

文章编号:0559-9350(2012)05-0505-07

堆石料的临界状态探讨

刘恩龙¹, 覃燕林¹, 陈生水², 李国英²

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 高应力水平时堆石料的颗粒破碎对其强度和变形机理有重要影响。为此, 本文对堆石料进行了固结应力从400kPa到4MPa的18组固结排水和固结不排水常规三轴压缩试验, 及6组等向压缩试验。结果表明: (1) 围压低时颗粒破碎轻微, 固结排水时试样剪胀, 固结不排水时孔压先增加后稍有降低; 围压高时颗粒破碎严重, 固结排水时试样剪缩, 固结不排水时孔压也是先增加后降低; 等向压缩时随着平均有效应力增加颗粒逐渐破碎, 但不明显; (2) 不同的固结应力时, 在排水条件和不排水条件下试样都趋于临界状态; (3) 堆石料的临界状态在 $q-p'$ 平面和 $e-\lg p'$ 平面均为非线性变化。最后提出了堆石料的临界状态的数学描述并较好地验证了试验结果。

关键词: 堆石; 颗粒破碎; 临界状态; 三轴试验**中图分类号:** TU452**文献标识码:** A

高堆石坝体中产生的应力会使堆石料产生严重的颗粒破碎^[1-2], 颗粒破碎对堆石体的强度和变形特性影响很大。低应力水平时粗粒土的变形以颗粒之间的滑移、转动为主, 目前有较为成熟的强度理论和本构模型来反映其强度和变形特性^[3]。而高应力水平时堆石料的变形和破坏机理的研究还不成熟, 原因是颗粒破碎对堆石料的影响比较复杂^[4-5], 目前只是提出了一些颗粒破碎指标来反映颗粒破碎的影响^[6-8]。随着荷载的增加, 堆石在颗粒接触位置会逐渐破碎, 所以其颗粒级配也在发生相应变化^[9-10]。在外荷的作用下, 疏松的堆石料发生剪缩而密实的产生剪胀。临界状态是体积和剪应力不再变化, 而剪应变可以无限增加的状态^[11], 研究表明砂土存在临界状态^[12-15]。而堆石料是否也存在临界状态, 这方面的研究较少。高应力水平时产生的颗粒破碎会对堆石料的临界状态产生影响, 随着颗粒破碎程度的增加, 堆石料的临界状态的变化规律也需要从试验和理论方面进行探讨。

为了探讨堆石料在颗粒破碎时的临界状态及颗粒破碎对其变形和破坏机理的影响, 进行了18组固结排水和固结不排水常规三轴试验和6组等向压缩试验, 研究了堆石的临界状态, 并提出了描述其变化规律的数学表达式。研究成果为建立堆石料状态相关的本构模型提供了理论依据。

1 试验概况

试验设备为高压三轴试验设备, 见图1(a)。试样尺寸为 $\Phi 300\text{mm} \times 600\text{mm}$ 。试验所用土料是某堆石坝的主堆石料, 为闪长岩, 颗粒比重为2.82, 天然含水率4.5%, 照片见图1(b)。采用干法制样, 最大粒径为60mm, 制样完成的照片见图1(c)。试验土料的初始级配曲线见图1(d)。

进行固结排水、固结不排水和等向压缩等3种应力路径的三轴试验, 并对每组试验后的土料进行颗粒分析来研究破碎程度对堆石料力学性质的影响。固结排水和固结不排水试验的围压分别为400、800、1 200、1 600、2 000、2 500、3 000、3 500和4 000kPa; 等向压缩试验先固结到围压为200kPa, 然后分别等向加载到800、1 300、2 000和4 000kPa。

收稿日期: 2010-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90815024, 51009103); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200801014)

作者简介: 刘恩龙(1976-), 男, 河南商丘人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土的本构关系和数值分析等研究。

E-mail: liuenlong@scu.edu.cn

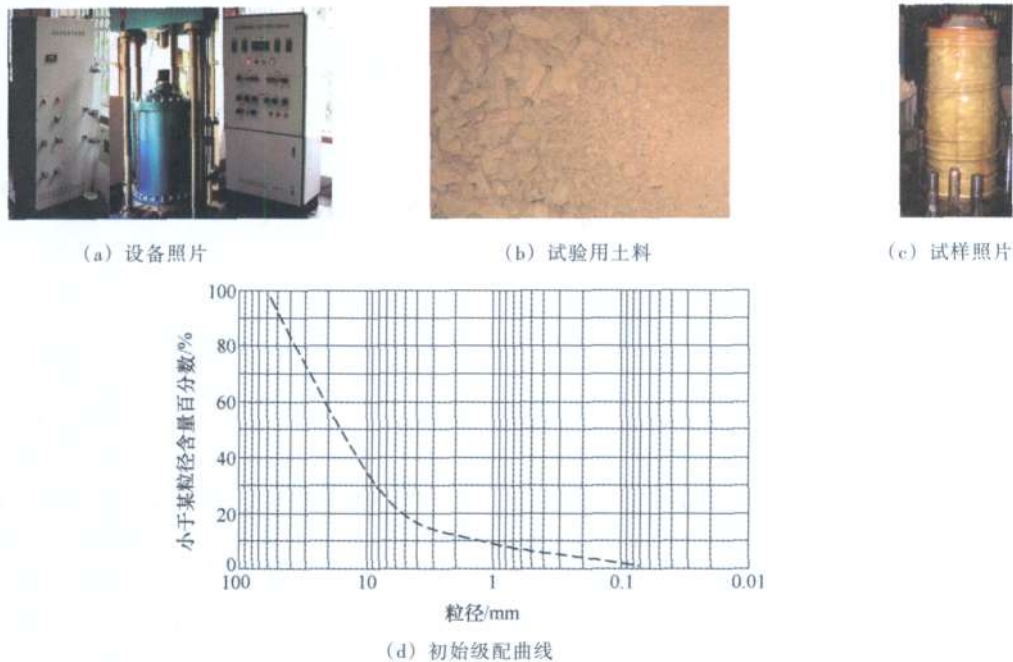


图1 试验设备、堆石料及级配曲线

2 试验结果及分析

2.1 固结排水试验结果 图2为固结排水试验的应力-应变和体变-应变关系曲线，应变以压缩为正，应力以受压为正。从图2(a)的偏应力-轴向应变关系曲线中可知围压低时试样稍有软化，围压高时试样为应变硬化，随着应变的增加应力最终趋于稳定值；从图2(b)的偏应力-径向应变关系曲线中可知径向一直是膨胀的，最终偏应力都趋于稳定值；从图2(c)的体变-轴向应变关系曲线中可知试样总体上是剪缩的，但是在围压低时土样有剪胀发生、围压高时土样则一直剪缩，剪胀和剪缩的分界围压值约为800kPa。从颗粒破碎的影响分析，围压高时颗粒破碎严重。随着试样所受的围压逐渐增加，颗粒破碎会增加，这有助于试样表现剪缩性状。在不同的围压下排水剪切时，在轴向应变达到约16%时偏应力和体变都达到稳定值，即达到了临界状态。稳定的判断标准为体变增量与当前体变之比绝对值小于0.01，表示为 $\left|(\varepsilon_{v, n+1} - \varepsilon_{v, n}) / \varepsilon_{v, n}\right| \leq 0.01$ ，其中 n 加载级。

2.2 固结不排水试验结果 图3为固结不排水试验的应力-应变和孔压-应变关系曲线。从图3(a)的偏应力-轴向应变关系曲线中可知不同围压作用下试样均表现为应变硬化，最终在应变较大时应力趋于稳定值；从图3(b)的偏应力-径向应变关系曲线中可以看出径向一直是膨胀的，最终偏应力都趋于稳定值；从图3(c)的孔压-轴向应变关系曲线中可知随着轴向应变的增加孔压是逐渐增加，达到峰值后逐渐减小，并且围压越大产生的孔压越大。在不同的围压下进行固结不排水剪切时，最终也达到稳定的状态，即达到了临界状态。稳定的判断标准为孔压增量与当前孔压之比绝对值小于0.01，表示为 $\left|(u_{n+1} - u_n) / u_n\right| \leq 0.01$ ，其中 n 加载级。

2.3 等向压缩试验结果 图4为等向压缩试验得到的体变-平均有效应力关系曲线，可见随着平均应力的增加体变逐渐增大。在最大平均应力(有效应力)较小时，颗粒破碎很少发生(由图5(c)粒径级配曲线可以分析得到)，得到的体变曲线基本相同；随着最大平均应力(有效应力)的增加，颗粒破碎较严重，使得体积收缩较多。

2.4 粒径级配曲线的演化 试验完成后，对堆石料进行筛分，就可以得到粒径级配曲线，然后与初始级配曲线进行比较，就可以判断出颗粒的破碎程度。图5为固结排水试验、固结不排水试验和等向压缩试验在达到稳定状态时的粒径级配曲线。由三轴试验结果可知，与初始级配相比，达到稳定状

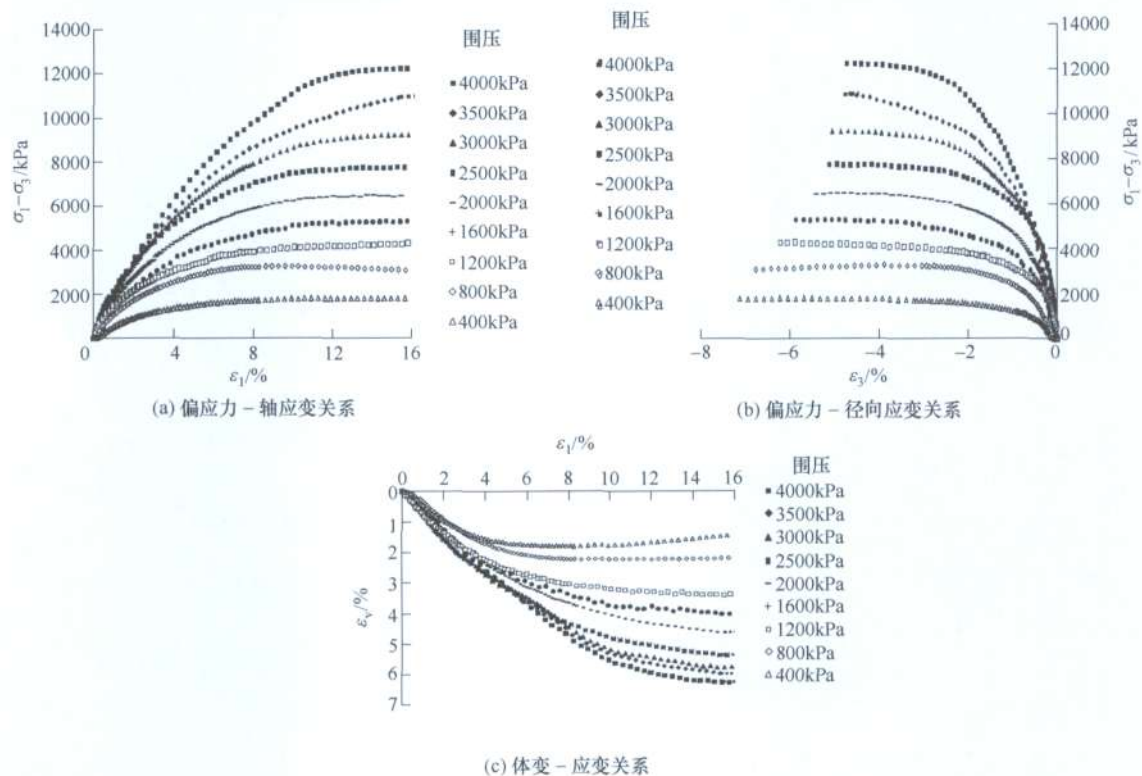


图2 固结排水三轴试验结果

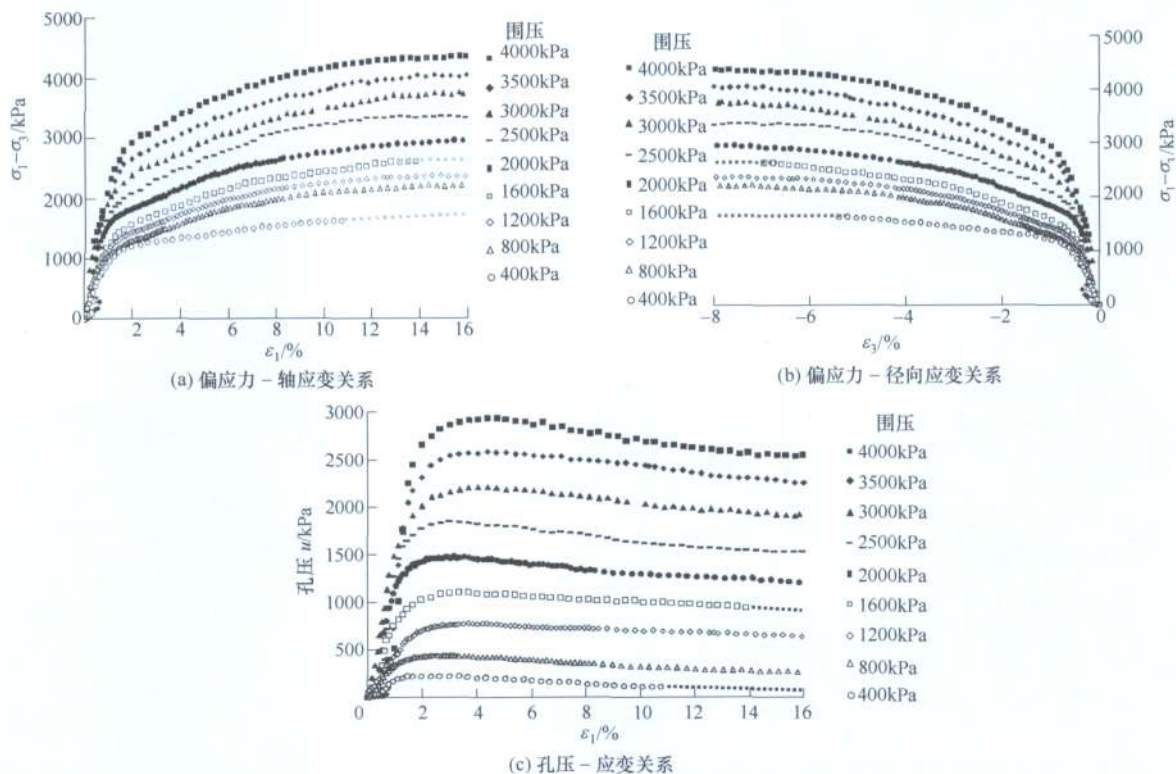


图3 固结不排水三轴试验结果

态时试样的粒径级配发生了很大的变化。随着固结应力的增加，稳定状态时细颗粒的含量逐渐增加。由等向压缩试验结果可知，随着最大等向固结压力(平均有效应力)的增加，颗粒破碎的程度逐渐增加，与初始级配相比，细颗粒的含量也逐渐增加。

2.5 颗粒破碎对应力路径的影响 图6为常规三轴压缩试验在固结不排水和固结排水条件下的有效

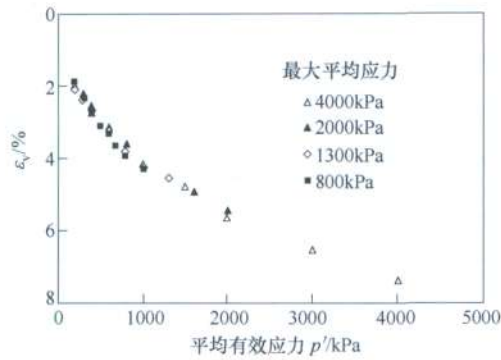


图4 等向压缩试验结果

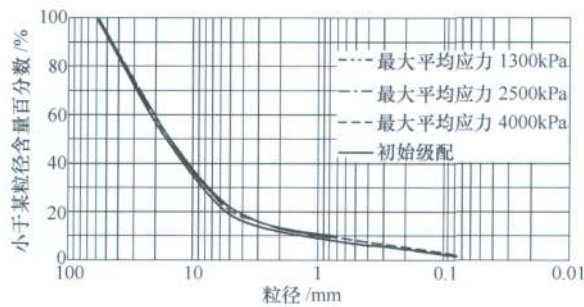
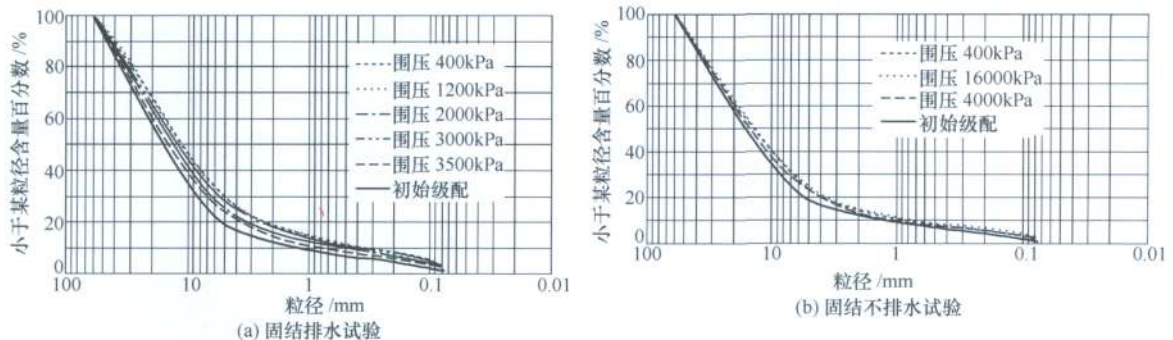


图5 粒径级配曲线

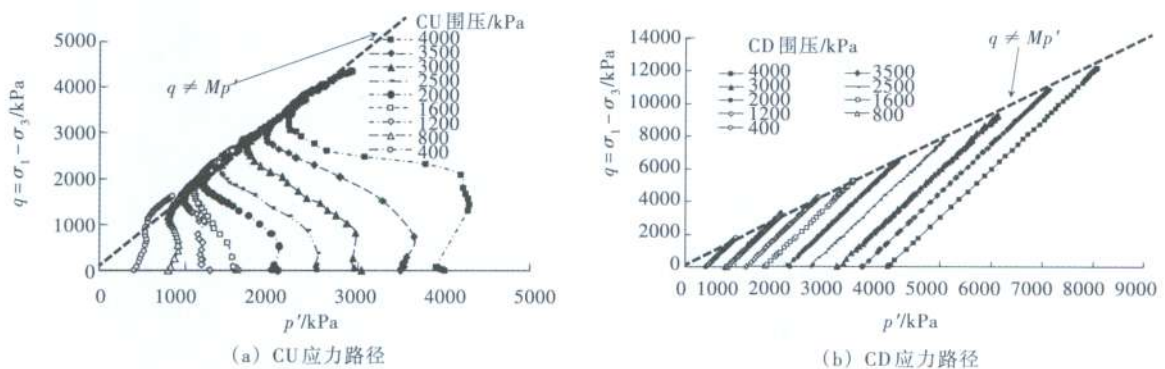


图6 应力路径

应力路径。对于固结不排水试验，在主应力差 $q=\sigma_1-\sigma_3$ 达到最大值时，不同固结围压下试样均趋于临界状态。随着平均有效应力 $p'=(1/3)(\sigma_1'+2\sigma_3')$ 的增加，剪应力逐渐增加，当平均有效应力达到最小值后剪应力继续增加试样趋于临界状态。对于固结排水试样，在主应力差 q 达到最大值时，不同固结围压下试样也均趋于临界状态。从图6可见，试样在达到临界状态时所满足的强度包线不再是直线变化，而是非线性变化。强度包线呈非线性的原因是：应力水平较低时堆石料剪胀且伴有轻微的颗粒破碎，而应力水平较高时，堆石料颗粒破碎为主。由于颗粒破碎的影响，在 $q-p'$ 平面中的临界状

态线 q 随 p' 的增加呈非线性变化。

3 临界状态的讨论

已有试验结果^[11]初步表明,对于不同初始密实度的堆石料,在常规固结排水三轴试验中,在某一固结压力下,堆石料会达到临界状态。以下采用上述常规三轴固结不排水和固结排水试验结果进一步探讨堆石料的临界状态。

3.1 $q-p'$ 平面中的临界状态线 Casagrande 和 Roscoe 等人定义的临界状态^[16]为:在持续剪切荷载作用下当主应力差和孔隙比为常值的状态即为临界状态。由图2、图3和图6可知,对于固结不排水试验,在某一围压下随着轴向应变的增加,偏应力趋于稳定值,孔压也趋于稳定值,有效应力路径 $q-p'$ 平面中试样在临界状态时呈非线性变化;对于固结排水试验,在某一围压下随着轴向应变的增加,偏应力趋于稳定值,体变也趋于稳定值,有效应力路径 $q-p'$ 平面中试样在临界状态时也呈非线性变化。把固结排水和固结不排水试样得到的临界状态时的剪应力和平均有效应力点绘在 $q-p'$ 平面,得到如图7所示的曲线,可见临界状态线偏离图7中的虚点线。在有效应力较低时临界应力比高于直线的临界状态线,而有效应力较高时临界应力比低于直线的临界状态线(斜率 $M_t=1.539$)。其原因是:应力水平较低时(即: $\eta=q/p'>M_t=1.539$),堆石料的颗粒破碎轻微,变形以剪胀为主;应力水平较高时(即: $\eta=q/p'<M_t=1.539$),堆石料的颗粒破碎严重,变形以体缩为主。参照已提出的堆石料的强度包线表达式^[17],可以给出在 $q-p'$ 平面上堆石料达到临界状态时的表达式:

$$q=A(p')^B \quad (1)$$

其中, A 、 B 为材料参数。对于本试验的堆石料, $A=3.738$ 和 $B=0.893$ 。

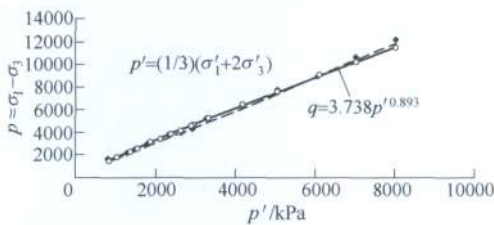


图7 $q-p'$ 平面中临界状态线

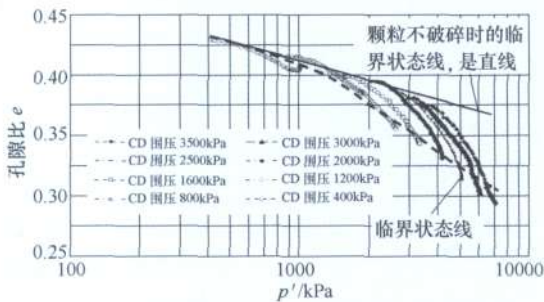


图8 $e-\lg p'$ 关系曲线

3.2 $e-p'$ 平面中的临界状态线 图8为固结排水试验得到的在不同围压作用下孔隙比 e 与平均有效应力 p' 关系曲线,达到临界状态时 $e-\lg p'$ 关系曲线不是直线,而是曲线。原因是:在应力水平较低时,颗粒稍有破碎,临界状态线近于直线;随着应力水平的提高,颗粒逐渐破碎,体积收缩逐渐增多,达到临界状态时的孔隙比在 $e-\lg p'$ 平面中逐渐偏离直线,呈曲线分布。

把固结排水和固结不排水试验得到的临界状态线与平均有效应力绘在 $e-\lg p'$ 平面中,得到图9所示结果,同时示意出颗粒不破碎时的临界状态线。随着应力水平的提高颗粒逐渐破碎,临界状态线逐渐偏离了颗粒不破碎时以直线示意的临界状态线。图9同时给出了等向压缩时的等向固结线,因为等向压缩时颗粒有轻微的破碎,所以等向固结线基本上成直线分布(斜率为 -0.0585)。

3.3 考虑颗粒破碎时 $e-p'$ 平面中临界状态线的数学描述 由以上试验结果的分析可知,随着应力水平的提高,堆石体逐渐发生颗粒破碎,达到临界状态时的临界状态线在 $e-\lg p'$ 平面中是一逐渐偏离初始颗粒不破碎时呈直线的临界状态线的曲线。对于堆石来说,颗粒的破碎使得其临界状态时的粒径级配与初始级配相比发生了很大变化。由此,我们定义同样级配的试样是同一种材料,那么初始试样在加荷的过程中由于颗粒的破碎(即级配在变化)从一种级配材料逐渐变化成为了另外一种级配不同的材料。级配不同的试样都相应的对应某一临界状态,所以破碎程度不同的试样达到不同的

临界状态。由图9的试验结果，颗粒破碎轻微时临界状态线几乎与等向压缩线的初始段平行(或者，因为等向压缩时应力水平较低其颗粒破碎轻微，所以认为等向固结线在 $e-\lg p'$ 平面中的斜率为常数)，如果以颗粒不破碎时的临界状态线为基准(图9中的直线)，那么找出其与颗粒破碎时的临界状态线的孔隙比的差值，就可以把颗粒破碎时在 $e-\lg p'$ 平面中呈曲线的临界状态线描述出来。

如图10所示，以颗粒不发生破碎时所对应的临界状态为参考临界状态，则可以把不同破碎程度的试样的临界状态表示出来。图10中参考临界状态线用下式表示：

$$e_{cro} = e_{\lambda} - \lambda \lg p' \quad (2)$$

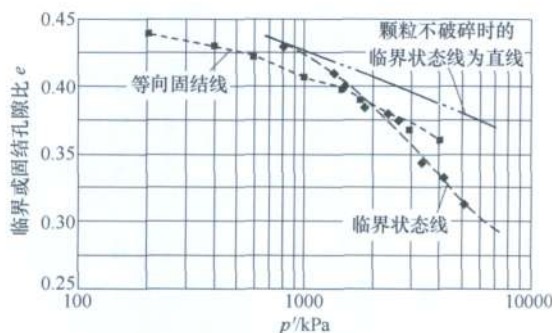


图9 固结或临界孔隙比-平均有效应力曲线

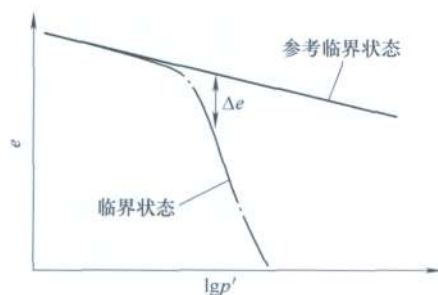


图10 临界状态线

式中： e_{cro} 为参考临界状态线的孔隙比； p' 为平均有效应力； e_{λ} 和 λ 为材料常数(其中 e_{λ} 为 $p'=1\text{kPa}$ 时所对应的孔隙比， λ 为斜率)。则颗粒破碎时的临界状态线可用下式表示为：

$$e_c = e_{cro} - \Delta e \quad (3)$$

式中： e_c 为颗粒破碎时的临界状态线的孔隙比； Δe 是随着颗粒的破碎程度和应力水平的变化而变化的，故 Δe 可以表示为破碎指标 B_1 (用来表示颗粒的破碎程度) 和 p' 的函数：

$$\Delta e = f(B_1, p') \quad (4)$$

则得到下式：

$$e_c = e_{cro} - f(B_1, p') \quad (5)$$

把式(2)代入到式(5)得到临界状态线的表达式为：

$$e_c = e_{\lambda} - \lambda \lg p' - f(B_1, p') \quad (6)$$

颗粒破碎程度随着应力水平的增加逐渐增加，所以破碎指数 B_1 可以表示为平均有效应力的函数，为简化起见，采用下式来表示临界孔隙比随平均有效应力的变化：

$$e_c = e_{\lambda} - \lambda \lg p' - \xi \lg(p'/p'_{ci}) \quad (p' > p'_{ci}) \quad (7)$$

其中： p'_{ci} 为 $e-\lg p'$ 平面临界状态线开始出现与直线偏离时对应的平均有效应力(即颗粒破碎开始对体积变形产生影响时对应的平均有效应力)，可以从 $e-\lg p'$ 关系曲线中确定； ξ 为破碎参数，表示颗粒破碎程度引起的孔隙比的减小。对本文堆石料的试验数据进行分析，得到的参数为： $e_{\lambda}=0.601$ 、 $\lambda=0.0585$ 、 $\xi=0.11$ 和 $p'_{ci}=1261.78\text{kPa}$ 。采用式(7)计算得到的临界孔隙比与试验结果的对比如图11所示。

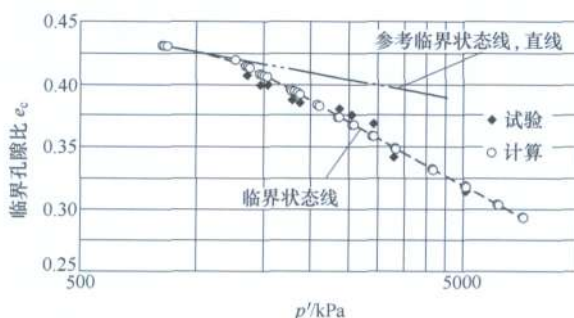


图11 临界状态孔隙比 e_c-p' 关系曲线

4 结论

通过固结排水、固结不排水常规三轴试验和等向压缩试验,探讨了颗粒破碎对堆石料临界状态的影响,得到结论如下:(1)颗粒破碎对堆石料的变形和破坏机理有很大影响。围压低时颗粒破碎轻微,固结排水时试样剪胀、固结不排水时孔压先增加后稍有降低;围压高时颗粒破碎严重,固结排水时试样剪缩、固结不排水时孔压也是先增加后降低;等向压缩时随着平均有效应力增加颗粒逐渐破碎,但不明显;(2)对于堆石料,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,且在 $q-p'$ 平面和 $e-\lg p'$ 平面临界状态线均为非线性变化;(3)通过与试验结果的对比表明,本文提出的式(1)和式(7)可以较好地模拟堆石料的临界状态线在 $q-p'$ 平面和 $e-\lg p'$ 平面的变化。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 杨光,张丙印,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.
- [3] 沈珠江.理论土力学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [4] Nakata Y, Hyde A F L, Hyodo M, et al. A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test [J]. Geotechnique, 1999, 49(5): 567-583.
- [5] Coop M R, Sorensen K K, Freitas T B, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Geotechnique, 2004, 54(3): 157-163.
- [6] Marsal R J. Mechanical properties of rockfill[C]//Embankment-dam engineering (edited by Hirschfeld R C and Poulos S J.), New York: John Wiley&Sons, 1973.
- [7] Lee K L, Farhoomand I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4(1): 68-86.
- [8] Hardin B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177-1192.
- [9] Einav I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007(55): 1274-1297.
- [10] Wood D M. The magic of sands-the 20th Bjerrum lecture presented in Oslo, 25 November 2005[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44: 1329-1350.
- [11] Roscoe K H, Schofield A N, Wroth C P. On the yielding of soils[J]. Geotechnique, 1958, 8(1): 22-53.
- [12] Been K, Jefferies M G, Hachey J. The critical of sands[J]. Geotechnique, 1991, 41(1): 365-381.
- [13] Konrad J M. Sand state from cone penetrometer tests: a framework considering grain crushing stress[J]. Geotechnique, 1998, 48(2): 201-215.
- [14] Russell A R, Khalili N. A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 1179-1192.
- [15] 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.
- [16] Wood D V. Soil behavior and critical state soil mechanics[M]. New York: Cambridge University Press, 1990.
- [17] De Mello V F B. Reflections on decisions of practical significance to embankment dams[J]. Geotechnique, 1977, 27(3): 279-355.

(下转第519页)

Study on distribution of streambed structures in a typical mountain river basin

LIU Huai-xiang^{1, 2}, WANG Zhao-yin², YU Guo-an³, LU Yong-jun¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Tsinghua University, Beijing 100084, China*;

3. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: Streambed structures have developed in many mountain rivers as a result of fluvial morphology. They influence the further morphology process in some aspects such as channel stability enhancement. The Diaoga River was chosen as an example of a certain typical mountain river basin, and a field investigation was carried out in that river to study the distribution of streambed structures and their relationship with geomorphology. The results indicate that in the fluvial morphology process the flow and structures adjust with each other and approach the final equilibrium. The more intense streambed structure it is, the greater stream power in consumption and steeper channel slope can be maintained in equilibrium state. If the structures are not compatible with the flow, the status will be unbalanced and the river bed will be scoured. In some severe incised river sections such as V-shape valley, strong structures often developed and sustained high slope, resulting in *steps* in longitudinal profiles.

Key words: mountain river; streambed structures; erosion and incision; investigation in natural rivers

(责任编辑: 吕斌秀)

(上接第 511 页)

Investigation on critical state of rockfill materials

LIU En-long¹, TAN Yan-lin¹, CHEN Sheng-shui², LI Guo-ying²

(1. *Sichuan University, Chengdu 610065, China*;

2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The grain crushing of rockfill materials with high stress level has significant influence on its strength and deformation mechanisms. The soil mechanics theory based on critical state concept can describe the stress-strain relationship of reconstituted soil materials successfully, but currently for rockfill, few studies are conducted on influence of grain crushing on critical states and mathematical description of critical state line. The consolidation drained and undrained triaxial compression tests of 18 sets with consolidation stress ranging from 400kPa to 4MPa and isotropic compression tests of 6 sets were conducted on rockfill materials. The results demonstrated experimentally that: (1) when the consolidation confining pressure was low, soil particles crushed slightly, the samples dilated under drained conditions and the pore pressure increased firstly then reduced slightly; when the consolidation confining pressure was high, soil particles crushed heavily, the samples contracted under drained conditions and the pore pressure increased also firstly then reduced slightly; for the isotropic compression tests, with the increase of mean effective stress the soil particles broke up gradually but very small; (2) for all the consolidation confining pressures, the samples tended to critical state under drained and undrained conditions; (3) the critical state of rockfill in q - p' plane and e - $\lg p'$ plane behaved nonlinear. Finally a formula describing the critical state of rockfill was proposed and verified well with test data.

Key words: rockfill; grain crushing; critical state; triaxial test

(责任编辑: 李琳)