

土的分类研究方法

——对土分类定名的几点建议

高大钊

(同济大学, 上海)

熊兴邦

(中国建筑科学研究院地基研究所, 北京)

提 要

本文提出一种土分类的研究方法, 并为我国地基基础设计规范的土分类系统给出了一些修改的建议。

大量资料证实, 在低塑性土中可发现假塑性现象。根据这种假塑性现象, 笔者注意到在自然界存在着一种过渡性土类, 它与砂土或粘性土相比都具有独特的性质。这种过渡性土类可称为粉土。

笔者建议将大于0.074mm颗粒含量50%作为砂性土与粉土的界限值, 小于50%为粉土。

粉土的塑性指数一般小于10, 但阿太堡界限是否适用于作为评价粉土的指标是值得怀疑的。

一、前 言

最近十余年, 国内岩土工程界对土分类的研究十分重视, 引起了广泛的兴趣。研究的问题是多方面的, 有的研究分类指标的试验标准, 有的研究如何将国外的一些分类标准移植到我国来, 也有的对我国现有的分类方法进行完善化研究。研究的方法不相同, 所得的结论也并不完全一致, 这是很正常的现象, 这种百家争鸣的局面是学术思想活跃的表现, 也是土分类趋于统一的必要前提。

本文是笔者多年来对土分类研究的系统总结, 阐明笔者在进行土分类研究时所采取的基本思想和方法, 以及在研究过程中的一些发现。

二、土的分类研究方法

土的分类是岩土工程中的一项基础性研究, 它的目的不仅在于为人类工程活动提供评价土的标准, 也是为了进一步完善人类对于土的自然属性的认识, 这有其学术上的意义, 而且有实用意义。因此, 对于土分类的研究结果, 应当从学术性和实用性两方面来评价才不至失之偏颇。

从研究目的来说, 有两种类型的分类研究。一种是发展性的, 即为了针对现有分类体系

中的缺陷与不足,通过研究来加以发展与完善;另一种是验证性的,即为了验证一种体系是否适用于某种特定的条件而进行的研究。这两种研究的性质虽不相同,但在某一项目上常常是结合在一起的,即为了发展而验证,或者在验证中发展。

从方法论来说,研究分类的基本方法是聚类分析,所谓聚类分析不同于相关或回归分析。聚类分析的目的是对数集用一个或几个主导因素 x_i 来划分为二个或多个子集,只需确定其界限方程。最简单的界限方程是 $x_i = C_i$, C_i 为某一常量。塑性图上的A线实际上就是一种非常量的界限方程而并非是回归方程。多变量的判别函数是一种复杂的界限方程,只适于某些必须用多个主导因素同时划分土类的场合,例如判别液化土与非液化土,膨胀土与非膨胀土等等。

聚类分析中所采用的主导因素越多,分类工作越复杂,就难以在实践中推广应用,所以采用的主导因素应当尽量地少,而将次要因素略去。这种称为简易性的原则是分类工作必须遵循的。

聚类分析的基本准则是同类土的特征指标之间的离差应当尽量地小,异类土的特征指标平均离差应当尽量地大。所有的方法都应当遵循这个准则,关键是选择合适的特征指标和主导因素。

这里要区别两个概念。所谓特征指标是指用以表示不同土类所具有不同性状的指标,用 y_i 表示,如土的强度指标、压缩性指标、原位测试指标等都用作特征指标。所谓主导因素则是指能将特征指标明显加以聚类的分类指标,用 x_i 表示。常用的主导因素大致有两类,一类是塑性指标,如液限、塑限、液塑比和塑性指数等;另一类是土的粒度成分。这两类指标各适用于不同的情况。

聚类分析的第一步是用专业知识判断哪些性状可选作为特征指标,哪些指标对特征指标的聚类起主导作用。第二步是用各种方法来研究所显示的聚类作用,并定出界限方程。

可用的聚类方法分为数解法与图解法两种,判别分析是数解法的一种。图解法比较简单,是常用的方法。图解法可分为散点带转折、平均值转折、最大(最小)散点边界三种方法。

(一)散点带转折法

以 y 为特征指标, x 为主导因素绘制散点图,如发现散点带具有明显的转折趋势,转折处 $x = C$,即可认为在 $x = C$ 两侧土类特征性状规律有明显的差别, $x = C$ 可作为界限方程。图1是一种典型的散点图,纵坐标特征指标 y 为平均粒径 d_{50} ,横坐标主导因素 x 为砂粒含量(大于0.05mm颗粒的百分含量) $P_{>0.05}$ 。随着砂粒含量增大,平均粒径相应地增大,散点带表现出明显的转折趋势,存在两个转折界限。第一个在砂粒含量40%左右,第二个在砂粒含量70—80%之间,这两个界限值都有分类的意义。

(二)平均值转折法

如果散点带比较离散,可以将 x 划分为若干区间,将每个区间的 y 值取平均值,画成平均值的散点图,观察平均值散点的转折趋势。图2是典型的平均值散点图,纵坐标特征指标为液限和塑限,横坐标主导因素为塑性指数。这两个特征指标的平均值散点都有明显的规律性,在塑性指数 $I_p = 10$ 附近有明显转折,对于塑性指数小于10的低塑性土,平均值偏离直线,呈现假塑性的现象。

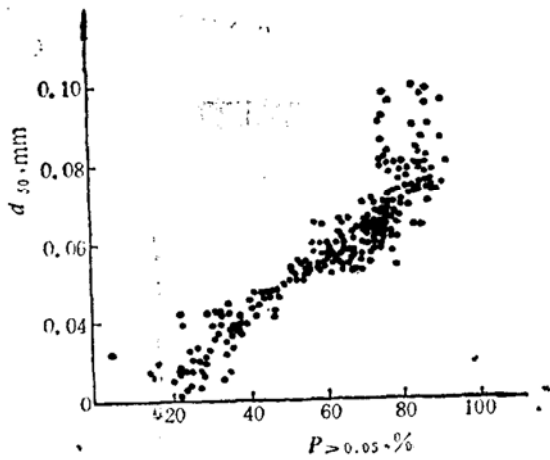


图1 平均粒径与砂粒含量的散点带

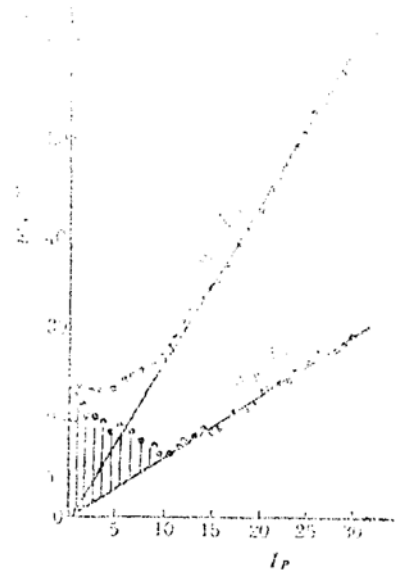


图2 液、塑限与塑性指数的关系

(三)最大(最小)散点边界法

如果被忽略的次要因素对特征指标还有比较大的影响,则散点就相当离散,即使取平均值散点可能仍看不出明显规律时,可试从散点图上寻求最大(最小)散点边界。如在主导因素 $x = C$ 两侧,最大或最小的散点边界有明显的突然性变化,则可认为 $x = C$ 有聚类作用。用它来划分两类土,其特征指标的最大可能值或最小可能值是不相同的。

当 $x < C$ (或 $x > C$) 时, $y \geq y_0$, y_0 称为最大边界值。当 $x < C$ (或 $x > C$) 时, $y \leq y_0$, y_0 称为最小边界值。

在图3中,给出了压缩系数与砂粒含量的散点图。影响压缩性的因素很多,故散点极为离散,但它的最大边界有十分明显的规律性,在砂粒含量20, 50, 80%附近均有突变,可能作为分类的界限来判别为不同的土类。

运用上述三种图解方法来确定聚类的界限方程时,要遵守重现性原则,不能只根据个别图件的特征就作出最后的结论。所谓重现性包含两方面的含义。对于某一特征指标所显示出来的界限方程,在所研究的范围内不同地区应当重现。例如在图3中所示的规律,砂粒含量($P_{>0.05}$)等于80%这个界限,在上海和天津两个地区重复出现,图2所示的规律在全国许多地区重复出现,均有相当好的重现性。重现性的另一含义是用同一个主导因素对不同特征指标进行聚类分析时,能重现大体相似的界限方程。只有符合重现性的界限方程才对土有分类意义。

采用粒度成分作为主导因素时,可供选择的粒径组合有多种,例如,砂粒含量(大于0.05 mm颗粒的百分含量) $P_{>0.05}$ 、粉粒含量(0.005—0.05 mm颗粒的百分含量) $P_{0.005-0.05}$ 、粘粒含量(小于0.005 mm颗粒的百分含量) $P_{<0.005}$ 等等。选用不同的粒径组合就会得出不同的界限方程。为了研究不同界限方程之间的关系,笔者提出了一种直角三角图解方法,它作为研究分类的工具是十分实用的,适用于不同分类界限之间的分析比较。

设 A , B , E 为三个粒组的百分含量, A 和 B 为对比粒组, E 为辅助粒组,令 $A + B + E = 1$ 。如以 A 为横坐标, B 为纵坐标,将纵横坐标满度值(100%)连一直线,此线必然是一根45°斜线。在图4的小图中,任意点的位置由坐标值 A 和 B 确定,则 E 值可由通过该点的水平线与斜线相交点和该点的水平距离来量度。利用这种图件就可以在图上分析不同界限方程

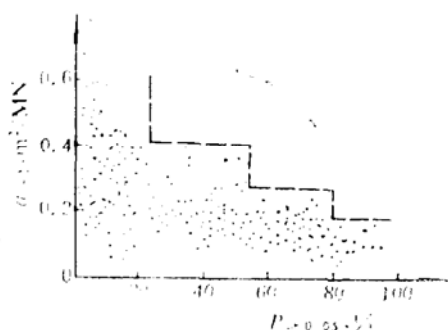


图3 压缩系数与砂粒含量的关系

的聚类作用。

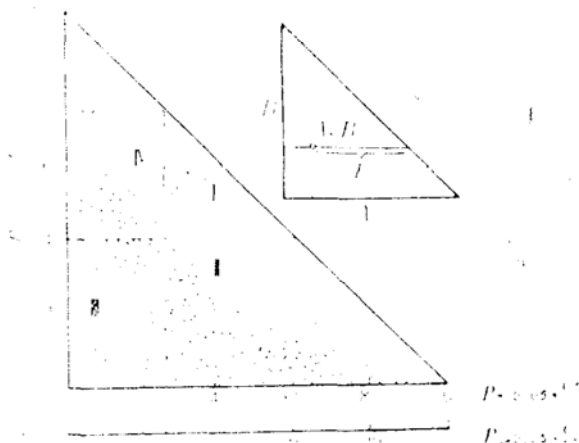


图4 大于0.1mm颗粒含量与砂粒含量的关系

图4中的大图是比较大于0.1mm颗粒含量与砂粒含量关系的直角三角图。纵坐标值 B 为大于0.1mm颗粒含量 $P_{>0.1}$ ，横坐标值 A 为小于0.05mm颗粒含量 $P_{<0.05}$ ，则辅助粒组 E 即为0.05—0.1mm颗粒含量(极细砂含量) $P_{0.05-0.1}$ 。第二根横坐标轴为砂粒含量，这两个横坐标值是互补的，即 $P_{>0.05} + P_{<0.05} = 1$ 。图中第一根水平线为 $P_{>0.1} = 75\%$ ，它是中砂与粉砂的界限方程。第二根水平线 $P_{>0.1} = 40\%$ ，是作为粉砂下限界限方程的一种方案；竖线为 $P_{>0.05} = 75\%$ ，是作为粉砂下限界限方程的另一方案。利用直角三角图上的散点群，可以比较这两种方案聚类作用的差别。这两个界限方程将图中散点(除去中砂部分)划分为四个象限。无论采用哪一种方案来分类，第IV象限的散点总划为粉砂，第II象限的散点总不会划入粉砂。问题在第I和第III象限中的散点，第I象限中散点非常之少，且极细砂含量很少，但第III象限散点很多，极细砂含量也很多，因此作为重点讨论的内容。按第一种方案(即 $P_{>0.1} = 40\%$ 方案)，第III象限不属于粉砂；但按第二种方案(即 $P_{>0.05} = 75\%$ 方案)，第III象限属于粉砂。从图可知，在第III象限中的散点，极细砂含量一般为50—80%，最高可达90%左右，人们已经知道，极细砂含量高的土，大多具有粉砂的典型特征，应划粉砂，由此可知第二方案的聚类作用优于第一方案。

直角三角图可同样用于比较其它分类方案。

三、假塑性现象的发现

液、塑限试验是十分普通的土工试验，但所测得的指标却表现了粘性土的重要特征——可塑性。它是粘性土区别于砂性土的重要标志。粘性土具有典型意义的可塑性，而砂性土是无塑性的。从粘性土到砂性土，可塑性是逐渐消失的。笔者根据大量试验现象和资料统计，发现在这两大类土之间的过渡性土中存在着假塑性现象^①。所谓假塑性是指一种表现的塑性，但其机理与粘性土的塑性不同。这种现象是在70年代初期编制我国第一本地基基础规范时开始发现的^②，在后来的研究中，特别是80年代修订规范的研究中，继续从各个侧面证实了低塑性土的塑性不同于粘性土，是一种假塑性或伪塑性^②。

① 工业与民用建筑地基基础设计规范编制说明，中国建筑科学研究院地基研究所编，1973年，第19页。

② 熊兴邦，谈谈塑性指数10，中国建筑科学研究院，1981年，第1页。

(一)假塑性现象

假塑性现象是从液、塑限与塑性指数关系的平均值趋势上看出来的。在粘性土中，液限与塑性指数、塑限与塑性指数均呈近似的线性关系，这符合土质学的原理。但在低塑性土中，这种线性关系消失了，统计点明显偏离理论上的线性关系。从图2可以看出这种现象，在塑性指数小于10以后，随着塑性指数减小，塑限不仅没有减小，反而逐渐增大，这一现象无法用水膜理论来解释。

土的可塑性是与粘土颗粒表面活性有关的一种现象。粘粒含量越多，土的分散程度越高，亲水性矿物含量越多，水膜厚度越厚，水膜持水的量就相应增加，液限、塑限、塑性指数都随之增大，这就是可塑性的机理。但在低塑性土中，粘粒含量只有百分之几到十几，绝大多数土粒不可能有很厚的水膜，不可能有图2中所示的如此高的液限和塑限，偏离线性关系而增大的这部分含水量显然不是水膜的持水量，而是由别的原因产生的。这种塑性与典型的塑性有本质的区别，可称为假塑性。图2所示的规律有很好的重现性，说明假塑性是客观存在的普遍现象。

(二)假塑性的机理

可塑性的机理是由于表面活性和水膜的存在，那末假塑性产生的原因是什么呢？

1. 塑限试验时，将土条滚搓到标准尺寸的过程中，水分逐渐蒸发，直至弱结合水蒸发完毕，留下不易蒸发的强结合水，此时呈现丧失塑性的表现特征，所测定的含水量实质上是相应于强结合水膜持水的量。对低塑性土，无法按试验标准操作，土条尚未滚搓到标准尺寸即已粉碎。许多单位不得不采用了各种非标准的做法来作塑性试验，结果出现了如图2所示的塑限偏高的现象，阴影部分的含水量并不表示强结合水膜的持水量。应当注意到在低塑性土中，粘粒含量已经很少，却含有大量的粉土颗粒，粉土颗粒并不具有典型意义的吸附水膜，但在非饱和状态时，三相界面上具有毛细现象。塑限试验的非标准做法是先将土块压成饼，再切成条，然后稍加滚动即认为到达塑性界限，此时完全依靠微弱的毛细压力来保持土条的完整性。此时所测得的含水量中大部分为毛细持水量，这就是在图2中出现一块阴影的原因。

2. 土达到液限时，其极限抗剪强度是一个很小的稳定值，正确地确定液限的前提是保证液限皿中土样饱和。图5是液限时的饱和度与塑性指数的散点图，(a)、(b)两图是在完全独立的条件下由两个试验室得到的，说明重现性是好的。在饱和度散点带上有明显转折的趋势，当塑性指数大于10时，饱和度大于90%，接近于饱和；而当塑性指数小于10时，饱和度仅为80—90%，饱和度很低，属三相土。

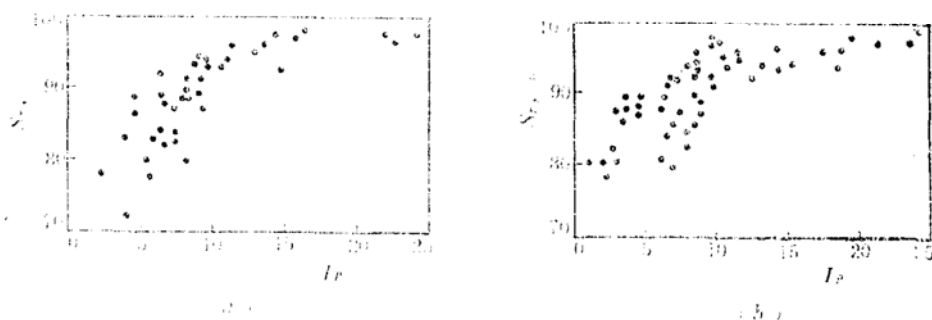


图5 液限时饱和度和塑性指数的关系

从图5可见,对于塑性指数小于10的低塑性土,液限试验时土体处于非饱和状态,在圆锥面压力作用下土体会发生压缩,因此圆锥不停地沉入土体中,久久不能稳定。按试验标准是在圆锥沉入15 s时读数,因为粘性土在圆锥沉入15 s后下沉量极微。但低塑性土在15 s以后仍有大量下沉。图6是从15—60 s之间圆锥沉入距离与粘粒含量之间的关系。说明15 s所沉入10mm仅仅是一个假象,实际上稳定的下沉距离已超过10mm,因此所测得的液限偏大。这就是在图2中,液限与塑性指数关系出现非线性的原因。为什么低塑性土在液限试验时饱和度很低呢?这也与低塑性土含有大量的粉粒有关。

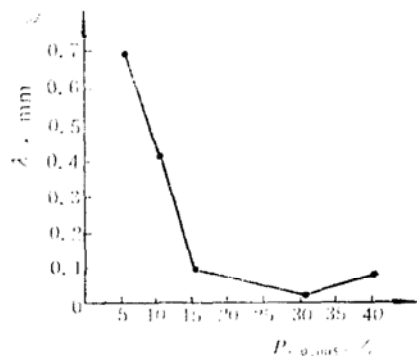


图6 圆锥沉入距离 λ 与粘粒含量的关系

(三)假塑性的意义

假塑性现象的发现对于土分类学的发展具有重要的学术意义,使人们对于土的可塑性的认识前进了一步。特别为认识与鉴别粘性土和砂性土之间的过渡性土类提供了依据。按照土质学基本性质的本质差别,将过渡性土类划分出来,有助于深入研究它的工程特性,对生产实践有指导意义。考虑到这类土的粒度成分和工程性状的特征,建议定名为粉土^③,并以塑性指数10为分类界限^④,粉土和粘性土主要性质的差异见表1。

表1

粉土与粘性土的区别

土性 土类	内摩擦角	压缩系数	比贯入阻力	抗液化能力	压实加固特性
粘性土	低	高	小	高	好
粉土	高	低	大	低	差

表1中所列的各种土性的区别,大多可用最大(最小)边界法显示出来,而且具有重现性,此外,粉土的地基承载力与粘性土亦有显著的差别^⑤。

四、粒度界限的检验

在我国通用的分类体系中,粉砂的下限是不明确的。尽管一些规范、规程规定了用塑性指数 $I_P = 1$ 或 $I_P = 3$ 来划分,但由于存在假塑性现象,这种标准已失去了实用意义。因而寻求新的分类界限是必要的。

这种新的分类界限应当采用粒度成分,而且应当采用粗粒组的含量而不宜采用细粒组含量^⑥。

为了使我国的分类体系逐步与国际上常用的标准靠拢,需要研究国外划分粗细粒土的标

③ 高大钊、熊兴邦,关于一般土的分类与定名的建议,建筑科学研究报告,1985, No.2-3,第12页。

④ 高大钊、熊兴邦,论塑性指数10作为分类的界限,工程勘察与地基基础,1986年第1期,第4页。

⑤ 熊兴邦、高大钊,关于低塑性土地基承载力表的修订,建筑科学研究报告,1985, No.2-1,第16页。

⑥ 高大钊、熊兴邦,论粉砂的分类界限,工程勘察与地基基础,1986年第2期,第8页。

准。按美国标准,采用大于0.074mm颗粒百分含量50%;按英国标准,采用大于0.06mm颗粒百分含量65%。这两种标准是否等效,是否适用于我国,这是需要检验的问题。

由于我国原有土工试验标准中没有这两种粒径标准,因而无法用现有资料来直接验证。

为了寻求两种标准之间的等效关系,在级配曲线上作如下的简化处理,将 D_{60} 到 D_{30} 和 D_{30} 到 D_{10} 之间的曲线分别用割线来代替,则当 D_A 在 D_{60} — D_{30} 之间时,可求得^⑦

$$P_A = P_B + \frac{60 \ln \frac{D_B}{D_A}}{\ln \frac{C_u}{C_c}}$$

式中 P_A ——大于 D_A 颗粒的百分含量; P_B ——大于 D_B 颗粒的百分含量; C_u ——不均匀系数; C_c ——曲率系数。

根据我国各地级配曲线的资料得到 C_u/C_c 的平均值为2.43。如以我国原有的粒径标准0.05mm为准,分别与上述两种国外标准等效,求出等效的百分含量如表2所示。从表2可以看出,与国外常用标准等效时,大于0.05mm颗粒含量为75%左右。

以 $P_{>0.05}$ 为主导因素,分别以 d_{50} , a_{1-2} , P_s , N , ϕ 为特征指标画散点图,用各种方法求得的界限方程均在 $P_{0.05} = 75\%$ 左右,在70—80%范围内出现比较明显的变化^③,典型的散点见图1和图3。这些资料也均有很好的重现性,这与等效值是一致的。

表2 各种标准之间的等效值

粒径 D (mm)	0.074	0.06	0.05
大于 D 颗粒百分含量(%)	50	65	75

表2给出的百分含量都是等效的,都可作为粉砂的下限。如粒径标准采用0.074mm,则可用50%百分含量来区分砂性土与粉土,小于50%为粉土。这个标准经检验证明符合我国资料所显示的规律性。

五、几点建议

本文的研究工作主要是为修订规范而作的,所提出的土分类研究方法具有学术上的意义和实用意义。根据上述研究结果,对规范修订方案提出如下建议:

1. 建议在砂性土和粘性土之间划出一类过渡性土类,定名为粉土;
2. 粉土与粘性土的界限方程采用 $I_P = 10$ 是适宜的;
3. 鉴于我国试验标准已经规定使用0.074mm筛,停止使用0.1mm筛。根据检验结果,建议采用大于0.074mm颗粒百分含量50%作为砂性土与粉土的界限方程。

参 考 文 献

- [1] 高大钊,试论低塑性土及其分类界限,同济大学学报,1984年第3期,第41页。

⑦ 熊兴邦、邹秀兰,粉砂与轻亚粘土的划分,中国建筑科学研究院,1980年第10页。

Research on Soils Classification

——A Recommendation for Soils Classification

Gao Dazhao

(Tongji University, Shanghai)

Xiong Xingbang

(Chinese Academy of Building Research, Beijing)

Abstract

In this paper, an approach to research on soils classification is developed, and a recommendation is presented for the soils classification system in Foundation Design Code of China.

It is indicated by large amount of experimental data that the pseudo-plasticity phenomenon often appears in soil of low-plasticity. Based on the hypothesis of pseudo-plasticity, the writers have found that there exists a transitional type of soils, which can be called silt, with their characteristics quite different from sandy and clayey soils.

The writers suggest that the soils containing less than 50% of particles which are coarse than 0.074mm should be defined as silt.

The plasticity index of silt is in general less than 10, but whether Atterberg limits can be used as indices for such soils is doubtful.