

# 粉质粘土图像纹理参数的多元线性回归 分析及其工程应用

翟文信<sup>1</sup>, 徐金明<sup>1</sup>, 张学明<sup>2</sup>, 谢建强<sup>3</sup>

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 都市置业(中国), 上海 200001;

3. 江苏省江阴市泰昌房地产开发有限公司, 江阴 214400)

**摘要:** 由二维小波技术分析粉质粘土图像的纹理特征, 获得小波能量参数与粉质粘土工程性质指标的多元线性回归方程。在考虑拍摄条件下(光照、拍摄距离等), 现场勘查并拍摄粉质粘土照片。将这些彩色照片转化为灰度图, 在二尺度小波分解水平下得到反映粉质粘土图像纹理特征的9个能量参数, 并将这些参数与对应土样的11个工程性质指标进行多元线性回归。在此基础上对2个土样的工程性质指标进行了预测。结果表明, 本文提出的粉质粘土的小波能量参数与传统工程性质指标具有较好的对应关系, 可以为现场快速确定粉质粘土的工程性质指标提供一个新的途径。

**关键词:** 粉质粘土; 纹理; 小波变换; 能量参数; 多元线性回归分析

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)01-0090-06

## 1 引言

粉质粘土图像具有明显的纹理特征。随着计算机技术与数字图像技术的快速发展, 国内外许多学者对图像的纹理特征进行了大量研究。Haralick等<sup>[1]</sup>基于图像纹理特征对5类砂岩的显微照片和8种地物的航拍照片进行了分类分析。陈玲等<sup>[2]</sup>将改进的图像纹理检索方法应用于矿物识别。韩彦芳和施鹏飞<sup>[3]</sup>利用小波变换和灰度共生矩阵对液晶显示器的纹理损伤图像进行了检测研究。唐玮等<sup>[4]</sup>采用分形和灰度共生矩阵方法提取不锈钢材料断口的纹理信息, 对4个端口形貌进行了定量分析。王辉和王克奇<sup>[5]</sup>用灰度共生矩阵方法提取木材纹理特征, 对木材作了分类分析。李亚春等<sup>[6]</sup>对小波变换在图像纹理分析中的研究和进展情况作了较系统的论述。李兰<sup>[7]</sup>通过对黄土微观结构电子显微镜照片的研究提取了一系列土特性的量化微观结构指标, 并分析了这些指标与黄土动力试验指标之间的关系。高大钊<sup>[8]</sup>从实际工程的需要、土质学的原理、国外有关标准的规定等方面讨论关于目力鉴别土的意义、鉴别的理论依据以及鉴别方法。

本文以长江流域某工程第四层粉质粘土图像为例, 采用二维小波分解技术对粉质粘土图像进行二尺度分解, 提取反映图像纹理特征的小波能量参数。将这些能量参数与对应土样的工程性质指标进行多元线性回归分析, 利用得到的回归方程对土样的工程性质指标进行预测。这一分析方法为快速确定粉质粘土工程性质指标提供一个新途径。

## 2 图像获取及数字图像技术基础

### 2.1 图像获取

粉质粘土图像由长江流域某工程勘察现场拍摄得到。拍摄时, 以SH-30-2型钻机取原状土样, 特制5cm×5cm正方形标尺(中间镂空)作为参照物, 在自然光照条件下用SONY DSC-W5型相机平行土样截面、距离5cm拍摄照片。截取方尺内的图像, 以便进行分析。

为了减少照片获取时对粉质粘土图像纹理特征的随机干扰, 勘察现场截取土样及拍摄照片时应注意一些事项: 切取土样时要一次性截取, 且要确保作为弓弦的钢丝要特细、顺直, 以避免产生多余的纹理; 若取出原状土样太软, 可能会在切取土样时截面变形, 从而造成纹理特征的变化, 此时可以在背阴、保持水分条件下养护土样, 待手触土样不留痕时再切取土样; 若拍摄时不能涵盖所有的原状土样截面, 选择的拍摄区域相对于粉质粘土截面应具有代表性等。

### 2.2 数字图像技术基础

得到粉质粘土RGB格式的图像(R、G、B分别表示

收稿日期: 2008-05-19; 修订日期: 2008-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(40572162); 上海市教委科技创新项目(09YZ39)

作者简介: 翟文信(1980-), 男, 硕士生, 主要从事岩土工程的科研工作。

E-mail: zhail@163.com

红色、绿色、蓝色)大小为  $M \times N \times 3$  像素( $M$ 和 $N$ 均为整数)。为了后续处理方便,首先将这些图像转化为灰度级为0~255的灰度图像,图1是一幅典型粉质粘土的灰度图像。

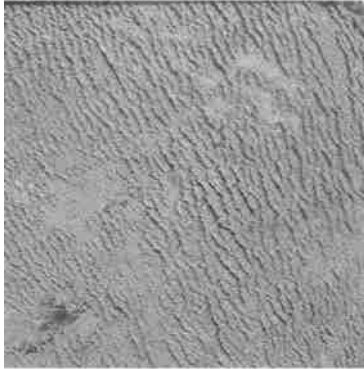


图1 典型粉质粘土的灰度图像

Fig. 1 A gray image of typical silty clay

图1相应的灰度函数为  $f(m, n)$ <sup>[9]</sup> 为:

$$f(m, n) = \begin{bmatrix} f(1, 1) & f(1, 2) & \dots & f(1, N) \\ f(2, 1) & f(2, 2) & \dots & f(2, N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M, 1) & f(M, 2) & \dots & f(M, N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N.$

式中: $m, n$ ——图像中像素点的直角坐标值;

$f(m, n)$ ——位置 $(m, n)$ 处的灰度值。

### 3 小波变换

#### 3.1 小波变换基础

根据 Mallat<sup>[10]</sup>塔式分解原理,选用二进正交小波基对粉质粘土图像进行多尺度分解。在每一尺度分辨率空间中,图像分解成4个原图像四分之一大小子图:

(1)子图  $LL$ ; (2)子图  $LH$ ; (3)子图  $HL$ ; (4)子图  $HH$  (每一次分解得到1个低频分量和3个高频分量,为表述方便,文中直接简称为子图)。这4幅子图具有如下性质:子图  $LL$  在水平方向和垂直方向都具有低通特性,集中了原始图像的主要低频成分,反映了图像的近似概貌信息;子图  $LH$  在水平方向具有低通特性而在垂直方向具有高通特性,较好保留了原始图像的水平边界信息;子图  $HL$  在垂直方向具有低通特性而在水平方向具有高通特性,较好保留了垂直边界信息;子图  $D$  在水平方向和垂直方向都具有高通特性,仅保留零散的边界点。对低频子图递归分解,可得到下一尺度的4个分量,依次进行分析便得到图像的  $k$  尺度小波

分解分量,图2为  $k$  尺度小波分解示意图。

#### 3.2 小波分解的能量参数

对原图像进行  $K$  尺度小波分解,得到不同分解尺度下的子图像,  $A_0$  为低频子图,  $H_k$  为水平高频子图,  $V_k$  为垂直高频子图,  $D_k$  为对角高频子图。图像  $f(m, n)$  的平均能量如下<sup>[11]</sup>:

$$e = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f^2(m, n) \quad (2)$$

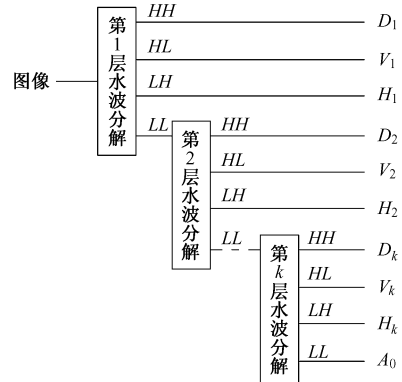


图2  $k$  尺度二维小波分解示意图

Fig. 2 Two dimensional duple discrete wavelet decomposition at  $k$  scale

根据公式(2)可以计算出图像的各子图  $A_0$ 、 $H_k$ 、 $V_k$ 、 $D_k$  的能量  $E_0$ 、 $E_{H, k}$ 、 $E_{V, k}$ 、 $E_{D, k}$ 。正交分解后各子图像的总能量为  $E$ :

$$E = E_0 + \sum_{k=1}^k E_{H, k} + \sum_{k=1}^k E_{V, k} + \sum_{k=1}^k E_{D, k} \quad (3)$$

分解后的低频子图的能量百分比由式(4)求得:

$$P_0 = 100 \times E_0 / E \quad (4)$$

各高频子图像的能量百分比由式(5)求得:

$$P_{H, k} = 100 P_{V, k} = 100 \times E_{V, k} / E \quad (5)$$

$$P_{D, k} = 100 \times E_{D, k} / E$$

小波能量分布比例是同一尺度下某一特定细节子图像对所有高频子图的能量比重与方向特性。小波能量分布比例由式(6)求得:

$$B_{H, k} = \frac{E_{H, k}}{E_{H, k} + E_{V, k} + E_{D, k}}$$

$$B_{V, k} = \frac{E_{V, k}}{E_{H, k} + E_{V, k} + E_{D, k}} \quad (6)$$

$$B_{D, k} = \frac{E_{D, k}}{E_{H, k} + E_{V, k} + E_{D, k}}$$

由小波正交分解性质可以发现,  $P_0$ 、 $P_{D, k}$ 、 $B_{D, k}$  是与图像拍摄角度无关的量;但是  $P_{H, k}$ 、 $B_{H, k}$  与图像纹理的水平边缘信息有关,而  $P_{V, k}$ 、 $B_{V, k}$  与垂直边缘信

息有关,显然要受到具体拍摄角度的影响。为了消除这种影响,取 $(P_{H,k} + P_{V,k})/2$ 、 $(B_{H,k} + B_{V,k})/2$ 作为粉质粘土的图像特征值。

### 3.3 滤波长度的确定和分解尺度的选择

选择滤波长度为 2、4、6、8、10,对土样图像进行 2 尺度分解,考察利用不同滤波长度分解的低频子图像可看出。不同滤波长度下分解的低频图像均比较清晰,但是滤波长度为 6、8、10 时低频子图像的边界相应很明显,而滤波长度为 2、4 时效果要好得多(图 3)。故对于粉质粘土,滤波长度选用 2 即可。

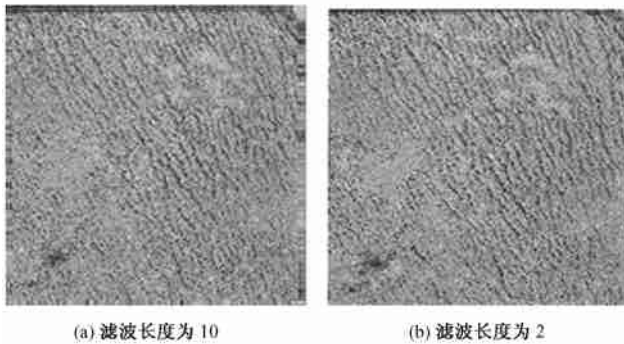


图 3 不同滤波长度时的小波分解图像

Fig. 3 Sub-image by wavelet decomposition while different filter length

小波分解的尺度越多,总体特征参数会越多,理论上精确度越高。但在实际应用中,随着分解尺度的增大,边界像素和超出边界的像素增多,会造成伪纹理的出现,反而使特征值的可信度降低。对土样进行 5 尺度 sym 2 小波正交分解,利用高频子图能量的均值和标准差来确定粉质粘土图像的最佳分解尺度<sup>[3]</sup>。样本能量值的均值可以反映信息量的多少,而标准差可以反映样本偏离总体平均数的程度和样本间纹理差异的大小,因此当某一尺度上的各分频能量的标准差最大时,即反映样本在此分解尺度上的纹理间差异。粉质粘土图像在不同分解尺度下高频子图 H、V、D 的能量均值和标准差见表 1。可见,子图 H、V 的能量均值和标准差在尺度 2 和 3 之间有个拐点,说明图像经小波第一、二次分解,其纹理信息随分解次数的增加而逐渐得以放大体现,当分解到第二层时纹理信息得到了充分体现,此时标准差达到最大,纹理差异体现最明显;随后再分解时,随尺度的增高,标准差反而降低,反映样本纹理的能力已大为减弱。子图 D 的能量均值和标准差在第三分解尺度 3 时达到最大。综合考虑,本文对粉质粘土图像行进 2 尺度小波分解。

表 1 不同分解尺度上细节子图能量值与标准差

Table 1 The mean value and standard deviation of detail images' energies at different scales

尺度数	子图 H 能量值		子图 V 能量值		子图 D 能量值	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	53.96	46.23	49.56	82.33	3.73	6.88
2	135.91	148.76	114.70	203.05	40.91	88.56
3	119.26	129.22	100.68	161.44	65.21	123.83
4	78.61	96.18	103.26	150.04	61.40	110.14
5	34.74	68.63	79.08	112.47	57.04	32.89

### 3.4 数字特征参数提取及分析

根据上述分析,对粉质粘土图像进行 2 尺度小波正交分解,提取消除拍摄角度影响的图像纹理的小波能量参数,为便于后续分析,小波能量参数表示为 $\{g_1, g_2, g_3, \dots, g_9\}$ 。(其中  $g_1$  表示低频能量百分比  $P_0$ ,  $g_2$  表示第 1 分解尺度下水平、垂直高频能量平均百分比  $(P_{H,1} + P_{V,1})/2$ ,  $g_3$  表示第 2 分解尺度下水平、垂直高频能量平均百分比  $(P_{H,2} + P_{V,2})/2$ ,  $g_4$  表示第 1 分解尺度下的对角高频能量平均百分比  $P_{K,1}$ ,  $g_5$  表示第 2 分解尺度下的对角高频能量平均百分比  $P_{K,2}$ ,  $g_6$  表示第 1 分解尺度下的水平、垂直高频能量占有所有细节子图能量的平均百分比  $(B_{H,1} + B_{V,1})/2$ ,  $g_7$  表示第 2 分解尺度下的水平、垂直高频能量占有所有细节子图能量的平均百分比  $(B_{H,2} + B_{V,2})/2$ ,  $g_8$  表示第 1 分解尺度下的对角高频能量占有所有细节子图能量百分比  $B_{D,1}$ ,  $g_9$  表示第 2 分解尺度下的对角高频能量占有所有细节子图能量百分比  $B_{D,2}$ )。表 2 列出了长江流域某层粉质粘土 16 个土样图像的小波能量参数。

### 3.5 光照、拍摄距离对小波能量参数的影响

拍摄照片时的光照条件、拍摄距离对小波能量参数具有一定的影响,具体何种光照条件和拍摄距离比较好,数字图像处理技术中还没有统一。本文对光照、背阴条件下距离土样 5cm、10cm、15cm、20cm 拍摄的粉质粘土图像的能量参数进行了比较(图 4、图 5)。

由图 4 可以看出,光照、背阴条件下的小波能量参数  $g_1$  变化较大,并随着拍摄距离的增大而逐步增大,在拍摄距离为 15cm 时出现拐点。由图 5 可以看出,光照条件下小波能量参数  $g_2 \sim g_9$  随拍摄距离逐步减小,在拍摄距离为 15cm 时出现拐点。背阴条件下小波能量参数  $g_2 \sim g_9$  也随拍摄距离逐步减小,由于篇幅有限,本文仅选用的是自然光照条件下距离土样 5cm 拍摄的粉质粘土图像。

表 2 消除拍摄角度影响后的粉质粘土图像小波能量参数

Table 2 Texture characteristics of different photographs eliminated the effects of angle

图像编号	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$	$g_7$	$g_8$	$g_9$
1	97.7935	0.1697	0.876	0.0066	0.1084	0.4905	0.4709	0.019	0.0583
2	98.3157	0.1358	0.662	0.0054	0.0833	0.4902	0.4704	0.0197	0.0592
3	99.1048	0.0742	0.3453	0.0035	0.0526	0.4884	0.4646	0.0231	0.0708
4	99.0176	0.0867	0.37	0.004	0.0649	0.4887	0.4597	0.0226	0.0807
5	98.9663	0.0853	0.3966	0.0039	0.0659	0.4888	0.4616	0.0223	0.0767
6	97.1255	0.2953	1.0139	0.0157	0.2403	0.487	0.447	0.0259	0.1059
7	97.6857	0.2127	0.8547	0.01	0.1695	0.4885	0.4549	0.0231	0.0902
8	94.964	0.5877	1.6958	0.0351	0.4338	0.4855	0.4433	0.029	0.1134
9	99.1624	0.0661	0.3266	0.0032	0.049	0.488	0.4651	0.024	0.0698
10	98.6874	0.1017	0.5185	0.0041	0.0681	0.4902	0.4692	0.0197	0.0617
11	98.9349	0.0839	0.4159	0.0037	0.0618	0.4893	0.4654	0.0215	0.0692
12	97.1169	0.373	0.9075	0.0269	0.2952	0.4826	0.43	0.0347	0.1399
13	99.2025	0.1056	0.2464	0.008	0.0855	0.4818	0.4261	0.0364	0.1479
14	98.8244	0.1061	0.446	0.0042	0.0671	0.4902	0.465	0.0196	0.0699
15	98.5066	0.1811	0.4876	0.0114	0.1446	0.4847	0.4354	0.0305	0.1292
16	98.7449	0.1371	0.4407	0.0077	0.0917	0.4863	0.4529	0.0274	0.0943

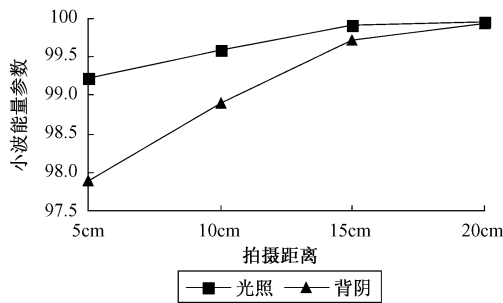


图 4  $g_1$  在自然光照、背阴条件的变化

Fig. 4 The change of  $g_1$  under different illumination intensity

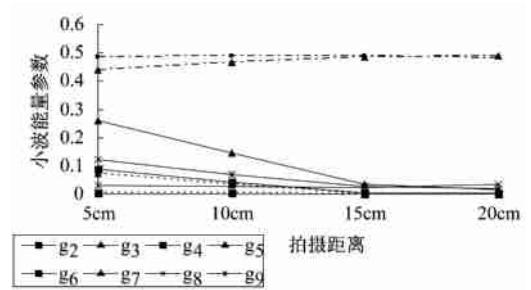


图 5  $g_2 \sim g_9$  在自然光照条件下随拍摄距离的变化

Fig. 5 The change of  $g_2 \sim g_9$  along with distance between the camera lens and the section of silty clays under light intensity

#### 4 多元线性回归

以表 2 中前 14 幅图像的小波能量参数作为自变量(第 15、16 组参数仅作为验证样本),以相应土样的

$$W_0 = (-0.46g_1 - 0.84g_2 - 0.99g_3 - 1.44g_4 - 0.2g_5 + 16.23g_6 + 75.6g_7 + 6g_8 + 37.8g_9) \times 1000 \quad R^2 = 0.78$$

$$r_o = (0.05g_1 + 0.09g_2 + 0.12g_3 + 0.24g_4 + 0.02g_5 - 1.36g_6 - 9.47g_7 - 0.47g_8 - 4.73g_9) \times 1000 \quad R^2 = 0.74$$

$$W_L = (-0.06g_1 - 0.01g_2 - 0.14g_3 - 0.14g_4 - 0.15g_5 - 2.81g_6 + 15.34g_7 - 2.27g_8 + 7.79g_9) \times 1000 \quad R^2 = 0.76$$

$$W_P = (-0.08g_1 - 0.09g_2 - 0.17g_3 + 0.05g_4 - 0.11g_5 + 1.55g_6 + 14.18g_7 + 0.2g_8 + 7.13g_9) \times 1000 \quad R^2 = 0.83$$

$$a_{0.1-0.2} = (-0.01g_1 - 0.01g_2 - 0.01g_3 - 0.01g_4 - 0.01g_5 - 0.54g_6 + 1.93g_7 - 0.33g_8 + 0.97g_9) \times 1000 \quad R^2 = 0.53$$

$$Es_{0.1-0.2} = (0.04g_1 + 0.08g_2 + 0.09g_3 - 0.04g_4 + 0.03g_5 + 4.69g_6 - 13.4g_7 + 2.94g_8 - 6.75g_9) \times 1000 \quad R^2 = 0.55$$

工程性质指标作为因变量(表 3 中前 14 组参数),进行多元线性回归分析,得到小波能量参数与工程性质指标的系列关系式:

$$\begin{aligned}
 G &= (0.05g_1 + 0.39g_2 + 0.12g_3 + 0.7g_4 - 0.5g_5 + 3.48g_6 - 7.92g_7 + 0.44g_8 - 3.49g_9) & R^2 &= 0.78 \\
 S_r &= (-0.05g_1 - 0.15g_2 - 0.1g_3 + 0.38g_4 - 0.01g_5 + 8.98g_6 + 0.94g_7 + 3.77g_8 + 0.56g_9) \times 1000 & R^2 &= 0.74 \\
 e_o &= (-0.01g_1 - 0.02g_2 - 0.03g_3 - 0.05g_4 - 0.01g_5 + 0.43g_6 + 2.07g_7 + 0.16g_8 + 1.03g_9) \times 1000 & R^2 &= 0.76 \\
 I_p &= (0.02g_1 + 0.08g_2 + 0.03g_3 - 0.18g_4 - 0.04g_5 - 4.36g_6 + 1.16g_7 - 2.47g_8 + 0.66g_9) \times 1000 & R^2 &= 0.70 \\
 I_L &= (-0.03g_1 - 0.06g_2 - 0.06g_3 - 0.1g_4 + 0.0004g_5 + 1.3g_6 + 4.41g_7 + 0.56g_8 - 2.2g_9) \times 1000 & R^2 &= 0.79
 \end{aligned}$$

(7)

为了验证系列公式(7)的有效性,选取表2中的第15、16组小波能量参数代入系列公式(7),并将计算结果与验证样本的土工试验成果比较(表3中的第15、16组数据),得到表4。

表3 土工试验成果

Table 3 Geotechnical testing results for different silty clays

编号	含水量 $W_0(\%)$	重度 $\gamma_0(\text{kN/m}^3)$	液限 $W_L(\%)$	塑限 $W_P(\%)$	压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ ( $\text{MPa}^{-1}$ )	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ (MPa)	比重 $G$	饱和度 $S_r(\%)$	孔隙比 $e_0$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
1	26.5	19.4	34.2	19.6	0.4	4.5	2.73	97	0.74	14.6	0.47
2	30.9	18.8	34.6	20.2	0.4483	4.1551	2.73	98	0.86	14.4	0.74
3	34.7	18.1	33.6	20.3	0.4839	4.0995	2.72	96	0.98	13.3	1.08
4	37.8	18	35	21.5	0.5111	3.9925	2.72	99	1.04	13.5	1.21
5	26	19.4	33.6	20.2	0.3086	5.611	2.72	97	0.73	13.4	0.43
6	32.7	18.5	32.4	18.5	0.4569	4.1851	2.72	98	0.91	13.9	1.02
7	34.4	18.3	33	20.5	0.4456	4.3932	2.72	98	0.96	12.5	1.11
8	33.1	18.3	33.9	22.5	0.3875	5.0029	2.72	96	0.94	11.4	0.93
9	29.8	18.8	33.4	19.8	0.3171	5.8035	2.72	96	0.84	13.6	0.74
10	39.6	17.7	37	21.9	0.664	3.1776	2.73	97	1.11	15.1	1.17
11	33.7	18.5	33.4	19.5	0.35	4.5	2.72	99	0.93	13.9	1.02
12	31.4	18.6	33.4	21.7	0.3962	4.7532	2.72	97	0.88	11.7	0.83
13	22.4	19.9	33.5	19.4	0.2308	7.1293	2.73	95	0.65	14.1	0.21
14	35.9	18.2	37	21.9	0.5195	3.8457	2.73	98	1	15.1	0.93
15	33.6	18.4	36.6	21.2	0.5522	3.5179	2.73	97	0.94	15.4	0.81
16	35.2	18.1	36.8	22.1	0.554	3.6072	2.73	96	1	14.7	0.89

表4 土工试验结果与预测结果对比

Table 4 The correlation table between geotechnical testing results and predicted value

检验样本	含水量 $W_0(\%)$	重度 $\gamma_0(\text{kN/m}^3)$	液限 $W_L(\%)$	塑限 $W_P(\%)$	压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ ( $\text{MPa}^{-1}$ )	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ (MPa)	比重 $G$	饱和度 $S_r(\%)$	孔隙比 $e_0$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$	
1	实际值	33.6	18.4	36.6	21.2	0.5522	3.5179	2.73	97	0.94	15.4	0.81
	预测值	32.64	18.56	35.74	21.20	0.50	4.27	2.72	97.05	0.91	14.53	0.79
	差值	0.96	-0.16	0.86	0.00	0.06	-0.76	0.01	-0.05	0.03	0.87	-0.02
	误差率	0.03	-0.01	0.02	0.00	0.10	-0.21	0.00	0.00	0.03	0.06	-0.03
2	实际值	35.2	18.1	36.8	22.1	0.554	3.6072	2.73	96	1	14.7	0.89
	预测值	32.57	18.46	35.74	21.45	0.45	4.76	2.72	95.63	0.92	14.28	0.78
	差值	2.63	-0.36	1.06	0.65	0.10	-1.16	0.01	0.37	0.08	0.42	-0.11
	误差率	0.08	-0.02	0.03	0.03	0.23	-0.24	0.00	0.00	0.08	0.03	-0.14

由系列公式(7)可以看出,本文选用的9个反映图像纹理特征的小波能量参数与11个工程性质参数之间的相关性还是比较好的。 $a_{0.1-0.2}$ 和 $E_{s0.1-0.2}$ 的拟合优度稍低(小于0.6),其他9个工程性质参数的拟合优度达到0.70~0.83。由表4可以看出,由回归公式计算出的2组土样的 $a_{0.1-0.2}$ 、 $E_{s0.1-0.2}$ 和 $I_L$ 与土工试验数值误差率大于10%,其余参数的误差率在8%以内(含8%)。

### 5 结论

(1)本文选取的粉质粘土图像纹理特征参数和工程性质参数分别为9个和11个,数字图像处理中所用纹理特征参数个数通常大于9,描述粉质粘土工程性质参数的个数也远大于11。结合其它图像纹理分析方法可以对粉质粘土的工程性质参数做进一步分析。

(2)以长江流域某工程第四层粉质粘土图像为例,提出了通过数字图像处理中的纹理特征参数来研究粉

质粘土工程性质指标的一种新方法。与传统的土工试验分析方法相比,此方法可以极大降低土工试验耗用的劳动时间和劳动强度,从而为现场快速确定粉质粘土工程性质指标提供一个新途径。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Texture features for image classification [ J ]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1973, 3(6): 610—621.
- [ 2 ] 陈玲,沈红标,李咸伟,等.改进的图像纹理检索方法在矿石识别中的应用[ J ].中国图像图形学报, 2006, 11(11): 1700—1703.
- [ 3 ] 韩彦芳,施鹏飞.基于多层小波和共生矩阵的纹理表面缺损检测[ J ].上海交通大学学报, 2006, 40(3): 425—430.
- [ 4 ] 唐玮,朱华,王勇.分形和空间灰度共生矩阵联合评价断面地貌研究[ J ].中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 530—534.
- [ 5 ] 王辉,王克奇.基于主分量分析木材纹理特征的提取[ J ].森林工程, 2006, 22(6): 14—16.
- [ 6 ] 李亚春,夏德深,徐萌.小波分析在图像纹理分析中的研究进展[ J ].计算机工程与应用, 2005(35): 47—51.
- [ 7 ] 李兰.黄土微结构的实验研究[ J ].水文地质工程地质, 2004, 31(5): 17—19.
- [ 8 ] 高大钊.关于土的目力鉴别[ J ].工程勘察, 2003(1): 1—4.
- [ 9 ] 冈萨雷斯.数字图像处理[ M ].阮秋琦(等译).北京:电子工业出版社, 2006: 179—210.
- [ 10 ] Mallat. A Theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation [ J ]. IEEE Trans, 1989, 11(7): 674—693.
- [ 11 ] 唐远炎,王玲.小波分析与文本文字识别[ M ].北京:科学出版社, 2004: 273—277.
- [ 12 ] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[ M ].北京:国防工业出版社, 2004: 20—24.
- [ 13 ] 于海鹏.基于数字图像处理学的木材纹理量化研究[ D ].东北林业大学博士学位论文, 2005: 80—81.

## Multivariate linear regression and applications of textural parameters of silty clay images

ZHAI Wen-xin<sup>1</sup>, XU Jin-ming<sup>1</sup>, ZHANG Xue-ming<sup>2</sup>, XIE Jian-qiang<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Multi Luck Real Estate Development Co. Ltd. (China), Shanghai 200001, China;

3. Taichang Real Estate Co. Ltd., Jiangsu Province, Jiangyin 214400, China)

**Abstract:** By two-dimensional wavelet decomposition, the photograph texture of silty clay is analyzed in this paper and the multiple linear regression relations of the wavelet energy parameters and the traditional engineering properties of silty clays are constructed. During the image analysis, considering the requirements (such as light intensity, the distance between the camera lens and the section of silty clays) in taking images, colorful photographs of the clay were captured by a commercial camera in field investigation and transformed into grayscale images. The nine energy parameters, considering the elimination of the unfavorable influences of capturing condition, were obtained from the images. A regression technique was applied to estimate the relations between the nine energy parameters and the eleven traditional engineering properties of silty clays, traditional engineering properties in two samples are calculated out by the multiple linear regression equations. The results show that these relations are much satisfactory. So the method developed in this paper may provide a new technique for quickly examining the engineering properties of silty clay in field.

**Key words:** silty clay; texture; wavelet transform; energy parameters; multiple linear regression

责任编辑:张明霞