

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.02.050

人工模拟堆石料的颗粒破碎特性分析研究

许建宝

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300074)

摘要:采用人工模拟堆石料代替天然堆石料进行试验研究,可以对颗粒形状等单一因素对堆石料力学特性和颗粒破碎特性的影响进行更加深入的研究。对人工模拟堆石料三轴试验结果进行了本构模型参数回归分析,统计了不同形状人工模拟堆石料的颗粒破碎情况,进而定量的研究了颗粒形状与颗粒破碎的关系,并就颗粒破碎对堆石体强度和变形的影响进行了探讨。研究表明,邓肯-张本构模型能够对人工模拟堆石料应力应变曲线进行较好的拟合,其模型参数符合天然堆石料的规律;颗粒破碎率与颗粒球度呈现较好的线性关系,并且在不同围压下颗粒破碎率随颗粒球度的变化规律基本一致;随着围压的升高,颗粒破碎逐渐增大并占据主导作用,使堆石体强度降低,变形加大。

关键词:人工模拟堆石料;颗粒破碎;颗粒形状;本构模型

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)02-0230-04

0 引言

堆石料是广泛应用于水利、市政、铁路、公路、港口等工程领域中的一种粗粒料。随着我国社会经济不断发展,工程建设项目的规模越来越大,土石坝、路基、护坡等工程不断加高加大,堆石料的应力也不断增加,其强度变形和颗粒破碎特性将会直接影响堆石体的整体变形和稳定。

天然堆石料的组成较为复杂,颗粒形状多种多样且不规则,很难采用试验单独研究某个因素对其特性的影响。因此,采用人工模拟材料代替天然堆石料进行试验研究成为一个解决方案。程展林等^[1]采用玻璃球来模拟天然堆石料,主要研究了堆石料的变形特性和宏观力学性质的离散特征;孔德志等^[2-3]制备了一种水泥椭圆球颗粒来模拟堆石料,并对其进行了颗粒破碎三轴试验研究,探讨了水泥椭圆球颗粒强度和变形特性以及颗粒破碎特性,并提出了描述其破碎量的相应指标;许建宝等^[4]和杨贵等^[5]制备了几种不同形状的水泥颗粒,来研究颗粒棱角特性、颗粒形状对堆石料强度和变形特性的影响。堆石料的本构模型主要是用于反应材料的力学性状,具体来说就是采用本构方程来描述应力和应变的关系,强度和时间的关系,因此本构模型参数是可以明确反应材料力学特性的指标。但是,对人工模拟材料本构

模型的适用性和颗粒形状对颗粒破碎的定量化影响研究还没有进行更深入的探索和分析。采用邓肯-张模型^[6]对人工模拟堆石料三轴试验结果进行模型参数回归分析研究,进一步验证其能够近似模拟天然堆石料的应力应变特性;统计了不同形状人工模拟堆石料的颗粒破碎情况,进而定量的研究了颗粒形状与颗粒破碎的关系,并就颗粒破碎对堆石体强度和变形的影响进行了探讨。

1 人工模拟堆石料本构模型参数回归分析

邓肯-张模型可以反映土体变形的特点,模型参数假定较为合理,并且定义明确,非常适用于工程实际,其模型假设偏应力~偏应变关系曲线可用双曲线拟合,见式(1),经过转换,也可表示成式(2)的形式。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_a \quad (2)$$

由许建宝等^[4]给出的不同围压情况下四棱台人工模拟堆石料静三轴剪切试验的偏应力与偏应变关系曲线可知,处于较低围压的偏应力与偏应变关系曲线出现了较为轻微的软化状态,其余均为应变硬化,因此,忽略少数应变软化型曲线,则偏应力与偏应变关系曲线基本符合双曲线,可以采用邓肯-张模型拟合其试验结果。

按照邓肯-张模型的式(2)结合式(3)可以整理

收稿日期: 2023-02-20

作者简介: 许建宝(1990—),男,硕士,工程师,从事结构、岩土及水工方面的设计研究工作。

得到不同围压情况下的初始切线模量 E_i 。

$$a = \frac{1}{E_i} \tag{3}$$

将初始切线模量与大气压力比值、围压与大气压力比值绘制在双对数坐标上,见图1。由图1可知,在双对数坐标上,二者的关系曲线呈良好的线性关系,与天然堆石料邓肯-张模型得到的结论一致。

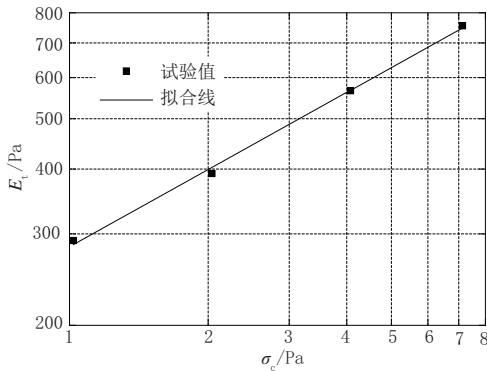


图1 初始切线模量随围压变化曲线

按照邓肯-张模型整理在不同围压条件下,当应力水平为0.7时人工模拟堆石料偏应力和体积应变,并通过式(4)计算切线体积模量 B_i 。

$$B_i = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{s_1=0.7}}{3(\epsilon_V)_{s_1=0.7}} \tag{4}$$

将切线体积模量与大气压力比值、围压与大气压力比值绘制在双对数坐标,见图2。由图2可知,在双对数坐标上,二者的关系曲线呈良好的线性关系,与天然堆石料邓肯-张模型得到的结论一致。

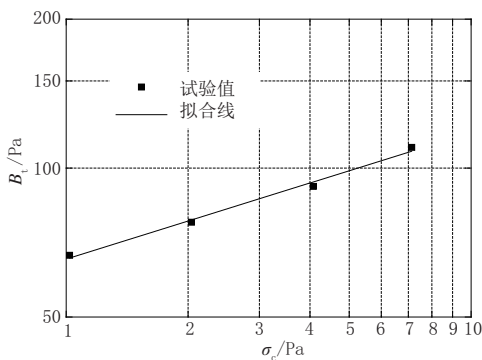


图2 体积模量随围压变化曲线

综上所述,可得到四棱台人工模拟堆石料的邓肯-张本构模型的模型参数,见表1。

采用计算得到的邓肯-张本构模型的模型参数,运用式(1)对得到的不同围压情况下四棱台人工模拟堆石料静三轴剪切试验的偏应力与轴向应变关系曲线进行拟合,拟合结果见图3。

由图3可知邓肯-张本构模型能够对人工模拟堆石料应力应变曲线进行较好的拟合,同时也证明

表1 人工模拟堆石料 Duncan-Chang 模型参数

Duncan-Chang 模型参数							
C/kPa	$\varphi/(\circ)$	$\Delta\varphi/(\circ)$	K	n	R_f	K_b	m
0	44.8	14.1	245	0.49	0.82	66	0.26

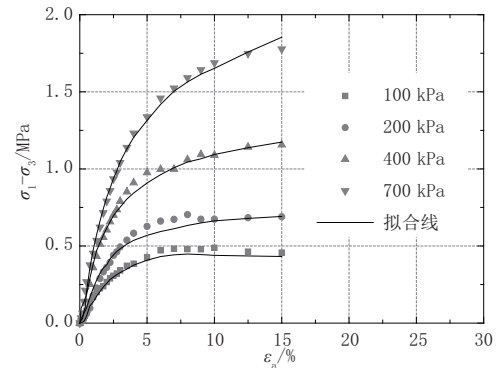


图3 不同围压下应力-应变关系非线性结果

人工模拟堆石料的应力应变特性符合其本构方程,其模型参数也符合天然堆石料的规律。

2 颗粒形状对颗粒破碎的影响分析研究

颗粒形状是堆石料颗粒本身的一个重要因素,其对颗粒破碎具有非常显著的影响,许建宝等[4]通过对颗粒破碎的形式进行细化,重新定义了颗粒破碎率。因此可对杨贵等[5]不同形状人工模拟堆石料三轴试验结束后的颗粒破碎情况进行详细的统计和分析,并采用颗粒球度定量的研究颗粒形状与堆石体颗粒破碎的关系。经过统计分析,图4给出了不同围压情况下颗粒破碎率与颗粒球度关系曲线。

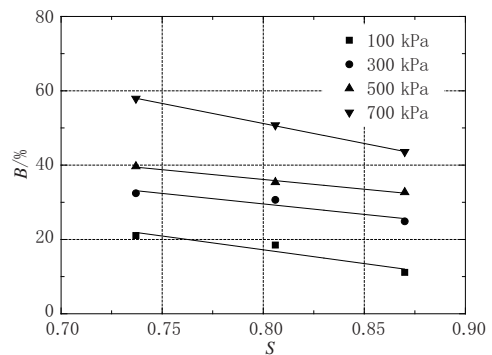


图4 颗粒破碎率与颗粒球度关系曲线

可以明显地看出不同形状人工模拟堆石料颗粒的颗粒破碎率均随围压的升高而增大;颗粒破碎率与颗粒球度呈现较好的线性关系,并且在不同围压下颗粒破碎率随颗粒球度的变化规律基本一致,不受围压大小的影响。

由于不同围压下颗粒破碎率随颗粒球度的变化规律基本一致,因此可对颗粒破碎率与颗粒球度的

关系曲线进行归一化处理, 归一化后的 $B/B_{\max} \sim S$ 关系曲线见图 5。由图 5 可知, 除了在 100 kPa 下圆柱型试样的颗粒破碎率有偏差外, 其他工况下的人工模拟堆石料归一化后 B/B_{\max} 与颗粒球度 S 的关系近似可以用线性进行拟合, 对于本文人工模拟堆石料来说, 拟合公式为式(5):

$$B/B_{\max} = -1.72 s + 2.29 \quad (5)$$

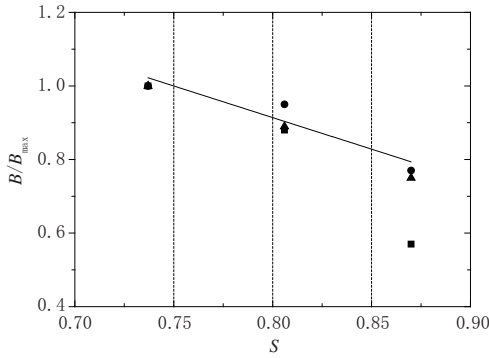


图 5 B/B_{\max} 与颗粒球度 S 的关系

3 颗粒破碎对强度和变形影响分析研究

由于人工模拟堆石料在各个围压下均发生了不

同程度的颗粒破碎, 所以无法直接从试验结果中分离出破碎体应变。颗粒形状对体积变形的影响主要包括颗粒滑移、转动引起的剪胀以及颗粒破碎作用引起的剪缩, 但是对于人工模拟堆石料颗粒, 由于棱角较大, 可以推断颗粒破碎的影响占主导作用, 这从不同形状人工模拟堆石料颗粒的体应变 ~ 轴向应变大部分呈剪缩也可看出。通过对颗粒形状与颗粒破碎的关系进行的分析, 可以进一步整理出颗粒破碎率与堆石体强度和变形的关系, 进一步论证颗粒破碎对堆石体强度和变形的影响。图 6 给出了人工模拟堆石料不同围压下峰值强度与颗粒破碎率的关系曲线, 可以明显看出, 在围压 100 kPa 和 300 kPa 下, 二者的关系并不明显, 但是随着围压的升高, 二者的关系曲线逐渐向直线靠近。因此可以推断, 颗粒破碎在较低围压并不严重, 对强度和变形的影响较小, 主要是颗粒的滑移和翻转产生的剪胀使颗粒强度略有增加, 随着围压的逐渐升高, 颗粒破碎逐渐增大, 并且占据主导作用, 进而使堆石体的强度降低, 变形加大, 峰值强度与颗粒破碎率在高围压下逐渐趋于线性关系。

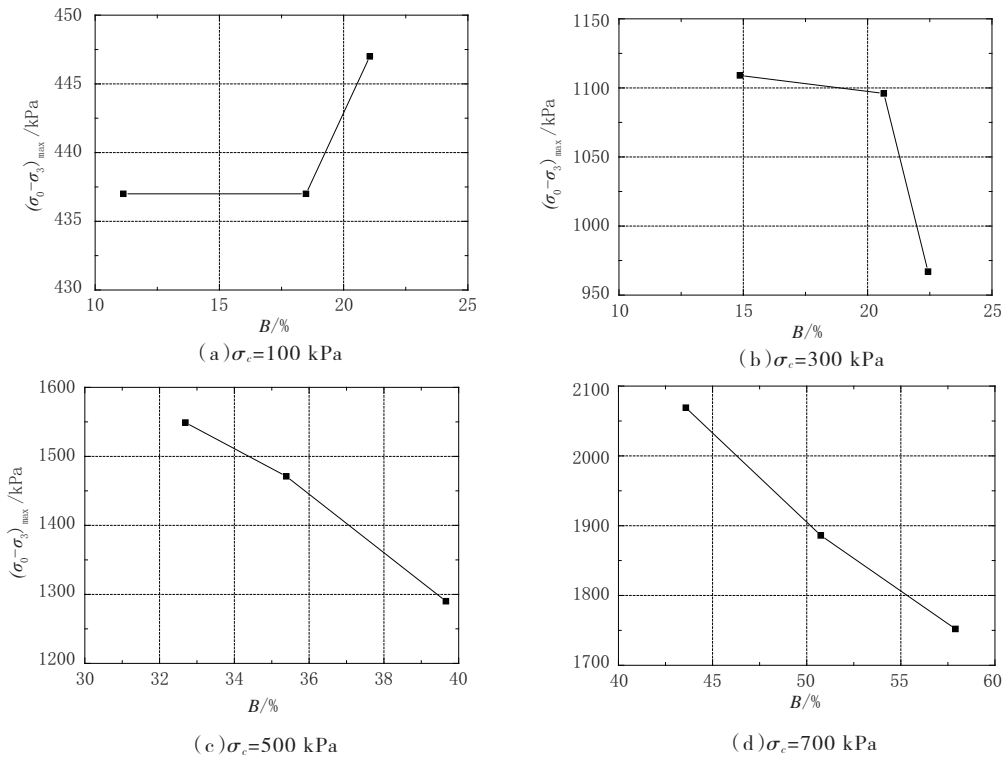


图 6 不同围压下峰值强度与颗粒破碎率的关系

对比以上四幅图可以发现, 高围压颗粒破碎率与峰值强度的关系呈现较好的线性相关性, 忽略低围压下相关性较差的点, 对不同围压下人工模拟堆石料的峰值强度和颗粒破碎率进行归一化处理, 得

到了 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / \sigma_c$ 与颗粒破碎率 B 的关系, 见图 7。对不同围压下归一化后的数据点进行线性拟合, 得到拟合公式为式(6):

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / \sigma_c = -0.05B + 5.0 \quad (6)$$

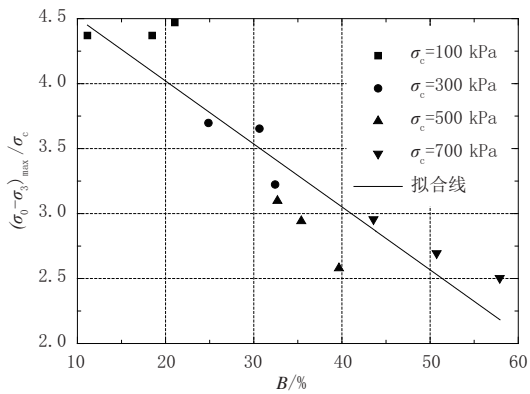


图7 (σ₁-σ₃)_{max}/σ_c与颗粒破碎率B的关系

以上的关系式,较为清楚地描述了(σ₁-σ₃)_{max}/σ_c与颗粒破碎率B的关系,因此可以对更高围压下人工模拟堆石料的颗粒破碎率进行一定的预测。

4 结论

采用邓肯-张模型对人工模拟堆石料三轴试验结果进行模型参数回归分析研究,进一步验证其能够近似模拟天然堆石料的应力应变特性;统计了不同形状人工模拟堆石料的颗粒破碎情况,进而定量的研究了颗粒形状与颗粒破碎的关系,并就颗粒破碎对堆石体强度和变形的影响进行了探讨。得到如下主要结论:

(1)邓肯-张本构模型能够对人工模拟堆石料应力应变曲线进行较好的拟合,同时也证明人工模拟

堆石料的应力应变特性符合其本构方程,其模型参数也符合天然堆石料的规律。

(2)不同形状人工模拟堆石料颗粒的颗粒破碎率均随围压的升高而增大;颗粒破碎率与颗粒球度呈现较好的线性关系,并且在不同围压下颗粒破碎率随颗粒球度的变化规律基本一致,不受围压大小的影响。

(3)颗粒破碎在较低围压下并不严重,对堆石料强度和变形等宏观力学行为影响较小,但是随着围压的逐渐升高,颗粒破碎逐渐增大,并且占据主导作用,进而使堆石体强度降低,变形加大,峰值强度与颗粒破碎率在高围压下逐渐趋于线性关系。

参考文献:

- [1] 程展林,丁红顺,吴良平.粗粒土试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(8):1151-1158.
- [2] 孔德志,张丙印,孙逊.人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(3):464-469.
- [3] 孔德志,张其光,张丙印,等.人工堆石料的颗粒破碎率[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(6):811-815.
- [4] 许建宝,杨贵,唐晨景.人工模拟堆石料强度和变形特性试验研究[C]//第十二届全国土力学及岩土工程学术大会论文集,2015.
- [5] 杨贵,许建宝,孙欣,等.颗粒形状对人工模拟堆石料强度和变形特性影响的试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3113-3118.
- [6] DUNCAN J M, CHANG C-Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970(96):1629-1653.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com