

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.001

粗粒料颗粒破碎特性研究述评

刘汉龙^{1,2}, 孙逸飞^{1,2}, 杨 贵^{1,2}, 陈育民^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:从颗粒破碎的度量指标、影响因素、对土体强度特性的影响和本构模型 4 方面对粗粒料在高应力条件下的颗粒破碎特性研究进展进行评述, 并就其中存在的问题进行探讨, 指出今后的研究方向: 分形理论在颗粒破碎度量中的应用、初始应力状态对颗粒破碎率的影响、土体结构性对颗粒破碎的影响、土体尺寸效应对颗粒破碎的影响、考虑微观力学机理的颗粒破碎本构模型。

关键词:粗粒料 颗粒破碎 土体剪胀性 摩擦角 本构模型 综述

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)04-0361-09

A review of particle breakage characteristics of coarse aggregates

LIU Hanlong^{1,2}, SUN Yifei^{1,2}, YANG Gui^{1,2}, CHEN Yumin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper provides a review of the research progress on the characteristics of particle breakage of coarse aggregates under high stress, including the particle breakage index, influencing factors, effects on soil strength, and constitutive models. Based on discussion of the problems in the research, it is pointed out that further research should focus on the following: application of the fractal theory to measurement of particle breakage, the effect of initial stress on the particle breakage rate, the effect of soil fabric on particle breakage, the effect of soil size on particle breakage, and constitutive models for crushable soils based on micromechanical mechanisms.

Key words: coarse aggregate; particle breakage; dilatancy; friction angle; constitutive model; review

粗粒料因压实性好、强度高、透水性强等优点, 在工程中得到广泛应用, 如土石坝、道路、港口等工程。作为典型的散粒体材料, 粗粒料存在明显的颗粒破碎特征, 从而引起土体级配的改变, 显著影响着粗粒料的物理力学性质。如紫坪铺大坝在汶川地震发生后产生明显的体积收缩, 研究表明主要是由于颗粒破碎而导致坝体体积收缩^[1], 因此颗粒破碎现象越来越引起人们的重视。国内外许多学者已经对粗粒料的颗粒破碎特性开展了较多的研究^[2], 目前研究主要集中于颗粒破碎程度的量化描述指标、影响颗粒破碎特性的因素以及颗粒破碎对粗粒料力学行为的影响, 并在此基础上建立了很多考虑颗粒破碎的本构模型, 用以描述、预测粗粒料在荷载作用下的变形特征。笔者拟在阅读有关颗粒破碎研究文献的基础上, 综述粗粒料颗粒破碎特性的研究进展, 包括颗粒破碎程度的度量指标、影响颗粒破碎的因素、颗粒破碎对土体剪胀和强度特性的影响和考虑颗粒破碎的本构模型等方面, 并就相关问题进行探讨。

1 颗粒破碎程度的度量指标

粗粒料在外力荷载作用下易于发生破碎, 为了量化分析粗粒料的颗粒破碎程度, 学者们基于颗粒级配曲线的变化提出了多种破碎率指标。

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50825901) 国家自然科学基金(51109068)

作者简介: 刘汉龙(1964—), 男, 长江学者, 教授, 博士, 主要从事土动力学与地基基础工程研究。E-mail: hliuhhu@163.com

Lee 等^[3]在研究大量颗粒破碎是否会有效堵塞坝体反滤层时,提出可用限制粒径 d_{15} 变化的比值 B_{15} 来表示颗粒的破碎程度;Lade 等^[4]在研究粗粒料颗粒破碎特性时,提出采用与土体渗透性相关的限制粒径 d_{10} 的前后变化值 B_{10} 来表征粗粒料的颗粒破碎程度。类似地,柏树田等^[5]在研究堆石物理力学特性时,提出用堆石试验前后的限制粒径 d_{60} 的差值 B_{60} 来表征颗粒破碎程度,提出了破碎指标 B_{60} 。上述度量指标定义和计算比较简单,但是它仅能反映某个粒径下颗粒的增减,不能从整体反映颗粒的破碎情况。为此,许多学者提出了通过度量整体颗粒粒径分布的前后变化来度量颗粒破碎程度。

Marsal^[6]建议利用 B_g 指标来衡量粗粒料的破碎情况,对于同一级配的试样,计算各粒组含量试验前后的差值 ΔW_k ,取所有 ΔW_k 的正值之后就是破碎率 B_g ,该指标受颗粒粒径和级配影响较大,虽包含了受压前后各粒组含量的变化,但以总量表示,难以反映各粒组的实际变化量。但是这一指标由于计算方便,且相对于单一粒径指标而言可以较好度量整体破碎特性,也曾一度被其他学者采用^[7-8]。

Miura 等^[9]在研究风化花岗岩在剪切作用下力学特性时,发现颗粒新生表面积 ΔS 和塑性功 W 有良好的函数关系,提出了采用颗粒新生表面积 ΔS 作为度量颗粒破碎程度的指标,但该指标需要事先假定颗粒形状,所以只能正确反映部分散粒体的破碎情况,对于棱角尖锐、较不规则的散粒体,其预测效果较差。

Hardin^[10]在分析总结前人研究成果后提出颗粒破碎的可能性随颗粒粒径的增大而增大,理想状态下大颗粒完全破碎成粉粒时,破碎便不再发生,进而引入破碎势的概念,定义了一个可以反映土体总体破碎情况的相对破碎率 B_r ,该指标可以从整体上反映颗粒的破碎情况,计算也较为方便,因而被广泛采用^[11-12]。但是该指标是在一个假设前提下提出的,即在理想状态下,无论初始级配如何,所有颗粒最终会完全破碎成粉粒。而事实上并非如此,根据 Turcotte^[13]和 Coop 等^[14]的研究,试样中颗粒在破碎到一个阶段后,级配曲线会趋于一个最佳状态,而不是无限制破碎至粉粒。

为了细化研究堆石料颗粒破碎的机理,孔德志等^[15]利用人工模拟堆石料形状规则和颗粒可数的特点,对人工模拟堆石料进行了颗粒破碎三轴试验,将破碎颗粒分为残缺颗粒和完全破碎颗粒,并基于此提出了体积破碎率指标 B_v ,与 B_g, B_f, B_r 指标之间存在唯一性关系,可综合反映人工堆石料残缺颗粒和完全破碎颗粒的影响,但是由于该指标是假设颗粒形状规则分布,对于形状不规则天然堆石料,该指标未必适用。

还有一些特殊度量指标,如孙吉主等^[16]用声发射活动来表征钙质砂的破碎程度。但该指标的测定需要特定场合,不便实际应用。

此外,根据 McDowell 等^[17]以及 Coop 等^[14]的研究,颗粒破碎后会趋于自相似分布,呈现分形特征;陈海洋等^[8]进一步研究发现,分形维数会随着加载而变化,颗粒粒径越小,分形特征越明显;张季如等^[18]对石英砂侧限压缩数据进行分析,认为分形维数和压应力以及 Hardin 破碎指标有着很好的相关性。石修松等^[19]运用分形维数研究了堆石料的破碎特性,发现破碎会导致分形维数的增大,破碎后的分形维数与 Marsal 破碎指标有良好的线性关系。可见,用破碎分维数不仅可以描述粒径的大小、颗粒组成的均一程度,还可以用于描述单一粒级分布的集中程度,能较全面地反映颗粒破碎后的粒径分布状况。

Einav^[20]综合前人研究,在 Hardin 破碎理论的基础上引入分形理论,认为颗粒破碎到最后会存在一个最终级配,在这个级配下,大小颗粒会成自相似分布,并且加载之前、加载当前以及加载最终的级配曲线可以利用函数 $F_0(d), F(d)$ 以及 $F_u(d)$ 来拟合。据此,提出了基于分形理论的修正 Hardin 破碎指标:

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} = \frac{\int_{d_m}^{d_M} (F(d) - F_0(d)) d(\lg d)}{\int_{d_m}^{d_M} (F_u(d) - F_0(d)) d(\lg d)} \tag{1}$$

式中: d_m 和 d_M ——试样最小和最大粒径, $F_u(d)$ 的表达式为

$$F_u(d) = \left(\frac{d}{d_M} \right)^{3-\alpha} \tag{2}$$

其中, α 为分形维数,对于多数材料设定为常数 2.6。Einav^[20]整理了 Coop 等^[14]对钙质砂的环剪试验结果,分别运用 Hardin 指标和修正 Hardin 指标描述了砂料的破碎情况,发现所提出的修正 Hardin 模型可以更精确地描述颗粒的破碎情况。由于该指标可以反映总体破碎情况,且有较强的理论基础,目前已被广泛用于本构模型的建立和离散元分析中^[21-23]。

综上所述,目前提出的多种度量颗粒破碎程度的指标,大多是以颗粒破碎前后的土体粒径变化作为度量基础的。以特征粒径的变化为度量的指标,它仅仅能反映某个粒径下颗粒的增减,不能从整体反映颗粒的破碎情况。而以整体颗分曲线的变化为度量的指标,由于可以综合反映土体受荷前后的颗粒破碎情况,被后人广为采用。近年来,分形几何学的引入,使得颗粒破碎率指标的研究有了新的进展,综合分形理论和整体颗分曲线变化情况的指标有较强的理论基础和应用前景。

2 影响颗粒破碎的因素

影响颗粒破碎特性的因素可分为内在因素和外在因素。内在因素是其自身物理力学性质,如硬度、颗粒形状、粗糙程度、风化程度、相对密度、颗粒级配以及微观结构等^[7,20,24]。此外,由于颗粒自身有一定的硬度,只有在所受应力达到一定值时才会发生破碎^[6];同时颗粒棱角越分明、表面越粗糙,相对而言就越容易破碎^[3]。相对密度越高、颗粒级配越良好的颗粒组越不容易发生破碎^[25]。从土的微观结构看,在相同围压、应力水平下,相对密度较大以及级配良好的土颗粒,颗粒间的配位数(coordination number)相对较多,单个颗粒所承受的力就较小,颗粒不容易发生破碎^[26]。

外在因素有围压、应力水平、应力路径、加荷时间、湿化程度、制样方法、荷载频率、循环次数等多重因素影响。目前外因对颗粒破碎特性影响的研究又分静载作用和动载作用两种情况进行。

静载作用下,颗粒破碎程度会随着围压和应力水平的提高而变大,具有良好的相关性,相对于偏剪应力而言,围压对颗粒破碎的影响占主导作用^[4,25,27-28]。

为了研究加荷时间的影响,梁军等^[29]通过研究堆石料的蠕变特性,将堆石体的颗粒破碎分为主压缩破碎阶段和蠕变破碎阶段两部分,分析了考虑颗粒破碎的堆石体变形机理。可见加荷时间会显著影响颗粒破碎特性,从而显著影响面板坝等工程设施的变形特性^[30]。此外,Lade等^[31]也对粗粒料在时间效应下的颗粒破碎效应进行了研究,提出单个颗粒的静态疲劳是时间效应下颗粒破碎的根本原因。王者超等^[32]在研究高应力作用下一维蠕变特性时,认为颗粒材料颗粒破碎会造成土体变形,并基于表面物理学和分形几何学,推导得出了一维蠕变条件下颗粒材料的宏观蠕变速率与颗粒破碎速率的显式关系,认为两者成正比。

湿化条件下,颗粒破碎不可避免。魏松等^[12,33]对堆石料在湿化条件下的颗粒破碎特性进行了研究,发现由于颗粒湿化后发生软化,在围压和应力水平不是很高的情况下,颗粒也会发生显著破碎,颗粒破碎率和围压以及应力水平之间有很好的相关性。

对于制样过程的影响,高玉峰等^[34]运用大型静力三轴试验仪研究堆石料的颗粒破碎特性时,发现制样过程引起的颗粒破碎特性不容忽视,为了在固结开始前保持初始设计的级配,应将设计级配相应下调一定数值来制备试样。但是只研究了一种级配和相对密度情况下制样过程对破碎的影响,对于制样中颗粒破碎特性和级配、相对密度的关系有待深入研究。

杨光等^[35]研究了不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎特性,发现应力路径对粗粒料的颗粒破碎的强度特性影响并不显著,颗粒破碎主要与加载过程中输入的塑性功有关。这与蒙进等^[24]的研究成果相左,蒙进和屈智炯研究表明,应力路径不同,造成的颗粒破碎量也不同。所以有必要利用室内试验和离散元对不同应力路径下的颗粒破碎情况进行分析。

相对于静力作用下的颗粒破碎特性的研究,动力作用下颗粒破碎特性的研究目前主要集中的数值模拟部分,动三轴试验的研究尚少。

Indraratna等^[36-37]运用动力三轴试验仪,研究了加荷频率、循环次数、围压和粗粒料颗粒破碎之间的关系,发现颗粒破碎率随着加荷频率和循环次数的增大而单调增加,但是大多数破碎是发生在循环加载的初期阶段;与静力加载类似的是,颗粒的破碎率随着加荷应力水平的增加而单调增加,颗粒破碎大多发生在初始循环加载过程中;在动力荷载作用下,颗粒破碎程度随着围压增加先减小后增大,即相同应力水平下存在一个最佳围压使得颗粒破碎程度降到最低。这是因为对于一定颗粒级配、相对密度的试样,当围压处于一个较适当的水平时,颗粒之间的接触情况相对良好,配位数较大,这样一来在循环加载时,单个颗粒所承受的力就较小,颗粒不容易发生破碎;而当围压过小时,颗粒间的配位数相对较小,循环施加偏应力时单个颗粒承受的压力就偏大,容易发生破碎,但是如果围压过大,围压本身便可以施加给颗粒巨大压力,显著引发颗粒体的破碎。因此颗粒破碎率会随着围压的增大而先减小后增大。很明显,动力荷载和静力荷载情况下,围压对颗粒

破碎特性的影响存在显著差异,为何会存在这一差异,还有待运用室内试验和离散元模拟进一步研究。

此外,陈生水等^[38]在研究循环加载下堆石料变形特性时也发现,随着围压的增加,试样颗粒破碎率升高,但单纯由振动三轴引起的颗粒破碎率逐渐降低。这与 Indraratna 等^[36]的结论相左,究其原因,可能是由于试验时所选材料的级配尺寸不一致、加荷量级差异引起的。颗粒自身的强度是其自身尺寸的函数^[39],也就是说,材料的尺寸效应可能会得出与实际截然不同的结果,对于堆石等筑坝料而言,这种效应可能更突出,因为试验所采用的颗粒尺寸和实际施工的尺寸有时会差几个数量级。对于材料的尺寸效应是如何影响试验效果的,有待于进一步研究。

近年来,离散元理论迅猛发展,很多学者^[40-42]对静动荷载下影响粗粒料的颗粒破碎的因素进行了数值模拟,数值模拟可视化了颗粒破碎特性,但大多数研究还只是对已得试验结果进行验证。运用离散元对颗粒破碎影响因素的深入研究还有待进一步开展。

3 颗粒破碎对土体剪胀和强度特性的影响

颗粒破碎会引起土体级配、相对密度的变化,不可避免的影响着土体的变形和强度特性。近年来,许多学者就颗粒破碎对土体应力应变和强度的影响做了试验研究,既有定性描述也有定量分析。

大部分研究集中在对影响因素和影响结果的定性描述上。Miura 等^[9]在研究粗粒料变形和强度特性时,发现颗粒破碎会削弱土体剪胀,降低土体的峰值内摩擦角,显著影响土体抗剪强度。

蒙进等^[24]在研究高压下冰碛土的颗粒破碎和应力应变特性时指出,在高压下剪胀已不是影响应力应变特性的主要因素,起影响作用的是颗粒破碎。并指出,不同围压下颗粒破碎的速度决定了冰碛土应力应变曲线是属于硬化型还是软化型。

为了细化研究颗粒破碎对剪胀的影响,郭熙灵等^[7]对三峡花岗岩风化石碴进行了三轴试验和平面应变试验,发现颗粒破碎对剪胀性产生明显影响,其影响程度与破碎率的大小、试验方式、试验颗粒形状等因素有关。颗粒破碎对土体剪切强度指标有显著影响,其对强度的影响程度与破碎率、试验方式、形状系数有关。破碎率越大,破碎强度分量越大,试验总的强度指标降低。刘萌成等^[43]为了研究颗粒破碎效应下堆石料的力学特性,对两种堆石料饱和试样进行大型三轴试验,研究发现:由于颗粒破碎的影响,材料峰值摩擦角降低,试样侧向应变和轴向应变成指数关系,强度包线在 $p-q$ 空间下弯,呈现幂函数形式。

刘汉龙等^[28]运用大型三轴试验仪对堆石料的颗粒破碎特性进行了研究,发现材料峰值摩擦角随着颗粒破碎率的增大而降低,但是当颗粒破碎率小于一定值时,颗粒破碎率并不会引起峰值内摩擦角的显著降低,只有当颗粒破碎率大于某一个数值时才会对峰值内摩擦角造成影响。因为颗粒破碎率较小时,对剪胀影响不大,这时剪胀贡献的摩擦角还是占主要因素,但是当颗粒破碎率很大时,对剪胀影响很大,此时剪胀相对摩擦角的贡献相对于之前变小了,从而在两种因素的共同作用下,峰值内摩擦角显著变小了。此外,研究还发现,不论颗粒的岩性、强度、大小、形状、级配和初始孔隙比等情况如何,试验资料落在 1 个狭小区域,颗粒破碎率和围压成幂函数关系。但是高玉峰等^[34]在修正制样过程中的破碎时,发现颗粒破碎率和围压成线性关系。

张家铭等^[44]对钙质砂进行三轴剪切试验,认为颗粒破碎与剪胀对钙质砂强度有着重要影响,低围压下剪胀对其强度的影响远大于颗粒破碎,随着围压的增加,钙质砂颗粒破碎加剧,剪胀影响越来越小,而颗粒破碎的影响则越来越显著。颗粒破碎对强度的影响随着围压的增大而增大,当破碎达到一定程度后,试样达到最佳级配,颗粒破碎渐趋减弱,其影响也渐趋于稳定。

Indraratna 等^[36]研究了不同围压和主应力比情况下,铁路路基石料的颗粒破碎特性,建立了峰值摩擦角与颗粒破碎指标 B_g 之间的指数关系;以及主应力比与 B_g 之间的指数关系。定性研究了颗粒破碎对摩擦角的影响,发现由于颗粒破碎的原因,土体内摩擦角随围压增大而降低,并且由于破碎,剪胀因子与主应力比不再是罗维的线性关系,而是一个双曲线关系,秦红玉等^[11]在研究堆石料颗粒破碎特性时,进一步验证了这一关系。

还有一些学者尝试量化分析了颗粒破碎和剪胀效应对试样摩擦角的影响。Ueng 等^[45]运用罗维最小比能原理首次建立了考虑颗粒破碎特性的砂土应力应变关系,并基于此关系和罗维剪胀方程定量讨论了颗粒破碎对材料强度和摩擦角的影响,认为试样宏观摩擦角由 3 个基本要素构成:基本摩擦角 φ_f ,剪胀对摩擦角

的贡献 φ_d , 颗粒破碎对摩擦角的贡献 φ_b , 即 $\varphi = \varphi_f + \varphi_d + \varphi_b$ 。通常情况下, 基本摩擦角 φ_f 与颗粒本身物理性质有关, 在试验时常常认为不变 (其实随着接触点面的变化是变化的)。整理 Ueng 等^[45] 定量计算的结果可知 静力作用下围压越大颗粒破碎越多, 颗粒破碎贡献的摩擦角越大, 但是由于围压增大, 剪胀贡献的摩擦角就减小, 大多数情况下减幅大于增幅, 因此在宏观情况下的峰值摩擦角反而变小了。值得一提的是, 张季如等^[18] 在研究侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性时, 进一步验证了颗粒破碎对摩擦角贡献这一事实。

基于 Ueng 等^[45] 的考虑颗粒破碎功和剪胀的应力应变关系, Indraratna 等^[46] 定量研究了静力加载条件下的颗粒破碎对铁路路基石摩擦角的影响, 建立了颗粒破碎功与破碎指标 B_g 之间的线性关系。为进一步建立考虑颗粒破碎的本构模型提供了依据。

王者超等^[47] 在研究高应力作用下颗粒材料一维压缩时, 基于表面物理学和分形几何学, 从微观上分析了颗粒破碎的成因机理, 认为颗粒表面张力导致了颗粒的破碎, 并据此计算出破碎功, 提出了宏观破碎率和宏观压缩量之间的显式关系。但是作者在计算破碎功时是基于土体一维压缩变形的假设, 并没有考虑剪胀作用, 所以笔者认为这一理论可以进一步发展, 结合 Ueng 等^[45] 的综合考虑颗粒破碎功和剪胀的应力应变关系, 建立适合工程应用的本构模型。

动力作用下, 颗粒破碎对土体剪胀和强度特性的影响与静力作用下极为相似, 在此不再赘述。此外, 还有不少学者^[41-42] 运用离散元算法, 对上述影响做了数值试验, 验证了不少三轴试验的结论, 为加深概念理解和可视化试验过程作出了贡献。

4 考虑颗粒破碎的本构模型

粗粒土不同于其他岩土材料, 受力时会表现出剪胀和颗粒破碎特性, 并因此显著影响材料的应力应变行为和强度特性, 一般的土体本构模型不能很好地反映这些特性。为了深入了解和预测粗粒料的物理力学行为, 以及在进行以粗粒料为主的工程设计时, 充分考虑颗粒破碎特性以完善设计方案、指导工程施工, 近年来, 许多学者尝试建立考虑颗粒破碎的土体本构模型。大多数模型在临界状态土力学的框架内, 将颗粒破碎反应到临界状态线的变化上, 少部分模型从微观角度分析构建。

Daouadji 等^[48] 提出随着颗粒破碎的变化, 临界状态线的位置发生改变。Russell 等^[49] 使用了 1 种 3 段式的临界状态线来考虑颗粒破碎对临界状态线斜率的影响, 从而将颗粒破碎效应考虑到本构模型中。模型可以较好地反映土体应力变形特征, 但是上述修正的临界状态线均是基于经验拟合, 并没有从力学机理上给出解释^[21]。基于连续破碎力学^[20] 初次从理论上给出了临界状态线函数, 该临界状态函数在稍高应力状态下适应性较差, 不如经验函数, 但是 Einav 的理论从力学上解释了颗粒级配和颗粒破碎如何影响临界状态线。

孙海忠等^[50] 考虑了颗粒破碎对临界状态线和硬化准则的影响, 提出了修正后的硬化准则和临界状态线, 并据此建立了考虑颗粒破碎的粗粒料临界状态弹塑性模型。

刘恩龙等^[51] 在研究堆石料颗粒破碎本构模型时, 认为不同的排水条件和固结应力作用下, 试样最终都达到临界状态, 且由于颗粒破碎的缘故, 临界状态线呈现非线性变化, 将临界状态线表示为颗粒破碎率和围压的函数。再通过引入状态参数, 提出了考虑颗粒破碎的堆石料本构模型。

汪稔等^[52] 研究钙质砂在低应力水平下的颗粒破碎时, 指出其变形在微观上存在颗粒破碎与滑移两种机制的耦合作用, 将颗粒强度视为服从威布尔概率分布, 得到描述颗粒破碎的损伤参量, 建立了钙质砂的损伤边界模型。模型预测与固结不排水压缩试验结果基本吻合。

Salim 等^[53] 根据他们之前所建立的颗粒破碎率与破碎功之间的线性关系^[46], 进一步研究、修正了 Ueng 等^[45] 的考虑颗粒破碎的粗粒土应力应变关系, 最终建立了考虑颗粒破碎的粗粒土本构模型。模型可以很好反映剪胀变形、颗粒破碎对应变的影响, 但是上述模型有 2 个前提假设: (a) 模型中假设仅偏应力引起土体变形, 因此对体应力引起的变形并不能很好反映; (b) 假设土体基本摩擦角 φ_f 不变, 但是由于颗粒破碎会增加颗粒间的接触点和面, 不可避免地要影响摩擦系数。

受 Salim 等^[53] 研究的启发, 迟世春等^[54] 提出了一个基于 Hardin 破碎指标的修正粗粒土屈服面方程, 相比于剑桥模型、罗维模型等, 该屈服面由于考虑了颗粒破碎对剪胀的削弱, 有剪胀率低的显著特点, 但是该屈服面与 Salim 等的模型^[53] 一样, 假设 φ_f 不变, 为了修正这一缺陷, 贾宇峰等^[55-57] 认为随着剪切变形的增大, 颗粒间的接触方式会发生变化, 试样的基本摩擦角 φ_f 因此会发生变化, 提出了变临界状态系数 M 的修正模

型,该模型将 M 与偏应变关联,并考虑了颗粒破碎对硬化规律的影响,可以很好地反映粗粒土的应力应变关系。但是上述模型参数过多,且必须采用特殊算法(粒子群优化算法)才能通过本构模型求解土体应力应变关系,比较复杂,不适合实际工程应用,但该模型从能量角度比较完善地考虑了颗粒破碎对土体本构行为的影响,推动了粗粒土基本力学特性的研究。

姚仰平等^[58]认为由于颗粒破碎的影响,土体的特征状态应力比 M_c (土体胀缩转换时的应力比,类似于黏土里的临界状态系数)和强度应力比 M_f (土体破坏时的应力比)不再是常数,而是一个与体应力成指数关系的量,将这一非线性关系引入到剪胀方程和其之前定义的不依赖于应力路径的硬化函数中^[59],提出了考虑颗粒破碎的 UH 本构模型,该模型可以反映由于颗粒破碎对土体剪胀效应的削弱。其后在原先静力模型的基础上,姚仰平等^[60]采取变换应力的方法,引入旋转硬化准则,又提出了考虑颗粒破碎的动力 UH 模型。

张丙印等^[61]考虑到颗粒破碎等因素引起的剪胀因子和主应力的非线性,修正了罗维剪胀模型^[62],并将其引入南水双屈服面模型,建立了适合堆石体的本构模型,该模型形式简单,便于理解和应用。同年,米占宽等^[63]将堆石体视为结构体和破损带组成的二元介质,建立了颗粒破碎率和破损参数之间的关系,提出了可以考虑颗粒破碎的堆石体本构模型。考虑颗粒破碎计算的应力应变曲线与试验结果更加吻合,尤其是体变曲线,考虑颗粒破碎后,计算得到的低围压下的剪胀性明显降低,与试验曲线的吻合也更好,具有较好的实用性。

综上所述,有关考虑颗粒破碎特性的应力应变关系,多数是基于经验曲线,将颗粒破碎率和土体临界状态关联,以得到可以考虑颗粒破碎效应的本构模型。对于,基于颗粒破碎和土体应力变形微观机理的模型,尚不多见,现有的几个基于微观机理的模型,往往参数复杂,且常常需要假定应力路径、试验方法,这使得多数工程师不相信既有模型的可靠性,不便于应用。所以,从微观角度考虑颗粒破碎的本构模型,特别是动力荷载作用下的模型,还有待进一步研究。

5 有待进一步研究的问题

影响粗粒料颗粒破碎的因素很多,研究范围很广,在回顾和分析了粗粒料在颗粒破碎的度量指标、影响因素、对土体强度特性的影响和本构模型 4 个方面的研究进展后,笔者认为今后有待加强和深入研究的几个方向是:

- 引入新的理论进行粗粒料整体颗粒级配曲线的度量,提出更完善、更实用的指标,如:引入分形理论。
- 进一步完善试样初始应力状态对粗粒料颗粒破碎影响的研究。
- 深入开展粗粒料初始结构性和复杂应力加载条件下粗粒料颗粒破碎特性研究。
- 加强大型设备的研发,开展颗粒破碎特性与粗粒料尺寸的研究。
- 进一步开展颗粒破碎的微观机理研究,建立可以考虑颗粒破碎的本构模型。

需要说明的是,本文仅涉及粗粒土颗粒破碎部分的内容,并没有对运用离散元方法研究颗粒破碎的内容进行综述。

参考文献:

- [1] 陈生水,霍家平,章为民.“5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795-801. (CHEN Shengshui, HUO Jiaping, ZHANG Weimin. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan Earthquake on Zipingpu Concrete Face Rock-fill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 795-801. (in Chinese))
- [2] 张家铭,汪稔,张阳明,等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊 1): 661-665. (ZHANG Jiaming, WANG Ren, ZHANG Yangming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Sup1): 661-665. (in Chinese))
- [3] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soils in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4(1): 68-86.
- [4] LADE P V, YAMAMURO J. Significance of particle crushing in granular materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(4): 309-316.
- [5] 柏树田,崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报, 1997(3): 21-30. (BAI Shutian, CUI Yihao. The mechanical properties of rockfill[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1997(3): 21-30. (in Chinese))

- [6] MARSAL R J. Large scale testing of rockfill materials[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(SM2): 27-43.
- [7] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 83-88. (GUO Xiling, HU Hui, BAO Chenggang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rockfill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 83-88. (in Chinese))
- [8] 陈海洋, 汪稔, 李建国, 等. 钙质砂颗粒的形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1389-1392. (CHEN Haiyang, WANG Ren, LI Jianguo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1389-1392. (in Chinese))
- [9] MIURA N, O'HARA S. Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses[J]. Soils and Foundations, 1979, 19(3): 61-76.
- [10] HARDIN B O. Crushing of Soil Particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [11] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1575-1580. (QIN Hongyu, LIU Hanlong, GAO Yufeng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1575-1580. (in Chinese))
- [12] 魏松, 朱俊高, 钱七虎, 等. 粗粒料颗粒破碎三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 533-538. (WEI Song, ZHU Jungao, QIAN Qihu, et al. Particle breakage of coarse-grained materials in triaxial tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 533-538. (in Chinese))
- [13] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B2): 1921-1926.
- [14] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [15] 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. (KONG Dezhi, ZHANG Qiguang, ZHANG Bingyin, et al. Particle breakage ratio of artificial rockfill materials [J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2009, 49(6): 811-815. (in Chinese))
- [16] 孙吉主, 汪稔. 三轴压缩条件下钙质砂的颗粒破裂过程研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 822-825. (SUN Jizhu, WANG Ren. Study on particle failure process of calcareous sand under triaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 822-825. (in Chinese))
- [17] McDOWELL G R, BOLTON M D, ROBERTSON D. The fractal crushing of granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1996, 44(12): 2079-2102.
- [18] 张季如, 祝杰, 黄文竟. 侧限压缩下石英砂砾的颗粒破碎特性及其分形描述[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 783-789. (ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Wenjing. Crushing and fractal behaviors of quartz sand-gravel particles under confined compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 783-789. (in Chinese))
- [19] 石修松, 程展林. 堆石料颗粒破碎的分形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3852-3857. (SHI Xiusong, CHENG Zhanlin. Fractal behavior in crushing of rockfill material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 3852-3857. (in Chinese))
- [20] EINAV I. Breakage mechanics-Part I: Theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(6): 1274-1297.
- [21] EINAV I. Soil mechanics: breaking ground[J]. Philos Transactions, Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2007, 365: 2985-3002.
- [22] HU Wei, YIN Zhenyu, DANO Christophe, et al. A constitutive model for granular materials considering grain breakage[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 2188-2196.
- [23] BEN-NUN O, EINAV I. A refined DEM study of grain size reduction in uniaxial compression[C]//The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India. 2008: 702-708.
- [24] 蒙进, 屈智炯. 高压下冰碛土的颗粒破碎及应力应变关系[J]. 成都科技大学学报, 1989, 43(1): 17-22. (MENG Jin, QU Zhijiong. Stress-strain behavior of glacial till under high confining pressure [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1989, 43(1): 17-22. (in Chinese))
- [25] 傅华, 凌华, 蔡正银. 粗颗粒土颗粒破碎影响因素试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 75-79. (FU Hua, LIN Hua, CAI Zhengyin. Influencing factors for particle breakage of coarse grained soil [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(1): 75-79. (in Chinese))
- [26] ODA M. Coordination number and its relation to shear strength of granular material[J]. Soils and foundations, 1977, 17(2): 32-42.
- [27] INDRARATNA B, IONESCU D, CHRISTIE H D. Shear behaviour of railway ballast based on large scale triaxial testing[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(5): 439-449.

- [28] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562-566. (LIU Hanlong, QIN Hongyu, GAO Yufeng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 562-566. (in Chinese))
- [29] 梁军, 刘汉龙, 高玉峰. 堆石蠕变机理分析与颗粒破碎特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 479-483. (LIANG Jun, LIU Hanlong, GAO Yufeng. Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 479-483. (in Chinese))
- [30] 王永明, 董育烦, 朱晟. 考虑后期变形影响的高面板坝堆石坝工作性态[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 24-27. (WANG Yongming, Dong Yufan, ZHU Shen. Working behaviors of high concrete face rockfill dams considering late deformation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 24-27. (in Chinese))
- [31] LADE P V, KARIMPOUR H. Static fatigue produces time effects in granular materials[C]//GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design (GSP 199), ASCE, 2010, 530-538.
- [32] 王者超, 李术才. 高应力下颗粒材料一维力学特性研究(II) 蠕变性质[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3392-3396 (WANG Zhechao, LI Shucai. One-dimensional mechanical behavior of granular materials at high stresses (Part II): Creep behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3392-3396. (in Chinese))
- [33] 魏松, 朱俊高. 粗粒料三轴湿化颗粒破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1252-1258. (WEI Song, ZHU Jungao. Study on wetting breakage of coarse-grained materials in triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1252-1258. (in Chinese))
- [34] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237-1246. (GAO Yufeng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1237-1246. (in Chinese))
- [35] 杨光, 孙逊, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 338-342. (YANG Guang, SUN Xun, YU Yuzhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 338-342. (in Chinese))
- [36] INDRARATNA B, LACKENBY J, CHRISTIE D. Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading[J]. Géotechnique, 2005, 55(4): 325-328.
- [37] LACKENBY J, INDRARATNA B, MCDOWELL G, et al. Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading[J]. Géotechnique, 2007, 57(6): 527-536.
- [38] 陈生水, 韩华强, 傅华. 循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1151-1157. (CHEN Shengshui, HAN Huaqiang, FU Hua. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1151-1157. (in Chinese))
- [39] MCDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. Géotechnique, 1998, 48(5): 667-679.
- [40] CHENG Y P, NAKATA Y, BOLTON M D. Discrete element simulation of crushable soil[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 633-641.
- [41] CHENG Y P, BOLTON M D and NAKATA Y. Crushing and plastic deformation of soils simulated using DEM[J]. Géotechnique, 2004, 54(2): 131-141.
- [42] LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L E. Discrete element method evaluation of granular crushing under direct shear test conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1295-1300.
- [43] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 堆石料变形与强度特性的大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1104-1111. (LIU Mengcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong, et al. Large-scale triaxial test study on deformation and strength characteristics of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1104-1111. (in Chinese))
- [44] 张家铭, 蒋国盛, 汪稔. 颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2043-2048. (ZHANG Jiaming, Jiang Guosheng, WANG Ren. Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2043-2048. (in Chinese))
- [45] UENG T S, CHEN T J. Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands[J]. Géotechnique, 2000, 50(1): 65-72.
- [46] INDRARATNA B, SALIM W. Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy[J]. Geotechnical Engineering, 2002, 155(4): 243-252.
- [47] 王者超, 李术才. 高应力下颗粒材料一维力学特性研究(I) 压缩性质[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3051-3057. (WANG Zhechao, LI Shucai. One-dimensional mechanical behavior of granular materials at high stresses (Part I): compression behavior[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3051-3057. (in Chinese))
- [48] DAOUADJI A, HICHER P Y, RAHMA A. An elastoplastic model for granular materials taking into account grain breakage[J].

- European Journal of Mechanics-A/Solids, 2001, 20(1): 113-137.
- [49] RUSSELL A R, KHALILI N. A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1179-1192.
- [50] 孙海忠, 黄茂松. 考虑颗粒破碎的粗粒土临界状态弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1284-1290. (SUN Haizhong, HUANG Maosong. Critical state elasto-plastic model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1284-1290. (in Chinese))
- [51] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 堆石料的临界状态与考虑颗粒破碎的本构模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 148-154. (LIU Enlong, CHEN Shengshui, LI Guoying, et al. Critical state of rockfill materials and a constitutive model considering grain crushing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup2): 148-154. (in Chinese))
- [52] 汪稔, 孙吉主. 钙质砂不排水性状的损伤-滑移耦合作用分析[J]. 水利学报, 2002(7): 75-78. (WANG Ren, SUN Jizhu. Damage-slide coupled interaction behavior of undrained calcareous sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7): 75-78. (in Chinese))
- [53] SALIM W, INDRARATNA B. A new elastoplastic constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 657-671.
- [54] 迟世春, 贾宇峰. 土颗粒破碎耗能对罗维剪胀模型的修正[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1266-1269. (CHI Shichun, JIA Yufeng. Rowe's stress-dilatancy model modified for energy dissipation of particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1266-1269. (in Chinese))
- [55] 贾宇峰, 迟世春, 杨峻, 等. 粗粒土的破碎耗能计算及影响因素[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1960-1966. (JIA Yufeng, CHI Shichun, YANG Jun, et al. Measurement of breakage energy of coarse granular aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1960-1966. (in Chinese))
- [56] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎影响的粗粒土本构模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3261-3272. (JIA Yufeng, CHI Shichun, LIN Gao. Constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3261-3272. (in Chinese))
- [57] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性统一本构模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1381-1388. (JIA Yufeng, CHI Shichun, LIN Gao. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1381-1388. (in Chinese))
- [58] YAO Y P, YAMAMOTO H, WANG N D. Constitutive Model Considering Sand Crushing[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4): 603-608.
- [59] YAO Y P, LU D C, ZHOU A N, et al. Generalized non-linear strength theory and transformed stress space[J]. Science in China Series E: Engineering and Materials Science, 2004, 47(6): 691-709.
- [60] 姚仰平, 万征, 陈生水. 考虑颗粒破碎的动力 UH 模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1036-1044. (YAO Yangping, WAN Zheng, CHEN Shengshui. Dynamic UH model considering particle crushing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1036-1044. (in Chinese))
- [61] 张丙印, 贾延安, 张宗亮. 堆石体修正 Rowe 剪胀方程与南水模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1443-1448. (ZHANG Bingyin, JIA Yanan, ZHANG Zongliang. Modified Rowe's dilatancy law of rockfill and Shen Zhujiang's double yield surfaces elastoplastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1443-1448. (in Chinese))
- [62] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for the static equilibrium of an assembly of particles in contact[C]. Proc R Soc, 1962, A269, 500-527.
- [63] 米占宽, 李国英, 陈铁林. 考虑颗粒破碎的堆石体本构模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1865-1869. (MI Zhankuan, LI Guoying, CHEN Tielin. Constitutive model for rockfill material considering grain crushing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1865-1869. (in Chinese))