

# 基于 Matlab 对强夯法处理黄土湿陷性的 微观结构研究

苗得雨, 马富丽, 王敏, 白晓红

(太原理工大学建筑与土木工程学院, 太原 030024)

**摘要:**黄土的湿陷性与其微观结构有极大关系,土体的物理力学性状也很大程度上受其微观结构影响。针对湿陷性黄土微观研究中的问题,对山西省平阳高速中强夯法处理湿陷性黄土进行微观层面上的定性和定量分析。从土样提取与制备到 SEM 图像扫描,开展了详实的探讨。针对 SEM 图像的特征及其处理过程中存在的问题,使用 Matlab 对图像预处理中去除亮度差异背景,对比度增强,降噪做了对比分析,通过预处理可以对图像信息在采集阶段较为精确地进行统计计算分析,对比分析了强夯前后的孔隙数量及面积分布、定向特征、形状特征等参数,对土体 SEM 图像处理和强夯法消除湿陷性机理做较为深入的探讨,为工程建设提供参考依据。

**关键词:**湿陷性黄土;强夯法;微观结构;Matlab;SEM 图像;阈值

**中图分类号:** TU444

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-2783(2013)05-0385-06

## Microstructural research using Matlab on collapsible loess by dynamic compaction method

Miao Deyu, Ma Fuli, Wang Min, Bai Xiaohong

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Collapsibility of loess is related to its microstructure. The physical and mechanical properties of soil are influenced by its microstructure to a large extent. For the problem of collapsibility of loess in microscopic study, we did the qualitative and quantitative analyses of collapsible loess at a microscopic level. The samples that underwent dynamic compaction were taken from Pingyang Highway in Shanxi. Extraction and preparation of soil samples were introduced and scanning electron microscope (SEM) images were obtained. For the features and problems found in the SEM images processing, we applied Matlab for comparative analysis of removal of background brightness difference, contrast enhancement and noise reduction in image processing. The image preprocessing helped for more accurate statistical calculation during the image information acquisition process. Comparing characteristics of pore size and size distribution, directional and shape parameters before and after the dynamic compaction, we further discuss the SEM image processing and the mechanism that uses dynamic consolidation method to remove collapsibility, attempting to provide a reference for engineering construction.

**Key words:** collapsible loess; dynamic compaction; microstructure; Matlab; SEM image; threshold

强夯法是以一定重量重锤以规定落距对地基施加冲击振动,在一定范围内能提高土体强度,降低孔隙率等<sup>[1-2]</sup>。可以消除或者部分消除其湿陷性。20世纪70年代强夯法引入到我国,因其适应范围广、造价低、效果好的优势不断得到技术推广和完善。而随着技术的不断进步,工程土体性质在微观层面上的研究不断得到发展和应用<sup>[3-4]</sup>。土的微观结构是展现土体物理本质的重要依据,土体宏观工程物理性质是受土体微观结构及其变化所决定的<sup>[2]</sup>。而关于土样 SEM 图像处理一直是微观定性分析的一个难题。

笔者针对平阳高速湿陷性路基段的强夯法处理,在强夯前后,通过 Matlab 对土体 SEM 图像处理,对微观结构进行定性和定量分析<sup>[5]</sup>,结合力学指标,对土体 SEM 图像处理和强夯法消除湿陷性机理

做了较为深入的探讨,为科研和工程建设提供参考依据。

## 1 工程概况

平阳高速连接山西省平定县与太原市尖草坪区,全长 123.321 km,设计荷载等级为公路 I 级。本次取样区段位于平阳高速 K79+600—K122+980 段,地基 1~12 m 深度范围内为马兰黄土(Q<sub>3</sub>)和全新世黄土(Q<sub>4</sub>),湿陷等级 II~III 级。针对强夯处理段,采用人工挖井法取样,在夯击能 2 000 kN·m 段取处理前后的 1~5 m 深度范围内土样<sup>[6]</sup>。取样后,严密包裹送至实验室进行颗粒分析、含水量测定、重度测量、液塑限和室内固结等实验。强夯前后土体物理力学指标见表 1。

**收稿日期:** 2013-03-23

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51178287);山西省自然科学基金项目(2010011029);太原理工大学研究生创新基金项目(2012B015)

**作者简介:** 苗得雨(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向:岩土工程

**通信联系人:** 白晓红,教授,主要研究方向:岩土工程领域的教学,研究和技术开发, bxhong@tyut.edu.cn

表1 2 000 kN·m 强夯法处置前后土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indices of soil by 2000 kN·m dynamic compaction

夯击能	深度 H/m	干重度 $\gamma_d/(kN \cdot cm^{-3})$	砂土含量 ( $>0.05 mm$ )/%	粉粒含量 ( $0.05 \sim 0.005 mm$ )/%	黏粒含量 ( $<0.005 mm$ )/%	定名	孔隙比 $e$	湿陷系数 $\delta_s$	孔隙率 $n/\%$
夯击前	1	13.2	20.3	67.2	12.5	粉土	1.051	0.138	51.24
	2	13.6	15.5	69.6	14.9	粉土	0.985	0.085	49.62
	3	12.9	20.7	67.7	11.6	粉土	1.092	0.111	52.20
	4	13.2	18.3	70.8	10.9	粉土	1.038	0.127	50.93
	5	13.7	21.8	67.6	10.6	粉土	0.970	0.085	49.24
夯击后	1	14.5	15.5	65.6	18.9	粉土	0.688	0.067	40.76
	2	17.5	20.6	60.9	18.5	粉土	0.583	0.006	36.83
	3	16.5	23.6	66.1	10.3	粉土	0.886	0.092	46.98
	4	16.1	20.6	66.1	13.3	粉土	0.876	0.012	46.70
	5	16.1	26.3	60.4	13.3	粉土	0.891	0.111	47.12

## 2 试样制备及图像采集

室内微观扫描电镜对土样要求较高,主要包括:保持土样原有状态、维持土样干燥状态和土样具有良好的导电性<sup>[7-8]</sup>。根据王梅等<sup>[7]</sup>已有研究,本次土样制备主要经过以下过程:

1)切样。切取与其自重应力作用线平行和垂直的2块土样<sup>[7]</sup>,规格为30 mm×30 mm×15 mm。

2)干样。采用自然风干法,将土样置于阴凉通风处1~2个月,直至土样边界变化率小于1%<sup>[7]</sup>。

3)样品浸泡。采用胶结材料固化土样,选用浸泡溶成分有环氧树脂、丙酮、乙二胺、邻苯二甲酸二丁酯,体积比为100:200:7:2<sup>[7]</sup>,在通风橱内静置3个月,直至溶液完全渗入固化。

4)试样切割、打磨抛光。电锯切去多余树脂,维持试样规格为30 mm×30 mm×15 mm,且上下两大面平行。在磨样机上以700 r/min滴水对土样粗磨,之后用2 000~3 000目砂纸对土样大面精磨,直至土样表面光滑,无孔洞、裂纹、划痕。

5)镀金。采用SBC-12小型离子溅射仪,根据溅射电流,选取合适的镀金时长,直至土样表面明显发暗发黑且在灯光下具有金属光泽。

6)扫描。采用HITACHI TM-1000电子显微镜进行土样扫描拍摄。本次试样共拍摄完成了800余幅不同倍数的SEM图像。

## 3 图像处理

图像信息处理过程主要包括图像预处理和图像分割。预处理包括调整对比度、降噪等操作;图像分割主要选择合理灰度阈值将图像二值分割<sup>[5,8-9]</sup>。

### 3.1 图像预处理

#### 3.1.1 去除图像亮度不均匀

由于扫描电镜长时间工作过程中电镜灯丝位置可能偏移,且土样磨样过程为人为打磨,表面不能保证绝对平整,会出现图像亮度不一致的情况,尤其在低倍数情况下更为明显。如图1所示,在100倍放大图像中明显看到左上角发暗,右下角发亮。为此利

用Matlab去除背景来实现对亮度调整,调用imopen函数和半径为10的圆盘形结构元素进行形态学开运算<sup>[5]</sup>,去掉不包括结构元素在内的对象,实现背景亮度估计<sup>[10]</sup>,如图1所示。不一致的背景被提取出来(见图1(b)),从图1(a)中去除图1(b)后效果见图1(c)。可以看出,左上角发暗背景减弱,右下角发亮背景加强,有效地改善了图像扫描过程中出现的亮度背景不一致的情况。

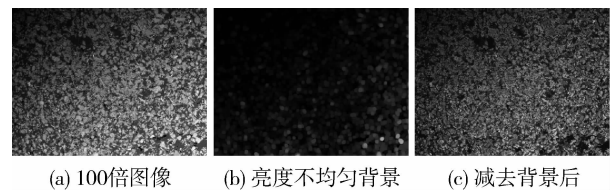


图1 去除图像亮度不均匀背景  
Fig. 1 Removal of inconsistent background of image brightness

#### 3.1.2 调整对比度

对一个低对比度的灰度图像进行调整,增强对比度实际上是增强原图像中各部分的反差,同时不丢失细节信息<sup>[10]</sup>。笔者根据SEM图像特点,在Matlab中选取imadjust对比度调整函数、直方图均衡化处理<sup>[11]</sup>、同态滤波增强三种方式对处理效果进行对比。效果对比如图2所示。

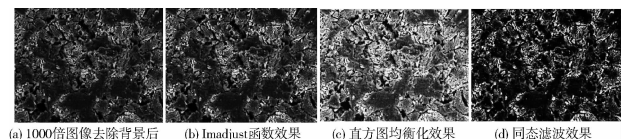


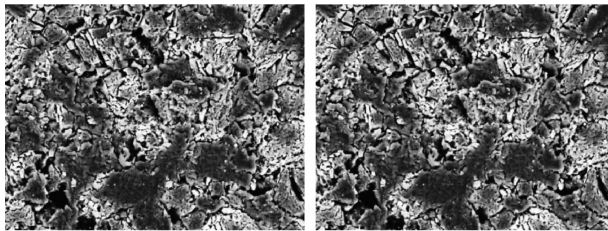
图2 SEM图像对比度调整效果对比  
Fig. 2 Comparison of SEM imaging contrast adjustment

对比发现imadjust函数调整,虽然较好保留图像的细节信息,但是对于对比度增强没有达到理想效果。同态滤波处理效果,虽然加深了对比度,但是黑色区域覆盖过分,白色区域细节信息丢失明显。直方图均衡修正后,孔隙黑色区域强度降低,同时颗粒白色区域强度增强,较好地表现了细节。因此,本文选用直方图均衡法对图像进行对比度调整。

### 3.1.3 降噪

噪声产生可能来自电镜在土样表面过分放电,或来自图像量化过程中,也可能来自图像的转换过程中,噪声具有离散性和随机性等。本文图像噪声主要有高斯噪声(当电路或系统中电压不稳定、放电不稳定造成高斯噪声)、椒盐噪声(图像中有明显的颗粒<sup>[10]</sup>)。

结合 SEM 图像的特点,在 Matlab 选用  $3 \times 3$  中值滤波器对图像进行降噪,中值滤波不是简单的取均值,在降噪同时,图像产生的模糊较少,能较好地保留图像细节信息,如图 3 所示。



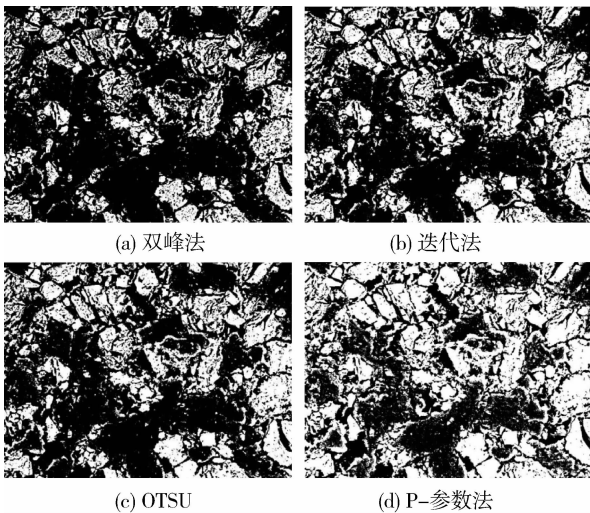
(a) 去除椒盐噪声效果 (b) 去除高斯噪声效果

图 3 SEM 中值降噪效果

Fig. 3 SEM median noise reduction effect

### 3.2 图像分割

基于 SEM 图像灰度强度的不连续性和相似性<sup>[12]</sup>,本文在 Matlab 中选用不同算法对图像进行分割,并对比了效果,如图 4 所示。



(a) 双峰法 (b) 迭代法 (c) OTSU (d) P-参数法

图 4 不同分割方法的 SEM 图像分割效果对比

Fig. 4 Comparison of SEM image segmentation with different methods

1) 双峰法。双峰法原理认为图像灰度分布曲线近似由 2 个正太分布函数叠加而成,会出现 2 个明显分离的峰值<sup>[10]</sup>,人为从两峰值中间的峰谷选取阈值进行二值分割。阈值取 130 时的分割结果如图 4(a) 所示。

2) 迭代法。迭代法选择近似阈值  $T$ ,将图像分割为两部分  $R_1$  和  $R_2$ ,计算区域均值  $\mu_1$  和  $\mu_2$ ,选择新的分割阈值  $T = (\mu_1 + \mu_2) / 2$ ,重复运算,直至  $\mu_1$  和  $\mu_2$

不再变化。计算阈值结果为 103 时的分割结果如图 4(b) 所示。

3) OTSU 法。OTSU 法利用近似阈值,通过计算总平均灰度,计算前后景方差最大值的分割阈值,实现错分概率最小<sup>[13]</sup>。计算阈值结果为 101 时的分割结果如图 4(c) 所示。

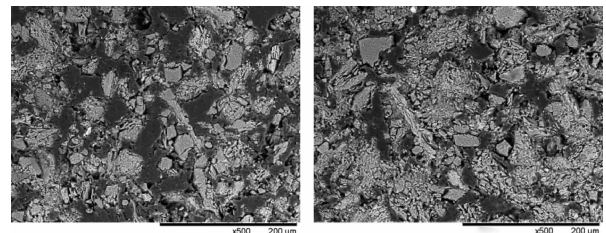
4) P-参数法。P-参数法思想是先给出一个阈值,统计目标物的像素点数在整幅图中所占的比例是否满足要求,否则,再进行调整,直到满足要求<sup>[13]</sup>。本文为了更直观地展现 P-参数法的思想,进行了如下改进:利用迭代法计算阈值作为 P,结合阈值分割的二值图中孔隙和颗粒区域的覆盖情况,以 10 为递减值给出一个阈值,观察重新分割后的覆盖情况,比例满足基本要求,则阈值合适;否则,继续调整,直至满足要求。计算阈值结果为 73 时的分割结果如图 4(d) 所示。

综上所述,双峰法原理简单,但是各个 SEM 图像灰度曲线相似性较差,选值没有标准。迭代法和 OTSU 法计算结果相似,但是从对比发现,在颗粒区域覆盖较差,黏粒部分信息丢失明显。鉴于迭代法较 OTUS 法计算效率高,选取迭代法改进 P-参数法,对比效果发现大颗粒和细小黏粒覆盖较好,且在颗粒和孔隙边界分割实现了过渡。因此本文选取 P-参数法对降噪后的图像进行分割处理。

## 4 土体微结构变化分析

表 1 中,2000 kN·m 强夯原状土的湿陷性系数均大于 0.07,属于强湿陷性黄土,干重度基本为 13 kN/m<sup>3</sup>,孔隙比较大。经过强夯后,1~4 m 深度范围内黄土湿陷性系数减小,各部分黄土湿陷性得到不同程度消除,其中在 2 m 深度处效果尤为明显,干重度增大到 16 kN/m<sup>3</sup> 以上,孔隙比显著降低,其中 2 m 深度处减小幅度最明显;同时从颗分数据可知,强夯后砂土含量明显增长。说明经过强夯处理,黄土结构变得密实,微观结构得到优化。这一点通过对原状土和强夯后土体的 SEM 图像的对比分析,可以得到较好的解释与印证。

对于原状土 SEM 图像,在 1~5 m 范围内,结构变化较小,故这里仅展示 1 m 和 5 m 处图像,如图 5 所示。为便于比较,选取 500 倍图像分析<sup>[14]</sup>。



(a) 原状土 1 m 处 500 倍图像 (b) 原状土 5 m 处 500 倍图像

图 5 原状土 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of undisturbed soil

对比不同深度处的图像发现原状土基本以颗粒单元体为主,直径在  $5\sim 50\ \mu\text{m}$  之间,没有大的团粒存在;骨架单元连接以接触式较多,同时骨架单元相互不规则排列形成了较大的架空孔隙,因此也造成了土体结构不稳定,强度较弱<sup>[15]</sup>。

对于强夯后 SEM 图像,在  $1\sim 5\ \text{m}$  范围内,土体结构都发生了显著的变化,如图 6 所示,为便于展现整体结构,选取 200 倍图像分析。且由于制样过程中  $4\ \text{m}$  处土样发生破裂, $4\ \text{m}$  处本文从略。

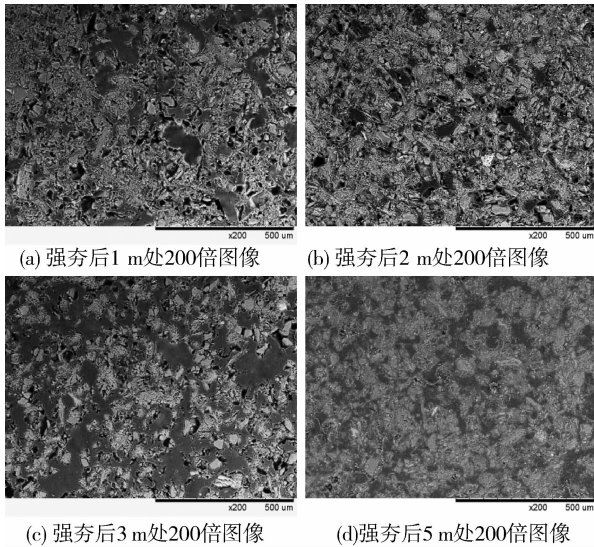


图 6 强夯后土体 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of dynamically compacted soil

对比强夯前后发现,强夯后  $1\ \text{m}$  深度处团粒大量增加,出现较多颗粒镶嵌构成的孔隙,同时团粒之间形成了较大的孔隙,大团粒内部也由于挤压变形不充分存在较多细微孔隙,但是改变并不充分,只能部分消除湿陷性。 $2\ \text{m}$  深度处,土体更加密实,团粒继续增多,形成了较好的粒状-凝块、胶结、镶嵌结构,

湿陷性能得到较好的消除,这一点在其湿陷性系数中也可以得到较好的体现。 $3\ \text{m}$  深度处团粒之间有一部分架空明显,形成了很多架空孔隙,有一部分相对分散,但是由于细小颗粒挤密填充作用,团粒单元胶结较好,土体湿陷性可以得到部分改善。 $5\ \text{m}$  深度处,聚合团粒分布更加分散,一些黏粒由于受振动作用悬浮在大孔隙中。

综上所述,土体在强夯前后对比,强夯后各深度均得到不同程度的密实;同时强夯法消除湿陷性的最优效果深度在  $2\ \text{m}$  处,其余  $1\ \text{m}$  和  $3\sim 5\ \text{m}$  范围内湿陷性得到部分消除。

同时通过对土体微观结构定量分析,统计计算强夯前后土体孔隙分布特征表明:孔隙数量及面积分布、定向特征、形状特征能更直观地表现强夯及土体湿陷机理<sup>[16-17]</sup>。本文计算孔隙平均直径,将孔隙分为 5 类:微孔隙(孔径  $< 5\ \mu\text{m}$ )、小孔隙(孔径  $2\sim 5\ \mu\text{m}$ )、中孔隙(孔径  $5\sim 20\ \mu\text{m}$ )、大孔隙(孔径  $20\sim 50\ \mu\text{m}$ ) 和特大孔隙(孔径  $> 50\ \mu\text{m}$ )<sup>[12]</sup>。选取  $1\ 000$  倍的土样 SEM 图像进行处理,得到孔隙面积分布规律如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,各深度处原状土除特大孔隙面积较大,其余类型孔隙分布都很小,强夯处理后,土体中特大孔隙面积锐减,尤其在  $2\ \text{m}$  深度处,同时其余类型孔隙均不同程度增多。说明正是由于特大孔隙的存在,造成了土体内部孔隙连通,当有水入侵,这种孔隙发育越强烈,湿陷性越大。强夯法通过降低特大孔隙的面积,造成其连通性下降,从而不同程度降低黄土的湿陷性。

定量分析孔隙定向分布特征,依照其长轴角度,将  $180^\circ$  均分 9 个区段<sup>[12,17]</sup>,以每个区段中孔隙累计面积与图像孔隙总面积的比值为源数据,绘制玫瑰图,如图 8 和图 9 所示。

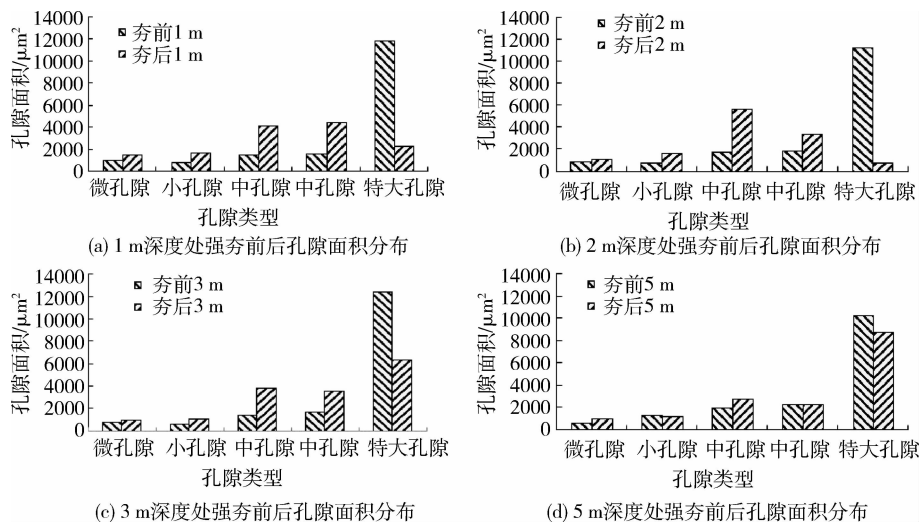


图 7 强夯前后孔隙类型及面积分布

Fig. 7 Distribution of pore types and sizes before and after dynamic consolidation

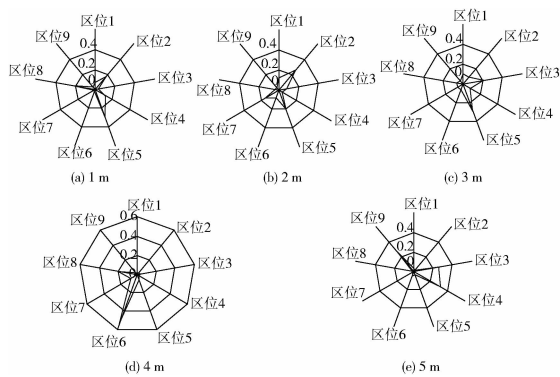


图 8 原状土各深度处孔隙定向玫瑰图  
Fig. 8 Pore directional rose charts of undisturbed soil in different depths

从图中可以看出原状土在孔隙长轴上表现出

明显的定向性,但不固定于某个区域,这与其天然形成和应力状态有关,而强夯后玫瑰图较强夯前平滑了许多,各区域孔隙面积分布更加均匀,尤其在 2 m 处,其玫瑰图近乎圆线,说明土中大孔隙受到挤压变形,从而造成颗粒和孔隙结构产生重塑,颗粒得到压实,土体孔隙率下降,湿陷性降低。

形状比为孔隙长轴和短轴比值<sup>[12,17]</sup>,统计 5 类孔隙的形状比如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,原状土孔隙形状比在 1.5~3.0 之间,强夯后在 1.5~2.5 之间,强夯前后微孔隙和小孔隙的形状比基本不变,中孔隙和大孔隙形状比降低显著,特大孔隙形状比略有降低。说明在强夯过程中土颗粒之间的接触关系发生变化,同时孔隙发生挤压,造成孔隙比变化。

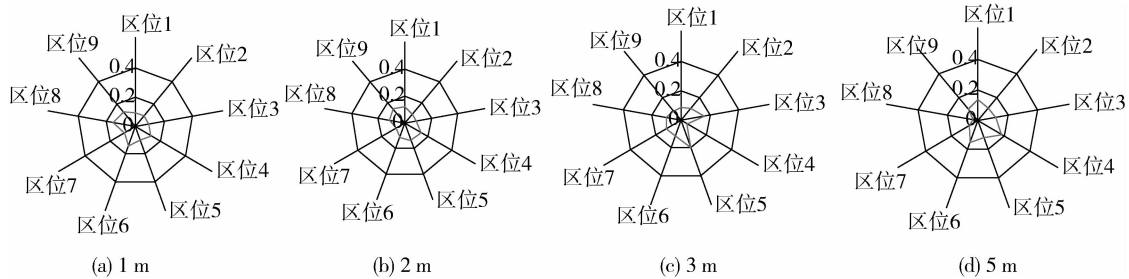


图 9 强夯后各深度处孔隙定向玫瑰图

Fig. 9 Pore directional rose charts of dynamic compaction soil in different depths

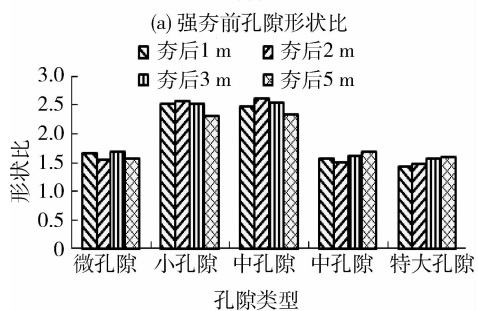
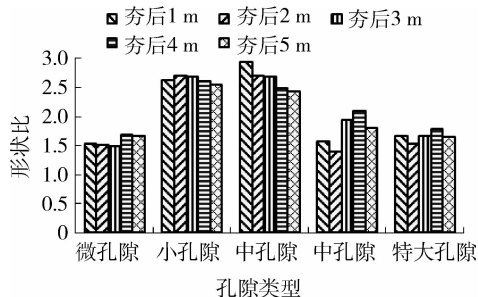


图 10 强夯前后孔隙形状比

Fig. 10 Ratio of pore types and sizes before and after dynamic consolidation

### 5 结论

通过对湿陷性黄土强夯前后的 SEM 图像的预处理和图像分割方法的讨论以及图像中土样颗粒和

孔隙的分析对比,可以得出以下结论:

1)通过室内测定土样物理力学形状和 SEM 图像表现特征分析,认为原状湿陷性黄土大孔隙发育强烈,孔隙连通性好,颗粒状态以颗粒单元体为主,强夯后土体中出现较多团粒结构,颗粒接触关系由点-点和点-边为主的接触方式转向较好的粒状凝胶、胶结、镶嵌结构。

2)通过使用 Matlab 在 SEM 图像处理过程中,对比了不同的对比度调整和阈值分割效果,发现直方图均衡法可以较好地展现图像信息,改进 P-参数法可以较好地适应不同图像效果,选取阈值分割图像,同时采用去除亮度失衡背景和降噪处理,提高了后续 SEM 图像信息提取的准确性。

3)通过本文提出的 SEM 图像处理方法,对强夯前后图像 1 000 倍微结构图像进行孔隙信息统计计算,得出孔隙面积、直径、数量等参数,通过分析对比孔隙数量及面积分布、定向特征、形状特征等参数,认为在强夯作用下,特大孔隙数量降低,其余孔隙数量增多,孔隙定向性被破坏,土体发生重塑,孔隙方向更加分散,土颗粒之间的接触关系发生变化,同时孔隙发生挤压,造成孔隙比形状变化。而这种变化在 2 m 内尤为强烈,对比其他深度,说明强夯法可以在一定程度内消除或者部分消除黄土湿陷性。

## [参考文献] (References)

- [1] 赵常洲,王晖,杨为民. 夯实地基土的微结构特性及其对工程性质的影响[J]. 岩土工程, 2005, 19(2): 75-80.  
Zhao Changzhou, Wang Hui, Yang Weimin. The microstructure characteristic of compacted soils and its influence on soils' engineering property [J]. Geotech Eng Tech, 2005, 19(2): 75-80. (in Chinese)
- [2] 王立朝,胡瑞林,李耀刚,等. 强夯法加固填土地基的现场试验与微观结构分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1832-1836.  
Wang Lichao, Hu Ruilin, Li Yaogang. Field test of dynamic compaction for reinforce filled ground and its microstructural analysis [J]. Rock Soil Mech, 2004, 25(11): 1832-1836. (in Chinese)
- [3] 邢玉东. 辽宁西部湿陷性黄土特性与处治技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.  
Xing Yudong. Research on Engineering Characteristic of Collapsible Loess and Subgrade Treatment Technique in West Area of Liaoning [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)
- [4] 杨为名. 强夯后高饱和度地基土工程特性的试验研究及其本构模型[D]. 北京: 中国地质大学, 2002.  
Yang Weiming. The Experimental Study on Engineering Characteristic of the Soil with High Saturated Degree after Dynamic Consolidation and the Soil's Constitutive Model [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- [5] 毛灵涛,薛茹,安里千. MATLAB在微观结构 SEM 图像定量分析中的应用[J]. 电子显微学报, 2004, 23(5): 579-583.  
Mao Lintao, Xue Ru, An Liqian. MATLAB application in quantitative microstructure SEM image [J]. J Chin Electron Microsc Soc, 2004, 23(5): 579-583. (in Chinese)
- [6] 郭小云,王敏,闫嘉庆,等. 灰土挤密桩法和强夯法处理湿陷性黄土地基的效果对比[J]. 施工技术, 2012, 374(41): 68-71.  
Guo Xiaoyun, Wang Min, Yan Jiaqing, et al. Comparison of effect of lime-soil compaction pile and dynamic consolidation method to improve collapsible loess ground [J]. Construct Tech, 2012, 374(41): 68-71. (in Chinese)
- [7] 王梅,白晓红,杨晶,等. 湿陷性黄土微观结构分析的试样制备[J]. 太原理工大学学报, 2010, 41(3): 283-286.  
Wang Mei, Bai Xiaohong, Yang Jing, et al. Method of specimen preparation for collapsible loess microstructure research [J]. J Taiyuan Univ Tech, 2010, 41(3): 283-286. (in Chinese)
- [8] 刘红玫. 黄土孔隙微结构的计算机图像处理分析方法[J]. 高原地震, 1999, 11(3): 44-48.  
Liu Hongmei. Analysis of microstructure of loess porosity in computer image processing [J]. Earthquake Res Plateau, 1999, 11(3): 44-48. (in Chinese)
- [9] 徐清浩,赵轶,樊杰. 浅谈图像分析技术在土的微观结构研究中的应用[J]. 科学之友, 2008, 2(2): 147-148.  
Xu Qinghao, Zhao Yi, Fan Jie. Application of picture analyse technology in soil microcosmic composition research [J]. Friend Sci Amat, 2008, 2(2): 147-148. (in Chinese)
- [10] 张德丰. MATLAB 数字图像处理 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
Zhang Fengde. MATLAB Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2012. (in Chinese)
- [11] 王明泉,冯晓夏,梁君婷. 基于直方图均衡的射线图像增强算法 [J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(1): 67-70.  
Wang Mingquan, Feng Xiaoxia, Liang Junting. Algorithm of radiographic image enhancement based on Histogram Equalization [J]. China Sciencepaper Online, 2011, 6(1): 67-70. (in Chinese)
- [12] 谷天峰,王家鼎,郭乐,等. 基于图像处理的 Q<sub>3</sub> 黄土的微观结构变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 3185-3192.  
Gu Tianfeng, Wang Jiading, Guo Le, et al. Study of Q<sub>3</sub> loess microstructure changes based on image processing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 3185-3192. (in Chinese)
- [13] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. 数字图像处理 (MATLAB 版) [M]. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital Image Processing (MATLAB) [M]. Ruan Qiuqi, Trans. Beijing: Publishing House of electronics industry, 2005. (in Chinese)
- [14] 王朗,钱晓华,李英道. 基于图像模式特征放大的图像分割算法[J]. 中国科技论文, 2012, 7(7): 556-559.  
Wang Lang, Qian Xiaohua, Li Yingdao. An algorithms of image segmentation based on pattern feature amplification [J]. China Sciencepaper, 2012, 7(7): 556-559. (in Chinese)
- [15] 王梅,杜建安,白晓红. 黄土湿陷性质的微观研究[J]. 科技情报开发与经济, 2001, 11(1): 75-76.  
Wang Mei, Du Jianan, Bai Xiaohong. Micro-examination on collapse property of loess [J]. Tech Inform Dev Econ, 2001, 11(1): 75-76. (in Chinese)
- [16] 徐清浩. 数字图像分析程序在土的微观结构中的应用以及数据分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.  
Xu Qinghao. Application of Image Analysis Technology on Soil Microstructure Study and Data Analysis [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] 张济忠. 分形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
Zhang Jizhong. Fractal [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)