

DOI: 10.11779/CJGE201902013

单试件重复加载法测定岩石残余强度指标

邓华锋, 张恒宾, 李建林, 段玲玲, 支永艳, 潘 登

(三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 在以往单试件法基础上, 结合岩石三轴压缩试验残余阶段的变形特点, 研究提出了一种单试件重复加载法, 测定岩石残余阶段的强度指标。研究结果表明: ①常规多试件三轴压缩试验和单试件重复加载试验结果对比分析发现, 岩样的残余强度主要由加载时的围压控制, 与初始加载破坏的围压关系不明显; ②单试件重复加载法得到的岩样残余阶段的强度指标与常规三轴压缩试验得到的结果基本一致, 而且试验结果离散性明显较小, 说明该方法是合理可行的; ③为了更好地运用本文所提出的单试件重复加载法, 建议在重复加载时尽量选择较大的围压值, 从而保证重复加载过程中岩样的剪切破坏面处于紧密的接触状态, 以更好地反映岩样在残余阶段的强度特征。

关键词: 单试件法; 重复加载; 残余强度; 离散性

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)02-0348-07

作者简介: 邓华锋(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

Single specimen repeated loading method for determination of residual strength parameters of rock

DENG Hua-feng, ZHANG Heng-bin, LI Jian-lin, DUAN Ling-ling, ZHI Yong-yan, PAN Deng

(Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Hubei

Province, Yichang 443002, China)

Abstract: Based on the single test method and the deformation characteristics of residual phase of rock, a single specimen repeated loading method is proposed to measure the residual strength parameters of the rock. The results show that: (1) By comparing the results of the conventional triaxial tests with those of the single specimen repeated loading tests, the residual strength of rock samples is mainly controlled by the confining pressure of loading, and it is not obviously related with the initial confining pressure; (2) The strength parameters of the residual phase of rock samples obtained by the single specimen repeated loading method are basically consistent with those of the conventional triaxial tests, and the dispersion of the test results is significantly smaller, indicating that the proposed method is reasonable and feasible; (3) In order to better use the proposed single specimen repeated loading method, it is recommended to choose the larger confining pressure during the repeated loading process so as to ensure the shear failure surface of rock samples to be in close contact state, which can reflect the strength characteristics of rock samples in residual phase better.

Key words: single specimen method; repeated loading; residual strength; dispersion

0 引 言

岩石力学试验一般都是破坏性试验, 在常规的岩石三轴压缩试验中, 一个岩样一般只能得到一组(σ_1 , σ_3), 要得到岩石的强度包络线确定其强度参数, 相关岩石力学试验规范^[1]建议岩样的数量至少为 5 个, 对应的这种方法通常称为多试件法。然而, 工程中的各类岩石都经历过长期地质作用, 是一种典型的非均质的材料, 内部包含各种微细观的裂纹、孔隙等缺陷, 即使是从同一块岩石上取芯制备的岩样, 试验结果的离散性仍然无法避免, 甚至出现围压增大而抗压强度降低的反常现象^[2]。虽然通过重复性试验可以在一定

程度上控制试验结果的离散性, 但是对岩石力学试验结果分析来说仍然是一件困难的事情。针对这个问题, 较多学者在试样制备精度、试样筛选和试验结果修正^[3-4]等方面开展了大量的研究工作, 为控制试验结果的离散性提供了较好的思路, 但无法从根本上解决岩样本身差异对试验结果离散性的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679127, 51439003); 湖北省技术创新专项重大项目(2017ACA189); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金项目(2015KDZ04); 三峡大学 2015 级硕士学位论文培优基金项目(2017YPY018)

收稿日期: 2017-12-15

***通讯作者** (E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn)

20 世纪 80 年代, 有学者研究提出了利用单个试件进行多级加载, 进而获得多级强度的方法, 通常称为单试件法^[5-13]。Kovari 等^[5-6]、Peter 等^[7]、苏承东等^[8]、吴玉山等^[9]、张磊等^[10]、程鸿鑫等^[11]、闫明礼等^[12]采用单试件的方法对砂岩、大理岩、泥岩等进行了试验研究, 并分析了单试件法和常规多试件法试验结果的差异; 李宏哲等^[13]采用单试件多级卸荷破坏试验方法确定了卸荷强度参数。徐颖等^[14]、Hou 等^[15]、Yan 等^[16]将单试件法的思路应用到剪切试验中, 对软岩和复合材料等进行了单试件多级直剪试验。单试件分级加载方法的思路清晰, 操作方法比较简单, 可以较好地控制试验结果的离散性, 在岩石力学试验中得到了比较广泛的应用和认可, 国际岩石力学学会也将这个方法列入到岩石三轴压缩强度的建议方法之一^[6]。但相关研究表明^[17-18], 在单试件分级加载过程, 每级加载都会对岩样造成损伤, 导致除第一级围压之外的每一级围压对应的强度要明显小于同等围压的常规三轴抗压强度。刘保国等^[17]、宋晓明等^[18]考虑分级加载的损伤效应, 研究提出了相应的修正方法。

工程中岩体的实际受力状态复杂, 较多的工程岩体往往都是在峰后阶段承载的, 现场也可见较多边坡、隧洞的岩体都是带裂缝工作的。因此, 在工程岩体稳定分析评价中, 岩石峰后阶段的力学特性及残余强度指标也是非常重要的。在以往的研究中, 岩石的残余强度通常是通过多试件三轴试验获得, 其离散性与峰值强度的规律类似, 而相关单试件法在岩石残余强度分析中还鲜有报道。

基于此, 本文拟在以往单试件法基础上, 结合岩石三轴压缩试验过程中残余阶段变形特点, 研究提出一种单试件重复加载法, 测定岩石的残余强度指标。

1 单试件重复加载法的思路

以往单试件分级加载应力路径如图 1 所示^[5]。这种方法在分级确定岩样的峰值强度时具有较好的适用性, 但是如果将这种方法直接应用与分级确定岩样的残余强度将会出现困难, 主要是由于岩样在达到残余阶段时的变形往往较大, 如果在此基础上直接再进行分级加载至残余强度阶段, 过大的变形很容易导致试验机三轴压力室油压套破坏, 而且变形值也容易超出试验设备的测量范围。

为此, 本文提出一种单试件重复加载的试验方法, 典型单试件重复加载应力-应变曲线如图 2 所示。试验过程主要分为两步: ①设定初始围压, 对岩样进行常规三轴压缩试验, 直至应力-应变曲线进入稳定的残余阶段后卸载, 获得常规三轴压缩试验的峰值强度

和残余强度。②对上述加载破坏的岩样, 设定围压值, 进行重复加载, 直至应力-应变曲线进入稳定的残余阶段后卸载, 然后逐级增大围压值, 进行重复加载。为了比较准确地确定岩样残余阶段的抗剪强度, 一般进行 4, 5 级围压的重复加载。对不同围压下的残余强度拟合分析, 即可得到岩样残余阶段的抗剪强度指标。

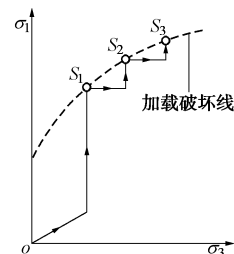


图1 单试件多级加载试验应力路径

Fig. 1 Stress paths in triaxial multiple failure state tests

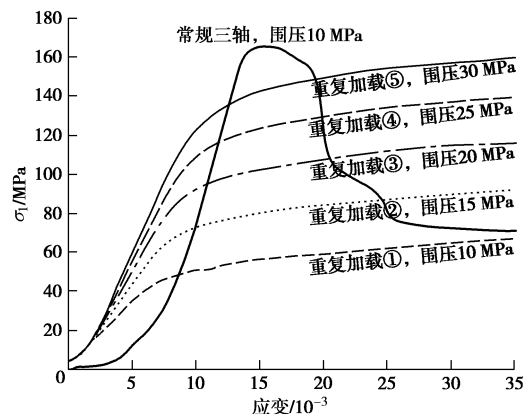


图2 单试件重复加载应力-应变曲线图

Fig. 2 Stress-strain curves of single specimen repeated loading tests

单试件重复加载法测定岩石残余强度指标是否准确可靠, 需要满足两个条件: ①在相同围压条件下, 单试件重复加载得到的残余强度与常规三轴压缩试验得到的岩样残余强度应该基本一致; ②对不同初始围压条件下常规三轴压缩破坏的岩样, 若采用相同的围压进行重复加载, 得到的残余强度应该基本一致。

为此, 设计进行了常规三轴压缩试验和单试件重复加载试验, 并进行了对比分析。砂岩是工程中非常常见的一类岩石, 本文特以砂岩为试验对象, 试验用岩样取自三峡库区, 微风化, 为绢云母中粒石英砂岩, 典型岩样照片如图 3 所示, 直径为 50 mm, 高度为 100 mm, 制样精度按照规范严格控制^[1]。为了控制试样的离散, 通过波速和密度测试进行严格筛选^[3]。三轴压缩试验在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行, 如图 4 所示。



图3 典型岩样照片

Fig. 3 Sketch of typical samples



图4 RMT-150C 岩石力学试验系统

Fig. 4 RMT-150C rock mechanics test system

试验过程中, 采用 10, 15, 20, 25, 30 MPa 5 种围压, 首先进行常规三轴压缩试验, 达到残余强度阶段后卸载, 然后采用上述 5 种围压进行单试件重复加载。重复加载过程中, 每次加载到残余强度阶段后卸载, 然后增大围压值, 再次进行加载。

2 试验结果分析

2.1 岩样破坏模式分析

不同初始围压下, 经过重复加载的典型岩样破坏照片如图 5 所示。由于破坏后岩样发生了较大的侧向膨胀, 采用专用工具将岩样从压力室油压套中顶出, 在岩样顶端留下了一小团黑色印记。



(a) 10 MPa (b) 15 MPa (c) 20 MPa (d) 25 MPa (e) 30 MPa

图5 典型岩样破坏照片

Fig. 5 Sketch of destroyed typical samples

从图 5 可以看出, 不同初始围压条件下, 岩样均为典型的剪切破坏。每个岩样虽然经历了常规的三轴压缩试验和 5 次不同围压的重复加载试验, 但总体只有一条控制性的宏观剪切破坏面, 没有产生新的剪切破坏。说明重复加载过程中, 岩样的残余强度由第一次常规三轴压缩时形成的剪切破坏面控制。

2.2 应力 - 应变曲线分析

不同初始围压下, 典型常规三轴压缩试验和单试件重复加载的应力 - 应变曲线如图 6 所示。

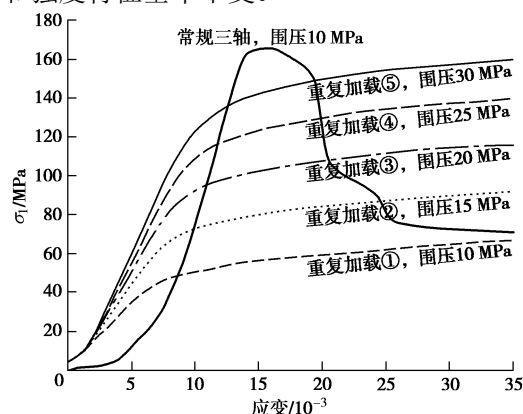
从图 6 可以看出:

(1) 不同围压条件下, 常规三轴压缩试验应力 -

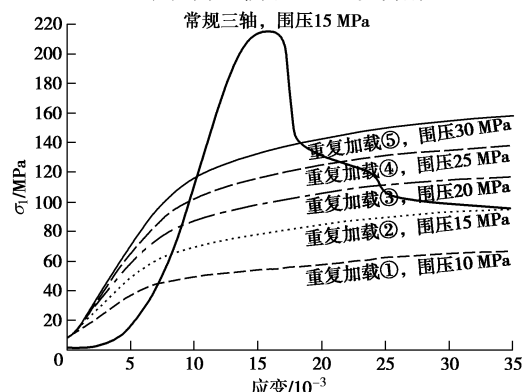
应变曲线的形态基本相同, 均有压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段和残余强度阶段。围压从 10 MPa 增大到 30 MPa, 岩样的峰值强度从 162.79 MPa 增大到 270.40 MPa, 残余强度从 60.96 MPa 增大到 151.35 MPa, 总体呈线性趋势增长。

(2) 不同围压条件下, 重复加载的应力 - 应变曲线的形态也基本相同, 岩样经过短暂的压密阶段和弹性阶段之后, 迅速进入塑性阶段, 均没有明显峰值出现而直接进入残余强度阶段, 应变硬化现象明显, 而且, 随着围压的增大, 应力 - 应变曲线的斜率逐渐增大。

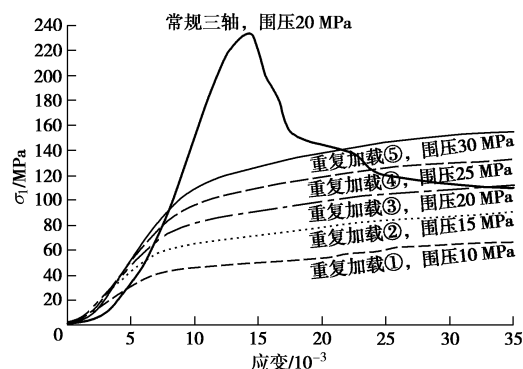
(3) 当重复加载的围压值与初始常规三轴压缩试验的围压值一致时, 二者残余阶段的应力 - 应变曲线能较好的重合在一起。说明对常规三轴压缩破坏的岩样, 当采用相同的围压进行重复加载时, 残余阶段的变形和强度特征基本不变。



(a) 常规三轴围压10 MPa破坏岩样



(b) 常规三轴围压15 MPa破坏岩样



(c) 常规三轴围压20 MPa破坏岩样

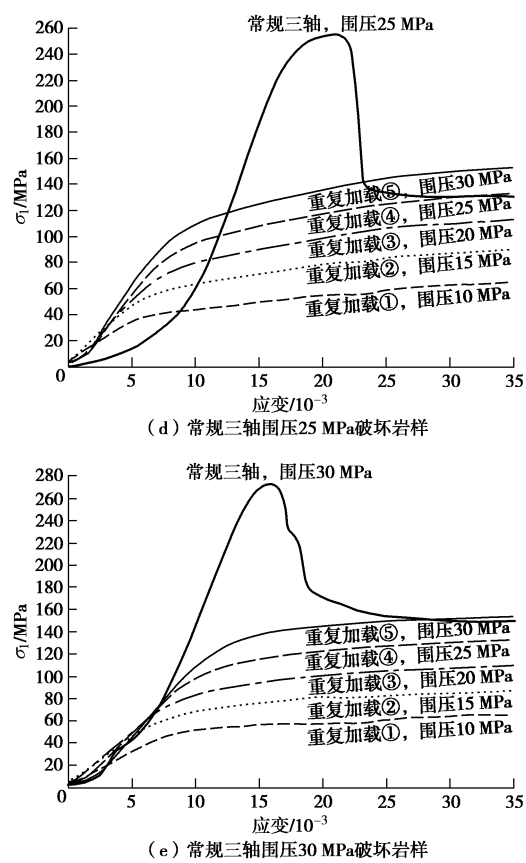


图 6 典型常规三轴压缩试验和单试件重复加载应力 - 应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of conventional triaxial tests and single specimen repeated loading tests

为了定量分析不同加载情况下岩样的强度参数, 特对图 6 中常规三轴压缩试验和重复加载试验结果进行统计, 如表 1 所示, 取应力 - 应变曲线趋于稳定的值作为残余强度, 为了便于比较分析, 本文中残余强度统一取轴向应变为 3% 时对应的强度值 (不同类型岩石残余强度取值应根据应力 - 应变曲线稳定阶段而定。)

表 1 常规三轴压缩试验和单试件重复加载试验结果统计表

Table 1 Intensity statistics of conventional triaxial tests and single specimen repeated loading tests

围压 /MPa	初始常规三轴压缩试验		单试件多级围压重复加载试验				
	峰值强度 /MPa	残余强度 /MPa	围压 10 MPa	围压 15 MPa	围压 20 MPa	围压 25 MPa	围压 30 MPa
10	162.79	60.96	60.02	88.27	108.33	131.16	150.27
15	214.98	90.92	58.98	91.16	109.98	131.49	151.60
20	250.55	105.34	58.90	90.62	106.57	128.69	150.69
25	260.15	131.38	57.61	90.39	106.05	128.91	148.40
30	270.40	151.35	58.11	87.89	109.17	128.38	149.04

从表 1 可以看出:

(1) 在常规三轴压缩试验中, 10, 15, 20, 25, 30 MPa 五种围压情况下, 岩样残余强度分别为 60.96, 90.92, 105.34, 131.38, 151.35 MPa。当重复加载的围压与常规三轴压缩试验的围压相同时, 对应残余强度分别为 60.02, 91.16, 106.57, 128.91, 149.04 MPa,

差别范围为 0.27%~1.87%。说明对常规三轴压缩破坏的岩样, 当采用相同的围压进行重复加载时, 得到残余强度与常规三轴岩石试验结果基本一致, 这也很好地满足前述的第一个条件。

(2) 对常规三轴压缩试验 10 MPa 围压破坏的岩样进行重复加载, 加载的围压为 10, 15, 20, 25, 30 MPa 时, 对应的残余强度分别为 60.02, 88.27, 108.33, 131.16, 150.27 MPa, 与常规三轴压缩试验得到的残余强度的差别范围为 0.16%~2.91%。而且, 常规三轴压缩试验 15, 20, 25, 30 MPa 围压破坏岩样的重复加载试验得到了一致的规律。说明常规三轴压缩破坏的岩样, 进行不同围压的重复加载试验, 得到的残余强度与常规三轴试验得到残余强度近似相等。

(3) 对不同围压下常规三轴压缩破坏的岩样进行重复加载, 当加载的围压为 10 MPa 时, 对应的残余强度分别为 60.02, 58.98, 58.90, 57.61, 58.11 MPa, 与围压为 10 MPa 的常规三轴试验测得的残余强度数值近似相等, 差别范围为 1.53%~5.50%。而且, 重复加载围压为 15, 20, 25, 30 MPa 时也得到了一致的规律。说明, 不同围压下常规三轴压缩试验破坏后的岩样, 若采用相同的围压进行重复加载, 所得到的残余强度近似相等。

综合上述两个方面分析比较可以发现, 对三轴压缩破坏的岩样进行重复加载, 其残余强度主要由重复加载时的围压控制, 而与初始加载破坏的围压关系不明显, 这样也很好的满足了前述第 2 个条件。

(4) 比较而言, 重复加载过程中, 围压为 10 MPa 时得到的岩样残余强度整体略低于常规三轴试验得到的残余强度值, 而当重复加载围压为 15 MPa 及以上时, 重复加载试验和常规三轴压缩试验得到残余强度吻合趋势更好。

2.3 残余阶段抗剪强度分析

对表 1 中常规三轴压缩试验和单试件重复加载试验结果进行拟合分析, 如图 7, 8 所示, 岩样的抗剪强度参数统计如表 2 所示。

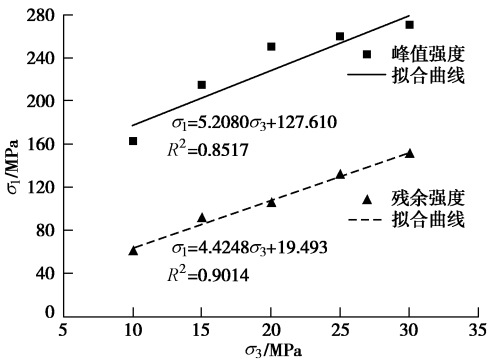


图 7 常规三轴压缩试验结果拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of conventional triaxial tests

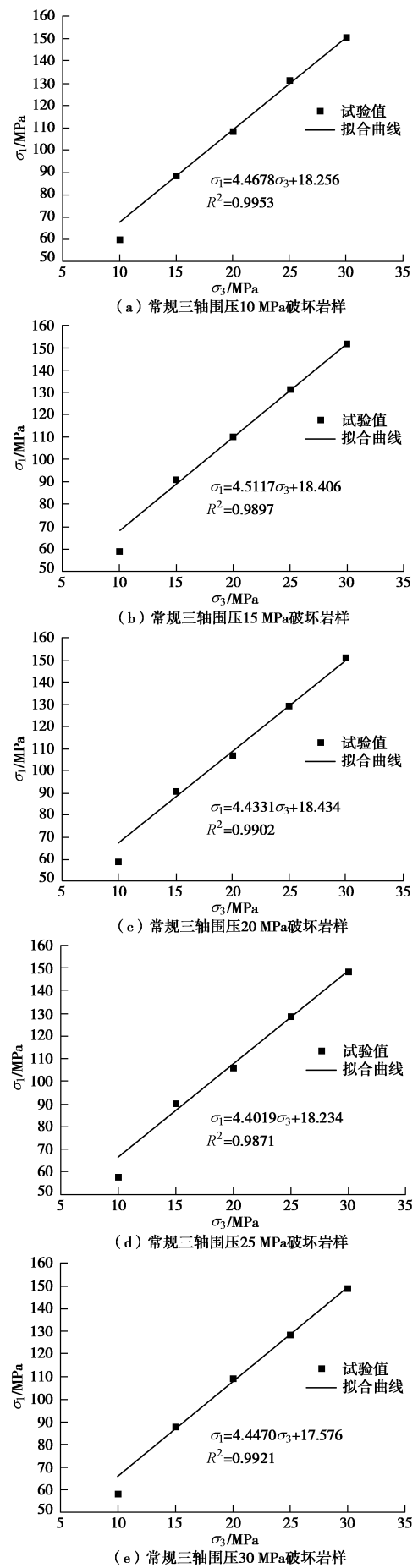


图8 单试件重复加载法试验结果拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of single specimen repeated loading tests

表2 多试件法和单试件重复加载法岩样抗剪强度参数统计表
Table 2 Shear strength parameters statistics of multiple specimen and single specimen repeated loading tests

抗剪强度参数	常规三轴压缩试验		单试件多级重复加载试验				
	峰值强度	残余强度	围压 10 MPa	围压 15 MPa	围压 20 MPa	围压 25 MPa	围压 30 MPa
c/MPa	27.96	4.63	4.32	4.33	4.38	4.35	4.17
$\varphi/(\text{^\circ})$	42.67	39.15	39.36	39.58	39.19	39.23	39.26

综合表2和图7、8可以看出:

(1) 常规三轴压缩试验中,得到岩样峰值阶段的黏聚力为 27.96 MPa,内摩擦角为 42.67°,残余阶段的黏聚力为 4.63 MPa,内摩擦角为 39.15°。采用单试件重复加载法得到岩样残余阶段的黏聚力为 4.17~4.38 MPa,与常规三轴压缩试验结果的差别范围为 5.40%~9.94%;内摩擦角为 39.19°~39.58°,对应差别范围为 0.10%~1.10%,总体差别较小。同时,从图7、8数据拟合效果来看,常规三轴压缩试验得到的峰值阶段和残余阶段莫尔-库仑强度包络线拟合结果的相关系数为 0.85~0.90,而单试件重复加载法得到的残余阶段强度包络线拟合结果的相关系数均在 0.95 以上。说明单试件重复加载法用于测定岩样的残余强度参数指标的离散性明显较小,该方法是合理可行的。

(2) 相对于常规三轴压缩试验,单试件重复加载法测得岩样残余阶段的黏聚力总体偏小,而内摩擦角总体偏大。分析其原因是由于三轴压缩试验破坏岩样在重复加载过程中,在围压较低(10 MPa)时,围压的侧向约束作用不够强,在轴向荷载作用下容易沿着宏观剪切破坏面产生切齿破坏错动,从而导致岩样的残余强度偏低;而在围压较高(15 MPa 及以上)的时候,侧向约束作用使得破坏岩样剪切面的齿合效应非常显著,剪切面抗剪能力稳定,重复加载试验得到残余强度与三轴压缩试验的结果吻合较好,试验结束后取出的岩样较好地咬合在一起用手无法分开,也进一步说明了这种分析的合理性。同时,这也较好地解释了表1中两种试验方法得到的岩样残余强度分布规律。

3 结论与讨论

(1) 在以往单试件法基础上,结合岩石残余阶段变形特点,研究提出了一种单试件重复加载法测定岩石的残余强度指标。验证分析表明,单试件重复加载法得到岩样残余阶段的强度指标与常规三轴压缩试验得到的结果基本一致,而且单试件重复加载法得到的试验结果离散性明显较小,说明该方法是合理可行的。

(2) 对常规三轴压缩破坏的岩样,进行单试件重复加载时,低围压(10 MPa)的残余强度偏小约 1.53%~5.50%,从而使得岩样残余阶段的黏聚力偏小 5.40%~9.94%,内摩擦角偏大 0.10%~1.10%,单试

件重复加载试验结果可据此进行修正。

(3)不同围压下常规三轴压缩试验得到的岩样峰值强度、残余强度,已经包含了岩样之间的差异及围压对岩样剪切破裂面的影响。岩样之间的差别主要来源于岩样内部微细观的孔隙、裂隙等缺陷,在加载过程中,岩样内部的缺陷逐渐闭合或者扩展,从而导致岩样应力-应变曲线特征和峰值强度的明显差异,这也是以往分析中经常提到的试验结果离散性;当加载应力超过岩样的峰值强度之后,逐渐形成宏观剪切破坏面,岩样残余阶段的承载能力主要受宏观剪切破坏面的抗剪强度控制。对同一组岩样来说,其本身的矿物成份、颗粒结构、颗粒强度及胶结性质是近似一致的,因此,不同岩样剪切破坏面表现出来的抗剪强度及其所控制的岩样残余强度自然是一致的。也即,岩样之间的差异主要影响峰前阶段的变形和强度特征,对破坏之后的残余强度影响很小,其残余强度主要由加载时的围压控制。也得到类似的试验结果。这也进一步说明了本文提出的单试件重复加载确定岩样残余强度参数方法的合理性。

(4)采用单试件法确定岩石残余阶段的强度指标可以较好地消除试样之间的差异导致的试验的离散性。苏承东等^[8]的研究发现,岩样破坏之后,在沿剪切面没有宏观滑移时,剪切面的摩擦特性与岩石内摩擦特性一致。本文试验中也发现,在围压较大(15 MPa及以上)时进行重复加载,得到的残余强度与常规三轴压缩试验结果一致性较好,而在围压较低(10 MPa)时,重复加载时得到的残余强度略微偏低。因此,为了更好的采用本文所提出的单试件重复加载法,建议在设定重复加载的围压值,尽量选择较大的围压值,以保证重复加载过程中岩样的剪切破坏面处于紧密的接触状态,以更好地反映岩样在残余阶段的强度特征。

(5)为了验证上述试验方法对其他岩石的适用性,特进行了一组灰岩的试验,初始围压取10, 20, 30, 40 MPa,典型岩样图9所示,不同初始围压破坏岩样在20 MPa围压重复加载的曲线如图10所示。得到的灰岩残余强度与前述砂岩残余强度变化规律是一致的,结合两种岩样的破坏特征和受力特征分析,所提出方法对三轴压缩试验下呈剪切破坏的岩石是适用的,对呈脆性张拉破坏的岩石不能适用。



图9 破坏前后灰岩岩样照片

Fig. 9 Photos of limestone samples before and after destruction

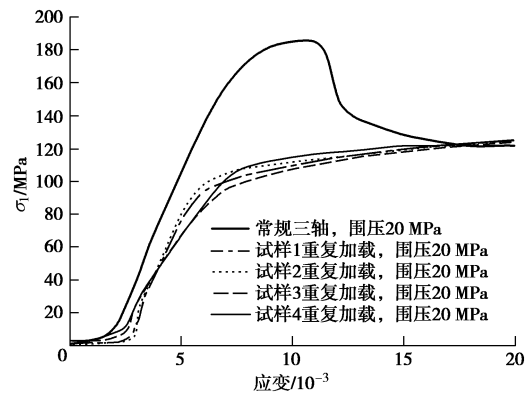


图10 灰岩三轴压缩试验和单试件重复加载应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of triaxial tests and single specimen repeated loading tests on limestone samples

参考文献:

- [1] GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 2013. (GB/T 50266—2013 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. 2013. (in Chinese))
- [2] 尤明庆, 华安增, 李玉寿. 缺陷岩样强度及变形特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 97 - 101. (YOU Ming-qing, HUA An-zeng, LI Yu-shou. A study of triaxial strength and deformation of flawed specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 20(2): 97 - 101. (in Chinese))
- [3] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中岩样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399 - 3403. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3399 - 3403. (in Chinese))
- [4] 邓华锋, 王哲, 李建林, 等. 岩石力学试验中缺陷岩样抗压强度修正方法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 307 - 313. (DENG Hua-feng, WANG Zhe, LI Jian-lin, et al. Compressive strength correction method of flaw sample in rock mechanics test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 307 - 313. (in Chinese))
- [5] KOVARI K, TISA A. Multiple failure state and strain controlled triaxial tests[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 7(1): 17 - 33.
- [6] KOVARI K, TISA A, EINSTEIN H H, et al. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 283 - 290.

- [7] PETER C, CLEMENT M K, GUY R, et al. Triaxial testing of brittle sandstone using a multiple failure state method[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, **10**(4): 213 - 217.
- [8] 苏承东, 尤明庆. 单一试样确定大理岩和砂岩强度参数的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(18): 3055 - 3058. (SU Cheng-dong, YOU Ming-qing. Determination method of strength parameters for sandstone and marble with one specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(18): 3055 - 3058. (in Chinese))
- [9] 吴玉山, 李纪鼎. 确定岩石强度包络线的新方法——单块法[J]. 岩土工程学报, 1985, **7**(2): 85 - 91. (WU Yu-shan, LI Ji-ding. Single specimen method: a new method to determine the Coulomb curves of rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **7**(2): 85 - 91. (in Chinese))
- [10] 张磊, 王宝学, 杨同. 岩石三轴多级围压加载试验方法与数据统计分析的研究[J]. 实验技术与管理, 2008, **25**(2): 43 - 47. (ZHANG Lei, WANG Bao-xue, YANG Tong. The research of rock triaxial compression with multilevel confining pressure and the data statistics[J]. Experimental Technology and Management, 2008, **25**(2): 43 - 47. (in Chinese))
- [11] 程鸿鑫, 沈明荣. 在普通压力机进行岩石三轴单块试验方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, **6**(1): 39 - 46. (CHENG Hong-xin, SHEN Ming-rong. Triaxial test of a single block on a common liquid press[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, **6**(1): 39 - 46. (in Chinese))
- [12] 闫明礼, 杨志红. 单试件测定强度指标的试验研究[J]. 港口工程, 1991(2): 13 - 19. (YAN Ming-li, YANG Zhi-hong. Test study of the strength index of single specimen[J]. Port Engineering, 1991(2): 13 - 19. (in Chinese))
- [13] 李宏哲, 夏才初, 徐崇帮, 等. 基于多级破坏方法确定岩石卸荷强度参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 2681 - 2686. (LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, XU Chong-bang, et al. Experimental study of rock unloading strength parameters based on multiple failure method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2681 - 2686. (in Chinese))
- [14] 徐颖, 李振平, 葛新. 软岩单试件直剪实验方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, **25**(3): 367 - 368. (XU Ying, LI Zhen-ping, GE Xin. Soft rock single test sample shear experiment method[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, **25**(3): 367 - 368. (in Chinese))
- [15] HOU Y P, SUN T Q. An improved method to make the microdroplet single fiber composite specimen for determining the interfacial shear strength[J]. J Mater Sci, 2012, **47**: 4775 - 4778.
- [16] YAN K F, ZHANG C Y, QIAO S R, et al. Measurement of in-plane shear strength of carbon/carbon composites by compression of double-notched specimens[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, **21**(1): 62 - 68.
- [17] 刘保国, 崔少东. 单试件法测定岩石强度参数的修正方法[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(增刊): 162 - 165. (LIU Bao-guo, CUI Shao-dong. Improvement of single specimen method for determination of rock strength parameters[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(S0): 162 - 165. (in Chinese))
- [18] 宋晓明. 单试件法确定岩石强度参数的特点及改进方法[J]. 科学技术创新, 2016(11): 33 - 34. (SONG Xiao-ming. The characteristics and improvement methods of strength parameters of rock are determined by single test method[J]. Heilongjiang Science and Technology Innovation, 2016: 33 - 34. (in Chinese))