

一种土颗粒体微结构特征的描述方法

李顺群^{1,2} 柴寿喜^{1,2} 王英红³

(1. 天津城市建设学院土木工程系,天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室,天津 300384;
3. 天津城市建设学院电子与信息工程系,天津 300384)

【摘要】 在前期工作基础上,采用相关分析和主成分分析方法,对三种土的 SEM 照片特征块原始微结构参数进行了相关分析和主成分分析。研究表明,与域微结构参数一样,特征块微结构参数间也存在“严重”的“信息重复”现象,可以用较少主成分反映全部原始特征块微结构参数的主要信息,从而达到降维目的。

【关键词】 特征块微结构;SEM 图像;相关分析;主成分分析;降维

【中图分类号】 TU 411.92

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.06.011

A Method to Describe Characteristics Feature of Microstructure for Soil

Li Shunqun^{1,2} Chai Shouxi^{1,2} Wang Yinghong³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, china;

2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, china;

3. Department of Electron and Information Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, china)

【Abstract】 The techniques of correlation analysis and principal component analysis are utilized to study feature micro-structure parameters extracted from SEM photos of the three kinds of soil. The study shows that message superposition is clear and severe among microstructure parameters for feature analysis, and that is same for field analysis. Therefore, it is reasonable to construct a lower parameter matrix to substitute the original higher parameter matrix for microstructure. The minority representative principal components can approximately synthesize the overall meaning of microstructure according to the desired value of contribution by the method of principal component analysis, and this makes extensive use of microstructure theory in soil mechanics expediently and potentially.

【Key words】 feature micro-structure; SEM photo; correlation analysis; principal component analysis; dimensionality reduction

0 引言

土体既是一种地质历史产物,残留着各种地质作用痕迹,又受各种人类活动的强烈改造^[1-3]。其物理力学性质具有很强的非均匀性和各向异性特征。这种特征在微观上主要表现为土质结构的非连续性和不确定性,很难用传统的、基于线性分析基础之上的技术方法加以表达^[4,5]。因此,土体微细结构变化的定量试验方法和评估手段研究,对于揭示土体工程特性与其微细结构变化之间的内在规律,建立具有微结构变化特征的本构关系,具有十分重要意义^[6]。

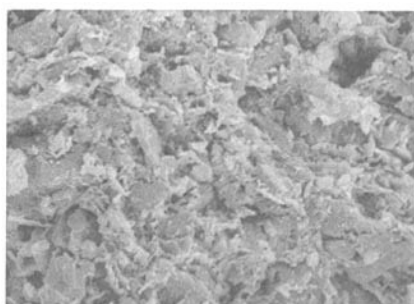
黏土微结构研究可以借助于电镜扫描方法(SEM)和各种图像处理系统^[7]。SEM 图像可以反映颗粒体的大小、形态以及分布特征等。在提取微结构信息过程中,为了尽可能完整地获取信息,往往提取

尽可能多的微结构参数,这虽然可以避免遗漏信息,但参数过多和由此引起的各参数“信息重复”现象,增加了微结构理论应用的复杂性和难度。对微结构与力学现象之间的关系研究,也因此停留在对单个微结构参数与单个宏观力学指标之间的趋势分析。

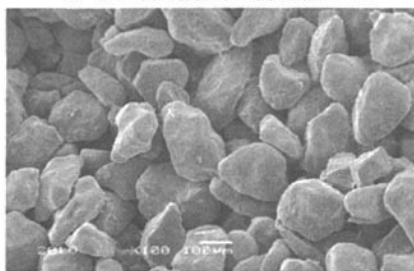
相关分析和主成分分析,是对多参数体系进行分离和降维的一种统计方法。笔者曾经研究并建立了 SEM 照片域微结构参数的主成分分析方法^[8]。在此基础上,本文对 SEM 照片的特征块微结构参数进行相关分析和主成分分析,以进一步认识颗粒体之间的相互关系。研究表明,与域微结构参数一样,特征块微结构参数间也存在“严重”的“信息重复”现象,可以用较少主成分反映原始特征块微结构参数的主要信息,从而达到降维目的。

1 样品土的扫描电镜照片

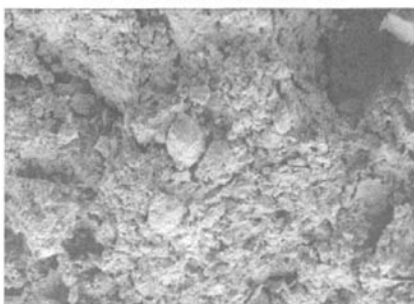
试验样品针对三类土进行,这三类土分别是:珠江三角洲粉质黏土,自然固结,埋深 45 m;法国钙质砂;天津滨海新区黏土,重塑固结试验(400 kPa)样品。样品的干燥采用冷冻真空法,干燥后的样品采用扫描电镜方法获得 SEM 照片,这三类土的 SEM 照片见图 1(a)、(b)、(c)。可以看出,三种土的微结构特征存在显著差异。



(a) 珠江三角洲粉质黏土 放大倍数×2 000



(b) 法国某钙质砂 放大倍数×100



(c) 天津滨海新区黏土 放大倍数×2 000

图 1 三种不同土类的 SEM 照片

2 土颗粒几何微结构特征的表述

图 1(a)的二值化结果见图 2。从图 2 可以看出,土颗粒体的几何微结构特征非常复杂。为了更详细的描述颗粒体的微结构特征,这里给出一个长度量—Feret 长度,其含义为颗粒体两条平行切线间的距离。本文采用的图像处理软件为 Leica QWin 系统,该系统可以给出 30 多个颗粒体微结构参数,其中主要的原始参数有 9 个,其余则为导出参数。

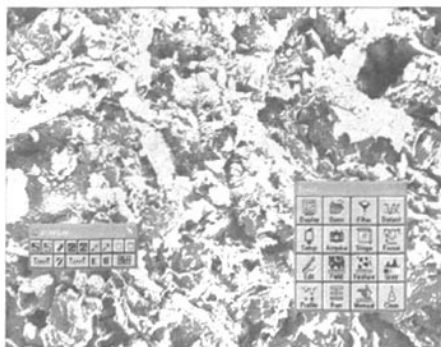


图 2 Leica QWin 图像处理系统的信息提取

Leica QWin 图像处理系统提取到的原始参数包括以下参数。水平投影长度 a ,颗粒体在水平线上的投影长度;垂直投影长度 b ,颗粒体在垂直线上的投影长度;长度 c ,即最长 Feret 直径;宽度 d ,即最短 Feret 直径;直交 Feret 长度 e ,即与长度 c 方向垂直的 Feret 直径;颗粒体面积 f ,颗粒体像素的总和;颗粒体周长 g ;最小外切凸多边形周长 h 和最小外切凸多边形面积 i 。各种 Feret 长度的定义见图 3。

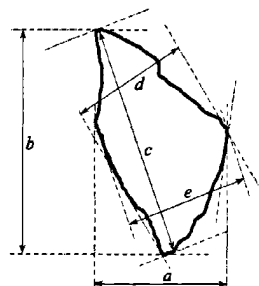


图 3 土颗粒体的几种 Feret 长度定义

最小外切凸多边形面积(ConvexArea)和最小外切凸多边形周长(ConvexPerim)是两个特殊的概念。几种特殊图形的最小外切凸多边形面积(图中阴影区域面积)和最小外切凸多边形周长(图中阴影区域外边界周长)见图 4。

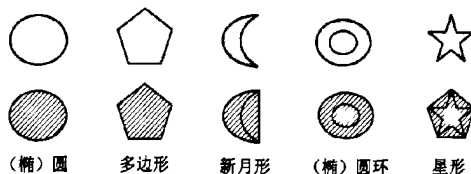


图 4 特殊图形的 ConvexArea 和 ConvexPerim 定义

3 Feature 微结构参数的相关性

第一张照片提取到了 300 个颗粒体,第二张照片提取到了 50 个颗粒体,第三张照片提取到了 500

个颗粒体。由于每个颗粒体的微结构参数有 9 个，因此可以用下式刻画每个颗粒体的微结构特征。

$$x = (a, b, c, d, e, f, g, h, i) \quad (1)$$

由于是高维向量，颗粒体微结构之间的评估显得比较复杂，以某一个参数（比如颗粒体面积 A）为指标来评估颗粒体之间的差异显然带有很大的片面性。但如果用 9 个原始微结构参数，评估颗粒体之间的差异在理论上和数学上又难以实现。因此，寻求合理评估高维数据的方法成为急需解决的课题。

三幅照片的 Feature 微结构参数分别是 300×9, 50×9 和 500×9 矩阵。经计算，三幅照片中 9 个微结构参数之间的相关系数矩阵分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1 珠江三角洲粉质黏土 Feature 微结构参数相关系数

参数	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	1	0.8868	0.9047	0.8847	0.9210	0.9316	0.9041	0.9127	0.9710
b		1	0.9768	0.9189	0.9437	0.9222	0.9939	0.9376	0.9442
c			1	0.9024	0.9351	0.9209	0.9941	0.9270	0.9529
d				1	0.9318	0.9268	0.9200	0.9937	0.9257
e					1	0.9932	0.9465	0.9642	0.9341
f						1	0.9294	0.9605	0.9335
g							1	0.9412	0.9567
h								1	0.9440
i									1

表 2 法国某钙质砂 Feature 微结构参数相关系数

参数	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	1.0000	0.9528	0.9528	0.9194	0.9446	0.9408	0.9510	0.9329	0.9685
b		1.0000	0.9992	0.9365	0.9276	0.9150	0.9997	0.9406	0.9705
c			1.0000	0.9387	0.9233	0.9105	0.9996	0.9405	0.9721
d				1.0000	0.9405	0.9275	0.9398	0.9941	0.9288
e					1.0000	0.9971	0.9252	0.9702	0.9001
f						1.0000	0.9122	0.9610	0.8915
g							1.0000	0.9423	0.9707
h								1.0000	0.9255
i									1.0000

表 3 天津滨海新区黏土 Feature 微结构参数相关系数

参数	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	1.0000	0.9961	0.9967	0.9322	0.8967	0.8813	0.9962	0.9300	0.9895
b		1.0000	0.9995	0.9251	0.9166	0.9031	0.9999	0.9267	0.9750
c			1.0000	0.9311	0.9192	0.9063	0.9998	0.9327	0.9782
d				1.0000	0.9359	0.9278	0.9288	0.9981	0.9481
e					1.0000	0.9965	0.9198	0.9536	0.8684
f						1.0000	0.9066	0.9471	0.8524
g							1.0000	0.9306	0.9760
h								1.0000	0.9403
i									1.0000

可见，无论是哪种土，颗粒体微结构参数之间的相关性都比较高。因此，式(1)中的 9 个参数之间存在

在高度的信息重复现象。所以，可以对式(1)进行主成分分析，从而得到低维向量以便对颗粒体微结构加以描述和评估。

4 Feature 微结构参数的主成分

照片 1 的第一主成分表达式为

$$y_1^* = 0.3257x_1^* + 0.3340x_2^* + 0.3336x_3^* + 0.3292x_4^* + 0.3357x_5^* + 0.3337x_6^* + 0.3364x_7^* + 0.3362x_8^* + 0.3354x_9^* \quad (2)$$

照片 2 的第一主成分表达式为

$$y_2^* = 0.3273x_1^* + 0.3348x_2^* + 0.3349x_3^* + 0.3295x_4^* + 0.3325x_5^* + 0.3278x_6^* + 0.3388x_7^* + 0.3396x_8^* + 0.3346x_9^* \quad (3)$$

照片 3 的第一主成分表达式为

$$y_3^* = 0.3362x_1^* + 0.3371x_2^* + 0.3379x_3^* + 0.3325x_4^* + 0.3276x_5^* + 0.3243x_6^* + 0.3377x_7^* + 0.3337x_8^* + 0.3327x_9^* \quad (4)$$

同样，可以给出三张照片颗粒体的第二主成分表达式、第三主成分表达式、……、第九主成分表达式。以上各参数的物理意义可以参见文献[8]。各主成分的贡献率 η 见表 4。

表 4 各主成分的贡献率

贡献率 η	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6	η_7	η_8	η_9
照片 1	0.9455	0.0211	0.0177	0.0115	0.0023	0.0014	0.0005	0.0001	0.0000
照片 2	0.9522	0.0264	0.0122	0.0074	0.0015	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
照片 3	0.9498	0.0347	0.0145	0.0005	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000

从表 4 可以看出，三张照片颗粒体的第一主成分贡献率都在 90% 以上；第二主成分贡献率在 2%~3.5% 之间；而第三主成分贡献率则稍微大于 1%。因此，以第一主成分表述颗粒体的微结构特征能反映颗粒体的几何特征。

5 结论

在前期研究工作的基础上，对珠江三角洲黏土、法国砂和天津滨海新区黏土的 SEM 照片原始 Feature 微结构参数进行了相关分析和主成分分析。研究表明，与域微结构参数一样，原始 Feature 微结构参数间也存在“严重”的“信息重复”现象，可以用较少主成分反映全部原始特征块微结构参数的主要信息，从而达到降维目的。

参考文献

[1] 胡瑞林, 李向全, 官国琳, 等. 土体微结构力学—观念·观点·核心[J]. 地球学报—中国地质科学院院报, 1999, 20(2): 150-156.

的是消除湿陷、提高强度,通过试验研究,认为西宁地区当黄土状盐渍土含盐量小于1%时,可以作为基础底面以下的回填用土。

2)基础底面以上至室外地坪,散水以下回填用土中含盐量对工程建筑物的破坏,主要是盐胀和腐蚀破坏。加之接近地表温度和湿度易受气候及外部条件变化,因而极易产生上述破坏,故回填用土含盐量应控制在0.5%以内。

3)目前黄土状盐渍土湿陷性黄土,西宁地区地基处理方法多采用大开挖回填碾压,该方法只是部分消除湿陷,因而要采取以地基处理为主且与相应的防水措施、结构措施相结合的综合措施。

4)盐渍土作为一种特殊性岩土,本文是从含盐量这一主要因素入手研究黄土状盐渍土地基回填问题,其实影响黄土状盐渍土力学性质的因素较多,如土的颗粒成分、液限、塑限、施工质量的控制等因素,影响黄土状盐渍土盐胀变形的因素也较多,如含水

量以及外界的温度变化、土的密实度、颗粒成分以及亲水性矿物(蒙脱石、伊利石含量)等因素,因而要根据工程地质条件,对症下药,只有这样才能达到提高经济和社会效益的目的。从而达到技术更先进,科学,经济,安全可靠的目的。

参 考 文 献

- [1] 徐攸任主编.盐渍土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [2] 中华人民共和国建设部.GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3] 常士骧,张苏民主编.工程地质手册(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [4] 中华人民共和国国家建设部.GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.

收稿日期:2009-09-25

(上接第315页)

- [2] 薛 茹,胡瑞林,毛灵涛.软土加固过程中微结构变化的分形研究[J].土木工程学报,2006,39(10): 87-91.
- [3] 唐益群,张 曦,周念青,等.地铁振动荷载作用下饱和软粘土性状微观研究[J].同济大学学报(自然科学版)[J],2005,33(5): 626-630.
- [4] HU R L, YEUNG M R, LEE C F, etc. Mechanical behavior and microstructural variation of loess under dynamic compaction[J]. Engineering Geology, 2001, 59(3-4): 203-217.
- [5] 周翠英,牟春梅.软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J].岩土工程学报,2005,27(10): 1136-1141.
- [6] 王国欣,黄宏伟,肖树芳.软土微结构特征的试验研究[J].水利学报,2005,36(2): 190-196.
- [7] Ferber Valery, Auriol Jean-Claude, Cui Yu-Jun, Magnan Jean-Pierre. Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(2): 252-265.
- [8] 李顺群,郑 刚,赵瑞斌,等.黏土微结构参数的相关分析和主成分分析[J].岩土工程学报,2009,31(7): 1120-1126.

收稿日期:2009-08-17