

DOI: 10.11779/CJGE201902002

基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究

孔宪京^{1, 2}, 宁凡伟^{1, 2}, 刘京茂^{*1, 2}, 邹德高^{1, 2}, 周晨光^{1, 2}

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工程抗震研究所建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对某一爆破筑坝堆石料开展了试样直径 1 m (最大粒径为 200 mm) 的超大型和试样直径 0.3 m (最大粒径为 60 mm) 的常规大型三轴固结排水剪切试验, 研究了平行相似级配条件下最大粒径对应力 - 应变关系、颗粒破碎、特征应力状态、割线模量及邓肯张 E-B 模型参数的影响。试验结果表明: ①大型三轴试验的峰值内摩擦角大于超大型三轴试验, 并且峰值应力处的轴向应变小于超大型三轴试验; ②大型三轴试验的相变应力比大于超大型三轴试验, 并且相变处的体变及轴向应变均小于超大型三轴试验; ③大型三轴试验的颗粒破碎率小于超大型三轴试验, 但二者平行粒组的变化规律相同; ④大型三轴试验在应力水平 50% 处的割线弹性模量及割线体积模量均大于超大型三轴试验。大型三轴试验的邓肯张 E-B 模型参数 k , k_b 分别是超大型三轴试验的 1.22 倍、1.38 倍。研究成果可为建立考虑缩尺效应的堆石料本构模型和分析土工构筑物变形提供重要的试验依据。

关键词: 堆石料; 超大三轴; 缩尺效应; 最大粒径; 颗粒破碎

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)02-0255-07

作者简介: 孔宪京(1952-), 男, 博士, 中国工程院院士, 主要从事岩土地震工程、高坝和核电工程抗震研究工作。
E-mail: kongxj@dlut.edu.cn。

Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests

KONG Xian-jing^{1, 2}, NING Fan-wei^{1, 2}, LIU Jing-mao^{1, 2}, ZOU De-gao^{1, 2}, ZHOU Chen-guang^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A super-large triaxial apparatus and a common large triaxial apparatus are used to conduct triaxial tests on quarried rockfill materials with the maximum particle size d_{\max} of 200 and 60 mm in parallel gradation. The study mainly focuses on the effect of particle size on the stress-strain relation, particle breakage, characteristic stress state and parameters of Duncan-Chang model. The results show that the peak friction angle of $d_{\max}=60$ mm is higher than that of the $d_{\max}=200$ mm, and the axial stain at the peak strength of $d_{\max}=60$ mm is smaller than that at $d_{\max}=200$ mm. The phase transformation stress ratio of $d_{\max}=60$ mm is higher than that at $d_{\max}=200$ mm, and the volumetric and axial strains in phase transformation state are smaller than those at $d_{\max}=200$ mm. The amount of particle breakage of $d_{\max}=200$ mm is greater than that at $d_{\max}=60$ mm. The secant elastic and bulk moduli at 50% stress level of $d_{\max}=60$ mm are larger than those at $d_{\max}=200$ mm. The parameters k and k_b of Duncan-Chang model for $d_{\max}=60$ mm are 1.22 and 1.38 times those for $d_{\max}=200$ mm, respectively. This study may provide valuable experimental references for the constitutive model considering scale effect and the deformation analysis for rockfill structures.

Key words: rockfill material; super-large triaxial test; scale effect; maximum particle size discrete; particle breakage

0 引言

堆石料是高土石坝、路基、人工岛等大型土工构筑物的主要建筑材料, 其原型设计级配的最大粒径可达到 800~1000 mm。由于堆石料的颗粒尺寸大, 几乎无法对原型堆石料进行试验, 只能进行缩尺后试验研究。国内外学者对堆石料的缩尺效应进行了大量的研究^[1-10], 已有的研究成果普遍认为, 缩尺后会高估原型堆石料的强度^[1-2, 4-5, 7-10], 但部分学者的研究成果

得到相反的结论^[3, 6]。这可能与采用的缩尺方法、密度控制条件、颗粒形状及强度等有关^[11]。堆石料的力学特性对土工构筑物的安全性具有决定性的影响, 目前

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404902); 国家自然科学基金项目(51678113, 51779034, 51608095); 中央高校基本科研业务费项目(DUT17ZD219)

收稿日期: 2018-01-17

*通讯作者(E-mail: liujm@dlut.edu.cn)

堆石料缩尺效应的研究主要关注缩尺后峰值强度的规律, 对于缩尺后堆石料变形特性的变化规律和机理的认识尚不清楚, 堆石料的缩尺效应一直是困扰工程界而又亟待解决的难题之一。

目前为止, 堆石料缩尺效应的研究仍基本处于定性分析阶段, 且已有研究大都是通过直径 300 mm 的常规三轴试样向更小尺寸方向发展。大比例缩尺后会导致细颗粒的增加, 颗粒的填充关系与原型可能有较大差别。采用最大粒径小于 60 mm 的试验参数, 不可避免地会有较大的偏差。鉴于此, 墨西哥和美国在 20 世纪 60 至 70 年代^[1-2], 日本在 20 世纪 70 年代和 20 世纪 90 年代末以及法国在 21 世纪初^[8, 12], 相继研发了直径 1.0~1.2 m 的超大型三轴仪, 可进行最大粒径 250 mm 的三轴试验, 试验颗粒尺寸更接近实际情况, 试验结果误差更小。Marachi 等^[2]采用相似级配法缩尺对 3 种堆石料进行了不同试样尺寸的三轴试验, 结果表明在相同孔隙比的条件下堆石料的峰值内摩擦角随最大粒径的增大而减小。Hu 等^[8]对某石灰岩进行了最大粒径为 160 mm 三轴剪切试验, 结果表明最大粒径对峰值内摩擦角影响较小。超大型三轴试验涉及到的问题非常复杂, 且相比于常规大型三轴试验要耗费大量的人力及物力^[12]。目前仅日本及法国新研制的超大型三轴仪仍在使用, 但这两台设备可进行试验的围压较小, 不能满足进行高围压下堆石料试验的条件。

本文采用试样直径 1 m 的超大型三轴仪与常规大型三轴仪, 针对某一爆破筑坝堆石料开展了不同最大粒径的堆石料三轴固结排水静力剪切试验, 重点研究了平行相似级配条件下最大粒径不同的两组试验在应力-应变关系、颗粒破碎、特征应力状态、割线模量及邓肯张 E-B 模型参数上的差异, 并分析了其对土工构筑物安全评价的影响。研究成果可为土工构筑物变形分析提供重要的试验依据。

1 试验介绍

试验仪器为大连理工大学工程抗震研究所最新研制的超大型三轴仪及高压大型三轴仪^[13]。其中超大型三轴试样尺寸为直径 1000 mm, 高 2000 mm, 最大围压 3 MPa。大型三轴试样尺寸为直径 300 mm, 高 700 mm, 最大围压 4 MPa。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^[14], 即对于超大型三轴试验最大粒径为 200 mm, 大型三轴试验最大粒径为 60 mm。超大型三轴仪及大型三轴仪均布置有内置力传感器和高压防水的局部位移计(LDT), 可分别消除传力轴摩擦力对力测量的影响和端部误差对轴向应变测量的影响^[15-16]。超大型三轴及大型三轴试验的

体变可分别通过体变管排出水的体积以及压力室内水体积的变化进行测量。

本文研究的堆石料是某堆石坝主堆石料, 岩性为英安岩, 岩块坚硬, 岩石相对密度为 2.63, 颗粒三维形状指标无显著差别^[11]。采用相似级配法缩尺, 原型及试验级配见图 1。超大型及大型三轴试验最大粒径颗粒对比见图 2。

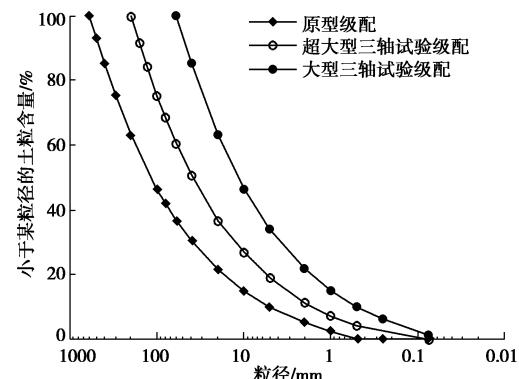


图 1 原型级配及试验级配

Fig. 1 Grain-size distribution curves (original and test)



图 2 最大粒径对比

Fig. 2 Comparison of maximum particle sizes

制样采用分层振捣法, 超大型三轴试验共分 10 层装样, 每层 20 cm, 大型三轴试验分 7 层装样, 每层 10 cm。采用表面振动器击实, 击振频率均为 50 Hz。采用控制试样干密度法制样。试样采用水头饱和法进行饱和。固结完成后均以 0.1%/min 的应变速率剪切。共进行 4 组不同围压的试验, 具体试验控制条件见表 1, 试验终止轴向应变均为 20%。

表 1 试验控制条件

Table 1 Control conditions in tests

试验名称	试样 直径 /mm	最大 粒径 /mm	制样干密 度 /(g·cm ⁻³)	围压 σ_3 /kPa
超大型三轴	1000	200	2.107	400, 1000, 1500, 2000
大型三轴	300	60	2.107	400, 1000, 1500, 2000

2 试验结果与分析

2.1 轴向应变 - 应力 - 体变关系

图3给出了超大型、大型三轴试验不同围压下的应力比 η ($\eta=q/p'$, 其中 q 为广义剪应力, p' 为平均主应力) - 轴向应变 ε_a 和体变 ε_v - 轴向应变 ε_a 关系曲线。可以看出, 随着围压的增大, 两组试验的 $\eta - \varepsilon_a$ 曲线逐渐下移, $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线逐渐上移, 试验结果均表现出低围压剪胀、高围压剪缩, 随围压增大应力软化逐渐减弱的特性。相同围压下超大型三轴试验的 $\eta - \varepsilon_a$ 曲线位于大型三轴试验的下侧, $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线位于其上侧, 大型三轴试验的剪胀和软化特性明显强于超大型三轴试验。

图4, 5给出了两组试验试验前后试样的典型照片 ($\sigma_3=1000 \text{ kPa}$)。由图4, 5可以看出, 试验后试样均被压成鼓状。

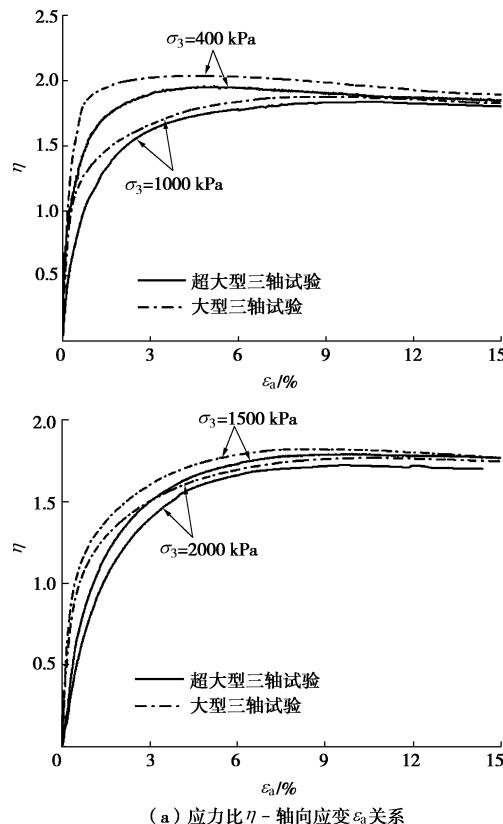
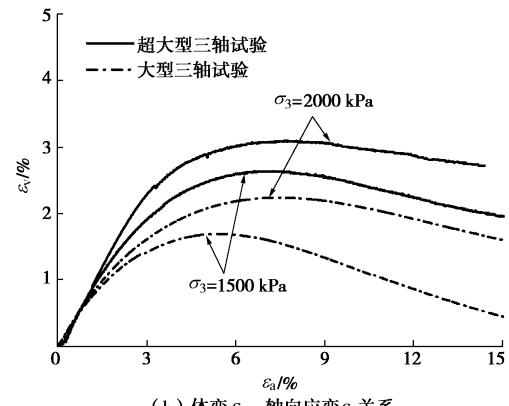
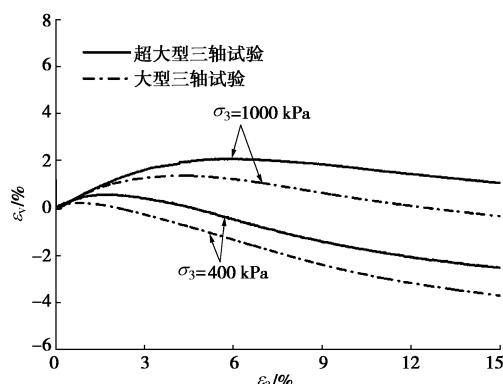
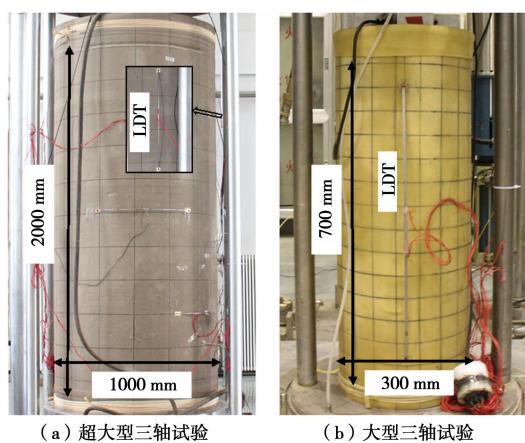
(a) 应力比 η - 轴向应变 ε_a 关系图3 应力比 η - 轴向应变 ε_a 及体变 ε_v - 轴向应变 ε_a 关系曲线Fig. 3 η - ε_a and ε_v - ε_a relation of test rockfills

图4 试验前试样对比

Fig. 4 Samples before tests



图5 试验后试样对比

Fig. 5 Samples after tests

2.2 颗粒破碎

颗粒破碎作为堆石料力学特性之一, 是影响高土石坝变形的重要因素^[17]。本文对超大型、大型三轴试验后的试样进行了风干后筛分。试验前后对于粒径小于 5 mm 的颗粒采用旋振筛筛分, 大于 5 mm 的颗粒采用大型直线振动筛筛分, 筛分控制标准相同。本文整理了最大粒径不同的两组试验的 Marsal 颗粒破碎率 B_m ^[1], 如表 2 所示。可以看出, 两组试验的颗粒破

碎率均随围压的增大而增大, 相同围压下超大型三轴试验的颗粒破碎明显高于大型三轴试验, 且二者的差距随着围压的增大逐渐增大, 前者是后者的 1.17~1.32 倍。

图 6 给出了两组试验试验前后平行粒组典型的颗粒含量变化 ($\sigma_3=1000$ kPa)。两组试验的粒组变化均表现为粒径较大粒组 ($d/d_{\max}>0.4$) 的颗粒含量减少, 粒径较小粒组 ($d/d_{\max}<0.2$) 的颗粒含量增加, 中间粒径的颗粒含量变化不大, 其他各围压试验均有相同的规律。可以看出, 最大粒径不同的两组试验的粒组变化规律趋势一致, 说明尽管二者颗粒破碎量不同, 但其变化规律是相同的。

表 2 不同围压下的颗粒破碎率 B_m

Table 2 Variation of particle breakage B_m with confining pressure

(%)

试验编号	$\sigma_3=400$ kPa	$\sigma_3=1000$ kPa	$\sigma_3=1500$ kPa	$\sigma_3=2000$ kPa
超大型三轴	8.42	14.03	15.90	21.09
大型三轴	7.21	11.93	12.25	15.98

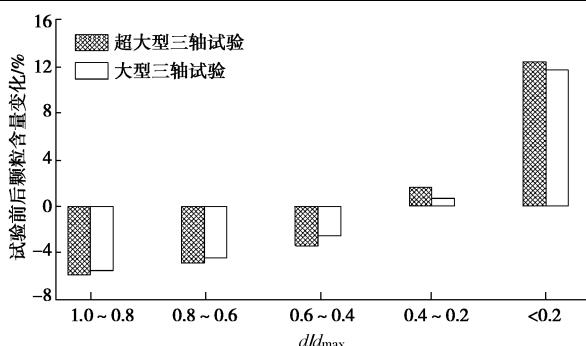


图 6 试验后各粒组颗粒含量的变化 ($\sigma_3=1000$ kPa)

Fig. 6 Variation of each set of grains ($\sigma_3=1000$ kPa)

2.3 特征应力状态

图 7 为堆石料常规三轴剪切试验的典型轴向应变-应力-体变关系示意图。本文研究了超大型、大型三轴试验的峰值应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 、峰值应力处的轴向应变 ε_{af} 、相变应力比 M_{pt} 、相变处的轴向应变 ε_{apt} 以及相变处的体变 ε_{vpt} 之间的差别。

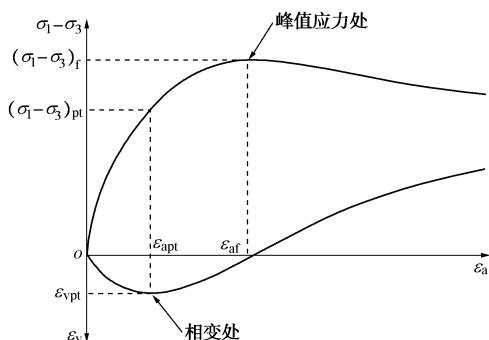


图 7 堆石料常规三轴剪切试验典型轴向应变-应力-体变关系

Fig. 7 The stress-strain relation of rockfill materials in conventional triaxial tests

(1) 峰值应力状态

图 8 给出了两组试验的峰值应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与围压 σ_3 的关系, 可以看出, 两组试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 均随围压的增大而增大, 相同围压下, 大型三轴试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 高于超大型三轴试验。

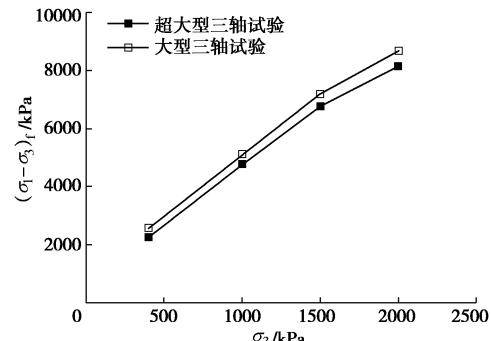


图 8 峰值应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与围压 σ_3 的关系

Fig. 8 Relationship between peak strength and confining pressure

图 9 给出了两组试验各围压下的峰值内摩擦角 φ 随围压的变化规律。可以看出, 相同围压下, 随着试验最大粒径的增大, 峰值内摩擦角逐渐减小。在试验围压范围内, 大型三轴试验的峰值内摩擦角较超大型三轴试验高 $1.1^\circ \sim 1.5^\circ$ 。大型三轴试验与超大型三轴试验峰值内摩擦角的差异并不十分显著。

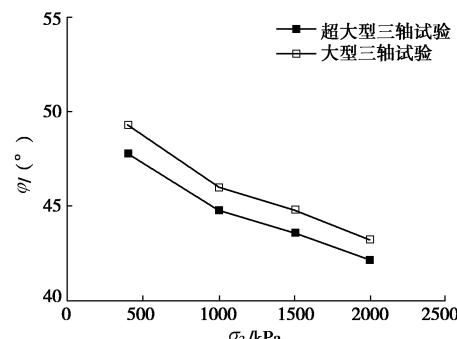


图 9 峰值内摩擦角 φ 与围压 σ_3 的关系

Fig. 9 Relationship between peak friction angle and confining pressure

图 10 给出了两组试验峰值应力处的轴向应变 ε_{af} 与围压的关系。从图中可以看出, 两组试验的 ε_{af} 均随围压的增大而增大。超大型三轴试验的 ε_{af} 平均比大型三轴试验高 7%。

(2) 相变状态

土体的相变状态是指土体由剪缩转为剪胀时的状态, 即土体在剪切过程中最密实的状态, 是构建弹塑性本构模型的一个重要状态^[18-19]。

图 11 给出了两组试验的相变应力比 M_{pt} 与围压的关系, 可以看出, 随着围压的增大, 两组试验的 M_{pt} 均减小, 且与围压成近似线性关系, 而相同围压下, 大型三轴试验的 M_{pt} 高于超大型三轴试验。

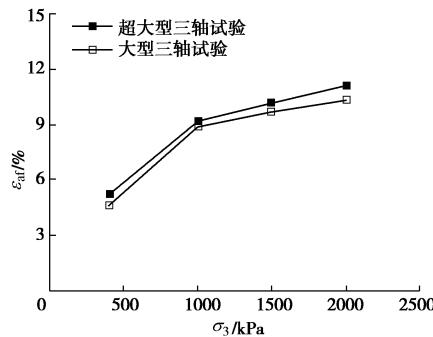
图 10 峰值应力处轴向应变 ε_{af} 与围压 σ_3 的关系

Fig. 10 Relationship between axial strain at peak strength and confining pressure

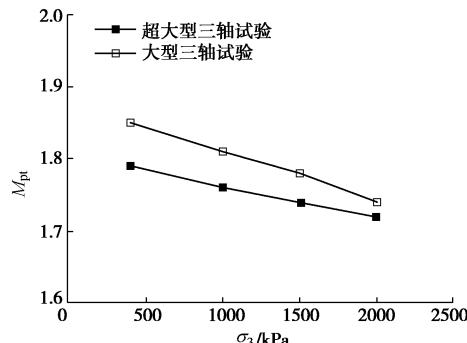
图 11 相变应力比 M_{pt} 与围压 σ_3 的关系

Fig. 11 Relationship between M_{pt} and confining pressure

图 12 给出了两组试验相变处的体变, 即最大体变 ε_{vpt} 与围压的关系。可以看出, 两组试验的 ε_{vpt} 均随围压的增大而增大。超大型三轴试验的 ε_{vpt} 平均比大型三轴试验高 77%, 超大型三轴试验在剪切过程中表现出更明显的压缩性。

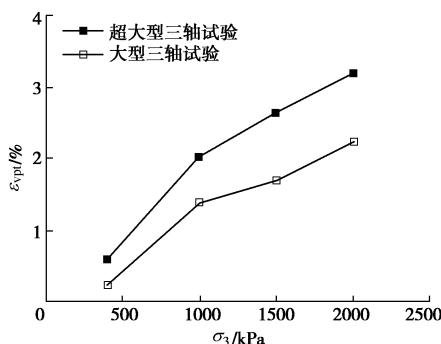
图 12 最大体变 ε_{vpt} 与围压 σ_3 的关系

Fig. 12 Relationship between maximum volumetric strain and confining pressure

图 13 给出了两组试验各围压下相变处的轴向应变 ε_{apt} , 可以看出, 两组试验的 ε_{apt} 均随着围压的增大而增大。超大型三轴试验的 ε_{apt} 平均比大型三轴试验高 50%。

相同围压下, 超大型三轴试验的颗粒破碎高于大型三轴试验, 破碎的颗粒填充到孔隙中, 抑制了土体的剪胀性, 提高了土体的压缩性, 体现在应变特性上即超大型三轴试验的 ε_{af} , ε_{apt} , ε_{vpt} 均大于大型三轴

试验。

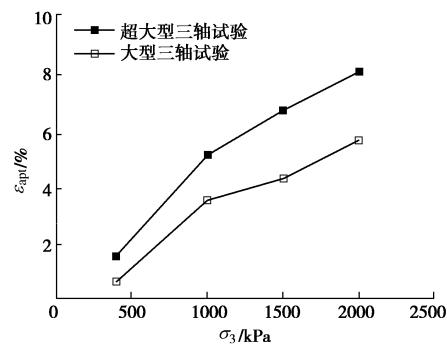
图 13 相变处轴向应变 ε_{apt} 与围压 σ_3 的关系

Fig. 13 Relationship between axial strain at phase transformation point and confining pressure

2.4 割线模量

高土石坝堆石区的应力水平大部分处于 50% 以下。根据常规三轴剪切应力路径, 应力水平 50% 处的割线弹性模量 $E_{0.5}$ 及割线体积模量 $K_{0.5}$ 可通过该应力水平下的偏应力、轴向应变及体变确定, 如图 14, 15 所示。

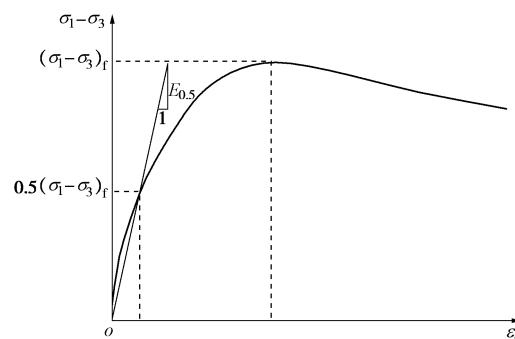
图 14 常规三轴试验典型 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系曲线

Fig. 14 Typical $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ relation of conventional triaxial tests

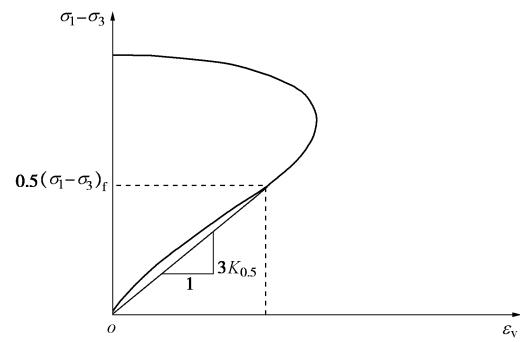
图 15 常规三轴试验典型 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_v$ 关系曲线

Fig. 15 Typical $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_v$ relation of conventional triaxial tests

本文整理出了超大型、大型三轴试验应力水平 50% 处的割线弹性模量 $E_{0.5}$ 及割线体积模量 $K_{0.5}$ 与围压的关系, 如图 16, 17 所示。

可以看出, 两组试验的割线弹性模量 $E_{0.5}$ 均随围压的增大而增大, 大型三轴试验的 $E_{0.5}$ 高于超大型三

轴试验, 且随着围压的增大, 大型三轴试验的 $E_{0.5}$ 的增长幅度大于超大型三轴试验, 大型三轴试验的 $E_{0.5}$ 是超大型三轴试验的 1.5~1.7 倍。两组试验的割线体积模量 $K_{0.5}$ 随围压的变化不大, 大型三轴试验的 $K_{0.5}$ 值是超大型三轴试验的 1.7~1.8 倍。

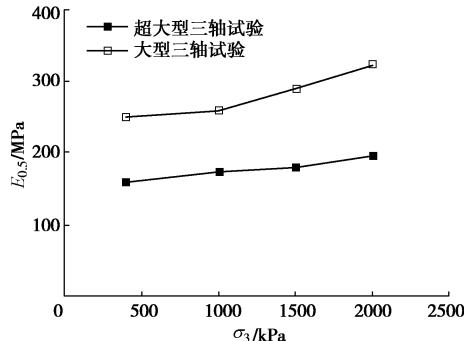


图 16 割线弹性模量 $E_{0.5}$ 与围压 σ_3 的关系

Fig. 16 Relationship between secant modulus $E_{0.5}$ and confining pressure

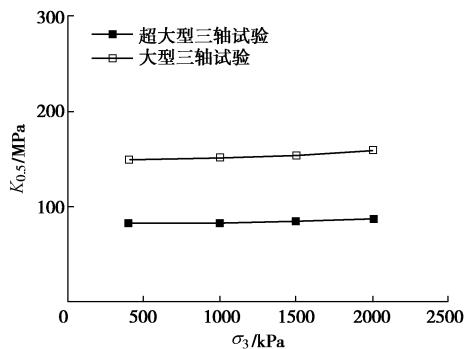


图 17 割线体积模量 $K_{0.5}$ 与围压 σ_3 的关系

Fig. 17 Relationship between bulk modulus $K_{0.5}$ and confining pressure

2.5 邓肯张 E - B 模型参数

表 3 给出了整理得到的超大型、大型三轴试验的邓肯张 E - B 模型参数。高土石坝堆石区的大主应变一般小于 5%, 图 18, 19 给出了试验数据以及轴向应变 6% 以内邓肯张 E - B 模型的拟合结果, 其中 SLT 代表超大型三轴试验, LT 代表大型三轴试验。

表 3 邓肯张 E - B 模型参数

Table 3 Parameters of E - B model

试验名称	φ_0 (°)	$\Delta\varphi$ (°)	k	n	R_f	k_b	m
超大型三轴	52.2	7.6	980	0.41	0.74	650	0.01
大型三轴	54.3	8.5	1200	0.45	0.80	900	0.06

从表 3 中可以看出, 大型三轴试验的 φ_0 高出超大型三轴试验 2.1°, $\Delta\varphi$ 高出 0.9°, 超大型三轴与大型三轴试验的强度指标差距不大。

大型三轴试验的弹性模量参数 k 以及体积模量参数 k_b 分别为超大型三轴试验的 1.22 倍以及 1.38 倍。大型三轴试验的变形模量指数 n 高于超大型三轴试验, 说明前者初始模量 E_i 随围压的增幅大于后者; 二者的体积模量指数 m 分别只有 0.06 和 0.01, 说明二者

的体积模量随围压的变化不显著, 这与前文所得 50% 应力水平处的割线模量规律一致。从邓肯张参数对比可知, 采用超大型三轴试验参数计算将得到更大的坝体填筑期沉降量。

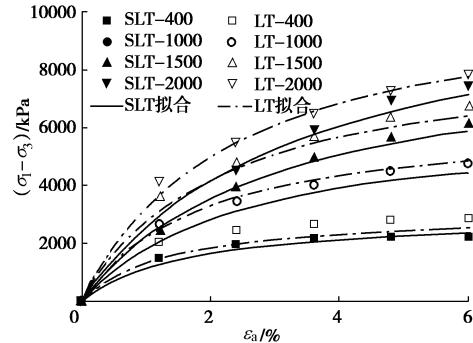


图 18 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_a 关系的试验及拟合结果

Fig. 18 Test results and predictions of $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_a relation

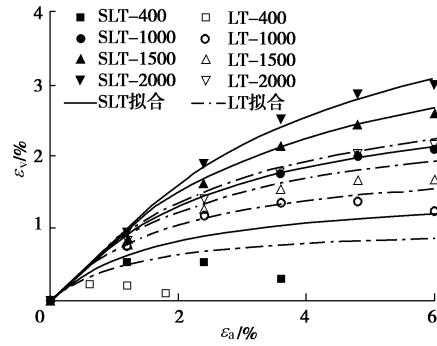


图 19 ε_v - ε_a 关系的试验及拟合结果

Fig. 19 Test results and predictions of ε_v - ε_a relation

3 结论

本文在国内首次采用直径 1 m 的超大型三轴仪和传统大型三轴仪对某一爆破筑坝堆石料进行了平行相似级配条件下最大粒径分别为 200 mm 及 60 mm 的固结排水剪切试验, 研究了堆石料力学特性的缩尺效应, 得到以下 3 点结论。

(1) 在试验围压范围内, 大型三轴试验的峰值内摩擦角较超大型三轴试验高 1.1°~1.5°, 超大型三轴与大型三轴试验的强度指标差距不大, 大型三轴试验的相变应力比大于超大型三轴试验。

(2) 超大型三轴试验的颗粒破碎率高于大型三轴试验, 且围压越大, 两者的颗粒破碎率的差别越大, 前者是后者的 1.17~1.32 倍, 但两者的平行粒组含量变化规律相同; 破碎的颗粒填充到孔隙中, 抑制了土体的剪胀性, 提高了土体的压缩性, 体现在大型三轴试验峰值处的轴向应变以及相变处的轴向应变和体变均小于超大型三轴试验。

(3) 大型三轴试验的割线弹性模量 $E_{0.5}$ 、割线体积模量 $K_{0.5}$ 分别为超大型三轴试验的 1.5~1.7 倍、1.7~1.8 倍; 邓肯张 E - B 模型中, 大型三轴试验的弹

性模量参数 k 、体积模量参数 k_b 分别为超大型三轴试验的 1.22 倍、1.38 倍。因此采用大型三轴的试验结果计算的变形量会比实际偏小, 高估土工构筑物的安全性。

本文仅研究了一种爆破堆石料的缩尺效应演化规律, 对于不同岩性、来源的堆石料的缩尺效应还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [2] MARACHI 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.
- [3] 李凤鸣, 卞富宗. 两种粗粒土的比较试验[J]. 勘察科学技术, 1991(2): 25 - 29. (LI Feng-ming, BIAN Fu-zong. Comparison of two rockfill tests[J]. Site Investigation Science and Technology, 1991(2): 25 - 29. (in Chinese))
- [4] 王继庄. 粗粒料的变形特性和缩尺效应[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 89 - 95. (WANG Ji-zhuang. Deformation characteristic and scale effect of rockfill material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(4): 89 - 95. (in Chinese))
- [5] 郦能惠, 朱铁, 米占宽. 小浪底坝过渡料的强度与变形特性及缩尺效应[J]. 水电能源科学, 2001, **19**(2): 39 - 42. (LI Neng-hui, ZHU Tie, MI Zhan-kuan. Strength and deformation properties of transition zone material of Xiaolangdi Dam and scale effect[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2001, **19**(2): 39 - 42. (in Chinese))
- [6] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(3): 206 - 218.
- [7] 李翀, 何昌荣, 王琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(增刊 1): 563 - 566. (LI Chong, HE Chang-rong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(S1): 563 - 566. (in Chinese))
- [8] HU W, DANO C, HICHER P, et al. Effect of sample size on the behavior of granular materials[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(3): 186 - 197.
- [9] 凌华, 殷宗泽, 朱俊高, 等. 堆石料强度的缩尺效应试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, **39**(5): 540 - 544. (LING Hua, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao, et al. Experimental study of scale effect on strength of rockfill materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, **39**(5): 540 - 544. (in Chinese))
- [10] HONKANADAVAR P N, L GUPTA S. Effect of particle size and confining pressure on shear strength parameter of rockfill materials[J]. Academic Research, 2012, **1**(1): 49 - 63.
- [11] 邹德高, 田继荣, 刘京茂, 等. 堆石料三维形状量化及其对颗粒破碎的影响研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(10): 3525 - 3530. (ZOU De-gao, TIAN Ji-rong, LIU Jing-mao, et al. Three-dimensional shape of rockfill material and its influence on particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(10): 3525 - 3530. (in Chinese))
- [12] 福島伸二, 北島明. 超大型三軸圧縮試験装置の歩みとその果たした役割[J]. 土と基礎, 1998, **46**(11): 29 - 32. (FUKUSHIMA S, KITAJIMA A. History and contribution of super large scale triaxial compression testing apparatus[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1998, **46**(11): 29 - 32. (in Japanese))
- [13] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高. 堆石料尺寸效应研究面临的问题及多尺度三轴试验平台[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 1941 - 1947. (KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao. Scale effect of rockfill and multiple-scale triaxial test platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 1941 - 1947. (in Chinese))
- [14] SL237—1999 土工试验规程[M]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [15] GOTO S, TATSUOKA, SHIBUYA S, et al. A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory[J]. Soils & Foundations, 1991, **31**(1): 169 - 180.
- [16] 孔宪京, 贾革续, 邹德高, 等. 微小应变下堆石料的变形特性[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 32 - 37. (KONG Xian-jing, JIA Ge-xu, ZOU De-gao, et al. Deformation characteristics of rockfill at small strains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 32 - 37. (in Chinese))
- [17] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 紫坪铺面板坝堆石料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 35 - 40. (KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rockfill material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 35 - 40. (in Chinese))
- [18] LIU J, ZOU D. Stress-dilatancy of Zipingpu gravel in triaxial compression tests[J]. Science China (Technological Sciences), 2016, **59**(2): 214 - 224.
- [19] KONG X, LIU J, ZOU D, et al. Stress-dilatancy relationship of Zipingpu gravel under cyclic loading in triaxial stress states[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, **16**(4): 4016001.