

马鞍山淤泥质粉质黏土土性相关性研究

颜祖鹏

桂林理工大学，广西 桂林

收稿日期：2023年1月5日；录用日期：2023年2月10日；发布日期：2023年2月20日

摘要

岩土土性具有较强的地域性，查明其区域性，对于当地工程建设具有重要意义。本文以马鞍山江边软黏土地基为例，以淤泥质粉质黏土为研究对象，研究区域内淤泥质粉质黏土埋深浅，土层厚，查明该地软黏土地基物理力学指标对工程建设有着重要意义。对马鞍山江边软黏土地基土物理力学指标进行统计分析，发现淤泥质粉质粘土厚14 m，物理力学指标随土层深度变化小，且发现马鞍山散料物理力学指标之间存在较好的线性相关。马鞍散料场地基土淤泥质粉质黏土物理力学指标之间相关性显著，其中物理指标相关性好，尤其是孔隙比、含水率、塑限、液限及天然重度的线性拟合，其相关系数 R^2 均大于0.9。力学指标存在一定变异性，但力学指标与物理指标间相关性好，尤其是孔隙比与压缩系数、无侧限抗压强度和内聚力之间相关性尤为显著。

关键词

马鞍山，淤泥质粉质黏土，物理指标，力学指标，相关性

Study on Correlation of Soil Properties of Mucky Silty Clay in Maanshan

Zupeng Yan

Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jan. 5th, 2023; accepted: Feb. 10th, 2023; published: Feb. 20th, 2023

Abstract

Geotechnical properties have strong regional characteristics, so it is of great significance to identify their regional characteristics for local engineering construction. In this paper, taking the soft clay foundation near the Maanshan River as an example, taking the muddy silty clay as the research object, the buried depth of the muddy silty clay in the research area is shallow, and the soil layer is thick. It is of great significance to find out the physical and mechanical indexes of the soft clay foun-

dation in this area for engineering construction. Based on the statistical analysis of the physical and mechanical indexes of the soft clay foundation soil near the Maanshan River, it is found that the muddy silty clay is 14 m thick, and the physical and mechanical indexes change little with the depth of the soil layer. It is also found that there is a good linear correlation between the physical and mechanical indexes of Maanshan bulk materials. The physical and mechanical indexes of mucky silty clay in the foundation soil of Ma'an bulk material site are significantly correlated, among which the physical indexes are well correlated, especially the linear fitting of void ratio, water content, plastic limit, liquid limit and natural gravity, with the correlation coefficient R^2 greater than 0.9. There is some variability in mechanical indexes, but the correlation between mechanical indexes and physical indexes is good, especially the correlation between void ratio and compression coefficient, unconfined compressive strength and cohesion.

Keywords

Maanshan, Muddy Silty Clay, Physical Index, Mechanical Index, Correlation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

软土的物理指标是工程勘察的重要环节[1]，可由实验室直接测出精确的数值[2]，衡量软土的工程特性的重要指标和直观体现[3][4]，因此不少学者对软土的物理指标展开研究[5]，软土的物理指标具有普遍性，同时还具有一定变异性，其中软土含水率是物理指标中最不稳定的指标，不同地方其物理指标各有不同，且实验也容易受到干扰[6]，准确测定软土的物理指标有着重要的意义[7]。Burland 基于 Rankine 理论作出对英国软土作出相关研究，沈珠江结合 Burland 的研究对软土天然结构进行研究，发现我国软土具有高孔隙比和弱透水等特性[8]。对不同地区软土物理指标展开研究，如：宁波地区软土其天然含水率在 34.4%~58.1% 之间，孔隙比在 1.068~1.498 之间，液限在 29.3%~50.2% 之间，液性指数 1.02~1.94，塑性指数 9.1~24 [9]；云南大理洱海早全新世软土其粘粒(<0.005 mm)含量占 35%，含水量在 40%~60% 之间，孔隙比在 0.64~2.63 之间，平均值为 1.49，液限平均为 58.17% [10]；长江中下游南京段河漫滩沉积相软土其粘粒(<0.005 mm)含量占 34.1% 天然含水量为 38.9%，土体颗粒密度为 2.71 g/cm³，湿重度为 17.3 kN/m³ [11]；我国东南沿海地区软土含水量在 27.9%~73.5% 之间，土体颗粒密度为 1.725 g/cm³，孔隙比为 0.791~2.413 之间[12]。不少学者运用统计学理论对软土物理指标进行分析认为软土物理指标对软土的工程特性有直接影响，并发现软土主要物理指标之间存在一定联系且多呈线性关系[7][13][14]。通过对不同地区软土物理指标的统计，可以发现不同地区的软土其物理力学指标差异明显，具有较强的区域性[15][16][17]。

本文在收集长江中下游江边马鞍山江边散料场淤泥质粉质黏土地基试验资料进行整理，查明长江中下游江边粉质黏土在马鞍山散料场内埋深与分布情况。根据第三文室内试验和现场试验结果，统计分析马鞍山散料场软土地基土体常规物理指标和力学指标。本文根据物理力学指标在工程重要程度和影响因子对马鞍散料软土土层天然含水率(w)、比重(G_s)、液限(W_L)、塑限(W_P)、天然空隙比(e_0)、塑限指数(I_P)和液限指数(I_L)等物理指标以及压缩系数、压缩模量、内聚力和内摩擦角等力学指标开展研究。根据大多实践工程发现，土体的物理力学指标即各自代表土体特性，也存在相互联系。工程上常将物理力学指标进行综合分析，根据不同的组合判别土体的特性。本文采用工程上的常用物理力学指标组合方式，探究

基本物理指标之间的相关性，采用数理统计法对物理力学指标进行线性拟合，获得物理指标及力学指标与物理指标之间的回归方程及相关系数，对当地工程建设和项目改建有着较好的参考价值。

2. 地理位置

马鞍山江边软黏土地基位于安徽省马鞍山市，东接长江路与马鞍山市海事处相连，陆上交通便利；西邻马鞍山港。长江位于场地西侧，经马山港，可通货轮与客轮，能上接武汉，下连南京，水路亦便利。同时，长江还是我国轮船自沿海进入内陆的主要航道，是沿海城市和内陆连通重要的枢纽，也是长三角地区经济发展的依托纽带，其航运价值大，水路交通便利，场地地理位置优越，经济潜力大。马鞍山散料堆场坐标为：东经 $118^{\circ}27'51''E$ ，北纬 $31^{\circ}44'02''$ ，其场地面积为 $100\text{ m} \times 200\text{ m}$ ，位置详见图 1。

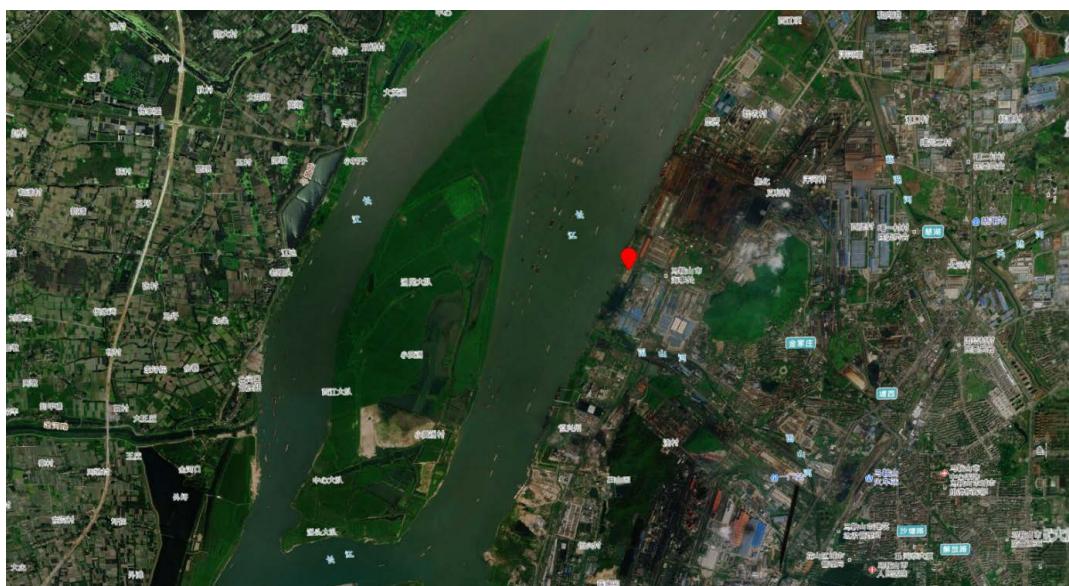


Figure 1. Geographic location of soft soil foundation by the Maanshan River

图 1. 马鞍山江边软土地基地理位置图

3. 原始地貌基本物理指标统计

对于岩土工程，查明地基土物理指标尤为重要。对马鞍山原始地基进行钻探布孔，场地共布设 167 个钻孔，累计钻进 $15,664\text{ m}$ ，查明散料场土层分布情况，并对土层取样，其中 367 个原状土样，154 个扰动土样。本文在收集安徽马鞍山江边散料场基础地质资料上，对原始地貌进行钻探取样，场地共布设 167 个钻孔，累计钻进 $15,664\text{ m}$ ，土层取样过程中采取 0.5 m 间隔钻进取样，共采取原状土样 367 个，扰动土样 154 个，同时查明散料场土层分布情况以及软土土层状态。本文土样试验主要参照土工试验规范对原始地貌土样进行试验，采用数理统计对数据进行整理分析，得到马鞍山散料场原始地貌软土地基物理指标(表 1)。

Table 1. Physical indexes of soft soil foundation in original landform of Maanshan bulk material yard
表 1. 马鞍山散料场原始地貌软土地基物理指标

取样标高(m)	$W(\%)$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	G_s	e_0	W_L	W_P	I_P	I_L
4.50	41.96	17.48	2.74	1.18	39.65	21.57	18.13	1.14
4.00	43.20	17.68	2.73	1.19	39.40	21.60	17.80	1.21

Continued

3.50	42.80	17.36	2.74	1.21	39.00	21.80	17.20	1.25
3.00	39.50	17.62	2.73	1.13	37.17	21.83	15.33	1.12
2.50	42.55	17.42	2.73	1.19	37.09	21.05	16.00	1.36
2.00	40.44	17.72	2.73	1.12	36.00	20.33	15.67	1.27
1.50	38.86	17.53	2.72	1.12	35.71	21.43	14.29	1.23
1.00	41.33	17.62	2.72	1.14	35.67	21.33	14.33	1.40
0.50	40.41	17.62	2.72	1.12	35.85	21.06	14.76	1.28
0.00	39.11	17.80	2.73	1.08	35.00	20.00	15.00	1.29
-0.50	40.50	17.38	2.73	1.16	37.25	21.25	16.00	1.21
-1.00	42.33	17.47	2.72	1.17	36.50	21.50	15.00	1.31
-1.50	40.62	17.42	2.73	1.16	35.77	20.54	15.23	1.31
-2.00	43.80	17.24	2.73	1.24	38.00	21.20	16.80	1.24
-3.50	41.40	17.18	2.73	1.20	39.20	22.20	17.00	1.13
-4.00	40.00	17.55	2.72	1.13	34.50	20.00	14.50	1.39
-4.50	39.00	17.20	2.75	1.18	36.00	20.00	16.00	1.19
-5.50	40.00	17.20	2.72	1.17	34.00	21.00	13.00	1.46
-7.00	38.00	17.40	2.72	1.11	34.00	21.00	13.00	1.31
-7.50	41.00	17.60	2.71	1.16	35.00	21.50	13.50	1.45
-8.50	39.00	17.45	2.73	1.14	35.50	20.50	15.00	1.24
-9.00	36.75	17.63	2.72	1.07	33.75	19.25	14.50	1.21
-9.50	37.89	17.66	2.72	1.08	35.89	21.44	14.44	1.18

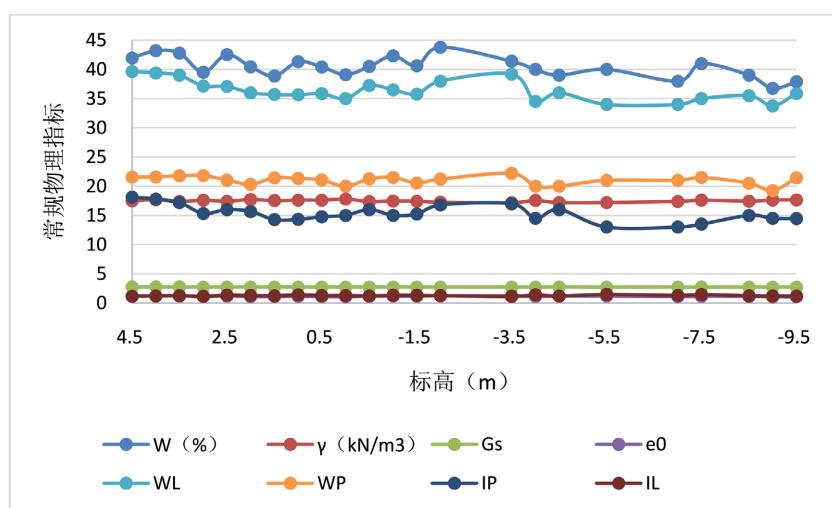


Figure 2. Depth variation of physical indicators in Maanshan
图 2. 马鞍山物理指标深度变化图

通过马鞍山原始地貌物理指标分析可以发现如下特征：

- 1) 根据钻孔资料对别分析, 马鞍山淤泥质软土其埋深范围为 4.5~9.5 m;
- 2) 根据表 1 统计分析, 马鞍山江边散料场原始地貌含水率范围 36.2~44.3, 平均值为 41.5; 天然重度 17.3 kN/m^3 ~ 17.7 kN/m^3 , 平均值为 17.6 kN/m^3 ; 孔隙比为 1.58, 比重为 2.7; 液限范围为 36.2~38.8, 平均值为 38.2; 塑限范围为 21~22.5, 平均值为 22; 液性指数范围为 0.95~1.3, 平均值为 1.17; 塑性指数范围为 15.2~16.9, 平均值为 16.2;
- 3) 根据图 2 马鞍山散料场和南京散料场原始地貌淤泥质粉质黏天然含水率(w)、天然重度(γ)、孔隙比(e_0)、比重(G_s)、液性(W_L)、塑限(W_p)、液性指数(I_L)、塑性指数(I_p)等基本物理指标在相同深度范围内变化小, 且各物理参数随深度变化不明显。

4. 原始地貌物理指标相关性分析

土的物理指标是软土地基变形计算的重要参数, 与软土变形与沉降固结参数有密切的关系, 是软土原始地貌物理指标是软土工程特性的重要指标之一。根据马鞍山物理指标统计, 物理指标之间存在一定关系。

土的物理指标受其成分、成因、应力环境等因素影响较大, 难以找到准确的数学方程来描述物理指标之间的关系, 工程上广泛应用经验公式对当地物理指标进行描述。最小二乘法广泛用于经验公式的线性拟合, 本文采用线性回归方程对软土物理参数进行回归分析。

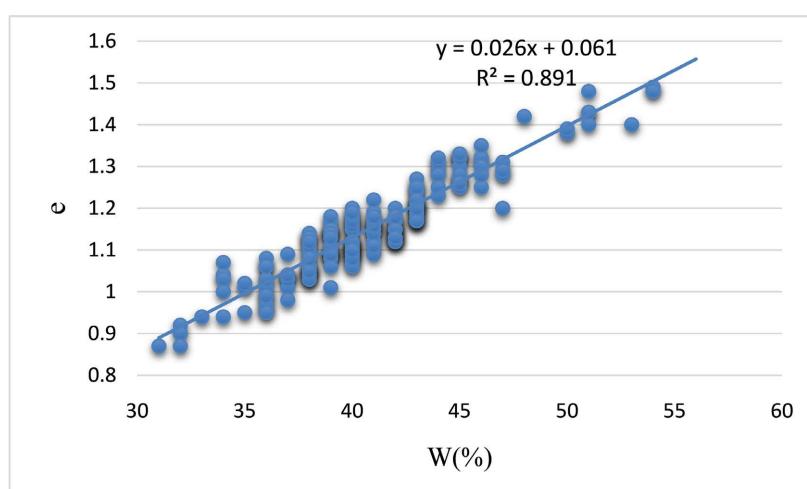


Figure 3. W-e fitting curve
图 3. W-e 拟合曲线

孔隙比通常决定土体的结构性, 故可通过孔隙比对土体的松散程度进行判别; 含水率是土体中液体质量与土体颗粒的质量之比。对于饱和土体而言, 土体的孔隙完全由液体充填, 表现为孔隙中液体的体积与土体颗粒的体积之比。马鞍山散料场地基软黏土属于饱和黏土, 故通过数据统计整理和运用回归法拟合可得到两者关系, 根据图 3 中孔隙比与含水率的拟合曲线, 可知两者存在线性关系, 根据式图 3 中 $R^2 = 0.891$, 呈高度相关, 马鞍山散料场原始地基软土土层土体孔隙比与含水率呈高度线性相关。

土体重度是指土体在不同含水率条件下土体的重度, 可分为天然重度和饱和重度, 天然重度是土体处于天然含水率条件下的重度, 土体的重度即为土体总重量比上土体总体积(均包括土体中空气的重量和体积); 饱和重度是指土体位于地下水位以下, 土体由三相介质变为两相介质, 饱和重度就是土颗

粒重量和孔隙中水的重量比上总体积。根据其物理定义可知，土体重度和土体含水率相关。马鞍山散料场软土层位于地下水位以下，软土均属于饱和土体。故通过数据统计整理和运用回归法拟合可得到两者关系，根据图4中天然重度与含水率的拟合曲线，可知两者存在线性关系，根据图4中 $R^2 = 0.9569$, $R < 0$, 呈高度负相关，马鞍山散料场原始地基软土土层土体重度与含水率呈高度线性相关。

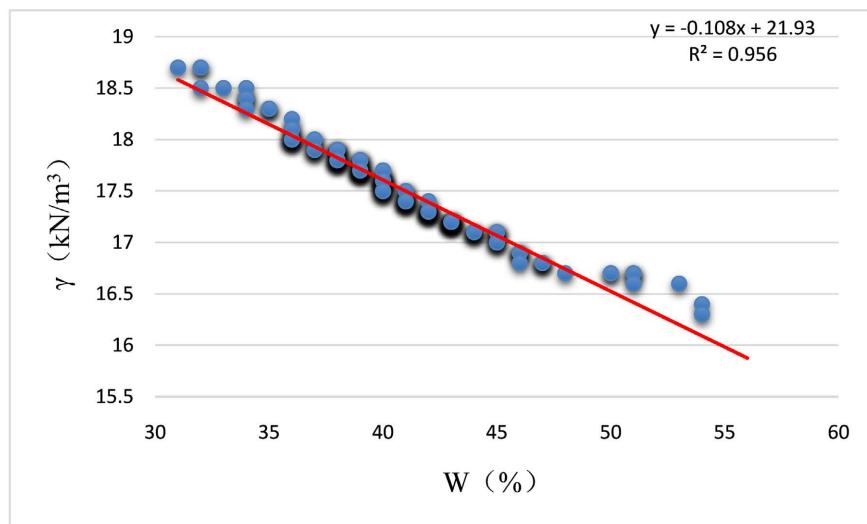


Figure 4. W- γ fitting curve

图4. W- γ 拟合曲线

马鞍山散料场淤泥质粉质黏土属于粉土，土体中水分含量会导致土体呈现不同的物理状态和性质，根据含水率的不同可将土的物理状态分为固结、半固结、可塑、软塑及流塑状态。因土中水分在量和质方面的变化而明显地表现出不同的物理状态，具有不同的性质，如随着含水率从少到多，土可以由固态、半固态变为可塑态，最后变为流动状态。细粒土这种因含水率的变化而表现出的各种不同物理状态，称为细粒土的稠度。土的不同稠度状态表明了由于含水量不同，土粒相对活动的难易程度或土粒间的连结强度。如当含水量少时，土的状态为固态或半固态，颗粒连结力牢固，体现出来的力学强度较高，能抵抗力较大；当含水量增加时，土变为塑态，颗粒间连结衰弱，在外力作用下容易变形；当含水增加过多时，土变为流动状态，此时土粒间连结极弱或者丧失连结，几乎丧失抵抗外力的能力，在重力作用下可流动，难以维持固定形状。随着含水率的变化，土由一种稠度状态转变为另一种稠度状态，相应于转变点的含水率称界限含水率，也称稠度界限。从半固态转变为稠塑态的转变点含水率称为塑限含水率 W_p (也称塑性下限)。从粘塑态转变为粘流态的转变点含水率称为液限含水率 W_L (也称塑性上限)。根据勘察发现马鞍山散料场饱和软土处于软塑、可塑状态，根据含水率和液限含水率与塑限含水率的关系，进行曲线拟合得到图5和图6。根据拟合曲线可知含水率和液限含水率与塑限含水率存在如图关系式， R^2 分别是 0.9653 和 0.9404，相关性高。

通过对马鞍山原始地貌物理指标统计分析，发现物理指标中土体的天然含水率(W)和孔隙比(e)、液限含水率(W_L)和塑限含水率(W_p)之间具有良好的线性关系，对其进行线性拟合，得到三者之间的线性拟合曲线(图2~6)和一元关系式。根据皮埃尔相关系数规律，三者相关系数是 $r_1 = 0.99428$ 、 $r_2 = 0.97243$ 和 $r_3 = 0.97891$, $r \in [0,1]$, $r > 0.9$ 马鞍山原始地貌天然含水率(W)，孔隙比(e)和液性指数(W_L)之间存在正向线性相关；三者相关指数 $R_1^2 = 0.98859$ 、 $R_2^2 = 0.94561$ 、 $R_3^2 = 0.95826$ ， $R^2 \in [0,1]$ ， $R^2 > 0.9$ ，线性相关性好。

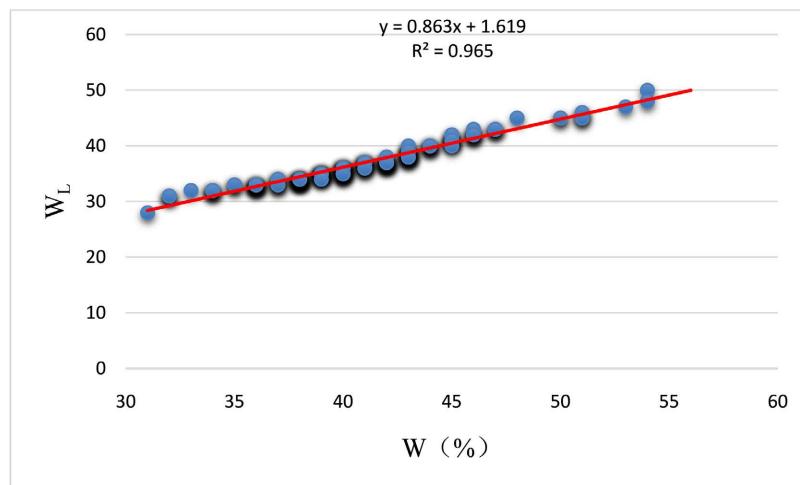


Figure 5. W - W_L relationship fitting curve
图 5. W - W_L 关系拟合曲线

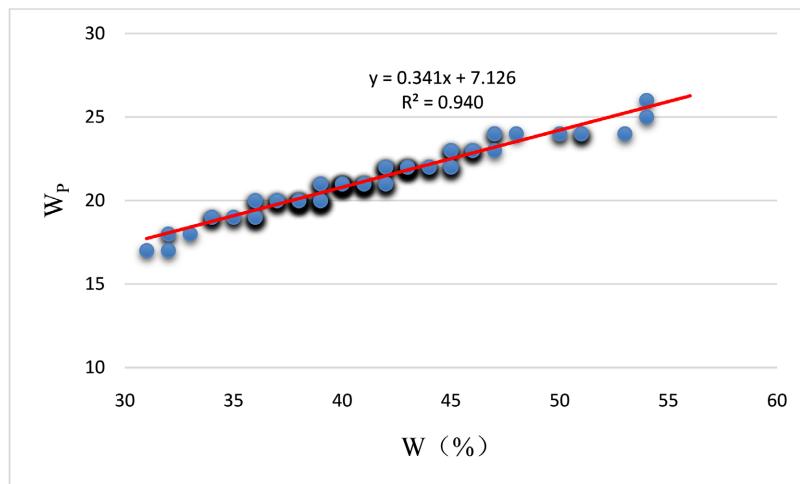


Figure 6. W - W_P relationship fitting curve
图 6. W - W_P 关系拟合曲线

5. 原始地貌物理力学指标统计分析

土的力学性质是指在附加荷载作用下，土体所表现出来的抗压性和抗剪性。工程上，常采用室内固结试验和剪切试验，对土的力学指标展开研究。对于饱和黏土而言，其渗透性差，软土的压缩性对工程影响明显，工程设计和施工主要考虑的参数之一。马鞍山散料场软土地基属于河漫滩沉积相淤泥质粉质黏土，河漫滩沉积环境和河流历史水动力条件对马鞍山散料场地基土的物质组成、土的类型和微观结构影响明显，具有强烈的地域性。土的力学指标主要体现在土的压缩系数和无侧限抗压强度，工程建设具有重要意义。根据已有研究，土的物理指标与力学指标之间存在较好的相关性。

马鞍山散料场地基土属于饱和软粘土，其土样保存、和试验过程中土体原状性保存较难，导致部分标高下缺少土体力学指标(如表 2)，尤其式标高位于-2.5 m 以下软土，其位于地下水位以下，上覆土层后，钻进取样过程中很容易被破坏。但通过对马鞍山散料场力学指标进行统计(如图 7)，任可发现其力学指标在竖向沿深度方向尚未发现明显变化规律。散料场地基土围压 100~200 kPa，压缩系数平均值为 0.62 MPa⁻¹，压缩模量平均值为 3.46 MPa，黏聚力平均值为 25.67 kPa，内摩擦角平均值为 13.48°，无测限抗压强度为 34.99 kPa。

Table 2. Mechanical indexes of original foundation of Maanshan
表 2. 马鞍山原始地基力学指标

取样标高	av	Es	c	φ	qu
4.5	0.58	3.76	24.97	12.87	36.45
4	0.66	3.10	-	-	46.10
3.5	0.67	3.15	28.40	12.75	36.30
3	0.49	4.55	25.90	14.57	29.40
2.5	0.70	3.15	25.49	12.87	23.03
2	0.69	3.23	-	-	34.70
1.5	0.68	3.40	27.10	14.70	38.75
1	0.61	3.25	26.70	12.75	32.30
0.5	0.62	3.49	26.59	12.31	28.68
0	0.53	3.98	23.95	14.20	18.60
-0.5	0.60	3.43	25.90	15.70	-
-1	0.50	4.07	-	-	22.55
-1.5	0.62	3.48	27.60	15.12	40.95
-2	0.80	2.68	22.80	12.73	-
-3.5	0.78	2.77	-	-	38.20
-4	0.59	3.45	23.30	13.70	-
-4.5	0.52	4.10	-	-	-
-5.5	0.72	2.90	-	-	-
-7	0.72	2.80	-	-	-
-7.5	0.71	3.00	26.30	11.80	-
-9	0.56	3.55	24.50	9.80	52.70
-9.5	0.42	4.79	25.58	16.28	46.10

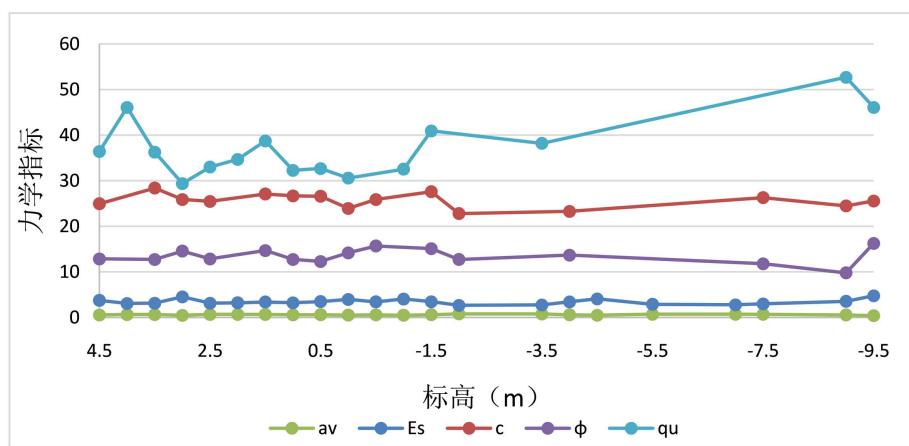


Figure 7. Mechanical indexes of Maanshan bulk material yard
图 7. 马鞍山散料场力学指标

6. 马鞍山散料场物理力学指标相关性分析

根据图 8 拟合曲线, 马鞍山散料场的 a_{v1-2} 与 e 成正相关, 相关性良好。散料场内淤泥至粉质黏土孔隙比(e)集中分布于 1.10~1.35, 其压缩系数(a_{v1-2})集中分布于 0.5~0.9 MPa, 且在孔隙比于压缩系数集中分布范围内两者线性关系式如下。

$$a_{v1-2} = 1.8506e - 1.5209 \quad R^2 = 0.961$$

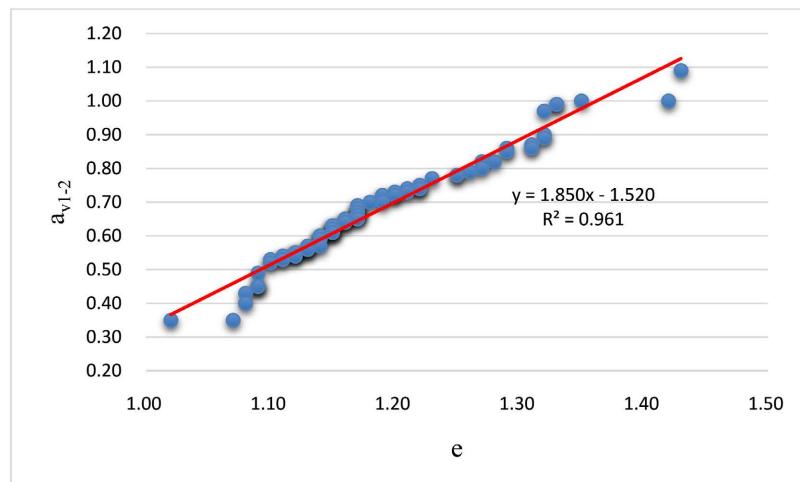


Figure 8. Original landform e - a_v Curve of Maanshan Bulk Dump

图 8. 马鞍山散料场原始地貌 e - a_v 曲线

根据图 9, 马鞍山散料场淤泥质粉质黏土 q_u 与 e 呈负相关, 相关性良好, 线性关系如下式。

$$q_u = -222.54e + 288.52 \quad R^2 = 0.9722$$

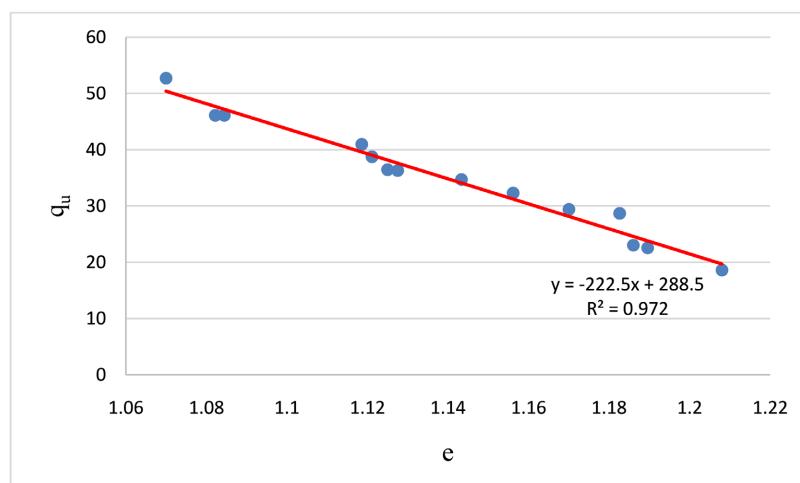


Figure 9. e - q_u fitting curve of Maanshan bulk material yard

图 9. 马鞍山散料场 e - q_u 拟合曲线

通过对土的孔隙比与压缩系数和无侧限抗压强度的线性拟合, 对马鞍山散料场原始软土物理指标与力学指标存在线性相关。建立研究区内淤泥质软土孔隙比与压缩系数和无侧限抗压强度参数联系, 并进行相关性研究, 联立了孔隙比与压缩系数的回归方程, 以及孔隙比与无侧限抗压强度的回归方程, 根据

两者的相关系数分析, 可知孔隙比与压缩系数和无侧限抗压强度呈高度相关, 相关系数 R^2 均大于 0.9。

通过对马鞍山散料场孔隙比与内聚力进行线性拟合(如图 10), 发现研究区内孔隙比与内聚力呈如下关系。

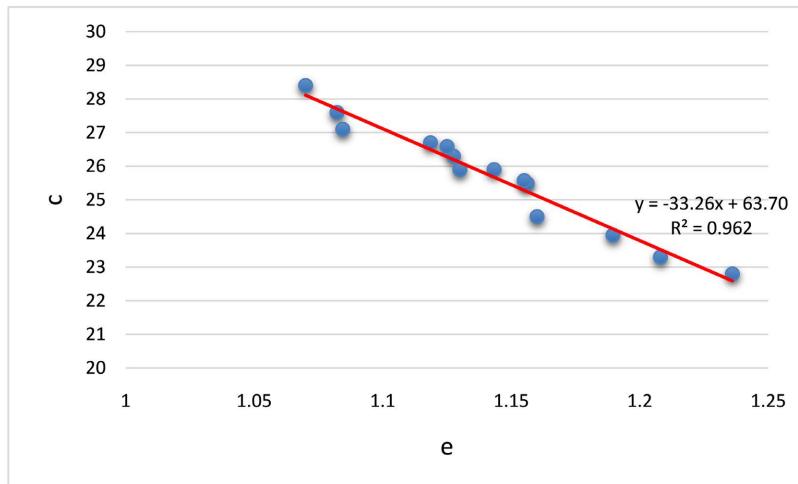


Figure 10. $e-c$ fitting curve of Maanshan bulk material yard

图 10. 马鞍山散料场 $e-c$ 拟合曲线

7. 结论

本文在前人基础上, 基于马鞍山散料场原始地基室内试验和现场试验数据, 对场地内淤泥质粉质黏土进行物理力学指标进行统计, 分析马鞍山散料场淤泥质粉质黏土的物理力学性质, 拟合各指标间的回归方程。查明马鞍山淤泥质粉质黏土区域性, 取得研究结果如下:

- 1) 马鞍山散料场地基土淤泥质粉质黏土层分布于场地内浅地表, 其标高处于 4.5~9.5 m 范围内, 其厚度达 14 m, 部分地段黏土层中含粉砂。
- 2) 场地内淤泥质粉质黏土的物理力学性质与土层深度无关, 土性整体表现比较均一, 各土性变化幅度小, 物理指标整体性优于力学指标, 与其他地区具有较大差异。
- 3) 马鞍散料场地基土淤泥质粉质黏土物理力学指标之间相关性显著, 物理指标相关性好, 尤其是孔隙比、含水率、塑限、液限及天然重度的线性拟合; 力学指标与物理指标间相关性好, 尤其是孔隙比与压缩系数、无侧限抗压强度和内聚力之间相关性尤为显著, 所得拟合方程在研究区内的工程实践均可适用。

参考文献

- [1] 吴山. 地基土物理指标的简易测定方法[J]. 化工矿山技术, 1974(3): 26-33, 17.
- [2] 阮波, 冷伍明. 粘性土物理力学指标的统计分析[J]. 大坝观测与土工测试, 1998(1): 7-9.
- [3] 别传炎, 江兆云, 郭敏. 土的比重研究[J]. 土工基础, 2003, 17(4): 61-62, 60.
- [4] 方蔚成. 试述土工试验中土的物理力学指标影响因素[J]. 居业, 2020(11): 57-58.
- [5] 刘连喜, 廖建生. 利用土的物理指标确定土的抗剪强度[J]. 城市勘测, 2003(3): 13-14.
- [6] 王立志. 土的物理指标测定试验中几个常见问题对结果的影响[J]. 科技信息, 2012(26): 367.
- [7] 韩素君. 北京地区土工试验成果及综合分析[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(1): 40-45, 48.
- [8] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998(1): 100-111.

-
- [9] 刘用海, 朱向荣, 王文军. 宁波地区典型淤泥质粘土工程特性[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 30-33.
 - [10] 王献礼, 曲永新, 蒋良文, 等. 云南大理洱海东缘早全新世软粘土的工程特性研究[J]. 地质力学学报, 2007, 13(3): 261-269.
 - [11] 刘维正, 石名磊. 低路堤下长江漫滩相沉积土的工程特性评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 844-849.
 - [12] 张丽娟, 李彭明. 动静力排水固结法加固淤泥地基的技术及效果[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(5): 898-903.
 - [13] 叶国良, 郭述军, 朱耀庭. 超软土的工程性质分析[J]. 中国港湾建设, 2010(5): 1-9.
 - [14] 张宏亮. 土工试验中土的物理力学指标影响因素分析[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(5): 67-69.
 - [15] 张丁宁. 上海滨海平原区土的热物理指标与静力触探 P_s 值的关系研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(7): 197-199.
 - [16] 白建文, 冯品基, 杨锐, 等. 北戴河新区粉质黏土物理力学性质研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1031-1040.
 - [17] 朱丽霞, 袁望新. 含水率对花岗岩残积土强度影响研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(17): 109-111, 156.