

高压旋喷桩桩周土的变形和渗透特性研究

朱汉强¹, 卢浩¹, 林法力², 朱赞成^{2*}

¹浙江良和交通建设有限公司, 浙江 宁波

²台州学院建筑工程学院, 浙江 台州

Email: *zancheng_77@163.com

收稿日期: 2021年8月13日; 录用日期: 2021年9月2日; 发布日期: 2021年9月9日

摘要

桩周土的渗透系数和固结变形对桩侧摩阻力的发挥起着重要的作用。为了测试距高压旋喷桩不同桩距和深度下的试样压缩回弹特性、渗透特性及其与矿物成分之间的关系, 对其试样进行了固结试验和X衍射试验(XRD)。利用时间平方根方法计算固结试验中每一级荷载下的固结系数, 再利用太沙基一维固结理论计算软黏土的渗透系数。试验结果表明: 软黏土屈服后, 远桩土与桩间土的压缩曲线近似平行, 5 m、15 m处的远桩土的压缩指数和回弹指数稍微大于桩间土的压缩指数。在双对数坐标下, 渗透系数随压缩应力的增大而减小; 渗透系数随孔隙比减小而减小, 且二者间呈线性关系; 与试样的初始孔隙比、应力路径无关。塑限、液限随黏土矿物成分的增加而增大, 渗透系数反之。

关键词

软土, 高压旋喷桩, 桩周土, 压缩特性, 渗透系数

Deformation and Permeability Characteristics of Soil around High Pressure Jet Grouting Pile

Hanqiang Zhu¹, Hao Lu¹, Fali Lin², Zancheng Zhu^{2*}

¹Zhejiang Lianghe Transportation Construction Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

²School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou Zhejiang

Email: *zancheng_77@163.com

Received: Aug. 13th, 2021; accepted: Sep. 2nd, 2021; published: Sep. 9th, 2021

Abstract

The permeability coefficient and consolidation deformation of the soil around the pile play an im-

*通讯作者。

文章引用: 朱汉强, 卢浩, 林法力, 朱赞成. 高压旋喷桩桩周土的变形和渗透特性研究[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(9): 1149-1157. DOI: 10.12677/ag.2021.119111

portant role in the play of the lateral frictional resistance of the pile. In order to test the compressive rebound properties, permeability properties and their relationship with mineral composition of the specimens at different pile spacing and depths from the high-pressure rotary piles, consolidation tests and X diffraction tests (XRD) were performed on their specimens. The time square root method is used to calculate the consolidation coefficient by conducting series of one-dimension compression test, and the permeability coefficient of soft clay can be calculated by the Terzaghi's one-dimensional consolidation theory. The experimental results show that the compression curves of the far pile soil and the soil between piles are approximately parallel after the soft clay yield. The compression index and rebound index of the far pile soil at 5 m and 15 m are slightly larger than those of the soil between piles. In double logarithmic coordinates, the permeability coefficient decreases with the increase of compressive stress. The permeability coefficient decreases with the decrease of void ratio, and there is a linear relationship between them. It is independent of the initial void ratio and stress path of the specimen. The plastic limit and liquid limit increase with the increase of clay mineral composition, and the permeability coefficient inversely.

Keywords

Soft Soil, High Pressure Jet Grouting Pile, Soil around the Pile, Compression Characteristics, Permeability Coefficient

Copyright © 2021 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. 引言

台州市区地处浙江省东部沿海温黄平原，地层属于典型的海相沉积软土地质，台州市区 1971~2011 年围涂总面积为 231.32 km²，这些既有滩涂围垦区地基土多是由几米到几十米不等的软塑 - 流塑状的淤泥、淤泥质粘土、淤泥质亚粘土及淤泥混砂层等软土构成[1]。此类软土通常具备含水率高、孔隙比大、渗透性低、强度低、压缩性高等工程特性。在此类软土上进行建设时，地基稳定性差，竖向变形大，且固结时间长，工后沉降大，必须对其进行处理后才能作为工程结构物或构筑物的地基。目前台州市区正在建设施工的地下工程如 1 号轻轨、地铁、大型基坑、地下管廊、大型建筑物基础或桩基都需穿越这些围垦软土。因此，围垦软土地基的物理力学特性引起特别的关注。

近年来，有以下学者对软土进行研究，万先逵等[2]对珠三角的深厚软土地层变形进行了研究取得了一些成果。祝卫东[3]利用最小二乘法对台州和温州两地的软土进行了分析，除压缩系数、压缩模量等个别指标比较接近外，两地区的力学性质指标差异性较大，温州软土的远处和重塑无侧限抗压强度、灵敏度变异系数比台州明显小得多。陈波等[4]，武朝军[5]对上海浅部土层的压缩特性进行研究。张虎元[6]、Nishida 等[7]、孙文静等[8]对高塑性黏土的渗透系数进行了研究。王勇军[9]介绍了台州市区地层分布情况及其适应的基础型式。朱赞成等[10]对台州湾地表浅层软土的矿物成分进行了分析。目前，不论在理论还是实际工程应用中高压喷射注浆形成的旋喷桩基础对软土地区地基加固效果明显。我国是一个地质条件差异很大的国家，软土在我国分布很广泛，所以，高压喷射注浆技术具有很广阔的应用前景。不少学者(杨凤灵等[11]，胡焕校等[12]，吕成等[13])研究了高压旋喷桩轴向力、桩身沉降量以及桩周摩阻力，获得其随顶部荷载以及桩深变化的基本规律。而至今对高压旋喷桩加固海相淤泥质粘土桩周土样的物理力学特性研究比较少。

本文利用 X 射线衍射仪(XRD)测试和分析了台州市区围垦软土采用水泥高压旋喷桩加固后桩周土的矿物成分。测试了含水率、密度、渗透系数等物理特性，并对台州市区海相软黏土的远桩土样和重塑样

进行一维固结试验, 得到不同试样的压缩曲线、压缩指数和渗透系数, 可以为类似围垦软土而形成的软土桥梁台后地基变形计算和公路路基设计与施工方案提供试验数据。

2. 物理特性分析

试验试样取自台州市椒江区现代大道桩号为 XD7+895~XD7+925 的两根高压旋喷桩间, 钻孔距离两高压旋喷桩中心 0.5 m 处的桩间土, 以及 XD11+105~XD11+130 段, 距地下管廊基坑边缘 3 m 处的远桩土, 取样深度分别为 5 m、9 m、15 m, 为台州最具代表性的第②-1 层淤泥质黏土、第②-2 层淤泥, 对其进行了室内的物理力学性能测试。现代大道地下综合管廊地基处理采用 $\Phi 500@1000$ 高压旋喷桩, 正方形布孔, 采用“梅花型”跳打施工的方式, 设计桩长 10 m, 桩底距地表 15 m, 停浆高度+0.3 m。采用 P.O 42.5 “海螺”牌普通硅酸盐水泥, 水灰比为 1.0, 注浆压力位 20 MPa, 桩机提升速度为 20 cm/min, 单管水泥用量为 870~1150 kg。

为了研究台州软土区高压旋喷桩周土的基本物理特性, 按照相关试验标准[14], 对土样分别进行土粒比重、密度、界限含水量试验。试验各进行 3 次, 并对相应的数值取平均值, 得到台州软土区高压旋喷桩周土的基本物理指标, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 随着取样深度增加, 远桩土和桩间土的密度都逐渐减小, 而含水率均逐渐增大, 且都高于液限含水率。杨勇超[15]对取自宁波镇海 10 m 和 15 m 深处的淤泥质粉质黏土进行测试, 得到天然含水率均大于液限含水率。5 m、9 m、15 m 三处远桩土的密度和比重均出现了比桩间土要稍微大一点。而远桩土的含水率比桩间土的要稍微小点。

Table 1. Physical indexes of soil around piles

表 1. 桩周土的物理指标

取土深度/m	土样	含水率/%	密度/g/cm ³	G _s	塑限/%	液限/%
5	远桩土	42.9	1.83	2.742	19.394	37.659
5	桩间土	45.5	1.81	2.733	18.489	34.678
9	远桩土	43.3	1.78	2.732	18.219	39.122
9	桩间土	47.7	1.76	2.726	19.485	39.765
15	远桩土	51.4	1.71	2.718	21.638	48.397
15	桩间土	56.2	1.69	2.701	25.051	52.704

3. 压缩试验

为了研究结构性对台州软黏土压缩特性的影响, 对现场取回的远桩土样、桩间土样、以及对远桩土样和桩间土样用手揉捏后将其结构完全破坏后再装入环刀的试样(重塑样), 利用固结仪对这 3 种试样进行一维压缩、回弹、再压缩试验, 压缩 - 回弹曲线如图 1 所示。

将 $h = 20.0$ mm, $d = 61.8$ mm 的试样连环刀装入固结仪中, 再分级加载, 加载应力路径为: 6→12.5→25→50→100→200→100→50→25→12.5→25→50→100→200→400→800→1600 kPa。每级荷载固结 12 h。根据固结过程中试样高度的变化, 得到各级荷载下的孔隙比及相应的曲线。

由图 1 所示的试验结果中, 可以得到以下结论: 台州软黏土的压缩曲线近似为一直线, 其压缩指数 C_c 为一常数。通过计算得到台州距地表 5 m、9 m、15 m 深三处软黏土的远处样和重塑样的压缩指数 C_c 汇总如图 2 所示。由图 2 可知, 距地表 5 m、9 m、15 m 深三处远桩土远处样的压缩指数 C_c 分别为 0.2847、0.3130、0.4136, 随着深度的增大, 压缩指数逐渐增大, 其原因是表层②-1 由于埋深较浅, 水分蒸发循环导致密度和硬度增大(见表 1)。远桩土重塑样的压缩指数 C_c 为 0.2753、0.2673、0.3461, 远桩土远处样的压缩指数 C_c 比远桩土重塑样的压缩指数 C_c 均较大。桩间土远处试样的压缩指数 C_c 较桩间土重塑试样的

压缩指数 C_c 也呈现相同规律。对比分析各层黏土的回弹指数 C_s ，发现各层的回弹指数 C_s 非常接近，基本上在 0.017~0.073 之间。远处样的回弹指数 C_s 比重塑样的回弹指数 C_s 也稍微大点。

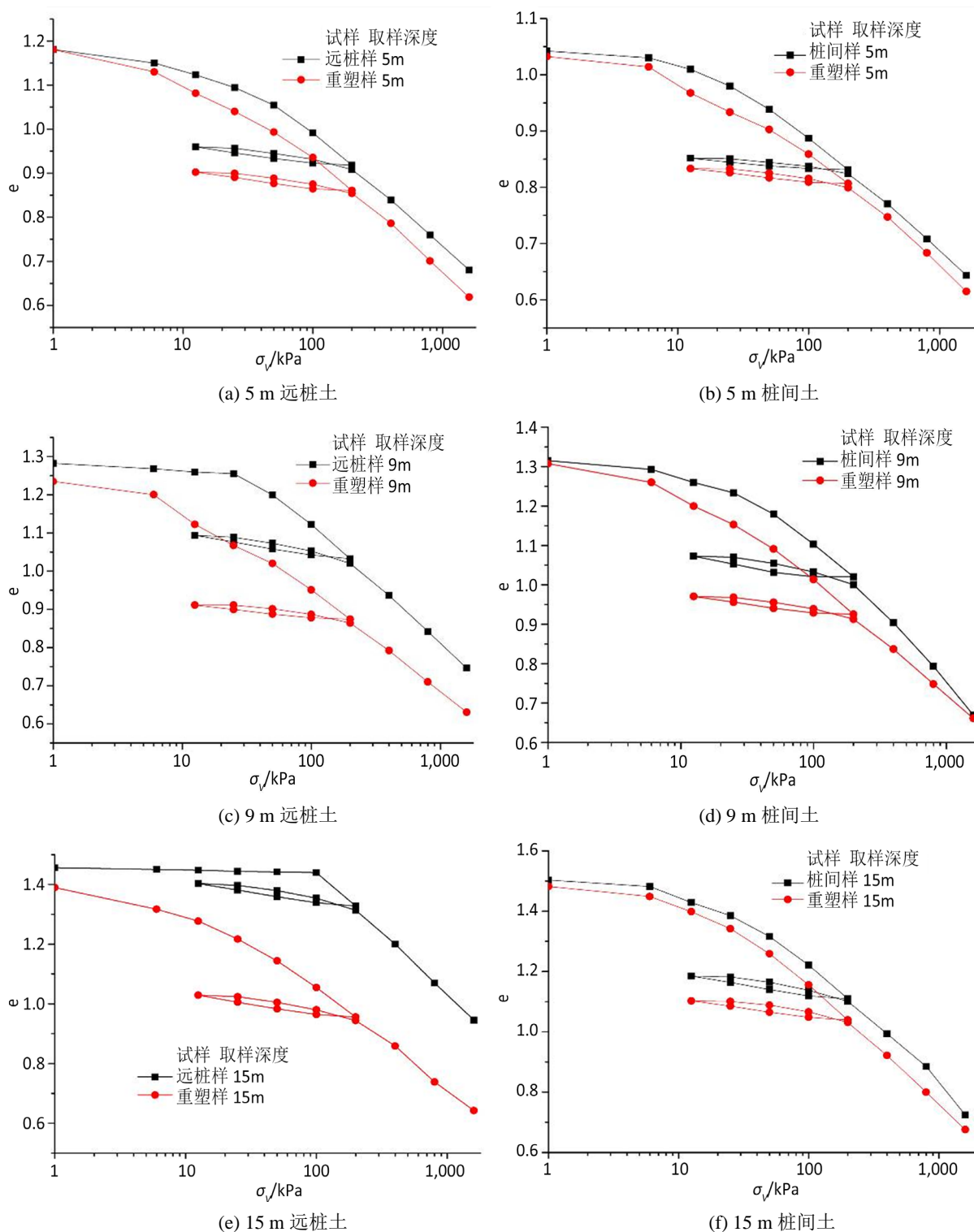


Figure 1. Compression-rebound curve of soil around pile
图 1. 桩周土的压缩 - 回弹曲线

台州地表软粘土原状样的压缩指数比重塑样大了约 0.3%~24%，原状样的回弹指数 C_s 比重塑样的回弹指数 C_s 大了约 0.5%~65%，与其他研究者的众多试验结果基本一致[16]。

众多研究人员通过大量的试验结果，建立了土的变形与物理指标的经验公式。本文选初始孔隙比 e_{10} ，即压缩曲线上竖向压力 10 kPa 时对应的孔隙比作为物理参数指标。图 2 为各种土样原状样和重塑样的一维固结试验的压缩指数 C_c 和孔隙比 e_{10} 的关系。由图可知，远桩土单向压缩试验的压缩指数和孔隙比具有很好的线性相关性，重塑样的经验公式为 $C_c = 0.478e_{10} - 0.276$ ，相关系数为 0.92；原状样的经验公式为 $C_c = 0.521e_{10} - 0.324$ ，相关系数为 0.93。与陈波等[4]，武朝军[5]对上海浅部土层的压缩特性研究结果基本一致。

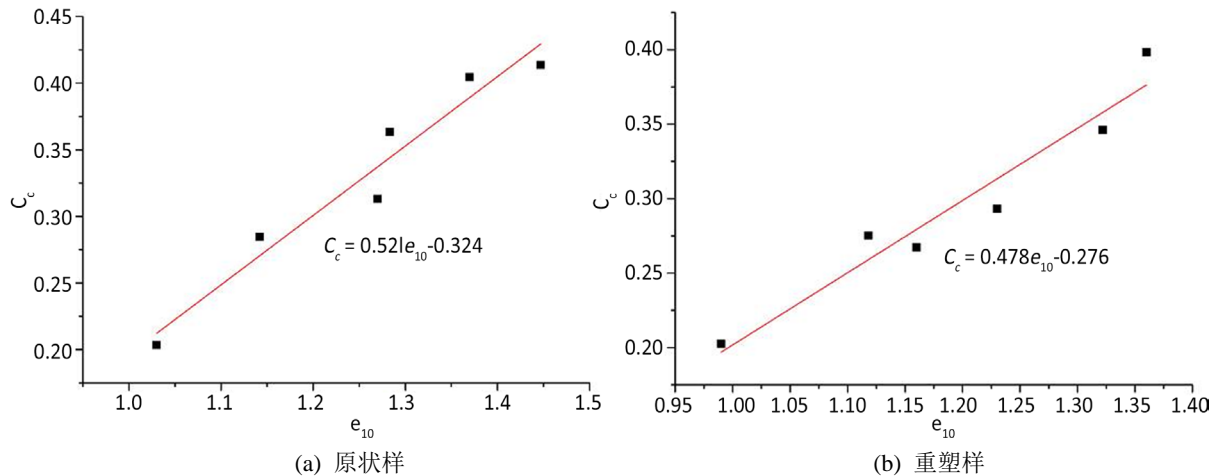


Figure 2. Relationship between uniaxial compression index C_c and initial void ratio e_{10}

图 2. 单向压缩指数 C_c 与初始孔隙比 e_{10} 的关系

4. 渗透特性

渗透系数是软粘土的重要物理力学参数，饱和软黏土的固结沉降时间、桩周土的侧向应力的发挥均与软土的渗透系数有关，所以对软黏土的渗透特性的研究有着重要的工程意义。本文对固结试验试样的试验结果，利用时间平方根法计算每一级荷载下的竖向固结系数 c_v [14]。

$$c_v = \frac{0.848\bar{h}^2}{t_{90}} \quad (1)$$

式中： c_v 为竖向固结系数， cm^2/s ； \bar{h} 为最大排水距离，等于某一级荷载下试样的初始高度与最终高度的平均值的一半， cm ； t_{90} 为固结度达到 90% 所需时间， s 。

由太沙基一维固结理论，固结系数与渗透系数存在如下关系[5]：

$$c_v = \frac{k(1+e_1)}{a_v\gamma_w} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式，可得土样的渗透系数[5]：

$$k = \frac{a_v\gamma_w c_v}{1+e_1} \quad (3)$$

式中： k 为渗透系数， cm/s ； e_1 为上一级荷载的孔隙比； a_v 为上一级荷载与本级荷载下的压缩系数； γ_w 为水的重度， kN/m^3 。由(1)~(3)式可以看出，渗透系数 k 与初始孔隙比 e_0 有关。Tavenas *et al.* [17]对加拿大

Champlain sea 海相黏土进行了 CRS 试验研究表明, 在体应变 ε_v 小于 20% 时, $e-\lg k$ 具有较好的线性关系。当 ε_v 大于 20% 时, $e-\lg k$ 直线开始弯曲, 逐渐转向为双对数关系。

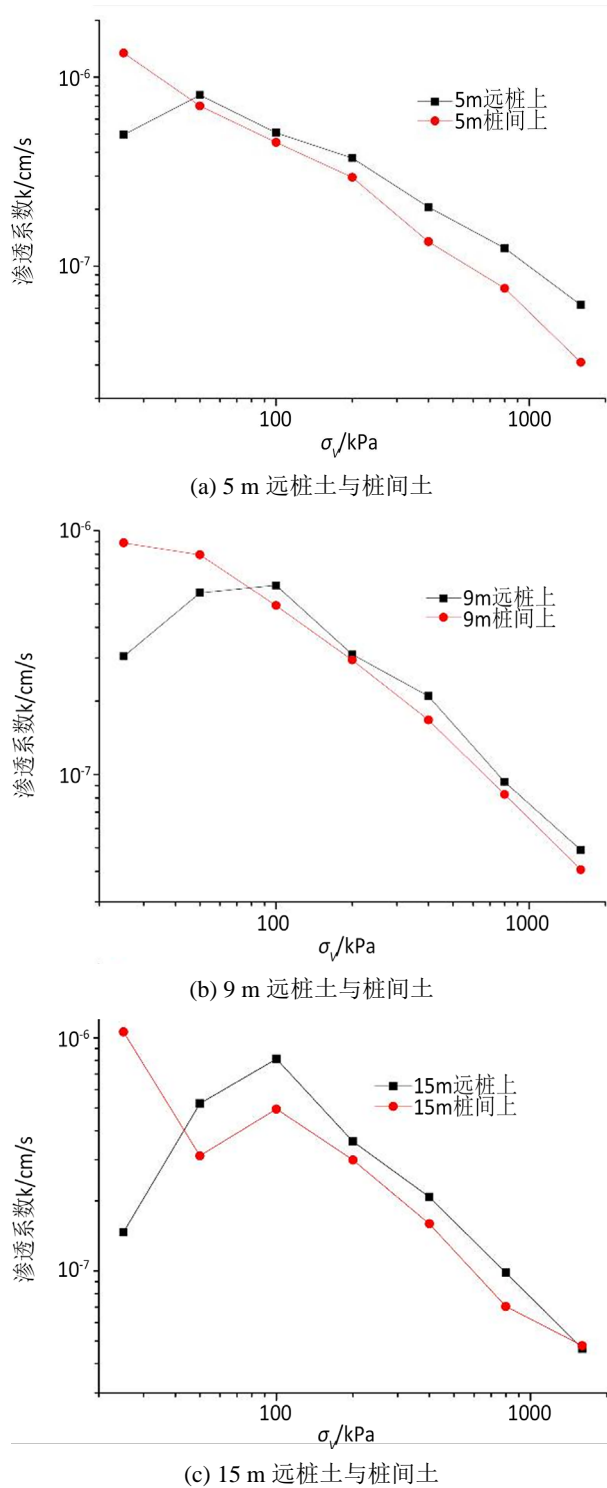


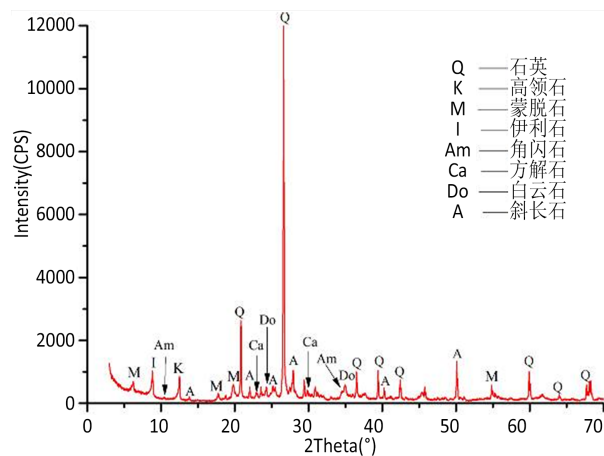
Figure 3. Relationship between permeability coefficient of soil around pile and compressive stress
图 3. 桩周土的渗透系数与压缩应力的关系

图 3 为桩周土的渗透系数与压缩应力的关系图。由图可知,远桩土的渗透系数出现了一个峰值,而桩间土没有明显的峰值。远桩土的峰值非常接近屈服应力,在峰值的右侧随着压缩应力的增大,饱和样的孔隙被压缩,孔隙比随之减小,相应的渗透系数降低。在双对数坐标下,在峰值的右侧,远桩土与桩间土的渗透系数与压缩应力呈线性关系,很接近且近似平行。与试样的初始孔隙比,含水率及加载路径无关。对于远桩土渗透系数曲线,在峰值的左侧,当压缩应力较小时渗透系数反而较小。其原因是远桩土的试样尚未屈服,试样的压缩模量较大,体积压缩系数较小。试样屈服后,试样结构破坏,试样土颗粒重新排列,孔隙比在较高压缩应力下下降明显,排水孔径减小。

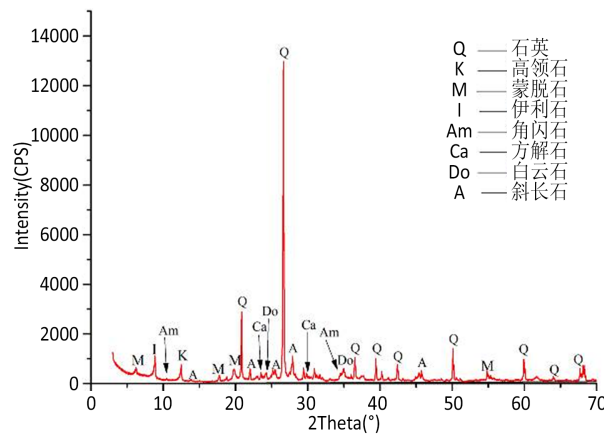
5. X 射线衍射(XRD)物相分析

矿物成分对粘性土的物理指标和变形特性起重要的决定性作用。为了测试台州地表浅部土层矿物组成与渗透特性关系。将试样放入烘箱内,在 105℃ 下烘 12 h,冷却后研磨,再过 0.25 mm 粒径的筛。试验仪器采用德国的 Bruker 公司生产的 D8 advance 型射线衍射仪(XRD)。试验条件为:铜靶,电压 40 kV,电流 40 mA,扫描角度为 3°~70°,扫描步长 0.02°,测角仪半径为 280 mm,发散狭缝为 0.6 mm,防发散狭缝为 5.7 mm。

图 4 为台州第②-1 层淤泥质黏土、第②-2 层淤泥 X 射线衍射图,试验分析结果显示,②-1 层淤泥质黏土和②-2 层淤泥矿物成分相似度极高,差别也不大。矿物成分为石英(SiO₂)、斜长石、方解石、白云石、角闪石、黏土矿物,石英含量约 51%,黏土矿物含量约 16%,矿物主要为伊蒙混层、伊利石、高岭土,伊蒙混层占黏土矿物的 78%。



(a) 5 m



(b) 9 m

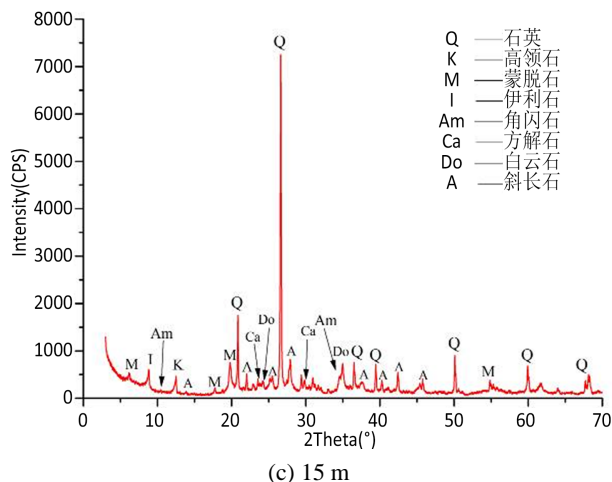


Figure 4. X-ray diffraction of soil layer in Xiandai Avenue
图 4. 现代大道地表浅部土层 X 射线衍射图

龙凡等[18]对取样深度为 9.5 m 的舟山土样和温州土样进行了 XRD 测试分析, 得到舟山土样中伊利石含量为 31.6%, 温州土为 25.3%; 取样深度为 17.5 m 时舟山土中伊利石含量的 62.4%, 温州土为 40.7%。王文军等[19]得到宁波地表浅部土层的矿物组成, 同上海软土一样, 粘土矿物以伊利石为主。而伊蒙混层较伊利石对土的工程性质影响更大, 可见台州地表浅部软黏土矿物伊蒙混层含量明显比舟山土和温州土要高, 故台州地表浅层软黏土的塑限、液限较其他两地要高些, 而渗透系数要低一些。

6. 结论

本文研究了台州地表浅部第②土层的矿物组成、物理参数, 以及高压旋喷桩桩周土样的变形特性和渗透特性, 得到如下结果:

- 1) 随着深度增加, 远桩土和桩间土的密度都逐渐减小; 而远桩土和桩间土的含水率均逐渐增大, 且都高于液限含水率。远桩土的密度和比重均比桩间土要稍大。而远桩土的含水率比桩间土的稍小。
- 2) 单向固结试验得到的②-1 和②-2 层远桩土的压缩指数随着深度的增大, 逐渐增大。重塑样的压缩指数较远处样的稍小。
- 3) 在试样屈服后, 远桩土的渗透系数稍微大于桩间土的渗透系数。孔隙比对渗透系数的影响起主要作用。
- 4) 采用 X 射线衍射试验对地表浅部土层矿物成分尽量测试和分析, ②-1 和②-2 层的黏土矿物组成基本相同, 均以伊蒙混层为主, 其次是伊利石、高岭土, 伊蒙混层含量明显高于温州土和舟山土。导致其塑限、液限随黏土矿物成分的增加而增大, 而渗透性较温州土和舟山土更差。

基金项目

浙江省住建厅资助项目(2019K085)。

参考文献

- [1] 张登荣, 许思莹, 谢斌, 吴文渊, 路海烽. 近 40 年椒江 - 台州湾滩涂围垦土地利用变化的遥感调查[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(1): 101-106.
- [2] 万先逵, 袁聪聪, 黄展军, 褚东升, 曹成威, 石钰锋. 某深厚软土地层基坑支护方案优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(5): 47-52.

- [3] 祝卫东. 温州软土与台州软土工程特性及其比较分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [4] 陈波, 孙德安, 吕海波. 海相软土压缩特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2013(2): 381-388.
- [5] 武朝军. 上海浅部土层沉积环境及其物理力学性质[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [6] 张虎元, 赵天宇, 卢一亭, 张明. 膨胀条件下混合型缓冲回填料渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3149-3156.
- [7] Nishida, Y., Koike, H. and Nakagawa, S. (1971) Coefficient of Permeability of Highly Plastic Clays. *Proceedings of 4th Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Budapest, 12-15 October 1971, 219-224.
- [8] 孙文静, 孙德安, 方雷. 饱和高庙子钙基膨润土的变形特性和渗透特性[C]//中国环境科学学会, 中国岩石力学与工程学会, 中国核学会. 第四届废物地下处置学术研讨会论文集, 北京: 中国原子能出版社, 2012: 191-196.
- [9] 王勇军. 台州市区工程地质特性及基础型式合理选用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 朱赞成, 李纪伟, 林法力, 陈雾, 孙德安, 刘藤. 不同矿物成分下土样脱附曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 175-180.
- [11] 杨凤灵, 吴燕, 李卿, 王军权. 高压旋喷桩复合地基的基本特性[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 97-99.
- [12] 胡焕校, 刘静. 高压旋喷桩桩周土摩阻力的分析与探讨[J]. 地质与勘探, 2003, 39(2): 88-90.
- [13] 吕成. 基于现场试验的高压旋喷桩承载特性变化规律研究[J]. 安徽建筑, 2014, 21(5): 332-334.
- [14] 南京水利科学研究院. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 水利水电出版社, 1999.
- [15] 杨勇超. 宁波软土一维固结特性及微观机理研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [16] 申海娥, 孙德安, 陈波. 苏州黏土的力学特性[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2011, 17(2): 209-215.
- [17] Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S. (1983) The Permeability of Natural Softclays. Part II: Permeability Characteristics. *Canadian Geotechnical Journal*, **20**, 645-660. <https://doi.org/10.1139/t83-073>
- [18] 龙凡, 王立忠, 李凯, 李玲玲. 舟山黏土和温州黏土灵敏度差别成因[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(2): 218-224.
- [19] 王文军, 刘用海, 朱向荣. 宁波海相软土工程特性研究[J]. 工程勘察, 2008(10): 19-24.