

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1307-05

强地震动作用下层状岩体破坏的物理模拟研究

梁庆国^{1,2}, 韩文峰^{1,3}, 马润勇⁴, 湛文武¹

(1.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2.兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070
3.天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384; 4.长安大学 地质工程与测绘工程学院, 西安 710054;)

摘 要: 岩体地震动力破坏现象是常见但研究较少的复杂课题。利用物理模拟试验, 研究了层状岩体边坡在强地震动作用下的变形破坏问题。按结构面走向平行和垂直地震动方向, 对不同岩体结构特征的模型施加不同的幅值和频率的水平向地震动荷载, 进行岩体的振动破坏试验。结果表明, 结构面空间展布方向与地震动荷载的相互关系不同、结构面软弱程度不同, 岩体变形破坏的形式和分布特征也不相同。岩体的动力破坏主要是岩体结构的破坏, 即岩体结构的宏观破坏和微观损伤, 岩体结构特征是控制其动力变形破坏的主要因素。极大的不均匀性是岩体动力破坏的显著特点, 这与大量极震区岩体破坏的现象类似。但岩体动力破坏模式的建立和定量的力学分析还需更多研究。

关 键 词: 强地震动; 层状岩体破坏; 结构面; 物理模拟; 不均匀性

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Physical simulation study on dynamic failures of layered rock masses under strong ground motion

LIANG Qing-guo¹, HAN Wen-feng^{1,2}, MA Run-yong³, CHEN Wen-wu¹

(1.School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2.Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;
3.School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

Abstract: Dynamic failures of rock masses under strong ground motion are common phenomena usually observed but lack of studies because of their complexity. Deformation failures of layered rock masses under strong ground motion are studied by physical simulation experiments. Horizontal ground motion with different amplitudes and frequencies is respectively operated on models with different structure characteristics to investigate dynamic failure of layered rock masses according to mutual relation between discontinuity orientations and seismic forces. The results indicate that deformation failures of rock masses have different forms and distributing characteristics because of different spatial relations between discontinuities & dynamic forces and different discontinuities strengths. Structure failure of rock mass is principal that can be classified into macroscopical failure and microcosmic damage, structure characteristics of rock mass is dominating factor of dynamic failure of rock mass; inhomogeneity is one of its outstanding characteristics that are similar with those of the rock mass suffered from strong ground motions at meizoseismal areas. More researches are badly needed to establish dynamic failure modes of rock mass and to carry out quantitative mechanical analysis.

Key words: strong ground motion; failure of layered rock mass; discontinuity; physical simulation; inhomogeneity

1 引 言

地震是地球释放其内能的动力地质作用, 是对人类危害最严重的地质灾害。目前, 在国内外历史地震资料 and 现代地震考察研究中有大量的岩体变形破坏的实例, 岩体的地震破坏大部分集中于极震区

内^[1, 2]。自 1971 年美国圣费尔南多地震以来, 国内外获得了多次强震极震区的地震动记录, 如美国北岭地震 (1994 年)、日本阪神地震 (1995 年) 和中国台湾集集地震 (1999 年) 等。实测资料表明, 极震区内地震动的幅值很高, 其峰值有时可能接近或超过重力加速度, 并且竖向地震动接近甚至超过水

平地震动^[3~6], 显然, 极震区内的强地震动是造成岩土体严重破坏的主要动力。

对于岩体在地震动力作用下的稳定性问题, 已有学者对其进行了研究, 如杜永廉等^[7]应用实体物理模拟试验研究了地震动荷载作用下岩体中块体的倾倒和转动, 王存玉^[8]研究了水平层状边坡、反倾向边坡和顺倾向边坡的地震动力破坏, 祁生文^[9]进行了边坡动力响应分析及其应用研究等。

为科学合理的阐释黄河黑山峡大柳树松动岩体成因机制, 笔者进行了物理模型的振动模拟试验, 研究强地震动作用下层状岩体的变形破坏问题。试验结果表明, 在不同方向的强地震动作用下, 岩体结构面的空间展布方向和充填物的软硬程度是影响岩体动力变形破坏方式和分布的控制性因素, 岩体的破坏主要是其结构的宏观破坏和微观损伤, 本文就相关问题进行了探讨。

2 模型及试验概况

工程地质模拟试验分为工程模拟和机制模拟^[10], 由于岩体本身及其赋存环境的复杂性, 实际中常以后者为主, 都以相似性原理为基础^[8,10~12]。本文的试验设计综合分析了研究区的地质背景、岩体的介质特征和结构特征^[13], 以研究层状岩体地震动力变形破坏的形式、特点为目的, 着重考虑了模型与原形的几何相似性和软硬岩体分布、参数差异的特点^[12], 并且以模拟岩体中的Ⅱ、Ⅲ级结构面为主。

依据大柳树坝址工程地质勘测资料, 地质模型

按1:2 000比例尺建立, 模型实际尺寸为(宽×高×长) 20 cm×25 cm×60 cm。模型堆砌基块所用材料为重晶石、石膏、沙子按一定配合比做成尺度为20 mm×10 mm×50 mm的模块, 共制作了两种模型(编号: 1[#], 2[#]), 其中1[#]模型模拟层间结合力较强的完整层状岩体, 2[#]模型模拟含有软弱夹层的弱结合力层状岩体, 模型参数见表1, 模型中软岩所占比例为20%, 硬岩为80%。

表1 模型材料参数表

Table 1 Material parameters of model 1 and model 2

模型编号	硬质岩石材料		结构面软岩材料	
	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	变形模量 E / MPa	密度 ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	变形模量 E / MPa
1 [#]	2.4	37.2	1.94	24
2 [#]	2.4	137.2	1.9	72.0

振动试验设备是美国 UD 公司生产的 2XSA60-T100-32WL 型电磁振动台。该设备可进行频率为2~2 000 Hz 的 X , Y , Z 三向振动。本次试验取结构面走向与地震动力荷载平行行为 X 方向, 结构面走向与地震动力荷载垂直为 Y 方向, 垂直向震动为 Z 方向。试验选用的模拟地震动力参数: 水平加速度 $A_h = 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 \text{ g}$, 频率 $F = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 \text{ Hz}$ 。 $A_h = 1.0 \text{ g}$ 时, 频率 $F = 6 \text{ Hz}$ 。各次振动持续时间为 20 s。进行了 2 次试验, 共 4 个模型。

3 结果分析

试验结果如表2和图1所示。

表2 振动模拟试验结果汇总表

Table 2 Experiment results

方向	1 [#] 模型		2 [#] 模型	
	加速度/ g	破坏描述	加速度/ g	破坏描述
X	0.2	无明显反应。	0.2	当频率低于 12 Hz 时, 无破坏现象; 在 12 Hz 时, 产生共振, 表层块体间出现微弱开裂。
	0.4	频率在 16 Hz 时, 左岸岩体局部出现共振。	0.3	出现明显开裂, 表层岩体倾倒 (图 1(b))。
	0.6	出现大的松动开裂, 在 16 Hz 时, 岩体出现剧烈振动, 并发生明显错位, 右岸断层上部拉裂破坏深度约 2 cm (图 1(a))。	0.4	左岸坡体表面整体松动、滑塌, 右岸裂缝延伸。
	0.8	岩层出现断裂、严重滑塌, 14 Hz 时, 发生崩塌。	0.6	左岸坡脚发生鼓胀, 影响深度达 8 cm。在 12 Hz 时, 右岸整体松动, 并向河谷倾倒滑移; 16 Hz 时, 右岸岩层严重倾倒、崩塌、拉裂。
			0.8	整体崩塌。
	≤0.3	较稳定状态。	≤0.3	处于较稳定状态。
Y	0.4	在 14 Hz 时, 表层有松动, 右岸共振, 坡缘出现倾滑。	0.4	在 14 Hz 时, 左岸坡上部松动、鼓起, 有较小的破碎岩块滑落; 在 12 Hz 时, 右岸出现倾倒拉裂; 在 16 Hz 时, 右岸溃屈、拉裂破坏, 浅部整体倾滑 (图 1(c))。
	0.8	右岸出现断裂, 影响深度距坡表 4 cm, 垂直顶面 13 cm, 随着频率的增加, 岩体断裂、破坏程度加剧, 在 16 Hz 时, 断层带严重破碎, 影响深度达 10 cm 以上。	0.8	大面积崩塌 (图 1(d))。
	1.0	左岸彻底破坏, 最大影响深度距顶面为 13~15 cm, 距坡表水平距离为 10 cm, 右岸塌落, 山体下降 0.6 cm, 河谷松动影响深度为 2~4 cm (图 1(e))。	1.0	整体崩塌, 山体下降约 5 mm (图 1(f))。

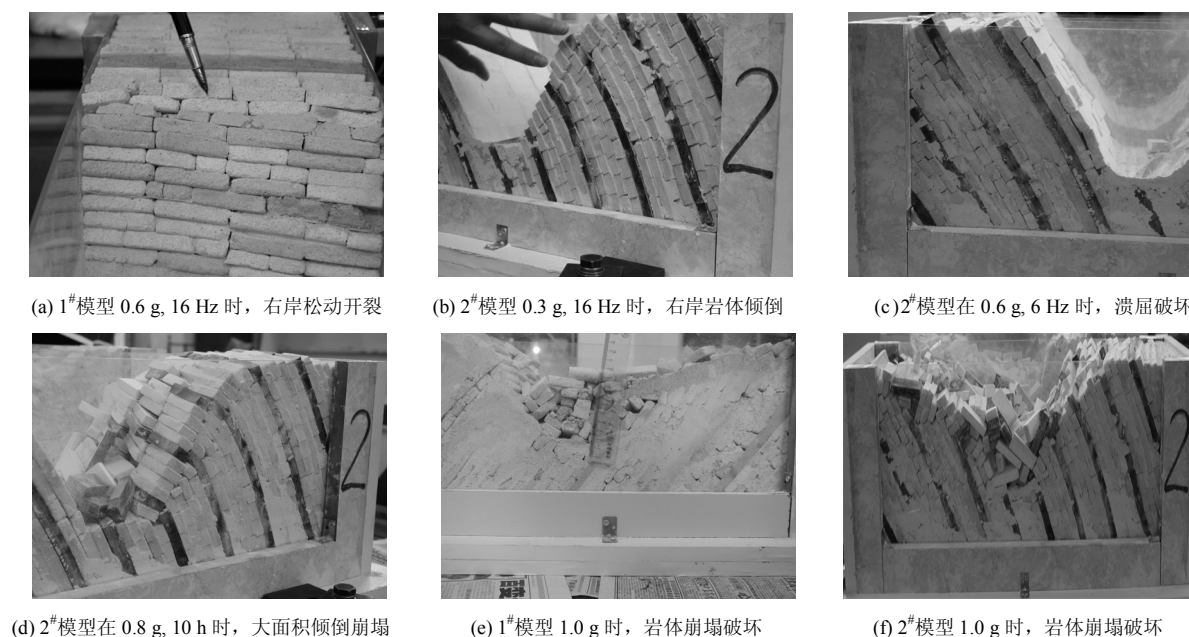


图1 岩体动力破坏照片
Fig. 1 Photos of rock mass dynamic failure

由模拟试验成果分析可知：

(1) 当 $A_h \leq 0.2 \text{ g}$ 时, 岩体都是相对稳定的。对于软硬岩的变形模量相差较大的 2[#]模型, 当 $A_h = 0.3 \text{ g}$ 时, 岩体开裂, 反向坡表层岩体倾倒, 顺向坡岩体出现溃屈, 而软硬岩的变形模量相差不大的 1[#]模型; 当 $A_h \leq 0.3 \text{ g}$ 时, 岩体总体上处于相对稳定状态; 当 $A_h = 0.4 \text{ g}$ 时, 坡体表层出现明显的松动、开裂与滑塌。当 $A_h \geq 0.6 \text{ g}$ 时, 不但两类模型中岩体都出现错位、拉裂、崩塌等加剧, 且顺向坡出现岩体倾倒, 1[#]模型发生模型块断裂, 岩体出现大面积松动开裂崩塌、下陷。

(2) 动荷载平行于结构面走向时, 岩体中出现软硬岩层间的明显错位(顺层剪切滑动), 而动荷载垂直于结构面走向时, 则表现为拉张破裂, 这实质上体现的是岩体抗剪强度和抗拉强度的差异。

(3) 边坡岩体的局部共振现象多出现在模型左岸, 即顺向坡一侧; 共振频率对 1[#]模型为 16 Hz, 对 2[#]模型则为 12 Hz; 共振出现的加速度幅值, 1[#]模型的要高(0.4 g)于 2[#]模型(0.2 g)。

(4) 根据实测振动模型中的破坏深度, 换算到实际工程中, 当 $A_h = 0.4 \text{ g}$ 时, 在坝址坡体中岩体松动实际影响深度最大可达 200 m 左右, 河谷影响深度达 80 m; 而当 $A_h \geq 0.4 \text{ g}$ 时, 实际岩体中破坏深度达到 200~300 m, 河谷地段纵向影响深度大约 120~160 m, 模拟结果与大柳树岩体的实际情况基本吻合^[10]。

4 问题与讨论

4.1 岩体动力破坏的形式及其本质

试验中, 在不同方向、幅值和频率的地震动力作用下, 岩体产生了不同形式和程度的变形和破坏。岩体的局部张裂、滑塌、倾倒以及大范围的破裂、崩塌等, 破坏形式和分布较为复杂, 但本质上都是岩体结构的破坏, 可分为岩体的宏观结构破坏和微观结构损伤。岩体的微观结构损伤实际上是岩体的完整性降低, 应力释放, 岩体质量和力学参数下降, 岩体发生了松动, 如图 1(b)、图 1(f)所示。这里的“松”是指岩体结构疏松, “动”则表现为岩体的剪切位移或拉张位移, 本质上是岩体密度的降低^[13]。较多的震害调查资料表明, 一次大的地震造成地表岩土体的动力失稳而产生大量的崩塌、滑坡等地震地质灾害, 而且震后发生的次生地质灾害也很严重, 例如 1950 年西藏墨脱地震^[14]、1974 年云南昭通地震^[15]、1976 年四川松潘地震^[16]、1996 年云南丽江地震^[17]等。究其原因, 是地震动力导致岩体较大范围和深度的微观损伤, 即岩体的松动所致。所以, 地震作用造成岩体内部的损伤、松动是一种较为广泛的岩体动力破坏形式, 是客观存在的现象, 并成为许多强震区震后地质灾害频繁发生的最主要原因之一。

4.2 岩体地震动力破坏的简化模式

模拟试验结果和大量的野外调查资料表明, 岩体在强地震动作用下的变形破坏类型多样、形式复

杂。基于岩体的动力变形破坏主要是其结构的破坏这一基本认识,对于具有软硬相间的层状岩体,可将其岩块的运动模式简化平动(图 2(b)~图 2(d))和转动(图 2(e)~图 2(h))两类共 7 种类型^[18]。其中图 2(c)、图 2(e)、图 2(f)可看作是地震动力平行于结构面时作用的结果,图 2(b)可以看作是地震动力垂直于结构面时作用的结果,图 2(d)、图 2(g)则为斜交时作用的结果。在本次模拟试验中,由于岩层产状较陡,对于 Y 向的水平地震动和 Z 向的垂直地震动,因地震动方向与结构面方向属于斜交,所以其变形破坏形式较复杂;对于 X 向的水平地震动,主要是由于顺加载方向的剪切滑移而导致的岩体变形破坏,形式较为简单。

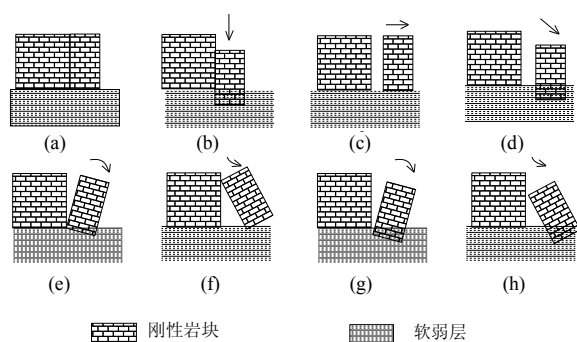


图 2 岩块运动模式示意图

(据 Boris Benko, 1997 年, 有修改)

Fig. 2 Sketch map of rock movements
(Modified from Boris Benko, 1997)

4.3 岩体地震动力破坏的不均匀性

试验中发现,在一定的地震动的幅值和频率时,边坡岩体出现共振破坏的部位和程度不同。可见这种共振破坏具有一定的选择性,即岩体的结构敏感性,同时还受岩体边界条件的影响,前者表现为岩体中结构面的分布及充填特征,后者则主要是坡形及坡高。

结构面方向与地震动方向的垂直、平行或斜交决定了岩体变形破坏的机制。正交时为拉张破坏,对岩体变形破坏起控制作用的是其结构的抗拉强度;平行时为剪切破坏,此时受结构面的抗剪强度的控制;而斜交时则拉张破坏和剪切破坏都有,但结构面方向与地震动作用方向的夹角大小决定了其岩体的强度和破坏机制。试验中对模型施加垂直向地震动时,仅在加速度大于 1.0 g 时模型坡脚有轻微破裂。因此对于倾角较陡的岩体,水平地震动可能对变形破坏的影响较大,而对于倾角较缓的岩体,竖向地震动的影响则相对较大。而实际中岩体的动力强度因其结构面分布和充填特征的随机性而

具有较大的复杂性,同时由于地震动力的幅值、方向和频率也是随机复杂变化的。因此岩体在地震动作用下的变形破坏表现出极大的不均匀性,这也是与岩体受一般静力作用时变形破坏的最大区别。

5 结 语

模拟试验结果表明,结构面相对于动荷载的方位及夹层特点,是影响层状岩体在强地震动作用下动力稳定性和变形破坏的控制性因素,不均匀性是岩体地震动力破坏的主要特点。实际上,地震时地表质点的运动是复杂的三维空间运动,岩体在地震动作用时不仅力的大小发生变化,而且其方向和频率也是不断变化的,加之岩体结构面空间分布的随机性,实际岩体的变形破坏过程将非常复杂。

岩体地震动力破坏是涉及岩体力学、工程地质学、地震学、地震工程学等诸多学科的复杂课题,岩体的动力破坏不仅是大变形、大位移的,而且是动力学、运动学耦合作用的过程。同时,由于对岩体变形破坏的定量评价还很不成熟,目前尚难以建立其动力破坏的模式并进行定量的力学分析。因此,极震区岩体在强地震动下的动力响应问题还需进行更多的深入研究。

参 考 文 献

- [1] 李善邦. 中国地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [2] 国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策(分论)[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [3] 谢礼立, 陶夏新, 王国新. 强地震动估计和地震危险性评定[J]. 东北地震研究, 2001, 17(1): 1-8.
XIE Li-li, TAO Xia-xin, WANG Guo-xin. Prediction of strong ground motion and assessment of seismic hazard[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 2001, 17(1): 1-8.
- [4] 王国权, 周锡元, 马宗晋, 等. 921台湾地震近断层强地面运动的周期和幅值特性[J]. 工程抗震, 2001, (1): 30-36.
- [5] 胡聿贤, 周锡元. 地震工程跨世纪发展趋势[J]. 工程抗震, 1999, (1): 3-9.
- [6] 梁庆国, 韩文峰, 李雪峰, 等. 强震极震区竖向地震力与重大工程安全问题[A]. 全国岩土与工程学术大会论文集[C]. [s.l.]: [s.n.], 2003.
- [7] 杜永廉, 陈尚武, 吴玉庚. 黄河小浪底坝区古滑坡机制的模型实验研究[A]. 岩体工程地质力学问题(五)[M]. 中国科学院地质研究所主编. 北京: 科学出版社, 1984.
- [8] 王存玉, 王思敬. 边坡模型振动实验研究[A]. 岩体工

- 程地质力学问题(七)[M]. 中国科学院地质研究所主编. 北京: 科学出版社, 1987.
- [9] 祁生文. 边坡动力响应分析及其应用[博士学位论文D]. 北京: 中国科学院, 200.
- [10] 余定生, 杜永廉. 露天边坡变形的模拟实验研究. 岩体工程地质力学问题(三)[M]. 中国科学院地质研究所主编, 北京: 科学出版社, 1980.
- [11] 石豫川, 冯文凯, 冯学钢, 等. 国道 108 线某段缓倾角顺层边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 350—355.
SHI Yu-chuan, FENG Wen-kai, FENG Xue-gang, et al. Study on mechanism of deformation failure of a low-angle dip bedding slope of national highway No. 108 by physical simulation method[J]. **Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)**, 2003, 30(4): 350—355.
- [12] 刘建, 冯夏庭, 张杰, 等. 三峡工程左岸厂房坝段深层抗滑稳定的物理模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 993—998.
LIU Jian, FENG Xia-ting, ZHANG Jie, et al. Physical modeling on stability against sliding for left powerhouse dam of the Three Gorges Project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 993—998.
- [13] 韩文峰. 黄河黑山峡河段开发重大工程地质问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [14] 杜榕桓. 山地灾害发展趋势预测[A]. 中国西部环境演变评估——中国西部环境变化的预测(第二卷)[M]. 丁一汇主编. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] 朱海之, 王克鲁, 赵其强. 从昭通地震破坏看山区地面破坏特点[J]. 地质科学, 1975, 8(3): 230—241.
- [16] 李天池. 四川松潘平武地震区崩塌和滑坡的若干问题[A]. 滑坡文集(二)[C]. 铁道部科学研究院西北所主编. 北京: 人民铁道出版社, 1979.
- [17] 唐川, 黄楚兴, 万晔. 云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 76—84.
TANG Chuan, HUANG Chu-xin, WAN Ye. Lijiang earthquake and the induced rockfalls and slumps in Yunnan[J]. **Journal of Natural Disasters**, 1997, 6(3): 76—84.
- [18] Boris Benko. Numerical modeling of complex slope deformations [D]. [s.l.]: University of Saskatchewan, 1997.
-
- 上接第 1302 页
- [11] 马巍, 盛煜, 吴紫汪. 冻土蠕变过程中冰及冰相应力的变化[J]. 自然科学进展, 1994, 4(6): 921—926.
MA Wei, Sheng yu, WU Zi-wang. Stress changes of ice during creep of frozen soil[J]. **Natural Science Progress**, 1994, 4(6): 921—926.
- [12] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土蠕变过程中的 CT 分析[J]. CT 理论与应用研究, 1995, 4(3): 31—34.
WU Zi-wang, MA Wei. Analysis of creep of frozen soil by CT[J]. **CT Theory and Application**, 1995, 4(3): 31—34.
- [13] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土蠕变变形特征的细观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 1—6.
WU Zi-wang, MA Wei. Submicroscopic analysis on deformation characteristics in creep process of frozen soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(3): 1—6.
- [14] 马巍, 吴紫汪, 蒲毅彬, 等. 冻土三轴蠕变过程中结构变化的 CT 动态监测[J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 52—57.
MA Wei, WU Zi-wang, PU Yi-bin. Monitoring the changes of structure in frozen soil in triaxial creep process by CT[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1997, 19(1): 52—57.
- [15] 刘增利, 李洪升, 朱元林. 冻土单轴压缩动态试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 12—16.
LIU Zeng-li, LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin. A timely experimental study on uniaxial compression for frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 12—16.
- [16] 刘增利, 李洪升, 朱元林. 冻土单轴压缩损伤特征与细观损伤测试[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(2): 223—227.
LIU Zeng-li, LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin. Damage characteristics and microcrack damage measurement of frozen soil under uniaxial compression[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2002, 42(2): 223—227.
- [17] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬. 冻土单轴蠕变过程中结构变化的 CT 实时试验[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 306—311.
WU Zi-wang, MA Wei, PU Yi-bin. Monitoring the change of structures in frozen soil in uniaxial creep process by CT[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1996, 18(4): 306—311.
- [18] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬. 岩石细观损伤扩展规律的 CT 实时试验[J]. 中国科学(E辑). 2000, 30(2): 104—111.
GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin. Real-time CT test on the meso-damage evolution laws of rock[J]. **Science in China (Series E)**, 2000, 30(2): 104—111.