

# 红层软岩变形特性试验研究

陈从新, 卢海峰, 袁从华, 童志怡, 沈 强, 鲁祖德

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 以沪蓉西高速公路工程中发生变形破坏较多的巴东组红层软岩为研究对象, 通过室内三轴压缩试验、现场承压板压缩试验及流变试验对岩体的变形特性进行系统分析。室内三轴试验分别对自然和饱水状态下的岩体进行分析研究, 建立考虑结构面闭合变形的红层软岩弹性本构模型, 并分析水对岩体变形特征的影响; 现场承压板试验分别对泥质含量不同的 2 处岩体进行压缩试验, 分析其变形特性的异同, 同时对其中一点在外荷载作用下内部岩体的应力分布以及位移影响范围和深度进行探讨, 并对循环荷载作用下岩体的变形特性进行分析; 流变试验在 3 级不同荷载下进行, 通过试验结果建立考虑结构面闭合变形的流变本构模型。通过以上一系列分析研究, 从整体上把握巴东组红层软岩的变形特性, 为深入研究该岩体其他特性打下基础, 同时对这类岩体组成边坡, 尤其是对反倾边坡的设计具有重要的指导意义, 也为预应力锚索在该类岩体边坡中的加固效果研究提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 红层软岩; 变形特性; 本构方程

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)02 - 0261 - 10

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON DEFORMATION PROPERTIES OF RED-BED SOFT ROCK

CHEN Congxin, LU Haifeng, YUAN Conghua, TONG Zhiyi, SHEN Qiang, LU Zude

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Taking the red-bed soft rock as investigative subject, which has caused many deformation failures during the West-section of Shanghai-Chengdu construction, the deformation characteristics of red-bed soft rock are analyzed through indoor triaxial test, field load-bearing plate test and rheological test. With the triaxial test on natural and saturated red-bed soft rocks, the elastic constitutive equations of red-bed soft rock, considering the closing of structural surface, are established; and the deformation characteristics of water-bearing influence is analyzed. By performing load-bearing plate test, the deformation characteristics of two kinds of red-bed soft rocks with different argillaceous contents are analyzed. Meanwhile, the rock characteristics under cyclic load, and the stress and displacement distribution and the influential range and depth are studied. With the rheological test, the rheological constitutive equation considering the closing of structural surface is also established. Through the tests, the deformation characteristics of red-bed soft rock are further understood, and it can provide the basis for further research. The results can give some advices to the design of counter-inclined red-bed soft rock slope, and can also offer references to the research on the reinforcement effect of prestressed cables.

**Key words:** rock mechanics; red-bed soft rock; deformation characteristics; constitutive equation

**收稿日期:** 2009 - 07 - 14; **修回日期:** 2009 - 09 - 21

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(10872207)

**作者简介:** 陈从新(1962 -), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事边坡工程、地下采矿和渗流等方面的教学与研究工作。Email: cxchen@whrsm.ac.cn

## 1 引言

掌握岩体特性是进行岩土工程设计和稳定性评价的基础, 李建林等<sup>[1~9]</sup>在岩体力学特性和变形特性方面做了相当多的研究工作, 取得了一定的成果。目前, 岩土工程建设中多以岩体强度破坏来进行稳定性评价和设计, 然而, 实际工程中很多岩体(尤其是软岩)的变形往往是整个工程建设稳定性的决定因素。

红层软岩在我国西南、西北及中部地区广泛分布, 其工程地质特性复杂, 尤其是水理特性对于工程建设影响很大, 有关红层软岩工程地质特性和水理特性方面的研究也取得了相当多的成果<sup>[10~14]</sup>。红层软岩的变形特性对于工程建设稳定性同样至关重要, 在建的沪蓉西高速红层软岩地段边坡开挖过程中, 反倾边坡的失稳破坏大多数都是由于岩体变形过大所造成的失稳破坏, 有关红层软岩变形特性方面的研究也有一些成果<sup>[15, 16]</sup>, 但主要是集中在岩体某一方面特性的研究, 试验也以室内三轴压缩为主, 没有对某一岩体进行室内及现场各种变形特性的系统研究。

以鄂西南地区三叠系巴东组红层软岩为研究对象, 通过室内三轴试验、现场承压板压缩及流变试验, 对该类红层软岩的变形特性进行了全面系统的分析研究。室内三轴试验分别对自然状态和饱和状态下的2组结果进行了对比分析, 得出一些室内试验变形参数规律, 并给出了考虑结构面闭合变形的弹性本构模型; 现场承压板试验分别对2处含泥量不同的红层软岩变形特性进行了对比分析, 并选取其中一点对岩体内部应力分布及影响范围进行了探讨, 同时还对循环荷载作用下岩体的变形规律进行了分析; 在承压板压缩试验的基础上对其中一点进行了三级不同荷载下的压缩流变试验, 根据试验结果建立了红层软岩考虑结构面闭合变形的流变本构模型。

通过一系列试验研究分析, 对巴东组红层软岩的变形特性有了全面系统的认识, 对该类岩土工程建设, 尤其是反倾边坡的设计具有指导意义, 同时也为预应力锚索在该类边坡中的加固效果以及边坡岩体长期稳定性的研究提供了参考依据。

## 2 室内三轴压缩特性研究

### 2.1 试验介绍

试验仪器采用 MTS 岩石力学试验系统, 该系统由美国 MTS 公司生产, 主要用于岩石、混凝土等材料电液伺服控制常规力学试验, 配有伺服控制的全自动三轴加压和测量系统, 并于 2000 年完成全数字化控制系统改造。该系统由以下部分组成: (1) 加载部分: 由液压源、单轴加压框架、三轴室、作动器、伺服阀、增压器等组成; (2) 测试部分: 由荷载、压力、位移、应变规等传感器组成; (3) 控制部分: 由反馈控制系统、数据采集器、计算机等控制软硬件组成; (4) 程序控制部分: 包括试验助手、静力试验软件、多功能试验软件、函数发生器控制等。

试样采用圆柱形( $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ), 如图 1 所示。试验分 2 组进行, 每组 6 个试样, 一组为自然状态, 另一组为饱和状态。围压分别为 0, 1, 2, 4, 8 和 16 MPa。试样饱水采用自然吸水饱和, 即先将试样放入水槽, 先注水至试样高度的 1/4 处, 以后每隔 2 h 分别注水至试样高度的 1/2 和 3/4 处, 6 h 后全部浸没试样, 试样全部浸入在水中吸水 48 h 后进行试验, 通过饱和试验测得试验自由吸水率为 2%~3%。



图 1 加工完成的试样

Fig.1 Rock sample after being artificially manufactured

### 2.2 试验结果

#### 2.2.1 应力 - 应变全过程曲线

试验得到的应力 - 应变全过程曲线如图 2 所示。

#### 2.2.2 变形参数计算

根据应力 - 应变全过程曲线中偏应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与 $\varepsilon_1$ 关系曲线上的直线段斜率计算得到岩石的平均弹性模量, 泊松比则根据平均弹性模量与( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与 $\varepsilon_2$ 关系曲线直线段斜率的比值求得, 具体结果如表 1 所示。

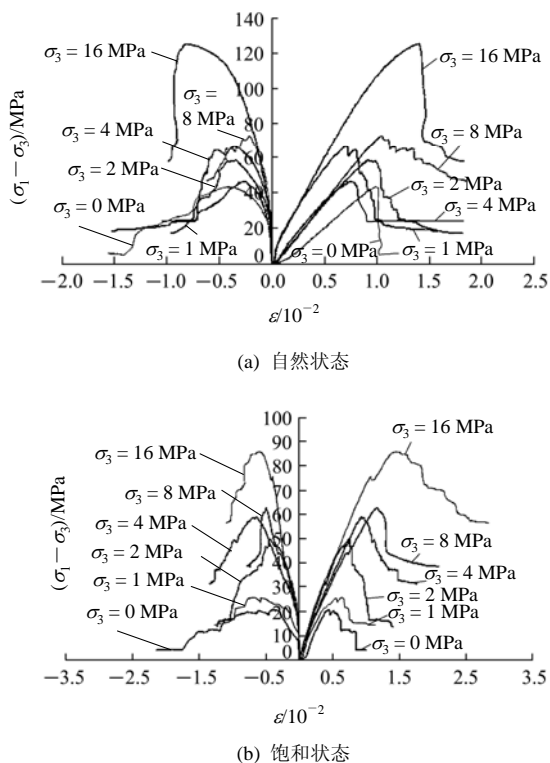


图 2 应力 - 应变全过程曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves

表 1 变形参数计算结果表

Table 1 Calculation results of deformation parameters

试样状态	围压/MPa	平均弹性模量/GPa	泊松比
自然	0	5.19	0.26
	1	7.61	0.29
	2	7.33	0.33
	4	9.20	0.23
	8	7.52	0.13
	16	11.03	0.36
饱和	0	7.26	0.25
	1	6.28	0.14
	2	7.84	0.18
	4	6.94	0.13
	8	6.14	0.13
	16	8.83	0.18

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 基本变形特性

由图 2 可以看出, 无论是自然状态还是饱和状态, 岩石变形破坏基本还是分为 5 个阶段, 即压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段和摩擦阶段, 而且随着围压的增大, 两者的峰值应力也逐

渐增大, 这些是一般岩石都具有的普遍特性。

比较饱水前后试样的变形参数可以看出, 饱水后试样的平均弹性模量要比自然状态低, 但降低的比例不是特别大, 说明水对岩石的变形起到一定的软化作用, 但这种软化作用在短时间内的影响程度相对较小。水的介入使得岩石中的黏土矿物晶格间距适当加大, 岩石的弹性活动空间更大, 表现在变形参数上就是变形模量有所降低。岩石的泊松比由于计算所取直线段不太好判断所以参数离散性相对较大, 但其范围基本为 0.14~0.36, 而且水对泊松比影响不大。统计岩石破坏时峰值应变与围压的关系(见图 3)发现, 围压越大, 岩石破坏时的峰值应变越大, 而且相同围压下, 饱水状态的峰值应变一般比自然状态下的峰值应变大, 可见水的作用使红层软岩的延性增大。

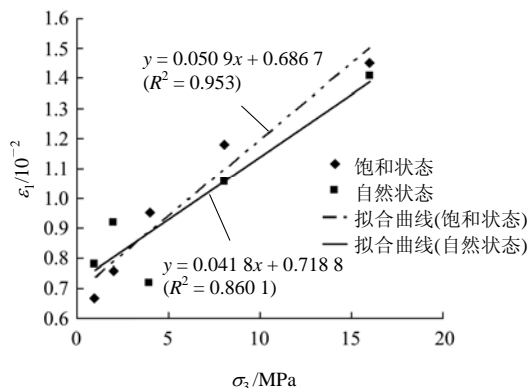


图 3 峰值应变与围压关系图

Fig.3 Relationships between peak strain and confining pressure

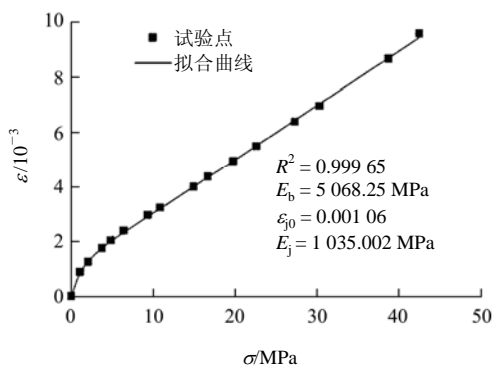
#### 2.3.2 本构模型研究

岩体包括岩块和结构面两部分组成, 即使是加工成型的三轴试样, 其内部还是有许多微小的裂隙, 所以岩体的变形一方面包括岩石的压缩变形, 另一方面还应包括结构面(或微裂隙)的闭合变形。孙广忠<sup>[17]</sup>对于不同材料组合形式下各种裂隙岩体本构规律进行了全面的分析, 给出了不同的本构形式, 从图 2(a), (b)给出的应力 - 应变全过程曲线可以看出, 巴东组红层软岩的破坏前主要处于压密阶段和弹性阶段, 因此, 本文选用孙广忠<sup>[17]</sup>提出的弹性碎裂结构岩体变形本构形式对破坏前岩体的变形本构规律进行拟合分析, 即

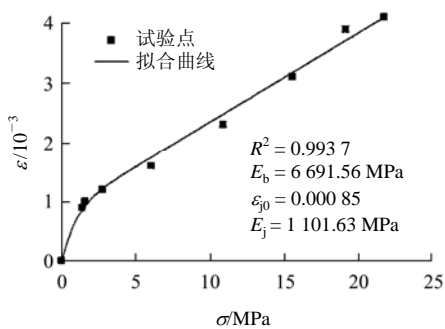
$$\varepsilon = \frac{1}{E_b} \sigma + \varepsilon_{j0} \left( 1 - e^{-\frac{\sigma}{E_j \varepsilon_{j0}}} \right) \quad (1)$$

式中： $E_b$  为结构体弹性模量， $E_j$  为结构面闭合模量， $\epsilon_{j0}$  为结构面最大闭合应变值。

由于三轴试验施加围压为静水压力，裂隙在围压施加过程中已经完成闭合，而围压施加过程没有进行变形数据采集，无法反映结构面闭合变形过程，所以选取自然和饱和状态下单轴压缩试验数据进行本构拟合，拟合结果分别如图 4(a), (b)所示。从图 4 中可以看出，无论是自然状态还是饱和状态，红层软岩单轴压缩破坏前的部分都能用式(1)很好地拟合，拟合曲线具有很高的相关度，比较自然状态和饱和状态的参数可以看出，试样饱和后，结构面最大闭合应变  $\epsilon_{j0}$  减小，而结构面闭合变形模量  $E_j$  和弹性模量  $E_b$  均有所增大。分析原因可能是试样饱和后，微裂隙以及岩石中的孔隙被水充填，而试验加载过程较短，近似不排水条件下进行的，所以使得结构面最大闭合应变减少，同时岩石骨架更加不容易被压缩，从而使得模量提高。



(a) 自然状态



(b) 饱和状态

图 4 本构拟合曲线

Fig.4 Constitutive fitting curves

当然，现场实际情况并非完全不排水情况，但分析所得出的规律和模型对于荷载施加初始阶段的岩体变形还是适用的，结合前面分析，给出巴东组红层软岩自然状态和饱和状态下的弹性碎裂结构本构模型公式以供参考：

自然状态：

$$\epsilon = \frac{1}{5068.25} \sigma + 0.00106 \left( 1 - e^{-\frac{\sigma}{1.097}} \right) \quad (2)$$

饱和状态：

$$\epsilon = \frac{1}{6691.56} \sigma + 0.00085 \left( 1 - e^{-\frac{\sigma}{0.936}} \right) \quad (3)$$

### 3 现场承压板压缩特性研究

#### 3.1 试验介绍

##### 3.1.1 试验点工程地质特性

试验点位于沪蓉西高速公路 YK178+700 处高边坡上，基岩主要为三叠系巴东组(T<sub>2</sub>b)薄~中厚层紫红色泥质粉砂岩，地层产状为 82°∠18°，地层岩性软弱，耐水性差，水化强烈，节理裂隙发育，贯通性强。上层 4.9~5.4 m 厚度为强风化泥质粉砂岩，下伏为弱风化泥质粉砂岩。主要分布有 3 条节理：(1) 节理产状为 282°∠80°，密度约 0.5 条/m，贯通性较强；(2) 节理产状为 220°∠70°，密度约为 2 条/m，贯通性强，大部分有泥质充填；(3) 节理产状为 230°∠76°，密度 2~3 条/m，贯通性稍差。该段无地表水，地下水主要为地表降雨渗流到基岩裂隙中的裂隙水，水文地质条件较为简单。

##### 3.1.2 试验设备

试验采用承压板法(见图 5)，采用刚性圆形承压板，直径 32 cm，试点岩面尺寸为 50 cm×50 cm (见图 6)，岩面的起伏差小于承压板直径的 1%，试验反力装置采用地锚法，每排 4~6 根  $\phi 25$  mm II 螺纹钢，埋深 3 m 左右，用 M25 砂浆灌注，锚杆露出试样高度 1.8 m。竖向加力装置采用 500 kN 千斤顶配标准压力表，在加力过程中保持竖向应力方向不变。

##### 3.1.3 试验方法及内容

试验按照相关规程<sup>[18]</sup>进行，加压方式采用逐级多次循环法，竖向变形采用百分表记录，承压板下的变形均用 1~4 号表记录，承压板周围变形用 5~8 号表记录，其中试点 5 和 6 号表距离承压板边缘 20 cm 对称分布，7 和 8 号表距离承压板边缘 40 cm 对称分布。试验对 2 个含泥量不同点进行，分别为试点 1 和 2，两者矿物成分如表 2 所示，两者对比



图 5 试验装置图

Fig.5 Photo of test apparatus



图 6 试点岩面图

Fig.6 Photo of rock face at testing point

表 2 试点岩石矿物组成

Table 2 Mineral constitution of experimental rocks %

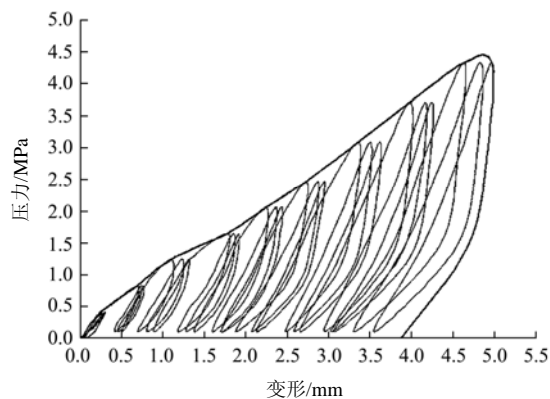
试点编号	绿泥石	云母	石英	长石	方解石	白云石	赤铁矿
1	30	20	37	10	0	0	3
2	35	35	23	2	0	0	5

可以看出试点 1 比 2 砂质含量高, 但黏土矿物含量较低。

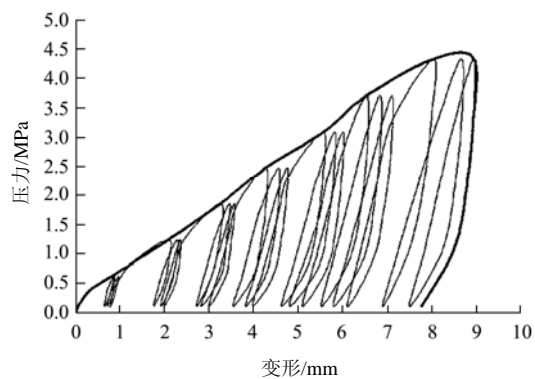
试点 1 首先在 0.31 MPa 荷载下预压 30 min 再卸至 0 MPa, 然后分别施加 0.41, 0.82, 1.24, 1.65, 2.06, 2.47, 3.09, 3.71 和 4.33 MPa 九级荷载, 每级荷载分别作用 3 次加卸载循环, 每次加卸载过程荷载均分 4 步逐步增加或减少。试点 2 首先在 0.21 MPa 荷载下预压 30 min 再卸至 0 MPa, 然后分别施加 0.62, 1.24, 1.86, 2.47, 3.09, 3.71 和 4.33 MPa 七级荷载, 每级荷载分别作用 3 次加卸载循环, 每次加卸载过程荷载均分 3 步逐步增加或减少。

### 3.2 试验结果

试点 1 和 2 的压力 - 变形全过程曲线分别如图 7(a), (b)所示。



(a) 试点 1



(b) 试点 2

图 7 压力 - 变形全过程曲线

Fig.7 Curves for the whole process of pressure-deformation

### 3.3 试验结果分析

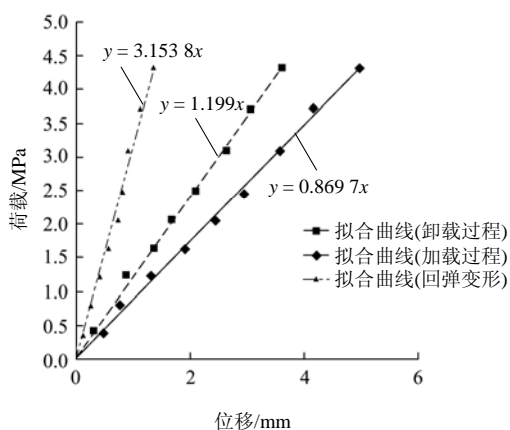
对试验数据进行统计筛选, 分别从 2 处试验点变形特性的异同、下部岩体应力和位移分布以及循环荷载作用下变形特性等方面对岩体的变形特性进行综合分析。

#### 3.3.1 不同矿物组成岩体变形特性

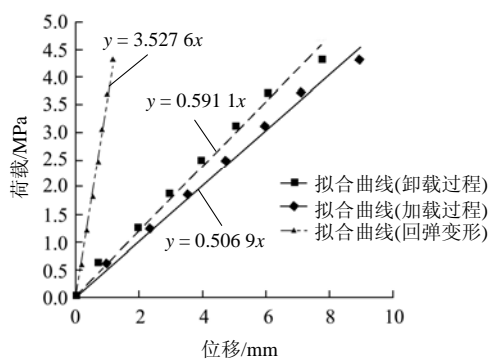
试点 1 和 2 两处岩体虽然同属红层软岩, 但两者矿物组成(见表 2)不同, 试点 1 黏土矿物含量较低, 而石英、长石等稳定矿物含量较高, 岩体中砂质成分较多; 而试点 2 岩体黏土矿物含量高, 岩体中泥质成分较多。2 处岩体组分的不同也决定了两者变形特性会存在一定差异, 试验采用多次循环加载, 每级荷载循环 3 次, 为此选择每级荷载第三次循环荷载结束后的变形值, 分别绘制两处岩体压力与变形关系曲线(见图 8(a), (b))进行对比分析。

通过对比图 8(a)和(b)可以得出以下几点结论:

(1) 泥质含量高(试点 2)的岩体变形较大, 变形模量



(a) 试点 1



(b) 试点 2

图 8 第三次循环后压力 - 变形关系图

Fig.8 Figures of pressure-deformation after third cycles

较小；(2) 在循环加载卸载作用后，岩体的变形模量均有所提高，泥质含量高(试点 2)的岩体增加约 16.6%，而泥质含量相对较低的岩体(试点 1)增加近 37.9%，说明砂质含量高的岩体在循环荷载作用下的硬化效果更明显；(3) 无论是泥质含量高的岩体还是泥质含量低的岩体，卸荷后的残余变形刚度变化都不是特别明显，但泥质含量低(试点 1)的岩体在同等荷载作用下的卸荷残余变形量较泥质含量高(试点 2)的岩体大。

### 3.3.2 循环荷载作用下残余变形特性

选取试点 2 循环加载卸载过程数据进行统计，绘制不同荷载作用下 2 次循环作用的残余变形变化关系图(见图 9)。从图 9 中可以看出，残余变形随着施加荷载的增大而增大；某一级荷载下，第二次循环荷载作用产生的残余变形比第一次循环荷载作用产生的残余变形小。

### 3.3.3 弹性应力分布及位移影响深度探讨

从前面试验结果可以看出，试验应力水平下岩体的变形基本处在弹性阶段，因此，可考虑借鉴土

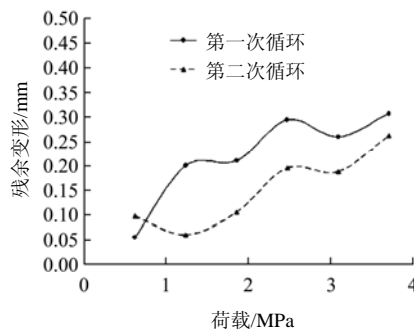


图 9 不同循环下残余变形与荷载关系图

Fig.9 Relationships between residual deformation and pressure under different cycles

力学分析中的布西奈斯克(J. V. Boussinesq)弹性半无限空间应力解析式来对岩体内部应力分布进行探讨<sup>[19]</sup>，即

$$\sigma_z = \alpha_c p \tag{4}$$

式中： $\alpha_c$ 为应力系数，它是  $r/R$  及  $z/R$  的函数，可通过查表求得，其中， $R$  为应力作用圆面积的半径， $r$  为应力计算点  $M$  到  $z$  轴的水平距离； $p$  为按承压板单位面积计算的的压力。

岩体的变形与其受力状态有密切的联系，以试点 2 为例，绘制不同荷载作用下地表距离作用点圆心不同位置的沉降图(见图 10)，同时按照布西奈斯克解析式计算出与图 10 对应位置的应力分布，并绘制成图 11，对比图 10，11 可以看出两者曲线分布形状基本相同，可见岩体在弹性阶段的应力状态用布西奈斯克解析式表达是可取的。

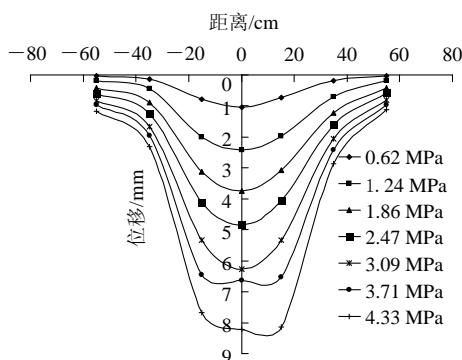


图 10 位移分布图(试验值)

Fig.10 Distribution map of displacements(test values)

通过上述分析可以看出，处在弹性变形阶段的岩体其内部应力分布可以用布西奈斯克弹性半无限空间应力解析式来描述，而岩体的变形与其应力水平密切相关的，由于岩体处于弹性阶段，各部分模



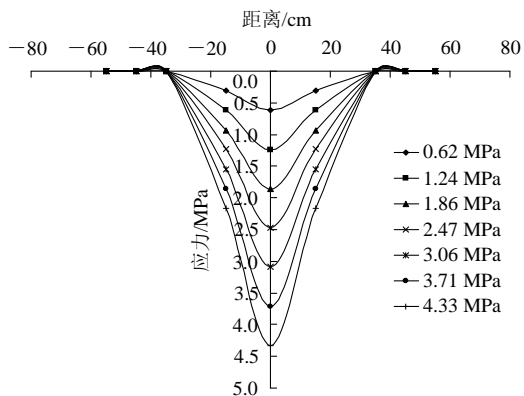


图 11 应力分布图(计算值)

Fig.11 Distribution map of stress (calculating values)

量基本相同, 因此可以通过分析应力的影响范围来间接反映岩体位移的影响深度。从式(4)中可以看出, 影响应力分布的决定因素是应力系数  $\alpha_c$ 。选取  $r = 0^{[19]}$ , 即荷载作用中心点处数据进行统计分析, 绘制应力系数  $\alpha_c$  同深度  $z/R$  的关系曲线(见图 12)。

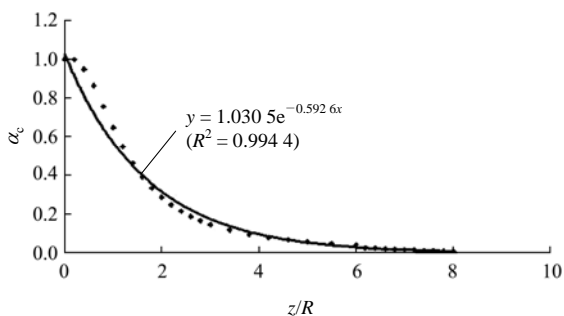


图 12  $\alpha_c$  与  $z/R$  关系图

Fig.12 Relationship between  $\alpha_c$  and  $z/R$

从图 12 中可以看出, 荷载作用中心点的应力系数随深度的增加呈现出指数递减的趋势, 当  $z/R \approx 8$  时应力系数几乎降为 0, 可见应力影响深度与荷载作用面积半径成正比, 且最大影响深度  $z \approx 8R$ , 岩体变形最大影响深度同样满足这一条件。

## 4 现场压缩流变特性

### 4.1 试验介绍

试验是在前面进行承压板试验试点 2 的基础上, 进一步对其进行 3.1, 3.7 和 4.3 MPa 荷载下 24 h 的流变试验, 其变形与时间的关系图如图 13 所示。由以上结果可以看出, 岩体在长期荷载作用下引起的流变变形量是不容忽视的, 在对岩体的长期稳定性进行判断时必须考虑岩体的流变变形量。需

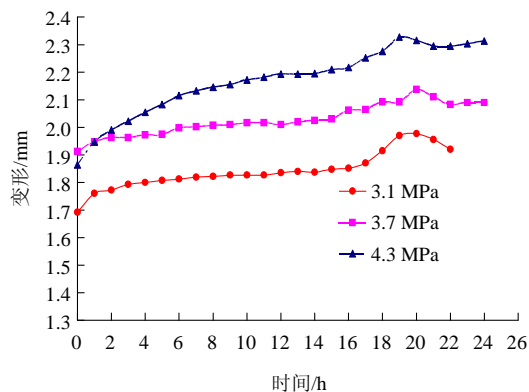


图 13 流变全过程曲线

Fig.13 Full curves of rheology

要指出的是, 3 种荷载的流变曲线在 21 h 附近都有变形陡增的表现, 流变曲线上表现为上凸, 产生这种现象的原因是由于该段对应时间在中午时段, 此时由于温度较高, 测量变形的支撑架受热膨胀, 导致变形测量值读数呈现小幅上升, 从而导致岩体的变形量的增加而使曲线上凸, 下面章节本构模型研究中将适当修正以消除这部分影响。

### 4.2 参数换算

上述压缩流变试验得到的是压力与承压板沉降量之间的关系, 承压板下部一定深度范围内岩体各点的应力和应变各不相同, 在试验应力水平下处于弹性阶段, 结合式(4), 其应力 - 应变关系可表示为

$$E_0 = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} = \frac{\alpha_c p}{\varepsilon_i} \quad (5)$$

式中:  $E_0$  为岩体变形模量(弹性模量),  $\sigma_i$  为承压板下第  $i$  点应力,  $\varepsilon_i$  为承压板下第  $i$  点应变。

根据节 3 分析可知承压板下应力状态可用布西奈斯克弹性半无限空间应力解析式来描述, 依此可建立刚性承压板模量求解公式<sup>[18]</sup>, 即

$$E_0 = \frac{\pi (1 - \mu^2) p d}{4 S_0} \quad (6)$$

式中:  $S_0$  为岩体变形,  $d$  为承压板直径,  $\mu$  为泊松比。

岩体在试验压力水平处于弹性阶段, 且各点模量  $E_0$  相等, 结合式(5), (6)可以得到应变同承压板变形之间的关系式:

$$\varepsilon_i = \frac{4\alpha_c S_0}{\pi(1 - \mu^2)d} \quad (7)$$

为了研究红层软岩流变本构关系, 选取地表中

心点为研究对象, 利用式(7), 得到该点对应的应变, 而该点的应力系数  $\alpha_c = 1$ , 应力水平与承压板上施加的均布荷载  $p$  相等, 由此可得到一组应力 - 应变来进行流变本构模型分析。

### 4.3 流变本构模型建立

#### 4.3.1 模型选取

同节 2 弹性本构模型相类似, 试验点红层软岩流变特性同样可以用孙广忠<sup>[17]</sup>提出的黏弹性碎裂岩体本构模型来描述, 具体形式为

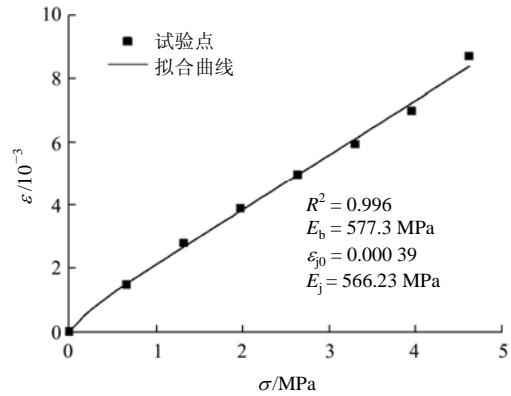
$$\varepsilon = \frac{1}{E_b} \sigma + \varepsilon_{j0} \left( 1 - e^{-\frac{\sigma}{E_j \varepsilon_{j0}}} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta} t \quad (8)$$

式中:  $\sigma_0$  为流变阶段施加荷载,  $\eta$  为黏滞系数。

以式(8)为基础, 分别对图13所示曲线加载阶段和流变阶段进行拟合分析, 并最终建立该类红层软岩考虑结构面闭合变形的本构模型。

#### 4.3.2 本构参数模拟

上述式(8)中前面两项为加载阶段, 最后一项为流变阶段, 根据式(8)所给形式分别对流变试验三级不同荷载水平下的加载阶段和流变阶段进行拟合, 分别得到加载阶段拟合曲线(见图 14)和流变阶段拟合曲线(见图 15), 根据拟合结果通过换算可以得到各级荷载下的拟合参数(见表 3)。



(c) 4.3 MPa

图 14 不同荷载水平下加载阶段拟合曲线

Fig.14 Fitting curves during loading under different loading levels

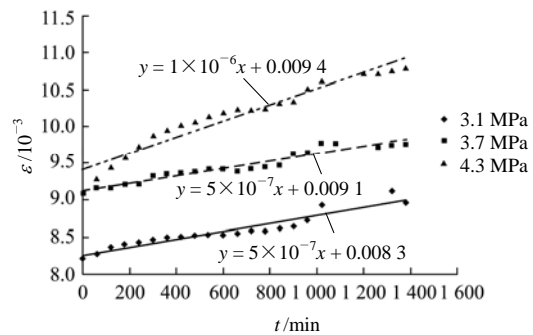
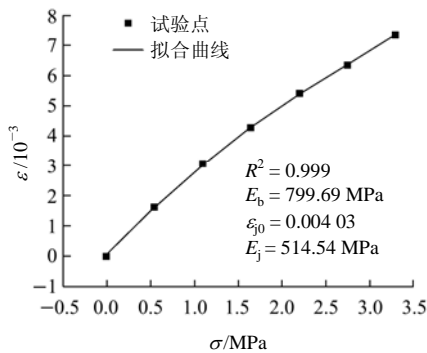
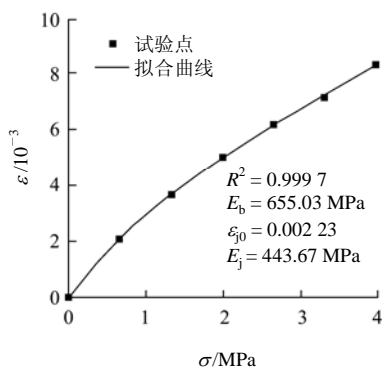


图 15 流变阶段拟合曲线

Fig.15 Fitting curves during rheology



(a) 3.1 MPa



(b) 3.7 MPa

表 3 流变本构拟合参数

Table 3 Fitting parameters of rheological constitutive relation

荷载/MPa	$\eta / (\text{MPa} \cdot \text{d})$	$E_b / \text{MPa}$	$E_j / \text{MPa}$	$\varepsilon_{j0}$
3.1	4 305.56	799.69	514.54	0.004 03
3.7	5 138.89	655.03	443.67	0.002 23
4.3	2 986.11	577.30	566.23	0.000 39

#### 4.3.3 模型参数选择

从表 3 中参数拟合结果可以看出, 随着荷载的增大, 结构面最大闭合应变值  $\varepsilon_{j0}$  越来越小, 这主要是由于试验是在同一点进行, 岩体经历多次加载和卸载过程, 使得部分结构面闭合后不能再张开, 所以岩体的结构面最大闭合应变选择第一级荷载下的值。弹性模量  $E_b$ 、结构面闭合变形模量  $E_j$  和黏滞系数都有一定浮动, 但规律性不是很明显, 所以选择三级荷载作用下的平均值。最终可以得到描述该类红层软岩考虑结构面闭合变形的流变全过程本构模型, 即

$$\varepsilon = \frac{1}{677.34} \sigma + 0.004 \left( 1 - e^{-\frac{\sigma}{2.03}} \right) + \frac{\sigma_0}{4 143.52} t \quad (9)$$



式中:  $\sigma$  为加载阶段应力(MPa),  $t$  为流变荷载作用时间(d)。

## 5 讨 论

边坡的失稳破坏不仅涉及到岩体的强度问题, 还与岩体的变形特性有很大的关系。红层软岩水理性质特殊, 节理裂隙发育, 其变形特性对边坡的稳定性影响尤其复杂。对于边坡岩体来说, 降雨和干旱的交替相当于对边坡岩体循环加卸载的过程。一般路基边坡的应力水平相对较低, 岩体结构面的闭合变形是不容忽视的, 尤其是红层软岩反倾边坡, 不同层位岩体结构面的扩展并最终贯通是引起边坡失稳破坏的主要原因。该类边坡加固方式的选取也是值得探讨的问题, 目前普遍采用预应力锚索加固措施, 锚索对于边坡岩体变形的影响范围, 以及锚索设计参数选择的合理性问题都是有待探讨的问题。本文对于红层软岩循环荷载作用下的变形特性以及岩体表面作用荷载下应力-应变影响深度等问题进行了研究, 同时建立了考虑岩体结构面闭合变形的弹性本构模型和流变本构模型, 这些研究成果在解决该类岩体组成的边坡破坏机制以及锚索加固效果分析方面具有一定的指导意义。

## 6 结 论

本文通过室内三轴试验、现场承压板压缩试验和压缩流变试验, 并结合理论分析, 对红层软岩的变形特性进行探讨, 主要得出以下结论:

(1) 红层软岩的变形特性与其矿物和颗粒组分有关, 循环荷载作用对于岩体变形特性也有较大的影响。

(2) 现场荷载试验所得弹性模量与室内三轴试验所得相差近一个数量级, 可见红层软岩中裂隙的发育及扩展程度对于岩体变形特性具有重要的影响。

(3) 对于表面作用荷载水平不高岩体, 其内部应力分布可用布西奈斯克弹性半无限空间应力解析式来分析, 其位移影响深度也基本为8倍的荷载作用半径, 这点结论可以用来进行边坡工程中预应力锚索加固引起内部岩体应力和位移变化分析研究。

(4) 基于孙广忠<sup>[17]</sup>提出的相关本构模式, 给出了考虑结构面闭合变形的弹性和流变本构模型, 通过与试验数据比较证明是合理的。

红层软岩另一重要特性是其水理特性, 本文研究成果对于进行更深层次的水-岩耦合作用下的变形特性研究具有十分重要的指导意义, 作者将在后续工作中进行研究。

## 参考文献(References):

- [1] 李建林, 王乐华. 节理岩体卸荷非线性力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1 968 - 1 975.(LI Jianlin, WANG Lehua. Study of unloading nonlinear mechanical characteristic of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 1 968 - 1 975.(in Chinese))
- [2] 熊诗湖, 周火明. 三峡永久船闸边坡岩体在复杂应力路径下的变形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3 636 - 3 641.(XIONG Shihu, ZHOU Huoming. Deformation properties of rock mass of TGP permanent shiplock slopes under complex stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 636 - 3 641.(in Chinese))
- [3] 许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 边坡岩体软弱夹层力学特性[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3 077 - 3 081.(XU Baotian, YAN Changhong, CHEN Hanyong, et al. Experimental study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3 077 - 3 081.(in Chinese))
- [4] 刘晓丽, 王恩志, 王思敬, 等. 裂隙岩体表征方法及岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 814 - 1 821.(LIU Xiaoli, WANG Enzhi, WANG Sijing, et al. Representation method of fractured rock mass and its hydraulic properties study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 814 - 1 821.(in Chinese))
- [5] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 615 - 621.(WU Gang, SUN Jun. Deformation and strength characters of jointed rock mass under unloading stress states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 615 - 621.(in Chinese))
- [6] 周济芳, 李建林, 邓华锋, 等. 岩体卸荷力学特性的数值仿真研究[J]. 岩土力学, 2008, 28(增1): 524 - 528.(ZHOU Jifang, LI Jianlin, DENG Huafeng, et al. Research on mechanical characteristics of unloading rock mass by numerical simulation method[J]. Rock and

- Soil Mechanics, 2008, 28(Supp.1): 524 - 528.(in Chinese))
- [7] 熊诗湖. 层状岩体变形特性试验研究[博士学位论文][D]. 武汉: 长江科学院, 2007.(XIONG Shihu. Testing study of deformation characteristics of layered rockmass[pH. D. Thesis][D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2007.(in Chinese))
- [8] 沈明荣, 张清照. 规则岩体结构面的蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3 973 - 3 979.(SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study of creep characteristics of regular rock mass discontinuity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3 973 - 3 979.(in Chinese))
- [9] 石安池, 唐鸣发, 周其健. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 079 - 2 086.(SHI Anchi, TANG Mingfa, ZHOU Qijian. Research of deformation characteristics of columnar jointed basalt at Baihetan hydropower station on Jinsha river[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 079 - 2 086.(in Chinese))
- [10] 苏永华, 赵明华, 刘晓明. 软岩膨胀崩解试验及分形机制[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 728 - 732.(SU Yonghua, ZHAO Minghua, LIU Xiaoming. Research of fractal mechanism for swelling and collapse of soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 728 - 732.(in Chinese))
- [11] 殷跃平, 胡瑞林. 三峡库区巴东组(T<sub>2</sub>b)紫红色泥岩工程地质特性研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 124 - 135.(YIN Yueping, HU Ruilin. Engineering and geological characteristics of purplish-red mudstone of middle tertiary formation at the Three Gorges reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(2): 124 - 135.(in Chinese))
- [12] 赵明华, 苏永华, 刘晓明. 湘南红砂岩崩解机制研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 16 - 19.(ZHAO Minghua, SU Yonghua, LIU Xiaoming. Research on the mechanics of swelling and collapse of the red stratum rock mass in South Hunan[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2006, 33(1): 16 - 19.(in Chinese))
- [13] 胡昕, 洪宝宁, 王伟, 等. 红砂岩强度特性的微结构试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 141 - 2 147.(HU Xin, HONG Baoning, WANG Wei, et al. Experimental study of microstructure of strength property of red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 141 - 2 147.(in Chinese))
- [14] 张永安, 李峰, 陈军. 红层泥岩水岩作用特性研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 22 - 26.(ZHANG Yong'an, LI Feng, CHEN Jun. Analysis of the interaction between mudstone and water[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 22 - 26.(in Chinese))
- [15] 周应华, 周德培, 封志军. 三种红层岩石常规三轴压缩下的强度与变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 477 - 480.(ZHOU Yinghua, ZHOU Depei, FENG Zhijun. Strength and deformation of three types of red beds under conventional triaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(4): 477 - 480.(in Chinese))
- [16] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 473 - 478.(ZHANG Qingxu, GE Xiurun, HUANG Ming, et al. Testing study of fatigue deformation law of red-sandstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 473 - 478.(in Chinese))
- [17] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(SUN Guangzhong. Rock mass structural mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1988.(in Chinese))
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264 - 2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264 - 2001 Specification for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [19] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(GAO Dazhao, YUAN Juyun. Soil mechanics and soil science[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))