

# 二灰土渗透系数随龄期变化的微细结构分析

徐奋强<sup>1,2</sup>, 方庆军<sup>2</sup>, 洪宝宁<sup>2</sup>, 陈艳丽<sup>3</sup>

(1. 南京工程学院建筑工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;  
3. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

**摘要:**为解释二灰土的宏观物理特性,在进行常规的二灰土渗透试验后,利用岩土材料微细结构光学测试系统拍摄了二灰土的微细结构序列图像。采用数字图像处理方法从二灰土初始状态微细结构图像以及养护 7 d, 14 d 和 28 d 后的微细结构图像中获取所需的微细结构参数,对其进行分析,揭示二灰土渗透系数随龄期变化的宏观现象。结果表明,随着龄期的增长,二灰土颗粒面积比例不断增大,颗粒圆度、孔隙定向度和孔隙分布分维数不断减小,微观试验参数的变化很好地解释了宏观试验所得出的渗透系数随龄期逐渐减小的变化规律。

**关键词:**二灰土;渗透系数;微细结构;量化参数

**中图分类号:** TU411.92

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2012)05-0043-04

**Microstructure analysis of effect lime-ash soil on permeability coefficient variation with duration**//XU Fenqiang<sup>1,2</sup>, FANG Qingjun<sup>2</sup>, HONG Baoning<sup>2</sup>, CHEN Yanli<sup>3</sup> (1. College of Architecture and Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** To illustrate the macro-physical characteristics of lime-ash soil, microstructure images of lime-ash soil were taken by the optics test system after the permeability test was carried out. Using a digital image processing method, the microstructure parameters of lime-ash soil were obtained from original state images and images after 7 days, 14 days, and 28 days. Through the analysis of microstructure parameters, the macro-phenomena of the permeability coefficient change with maintenance duration of lime-ash soil are explained. It can be concluded that the percentage of surface area of lime-ash soil particle increases with duration, while the roundness of soil particles, the value of pore orientation, and the value of pore fractal dimension continuously decrease with duration. Thus, the variation rule of the permeability coefficient decline with the duration of lime-ash soil can be well illustrated by the change of the microstructure parameters.

**Key words:** lime-ash soil; permeability coefficient; microstructure; quantitative parameter

二灰土作为一种半刚性材料,具有较高的强度及水稳性,一般可作为路面的基层或者底基层,在公路建设中的应用较为广泛。目前,二灰土宏观物理力学特性的研究较为成熟<sup>[1-2]</sup>,但微细观层面的研究较少。为推动二灰土在工程中的应用,有必要加强其在微细观层面的研究。此外,针对二灰土的渗透特性和强度特性进行微细观方面的研究还有助于微细观理论的扩展和二灰土工程应用宏观现象研究的推动。

众所周知,土体微细结构的非连续性和非确定性决定了土体工程性质在宏观上的非连续性、不均匀性、各向异性和非确定性<sup>[3]</sup>。由于混合土体的微细结构十分复杂,获得的信息数据量也十分巨大,这

些信息数据的些许变化就有可能导致土体在宏观上的特性产生较大差异。因此只有准确获取微细结构量化参数,并对其进行分析,才能更好地揭示宏观现象。在进行常规的渗透试验后,运用岩土材料微细结构光学测试系统获取二灰土微细结构图像,采用适于提取二灰土微观结构量化参数的数字图像处理方法获取所需的微细结构参数,结合宏观和微观试验成果<sup>[4-5]</sup>,探讨二灰土渗透系数随龄期变化的特性。

## 1 常规渗透试验

### 1.1 试验材料参数

一般来说,二灰(石灰和粉煤灰)适用于稳定各

类亚砂土、亚黏土、粉类和黏土。试验采用黏土,按照 JTGE51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》规定的方法对所采用的试样进行化学分析试验。其基本物理性质指标为:石灰中有效 CaO 和 MgO 的质量成分达 63.8%,质量等级为 II 级;粉煤灰的主要成分中 SiO<sub>2</sub> 占 40%~58%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 占 12%~29%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 占 4%~18%,CaO 占 4%~7%,烧失量为 1%~10%,材料的各项性能指标满足路用要求。

## 1.2 渗透试验成果

### 1.2.1 常规渗透试验成果

在渗透试验中考虑了压实度和含水率对渗透系数的影响,从工程应用的角度看,试样压实度采用 93%,95%,97%,含水率采用最优含水率以及最优含水率±2% 这 3 种情况,进行不同压实度条件下的渗透试验。不同含水率时二灰土渗透系数与压实度的关系曲线见图 1。从图 1 可以看出,二灰土的渗透系数较小,数量级都是 10<sup>-6</sup> cm/s,这有利于阻止路基表面水分向路基渗透。随着压实度的增大,二灰土的渗透系数呈明显的减小趋势,这是因为渗透系数与孔隙大小关系密切:压实度增大时,孔隙减小,孔隙越小,孔隙中越易充满薄膜水,由于薄膜水具有很大的黏滞阻力,使得渗透系数减小。

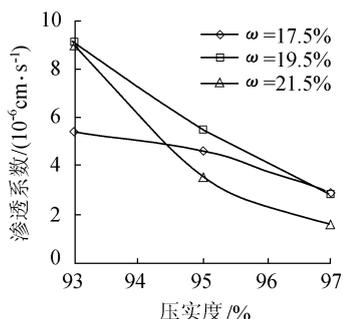


图 1 不同含水率下二灰土渗透系数与压实度的关系曲线

在压实度为 95% 时,初始含水率较低(17.5%)的二灰土的渗透系数较高,主要因为渗透系数与土粒基质吸力有关,含水率越低,基质吸力越大,阻碍了水的渗透。土中水的能量增大,导致土中水的势能变大,从而吸力梯度变大,吸水速率变大,土的吸水趋势的变化是土中基质吸力变化的宏观表现,故初始含水率低时,土体渗水速率增大;初始含水率大时,土体渗水速率减小。

随着压实度的增加,初始含水率较低(17.5%)的土样渗透系数减小的幅度最小,当压实度为 95% 时,其渗透系数居于三者之间,压实度达到 97% 时,已明显有成为三者较大值的趋势,说明渗透系数随压实度增大而减小的程度与初始含水率相关<sup>[6]</sup>,这也与相关研究成果相符。因为在小于最优含水量一侧,

土样稍硬,土粒结构呈絮凝状排列,孔隙率稍大,渗透系数也较大;相反,在大于最优含水量一侧,土样柔软,土粒结构易变化,土粒矿物成定向排列,孔隙率小,渗透系数也较小<sup>[7]</sup>。另一方面,二灰土在最优含水率(19.5%)时混合体的固、液、气三相处于相对稳固的平衡状态,外力难以打破这种平衡,使得混合体渗透系数比较接近于较小含水率状态的渗透系数。

### 1.2.2 考虑龄期影响的试验结果

二灰土的渗透性与龄期有密切的关系。为了研究二灰土的渗透性与龄期的关系,将制作好的不同压实度、不同含水率的二灰土试样在湿砂中分别养护 7 d,14 d,28 d,然后进行渗透试验,试验结果见图 2。由图 2 可以看出,3 种压实度下二灰土的渗透系数都随龄期的增大而减小,并且压实度越高,渗透系数越小,这是因为压实度增大,导致二灰土颗粒间孔隙减小,渗透性降低。随着龄期的增加,含有 Ca<sup>2+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 的溶液通过粉煤灰表面水化凝胶物间隙向里渗透,使火山灰反应继续发生,增大了混合料中凝胶物质的数量,填充了粉煤灰颗粒间的孔隙,使结构变得紧密。当龄期较小(7 d)时,曲线斜率较大,即二灰土的渗透系数随龄期增大而减小的幅度较大;龄期较大(14 d,28 d)时,二灰土的渗透系数随龄期增大而减小的幅度较小。

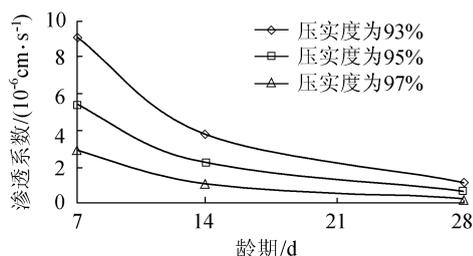


图 2 不同压实度下二灰土渗透系数与龄期的关系曲线(ω = 19.5%)

## 2 微观试验

### 2.1 试验参数及土样的制备

微观试验用材与宏观试验用材相同,在试样的制备方面,为了保持所观测的表面具有天然的结构,先制备常规三轴试验所用试样,然后将试样沿径向对半切割一定深度后掰开(尽量不要用机械模具,因为这样会改变土的原始结构),使试样断面中有一部分为新鲜断面,保持其真实的天然结构<sup>[8]</sup>。

### 2.2 微细结构图像的获取

采用河海大学岩土工程科学研究所微细结构实验室自行研制的岩土材料微细结构光学测试系统获取微细结构图像。相比采用扫描电镜获取微观图像,该测试系统具有制样简单、测试成本较低的优点,更

为重要的是该测试系统可以获取同一位置同一放大比例不同条件下的图像,这使获取的信息更具有可比性,从而使进一步的分析研究更为准确。

由于篇幅的原因仅以压实度  $P=95\%$  为例进行分析。图3为含水率为21.5%、压实度为95%时不同龄期下的二灰土微细结构图像。图4为龄期为7d,压实度为95%时不同含水率下的二灰土微细结构图像。每个试样均取2个特征区域进行拍摄。

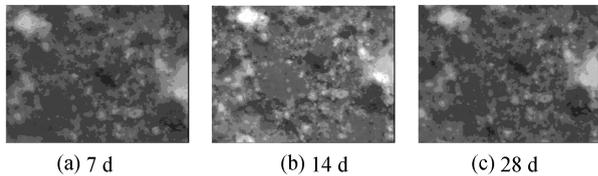


图3 不同龄期下的二灰土微细结构图像  
( $P=95\%$ ,  $\omega=21.5\%$ )

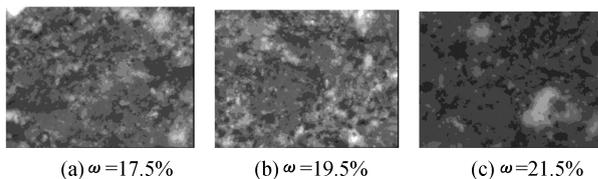


图4 不同含水率下的二灰土微细结构图像  
( $P=95\%$ ,  $T=7\text{d}$ )

### 2.3 图像处理

运用图像处理技术,对所获取的图像进行一系列的处理,包括采用由河海大学岩土工程科学研究所微细结构实验室自行编制的 wavelet 软件,结合小波变换的多分辨率技术进行图像的融合,以解决景深导致的图片模糊问题<sup>[9]</sup>;采用该实验室自行编制的 geoimage 软件结合最大方差取阈法进行图像分割,并提取微细结构量化参数。

将来自摄像机的图像进行数学变换后得到数字图像信息,数字图像是由一系列矩形排列的像素点构成,图像中每个像素点对应一个整数值,用以表示该点的亮度,即灰度。常见的256色或二值化图像,其灰度值分别为0~255和0~1。整个图像便由具有不同灰度值的像素点阵构成,该像素点阵的灰度值构成了一个离散函数  $f(i, j)$ 。把灰度图像转换成黑白图像,其中白色部分为颗粒,黑色部分为孔隙。这里采用最大方差法确定灰度阈值,从而区分颗粒和孔隙。如此,土体表面或内部不同介质的空间位置和分布特征便可以通过其对应数字图像的灰度值或色度的离散函数来准确体现<sup>[10]</sup>。

土体结构的形态要素主要包括孔隙形态、颗粒形态和联结形态。孔隙形态主要指孔隙面积、等效粒径、圆度、分布分维数、定向度等;颗粒形态主要指颗粒面积、等效粒径、圆度、分布分维数、定向度等;

联结形态主要反映颗粒间的接触联结情况,由于其界限较难确定,在图像处理过程中将其区域划入颗粒或孔隙中。孔隙分布分维数  $D_{bd}$  与颗粒分布分维数  $D_{pd}$  的计算方法如下<sup>[11]</sup>:采用 Sandbox 方法求取,假设一幅图像中含有多个颗粒,以边长为  $\varepsilon$  的正方形将图像分割成规格为  $(L/\varepsilon) \times (L/\varepsilon)$  的正交型格网,设格网中含有孔隙(或一部分)的格子总数为  $N(\varepsilon)$ ,那么如果改变  $\varepsilon$ ,使其在一定值域范围内由小到大变化,如  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ ,将得到相应的序列值  $N(\varepsilon_1), N(\varepsilon_2), \dots, N(\varepsilon_n)$ ,以  $\ln \varepsilon$  为横坐标,  $\ln N(\varepsilon)$  为纵坐标,则  $\ln N(\varepsilon) \sim \ln \varepsilon$  呈一条直线。直线方程为  $N(\varepsilon) = c\varepsilon^{-D}$ ,直线的斜率  $D$  即为分布分维数,则  $D_{bd} = -\lim(\ln N(\varepsilon)/\ln \varepsilon)$ 。

随着龄期的增长,二灰土内部结构不断发生变化,其颗粒形态和孔隙形态也随即发生变化,为了对二灰土微细结构演化过程有更为清楚的认识,以下就颗粒形态、孔隙形态以及联结形态随龄期增长而变化的规律进行探讨。

### 2.4 试验结果分析

#### 2.4.1 颗粒面积比例变化分析

颗粒面积比例是描述颗粒所占区域大小的最基本特征。压实度为95%时,不同含水率下二灰土颗粒面积比例与龄期的关系曲线见图5。从图5可以发现,不同含水率下试样颗粒面积比例都随着龄期的增长而增大,且颗粒面积比例与龄期的关系曲线近似为直线。颗粒面积比例随龄期增长而增长的主要原因是二灰土的 CaO 和 MgO 发生消解作用,生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和少量的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,这两种物质在土中水的作用下发生离解反应。离解反应产生  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  置换土颗粒吸附的  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  等离子,使得土颗粒迅速靠拢,小颗粒聚集成大颗粒并相互胶合,从而使颗粒的面积逐渐增大,同时二灰土中的  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在石灰的碱性激发下与水和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应,生成水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CAH)。而熟石灰结晶网格和水化硅酸钙、水化铝酸钙晶体在土微粒团外围形成一层稳定的保护

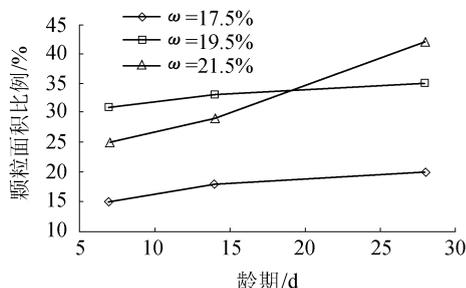


图5 不同含水率下二灰土颗粒面积比例与龄期的关系曲线

膜,并填充颗粒间的孔隙,减少了颗粒间的孔隙,这与试验所得结果是相符的。从图5还可以发现除含水率为17.5%时例外,其他含水率下二灰土面积增长率随龄期的增长有所减缓,这也说明随着龄期的增长,各种化学作用在逐步减弱。

#### 2.4.2 颗粒圆度演化特性分析

颗粒圆度指的是土中结构单元体的长轴与短轴之比,它可以表示结构单元体在二维平面中所展示的几何形状特征。不同含水率下二灰土颗粒圆度与龄期的关系曲线见图6。从图6可知,随着龄期的增长,颗粒圆度不断减小,这主要是由于二灰土中发生了团聚反应,伴随着凝胶物的生成,构成了凝胶团聚结构,使颗粒向着圆度降低的方向发展。

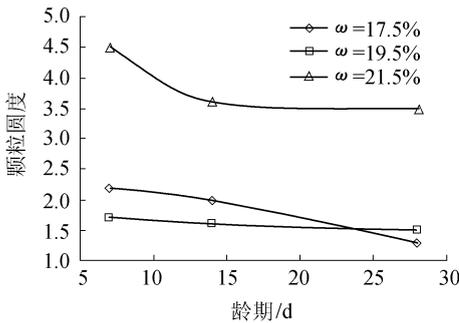


图6 不同含水率下二灰土颗粒圆度与龄期的关系曲线

#### 2.4.3 孔隙定向度变化分析

孔隙定向度可以反映各定向方位角区间内结构单元或孔隙出现的频率,分析土体微细结构中的孔隙在各个角度区间内的定向强度。一般来说定向度越小,孔隙排列的有序性越好。不同含水率下二灰土孔隙定向度与龄期的关系曲线见图7,由图7可以观察到二灰土的孔隙定向度随龄期的增长而下降,这是因为随着龄期的增长,二灰土中不断发生团聚反应,使得小颗粒聚集成大颗粒,进而扰乱了原有孔隙的定向度,使其定向性有所减弱。

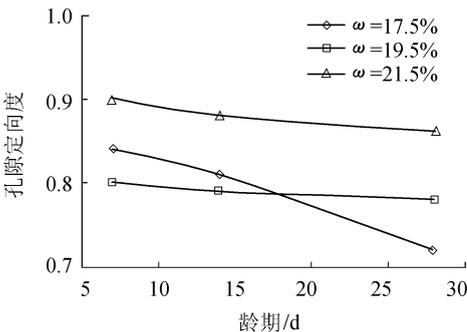


图7 不同含水率下二灰土孔隙定向度与龄期的关系曲线

#### 2.4.4 孔隙分布分维数变化分析

孔隙分布分维数主要用于定量孔隙整体在平面

上的分布。一般情况下,孔隙分布分维数越大,土中孔隙分布越分散,孔隙集团化程度越低。不同含水率下二灰土孔隙分布分维数与龄期的关系曲线见图8。从图8可以发现,随着龄期的增长,孔隙分布分维数逐渐降低,这是因为土颗粒发生了团聚反应,集团化程度增大,同时也导致孔隙分布相对较为集中。

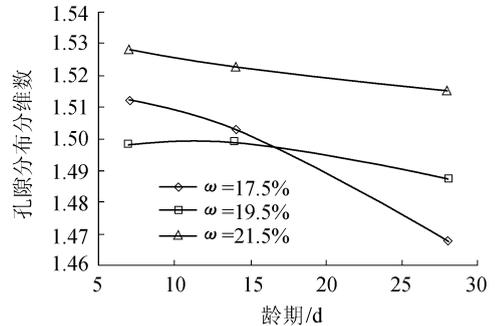


图8 不同含水率下二灰土孔隙分布分维数与龄期的关系曲线

### 3 结语

通过对二灰土不同龄期条件下微细结构特征参数变化规律的定量分析可知,随着龄期的增加,二灰土颗粒面积比例不断增大,颗粒圆度、孔隙定向度和孔隙分布分维数不断减小。宏观上二灰土的颗粒面积逐渐增大,必然导致相应孔隙面积的减小,微观上孔隙分布分维数的减小和定向度的减小,也必然伴随土颗粒分布分维数的增加和定向度的增大,颗粒面积的增加表明单位面积的土粒增大,说明土颗粒分解,分散分布,集团化程度降低,土体趋于紧密,土体渗透性降低。孔隙分布分维数的减小说明土颗粒集团化程度增大,其连通性逐步减小,相应的渗透性减弱。宏观上,土颗粒与孔隙的变化特征具有一定的关联性;微观上,孔隙分布变化趋势与颗粒分布变化趋势正好相反。

从这几方面因素来看,二灰土渗透系数必定随着龄期的增长而不断减小,这与宏观的试验成果是相符的。从试验结果还可以观察到在不同含水率条件下二灰土微观结构参数的变化趋势较为相似,但随着龄期的增长其变化幅度有所不同,说明不同的初始结构状态下渗透系数随龄期的变化规律有所不同,这正好验证了土体材料是一种复杂的非线性材料的结论。

微细结构试验中仅考虑了不同含水率下二灰土随龄期的变化情况,对不同压实度、不同含水率下的二灰土渗透系数随龄期的变化还有待于进一步的研究。

(下转第55页)

通过有限元软件 ANSYS 计算得出有限宽板模型的应力强度因子  $K_I = 4594.1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $K_{III} = 6123.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $J$  积分的数值为 2.54。

在线弹性情况下  $J$  积分等于应变能释放率<sup>[2]</sup>, 即  $G = 2.54 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ , 将  $K_I$  和  $K_{III}$  的值代入公式(15) 可得  $G_{I-III} = 2.33 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ 。

公式(15) 计算结果与有限元软件计算结果的相对误差为 8.2%, 考虑到所取的几何模型为有限宽板, 并非无限宽大板且 ANSYS 中的约束会稍微影响到物体的固有模态分布, 所以 8.2% 的相对误差可以认为在允许范围内。从而 I-III 复合型裂纹的  $K$  与  $G$  关系式的正确性得到有限元验证。

## 6 结 语

从断裂力学理论出发, 基于最大主应变准则以 I 型裂纹的  $K$  与  $G$  关系为基础, 进行了 III 型裂纹  $K$  与  $G$  的关系推导, 并在假设分支裂纹趋近于零的情形下对 I-III 复合型裂纹的  $K$  和  $G$  关系式进行推导和分析, 并利用有限元软件对关系式进行验证。

由于 I-III 复合型裂纹是空间问题, 仅利用最大主应变准则和有限元软件进行验证是不够的, 还有许多方面有待做进一步的研究。

### 参考文献:

[1] 徐道远. 坝体混凝土损伤-断裂模型[J]. 大连理工大学

(上接第 46 页)

### 参考文献:

- [1] 杨广庆. 二灰改良土在高速铁路路基中的应用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(6): 28-31.
- [2] 黄婉荣, 郭志平. 填埋场压实黏土衬垫渗透系数的影响因素综述[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(2): 19-21.
- [3] 洪宝宁, 胡昕, 周宇泉, 等. 三轴应力下黏性土微细结构试验[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6): 47-50.
- [4] 刘敬辉. 岩土体微细结构定量分析及试验方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [5] DUDOIGNON P, PANTET A, CARRARA L, et al. Macro-micro measurement of particle arrangement in sheared kaolinitic matrices[J]. Geotechnique, 2001, 51(6): 493-499.
- [6] BENSON C H, TRAST J M. Hydraulic conductivity of thirteen compacted clay[J]. Clays and Clays Minerals, 1995, 43(6): 669-681.
- [7] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测试应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 160-164.

学报, 1997, 37(1): 1-6.

- [2] 程新, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 31-40.
- [3] 吴力宁, 刘金喜. 各向异性材料 III 型裂纹问题的基本解[J]. 石家庄铁道学院学报, 1997, 10(4): 84-87.
- [4] 倪新华, 刘协权, 马英忱. I-III 混合型裂纹相变增韧分析[J]. 内蒙古工业大学学报, 1997, 16(3): 68-72.
- [5] 田常海, 任明法, 陈浩然. 复合型裂纹脆断主应变因子准则[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(2): 139-143.
- [6] KOO J M, CHOY Y C. A new mixed mode fracture criterion: maximum tangential strain energy density criterion[J]. Engin Fract Mech. 1991, 39(3): 433-449.
- [7] HEO S P, YANG W H. Mixed-mode stress intensity factors and critical angles of cracks in bolted joints by weight function method[J]. Archive of Applied Mechanics, 2002, 72(2): 96-106.
- [8] KRISHNAN G R, ZHAO X L, ZAMAN M, et al. Fracture toughness of a soft sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1998, 35(6): 695-710.
- [9] 周晓军, 鲜学福, 尹光志. 岩石 III 型裂纹尖端应力场及塑性区的研究[J]. 西部探矿工程, 1997, 9(4): 38-40.
- [10] BUCHHOLZ F G, CHERGUI A, RICHARD H A. Fracture analyses and experimental results of crack growth under general mixed mode loading conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(4): 455-468.

(收稿日期: 2011-12-28 编辑: 周红梅)

- [8] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 黏性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [9] 胡昕, 洪宝宁, 周宇泉. 三轴应力下黏性土的微结构及其演化规律[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 6-11.
- [10] 胡昕, 洪宝宁, 周宇泉, 等. 三轴压缩条件下黏性土微细结构随荷载变化动态调整的定量研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(6): 57-62.
- [11] 洪宝宁, 刘鑫. 土体微细结构理论与试验[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(收稿日期: 2011-10-31 编辑: 骆超)

