



高速铁路隧道基底软岩动力累积损伤特性

王祥秋¹, 蔡斌², Jiang Ruinian³

(1. 佛山科学技术学院 环境与土木建筑学院, 广东 佛山 528000; 2. 广东工业大学 土木交通学院, 广州 510006; 3. New Mexico State University, American)

摘要:利用相似材料模拟高速铁路隧道基底软岩,采用荷载控制和非对称正弦波循环加载方式对软岩试件进行动三轴疲劳与损伤检测综合试验。通过试验结果分析,建立了软岩 3 参数多项式疲劳寿命计算模型和 4 参数多项式累积损伤参量计算模型,获得了软岩疲劳损伤特性,即:软岩疲劳破坏表现为端部拉-剪复合破坏和中部压-剪复合破坏两种模式;疲劳破坏全过程表现为初始微孔隙压密、裂纹发生与稳定扩展以及损伤裂纹加速发展 3 个发展阶段;软岩疲劳寿命主要取决于本身强度和动应力水平,强度愈高、动力应力水平愈低,其疲劳寿命就愈长;当动应力水平相同时,软岩疲劳寿命与其弹性模量呈线性增长关系。

关键词:高速铁路隧道;基底软岩;疲劳寿命;累积损伤

中图分类号:TU411.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)05-0026-07

Characteristics of dynamic and accumulative damage of soft rock-mass for the basement of high speed railway's tunnel

Wang Xiangqiu¹, Cai Bin², Jiang Ruinian³

(1. Department of Environment & Civil Engineering, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, P. R. China
2. Faculty of Civil Engineering of Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China
3. New Mexico University of State, American)

Abstract: The similar materials is used to simulate the soft rock-mass on the basement of tunnel in the high speed railway. Based on the method of loading control and the cyclic loadings of non-symmetrical sine wave, the dynamic fatigue test of three axial and the damage detection test are carried on for soft rock-mass specimens. With analysis of the results of tests, the polynomial model with three parameters to calculate the fatigue life and the polynomial model with four parameters to calculate the cumulative damage are established for soft rock-masses. And then, some characteristics of fatigue damage has been obtained about the soft rock-mass, such as the fatigue failure of soft rock-mass mainly shows two composite modes those are the tension-shear on the end and the compression-shear on the central of specimen. The whole process

收稿日期:2014-11-18

基金项目:国家自然科学基金(51278121);广东省教育厅重大特色创新资助项目(2014KTSCX155)

作者简介:王祥秋(1968-),男,博士,教授,主要从事岩土与地下结构工程研究,(E-mail)tongji_wxq@163.com。

Received:2014-11-18

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278121); The Major Project Program of the Department of education of Guangdong Province(2014KTSCX155)

Author brief: Wang Xiangqiu(1968-), PhD, professor, main research interests: geotechnical and underground engineering, (E-mail)tongji_wxq@163.com.

of fatigue damage is shown three stages those are the compaction of initial micro-pore, the occurrence and stable propagation of new cracks, and the accelerating development of crack damage. The fatigue life of soft rock-mass mainly depends on itself strength and the level of dynamic stress. The higher strength of itself and the lower level of dynamic stress, the longer fatigue life of rock-mass will be. If the level of dynamic stress has not been changed, the fatigue life of soft rock-mass will be increased linearly with its elastic model.

Key words: tunnel of high speed railway; soft rock-mass on the basement; fatigue life; cumulative damage.

中国铁路运营经验表明,在列车振动荷载的长期作用下,软岩隧道底部结构常因底部软岩动力损伤而受到破坏,导致隧道底部结构因脱空现象而产生超过允许值的大变形甚至破坏,给铁路运营造成了重大的安全隐患。为此,学者们针对普通铁路隧道基底稳定性问题开展了深入的研究,取得了较丰富的研究成果^[1-8]。高速铁路现场振动测试成果表明^[9-11],高速铁路产生的振动影响比普通铁路更大,可以预测高速铁路运营将不可避免地对隧道围岩产生累积损伤效应,特别是处于软岩地层中的高速铁路隧道,围岩累积损伤变形可能产生导致隧道轴线方向不均沉降甚至衬砌结构的开裂与破坏,从而影响高速铁路列车的行车安全。因此,高速铁路隧道结构长期动力稳定性问题已经成为工程界广泛关注的重大技术问题。目前,少数学者针对高速铁路隧道底部软岩动力特性进行了探索性研究^[12-13],但关于高速铁路隧道底部围岩疲劳特性与动力累积损伤的研究尚少见报道。本文拟通过对隧道围岩相似材料进行室内动三轴疲劳试验与超声波损伤检测试验分析研究隧道围岩疲劳与动力累积损伤特性。

1 疲劳与损伤试验

1.1 软岩试样制备

以武广高速铁路改良泥质粉砂岩隧道围岩为研究对象,考虑到取样扰动以及岩体内富含的各类原生裂纹可能导致疲劳试验与超声波检测试验结果出现较大离散性,从而影响隧道围岩累积损伤特性的规律性分析,故采用相似材料模拟隧道围岩。在满足力学特性相似比的前提下,尽可能模拟泥质粉砂岩的物质构成。为此,采用了中细砂、水泥以及适量粘性土以模拟泥质粉砂岩的物理特性。其中:胶结材料采用 325 普通硅酸盐水泥,4 种掺入比 α_w 分别为 10%、15%、20% 和 25% (编号为 SY1~SY4),以模拟不同强度等级的隧道围岩;中细砂颗粒粒径 $d \leq 0.5 \text{ mm}$,粘性土经烘干后过筛(筛孔直径为 0.05

mm),粘性土掺入比均取为 $\alpha_t = 5\%$,水灰比均取为 $C=0.5$;试样尺寸为:39.1 mm×80 mm(如图 1 所示),经标准养护后进行强度与疲劳损伤试验。通过室内三轴试验及液压伺服万能试验机获得 SY1~SY4 四组试样 90 d 龄期强度指标如表 1 所示,其材料组成及强度指标相当于武广高速铁路改良泥质粉质砂岩,属于中等软岩范畴^[14-15]。

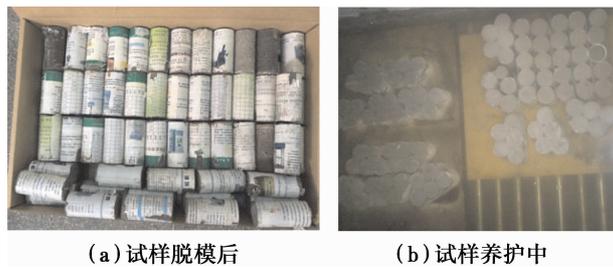


图 1 相似材料软岩试件制作

Fig. 1 Samples of similar materials for soft rock

表 1 软岩试件力学特性指标

Table 1 Mechanical properties of soft rock samples

试样类别	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	单轴抗压强度/MPa
SY1	0.204	29.6	146.7	1.62
SY2	0.251	46.5	294.2	3.15
SY3	0.398	51.5	539.9	5.64
SY4	0.561	51.7	773.8	7.16

2.2 疲劳试验

采用 STD-10 型微机控制电液伺服土动三轴试验系统进行,该试验系统主要用于软岩、水泥加固土以及强度较高的粘性土动力学性能研究。疲劳试验施加非对称正弦波动力荷载,荷载频率依据某高速铁路轨道振动现场测试获取的列车轮轨主振频率,确定为 $f=6 \text{ Hz}$ (对应于高速列车运行速度 $v=270 \text{ km/s}$),荷载最大应力幅值分别取为 $0.85f_{cm}$ 、 $0.8f_{cm}$ 、 $0.7f_{cm}$ 、 $0.6f_{cm}$ 4 种,最小应力幅值均取为 $0.05f_{cm}$ (其中: f_{cm} 为试件单轴抗压强度,具体取值

参见表 1)。通过对 4 组试件 4 种应力水平共计 16 个试件的疲劳试验成果进行整理分析,获得典型动载滞回曲线以及振动次数-动应变关系曲线如图 3 所示。



图 2 疲劳试验及试件破坏形态

Fig. 2 Fatigue test and failure modes

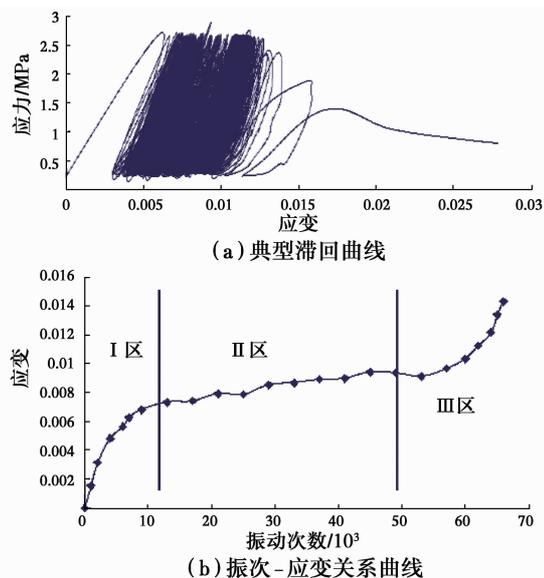


图 3 疲劳试验特征曲线

Fig. 3 Characteristic curves of fatigue tests

由图 2 可知,疲劳试验中试件表现出两种不同形式的破坏模式,即:端部拉-剪复合破坏和中部压-剪复合破坏,主要取决于试件内部初始损伤状态。当试件的初始损伤出现在端部时,在轴向动荷载反复作用下,首先在试件端部沿轴向产生损伤裂纹,随着动力荷载作用次数的不断增加,轴向裂纹将不断累积与扩展,加之试件受到轴向动力荷载往复作用,最终导致试件产生如图 2(b)所示的轴向剪切与拉伸复合破坏模式。而当试件初始损伤不明显或者初始损伤微裂纹存在于试件中部时,在轴向动荷载反复作用下,首先在试件中部出现“X”型剪切破坏裂纹,并在试件中部出现动态压应力集中区,随着动力荷载循环作用次数不断增加,试件中部损伤不断积累,并最终形成如图 2(c)所示的复合压剪破坏区。

与此同时,由疲劳试验特征曲线(如图 4 所示)可知,疲劳试验过程中,试件变形呈现出特征显著不同的 3 个发展阶段。1)初始微孔隙压密阶段,在轴向动荷载作用下,试件中存在的初始损伤微孔隙被压密闭合,试件变形速率表现为线性增长到渐趋稳定的变化过程;2)裂纹发生与稳定扩展阶段,试件内部初始损伤被激活,并产生新的损伤裂纹,且随着加载次数增长,裂纹不断稳定扩张,试件变形表现为持续稳定增长的趋势;3)损伤裂纹加速发展阶段,试件内部损伤裂纹加速扩展,损伤累积不断加剧,试件变形速率快速增长,并最终导致试件的破坏。

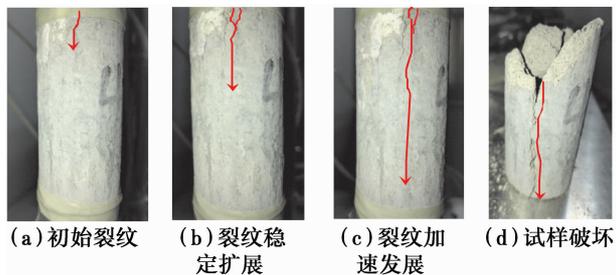


图 4 疲劳损伤裂纹发展全过程

Fig. 4 Developing process of fatigue damage cracks

2.3 超声波损伤检测

按照疲劳试验加载方式,对初始超声波速相等(即初始损伤参量相同)的同一组 10 个试件进行 10 个不同累积振动次数的动荷载试验。荷载最大应力幅值取为 $0.7f_{cm}$,最小应力幅值取为 $0.05f_{cm}$,加载频率取为 $f=6\text{ Hz}$ 。试验过程中保持动载波形、应力幅值等均与疲劳试验完全相同。对每一个达到预定累积振动次数的试件,采用 ZBL-U520 型非金属超声检测仪对其进行超声波测试,并根据超声波特征值分析累积振动次数对试件产生的累积损伤效应。具体测试仪器及测试方法如图 5 所示。通过对四组共 40 个试件的疲劳损伤试验获得软岩典型的超声波特征曲线如图 6 所示。



图 5 超声波损伤检测试验

Fig. 5 Test of ultrasonic damage

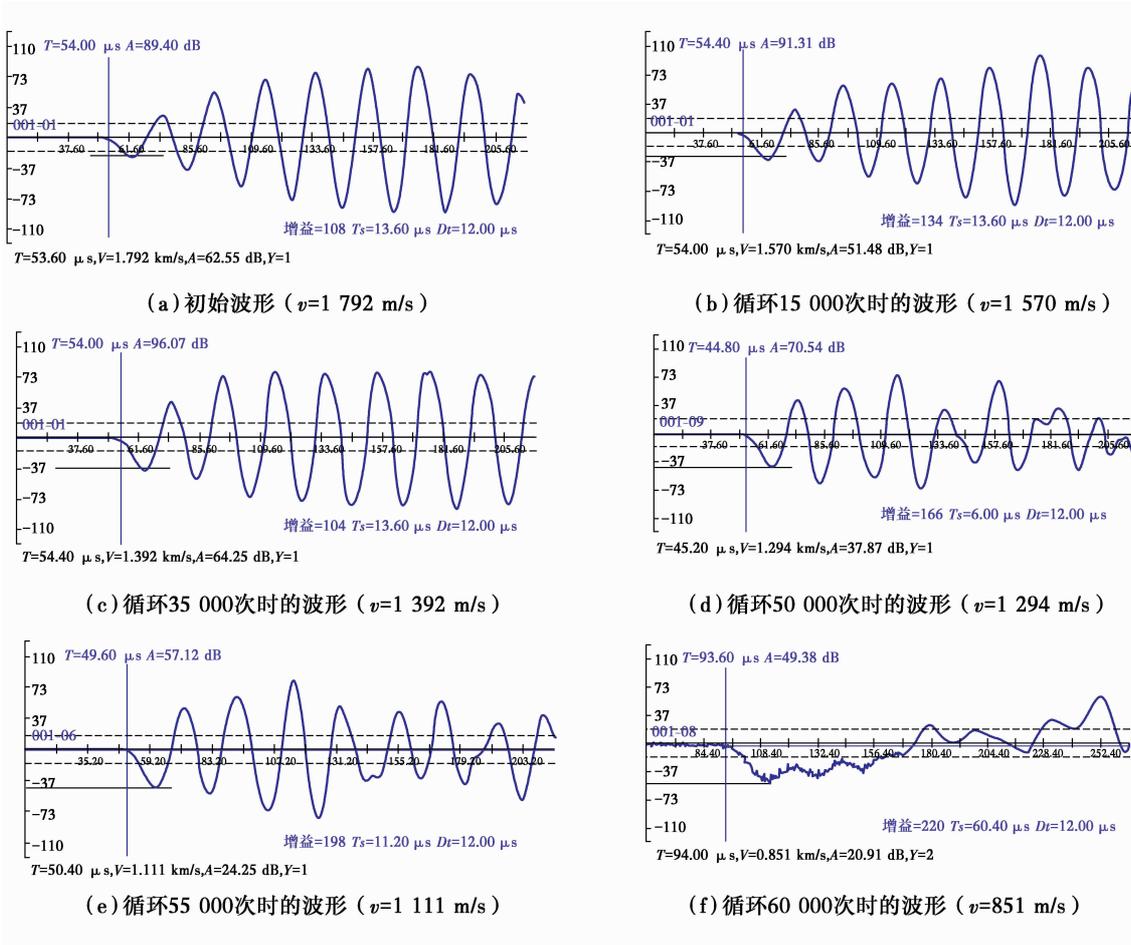


图 6 典型(SY4)超声波特征曲线

Fig. 6 Characteristic curves of ultrasonic wave for SY 4

由图 6 可知,疲劳试验过程中,当动荷载累积振动次数少于某一界限值时(如图 6(c)所示),尽管试件的超声波波速明显降低,但其超声波形态并未发生明显改变,表明试件内部虽已产生微观损伤,但并未发展形成宏观损伤裂纹。当动荷载累积振动次数超过某一临界值时(如图 6(d)所示),试件超声波波速继续衰减,超声波形态也开始发生畸变现象,表明试件内部微观损伤已扩展形成宏观裂纹。当试件所受的振动荷载次数继续增加,超声波特征曲线将发生明显改变,其超声波衰减速率以及反射波数量随累积加载次数的增大而不断增加,表明试件内部损伤裂纹数量也在不断增大。当动荷载累积振动次数达到某一极限值时(如图 6(f)所示),超声波形态将发生显著畸变,不再表现为类似正弦波的变化规律,开始呈现为无序随机波状态,表明试件已发生宏观破坏。上述各种超声波形态特征与试件表现出的宏观物理性态完全吻合,可见,非金属超声波检测方法

可有效跟踪和判定软岩试件的累积损伤状态。

3 疲劳损伤特性分析

3.1 疲劳特性分析

通过对 SY1-SY4 四组试件 4 种不同应力水平共计 48 个疲劳试验(其中:每组试件进行 4 种应力水平,每种应力水平 3 个试件,共计 12 个试件的疲劳试验)测试成果进行分析,可得不同强度等级软岩疲劳寿命与应力水平的关系曲线,即 $s-\lg N$ 关系曲线(如图 7 所示)。由图 7 可知,同一组软岩试件(组成材料及强度相同)在同一应力水平动荷载作用下,其疲劳寿命具有一定的离散性;同一组软岩所受的动应力水平愈低,其疲劳寿命就愈长。不同强度等级的软岩试件其 $s-\lg N$ 关系曲线呈现出相似的变化规律,且均可用多项式 $s = A(\lg N)^2 + B(\lg N) + C$ 进行很精确地拟合,其相关性指数 $R^2 \geq 0.983$,具体拟合参数如表 2 所示。

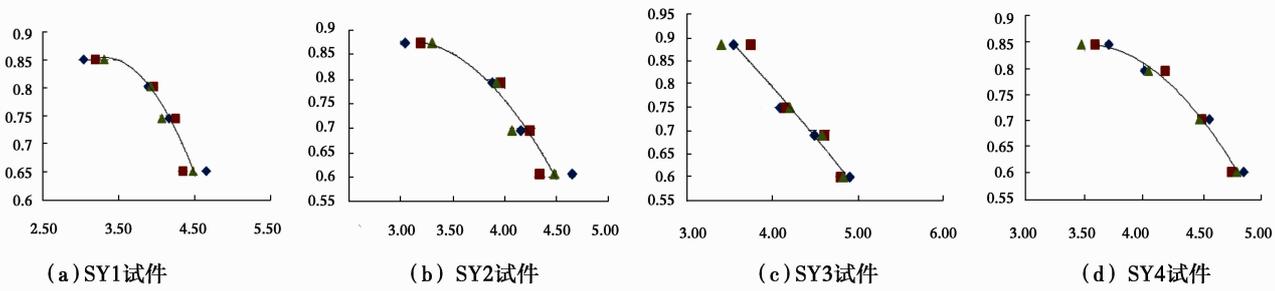


图 7 疲劳试验应力水平 s - $\lg N$ 关系曲线

Fig. 7 Curves of s - $\lg N$ for fatigue tests

表 2 不同强度等级围岩的疲劳曲线拟合参数表

Table2 Fitting parameters of fatigue curves for different soft rocks

编号	弹性模量 E/MPa	单轴抗压强度 f_{cm}/MPa	拟合参数			S- $\lg N$ 曲线	相关指数 R^2
			A	B	C		
SY1	146.7	1.62	-0.148	0.982	-0.772	$s = -0.148 (\lg N)^2 + 0.982 \lg N - 0.772$	0.999
SY2	294.2	3.15	-0.135	0.831	-0.393	$s = -0.135 (\lg N)^2 + 0.831 \lg N - 0.393$	0.983
SY3	539.9	5.64	-0.013	-0.097	1.405	$s = -0.013 (\lg N)^2 - 0.097 \lg N + 1.405$	0.988
SY4	773.8	7.16	-0.146	1.024	-0.946	$s = -0.146 (\lg N)^2 + 1.024 \lg N - 0.946$	0.999

3.2 损伤特性分析

假设圆柱体状软岩试件为一维弹性杆件,按一维杆件弹性波传播原理可知,圆柱体状软岩试件沿轴线方向的初始纵波波速可由下式计算,即

$$v_L^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (1)$$

而当试件受到累积振动荷载作用发生损伤以后的纵波波速为

$$\tilde{v}_L^2 = \frac{\tilde{E}}{\tilde{\rho}} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (2)$$

则根据弹性体损伤理论,可得试件的损伤量为

$$D \approx 1 - \frac{\tilde{v}_L^2}{v_L^2} \quad (3)$$

表 3 试件损伤参量计算表

Table3 Damage parameters for samples

试件编号	循环次数/次	损伤波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	N/N_i	损伤参量 D	试件编号	循环次数/次	损伤波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	N/N_i	损伤参量 D
	0	1 613	0.00	0		0	1 681	0.00	0
	1 000	1 564	0.02	0.059 8		1 000	1 612	0.02	0.080 4
	5 000	1 365	0.11	0.283 8		5 000	1 314	0.11	0.388 9
	15 000	1 227	0.33	0.421 3		15 000	1 227	0.33	0.467 2
SY1	25 000	1 351	0.56	0.298 4	SY2	25 000	1 251	0.56	0.446 1
	30 000	1 210	0.67	0.437 2		30 000	1 210	0.67	0.481 8
	35 000	1 211	0.78	0.436 3		35 000	1 101	0.78	0.571 0
	45 000	546	1.00	0.885 4		45 000	606	1.00	0.870 0

续表 3

试件编号	循环次数/次	损伤波速/(m·s ⁻¹)	N/N _f	损伤参量 D	试件编号	循环次数/次	损伤波速/(m·s ⁻¹)	N/N _f	损伤参量 D
	0	1 764	0.00	0		0	1 792	0.00	0
	1 000	1 712	0.02	0.058 0		1 000	1 755	0.02	0.040 8
	5 000	1 614	0.08	0.162 8		5 000	1 656	0.08	0.146 0
	15 000	1 427	0.25	0.345 5		15 000	1 570	0.25	0.232 4
SY3	25 000	1 451	0.42	0.323 3	SY4	35 000	1 392	0.57	0.396 6
	35 000	1 382	0.58	0.386 2		45 000	1 368	0.74	0.417 2
	45 000	1 350	0.75	0.414 3		55 000	1 177	0.90	0.568 6
	50 000	1 298	0.83	0.458 5		60 000	851	0.98	0.774 4
	55 000	1 076	0.92	0.627 9		61 000	509	1.00	0.919 3

根据超声波测试结果,利用式(3)可得试件在不同累积振次数荷载作用下的损伤参量(如表 3 所示),由此可得不同强度等级软弱围岩的累积损伤参量-循环次数的关系曲线,即 $D-N/N_f$ 关系曲线(如图 8 所示),该曲线可用 4 参数三次多项式 $D = a(N/N_f)^3 + b(N/N_f)^2 + c(N/N_f) + d$ 进行拟合。由图可知,不同强度等级的软弱围岩表现出相似的动力累积损伤进程,在相同动荷载作用下,软岩的累积极限振动次数(疲劳寿命) N_f 随强度的增大呈线性增长(如图 9 所示)。但试件破坏时损伤参量的大小与试件的强度等级没有必然联系,其离散性较大。对比软岩损伤参量 $D-N/N_f$ 关系曲线与累积振次-应变关系曲线(如图 3(b)所示),发现两者之间表现相似的变化规律,表明软岩的动应变增量与其动力累积损伤参量同步增长,两者互为因果关系。

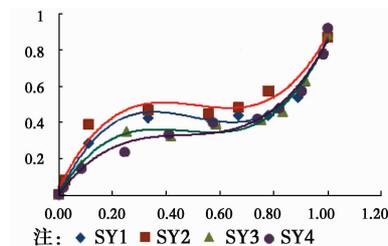


图 8 损伤参量 $D-N/N_f$ 关系曲线

Fig. 8 Curves of $D-N/N_f$

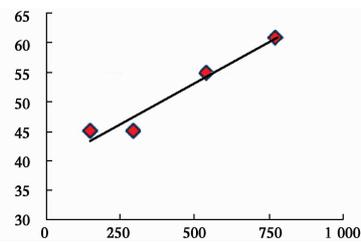


图 9 极限循环次数 N_f-E 关系曲线

Fig. 9 Curves of N_f-E

表 4 不同强度等级软岩累积损伤曲线拟合参数表

Table 4 Fitting parameters of cumulative damage for different strength soft rocks

编号	弹性模量 E/MPa	拟合参数				$D-N/N_f$ 曲线	相关指数 R^2
		a	b	c	d		
SY1	146.7	4.609	-6.910	3.161	-0.002	$D = 4.609(N/N_f)^3 - 6.910(N/N_f)^2 + 3.161(N/N_f) - 0.002$	0.988
SY2	294.2	4.146	-6.361	3.068	0.032	$D = 4.146(N/N_f)^3 - 6.361(N/N_f)^2 + 3.068(N/N_f) + 0.032$	0.972
SY3	539.9	3.885	-5.483	2.456	0.004	$D = 3.885(N/N_f)^3 - 5.483(N/N_f)^2 + 2.456(N/N_f) + 0.004$	0.991
SY4	773.8	3.081	-4.244	2.012	0.000	$D = 3.081(N/N_f)^3 - 4.244(N/N_f)^2 + 2.012(N/N_f) + 0.0$	0.981

4 结 论

1)相似材料疲劳损伤试验结果表明,隧道软岩疲劳破坏主要表现为端部拉-剪复合破坏和中部压-剪复合破坏两种模式。软岩疲劳试验特征曲线表现

为:初始微孔隙压密、裂纹发生与稳定扩展以及损伤裂纹加速发展 3 个阶段。

2)基于弹性损伤理论与非金属超声波检测方法可以较好地反映软岩疲劳损伤特征,超声波波速及超声波形态特征可以作为软岩动力累积损伤发展特

性的关键性评价指标,进而推广应用于高速铁路隧道围岩长期动力损伤状态监测。

3)软岩的强度愈高、所受到的动力应力水平愈低,其疲劳寿命就越长。不同强度等级的软岩其 $s\text{-lg}N$ 关系曲线表现为相似的变化规律,且可用 3 参数多项式进行拟合。

4)疲劳损伤试验结果表明,不同强度等级软岩累积损伤参量与循环振次 $D\text{-}N/N_r$ 关系曲线可用 4 参数三次多项式进行拟合,累积振次-动应变关系曲线与累积振次-损伤参量关系曲线具有良好的相关性。

参考文献:

- [1] 丁祖德,彭立敏,黄娟. 基底脱空条件下铁路隧道行车安全性分析[J]. 铁道学报, 2012, 35(9): 104-110.
Ding Z D, Peng L M, Huang J. Running safety in railway tunnel with base voids [J]. Journal of China Railway Society, 2012, 35(9): 104-110. (in Chinese)
- [2] 程学武,董敬. 隧道内整体道床的破裂原因分析及整治[J]. 铁道工程学报, 2009, 128(5): 64-68.
Cheng X W, Dong J. Analyses of the cause for the fracture of monolithic concrete bed in tunnel and treatment measures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 128(5): 64-68. (in Chinese)
- [3] 朱万听,李兰勤. 隧道基底病害现状及成因分析[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(5): 42-44.
Zhu W T, Li L Q. Base disease in tunnels and their cause analysis [J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(5): 42-44. (in Chinese)
- [4] Jones S, Hunt H. Voids at the tunnel-soil interface for calculation of ground vibration from underground railways [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 333 (2): 245-270.
- [5] 施成华,雷明锋,彭立敏,等. 隧道底部结构受力与变形的现场测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (5): 879-884.
Shi C H, Lei M F, Peng L M. In-situ monitoring and analysis of mechanical characteristics and deformation of bottom structure of tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (5): 879-884. (in Chinese)
- [6] 施成华,雷明锋,彭立敏,等. 砂层隧道列车振动响应与地基累积变形研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(7): 118-124.
Shi C H, Lei M F, Peng L M. Study on train vibration response and cumulative deformation of sand layers of the tunnel [J]. Journal of China Railway Society, 2011, 33(7): 118-124. (in Chinese)
- [7] Lee I W, Lee S H, Kang Y S. Characteristics of roadbed behaviors of concrete track for high-speed railway [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2006, 9(3): 298-304.
- [8] Tang Y Q, Yang P, Zhao S K, et al. Characteristics of deformation of saturated soft clay under the load of Shanghai subway line No. 2 [J]. Environmental Geology, 2008, 54(6): 1197-1203.
- [9] 王峰. 沪宁高铁与邻近既有线振动相互影响的测试与分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4): 12-18.
Wang F. Test and analysis for vibration influence between HuNing high-speed railway and adjacent existing line [J]. Journal of Beijing Jiao tong University, 2012, 36(4): 12-18. (in Chinese)
- [10] 郭强. 武广高铁红黏土路堑基床动响应现场测试与分析[J]. 铁道工程学报, 2011(8): 47-52.
Wu Q. Test and analysis of dynamic responses of red clay cutting bedding of Wuhan- Guangzhou passenger dedicated line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011 (8): 47-52. (in Chinese)
- [11] Kogut J, Degrande G, Haegeman W, et al. In situ vibration measurements on the high speed track L2 Brussels-Koln [C]// Antwerp; International Association for Bridge and Structural Engineering, 2003: 15-27.
- [12] 丁祖德,谢洪涛,彭立敏. 高速铁路隧道基底软岩动力响应特性分析[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版, 2013, 38(3): 36-41.
Ding Z D, Xie H T, Peng L M. Dynamic response properties of soft bedrock of high-speed railway tunnel [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 38(3): 36-41. (in Chinese)
- [13] 刘宇. 软弱土地盾构隧道高速列车动力响应分析[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
Liu Y. The dynamic response analysis of shield tunnel on soft soil foundation exposed to high-speed train vibration excitation [D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [14] 赵勇. 泥质粉砂岩化学改良土动力特性测试与分析[J]. 铁道工程学报, 2012, 162(3): 22-25.
Zhao Y. Test and analysis of dynamic character of chemical improved soil of argillaceous siltstone for subgrade of high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 162(3): 22-25. (in Chinese)
- [15] 住房和城乡建设部. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 2014.
GB/T 50218—2014 Standard for Engineering Classification of Rockmasses[S]. Ministry of Housing and Urban-rural Development, 2014. (in Chinese)