

文章编号: 1000-7598(2011)11-3301-05

红砂岩长期强度特性的试验研究

沈明荣, 谌洪菊

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 岩石的流变特性是岩石的重要力学特性之一, 其中岩石的长期强度是绝大多数岩土工程所必须引起重视的力学特性, 然而就目前研究现状而言, 与蠕变特性相比较是极不对称的。由岩石蠕变试验确定岩石的长期强度是现有最常用的方法, 具有重要的现实意义。通过对完整红砂岩在 CSS-2950 岩石双轴流变试验机上进行的单轴压缩蠕变试验, 利用过渡蠕变法、等时曲线法探讨了这些方法确定岩石长期强度在理论上的正确性和试验方法的可操作性, 同时, 将蠕变曲线与应力-应变曲线结合, 提出了确定岩石长期强度的新方法, 预测了岩石在荷载作用下可能破坏的时间。分析结果表明, 将蠕变曲线与应力-应变曲线结合确定岩石长期强度对岩土工程设计具有重要的指导意义。

关键词: 应力-应变曲线; 蠕变曲线; 数值拟合; 岩石长期强度; 岩石破坏时间预测

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Testing study of long-term strength characteristics of red sandstone

SHEN Ming-rong, CHEN Hong-ju

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Rheological property is one of the most important mechanical properties of rock. Great importance shall be attached to long-term strength of the rock among mechanical properties in most geotechnical engineering, while the present study of it is asymmetrical compared with the creep property. Creep test is the most common and practical way to confirm long-term strength of rock. Based on uniaxial compression creep test of red sandstone rock in the CSS-2950 biaxial rheological testing machine; theory accuracy and operability of transition creep and isochronous curve methods are discussed in the research of testing long-term strength of the rock. Meanwhile, a new method to confirm long-term strength of the rock is proposed; and the time for rock to be destroyed under load is predicted by the combination of creep curve and stress-strain curve. The results show that the combination of creep curve and stress-strain curve plays a leading role in the confirmation of long-term strength of the rock in geotechnical engineering field.

Key words: stress-strain curve; creep curve; numerical fitting; long-term strength of rock; time prediction of rock failure

1 引言

国内外对于岩石的流变现象, 大都集中在对蠕变的研究, 对于长期强度的研究很少, 而对于长期强度的确定方法研究则少之又少。目前长期强度的确定方法有直接法和间接法, 而直接法费时而昂贵, 因此, 目前大部分采用室内试验进行的间接法确定岩石的长期强度^[1]。国外, Schmidtke、Lajtai^[2]通过岩石静态疲劳试验得出引起花岗岩试件逐步破坏的最小载荷是单轴抗压强度的 60%。Szczepanik、Milne 等^[3]得出花岗岩在长期加载下, 荷载为常规单轴压

缩试验峰值强度的 70%~80%时, 试样开始出现扩容现象, 并以此荷载作为该试样的长期强度。而国内主要是借助蠕变曲线分析岩石的长期强度, 蠕变试验方法上采用陈氏加载法^[1]。崔希海等^[4]通过红砂岩的蠕变曲线得出, 根据横向稳定蠕变的应力阈值确定的岩石长期强度值是根据轴向稳定蠕变阈值所确定的岩石长期强度值的 65%~81%; 刘沐宇等^[5]通过对硬石膏的扭转流变试验得出, 硬石膏的长期强为 2.77 MPa, 为瞬时强度的 66%。但鉴于各种间接法对于长期强度的定义不一致, 因而得出来的结论可比性较小, 本文主要通过室内单轴压缩蠕

收稿日期: 2010-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41072203); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20090072110012)。

第一作者简介: 沈明荣, 男, 1951 年生, 工学硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石、结构面力学特性及本构关系方面的研究工作。

E-mail: shenmingrong@mail.tongji.edu.cn

变试验,利用过渡蠕变法、等时曲线法等间接确定长期强度的方法,对完整红砂岩进行了分析探讨,并将蠕变曲线与应力-应变曲线结合,提出了确定岩石长期强度的新方法,预测了岩石在荷载作用下可能破坏的时间。

2 室内试验

本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常应力流变试验,该试验机能同时测量试件的双侧变形值,变形测量精度为 0.001 mm,能很好地满足试验精度要求。试验采用 50 mm×50 mm×100 mm 的立方体试件。首先进行单轴压缩试验,为获得较完整的应力-应变全过程曲线,采取以控制应变速率的方式加载,在控制应变速率值为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 下获得应力-应变全过程曲线。蠕变试验采用陈氏加载法,通过在试验机上进行单轴压缩试验测得的红砂岩极限抗压强度 33.50 MPa 作为蠕变试验加载依据,本文蠕变试验中的第 1 级荷载取常规试验极限荷载的 40% 左右,即 14.55 MPa。通过之前对一块试样进行的预压试验,发现因该批试样放置一段时间且红砂岩属于较软岩石,蠕变曲线易获得,且在低应力水平下经过较短时间变形就基本趋于稳定,故每级荷载加载时间在 40 min 左右,荷载级差控制在 0.4 MPa。

3 试验结果整理及分析

共对 14 块试样进行了单轴抗压强度试验,其中试样 14 获得了较理想的应力-应变全过程曲线。从全过程曲线上得到试样 14 的峰值强度为 33.50 MPa。(如图 1 所示)。

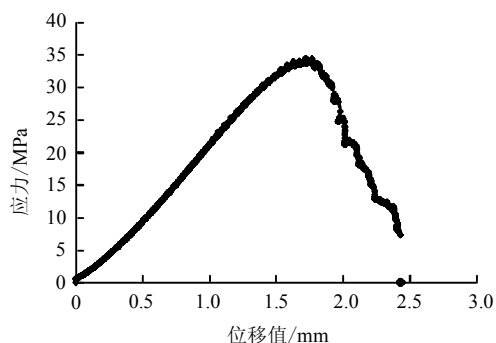


图 1 试件 14 应力-位移全过程曲线
Fig.1 Stress-deformation curve of sample 14

共对 16 块试样进行了流变试验,其中试样 12 获得了比较理想的蠕变曲线(见图 2)。从图中可以看出,在多个不同级荷载下,试样都出现了衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段,且不同级荷载下稳态蠕变

阶段的蠕变速率相差不大;在蠕变荷载加到 27.20 MPa 时,蠕变曲线出现了较完整的蠕变 3 阶段,当蠕变第 3 阶段一出现,试样随即破坏。将蠕变破坏荷载与常规压缩试验强度对比可知,该红砂岩蠕变破坏强度为常规压缩试验峰值强度的 81.2%。

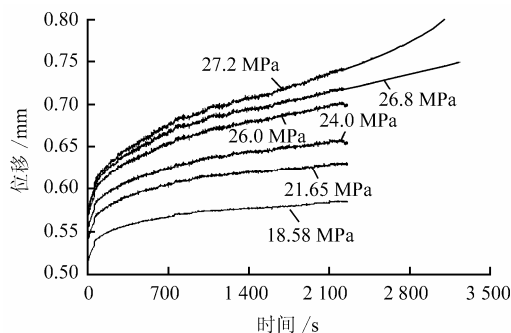


图 2 不同应力水平下典型蠕变曲线
Fig.2 The creep curves under different stress levels

4 长期强度确定方法的对比分析

根据目前室内单轴压缩蠕变试验间接确定岩石长期强度的方法对试验数据进行分析^[6]。对能够适用于本试验的长期强度的方法进行分析探讨。

4.1 过渡蠕变法

过渡蠕变法认为,稳态蠕变速度为 0 时的最大荷载可作为岩石的长期强度^[1]。该方法基于在低应力、低温度水平下岩石裂纹分析。由于岩石破坏带有扩容效应,而扩容与岩石内部裂纹的不稳定扩展是联系在一起的,岩石内部裂纹的不稳定扩展存在一个应力阈值。当施加的外部荷载低于该应力阈值,岩石不会破坏,高于该值则岩石内部裂纹出现不稳定扩展直至岩石破坏。因此,通过蠕变速率的变化,找出不稳定扩展的应力阈值作为岩石的长期强度,这就是过渡蠕变法确定岩石长期强度的基本思想。在试验中很难直接找到稳态蠕变速度为 0 所对应的应力水平,通常采用陈氏加载法进行多应力水平下的蠕变试验,分析各应力水平下的蠕变速率与时间的变化规律,来确定岩石长期强度值。图 2 所示红砂岩多级应力水平下的一组蠕变曲线,通过对图中的各条曲线拟合可知,在荷载为 22.45 MPa 时的蠕变曲线拟合公式 $u = 0.075 0 \times (8.488 0 - e^{-0.001 5t})$,由该式可以得知,试样在荷载为 22.45 MPa 下未出现稳态蠕变,对于试样在荷载为 22.85 MPa 时的蠕变拟合曲线 $u = 0.050 6 \times (12.005 0 - e^{-0.003 9t}) + 1.649 1 \times 10^{-5} t$ 。从拟合曲线上可以看到,在该荷载下出现稳态蠕变。根据过渡蠕变法可确定的长期强度在 22.45 ~

22.85 MPa。

通过上述分析可知, 过渡蠕变法不易得出岩石长期强度的一个确定的具体值, 只能给出长期强度值处在某个区间内, 而该区间的大小与蠕变试验的应力级差有关。因此, 蠕变试验的应力级差越小, 越易缩小长期强度值区间。需要指出的是, 当荷载为 22.45 MPa 时, 蠕变曲线若采取不同的函数形式, 即 $u = 0.0504 \times (12.01 - e^{-0.0038t}) + 1.5760 \times 10^{-5}t$ 拟合, 同样相关系数很高。所以, 过渡蠕变速率法基于蠕变速率找裂纹不稳定扩展时的应力阈值, 关键在于如何去求得蠕变速率, 但目前大部分确定蠕变是否出现稳态阶段, 主要借助于数据拟合。而数据拟合对于低应力水平下的蠕变曲线拟合成衰减或有出现稳态蠕变的曲线相关系数都非常高, 不易判断。因此, 将下限值再降低一级, 确定长期强度为 22.05~22.85 MPa。

4.2 等时曲线法

等时曲线是指在一组不同应力水平的蠕变曲线中, 相等时间所对应的蠕变变形与应力的关系曲线。而等时曲线法是将各等时线的直线向曲线转变, 类似屈服应力形成的渐进线所对应的应力值为岩石的长期强度^[7]。各等时线的拐点标志着岩石由黏弹性阶段向黏塑性阶段转化。岩石内部结构发生变化, 并开始发生破坏。等时曲线法确定岩石的长期强度是目前采用最多的方法, 并已引入相关的岩石力学试验规范中。根据试样 12 的蠕变曲线 (图 3) 所绘制等时曲线如图 4 所示。

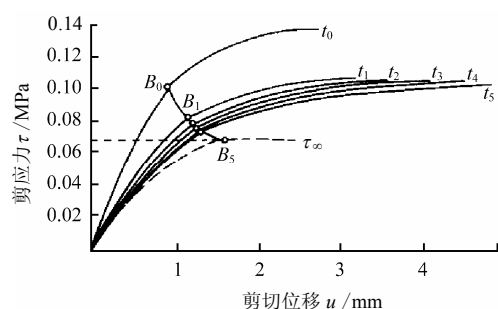


图 3 试样 12 蠕变试验的等时曲线
Fig.3 Creep curves of sample 12

从图中可以看出, 在 $t=0$ s, 等时线基本呈直线状态; $t=0$ s 之后的等时线出现基本上是由两拐点的 3 段线组成, 一直线段和两非线性段组成, 两非线性段的拐点位置作为人为选取的拐点位置, 如图 4 中圆点所示。每条等时曲线的拐点所对应的荷载基本上在 24 MPa 左右。因此, 确定该岩石的长期强度为 24 MPa, 本试验所作出的等时曲线的拐点位

置并不是如定义所描述的随时间的增加逐步降低, 并趋于稳定值。

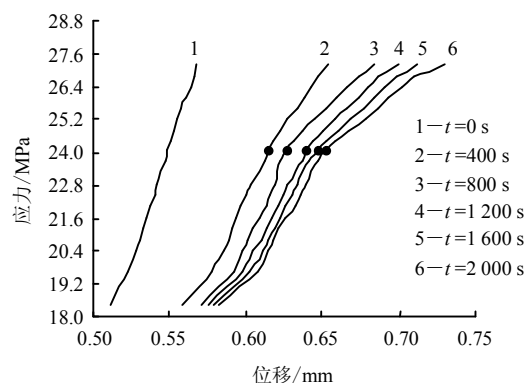


图 4 试样 12 的等时曲线
Fig.4 Isochronous curves of sample 12

等时曲线法确定岩石的长期强度理论上的定义与过渡蠕变法不相一致, 由于前者的定义采用黏弹性与黏塑性的转折点作为判断的主要依据, 因此, 该方法在理论上的合理性有待于进一步的验证。此外, 本试验表明, 等时曲线拐点的变化规律具有多样性, 有必要深入地研究等时曲线法确定岩石长期强度的可操作性。

4.3 蠕变曲线与应力-应变曲线结合

通过陈氏加载法进行蠕变试验通常在一块试样上可获得多级应力水平下瞬态蠕变阶段和稳态蠕变两阶段的曲线, 如图 5 所示。

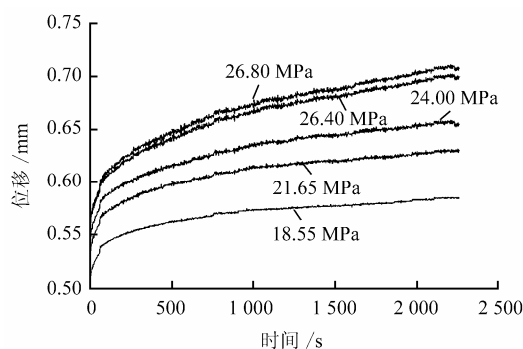


图 5 不同应力水平下典型蠕变曲线
Fig.5 Typical creep curves under different stress levels

根据岩石蠕变曲线的变化特征, 将瞬态蠕变、稳态蠕变分别用 $u = A(1 - e^{-Ct})$ 、 $u = Dt$ 拟合。因此, 整个蠕变曲线拟合表达式为

$$u = A(B - e^{-Ct}) + Dt \quad (1)$$

由曲线可知, 系数 A 、 B 、 C 、 D 是一组与应力

水平有关的常数, 其中系数 A 与瞬时应变相对应, 系数 B 、 C 由衰减蠕变的特征所决定的参数, D 为稳态蠕变速率。本次试验中红砂岩在各级应力水平下的拟合结果见表 1。

表 1 蠕变拟合公式
Table 1 Creep fitting formula

拟合公式	R	荷载 /MPa
$u = 0.050\ 6(12.005\ 0 - e^{-0.003\ 9t}) + 1.649\ 1 \times 10^{-5}t$	0.994\ 8	22.85
$u = 0.052\ 3(11.762\ 7 - e^{-0.003\ 6t}) + 1.804\ 2 \times 10^{-5}t$	0.995\ 0	23.60
$u = 0.052\ 1(11.839\ 3 - e^{-0.003\ 7t}) + 1.870\ 1 \times 10^{-5}t$	0.994\ 8	24.00
$u = 0.053\ 9(11.535\ 0 - e^{-0.003\ 6t}) + 1.903\ 3 \times 10^{-5}t$	0.994\ 4	24.40
$u = 0.054\ 4(11.481\ 5 - e^{-0.003\ 7t}) + 2.219\ 9 \times 10^{-5}t$	0.995\ 2	24.80
$u = 0.054\ 5(11.496\ 5 - e^{-0.003\ 9t}) + 2.621\ 6 \times 10^{-5}t$	0.996\ 0	25.20
$u = 0.058\ 4(10.833\ 4 - e^{-0.003\ 9t}) + 2.751\ 5 \times 10^{-5}t$	0.996\ 4	25.60
$u = 0.062\ 1(10.306\ 5 - e^{-0.003\ 8t}) + 2.766\ 4 \times 10^{-5}t$	0.996\ 6	26.00
$u = 0.064\ 8(9.954\ 1 - e^{-0.003\ 8t}) + 2.900\ 8 \times 10^{-5}t$	0.996\ 8	26.40
$u = 0.069\ 3(9.399\ 6 - e^{-0.003\ 7t}) + 2.986\ 6 \times 10^{-5}t$	0.998\ 4	26.80

A 、 B 、 C 、 D 与应力水平有关, 因此, 将 A 、 B 、 D 拟合如表 2 所示, C 值基本上为常数 $-0.003\ 76\ s$, 代表该类红砂岩的衰减蠕变代表参数, 见表 2。 A 、 C 、 D 的单位分别为 mm 、 s 、 $s^{-1}(mm/s)$ 。

表 2 系数 A 、 B 、 D 拟合
Table 2 Fitting formula of coefficients A , B , D

参数	拟合公式	R
A	$A = 1/(-0.339\ 4\sigma^2 + 15.546\ 9\sigma - 158.444\ 0)$	0.992\ 0
B	$B = -0.204\ 4\sigma^2 + 9.577\ 7\sigma - 98.853\ 1$	0.988\ 2
D	$D = 6.776\ 0 \times 10^{-5} / (1 + 1\ 193.106\ 6 \times e^{-0.257\ 7\sigma})$	0.990\ 5

根据 Goodman 提出的蠕变与应力-应变全过程曲线的关系, 瞬时加载产生的应力-应变全过程曲线, 若以 C 点作为施加在试样上蠕变试验的应力水平, 则在图 6 中 D 点所对应的即为该应力水平下的蠕变破坏量^[8]。由此可知, 在给定应力水平, 在图 1 应力-应变全过程曲线试样 14 后区找到蠕变荷载 22.85~26.8 MPa 所对应的蠕变破坏极限应变, 再将各级蠕变荷载代入表 2 所示的拟合公式, 求出 A 、 B 、 C 、 D 值。在图 1 中找到蠕变破坏的极限应变值 u 代入式 (1) 中, 这样就可以求得时间 t , 即为试样在该级荷载下蠕变破坏的时间。将该方法用于本试验可得出, 试样在荷载为 22.85~26.80 MPa 的蠕变

破坏时间为 23.52~10.51 h。若将各级应力代入表 2 求出系数 A 、 B 、 C 、 D , 再代入式 (1) 求导后, 在 $t \rightarrow \infty$ 时, 求出各级应力在 22.85~26.80 MPa 下的应变速率为 $1.551\ 9 \times 10^{-5} \sim 3.044\ 4 \times 10^{-5}\ s^{-1}$ 。将各级应力与 $t \rightarrow \infty$ 时的应变速率进行数值拟合, 将得到应力与应变速率的关系如下:

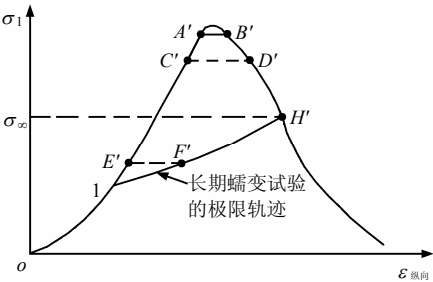


图 6 蠕变与应力-应变全过程曲线的关系
Fig.6 Relationship between creep curve and overall process of stress-strain curves

$$\varepsilon' = 1.167\ 0\sigma^2 - 1.993\ 6\sigma + 1.297\ 3 \times 10^{-9} \quad (2)$$

相关系数 $R=0.999\ 9$, 从式 (2) 可知, 在 $\varepsilon' = 0$ 时, 求出应力值 $\sigma = 0$ 或 17.08 MPa, $\sigma = 0$ 所对应的是试样在未加荷载时的应变速率为 0, 而在 $\sigma = 17.08\ MPa$ 时, 对应的是蠕变试验中试样未出现稳态蠕变所对应的最大荷载, 也就是只出现衰减蠕变阶段所对应的最大荷载。按过渡蠕变法可知, $\sigma = 17.08\ MPa$ 为该岩石试样的长期强度。该试样的长期强度值为蠕变破坏强度的 63%。为常规试验破坏强度的 51%。综上分析可知, 对于具有一定设计期限的岩土工程设计中, 为可以充分利用岩石的时效强度, 减少岩土工程设计中的经济成本, 可根据式 (1) 和表 2 并与应力-应变曲线相结合的方法求出在某级荷载下蠕变破坏的时间, 只要该时间在设计期限内; 而对于时间为无穷大所对应的岩石设计强度, 建议用式 (2) 求出的过渡蠕变法所确定的强度作为岩石的长期强度。

5 结 论

通过对红砂岩进行的室内单轴压缩蠕变试验及不同的长期强度确定方法的分析, 得出以下认识:

(1) 过渡蠕变法, 借助裂纹不稳定扩展的宏观现象蠕变速率来分析岩石的长期强度是可行的, 但是过渡蠕变法只能确定长期强度值在某一范围之内, 并不能求出一个确定的值。

(2) 等时曲线法, 对岩石长期强度的确定需蠕变加载时间较长; 再者由于该试验确定出的拐点并

不是如规范上所示变化规律那么明显, 由此表现出的等时曲线拐点的变化规律具有多样性, 有必要深入地研究等时曲线法确定岩石长期强度的可操作性。

(3) 由于过渡蠕变法不能确定一个具体的值以及等时曲线法在该试验应用时拐点变化规律的不明显性, 本文将对长期强度从两个方面评价, 一个为长期强度值的确定, 另一个为长期强度破坏时间的确定。

(4) 在岩土工程中, 设计期限为无穷大时采用长期强度值, 根据式 $u = A(B - e^{-Ct}) + Dt$, 求导出各级应力下 $t \rightarrow \infty$ 时的应变速率, 并与所对应的应力进行数值拟合, 将得到应力与应变速率的函数关系式 $\varepsilon' = f(\sigma)$, 令 $\varepsilon' = 0$, 所对应的非 0 的 σ 值即为该岩石的长期强度值。

(5) 对于具有一定设计期限的岩土工程, 采用长期强度破坏时间, 采取蠕变曲线与应力-应变曲线结合, 将蠕变试验中出现的衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段的曲线用函数 $u = A(B - e^{-Ct}) + Dt$ 进行拟合, 并以应力-应变曲线找出的蠕变破坏所对应的位移值 u 代入上式, 可求出在该荷载下的破坏时间 t 。

参 考 文 献

- [1] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] SCHMIDTKE R H, LAJTAI E Z. The long-term strength of Lac du Bonnet granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1985, 6(22): 461—465.
- [3] SZCZEPANIK Z, MILNE D, KOSTAKIS K, et al. Long term laboratory strength tests in hard rock[C]//ISRM 2003—Technology Roadmap for Rock Mechanics. Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003: 1179—1184.
- [4] 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 Xi-hai, FU Zhi-liang. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 1021—1024.
- [5] 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 Mu-yu, XU Chang-you. Rheological properties of anhydrite and determination of its long time strength[J]. **China Mining Magazine**, 2000, 9(2): 53—55.
- [6] HELAL H, HOMAND-ETIENNE F, JOSIEN J P. Validity of uniaxial compression tests for indirect determination of long term strength of rocks [J]. **International Journal of Mining and Geological Engineering**, 1988, 3(6): 249—257.
- [7] 中华人民共和国水利部. SL264—2001 水力水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [8] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
- [14] 杨延毅. 加固层状岩体的变形破坏过程与加固效果分析模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 309—317.
YANG Yan-yi. Analytical model for evaluating reinforcement efficiency of bolts in layered rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1994, 13(4): 309—317.
- [15] 李术才, 朱维申. 加锚断续节理岩体力学特性的研究及其应用[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 490—494.
LI Shu-cai, ZHU Wei-shen. Mechanical character of anchoring discontinuous joint rockmass and its application[J]. **Journal of China Coal Society**, 1997, 22(5): 490—494.
- [16] 何则干, 陈胜宏. 加锚节理岩体的复合单元法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1544—1550.
HE Ze-gan, CHEN Sheng-hong. Study on bolted discontinuous rock mass by composite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1544—1550.
- [17] 温进涛, 朱维申, 李术才. 锚索对结构面的锚固抗剪效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 21(10): 1699—1703.
WEN Jin-tao, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai. Research on anchoring and shearing Effect of anchoring cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 21(10): 1699—1703.
- [18] 张宁, 李术才, 李明田, 等. 新型岩石相似材料的研制[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 149—154.
ZHANG Ning, LI Shu-cai, LI Ming-tian, et al. Development of a new rock similar material[J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2009, 39(4): 149—154.
- [19] 温暖冬. 裂隙岩体锚固方式优化的试验与数值模拟研究[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [20] 林春金. 裂纹扩展及合理布锚的试验研究[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2006.

上接第 3294 页