

DOI: 10.11779/CJGE2019S2007

考虑颗粒破碎影响的粗粒土临界状态研究

武颖利¹, 皇甫泽华², 郭万里¹, 张兆省²

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河南省前坪水库建设管理局, 河南 郑州 450003)

摘要: 粗粒土的临界状态是构建本构模型的重要工具, 目前考虑颗粒破碎影响的粗粒土临界状态并不明确。通过大型三轴 CD 试验, 研究了粗粒土在临界状态时的颗粒破碎规律和应力变形特性, 探讨了颗粒破碎对粗粒土临界状态应力比和临界状态方程参数的影响。主要结论如下: ①粗粒土的临界状态应力比 M_c 并不是定值, 而是与围压之间呈现出非线性的关系; ②初始孔隙比对于临界状态应力比 M_c 的影响则可以忽略; ③初始级配相同, 围压和初始孔隙比不同的粗粒土, 其临界状态在 $e - (p/p_a)^{\xi}$ 平面可以用同一条直线来描述, 且直线的参数是与初始孔隙比和围压无关的常数。

关键词: 粗粒土; 颗粒破碎; 临界状态; 三轴试验

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)S2 - 0025 - 04

作者简介: 武颖利(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水工结构、土石坝与堤坝工程数值计算等研究。E-mail: wuyingli@nhri.cn。

Influences of particle breakage on critical state of coarse-grained soils

WU Ying-li¹, HUANGFU Ze-hua², GUO Wan-li¹, ZHANG Zhao-sheng²

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Construction Management Bureau of Qianping Reservoir, Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The critical state of coarse-grained soils is the important tool to study the constitutive model, however, the critical state of coarse soil considering the effect of particle breakage is not clear. The influences of particle breakage on the stress and deformation properties and the critical state of rockfills are studied through the large-scale triaxial CD tests. The main conclusions are as follows: (1) The critical-state stress ratio M_c of rockfill materials is not a constant, which is found to be passively correlated with the confining pressure. (2) While the effect of void ratio on M_c can be neglected. (3) The critical state of rockfill samples with different confining pressures and void ratios can be described by the same straight line in $e - (p/p_a)^{\xi}$ plane, and the parameters of the straight line are constant.

Key words: coarse-grained soil; particle breakage; critical state; triaxial test

0 引言

研究表明, 土石坝的变形问题与粗粒土的强度变形特性和颗粒破碎密切相关^[1-2]。一直以来, 就地取材、成本低廉的堆石料、砾石料等粗粒土都是土石坝的主要建筑材料。目前中国一批 300 m 级的高土石坝正在设计或建设之中, 而高土石坝对于筑坝料而言意味着高应力状态, 高应力状态下粗粒土的颗粒破碎效应加剧, 会显著影响土体的强度及变形特性^[3-4]。因此, 对坝体应力变形进行准确预测, 需要构建考虑颗粒破碎影响的本构模型。

在本构模型中考虑颗粒破碎的影响主要包括如下 3 个思路^[2]: 一是在经典弹塑性模型的基础上修正硬化准则和剪胀关系, 二是基于损伤力学引入损伤因子, 三是考虑颗粒破碎对于临界状态的影响。其中, 第三类思路是基于临界状态理论。近些年来, 基于临界状

态理论的弹塑性本构建模方法在砂土中得到了较快地发展, 并取得了一些成果^[3]。但是粗粒土的颗粒破碎效应更为显著, 使得其临界状态的表述更为复杂, 需要进行更多的试验验证和规律总结。

目前, 对于粗粒土临界状态的描述并不完善。一方面, 部分研究认为粗粒土的临界状态应力比与砂土性质相同, 即在 $q - p$ 平面为线性关系^[3]; 而丁树云等^[4]、魏匡民等^[5]、蔡正银等^[6]通过大应变条件下粗粒土大型三轴试验结果, 认为临界状态在 $q - p$ 平面内具有非线性性质, 即粗粒土的临界状态应力比 M_c 并非定值。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目 (2017YFC0404806); 河南省水利科技攻关计划项目 (GG201705); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y318005)

收稿日期: 2019 - 04 - 30

***通讯作者 (E-mail: guowljs@163.com)**

另一方面,对于粗粒土的临界状态方程也有多种观点。虽然 $e_c=e_r-\lambda(p/p_a)^{\xi}$ 这一临界状态方程逐渐被接受,但是对于其中的材料参数的确定,特别是 e_r 是否与初始孔隙比有关,依然存在较大分歧。比如 Xiao 等^[3]认为 e_r 与初始孔隙比 e_0 线性相关;而丁树云等^[4]则认为 e_r 基本为一个常数。理论上讲,对临界状态的准确描述是临界状态理论的核心,也是建立状态参量本构模型的基础,对临界状态的描述若不符合物理规律则此类本构模型预测精度就无从谈起。

基于此,本文进行了一组不同初始孔隙比、不同围压下的粗粒土三轴 CD 试验,研究了临界状态应力比和临界状态方程与初始孔隙比、围压之间的关系,并分析了该关系与颗粒破碎之间的内在联系。

1 临界状态应力比

试验选用的材料为某大坝的砾石料,试样最大粒径为 60 mm,颗粒相对密度 $G_s=2.78$,最大孔隙比 $e_{\max}=0.562$,最小孔隙比为 $e_{\min}=0.238$ 。试样尺寸为 $\Phi 300\text{ mm}\times 700\text{ mm}$,制样孔隙比分别为 0.352, 0.320, 0.301 和 0.272,制样干密度如表 1 所示。每组试样在饱和状态下进行了 4 个不同围压,即 300, 600, 900 和 1200 kPa 的常规三轴固结排水剪切试验。

表 1 三轴 CD 试验方案

Table 1 Test schemes of CD tests

制样孔隙比 e_0	制样干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	围压/kPa
0.352	2.06	300, 600, 900, 1200
0.320	2.11	300, 600, 900, 1200
0.301	2.14	300, 600, 900, 1200
0.272	2.19	300, 600, 900, 1200

人们描述临界状态应力比时,通常在 $q-p$ 平面描绘临界状态偏应力 q_c 和临界状态正应力 p_c 的关系。图 1 给出了本文不同围压、不同初始孔隙比的 16 个试样在临界状态时的 q_c-p_c 散点,并利用直线 $q_c=M_c p_c$ 进行了拟合,得到临界状态应力比 $M_c=1.722$,拟合相关系数 R^2 高达 0.997,接近于 1。那么是否就可以得出结论:粗粒土的临界状态应力比 M_c 为定值?

目前较多的研究者对于上述问题的答案是肯定的,即认为 M_c 是定值,与初始孔隙比和围压都无关。针对这一点,笔者先给出一个类似的反例,来说明在 $q-p$ 平面内尽管拟合相关系数 R^2 接近于 1 也并不能说明应力比为定值。

图 2 给出了这 16 个试样在偏应力峰值时对应的峰值偏应力 q_f 和峰值正应力 p_f 散点图,并利用直线 $q_f=M_f p_f$ 进行拟合,得到峰值应力比 $M_f=1.817$,拟合相关系数 R^2 也高达 0.989,同样接近于 1。

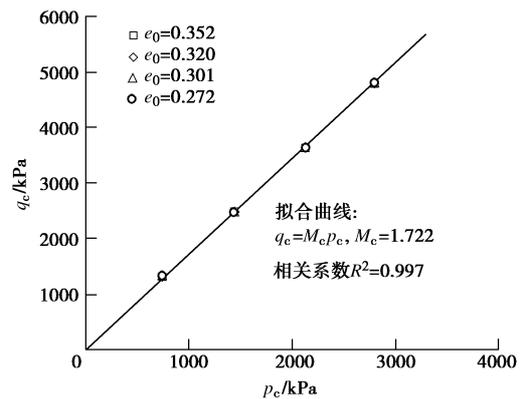


图 1 $q-p$ 平面的临界状态应力比

Fig. 1 Critical-state stress ratios in $q-p$ plane

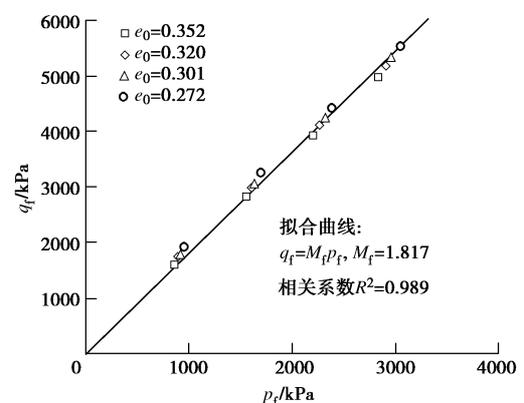


图 2 $q-p$ 平面的峰值应力比

Fig. 2 Peak stress ratios in $q-p$ plane

若单从 R^2 接近于 1 的角度,似乎可以认为图 2 中峰值应力比 M_f 为定值,与围压和初始孔隙比都无关。而实际上,一个众所周知的事实是粗粒土的峰值强度具有显著的非线性,其中,与围压的关系最常见的表达式是来自邓肯-张模型^[6]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right), \\ M_f &= \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, φ 为峰值内摩擦角, φ_0 和 $\Delta\varphi$ 为材料参数。 $\Delta\varphi$ 越大,说明强度非线性越显著。

式 (1) 揭示了峰值应力比 M_f 与围压的非线性关系。进一步地,将本文不同围压、不同初始孔隙比的 16 个试样峰值应力比 M_f 绘制与 $M_f - \lg(\sigma_3/p_a)$ 坐标系,如图 3 所示。

由图 3 可见,围压相同时,峰值应力比 M_f 随着初始孔隙比的增大而减小;初始孔隙比相同时, M_f 随着围压的增大而减小。其中,峰值应力比 M_f 最大值为 2.048,最小值为 1.733,都远远偏离了图 2 中拟合直线确定的定值 1.817。将 M_f 根据式 (1) 换算为峰值内摩擦角 φ 的形式,得到 4 组不同 e_0 试样的 $\Delta\varphi$ 平均值

为 8.8°, 可见峰值强度的非线性是较为显著的。由此可见, 简单地根据图 2 中 $q_f - p_f$ 散点呈现显著的线性关系 (R^2 接近于 1) 来判断峰值应力比 M_f 为与初始孔隙比和围压无关的定值是不合理的。

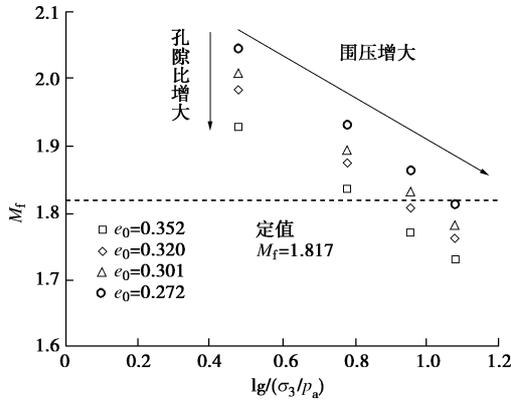


图 3 峰值应力比与围压和孔隙比的关系

Fig. 3 Influences of confining pressure and void ratio on peak stress ratio

同理, 根据图 1 中 R^2 接近于 1 来判断临界状态应力比 M_c 与初始孔隙比和围压无关也是值得商榷的, 尽管其拟合相关系数 R^2 更接近于 1。那么 M_c 与初始孔隙比和围压的关系是否类似于 M_f ? 首先, 将 16 个试样的临界状态应力比根据式 (2) 换算为临界状态内摩擦角的形式 φ_c , 并绘制于 $\varphi_c - \lg(\sigma_3/p_a)$ 平面, 如图 4 所示。

$$\varphi_c = \arcsin \frac{3M_c}{6 + 3M_c} \quad (2)$$

图 4 展现了临界状态摩擦角 φ_c 的 3 个特征: 一是当围压相同时, 不同初始孔隙比的试样 φ_c 基本相等, 除了围压 300 kPa 时, $e_0=0.272$ 的试样与其他 3 个试样的 φ_c 偏差较大, 可能是试验误差, 该试验点可以剔除; 二是不同的试样特别是围压较小时 (如 300 kPa), φ_c 与图 1 确定的定值 $\varphi_c=42.0^\circ$ (即 $M_c=1.722$) 之间的差异较为显著; 三是初始孔隙比相同时, φ_c 随着围压的增大而减小, 该规律也可以用类似于式 (1) 的非线性关系来表示:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_c &= \varphi_{c0} - \Delta\varphi_c \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right), \\ M_c &= \frac{6 \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, φ_c 为临界状态内摩擦角, φ_{c0} 和 $\Delta\varphi_c$ 为材料参数。

将围压 300 kPa、 $e_0=0.272$ 的试验点剔除, 并利用式 (3) 对剩余 15 个试验点 $\varphi_c - \lg(\sigma_3/p_a)$ 关系进行拟合, 得到参数为 $\varphi_{c0}=44.5^\circ$, $\Delta\varphi_c=2.63^\circ$, 如图 4 所示, 拟合曲线能够较好地描述 φ_c 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 之间的关系。

综上所述, 粗粒土的临界状态应力比 M_c 并不是定值, 而是与围压之间存在一定的非线性关系; 初始孔隙比对于 M_c 的影响则可以忽略。

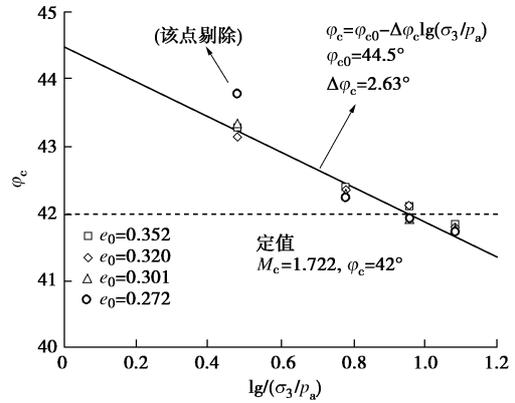


图 4 临界状态内摩擦角与围压和孔隙比的关系

Fig. 4 Influences of confining pressure and void ratio on critical-state friction angle

2 临界状态方程

临界状态方程描述的是临界状态孔隙比 e 和正应力 p 的关系, 是临界状态理论的核心。粗粒土的临界状态常用表达式是在 $e - (p/p_a)^\xi$ 平面为直线:

$$e_c = e_\Gamma - \lambda \left(\frac{p}{p_a} \right)^\xi, \quad (4)$$

其中, e_c 为临界状态孔隙比, e_Γ , λ 和 ξ 为材料参数。

目前式 (4) 表示的临界状态方程虽然为人们广泛接受, 但是对于其中的参数 e_Γ 还存在较大的分歧。比如文献[3]认为 e_Γ 与初始孔隙比 e_0 线性相关; 而文献[4]则认为 e_Γ 基本为一个常数, 与初始孔隙比无关。图 5 给出了 16 个试样在临界状态时的 $e - (p/p_a)^\xi$ 散点图。

由图 5 可总结出关于临界状态的两个特征: 一是围压相同、孔隙比不同的试样在 $e - (p/p_a)^\xi$ 平面达到临界状态时基本趋向于同一个点。二是初始孔隙比相同、围压不同的试样, 在临界状态时呈现出围压越大, 则临界状态孔隙比 e_c 越小、临界状态正应力 p 越大的特点。

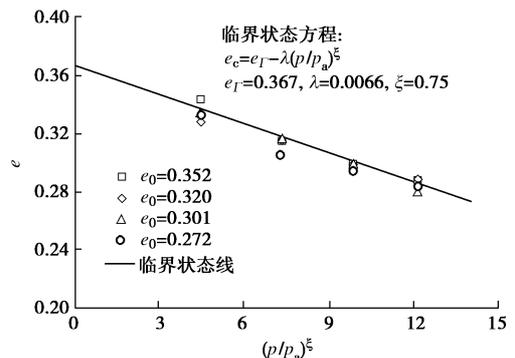


图 5 $e - (p/p_a)^\xi$ 平面的临界状态线

Fig. 5 Critical-state line in $e - (p/p_a)^\xi$ plane

利用式(4)对图5中的16个散点进行拟合,得到该粗粒土的临界状态线,及其参数为 $e_r=0.367$, $\lambda=0.0066$, $\xi=0.75$,如图5所示。由图5可见,初始级配相同,围压和初始孔隙比不同的试样,临界状态在 $e-(p/p_a)^\xi$ 平面能够用同一条临界状态线较好地描述,即 e_r 可以认为是一个与初始孔隙比无关的常数。

图5中关于临界状态与围压的关系容易理解,即围压越大临界状态应力 p 越大、孔隙比 e 越小。目前争议的焦点在于临界状态是否与初始孔隙比无关,这一点可以从颗粒破碎的角度来分析。不同初始孔隙比的试样在相同的围压下趋向于相同的级配、相同的偏应力。那么根据这个试验现象反推:为什么不同的试样在围压相同、级配相同时还能表现为偏应力相同?那只能说明这些试样所处的密实状态(孔隙比)也相同。因此,初始孔隙比不同的试样在临界状态时的孔隙比和正应力相同,具体表现为:在 $e-(p/p_a)^\xi$ 平面趋向于同一个点,如图5所示。

综上所述,粗粒土的临界状态在 $e-(p/p_a)^\xi$ 平面可以用直线 $e_c=e_r-\lambda(p/p_a)^\xi$ 来描述,且对于同一初始级配的粗粒土,临界状态方程的参数为常数,与围压和初始孔隙比无关。

3 结 论

本文通过试验研究了粗粒土在临界状态时的颗粒破碎规律及其对临界状态的影响,得出如下几点结论:

(1) 粗粒土的临界状态应力比 M_c 并不是定值,而是与围压之间呈现出非线性的关系;初始孔隙比对于 M_c 的影响则可以忽略。

(2) 初始级配相同,围压和初始孔隙比不同的试样,临界状态在 $e-(p/p_a)^\xi$ 平面可以用同一条临界状态线来描述。

(3) 粗粒土在 $e-(p/p_a)^\xi$ 平面内临界状态方程的参数可以认为是与初始孔隙比和围压无关的常数。

参考文献:

[1] GUO W L, ZHU J G. Energy consumption of particle breakage

and stress dilatancy in drained shear of rockfill materials[J]. *Géotechnique*, 2017, 7: 304 - 308.

- [2] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究:进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2170 - 2180. (YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: Review and development[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(12): 2170 - 2180. (in Chinese))
- [3] XIAO Y, LIU H, DING X, et al. Influence of particle breakage on critical state line of rockfill material[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, 16(1):04015031.
- [4] 丁树云, 蔡正银, 凌华. 堆石料的强度与变形特性及临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 248 - 252. (DING Shu-yun, CAI Zheng-yin, LING Hua. Strength and deformation characteristics and critical state of rock fill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(2): 248 - 252. (in Chinese))
- [5] 魏匡民, 陈生水, 李国英, 等. 基于状态参数的筑坝粗粒土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 654 - 661. (WEI Kuang-min, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. Constitutive model for coarse-grained dam materials considering state parameter[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 654 - 661. (in Chinese))
- [6] 蔡正银, 李小梅, 韩林, 等. 考虑级配和颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, HAN Lin, et al. Critical state of rockfill materials considering particle gradation and breakage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1357 - 1364. (in Chinese))
- [7] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YIN Zong-ze. *Geotechnical principle*[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)