

文章编号: 1000-7598(2009)07-2043-06

颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究

张家铭¹, 蒋国盛¹, 汪稔²

(1. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 武汉 430074; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 钙质砂是海洋沉积物中的一种, 富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类物质的特殊介质。由于其颗粒质脆, 受力后易产生破碎, 表现出与常规陆源砂不同的力学性质。通过对取自南沙群岛永暑礁附近海域的钙质砂进行三轴剪切试验, 分析了钙质砂颗粒破碎与剪胀对其抗剪强度的影响。试验结果表明, 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颗粒破碎渐趋减弱, 其影响也渐趋于稳定。

关键词: 钙质砂; 颗粒破碎; 剪胀; 抗剪强度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Research on influences of particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands

ZHANG Jia-ming¹, JIANG Guo-sheng¹, WANG Ren²

(1. Engineering Research Center of Rock-Soil & Excavation and Protection Ministry of Education, Wuhan 430074, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Calcareous sediments generally consist of the remains of marine organism, which tend to crush relatively easily under load, compared to terrigenous materials. Based on the data of triaxial shear tests carried out on calcareous sand taken from the South China Sea, the influences of the particle breakage and dilatancy on shear strength of calcareous sands are discussed and analyzed. The results indicate that the particle breakage and dilatancy have significant effect on the shear strength of calcareous sands. The effect of the dilatancy on the shear strength is more serious than that of the particle breakage under low confining pressure, while with the confining pressure increasing, the effect of the particle breakage increase and that of dilatancy decrease. When the confining pressure attained to some extent, the particle breakage and its effect on shear strength will diminish.

Key word: calcareous sand; particle breakage; dilatancy; shear strength

1 引言

钙质砂是指富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类物质的特殊介质, 是一种海洋沉积物, 多存在于北纬 30° 和南纬 30° 之间热带或亚热带气候的大陆架和海岸线一带, 主要矿物成分为碳酸钙。在长期饱和的碳酸钙溶液中, 经物理、生物化学及化学作用过程形成的一种与陆相沉积有很大差异的碳酸盐沉积物, 形成的土颗粒多孔隙(含有内孔隙)、形状不规则、易破碎, 其工程力学性质与一般陆相、海相沉积物相比有较显著的差异^[1-4]。

钙质砂颗粒质脆, 受力后易产生破碎, 致使其力学性质发生变化。由无黏性土强度机制可知, 剪胀与颗粒破碎对抗剪强度有重要影响。本文对钙质砂三轴排水剪切试验数据进行分析, 研究钙质砂剪胀、颗粒破碎对其强度的影响。

2 剪胀与颗粒破碎对强度的影响

对于无黏性土, 在密度较大的条件下受到剪切力作用时, 位于剪切面附近的颗粒必须以某种方式滑动、转动、折断或研磨来克服颗粒之间咬合, 寻求剪应变空间, 试样体积发生变化。在体积变化过

收稿日期: 2007-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40272121); 科技部批准“十五”南沙群岛及其邻近海区综合调查项目 2001 年度中央级科研院所社会公益研究专项资金项目(No. 2001DIA50041)。

第一作者简介: 张家铭, 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 主要从事海洋土力学方面的研究工作。E-mail: zjmm@163.com

程中, 试样要克服周围压力做功。这些功消耗的能量是由外力施加于试样的剪切力做功来补偿, 试样体积膨胀(剪胀)时, 试样克服外力做正功, 剪应力增大, 表现为试验材料强度得到提高: 如体积缩小(剪缩)时, 试样克服外力做负功, 剪应力减小, 试验材料强度降低。

关于剪胀和强度的定量关系有不少学者做过研究。Taloy (1948 年) 通过直剪试验对这一问题进行了研究, 他假设砂在剪切时用体积膨胀来抵抗周围压力, 其所消耗的能量由剪切力做功来提供, 这一剪切力就是由膨胀作用所产生的抗剪强度, 根据直剪试验, 式(1)表示这一结果。

$$\tau_e = \sigma_n \frac{dh}{dx} \tag{1}$$

式中: σ_n 为法向应力; dh 为试样厚度增量; dx 为剪应变增量。

Bishop (1954 年) 针对三轴试验, 提出了类似的表达式:

$$\sigma_e = \sigma_3 \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \tag{2}$$

式中: σ_3 为围压; $d\varepsilon_v$ 为体积应变增量; $d\varepsilon_1$ 为轴向应变增量。

从三轴试验和直剪试验的应变特征可见, 式(1)中的 dx 与式(2)中的 $d\varepsilon_1$ 是统一的, 都是剪胀的量度。

如果以 ϕ' 代表试验测得的排水剪内摩擦角, ϕ'_f 代表消除剪胀后的内摩擦角, 则有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \tan^2(45^\circ + \phi'/2) &= \left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} \right)_f; \\ \tan^2(45^\circ + \phi'_f/2) &= \left[\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right]_f \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Rowe (1962 年)^[5] 从颗粒材料的变形机制入手, 引入功能转换的概念, 提出了著名的剪胀方程, 即

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_0}{2} \right) \tag{4}$$

式中: σ'_1 为有效大主应力; σ'_3 为有效小主应力; $d\varepsilon_v$ 为体积应变增量(剪胀为正); $d\varepsilon_1$ 为轴向应变增量(压为正); ϕ_0 为颗粒之间的摩擦角。

Rowe 的剪胀方程(4)只考虑了剪胀对强度的影响, 而没有考虑颗粒破碎的影响作用。Ueng, T. S. & Chen T. J. (2000 年)^[6] 以 Rowe 的剪胀方程为基

础, 在考虑了颗粒破碎影响的条件下得出方程:

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_t}{2} \right) + \frac{dE_B}{\sigma'_3 d\varepsilon_1} (1 + \sin \phi_t) \tag{5}$$

式中: dE_B 为单位体积试样由于颗粒破碎所消耗的能量; ϕ_t 为消除了剪胀和颗粒破碎的摩擦角, 其他各符号意义同式(4)。

假设在剪切过程中, 颗粒破碎所消耗的能量主要由颗粒接触点处的剪切摩擦力来提供, 则单位体积试样由于破碎所消耗的能量与试样比表面积增量成正比:

$$dE_B = k dS_v \tag{6}$$

式中: dS_v 为单位体积试样比表面积增量; k 为比例系数, 由土颗粒强度决定。

颗粒破碎一般有两种形式, 一种是在压力或弯曲作用下发生张拉破坏, 另一种是在剪力作用下发生剪切破坏。对应于这两种破坏方式的比例常数 k 是不同的。通过扫描电镜^[7] 发现, 在三轴剪切试验中剪切破坏占了相当大的比例, 而第 1 种破坏方式只占了极小部分, 则式(5)可变为

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \left(1 + \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right) \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_t}{2} \right) + \frac{k dS_v}{\sigma'_3 d\varepsilon_1} (1 + \sin \phi_t) \tag{7}$$

式(7)既考虑了剪胀的影响, 又包含了颗粒破碎的作用。本文在对钙质砂三轴剪切试验数据分析的基础上, 运用式(7)对钙质砂剪切作用下颗粒破碎与剪胀对强度的影响进行分析探讨。

3 试 验

本次试验选用的试样取自南沙群岛永暑礁附近海域, 是未胶结的松散体。取适量砂样经清水洗掉盐分后, 烘干备用。由于试样中粒径大于 2 mm 的颗粒所占比例极低, 为便于控制试验条件和结果分析, 对原始试样进行了初筛, 除掉粒径大于 2 mm 的部分, 保留粒径小于 2 mm 的所有部分。试样的颗分曲线如图 1 所示, 该砂为中砂, 基本物理参数见表 1。

试验在国产三轴剪力仪和进口高压三轴剪力仪上进行, 试样最大围压为 13.8 MPa, 最大终止剪切应变分别为 7%、14%、20%。试验后对试样进行了颗粒大小分析试验, 对于粒径大于 0.074 mm 的粒组采用筛分法, 对于粒径小于 0.074 mm 的粒组则采用比重计法。图 2 为不同围压下钙质砂试样

剪切前后（剪应变为 20%）的颗分曲线，可见钙质砂在剪切作用下颗粒破碎十分严重。

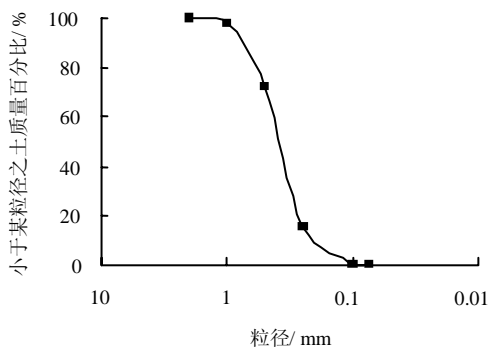


图 1 试样颗分曲线

Fig.1 Particle size distribution of the tested sample

表 1 试样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the tested sample

e_{min}	e_{max}	D_{60} / mm	D_{50} / mm	D_{10} / mm	砂土的相对 密度 G_s	C_u (D_{60}/D_{10})
1.09	1.46	0.420	0.377	0.208	2.79	2.20

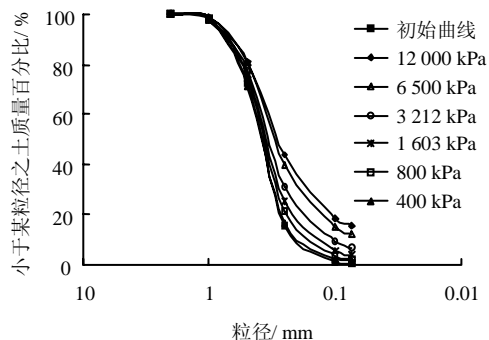


图 2 不同围压下钙质砂剪切后颗分曲线

Fig.2 Particle size distribution of the sample after shear

4 试验结果分析

4.1 比表面积的计算

运用式 (7) 进行分析时，需对由破碎产生的试样表面积增量进行计算，本文采用下述简化方法对其进行估算。对于粒径大于 0.074 mm 的颗粒，

$$S_{w1} = \sum \frac{F}{100} \frac{4\pi(d_m/2)^2}{(4/3)\pi(d_m/2)^3 G_s \rho_w} \quad (8)$$

式中： $d_m = \sqrt{d_1 d_2}$ ； d_1 、 d_2 为相邻筛径的尺寸，如 0.25、0.1 mm； F 为留筛质量百分数； G_s 为砂土的相对密度； ρ_w 为水的密度。

对于粒径小于 0.074 mm 的颗粒，采用 Blaine 法：

$$S_{w2} = \sum \frac{F}{100} \frac{S_0 G_c t (1 - e_0) \sqrt{e^3}}{G_s t_0 \sqrt{e_0^3} (1 - e)} \quad (9)$$

式中： G_c 为粉粒的相对密度； S_0 为比表面积； t_0 为下沉时间； e_0 为粉末的孔隙比； e 、 t 分别为 G_s 所对应的值。

总的比表面积：

$$S_w = S_{w1} + S_{w2} \quad (10)$$

总表面积为

$$S = S_w \rho_d \quad (11)$$

式中： ρ_d 为试样干密度。

对于形状不规则的颗粒，这种简化方法将低估了颗粒的表面积，但在计算颗粒表面积增量时，这种简化方法对结果影响不会太大。

4.2 剪胀与颗粒破碎对抗剪强度的影响

图 3 为不同围压下试样比表面积增量与轴向应变关系曲线。从图中可以看出，随着轴向应变的增加，试样比表面积增大，增加的幅度亦随着轴向应变的增加而增加。在相同的剪切应变下，试样比表面积随着围压的增加而加大。值得注意的是，即使达到破坏点以后，应力增量在 0 或负值的情况下，试样比表面积仍在继续增加，这说明了颗粒破碎与应力大小有关，而与应力增量的关系不大。

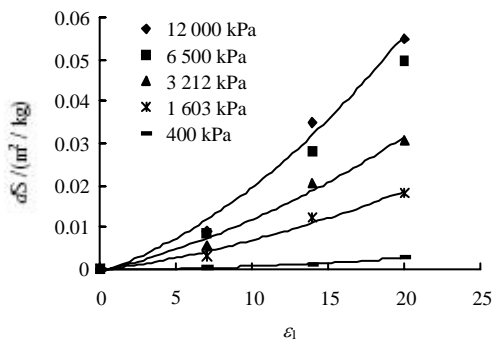


图 3 表面积增量与剪切应变关系曲线

Fig.3 The relationship between ds and ϵ_1

Rowe 剪胀方程 (4) 中的 ϕ_0 是消除了剪胀作用所得的摩擦角，其中包含颗粒破碎发挥的强度。式 (5) 中的 ϕ_f 则是消除了剪胀和颗粒破碎而得的摩擦角，即颗粒之间的基本滑动摩擦角。本次试验中 ϕ_f 无法直接求得，只能通过间接的方法。

为了更清楚说明，将 Rowe 剪胀方程 (4) 中的 ϕ_0 用 ϕ_b 来代替，即 ϕ_b 是消除了剪胀作用且包含颗粒破碎在内所对应的摩擦角。由于 ϕ_b 包含了破碎分

量，因此，其必定与试样破坏时单位体积表面积增量与应变增量的比率有关，通过式(4)可计算出 ϕ_b 的值。由图3曲线的斜率求得 $dS_v/d\varepsilon_1$ ，绘制 ϕ_b 与 $dS_v/d\varepsilon_1$ 关系曲线，如图4所示。当 $dS_v/d\varepsilon_1=0$ 时，意味着没有颗粒破碎产生，此时对应的 ϕ_b 即为消除了颗粒破碎影响的摩擦角，即 ϕ_f 值，从图4曲线在纵轴上的截距可得 $\phi_f=38.2^\circ$ 。 ϕ_b 与 ϕ_f 的差值即为颗粒破碎所发挥的强度 ϕ_b ，计算结果见表2。表2中，当围压小于800 kPa时，应力比是指峰值时的有效主应力比；当围压大于800 kPa时无峰值出现，此时应力比是指应变为20%所对应的值，其他各项类同。

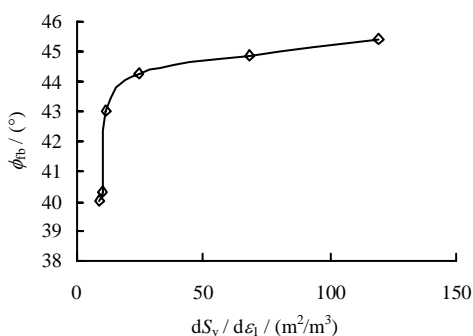


图4 ϕ_b 与 $dS_v/d\varepsilon_1$ 关系曲线
Fig.4 Relationship between ϕ_b and $dS_v/d\varepsilon_1$

表2 各强度分量试验结果统计表
Table 2 Summary of the quantitative analyses for the sand tested

围压 / kPa	应力比	峰值强度 ϕ_p / (°)	ϕ_b / (°)	ϕ_f / (°)	ϕ_b / (°)
100	7.30	49.39	40.04		1.84
200	6.64	47.59	40.35		2.15
400	6.43	46.96	43.03		4.83
600	5.72	44.61	43.61		5.41
800	5.53	43.94	43.88	38.2	5.68
1 603	4.62	40.12	45.28		7.08
3 212	3.89	36.21	45.97		7.77
6 500	3.30	32.36	46.38		8.18
12 000	3.25	31.94	48.40		10.20

从表2中还可以看出，围压对强度指标有明显的影响。当围压较低时，剪胀所发挥的强度非常显著，随着围压的增加，剪胀作用逐渐减小，而破碎的影响则越来越强。破碎分量从围压为100 kPa所对应的 1.84° 增加到围压12 000 kPa所对应的 10.20° 。

按照强度理论，剪胀和破碎对抗剪强度都有影响，从表2可知，当围压达到800 kPa时， ϕ_b 与峰值强度 ϕ_p 基本相等，说明此时剪胀作用基本消失，这也与试验结果相一致；当围压达到800 kPa时，

试样由剪胀过渡到剪缩；当围压大于800 kPa后，峰值强度 ϕ_p 小于 ϕ_b ，此时的剪胀率 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ 已出现负值，即出现负剪胀。表中出现的部分峰值强度低于滑动摩擦强度，一方面是由于颗粒破碎引起试样级配发生变化，使试样的粒间滑动摩擦角降低，更主要则是由于试验中峰值强度所对应的应变为20%，远没有达到真正的峰值。从试验中^[8]可知，即使围压高达13.8 MPa，应力-应变曲线中仍有峰值出现，只是需要很高的剪切应变，以此时的应力比计算所得的强度并不是真正的峰值强度，表中所计算的实际峰值强度有的低于滑动摩擦强度。

图5为破碎分量 ϕ_b 与围压关系曲线，表明破碎强度分量是随着围压的增加而增加的，但是增加的幅度逐渐减小，两者呈对数关系，即随着围压的进一步增加，破碎分量趋于一定值。实际上围压对破碎分量的影响是通过破碎量来表征的。

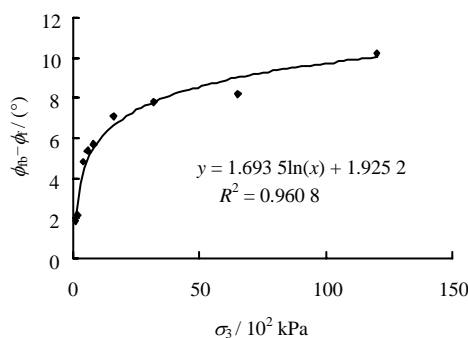


图5 破碎分量与围压关系曲线
Fig.5 The relationship between $\phi_b - \phi_f$ and σ_3

图6为破碎强度分量与相对破碎^[10]之间的关系曲线。从图中可以看出，破碎强度分量随着相对破碎的增加而增加，但破碎对强度的影响逐渐减弱，两者同样满足对数关系。当破碎量很大时，颗粒的粒径大幅度下降，粉粒已占相当大一部分，基本粒间滑动摩擦角发生了变化，由此公式得到的破碎分量误差已经不可忽略。另一方面，当围压达到一定程度，试样趋于最佳级配曲线时，颗粒破碎会渐趋于停止，此时不再因为颗粒破碎而消耗能量^[11]。

图7为单位体积内表面积增量与应变增量比率 $dS_v/d\varepsilon_1$ 与围压 σ_3 在破坏时的关系曲线，公式为

$$\frac{dS_v}{d\varepsilon_1} = \left(\frac{dS_m}{d\varepsilon_1} \right) \rho_d \quad (12)$$

式中： ρ_d 为与应变相对应的试样的干密度； $dS_m/d\varepsilon_1$ 可从图3求得。从图中可以看出， $(dS_v/d\varepsilon_1)_f$ 是随着围压的增加而增加，但当压力超过6 500 kPa后，

增加幅度逐渐降低。

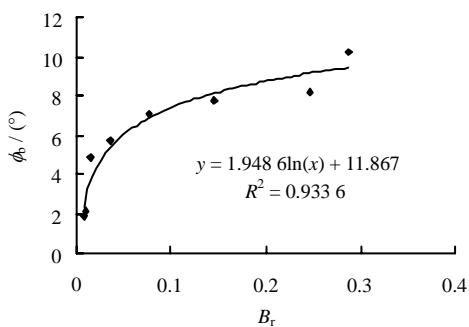


图 6 ϕ_b - B_r 关系曲线
Fig.6 The relationship between ϕ_b and B_r

将 $\phi_f = 38.2^\circ$ 代入式 (7) 可得试样破坏时单位应变增量所消耗的能量。图 8 为试样破坏时 $dE_b/d\varepsilon_1$ 与围压之间的关系，表明随着围压的升高，破坏时单位应变增量所消耗的能量增量也在增加。

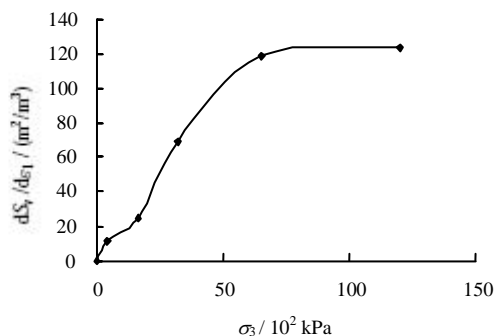


图 7 $(dS_v/d\varepsilon_1)_f$ 与 σ_3 关系曲线
Fig.7 The relationship between $(dS_v/d\varepsilon_1)_f$ and σ_3

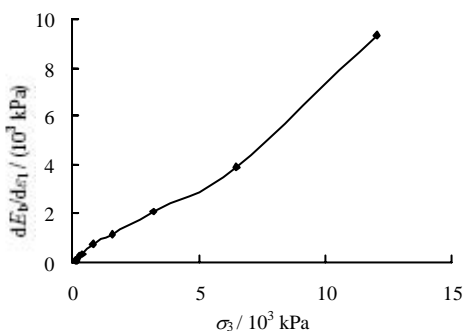


图 8 试样破坏时 $(dE_b/d\varepsilon_1)$ - σ_3 关系曲线
Fig.8 The relationship between $dE_b/d\varepsilon_1$ and σ_3 at failure

由图 7 和图 8 得出破坏时 $(dE_b/d\varepsilon_1)_f$ 与 $(dS_v/d\varepsilon_1)_f$ 关系曲线如图 9 所示。从图中可以看出，两者并非成简单的线性关系，即式 (6) 中的 k 值并不是常量，这是因为钙质砂中各颗粒的强度并不是完全一样的。在低围压、低应变下，往往是强

度低的颗粒首先发生破碎，随着围压的升高，强度更高的颗粒才发生破碎，此时增加单位面积所需的能量亦在增加，因此，式 (6) 中比例常数 k 将变大，表现为图中曲线斜率陡然加大。

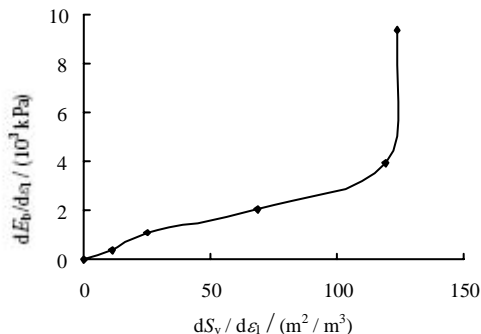


图 9 试样破坏时 $(dE_b/d\varepsilon_1)$ - $(dS_v/d\varepsilon_1)$ 关系曲线
Fig.9 The relationship between $dE_b/d\varepsilon_1$ and $dS_v/d\varepsilon_1$ at failure

5 结 语

通过对取自南沙群岛永暑礁附近海域的钙质砂三轴剪切试验数据的分析，对钙质砂剪切作用下的颗粒破碎与剪胀对其强度的影响进行了分析。试验结果表明，钙质砂的颗粒破碎与剪胀对其强度有重要影响。低围压下剪胀对其强度的影响远远大于颗粒破碎，而随着围压的增加，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，颗粒破碎程度会渐趋减弱，直至停止，其影响也渐趋于稳定。

参 考 文 献

- [1] 吴京平, 楼志刚. 钙质砂的基本特性[C]//第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 267 - 271.
- [2] SEMPLE R. State of the Art report on Engineering Properties of Carbonate Soils[C]//Proc. Int. Conf. on calcareous sediments. Perth, Australia: [s. n.], 1988: 807 - 836.
- [3] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sand[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(4): 607 - 626.
- [4] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚. 颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(5): 49 - 55. WU Jing-ping, CHU Yao, LOU Zhi-gang. Influence of

- particle breakage on deformation and strength properties of calcareous sands[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(5): 49 – 55.
- [5] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for the static equilibrium of an assembly of particles in contact[C]// Proceedings of the Royal Society of London. London: [s. n.], 1962: 500 – 527.
- [6] UENG T S, CHEN T J. Energy aspects of particle breakage in drained shear of sands[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(1): 65 – 72.
- [7] JENG C J, LI J C. Fabric of the hydraulic filled sand with flat particles and its variation after shearing[C]//Proc. 7th Conf. Current Res. Geotech. Engng Taiwan, Taipei: [s. n.], 1997: 1 – 8.
- [8] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3010 – 3015. ZHANG Jia-ming, ZHANG Ling, LIU Hui, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 3010 – 3015.
- [9] 张家铭, 汪稔, 石祥锋, 等. 侧限条件下钙质砂压缩与破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 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(8): 3327 – 3331.
- [10] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(10): 1177 – 1192.
- [11] LADE P V, YAMAMURO J A. Undrained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1996, 122(2): 120 – 129.
- [12] 刘崇权, 汪稔, 吴新生. 钙质砂物理力学性质试验中的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 209 – 212.
- LIU Chong-quan, WANG Ren, WU Xin-sheng. Some problems for the tests of physico-mechanical properties of calcareous sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 209 – 212.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB – T50123 – 1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [14] 孙岳菘, 濮家骝, 李广信. 不同应力路径对砂土应力-应变关系影响[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(6): 78 – 87. SUN Yue-song, PU Jia-liu, LI Guang-xin. Influence of different stress paths on stress-strain relation for sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(6): 78 – 87.
- [15] YAMAMURO J A, LADE P V. Drained sand behavior in axisymmetric tests at high pressures[J]. **J. Geotech. Engrg., ASCE**, 1996, 122(2): 109 – 119.
- [16] 张家铭, 汪稔, 张阳明, 等. 土体颗粒破碎研究进展[J]. 岩土力学, 2004, 24(增): 661 – 665. ZHANG Jia-ming, WANG Ren, ZHANG Yang-ming, et al. Advance in studies of soil grain crush[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 24(Supp.): 661 – 665.
- [17] 单华刚, 汪稔. 钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 299 – 308. SHAN Hua-gang, WANG Ren. Development of study of pile in calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 299 – 308.
- [18] 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. HEN Hai-yang, WANG Ren, LI Jian-guo, et al. Grain shape analysis of calcareous soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1389 – 1392.
- [19] 王新志, 汪稔, 孟庆山, 等. 钙质砂室内载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 147 – 151. WANG Xin-zhi, WANG Ren, MENG Qin-shan, et al. Study of plate load test of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 147 – 151