

裂隙性粘土粒度成分的分形结构*

胡 卸 文 宋 跃

(成都理工学院工程地质研究所 成都 610059)

提 要 根据分形理论,研究了我国普遍分布的裂隙性粘土粒度成分之分形结构特征,其分维值介于 2.600~3.000 之间,且灰白色隙壁粘土的分维值 \geq 黄褐色母体土的分维值。在此基础上,讨了分维与土体物质成分、结构特征的关系,以及它所代表的工程地质意义。

关键词 裂隙性粘土 粒度成分 分形结构

“裂隙性粘土”一词,广义的是指含有裂隙的一切粘土;而下面所指的主要为距地表 2m 以下、常作为建筑物地基持力层或边坡主体组成物之裂隙发育的粘土,其显著特点是土体中不同程度地发育着不同类型、规模和特征的裂隙,且裂隙两侧壁常由灰白色粘土(简称“隙壁土”)组成。裂隙性粘土往往具有胀缩特性,故前人对其相当重视,并积累了大量的研究资料^[1~3]。三轴试验结果证明,在裂隙面与主应力作用面夹角的较大范围内,试件破坏沿着或基本上沿已有的裂隙产生,而裂隙面的抗剪强度明显低于完整试样的强度^[4],裂隙及隙壁土的强度远低于完整粘土的强度。因此对粘土体中的裂隙和隙壁物质应像对岩体中的结构面和软弱夹层那样看待和重视,并进行必要的深入研究。

隙壁土和黄褐色粘土(简称“母体土”)工程地质性质差别的原因除与物质成分有关外,也取决于结构特征,尤其是粒度成分。以下据分形几何学,着重讨论隙壁土与母体土的粒度成分特征,将分维作为描述这两种土粒度成分的参数,探讨其意义。

1 分形理论及粒度成分分维计算方法

分形几何学是由法国数学家 B. B. 曼德布鲁特(Mandelbrot)于 20 世纪七八十年代创立的^[5],该理论主要是研究一些具有自相似性的不规则曲线和位线(线性分形)等。分维有许多不同的定义,但常谈到的分维是立足于自相似性的,可用下式表示

$$D = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \text{ 或 } N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D}, \quad (1)$$

式中 ε 为标度; $N(\varepsilon)$ 为在该标度下所得到的量度值; D 为研究对象的分维。

土颗粒组成分形是建立在一种统计分布基础上,若研究对象(颗粒)数目与按幂次增加的尺度(粒径)成比例,这个幂指数就是粒度成分的分维。设颗粒粒径为 R , 粒径 $\geq R$ 的颗粒数目为 $N(R)$, 若

$$N(\geq R) = \int_R^{\infty} P(R') dR' \propto R^{-D}, \quad (2)$$

* 国家地质灾害防治与环境保护专业实验室基金资助项目(编号:9410)的部分研究成果。

本文收稿日期:1997-07-09.

则 D 即为分维, 式(2)中 $P(R')$ 为粒径 R 的分布密度函数. 对比分维定义式(1), D 即为土粒度成分的分维值.

不直接考察粒径 $\geq R$ 的颗粒数目, 而用相应的质量关系来讨论粒度成分的分维.

设 $M(R)$ 为粒径 $< R$ 的颗粒累积质量, M 为总质量, 若

$$[M(R)/M] \propto R^b, \quad (3)$$

则 $dM \propto R^{b-1} dR$, 对式(2)求导得的 $dN \propto R^{-D-1} dR$, 考虑到 $dM \propto R^3 dN$, 则 $R^{b-1} dR \propto R^3 R^{-D-1} dR$, 故分维为

$$D = 3 - b. \quad (4)$$

实际上, $[M(R)/M]$ 即为粒径 $< R$ 的颗粒的累积百分含量, 这样只要在 $[M(R)/M]$ 与 R 的双对数坐标图上确实存在直线段, 则通过其斜率 b 值, 即可按式(4)求得不同土粒度成分的分维值.

2 两种土粒度成分的分维

据上述理论并结合隙壁土与母体土的粒度分析结果(表1, 2), 对 $\lg[M(R)/M]$ 和 $\lg R$ 进行拟合, 两者之间确实存在直线关系. 同时回归分析得出的相关系数 r 均 ≥ 0.970 , 这也说明两种土粒度成分的分形结构是客观存在的(图1).

表1 母体土粒度成分与分维

Table 1 Statistics of granulometric composition and fractal dimension in yellow-brown clay

地区	粒 度 组 成 (%)						b	D	r
	2~0.1mm	0.1~ 0.05mm	0.05~ 0.01mm	0.01~ 0.005mm	<0.005mm	<0.002mm			
成都	3.5	9.3	28.9	9.6	48.7	45.4	0.209	2.791	0.990
	1.4	7.1	30.2	10.2	51.1	47.2	0.206	2.794	0.990
	4.7	8.1	20.1	15.2	51.9	46.2	0.193	2.807	0.989
	3.7	6.3	17.6	14.8	57.6	50.5	0.169	2.831	0.976
	3.0	8.5	18.5	9.6	60.4	55.7	0.147	2.853	0.996
	4.8	4.5	20.4	15.6	54.7	48.8	0.181	2.819	0.984
广汉	2.4	10.2	45.8	12.2	29.4	27.7	0.362	2.638	0.981
绵阳	1.2	3.7	38.3	10.4	46.4	40.2	0.252	2.748	0.989
南充	3.1	11.6	28.4	14.1	42.8	39.5	0.246	2.754	0.990
西昌	2.5	8.0	26.5	20.1	42.9	39.0	0.252	2.748	0.981
南京	6.7	8.3	30.2	18.0	36.8	32.4	0.291	2.709	0.985
	5.4	4.6	41.3	20.2	28.5	24.7	0.379	2.621	0.980
	7.3	8.7	39.4	15.6	29.0	26.3	0.356	2.644	0.985
合肥	5.7	6.4	26.0	12.5	49.4	45.8	0.201	2.799	0.989
	6.8	8.1	29.4	13.7	42.0	38.9	0.244	2.756	0.998
	1.9	3.4	36.7	14.9	43.1	39.8	0.259	2.741	0.983

统计结果显示, 16组母体土的 D 在 2.621~2.853 之间, 平均 2.753; 而 7 组隙壁土的 D 于 2.858~2.902 之间, 平均值为 2.874, 显然 $D_{\text{隙壁土}} > D_{\text{母体土}}$.

同类土的粒度成分不同, 对应的分维也各异. 如同是母体土, 成都、合肥和南京三地相应的 D (平均值) 分别 2.816, 2.765, 2.658, 这与其粒度成分是完全吻合的. 南京母体土粘粒含量普遍 $< 30\%$, 属粉质粘土; 而合肥母体土粘粒含量 $\geq 40\%$, 成都母体土 $\geq 50\%$.

由上表明:母体土粒度成分由粗变细,相应的 D 则由小到大;隙壁土也有类似特点。

表 2 隙壁土粒度成分与分维

Table 2 Statistics of granulometric composition and fractal dimension in greyish-white clay

地区	粒 度 组 成 (%)						b	D	r
	2~0.1mm	0.1~0.05mm	0.05~0.01mm	0.01~0.005mm	<0.005mm	<0.002mm			
成都	1.0	4.3	12.4	17.3	65.0	63.2	0.124	2.876	0.965
	1.5	9.0	13.7	9.1	66.7	64.1	0.112	2.888	0.977
	0.5	1.5	14.8	18.2	65.0	63.4	0.128	2.872	0.958
	0.8	2.2	10.2	13.8	73.0	69.2	0.098	2.902	0.967
合肥	0.5	3.2	14.8	18.5	63.0	59.4	0.142	2.858	0.966
南京	1.0	3.1	16.5	16.9	62.5	60.3	0.138	2.862	0.971
	1.2	3.1	18.2	17.7	62.8	59.6	0.141	2.859	0.979

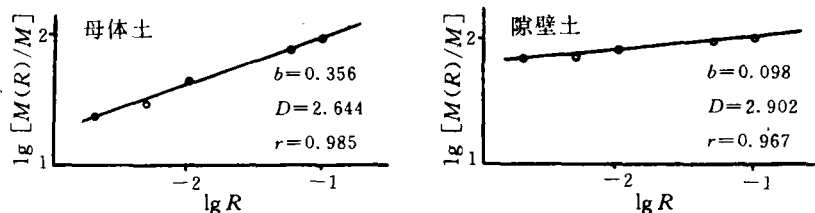


图 1 母体土和隙壁土粒度分布典型曲线

Fig. 1 Typical curves of yellow-brown clay and greyish-white clay granulometric distribution and fractal dimension

分维的变化趋势显示它作为对粘性土分类的一个定量参数指标,是完全可以实现的. 对上述各地裂隙性粘土的分维变化范围进行综合归类,并结合粘性土按颗粒组成的分类标准,可见粉质粘土与粘土的分维界限值为 2.700.

3 粒度成分分维显示的工程地质意义

母体土与隙壁土各自的分维特点,以及上述将分维作为粘性土分类的定量指标之分析结果显示,分维在工程地质研究中是具有重要作用及代表意义的. 实质上,两种粘土粒度成分均有统计意义上的自相似性;自组织特征是指在没有外界特定干预下,两种粘土系统各自所获得的时空上或功能上的结构特征. 这种系统存在着对土体演化起表征作用的自由度,自由度大小表征了系统的有序程度,也称为序参量. 而分维正是描述这种序参量的特征参数.

3.1 分维可表征粘土形成环境及其演变特征

研究证实^[1],裂隙性粘土中母体土和隙壁土的化学成分及矿物成分,均存在明显的差异,具体表现如下.

1. 化学成分上,同一地点的隙壁土 Fe_2O_3 含量明显低于母体土 Fe_2O_3 含量,前者仅为后者的 $1/2 \sim 1/3$,而 Al_2O_3 则隙壁粘土略高于母体土.

2. 各地隙壁土的 pH 值均 ≥ 7 ,为弱碱性环境,而此环境一般不利于高岭石稳定存在,而有利于伊利石赋存且部分向蒙脱石转变;氧化还原电位 Eh 值表明隙壁土虽均处于氧化

环境,但因 E_h 值偏低,显示其氧化强度低于母体土氧化强度.

3. 矿物成分上,同一地点隙壁土的蒙脱石、伊利石多高于母体土,相反高岭石含量一般低于母体土. 另从各地隙壁土的硅铝率变化在 2.79~2.93 之间,这表明均比母体土的要大,也证实了伊利石和蒙脱石含量隙壁土应高于母体土.

母体土与隙壁土的形成环境是有差异的. 母体土形成于强氧化环境,多在盆地或平原中,属冲积物和冰水沉积物;隙壁土则形成于弱氧化或还原环境,由母体土演变而来.

实际上裂隙性粘土体中的裂隙,向上不贯穿至地表,向下延展深度有限,虽相对于母体土无裂隙部位具有较大的容水空间,但因粘土的可渗透性微弱,渗入并聚集在裂隙中的地下水渗出也极为缓慢,长期的相对封闭条件逐渐形成局部还原环境. 对成都粘土 E_h 和 pH 测定结果显示,隙壁土 $E_h=326\sim329\text{mV}$, $\text{pH}=7.31\sim7.74$;母体土 $E_h=331\sim352\text{mV}$, $\text{pH}=7.65\sim7.78$. 从数据变化可见隙壁土的 E_h 值和 pH 值均偏低些,这表明其氧化状态弱于母体土. 此外隙壁土中的 FeO 因流失而含量普遍较低,也是一种还原环境的间接佐证. 母体土与隙壁土之间的上述形成环境及演变过程,表明隙壁土不仅由母体土转变而来,且是演变的高级阶段,形成的粒度成分更细,自组织程度更高,相应分维也大于母体土. 因此用粒度成分分维来表征裂隙性粘土的演变特征不仅可行,也是合适的.

3.2 分维与土结构特征的关系

粒度成分分维也可表征土结构特征的其他指标(如分选性、孔隙性等). 以往在对粘性土结构特征研究中,常用均匀性系数等表征土的分选和级配关系,实际上作为反映粒度成分的分维也必然可表征出裂隙性粘土的均匀程度. 文献^[6,7]表明,分维越大,其分选性就越差,而分选性差常预示着级配良好,颗粒均匀. 母体土与隙壁土均属分选性差,而隙壁土更差. 母体土主要由河流沉积而成,虽分选性较差,但仍表现出一定的分选性;隙壁土由母体土就地受水淋滤且发生离子交换作用而来,粒度更细、更均匀,分选性更差.

表3 成都粘土工程地质性质与对应的分维

Table 3 Engineering geological properties and fractal demension in Changdu Clay

土样类别	编 号	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	e	D	土样类别	编 号	$\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	e	D
母体土	CD1-下	1.67	0.635	2.791	隙壁土	CD1-中	1.60	0.681	2.876
	CD2-上	1.66	0.652	2.794		CD2-中	1.62	0.690	2.888
	CD3-上	1.65	0.666	2.807		CD5-中	1.58	0.703	2.872
	CD4-下	1.65	0.684	2.831		CD6-中	1.58	0.703	2.902
	CD5-上	1.62	0.697	2.853					
	CD6-下	1.64	0.695	2.819					

为定量表征分维与土结构特征的关系,表3列出了两种土部分分维值与相应的干密度 ρ_d 和孔隙比 e . 值得指出的是,土的 ρ_d 和 e 除与土本身粒度成分有关外,更主要取决于土体所处的应力状态(或固结状况). 尽管如此,从表3仍可看出,对取自同一地点相同部位(指埋深相近)粘土(基本处于相同固结状态), ρ_d 和 e 分别随 D 的增大而减小和增大的变化特点,这表明它们之间均存在一定的相关关系.

将两种土的 ρ_d, e 分别与 D 作回归分析,可得式

$$\rho_s = 3.699 - 0.729D, \quad r = -0.910, \quad (5)$$

$$e = -0.637 + 2.904 \lg D, \quad r = 0.784. \quad (6)$$

综上所述,分维作为描述裂隙性粘土粒度成分特征的参数,它反映了各种粒径大小在土体中的组成特点,故比 d_{60} 等单因素指标更具明确的物理意义,也更能反映土体粒度成分特点。再则因分维仅是在粒度分析结果基础上,通过简便的回归分析便可获得,操作性极强。显然把分维作为土体分类的一个综合性定量指标,揭示了不同土体物理力学性质差异的本质,也为用粒度成分分维与相应的物理力学性质进行相关研究提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 孔德坊,张惠英,胡卸文等. 裂隙性粘土. 北京:地质出版社,1994. 1~40.
- [2] 张惠英,田金花. 成都粘土的胀缩特征. 成都地质学院学报,1990,17(2):25~30.
- [3] 田金花,张惠英. 成都粘土固结特性的初步研究. 四川地质学报,1987,7(1):36~41.
- [4] 邓京萍,张惠英. 成都粘土的裂隙性对力学性能的控制作用. 水文地质工程地质,1988,(2):5~10.
- [5] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco, USA: Freeman, 1982. 95~190.
- [6] 王永焱,林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质. 北京:科学出版社,1990. 30~60.
- [7] 刘松玉,方磊,陈浩东. 论我国特殊土粒度分布的分形结构. 岩土工程学报,1993,15(1):23~30.

FRACTAL STRUCTURE OF GRANULARITY COMPOSITION IN FISSURED CLAY

Hu Xiewen Song Yao

(Institute of Engineering Geology Research, Chengdu University of Technology Chengdu 610059)

Abstract

The granularity characteristics of fissured clay distributed in China are studied according to the fractal geometry. It's found that there is a linear relationship between the accumulative granularity content and the grain size by double logarithmic grid system, and it's slope b can be used to calculate the relative fractal dimension D by the equation $D = 3 - b$. Results show that the D of fissured clay changes from 2.6 to 3.0, and the D of greyish-white clay is larger than the yellow-brown clay. Further, the D may be taken as the series-parameter, which describes the clay system as a self-organization one. Correlation between fractal dimension and sorting or grading, pore-size distribution, dry density are discussed respectively. It is concluded that the fractal dimension is a better index for the description of granularity characteristics and the classification of clay.

Key words fissured clay, granularity composition, fractal structure