

文章编号: 1000-7598(2010)10-3051-07

高应力下颗粒材料一维力学特性研究(I): 压缩性质

王者超^{1,2}, 李术才¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程中心, 济南 250061; 2. 卡尔加里大学 土木工程系, 加拿大 卡尔加里 T2N1N4)

摘要: 高水平应力作用下, 砂土等颗粒材料中的颗粒将发生破碎。一方面, 颗粒破碎导致材料的颗粒分布曲线发生变化: 材料中的粗颗粒含量减少, 细颗粒含量增加; 另一方面, 颗粒的破碎引起了能量的转化。由能量守恒定律, 作用过程中外力所做的功一部分由粒间摩擦力转化成热能, 而另一部分则消耗到颗粒破碎过程中。利用表面物理学理论, 颗粒破碎能可以表达为颗粒表面张力在颗粒破碎中所作的功。由此得到了一维压缩条件下颗粒破碎量与宏观压缩量之间的关系表达式。为了验证得到的关系式, 开展了砂土的一维压缩试验, 并进行了试验数据的整理分析。研究表明, 所得关系表达式能较好地反映高水平应力作用下颗粒破碎对颗粒材料压缩性的影响。

关键词: 砂土; 一维压缩; 颗粒破碎; 分形; 表面张力

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

One-dimensional mechanical behavior of granular material under high stresses(Part I): compression behavior

WANG Zhe-chao^{1,2}, LI Shu-cai¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Calgary, Calgary, T2N1N4, Canada)

Abstract: Grain crushing occurs in granular materials when the materials are compressed at high stresses. On one hand, grain crushing induces the evolution of grain size distribution. The content of coarse grains decreases while the content of fine grains increases. On the other hand, the crushing of grains induces the conversion of energies. According to the law of the conservation of energy, one component of the work done by external forces is transferred into heat energy due to the friction between grains; and the other component is dissipated into grain crushing, which was estimated using the theory of surface physics in this study. A relationship between grain crushing amount ratio and void ratio was obtained based on the theories of fractal geometry. One-dimensional compression tests on sand were conducted and relevant test data were examined to verify the obtained relationship. It was indicated in this study that the obtained relationship can describe the influence of grain crushing on the compressibility of granular materials at high stresses.

Key words: sands; one-dimensional compression; grain crushing; fractals; surface tension

1 引言

颗粒材料的破碎现象广泛存在于岩土工程中。工程实践中, 诱发材料颗粒破碎的原因主要有两个: 一是颗粒本身强度较低、受力易破碎, 如钙质砂、煤矸石的破碎^[1-2]; 另一个则是高强度颗粒受到极高应力的作用, 如在高土石坝底端和端桩持力层等中发生的颗粒破碎现象^[3-7]。微观上, 砂土类颗粒材料的变形是由接触点变形, 颗粒的滑动、滚动等

排列重组过程以及颗粒破碎等机制引起^[8]。不同水平应力下, 材料的变形由不同微观机制控制。在低水平应力下, 变形主要由颗粒接触点变形和轻微的颗粒滑动、滚动引起; 在中水平应力下, 变形多由颗粒之间不可恢复的滑动、滚动等排列重组过程引起; 而在高水平应力下, 变形则主要是由颗粒破碎及随后的颗粒排列重组引起。因此, 本文所讨论的高应力是个相对的概念, 用来表明在此应力下颗粒性质由颗粒破碎现象控制。

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (No. 20060422002)。

第一作者简介: 王者超, 男, 1980年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土类材料流变性质与地下工程稳定性研究。E-mail: wang_zhechao@hotmail.com

为了研究这种破碎现象,人们开展了一系列的室内试验。Roberts 和 de Souza 通过试验发现高水平应力下硅质砂的高压缩性与颗粒破碎密切相关^[9];研究者还发现一维压缩试验中硅质砂^[10]和钙质砂^[3]的屈服应力与颗粒破碎强度有关;而张季如等^[7]通过石英砂的一维压缩试验研究了破碎产物的分形特性。除此之外,Hagerty 等^[4]和 Bard 等^[11]分别发现玻璃和焦炭颗粒在受压作用下也出现了颗粒破碎现象。颗粒破碎不仅发生在材料受压过程中,研究人员在硅砂^[6]、堆石^[3]和食品^[12]的蠕变试验中也发现了颗粒破碎现象。

为了研究颗粒破碎对材料力学性质的影响,研究者采用了能量方程解析法和离散单元模拟法。在能量方程解析法中,Roscoe 等认为,黏土变形中外力做功全部由摩擦力消耗,提出了 Cam-clay 能量方程^[13];此后该方程被推广运用到摩擦性材料^[14];McDowell 和 Bolton 在研究颗粒破碎对于砂土压缩特性的影响过程中,在 Cam-clay 能量方程中加入了颗粒破碎能,得到一个用微观参数描述的一维压缩模型^[15]。而在离散单元模拟法中,利用颗粒流的簇颗粒单元,研究人员分别模拟了砂土在一维压缩^[16]和直剪^[17]过程中的颗粒破碎现象。

然而,围绕颗粒破碎对材料压缩行为影响这一研究课题,人们对颗粒受力(常应力或递增应力)破碎后颗粒分布曲线的演化模式、破碎过程中能量相互转化关系等问题还并不十分清楚。本研究中,笔者在 McDowell 和 Bolton 模型基础上,分析了砂土一维压缩和蠕变过程中颗粒分布曲线演化模式,讨论了两个过程中能量转化关系,得到了砂土在一维压缩和一维蠕变中颗粒破碎量与宏观压缩量之间的关系表达式,并在此基础上开展了渥太华砂的一维压缩和蠕变试验,进行了相关文献的调研工作,验证了所得关系可以描述高应力下颗粒破碎量与宏观压缩量之间的关系。本文将着重讨论颗粒破碎对一维压缩行为的影响。颗粒破碎对颗粒材料一维蠕变行为的影响将在另一篇文章中讨论。

2 颗粒分布曲线演化模式

物理试验和数值模拟表明^[18],当砂土等颗粒材料在外力作用下,内部作用力成链状分布,形成力链结构。在这种力链结构中,少部分力链(强力链)承受了大部分的外力。在不断增大的外力作用下,部分位于强力链上的颗粒受力超过极限强度时,颗粒发生破碎并形成若干小颗粒,与此同时,周围颗粒发生滑动、滚动等排列重组过程;随着排列重组

过程的不断扩展,力链结构发生变化,从而进入下一个颗粒破碎循环。在整个过程中,一个重要的问题是如何描述颗粒尺寸随应力演化的过程。

由于颗粒材料受力后内部形成力链结构,因此,颗粒破碎不是同时发生,而是首先出现在强力链上的某些颗粒,然后扩展到更大范围。图 1 是渥太华砂在不同应力水平压缩后的颗粒分布曲线^[9]。从图中可以看到,颗粒破碎首先出现在较小颗粒中,然后随着应力水平的不断增加,颗粒破碎范围不断增加。而在 Hagerty 等人开展的一维玻璃珠压缩试验中,颗粒破碎表现出同样的特点,即在压缩过程中,颗粒破碎从较小颗粒逐渐扩展到较大颗粒^[4]。

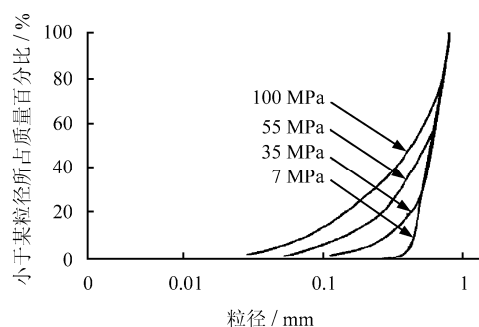


图 1 渥太华砂一维压缩颗粒分布变化曲线^[9]
Fig.1 Grain size distribution curves of Ottawa sand in 1D compression^[9]

Turcotte 分析了大量岩土类材料破碎产物数量和尺寸之间的关系,发现其中存在分形关系^[19]:

$$N(l > d) = A(d)^{-D} \quad (1)$$

式中: d 为一特定尺寸; l 为破碎产物尺寸大小; $N(l > d)$ 为尺寸大于 d 的破碎产物数量; D 为分形维数; A 为分形关系比例系数。大量试验观测表明,一维压缩试验中破碎产物的分形维数约为 2.5^[20-21]。除此之外,Mc Dowell 等^[20]采用数值模拟手段验证了颗粒破碎产物的分形特征。

这里需要特别指出的是,式(1)所示分形关系及其分形维数 $D = 2.5$ 只适用于颗粒破碎产物,而不适用于未破碎颗粒(未破碎颗粒数量-尺寸关系由试样的初始分布曲线决定)。但随着试样中破碎量增加,所有颗粒的数目-尺寸关系越来越趋近于 $D = 2.5$ 的分形关系^[7]。

综上所述,颗粒分布曲线演化模式可由图 2 表示。图中,材料中初始最小和最大颗粒尺寸分别为 d_s 和 d_l ;在应力 σ^1 作用下,颗粒中较小颗粒发生破碎,破碎产物颗粒分布曲线如图中 σ^1 标示线段所示;在应力 σ^2 作用下,颗粒中破碎范围增加,且在

应力 σ^1 作用下破碎产物再次发生破碎, 破碎产物颗粒分布曲线如图中 σ^2 标示线段所示; 并且两个应力水平下颗粒破碎产物的数量-尺寸关系都服从相同的分形分布。

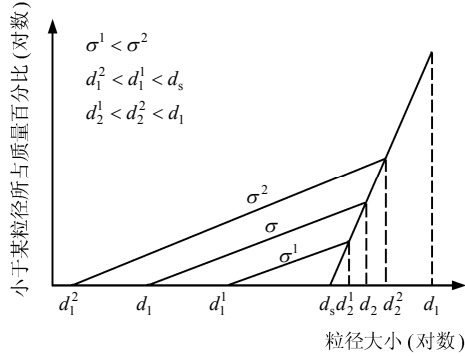


图 2 一维压缩条件下颗粒材料颗粒分布曲线演化示意图

Fig.2 Grain size evolution in 1D compression of granular materials

3 试样破碎前后比表面积增量

如图 2 所示, 假设试样受到应力 σ 的作用, 试样内颗粒发生破碎。颗粒破碎后颗粒分布曲线由两部分组成: 一部分为未发生破碎的较大颗粒 (粒径由 d_2 至 d_1), 而另一部分为由较小颗粒 (粒径由 d_s 至 d_2) 受力破碎产生的更小颗粒 (粒径由 d_1 至 d_2)。因此, 不难理解, 试样破碎前后表面积增量来自较小颗粒 (粒径从 d_s 至 d_2) 的破碎。

依据分形理论, 破碎产物的数量-尺寸关系可以由式 (1) 表示。对式 (1) 分别积分 2 次和 3 次可以得到破碎产物的表面积和体积表达式:

$$S'_c = S(d_1 \leq d \leq d_2) = \frac{D}{D-2} \beta_s A \left[(d_1)^{2-D} - (d_2)^{2-D} \right] \quad (2)$$

$$V'_c = \frac{D}{3-D} \beta_v A \left[(d_2)^{3-D} - (d_1)^{3-D} \right] \quad (3)$$

式中: S'_c 和 V'_c 分别为颗粒破碎产物的表面积和体积; β_s 和 β_v 分别为破碎产物表面和体积形状因子; S 为粒径小于 d_2 但大于 d_1 的颗粒面积。进一步假设颗粒破碎过程中密度保持不变, 破碎产物的质量可以表示为

$$M_c = \frac{D}{3-D} \rho \beta_v A \left[(d_2)^{3-D} - (d_1)^{3-D} \right] \quad (4)$$

式中: ρ 为材料密度。由此, 破碎产物的比表面积可表示为

$$s'_c = \frac{S'_c}{V'_c} = \frac{3-D}{D-2} \frac{\beta_s}{\beta_v} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{3-D} \frac{1}{d_1} \quad (5)$$

如上所述, 一维压缩试验中破碎产物的分形维数约为 $2.5^{[19-20]}$ 。由此式 (5) 可简化为

$$s'_c = \frac{\beta_s}{\beta_v} \frac{1}{\sqrt{d_1 d_2}} \quad (6)$$

式 (6) 表示破碎产物比表面积是破碎产物最大及最小尺寸的函数。式 (6) 利用分形理论把破碎产物大小不一的尺寸简化成一个等效尺寸表达。为简单起见, 把破碎前颗粒用另一个等效尺寸表达:

$$\bar{d} = \chi \sqrt{d_s d_2} \quad (7)$$

式中: χ 为初始颗粒分布曲线的分布系数, 对于均匀分布, $\chi = 1$ 。由此, 破碎前颗粒比表面积可分别表示为

$$s_c = \frac{S_c}{V_c} = \frac{\beta_s}{\beta_v} \frac{1}{\chi} \frac{1}{\sqrt{d_s d_2}} \quad (8)$$

如上所述, 试样表面积增量来自于较小颗粒破碎, 因此, 整个试样的比表面积增量可以表示为

$$ds = \left(s'_c - s_c \right) \frac{V'_c}{V_s} \quad (9)$$

式中: V_s 为试样中颗粒的固体体积。将式 (6) 和式 (8) 代入式 (9), 得到破碎前后试样比表面积增量可表达为

$$ds = \frac{\beta_s}{\beta_v} \left(\frac{1}{\sqrt{d_1 d_2}} - \frac{1}{\chi \sqrt{d_s d_2}} \right) \frac{V'_c}{V_s} \quad (10)$$

4 外力作用下试样的表面能

针对黏土类摩擦性材料, Roscoe 等^[13]从能量守恒方程出发, 得出表述黏土类材料性质的 Cam-clay 能量方程, 其表达式为

$$q \varepsilon_q^p + p' \varepsilon_p^p = M p' \varepsilon_q^p \quad (11)$$

式中: q 和 p' 分别为偏应力和有效平均主应力; ε_q^p 和 ε_p^p 分别为塑性偏应变和体应变; M 为临界状态下偏应力和有效平均应力比。对于可破碎材料, 外力做功一部分克服摩擦转化成热能, 而另一部分消耗在颗粒破碎过程中。因此, 能量守恒方程需写成:

$$q \varepsilon_q^p + p' \varepsilon_p^p = M p' \varepsilon_q^p + E_c \quad (12)$$

式中: E_c 为单位体积试样消耗到颗粒破碎过程中的能量。已有的研究^[21]认为, 颗粒破碎能等于颗粒破坏后试样中新增表面的表面能。然而, 近年来一些学者发现, 砂土颗粒破碎时伴随着大量的声发射现象^[14-15]。为了将声发射能也计入能量转化关系, 本

文将采用一种新的方法来度量颗粒破碎过程中消耗的能量。

表面物理学中,当液体或固体曲面两侧存在压力差时,液体或是固体表面内会产生表面张力,如图3所示,图中 $\delta\theta_x$ 和 $\delta\theta_y$ 为曲面在 x 和 y 方向的夹角; $F_F = F_B = \gamma R_x \delta\theta_x$, $F_L = F_R = \gamma R_y \delta\theta_y$ 分别为前、后、左、右4个方向的表面张力^[22],由力的平衡条件,表面张力与压力差和表面区率半径之间的关系可表示为 Young-Laplace 方程^[22]:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad (13)$$

式中: Δp 为表面内外两侧的压力差; γ 为表面张力; R_x 和 R_y 为表面的曲率半径。

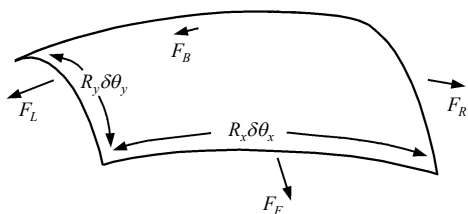


图3 曲面的表面张力示意图^[22]

Fig.3 Illustration of surface tension in a curved surface^[22]

为便于理解,本文将颗粒破碎过程分解为两个过程:首先是颗粒受力,同时储存能量的过程;然后是颗粒破碎,同时释放所储存能量的过程。在能量释放过程中,新增表面能和释放的声发射能总和应等于表面张力所做得功,即 E_c 应与颗粒破碎过程表面张力做功相等。上文已经得到颗粒比表面积增量表达式,接下来讨论表面张力的表达式。

考虑到试样中发生破碎颗粒尺寸大小不一,且颗粒表面内外压力差也不相同(颗粒间接触点应力不同),本文将采用等效曲率半径和等效压力差概念得到发生破坏颗粒群的等效表面张力表达式。按照式(13)中物理量之间关系,表面张力与表面上的压力差和表面曲率有关。上文中为表达破碎颗粒平均比表面积,提出了一个等效颗粒尺寸,在此该等效尺寸可用来度量将要发生破碎颗粒群的等效曲率半径,而颗粒表面的压力差来自施加在试样上的应力。因此,借鉴单个曲面表面张力的概念,颗粒群的等效表面张力与等效曲率半径和施加在整个试样上的应力关系可以表达为

$$\sigma = H_p \frac{\tau^{eq}}{\sqrt{d_1 d_2}} \quad (14)$$

式中: τ^{eq} 为试样在应力 σ 作用下等效表面张力; H_p 为比例系数,与颗粒材料破碎性质相关。

因此,试样在应力 σ 作用下消散到颗粒破碎过程中的能量可表达为

$$E_c = \tau^{eq} ds = \frac{H_p}{1+e_0} \frac{\beta_s}{\beta_v} \left(1 - \frac{\sqrt{d_1}}{\chi \sqrt{d_s}} \right) \frac{V_c}{V_s} \sigma \quad (15)$$

式中: e_0 为颗粒开始破碎时孔隙比,或屈服孔隙比。

5 颗粒破碎量与压缩量关系

将式(15)代入能量守恒方程式(12),可以得到:

$$e = e_0 - \frac{H_p}{\mu} \frac{\beta_s}{\beta_v} \left(1 - \frac{\sqrt{d_1}}{\chi \sqrt{d_s}} \right) \frac{V_c}{V_s} \quad (16)$$

式中: μ 为与摩擦角有关的常数。假设颗粒破碎后密度不变,试样中颗粒破坏量可表示为

$$\varphi_c = \frac{M_c}{M_s} = \frac{V_c}{V_s} \quad (17)$$

式中: M_s 为所有颗粒质量。因此,式(16)可写成:

$$e = e_0 - \frac{H_p}{\mu} \frac{\beta_s}{\beta_v} \left(1 - \frac{\sqrt{d_1}}{\chi \sqrt{d_s}} \right) \varphi_c \quad (18)$$

如果破碎产物中最小颗粒尺寸远小于初始最小颗粒尺寸,也就是 $\sqrt{d_1}/(\chi \sqrt{d_s})$ 远小于1,式(18)可以写成:

$$e = e_0 - C_p \varphi_c \quad (19)$$

式中: C_p 为颗粒压缩破碎指数,并有:

$$C_p = \frac{H_p}{\mu} \frac{\beta_s}{\beta_v} \quad (20)$$

至此,借助分形几何学和表面物理学的理论,建立了一维压缩试验中孔隙比与颗粒破碎量之间的一般关系(式(16))。当颗粒破坏程度扩展到一定程度,砂土等颗粒材料的孔隙比与颗粒破碎量呈线性关系(式(19)),其系数-颗粒压缩破碎指数与颗粒形状、摩擦系数及颗粒压缩破碎比例系数有关。

6 式(19)的验证

6.1 渥太华砂的一维压缩试验

试验材料采用 ASTM 20/30 渥太华砂,其相对密度约为 2.65。颗粒中 SiO_2 含量约为 99.8%。颗粒

形状为圆形, 颗粒最小和最大尺寸分别为 0.595 mm 和 0.841 mm。

试验使用的压缩仪由不锈钢材料制成, 内径为 63.5 mm, 厚度为 5 mm, 高度为 25.4 mm。为避免试验中可能产生的移动以及偏压现象, 另外加工了固定底座和导向装置。试验采用 MTS 系统施加压力, 并采用激光传感器测量试样的位移。

为了保证试样的一致性, 每个试样质量确定为 138 g, 在此条件下试样的初始孔隙比为 0.543。试验过程中加载速率严格控制在 10 kN/min。试验后, 收集试样并进行筛分试验。

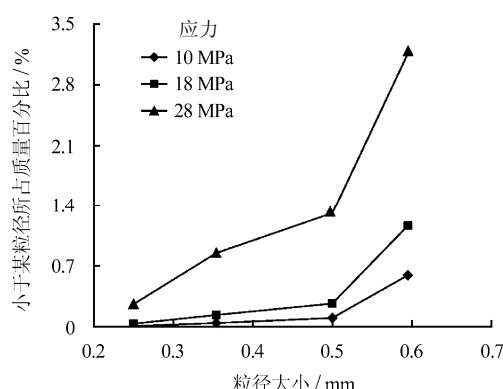


图 4 不同应力水平下试样内颗粒分布曲线

Fig.4 Grain size distribution curves of samples under different compression stresses

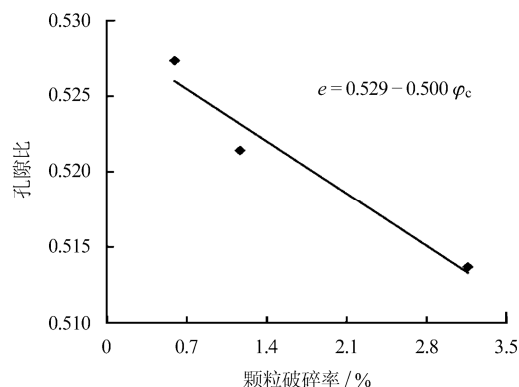


图 5 一维压缩下渥太华砂孔隙比-颗粒破碎量关系

Fig.5 Void ratio versus grain crushing amount ratio of Ottawa sand in one-dimensional compression

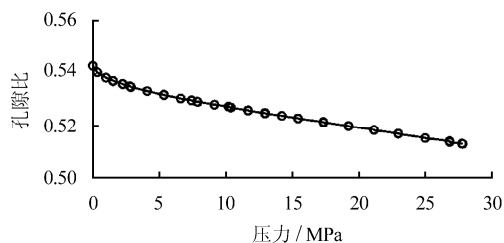
如图 4 所示, 试验后分别得到了试样在 10、18 和 28 MPa 压力作用后颗粒分布曲线。按式 (17) 可以得到不同压力下试样的破碎量。试验中获得的试样孔隙比-破碎量关系如图 5 所示。从图中可以看到, 随着压力增大, 颗粒破碎量不断增大。将试验所得数据与本文所得关系式 (式 (19)) 相拟合, 得到渥太华砂在一维压缩条件下孔隙比与颗粒破碎

量之间的关系如下:

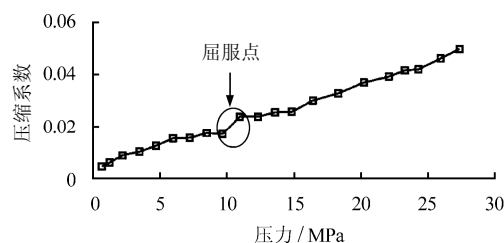
$$e = 0.529 - 0.50\varphi_c \quad (21)$$

式 (21) 表明, 渥太华砂的屈服点孔隙比为 0.529。颗粒压缩破碎指数 C_p 为 0.50。Harr 的研究结果表明, 石英质砂土颗粒的 β_s/β_v 为 14~18^[23]。一般地, 砂土摩擦角接近 30°, 据此 μ 为 0.167。将上述值代入破碎压缩颗粒指数表达式 (式 (20)), 得到渥太华砂的颗粒压缩破碎比例系数 H_p 为 0.005。

渥太华砂的一维压缩曲线如图 6 所示。对应于由式 (21) 预测的屈服点, 渥太华砂的屈服应力大约为 10 MPa。在图 6(b)中可以看到, 对应于该点试样在 10 MPa 左右压缩系数出现略微的增加。



(a) 孔隙比-压力关系



(b) 压缩系数-压力关系

图 6 渥太华砂一维压缩曲线

Fig.6 One-dimensional compression curves of Ottawa sand

6.2 其他文献数据

为充分验证本文所得关系式, 作者进行了相关文献整理工作。从文献中得到的 7 种颗粒材料的试验数据, 表 1 列出了各种材料的颗粒形状、尺寸、不均匀系数和初始孔隙比, 以及用式 (19) 拟合得到的参数 e_0 和 C_p 。各种材料的孔隙比与颗粒破碎量之间的关系如图 7 所示。图中离散点为试验数据, 离散点附近直线为式 (19) 的拟合结果。

从表中看, 这 7 种材料颗粒形状不同: 从圆形到棱角形再到片状; 颗粒强度不同: 有强度较高的硅砂, 有中等强度的熔渣和焦炭以及低强度的人造食品; 颗粒级配不同: 有颗粒较为均匀的硅砂试样, 也有颗粒相对不均匀的硅砂试样。从图中看, 虽然

各种颗粒材料形状、强度、级配各不相同,但都可以用式(19)模拟,这说明本文得到的关系式较好

地反映了颗粒材料一维压缩条件下破碎量与压缩量之间的关系。

表 1 7 种颗粒材料性质对比表
Table 1 Properties of seven granular materials

材料编号	材料	颗粒形状	颗粒尺寸/mm		不均匀系数	初始孔隙比	颗粒压缩破碎指数	屈服点孔隙比
			最大值	最小值				
OS1 ^[4]	渥太华砂	圆形	0.425	0.850	-2.0	0.70	0.79	0.63
OS2 ^[9]	渥太华砂	圆形	0.425	0.850	-2.0	0.60	0.54	0.60
BBS ^[4]	熔渣	棱角形	0.425	0.850	-2.0	0.80	0.61	0.79
PC ^[11]	焦炭	棱角形	5.000	10.000	-1.5	2.30	1.72	2.02
SS1 ^[10]	硅砂	棱角形	1.400	1.700	-1.5	0.63	0.43	0.62
SS2 ^[10]	硅砂	棱角形	0.250	2.000	-3.0	0.67	1.14	0.65
PS ^[12]	通心粉	片状	6.250	15.000	-1.5	2.40	1.25	1.63

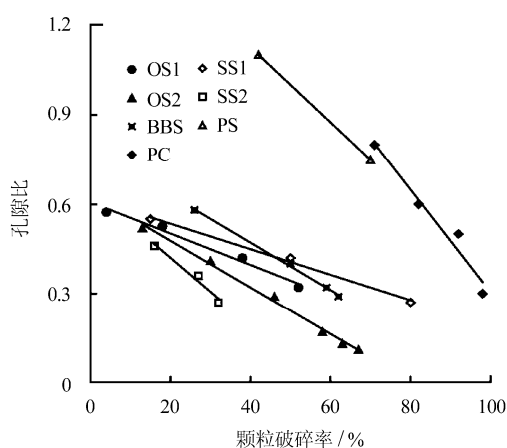


图 7 试验数据和模型预测对比
Fig.7 The comparison between test data and model predictions

从表中还可看出,渥太华砂由于颗粒形状大小一致,颗粒压缩破碎指数相近;而硅砂虽然形状相同,但由于级配不同,颗粒压缩破碎指数也不相同:颗粒大小较为不均匀的试样颗粒压缩破碎指数高于级配较为均匀的试样;从纵向比较,食品、焦炭等低强度材料的颗粒破碎指数高于石英砂、硅砂等高强度材料。据硅砂的试验数据分析,颗粒压缩破碎指数不但与颗粒固体破碎性质相关,还与颗粒级配有关,即颗粒固体强度与颗粒级配两个因素共同决定了颗粒材料的破碎特性。

除此之外,各种材料屈服点对应的孔隙比也列入表中,其值与试验值也较为吻合。

7 结 论

砂土等颗粒材料在高应力作用下,内部颗粒将发生破碎,这种破碎会引起颗粒分布曲线的演化,同时也引起了能量的转化。通过研究可得以下结论:

(1) 得到了颗粒材料在高应力水平作用下颗粒分布曲线演化模式,即颗粒破碎将从较小颗粒向较大颗粒扩展,并且颗粒破碎产物的数量-尺寸关系服从分形分布。

(2) 利用表面物理学理论,提出了颗粒材料等效表面张力与破碎产物尺寸和施加应力的关系表达式。

(3) 得到了颗粒破碎过程中的能量转换关系。通过颗粒破碎过程中表面张力做功来度量消散到颗粒破碎过程中的能量,改进了原有能量方程,从而更合理地描述颗粒破碎过程。

(4) 得到了可以颗粒破碎量与宏观压缩量之间的关系式,并利用几种颗粒材料的试验数据验证了所得关系式。

致谢:感谢卡尔加里大学土木工程系 Dr. Ron C.K. Wong 为本研究提供经费,并感谢土木工程系提供试验材料和设备。

参 考 文 献

- [1] 张家铭,汪稔,石祥锋,等.侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3327-3331.
ZHANG Jia-ming, WANG Ren, SHI Xiang-feng, et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3327-3331.
- [2] 刘松玉,童梨元,邱钰,等.煤矸石颗粒破碎及其对工程力学性质特性影响研究[J].岩土工程学报,2005,27(5):505-510.

- LIU Song-yu, TONG Li-yuan, QIU Yu, et al. Crushable effects on engineering mechanical properties of colliery wastes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(5): 505—510.
- [3] 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 Han-long, GAO Yu-feng. Creep mechanism and breakage behaviour of rockfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 479—483.
- [4] HAGERTY M M, HITE D R, ULLRICH C R, et al. One-dimensional compression of granular media[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 119(1): 1—18.
- [5] LADE P V, YAMAMURO J A, BOPP P A. Significance of particle crushing in granular materials[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 122(4): 309—316.
- [6] LEUNG C F, LEE F H, YET N S. The role of particle breakage in pile creep in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(6): 888—898.
- [7] 张季如, 祝杰, 黄文竞. 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 Ji-ru, ZHU Jie, HUANG Wen-jing. Crushing and fractal behaviors of quartz sand-gravel particles under confined compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 783—789.
- [8] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: Wiley, 2005.
- [9] ROBERTS J E, de SOUZA J M. The compressibility of sands[J]. **Proceedings of American Society for Testing and Materials**, 1958, 58: 1269—1277.
- [10] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M, et al. One-dimensional compression behavior of uniformly graded sand related to single particle crushing strength [J]. **Soils and Foundations**, 2001, 41(2): 39—51.
- [11] BARD E. Comportement des matériaux granulaires secs et à liant hydrocarboné[D]. Paris: Ecole Centrale de Paris, 1993.
- [12] MCDOWELL G R, KHAN J J. Creep of granular materials[J]. **Granular Matter**, 2003, 5(3): 115—120.
- [13] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yield of clays in states wetter than critical[J]. **Geotechnique**, 2003, 13(3): 211—240.
- [14] UENG T S, CHEN T J. Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(1): 65—72.
- [15] MCDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(5): 667—679.
- [16] 史旦达, 周健, 贾敏才, 等. 考虑颗粒破碎的砂土高应力一维压缩特性颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 736—742.
- SHI Dan-da, ZHOU Jian, JIA Min-cai, et al. Numerical simulations of particle breakage property of sand under high pressure 1D compression condition by use of particle flow code[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 736—742.
- [17] LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L E. Crushing a weak granular material: experimental numerical analyses[J]. **Geotechnique**, 2005, 55(3): 245—249.
- [18] THORNTON C, BARNES D J. Computer simulated deformation of compact granular assemblies[J]. **Acta Mechanica**, 1976, 64: 45—61.
- [19] TURCOTTE D L. Fractals and fragmentation[J]. **Journal of Geophysics Research**, 1986, 91(B2): 1921—1926.
- [20] MCDOWELL G R, BOLTON M D, ROBERTSON D. The fractal crushing of granular materials[J]. **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, 1996, 44(12): 2079—2102.
- [21] KARNER S L, CHESTER F M, KRONENBERG A K, et al. Subcritical compaction and yielding of granular quartz sand[J]. **Tectonophysics**, 2003, 377(3—4): 357—381.
- [22] DE GENNES P, BROCHARD-WYART F, QUERE D. Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves[M]. New York: Springer Verlag, 2004.
- [23] HARR M E. Mechanics of particulate media[M]. New York: McGraw Hill, 1977.