

不同应力路径下绢云母片岩粗粒料力学特性试验研究

秦尚林¹, 杨兰强^{1,2}, 高惠¹, 陈善雄¹, 罗伟锦²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315010)

摘要: 绢云母片岩粗粒料大量用于谷城—竹溪高速公路路基填筑, 为研究不同应力路径下绢云母片岩粗粒料的力学特性, 采用大型三轴试验机, 对绢云母片岩粗粒料分别进行常围压下的固结排水、固结不排水三轴试验以及等 p 应力路径下的固结排水试验。研究表明, 低围压条件下, 应力—应变曲线均表现为应变硬化型, 但是在高围压条件下, 却出现了应变软化现象。在整个试验过程中, 体积应变均以剪缩为主, 并没有出现低围压剪胀的现象; 并通过分析该粗粒料的破碎特征阐述了出现这种反常现象的原因。另外, 通过对不同应力路径下的绢云母片岩粗粒料进行强度分析, 验证了 Duncan 非线性强度准则对绢云母片岩粗粒料具有良好的适用性。

关键词: 土力学; 绢云母片岩粗粒料; 应力路径; 力学特性; 颗粒破碎

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)09-1932-07

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF COARSE AGGREGATES OF SERICITE SCHIST UNDER DIFFERENT STRESS PATHS

QIN Shanglin¹, YANG Lanqiang^{1,2}, GAO Hui¹, CHEN Shanxiong¹, LUO Weijin²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Zhejiang Engineering Investigation Institute, Ningbo, Zhejiang 315010, China)

Abstract: Coarse aggregates of sericite schist are widely used in the construction of Gucheng—Zhuxi expressway as subgrade fillings. In order to study the mechanical properties of coarse aggregates of sericite schist, a series of large-scale triaxial tests under different stress paths were carried out, including the conventional drained triaxial, conventional undrained triaxial and constant p tests. All of the stress-strain curves under the low confining pressures exhibited the strain hardening phenomenon. However, the stress-strain curves exhibited the weak strain softening behavior under the high confining pressures. The volumetric strains were found to be mainly shear contraction under different confining pressures, and no shear dilatancy behavior appeared under low confining pressure. The reason of the abnormal strain change behaviour was explained through the analysis of the breakage characteristics of particles. In addition, it is verified that the Duncan's nonlinear strength criterion has a good applicability for the sericite schist coarse aggregates.

Key words: soil mechanics; coarse aggregates of sericite schist; stress path; mechanical property; particle breakage

1 引言

粗粒料通常具有压实性能好、透水性强、填筑

密度大、抗剪强度高、沉陷变形小、承载力高等工程优点, 且在自然界分布广泛、储量丰富, 广泛应用于土石坝、公路、铁路、机场、堤坝、人工筑岛及地基处理等建筑工程^[1]。但是由于粗粒料的颗粒

收稿日期: 2013-07-01; **修回日期:** 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079142); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05); 湖北省交通科技项目(20117003.3)

作者简介: 秦尚林(1973-), 男, 博士, 1995年毕业于东北大学采矿工程专业, 现任副研究员, 主要从事特殊土工程特性与处治方法及灾害防治技术等方面的研究工作。E-mail: qinshlin@sina.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.025

粒径较大，且有潜在缺陷、棱角丰富等特点，导致其在应力作用下易发生颗粒破碎，使得各种填筑工程的稳定和沉降问题十分突出^[2-3]。这些问题已经引起了工程界的专家和学者的高度重视。自 20 世纪 60 年代以来，国内外许多学者对粗粒土的压实特性、常规三轴试验以及高压、复杂应力状态及循环荷载作用下的工程性质进行了深入研究^[4-7]。但总体而言，由于粗粒土的复杂性，目前对粗粒土的研究仍处于探索阶段，其强度和变形特性与内在机制尚未完全掌握，还不能很好地指导工程实践。目前在粗粒土填筑施工与检测过程中主要还是依靠经验，由此导致的填筑体不均匀沉降、沉陷或坍塌等多种病害在所难免，进而影响结构物的功能^[8]。

鄂西地区谷城—竹溪(谷竹)高速公路存在大量的绢云母片岩，岩石风化程度严重，强度较低。现场碾压试验结果表明，如仅按照规范、常规经验，把绢云母片岩视为普通的软岩粗粒料对待，压实效果非常不理想，只能做废弃处理。如果绢云母片岩能够作为路堤填料被利用，不仅可以解决当地路堤填料缺乏、弃土占用农田的问题，而且能起到节省投资、保护环境的作用。目前对绢云母片岩粗粒料的强度、变形特性研究甚少，对于这种软岩粗粒料的力学特性还不太清楚^[9-13]。因此，开展不同应力路径下软岩粗粒料的强度、变形特性研究具有意义。

鉴于此，采用大型静动三轴试验机，对绢云母片岩粗粒料的饱和试样，分别进行固结排水试验、固结不排水试验以及等体积应力(以下简称等 p ，其中， $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$)应力路径试验。以便深入了解绢云母片岩粗粒料的力学特性，为构建考虑颗粒破碎和颗粒形态的本构模型提供分析依据，也为谷竹高速公路路基填筑工程及其他类似工程的稳定性和变形沉降分析提供参考。

2 试验材料和试验方案

2.1 试验材料

试验材料取自谷竹高速公路现场的绢云母片岩粗粒料。绢云母片岩属于极软岩，多见灰绿色、浅灰色，其主要矿物成分为云母(35%)、绿泥石(35%)、石英(25%)和长石(5%)。绢云母片岩呈鳞片状结构，片状构造，极易沿片理面劈开成极薄片状，在外力作用下，极易发生颗粒破碎。现场绢云母片岩母岩结构大部分已被破坏，构造不清晰，节理、裂隙十分发育，岩体较破碎，如图 1 所示。



图 1 绢云母片岩

Fig.1 Sericite schist

2.2 试验方案

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所 2 000 kN 大型多功能静动三轴试验机上进行。试样高度 600 mm、直径 300 mm。根据试验规程，试验用料允许的最大粒径为 60 mm。由于现场采集的绢云母片岩粗粒料中，有一部分颗粒粒径大于 60 mm，为此，在进行试验之前需进行级配缩尺。本文采用等量替代法对现场级配进行缩尺，如图 2 所示。试样标准最大干密度为 2.01 g/cm^3 ，室内试验按 98% 压实度控制，因此，制样初始干密度控制为 1.98 g/cm^3 。

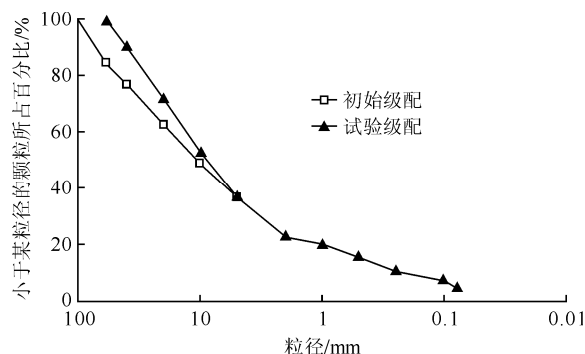


图 2 绢云母片岩粗粒料的级配曲线

Fig.2 Gradation curves of coarse aggregates of sericite schist

对绢云母片岩粗粒料进行常规三轴固结排水、固结不排水以及等 p 等不同应力路径试验，如图 3 所示。

(1) 常规三轴固结排水试验(DCTC)选取 6 种围压，分别为 200, 400, 600, 800, 2 000, 3 000 kPa。采用位移控制，轴向剪切速率为 1.0 mm/min。当轴向应变达到 17% 时，结束试验。试验期间上、下孔隙水阀始终打开，保持排水顺畅。

(2) 常规三轴固结不排水试验(UCTC)选取 3 种围压，分别为 200, 400, 600 kPa。采用位移控制，轴向剪切速率为 1.0 mm/min。当轴向应变达到 17% 时结束试验。试验期间上、下孔隙水阀始终关闭。

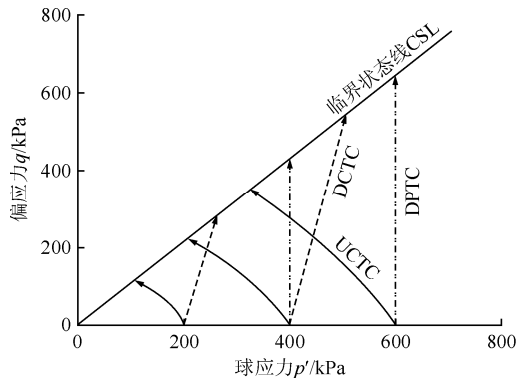


图3 应力路径示意图

Fig.3 Sketch of stress paths

(3) 等 p 试验(DPTC)选取 4 种球应力, 分别为 400, 600, 800, 1 000 kPa。试验采用应力控制, 轴向力保持增长速率+0.035 kN/s, 围压降低速率保持在 - 0.001 MPa/s, 当试验轴向应变达 15%时结束试验。试验期间上、下孔隙水阀始终打开, 保持排水顺畅。

3 大型常规三轴试验结果与讨论

3.1 应力 - 应变特性分析

图 4 为固结排水试验的偏应力 - 轴向应变的关系曲线。

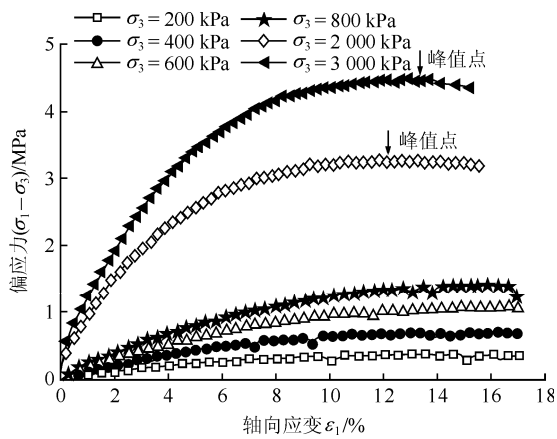


图4 DCTC 试验的偏应力 - 轴向应变关系曲线

Fig.4 Curves of deviatoric stress-axial strain in DCTC

由图 4 可知, 偏应力峰值随围压增大而增大。试样在低围压(200 ~ 800 kPa)下, 偏应力 - 轴向应变曲线均表现为应变硬化型。但是当围压达到 2 000 和 3 000 kPa 时, 偏应力 - 轴向应变曲线却出现应变微软化的现象, 轴向应变到达峰值强度后偏应力有所降低。一般而言, 不论细粒土还是粗粒土, 在进行三轴试验时, 其应力软化情况大多会发生在低围压阶段, 随着围压的增大, 应力会出现硬化现象,

而本文研究的绢云母片岩粗粒料软化现象却在高围压阶段出现。

为了讨论颗粒破碎对强度和变形的影响, 对本次试验样品试验前、后进行筛分, 并引用 B. O. Hardin^[14]提出的相对颗粒破碎率 B_r 进行统计分析, 发现随着围压的增大, DCTC 试验的相对颗粒破碎率也逐渐增大, 当围压达到 3 MPa 时, 相对颗粒破碎率 B_r 达到 20.59%。而一般粗粒料的相对颗粒破碎率主要集中在 6% 以内^[8, 15-16], 这说明绢云母片岩粗粒料的颗粒破碎非常严重。综合分析认为, 主要是由于随着围压的增大, 颗粒破碎导致级配曲线发生了很大的变化, 使得其强度降低, 因而出现了高围压软化, 低围压硬化的特殊现象。

图 5 为固结不排水三轴试验(UCTC)偏应力 - 轴向应变的关系曲线。由图 5 可知, 偏应力峰值随围压增大而增大。试样在低围压(200 ~ 600 kPa)时, 偏应力 - 轴向应变曲线均表现出硬化型。

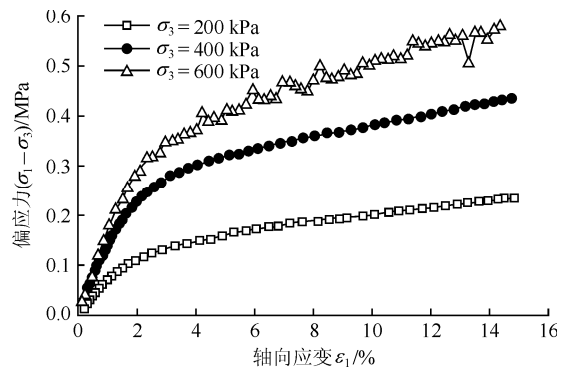


图5 UCTC 试验的偏应力 - 轴向应变关系

Fig.5 Curves of deviatoric stress-axial strain in UCTC

3.2 变形特性分析

绢云母片岩粗粒料 DCTC 试验的体积应变 - 轴向应变关系如图 6 所示。

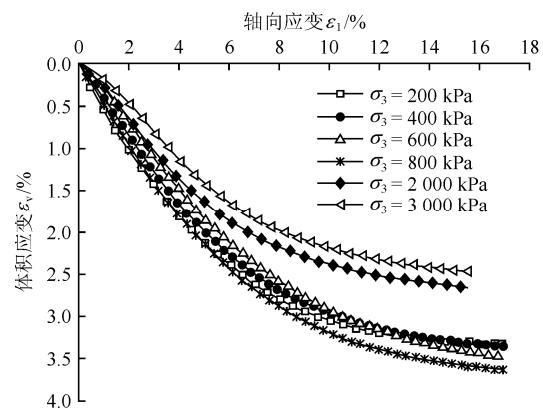


图6 DCTC 试验体积应变 - 轴向应变关系曲线

Fig.6 Curves of volumetric strain-axial strain in DCTC

从图 6 可以看出，围压从 200 kPa 变化到 3 000 kPa，体积应变一直以剪缩为主，并没有出现粗粒料常见的剪胀现象。在剪切过程中，颗粒间往往会经历错动、转动、拔出等，但是本文的绢云母片岩颗粒强度非常低，因此在错动过程中，绢云母片岩出现了折断、破裂等现象，从而抑制了剪胀的发展，如图 7 所示。

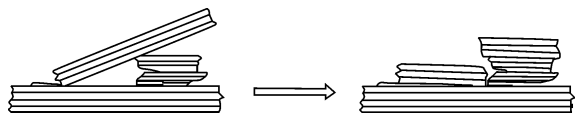


图 7 颗粒破碎示意图

Fig.7 Sketch of particle breakage

为了更好地解释这个问题，这里采用了剪胀因子 D ^[17]，当 $D > 1$ 时，表示剪胀； $D < 1$ 时，表示剪缩。 D 的表达式为

$$D = 1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \quad (1)$$

图 8 为固结排水试验的剪胀因子与轴向应变的关系。由图 8 可知，围压从 200 kPa 变化到 3 000 kPa，随着轴向应变增大，剪胀因子均出现先减小后逐渐增大，并趋近于 1 的现象。说明尽管剪应力引起的体积变形一直朝剪胀的方向发展，但由于绢云母片岩粗粒料在剪切过程中颗粒破碎非常严重，导致在整个变形过程中，颗粒破碎一直抑制剪胀的发展，因此在整个加载过程中，一直表现为体缩。

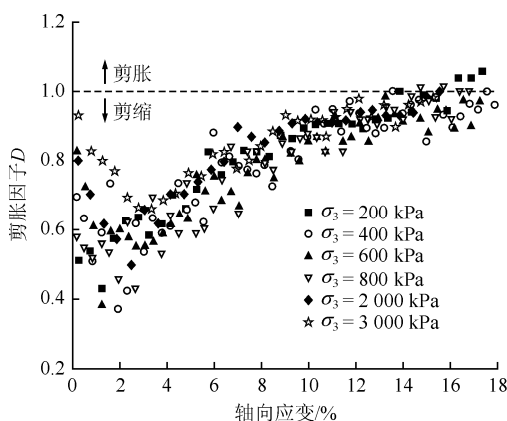


图 8 剪胀因子与轴向应变的关系

Fig.8 Relationships between dilatancy factor and axial strain

4 等 p 试验结果与讨论

4.1 应力-应变特性分析

图 9 为等 p 试验的偏应力与剪应变的关系曲线。由图 9 可知，等 p 试验曲线与常规试验曲线形状大体相似。偏应力 q 随着球应力 p 增大而增大，但是

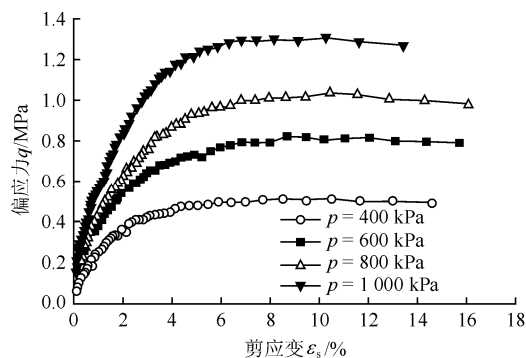


图 9 DPTC 试验偏应力-剪应变关系曲线

Fig.9 Curves of deviatoric stress-shear strain in DPTC

随着球应力 p 的增加，出现了应变软化的现象。当控制 $p = 400$ kPa 时，偏应力 q 到达峰值后基本不变，剪切变形迅速发展，直至破坏。当控制 $p = 1 000$ kPa 时，偏应力 q 大约在剪应变 10% 的位置就达到峰值，随后出现了软化现象。

查阅相关文献^[5, 16]发现，应变软化主要发生在低围压阶段，随着围压的增大，主要呈现硬化特性。而本研究的软岩粗粒料却出现了相反的情况，究其原因，主要是由于软岩粗粒料相较其他堆石料而言，颗粒破碎现象非常严重(等 p 路径下的相对颗粒破碎率 $B_r = 14.94\% \sim 21.13\%$)。其结果导致级配发生了明显的变化，从而使得强度下降很明显。因此，这里出现软化的现象，也是由于颗粒破碎造成的。

4.2 变形特性分析

图 10 为等 p 试验的剪切应变与体积应变的关系曲线。从图 10 中可以看出，随着球应力的增大，体积应变随着剪应变增大而增大。从球应力 $p = 600$ kPa 开始，随着剪应变的增长，体积应变增长非常缓慢，从图 10 中可以看出，球应力 p 从 600 kPa 变化为 1 MPa，最终体应变趋于一致。

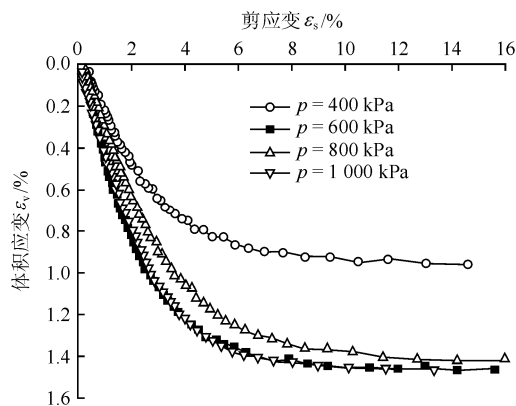


图 10 PPTC 试验的体积应变-剪应变关系曲线

Fig.10 Curves of volumetric strain-shear strain in PPTC

在等 p 应力路径试验中，由于球应力自始至终保持不变。因此，在应力环境中，仅是由剪应力发挥作用。由图 10 可知，随着剪应力的增长，剪切变形变化很大，但是体应变仅产生 1.5% 不到。这说明，剪应力对体积变形影响不大，仅对剪切变形产生明显的影响。另外发现，由于体积应变的变化非常小，可以认为，剪应力对软岩粗粒料的孔隙率造成的影响不大。

5 不同路径下绢云母片岩粗粒料力学特性分析

5.1 强度特性分析

在粗粒料中，由于颗粒的几何堆积，可以在无任何物理和化学引力的体系中引起表观黏聚力^[17]。图 11 为绢云母片岩粗粒料固结排水三轴剪切试验的抗剪强度与强度包线。由图 11 可知，在围压低于 800 kPa 时，其强度包线基本在一条直线上，此时黏聚力 $c = 13.55$ kPa，该黏聚力正是咬合力的反映。由于绢云母片岩颗粒间不存在胶结，因此反映颗粒内部的各种应力的黏聚力非常低，可近似认为绢云母片岩的黏聚力为 0，则峰值内摩擦角可由下式得出：

$$\varphi_p = \arcsin\left(\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}\right) \quad (2)$$

式中： σ'_{1f} ， σ'_{3f} 分别为峰值偏应力时有效大主应力与小主应力试验值。

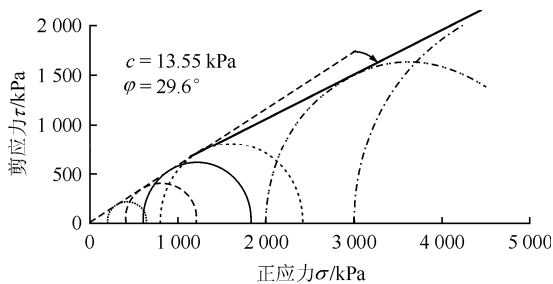


图 11 固结排水试验应力莫尔圆

Fig.11 Mohr circles of stress in consolidated drained triaxial tests

表 1 为绢云母片岩粗粒料在不同应力路径下三轴试验颗粒破坏统计值。表 1 中内摩擦角由式(2)求得，可以明显看出，不同的试验(DCTC，UCTC，DPTC)下，随着围压增大，内摩擦角均逐渐下降。

另外，由图 11 可知，随着围压的增大，特别是当围压达到 2 000 kPa 时，其强度包线有明显的下降趋势。大量的研究表明，由于颗粒破碎导致粗粒料

表 1 绢云母片岩粗粒料的三轴试验参数统计值
Table 1 Measured parameters of coarse aggregates of sericite schist

试验类型	围压/MPa	破坏应变/%	破坏偏应力/MPa	内摩擦角 $\varphi_p / (^\circ)$	相对破碎率 $B_r / \%$
固结排水	0.200	15.0	0.438	31.5	12.9
	0.400	15.0	0.817	30.3	14.9
	0.600	15.0	1.233	30.4	16.2
	0.800	15.0	1.612	30.1	16.8
	2.000	11.8	3.212	26.7	17.7
固结不排水	3.000	12.4	4.469	25.3	20.6
	0.200	15.0	0.235	21.7	14.4
	0.400	15.0	0.434	20.6	15.6
等 p 路径	0.600	15.0	0.577	18.9	16.8
	0.232	15.0	0.503	31.3	14.9
	0.328	10.0	0.815	33.6	16.3
	0.460	10.4	1.021	31.8	19.1
	0.565	10.2	1.304	32.4	21.1

的内摩擦角随着围压的增大而降低。因此，简单的采用莫尔-库仑强度准则，会过大评估高围压下的粗粒料的强度。有研究^[18-19]表明，采用非线性的强度准则与采用线性强度准则相比，其稳定安全系数及最危险滑裂面深度均有明显区别。另外，固结排水试验主要反映长期强度情况，固结不排水试验主要模拟快速施工的过程，等 p 应力路径试验主要反映纯剪应力下的强度情况，因此不同的应力路径反映了不同的工况，其对应的强度也存在一定的差别。因此，为了反映颗粒破碎导致峰值内摩擦角下降的情况，绢云母片岩粗粒料拟采用 J. M. Duncan 和 C. Y. Chang^[20]提出的非线性强度准则(见图 12)，进行强度分析，具体表达式为

$$\varphi_p = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma'_3 / P_a) \quad (3)$$

式中： φ_0 为一个大气压下的内摩擦角， $\Delta\varphi$ 为 σ'_3 增加一个对数周期下内摩擦角 φ 的减小值， P_a 为标准大气压， σ'_3 为有效小主应力。

依据表 1 中固结排水试验的结果，按式(3)进行最小二乘法拟合，求得 $\varphi_0 = 31.7^\circ$ ； $\Delta\varphi = 5.4^\circ$ 。根据固结不排水试验的结果，拟合求得 $\varphi_0 = 23.5^\circ$ ； $\Delta\varphi = 5.6^\circ$ 。由此可见两者斜率基本一致。

由图 12 可知，J. M. Duncan 和 C. Y. Chang^[20]提出的非线性强度准则对绢云母片岩粗粒料的固结排水试验以及固结不排水试验具有良好的适用性，等 p 试验(DPTC)的有效峰值内摩擦角随着围压表现的离散性较大，并没有表现出式(3)的那种规律。由

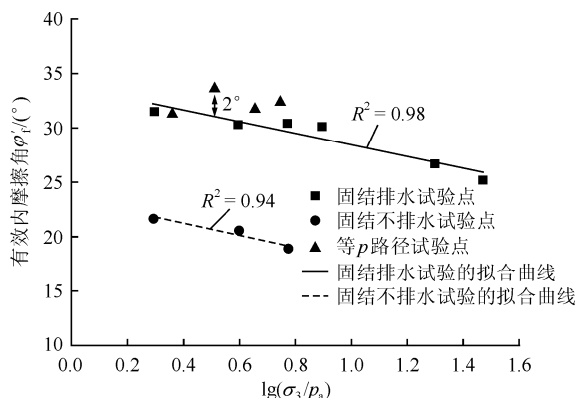


图 12 有效峰值内摩擦角与围压的关系

Fig.12 Relationships between effective peak angle of internal friction and confining pressure

于 DPTC 试验点较少，因此受岩土材料的离散影响较大，规律不明显。但可大致看出等 p 试验(DPTC)的峰值有效内摩擦角随着围压的增大有降低的趋势。DPTC 的有效内摩擦角在同一种围压条件下与 DCTC 相似，在一个狭小的范围内。固结不排水(UCTC)试验得到的峰值有效内摩擦角比固结排水试验求得的内摩擦角要小，位于下限。由于 DCTC，UCTC 以及等 p 试验可代表不同工况下的应力状态，因此可通过图 12 来反映具体工况下的强度情况。

5.2 颗粒破碎对绢云母片岩粗粒料的力学特性的影响

表 1 中还统计了三轴试验结束后，绢云母片岩粗粒料的相对破碎率情况。从表 1 中可以看出，围压越大，绢云母片岩粗粒料的颗粒破碎就越严重。而相同围压情况下，等 p 路径的相对破碎率明显要比固结排水试验和固结不排水试验的相对破碎率大一些，说明颗粒破碎受剪切作用影响更大。

图 4 与 8 中出现的应变微软化均发生在围压较大的阶段，同时无论何种围压，试样体变始终保持在体缩状态。基于常规认识，粗粒料试样的软化一般最有可能发生在低围压阶段，随着围压的逐渐增大，应变逐渐呈硬化型。如果初始干密度较大，大部分硬质粗粒土均易出现剪胀的现象。绢云母片岩粗粒料出现上述反常特征，究其原因，从表 1 中不难发现，DCTC 和 DPTC 中发生应变软化的阶段，颗粒破碎都非常大(DCTC 中围压达到 2 和 3 MPa 时，相对破碎率分别达到 17.6%，20.6%；DPTC 中 $p = 800$ 和 1 000 kPa 时，相对破碎率分别达到 19.1%，21.1%)，颗粒破碎必然引起颗粒重排，细颗粒不断充填到孔隙中，从而引起附加的剪胀性降低，直接影响粗粒料的峰值强度，在颗粒破碎达到一定

程度情况下，应变软化就会出现。本研究的绢云母片岩初始干密度达到 1.98 g/cm^3 ，控制压实度达 98%，在这么大的干密度情况下，体积应变依然保持体缩的状态，综合图 7 的分析，也充分说明颗粒破碎严重抑制了体变剪胀的发展。

6 结论

由于绢云母片岩粗粒料在颗粒形态、母岩强度上与其他粗粒料具有明显的差异性。为此，通过大型三轴试验机，开展固结排水试验(DCTC)、固结不排水试验(UCTC)、等 p 试验(DPTC)，对绢云母片岩粗粒料的应力-应变关系、变形、强度特性进行了分析和探讨，得到了如下几点主要结论：

(1) 在排水与不排水条件下以及等 p 应力路径下，偏应力峰值随围压增大而增大。但是在排水条件下，当围压达到 2 000 和 3 000 kPa 时，应力-应变曲线却表现为弱软化型，轴向应变到达峰值强度后有所降低。等 p 试验中，当控制 $p = 1 000 \text{ kPa}$ ，也出现了软化现象。研究表明，这主要是由于颗粒破碎导致其级配、峰值强度发生了较大的变化，从而出现了低围压硬化而高围压软化的独特现象。

(2) 大量的试验结果表明，粗粒料在低围压状态下，体积应变会出现剪胀现象，但是绢云母片岩粗粒料在排水与不排水条件下以及等 p 应力路径下，不同围压条件下，自始至终没有出现剪胀，体积应变一直表现为剪缩。研究表明，软岩颗粒易破碎的性质，抑制了粗粒料的剪胀发展。尽管在剪切过程中，剪胀效应一直存在，但是颗粒破碎一直在变形中起主导地位，所以体积应变一直表现为体缩。

(3) 对绢云母片岩粗粒料进行的固结排水试验以及固结不排水试验具有良好的适用性。等 p 试验的有效峰值内摩擦角随着围压表现出的离散性较大，并没有表现出式(3)的那种规律。但可大致看出等 p 试验的峰值有效内摩擦角随着围压的增大有降低的趋势。DPTC 的有效内摩擦角在同一种围压条件下并与 DCTC 相似，在一个较小的范围内。因此可以采用 J. M. Duncan 和 C. Y. Chang^[20]提出的非线性强度准则来描述绢云母片岩粗粒料不同应力路径下的强度情况。

参考文献(References)

- [1] 杨光, 孙逊, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1 118-1 122.(YANG Guang,

- SUN Xun, YU Yuzhen, et al. Experimental study of mechanical behavior of a coarse-grained material under various stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 118–122.(in Chinese))
- [2] 日本土工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭熙灵, 文丹, 译. 北京:中国水利水电出版社, 1999: 6–7.(Japanese Soil Engineering Society. Field compaction of coarse soils[M]. Translated by GUO Xiling, WEN Dan. Beijing: China Water Power Press, 1999: 6–7. (in Chinese))
- [3] 薄官林, 小岛. 采用软岩弃渣的大型填土的设计和施工[J]. 中国铁道科学研究院译. 土与基础, 1984, 32(7): 53–59. (BO Gonglin, KOJIMA Kobayashi. Design and construction of large scale subgrade filling with soft rock and waste slag[J]. Translated by China Academy of Railway Sciences. *Soils and Foundations*, 1984, 32(7): 53–59.(in Chinese))
- [4] 陈金锋, 徐明, 宋二祥, 等. 不同应力路径下石灰岩碎石力学特性的大型三轴试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(8): 195–201. (CHEN Jinfeng, XU Ming, SONG Erxiang, et al. Large scale triaxial testing on mechanical properties of broken limestone under various stress paths[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 195–201.(in Chinese))
- [5] 李翀, 何昌荣, 赵红芬. 不同应力路径堆石料大型三轴试验特性研究[J]. *路基工程*, 2009, (6): 134–136.(LI Chong, HE Changrong, ZHAO Hongfen. Experiment study on large scale triaxial tests under different stress pass of rockfill[J]. *Subgrade Engineering*, 2009, (6): 134–136.(in Chinese))
- [6] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2): 254–258.(ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(2): 254–258.(in Chinese))
- [7] 褚福永, 朱俊高, 贾华, 等. 粗粒土卸载–再加载力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1061–1066.(CHU Fuyong, ZHU Jungao, JIA Hua, et al. Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1061–1066.(in Chinese))
- [8] 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.(YANG Guang, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen, et al. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(3): 338–342.(in Chinese))
- [9] 李震, 周辉, 宋雨泽, 等. 考虑硬化软化和剪胀特性的绿泥石片岩力学模型[J]. *岩土力学*, 2013, 34(2): 404–410.(LI Zhen, ZHOU Hui, SONG Yuze, et al. Mechanical model of chlorite schist considering hardening-softening and dilatancy characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 404–410.(in Chinese))
- [10] 刘胜利, 陈善雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(12): 3616–3623.(LIU Shengli, CHEN Shanxiang, YU Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(12): 3616–3623.(in Chinese))
- [11] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 531–537.(XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(I): experimental results[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 531–537.(in Chinese))
- [12] 于德海, 彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(1): 205–211.(YU Dehai, PENG Jianbing. Experimental study of mechanical properties of chlorite schist with water under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 205–211.(in Chinese))
- [13] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 锦屏绿片岩力学特性及长期强度特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(8): 1642–1649.(ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wenqi. Study of mechanical properties and long-term strength of Jinping green schist[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1642–1649.(in Chinese))
- [14] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(10): 1177–1192.
- [15] 魏松, 朱俊高, 钱七虎, 等. 粗粒料颗粒破碎三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 533–538.(WEI Song, ZHU Jungao, QIAN Qihu, et al. Particle breakage of coarse-grained materials in triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 533–538.(in Chinese))
- [16] 孔德志, 张丙印, 孙逊. 人工模拟堆石料颗粒破碎应变的三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(3): 464–469.(KONG Dezhi, ZHANG Bingyin, SUN Xun. Triaxial tests on particle breakage strain of artificial rockfill materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 464–469.(in Chinese))
- [17] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 119–120.(LI Guangxin. *Advanced soil mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 119–120.(in Chinese))
- [18] 吕擎峰, 殷宗泽. 非线性强度参数对高土石坝坝坡稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2708–2711.(LU Qingfeng, YIN Zongze. Effect of strength nonlinearity on slope stability of high rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2708–2711.(in Chinese))
- [19] CHARLES J A, SOARES M M. The stability of slopes in soils with nonlinear failure envelopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(3): 397–406.
- [20] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 1970, 96(SM5): 1629–1653.