

文章编号:1006-2106(2008)05-0005-04

挤压性软岩流变参数反演与本构模型辨识*

赵旭峰¹ 孙 钧^{2**}

(1. 中国国际工程咨询公司, 北京 100044, 2. 同济大学, 上海 200092)

摘要:研究目的:为合理确定挤压性岩体力学性态的各有关参数,正确认识岩体力学属性并确保数值计算结果的可靠性,将隧道现场监测变形时间序列作为依据,通过位移反演分析理论,获得对隧道围岩稳定分析结果影响显著的流变参数值,进而实施流变模型辨识,为隧道工程围岩稳定性分析提供合理的本构模型和切合实际的计算参数。

研究结论:针对挤压性软岩隧道,建立了一套基于实测位移序列的模型辨识与参数反演的方法,该方法既依赖于工程地质和岩石力学理论,又依托于岩体工程现场实际量测,是联系理论实际的桥梁。

关键词:挤压性软岩;流变;参数反演;模型辨识

中图分类号:TU443 **文献标识码:**A

Inversion of Mechanical Parameters of Squeezing Soft Rock and Identification of Rheological Model

ZHAO Xu-feng¹, SUN Jun²

(1. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100044, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Research purposes: Rational mechanics parameter of squeezing rocks is very important for understanding the mechanical characteristic of rocks and improving the reliability of numerical simulation. Based on the displacement time series from field monitoring, rheological parameter of rocks were obtained with numerical inversion analysis method, and visco-elastic constitutive model for squeezing rocks were identified in this paper. Rational constitutive model and rheological parameter can be provided for stability analysis of tunnel in squeezing ground.

Research conclusions: A method for identification of rheological model and inversion of mechanical parameters was proposed. This proposed method is based on the theories of rock mechanics and on-site measurement, which can be as the bridge linking the theory with practice.

Key words: squeezing soft rock; rheology; inversion of mechanical parameters; identification of rheological model

对于岩体工程问题,由于介质的非均质、非线性、不连续性以及各种工程、施工等因素的影响,企图用解析方法进行求解几乎是不可能的。随着计算机技术在岩石力学和岩体工程中的应用和推广,岩石力学的数值理论和方法渐趋成熟,并在岩体工程中有不少成功应用。然而,数值方法虽有较合理的计算模型,但输入

参数,诸如工程区域内岩体的初始地应力和相应的力学特性参数等都很难作合理的估值。无论由室内实验或现场原位实验确定的岩体力学参数都与实际岩体参数有较大偏差,加之岩体的非均质性以及节理、裂隙的影响,使得实验结果很难具有代表性。用这样的参数作为计算输入参数进行数值分析,所得结果往往与实

* 收稿日期:2008-03-26

基金项目:铁道部十五科技研究开发计划项目(2004G043-A)

** 作者简介:赵旭峰,1976年出生,男,高级工程师;孙钧,1926年出生,男,教授,中科院院士。

际情况有一定的误差,难于在工程实践中采用,且不同程度的阻碍了数值方法在岩体工程中的进一步推广应用^[1]。20世纪70年代发展起来的以现场量测位移为基础的位移反分析法,是解决这一难题的重要手段之一^[2-5]。它既依赖于工程地质和岩石力学理论,又依托于岩体工程的现场实际量测,是理论性和实践性都很强的一种实用技术,是联系理论实际的桥梁。

流变模型的选择既要反映岩土介质的主要受力特性又要计算参数为最少,这对以控制为目的的地下结构物的设计和施工来说,是完全允许和合理的。在岩土工程设计计算与开挖施工预测中,本构关系模型的确定比地层参数的选择更重要,因为它可以决定参数的物理含义和量值。此外,由室内或现场试验得出的本构关系与实际岩土体的性态常有差异,而开挖引起的位移则同时包含各类因素的影响,据以得出的本构模型能切合实际^[6-8]。因此,模型辨识不仅具有重要的理论意义,而且有重要的应用价值。

1 挤压性岩体粘性参数反演理论

挤压性岩体所处地质条件复杂,岩质软弱破碎,致使通过试验为计算提供可靠参数变得十分困难。反演分析理论的出现,无疑为解决这一难题提供了有力的手段。把洞壁收敛量测与拱顶下沉量测数据序列作为据以选择数学模型,阐明其物理概念的技术基础,并据以进行位移反分析,取得对隧道围岩稳定分析结果影响的参数,应该说是适宜的和可行的。粘弹性位移反演分析方法可以有效地考虑位移随时间的发展,并可预测位移的发展,为工程提供合理的预测与评价,从而使位移反分析方法具有更广泛的实用价值。

1.1 粘弹性位移反演格式

这里以 Burgers 模型为例进行位移反分析格式推演。Burgers 模型由 Maxwell 模型与 Kelvin 模型串联而成,如图 1 所示。模型本构方程为:

$$\eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} = \sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_2}{E_2} + \frac{\eta_1}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} \quad (1)$$

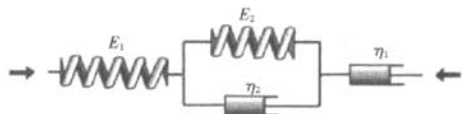


图1 Burgers模型示意图

在 $t=0$ 时,对模型施加常应力 $\sigma = \sigma_0$, 可得:

$$\varepsilon(t) = \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} \sigma_0 \quad (2)$$

根据建立粘弹性问题反演计算统一格式的需要,将式(2)变换为:

$$\sigma_0 = \frac{1}{E_i} \varepsilon(t) \quad (3)$$

式(3)中:

$$E_i = 1 / \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} \quad (4)$$

式(3)与弹性力学中公式相比较,可知 E_i 的含义与杨氏模量相同,故将其称为“等效弹性模量”,它是一个与岩石弹性模量及粘性参数等有关的“综合参数”。

1.2 考虑空间效应的监测数据修正

由于隧道开挖作业面空间效应影响,开挖面到达前地层中已经发生的位移量不可能由在开挖过程中设置的量测仪表测取,将位移损失量与地层实际发生的、由开挖引起的总位移量的比值称为空间效应系数。利用现场位移值作为反演分析输入数据时,须将损失位移与实测位移相叠加,才能得到地层实际发生的总位移量。具体计算时,则可利用空间效应系数按式(5)直接算得总位移量:

$$U = \frac{U'}{1 - \eta} \quad (5)$$

式中 U' ——由仪表测得的位移量;

U ——总位移量;

η ——空间效应系数。

η 值可参照经验选定^[3],岩性坚硬、节理裂隙不发育时 η 值可取为 0.15 ~ 0.25; 而岩性较软弱、节理裂隙较发育时 η 值可取为 0.4 ~ 0.5; η 值也可通过三维数值计算确定。Sakurai 用轴对称有限元分析在任意初始应力场的均质各向同性地层中开挖圆形隧道时的先期位移和全位移的比值为 35%。

1.3 流变参数反演分析

隧道开挖、支护与洞壁位移量测是一个时空过程,反演所得到的等效弹性模量 E_i 必将是对应于隧道施工中的某一时刻。用各时刻量测值分别作位移反分析,可得与位移、时间序列相对应的等效弹性模量序列。鉴于描述地层粘弹性性态的 Burgers 模型有 4 个参数,所需进行的反演计算的最少次数应为 4 次,以分别求得 $(E_i)_i (i=1 \sim 4)$ 。在应力边界条件保持不变且 μ 为常数的情况下,组建用于反演确定围岩流变性态参数的方程组为:

$$\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] = \frac{1}{(E_i)_i} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

可证明式(6)有唯一解,但由于表达式式的非

线性,只能通过逐次线性化,利用曲线拟合按最小二乘意义求待定参数的数值原理,逐次迭代逼近,最终求得满足精度的数值解答,即为围岩流变参数值。

需要指出的是,鉴于三维问题分析中采用的材料性状模型一般与二维问题相同,故由二维问题的反演分析所得的材料性状参数对三维问题的分析例如开挖过程中位移预测的计算等也完全适用。

2 挤压性岩体流变模型辨识理论

运用系统辨识原理和优化技术可确定相应岩体的粘弹性本构关系^[3,6]。其基本原理是:首先组集某种模型库,将库中每一种模型便于同实际观测值或试验值相比较的量提取出来,成为标志该模型独有的特征量,然后用同等含义下的实测或试验值或是它们的导出量同每一种模型的特征量相比较来确定最佳模型。

依赖于对挤压性岩体工程地质成果的分析 and 现场监测信息的认识,对其本构模型进行逐级筛选,并确定尽可能少且反映本质的模型集合。根据隧道工程施工现场监测信息,利用典型工程类比反演方程式计算隧道围岩不同时刻等效弹性模量,得到的时间序列。对模型类属集合中的每一种流变本构关系均可建立粘弹性位移反演格式,并将其与反演得到的等效弹性模量时间序列组建方程组,根据非线性最小二乘拟合数值原理,分别求解模型类属集合中各本构模型参数,并提取等效弹性模量时间序列。对隧道结构体系实际输出(反演弹性模量时间序列)与模型类属库输出(各模型等效弹性模量计算时间序列),根据最小二乘优化理论,建立目标函数,进而可辨识出能反映隧道实际设计施工条件下的最佳模型。

表1 乌鞘岭隧道变形量测值

时间/d		1	3	5	7	9	11	15
拱顶位移/mm	实测	38	61	78	89	99	105	123
	修正	63.3	101.7	130.0	148.3	165.0	175.0	205.0
拱脚收敛/mm	实测	27	46	59	73	90	94	98
	修正	38.6	65.7	84.3	104.3	128.6	134.3	140.0
下边墙收敛/mm	实测	—	—	—	38	135	223	261
	修正	—	—	—	58.5	207.7	343.1	401.5

根据乌鞘岭隧道工程设计与施工方案,建立数值反演分析模型,岩体力学性质、初始地应力和锚喷支护参数如表2所示。

将表1中隧道基于实测变形基础上的修正变形值和表2中的围岩与支护力学参数作为已知输入信息,对乌鞘岭隧道岭脊地段F7断层带设计施工改进后的围岩一支护体系进行位移反演分析计算,得到挤压性围岩各时刻等效弹性模量如表3所示。

3 工程应用

乌鞘岭特长隧道是兰新铁路兰武二线工程的关键枢纽,设计为两座单线隧道,主体一般埋深400~700 m,最大埋深1100 m,隧道长20.05 km,为我国已建成的最长单线铁路隧道。隧道所经地层岩性复杂,岭脊地段分布有4条区域性大断层组成的宽大“挤压构造带”,为高又极高地应力场中的薄层、破碎、软质围岩,流变时效特性显著。此处根据乌鞘岭隧道工程岭脊地段挤压性岩体试验与现场变形监测信息,对岭脊F7断层带挤压性岩体进行流变参数反演分析与本构模型辨识。

3.1 流变参数反演分析

挤压性地层具有明显的流变特性,本着简单、实用、易于辨识,并能反映岩体主导属性的原则,在确定了挤压性岩体明显时效属性的基础上,合理地选取能基本反映挤压性地层粘弹性模型的类属集合为:

M = {M₁, M₂, M₃, M₄, M₅} (7)

- 式中 M₁——Maxwell 模型;
M₂——Kelvin 模型;
M₃——Kelvin - Voigt 模型;
M₄——Poyting - Thomson 模型;
M₅——Burgers 模型。

根据乌鞘岭隧道工程F7断层带设计施工改进后的YDK 177+345断面监控量测信息进行反演分析,并考虑量测空间效应损失,对实测数据进行修正,综合考虑确定拱顶下沉空间效应系数为0.4,拱脚水平收敛空间效应系数为0.3,而墙腰水平收敛空间效应系数为0.35。隧道实测变形值和考虑空间效应修正后的变形值如表1所示。

表2 乌鞘岭隧道挤压性围岩反演计算参数

岩体参数	等效弹模 /MPa	μ	C/kPa	φ /°	P _x /MPa	P _y /MPa
	1 100	0.33	60	25	11.16	11.16
支护参数	喷混凝土		锚杆		钢筋网	
	厚度 /cm	强度 /MPa	直径 /mm	长度 /m	间距 /cm	直径 /mm
	35	15	φ32	4	80 × 80	φ8
					20 × 20	2幅/m I20

表3 乌鞘岭隧道挤压性围岩反演等效弹性模量值

时间/d	1	3	5	7	9	11	15
等效弹性模量/MPa	1 237.5	755	471.0	395.2	358.2	338.6	289.3

根据模型特性与本构关系式建立模型类属集中各模型的粘弹性反演统一格式,并同表3中的等效弹性模量时间序列联列组建方程组。由于表达式为非线性的方程组,利用最小二乘拟合数值计算方法,编制相应的计算程序,可求得各模型流变参数,反演结果如表4所示。

表4 挤压性围岩各种模型流变参数

模型特征参数		E_1 /MPa	η_1 /MPa·d	E_2 /MPa	η_2 /MPa·d
流变模型	Maxwell	1 810.6	3 832.5	—	—
	Kelvin	354.2	1 108.6	—	—
	Kelvin - Voigt	2 163.2	2 816.8	216.3	—
	Poyting - Thomson	196.6	2 328.1	1 996.6	—
	Burgers	2 161.6	68 422.9	238.1	2 938.1

3.2 粘弹性模型辨识

表5为根据优化目标函数求得的各模型等效弹性模量与反演等效弹性模量值之间的最小二乘残差平方和 Q 与拟合度值 R^2 的比较。可以看出 Maxwell 模型与 Kelvin 模型的等效弹性模量与反演等效弹性模量值的拟合度吻合的较差,而 Poyting - Thomson 模型、Kelvin - Voigt 模型与 Burgers 模型的等效弹性模量均与反演等效弹性模量值的拟合度吻合较好。

表5 挤压性围岩各模型辨识参数

	Maxwell	Kelvin	Kelvin - Voigt	Poyting - Thomson	Burgers
Q	11 902	42 226	5 435	5 465	5 390
R^2	0.982 86	0.939 18	0.99217	0.992 20	0.992 24

对于乌鞘岭隧道挤压性围岩在设计与施工改进后的条件下,采用后3种模型应该均能较好地反映挤压性岩体流变特征。这里,综合考虑到乌鞘岭隧道工程的高地应力软岩条件,围岩长期抗压强度低,而岩质非常软弱,进入断层初期,由于刚性支护构筑没有及时跟上,岩体表现出变形持续增长而长期强度降低的特性,与 Burgers 模型所表示的流变规律更接近。因此,建议采用 Burgers 复合粘弹性模型描述挤压性围岩的流变性状。Burgers 模型可用来描述有瞬时弹性变形、过渡蠕变、等速蠕变及卸载后有残余变形的岩体,特别适用于长期抗压强度特别低的岩体,尤其是软岩,如板岩、页岩等。

4 模型校验

尽管模型辨识与参数反演分析过程是一步步科学

推导而来,但其间掺和了若干人为因素和不确定因素,因此,有必要对模型进行检校。岩体模型辨识与参数反演主要为稳定性预测,若模型预测结果与实际观察结果相差不大,则说明模型有效。

利用上述 Burgers 模型与反演所得参数对乌鞘岭隧道进行了三维数值模拟,其计算位移与实测值的比较如图2所示。

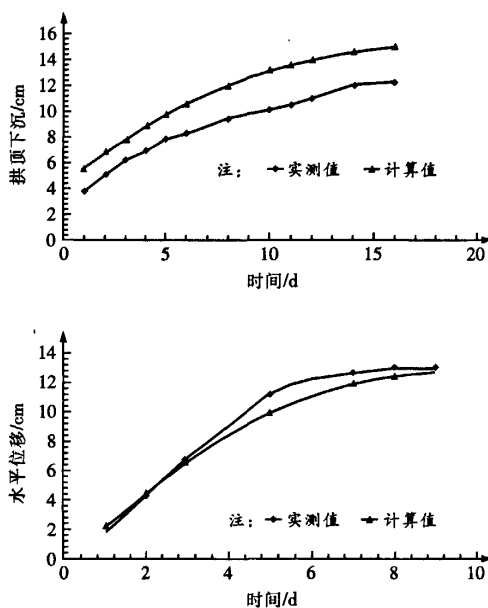


图2 隧道位移时态曲线

隧道拱顶下沉计算值与实测值随时间发展规律一致,计算值较实测值稍大,主要是由于开挖后监控量测滞后,而在位移分析中将开挖后到第1次读数损失变形量人为设置成3.8 cm,这是致使计算与实测误差的主要来源;下台阶边墙变形计算值与实测值基本吻合。模型校验结果表明,Burgers 模型和反演参数能够反映该条件下挤压性软岩的流变时效特性,可用于对隧道工程的稳定性做出合理的评价和符合实际的预测。

5 结论

通过本文研究工作,针对挤压性软岩隧道,建立了一套利用现场丰富的监测信息对挤压性岩体流变参数进行反演的实用方法,并运用系统辨识原理与优化技术对其宏观流变力学模型进行辨识。该方法可为数值计算提供符合实际的本构关系与较准确的输入参数,使数值解答能有效地用于工程决策,真正实现了地下工程信息化动态反馈与控制。位移反演分析方法与模型辨识理论不仅是为了确定所谓“正确的模型与计算

(下转第19页)

开挖;底部止浆墙设计为台阶齿墙式;喷混凝土封闭注浆墙缝隙。

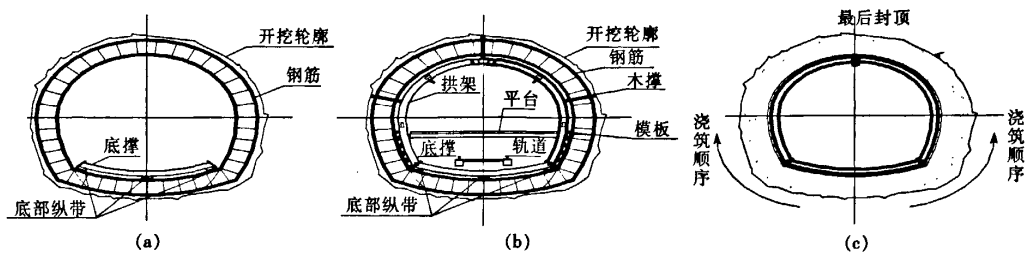


图8 模板架立及混凝土浇筑示意图

(4) 重视灾害地层排水。采取“堵、排”相结合的方式,通过注浆帷幕使水流集中,并设置深孔集水管导出水流。

参考文献:

[1] 刘志刚. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京:中国铁道出

版社,2001.

[2] 王国际. 注浆技术理论与实践[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2000.

[3] 曾秀荣,崔增骥,周庆芬,等. 注浆技术经验汇编[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.

(上接第8页)

参数”,更有意义的在于把它们用于动态预测并评价挤压性围岩隧道工程的可靠性与稳定性。必须强调指出,反演分析所得参数只是在一定设计与施工条件下的等效参数,正演预测与评价只有采用与反演相同的计算模型才具有广泛的实用价值。

参考文献:

[1] 王芝银,杨志法,王思敬. 岩石力学反演分析回顾及进展[J]. 力学进展,1998,28(4):488-498.
[2] Sakurai S., Takeuchi K., Back Analysis of Measured Displacement of Tunnel[J], Rock Mech. Rock Engng., 1983, 16(3):173-180.
[3] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京:科学出版社,1999.

[4] Yang Zhifa, Wang Zhiyin, et al, Back - Analysis of Viscoelastic Displacements in a Soft Rock Road Tunnel[J], Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 2001, 38(2):331-341.
[5] Li Yunpeng, Wang Zhiyin, et al, Three Dimension Back Analysis of Viscoelastic Creep Displacements[A]. Proc. 3rd Int. Conf. on Underground Space and Earth Sheltered Buildings[C]. Shanghai:Tongji University Ptreess,1988.
[6] 孙钧. 岩石材料流变及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
[7] 朱珍德,徐卫亚. 岩体粘弹性本构模型辨识及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(11):1605-1609.
[8] 徐平,杨挺青. 岩石流变试验与本构模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊):1739-1744.

作者: 赵旭峰, 孙钧, ZHAO Xu-feng, SUN Jun
作者单位: 赵旭峰, ZHAO Xu-feng(中国国际工程咨询公司, 北京, 100044), 孙钧, SUN Jun(同济大学, 上海, 200092)
刊名: 铁道工程学报 
英文刊名: JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY
年, 卷(期): 2008(5)
被引用次数: 3次

参考文献(8条)

1. 王芝银;杨志法;王思敬 岩石力学反演分析回顾及进展 1998(04)
2. Sakurai S;Takeuchi K Back Analysis of Measured Displacement of Tunnel 1983(03)
3. 杨林德 岩土工程问题的反演理论与工程实践 1999
4. Yang Zhifa;Wang Zhiyin Back-Analysis of Viscoelastic Displacements in a Soft Rock Road Tunnel[外文期刊] 2001(02)
5. Li Yunpeng;Wang Zhiyin Three Dimension Back Analysis of Viscoelastic Creep Displacements 1988
6. 孙钧 岩石材料流变及其工程应用 1999
7. 朱珍德;徐卫亚 岩体粘弹性本构模型辨识及其工程应用[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2002(11)
8. 徐平;杨挺青 岩石流变试验与本构模型辨识[期刊论文]-岩石力学与工程学报 2001(zk)

本文读者也读过(10条)

1. 祝艳波 基于灰色聚类法的下洲隧道围岩分级研究[期刊论文]-城市地质2009, 4(4)
2. 伍振志. 王泉. WU Zhen-zhi. WANG Quan 基于改进遗传算法的粘弹性岩体力学参数反演[期刊论文]-煤田地质与勘探2006, 34(3)
3. 唐芳. Tang Fang 降雨条件下隧道稳定性的弹塑性位移计算分析[期刊论文]-市政技术2010, 28(6)
4. 申玉生. 赵玉光. 高红兵. Shen Yusheng. Zhao Yuguang. Gao Hongbin 连拱隧道结构内力样式的模型试验研究及有限元分析[期刊论文]-现代隧道技术2005, 42(1)
5. 王长虹. 杨有海. Wang Changhong. Yang Youhai 弹性位移反分析法在乌鞘岭隧道工程中的应用[期刊论文]-兰州交通大学学报2005, 24(6)
6. 卢廷基. 王建. LU Ting-ji. WANG Jian 济晋高速公路凤凰台三号隧道施工监控研究[期刊论文]-交通标准化2010(20)
7. 歌乐山隧道水环境监测与涌水预测应用研究[期刊论文]-现代隧道技术2004(z2)
8. 叶德平. 严生. 胡耀云. Ye Deping. YanSheng. Hu Yaoyun 高抗裂、高抗渗复合材料在南京地铁工程中的应用[期刊论文]-特种结构2007, 24(4)
9. 郭辉. GUO Hui 深圳地铁某区间隧道二衬结构数值模拟分析[期刊论文]-山西建筑2011, 37(4)
10. 杨宏燕 上海地铁盾构数据采集系统的技术改造[会议论文]-2003

引证文献(3条)

1. 李德海 隧道围岩流变参数的粘弹性位移反演与验证[期刊论文]-探矿工程-岩土钻掘工程 2012(2)
2. 王坤 深圳土体蠕变特性在深基坑工程中的应用[期刊论文]-铁道工程学报 2011(8)
3. 陈德彪 兰渝铁路胡麻岭隧道第三系弱成砂岩蠕变特性试验研究[期刊论文]-隧道建设 2013(8)

引用本文格式：[赵旭峰, 孙钧. ZHAO Xu-feng, SUN Jun 挤压性软岩流变参数反演与本构模型辨识](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008 (5)