

粉质黏土卸荷变形特性试验研究

陈善雄¹, 凌平平², 何世秀², 杨雪强²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学国家重点实验室, 武汉 430071; 2.湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: 依托武汉长江隧道江北明挖段基坑工程, 开展了一系列的 K_0 固结状态下原状粉质黏土卸荷应力路径排水剪三轴试验, 并对卸荷变形特性进行了深入分析。分析表明: 卸荷应力路径下原状粉质黏土的应力-应变关系与应力路径有着密切的关系, 近似呈双曲线型。根据应力-应变曲线表现, 可将卸荷应力路径分为 A、B 两组, A 组应力路径试样表现为轴向压缩; B 组应力路径试样表现为轴向伸长。卸荷应力路径下粉质黏土的应力-应变关系具有良好的归一化特性, 同一应力路径下不同固结压力的应力-应变曲线可采用双曲线函数用平均固结压力归一化, 但 A、B 两组应力路径下的归一化方程有所差别。给出了各种应力路径下的归一化方程, 可为卸荷土体的变形参数及本构关系研究提供参考。

关键词: 基坑工程; 卸荷; 应力路径; 应力-应变曲线; 归一化

中国分类号: TU 411

文献标识码: A

Experimental study on deformation behavior of silty clay under unloading

CHEN Shan-xiong¹, LING Ping-ping², HE Shi-xiu², YANG Xue-qi²

(1. State Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei Polytechnic University, Wuhan 430068, China)

Abstract: Relying on the open excavation section of Jiang Bei of the Yangtze River tunnel in Wuhan, a series of drained triaxial tests on unloading stress paths at K_0 consolidation have been carried out with undisturbed silty clay. And the deformation characters under unloading were deeply analyzed. Analysis shows that stress-strain curves and stress paths have close relationship and the stress-strain curves under unloading are similar to a hyperbolic type. According to the stress-strain curves, unloading stress paths can be divided into two groups A and B. The stress paths of group A exhibit axial compression and ones of group B show axial tension. The normalization of its stress-strain relationship is very good under unloading stress paths for undisturbed silty clay. The stress-strain curves of different confining pressures in the same stress path can be normalized with average confining pressures. But normalized equations of groups A and B are different. Additionally the normalized equations of all stress paths have been given. This outcome can be used to further research on both deformation parameters and constitutive equation of soils under unloading.

Key words: excavation engineering; unloading; stress path; stress-strain curve; normalized behavior

1 前言

随着大规模地下空间的开发与利用, 深基坑开挖工程日益增多, 且深基坑工程的规模和深度都不断加大。

基坑开挖过程也就是土体的卸荷过程, 其变形特性具有独特的规律, 传统的土力学理论采用常规三轴试验(即加载试验)参数来计算基坑变形, 无法真实反映基坑开挖的卸荷过程。由于问题的复杂性,

目前有关土体在卸荷状态下的变形和破坏机制的试验研究和理论分析均不成熟, 欠缺系统性, 因此, 有必要加强对土体卸荷特性的研究, 以期能更为全面地认识土体在卸荷状态下的变形和破坏机制, 为卸荷作用下土体变形计算提供理论依据和合理的计算参数。

一般地, 开挖工程中土体的稳定与变形特性受其应力状态和应力历史的影响, 因此, 正确理解现场土体的应力历史是试验室模拟实际的前提。刘熙

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 武汉长江隧道工程关键技术项目—深基坑围护体系与防渗技术研究(No. 20030183025)。

作者简介: 陈善雄, 男, 1965年生, 研究员, 主要从事非饱和土力学和地基处理的理论与工程工作。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

媛^[1]、刘国彬^[2]、张荣堂^[3]等曾对基坑开挖的应力路径做过详细分析，认为对于一般基坑开挖过程，可以总结为两类卸荷应力路径：一类是垂直向卸荷，水平向加荷；另一类是垂直与水平向同时卸荷，只不过不同单元的加卸荷比例不同。另外，王钊等^[4]曾开展了粉质黏土加、卸载排水三轴对比试验，发现卸荷试验应力-应变关系呈双曲线型，获得的强度参数 c, φ 和变形参数 E, μ 均比加荷试验的大。

本文研究的主要目的是针对武汉地区有代表性的原状粉质黏土，模拟开挖卸荷条件，开展土体卸荷路径三轴排水试验，探索土在卸荷条件下的应力-应变状态变化规律，为建立适用的土体卸荷本构模型奠定基础。

2 应力路径试验设计

2.1 试样物理力学性能指标

试验所用土样为原状粉质黏土，取自武汉长江隧道江北明挖段竖井附近，取土深度约 13~15 m。土样的主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 土样物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil samples				
含水率 / %	塑性指数	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	天然密度 / g·cm ⁻³
29.5	11.5	12.2	27.2	2.035

2.2 应力路径设计

基坑开挖时基坑中不同部位土体的应力路径是完全不一样的，为正确模拟开挖工程中的应力路径，从基坑开挖过程不同部位土体的应力路径中抽象出几种典型的等主应力比卸荷应力路径，开展模拟基坑开挖过程的卸荷试验。大体分为二类：一类是轴向和径向同时卸荷；另一类是轴向卸荷，径向加荷。试验应力路径如图 1 所示，图 1 中 UU 代表轴向和径向均卸荷，UL 代表轴向卸荷，径向加荷。脚标代表轴向应力变化量和径向应力变化量之比，并且均无正负之分。

为了更好地模拟土的原位应力状态，所有试样先在一定围压下分级 K_0 固结，再按照规定的应力路径进行排水剪切试验，各组应力路径的径向固结压力分别为 50, 100, 200 kPa， K_0 按经验公式 $K_0=0.24+0.31\log I_p(\%)$ ^[3] 确定。

试验均在改装之后的常规三轴试验仪器上进行。由于试验所用三轴仪为常规应变控制式三轴仪，无法实现本文所设定的应力路径，为此将应变控制式改装为应力控制式。但试验仍受到一定的限制，

轴向卸荷只能卸到与径向相等的程度。

试样尺寸与常规三轴试样相同，高度为 80 mm，直径为 31.9 mm。

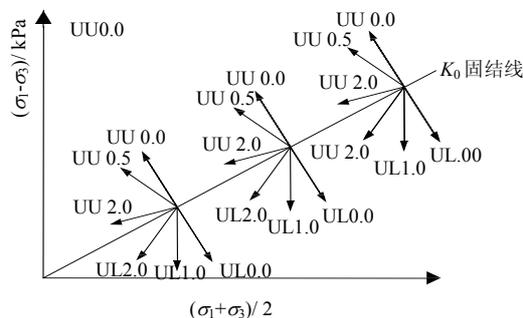


图 1 应力路径示意图

Fig.1 A schematic diagram of stress paths

3 试验结果分析

不同应力路径试验的应力-应变曲线分别见图 2~图 7，图中 ϵ_1 为轴向应变。

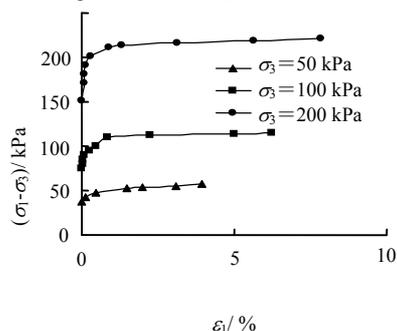


图 2 应力路径 UU_{0.5} 试验的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-stain curves of UU_{0.5}

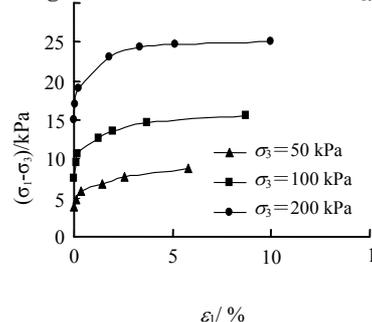


图 3 应力路径 UU_{0.0} 的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-stain curves of UU_{0.0}

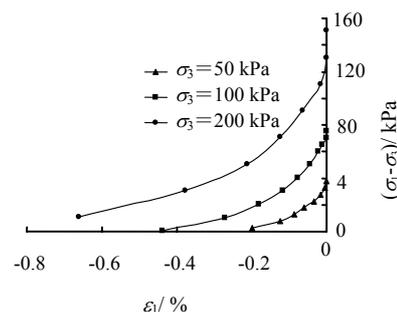


图 4 应力路径 UU_{2.0} 的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-stain curves of UU_{2.0}

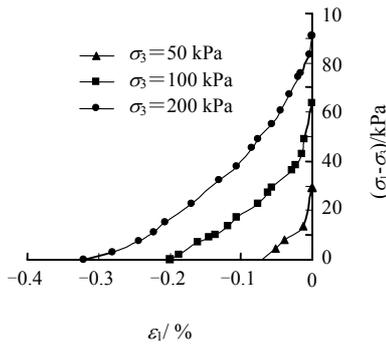


图5 应力路径 $UL_{0.0}$ 的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-stain curves of $UL_{0.0}$

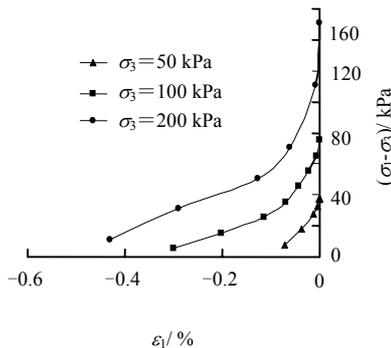


图6 应力路径 $UL_{1.0}$ 的应力-应变曲线
Fig.6 Stress-stain curves of $UL_{1.0}$

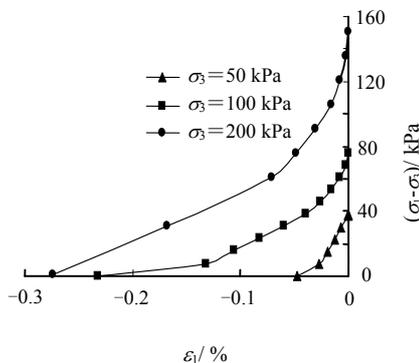


图7 应力路径 $UL_{2.0}$ 的应力-应变曲线
Fig.7 Stress-stain curves of $UL_{2.0}$

由图 2~7 不难看出, 各组试验的应力-应变曲线有如下共同特点:

(1) 各组应力路径在不同围压下的应力-应变曲线形状相似, 均近似呈双曲线关系。另外, 应力-应变曲线呈现明显的非线性, 即使在应变很小的时候, 应力-应变曲线便呈现很强的非线性。这与土的实际表现一致;

(2) 各组应力路径试验的应力-应变曲线虽然形状相似, 但是初始偏应力差不同, 这体现了 K_0 固结的作用, 表明试样在剪切初期已经具有比等压固结较大的强度, 这也从一定程度上体现了土体的结构性对土体强度的影响;

(3) 对于同一组应力路径, 随着固结压力的

增加, 应力-应变曲线初始坡度逐渐由缓变陡。

从图 2~7 还可以看出: $UU_{0.5}$ 和 $UU_{0.0}$ 应力路径下的应力-应变曲线表现类似, 而明显区别于 $UU_{2.0}$ 、 $UL_{0.0}$ 、 $UL_{1.0}$ 和 $UL_{2.0}$ 应力路径下的应力-应变曲线, 据此, 可将本次试验分为 A、B 两组, A 组包括 $UU_{0.5}$ 和 $UU_{0.0}$; B 组包括 $UU_{2.0}$ 、 $UL_{0.0}$ 、 $UL_{1.0}$ 和 $UL_{2.0}$ 。

A 组应力-应变曲线表现出了独有的特点:

(1) 应力路径试样均表现为轴向压缩, 其应力-应变曲线为应变硬化且近似呈双曲线型;

(2) 当试样达到破坏时, 其轴向破坏应变(4%~10%)比常规三轴要小得多, 这说明在卸荷应力路径下土体即使产生较小的应变便会破坏, 这一点说明实际工程中的围护墙后土压力值在较小的侧向变形条件下接近主动土压力的情况, 如果不能有效地控制基坑围护墙的水平位移, 基坑上部土体易出现滑裂破坏。

B 组应力-应变曲线表现出了独有的特点:

(1) 应力路径试样均表现为轴向伸长, 其应力-应变曲线则呈现高度的非线性、模量急剧变化、受应力路径的影响明显等特点;

(2) 应变均在 0.7% 以内, 可以认为土体只发生了小应变。Mair^[5]认为: 挡土墙工程的土体应变一般在 0.1% 以下; 地基以及隧道工程土体的应变稍大一些, 但也不会超过 1%。此组应力路径试验成果可以为研究土体小应变提供资料。

4 应力-应变曲线的归一化特性

现代土力学认为土的应力-应变关系具有归一化特性。土的归一化特性不仅能够推论同一应力路径, 不同固结压力的应力-应变曲线, 而且能够减小试验的取、运土等人为造成的试验误差, 能更真实地反映土的本质。Skempton^[6], 李作勤^[7]、曾国熙^[8]等学者曾用归一化的方法整理土工试验资料, 得到了一些归一化的应力与应变、应力路径关系, 从不同角度论证了许多类土都具有归一化特性。但这些成果大多是在加载条件下进行的, 而土体在卸荷应力路径下的归一化特性研究较少, 以下将讨论卸载应力路径下武汉粉质黏土应力-应变的归一化特性。

4.1 A 组应力路径的归一化特性及归一化方程

(1) 应力-应变曲线关系的破坏点的选择

破坏点的选择是归一化性状分析的关键问题之一, 可以采用以下两种方法: ①对于应变硬化型通常以轴向应变为 15% 对应的主应力差为土的破坏点; 或者以 $(\sigma'_3/\sigma'_1)_{\max}$ 为破坏点; ②对于应变软

化型通常以应力-应变的转折点为破坏点。卸荷土体的轴向应变较小，且应力-变关系的突变点一般不明显，容易受人为因素影响，因而，这里借鉴文献 [7] 中的确定，方法即采用绘制应力-应变的全对数图解来确定 A 组应力路径的破坏点。

(2) 应力-应变曲线归一化

用平均固结应力 $\sigma_m = (\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c})/3$ 对 A 组应力-应变曲线进行归一化，表明在 K_0 固结条件下武汉粉质黏土具有归一化特性。以应力路径 UU_{0.5} 试验为例，其归一化曲线见图 8。由图可以看出，大部分点归一化效果较好，仅有部分点有些离散，这可能是扰动的影响。

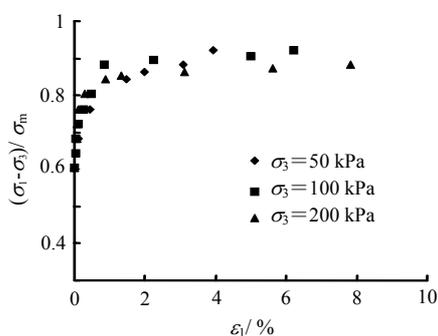


图 8 应力路径 UU_{0.5} 应力-应变的归一化曲线
Fig.8 Normalized stress-stain curves of UU_{0.5}

(3) 应力-应变归一化方程

Kondner^[9] (1963 年) 提出用双曲线函数来表达黏性土固结排水三轴试验的应力-应变关系

$$\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b\varepsilon_1 \quad (1)$$

式中： $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为主应力差或偏应力； ε_1 为轴向应变； a, b 为双曲线的两个参数。

从式 (1) 可以看出，如果将应力-应变曲线画成 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线，则呈线性关系，直线的截距为 a ，斜率为 b 。 $1/a$ 就是初始卸荷模量， $1/b$ 为应力-应变曲线的渐进线。

由图 2 和图 3 可以看出，A 组应力-应变曲线呈双曲线型，用式(1)绘制 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 曲线，则呈线性关系。以应力路径 UU_{0.5} 为例，其归一化曲线见图 9，应力路径 UU_{0.0} 的情况类似。

由归一化曲线可知，A 组应力路径的应力-应变归一化方程为

$$\frac{\varepsilon_1 \sigma_m}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b\varepsilon_1 \quad (2)$$

式中： $\sigma_m = \frac{1+2K_0}{3K_0} \sigma_{3c}$ ，为平均固结压力。

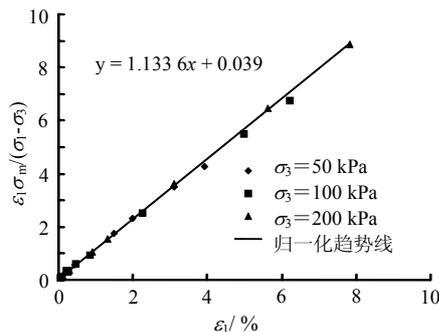


图 9 应力路径 UU_{0.5} 应力-应变的归一化双曲线函数表示
Fig.9 The normalized hyperbola pattern of UU_{0.5}

4.2 B 组应力路径的归一化特性及归一化方程

用上述方法对 B 组应力-应变曲线进行归一化，发现 B 组应力路径也具有较好的归一化特性。以应力路径 UL_{1.0} 为例，其归一化曲线见图 10。

与 A 组应力路径不同的是，若用式(1)来绘成 B 组的 $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线， $\varepsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 并没有呈现良好的线性关系，离散性比较大。

将其绘成 $\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})} - \varepsilon_1$ 曲线时，不同

固结压力下的应力-应变双曲线关系才呈良好的线性关系 (图 11)。图 11 是应力路径 UL_{1.0} 下应力-应变关系的归一化曲线。

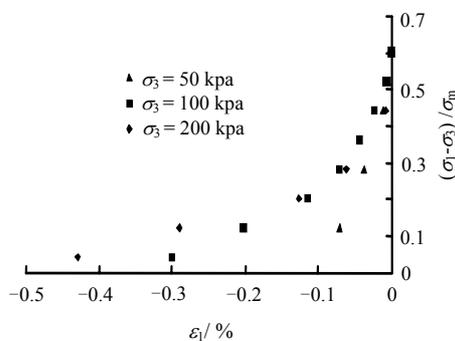


图 10 应力路径 UL_{1.0} 应力-应变的归一化曲线
Fig.10 Normalized stress-stain curves of UL_{1.0}

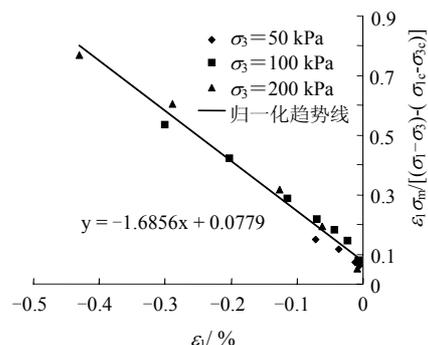


图 11 应力路径 UL_{1.0} 应力-应变的归一化双曲线函数表示
Fig.11 Normalized hyperbola pattern of UL_{1.0}

由此可见, B 组应力路径的应力-应变关系可用式(3)所示的双曲线函数归一化

$$\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})} = a + b\varepsilon_1 \quad (3)$$

由 $\sigma_{1c} - \sigma_{3c} = \frac{3(1-K_0)}{1+2K_0} \sigma_m$, 式(3)变换为

$$\frac{\varepsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3) - \frac{3(1-K_0)}{1+2K_0} \sigma_m} = a + b\varepsilon_1 \quad (4)$$

由上述分析可知, 用平均固结压力利用式(4)对 B 组的应力-应变曲线进行归一化, 具有良好的归一化特性。式(4)即为 B 组的归一化方程。

由此可知, 以双曲线非线性弹性模型为基础, 无论是 A 组应力路径还是 B 组应力路径都具有归一化特性, 只是各自的归一化方程不同而已。

5 结 语

(1) 武汉原状粉质黏土的卸荷应力路径试验表明, 卸荷土体的应力-应变关系呈双曲线关系, 并且从应变很小时具有较高的非线性, 其应力-应变关系与应力路径具有密切的关系;

(2) 对于武汉粉质黏土, 其卸荷应力路径的应力-应变关系具有归一化特性, 并分别给出了 A 组应力路径和 B 组应力路径的归一化方程。

参 考 文 献

- [1] 刘熙媛, 闫澍旺, 窦远明, 等. 模拟基坑开挖过程的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 97-104.
LIU Xi-yuan, YAN Shu-wang, DOU Yuan-ming, et al. Experimental studies of simulated excavation process[J].
- [2] 张荣堂. 减P路径下饱和软黏土应力应变性状的试验研究[博士学位论文D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [3] 刘国彬. 软土卸荷变形特性的试验研究[博士学位论文D]. 上海: 同济大学, 1993.
- [4] 王钊, 黄杰, 咸付生, 等. 土的卸荷试验和在万家寨引水隧洞变形分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 525-527.
WANG Zhao, HUANG Jie, XIAN Fu-sheng, et al. Unloading test of soil and application to deformation analysis of Wanjiashai water diversion tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(4): 525-527.
- [5] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineering: Civil Engineering**, 1993, 93(2): 27-41.
- [6] Skempton A W. The Pore-pressure coefficients A and B[J]. **Geotechnique**, 1954, (4): 143-147
- [7] 李作勤. 黏性土归一化性状的分析[J]. 岩土工程学报, 1987, 9 (5): 67-75.
LI Zhuo-qin. Analysis of the normalized property of cohesive clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 9(5): 67-75.
- [8] 曾国熙. 正常固结黏土不排水剪切的归一化性状[A]. 软土地基学术讨论会论文集[C]. 北京: 水利出版社, 1980, 13-26.
- [9] Duncan J M. Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation**. 1970, 9: 1 629-1 654.
- [10] 易武, 吴定洪. 链子崖炭质页岩与栖霞灰岩声发射特性室内试验报告[R]. 宜昌: 湖北省岩崩滑坡研究所. 1991.
- [11] 吴定洪, 陆业海. 岩石声发射特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(增刊): 73-77.
WU Ding-hong, LU Ye-hai. Study on acoustic emission characteristics of rocks [J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1996, 7(Supp): 73-77.
- [12] 陈开端, 易武. 长江三峡链子崖危岩体声发射监测报告[R]. 宜昌: 冶金部安全环保研究院、湖北省岩崩滑坡研究所, 1990.
- [13] 徐峻龄. 黄茨大型滑坡的监测预报 [R]. 兰州: 铁道部科学研究院西北分院, 1995.

上接第 2533 页

attenuation as an indicator of roof stability in advancing Headings[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, (37): 1 123-1 131.

[8] Ronnie K. Miller and Paul McIntire eds. Acoustic emission testing[A]. **Nondestructive Testing Handbook** [C]. [s.l.]: American Society for Nondestructive Testing, 1987.

[9] 彭苏萍, 孟召平. 矿井工程地质理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

[10] 易武, 吴定洪. 链子崖炭质页岩与栖霞灰岩声发射特性室内试验报告[R]. 宜昌: 湖北省岩崩滑坡研究所. 1991.