

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.017

结构面长期强度确定方法对比研究*

刘昂¹, 阮宁¹, 朱军¹, 林文丽²

(1. 南京工业大学地质工程系, 江苏南京 210008; 2. 东南大学岩土工程系, 江苏南京 211189)

摘要: 结构面长期强度的确定对工程岩体长期安全稳定性评价具有重要意义。在对水泥砂浆结构面试件分别进行了不同法向应力条件的剪切应力分级剪切蠕变试验和循环剪切应力松弛试验的基础上, 分别利用过渡蠕变法、应力—应变等时曲线法和应力松弛法对结构面的长期强度进行了求解。结果表明: 过渡蠕变法确定的长期强度精度依赖于蠕变试验中加载应力级的划分; 等时曲线法将长期强度值视为考虑时效作用的屈服强度值, 结果偏保守; 应力松弛法考虑了循环加载条件应力松弛的终止条件和长期强度之间的关系求得, 结果合理明确。该研究对考虑时效作用的工程岩体安全稳定性支护提供设计依据。

关键词: 长期强度; 结构面; 过渡蠕变法; 等时曲线法; 应力松弛法

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0140-07

Comparative Study on Methods to Determine Long-term Strength of Discontinuity

LIU Ang¹, RUAN Ning¹, ZHU Jun¹, LIN Wenli²

(1. Department of Geological Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210008, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The long-term strength of discontinuities contained in rock mass is directly relate to the stability of engineering rock mass, so a reasonable approach to determine it is of great significance for engineering design. In this paper, a series of stepwise shear loading creep tests and cyclic shear stress relaxation tests on artificial discontinuities were conducted to investigate the determination of long-term strengths. Three determination methods, i.e. transition creep method, isochronous curve method and stress relaxation method, were employed to determine long-term strengths, respectively. The long-term strengths determined by the above-mentioned methods are compare to each other. It is indicated that the transition creep method can only determine the long-term strength contained in a range whose accuracy depends on the loading steps. The isochronous curve method, which treats the long-term strength as the yield strength considering time-effect, is apt to be conservative. The stress relaxation method recommended in this paper can guarantee the reasonable and accuracy results of long-term strength, which provides reference for the design of engineering rock masses considering time effect.

Keywords: long-term strength; discontinuity; transition creep method; isochronous curve method; stress relaxation method

* 收稿日期: 2019-07-13; 修回日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41602302)、江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心开放基金项目(OF201604)资助

作者简介: 刘昂(1985—), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士。主要从事岩体工程相关研究。E-mail: fuxiao@njtech.edu.cn

引言

近年来,结合能源开发和环境保护所进行的天然气、液化气、油料以及核废料地下储藏课题研究,以及地下工程开发涉及的隧道工程、大坝工程等,将岩体材料在不同荷载水平、不同荷载方式及不同温湿度等条件下的流变变形和破坏研究提到了十分紧迫和重要的位置^[1-4]。流变研究主要集中在蠕变、应力松弛和长期强度等方面。其中蠕变和应力松弛为流变的宏观表现,长期强度体现了蠕变和应力松弛综合作用的结果,与工程安全稳定密切相关。岩体长期强度明显低于其常规强度^[5-6]。刘沐宇等^[7]通过蠕变试验发现,硬石膏的长期强度约为其常规强度的66%;Q.Zh.Zhang等^[8]发现,弱不连续面的长期强度约为其常规强度的80%。显然,当加载应力大于长期强度时,岩石的损伤有增无减,最终发生破坏,因此采用长期强度作为设计指标保证岩体的长期稳定性更为合理。但目前国内外关于岩体结构面长期强度的研究并不多见,对于许多岩体工程,在计算中引入长期强度确定安全系数是很必要的,岩体工程中的强度变形和稳定问题都要经得住时间的考验。

确定长期强度最直接准确的方法^[9]为通过对岩石进行一系列不同应力水平的单级恒定荷载试验直至破坏,取破坏前受荷载时间足够长的荷载的最小值为岩体的长期强度。这种方法理论上合理,但由于需要时间过长,试验操作中难以实现。当前长期强度计算方法均是基于长期强度对应的应力对蠕变或者应力松弛特性的节点性影响进行确定,即在蠕变试验或者应力松弛试验过程中,依据长期强度对应的应力值前后蠕变和应力松弛试验曲线或者其衍生的曲线变化特点来判断长期强度值,如比较代表性过渡蠕变法、等时曲线法、应力松弛法等^[9-16]。Z.T.Bieniawski^[17]提出岩石的单轴压缩长期强度由不稳定裂缝的发展点即岩石的应力-应变曲线的拐点决定;B.Damjanac等^[18]对晶质脆性岩石的长期强度特性进行研究;J.G.L.Munday等^[11]对砂岩、大理石、花岗岩、花岗闪长岩蠕变过程中的体积膨胀与泊松比的变化进行了分析,对长期强度展开研究,发现基于泊松比得到的长期强度要高于基于体积膨胀得到的长期强度。崔希海等^[3]对红砂岩的蠕变特性进行单轴压缩蠕变实验,分析了岩石横

向蠕变规律与轴向蠕变规律差异,并指出当加载速率趋于零时,应将长期强度视为其失效强度。刘沐宇等^[7]基于室内纯扭转流变实验,研究了硬石膏的流变特性,通过对流变曲线的分析,建立了应力应变与时间之间的函数关系式,在此基础上获得了硬石膏的长期强度。

本文在对制作的人工水泥砂浆结构面试件分别进行分级剪切蠕变试验和循环剪切应力松弛试验的基础上,分别利用过渡蠕变法、等时曲线法和应力松弛法对结构面的长期强度进行求解,对比了解决结果,分析了三种确定方法的原理和合理性。

1 试验准备

1.1 试样制备

自然界中天然岩体结构面形态变化差异性大,充填物力学性质差异明显,且一直以来结构面粗糙度的评价问题没有得到很好的解决,因此,采用相对均一的天然结构面是一件十分困难的事情。本文基于Barton提出的标准剖面线^[19]中的第4条(4号结构面)为样本,利用制作好的钢模(图1),采用合适的试验材料人工浇注结构面模型试件(图2)进行试验。这样可以最大化保证结构面试样的均一性,降低结构面的差异性造成研究的复杂性。

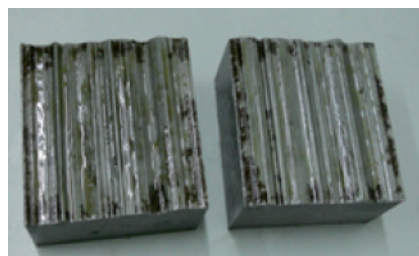


图1 制作结构面试件的钢模

Fig.1 Steel mold used to make structural samples

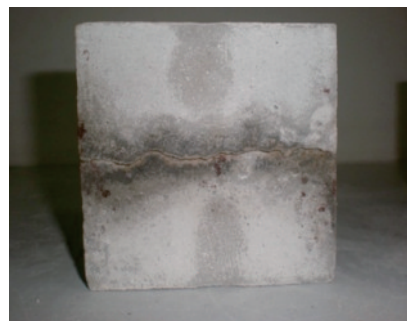


图2 人工结构面试样

Fig.2 Artificial sample with a structural plane

经过分析对比,试样制作材料选用325标号水泥、标准砂和水,具体配合比为水:水泥:砂=1:2:4。制作试件过程中,先将三种试验材料按照配合比搅拌混合均匀,待成浆后,分层浇筑到钢模中。为了保证模型试件的质量,采取了分层浇筑、分层捣实的原则,即每浇筑一层水泥砂浆,立刻对其进行捣实。在最后一层水泥砂浆浇筑和捣实完毕后,将试件表面抹平,静放24 h,待模型成形后进行拆模,最后将成形后的试件在恒温恒湿的标准条件下养护28 d后进行试验。本次试验中所有模型试件的养护条件与养护时间均保持一致,为获得良好的试验数据提供了良好的条件。另外,为保证结构面的完整性以及表面的平整度,在进行试样浇筑前,在钢模上涂抹润滑油,以保证试样顺利脱模。但由于材料的原因,部分结构面表面仍存在少量的孔洞气泡。

1.2 试验设备

采用长春试验机研究所研制的CSS-1950型岩石双轴流变试验机进行本次试验。该试验机主要由主机、电控箱、计算机控制处理器三部分组成,可对混凝土试件或岩石试件进行单轴抗压试验、以及在恒定法向应力下的常规剪切试验和剪切流变试

验。CSS-1950岩石双轴剪切流变试验机为伺服控制试验机,利用自带软件系统对试验过程进行控制和对试验数据进行自动采集,采集频率可按试验要求进行设定。其垂直轴最大压缩荷载为500 KN,水平轴最大压缩荷载为300 KN。试验机加载系统采用丝杠加压,加载方式可采用加载速率和应变速率两种控制方法。能同时测量试样两个不同方向的变形值,变形测量的精度为0.001 mm。

2 基于蠕变试验的长期强度确定

2.1 试验条件

蠕变试验加载采用应力分级加载,该加载方法可从单体试样获得更多蠕变试验资料,其基本原理考虑到对加载历史的记忆效应,同时避免结构面试件差异性带来的对试验数据的影响。进行了3组不同法向力条件下的剪切蠕变试验,3块试样。其中法向应力分别取完整水泥砂浆试件强度的10%、20%和30%,分级剪切应力分别取相应法向力作用下剪切强度的50%、60%、70%、80%和90%,试验条件见表1。试样命名为:结构面序号-法向力值,如4号结构面在法向力2.17 MPa下的结构面剪切蠕变试验对应的试样编号为4-2.17。

表1 应力分级剪切蠕变试验条件

Table 1 Test conditions of the stepwise shear loading creep tests

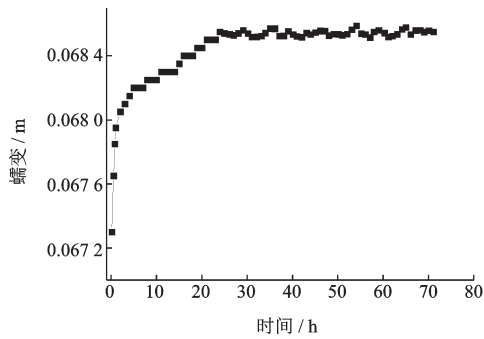
试样	法向应力/MPa	剪切应力/MPa					每级加载 时间/h
		第1级	第2级	第3级	第4级	第5级	
4-2.17	2.17	1.10	1.32	1.54	1.76	1.98	71~75
4-4.35	4.35	2.27	2.72	3.18	3.63	4.09	71~73
4-6.52	6.52	2.66	3.19	3.72	4.25	4.78	70~73

2.2 过渡蠕变法

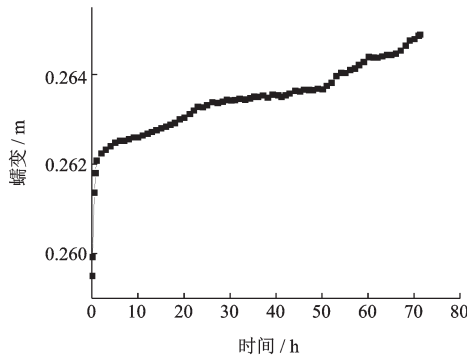
在蠕变条件下认为,当应力水平小于长期强度,只会发生衰减蠕变,并进入蠕变速率为0的稳态蠕变阶段;而一旦应力水平大于长期强度值,蠕变在完成衰减蠕变阶段以后将进入蠕变速率不为0的稳态蠕变阶段,并最终发展为破坏。其中,稳态蠕变阶段持续的时间取决于岩石的性质和应力水平的大小。过渡蠕变法确定结构面的长期强度正是基于此。取在稳态蠕变阶段刚好发生蠕变速率不为0的应力水平作为结构面的长期强度。

通过分级蠕变曲线得到的长期强度并不是一

个确定值,而是一个范围值。该范围值区间的大小取决于在进行岩石蠕变试验时,应力分级的跨度大小。应力分级越密集或者分级的应力值跨度越小,则得到的长期强度区间值越精确。通过对试验数据处理可以发现,以试样4-2.17为例,在应力水平分别为0.5 τ 、0.6 τ 和0.7 τ 时,蠕变曲线只有衰减蠕变阶段,如图3(a)所示;而应力水平达到0.8 τ 和0.9 τ 时,蠕变曲线除了含有衰减蠕变阶段以外,还有稳态蠕变速率阶段,如图3(b)所示。由此可以判断结构面的长期强度为0.7~0.8 τ 。为了工程安全考虑,可取0.7 τ 作为其长期强度值。



(a) 第3级



(b) 第4级

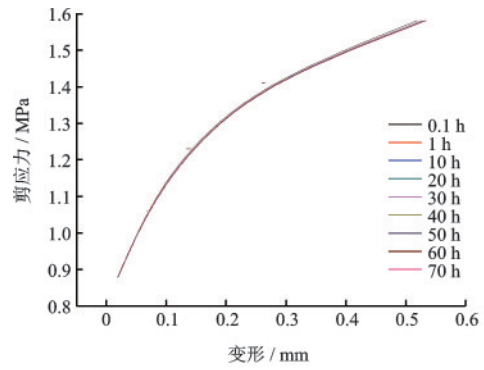
图3 第3、4级蠕变曲线(4-2.17)

Fig.3 3rd and 4th creep curves of the sample (4-2.17)

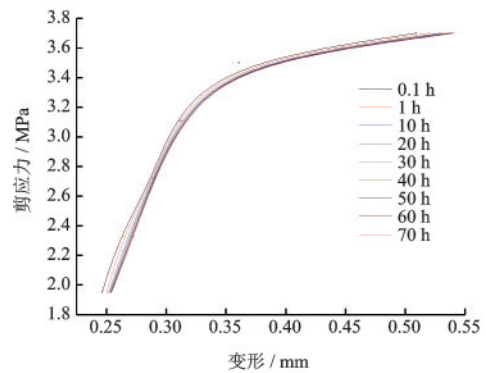
2.3 应力—应变等时曲线法

等时曲线反应了考虑时间效应的应力、应变关系,对认识蠕变的非线性特性具有重要价值。等时曲线法确定岩体的长期强度,是当前运用最为广泛的方法之一,并已于2001年编入了《水利水电工程岩石试验规程》^[20]。每条等时曲线都由近似线性段和非线性段组成,并且有一个转折点,且此转折点随着时间的增加逐渐降低,并趋于某极限值,即为长期强度。该转折点是岩石由粘弹性阶段向粘塑性阶段转化的节点,从该点以后,岩石的内部结构发生了恶化,开始发生破坏。通过分级蠕变曲线分别得到的等时曲线如图4所示,对拐点的趋势进行放大处理并估值,可得出各结构面长期强度,见表2。

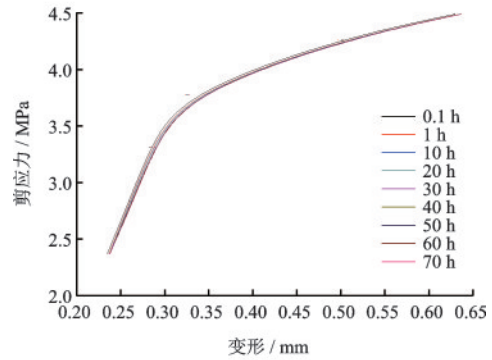
从表中可以看出,长期强度与瞬时强度的比值除了试样4-2.17以外,基本处在瞬时强度的70%~80%,平均比值为0.735,取得的结果有一定跳跃性。但在计算过程中存在较大的人为判断因素影响,从图4可以看出:等时曲线相对间隔较小,给判断拐点造成困难,需进行局部放大处理,这与水泥砂浆材料结构面偏硬,时效特性偏弱,所造成其拐点变



(a) 4-2.17



(b) 4-4.35



(c) 4-6.52

图4 等时曲线

Fig.4 Isochronous curves

表2 基于等时曲线法的长期强度

Table 2 Long-term strength determined by isochronous curves method

试样	瞬时强度/MPa	长期强度/MPa	τ_{∞}/τ
4-2.17	1.76	1.12	0.636
4-4.35	3.90	3.09	0.792
4-6.52	4.74	3.50	0.738

化趋势不明显有关;等时曲线在拐点附近应力分级需进一步细化,以便在等时曲线中能更轻易的确定拐点位置。

瞬时力学中应力应变曲线所划分的压密阶段、弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和破坏阶段四个阶段。将等时曲线中的应力应变关系与瞬时力学中应力应变关系进行对比,压密阶段的应力水平并不会导致蠕变,也不会有对应的等时曲线。峰值后期阶段结构面破裂机理比较复杂,在蠕变过程中对应加速蠕变阶段,很难实现等时间点的应力应变取值。那么,只有弹性变形阶段和弹塑性变形阶段与等时曲线有对应关系,分别对应等时曲线中的黏弹性变形阶段(线性阶段)和黏塑性变形阶段(非线性阶段)。在瞬时力学中,弹性变形阶段与弹塑性变形阶段,以屈服点为转折点;当考虑时间因素时,此拐点为黏弹性变形与黏塑性变形的转折点,那么该转折点本质上是考虑时间因素的屈服强度。也就是说基于等时曲线法确定的长期强度本质上是考虑时间因素屈服强度值的发展趋势值。将考虑时间因素的屈服强度作为长期强度值是否合理值得思考,本质上将考虑时间因素的峰值强度作为长期强度更为合理。可想而知,通过等时曲线法得到的长期强度趋于保守。

3 基于应力松弛试验的长期强度确定

3.1 加载方法与试验条件

应力松弛试验的加载方式采用循环加载剪切试验。其加载示意如图5所示,首先通过瞬时剪切强度试验对应力松弛试验中的循环应力加载值 σ_0 进行确定,本次取 0.85τ 为其加载值,结合基于蠕变试验的长期强度求解结果可知,该加载值大于长期强度值;将应力值加载至已确定的循环应力加载值 σ_0 ,并保持该应力值对应的应变值不变,作为应力松弛的试验条件,进行应力松弛试验,当应力松弛至

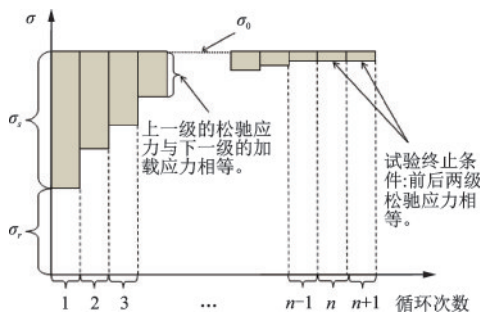


图5 循环加载方法示意^[5]

Fig.5 Illustration of the cyclic loading procedure^[5]

稳定,该级试验结束。其中松弛应力计做 σ_r ,剩余应力计做 σ_s , $\sigma_0 = \sigma_s + \sigma_r$;在剩余应力 σ_s 的基础上,重新将应力加载至 σ_0 ,保持其对应的应变值不变,进行第2级的应力松弛试验;以此类推进行第3级、第4级、...试验。每一级试验的剩余应力值分别记作 $\sigma_{s1}, \sigma_{s2}, \sigma_{s3}, \dots, \sigma_{sn-1}, \sigma_{sn}, \sigma_{sn+1}$ 。当 $\sigma_{sn} \geq \sigma_{sn+1}$ 时,试验结束,试验条件见表3。

表3 剪切应力松弛试验条件

Table 3 Test conditions of the shear relaxation tests

试样	剪切强度/MPa	法向应力/MPa	剪切应力/MPa	每级加载时间/h
4-4	4.01	4	3.41	72.07
4-8	7.71	8	6.55	72.07
4-12	11.41	12	9.70	84.79

3.2 应力松弛法确定结构面长期强度

通过应力松弛试验,可得到应力松弛曲线,如图6所示。应力松弛特性与不同应力水平的裂隙扩展特性和蠕变特性紧密相关。其松弛形式可归纳为两种方式:一种是应力集中区域裂隙的发展对应力释放;另一种是荷载条件下跟时间相关的黏性变形。两种方式均促进了变形的发展,为满足应力松弛的试验条件,将通过释放荷载过程中累积的弹性变形置换荷载、时间等因素导致的变形,进而松弛掉一部分荷载应力。在循环应力相等的条件下,初始加载应力大于结构面的长期强度,将导致岩石内部部分区域应力集中并发生裂隙发展,因为循环加载应力为等值,随着循环次数的增加,裂隙的发展将逐渐减少,应力松弛的方式将逐渐从初始阶段的裂隙发展为主向黏性变形的过渡。当剩余应力只能发生衰减蠕变,蠕变变形将终止,也将不会有持续的应力松弛现象。当应力水平能形成蠕变速率不为0的稳态蠕变阶段时,此时继续有黏性变形增长,为满足应力松弛变形不变的试验条件,试样必然会释放一定弹性变形来满足变形的恒定,直到应力水平衰减只能发生衰减蠕变,此应力水平下,岩石刚好发生非持续性的黏性变形,即为岩石的长期强度。分析可知,通过等应力循环加载应力松弛所得到的剩余应力的渐进值即为长期强度。

从图7中可得到剩余应力的渐近线,即其长期强度的渐近线,试样4-4、4-8和4-12的剪切长期强度 τ_∞ 最终分别趋于3.03、5.86和8.85 MPa,长期强度与瞬时强度的比值分别为0.756、0.760和0.775,

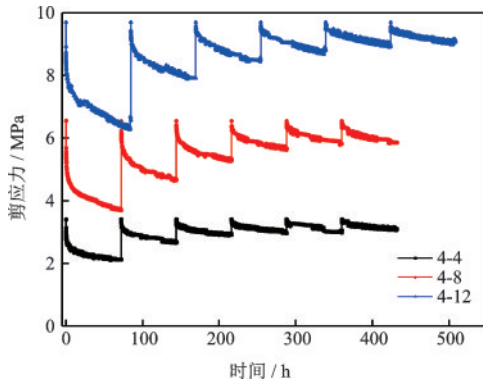


图6 应力松弛曲线^[5]

Fig.6 Stress relaxation curves^[5]

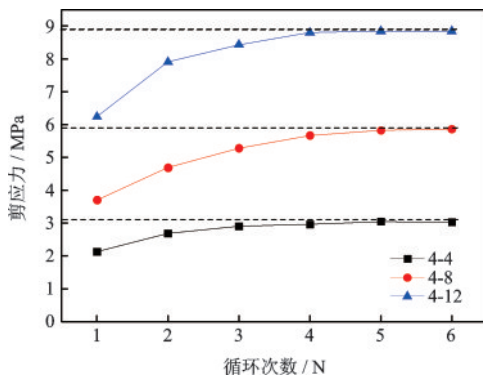


图7 长期强度趋势线

Fig.7 Trend lines of long-term strengths

平均值为0.764,具体见表4。

表4 长期强度与瞬时强度对比

Table 4 Comparison of long-term and instantaneous strengths

试样	瞬时强度/ MPa	长期强度/ MPa	τ_{∞}/τ
4-4	4.01	3.03	0.756
4-8	7.71	5.86	0.760
4-12	11.41	8.85	0.775

4 结果对比与讨论

基于三种长期强度确定方法,长期强度与瞬时强度的平均比值见表5。表中显示,不同的确定方法得到的长期强度取值有一定的差异性,过渡蠕变法只能获得一个范围值,基于工程安全考虑,可取范围的下限值,得到的结果也将相对保守;等时曲线法得到的结果为一确定值,但其拐点确定带有一定的人为因素,另外该确定方法以考虑时间因素的

表5 基于不同方法的长期强度与瞬时强度比值

Table 5 Ratios of long-term strength to instantaneous strength on basis of three different methods

长期强度确定方法	长期强度与瞬时强度的 平均比值
过渡蠕变法	0.700~0.800
等时曲线法	0.735
应力松弛法	0.776

屈服强度渐近值作为长期强度,相对保守且合理性有待进一步考证;相比而言,应力松弛法基于蠕变和应力松弛之间关系,能更准确地获取长期强度值,试验的操作时间及循环次数可依据应力松弛至稳定应力的时间及剩余应力趋于稳定的时间进行确定。

三种方法均从不同角度阐释了长期强度与流变行为之间的关系,本质上均是基于蠕变特性展开。过渡蠕变法基于不同应力水平条件下稳态蠕变阶段的蠕变速率进行判断,假设岩体进入蠕变速率大于0的稳态蠕变阶段,必将发展为破坏,并认为长期强度为岩体在蠕变条件下不发生破坏的最大应力值;等时曲线法基于蠕变应力应变关系的非线性转折点,认应力水平小于长期强度的蠕变成分为粘弹性变形,而大于长期强度时得蠕变包含了黏塑性变形;应力松弛法从应力松弛的终止条件出发,认为应力松弛过程伴随着蠕变,且蠕变为应力松弛的诱发因素之一,蠕变的发展的停止也将致使应力松弛的终止,而蠕变发展终止的应力条件以长期强度应力值转折,从而建立了应力松弛终止条件与长期强度间的密切关系。从长期强度确定值的准确性而言,应力松弛法更为可取。

5 结论

(1)基于蠕变试验分别利用过渡蠕变法和等时曲线法对长期强度进行了求解。过渡蠕变法只能确定长期强度的范围值,其求解精度与应力分级蠕变试验中的分级跨度相关,从工程安全的角度,可取其范围的下限值作为长期强度;等时曲线法黏弹性变形至黏塑性变形的转折点的渐进值作为长期强度,其求解过程中发现,等时曲线的曲线形态上存在一定的差异性,曲线拐点的确定存在一定的人为因素。

(2)等时曲线求解的长期强度本质上是考虑时效作用的屈服强度渐进值,其值相对保守;应力松弛法考虑了蠕变和应力松弛之间的联系,取大于材

料的长期强度的加载值进行应力松弛试验,采用循环加载的方式,在应力松弛条件下的剩余应力将最终趋于试样的长期强度,该方法能更准确地获得长期强度值。

(3)三种确定方法本质上均基于结构面的蠕变特性。

参考文献:

- [1] Li Y, Xia C. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(3):467-475.
- [2] 孙均. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(6):1081-1106.
Sun J. Rock rheological mechanic and its advance in engineering applications[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6):1081-1106. (in Chinese).
- [3] 崔希海,付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5):1021-1024.
Cui X H, Fu Zh L. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5):1021-1024. (in Chinese).
- [4] Barton N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, 5(4): 249-261.
- [5] Fabre G, Pellet F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(6):950-960.
- [6] Zhang Q Zh, Shen M R, Clark C. Shearing mechanical properties of structural planes of a regular tooth rock[J]. *Materials Testing*, 2011, 53(9):540-545.
- [7] 刘沐宇,徐长佑. 硬石膏的流变特性及其长期强度的确定[J]. *中国矿业*, 2000, 9(2): 53-55.
Liu M Y, Xu Ch Y. Rheological properties of anhydrite and determination of its long-time strength[J]. *China Mining Magazine*, 2000, 9(2): 53-55. (in Chinese)
- [8] Zhang Q Zh, Shen M R, Ding W Q. The shear creep characteristics of a green schist weak structural marble surface[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2015, 22(9): 697-704.
- [9] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社, 1994: 194-207.
Liu X. Introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:194-207. (in Chinese).
- [10] 刘昂,沈明荣,蒋景彩,等. 基于应力松弛试验的结构面长期强度确定方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9):1916-1924.
Liu A, Shen M R, Jiang J C, et al. Determining long-term strength of rock with discontinuities using shear stress relaxation test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(9):1916-1924. (in Chinese).
- [11] Munday J G L, Mohamed A E, Dhir R K. A criterion for predicting the long-term strength of rock [C] //in Conference: *Rock Engineering*. 1977: 127-35.
- [12] 庞正江,胡建敏. 结构面剪切流变及其长期强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(增):1179-1182.
Pang Zh J, Hu J M. Shear creep and long-term strength test research on unconformity plane[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Sup):1179-1182. (in Chinese).
- [13] Chandler N A. Quantifying long-term strength and rock damage properties from plots of shear strain versus volume strain[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 59: 105-110.
- [14] Damjanac B., Fairhurst C. Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(5): 513-531.
- [15] 沈明荣,谌洪菊. 红砂岩长期强度特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11):3301-3305.
Shen M R, Chen H J. Testing study of long-term strength characteristics of red sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11):3301-3305. (in Chinese)
- [16] 沈明荣,谌洪菊,张清照. 基于蠕变试验的结构面长期强度确定方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 1-7.
Shen M R, Chen H J, Zhang Q Zh. Method for determining long-term strength of discontinuity using shear creep test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1):1-7. (in Chinese)
- [17] Bieniawski Z T. Stability concept of brittle fracture propagation in rock[J]. *Engineering Geology*, 1967, 2(3): 149-162.
- [18] Damjanac B, Fairhurst C. Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(5): 513-531.
- [19] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice [J]. *Rock Mechanics*, 1977, 10(1/2): 1-54.
- [20] 水利水电工程岩石试验规程:SL264—2001[S]. 武汉:长江水利委员会长江科学院, 2001.
Rock test code for hydraulic and hydroelectric engineering: SL264—2001 [S]. Wuhan: Yangtze River Water Resources Commission Yangtze River Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)