

岩体结构面流变特性及长期强度的试验研究

侯宏江 沈明荣

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

【摘要】 采用室内剪切蠕变试验, 通过对两组不同爬坡角的结构面进行剪切蠕变试验, 得出不同应力水平下的蠕变试验曲线, 并给出相应的剪切蠕变方程。研究表明, 结构面的剪切蠕变和加载持续时间与应力水平的大小有关。最后预测了这两组结构面的长期强度。

【关键词】 岩体结构面; 剪切蠕变试验; 蠕变方程; 长期强度

【中图分类号】 TU 459

Rheological Properties of Rockmass Discontinuities and Trial Research of Its Long-term Strength

【Abstract】 The rheological properties of rock-mass discontinuities are researched by laboratory creep test. By analyzing the obtained rheological curve, a function relation formula between the strain and time is established. Study shows that the strain is not only related to time but also to the stress loaded. Finally the long-term strength is determined.

【Key words】 rock-mass discontinuities; shear creep test; creep equation; long-term strength

0 引言

岩石和岩体中的节理裂隙、断层等各类结构面在长期荷载作用下, 都具有十分明显的流变特征。对岩石工程进行稳定性评价以及在结构设计与施工中都必须考虑岩体的流变属性。结构面的流变力学性能往往控制着岩体的实效变形和长期强度。研究各类结构面的时效特征是岩石流变学的一项重要内容。由于结构面的流变性能非常复杂, 影响因素也很多, 相关的研究成果也很少。笔者通过试验手段, 分析了岩体结构面的蠕变特性, 在此基础上分析了结构面的长期强度, 总结了规则齿型的硬性结构面的蠕变特性规律及其长期强度的确定方法, 获得了较为理想的结果。

1 试验试件以及试验方案的实施

研究岩体流变特性的试验方法主要有: 常

应力下的流变试验和常应变下的应力松弛试验^[1]。本试验采用前种试验方法, 试验是在长春试验机研究所研制的 CSS-2950 岩石双轴流变试验机上进行的。该试验机可同时或分别对试件施加垂直轴压缩(拉伸)荷载和水平轴压缩荷载, 能同时测量试件的双轴双侧变形值, 变形测量精度为 0.001 mm, 能很好的满足试验精度要求。试件采用水泥砂浆制作规则齿状结构面模型, 试件规格: 10 cm × 10 cm × 10 cm, 规则锯齿状结构面单齿长度 10 mm, 齿型个数 10, 采用两种角度的爬坡角: 30°、45°。模型材料选用 325 标号水泥, 标准砂和水, 配合比: $m(\text{水泥}): m(\text{砂})=1:2$; $m(\text{水}): m(\text{水泥})=0.4$, 模型成形后 24 h 拆模, 养护 28 d。

本次试验采用分级加载方式即陈氏加载法, 在垂直荷载始终固定不变的情况下, 进行

了不同爬坡角,不同剪切应力的剪切蠕变试验。垂直荷载大小按相同材料单轴抗压强度 σ_c 的10%进行,本试验为24.1 kN。剪切应力值见表1。在剪切蠕变应力 τ 水平下变形进入稳态蠕变后,把剪切应力提高到 τ_2 ,在该级应力水平下变形进入稳态蠕变后,再提高应力水平,直到试件剪切蠕变破坏为止。

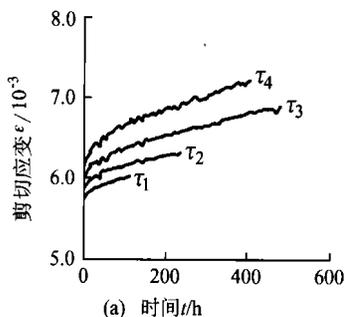
表1 不同爬坡角结构面压力等级

应力 分级	爬 坡 角					
	30°			45°		
	τ/MPa	τ_f/MPa	τ/τ_f	τ/MPa	τ_f/MPa	τ/τ_f
1	2.126	3.76	0.56	2.895	4.96	0.58
2	2.436	3.76	0.65	3.308	4.96	0.66
3	2.746	3.76	0.74	3.722	4.96	0.75
4	3.008	3.76	0.80	3.982	4.96	0.80
5				4.132	4.96	0.83
6				4.342	4.96	0.87

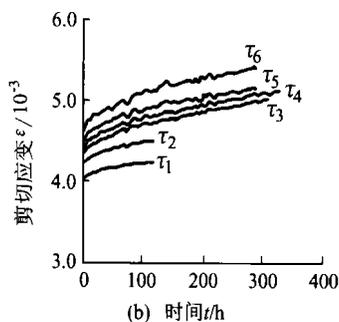
2 试验结果分析

流变试验资料的整理采用陈宗基先生提出的方法。其流变过程用剪切变形 γ 与时间 t 曲线来表示,然后利用叠加原理从试验获取的 $\gamma-t$ 关系曲线中整理出各级荷载下的剪应变叠加曲线^[2]。两组结构面在各级剪应力作用下的剪切蠕变曲线见图1。

每一级剪应力加载的瞬间,结构面产生瞬时的应变。之后在剪应力作用下应变随时间而增加,剪切速率随时间减小。当应力水平增大时,试件沿结构面的应变随时间的变化趋向稳定。由曲线形态可知:岩体结构面的蠕变过程中出现瞬时蠕变阶段,过渡蠕变阶段和稳态蠕变阶段,没有出现加速蠕变阶段。



(a) 30°爬坡角结构面剪切蠕变曲线



(b) 45°爬坡角结构面剪切蠕变曲线

图1 不同爬坡角结构面下剪切蠕变曲线

试件在恒定外荷载持续作用下沿着结构面的剪切应变 $\gamma(t)$ 可以用下列的经验公式来表示^[3]:

$$\gamma(t) = A + B \ln t + Ct \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 对定荷载均为常数,第1项为描述岩体结构面的瞬时剪切应变,第2、3项分别描述结构面在第一和第二阶段的剪切蠕变。加速蠕变阶段在结构面的蠕变过程中没有出现,在公式中未予考虑。

采用最小二乘法对试验数据进行回归分析,得到了结构面在不同应力水平下的剪切蠕变方程(见表2)。

根据两组结构面的流变曲线(见图1)及

剪切蠕变方程,剪切应变 γ 不仅是加载时间的函数,而且与加载的剪切应力水平的大小有关。从表2中可以看出,结构面剪切蠕变方程中的系数 A 、 B 、 C 随着应力水平的增加呈现出规律性的变化。

为了寻求系数 A 、 B 、 C 与应力水平的关系,笔者以45°爬坡角的结构面为例,以 τ/τ_f 为横坐标,以系数 A 、 B 、 C 为纵坐标,作出其散点图(见图2),并进行拟合,发现系数 A 、 B 、 C 与应力的依赖关系都可采用以下公式加以表述:

$$M = ke^{a(\tau/\tau_f)} \quad (2)$$

式中: M 为系数 A 、 B 、 C ; k 和 a 为试验常数,其值取决于结构面的性质和结构面的粗糙程度。

表2 不同应力水平下结构面剪切蠕变方程

试件编号	法向应力 s_n/MPa	剪应力 τ/MPa	剪切蠕变方程 ($\gamma/\times 10^{-3}, t/h$)	相关系数 R
30-1	2.41	2.126	$\gamma(t) = 5.162 + 3.18e^{-2\ln t} + 7.02e^{-3t}$	0.843
		2.436	$\gamma(t) = 5.847 + 4.097e^{-2\ln t} + 1.113e^{-3t}$	0.991
		2.746	$\gamma(t) = 5.935 + 6.78e^{-2\ln t} + 1.129e^{-3t}$	0.997
		3.008	$\gamma(t) = 5.957 + 7.15e^{-2\ln t} + 3.934e^{-3t}$	0.929
45-1	2.41	2.895	$\gamma(t) = 3.001 + 0.286\ln t + 0.31e^{-2t}$	0.889
		3.308	$\gamma(t) = 2.883 + 0.325\ln t + 1.42e^{-2t}$	0.803
		3.722	$\gamma(t) = 3.362 + 0.356\ln t + 1.77e^{-2t}$	0.815
		3.928	$\gamma(t) = 3.458 + 0.347\ln t + 2.54e^{-2t}$	0.823
		4.132	$\gamma(t) = 3.513 + 0.412\ln t + 2.84e^{-2t}$	0.849
		4.342	$\gamma(t) = 3.706 + 0.452\ln t + 3.86e^{-2t}$	0.75

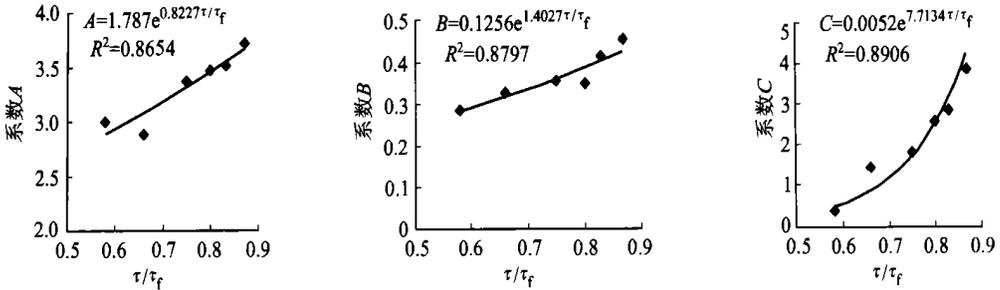
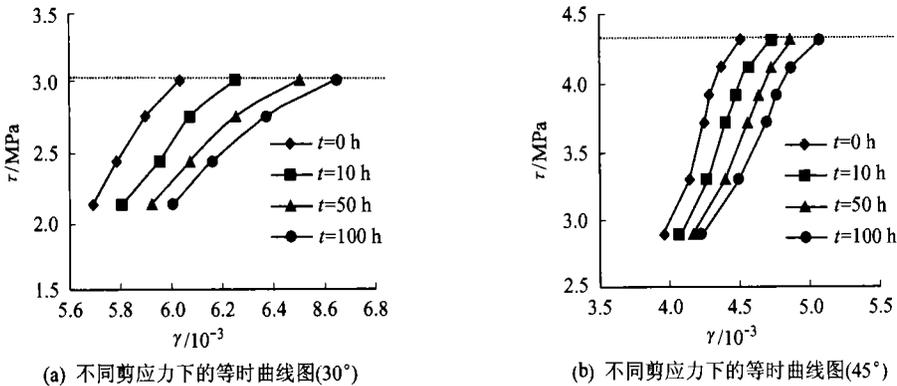


图2 系数A、B、C与 τ/τ_f 关系图

随着剪切应力水平的增大,系数A, B, C也在不断的增大,即剪切应变值 γ 迅速增大,结构面也将迅速进入破坏阶段。方程 $\gamma(t) = A + B\ln t + Ct$ 可以较好的表示结构面的蠕变过程。

3 岩体结构面长期强度的确定

在两组试件的 $\gamma-t$ 曲线上,以h为单位,截取不同剪切应力 τ_i 下的应变 γ_i 。应用叠加原理,将 $\gamma-t$ 曲线整理成 $t=t_1, t_2, \dots, t_n$ 的剪应力-剪应变($\tau-\gamma$ 曲线)等时线簇^[2](见图3)。



(a) 不同剪应力下的等时曲线图(30°)

(b) 不同剪应力下的等时曲线图(45°)

图3 等时线簇

系数同回弹压缩系数的比值为 ψ_s ; 这是符合工程实际情况的。

参 考 文 献

- 1 黄熙龄. 高层建筑厚板反力及变形特征试验研究. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 121~136
- 2 GB 5007—2002 建筑地基基础设计规范
- 3 邸道怀. 高层建筑与裙房基础整体连接设计时基底反力和变形规律研究. 工业建筑, 2002, 32(12):

- 10~11
- 4 潘安平. 高层建筑和裙房连体筏板地基反力分布的探讨, 岩土工程技术, 2003(2): 160~162
- 5 [美] HF 温特科恩, 方晓阳主编. 基础工程手册. 钱鸿缙, 叶书 等译校. 北京: 中国建筑工业出版社, 1975. 212
- 6 华南理工大学, 东南大学, 浙江大学, 湖南大学编. 地基及基础. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 72

收稿日期: 2003-08-11

(上接第 326 页)

根据图 3(a)(b) 图中等时曲线的形态, 其曲线随着时间的增长趋于平缓, 按照这种趋势, 可以绘制出一条 $t \rightarrow \infty$ 的平行于横坐标的直线, 该直线与纵坐标 (t) 相交所得到的剪应力值 t_∞ 即为该结构面的长期强度。所求结果见表 3。

表 3 两组结构面长期强度

试件编号	长期强度 t_∞/MPa	极限剪切强度 t_f/MPa	$(t_f/t_\infty)/\%$
30-1	2.96	3.76	78.1
45-1	4.26	4.96	85.8

4 结 论

本文通过对两组硬性结构面的流变特性及长期强度的研究, 取得以下几点认识:

1) 岩体结构面的蠕变过程中出现瞬时蠕变阶段, 过渡蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 没有出现加速蠕变阶段。

2) 方程 $\gamma(t) = A + B \ln t + Ct$ 可以较好的表示结构面的蠕变过程。岩体结构面的蠕变不仅与荷载的时间有关系, 而且与应力水平的大小有密切的关系, 蠕变方程中的系数 A , B , C 随着应力水平的增大而呈指数规律变化。

3) 硬性结构面的长期强度可以用其极限剪切强度的 80% 来估算。在岩体工程中, 该值可以作为其长期强度的上限值。

参 考 文 献

- 1 刘沐宇, 徐长佑. 硬石膏的流变特性及其长期强度的确定. 武汉工业大学学报 2000, 9(2): 53~55
- 2 刘 雄. 岩石流变学概论. 北京: 地质出版社, 1994
- 3 丁秀丽, 刘雄贞. 岩体结构面蠕变特性的研究. 地下空间, 1999, 19(5): 681~687

收稿日期: 2003-09-08