粗粒料及粒间微生物胶结的破碎-强度-能量耗散研究进展

孟敏强^{1,2,3}, 肖杨^{3,4*}, 孙增春^{3,4}, 张志超^{3,4}, 蒋翔^{3,4}, 刘汉龙^{3,4}, 何想^{3,4}, 吴焕然^{3,4}, 史金权^{3,4}

1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学岩土工程研究所, 杨凌 712100;

3. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

* E-mail: hhuxyanson@163.com

收稿日期: 2021-08-18; 接受日期: 2021-12-30; 网络版发表日期: 2022-06-17

国家自然科学基金青年基金(批准号: 52108343, 52008213)、国家自然科学基金优秀青年基金(批准号: 51922024)、重庆市杰出青年科学基金(编号: cstc2019jcyjX0014)和中央高校科研基本业务费(编号: 2020CDJQY-A068)资助项目

摘要 粗粒料广泛应用于水利大坝、公路铁路路基及机场高填方边坡等对强度及变形要求较高的基础设施中。粗粒料颗粒粒径及颗粒强度离散性较其他岩土颗粒材料大, 且在外荷载作用下易发生破碎; 微生物胶结作为一种新型的绿色胶结方式, 可以改善粗粒料的力学特性, 抑制颗粒破碎。文章首先介绍了粗粒料颗粒强度相关理论分析方法: 包括Weibull分布理论、尺寸效应、分形维数、雪崩动力学理论等; 随后总结了研究粗粒料颗粒强度及变形特性的室内试验方法与技术: 包括单颗粒破碎试验、一维压缩试验、声发射监测系统及微生物胶结技术; 最后从粗粒料类别、外部环境因素、颗粒粒径、微生物胶结情况等方面对粗粒料单颗粒破碎试验和一维压缩试验结果进行分析, 阐明了相关因素对颗粒强度、Weibull模量、压缩性、破碎量、声发射能量及能量耗散等的影响规律。研究成果有助于加深对粗粒料强度及变形特性的认识, 也可推动粗粒料在实际工程中的应用。

关键词 粗粒料, 强度变形, 微生物胶结, 尺寸效应, Weibull分布, 声发射, 能量耗散

1 引言

粗粒料由于压实性好、强度大、变形小且渗透性好等特点, 目前已被广泛应用于堆石坝、路基、铁路道砟及机场高填方等工程中^[1-5]。当所受外荷载超过粗粒料自身强度时, 粗粒料发生颗粒破碎, 从而引起整个

粗粒料结构的强度和变形改变, 严重影响实际工程在施工及后续运行过程中的安全稳定^[6-9]。在实际工程(如高土石坝)中, 粗粒料的最大控制粒径可达100 cm, 导致相关颗粒强度试验在室内试验中无法完成, 并且粗粒料属于典型的准脆性材料, 其颗粒强度具有明显的离散性^[10]。因此, 研究粗粒料的颗粒强度特性、变

引用格式: 孟敏强, 肖杨, 孙增春, 等. 粗粒料及粒间微生物胶结的破碎-强度-能量耗散研究进展. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 999–1021
Meng M Q, Xiao Y, Sun Z C, et al. Recent progress on crushing-strength-energy dissipation of coarse granular soil and biocementation at contacts (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 999–1021, doi: [10.1360/SST-2021-0387](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0387)

形特性、尺寸效应以及颗粒破碎特性具有实际的工程意义。

近年来, 国内外许多学者通过单颗粒破碎试验开展了粗粒料的颗粒强度研究。Mcdowell^[11]通过单颗粒破碎试验研究了3个不同颗粒粒径的硅砂颗粒强度, 发现其颗粒强度的分布规律可用Weibull分布函数进行描述。Manso等人^[12]通过单颗粒破碎试验研究了相对湿度对花岗岩粗粒料破碎强度的影响, 结果表明颗粒强度随着相对湿度的增大而减小, 且颗粒强度服从Weibull分布, 但不同相对湿度的花岗岩粗粒料的Weibull模量不同。Zhao等人^[13]利用X射线技术, 对Leighton Buzzard砂和全风化花岗岩开展了单颗粒破碎试验, 分析了两种粗粒料破裂模式的影响因素, 研究了两种粗粒料的破裂机制。Wang和Coop^[14]通过将单颗粒破碎试验与高速摄像机结合, 研究了砂土的微观特性及破裂过程, 探讨了颗粒强度与破碎模式之间的关系。为了研究更大颗粒粒径的粗粒料颗粒强度, Frossard等人^[15]基于尺寸效应提出了一个合理估算堆石料大颗粒粒径的方法, 且通过试验进行了验证。随后Xiao等人^[16]通过堆石料真三轴试验验证了该方法在考虑中主应力条件下的准确性。马刚等人^[17]采用数值模拟方法, 阐述了堆石料缩尺效应的细观机制, 并联系宏观力学响应, 从细观角度阐明了堆石料的尺寸效应。周海娟等人^[10]通过单颗粒破碎数值模拟分析了5组不同颗粒粒径的粗粒料颗粒强度的尺寸效应, 并与室内试验进行了对比验证。孔宪京等人^[18]基于尺寸效应, 通过自主研发的超大型三轴仪试验结果与常规大型三轴仪试验结果进行对比, 研究了堆石料的缩尺效应。同时, 颗粒破碎以及颗粒级配等因素对于粗粒料强度和变形的影响也不容忽视^[19-24]。Sun和Zheng^[25]通过单调和循环三轴试验分析了不同颗粒级配的道砟粗粒料的破碎及形状特性, 比较了不同颗粒破碎指标的优缺点; 而后再根据大三轴试验, 研究了级配和加载频率对铁路道砟回弹模量的影响, 分析了回弹模量随颗粒破碎的变化规律^[26]。Xiao等人^[27]利用冲击试验研究了不同试样高度条件下的钙质砂和石英砂的分层破碎分形特性; 然后通过回顾总结前人所提出的颗粒破碎指标的优点及缺陷, 提出了一个可以通过筛分试验结果快速获取颗粒破碎指标的新方法, 研究成果成为研究颗粒破碎的新基石^[28]。另外, Whiffin^[29]提出将微生物诱导碳酸钙沉积(microbially induced calcite precipita-

tion, MICP)应用于土体加固中, 由于其环境友好型特性, 目前已受到国内外学者的广泛关注^[30-38]。Gao等人^[39]采用大豆脲酶催化碳酸钙沉淀技术加固石英粉和Ottawa砂混合物, 并通过三轴固结不排水试验对比分析了加固前和加固后砂混合物的力学特性。He等人^[40]采用尿素水解菌得到天然脲酶, 随后加固粉砂, 采用三轴固结不排水试验和CaCO₃含量测试试验研究了粉砂的剪切强度及剪胀特性, 分析了CaCO₃的累积特性。

本文主要根据笔者及其团队近年来对于粗粒料颗粒强度和变形方面的研究成果, 分别从粗粒料类别、外部环境因素、颗粒粒径及胶结状态四方面展开分析, 总结了目前在粗粒料颗粒强度及尺寸效应方面的常用理论、试验方法等, 阐述了粗粒料类别、外部环境因素、颗粒粒径、胶结状态等对粗粒料颗粒强度、Weibull分布、压缩变形、相对破碎指标以及声发射能量等方面的影响。

2 理论分析

2.1 Weibull分布函数

脆性材料的破坏强度主要取决于材料自身内部裂缝或裂纹等缺陷大小的分布情况^[41]。即使是相同的两个脆性试样在相同的加载条件下, 材料中不同的裂缝或裂纹的大小、形状以及由于外力所造成的纹路走向都会导致脆性材料破坏强度的离散性。因此脆性材料的破碎强度统计与弹塑性材料的破碎强度统计存在明显的差异性^[42]。

对于脆性材料, 破坏强度必须运用统计学的方法进行处理分析。Weibull^[43]在1951年提出了一个统计分布函数(Weibull分布函数), 建立了破坏概率与应力的经验公式, 目前已广泛应用于统计脆性材料的破坏强度中, 表达式如下:

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV \right\}, \quad (1)$$

其中, P_f 为破坏概率; σ 为对试样施加的应力; σ_u 为当 $P_f = 0$ 时所对应的应力, 对于脆性材料, 一般认为 $\sigma_u = 0$; σ_0 为特征应力, 又称归一化参数; m 为Weibull模量, 是材料特性参数, 与材料的裂隙尺寸分布有关; V 为试样体积。根据式(1)可得脆性材料的残存概率 P_s 为

$$P_s = 1 - P_f = \exp \left\{ - \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right\}, \quad (2)$$

其中, P_s 为残存概率. 但是无论是式(1)还是式(2)所表示的Weibull分布函数, 都是建立在脆性材料为各向同性且均质的基础上, 并且服从在给定的应力分布条件下当材料的某个关键裂隙破坏导致整个材料破坏的假设, 显然对于岩土颗粒材料是不适用的. Nakata等人^[44]利用Weibull分布函数量化了Aio砂颗粒的破坏强度, 但是结果发现对于长石的平均颗粒强度与颗粒尺寸之间的关系不能很好地利用Weibull函数进行解释.

基于以上分析, McDowell和Amon^[45]在假设所研究的岩土材料的颗粒形状相同或相似且颗粒的破坏是由拉应力所引起的基础上, 用Weibull分布函数来描述岩土材料的颗粒强度特性, 目前已在钙质砂^[46]、Quiou砂^[47]、堆石料^[48]及铁路道砟^[49]等岩土材料中应用. 具体如式(3)所示^[50]:

$$P_s(d) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{co,d}} \right)^m \right], \quad (3)$$

其中,

$$\sigma_c = \frac{F}{d^2}, \quad (4)$$

F 为颗粒压缩时所承受的力; d 为特征粒径; $\sigma_{co,d}$ 为当颗粒粒径为 d 时 37% 残存概率所对应的特征应力, 且 $\sigma_{co,d} \propto d^{-3/m}$. 破坏时的平均特征强度 σ_{ave} 与 $\sigma_{co,d}$ 和 Weibull 模量 m 有关, 具体表达式如下:

$$\sigma_{ave} = \sigma_{co,d} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right), \quad (5)$$

其中, Γ 为伽马函数, 其值可通过查表得出.

通过对比式(3)和(5)可知, 在利用Weibull分布函数统计分析岩土材料的破坏强度时, Weibull模量 m 直接与材料的颗粒强度有关, 是一个重要的材料参数, 其值可通过室内试验获得. 对式(3)进行对数变换, 可得

$$\begin{cases} \ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{P_s(d)} \right] \right\} = m \ln \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{co,d}} \right), \\ \ln \left\{ \ln \left[\frac{1}{P_s(d)} \right] \right\} = m \ln \sigma_c - b, \quad (b = m \ln \sigma_{co,d}), \end{cases} \quad (6)$$

其中, Weibull模量 m 为 $\ln \{ \ln [1 / P_s(d)] \}$ 和 $\ln (\sigma_c / \sigma_{co,d})$ 之间

关系曲线的斜率; 当 $\ln \{ \ln [1 / P_s(d)] \} = 0$ 时, $\sigma_{co,d} = \sigma_c$. 对于具有分形特性的颗粒材料, 通常可通过室内试验得到其分形维数 D , Xu^[51]对式(3)进行修正, 根据分形维数得到一个快速计算Weibull模量的方法:

$$m = \frac{D}{3-D}, \quad (7)$$

其中, D 为分形维数.

2.2 尺寸效应

对于粗粒料中的大颗粒而言, 如高土石坝筑坝料, 一般在实际工程中的最大颗粒粒径可达 100 cm, 远远超过室内试验仪器的允许标准, 很难通过室内试验的方法获得颗粒强度. 因此, 必须寻找一种可以通过在室内试验测得某种矿物成分小颗粒粒径试样的破坏强度从而推算出同种矿物成分大颗粒粒径试样的破坏强度的方法.

由尺寸效应可知, 无论是对于单颗粒破碎强度还是群颗粒破坏强度, 均随着试样尺寸的增大而减小^[16,52,53]. Frossard等人^[15]基于尺寸效应, 根据断裂力学原理, 利用Weibull统计理论, 提出了一种可以合理评估堆石料破坏强度的方法, 如公式(8)所示:

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_B} = \left(\frac{D_A}{D_B} \right)^{-3/m}, \quad (8)$$

其中, σ_A 和 σ_B 分别为材料 A 的颗粒粒径 D_A 和材料 B 的颗粒粒径 D_B 所对应的颗粒强度.

徐永福^[54]基于单颗粒的分形模型, 定义了颗粒破碎时的固有强度:

$$\sigma_f^* = \frac{F_f}{A_{\text{real}}}, \quad (9)$$

其中, F_f 为破碎力, A_{real} 为颗粒截面的真实面积. 随后得到与分形维数有关的单颗粒破碎强度尺寸效应:

$$\begin{cases} \sigma_f = \sigma_f^* d^{D-3}, \\ \sigma_f^* = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{fi}}{d^{D-3}} \right)}{n}, \end{cases} \quad (10)$$

其中, n 为所进行单颗粒破碎试验的试样个数.

2.3 分形维数及破碎能量

分形理论^[55]自提出后, 已广泛应用于自然界中具

有自相似形态的事物中^[56]。在理想状态下对于分形维数的认识存在两种不同的观点: 第一种观点认为一般情况下当颗粒材料的试样在某个大围压或者大剪切应变条件下, 级配曲线会达到一个极限分形维数; 但是另一种观点认为将所认为达到极限分形维数中的颗粒材料试样进行重塑及重新加载, 会导致一个新的分形维数的产生^[57]。在实际情况下, 颗粒材料分形模型的分形维数一般为2.5~2.6, 最大不能超过3^[24,58-60]。

Einav^[57]基于分形模型, 在Turcotte^[61], Tyler和Wheatcraft^[62]所提出的颗粒级配分布曲线的基础上, 建立了颗粒级配曲线与分形维数之间的关系:

$$F(d) = \left(\frac{d}{d_M} \right)^{3-D}, \quad (11)$$

其中, $F(d)$ 为小于某粒径 d 的颗粒质量含量, d_M 为试样的最大颗粒粒径。对式(11)等式两边分别取对数可得

$$\ln[F(d)] = (3-D)\ln(d/d_M). \quad (12)$$

通过式(12)即可得到颗粒材料的分形维数 D 。

试样的破碎能量一般通过室内试验仪器无法直接获得, 必须经过对试验数据的再加工。Wang等人^[63]根据功的定义, 即破碎力对颗粒位移的积分, 定义了破碎能量, 如公式(13)所示:

$$E = \int_0^{\Delta} F d\Delta, \quad (13)$$

其中, E 为破碎能量, F 为破碎力, Δ 为颗粒位移。随后在弹性理论的基础上建立了破碎能量 E 与分形维数 D 之间的幂函数关系:

$$E \propto d^{\frac{5D}{3}-2}. \quad (14)$$

2.4 声发射技术及雪崩动力学

声发射(acoustic emission, AE)是指物体在受力过程中, 内部储存的能量以弹性波的形式释放出的信号。声发射信号包含丰富的信息, 可以通过声发射信号来推断受力物体内部结构的变化以及对材料破坏进行预警等, 早期主要用于矿山、煤矿等, 目前在岩土工程中也应用广泛^[64], 主要集中在黏性土及粗粒料等方面的研究^[65-68]。

针对声发射技术的应用, 现如今比较主流的研究思路为物体在受力后产生声发射信号, 建立声发射信

号与受力物体变形破裂之间的函数关系, 然后再采用统计学方法分析声发射信号, 再逆向认识受力物体的破裂机理^[69]。雪崩动力学是分析复杂系统统计规律的方法, 对于固体材料破坏的声发射信号常采用雪崩动力学基本统计规律加以分析, 主要规律如下。

(1) Gutenberg-Richter定律^[70]: Gutenberg-Richter定律主要描述地震等级分布规律, 建立地震等级与所释放的能量之间的幂律关系, 如公式(15):

$$P(E_s)dE_s \sim E_s^{-\tau}dE_s, \quad (15)$$

其中, $P(E_s)$ 为声发射能量概率密度, E_s 为声发射能量, 为幂指数。

(2) Omori定律^[71]: Omori定律主要描述主震发生之后余震的衰减规律。设在 t_M 时发生主震, 则在 $t-t_M$ 时间内余震的衰减规律可用公式(16)表示:

$$r_{AS}(t-t_M) = k(c+t-t_M)^{-p}, \quad (16)$$

其中, $t > t_M$, r_{AS} 为余震衰减率; k 为与主震相关常量; c 为 $t-t_M$ 值较小时的收敛项; p 为幂指数, 取值范围为0.9~1.6。

(3) 等候时间分布(waiting time)^[72]: 等候时间主要是指两次地震(或称声发射事件)之间相邻时间间隔, 服从双幂定律; 在声发射事件中, 采用不同的能量阈值得到的等候时间分布规律相似。

3 试验方法

目前研究粗粒料及粒间微生物胶结的强度及破碎特性常用的室内试验手段主要包括: 单颗粒破碎试验、一维压缩试验、声发射与室内试验装置协同技术以及微生物胶结技术。此部分主要对上述室内试验方法进行总结, 图1为不同试验条件下的破碎形式。

3.1 单颗粒破碎试验

单颗粒破碎试验目前是研究粗粒料单颗粒破碎强度最直接的试验方法。虽然目前测定单颗粒破碎强度的试验仪器多种多样, 但是其基本原理均如图2所示, 主要利用位移计及力的传感器通过电脑设备记录位移和力的变化规律。具体试验过程如下: 首先将选取的单颗粒试样放置在两个刚性加载板之间; 然后对单颗粒试样施加轴向荷载, 直至单颗粒试样发生破坏。当单

图 1 (网络版彩图)不同试验条件下的破碎形式. (a) 单颗粒破碎; (b) 群颗粒破碎; (c) 胶结条件下的破碎

Figure 1 (Color online) The crushing mode under different test conditions. (a) Single-particle crushing; (b) group-particle crushing; (c) crushing under cementation conditions.

颗粒试样破碎成3~4小块时,且每一小块的体积及质量均小于所选单颗粒试样的1/2及以下,或者设备上所记录的单颗粒试样所承受的荷载陡峭式下降,且不会再出现峰值时,认为试验结束.

图2中关系为Nakata等人^[44]选取的典型砂颗粒力-位移关系曲线图.笔者在本文中进行的单颗粒破碎试验所采用的仪器是重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点试验室的拉压加载台,具体仪器参数在文献[73~75]中均有所提及,单颗粒破碎试验结果分析将在第4节进行详细讨论.

3.2 一维压缩试验

粗粒料的压缩特性一般通过一维压缩试验进行分析.由于一维压缩试验可对试样施加高应力(一般可达100 MPa),已成为目前研究粗粒料颗粒破碎特性的一个重要试验方法.在一维压缩试验中,对于粗粒料松散试样,一般将其放入一个无侧向变形的金属模具;

图 2 典型砂颗粒力-位移关系曲线图^[44]

Figure 2 Force-displacement curves of representative sand particles [44].

对于胶结试样,一般直接将试样放置仪器中(本文中根据不同影响因素,分别总结分析了近年来笔者团队将松散试样在金属模具中和直接平铺放置在仪器中的一维压缩试验结果),然后根据所设定的试验条件进行分级阶段加载,这种方法虽然和实际的工程情况有所差异,但是由于试验过程操作简单且试验结果真实可靠,还可通过控制应力的大小分析试样的全过程颗粒破碎情况,因此也具有一定的实用价值.具体的试验过程如下:首先对筛选好的颗粒材料进行挑选,然后按照Selig和Ladd^[76]的方法将材料均匀地装入容器中,待装满后压上顶盖,放入试验仪器中进行一维压缩试验.当电脑系统上显示有力的作用时,按照试验方案所制定的加载速度进行试验直至加载到所需荷载后,加载完成,试验结束.笔者在本文中进行的一维压缩试验所采用的仪器是重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点试验室的MTS 815岩石力学试验系统和高温盐岩石力学测试系统以及山地城镇建设与新技术教育部重点实验室MTS测试机,具体仪器参数及实物照片在文献[73,77,78]中均有所提及,一维压缩试验结果分析将在第5节进行详细讨论.

3.3 声发射采集仪与室内试验装置协调监测技术

第2.4节对声发射技术进行了简单的介绍,这里主要介绍声发射技术在单颗粒破碎试验以及一维压缩试验中的实现.对于单颗粒破碎-声发射试验,由于颗粒较小,一般将声发射探头放置仪器上下加载板上,并用黏结剂固定,在确认声发射探头、放大器以及声发射仪连接好之后,运行声发射采集系统,调整系统中的各项参数,并轻轻敲击仪器,以确保声发射采集系统能够采集到声发射信号;随后按照单颗粒破碎试验步骤进行单颗粒破碎-声发射试验,并同时开启声发射采

集仪,采集声发射信号,以保证后期数据处理中无明显时间差.对于一维压缩-声发射试验,当试样为松散颗粒时,分为两种情况:第一种是将松散颗粒放置于金属模具中,一般是将声发射探头用橡胶圈固定于金属模具外壁上,并涂上耦合剂,确保声发射信号接收正常;第二种是将松散颗粒平铺放置于仪器中,一般是与单颗粒破碎-声发射试验一样,将声发射探头黏结于仪器上下加载板上.当试样为胶结试样时,一般是将声发射探头用橡胶圈固定在胶结试样侧面,涂上耦合剂,以确保声发射信号接收正常.声发射仪的连接与测试与单颗粒破碎-声发射试验一致.随后按照一维压缩试验步骤进行一维压缩-声发射试验,并同时用声发射采集仪采集声发射信号,以保证后期数据处理中无明显时间差.试验过程及声发射采集系统相关参数及装置可参考文献[79~81].单颗粒破碎-声发射试验结果和一维压缩-声发射试验结果将在第4节和第5节分别讨论,并主要分析Gutenberg-Richter定律对雪崩动力学的描述.

3.4 微生物胶结方法

目前采用MICP加固土体的室内试验方法主要可分为循环反应法、浸泡法、Two-phase加固法和One-phase加固法、温度控制法[78,82~85],还有一些改进后可应用于实际工程,如注浆管MICP加固法[86].针对MICP加固方法的应用,目前在桩基及降雨防渗中较为广泛[87~89].MICP微观机理研究已成为当前的研究热点[90~92].MICP加固土体常用的细菌为巴氏芽孢杆菌,无论何种方法加固,其基本原理主要为通过尿素水解

菌(如巴氏芽孢杆菌)在试样内生成铵根离子和碳酸根离子,然后再与溶液或试样中所提供的钙离子发生化学反应,从而在试样中生成碳酸钙,进而将松散的试样进行胶结,以增强试样强度和稳定性,具体反应如下[93~95]:

4 粗粒料单颗粒破碎强度试验研究

4.1 粗粒料类别影响研究

即使相同材料相同颗粒粒径的岩土材料,由于内部孔隙及裂纹的不同,破碎强度也具有一定的差异性.所以对于不同材料类别但是颗粒粒径相同的粗粒料,其材料类别对于破碎强度的影响也是显而易见的.笔者针对3种不同材料类别、相同颗粒粒径的粗粒料单颗粒开展了单颗粒破碎试验[73~75],如图3和4所示,主要分析粗粒料类别对单颗粒破碎强度的影响.此节分析的粗粒料类别主要为砂岩、泥岩和石灰岩三种.

图3为不同粗粒料类别的力-位移关系曲线图[73~75],其中图中峰值点代表最大峰值力.对比图3(a)~(c)中相同材料的力-位移关系曲线可知,最大峰值力随着颗粒粒径的增大而增大.由图3(a)~(c)还可知,三种材料的粗粒料颗粒力-位移关系曲线均呈现一个相似

图3 (网络版彩图)不同类别粗粒料的力-位移关系曲线图[73~75].(a) 砂岩;(b) 泥岩;(c) 石灰岩;(d) 三种粗粒料10 mm颗粒粒径力-位移关系曲线对比图

Figure 3 (Color online) Force-displacement curves of different kinds of representative coarse grains [73~75]. (a) Sandstone grains; (b) mudstone grains; (c) limestone grains; (d) comparison of force-displacement curves of three kinds of coarse grains with particle size of 10 mm.

图 4 (网络版彩图)不同类别粗粒料的应力-应变关系曲线图^[73~75]. (a) 砂岩; (b) 泥岩; (c) 石灰岩; (d) 三种粗粒料 10 mm 颗粒粒径应力-应变关系曲线对比图

Figure 4 (Color online) Stress-strain curves of different kinds of representative coarse grains ^[73~75]. (a) Sandstone grains; (b) mudstone grains; (c) limestone grains; (d) comparison of stress-strain curves of three kinds of coarse grains with particle size of 10 mm.

的规律: 即初始阶段压缩力随着压缩位移的增大呈锯齿状增大, 且出现多个峰值和力降, 这是因为在达到最大峰值力之前, 锯齿状曲线均是因为颗粒棱角的破碎所导致的; 在达到某个力峰值点时, 颗粒发生破坏, 且此后所测得的力的值均不会超过该点, 此时所得到的力为最大峰值力; 在最大峰值力之后, 力-位移关系曲线形式与岩柱不同, 没有一个陡峭的力降, 直接降至 0 N, 这是由于在颗粒破碎之后, 破碎的小颗粒还在两个加载板间, 还能够承受一些力的作用. 将颗粒粒径为 10 mm 的三种粗粒料颗粒的力-位移关系曲线绘制在一起, 如图 3(d) 所示. 由图 3(d) 可知, 在相同颗粒粒径条件下, 不同类别的粗粒料颗粒, 其最大峰值力也不同, 其中石灰岩 > 泥岩 > 砂岩, 例如颗粒粒径为 10 mm 的石灰岩最大峰值力可达 796.86 N, 而砂岩的仅为 200 N, 石灰岩最大峰值力约为砂岩的 4 倍.

图 4 为不同类别粗粒料应力-应变关系曲线图^[73~75], 应力可通过公式(4)获得, 其中图中峰值点为最大峰值应力. 对比图 4 与图 3(a)~(c) 可知, 所得到的最大峰值应力随颗粒粒径的变化规律恰好与最大峰值力的变化规律相反, 即最大峰值应力随着颗粒粒径的增大而减小, 这是由于应力所代表的是颗粒的破碎强度, 与颗粒粒径相关, 颗粒粒径越大, 即使测得的最大峰值力越大, 但是由于大颗粒内部的孔隙或者裂纹相对于颗粒粒径小的颗粒更多, 分布的离散性更大, 所以最大峰值应力越小, 越容易发生破碎. 将颗粒粒径为 10 mm 的三种粗粒料的应力-应变关系曲线绘制在一

起, 如图 4(d) 所示. 由图 4(d) 可知, 在相同颗粒粒径条件下, 不同类别的粗粒料颗粒, 其最大峰值应力也不同, 与图 3(d) 所得规律相同, 即石灰岩 > 泥岩 > 砂岩, 例如颗粒粒径为 10 mm 的石灰岩最大峰值应力可达 9.09 MPa, 而砂岩的仅为 2.07 MPa, 石灰岩最大峰值应力约为砂岩的 4.4 倍.

图 5 为不同类别粗粒料的残存概率曲线图^[73~75]. 残存概率一般可由式(18)获得

$$P_s = \frac{n}{N}, \quad (18)$$

其中, P_s 为残存概率, n 为在某特征应力作用下发生破碎的个数, N 为进行单颗粒破碎试验的颗粒试样总个数. 由图 5(a)~(c) 可知, 对于同一种材料的粗粒料颗粒, 在残存概率相同条件下, 特征应力随着颗粒粒径的增大而减小, 例如在给定 37% 的残存概率时, 颗粒粒径为 2.5 mm 的砂岩特征应力为 8.05 MPa, 而颗粒粒径为 10 mm 的砂岩仅为 2.28 MPa. 将颗粒粒径为 10 mm 的三种材料的残存概率曲线绘制在一起, 如图 5(d) 所示, 可知在残存概率相同条件下, 特征应力的大小顺序为石灰岩 > 泥岩 > 砂岩, 这与图 3 和 4 所得到的结论一致. 随后将三个不同类别的粗粒料的特征应力进行归一化处理, 得到如图 5(e) 所示的归一化后的特征应力的残存概率曲线图. 由图 5(e) 可知, 归一化后的特征应力的残存概率曲线落在一个较为狭小的区域内, 不同类别和不同颗粒粒径的残存概率曲线基本重合, 说明粗粒料类别以及颗粒粒径对归一化后的特征应力的影响

图5 不同类别粗粒料的残存概率曲线图^[73~75]。(a) 砂岩; (b) 泥岩; (c) 石灰岩; (d) 三种粗粒料10 mm颗粒粒径残存概率曲线对比图; (e) 归一化后的特征应力与残存概率关系曲线图

Figure 5 Non-failure probability curves of different kinds of representative coarse grains [73–75]. (a) Sandstone grains; (b) mudstone grains; (c) limestone grains; (d) comparison of non-failure probability curves of three kinds of coarse grains with particle size of 10 mm; (e) relationship between normalized given characteristics stress and non-failure probability curves.

较小。

Weibull模量是后续研究颗粒强度中的一个重要参数,一般可通过式(6)获得。由第2节可知,Weibull模量是材料的特性参数,代表着破碎强度的离散性,Weibull模量越大,材料的破碎强度离散性越小^[56]。图6为不同类别粗粒料的Weibull分布图^[73~75]。由图6(a)~(c)可知,对于同一种材料的粗粒料颗粒,不同颗粒粒径Weibull模量拟合曲线的相关系数均较高,在0.9以上,且其Weibull模量值相差不大,破碎强度离散性接近,因此采用Weibull模量的平均值来代表该材料的最终Weibull模量值。将三种类别粗粒料材料的Weibull分布数据分别进行绘制,如图6(d)所示,可知对于材料最终得到的Weibull模量值和试验数据拟合度较好,因此可得砂岩的Weibull模量值 $m=3.24$,泥岩的Weibull模量值 $m=2.24$,石灰岩的Weibull模量值 $m=3.63$ 。Weibull模量值还说明了在三种类别的粗粒料中,泥岩的破碎强度离散性最大,石灰岩的破碎强度离散性最小。对于具有分形特性的颗粒材料,通过分形维数 D 即可得到其Weibull模量。针对砂岩和泥岩颗粒,当前分形维数分别为2.22和2.14^[96]。利用式(7)可知,砂岩和泥岩的Weibull模量分别为2.85和2.49,与式(6)所得结果基本一致。

4.2 外部环境的影响研究

图7为冻融循环影响下泥岩单颗粒特征强度和Weibull模量的变化曲线图^[74]。由图7(a)可知,三个不同

颗粒粒径的泥岩单颗粒在残存概率为37%时所对应的特征强度均随着冻融循环次数的增大而减小,例如当泥岩单颗粒粒径为5 mm时,在未冻融条件下的37%残存概率的特征强度为7.22 MPa,当冻融循环次数增加到12次时,37%残存概率的特征强度为6.15 MPa,减小了约15%。该结论与前人所得到的研究结论类似^[97~100]。图7(b)为泥岩的Weibull模量随冻融循环次数变化图。由图7(b)可知,随着冻融循环次数的增加,泥岩的Weibull模量在减小,但是减小幅度不大,两者间的关系可由式(19)表示:

$$m = -0.035\omega + 2.469, \quad (19)$$

其中, ω 为冻融循环次数。

图8为不同颗粒粒径的石灰岩颗粒在pH值和浸泡天数影响下的特征强度和Weibull模量变化曲线图^[75]。由图8(a)~(c)可得,37%残存概率的特征强度随着pH值的增大而增大,也就是当浸泡溶液由酸性转为中性时,石灰岩的颗粒强度越高。这是由于石灰岩的主要成分是碳酸盐岩,当在酸性溶液中浸泡时,石灰岩与酸性溶液起化学反应,从而降低了石灰岩的颗粒强度。纵向对比试验数据,当颗粒粒径一致时,石灰岩的颗粒强度随着浸泡时间的增加而降低,如图8(a)所示(颗粒粒径为2.5 mm),其原因是随着浸泡天数的增加,石灰岩与溶液的化学反应越彻底,导致其颗粒强度越低,且明显低于未浸泡时的颗粒强度。当颗粒粒径为5和

图 6 不同类别粗粒料的Weibull分布图^[73-75]. (a) 砂岩; (b) 泥岩; (c) 石灰岩; (d) 三种粗粒料Weibull分布对比图

Figure 6 Weibull distribution of different kinds of representative coarse grains [73-75]. (a) Sandstone grains; (b) mudstone grains; (c) limestone grains; (d) comparison of Weibull distribution curves of three kinds of coarse grains.

10 mm时表现出类似的规律,但是在图8(b)中颗粒粒径为5 mm时,浸泡5天的试验数据存在一个异常点,这个可能是由于所选取的该组颗粒内含有太多的杂质和裂纹,导致其强度低于浸泡10和15天的颗粒强度.图8(d)为石灰岩的Weibull模量随pH值和浸泡天数的曲线变化图.由图8(d)可知,石灰岩的Weibull模量随pH值增加而增大,同时随浸泡天数的增加在减小,三者之间的关系可由式(20)表示:

$$m = (-0.002 - 0.038e^{-0.401p})t + 3.63, \quad (20)$$

其中, p 为pH值, t 为浸泡天数.

4.3 离散元模拟研究

室内试验的方法一般情况不能满足大粒径或超大粒径颗粒的破碎强度的获取,前文已经介绍了基于尺寸效应可获取更大颗粒粒径的破碎强度,所得到的结果称为理论结果.随着计算机技术的发展,利用离散元程序模拟大粒径颗粒的破碎过程成为一种可能,所得到的结果称为数值结果.如图9所示,为砂岩和泥岩粗粒料单颗粒数值结果和理论结果对比图^[96].由图9(a)可知,对于小颗粒粒径(小于等于10 mm),试验结果和数值结果基本重合,因此认为所编写的数值程序准确

图 7 (a) 泥岩单颗粒特征强度与冻融循环次数变化曲线图^[74]; (b) 泥岩 Weibull 模量与冻融循环次数变化曲线图^[74]

Figure 7 (a) Relationship between characteristic strength of single particle and the number of freezing-thawing cycles of mudstone [74]; (b) relationship between the Weibull modulus and the number of freezing-thawing cycles of mudstone [74].

图 8 不同石灰岩颗粒粒径的特征强度和 Weibull 模量与 pH 值变化曲线图^[75]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) Weibull 模量与 pH 值的关系

Figure 8 Curves of characteristic strength and Weibull modulus of limestone versus pH values under different particle size condition [75]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) relationship between the Weibull modulus and pH values.

图 9 (网络版彩图)粗粒料单颗粒数值结果与理论结果对比分析^[96]. (a) 单颗粒破碎强度; (b) 单颗粒破碎能量

Figure 9 (Color online) Comparison between the numerical results and the predicted results of single-particle coarse grains [96]. (a) Single-particle crushing strength; (b) single-particle crushing energy.

可靠, 可用来模拟大颗粒粒径的破碎. 利用数值程序得到大颗粒粒径的破碎强度后, 与式(10)得到的理论结果绘制一起, 可知其拟合度较好, 因此可采用数值模拟以及分形维数 D 和式(10)来获取大颗粒粒径的破碎强度. 但是需要注意的是大颗粒粒径的破碎强度是否随颗粒粒径的增大在无限减小, 还需要通过试验和理论进一步进行验证.

单颗粒破碎能量随颗粒粒径的变化规律如图9(b)所示. 根据数值程序得到砂岩和泥岩单颗粒破碎的力-位移关系, 根据式(13)得到其破碎能量值, 随后将试验结果、数值结果以及利用式(14)得到的理论结果进行对比发现: 针对大颗粒粒径, 式(14)不能很好满足试验结果和数值结果的拟合, 因此对式(14)进行修正, 引入能量参数 A , 如式(21)所示:

$$E \propto d^A \left(\frac{SD}{3} - 2 \right), \quad (21)$$

其中, A 为能量参数, 其值为1.23. 因此可采用数值模拟

以及分形维数 D 和式(21)来获取大颗粒粒径的破碎能量.

4.4 单颗粒破碎试验和声发射监测协同分析

单颗粒破碎试验一般只能记录试验过程中力的变化规律, 对颗粒能量的耗散过程不能实时进行测量, 而将单颗粒破碎试验和声发射监测系统进行协同分析, 就能够获得在试验过程中力与能量的变化规律, 具体操作步骤在第3.3节中已进行详细叙述. 图10为不同颗粒粒径钙质砂颗粒的压力与声发射能量随时间的变化曲线图及声发射能量分布图^[81]. 声发射能量可利用式(22)获得^[101]:

$$E_s = \frac{1}{R} \int_{t_i}^{t_f} V^2(t) dt, \quad (22)$$

其中, E_s 为声发射能量, 单位为aJ; R 为声发射监测系统的内阻抗; t_i 和 t_f 分别为电压信号超过设定阈值的时刻和结束时刻, 时间区间 $T = t_f - t_i$; $V(t)$ 为在 t 时刻的电

图10 (网络版彩图)不同钙质砂颗粒粒径压力与声发射能量随时间变化曲线及声发射能量分布图^[81]. (a) 0.9 mm; (b) 1.58 mm; (c) 2.18 mm; (d) 声发射能量分布图

Figure 10 (Color online) Force-time and AE energy-time relationship and AE energy distribution of different calcareous sand particle sizes ^[81]. (a) 0.9 mm; (b) 1.58 mm; (c) 2.18 mm; (d) AE energy distribution graph.

压值。

图10(a)~(c)为不同钙质砂颗粒粒径的力-时间和声发射能量-时间关系曲线^[81], 其中由于声发射能量跨越了多个数量级, 具有明显的雪崩特性, 故采用对数坐标表示, 使数据的规律性更加明显。由图10(a)~(c)可知, 对于颗粒粒径为0.9和1.58 mm的钙质砂颗粒, 在试验初始阶段, 力-时间曲线较为光滑, 对应声发射信号可发现只有少量声发射信号产生; 随着试验的继续, 由于颗粒内部开始发生破裂及位错, 力-时间曲线发生抖动, 即产生力降, 在声学上可发现有明显的声发射信号产生, 每一个力降前后都会对应着声发射信号的产生, 该现象在颗粒粒径为2.18 mm的钙质砂颗粒中更加明显。但是已有研究表明^[102], 声发射信号能量与力降的大小无直接联系。图10(d)为根据雪崩动力学特性来描述声发射能量分布的Gutenberg-Richter定律。由图10(d)可知, 对于传统的直方图统计结果, 在双对数坐标系下, 声发射能量与能量概率密度在超过4个能量级的范围内表现出较好的幂函数关系, 即服从Gutenberg-Richter定律。对于0.9, 1.58和2.18 mm的钙质砂颗粒的幂指数分别为1.41, 1.40和1.80。

5 粗粒料群颗粒一维压缩特性试验研究

5.1 颗粒粒径影响研究

砂岩试样的一维压缩试验是在8个梯度的法向应力作用下进行的, 旨在研究不同终止法向应力作用下

砂岩粗粒料的一维压缩特性, 分析砂岩试样在试验过程中的颗粒破碎及能量耗散。

图11为不同颗粒粒径的砂岩试样在不同终止法向应力作用下的法向应力-应变关系曲线图^[73]。由图11(a)~(c)可知, 对于三个不同颗粒粒径的砂岩试样, 8个梯度的法向应力-应变曲线均在一个较为狭小的范围内, 且基本重合, 也就是说可以用最大的终止法向应力(本试验中即为100 MPa)所得到的法向应力-应变曲线来代替前7个梯度的法向应力-应变曲线。图11(d)为将3个不同颗粒粒径的砂岩试样在100 MPa时的终止法向应力的法向应力-应变曲线对比图。由图11(d)可知在相同的终止法向应力作用下, 应变随试样的颗粒粒径的增大而增大, 在颗粒粒径为10 mm, 终止法向应力为100 MPa时, 试样的最终应变可达50%左右。法向应力和应变的关系可用一个双曲线函数关系来进行描述:

$$\varepsilon = \frac{\eta\sigma}{\zeta + \sigma}, \quad (23)$$

其中, ε 为应变, σ 为法向应力, η 和 ζ 为拟合参数, 具体取值见图11(d)。

图12为不同颗粒粒径的砂岩试样在不同终止法向应力作用下的法向应力-孔隙比关系曲线图, 又可称压缩曲线, 其中法向应力以对数坐标表示^[73]。与图11(a)~(c)类似, 图12(a)~(c)中不同颗粒粒径的砂岩试样的压缩曲线在8个梯度法向应力作用下基本重合, 即可用最大的终止法向应力的压缩曲线来表示前7个梯度的

图11 不同颗粒粒径的砂岩群颗粒法向应力-应变关系曲线图^[73]。(a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) 法向应力为100 MPa时的法向应力-应变曲线对比图

Figure 11 Relationship between vertical stress and strain of sandstone specimens with different particle sizes ^[73]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) comparison of relationship between vertical stress and strain of sandstone specimens at 100 MPa.

图 12 不同颗粒粒径的砂岩群颗粒法向应力-孔隙比关系曲线图^[73]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) 法向应力为 100 MPa 时的法向应力-孔隙比曲线对比图

Figure 12 Relationship between vertical stress and void ratio of sandstone specimens with different particle sizes ^[73]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) comparison of relationship between vertical stress and void ratio of sandstone specimens at 100 MPa.

压缩曲线. 由图12(a)~(c)还可知, 随着颗粒粒径的增大, 砂岩试样的屈服应力在减小, 当颗粒粒径为2.5 mm时, 砂岩试样的屈服应力点为1.85 MPa, 而当颗粒粒径为10 mm时, 砂岩试样的屈服应力点为0.65 MPa. 将3个不同颗粒粒径的砂岩试样在100 MPa时的压缩曲线绘制在法向应力-孔隙比双对数坐标上, 如图12(d)所示. 由图12(d)可知, 在双对数坐标中, 超过屈服应力后, 法向应力和孔隙比呈现一个较好的线性关系, 具体表达式如式(24)所示:

$$e = \lambda \sigma^{-C}, \quad (24)$$

其中, C 为压缩指数, λ 为拟合参数, 具体取值见图12(d)所示.

图13为双对数坐标下不同颗粒粒径的砂岩试样颗粒级配变化曲线图^[73]. 由图13(a)~(c)可知, 随着终止法向应力的增大, 级配曲线逐渐向左上方移动, 在小的终止法向应力作用下(<16 MPa), 利用式(12)所得到的曲线和试验数据点拟合度较差, 这是因为在小的终止法向应力作用下, 砂岩试样发生破碎, 但是其破碎程度还较小. 随着终止法向应力的增大, 砂岩试样的破碎程度增大, 当终止法向应力为16 MPa时, 利用式(12)所得到的曲线和试验数据点拟合度较好, 当终止法向应力达到100 MPa时, 基本达到极限分形, 所得到的分形维数为砂岩试样的最终分形维数, 如图13(d)所示. 在本试验中, 砂岩试样的最终分形维数可取为2.7.

颗粒破碎指标是用来度量试样颗粒破碎程度的参数, Hardin破碎指标^[103]是目前常用的破碎指标之一, 随后Einav^[57]在Hardin破碎指标的基础上进一步修正, 采用初始级配曲线、当前级配曲线和最终级配曲线的方式对颗粒破碎进行分析, 表达式如下:

$$B_r = \frac{B_t}{B_p}, \quad (25)$$

其中, B_r 为相对破碎指标, B_t 为总破碎量, B_p 为潜在破碎量. Xiao等人^[104]根据分形维数也提出一个相对破碎指标计算方法, 如式(27)所示:

$$B_r = \frac{(D_c - D_0)(3 - D_u)}{(D_u - D_0)(3 - D_c)}, \quad (26)$$

其中, D_0 为初始分形维数, D_c 为当前分形维数, D_u 为最终分形维数.

图14为不同颗粒粒径的砂岩试样的破碎指标随不同终止法向应力及输入功的变化曲线图^[73]. 由图14(a)可知, 在终止法向应力较小时(<16 MPa), 随着终止法向应力的增大, 三个颗粒粒径的相对破碎指标快速增大, 说明在此阶段, 试样中发生的颗粒破碎程度较大, 粗颗粒在快速向细颗粒转化; 当终止法向应力较大时(≥ 16 MPa), 相对破碎指标的增速开始变缓, 最终随着终止法向应力的持续增大, 相对破碎指标达到一个稳定值, 基本保持不变. 终止法向应力和相对破碎指标之间的关系可由一个双曲线函数进行表示, 具体表达式如式(27):

图 13 不同颗粒粒径的砂岩群颗粒级配变化曲线图^[73]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) 不同法向应力条件下分形维数变化图

Figure 13 Evolving particle size distribution of sandstone specimens with different particle sizes ^[73]. (a) 2.5 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) the change of fractal dimension at different vertical stress levels.

图 14 (a) 不同颗粒粒径的砂岩群颗粒法向应力-相对破碎指标变化曲线图^[73]; (b) 不同颗粒粒径的砂岩群颗粒输入功-相对破碎指标变化曲线图^[73]

Figure 14 (a) Relationship between vertical stress and relative particle breakage index of sandstone specimens with different particle sizes ^[73]; (b) Relationship between input work and relative particle breakage index of sandstone specimens with different particle sizes ^[73].

$$B_r = \frac{(\sigma/p_a)^\kappa}{\xi + (\sigma/p_a)^\kappa}, \quad (27)$$

其中, p_a 为一个标准大气压强, κ 和 ξ 为拟合参数, 具体数值见 图14(a).

一般情况下, 砂岩试样在受力过程中, 在发生颗粒破碎的同时, 试样内部的能量也在释放. 图14(b)为输入功和破碎指标间的关系曲线. 图14(b)与(a)表现出类似的变化规律, 这是由于输入功与终止法向应力之间呈线性关系, 所以相对破碎指标也是随着输入功的增大而增大, 且在最大终止法向应力所对应的输入功时, 破碎指标达到一个稳定状态. 输入功与破碎指标间的关系也可由一个双曲线函数表示, 如式(28):

$$B_r = \frac{W_{in}^{\kappa}}{\zeta(\lambda p_a)^{\kappa} + W_{in}^{\kappa}}, \quad (28)$$

其中, W_{in} 为输入功, λ 为拟合参数, 具体数值见图14(b), 其他参数取值与式(27)一致.

5.2 粗粒料类别影响研究

第4节已经分析了粗粒料类别对单颗粒破碎强度的影响, 这部分主要分析在一维压缩条件下不同粗粒料类别的强度和变形特性的变化. 此部分的粗粒料主要为钙质砂和石英砂^[77].

图15(a)和(b)为钙质砂和石英砂群颗粒法向应力-应变关系曲线图^[77], 终止法向应力主要分为5个不同梯度, 其分析与砂岩群颗粒法向应力-应变曲线变化规律相似, 即对于两个不同粗粒料类别的试样, 5个梯度的法向应力-应变曲线均在一个较为狭小的范围内, 且基本重合, 可用最大终止法向应力(即为100 MPa)所得到的法向应力-应变曲线来代替前4个梯度的法向应力-应变曲线, 其关系曲线可由式(23)进行描述, 主要参

数取值见图15(a)和(b). 由图15(a)和(b)还可知, 在相同的终止法向应力作用下, 钙质砂试样的变形量大于石英砂试样. 图15(c)和(d)为钙质砂和石英砂群颗粒法向应力-孔隙比关系曲线图^[77]. 由图15(c)和(d)可见, 钙质砂和石英砂在5个梯度终止法向应力条件下其压缩曲线基本重合. 对比图15(c)和(d)还可知, 钙质砂的屈服应力约为2 MPa, 石英砂的屈服应力约为10 MPa, 是钙质砂的5倍, 这是由于两种粗粒料的内部结构所造成的, 钙质砂较石英砂多孔隙, 易发生颗粒破碎, 因此在相同的终止法向应力条件下, 出现屈服拐点较石英砂早.

图16(a)和(b)为钙质砂和石英砂群颗粒级配变化曲线图^[77]. 对比钙质砂和石英砂试样的级配曲线, 钙质砂试样在终止法向应力10 MPa时开始出现大量的颗粒破碎, 并且随着法向应力的增大, 级配曲线向左上方移动明显, 在级配曲线双对数坐标图中, 也有类似的现象发生, 当终止法向应力 ≥ 10 MPa时, 分形明显; 但是对于石英砂试样, 终止法向应力为2和10 MPa时, 级配曲线变化不明显, 当终止法向应力 ≥ 30 MPa时, 出现明显的颗粒破碎现象, 然后随终止法向应力的增大, 级配曲线向左上方移动明显, 在级配曲线双对数坐标图中, 当终止法向应力 ≥ 30 MPa时, 分形明显. 但是对于钙质砂和石英砂试样, 当终止法向应力为100 MPa时, 试样并没有达到极限分形维数, 与砂岩群颗粒存在不同, 这主要是由于粗粒料类别和颗粒粒径的影响. 对于钙质砂和石英砂试样, 计算其最终分形维数还需要

图15 (网络版彩图) (a) 钙质砂群颗粒法向应力-应变关系曲线图^[77]; (b) 石英砂群颗粒法向应力-应变关系曲线图^[77]; (c) 钙质砂群颗粒法向应力-孔隙比关系曲线图^[77]; (d) 石英砂群颗粒法向应力-孔隙比关系曲线图^[77]

Figure 15 (Color online) (a) Relationship between vertical stress and strain of calcareous sand specimens ^[77]; (b) relationship between vertical stress and strain of quartz sand specimens ^[77]; (c) relationship between vertical stress and void ratio of calcareous sand specimens ^[77]; (d) relationship between vertical stress and void ratio of quartz sand specimens ^[77].

图 16 (a) 钙质砂群颗粒级配变化曲线图^[77]; (b) 石英砂群颗粒级配变化曲线图^[77]; (c) 钙质砂和石英砂群颗粒法向应力-相对破碎指标变化曲线图^[77]; (d) 钙质砂和石英砂群颗粒输入功-相对破碎指标变化曲线图^[77]

Figure 16 (a) Evolving particle size distribution of calcareous sand specimens ^[77]; (b) evolving particle size distribution of quartz sand specimens ^[77]; (c) relationship between vertical stress and relative particle breakage index of calcareous sand and quartz sand specimens ^[77]; (d) relationship between input work and relative particle breakage index of calcareous sand and quartz sand specimens ^[77].

进一步讨论。

图16(c)和(d)为钙质砂和石英砂群颗粒法向应力-破碎指标与输入功-破碎指标变化曲线图^[77], 其中破碎指标采用的是Hardin破碎指标^[103]。由对图16(a)和(b)的分析可知, 在终止法向应力为100 MPa时, 钙质砂和石英砂试样没有达到最终分形维数, 在图16(c)和(d)中表现为破碎指标未达到一个相对稳定值状态, 但是随着终止法向应力的增大(或输入功的增大), 破碎指标持续增大, 但是颗粒的破碎不会一直发生, 最终也会达到一个稳定状态, 因此可采用式(27)来描述钙质砂和石英砂试样终止法向应力和破碎指标之间的函数关系, 用式(28)来描述钙质砂和石英砂试样输入功和破碎指标之间的函数关系, 具体取值见图16(c)和(d)。

5.3 微生物胶结情况影响研究

图17(a)和(b)为不同加载阶段不同胶结程度的石

英砂法向应力-相对破碎指标与输入功-相对破碎指标变化曲线图^[105]。在图17(a)中按照终止法向应力以及斜率($k = \delta B_r / \delta \sigma$)的不同, 将加载阶段分为3个阶段, 分别为加载第一阶段(终止法向应力为10 MPa)、加载第二阶段(终止法向应力为20 MPa)和加载第三阶段(终止法向应力为30 MPa), 胶结程度分为未胶结、用1 mol/L CaCl₂溶液MICP胶结以及2 mol/L CaCl₂溶液MICP胶结三种情况。由图17(a)可知, 随终止法向应力的增大, 石英砂试样无论在未胶结情况还是胶结情况, 相对破碎指标都在增大; 但是对比未胶结和胶结情况可知, 当试样为胶结时, 当从加载第一阶段到加载第三阶段时, 相对破碎指标增长的速度在减缓, 即当终止法向应力达到某个较大的值时, 试样的相对破碎指标会趋向于一个稳定的状态; 而对于胶结试样, 在加载第一阶段时斜率较小, 说明在此阶段试样中所生成的碳酸钙胶结具有保护砂颗粒的作用, 但是在加载第

图 17 (网络版彩图) (a) 不同加载阶段石英砂试样法向应力-相对破碎指标变化曲线图^[105]; (b) 不同加载阶段石英砂试样输入功-相对破碎指标变化曲线图^[105]; (c) 石英砂试样压缩指数随不均匀系数及 CaCO_3 含量变化三维曲线图^[106]

Figure 17 (Color online) (a) Relationship between vertical stress and relative particle breakage index of quartz sand during different loading stages [105]; (b) relationship between input work and relative particle breakage index of quartz sand during different loading stages [105]; (c) evolution of compression index with C_u and CaCO_3 content of quartz sand [106].

二阶段和第三阶段时,斜率增加速度明显加快,说明随着终止法向应力的增加,试样中碳酸钙胶结和砂颗粒在同时发生破坏。将图17(a)由上至下进行对比可知,随着MICP胶结程度的增大,石英砂试样的相对破碎指标减小,即微生物胶结技术对粗粒料的颗粒破碎存在抑制作用。图17(b)为输入功和相对破碎指标变化曲线。由图17(b)可知,在同一种胶结程度条件下,输入功的增大导致了相对破碎指标的增加;在同一个相对破碎指标条件下,胶结程度越高,所需要的输入功越大。

图17(c)为石英砂试样压缩系数在不同不均匀系数 C_u 及 CaCO_3 含量(测 CaCO_3 含量的方法为试验结束后,对试样进行酸洗,利用质量差得到 CaCO_3 含量)影响下的三维曲线图^[106]。石英砂试样受力分为三层,分别为0~0.03, 0.04~2.7和20~30 MPa(从下至上),胶结程

度也分为未胶结、用1 mol/L CaCl_2 溶液MICP胶结以及2 mol/L CaCl_2 溶液MICP胶结三种情况(从右至左)。由图17(c)可知,在同种 CaCl_2 溶液MICP胶结条件下,压缩指数随着 C_u 的增大而增大,即 C_u 越大,试样中所含的细颗粒越多,从而导致试样的压缩性越大;当 C_u 相同时,石英砂试样的压缩性随着 CaCO_3 含量的增大而在减小,即MICP对于提高粗粒料的压缩性具有有利影响。由图17(c)还可知,在三个不同的受力层中,当力的范围在0~0.03 MPa,主要是石英砂试样中砂颗粒之间产生的摩擦作用;当力的范围在0.04~2.7 MPa,主要是石英砂试样中利用碳酸钙胶结在一起的砂颗粒之间碳酸钙胶结的破坏;随着受力继续增大,当力的范围在20~30 MPa时,石英砂试样中碳酸钙胶结发生破坏,同时砂颗粒发生颗粒破碎。

图18为不同胶结情况钙质砂试样压力与声发射能量随时间变化曲线图及声发射能量分布图^[107]。对比图18(a)和(b)可发现在未胶结情况下钙质砂试样只有AE能量谱, 没有力-时间曲线, 这是由于未胶结条件下, 钙质砂试样的压缩强度非常小, 试验仪器中不能监测到其力的大小; 研究表明, 无论钙质砂试样是否采用微生物胶结技术, 均表现出典型的裂纹破裂特征, 且胶结试样的声发射能量绝大多数大于105 aJ, 而未胶结试样中的声发射能量绝大多数在101~102 aJ, 这是由于未胶结试样中发生破碎的颗粒较少, 主要是由于钙质砂颗粒的位错、旋转及颗粒间的摩擦所导致的能量释放。由图18(b)可知, 采用微生物胶结技术的试样在压缩过程中, 声发射能量存在多个“沉默片段”, 对应的力-时间曲线则有多个较大的力降, 这是由于胶结后的试样在压缩过程中, 会产生裂纹, 从而释放能量, 产生力降; 在力降结束时, 裂纹完全产生, 当试验继续, 压缩位移增大, 试样的裂纹发生闭合, 能量将不再释放, 因此在声发射能谱上所反映的就是一个“沉默片段”。图18(c)为不同胶结情况钙质砂群颗粒声发射能量分布图, 具体函数关系可由Gutenberg-Richter定律, 即式(16)进行描述。对于未胶结和采用微生物胶结技术的钙质砂试样, 其幂指数分别为1.70和1.46。

6 结论

本文通过对粗粒料强度分析常用理论(主要包括Weibull分布、尺寸效应、分形、声发射及雪崩特性

等)和常用室内试验方法(主要包括单颗粒破碎试验、一维压缩试验及两种试验与声发射监测协同和微生物胶结)总结归纳, 主要分析了粗粒料类别、外部环境、颗粒粒径以及胶结情况对粗粒料强度及变形特性的影响。主要得出以下结论。

(1) 粗粒料类别对于粗粒料强度及变形影响显著。对于单颗粒破碎试验, 石灰岩强度>泥岩强度>砂岩强度, 但粗粒料类别对归一化后的特征应力的影响较小; 不同粗粒料颗粒强度均能够用Weibull分布函数进行描述, 且可分别获得不同粗粒料的Weibull模量 m : $m_{\text{砂岩}}=3.24$, $m_{\text{泥岩}}=2.42$, $m_{\text{石灰岩}}=3.63$ 。对于一维压缩试验, 在相同终止法向应力作用下, 钙质砂试样的变形量大于石英砂; 钙质砂的屈服应力早于石英砂出现; 钙质砂试样在10 MPa时出现大量的颗粒破碎, 而石英砂在30 MPa是才开始出现颗粒破碎, 且相同终止法向应力条件下, 钙质砂的破碎量大于石英砂的破碎量。

(2) 泥岩粗粒料颗粒强度和Weibull模量均随着冻融循环次数的增大而减小, 且Weibull模量与冻融循环次数呈线性关系; 在 $\text{pH} \leq 7$ 条件下, 石灰岩粗粒料颗粒强度和Weibull模量均随着pH值的增大而增大, 随着浸泡天数的增大而减小, 且Weibull模量与pH值和浸泡天数呈三维曲面函数关系。

(3) 粗粒料的颗粒强度随着颗粒粒径的增大而减小, 具有明显的尺寸效应。对于单颗粒破碎试验及数值模拟结果, 粗粒料颗粒强度随颗粒粒径的增大呈幂函数关系减小, 破碎能量呈幂函数关系增大; 对于一维压缩试验, 随着颗粒粒径的增大, 粗粒料试样屈服应力减小; 随着终止法向应力的增大, 粗粒料试样的

图18 (网络版彩图)不同胶结情况钙质砂群颗粒压力与声发射能量随时间变化曲线图及声发射能量分布图^[107]。(a) 未胶结; (b) 微生物胶结; (c) 声发射能量分布图

Figure 18 (Color online) Force-time and AE energy-time relationship of calcareous sand under different cementation conditions ^[107]. (a) Without cementation; (b) bio-cemented; (c) AE energy distribution graph.

相对破碎指标增大; 在达到极限分形维数之前, 相同终止法向应力下, 颗粒粒径越大, 破碎量越大, 在达到极限分形维数后, 相对破碎指标趋向一个稳定值; 微生物胶结对粗粒料的颗粒破碎具有抑制作用。

(4) 声发射监测技术可用于粗粒料颗粒强度分析。对于单颗粒破碎-声发射试验, 钙质砂力-时间曲线存在力降, 且力降大小与声发射能量无直接定量关系; 不同颗粒粒径的钙质砂颗粒的声发射能量在直方图中满足幂律分布, 颗粒粒径为 0.9、1.58 和 2.18 mm 的钙质砂颗粒所对应的幂律指数分别为 1.41、1.40 和 1.80。对

于一维压缩试验, 当钙质砂试样为未胶结状态时, 通过仪器监测可发现只有 AE 能量谱, 不存在力-时间关系曲线; 当钙质砂试样为胶结状态时, AE 能量谱存在“沉默片段”, 并与力-时间曲线大的力降对应; 钙质砂试样在未胶结和胶结状态下的声发射能量在直方图中均满足幂律分布, 幂律指数分别为 1.70 和 1.46。

由于本文只是对笔者及其团队近年来的相关研究成果进行分析总结, 其中还包括多个室内试验方法, 如三轴试验、冲击试验等并未深入涉及, 后续将进一步研究。

参考文献

- Indraratna B, Ionescu D, Christie H D. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. *J Geotech Geoenviron Eng*, 1998, 124: 439–449
- Liu P, Meng M Q, Xiao Y, et al. Dynamic properties of polyurethane foam adhesive-reinforced gravels. *Sci China Tech Sci*, 2021, 64: 535–547
- Shan J J, Liu H L, Xiao Y, et al. Deformation and stability analysis of airport high coarse-granular fills considering particle breakage characteristics (in Chinese). *J Civil Environ Eng*, 2020, 42: 17–22 [单军杰, 刘汉龙, 肖杨, 等. 考虑颗粒破碎特性的机场高填方变形与稳定性分析. *土木与环境工程学报*, 2020, 42: 17–22]
- Wang K Y, Zhuang Y, Geng X Y. Experimental study on critical dynamic stress of coarse-grained soil in railway subgrade (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2020, 41: 1865–1873 [王康宇, 庄妍, 耿雪玉. 铁路路基粗粒土填料临界动应力试验研究. *岩土力学*, 2020, 41: 1865–1873]
- Liu P, Liu H L, Meng M Q, et al. Effect of previous cyclic loading on dynamic deformation behaviors of the PFA-reinforced rockfill materials (in Chinese). *China J Highway Transport*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20210309.1423.004.html> [刘平, 刘汉龙, 孟敏强, 等. 先期振动对高聚物胶凝堆石料动变形特性的影响. *中国公路学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20210309.1423.004.html>]
- Indraratna B, Salim W. Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy. *Geotech Eng*, 2002, 155: 243–252
- Yu F W. Particle breakage in granular soils: A review. *Particulate Sci Tech*, 2021, 39: 91–100
- Xiao Y, Desai C S, Daouadji A, et al. Grain crushing in geoscience materials—Key issues on crushing response, measurement and modeling: Review and preface. *Geosci Front*, 2020, 11: 363–374
- Liu M C, Meng F, Wang Y Y. Evolution of particle crushing of coarse-grained materials in large-scale triaxial tests (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42: 561–567 [刘萌成, 孟锋, 王洋洋. 粗粒料颗粒破碎变化规律大型三轴试验研究. *岩土工程学报*, 2020, 42: 561–567]
- Zhou H J, Ma G, Yuan W, et al. Size effect on the crushing strengths of rock particles (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2017, 38: 2425–2433 [周海娟, 马刚, 袁藏, 等. 堆石颗粒压缩破碎强度的尺寸效应. *岩土力学*, 2017, 38: 2425–2433]
- McDowell G R. On the yielding and plastic compression of sand. *Soils Found*, 2002, 42: 139–145
- Manso J, Marcelino J, Caldeira L. Single-particle crushing strength under different relative humidity conditions. *Acta Geotech*, 2020, 16: 749–761
- Zhao B, Wang J, Coop M R, et al. An investigation of single sand particle fracture using X-ray micro-tomography. *Géotechnique*, 2015, 65: 625–641
- Wang W, Coop M R. An investigation of breakage behaviour of single sand particles using a high-speed microscope camera. *Géotechnique*, 2016, 66: 984–998
- Frossard E, Hu W, Dano C, et al. Rockfill shear strength evaluation: A rational method based on size effects. *Géotechnique*, 2012, 62: 415–427
- Xiao Y, Liu H, Chen Y, et al. Particle size effects in granular soils under true triaxial conditions. *Géotechnique*, 2014, 64: 667–672
- Ma G, Zhou W, Chang X L, et al. Mesoscopic mechanism study of scale effects of rockfill (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31: 2473–2482 [马刚, 周伟, 常晓林, 等. 堆石料缩尺效应的细观机制研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31: 2473–2482]

- 18 Kong X J, Ning F W, Liu J M, et al. Scale effect of rockfill materials using super-large triaxial tests (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2019, 41: 255–261 [孔宪京, 宁凡伟, 刘京茂, 等. 基于超大型三轴仪的堆石料缩尺效应研究. *岩土工程学报*, 2019, 41: 255–261]
- 19 Lade P V, Yamamuro J A, Bopp P A. Significance of particle crushing in granular materials. *J Geotech Eng*, 1996, 122: 309–316
- 20 Coop M R, Sorensen K K, Bodas Freitas T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand. *Géotechnique*, 2004, 54: 157–163
- 21 Zhang X, Baudet B A. Particle breakage in gap-graded soil. *Géotech Lett*, 2013, 3: 72–77
- 22 Xiao Y, Liu H, Chen Y, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests. II: Influence of particle breakage. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2014, 140: 04014071
- 23 Xiao Y, Liu H, Ding X, et al. Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material. *Int J Geomech*, 2016, 16: 04015031
- 24 Xiao Y, Liu H, Chen Q, et al. Evolution of particle breakage and volumetric deformation of binary granular soils under impact load. *Granular Matter*, 2017, 19: 10.1007
- 25 Sun Y, Zheng C. Breakage and shape analysis of ballast aggregates with different size distributions. *Particuology*, 2017, 35: 84–92
- 26 Sun Y, Nimbalkar S, Chen C. Grading and frequency dependence of the resilient modulus of ballast. *Géotech Lett*, 2018, 8: 305–309
- 27 Xiao Y, Yuan Z, Lv Y, et al. Fractal crushing of carbonate and quartz sands along the specimen height under impact loading. *Construct Build Mater*, 2018, 182: 188–199
- 28 Xiao Y, Wang C, Wu H, et al. New simple breakage index for crushable granular soils. *Int J Geomech*, 2021, 21: 04021136
- 29 Whiffin V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement. Dissertation for Doctoral Degree. Murdoch: Murdoch University, 2004
- 30 Lee M L, Ng W S, Tanaka Y. Stress-deformation and compressibility responses of bio-mediated residual soils. *Ecol Eng*, 2013, 60: 142–149
- 31 Xiao P, Liu H, Xiao Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2018, 107: 9–19
- 32 Liu H L, Xiao P, Xiao Y, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2018, 40: 38–45 [刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究. *岩土工程学报*, 2018, 40: 38–45]
- 33 Liu L, Liu H, Stuedlein A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand. *Can Geotech J*, 2019, 56: 1502–1513
- 34 Ma G, He X, Jiang X, et al. Strength and permeability of bentonite-assisted biocemented coarse sand. *Can Geotech J*, 2021, 58: 969–981
- 35 Zhao C, He X, Hu R, et al. Kinetic theory and numerical simulation of biomineralization (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2022, 44: 1096–1105 [赵常, 何想, 胡冉, 等. 微生物矿化动力学理论与模拟. *岩土工程学报*, 2022, 44: 1096–1105]
- 36 Xiao Y, Xiao W, Ma G, et al. Mechanical performance of biotreated sandy road bases. *J Perform Constr Facil*, 2022, 36: 04021111
- 37 Xiao Y, He X, Evans T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2019, 145: 04019048
- 38 Xiao Y, He X, Wu W, et al. Kinetic biomineralization through microfluidic chip tests. *Acta Geotech*, 2021, 16: 3229–3237
- 39 Gao Y F, He J, Tang X Y, et al. Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil. *Soils Found*, 2019, 59: 1631–1637
- 40 He J, Gao Y, Gu Z, et al. Characterization of crude bacterial urease for CaCO_3 precipitation and cementation of silty sand. *J Mater Civil Eng*, 2020, 32: 04020071
- 41 Jayatilaka A D S, Trustrum K. Statistical approach to brittle fracture. *J Mater Sci*, 1977, 12: 1426–1430
- 42 Zhang J M. Study on the fundamental mechanical characteristics of calcareous sand and the influence of particle breakage (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004 [张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2004]
- 43 Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech*, 1951, 18: 293–297
- 44 Nakata A F L, Hyde M, Hyodo H, et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test. *Géotechnique*, 1999, 49: 567–583
- 45 McDowell G R, Amon A. The application of Weibull statistics to the fracture of soil particles. *Soils Found*, 2000, 40: 133–141
- 46 Ma L J, Li Z, Wang M Y, et al. Effects of size and loading rate on the mechanical properties of single coral particles. *Powder Tech*, 2019, 342: 961–971
- 47 McDowell G R, Bolton M D. On the micromechanics of crushable aggregates. *Géotechnique*, 1998, 48: 667–679
- 48 Ovalle C, Frossard E, Dano C, et al. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data. *Acta Mech*, 2014, 225: 2199–2216

- 49 Lim W L, McDowell G R, Collop A C. The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast. *Granular Matter*, 2004, 6: 229–237
- 50 Jaeger J C. Failure of rocks under tensile conditions. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstracts*, 1967, 4: 219–227
- 51 Xu Y. Explanation of scaling phenomenon based on fractal fragmentation. *Mech Res Commun*, 2005, 32: 209–220
- 52 Charles J A, Watts K S. The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill. *Géotechnique*, 1980, 30: 353–367
- 53 Lee D M. The angles of friction of granular fills. Dissertation for Doctoral Degree. Cambridge: Univ Cambridge, 1992
- 54 Xu Y F. Theory of shear strength of granular materials based on particle breakage (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2018, 40: 1171–1179 [徐永福. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土的剪切强度理论. *岩土工程学报*, 2018, 40: 1171–1179]
- 55 Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W.H. Freeman, 1983
- 56 Chi S C, Wang F, Jia Y F, et al. Modeling particle breakage of rockfill materials based on single particle strength (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37: 1780–1785 [迟世春, 王峰, 贾宇峰, 等. 考虑细观单粒强度的堆石料破碎特性研究. *岩土工程学报*, 2015, 37: 1780–1785]
- 57 Einav I. breakage mechanics—Part I: Theory. *J Mech Phys Solids*, 2007, 55: 1274–1297
- 58 Sammis C, King G, Biegel R. The kinematics of gouge deformation. *Pure Appl Geophys*, 1987, 125: 777–812
- 59 McDowell G R, Daniell C M. Fractal compression of soil. *Géotechnique*, 2001, 51: 173–176
- 60 de Bono J P, McDowell G R. The fractal micro mechanics of normal compression. *Comput Geotech*, 2016, 78: 11–24
- 61 Turcotte D L. Fractals and fragmentation. *J Geophys Res*, 1986, 91: 1921–1926
- 62 Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci Soc Am J*, 1989, 53: 987–996
- 63 Wang Y, Shao C, Xu Y. Fractal crushing of solid particles. *KSCE J Civ Eng*, 2017, 21: 987–993
- 64 Yin X G, Li S L. The application of acoustic emission technology in geotechnical engineering (in Chinese). *Min Technol*, 2002, 2: 39–42 [尹贤刚, 李庶林. 声发射技术在岩土工程中的应用. *采矿技术*, 2002, 2: 39–42]
- 65 Koerner R M, Curran J W, McCabe W M, et al. Acoustic emission behavior of granular soils. *J Geotech Engrg Div*, 1976, 102: 761–773
- 66 Koerner R M, Lord Jr. A E, Deutsch W L. Determination of prestress in granular soils using AE. *J Geotech Eng*, 1984, 110: 346–358
- 67 Chen Q Y, Sun J Z, Wang R. Triaxial experiment study of acoustic emission laws of calcareous sand (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2009, 30: 2027–2030, 2036 [陈清运, 孙吉主, 汪稔. 钙质砂声发射特征的三轴试验研究. *岩土力学*, 2009, 30: 2027–2030, 2036]
- 68 Qin S L, Yang L Q, Gao H, et al. Acoustic emission characteristics of sericite schist coarse aggregates under different stress paths (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2015, 36: 89–96 [秦尚林, 杨兰强, 高惠, 等. 不同应力路径下绢云母片岩粗粒料声发射特征. *岩土力学*, 2015, 36: 89–96]
- 69 Jiang X. Avalanches dynamics and its application in mining materials under uniaxial compression basted on acoustic emission (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chongqing: Chongqing University, 2017 [蒋翔. 基于声发射的煤岩单轴压缩雪崩动力学及其应用研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2017]
- 70 Utsu T. Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 509–535
- 71 Utsu T, Ogata Y, S R, et al. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *J Phys Earth*, 1995, 43: 1–33
- 72 Alava M J, Nukala P K V V, Zapperi S. Statistical models of fracture. *Adv Phys*, 2006, 55: 349–476
- 73 Xiao Y, Meng M, Daouadji A, et al. Effects of particle size on crushing and deformation behaviors of rockfill materials. *Geosci Front*, 2020, 11: 375–388
- 74 Meng M, Sun Z C, Wang C G, et al. Size effect on mudstone strength during freezing-thawing cycle. *Environ Geotech*, 2020, doi: 10.1680/jenge.18.00160: 1–13
- 75 Xiao Y, Sun Z C, Desai C S, et al. Strength and surviving probability in grain crushing under acidic erosion and compression. *Int J Geomech*, 2019, 19: 04019123
- 76 Selig E T, Ladd R S. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotech Test J*, 1978, 1: 16
- 77 Ma Q F, Liu H L, Xiao Y, et al. Compression and particle breakage features of calcareous sand under high stress (in Chinese). *J Disaster Prev Mitigat Eng*, 2018, 38: 1020–1025 [马启锋, 刘汉龙, 肖杨, 等. 高应力作用下钙质砂压缩及颗粒破碎特性试验研究. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38: 1020–1025]
- 78 Chen H. Experimental study on gradations affecting compression and shear characteristics of MICP-improved sands (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chongqing: Chongqing University, 2019 [陈辉. 级配对MICP加固砂土的压缩及剪切特性影响研究. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2019]
- 79 Xiao Y, Wang L, Jiang X, et al. Acoustic emission and force drop in grain crushing of carbonate sands. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2019, 145:

04019057

- 80 Jin L S. Acoustic emission characteristics of calcareous sand particle and its aggregates cemented by MICP (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chongqing: Chongqing University, 2019 [金林森. 钙质砂及其MICP胶结体的声发射特性研究. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2019]
- 81 Wang L, Jiang X, Xiao Y, et al. Experimental research on the size effect and avalanche dynamics characteristics of calcareous sand particles (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2021, 43: 1029–1038 [王磊, 蒋翔, 肖杨, 等. 钙质砂颗粒的尺寸效应及雪崩动力学特性试验研究. 岩土工程学报, 2021, 43: 1029–1038]
- 82 Cheng L, Shahin M A, Chu J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method. *Acta Geotech*, 2019, 14: 615–626
- 83 Xiao Y, Wang Y, Desai C S, et al. Strength and deformation responses of biocemented sands using a temperature-controlled method. *Int J Geomech*, 2019, 19: 04019120
- 84 Xiao Y, Wang Y, Wang S, et al. Homogeneity and mechanical behaviors of sands improved by a temperature-controlled one-phase MICP method. *Acta Geotech*, 2021, 16: 1417–1427
- 85 Xiao P, Liu H L, Zhang Y, et al. Dynamic strength of temperature-controlled MICP-treated calcareous sand (in Chinese). *Chi J Geotech Eng*, 2021, 43: 511–519 [肖鹏, 刘汉龙, 张宇, 等. 微生物温控加固钙质砂动强度特性研究. 岩土工程学报, 2021, 43: 511–519]
- 86 Peng J, Huang M F, Xie G Q, et al. Grouting method of MICP-treated soil (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2019, 47: 259–264 [彭劫, 黄慕凡, 谢高强, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47: 259–264]
- 87 Xiao Y, Stuedlein A W, Pan Z, et al. Toe-bearing capacity of precast concrete piles through biogrouting improvement. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2020, 146: 06020026
- 88 Xiao Y, Stuedlein A W, He X, et al. Lateral responses of a model pile in biocemented sand. *Int J Geomech*, 2021, 21: 06021027
- 89 Xiao Y, Ma G, Wu H, et al. Rainfall-induced erosion of biocemented graded slopes. *Int J Geomech*, 2022, 22: 04021256
- 90 He X, Ma G L, Wang Y, et al. Visualization investigation of bio-cementation process based on microfluidics (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2020, 42: 1005–1012 [何想, 马国梁, 汪杨, 等. 基于微流控芯片技术的微生物加固可视化研究. 岩土工程学报, 2020, 42: 1005–1012]
- 91 Xiao Y, Zhang Z, Stuedlein A W, et al. Liquefaction modeling for biocemented calcareous sand. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2021, 147: 04021149
- 92 He X, Liu H L, Han F, et al. Spatiotemporal evolution of microbial-induced calcium carbonate precipitation based on microfluidics (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2021, 43: 1861–1869 [何想, 刘汉龙, 韩飞, 等. 微生物矿化沉积时空演化的微流控芯片试验研究. 岩土工程学报, 2021, 43: 1861–1869]
- 93 DeJong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement. *Ecol Eng*, 2010, 36: 197–210
- 94 Xiao P, Liu H, Stuedlein A W, et al. Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand. *Can Geotech J*, 2019, 56: 1849–1862
- 95 Xiao Y, Stuedlein A W, Ran J, et al. Effect of particle shape on strength and stiffness of biocemented glass beads. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2019, 145: 06019016
- 96 Meng M Q, Wang L, Jiang X, et al. Single-particle crushing test and numerical simulation of coarse grained soil based on size effect (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2020, 41: 2953–2962 [孟敏强, 王磊, 蒋翔, 等. 基于尺寸效应的粗粒土单颗粒破碎试验及数值模拟. 岩土力学, 2020, 41: 2953–2962]
- 97 Wang D, Ma W, Niu Y, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. *Cold Regions Sci Tech*, 2007, 48: 34–43
- 98 Tan X, Chen W, Yang J, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles. *Cold Regions Sci Tech*, 2011, 68: 130–138
- 99 Li J M, Huang Y L, Chen Z W, et al. Particle-crushing characteristics and acoustic-emission patterns of crushing gangue backfilling material under cyclic loading. *Minerals*, 2018, 8: 244
- 100 Ma Q Y, Ma D D, Yao Z M. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic compressive strength and energy distribution of soft rock specimen. *Cold Regions Sci Tech*, 2018, 153: 10–17
- 101 Salje E K H, Dahmen K A. Crackling noise in disordered materials. *Annu Rev Condens Matter Phys*, 2014, 5: 233–254
- 102 Salje E K H, Soto-Parra D E, Planes A, et al. Failure mechanism in porous materials under compression: Crackling noise in mesoporous SiO₂. *Philos Mag Lett*, 2011, 91: 554–560

- 103 Hardin B O. Crushing of soil particles. *J Geotech Eng*, 1985, 111: 1177–1192
- 104 Xiao Y, Sun Y F, Hanif K F. A particle-breakage critical state model for rockfill material. *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 1125–1136
- 105 Xiao Y, Chen H, Stuedlein A W, et al. Restraint of particle breakage by biotreatment method. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2020, 146: 04020123
- 106 Xiao Y, Zhao C, Sun Y, et al. Compression behavior of MICP-treated sand with various gradations. *Acta Geotech*, 2021, 16: 1391–1400
- 107 Wang L, Jiang X, He X, et al. Crackling noise and bio-cementation. *Eng Fract Mech*, 2021, 247: 107675

Recent progress on crushing-strength-energy dissipation of coarse granular soil and biocementation at contacts

MENG MinQiang^{1,2,3}, XIAO Yang^{3,4}, SUN ZengChun^{3,4}, ZHANG ZhiChao^{3,4}, JIANG Xiang^{3,4}, LIU HanLong^{3,4}, HE Xiang^{3,4}, WU HuanRan^{3,4} & SHI JinQuan^{3,4}

¹ College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

² Institute of Geotechnical Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

³ Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

⁴ School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

Coarse granular soil is widely used in infrastructures, such as hydropower dams, road and railways beds and airport high-fill slopes, which have high requirements of strength and deformation. Coarse granular soil has larger particle size and more scattered particle strength than other granular geomaterials. The particles of coarse granular soil are easy to break when subjected to external loading. Biocementation, as a new promising green technology, has a potential to improve mechanical properties and alleviate particle breakage of coarse granular soil. This review introduces relevant theoretical analysis methods of particle strength of coarse granular soils first, including Weibull distribution, size effect, fractal dimension, avalanche dynamics, etc. Then, laboratory testing technique to investigate the particle strength and deformation characteristics is also introduced, e.g., single-particle crushing test, one-dimensional compression test, acoustic emission monitoring system and biocementation technology, etc. Finally, results of single-particle crushing test and one-dimensional compression test of coarse granular soil are summarized and analyzed to examine the effects of material properties, external environmental factors, particle size, and biocementation conditions on particle strength, Weibull modulus, compressibility, crushing amount, acoustic emission energy and energy dissipation, etc. This work will deepen the understanding of the particle strength and deformation characteristics of coarse granular soil and promote the application of coarse granular soil in practical engineering.

coarse-grained, strength and deformation, biocementation, size effect, Weibull distribution, acoustic emission, energy dissipation

doi: [10.1360/SST-2021-0387](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0387)