

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0085-05

岩土材料疲劳损伤过程的数值跟踪分析

樊秀峰, 简文彬

(福州大学 环境与资源学院, 福州 350108)

摘要: 以岩土材料的疲劳损伤试验为基础, 基于神经网络的系统分析方法和信号处理技术, 对疲劳损伤过程进行在线监测, 建立了损伤过程的数学模型, 并提取了损伤参数。试验结果表明: 在循环荷载的作用下, 基于系统分析方法所定义的损伤参数对水泥土样与岩样的损伤发展状态十分敏感, 能够有效地跟踪损伤的不同发展阶段。整个损伤过程被分为3个阶段, 即疲劳裂纹萌生阶段、疲劳裂纹扩展阶段及疲劳裂纹高速扩展阶段。损伤参数跟踪显示, 对于水泥掺入比与龄期均相同的水泥土试样, 其疲劳寿命也会表现出较大的离散性; 对组分存在差异的砂岩而言, 即使疲劳寿命相同, 所经历的损伤过程也不完全相同。

关键词: 岩土材料; 疲劳损伤; 系统分析; 损伤监测

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Numerical analysis of damage process of rock-soil under fatigue loading

FAN Xiu-feng, JIAN Wen-bin

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Based on the fatigue damage tests of rock-soil materials, a new mathematic model of the fatigue damage of rock-soil material is proposed by using system analysis method and signal process technique and the parameter of fatigue damage is defined by means of bulk tests. The results show that damage parameter defined is susceptible and can trace effectively damage process of the samples. The damage process is divided into crack pullulating, crack expanding and crack high-speed expanding stage. Moreover, the relation curve between damage parameter and cycle times shows that the fatigue age of cement samples which has the same adding cement ratio and age is different. The damage process of the sandstones which have different components is not completely similar, even though their fatigue age is the same.

Key words: rock-soil material; fatigue damage; system analysis; damage monitoring

1 引言

近年来, 众多学者利用声发射技术、电镜扫描技术以及X射线CT扫描技术等手段对岩土材料的疲劳损伤特性从细、微观上进行了大量的研究, 形成了基于不同方法的疲劳损伤微观机制理论, 并选择了各种损伤变量来描述材料微观疲劳损伤与宏观变形之间的关系, 建立了相关模型及临界准则, 取得了较为丰硕的成果^[1-3]。然而疲劳过程是一种相当复杂的过程, 通过各种手段测得的数据需经过一系列的分析与处理才能够得到一个初步的变化规律, 无法对瞬时损伤进行实时监测。同时, 许多工

程实际中的疲劳断裂问题, 往往也需要更加有效的、可行的宏观分析和测量手段进行数值度量。

现代信号处理及系统分析技术的发展, 为损伤的实时监测提供了可能。该技术能够对各种动态信号进行多尺度分析, 实现实时、频域高分辨率的局部定位, 因此, 也使其拥有数学显微镜的美誉^[4]。

利用系统分析的方法在线跟踪损伤过程, 有些学者把它成功地应用于金属材料的疲劳损伤监测^[5, 6], 但在岩土工程领域的应用却很鲜见, 本文尝试在岩石与水泥土的疲劳测试中应用系统分析技术对岩土疲劳损伤过程中的微弱动态信号进行提取和分析, 将岩土材料的动态应力、应变等宏观信号的

收稿日期: 2007-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40672176) 资助; 福建省自然科学基金项目 (No. D0510009) 资助; 福州大学科技发展基金项目资助 (No. 2006-XY-11)。

作者简介: 樊秀峰, 女, 1975年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程与工程地质专业的教学与科研工作。E-mail: fdfxf@126.com

细微变化与相应材料组织的微观演化相结合进行模拟, 提取出材料的损伤参数, 实时监测损伤过程, 为疲劳损伤的宏观分析和量测提供直观、有效、快捷的数值度量 and 描述。

2 试验原理及方法

本试验中研究系统为进行循环加载疲劳受力的试样, 用 INSTRON1324 的信号发生器产生正弦动态信号, 由电液伺服系统将该动态信号转化成载荷循环加载于试样上, 这种动态载荷就是对系统的激励。试样因受力而发生变形 (即系统的响应), 响应的动态变形信号可由 INSTRON1324 试验机的位移传感器输出。随着试样疲劳损伤的产生和发展, 试验表明试样在相同的循环载荷作用下将产生不断变化的宏观动态响应, 动态变形信号包含了材料的疲劳损伤信息, 表现在由系统建立起来的数学方程 (传递函数) 中的某些参数跟随着发生相应的变化。建立材料的响应方程 (传递函数), 并提取敏感的系统变化参数, 跟踪试样疲劳损伤破坏的整个过程 (如图 1 所示)。

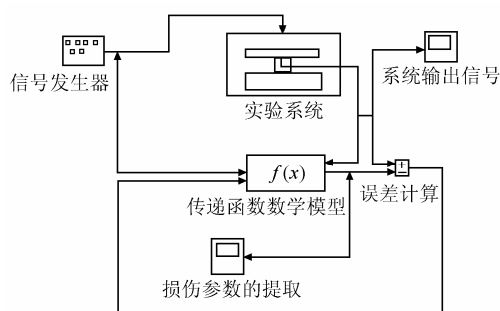


图 1 传递函数建模技术线路图

Fig.1 Schematic diagram of mathematical model set-up

在循环载荷作用下, 人们对材料的动态受力与动态变形之间的关系进行了大量的研究, 在这些研

究中所建立的数学模型比较成功的有 Dobson 模型^[7], 本工作在其基础上, 经大量试验选择由微分方程组构建传递函数如下:

$$\ddot{u} + 2\omega\dot{u} + \alpha\omega^2u + (1-\alpha)\omega^2z = f(t) \quad (1)$$

$$\dot{z} = A\dot{u} - \beta|\dot{u}||z|z - \gamma\dot{u}|z|^2 \quad (2)$$

非线性方程组 (1) 和 (2) 基本能反映材料在循环过程中的常见特征。这里 u 为试样受力点的位移; z 为方程组内部变量 (或中间变量), ω 为系统的固有频率; $f(t)$ 为外作用力; γ , σ , β 为材料指数 (相同材料基本保持不变)。

其中数学方程中特征参数 A 及参数 γ , σ , β 的确定由 3 层前向神经网络 BP 算法获得。理论上, BP 网络具有功能强大的函数逼近功能, 特别是对于高度非线性函数。计算结果表明 γ , σ , β 的数值, 在每千周采集的动态数据中所进行的计算结果变化不大, 而特征损伤参数 A 在疲劳循环损伤过程中则发生显著变化。通过大量的宏观和微观试验观察, 发现 A 对疲劳损伤过程反应敏感, 在此将无量纲参数 A 定义为岩土材料的损伤参数。试验中实时跟踪参数 A , 将循环过程的损伤参数计算结果对其循环初始值进行归一化处理, 并实时绘制计算结果。

3 岩土试样及试验参数

3.1 水泥土试样的制备

试验所用软土是福州盆地的淤泥, 其物理力学性质指标如表 1 所示。

试验所用水泥为 P.O32.5 普通硅酸盐水泥。水泥掺入比为 15%, 水灰比 $C=0.5$ 。按拟定的试验配方称量后放入搅拌锅内, 用搅拌铲人工拌和均匀, 装入试模, 分层击实。采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的规格制模, 制备大量样本, 选取其中两组: AY 组样养护龄期为 120 d, BY 组样则为 60 d。

表 1 原状土的主要物理力学性质指标
Table 1 Physico mechanical parameters of soil

土样 编号	天然含水率 $w_0/\%$	天然重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	天然孔隙比 e_0	液限 $W_L/\%$	液性指数 I_L	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 $\psi/^\circ$	压缩系数 a/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa
AY	64.3	15.8	1.662	46.8	1.94	9.5	3.6	1.52	1.35
CY	62.3	16.0	1.627	40.9	2.27	9.6	11.7	1.53	1.72

3.2 岩样的制备

试验所用的岩样为红色砂岩, 岩样为钻孔取样, 加工成国际标准圆柱形试件 ($r=50\text{ mm}$, $H=100\text{ mm}$), 选取其中 3 个较为典型样本, YY-1, YY-2 样为均匀性较好的细砂岩, 呈细粒结构, 较为密实;

YY-3 样含有少量砾石, 均匀性稍差。砂岩主要成分为石英、长石、方解石、高岭石。

3.3 试验参数

试验采用载荷控制进行加载, 其波形为正弦波。试验过程中所加的应力幅值的最大值为无侧

限抗压强度试验中所能承受的最大荷载的 70 %~80 %, 最小载荷为 1 kN。加载频率为 5 Hz, 采样频率为 50 Hz。

4 在线跟踪测量与分析

试验中以水泥土及岩石的受力和变形等数据建立数学模型, 为保证数学模型与实际误差最小, 采取在计算过程中不断用实测数据对数学模型进行修正, 将水泥土及岩石样本的微观损伤状态与数学方程中的参数相联系, 并提取数学模型中能够反映岩土材料疲劳损伤的损伤参数。

4.1 水泥土的在线跟踪测量与分析

根据反复的试验^[8], 得到典型的水泥土疲劳损伤参数与循环周数的关系曲线。随着循环周数(次数)的增加, 损伤参数 A 值出现明显的3个阶段(如图2所示)。在疲劳的第1阶段(AB), 水泥土试样得到不断的强化, 损伤参数在循环的初期快速下降; 第2阶段(BC), 微裂纹不断萌生及扩展, A 值表现为整体缓慢平稳上升, 该阶段约占总疲劳寿命的2/3多, 与第1阶段之间有明显的拐点; 在第3阶段(CD), 疲劳裂纹进入高速扩展期, A 值由缓慢上升转变为急速上升, 对应了材料塑性耗竭的过程, 试样瞬间破坏。此损伤参数所反映出的三阶段特征与文献^[9]中水泥土疲劳试验中应变及变形速率的三阶段特征很好的吻合。

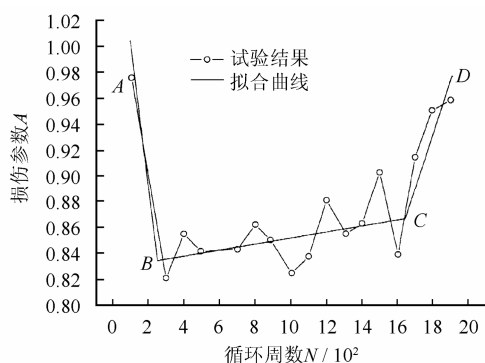
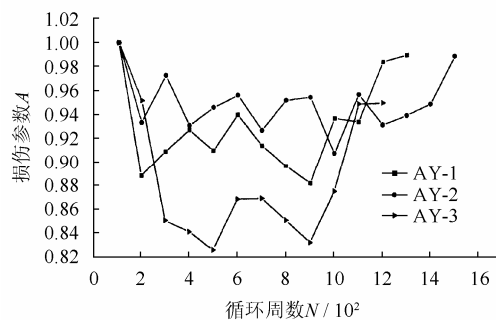


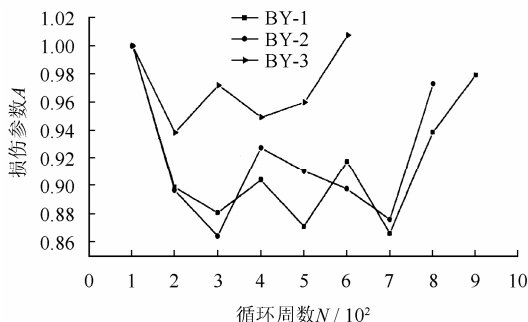
图2 典型水泥土样疲劳过程 A 值变化曲线

Fig.2 Characteristic parameter value (A) test results of the typical cement sample during fatigue process

图3(a)、图3(b)分别是对AY及BY两组水泥土试样进行实时的在线跟踪疲劳损伤试验所得结果。为了进行对比, 两组试样的荷载变化范围均为1.0~6.5 kN, 两组变化曲线均表现出了明显的三阶段变化特征, 每条曲线第1阶段与第2阶段之间均有明显的拐点, 也就是说, 在水泥土样的在线跟踪中损伤参数从裂纹的强化积累到萌生扩展反应敏感, 曲线由快



(a) AY 试样



(b) BY 试样

图3 水泥土样疲劳过程中损伤参数 A 值变化曲线图
Fig.3 Characteristic parameter value (A) test curve of cement samples under circle loading

速下降转为缓慢平稳的向前发展。从能量的角度来说, 从裂纹产生, 进而不断的扩展过程就是不断吸收能量的过程, 塑性变形随循环次数由大到小演变的过程, 到第2阶段末, 伴随着曲线的陡然上升, 材料的塑性耗竭, 试样瞬间破坏。图3(a)、图3(b)的曲线变化还显示出循环加载到2 000周左右时, 两组水泥土试样中裂纹开始萌生并扩展, 但是进入第2阶段持续稳定的抵抗循环荷载的时间却不一样, 也就是疲劳的主裂纹形成后, 裂纹的扩展寿命(第2阶段)是不同的, AY样的寿命在9 000~12 000周变化, BY样的寿命在5 000~7 000周变化, 两组样的水泥掺入比均为15 %, 但是AY样的龄期为120 d, BY样的龄期为60 d。也就是说, 相同荷载下龄期越长, 水泥土的疲劳寿命越大。但在水泥掺入比与龄期都相同的同一组样内(A Y-1、AY-2、AY-3或BY-1、BY-2、BY-3), 疲劳寿命的离散性却很大。分析其原因, 水泥土材料不象均质的金属材料, 它是由多种力学性质各不相同的组分组成的多相复合材料, 强度离散性较大, 并且由于吸水作用、干燥收缩、水化热以及成型工艺、养护条件等原因, 内部存在很多微小裂纹和微观缺陷, 这进一步增大了强度的离散性, 给疲劳荷载的上下限的确定带来一定的难度。对某些静载强度偏高的试样而言, 实际疲劳应力水平偏低, 使试样疲劳寿命比预期寿命大大增加;

而对于静强度偏低的试样, 实际应力水平偏高, 试样只要几周疲劳循环就破坏了。因此, 使水泥土样的疲劳寿命值出现较大的离散性。

4.2 岩石的在线跟踪测量与分析

研究中对3个砂岩样进行了实时在线疲劳损伤试验, 其中YY-2与YY-3样施加荷载范围为1.0~30.5 kN, YY-1施加荷载范围为1.0~23.9 kN。疲劳过程中对每个样的损伤参数 A 值进行了监测, 并实时绘制图形如图4(a)、图4(b)所示, 在3个岩样疲劳损伤的全过程中, 损伤参数 A 值仍然表现出了较为明显的三阶段特征, 即试样疲劳裂纹的萌生阶段、疲劳裂纹的扩展阶段及疲劳裂纹高速扩展阶段。这与文献[10]中关于岩石疲劳变形特性试验研究中所得出结论是一致的。与水泥土试样曲线所不同的是各阶段之间的拐点没有那么明显。分析其原因, 岩石试样比水泥土试样更不均匀, 具有更复杂的内部结构, 工程岩体本身已经是一种含初始损伤(缺陷)的裂隙介质, 在初始地应力和工程开挖应力场作用下, 众多随机裂纹不断积累、扩展, 并进一步演化, 因此, 内部已有裂纹的岩样在新的裂纹萌生时, 损伤参数 A 值已不是很敏感, 而是呈缓变形式。图4(a)中的2个岩样曲线显示, 2个岩样虽然都是在2 000周

左右破坏, 但是其经历的疲劳损伤过程却是不同的, YY-3样的第2阶段即疲劳裂纹的扩展阶段较短, 便很快进入高速扩展阶段, 由于此样为含砾砂岩, 结构比较松散, 裂纹一产生便很快扩展, 直至破坏; YY-2样较为均匀, 细砂间的凝聚力较强, 结构较为紧密, 抵抗裂纹的进一步扩展, 延长了疲劳裂纹的扩展时间, 但是一旦进入了高速扩展期便很快就破坏。图4(b)中的YY-1样是在较低荷载循环下进行的疲劳试验, 与图4(a)相比, 疲劳寿命明显增长, 并且主要是第2阶段疲劳裂纹扩展寿命增长缘故。

5 结 论

通过对水泥土样及岩样的疲劳损伤循环载荷试验的在线监测及其结果分析, 可得到如下结论:

(1) 在循环荷载作用下, 水泥土样及岩样的损伤参数 A 值均表现出了明显的3阶段特征, 即疲劳裂纹的萌生阶段、疲劳裂纹的扩展阶段及疲劳裂纹高速扩展阶段, 其中水泥土样由于质地相对较均匀, A 值更为敏感, 曲线的拐点更加明显。

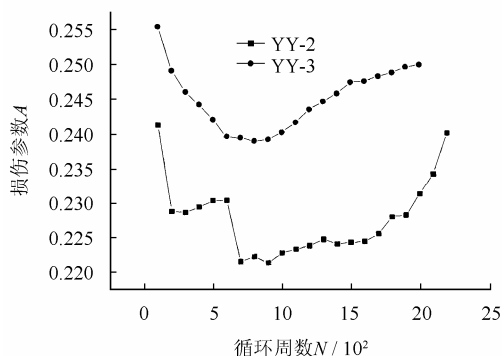
(2) 水泥土样由于受到成型工艺、养护条件等人为因素的影响, 疲劳寿命的离散性较大, 在试验及实际施工中应尽可能地减小各种因素的负面影响; 但岩样由于在天然条件下已经成为含初始损伤(缺陷)的裂隙介质, 内部结构及组分的个体差异性也很大, 即使在相同疲劳寿命的条件下所经历的损伤过程也可能完全不一样。

(3) 疲劳损伤是一个复杂的过程, 用神经网络系统分析的方法监测水泥土样及岩样在无侧限轴向压缩疲劳损伤的试验结果表明, 微分方程所建立的数学模型和相应的算法, 所得到的 A 值在疲劳过程中反映的材料损伤情况与其相对应的疲劳试验结果是一致的, 是相辅相成的, 说明该数学模型能够描述水泥土及岩石的瞬时损伤行为, 能够灵敏地跟踪试样疲劳损伤的各个过程, 为疲劳损伤过程的试验分析提供了一种可供选择的新的思路, 可为各种因素对疲劳损伤影响的试验研究提供帮助。

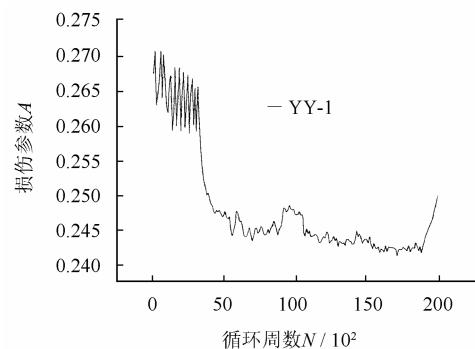
(4) 本文是对基于系统方法的疲劳损伤在线监测用于岩土材料的一个初步尝试, 该方法的进一步完善将为岩土在各种条件下疲劳损伤过程、疲劳瞬时损伤的深入研究及宏、微观研究成果的联系提供一种新的手段。

参 考 文 献

- [1] 葛修润. 岩石损伤演化规律的CT实时试验和周期荷载作用下的岩石疲劳破坏研究[A]. 21世纪的岩土力学与



(a) 荷载为 1.0~30.5 kN



(b) 荷载为 1.0~23.9 kN

图4 砂岩样疲劳过程中损伤参数 A 值变化曲线图
Fig.4 Characteristic parameter value A test curve of sandstone samples under circle loading