料的  $\varepsilon_v$  差距较大，HH 料会有较大

的剪缩变形，这是因为用混合法缩尺时粗粒含量较多，5 mm 以上的料约占 89%，颗粒间孔隙较大，剪切时一些小颗粒容易被充填到临近颗粒间孔隙中，表现为剪缩变形。而用剔除法缩尺时细粒含量多，5 mm 以下的料约占 35%，试样密度较大，压缩性小，剪切过程中表现出较强的剪胀性。总体而言，与 HH 料相比，TC 料有较强的剪胀性。

剪胀性的准确描述对建立合理反映剪胀性的本构模型十分重要。为进一步研究不同缩尺方法对剪胀性的影响，本文整理出了试样在不同围压下的相变处 ( 体积压缩转变为体积膨胀的拐点 ) 体积应变值  $\varepsilon_{v0}$ ，并画出了两者的关系曲线，如图 7 所示。可以看出，四组试验的  $\varepsilon_{v0}$  随着围压的增大而增大。除围压 500 kPa 下 H60 的  $\varepsilon_{v0}$  比 T60 的  $\varepsilon_{v0}$  小，同围压下 HH 料的相变处  $\varepsilon_{v0}$  值均大于 TC 料的  $\varepsilon_{v0}$  值，两者最大相差 0.53%。总体而言，用 HH 料在剪切过程中表现出更明显的压缩性。

一些本构模型在建立之时，常采用相变点的应力比 ( 以  $M_0$  表示，定义为对应点的  $q/p$  ) 来表述硬化参数或剪胀方程等。为研究相变点处的应力比  $M_0$  与围压之间的关系，整理试验数据并且点绘出  $M_0$  与  $\sigma_3/p_a$  之间的关系曲线，如图 8 所示。从图中可以看出，随着围压的不断增大，四组试验的  $M_0$  均减小，且与围压成良好的线性关系，可以用下式进行拟合：

$$M_0 = a \frac{\sigma_3}{p_a} + b \quad (1)$$

式中，a、b 为拟合参数，具体值如图 8 所示。

此外，在图 8 中也可以看出：相同围压相同粒径下，TC 料的  $M_0$  均高于 HH 料的相应值，较高的  $M_0$  说明土颗粒有较高的翻越势能，宏观上即表现为 TC 料有更强的剪胀性。

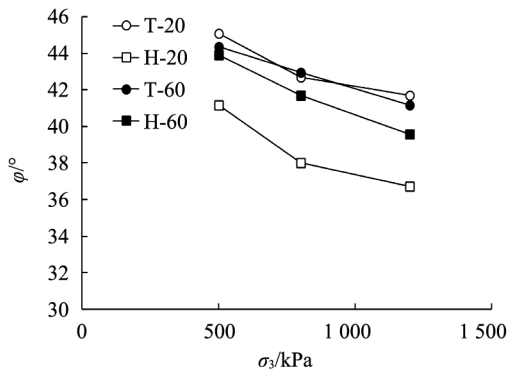
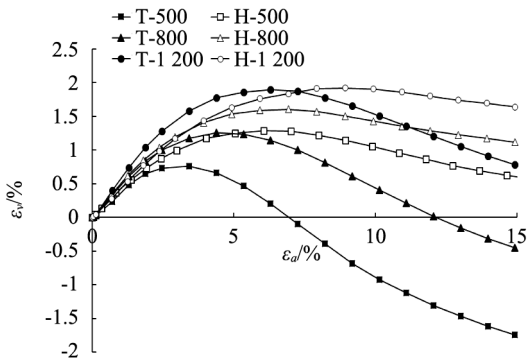
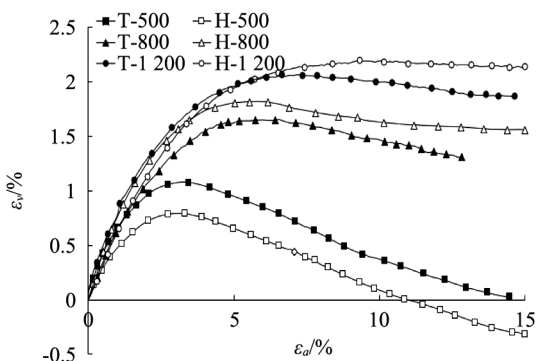


图 5 内摩擦角  $\varphi$  与围压  $\sigma_3$  的关系曲线

Fig.5 The relationship between friction angle and confining pressure



(a)  $d_{max}=20$  mm



(b)  $d_{max}=60$  mm

图 6 两种缩尺土料的  $\varepsilon_v - \varepsilon_a$  关系曲线

Fig.6 The  $\varepsilon_v - \varepsilon_a$  relationship of tested rockfill with two scaling methods

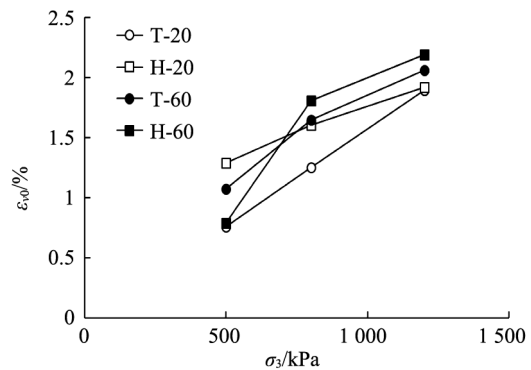


图 7 相变处体变  $\varepsilon_{v0}$  与围压  $\sigma_3$  的关系曲线

Fig.7 The relationship between phase transformation volumetric strain and confining pressure

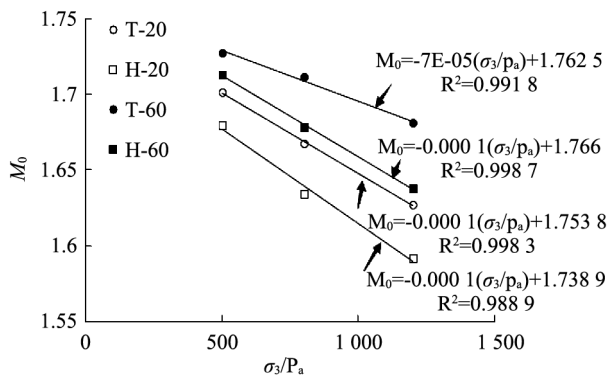
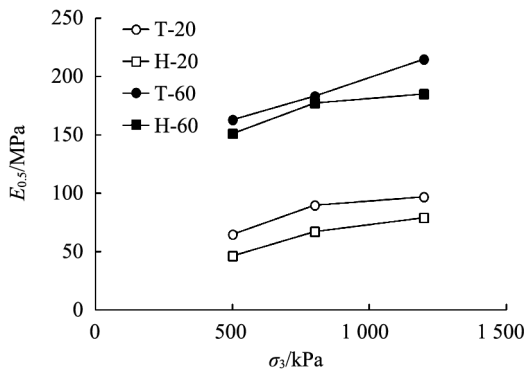
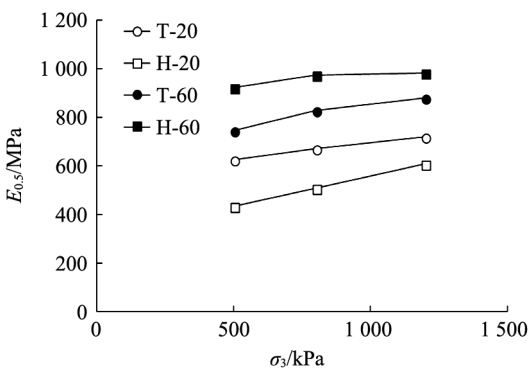


图8 相变应力比  $M_0$  与围压  $\sigma_3$  的关系曲线  
Fig.8 The relationship between  $M_0$  and confining pressure



(a)  $E_{0.5}$  与  $\sigma_3$  的关系曲线



(b)  $K_{0.5}$  与  $\sigma_3$  的关系曲线

图9 割线变形模量  $E_{0.5}$  及  $K_{0.5}$  与围压  $\sigma_3$  的关系曲线  
Fig.9 The relationship between modulus  $E_{0.5}$ ,  $K_{0.5}$  and confining pressure

剔除法是将超大粒径土粒剔除后,把剩余部分按百分比扩大。对于超大粒径土料较多的粗粒料,按剔除法缩尺会使剔除后的剩余土料比例较小,扩大倍数变大,可能会使细粒料变多,试样密度较大,压缩性小,体现在应变特性上即 TC 料的  $\varepsilon_{af}$  与  $\varepsilon_{v0}$  均小于 HH 料的相应值。

### 2.3 割线变形模量分析

对一些高土石坝堆石区,其应力水平一般在 50% 以下。割线弹性模量  $E_{0.5}$  可通过应力水平 50% 处的偏应力与轴向应变确定,而割线体积模量  $K_{0.5}$  可通过该应力水平下的偏应力与体变确定。本文整理了四组试验  $E_{0.5}$  及  $K_{0.5}$  与围压的关系,如图 9 所示。可以看出,四组试验的  $E_{0.5}$  与  $K_{0.5}$  均随围压的增大而增大。在同一种缩尺方法下,大型三轴试验的  $E_{0.5}$  与  $K_{0.5}$  均高于中型三轴试验。同一粒径下,TC 料的  $E_{0.5}$  高于 HH 料的  $E_{0.5}$ ,前者约为后者的 1.03 ~ 1.39 倍。当粒径由 20 mm 增大到 60 mm 时,TC 料的  $K_{0.5}$  的增幅小于 HH 料的相应值。

### 2.4 邓肯-张模型参数分析

表 3 给出了由试验结果整理所得线性和非线性强度指标与邓肯-张模型参数。由表 3 可以看出,剔除法下颗粒最大粒径分别为 20 mm 和 60 mm 的试样  $\varphi$  值非常接近,相差仅 0.4°,而混合法下颗粒最大粒径分别为 20 mm 和 60 mm 的试样  $\varphi$  值差别较大,且随着粒径的增大  $\varphi$  值有所下降。随着颗粒最大粒径的增大,HH 料的  $c$ 、 $\varphi_0$ 、 $\Delta\varphi$  值均有所增大,而 TC 料相应值却有所减小。除此以外,由表 3 也可以看出,两种缩尺方法下试样的弹性模量参数  $K$  的变化范围在 229 ~ 2 321 之间,尽管变化范围较大,但总体呈现出随颗粒最大粒径增大而增大的趋势。另一方面,随着颗粒最大粒径的增大,两种方法缩尺所得的变形模量指数  $n$  均有所减小。

表 3 强度指标与邓肯-张模型参数表

Tab.3 Strength indexes of samples and parameters of Duncan-chang model

缩尺方法	粒径/mm	线性		非线性		$R_f$	$K$	$n$	$G$	$F$	$D$
		$c/kPa$	$\varphi/^\circ$	$\varphi_0/^\circ$	$\Delta\varphi/^\circ$						
混合法	20	81.47	40.08	46.27	4.63	0.77	229	0.77	0.36	0.075	2.92
	60	172.80	37.00	49.31	8.25	0.91	2 321	0.20	0.35	0.159	5.50
剔除法	20	136.28	39.73	50.91	8.70	0.87	746	0.37	0.51	0.215	3.09
	60	112.40	39.80	47.59	5.27	0.85	1 991	0.23	0.46	0.376	10.40

## 参考文献:

- [1] John R Dymond, Mrray R Jessen. Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country[J]. ITC Journal/the International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences, 1999, 1(2): 122-131.
- [2] 石菊松, 石玲, 吴树仁, 等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1020-1030.
- [3] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995-1005.
- [4] 杜娟. 单体滑坡灾害风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [5] 向玲, 王世梅, 王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应——以三峡库区树坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 876-882.
- [6] 向学坤, 文海家, 谢朋, 等. 强降雨条件下诱发单体滑坡的多场特征耦合研究[A]. 中国地质学会工程地质专业委员会. 2015年全国工程地质学术年会论文集[C]. 中国地质学会工程地质专业委员会: 《工程地质学报》编辑部, 2015: 9.
- [7] 李佳春. 降雨入渗对麻湾村滑坡稳定性影响研究[D]. 中国地质大学(北京), 2018.
- [8] 顾春新. 城市短历时暴雨强度公式及参数确定方法研究[D]. 河海大学, 2007.
- [9] 刘光文. 皮尔逊Ⅲ型分布参数估计[J]. 水文, 1990(4): 1-15.
- [10] 张洁, 吕特, 薛建锋, 等. 适用于斜坡降雨入渗分析的修正 Green-Ampt 模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2451-2457.
- [11] UZIELLI M, NADIM F, LACASSE S, et al. A Conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 251 - 256.

(责任编辑 李新)

(上接第40页)

## 3 结论

1) 在低围压时, 两种缩尺方法缩制的粗粒料试样均有不同程度的软化现象, 且 TC 料的软化更为明显。围压相同时, TC 料的峰值偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  与内摩擦角均高于同一粒径下 HH 料的相应值。

2) TC 料的  $\varepsilon_{af}$  与  $\varepsilon_{v0}$  均小于 HH 料的相应值, 说明用剔除法缩制的粗粒料的压缩性较小。相同围压相同粒径下, TC 料的  $M_0$  均高于 HH 料的相应值, 较高的  $M_0$  说明土颗粒有较高的翻越势能, 宏观上即表现为 TC 料有更强的剪胀性。总体而言, 与 HH 料相比, TC 料有较强的剪胀性。

3) 两种方法缩尺所得的割线弹性模量  $E_{0.5}$  均随围压的增大而增大。同一缩尺方法下, 大型三轴试验在应力水平 50% 处的割线弹性模量  $E_{0.5}$  及割线体积模量  $K_{0.5}$  均高于中型三轴试验。同一颗粒最大粒径下, TC 料的  $E_{0.5}$  高于 HH 料的  $E_{0.5}$ , 前者约为后者的 1.03 ~ 1.39 倍。

4) 两种缩尺方法缩制的试样强度指标值有较大差别; 随着颗粒最大粒径的增大, HH 料的  $c$ 、 $\varphi_0$ 、 $\Delta\varphi$  值均有所增大, 而 TC 料的相应值却有所减小; 与 TC 料相比, HH 料的弹性模量参数  $K$  的变化幅度更大。

## 参考文献:

- [1] 日本土质工学会著. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹译. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 中华人民共和国行业标准. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [5] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1967, 93(2): 27-43.
- [6] MARSCHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972, 98(1): 95-114.
- [7] 福島伸二, 北島明. 超大型三軸壓縮試驗裝置の歩みとその果たした役割[J]. 土と基礎, 1998, 46(11): 29-32.
- [8] 朱俊高, 翁厚洋, 吴晓铭, 等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2394-2398.
- [9] 傅华, 韩华强, 凌华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645-2649.
- [10] AHAD, BAGHERZADEH Khalkhali, ASGHAR, et al. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils[J]. Particuology, 2009, 7(1): 83-91.
- [11] 王永明, 朱晟, 任金明, 等. 筑坝粗粒料力学特性的缩尺效应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1799-1806.

(责任编辑 李新)