

°水文地质工程地质°

文章编号: 1001-1986(2004) 03-0030-03

鲁西南地区大埋深粘性土力学指标统计分布规律研究

孙如华, 李文平, 梁双华 (中国矿业大学资源学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 以鲁西南地区深部粘性土为研究对象, 通过试验得到基本工程地质性质参数, 以多元统计分析为手段, 研究了深部粘性土各物理力学指标之间的相关性, 探讨了各项指标之间的内在联系, 为进一步研究大埋深粘性土的各项指标的内在联系打下了基础。

关键词: 粘土; 力学指标; 统计分布; 鲁西南地区

中图分类号: TU43 文献标识码: A

1 引言

华东是我国经济最为活跃、发达的地区之一, 对煤炭这一主要能源的需求也在与日俱增。该区内主要生产矿区有兖州、徐州、淮北、淮南、永城等, 年煤炭产量约 1.3 亿 t, 产值近 400 亿元。这些煤矿区大都为表土层覆盖, 表土厚一般达 200~300 m; 而即将开发的山东巨野煤田区, 土层厚达 400~700 m。

根据该区主要矿井井筒检查孔常规物理力学指标的测试, 以及国家基金项目“兖滕一两淮能源开发区煤矿立井破裂若干基本理论问题研究”所取得的相关成果<sup>[1]</sup>, 认为东部厚表土覆盖矿区的深部土的特殊性表现在: 大都为上第三系土层, 粘性土固结程

度高, 且大都为膨胀性土, 砂土密度大, 属于一种土向软岩过渡的中间产物, 是中科院地质所曲永新研究员、张永双博士所称的典型“土不土、岩不岩”的特殊类型土<sup>[2,3]</sup>; 土的结构性与浅部一般软土明显不同; 在对巨野煤田第一个筹建矿井龙固矿井筒检查孔深部粘性土样(表 1) 进行试样加工时(井筒处土厚 590 m), 发现土样有呈片状剥离现象, 肉眼可见土中有滑移面(类似软岩中的构造劈理面), 说明深部土同浅部土相比, 结构特性和物理力学性质不同。

由于深部粘性土的物理力学指标受成因、成分、结构等多种因素控制, 规律性较差, 为了了解深部粘性土各物理力学指标的内在联系, 寻找它们的相关关系, 本文应用多种统计分析方法进行了研究。

表 1 深部粘性土的物理力学指标

编号	取样深度/m	密度/g·cm <sup>-3</sup>	含水量/%	孔隙度	塑限/%	液限/%	塑限指数	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	309.00~326.40	1.95	27.22	0.43	31.64	52.37	20.73	98.45	23.51
2	326.40~328.60	1.99	16.04	0.37	21.92	35.86	13.94	172.85	29.33
3	332.20~341.80	2.06	17.92	0.36	25.70	49.33	23.63	96.63	32.51
4	361.40~367.50	1.99	29.53	0.44	29.59	53.23	23.64	58.36	26.65
5	370.60~372.80	1.94	19.23	0.41	28.82	51.14	22.32	177.46	20.93
6	382.90~385.90	1.96	27.66	0.44	27.56	52.23	24.76	84.38	20.12
7	385.90~388.00	1.96	25.41	0.43	24.14	47.30	23.16	94.12	23.44
8	429.60~431.80	1.93	21.18	0.42	28.51	48.51	20.00	28.95	32.70
9	454.60~457.50	1.96	18.64	0.39	26.60	41.90	13.30	81.41	36.64
10	462.30~468.50	1.96	20.78	0.42	27.17	55.06	27.89	130.73	17.66
11	477.50~481.30	2.06	18.36	0.36	35.60	61.33	25.73	123.92	34.02
12	487.50~495.50	1.92	16.61	0.40	26.19	44.48	18.29	128.30	32.22
13	498.90~499.30	1.93	18.76	0.38	23.46	45.13	21.67	86.63	39.91
14	506.00~510.50	2.10	17.49	0.34	26.91	46.41	19.50	115.24	29.33
15	517.60~521.60	2.12	22.10	0.37	28.25	51.35	23.10	98.21	26.72
16	525.00~526.60	2.20	15.68	0.32	16.46	34.85	18.39	198.08	43.07
17	532.30~538.70	2.13	18.41	0.35	16.23	33.31	17.08	187.57	29.19
18	542.70~546.00	2.16	17.12	0.34	17.81	35.88	18.07	203.05	44.72
19	550.60~551.70	1.97	16.81	0.36	18.48	26.30	7.82	138.80	46.34
20	566.00~566.20	2.11	19.47	0.31	16.74	35.12	18.38	177.83	40.67

2 各指标平均值的置信区间

根据工程实际应用, 选用常见的密度、含水量、孔隙度、液限、塑限、塑性指数、内摩擦力和内摩擦角等 8 个具有代表性的参数, 以现有 20 个样品资料进行统计, 分别求得各个指标的平均值 $\bar{x}_i$ 和标准差 $S_i$ , 假设任意一个指标为 $(\bar{x}_i, S_i)$ , 由中心极限定理, 当 $n$ 很大时,  $\bar{x}_i$ 近似服从正态分布。又 $E \bar{x}_i = \mu, E \bar{x}_i = \sigma / \sqrt{n}$ , 作代换:

$$U = \frac{\bar{x}_i - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \approx \frac{\bar{x}_i - \mu}{S / \sqrt{n}}. \quad (\text{当 } n \text{ 很大时})$$

该统计量近似服从标准正态分布, 若给定置信概率为 0.95, 存在 $u_{a/2}$ 使:

$$P\{|U| < u_{a/2}\} = 1 - a = 0.95,$$

则任意指标平均值购置信区间为:

$$\left[ \bar{x}_i - u_{\frac{a}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad \bar{x}_i + u_{\frac{a}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} \right].$$

将 20 个样品的各指标代入上式, 即得相应的置信区间(表 2)。

以上各指标的平均值置信区间反映了该指标常见的变化范围, 可靠率为 95%。由表 2 可知, 其中变化范围较大的有: 含水量、液限、塑限、塑性指数、内摩擦力和内摩擦角值, 这些参数反映了粘性土主要的物理力学性质。

3 对指标的 R 型聚类分析

在对粘性土各物理力学性质指标分析研究中, 笔者采用了 R 型聚类分析法。R 型聚类分析法主要是按变量相似程度的大小予以逐步分类的一种多元统计的方法, 它以变量间相关系数为基准, 来说明变量间的相关性。

对各指标进行分析, 数据组成如下矩阵:

$$x = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,8} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,8} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{20,1} & x_{20,2} & \cdots & x_{20,8} \end{bmatrix},$$

表 2 各指标平均值的置信区间

指标	置信区间	指标	置信区间
密度	(1.9787, 2.0613)	液限	(40.8656, 49.2434)
含水量	(18.2981, 22.1439)	塑限指数	(17.8618, 22.2782)
孔隙度	(0.3632, 0.4008)	内聚力	(101.1806, 146.9164)
塑限	(22.3505, 27.4275)	内摩擦角	(27.5506, 35.4174)

其中 $x_{1,1}$ 为密度; $x_{1,2}$ 为含水量; $x_{1,3}$ 为孔隙度; $x_{1,4}$ 为塑限; $x_{1,5}$ 为液限; $x_{1,6}$ 为塑限指数; $x_{1,7}$ 为内聚力; $x_{1,8}$ 为内摩擦角。

以 8 个指标间的相关系数(表 3)为基础, 按相关系数从大到小进行聚类。首先把相关系数最大的两个指标归并为一类, 求该类与其他类的相关矩阵, 组成一个新的相关矩阵, 把这一新的相关矩阵中的相关系数最大的再归并为一类, 依次类推, 直到最后。R 型聚类谱系如图 1。

从 R 型聚类谱系图可见: 当相关系数 $r=1$ 时, 它们各自为一类; 当取 $r=0.6501$ 时, 孔隙度、密度、含水量、内摩擦角和内聚力这 5 个指标聚为一类, 且有较高的相关性; 而塑限、液限、塑性指数则聚为一类, 以上各类从性质上来看各指标之间都较为“亲近”, 可以这样说, 粘性土物理力学性质的好坏可由以上的两类指标来决定。

4 对指标的 R 型因子分析

R 型因子分析方法是多元统计方法的一种, 它将样品的物理力学指标值矩阵进行线性变换, 求出矩阵的特征值, 从诸多变量之间的相关关系中得到数目减少了的新因子, 用新因子最大信息量地反映

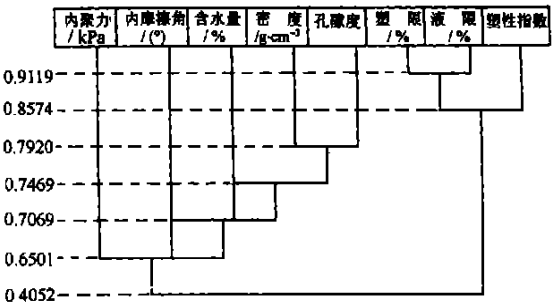


图 1 深部粘性土物理力学指标聚类谱系图

表 3 各指标的相关矩阵

指标	密度	含水量	孔隙度	塑限	液限	塑限指数	内聚力	内摩擦角
重度	1.000 0							
含水量	-0.348 3	1.000 0						
孔隙度	-0.792 0	0.746 9	1.000 0					
塑限	-0.487 7	0.467 2	0.620 6	1.000 0				
液限	-0.334 1	0.538 3	0.591 2	0.911 9	1.000 0			
塑限指数	-0.058 6	0.494 4	0.405 2	0.573 6	0.857 4	1.000 0		
内聚力	0.573 0	-0.583 8	-0.650 1	-0.642 9	-0.561 2	-0.306 9	1.000 0	
内摩擦角	0.398 7	-0.601 3	-0.706 9	-0.576 4	-0.673 0	-0.629 0	0.306 2	1.000 0

样本总体的变化情况。这种方法适用于分析样品数据量大, 变量种类繁多的样本总体, 目的是减少变量数目, 提取出综合因子。

在各指标的相关矩阵的基础上, 进一步研究它们的内部依赖结构, 即由观测数据中提取出有代表性的因子—原始变量的线性组合, 每个因子往往指示出某种共生组合及成因联系, 若各指标观测值用  $x_0, x_1 \cdots, x_p$  来表示, 则可用  $m$  个( $m < P$ )“公共因子”( $f_1, \cdots, f_m$ )以及“特殊因子”( $U_1, \cdots, U_p$ )的线性组合来表示, 即

$$\begin{aligned} x_0 &= \alpha_{01}f_1 + \alpha_{02}f_2 + \cdots + \alpha_{0m}f_m + C_0U_0, \\ &\vdots \\ x_p &= \alpha_{p1}f_1 + \alpha_{p2}f_2 + \cdots + \alpha_{pm}f_m + C_pU_p, \end{aligned}$$

其中  $f_j(j=1, \cdots, m)$  对  $x$  的各分量  $x(i=1, \cdots, p)$  都有作用, 称为公共因子, 而  $U_i$  只对  $x_i$  起作用, 称为特殊因子。  $\alpha_{ij}$  称为第  $i$  个变量在第  $j$  个公共因子上的因子载荷, 特殊因子系数  $C_i$  也称为特殊因子载荷, 对深部粘性土 8 个主要物理力学指标进行的 R 型因子分析结果见表 4 和图 2。这里考虑到作图和分析的简单直观, 所选公共因子为 2 个( $f_1, f_2$ ), 这是因为这两个因子的方差贡献累计已超过 89%。

从表 4 和图 2 中可看出, 以因子之间的载荷特征可划分为两类因子组合, 一类是以塑限、液限、塑性指数、含水量、孔隙度为代表的因子组合, 表示了粘性土的状态; 另一类则是由内摩擦角、内聚力为特征代表因子的组合, 揭示了粘性土的力学性质。

5 结论

a. 根据对深部粘性土物理力学指标的统计分析, 可知其含水量、密度、孔隙度关系最为密切, 3 个指标之间相互关联, 可作为同一类性质; 液限、塑限、塑限指数的关系也很密切, 因此, 可看作另一同类型性质; 而内摩擦力、内摩擦角和含水量、密度、孔隙度的关系可与液限、塑限、塑限指数的关系区分, 所以深部粘性土物理力学性质的好坏主要受以上两类指标组合的控制。

表 4 R 型因子载荷表

指标	$f_1$	$f_2$	指标	$f_1$	$f_2$
容重	2.066 5	0.507 4	液限	0.106 9	0.463 2
含水量	0.137 4	0.418 9	塑限指数	-0.125 5	-0.437 3
孔隙度	0.581 8	0.287 5	内聚力	-0.382 0	0.304 1
塑限	0.272 2	0.389 6	内摩擦角	0.382 0	0.375 0

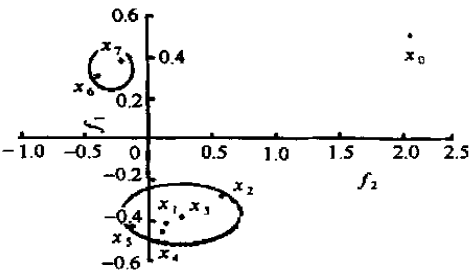


图 2 粘性土物理力学指标 R 因子分析图

b. 因深部粘性土性质较为特殊, 强度高, 膨胀量大, 因此应进行多角度、多方法的分析研究, 充分发挥其工程力学性能, 本文所作的几种统计分析的初步研究, 揭示了一些规律, 但还需要进一步充实和完善。

c. 鲁西南及徐淮广大地区煤矿立井井筒破坏的大量调查结果表明, 覆盖层中上第三系裂隙化硬粘性土底部是井筒破坏的重要层位之一, 井筒破坏具滞后性, 即井筒破坏通常在井筒建成数年之后发生。这些规律与硬粘性土的工程特性具有很大的关系, 应加强对深部粘性土的物理力学性质做进一步的探讨。

参考文献

[1] 李文平. 深厚表土中煤矿立井破裂工程地质研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.

[2] 张永双, 曲永新. 硬土/软岩(岩土间新类型)的确定及其判别分类的探讨[J]. 工程地质学报, 2000(增刊): 309—313.

[3] 张永双, 曲永新. 鲁西南地区上第三系硬粘性土的工程特性及其工程环境效应研究[J]. 岩土工程学报, 2000(4): 446—449.

[4] 袁志英, 王伍军等. 对贵州深部粘性土物理力学指标统计分布规律的初步研究[J]. 贵州科学, 1997, (3): 27—31.

An exploration on statistical distribution regularity  
of great overburden clay physics and mechanics data in southwestern Shandong

SUN Ru-hua, LI Wen-ping, LIANG Shuang-hua

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Using the deep buried clay from the southwest regions of Shandong province, the basic engineering geology parameters are obtained from the laboratory tests. The correlations among various physical mechanical indexes of the deep clay are studied by means of the multivariate statistical analysis. The inner connections of the various indexes are discussed. And it sets up a fundamental for the internal relationship among the data of great overburden clay.

**Key words:** clay; mechanical indexes; statistical distribution; the southwestern Shandong