

上海地区软土含水量与其他工程性质参数相关性分析

郭 嫄

上海元易勘测设计有限公司, 上海 201203

[摘要]以上海地区软土为研究对象,收集区域内 2620 个软土试样试验成果进行统计分析,得出软土基本物理性质指标范围值,并研究软土层含水量与密度、孔隙比、液限、塑限、液性指数和塑性指数之间的线性关系。结果表明:含水量与孔隙比和密度之间存在极强的线性关系;与液性指数之间存在较强的正向线性关系;与液限、塑限和塑性指数之间虽然存在统计学上的显著线性关系,但其线性解释能力(R方值)相对较低。

[关键词]上海;软土;基本物理性质指标;线性关系

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16600

中图分类号: TU411

文献标识码: A

Correlation Analysis between Soft Soil Moisture Content and Other Engineering Property Parameters in Shanghai Area

GUO Man

Shanghai Yuanyi Survey and Design Co., Ltd., Shanghai, 201203, China

Abstract: Taking soft soil in the Shanghai area as the research object, 2620 soft soil sample test results were collected for statistical analysis, and the range of basic physical property indicators of soft soil was obtained. The linear relationship between the moisture content of soft soil layer and density, porosity ratio, liquid limit, plastic limit, liquidity index and plasticity index was studied. The results indicate that there is a strong linear relationship between water content, porosity ratio, and density; There is a strong positive linear relationship with the liquidity index; Although there is a statistically significant linear relationship between liquid limit, plastic limit, and plasticity index, their linear explanatory power (R-squared) is relatively low.

Keywords: Shanghai; soft soil; basic physical property indicators; linear relationship

引言

在土力学^[1]中,土体的含水量是一个至关重要的基本物理性质指标。含水量不仅直接影响土体的重量、体积,更深远地决定了土体的力学性能,如强度、变形和渗透性等。了解含水量与其他土工参数之间的内在联系,对于地基基础设计、边坡稳定性分析、路堤填筑、地下结构施工等各类岩土工程问题具有不可替代的指导意义。

上海地区广泛分布第③层淤泥质粉质黏土、第④层淤泥质黏土,该两层是上海地区常见的饱和软土,具有高含水量、高孔隙比、高灵敏度、易流变等工程特性^[2],对各类工程建设具有较大影响,因此,土体自身物理力学性质及各物理参数之间的相互关系研究显得非常重要。为了研究软土的工程特性,田丽霞^[3]通过收集大量的工程案例,运用数理统计方法,得到实测液限值计算塑限值的经验公式。李玉朋^[4]等利用最小二乘法对天津软土各物理力学性质间的相关性进行统计,得出天然含水量与孔隙比具有良

好的相关性。屈若枫^[5]等分析了武汉地区工程特性,分析了武汉地区淤泥质土的物理力学参数及指标间的相关性。

本次收集大量上海地区第③层淤泥质粉质黏土和第④层淤泥质黏土土工试验数据,通过对一系列土样数据进行线性回归分析,旨在分析含水量与以下关键土工参数之间的线性关系:密度、比重、饱和度、孔隙比、液限、塑限、塑性指数和液性指数。通过深入解析回归结果,总结了含水量与各指标间的相应的经验公式,包括 R 方(R-squared)值和回归系数,我们将揭示这些关系背后的土力学原理,并探讨其在工程应用中的实际作用。

1 上海地区软土的基本特性

本次收集上海地区不同区域软土(第③层、④层)土工试验数据,包含约 2620 组土样,统计 18340 条土工试验数据,对第③层、④层土的基本物理力学指标进行研究,其概况如下表 1,可知,本次收集数据在上海市《岩土工程勘察标准》^[6](DG/TJ08-37-2023)统计数据内,数据具有可靠性。

表 1 上海地区软土基本物理力学参数统计表

层号		含水量 w/%	密度 ρ (g/cm ³)	孔隙比 e	液限 ω_L (%)	塑限 ω_P (%)	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}$ (MPa ⁻¹)	压缩模量 E _s (MPa)	固结快剪	
											c (kPa)	Φ (°)
③	最小值	35.1	1.73	1.001	31.4	17.1	11.2	1.01	0.32	2.13	9	13
	最大值	48.5	1.85	1.343	40.9	24.9	16.9	2.04	1.10	6.36	17	23.5
④	最小值	45.6	1.64	1.301	40.0	22.0	17.2	1.01	0.84	1.67	9	9
	最大值	57.7	1.75	1.611	48.5	26.6	23.7	1.71	1.52	2.81	15	13.5

2 数据分析方法

数据处理阶段,利用最小二乘法拟合分析,得出含水量与各参数间的相关性关系。为确保回归分析的准确性,所有涉及的数值型列均进行了严格的类型转换,并处理了可能存在的缺失值,确保了数据的完整性和可用性。

线性回归模型是本次分析的核心工具。对于每一个待分析的土工参数(因变量),我们都以含水量(自变量)进行一元线性回归建模。模型形式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times X + \epsilon$$

其中, Y 代表因变量(如密度、孔隙比等), X 代表含水量(自变量), β_0 是截距, β_1 是回归系数, ϵ 是误差项。回归分析的关键指标包括:

R 方 (R-squared, 决定系数): 衡量模型对因变量变异的解释程度。R 方值介于 0 到 1 之间,越接近 1 表示自变量对因变量的解释能力越强,模型拟合度越好。

回归系数 (Coefficient): 表示自变量每增加一个单位,因变量平均变化的大小。其符号(正或负)指示了变量之间的正向或负向关系。

3 含水量与各项土工参数的相关性分析

3.1 含水量与密度的关系

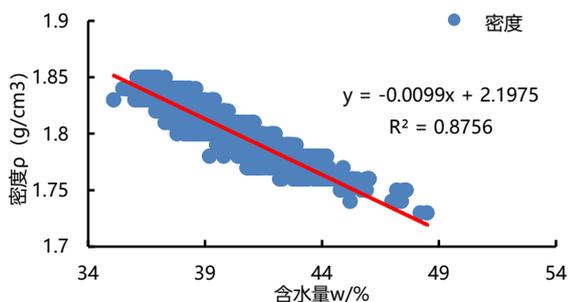


图1 第③层含水量-密度关系

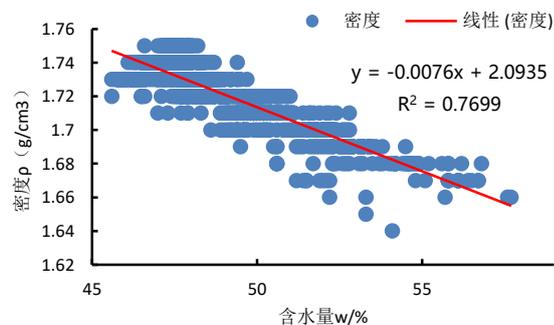


图2 第④层含水量-密度关系

本次分析揭示了第③层、第④层含水量与土体密度之间存在高度显著的负向线性关系,其 R 方值分别 0.876、0.770,表明含水量可以解释土体密度约 87.6%、77.0% 的变异性。密度(通常指湿密度)是土体质量与总体积之比。当土体中水分增加时,虽然水本身有质量,但由

于水分的加入往往会占据更大的体积,并替代了部分较重的土颗粒,或者在同样体积下,水的质量增量相对土颗粒的质量增量导致湿密度降低。更重要的是,上海地区第③层、第④层为饱和土或趋于饱和的土,孔隙中充满了水。当含水量增加到一定程度,意味着孔隙中的水更多,而固体骨架的相对密度贡献减小,从而导致整体湿密度的下降。

3.2 含水量与孔隙比的关系

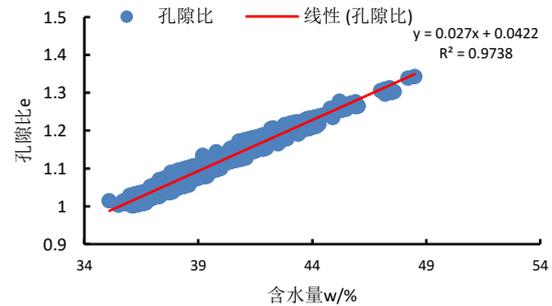


图3 第③层含水量-孔隙比关系

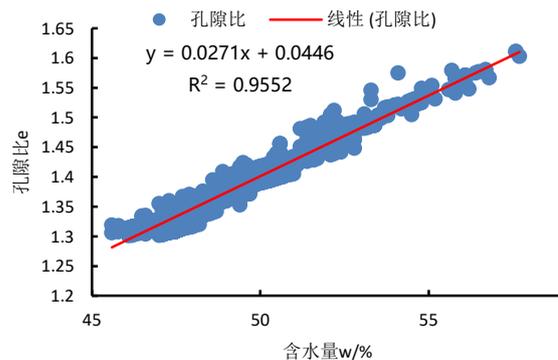


图4 第④层含水量-孔隙比关系

本次分析显示第③层、第④层含水量与孔隙比之间存在极高统计学显著的正向线性关系, R 方值分别高达 0.974、0.955,表明含水量可以解释孔隙比约 97.4%、95.5% 的变异性。这一结果在所有分析的参数中表现出最强的线性关联。孔隙比定义为土体中孔隙的体积与土颗粒体积之比。对于完全饱和的土体,孔隙体积近似等于水的体积。含水量与孔隙比之间存在一个重要的关系式: $e = w \cdot G_s / S_r$ 。当土体趋于饱和 ($S_r \approx 1$) 且土颗粒比重 G_s 变化不大时,孔隙比与含水量之间将呈现出非常密切的正向线性关系。它表明在特定土体类型(饱和土)中,可以通过测量含水量来非常准确地估算或预测土体的孔隙比。孔隙比是计算土体压缩性、渗透性、剪切强度等重要力学参数的关键输入。例如,在计算地基沉降时,压缩系数和固结系数都与孔隙比密切相关。此外,在评估土体液化可能性时,孔隙比也是一个重要指标。这种强烈的线性关系简化了现场测试和参数估算,提高了工程效率。

3.3 含水量与液限的关系

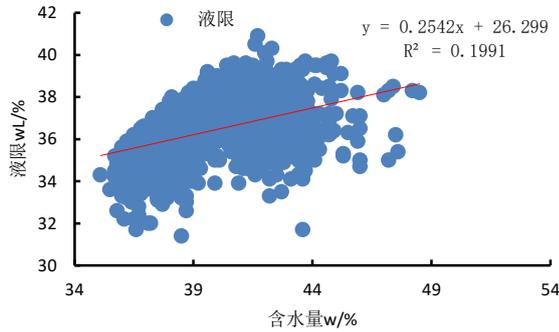


图5 第③层含水量-液限关系

3.4 含水量与塑限的关系

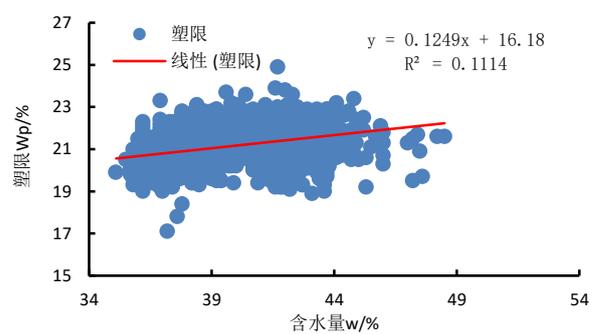


图7 第③层含水量-塑限关系

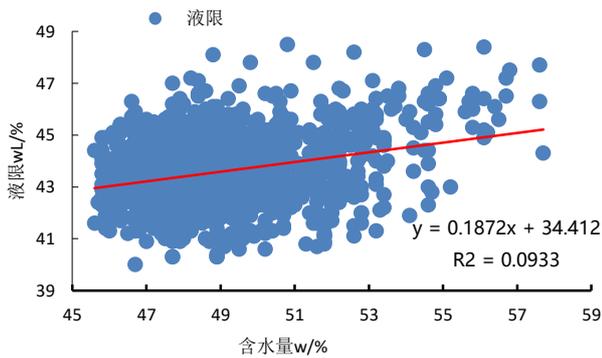


图6 第④层含水量-液限关系

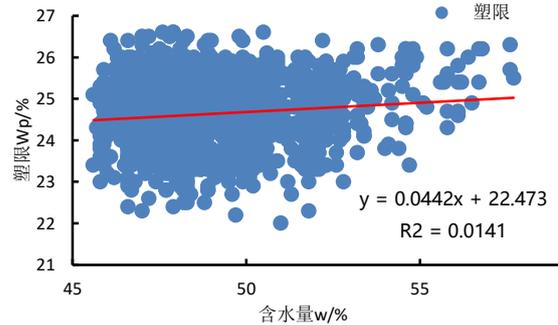


图8 第④层含水量-塑限关系

分析结果显示第③层、第④层含水量与液限之间存在统计学显著的正向线性关系，回归系数分别为 0.254、0.187。然而，R 方值仅为 0.199、0.093，表明含水量对液限的线性解释能力有限，仅能解释约 19.9%、9.3% 的变异。液限定义为土体从塑性状态转变为液态状态的最低含水量。它是衡量黏性土塑性大小和压缩性的重要指标。液限主要由土的矿物成分、颗粒形状和粒度分布决定。尽管含水量与液限在概念上都是水分含量，但液限是土体在特定稠度状态下的含水量，而含水量是土体当前的水分含量。它们之间的关系并非简单的一对一。线性回归中较低的 R 方值可能因为：

(1) 土体均匀性：土体中可能夹粉性土或砂性土，土质不均匀，导致液限范围差异较大，从而含水量与液限的线性关系离散型较大。

(2) 土体矿物结构和类型：液限是一个临界含水量，反映的是土体达到某种流动状态所需的水分，其数值更多地取决于土体本身的黏土矿物结构和类型。

(3) 非线性关系：含水量对土体稠度状态的影响可能是非线性的，线性模型可能无法完全模拟。在工程中，液限用于土体的分类和工程特性评价。尽管含水量与液限存在一定的正相关性，但不能直接用含水量来准确预测液限。液限的测定仍需要通过专门的试验（如液限联合测定仪法等）来获取。

分析结果表明第③层、第④层含水量与塑限之间存在统计学显著的正向线性关系，回归系数为 0.125、0.044。但 R 方值更低，为 0.111、0.014，表示含水量对塑限的线性解释能力更为有限，仅能解释约 11.1% 和 1.4% 的变异。塑限定义为土体从半固态转变为塑性状态的最低含水量，即土体在含水量降低到不能搓成 3mm 直径的土条而不开裂时的含水量。与液限类似，塑限也是土体固有性质的体现，主要受土颗粒表面性质、黏土矿物类型和颗粒级配等因素影响。含水量与塑限之间存在正相关性，因为土体塑性状态的保持需要一定的水分。然而，与液限类似，塑限的数值也主要取决于土体本身的性质，而非当前含水量。较低的 R 方值再次强调了这一点：当前含水量并不能很好地预测土体的塑限。在工程中，塑限的测定是独立的试验，用于评估黏性土的塑性范围和工程特性。

3.5 含水量与塑性指数的关系

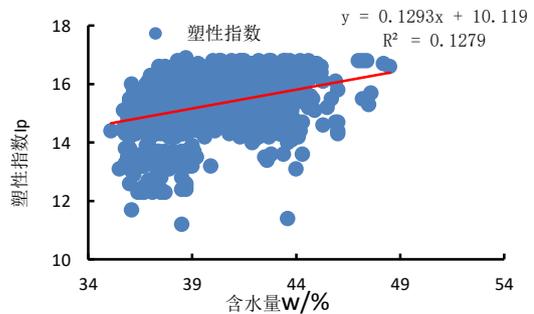


图9 第③层含水量-塑性指数关系

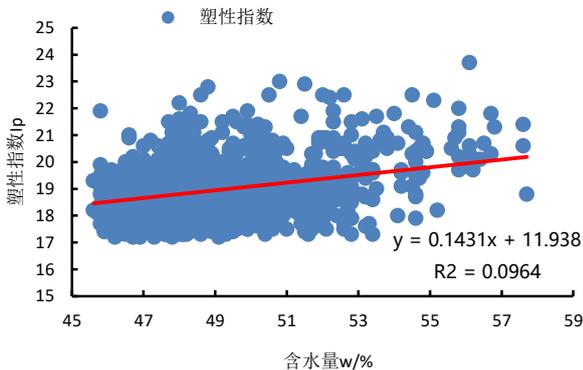


图 10 第④层含水量-塑性指数关系

分析结果显示含水量与塑性指数之间存在统计学显著的正向线性关系，回归系数为 0.129、0.143。R 方值分别为 0.128、0.096，表明含水量对塑性指数的线性解释能力非常有限，仅能解释约 12.8%、9.6% 的变异。塑性指数定义为液限与塑限之差 ($I_p = W_L - W_p$)。它表示土体处于塑性状态的含水量范围，是衡量黏性土塑性大小和可塑性强弱的重要指标。塑性指数越大，土体的塑性越强，通常也意味着黏土矿物含量越高，土体更容易变形。由于塑性指数是由液限和塑限共同决定的，而含水量对液限和塑限的线性解释能力都较弱，因此，含水量对塑性指数的直接线性解释能力也自然偏低。这再次强调了土体塑性性质（由塑性指数表征）主要取决于其自身组成和结构，而不是简单的当前含水量。在工程中，塑性指数是土体分类和评估其压缩性、透水性以及抗剪强度的重要参数。

3.6 含水量与液性指数的关系

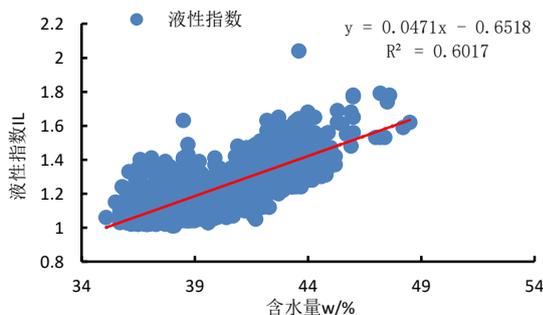


图 11 第③层含水量-液性指数关系

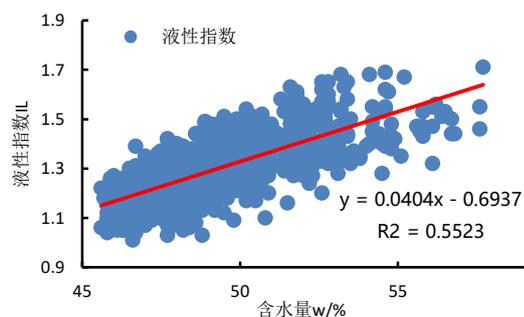


图 12 第④层含水量-液性指数关系

本次分析显示含水量与液性指数之间存在统计学显著的正向线性关系，R 方值分别达到了 0.602、0.552，回归系数分别为 0.047、0.040。这意味着含水量可以解释液性指数约 60.2% 和 55.2% 的变异。液性指数定义为 $I_L = (W - W_p) / (W_L - W_p)$ ，即 $(W - W_p) / I_p$ 。它表示土体当前含水量相对于塑限的距离，并以塑性指数为基准进行标准化。液性指数是判断黏性土稠度状态的重要指标： $I_L < 0$ 表示硬塑或坚硬； $0 < I_L < 1$ 表示塑性状态； $I_L > 1$ 表示软塑或流塑状态。由于液性指数的计算公式中直接包含了土体的当前含水量 w ，因此其与含水量存在较强的线性关系是合理的。当土体的塑限和塑性指数相对稳定时，液性指数的变化主要由当前含水量的变化驱动。较高的 R 方值 (0.602、0.552) 也印证了这一点。在工程实践中，液性指数对于评估黏性土的强度和稳定性至关重要。例如，在饱和黏土中，液性指数越高，土体的剪切强度越低，越容易发生流变或失稳。因此，通过监测含水量，并结合土体的塑限和液限（通常是相对稳定的值），可以较好地估算土体的液性指数，从而判断土体的工程状态和潜在风险。在软土地基处理、边坡稳定性分析以及桩基设计中，液性指数都是一个关键的参考参数。

4 结论与展望

本次对土体含水量与一系列土工参数的线性回归分析，揭示了它们之间不同强度的关联性。

(1) 强线性关系：含水量与孔隙比和密度之间存在极强的线性关系，其中与孔隙比呈显著正相关 ($R^2 \approx 0.974$ 、 0.955)，与密度呈显著负相关 ($R^2 \approx 0.876$ 、 0.770)。这意味着在本次分析的数据范围内，含水量是预测土体孔隙比和密度的最有效指标之一，这些关系符合土力学基本原理，并对工程实践具有直接指导意义。

(2) 中等线性关系：含水量与液性指数之间存在较强的正向线性关系 ($R^2 \approx 0.602$ 、 0.552)。由于液性指数的定义直接包含含水量，这种关联是合理的。这表明通过含水量可以对土体的稠度状态进行较好的初步判断，对于评估软土强度和稳定性具有参考价值。

(3) 弱线性关系：含水量与液限、塑限和塑性指数之间虽然存在线性关系，但其线性解释能力 (R 方值) 相对较低 (R 方在 0.014 到 0.199 之间)。这说明塑性指标更多地取决于土体自身的结构类型、颗粒组成等固有性质，而不仅仅是当前含水量的简单线性函数。在工程中，这些指标的测定仍需专门的土工试验。

展望：

本次分析通过一元线性回归模型，假设含水量与因变量之间存在简单的线性关系。然而，土体就有复杂性、多样性，某些关系可能并非严格线性，或者受到其他变量（如干密度、结构类型、颗粒级配、矿物成分等）的影响。未来的研究可以考虑：

(1) 非线性回归模型：探索含水量与其他参数之间是否存在更复杂的非线性关系（如指数关系、多项式关系等），以提高模型的拟合度。

(2) 多元回归分析：将更多的土工参数纳入模型，进行多元回归分析，以了解不同变量之间的交互作用，从而更全面地解释土体性质的变异。

(3) 分类分析：针对不同土体类型（如砂土、黏土、粉土等），分别进行分析，因为不同类型土的物理力学性质可能存在显著差异，导致含水量与各参数的关系模式也有所不同。

(4) 大数据和机器学习方法：利用更先进的机器学习算法来挖掘土工参数之间更深层次、更复杂的非线性关系，为岩土工程设计和施工提供更智能的决策支持。

[参考文献]

[1]李广信,张丙印,于玉贞.土力学(第3版)[M].北京:清华大

学出版社,2022.

[2]工程地质手册编委会.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑业出版社,2018.

[3]田丽霞,周黎月.上海地区黏性土液限和塑限数理相关性探讨[J].中国市政工程,2024(6):139-143.

[4]李玉朋,郭进京,余辉.天津软土物理力学性质的相关性研究[J].岩土工程技术,2012,26(6):309-312.

[5]屈若枫,徐光黎,王金峰,等.武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究[J].岩土工程学报,2014(1):113-119.

[6]上海市住房和城乡建设管理委员会.岩土工程勘察标准[M].上海:同济大学出版社,2023.

作者简介：郭嫚（1987.1—），女，毕业院校：沈阳建筑大学，学历：研究生，所学专业：建筑与土木工程师，目前就职单位：上海元易勘测设计有限公司，职务：项目经理 10 年，目前职称：中级工程师。