

公路隧道围岩强度多级加载试验研究

周吉学^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中铁二十局集团有限公司;
3. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室)

摘要:传统的单级加载三轴压缩试验需要对多个岩石试样施加荷载,而多级加载压缩试验作为一种替代方法,可以解决制备多个试样困难或成本较高的问题。该文针对隧道围岩开展了单级加载试验和两种应力路径的多级加载试验,通过对比强度测试结果,分析了多级加载方案的合理性。研究表明:多级加载方案Ⅱ的强度测试结果与单级加载的更加接近,无论是采用MC模型还是HB模型,方案Ⅱ数据拟合的置信区间与单级加载的重合度更高,而且在整个试验过程中试样的完整性保持得更好,因此在岩石试验数量有限的情况下,方案Ⅱ是一种更可靠的单级加载替代方案。

关键词:强度;隧道围岩;三轴压缩试验;单级加载;多级加载

1 前言

在许多房建、交通、水利水电工程中,岩石强度是分析岩体稳定、优化结构设计和评估承载能力的重要基础,而三轴压缩试验有助于了解三维应力状态下岩石的变形和强度行为,其试验结果可以为理论计算或评估提供必要依据,还可用来验证强度准则的合理性。

传统的单级加载三轴压缩试验中,通常每个岩石试样只被加载一次,为了获取强度包络线,至少需要3~5个试样,但是由于岩石试样数量有限,而且制备性质接近的样品有困难,对一个岩石试样进行多次加载已经逐步成为一种替代方法。在国外,Youn等提出当岩石试样即将破坏时停止轴向加载,随后提高围压水平再增大轴向应力,如此反复加载以实现多级加载测定岩石试样的抗剪强度;Sharma提出轴向应力和围压同时升降的多级加载方法;Taheri认为多级加载应在一定的围压范围内进行,围压过大会造成试验结果误差快速上升,同时多级加载只适用于延性较好的岩石,对于砂岩使用存疑。在中国,应力路径对岩土材料强度影响研究多针对土,孔令伟等为对比原状土与重塑土在不同应力路径下的强度特性,设计了3种应力路径试验,即主动压缩、被动压缩、主动伸长试验,分析了应力路径对变形强度特征的影响;黄勇等进行了不同温度下饱和软黏土应力路径试验研究,得出了温度、

应力路径对强度、孔压等参数的影响规律;林清辉针对软黏土开展了一系列CU试验,每组试验具有不同的应力比,从而研究应力路径旋转对 K 。固结原状软黏土小应变刚度和强度特性的影响;张坤勇等对 K 。固结黏土开展了排水卸荷应力路径试验,结果表明:卸荷应力路径下的土体强度特性与常规三轴试验结果有明显区别,实际工程中测定土的强度时,一定要采用与实际工程相近的应力路径;孙岳崧等以砂土为试验材料,以应力历史为自变量进行了相关试验研究,发现砂土材料力学特性受应力路径影响显著,并将这种应力路径依赖性归结为 q 和 p 耦合作用的结果;张敏等对福建标准砂进行一系列真三轴排水剪切试验,结果显示:当中主应力系数相同时,应力路径对砂土应力—应变关系影响很大,但对应力比—应变关系的影响并不显著。

综上所述,尽管众多学者开展了应力路径对岩土材料强度影响的研究工作,但大多采用单级加载方式,一些采用多级加载方式研究的也较少涉及加载应力路径的问题。该文以湖北某隧道的围岩为对象,通过钻孔取样,开展单级加载和两种应力路径的多级加载三轴压缩试验,探讨应力路径对测试强度结果的影响,并采用Mohr—Coulomb强度准则和Hoek—Brown强度准则对试验数据进行拟合,分析不同加载方案下的拟合参数,对比不同多级加载方案下岩石试样的外观和破坏情况,最终得出更为合理的多级加载方案。

收稿日期:2020-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51774222)

作者简介:周吉学,男,博士研究生,高级工程师, E-mail:zhoujixue@sohu.com

2 单级加载和多级加载的应力路径

为获取强度包络线,单级加载三轴试验往往需要 3~5 个岩石试样,而且每个试样都要在特定的围压进行试验,首先将围压增大至指定值,然后增加轴向应力直至试样破坏[图 1(a)].为了提高试样的重复利用性,该文采用了两种多级加载方案,其中多级加载方案 I [(图 1(b))]对同一个试样采用了 3 种不同的围压,第一级加载阶段与单级加载阶段相同,围压增大到一定程度,随后轴向应力单独增大,当岩石试样即将破坏时(接近破坏临界点)停止轴向加载,随后提高围压水平,再增大轴向应力直至试样再次即将破坏,如此反复。一般而言,尽管岩石强度可能随着加载阶段数量的增加而降低,但降低程度基本可以忽略。多级加载 II 方案[图 1(c)]是在岩石试样即将破坏时(接近破坏临界点)停止轴向加载,然后将轴向应力降低到与围压相同,然后提高围压至第二阶段指定值,再增加轴向应力直至试样再次即将破坏,如此反复。

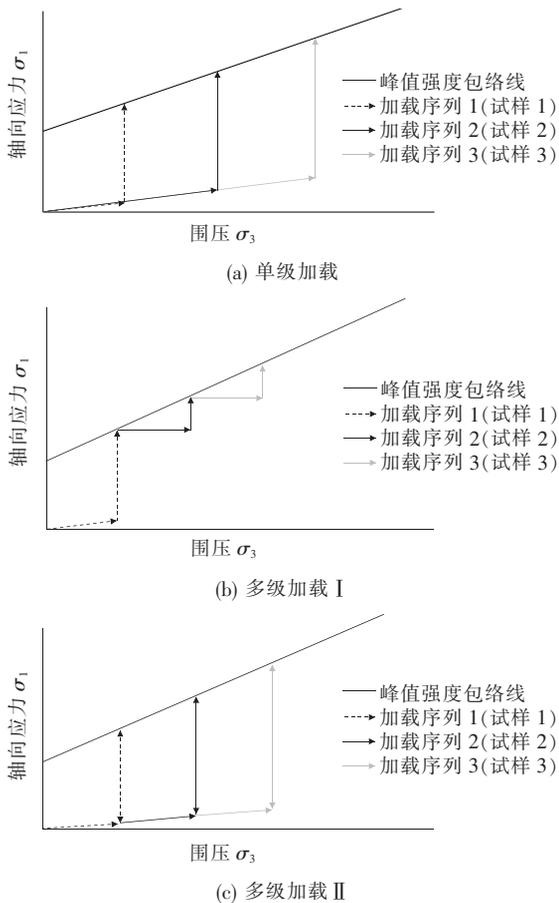


图 1 不同加载方式的应力路径

由图 1 可以看出:在上述试验中确定破坏临界点是十分关键的,若确定不当可能导致试验结果不准确或者试样过早破坏,无法进行下一级加载。目前常用的确定方法有 4 种:① 轴向应力增量与轴向应变增量之比接近于零;② 体积应变增量与轴向应力增量接近于零;③ 弹性模量接近稳定甚至开始下降;④ 轴向应力增量与径向应变增量之比接近于零。该文采用第 3 种方法来确定破坏临界点。

3 试验过程

从湖北省某隧道采用钻孔获取了石灰岩圆柱体样品,直径约为 50 mm,长径比为 2.1~2.3,为了使试样能在试验仪器中平稳放置,试样的上下两端末端被磨平,且上下面垂直于试样轴。试样的侧面也被打磨光滑,而且经检查没有明显的裂缝和软弱面。

试验仪器采用岩石三轴试验仪,由压力试验主机、控制柜、液压系统、试验测量系统、岩石三轴压力室和数据采集系统组成,具有伺服控制功能,最大轴向加载力为 1 000 kN,最大围压加载为 30 MPa,试验力精度为 $\pm 0.5\%$,位移精度为 $\pm 0.3\%$ 。试验方案见表 1,对于每组试验设置 3 个平行试样。试验时,围压的加载速率为 0.05 MPa/s,轴向荷载的加载速率为 0.75 MPa/s。具体试验过程参照 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法》,在此不做详述。

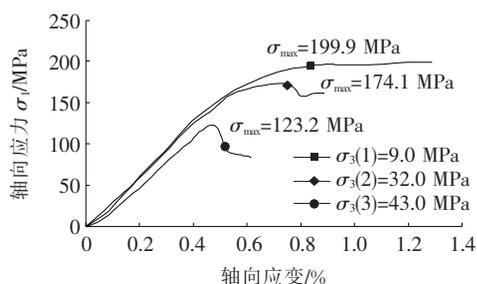
表 1 加载试验参数

试验组编号	试验方法	围压/MPa	平均空隙率/%	平均密度/(g·cm ⁻³)
R-1	单级	9	5.22	2.57
R-2		32	5.06	2.57
R-3		43	5.12	2.59
R-4	多级 I	9、32、43	5.25	2.57
R-5	多级 II	9、32、43	5.27	2.5
R-6	单级	22	4.98	2.60
R-7		39	4.74	2.61
R-8	多级 I	47	4.66	2.62
R-9		22、39、47	4.81	2.61
R-10		22、39、47	4.92	2.62

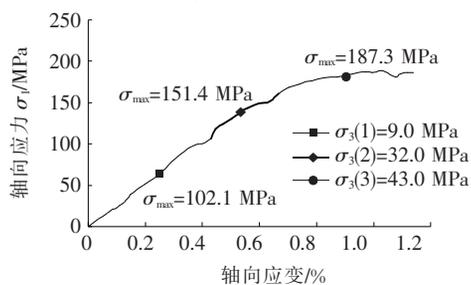
4 试验结果分析

图 2、3 为单级加载、多级加载 I 和多级加载 II 时

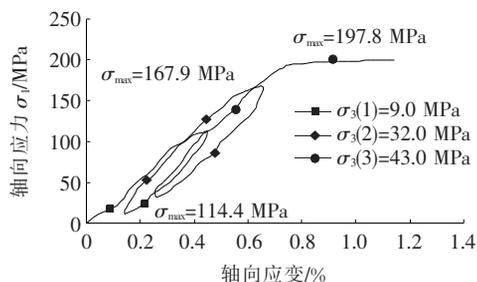
试样的应力—应变曲线。以图 2(a)为例可以看出:岩石试样首先进入弹性变形阶段,应力随着应变呈线性增大的趋势;随后应力逐渐偏离直线段,曲线的斜率降低,表明岩石试样开始进入屈服阶段;随后 $\sigma_3 = 9、32$ MPa 的试样在轴向应力达到最大值后出现跌落,发生脆性破坏,而 $\sigma_3 = 43$ MPa 的试样在应力达到最大值后出现残余破坏阶段,应力缓慢跌落,表现出残余强度。可见随着围压的增大,破坏模式也由脆性破坏转变为延性破坏。



(a) 单级加载



(b) 多级加载 I

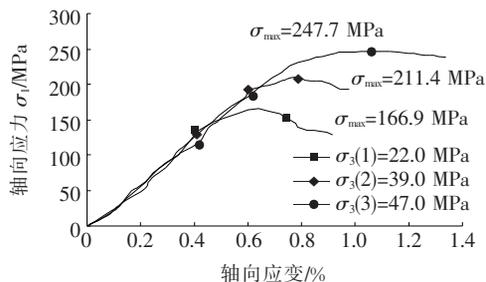


(c) 多级加载 II

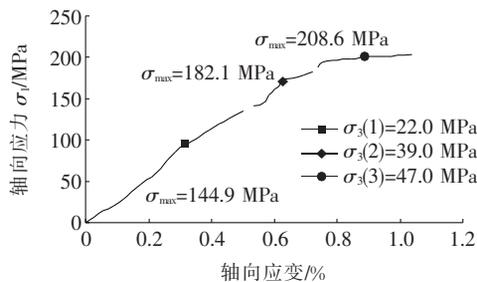
图 2 不同围压时的应力—应变曲线(1)

此外,岩石的三轴试验强度 σ_{max} 随着围压 σ_3 的增大而增大,而多级加载方案 I 条件下 σ_{max} 与 σ_3 的非线性关系更加明显。在同一围压下,单级加载试验测得的强度结果往往高于多级加载试验,且随着围压增加该偏差有增大的趋势,但总体上单级加载试验与多级加载试验 II 的强度结果更加接近。

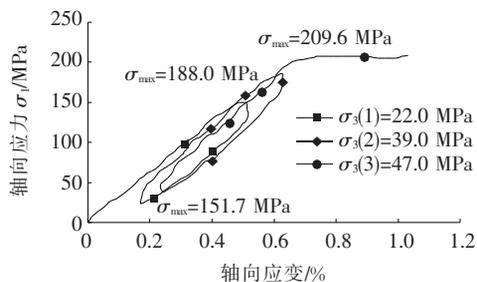
岩石强度准则反映了岩石在临界破坏条件下的应力状态与强度参数之间的关系,目前众多的岩石强度准则及其修正理论都有其相应的使用范围和应用条



(a) 单级加载



(b) 多级加载 I



(c) 多级加载 II

图 3 不同围压时的应力—应变曲线(2)

件,其中 Mohr—Coulomb (MC) 和 Hoek—Brown (HB) 强度准则的数学表达式简单,且各强度参数的物理意义明确,得到了广泛的应用。在 MC 强度准则中,破坏面上剪应力 τ 与正应力 σ_n 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 呈正比,表述如下:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \tag{1}$$

采用主应力 (σ_1 和 σ_3) 作为参数的 MC 强度准则表述如下:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2\beta) \tag{2}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin(2\beta) \tag{3}$$

式中: $\beta = 45^\circ + \varphi/2$, 代表破坏面的方向。

MC 准则表征岩石强度随围压呈线性增大,往往适用于围压较小的情况;相比 MC 准则,HB 准则能够反映岩石强度随围压增大的非线性特征,HB 强度准则表述如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5} \quad (4)$$

式中： σ_c 为岩石试样的单轴抗压强度； m 、 s 为材料参数， s 通常取 1。

图 4 为采用 MC 模型的拟合结果，为了使拟合采用的数据量更多，还采用了一些单轴抗压强度试验的数据。表 2 为采用 MC 和 HB 模型的拟合参数、置信区间以及方差。

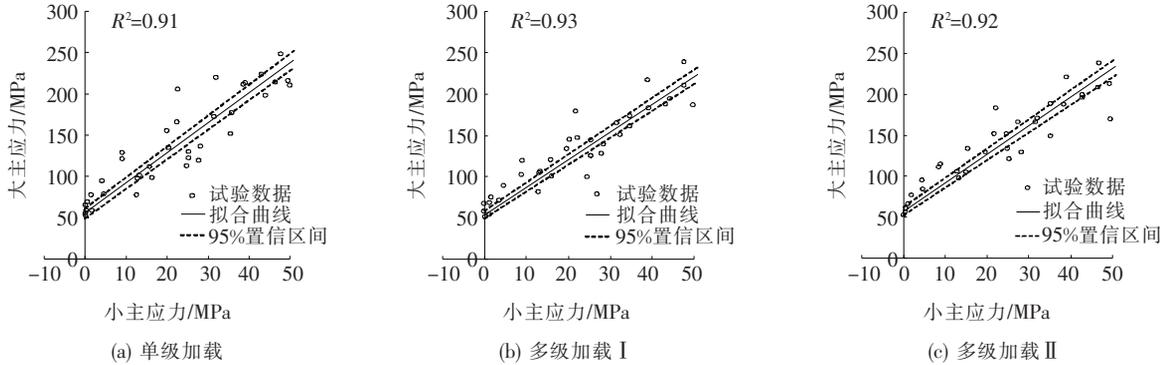


图 4 Mohr-Coulomb 强度准则拟合结果

表 2 不同强度准则拟合参数

模型	参数	单位	单级加载			多级加载 I			多级加载 II		
			预测值	95%置信区间	方差	预测值	95%置信区间	方差	预测值	95%置信区间	方差
MC	φ	(°)	34.45	(32.50,36.57)	7.29	32.33	(30.87,34.43)	6.41	33.32	(31.51,35.43)	6.91
	c	kPa	14.63	(11.85,16.90)	9.07	14.15	(12.45,16.52)	7.39	14.69	(12.69,17.30)	8.37
HB	σ_c	kPa	62.75	(58.10,67.51)	17.0	59.21	(55.65,63.06)	13.3	62.35	(58.09,65.71)	13.5
	m		7.64	(6.76,8.72)	3.49	7.18	(6.23,7.74)	2.72	7.85	(6.66,8.25)	2.80

结合图 4 和表 2 可以看出：采用单级加载得到的数据方差更大，这主要是由于单级加载的试样数量更多，试样之间不可避免地存在一定差异，导致试验结果更加离散。两种多级加载方案的测试结果方差比较接近，比起多级加载方案 I，多级加载方案 II 测得的强度参数更加接近于单级加载。

95%置信区间对比。从图 5 可以看出：① 无论是采用 MC 模型还是 HB 模型，多级加载方案 II 的置信区间与单级加载的重合度更高，这意味着方案 II 所测得的结果与单级加载的结果更加接近；② 在低应力水平状态下多级加载测出的结果与单级加载测出的结果更加接近，随着应力水平的增加(加载阶段增加)，两者的偏差有略微增加的趋势。

图 5 为不同强度准则下 3 种加载方法测试结果的

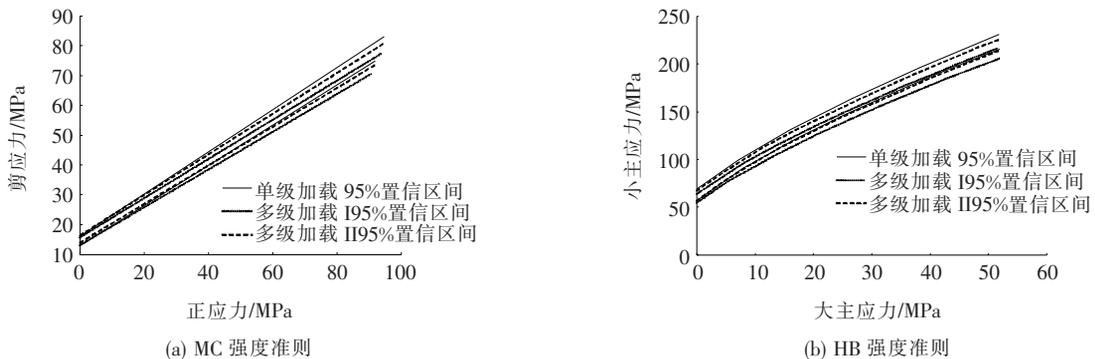


图 5 不同强度准则下的置信区间对比

图 6 为采用不同多级加载方案进行试验后，代表性岩石试样的外观和破坏程度。由图 6 可见：采用多

级加载方案 II 时试样的破坏相对较小，表明在整个试验过程中试样的完整性保持得更好，测出的强度参数

也与初始未扰动状态下试样的强度参数更加接近。综上所述,推荐采用方案Ⅱ中的应力路径来进行多级加载试验,该方案在岩石试样数量有限的情况下,可以获取更可靠的强度参数。

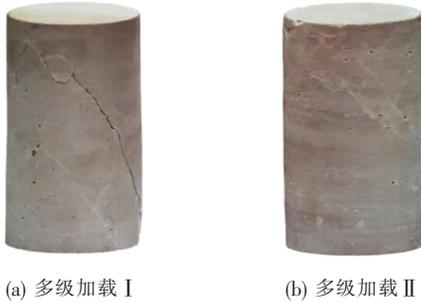


图6 试验完成后的试样情况

5 结论

(1) 三轴试验强度 σ_{\max} 随着围压 σ_3 的增加而增大,而多级加载方案Ⅰ条件下 σ_{\max} 与 σ_3 的非线性关系更加明显。在同一围压下,单级加载试验测得的强度结果往往高于多级加载试验,但总体上单级加载试验与多级加载试验Ⅱ的强度结果更加接近。

(2) 无论是采用 MC 模型还是 HB 模型,多级加载方案Ⅱ的置信区间与单级加载的重合度更高,同时在低应力水平状态下多级加载测出的结果与单级加载测出的结果更加接近,随着应力水平的增加(加载阶段增加),两者的偏差有略微增加的趋势。

(3) 采用多级加载方案Ⅱ时试样的破坏相对较小,这表明在整个试验过程中试样的完整性保持得更好,测出的强度参数也与初始未扰动状态下试样的强度参数更加接近。

(4) 根据该文试验结果,推荐采用方案Ⅱ中的应力路径来进行多级加载试验,该方案在岩石试样数量有限的情况下,可以获取更可靠的岩石强度参数,后续还有待通过增加试验数量作进一步的论证。

参考文献:

- [1] 陈京贤,曾德荣,王俊召,等. 基于应力释放率的大跨径回填料隧道的围岩稳定性研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [2] 邹琅. 山岭公路隧道围岩力学参数估计[J]. 公路工程,2013(2).
- [3] Youn H, Tonon F. Multi-Stage Triaxial Test on Brittle Rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci,2010,47:678-684.
- [4] Sharma R, Asce M, Baxter C, et al. Strength of Weakly Cemented Sands from Drained Multistage Triaxial Tests[J]. J. Geotech Geoenviron Eng, 2011, 137: 1 202 - 1 210.
- [5] Taheri A, Chanda E. A New Multiple - Step Loading Triaxial Test Method for Brittle Rocks[C]. Proceedings of the 19th New Zealand Geotechnical Society Symposium,2013:882-889.
- [6] 孔令伟,臧濛,郭爱国,等. 湛江强结构性黏土强度特性的应力路径效应[J]. 岩土力学,2015(S1).
- [7] 黄勇,刘干斌,祁良,等. 不同温度下饱和软黏土应力路径试验研究[J]. 水文地质工程地质,2016(2).
- [8] 林清辉,严佳佳. 应力路径旋转对原状软黏土小应变特性影响的研究[J]. 工业建筑,2017(1).
- [9] 张坤勇,李广山,梅小洪,等. 基于 K_0 固结排水卸荷应力路径试验粉土应力-变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2017(7).
- [10] 孙岳崧,濮家骝,李广信. 不同应力路径对砂土应力-应变关系影响[J]. 岩土工程学报,1997(6).
- [11] 张敏,许成顺,杜修力. 中主应力系数及应力路径对砂土剪切特性影响的真三轴试验研究[J]. 水利学报,2015(9).
- [12] GB/T 50266-2013 工程岩体试验方法[S].
- [13] 王嵩,左双英,季永新. 隧道围岩动态损伤劣化的累进性破坏数值模拟[J]. 中外公路,2019(6).
- [14] 李贤,蔡林真. 某软岩隧道变形规律和二衬最佳支护时机选择研究[J]. 中外公路,2019(3).
- [15] 刘卓华,黄小桂,骆俊晖. Singh-Mitchell 蠕变模型在炭质岩隧道围岩变形分析中的应用[J]. 中外公路,2020(3).