

DOI: 10.11779/CJGE201903021

基于扫描电镜图像的土体三维视孔隙率定量计算方法

冯怀平^{1, 2}, 马德良¹, 刘启源¹, 叶朝良^{*1, 2}

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043); 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 通过扫描电镜来观察土体微观结构是目前研究微观土力学的重要手段。目前, 大部分通过 SEM 图像反映土体孔隙率的研究多采用二维表观孔隙率定性分析, 而此时得到是土体的二维表观孔隙率难以反映土体真实的三维孔隙率。因此, 建立一种基于二维扫描图像计算三维孔隙率的计算方法具有重要研究意义。基于 SEM 电镜扫描图像, 利用 SEM 图像处理软件 IPP, 变换不同的阈值得到不用阈值下的二维表观孔隙率, 并且引入二重积分的思想, 提出了一种基于 SEM 扫描电镜二维图像确定土体三维视孔隙率的计算方法。最后对不同种类的土进行了对比试验验证, 结果表明本文提出的计算方法能够较好地反映土体真实的三维孔隙率。

关键词: 扫描电镜; 三维视孔隙率; IPP

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)03-0574-07

作者简介: 冯怀平(1975-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土测试及数值模拟等方面的研究工作。E-mail: fenghuaping@stdu.edu.cn。

Method for calculating three dimensional apparent porosity of soils based on SEM images

FENG Huai-ping^{1, 2}, MA De-liang¹, LIU Qi-yuan¹, YE Chao-liang^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: It is an important method to study the microstructure of soils by using the scanning electron microscopy (SEM). The recent researches on the microscopic porosity of the soils are based on the two-dimensional methods. The research methods mainly use the calibrated porosity to get the observation of the microstructural image of the soils and the apparent porosity. However, the microstructure by this way cannot conform to the change of the soil pores. Therefore, it is essential to learn the microstructure of the soils by using the SEM images and establish the quantitative relationship between the two-dimensional scanning image and the three-dimensional pore structure. Based on the SEM images and the double-integral method, a method for determining the three-dimensional unilateral apparent porosity of the soils with two-dimensional SEM images is proposed, and the comparative tests on different soils are also carried out. The results show that the proposed method can reflect the three-dimensional porosity of the soils correctly.

Key words: scanning electron microscope; three-dimensional porosity; IPP

0 引言

从微观结构分析土体的物理宏观性质是土力学研究的关键和难点, 其中 SEM 技术是研究土体微观结构的重要手段^[1-4]。近年来, 通过 SEM 图像了解土体的孔隙结构、分析土体工程特性等方面的研究成果丰富。裘国荣^[5]通过分析 SEM 图像, 从孔隙率角度研究了黄土在振动下的变形性质和变形机理; 羊群芳^[6]利用 SEM 技术研究了 SEM 图像与孔隙大小和数量的关系, 揭示黄土特殊工程性质; 张先伟等^[7]基于 SEM 和 MIP 试验, 对结构性黏土进行了土体在变形过程中微结构形态的演化规律; 周宾等^[8]对红砂岩的微结构进

行了研究, 利用 SEM 技术发现其破坏的重要机理; 张泽林等^[9]运用 SEM 技术对黄土的微观损伤效应进行了研究, 指出 SEM 测量时需要选择良好的观测面, 并且需要在平整的观测面上做镀金处理; 李顺群等^[10]建立面积累计曲线并研究该曲线的曲率系数和不均匀系数, 总结了土的 SEM 照片之间的差异; 宋芬芬^[11]基于形态学图像识别技术, 针对沙土的 SEM 图像提

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478279); 中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2017G008-G)

收稿日期: 2018-07-11

*通讯作者(yechl@stdu.edu.cn)

取出了砂土颗粒细观组构特性参数; 樊成意等^[12]指出微结构图像的处理中对阈值确定十分重要, 并建议使用“最小累积差值”法来确定阈值。在膨胀土吸力形成机理^[13]、粉质黏土微观结构变化^[14]、石灰水泥改良土渗透性机理^[15]、黏土剪切带^[16]等方面也都有重要的研究成果。

SEM 图像分析法是了解土体微观结构的重要手段, 通常采用孔隙率参数进行研究。然而, 多数研究采用的是某一个阈值下的二维表观孔隙率, 而非土体三维土体的孔隙率, 这就导致多数研究的结果偏于定性分析。对于通过二维 SEM 图像可以对土体的三维孔隙进行有效定量分析, 需要建立从二维 SEM 图像得到三维孔隙率的方法^[7]。张先伟等^[7]基于类似积分的方法计算得到三维孔隙率 V3D。徐日庆等^[17-20]建立了土体微观结构的三维计算模型, 并探讨了 SEM 技术观察土体微观结构的影响因素分析。王宝军等^[21-23]利用 GIS 软件对平面 SEM 的二维图像进行了三维可视化计算方法的研究, 建立基于二维 SEM 图像向三维转化的模型。此外, 张雄等^[24]引入体视学的概念, 探讨了利用二维 SEM 图像计算三维的孔结构参数的方法。通过前人的研究表明, 平面灰度图像计算土体三维孔隙率是困难的, 并且多数研究是针对某一阈值下的二维孔隙率来计算的, 其结果反映三维孔隙率仍然存在不可靠性。所以, 应当考虑多阈值下的二维孔隙率计算三维孔隙率方法。

本文通过拍摄某一盐渍土的土样的 SEM 图像, 利用 IPP 软件, 变换 SEM 图像的阈值, 得到不同阈值下的表观孔隙率, 总结阈值与表观孔隙率的关系; 并且基于该关系和二重积分的思想, 提出了一种基于 SEM 图像定量计算土体三维视孔隙率的方法, 并进行对比试验验证了计算方法的正确性。

1 试验步骤与方法

1.1 试验仪器

本次试验试验仪器为荷兰 PHENOM 生产的 Phenom Pure 扫描电子显微镜 (图 1), 由背散射电子探测器、真空装置以及成像系统组成。电子束系统发射具有高能的电子轰击物质表面, 从而产生二次电子、背散射电子、X 射线等信号。不同种类的信号分别被不同的接收器接收, 加之扫描线圈与成像系统偏转线圈的同步, 最终形成图像, 该图像上的点与被扫描的物质上的点一一对应。该产品光学放大倍数为 20, 电镜放大倍数为 30000 倍。

1.2 试验土的基本性质

试验用土选自新疆境内的天山南麓山前冲洪积平

原中部地区 (里程为 DK1640+205~DK1640+255, 长 55 m), 该地区土为盐渍土, 其基本物理性质如表 1 所示。



图 1 Phenom Pure 扫描电镜

Fig. 1 Phenom Pure scanning electron microscope

表 1 基本物理参数

Table 1 Basic physical-mechanical parameters

颗粒相 对密度	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	天然含水率 /%	天然密度 /(g·cm ⁻³)
2.61	1.48	14.5	1.69

经过现场颗粒分析试验, 得到天然盐渍土的颗粒级配曲线, 如图 2 所示。由图 2 可以看出, 粒径大于 2 mm 的颗粒含量占颗粒总量的 54.18%, 粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量占颗粒总量的 12.31%, 可以判定该土属于粗粒土。其中, $2 \text{ mm} < d \leq 60 \text{ mm}$ (砾粒组) 占总土量的 54.18%, $0.075 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$ (砂粒组) 占总土量的 34.51%, $d \leq 0.075 \text{ mm}$ 占总土量得 12.31%。

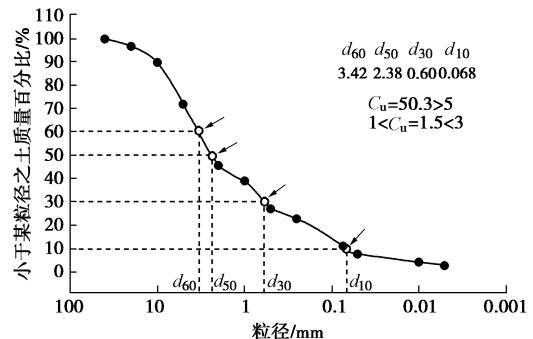


图 2 天然盐渍土颗粒级配曲线

Fig 2 Grain-size curves of saline soils

1.3 试样制备方法

由于试验设备要求试样为干土, 为满足试验要求并避免迅速失水导致土体产生收缩和结构性变化, 本试验采用自然风干法进行烘干^[16]。将土样分为两组, 一组用于常规固结试验来测量土体的标准孔隙率; 另一组进行扫描电镜试验。

本试验选取试样的水平断面进行试验, 因此不考虑除水平断面外其他侧面的扰动影响, 对于试验中扫

描的水平断面, 为了避免传统扫描电镜试验制备试样过程中的切割对孔隙率以及压实度的变化扰动影响, 本试验采用撕皮技术制备试验^[25]。

按设定的土体孔隙率和压实度制备土样, 采用割土刀在土样中部切出一道沟, 如图 3 所示。用手掰断土样, 得到图 4 的两个土样的不规则断面, 随后用宽胶带轻轻黏合土体的两个不规则切割断面, 其主要目的就是要通过胶带纸的黏合力将表面的浮动颗粒黏除, 同时黏合的力度不应过大, 黏合的次数以胶带纸上不再有土颗粒为准。为了保证扫描断面的完整性和避免胶带黏合后出现新的系统误差, 分别选取上下两个 A、B 断面, 然后取两个断面上的对应位置分别进行制备电镜扫描样。

分别对上下两个 A、B 断面进行电镜扫描, 取两个断面上的扫描数据平均值作为本试样的扫描计算孔隙率。采用上述制样方法基本可以避免掰断过程中对原有土样表面造成的影响。

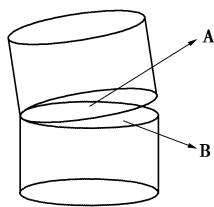


图 3 扫描断面示意图

Fig. 3 Diagram of scanning section



图 4 土样切割试样图

Fig. 4 Cutting of soil sample

1.4 扫描试验

在试样底部黏合电镀片, 放入载物台进行观察。为了避免扫描过程与后期处理结果的偶然性和随机性, 对于同一土体的多个土样进行不同位置的观察拍摄。但以往的研究发现放大倍数对于观察结果影响不大^[7]。此外, Mouret 等^[26]和 Scrivener 等^[27]都在拍摄数量和数据统计方面做了大量工作, 大量拍摄图片可以将数据方差及标准差降低至 0.6%。结合试验仪器拍照探头的实际情况及数据可靠度, 最终采用 20 张。为了观察到更多孔隙区域, 采用 1000 倍的放大倍率。

1.5 二值化处理

SEM 扫描电镜图片是灰度图像, 其中黑色的灰度为 0, 白色的灰度为 255。靠近白色的浅色部分通常表

示土颗粒, 靠近黑色部分的深色部分为孔隙。一般计算孔隙方法为二值化处理。二值化是图象处理的一种重要方法, 即将图像上像素点设置为 0 或者 255, 产生轮廓分明的黑白效果, 最终将图像分割, 只保留关注的方面, 如下式所示:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & f(x,y) < T \\ 255 & f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x,y) 是图像横纵坐标, $f(x,y)$ 为未处理图像的灰度值, $g(x,y)$ 为二值化后的图像灰度值, 如图 5 所示。

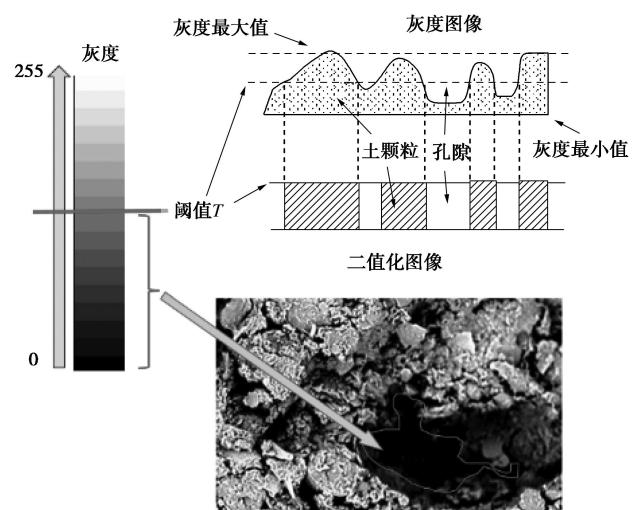


图 5 二值化原理图

Fig. 5 Principle diagram of thresholding

2 计算方法

2.1 三维模型的建立

利用 SEM 图像研究土体孔隙特性, 大多数研究多采用单一阈值下的二维孔隙率, 计算结果具有随机性和不可靠性。对于土体的微观研究尚停留在由已知土体的真实孔隙率总结二值化的阈值, 所以, 提出一种可靠的计算模型来计算孔隙率是十分必要的。由于 SEM 扫描电镜只能对土体单侧进行拍摄, 不能拍摄到土颗粒之间遮藏的孔隙, 如图 6 所示。因此以土颗粒接触点为基准, 下部分作等截面立体处理, 被遮藏的部分忽略不计。

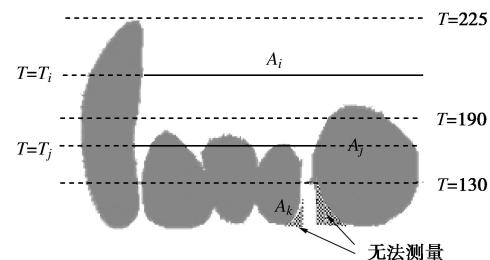


图 6 无法测量区域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of unmeasurable zone

由于微观结构下几何形状足够小, 为了便于计算, 将真实的土体形状简化为等截面不规则三维立体, 不规则孔隙在其内部不均匀分布。在二值化处理过程中, 建立以扫描电镜得到的二维图像为 xOy 像素平面, 以阈值 T 为 z 轴的三维坐标系。在土体中取出 dT 的微元体, 如图 7 所示。

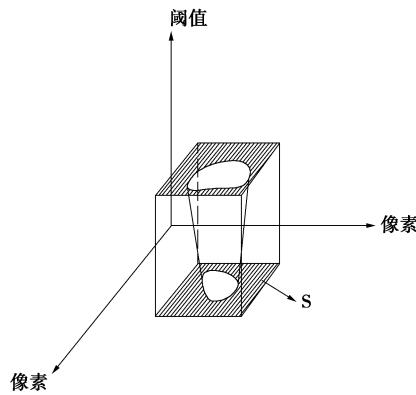


图 7 土颗粒及其孔隙的三维计算示意图

Fig. 7 3D diagram of calculation of soil particles and pores

微元体中阈值下孔隙的体积:

$$dv = \iint T ds \quad (2)$$

式中, ds 为该阈值下电镜扫描后得到的灰度图像的面积。其中, S 的面积值可以由 IPP 图像处理软件直接扫描得出, 因此对式 (2) 进行整理, 变换为对变量 T 的一元积分:

$$dv = \int S dT \quad (3)$$

对扫描得到的灰度图像进行积分, 得到孔隙的体积 V_e :

$$V_e = \int_0^{255} S(T) dT \quad (4)$$

式中, $S(T)$ 中为某确定阈值下得到的土体灰度图像面积。

由于试样为标准形状, 可将土体视为等截面立体, 那么对于土体体积则有

$$V = 255S(255) \quad (5)$$

式中, $S(255)$ 定义为图像全白时扫描得到的断面面积包括孔隙与土颗粒的所有面积。

最终土体得到的三维视孔隙率为

$$n = \frac{V_e}{V} \quad (6)$$

3 试验结果与讨论

对试验盐渍土进行扫描电镜试验后, 利用 IPP 软件统计某一阈值下的灰度图像面积, 并且以阈值梯度为 10 对 4 个扫描位置下绘制 0~255 阈值下灰度图像

面积的变化规律, 如图 8 所示。

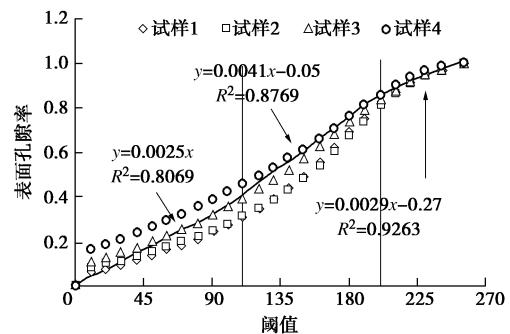


图 8 盐渍土的灰度随阈值变化规律

Fig. 8 Variation rules of images of saline soils

从图 8 可以明显看出, 当阈值为 0 时, 扫描后的像素面积为 0; 当阈值达到 255 时, 全图为白, 表示所有面积, 即包括土颗粒与孔隙的全面积。土体扫描后的灰度面积随阈值的变化规律曲线大致分为斜率不同的 3 段, 发现随着阈值的增大孔隙率很明显地增加, 可将曲线拟合为三段斜率不同的直线:

$$s_0 = a_i T + b_i \quad (7)$$

式中, s_0 为区间内像素点的灰度面积, a_i , b_i 为曲线拟合参数。

从图 8 可以看出, $T < 50$ 时 (接近黑色), 多为被大颗粒遮盖无法测量区域, 若将该部分计入表观孔隙率的计算则会引起较大的误差, 故将其舍去。通过计算各阶段结果, 由式 (2)、(3) 和图 8 中的拟合公式积分可得 4 个土样的孔隙率, 如表 2 所示。

表 2 土样的计算孔隙率

Fig. 2 Summation of porosity

序号	孔隙像素总体积	土样像素总体积	孔隙率
1	67507754	114378315	0.5902
2	47243530	85971875	0.5495
3	53552883	86826725	0.6167
4	45498150	75690715	0.6011

综合表 2 中 4 个土样试验数据, 取平均值得最后该盐渍土样的计算孔隙率为 0.5894。通过常规土工试验标定的该盐渍土的土体孔隙率为 0.6504, 可以比较精确地反映常规土工试验标定的土孔隙率。计算值比常规土工试验标定的土孔隙率小的原因是由于忽略了阈值 50 以下的体积, 误差为 9.38%, 在合理误差范围之内。

4 对比试验

4.1 试验土的基本物理参数

对比试验采用的两种土选自内蒙古境内的四道柳车站段和神华铁路 K45+300 里程区间, 属黏性土, 其基本物理性质如表 3 所示。

表3 基本物理参数

Table 3 Basic physical-mechanical parameters

取样地点	颗粒相对密度	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	天然含水率/%	天然密度 / (g·cm ⁻³)
四道柳站	2.60	1.51	14.50	1.65
K45+300	2.66	1.60	12.80	1.70

4.2 试验结果与分析

分别对上述两种土进行制备取样、扫描电镜试验,得出两种土的扫描灰度图像与阈值的变化规律如图9、10所示。

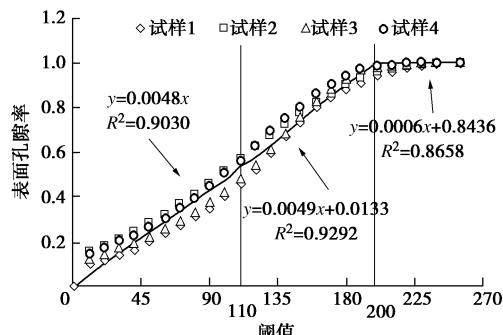


图9 四道柳站土样的灰度随阈值变化规律

Fig. 9 Variation rules of gray scale with threshold for soils of Sidaoliu station

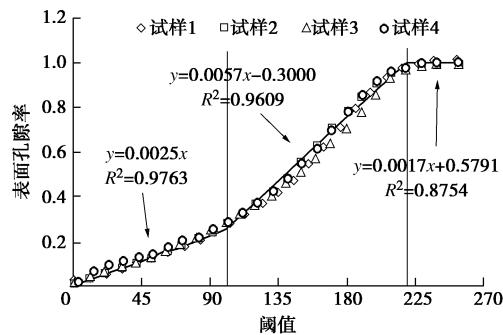


图10 K45+300 里程灰度随阈值变化规律

Fig. 10 Variation rules of gray scale with threshold of Shenhua railway (K45+300)

从图9不难看出,不同种类的土对于灰度像素图像与阈值的变化规律依然符合,并由上述计算方法,对取自四道柳的粉黏土进行孔隙率计算,结果如表4所示。

表4 四道柳站土样的粉黏土计算孔隙率汇总

Table 4 Calculated porosity of soils of Sidaoliu station

土样序号	孔隙像素总体积	土样像素总体积	孔隙率
1	57 067 744	82 905 075	0.688 3
2	51 290 300	74 302 865	0.690 3
3	47 485 715	69 433 295	0.683 9
4	52 490 368	75 237 255	0.697 7

综合表4中4个土样试验数据,取平均值得最后该土样的计算孔隙率为0.6901,而通过常规土工试验测得的土体的实际孔隙率为0.7514,误差为8.16%,在正常合理误差范围内。

经过数据拟合,可以发现对于砂土也符合灰度图像随阈值的变化规律。并采用上述计算方法,对取自K45+300的砂土进行孔隙率计算,结果如表5所示。

表5 K45+300 处计算孔隙率汇总

Fig. 5 Calculated porosity of silty clay of Shenhua railway (K45+300)

土样序号	孔隙像素总体积	土样像素总体积	孔隙率
1	41490 202	75771075	0.547 6
2	44172296	82448368	0.536
3	42682143	76001085	0.611 6
4	49237733	83943195	0.586 5

综合表5试样的试验数据,取平均值得最后该砂土样的计算孔隙率为0.5704,而通过常规土工试验测得的土体的实际孔隙率为0.6205,误差为8.07%,也在正常合理误差范围内。

经过不同种类的土的对比试验验证,根据本文提供的计算方法可以很好地计算土体单侧三维视孔隙率,但由于测试仪器和方法上的缺陷,仍不可避免地会出现系统误差,图11为不同种类土的样本误差对比。

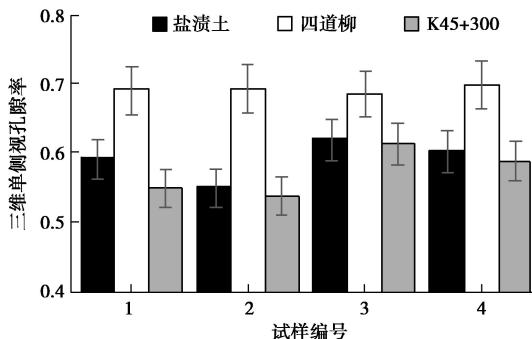


图11 不同种类土体三维视孔隙率计算误差对比

Fig. 11 Comparison of calculation errors of three-dimensional apparent porosity of different soil types

根据图11可以看出,拟合公式的斜率越接近0,直线越平缓,表明4个扫描计算结果越接近,离散程度越低;相反,直线斜率越大,直线越陡,表明4个扫描计算结果差异越大,离散程度越大。通过对比发现,3种土的视孔隙率计算存在不同程度的离散误差,其中盐渍土(粗砂土)和砂土的计算结果相差较大,方差为6%和9%;粉黏土的计算结果相差较小,方差为0.25%,经过误差分析,可以得出如下结论:①不同种类的试验土样在本文阐述的计算方法中存在不同程度的误差;②粉黏土的4个扫描图像的计算结果较为接近,离散程度较小且误差相对较小;砂土的4个扫描图像的计算结果离散程度较大,误差相对较大。主要原因是砂土土样在制备过程中土样受到的扰动较大,因此误差也相对较大。

5 结 论

本文基于盐渍土的微观 SEM 图像研究, 分析了灰度像素面积与阈值的变化规律, 并总结了土体微观结构下观察到的表观孔隙率与单侧三维视孔隙率的定量关系, 进行了粉黏土、砂土等不同种土的对比试验验证, 得到以下 4 点结论:

(1) 将微观结构下土颗粒的形状简化为不规则等截面柱体, 通过推导, 提出了由二维灰度图像计算土体三维视孔隙率的方法。

(2) 通过变换不同的阈值, 进一步研究了微观结构下阈值的离散性, 发现了阈值与灰度像素面积之间的线性关系, 以微观的观点解释了其变化规律, 同时表明了像素面积的增长与不同的阈值区间有关。

(3) 对不同种土进行了对比试验验证, 结果表明本文提出的计算方法可以较为接近的反映土体的真实孔隙变化。

(4) 对不同种土计算得到的单侧土体视孔隙率误差不同, 粉黏土的误差相对较小, 砂土的误差相对较大。

微观结构下的电镜扫描由于观察范围局限性和试样制作精度要求较高的影响, 误差分析及其消除解决方法还需要进一步探索研究。因此高精度的微观结构研究计算还有待进一步提高和发展。

参考文献:

- [1] JIANG M J, LI T, HU H J, et al. DEM analyses of one-dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **60**(1): 47 – 60.
- [2] 周萃英. 土体微观结构研究与土力学的发展方向—若干进展与思考[J]. 地球科学, 2000, **25**(2): 215 – 220. (ZHOU Cui-ying. Research into soil mass microstructure and some progresses on soil mechanics[J]. Earth Science, 2000, **25**(2): 215 – 220. (in Chinese))
- [3] 张伏光, 蒋明镜. 基于微观破损能理的胶结砂土三维本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1424 – 1432. (ZHANG Fu-guang, JIANG Ming-jing. A study on the three-dimensional constitutive model for cemented sands based on the micro-mechanism of bond degradation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1424 – 1432. (in Chinese))
- [4] 唐朝生, 施斌, 王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 560 – 565. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, WANG Bao-jun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 560 – 565. (in Chinese))
- [5] 裴国荣. 黄土震陷变形的微观结构控制机理研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2010. (QIU Guo-rong. The research about seismic subsidence of loess controlled by microstructure[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese))
- [6] 羊群芳. 基于湿陷、震陷、液化灾害的黄土微结构研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. (YANG Qun-fang. Microstructure of loess in collapsibility, seismic subsidence and liquefaction[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese))
- [7] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 406 – 412. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 406 – 412. (in Chinese))
- [8] 陈宾, 周乐意, 赵延林, 等. 干湿循环条件下红砂岩软弱夹层微结构与剪切强度的关联性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(5): 1633 – 1642. (CHEN Bin, ZHOU Le-yi, ZHAO Yan-lin, et al. Relationship between microstructure and shear strength of weak interlayer of red sandstone under dry and wet cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(5): 1633 – 1642. (in Chinese))
- [9] 张泽林, 吴树仁, 唐辉明, 等. 黄土和泥岩的动力学特性及微观损伤效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(5): 1256 – 1268. (ZHANG Ze-lin, WU Shu-ren, TANG Hui-ming, et al. Dynamic characteristics and microcosmic damage effect of loess and mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2017, **36**(5): 1256 – 1268. (in Chinese))
- [10] 李顺群, 柴寿喜, 王英红, 等. 阈值选取对黏土微结构参数的影响[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2011, **12**(4): 354 – 360. (LI Shun-qun, CHAI Shou-xi, WANG Ying-hong, et al. Influence of grey threshold on microstructure for SEM photograph[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2011, **12**(4): 354 – 360. (in Chinese))
- [11] 宋芬芬. 砂土颗粒细观特性的图像分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2016. (SONG Fen-fen. The image analysis on sand particles characteristics from microscopic[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016. (in Chinese))

- [12] 樊成意, 梁收运. 土体 SEM 图像处理中阈值的选取[C]//第九届全国工程地质大会. 青岛, 2012. (FAN Yi-cheng, LIANG Shou-yun. Selection of the threshold of SEM images in process of studing soil microstructure[C]//the 9th National Congress of Engineering Geology. Qingdao, 2012. (in Chinese))
- [13] LIN B, CERATO A B. Prediction of expansive soil swelling based on four micro-scale properties[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, **71**(1): 71 - 78.
- [14] CUI Z D, JIA Y J. Analysis of electron microscope images of soil pore structure for the study of land subsidence in centrifuge model tests of high-rise building groups[J]. Engineering Geology, 2013, **164**(12): 107 - 116.
- [15] QUANG N D, CHAI J C. Permeability of lime-and cement-treated clayey soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(9): 1221 - 1227.
- [16] GYLLEND A S, RUESLÄTTEN H, PANIAGUA P, et al. Microscopy techniques for viewing the inner structure of shear bands in sensitive clays[J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, **39**(4): 688 - 694.
- [17] 徐日庆, 邓祎文, 徐波, 等. 基于 SEM 图像的软土接触面积定量研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, **24**(2): 295 - 303. (XU Ri-qing, DENG Yi-wen, XU Bo, et al. Soft clay contact area quantitative research based on SEM images[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, **24**(2): 295 - 303. (in Chinese))
- [18] 徐日庆, 徐丽阳, 邓祎文, 等. 基于 SEM 和 IPP 测定软黏土接触面积的试验[J]. 浙江大学学报, 2015, **49**(8): 1417 - 1425. (XU Ri-qing, XU Li-ying, DENG Yi-wen, et al. Experimental study on soft clay contact area based on SEM and IPP[J]. Journal of Zhejiang University, 2015, **49**(8): 1417 - 1425. (in Chinese))
- [19] 徐日庆, 邓祎文, 徐波, 等. 基于 SEM 图像信息的软土三维孔隙率定量分析[J]. 地球科学与环境学报, 2015, **37**(3): 104 - 110. (XU Ri-qing, DENG Yi-wen, XU Bo, et al. Quantitative analysis of soft clay three-dimensional porosity based on SEM image information[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, **37**(3): 104 - 110. (in Chinese))
- [20] 徐日庆, 邓祎文, 徐波, 等. 基于 SEM 图像的软土三维孔隙率计算及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(7): 1497 - 1502. (XU Ri-qing, DENG Yi-wen, XU Bo, et al. Calculation of three-dimensional porosity of soft soil based on SEM image[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **34**(7): 1497 - 1502. (in Chinese))
- [21] 王宝军, 施斌, 蔡奕, 等. 基于 GIS 的黏性土 SEM 图像三维可视化与孔隙度计算[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 251 - 255. (WANG Bao-jun, SHI Bin, CAI Yi, et al. 3D visualization and porosity computation of clay soil SEM image by GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 251 - 255. (in Chinese))
- [22] 王宝军. 基于标准差椭圆法 SEM 图像颗粒定向研究原理与方法[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(7): 1082 - 1087. (WANG Bao-jun. Theories and methods for soil grain orientation distribution in SEM by standard deviational ellipse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 1082 - 1087. (in Chinese))
- [23] 王宝军, 张明瑞, 施斌. 基于坡度坡向原理的黏性土扫描电镜图像颗粒定向性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 2951 - 2957. (WANG Bao-jun, ZHANG Ming-rui, SHI Bin. Quantitative analysis of orientation distribution of soil grains based on slope-aspect theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 2951 - 2957. (in Chinese))
- [24] 张雄, 黄廷皓, 张永娟, 等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J]. 建筑材料学报, 2015, **18**(1): 177 - 182. (ZHANG Xiong, HUANG Yan-hao, ZHANG Yong-juan, et al. Image-pro plus analysis of pore structure of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, **18**(1): 177 - 182. (in Chinese))
- [25] 苏彤, 成晓平. 微观土样的制作、撕皮与镀膜[J]. 建材技术与应用, 2001(3): 37 - 38. (SU Tong, CHENG Xiao-ping. Preparation, peeling and coating of micro soil samples[J]. Building Materials Technology and Application, 2001(3): 37 - 38. (in Chinese))
- [26] MOURET M, RINGOT E, BASCOUL A. Image analysis: a tool for the characterization of hydration of cement in concrete—metrological aspects of magnification on measurement[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, **23**(2): 201 - 206.
- [27] SCRIVENER K L, PATEL H H, PRATT P L, et al. Analysis of phases in cement paste using backscattered electron images, methanol adsorption and thermogravimetric analysis[J]. Materials Research Society Symposium Proceedings, 1986, **85**(1): 67 - 76.