

文章编号: 1000-7598-(2002)增刊-0013-04

颗粒破碎对钙质土力学特性的影响

刘崇权,^{1, 2} 汪稔²

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 南中国海广泛分布着生物碎屑成因的钙质土。以相对破碎 B_r 为颗粒破碎的评价指标, 在三轴试验条件下, 分析了颗粒破碎对钙质土最大有效主应力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 、最大有效八面体应力比 $(q/p')_{\max}$ 、八面体剪应变 ε_s 和抗剪强度指标 ϕ' 的影响。

关键词: 钙质土; 颗粒破碎; 力学性质; 本构模型

中图分类号: TU 411.8 **文献标识码:** A

Influences of particles crushing on mechanical properties of calcareous soil

LIU Chong-quan^{1,2}, WANG Ren²(1. Guangzhou Urban Designing Planning and Surveying Institute, Guangzhou 510060, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: There are so many calcareous soils formed by biogenic scraps in South China Sea. Taking the relative breakage B_r as evaluation index of particles crushing, the influences of particles crushing on the maximum effective principal stress ratio $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, maximum effective octahedral stress ratio $(q/p')_{\max}$, octahedral shearing strain ε_s and shearing strength index ϕ' have been analyzed under the condition of triaxial tests.

Key words: calcareous soil; particles crushing; mechanical properties; constitutive model

1 前言

钙质土通常是指在海洋和部分陆地沉积环境中形成的、尚未胶结成岩的、 CaCO_3 矿物含量超过 50% 的沉积物。由于海上石油工程的需要, 在 20 世纪 70~90 年代, 钙质土力学特性和工程特性的探索曾经是国际岩土工程界研究的热点之一。我国在从“六·五”计划开始的南沙综合科学考察中, 逐步发现南中国海广泛分布的珊瑚碎屑沉积物, 与国外文献报道的钙质土既有相同点, 又有不同之处。从“八·五”计划开始, 在南沙综合科学考察中投入了大量人力物力进行钙质土物理力学特性的研究, 取得了许多具有代表性的成果, 本文是该研究项目成果的一部分。

2 颗粒破碎的评价指标

在文献[1]中推导了以相对破碎 B_r 为颗粒破碎

的评价指标, 并导出 B_r 与颗粒破碎消耗的破碎功 W^B 之间存在式 (1) 所示的线性关系:

$$B_r = k'W^B \quad (1)$$

式中 B_r 定义为

$$B_r = \frac{\int_0^1 \lg(d_{i0}/d_i) d\gamma}{\int_0^1 \lg(d_{i0}) d\gamma} \quad (2)$$

式中 d_{i0} 为试验前的颗粒直径 (mm); d_i 为试验后的颗粒直径 (mm); k' 为比例系数 (m^2/kN); γ 是直径为 d_{i0} , d_i 的颗粒在土样中所占的比例。

根据 Hardin^[2] 的研究, B_r 是一个与应力水平、相对密度、应力路径、矿物成分、含水量等有关而与土体初始级配无关的量, 按式 (1) 所述, 其实质就是与破碎过程中消耗的能量直接相关。假定当土体从一个初始应力为 σ_y^0 的状态经过一个加载应力路径后, 由颗粒破碎引起的应变为 ε_{ij}^B , 应力为 σ_{ij} , 可得到式 (3):

收稿日期: 2001-09-10

基金项目: “九·五”国家重点科技攻关计划项目, “南沙海区珊瑚礁工程地质和工程动力环境评价”专题 (编号 97-926-03-02)

作者简介: 刘崇权, 1972 年生, 博士, 1999 年毕业于中国科学院武汉岩土力学研究所。目前主要从事岩土力学研究、深基坑支护和软基处理设计与施工。

$$B_r = k'W^B = k' \int_{\sigma_{ij}^0}^{\sigma_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^{B'} \quad (3)$$

式中 σ_{ij}^0 为初始应力状态 (kPa); σ_{ij} 为加载后应力状态 (kPa); $\varepsilon_{ij}^{B'}$ 为由颗粒破碎引起的塑性应变 (%)。

显然, 式 (3) 对 Hardin^[2] 的研究成果给出了数学上的精确表达。由于 B_r 是一个与所有受力过程都相关, 且又是可以测试的变量, 因此, 可以将它作为颗粒破碎程度的评价指标, 也可以从它与其他力学变量之间的关系来讨论颗粒破碎对力学特性的影响程度。

3 颗粒破碎对应力-应变关系的影响

试验表明, 随围压的升高, 钙质土的 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, $(q/p')_{\max}$, ϕ 都降低, 这事实上与颗粒破碎是密切相关的。

3.1 颗粒破碎对于 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, $(q/p')_{\max}$ 的影响

对于无颗粒破碎的无粘性土, 其抗剪强指标 ϕ 值仅与材料成分、试验初始密度等有关, 而与试验时的应力水平无关, 这是 Mohr-Columb 确定 ϕ 为一定值的前提, 不考虑中主应力的影响, 对于任意应力路径有:

$$\phi' = \arcsin \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f} = \arcsin \frac{\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_f - 1}{\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_f + 1} \quad (4)$$

显然, 上式表明: 对于任意应力路径, 其破坏时的 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$, 即 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 为一定值。因此, 钙质土中随围压的升高而 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, $(q/p')_{\max}$ 及 ϕ 值的降低都是由于颗粒破碎引起的。

根据 Rowe(1962年)^[3] 的剪胀理论:

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = K_U \left(1 + \frac{d\varepsilon_v^n}{d\varepsilon_p^n} \right) \quad (5)$$

式 (5) 表明, 石英砂固结排水剪中 $\varepsilon_v - \varepsilon_p$ 曲线的斜率随 σ'_1/σ'_3 而线性变化, 但它并未指出 (σ'_1/σ'_3) 将会发展到什么程度。由于土是一种摩擦型材料, 其应力-应变的发展事实上取决于颗粒间摩擦的发展程度, 如果把土体看作是由无数粗糙的小块体组成的, 则外界对土体的作用力将由块体间的摩擦力 (剪应力 τ) 和接触面垂直应力 (正应力 σ) 来克服, 当块体间摩擦发挥到极限状态时, 即各块体间作用力满足 $\tau = \sigma \tan \phi$, 此后, σ 和 τ 将不再增加, 达到 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 的应力状态。因此, 土体应力应变状态从根本上来说是由颗粒间滑移、摩擦而决

定的。

当颗粒之间相互摩擦, 且可能导致颗粒破碎时, 其相对运动的形式将决定于滑动和破碎所需的应力水平谁最低, 如果应力作用时, 颗粒所需的应力已达到其抗压 (抗拉) 强度或者颗粒内部缺陷发展到贯通整个颗粒, 则将发生颗粒破碎, 否则将继续累积 τ 和 σ , 在满足 $\tau = \sigma \tan \phi$ 后产生滑移。因此, 当存在颗粒破碎时, 土体 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, $(q/p')_{\max}$ 是由破碎和滑动摩擦共同控制的。滑动摩擦将使应力 σ_{ij} 增加到极限状态, 而破碎将使 σ_{ij} 不能达到该状态而位于某一中间值, 试验中的 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, $(q/p')_{\max}$ 是二者协调发展的结果。

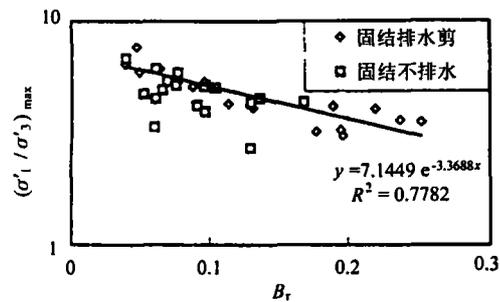


图 1 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max} - B_r$ 关系曲线

Fig.1 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max} - B_r$ curve

图 1 是三轴剪切实验 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 与 B_r 的关系曲线, 可见不管是固结排水剪 (CD), 还是固结不排水剪 (CU), 试验数据都位于如图所示的趋势线附近。随 B_r 值的增加, $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 减少。图中所示的拟合曲线写成一般式为

$$(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max} = A e^{-nB_r} \quad (6)$$

式中 A , n 均为试验常数, 无量纲。

可见, 随 B_r 的增加, $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 减小。由于 B_r 有一上限值, $B_r = 1$, 故 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 也存在着一个下限, 该下限在颗粒破碎时对 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 的减小不起作用, 主要为粒间滑动。同时, 当无颗粒破碎时, $B_r = 0$, 则 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max} = A = 7.144$, 对应着 $\phi = 49^\circ$, 与试验中得到最大 ϕ 角 50° 相近。这与 Lee 和 Seed(1967年)^[4], Vesic 和 Clough(1968年)^[5] 所述的强度机理一致。

同样, B_r 也与 $(q/p')_{\max}$ 有密切联系, 如将式 (6) 代入:

$$\left(\frac{q}{p'}\right)_{\max} = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{\frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)_f} \quad (7)$$

推导得

$$\frac{9}{3 - \left(\frac{q}{p'}\right)_{\max}} - 2 = A e^{-nB_r} \quad (8)$$

式(8)表明了 $(q/p')_{max}$ 与 B_r 之间的关系。根据与 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 同样的理由, 在无颗粒破碎时, $(q/p')_{max}$ 为一常数, 即临界状态线为一过原点的直线; 当有颗粒破碎时, $(q/p')_{max}$ 也要随 B_r 的增大而减少, 临界状态线是一条曲线。

3.2 剪切过程中广义剪应变 ϵ_s 与 B_r 的关系

试验表明, 钙质土在加载过程中的应变是以塑性应变为主的, 弹性应变几乎可以忽略不计^[6]。剪切过程中广义剪应变 ϵ_s 与 B_r 的关系曲线见图 2, 该图是在 CD 剪试验中, 当 $\sigma'_3 = 20$ MPa, 且轴向应变分别为 $\epsilon_1 = 0, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%, 25\%$ 时, 终止试验而得到的。

众所周知, 剪切试验中的广义剪应变 ϵ_s 被认为是塑性的, 它将随剪切过程不断地发展, 同样 B_r 也是随剪切过程而不断发展的, 剪切可导致颗粒破碎, 而剪应变中也包含有颗粒破碎引起的应变, 因此, ϵ_s 和 B_r 之间可能存在着某种关系。图 2 表明, B_r 和 ϵ_s 之间的这种关系是非线性的, 可以描述为

$$B_r = K\epsilon_s^m \quad (9)$$

式中 K, m 均为试验常数, 无量纲。式(9)表明, 当剪应变增大时, B_r 也随之增加, 在图 2 所示的围压水平中, $K = 0.0038, m = 0.5973$ 。

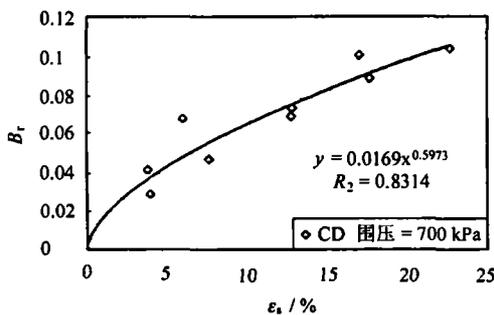


图 2 ϵ_s - B_r 关系曲线

Fig.2 ϵ_s - B_r curve

对于普通陆源砂, 其 CD、CU 试验资料常认为可用式(10)归一为一条直线:

$$\eta = \frac{\epsilon_s}{a + b\epsilon_s} \quad (10)$$

但对于钙质土, 文献[1]已表明不能用上式归一, 现在看来, 其原因是随着颗粒破碎的增加, B_r 值增大, 从而使 ϵ_s 增大, 根据式(3), 不管 σ_y 还是 ϵ_y^B , 只要有一个量导致 w^B 的增加, 则颗粒破碎将继续发展, 即使在 σ_y 不变时, 土体也会由于颗粒破碎而增大 ϵ_s , 从而使 η - ϵ_s 之间不存在一一对应关系。也就是颗粒破碎导致土体具有蠕变性, 这在文

献[6]中的一维压缩、固结排水剪应力关系曲线上也反映, 其卸载-再加载曲线几乎垂直于 σ 轴和 ϵ_1 轴, 即不可能同时维持 σ_y 和 ϵ_y 都为常数, 当维持 σ_y 为常数时, ϵ_y 缓慢增大; 而当维持 ϵ_y 常数时 σ_y 将迅速减小到 0, 这种蠕变特性可能是钙质土中打入桩侧壁摩阻力过低的原因之一。

4 颗粒破碎时的 Mohr-Columb 判据

Mohr-Columb 判据是在地质材料中广泛应用的强度准则, 其表达式为

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - \cos \varphi = 0 \quad (11)$$

此外, 还有各种各样的强度准则, 如双剪应力强度准则、广义双剪应力强度准则、Mises 准则、Parge-Drade 准则等。鲁祖统、龚晓南(1997年)^[7]证明了定材料在允许平面内的屈服曲线以 Mohr-Columb 为内包线, 而以广义双剪应力屈服条件为外包线。

如果我们对钙质土依然以 Mohr-Columb 屈服条件为强度准则, 且 $c = 0$, 则

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_f \quad (12)$$

φ 定义为 τ - σ 曲线上任意一点的割线倾角, 如果以有效应力表达, 则表达式即为式(4)。

我们知道, 以 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ 为破坏标准得的破坏点刚好对应于 $\left(\frac{q}{p'}\right)_{max}$ 点, 将式(4)改写为

$$\varphi' = \arcsin \left(\frac{\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_{max} - 1}{\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_{max} + 1} \right) \quad (13)$$

将式(6)代入式(13)并整理可得

$$\varphi' = \arcsin \left(1 - \frac{2}{Ae^{-nB_r} + 1} \right) \quad (14)$$

式(14)表明, 随着 B_r 的增加, φ' 逐渐减小。根据 Lade 和 Yamamuro (1996年)^[8]的试验, 石英砂在排水剪切过程中, B_r 值存在着一个极限, 该值不是 1 而是 0.3, 对应 $p'_f = 10$ MPa, 此后, 随 p'_f 的增加, φ' 和 B_r 都不再变化, 若以该值代入式(14), 则得到 $\varphi' = 26.4^\circ$ 。可认为是的 φ' 下限值(方解石的矿物摩擦角为 27°)。当 $B_r = 0$ 时, 其上限值为 49° , 与文献[6]中直剪试验的结果 (50°) 相近。

将式(14)在 0 的邻域内, 在以 B_r 为变量的泰勒展开式中, 取前一项并整理后, 得

$$\varphi' = \varphi(0) + \varphi'(0)B_r \quad (15)$$

其中

$$\varphi(0) = \arcsin(1 - \frac{2}{A+1})$$

$$\varphi'(0) = \frac{-\sqrt{A}}{(A+1)}$$

将式(6)代入式(15)并整理后得

$$\varphi' = \varphi_0 + j \ln(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3})_{\max} \quad (16)$$

其中

$$\varphi_0 = \varphi(0) - \frac{\varphi'(0)}{n} \ln A$$

$$j = \frac{\varphi'(0)}{n}$$

式(16)即为通常用于表达非线性 Mohr-Columb 包线的近似公式。

图3为 $\varphi' - (\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 关系曲线,可见不论级配、试验公式如何,其 $\varphi' - (\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 都位于同一条趋势线上,同时图3(b)中的拟合结果表明,在试验应力水平范围内式(16)可对各试验值作出足够精确的表达。本节所推导的公式是正确的。同时也可以看到,随着应力水平的提高,颗粒破碎加剧,将会显著降低土的抗剪强度指标,当围压从 100 kPa 上升

到 25 MPa 时, φ 值降低了 20° , 因此,抗剪强度指标是与应力水平相关的量。

5 结论

本文讨论了颗粒破碎的评价指标及其与相关力学指标的关系。以试验数据和理论推导相结合,讨论了颗粒破碎对钙质土应力-应变关系的影响,并对 Mohr-Coulomb 破坏准则进行了修正,得到了下列结论:

- (1) 以 B_r 作为颗粒破碎评价指标, B_r 值与颗粒级配无关,而与破碎功之间存在着式(3)所述关系。
- (2) 颗粒破碎对钙质土应力-应变关系的影响表现在两点:一是降低 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 和 $(q/p')_{\max}$, 使 Mohr-Coulomb 包线呈非线性特征,同时 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$, $(q/p')_{\max}$ 与 B_r 之间满足式(6)和式(8);二是增加塑性变形,且与 B_r 之间满足式(9)。
- (3) 将 Mohr-Coulomb 破坏准则定义为随应力水平而变化,则可推导出颗粒破碎是使钙质土抗剪强度降低的主要原因,并从理论上导出 $\varphi' - (\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 之间满足式(16)。

参考文献

- [1] 刘崇权. 钙质土土力学理论及其工程应用[博士学位论文D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1999.
- [2] Hardin B O. Crushing of soil particles[J]. J. Geotech Engrg. ASCE. 1985, 111(10): 1 177-1 192.
- [3] Rowe P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[A]. Proc. R. SOC. [C]. [s. l.]:[s. n.]. 1962, 500-527.
- [4] Lee K L, Seed H B. Drained Strength Characteristics of sands[J]. J. Soil Mech. & Foundation Division, ASCE, 1967, 93(6): 117-141.
- [5] Vesic A S, Clough G W. Behaviour of granular materials under high stress[J]. J. of Soil Mechanics & Foundation Division. 1968, 94 (sm3): 661-688.
- [6] 刘崇权, 汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 32-37.
- [7] 鲁祖统, 龚晓南. 关于稳定材料屈服条件在 π 平面内的屈服曲线存在内外包线的证明[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 1-5.
- [8] Yamamuro J A, Lade P V. Effect of strain rate on instability of granular soils[J]. Geotech. Testing, 1993, 16(3): 304-313.

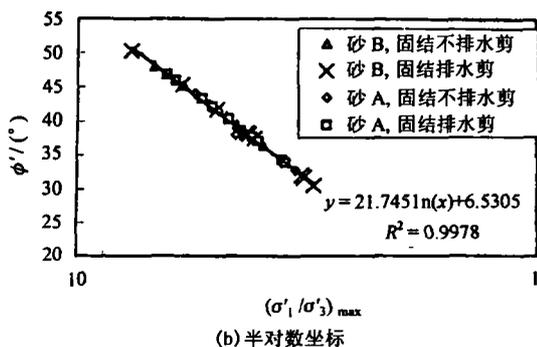
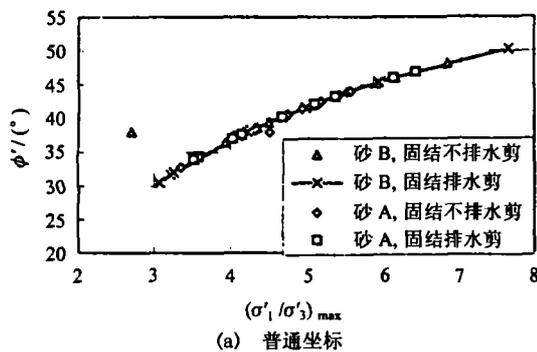


图3 $\varphi' - (\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ 关系曲线
Fig.3 $\varphi' - (\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ curve