

软土的含水率与界限含水量意义的讨论

郭进京 王 芳 赵光鹏

(天津城市建设学院土木工程系,天津 300384)

【摘 要】 鉴于软土的含水率、塑限、液限等工程性质指标的理论定义和试验测试结果不完全吻合,同时考虑到软土中不同形式的水对软土工程性质的不同影响和实际工程中应用习惯,建议废弃软土含水率的理论定义,而将软土含水率定义为软土中除强结合水外其它水的质量与土的固体颗粒质量之比,这里软土固体颗粒中粘粒定义为粘土矿物聚集体与其表层强结合水的组合体,这样使软土含水率理论定义与试验测试的结果相统一。软土的塑限(w_p)、液限(w_L)以及由此而派生的塑性指数(I_p)和液性指数(I_L)都是通过重塑土的测试获得的,未考虑软土天然结构对这些指标数值的影响,建议通过对软土结构研究,能提出一个结构影响系数,进而修正试验获得的数据,使这些指标更接近天然软土的实际。同时根据粘粒与水相互作用的特点和软土中各种形态水对软土状态和变形机制的影响,把塑限和液限的含义予以修正,塑限是软土中弱结合水的最小含量,而液限是弱结合水最大含量并有一定数量自由水。

【关键词】 软土;含水率;塑限;液限;水-土作用

【中图分类号】 TU 447

Discussion on Significances of Natural Moisture Content and Limit Moisture Contents of Soft Clays

Guo Jinjing Wang Fang Zhao Guangpeng

(Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

【Abstract】 Based on the analysis for the differences between the theoretical definitions of w , w_p and w_L of soft clays and usually used their test values, in consideration of different water forms and their functions in soft clay, it is suggested that w should be redefined as the ratio of total water mass except for strong combined water and soil grain mass, where soft grain means the integrated particles of real soil grains and strong combined water. This definition can avoid the confusion between theoretical definition and test results. The limit moisture contents (w_L , w_p) and deduced plastic and liquid indexes (I_L , I_p) from limit moisture contents (w_L , w_p) are all obtained from remold soft soil test without considering the effect of the natural structure of soft soils for them. Therefore, it is proposed that introducing a structure coefficient which can get from structural study for soft soil, emends the w_L , w_p , I_L and I_p . Emended w_L , w_p , I_L and I_p will be conformed to natural soft soil engineering practice. Meanwhile, on the interaction between clayey particles and different form water in soft soils and different function of different form water for the soft soil deformation mechanism, implication of w_L and w_p should be revised, that is, w_p represents minimum weak combined water contents and w_L represents maximum weak combined water contents with little free water.

【Key Words】 soft soils; moisture contents; limit moisture contents; water-soil interaction

0 引言

软土是一个特定的工程术语,按照岩土工程勘察规范(GB 50021—2001)的定义,天然孔隙比大于或等于 1.0,且天然含水量大于液限(w_L)的细粒土应判定为软土,包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等^[1]。我国东部沿海地区软土分布十分广泛,包括长三角、珠三角、黄河三角洲、天津、河北等地区。从

地质成因上分析,软土一般是在静力或水流环境中以细颗粒为主的近代沉积物,其直径小于 0.1 mm 的颗粒一般占土样的 50% 以上,包括海积软土、泻湖相软土、河口三角洲相软土、湖沼相软土、河漫滩相软土、湖沼相软土、人工冲填土等^[2-3]。尽管软土成因环境多样,但其工程性质却具有共同的特点,即天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低、渗透

系数小,一般呈软塑到流塑状态。正是因为软土特殊的工程性质,所以软土在工程荷载作用下,地基承载力低,地基沉降变形大,尤其是不均匀变形大、变形稳定历时长,基坑开挖中自立性差易坍塌和产生土坡滑动等^[4]。软土地基的科学处理和工程利用,关系到整个工程的质量、投资、工程进度以及工程安全,所以软土工程特性和软土地基处理成为岩土工程学科研究中最为热点的科学和技术问题。对于软土地基处理方案合理选择,关键是对软土中水的赋存状态和水与土颗粒之间复杂的物理、化学和力学作用机理的科学认识。一定程度上说,解决软土中水的问题是软土工程研究的核心。本文从软土中水的赋存状态特征分析入手,通过对软土工程研究中几个常用的、且与水有关的工程性质指标定义和内涵的分析与讨论,试图明确指标的科学涵义和正确使用这些指标。

1 软土的含水量、塑限、液限及其相关指标定义与含义

软土是由固、液、气三相组成,固体颗粒是其主要组成部分,构成了软土的骨架,液体一般是水,气体主要是空气,它们充满在固体颗粒之间的孔隙中。软土工程特性是软土中三相之间复杂的物理化学作用所决定。但一般来说软土多为饱和土,所以软土工程特性主要是由水与土颗粒相互作用所控制。软土工程特性指标中与水有关的指标包括含水量(率)、塑限、液限、塑性指数、液性指数和饱和度以及渗透系数^[5-6],这些指标多是在试验室通过对扰动样品的测定获得。虽然从理论上讲,与水有关的软土工程特性指标的定义很明确,但由于用于测试的仪器设备、测试条件和人为因素的影响,所获得的数据与实际情况有误差,尽管如此,与水有关的软土工程特性指标目前仍是评价软土的工程适应性、软土工程处理和设计的重要参考指标。所以为了合理使用这些指标,更客观的评价软土的工程适宜性,有必要深入理解这些指标的理论内涵和实际意义。

1.1 软土含水率(软土含水量)($w\%$)

土的含水量定义为土中水的质量与土粒质量之比,以百分数表示^[5]:

$$w(\%) = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m —土的总质量; m_s —土中固体颗粒的总质量; m_w —土中水的总质量。

试验室中测定土的含水率方法包括烘干法、酒精燃烧法、比重法、碳化钙气压力法。但最常用的是烘干

法。按照烘干法测定软土的含水率的定义应为:试样在 $105\text{ }^\circ\text{C} \sim 110\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘至恒量时,所失去水的质量与干土质量的比值,用百分数表示^[6],即:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: w 为含水率, $\%$; m_1 为称量盒加湿土的质量, g ; m_2 为称量盒加干土的质量, g ; m_0 为称量盒的质量, g 。

软土是一种细粒土,粘土矿物或粘土矿物聚集体是软土的主要固体颗粒组分。粘土矿物或粘土矿物聚集体由于离解、吸附、同晶形阳离子替换,常常带有不平衡的负电荷。由于表面带负电荷,粘土颗粒四周形成一个电场,在电场作用下水中的阳离子被吸引在颗粒四周,具有极性的水分子在电场中发生定向排列。颗粒表面的负电荷构成电场的内层,水中被吸引在颗粒表面的阳离子和定向排列的水分子构成电场的外层,合称为双电层^[5]。软土中水的赋存状态可以分为强结合水、弱结合水、毛细水和重力水,其中强结合水紧靠颗粒表面,所受电场作用力很大,吸附力可达 $1\ 000 \sim 2\ 000\ \text{kPa}$,几乎完全固定排列,丧失了液体的特性而接近于固体,密度大于 $1.5\ \text{g}/\text{cm}^3$,完全不能移动,不能传递静水压力。这层水在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 以下是烘不掉的。而弱结合水由于离土粒表面较远,分布在强结合水的外围,受到电场的约束力较小,因此在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 以下水分子动能增大可以逃逸电层约束。软土中除了上述两种水之外,极微小的孔隙也有利于毛细水的存在,虽然理论上软土孔隙中也应存在重力水,但事实上饱和软土的渗透系数很小($10^7 \sim 10^9\ \text{cm}/\text{s}$),给水性很差,所以软土中的重力水也不同与无粘性土中的自由水。在对软土中水的赋存状态分析后,讨论软土含水率指标的内在含义。

根据软土含水率的理论定义式(1), m_w 应为软土中除固体颗粒外全部水的质量,即强结合水+弱结合水+毛细水+重力水。但根据软土含水率的测定方法(烘干法)给出的含水率数值却是弱结合水+毛细水+重力水的质量与固体颗粒+强结合水的质量之比。显然含水率的理论值和测试值从概念上是有差别的。由于不同地质成因的软土中粘土矿物种类和相对含量以及粘土矿物聚集的方式和形态不同,所以不同类型软土中水的赋存状态和数量,特别是弱结合水构成的水膜厚度有较大差别。此外,含水率测定中弱结合水是否完全释放也是有待研究的问题。在软土研究中,土的含水率是计算土的干密

度、孔隙比、饱和度、液性指数等工程性质指标的重要依据。因此,在使用软土的含水率时,需要明确含水率的真实含义。否则依据意义不明确的含水率测定值推算软土其它工程特性指标,势必会传递误差,造成对软土工程特性认识上的偏差。鉴于上述,笔者建议在软土研究中废弃理论含水率的定义,取而代之以试验测试的含水率定义予以统一,同时明确软土含水率内在含义为软土除强结合水外的其他水的质量与土的固体颗粒质量之比。同时把软土固体颗粒的粘粒定义为土颗粒与强结合水的聚合物。当然对不同矿物成分和结构土中强结合水与弱结合水关系以及对软土性质的制约作用仍需深入研究。

1.2 软土的稠度指标

软土是一种粘性土,粘性土的稠度指标是其重要的工程特性指标。所谓软土的稠度指标是指土的软硬程度或土对外力引起变形或破坏的抵抗能力^[5]。岩土工程中常用的指标有塑性界限(w_p)、液性界限(w_L)、塑性指数(I_p)、液性指数(I_L),这些指标的定义如下:

塑性界限(w_p),通常简称塑限,相当于土从半固体状态转变为塑性状态时的界限含水量。

液性界限(w_L),通常简称液限,相当于土从塑性状态转变为液性状态时的界限含水量。

塑性指数(I_p)定义为: $I_p = w_L - w_p$

液性指数(I_L)定义为: $I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$ (3)

软土稠度指标的含义在一般教科书中都有说明^[5]。塑限是土中水的形态大约是强结合水的含量达到最大时的含水率;而液限是土中水除结合水(强结合水+弱结合水)外,已有相当数量的自由水;塑性指数大体上表示土所能吸着的弱结合水质量与土粒质量之比,常作为细粒土工程分类的依据。液性指数是表示土的天然含水量与界限含水量之间相对关系的指标,定量表示土体处于什么状态,从式(3)可知当 $I_L = 0$ 时,当 $w = w_p$,土从半固态进入可塑状态,而当 $I_L = 1$ 时, $w = w_L$,土从可塑状态进入液态,当 $0 < I_L < 1$ 时,土处于可塑与液态之间。

从理论上讲,上述指标可以表征软土的状态和土中水的赋存形式及相对含量。但应该指出,在岩土工程实践中,所使用的软土稠度指标值都是在试验室通过对重塑土的测试而获得的,也就是说 w_p 和 w_L 都是土的天然结构被彻底破坏后测得的。因此,用 I_L 反映土的稠度就存在不可避免的缺陷,一是忽略了软土的结构性,二是饱和软土天然含水量

(率)试验室测定值并非是软土中除结构水外的全部水。因此在使用软土的稠度指标时,应该充分考虑如下问题,并明确各稠度指标的真实含义。

1)因为含水量相同的土,保持天然结构比结构被破坏有更大的强度,也就是说一般使用的由试验室测试获得的软土的液限(w_L)、塑限(w_p)要比保持天然结构的软土小,则同样含水量的软土,天然状态下的 I_L 一般要比试验室测得的小,两者之间的相关关系是一个值得深入研究的问题。如果引入一个结构影响系数来修正稠度指标,可能更接近实际。

2)对软土而言,水的赋存形式有强结合水、弱结合水、毛细水、重力水四种,严格讲这四种水都为孔隙水,但一般认为颗粒表层的强结合水是不可移动的,因此软土中粘粒不应简单定义为由粘土矿物聚集而成的固体颗粒,而应定义为由粘土矿物聚集体与其表面不可移动的强结合水同构的颗粒体。那么塑限是软土中强结合水最大含量的认识应修正为最小弱结合水含量更为恰当,如果软土中除了强结合水外,没有其他形式的水则软土应呈固态和半固态。同样液限是除结合水外已有一定数量的自由水的认识也应修正为弱结合水的最大含水量。

2 讨论

软土工程是岩土工程中重要的研究领域,如何科学合理利用软土工程特性和正确处理软土地基问题对于我国东部沿海城市建设、地下空间开发和交通路网建设具有重要的实际意义。而对软土工程性质的客观认识是解决软土工程问题的基础。作为一种特殊的工程土体,软土工程性质是由水和粘粒相互作用的机理所决定的,特别是软土中水的赋存形式和数量是决定软土的工程性质的重要因素之一。对于软土而言,一般工程界常用的与水有关的指标包括天然含水量(w)、塑限(w_L)、液限(w_p)以及由此计算的塑性指数(I_p)和液性指数(I_L)。这些指标主要是通过对重塑土或扰动土室内测试获得,其理论定义与实际使用的测试值有一定差别。通过对与水有关的软土工程特性指标定义和试验测试原理以及软土中水与粘粒的作用方式等分析,对软土与水有关的几个工程性质指标意义和使用问题提出如下建议:

1)鉴于软土的含水率的理论定义与通常试验获得的值之间不对应,同时考虑到实际工程中应用的习惯,建议废弃原来的理论定义,而重新定义含水率为软土中除强结合水外其他水的质量与土的固体颗粒

质量之比,同时把软土固体颗粒中粘粒定义为粘土矿物聚集体与其表层强结合水的组合体,这样使软土含水率理论定义与试验测试的结果相统一。

2)软土的塑限(w_p)、液限(w_L)以及由此而派生的塑性指数(I_p)和液性指数(I_L)都是对重塑土的测试获得的,未考虑软土天然结构对这些指标数值的影响,建议通过对软土结构研究,能提出一个结构影响系数,进而修正试验获得的数据,使这些指标更接近天然软土的实际。同时根据粘粒与水相互作用的特点,以及软土中各种形态水对软土状态和变形机制的影响,把塑限和液限的含义予以修正,塑性是软土中弱结合水的最小含量,而液限是弱结合水最大含量并有一定数量自由水。

实际上,软土中水的赋存形式和数量与软土的结构(孔隙大小和形状、颗粒大小和形状、颗粒排列组合方式等)和颗粒成分(碎屑矿物颗粒和粘粒的相对含量以及粘土矿物的种类和相对含量)密切相关,它们之间精确关系目前科学界还没有完全认识。虽然近十余年来利用现代观测技术和图像处理技术对软土微结构进行了深入研究并取得了不少进展^[7-10],但微结构研究中忽略了水的作用,仅关注于颗粒和孔隙的几何参数变化,显然不能全面理解软土工程性质和变形机制的内在原因。软土工程特性研究中另一个倾向是通过对大量实验测试数据和原位测试数据进行统计分析,试图建立它们之间数学统计上的关系,以此指导岩土工程实践^[3,11-12]①,但遗憾的是多数研究者对统计分析的数据来源、可靠性以及指标参数之间内在关系分析不够,难以推广应用。如本文所讨论的软土与水有关的工程性质指标中含水率常作为软土干密度、孔隙比、饱和度、液性指数等项指标计算的主要依据,但对含水率内涵不明确的情况,势必会导致对软土工程特性认识上的偏差。笔者认为未来软土工程特性研究中不仅要重视软土的微观结构研究,更应重视软土中最为稳定的颗粒成分、颗粒与水的复杂物理、化学作用机理研究,更加深入认识和理解软土工程特性的内在决定因素,指导软土工程实践。

3 结论

1)鉴于软土的含水率的理论定义与通常试验获

得的值之间不对应,同时考虑到实际工程中应用的习惯,对软土天然含水率定义修正为:除强结合水外其他水的质量与土的固体颗粒质量之比,同时把软土固体颗粒中粘粒定义为粘土矿物聚集体与其表层强结合水的组合体,这样使软土含水率理论定义与试验测试的结果相统一。

2)软土的塑限(w_p)、液限(w_L)以及由此而派生的塑性指数(I_p)和液性指数(I_L)都是对重塑土的测试获得的,未考虑软土天然结构对这些指标数值的影响,如果通过对软土结构研究,提出一个结构影响系数来修正实验获得的数据,使这些指标更接近天然软土的实际。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家标准 GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [2] 李影明. 软土地基加固的理论、设计与施工[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 杨顺安,冯晓腊,张聪辰. 软土理论与工程[M]. 北京:地质出版社,2000.
- [4] 唐益群,周念清,王建秀,等. 软土环境工程地质学[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [5] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [6] 宋 畅,柴寿喜,王 沛,等. 土质试验与试验分析[M]. 天津:天津大学出版社,2007.
- [7] 胡瑞林,李向全,管国琳,等. 粘性土微结构的定量模型及其工程地质特征研究[M]. 北京:地质出版社,1995.
- [8] 李向全,胡瑞林,张 莉. 软土固结过程中的微结构变化特征[J]. 地学前缘,2000,7(1):147-152.
- [9] 谢定义,齐吉琳. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):651-656.
- [10] 夏 佳,陈新民,严三宝,等. 现代河漫滩软土固结与压缩微结构探析[J]. 岩土工程学报,1997,19(5):67-73.
- [11] 王海鹏,陈 峰. 厦门港湾软土工程地质性质的研究[J]. 台湾海峡,1998,17(3):235-243.
- [12] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状和展望[J]. 土木工程学报,1999,32(4):3-9.

收稿日期:2008-11-20

① 斯月英. 南京市城西长江漫滩软土的工程地质特性探讨[J]. 地基处理,2001,12(2):37-44.