

PROCEEDINGS OF THE FOURTH NATIONAL
CONFERENCE ON ROCK DYNAMICS

第四届全国岩石动力学学术会议

论 · 文 · 选 · 集

中国岩石力学与工程学会
岩石动力学专业委员会



湖北科学技术出版社

成都 · 1994 · 10

PROCEEDINGS OF THE FOURTH NATIONAL
CONFERENCE ON ROCK DYNAMICS

第四届全国岩石动力学学术会议

论 · 文 · 选 · 集

中国岩石力学与工程学会
岩石动力学专业委员会



湖北科学技术出版社

成都 · 1994 · 10

还书日期表

[illegible]

鄂新登字 03 号

第四届全国岩石动力学学术会议论文集

中国岩石力学与工程学会
岩石动力学专业委员会 编

湖北科学技术出版社出版发行
武汉水利电力大学印刷厂印刷

787/1092 毫米 16 开本 18.375 印张 450 千字

1994年10月第一版,1994年10月第一次印刷

ISBN7—5352—1585—8/P·6

印数:1-320

定价: 30.00 元

内 容 简 介

本论文集选自 1994 年在四川成都召开的“第四届全国岩石动力学学术会议”上交流的论文。共选编论文 46 篇,内容包括:岩石(体)动态力学性质与本构关系、岩体中波的传播与破岩机理、桩基动测技术与研究、岩石动力学在工程中的应用四大部分。反映了近几年来我国冶金矿山、煤炭石油、水利水电、铁路交通、地质地震、建筑环保、国防科研等部门与系统开展岩石动力学学科方面的研究与应用成果,基本代表了国内目前岩石动力学研究状况与发展水平。资料新颖,内容丰富,具有较强的实用性。

本论文集可供岩土力学与工程界的研究技术人员、高等院校有关专业的师生参考。

前 言

“全国岩石动力学学术会议”自 1988 年举办首届会议以来,每两年举办一届,今年已经是第四届了。在各方面的支持与帮助下,本次会议按惯例在会前正式出版了本论文集,它汇集了本会议有代表性的论文 46 篇。分岩石动态力学性质与本构关系;岩体中波的传播与破岩机理;桩基动测新技术与方法研究;岩石动力学在工程中的应用四大部分。基本反映了我国冶金矿山、煤炭石油、水利水电、铁路交通、地质地震、建筑环保、国防科研等部门与系统近几年来开展岩石动力学学科方面的研究水平与应用成果。

岩石动力学作为岩石力学的一个重要分支,是一门新颖的、年轻的、应用性强的边缘学科,在我国该学科的形成与队伍的建设都较晚,研究水平与发展也不平衡。但该学科又恰恰与国民经济建设息息相关。诸如三峡水电枢纽工程、深圳大亚湾核电工程、国防建设防护工程、地下开采岩爆与冲击地压防治工程、矿山建设控制爆破问题、高层建筑桩基动测技术问题等,都需要应用岩石动力学知识去解决工程中的重大疑难问题。

本论文集收集的论文,大都是当前我国岩石动力学工作者在理论与实践中的重要成果与经验总结。其中不少论文代表着我国岩石动力学发展的前沿水平。一些基础性学术论文的研究,有一定的深度,并具有独到的观点与见识。而最具代表性的是大部分论文都紧紧围绕着国民经济建设这一中心议题,密切结合工程实际,有较强的实用性。

我们希望本次会议的召开与论文集的正式出版,有助于同行们相互之间在多方面的进一步了解,切磋学问,研讨技艺,加强合作,把我国岩石动力学学科研究与应用提高到一个新的水平,在国民经济建设中发挥更大更好的作用。

本次会议顺利召开与论文集的正式出版,除了广大作者、论文集编委与会务人员的齐心努力与辛勤劳动外,还应特别感谢中科院武汉岩土力学所、武汉水利电力大学、湖北科学技术出版社、西南交通大学等单位的大力支持,开封市建筑工程质量监督站等单位的友情资助。

中国岩石力学与工程学会
岩石动力学专业委员会
1994 年 10 月

目 录

第一部分 岩石(体)动态力学性质与本构关系

岩土材料动力特性及其参数确定.....	周德培	屠树根(1)
高应变率作用下岩石的微观损伤特征.....	于亚伦	蒋德全(8)
砂岩在冲击荷载下的力学性质	信礼田 何 翔 李占田	刘建武(13)
加载速率对岩石力学性质及声发射率的影响	席道瑛 谢 端 张 毅	何 炬(19)
静动态砂岩渗流实验研究	吴云华 李荣筠 任冠韬	李文廷(24)
微结构数值分析方法	蔡钟业	王明洋(31)
微结构力学在颗粒介质的弹塑性本构关系的应用	王明洋	蔡钟业(36)
自分幅全息动光弹照相机和全息图象计算机处理系统的简介	丁钦贡	龚 敏(47)

第二部分 岩体中波的传播与破岩机理

爆炸荷载作用下霍布金逊杆裂纹发展的分形研究	杨 军	王树仁(53)
岩巷定向断裂爆破机理研究与实践	杨永琦 杨仁树 刘绍发 许 仪等	(59)
岩石爆破动扩裂过程的模型试验	吴从师 郭子庭	高晓初(67)
爆炸应力波作用造成的岩石破裂区	宗 琦	(71)
岩石中柱状装药爆扩过程的理论分析	宗 琦	(75)
浅论岩体结构和地质断层对爆震波传播的影响	高晓初	(80)
直眼掏槽方法的试验与研究	刘积铭	(85)
卸压巷分区并列式爆破法	张东升 屠世浩 邵 鹏	(92)
炮孔填塞的试验研究	苏学清	(98)
用岩体波速确定预裂爆破线装药密度的探讨.....	石怀理 岳 英 王洪训	吴树宝(101)
宽孔距微差接力式爆破原理及其应用.....	赵 根	刘弟海(105)
爆破漏斗特征曲线回归合理性分析.....	马芹永	杜俊林(108)
水压爆破的破坏特征及拆除实践.....	李守巨 何庆志 上官子昌	费鸿禄(115)
定向爆破拆除冷却塔倾倒条件的研究.....	上官子昌 李守巨 刘书贤	尹志刚(120)
露天矿爆破振动对临近矿井的影响.....	汪晓霖	陆 来(126)
露天矿爆破降震新技术.....	韩子荣	李华玉(130)
湘钢东安石灰石矿爆破震动对周围建筑物的影响及降震技术研究.....	于喜林	(137)
压电式结构表面动压力传感器.....	曾 辉	余尚江(145)

第三部分 桩基动测技术与研究

用动力法测定桩基质量和承载力.....	王武林	(154)
---------------------	-----	-------

考虑了桩土作用后的桩波动方程的理论分析·····	倪四道	席道英	刘孝敏	黄理兴(163)
桩-土结构中土的模拟分析·····	宋纳新		李造鼎(168)	
CPSA 软件及其在工程中的应用·····			柴华友(173)	
高应变动力法试桩与静载荷试桩对比实例·····	陈雅菁	方永锋	程召北(179)	
粉喷桩完整性动测技术的探讨·····			姚琦(183)	
喷粉桩的质量检测·····			罗成明(188)	
基桩质量低应变动测法中传感器特性与实测波形分析·····	吴亚平	刘明贵	蔡忠理(193)	

第四部分 岩石动力学在工程中的应用

岩爆的真三轴试验研究·····	侯发亮(201)			
冲击地压的分叉分析·····	王来贵	潘一山	梁冰	章梦涛(209)
顶板大面积来压机理研究·····	靳钟铭			张惠轩(215)
冲击地压的煤岩层结构破坏与摩擦滑动机理初探·····	齐庆新			刘天泉(221)
声发射(AE)法对三峡坝址区地应力试验研究·····	鲁先元			陈汉珍(226)
三峡工程一期围堰基础细砂层液化试验·····				刘国霖(236)
黄河李家峡水电站坝区岩体静、动弹性模量的对比研究·····	巫志辉	岳英		石怀理(241)
黄河李家峡水电站坝基断层声学特性的现场测试研究·····	石怀理	岳英		雷浪法(246)
太平驿隧洞岩爆特征及施工措施·····	洪开荣			周德培(251)
铁路浅埋隧道抗震缝的设置·····	吕和林			张铖(257)
砼砌石体力学特性及声波测试·····				阮福(264)
软泥岩巷道可伸长锚杆柔性喷层锚喷网支护原理的研究·····	田永山			关玉顺(274)
编后·····				(282)

CONTENTS

Part I Nature of Rock Dynamics and Its Constitutive Equations

Dynamic Behaviour of Geotechnical Material and Its Parameters Determination	Zhou Depei Tu shulgen(1)
Microscopic Damaged Specifics of Rock under High Strain Rate	Yu Yalun Jiang Dequan (8)
Mechanical Characters of Sandstone under Impulsive Load	Xin Litian He Xiang Li Zhantian Liu Jianwu(13)
Effect of Loading Rate on Mechanical Property and Acoustic Emission of Rock	Xi Daoying Xie Duan Zhang Yi He Ju(19)
Experimental Study of Sandstone Seepage Flow under Dynamic and Static States	Wu Yunhua Li Rongyun Ren Guantao Li Wenting(24)
A Numerical Analysis Method of Microstructure	Cai Zhongye Wang Minyang(31)
Application of Micro-structural Mechanics to the Constitutive Relation of Elastoplasticity in Granular Media	Wang Minyang Cai Zhongye(36)
An Introduction to the Holographic Instrument with Dynamic Photoelasticity and the Computer Treatment of Hologram	Ding Qingong Gong Min(47)

Part I Propagation of Stress Wave and Blasting Mechanism in Rockmass

Study and analysis of the Crazing Development of Huobu-Jinxun's Pole under Blasting Load	Yang Jun Wang Shuren(53)
Study and Practice of the Fracture Blasting Mechanism with Fixed Direction in Rock Alley	Yang Yongqi Yang Renshu Liu Shaofa Xu Yi(59)
A model Experiment of the Breaking Process of Rock Blasting	Wu Cangshi Guo Ziting Gao Xiaochu(67)
Rock Rupture Region Formed by the Action of Bursting Stress Wave	Zong Qi(71)
Theoretical Analysis of the Blasting Process under Cylindrical Charge in Rock	Zong Qi(75)
On the Influence of Rockmass Structure and Geologic Fault on Blasting Wave Propagation	Gao Xiaochu(80)
Experiment and Study on the Method of Parallel Cut	Liu Jiming(85)

A Method of Zonal Parallel Explosion in Destressing Opening	Zhang Dongsheng Tu Shihao Shao Peng(92)
Experimental Study on the Filling of Shot Hole	Shu Xueqing(98)
Discussion of the Charging Density to Determine the Line of Pre-splitting Blasting by the Wave Velocity of Rockmass ...	Shi Huali Yue Ying Wang Hongxun Wu Shubao(101)
Principle of the Short-delay Blasting of Wide Hole Spacing and Its Application	Zhao Gen Liu Dihai (105)
Reasonable Analysis of the Characteristic Curve Regression of the Explosive Funnel ...	Ma Qinyong Du Junlin(11)
Destructive Characteristic and Demolition Practice of Hydraulic Blasting	Li Shouju He Qingzhi Shangguan Zichang Fei Hongqu(115)
Study on the Dumping Condition to Dismantle Cooling Towers by the Directive Blasting	Shangguan Zichang Li Shouju Liu Shuxian Yi Zhigang(120)
Influence of Blasting Vibration at the Open-pit Mine on the Mine Block Nearby	Wang Xiaolin Lu Lai(126)
New Techniques of Reducing Blasting Vibration for Open-pit Mine	Han Zirong Li Huayu(130)
Influence of Vibration of Dong-an Limestone Mine of the Hunan Steel Factory on the Buildings Around and the Study on Damping Vibration Techniques	Yu Xilin(137)
A Dynamic Pressure Transducer of the Superficies in Piezo-electric Structures	Zeng Hui Yu Shangjiang(145)

Part III Study of Technology and Method of Dynamic Testing Piles

Determining the Quality and Bearing Capacity of Pilefoundation with Dynamic Testing Method	Wang Wulin(154)
Theoretical Analysis on the Wave Equation of Piles after Considering the Pile-soil Function	Yi Sidao Xi Daoying Liu Xiaomin Huang Lixing(163)
Analog Analysis of soil in the Pile-Soil Structure	Song Naxin Li Zhaoding(168)
CPSA Software and Its Application to Engineering	Chai Huayou(173)
Examples in Comparison between the Methods of Dynamic and Static Testing Pile under High Strain	Chen Yaqing Fang Yougfeng Cheng Zhaobei(179)
Discussion of the Integral Dynamic Testing Technology for the Disting Pile	Yao Qi(183)
Qualitative testing of the Disting Pile	Luo Chengming(188)
Analysis on the Characteristics of the Feeler Search and the Measured Waveform in the Dynamic Testing Method under Low Strain for the Pile Quality	Wu Yaping Liu Minggui Cai Zhongli(193)

Part IV Application of Rock Dynamics in Engineering

Experimental Study on True 3-D Axis of Rockburst	Hou Faliang(201)
Analysis on Bifurcation for the Impact Ground Pressure Produced by Coal Burst	
..... Wang Laigui Pan Yishan Liang bing Zhang Mangtao(209)	
Mechanism Study on Bearing Compression of Big Area on the Top Plate in a Mine	
..... Jin Zhongming Zhang Huixuan(215)	
Experimental Investigation into the Structure Failure of the Coal-Rock Seam and the Mechanism of the Friction Slip for the Coal Burst	Qi Qingxin Liu Tianguan(221)
Experimental Study on Geostress in the San-Xia Dam Area with the Acoustic Emission (AE) Method	Lu Xianyuan Chen Hanzhen(226)
Liquefaction Study on the Fine Sand Layer of Cofferdam Foundation in the First Period San-Xia Engineering	Liu Guolin(236)
Comparative Study on Static and Dynamic Elasticity Modulus of the Dam Area Rockmass in Li-Jia-Xia Power Station of the Yellow River	Wu Zhihui Yue Ying Shi Huali(241)
Study on Field Experiment of the acoustic Characteristics of Dam Foundation Fault in the Li-Jia-Xia Power Station of the Yellow River	Shi Huali Yue ying Lei Langfa(246)
Rockburst Features of Tai-Ping-Yi Tunnel and the Related Tunnelling Measures	
..... Hong Kairoug Zhou Depei(251)	
Arrangement of the Shockproof Sewing in Shallow Seam Tunnels of the Railway	
..... Lu Helin Zhang Zhen(257)	
Mechanical Characteristics and Acoustic Wave Test of Concrete Stone Blocks	
..... Ruan Fu(264)	
Study on Principles of the Fulcrum Protection of the Anchor Spraying Net, the flexible Spraying layer of Flexible Anchorpole in the Soft Shale Alleyway	
..... Tian Yongshan Guan Yushun(274)	
After editon	(282)

岩土材料动力特性及其参数确定

周德培 屠树根

(西南交通大学岩土所)

【提 要】本文首先从理论上给出了粘弹性材料的动力本构关系。然后根据 8 种岩土材料的动力试验结果,讨论了它们的动力特性。在压-压型动态加载下应力-应变滞回曲线会随荷载循环次数的增加而向右移动。滞回曲线面积与循环次数和动荷载大小都有关。最后给出了动力参数的确定方法。

【关键词】粘弹性 动荷载 滞回曲线

一、前 言

近年来,随着经济建设的发展和能源的开发利用,岩土工程中遇到了不少动力学方面的问题,例如在地震荷载、振动荷载等动力作用下,地下结构、岩土边坡等工程结构的稳定性分析,安全评估等。解决这些问题的重要一环,应了解岩土材料的动力本构关系及正确测定其动力参数。本文首先从理论上给出了粘弹性体在动荷载作用下的应力-应变关系,及一些参数的表达式,然后分析了 8 种岩土材料在动荷载作用下得出的试验结果,并将这些试验结果和理论结果作了比较,得出了一些有益的结论。

二、粘弹性体的动力本构关系

1. 在谐振荷载下粘弹性体的应力-应变关系。

许多动荷载如往返作用的振动荷载、地震荷载等,都可分解成不同频率和振幅的谐振荷载。因此研究材料在谐振荷载下的动力响应可为深入了解材料在复杂动荷载下的特性奠定基础。谐振荷载的波形一般是正弦波或余弦波。假设加在材料上的谐振荷载是谐振应力,即

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad (1)$$

如果材料是线性粘弹性体,其本构关系如下

$$P(D)\sigma = Q(D)\epsilon \quad (2)$$

为了得出在式(1)条件下粘弹性体的应变反应,将式(1)写出复函数形式,即

$$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得:

$$Q(D)\epsilon^* = \sigma_0 P(i\omega)e^{i\omega t} \quad (4)$$

方程(4)的齐次解和特解分别反映了材料的衰减和稳态振动性质。衰减在短期即结束,在此仅考虑稳态振动。方程(4)的特解为

$$\epsilon^* = \frac{P(i\omega)}{Q(i\omega)} \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

其中 $P(i\omega)/Q(i\omega) = J^*$ 是材料的复蠕变柔度, $J^* = |J^*| e^{-i\delta}$, δ 是应力与应变的相位差。在式(1)的谐振应力下, 材料的应变反应就是式(5)的虚部, 即

$$\epsilon = \sigma_0 |J^*| \sin(\omega t - \delta) \quad (6)$$

令 $\epsilon_0 = \sigma_0 |J^*|$ 。由式(1)和式(6)可得出

$$\frac{\epsilon^2}{\epsilon_0^2} + \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} - \frac{2\cos\delta}{\sigma_0\epsilon_0} \sigma\epsilon - \sin^2\delta = 0 \quad (7)$$

式(7)就是谐振荷载下, 粘弹性体的应力-应变关系。假设加在粘弹性体上的谐振荷载是谐振应变 $\epsilon = \epsilon_0 \sin\omega t$, 也可得到式(7)。该式在 $O\epsilon\sigma$ 坐标系内是一个椭圆。若将此坐标作旋转变换, 可在 $O\bar{\epsilon}\bar{\sigma}$ 坐标中得出其标准方程, 即

$$\frac{\bar{\epsilon}^2}{a^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{b^2} = 1 \quad (8)$$

这里 $a = \sin\delta / \sqrt{A}$, $b = \sin\delta / \sqrt{C}$, A, C 的值如下:

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\epsilon_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon_0^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}\right)^2 + \frac{4\cos^2\delta}{\sigma_0^2\epsilon_0^2}} \right]$$

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\epsilon_0^2} + \frac{1}{\sigma_0^2} - \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon_0^2} - \frac{1}{\sigma_0^2}\right)^2 + \frac{4\cos^2\delta}{\sigma_0^2\epsilon_0^2}} \right]$$

图1给出了这种应力-应变关系的曲线。椭圆的面积表示了在一周往返荷载作用下, 材料的耗能。椭圆面积 $A = \pi ab$, 将式(8)的 a 和 b 的值代入经演算可得:

$$A = \pi \sigma_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \sin\delta \quad (9)$$

因 $J^* = J_r - iJ_i$, $J_i = |J^*| \sin\delta$, 式(9)又可写为:

$$A = \pi \sigma_0^2 J_i \quad (10)$$

若用 E^* 表示材料的复模数, $E^* = E_r + iE_i$ 则式(9)又可用下式表达:

$$A = \pi \epsilon_0^2 E_i \quad (11)$$

相位差 δ 可由 $\tan\delta = E_i/E_r = J_i/J_r$ 求出。

2. 压-压型动荷载下粘弹性体的应力-应变。

压-压型动荷载如式(12)所示, 其波形如图2所示。图中 P_0 是平均应力, $P_0 + \sigma_0$ 和 $P_0 - \sigma_0$ 是动荷载的上下限。在 $0 \leq t \leq t_1$ 内, 材料内引起的应变 ϵ_1 为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= vt & 0 \leq t \leq t_1 \\ \sigma &= P_0 + \sigma_0 \sin\omega t & t \geq t_1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\epsilon_1 = v \int_0^{t_1} J(t - \xi) d\xi \quad (13)$$

这里 $v = P_0/t_1$, $J(t)$ 是材料的蠕变柔度。在 $t \geq t_1$ 内, 材料内产生的应变是 ϵ_2 和 ϵ_3 , ϵ_3 和共振应力有关, 由式(6)确定。 ϵ_2 是 P_0 产生的应变, 按下式计算:

$$\epsilon_2 = v \int_0^{t_1} J(t - \xi) d\xi - v \int_{t_1}^t J(t - \xi) d\xi \quad (14)$$

因此在图2的荷载作用下应力-应变曲线如图3所示。由此图可知, 在每一次往返应力作用下,

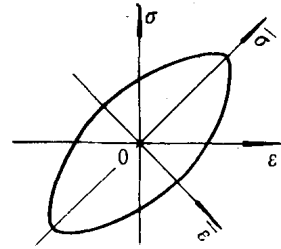


图1 粘弹性体动力应力-应变曲线

粘弹性体的应力-应变曲线为椭圆,各次往返应力下的椭圆都不重合,且随循环次数的增加逐渐向右移动。移动的量主要由 P_0 荷载持续时间决定。因由式(14)可知,持续时间越长, ε_2 值越大,则椭圆向右移动量也越大。这种移动方式为椭圆中心在 P_0 线上向右平移。

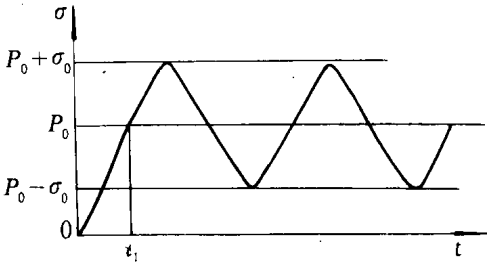


图 2 压-压型加载曲线

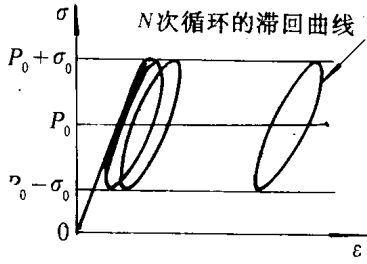


图 3 应力-应变曲线

三、 几种岩石材料的试验结果分析

1. 试验简述。

用石灰岩、花岗岩、棕色砂岩、灰色砂岩、青砂岩、黄砂岩及红砂岩等 6 种岩石,制成 $\Phi 50 \times 100$ (mm)的正圆柱体试件,在 MTS 电液伺服控制的试验机上进行了压-压型动力加载的单向压缩试验。频率是 0.4Hz。每个试件上加的平均应力 P_0 和振幅 σ_0 都不相同。每次试验约进行 100 次循环。表 1 给出了每种岩石的容重 r 及单轴抗压强度值 σ_c 。在 MTS 试验机上安装好试件及引伸计后,通过计算机输入加载指标及其他参数,待全部准备工作就绪完毕,按下测试键,整个系统则按照预定程序进行试验。

表 1 测试岩石的 r 和 σ_c

岩石 指 标	黄砂岩	红砂岩	青砂岩	灰色砂岩	棕色砂岩	花岗岩	石灰岩
σ_c ,MPa	14	27	67	76	110	126	202
r ,kN/m ³	21.8	23.2	25.7	25.2	26.7	26.0	26.6

2. 试验结果分析。

每种岩石测得的应力-应变曲线汇总后绘在图 4 中。图中给出了一定循环次数后的滞回曲线。对于石灰岩,循环荷载上下限即 $P_0 + \sigma_0 = 48\text{MPa}$, $P_0 - \sigma_0 = 10\text{MPa}$,测得的每次循环的滞回曲线的面积很小,近似为一直线,故未给出测试曲线。每次循环荷载下的应力-应变曲线都形成封闭的滞回曲线。可以近似地把它视为椭圆。特别是在低循环荷载下测得的滞回曲线的形状与椭圆形状更接近,如图 4E 所示。和图 3 的理论曲线一样,各次循环荷载下的滞回曲线也不重合,也随循环次数的增加而向右移动,但移动量很小。主要原因在于平均荷载 P_0 持续时间很短(约 1 小时)。另外 P_0/σ_c 的值和动荷载幅值 σ_0 的大小也影响这种移动量。例如在图 4A、B、D 中, $P_0/\sigma_c \approx 30\%$,这时滞回曲线向右移动较明显。而在图 4C 和 F 中, $P_0/\sigma_c \approx 12\%$,这种移动就不明显。试验曲线和理论曲线也有差别。在图 3 的理论曲线中,椭圆面积与循环次数无关,而且椭圆向右移动是平移,不会旋转。但对于试验曲线,滞回曲线的面积与循环次数有

关。初步看出的趋势为：循环次数增加滞回曲线面积减小。这说明在多次循环以后，岩石材料的粘滞性会发生变化，使耗能降低。在图 4A、B、D 中， P_0/σ_0 较大，此时高循环次数后得到的滞回曲线相对于低循环次数的滞回曲线有不同程度的偏转。说明了滞回曲线在向右移动时，不仅仅是平移，还有不同程度的转动。

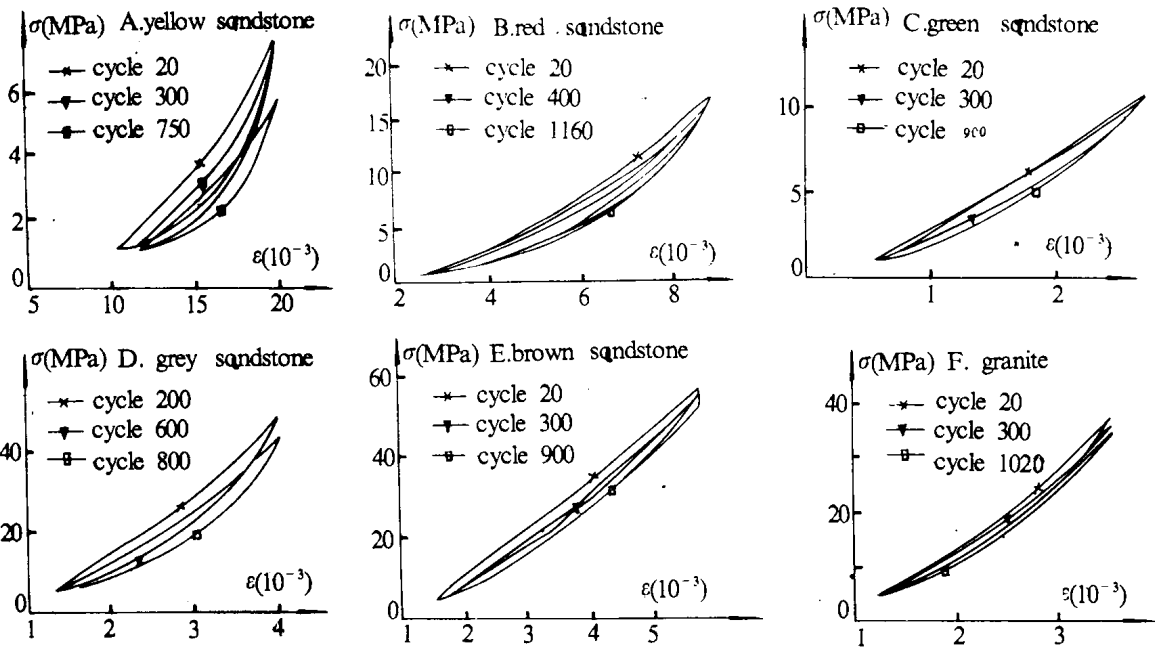


图 4 几种岩石的动态应力-应变曲线

表 2 不同循环荷载和循环次数下岩石滞回曲线面积

棕色砂岩					灰色砂岩			
$\frac{P_0 + \sigma_0}{P_0 - \sigma_0}$	$\frac{25}{5}$	$\frac{32}{4}$	$\frac{60}{6}$	$\frac{70}{6}$	$\frac{4.2}{1}$	$\frac{12}{0}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{22}{0}$
N	20	20	20	20	20	100	20	50
A	0.140	0.372	1.180	1.700	0.018	0.321	0.562	0.678
N	400	400	300	200	400	800	200	400
A	0.112	0.301	0.945	1.367	0.015	0.247	0.472	0.646
青砂岩				黄砂岩		红砂岩		
$\frac{P_0 + \sigma_0}{P_0 - \sigma_0}$	$\frac{10}{0}$	$\frac{18}{0}$	$\frac{42}{0}$		$\frac{5}{0}$	$\frac{6.4}{0}$	$\frac{17}{0}$	
N	20	20	20		50	20	20	
A	0.181	0.545	1.609		0.599	0.909	0.830	
N	300	100	300		400	300	400	
A	0.158	0.520	1.521		0.498	0.687	0.715	

注： $\frac{P_0 + \sigma_0}{P_0 - \sigma_0}$ 是循环荷载的上下限，单位 MPa，N 是循环次数；A 是第 N 次循环的滞回曲线面积，单位： $10\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}^3$

表 2 给出了 5 种砂岩的滞回曲线的面积与循环次数和荷载的关系。花岗岩和石灰岩的滞

回曲线面积很小,表 2 中没有列出这些值。表 2 的数字清楚地表明,同种岩石,当荷载相同时,循环次数增加,滞回曲线的面积则减小。例如棕色砂岩循环荷载的上下限为 25MPa 和 5MPa 时,第 20 次循环的滞回曲线面积为 0.140,而第 400 次循环的滞回曲线面积则降到 0.112。另外,如果循环次数相同,荷载增加,滞回曲线的面积也增加。例如棕色砂岩循环荷载下限约为 6MPa,上限 25、32、60、70MPa 时,第 20 次循环的滞回曲线面积则相应为 0.14、0.372、1.18、1.7,增加的幅度较大。

3. 一种砂粘土的动力试验结果。

该土样取自一隧道工地,是 Q_1 下更新统砂粘土。平均容重为 20.5kN/m^3 ,含水量 16.9%。单轴无侧限抗压强度为 700kPa。在 DTC—306 型动三轴仪上,用此土样作了不同围压下的动力试验,加载曲线如图 2 所示。按常规土动三轴试验方法加围压。动力荷载的频率为 5Hz。试验测得的应力-应变曲线如图 5 所示。试验中荷载循环次数为 10 000 次左右。由这些图可看出这种土样在动力荷载下有如下一些特点:单轴压缩时,循环约 10 000 次后土样的变形为 0.85%,而在有围压作用下,循环 10 000 次后土样的变形已超过 2%。这说明在动荷载下三轴压缩的变形和静荷载下一样,都比单轴压缩的变形大。在图 5 的 B、C、D 图中,动力荷载的幅值近似相等,因而滞回曲线的面积也近似相同。这似乎说明滞回曲线的面积与围压无关。这种砂粘土在三轴动力加载下得出的应力-应变曲线,和图 3 粘弹性体的应力-应变曲线在形状上很相似,每次循环下的滞回曲线形状很接近于椭圆。因此可以用粘弹性体的应力-应变关系即式 (7) 来描述其动力性质。单轴压缩得出的滞回曲线的面积比三轴压缩的小得多。分析图 5 的曲线还可看出,如果仅考虑材料经历 10 000 次荷载循环所产生的变形,那么可以发现前 200 次循环所产生的变形约占总变形的 68%。这说明土样在经历一定次数的反复加压后,内部孔隙被压密,内部结构经自身调整后以承受外加荷载,因而其变形会逐渐趋于稳定值。如果此时荷载再继续循环,试件的变形不会明显增加。但是如果循环荷载超过一定值后,荷载的继续循环会使土样发生破坏。

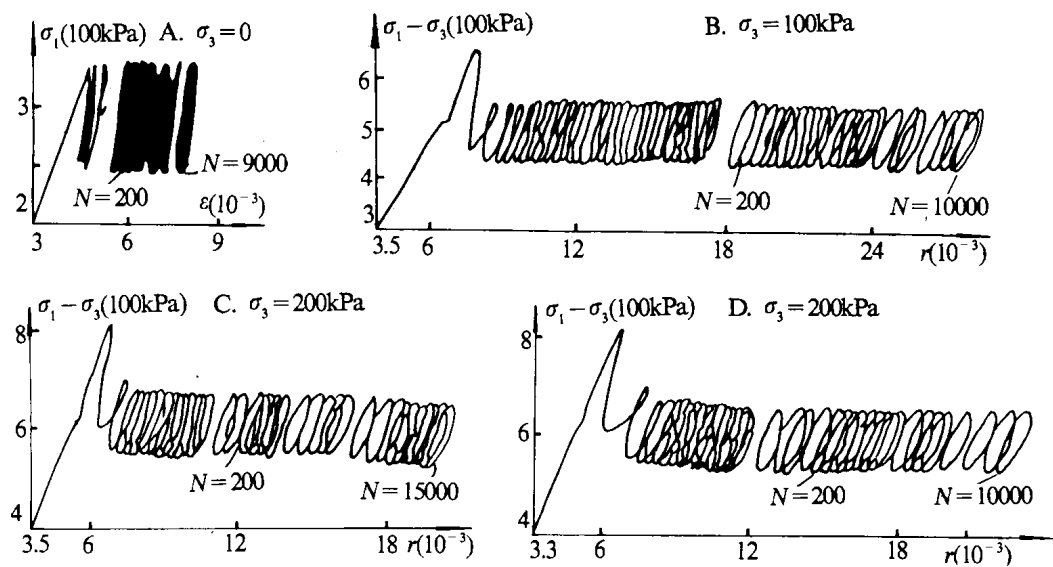


图 5 一种砂粘土的动态应力-应变曲线
 σ_3 是围压, N 是荷载循环次数

四、 动力参数的确定

根据粘弹性理论,如果确定了材料的复蠕变柔度 J^* ,那么在谐振应力式(1)作用下,应变振幅 ϵ_0 及相位差 δ 都可确定下来。相应地也就确定了式(7)中的各参数值。现以砂粘土的试验结果为例予以说明。在图 5B 中, $N=100\,000$ 时的椭圆面积为 $82.15\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 。振幅 $\epsilon_0=3.66\times 10^{-3}$,应力幅值 $\sigma_0=0.07\text{MPa}$,因而 $|J^*|=0.053\text{MPa}^{-1}$ 。由公式(9)可得 $\sin\delta=0.104$, $\delta=5^\circ58'10''$ 。由式(10)可得出 $J_i=0.00534\text{MPa}^{-1}$, $J_r=|J^*|\cos\delta=0.0523\text{MPa}^{-1}$,因而复蠕变柔度 J^* 为:

$$J^*=0.0523-0.00534i \tag{15}$$

下面根据静力试验得出的蠕变柔度 $J(t)$ 确定 J_r^* ,并将它和式(15)的结果作比较。首先对比分析砂粘土的静力和动力蠕变曲线。图6是砂粘土的静力蠕变试验得出的曲线,图7是根据图 5A 的试验结果得出的动力蠕变曲线,都是单轴应力状态下的试验结果。图7中平均应力 $P_0=300\text{kPa}$,和图6的应力值相同。在此二图中蠕变变形随时间变化的曲线具有较为相同的形式。最明显的差别是图7中2000秒后的平均应变值已超过了0.007,而在图6中34天的蠕变变形尚未超过0.006。这表明应力值虽相同,但动力荷载使试件变形迅速增大。由图6得出的 $J(t)$ 为

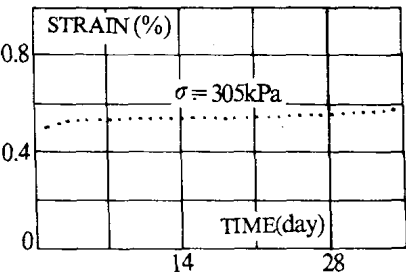


图6 单轴压缩下砂粘土的蠕变曲线

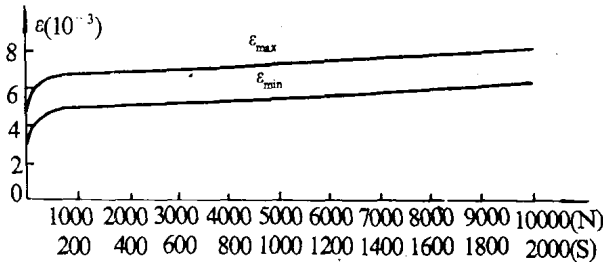


图7 单轴压缩下砂粘土的动力蠕变曲线

$$J(t)=1.915\times 10^{-6}-3.192\times 10^{-7}e^{-0.0386t} \tag{16}$$

上式中 $J(t)$ 的单位为 $\%/Pa$, t 为天。对于线性粘弹性体, $J(t)$ 和 J_r^* 有下列关系

$$J_r^*=i\omega\int_0^\infty J(t)e^{-i\omega t}dt \tag{17}$$

在砂粘土的试验中频率为5Hz,因而 $\omega=10\pi/\text{秒}$ 。由此得出

$$J_r^*=0.01951-0.00301i \tag{18}$$

式(18)是由静力蠕变试验得出的复柔度,其模明显小于式(15)的值。其原因有二:其一,如上所述在相同应力条件下,动荷载使试件产生较大变形;其二,因式(15)是低围压下的试验结果。尽管式(18)和式(15)在数值上相差较大,但它给了我们一种有益的启示,即可用材料的静力蠕变试验结果确定其动力参数,反之亦然。由于材料的非线性流变性,要找出二者间的相互关系,还需作进一步研究。

五、 结 论

根据本文的理论分析和试验研究结果,对于岩土材料的动力响应,可得出如下几点初步的