文章编号：1672-5050(2021)02-0001-05　　DOI：10.3969/j.issn.1672-5050.2021.02.001

* 粉质黏土地基支护结构极限承载力分析

吴丽萍
（山西工程职业学院，太原 030001）

摘　要：在城市建设规模不断扩大的同时，为提高城市土地利用率，进一步解决城市土地紧张问题，在高层建筑中，还可以采用特殊的土质来保证建筑结构的稳定性，增加地基的极限承载力。为提高粉质黏土地基支护结构极限承载力分析的准确性，对粉质黏土地基支护结构极限承载力进行试验研究。首先制备粉质黏土地基试样，然后选择施加荷载装置并提出现场加载数据采集与计算方法，并对粉质黏土地基支护结构极限承载力进行分析。结果表明，单桩极限承载力为 200 MPa，单桩复合地基承载能力特征值为 225～250 MPa，得到地基荷载、沉降与应力比之间的关系，可为设计与施工提供有益的参考。

关键词：粉质黏土；地基；支护结构；荷载；极限承载力
中图分类号：TU447　　**文献标识码**：A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID)**：

Analysis on Ultimate Bearing Capacity of Supporting Structure of Silty Clay Foundation

WU Liping
(*Shanxi Engineering Vocational College*, *Taiyuan* 030001, *China*)

Abstract: With ever increasing urban construction scale, it is necessary to improve the use capability and further solve the shortage of urban land. In high-rise buildings, special soil can be used to ensure the stability of the building structure and increase the ultimate bearing capacity of the foundation. The ultimate bearing capacity of the supporting structure for the silty clay foundation was tested to improve its analysis accuracy. Firstly, the silty clay sample was prepared, loading devices were selected, and the on-site loading data collection and related calculation methods were proposed. Finally, the test results were obtained to complete the ultimate bearing capacity analysis. The results show that the ultimate bearing capacity of single pile is 200 MPa, and the characteristic value of the bearing capacity of single-pile composite foundation ranges from 225 MPa to 250 MPa. In addition, the relationship between foundation load, settlement, and stress ratio was also obtained, which could provide useful reference for the design and construction.

Key words: silty clay; foundation; supporting structure; load; ultimate bearing capacity

为提高土地利用效率，大、中、小城市出现了大量高楼大厦。与此同时，为了解决土地短缺问题，除了利用城市软土以外，一些杂填土和人工填土也开始用作基础设施建设。由于不同地区、不同堆积体填筑物的承载能力差异较大，在施工过程中必须保证建筑物的安全可靠，这在一定程度上决定了高层

* 收稿日期：2021-04-29
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51874207)；山西省自然科学基金资助项目(201701D21131)；山西工程职业学院 2020 年度教学科研课题《“1+X 证书制度”下建筑工程技术专业教学改革探索》(JY2020-12)
作者简介：吴丽萍(1977－)，女，山西阳城人，硕士，讲师，从事采矿及建筑工程技术研究，E-mail：youji502103@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

建筑基础设计的要求。

按照GB50007—2011规定，塑性指数在10%～17%之间的粉质黏土，因软土的变形，在软土层中形成的沉降随时间逐渐增大，造成结构稳定性问题，影响结构的正常使用，甚至造成结构的损坏、倒塌和其他严重事故。为了提高粉质黏土地基的稳定性，对其支护结构进行极限承载力分析，有利于采取适应性加固措施。

1 试验概况

1.1 试样制备

本研究以某地为例，对粉质黏土地基支护结构极限承载力进行分析[1]。该区域土层物理学指标如表1所示。原样制作：将试验粉质黏土按上下方向放置于原样管中，使原样的密度与自然土层的密度保持一致[2]；用线锯将原样切成比环刀稍大的尺寸，在环刀内壁涂上一层凡士林，将环刀的边缘朝下放在原样上，轻轻将环刀垂直向下压，然后用刮刀将环刀两端刮平，注意不要把两端的土层弄脏。测量土样的含水率。自然原状土样，为防止其失水，应放置在加湿器中备用[3]。

再生试样制备：现场提取的原土样风干后全部粉碎。通过与原土的对比试验，对重塑土和原土的含水率及干密度进行控制[4]。将经称量的重塑土样用取样方法制成样品，倒入装有环刀的采样器中，压实至要求紧实程度为止[5]。

表1 主要土层物理学指标

Table 1 Physical property indicators of major layers

土层名称	状态	压缩模量/MPa	塑性指数/%	液性指数/%
黏性素填土	松散	4.900	16.8	0.50
淤泥	流塑	1.900	21.7	1.16
黏土	可塑	7.900	15.0	0.47
含黏性土中粗砂	稍密	13.000	—	—
含黏性土中粗砂	中密	14.600	—	—
含黏性土中粗砂	密实	17.800	—	—
黏土	坚硬	12.500	—	—
黏土	硬塑	0.978	15.8	0.35

1.2 固结试验步骤

1)安装百分表，使指针读数接近满刻度[6]。

2)施加预压，使样品与仪器各部分紧密接触，读百分表，记录样品的初始高度。

3)按照试验计划的装载次序，在各个级别施加压力。

4)在24 h内施加压力，以确定土样是否稳定，然后再施加下一级压力[7]。

5)试验期间，样品必须由湿棉纱包住，以免水分蒸发。

6)在测试结束后，取出仪器的所有部件，取出样品和测试结果。

固结试验装置如图1所示。

图1 固结试验装置

Fig. 1 Consolidation testing device

1.3 现场加载数据采集

单组份垂直压静荷载试验方法：每级荷载后，以5 mm、10 mm、15 mm为间隔测量沉降，然后以15 min为间隔测量沉降，以30 min为间隔测量累积比[8]。在连续2 h内，每1 h的沉降量小于1 mm，认为已经稳定，可以增加下一个荷载。单次供油垂直压缩静载试验，下列情况下可暂时终止供油[9]。

1)在一定载荷作用下，顶板的沉降比原来的水平荷载大5倍。

注意：当补给顶沉降能量相对稳定，且总沉降量小于40 mm时，应加载到40 mm以上补给顶沉降量[10]。

2)最大承载能力满足设计要求，沉降稳定，试样出现明显损伤。

3)工程桩上了错位涂料后，错位数量已经达到了允许值。

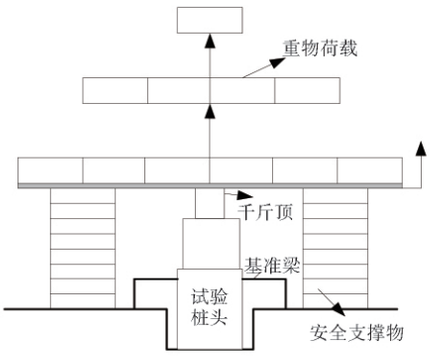
1.4 试验装置

测试前，确保测试场地平整，并做好前期准备工作，以确保测试有足够的工作面[11]。为确保荷载的均匀和便于沉降位移的测量，在桩顶上精确定位一端板，面积0.5 m^2。在此基础上，还可以根据实际情况进行调整，干燥的维护期不少于28 d，在温度适宜的情况下，时间应适当增加或减少。

试验设备分为加载系统，荷载系统，观测系统等。加载系统包括钢梁、框架梁和混凝土配重块[12]；荷载系统包括千斤顶，端头板；观测系统包括基准光束和位移计[13]。试验设备的安装示意图如

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 2 所示：经测试装置验证负荷测量精度不低于最大负荷的 1%，电位移测量法测量荷载板的沉降，其精度不应小于 0.01 mm。



(a)整体装置

(b)加载装置

图 2　试验装置示意图

Fig. 2　Testing devices

将四个位移仪置于承压板的对称方向，测量其沉降。仪器架固定在磁性测量仪上，测量仪架固定在参考梁上[14]，基准光束一端固定，一端自由。使用 30 mm 千分表测量桩顶的垂直沉降，监测表体的水平位移。当测试顶沉降时，将千分表对称放置在顶上，并将测点放置在智能顶板上，通过磁性支架将表体固定在基准横梁上；在监视表体水平时，在干燥的表体前后，在接近表体顶部的地方放置一个 100 点指示符，并贴在干燥的表体上，防止从表皮滑出。

通过单桩竖向静压试验来确定承载力时，荷载板的选择根据摩擦直径的不同，在单桩竖向静压试验中，采用直径为 800 mm 的刚性板作为承载板。

反荷载：本试验的荷载装置为混凝土堆载，反力荷载系统包括荷载千斤顶、钢梁和堆载[15]。

2　试验方案与计算方法

分别对原状样和重塑样进行固结试验，采用以下计算方案：

$$F = p_{pa} S + L \sum_{i=1}^{n} l_i p_{sia} \quad . \tag{1}$$

式中：F 代表固结压力单桩竖向承载力，kN；p_{pa} 代表桩端阻力，kPa；S 代表桩底端横截面面积，m^2；L 代表实验桩的周长，m；p_{sia} 代表桩侧阻力，kPa；l_i 代表桩长范围内第 i 层土的厚度，m。

计算内容如图 3 所示：

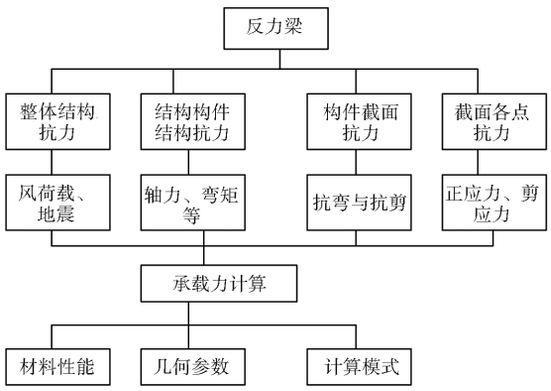


图 3　承载力计算内容

Fig. 3　Calculation of bearing capacity

3　结果讨论

3.1　单桩荷载试验结果分析

通过上述计算确定单桩极限承载力，共进行三组单桩静荷载试验，图 4 为单桩荷载与沉降的关系曲线。

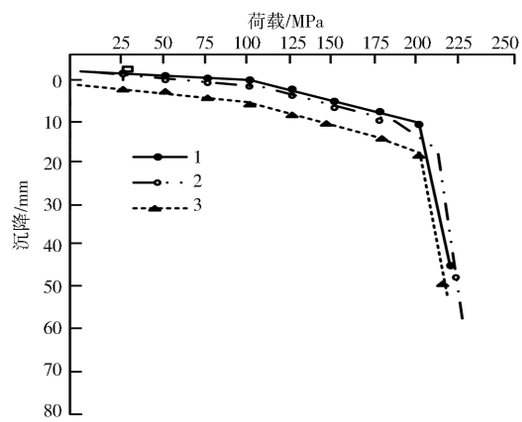


图 4　单桩荷载沉降关系

Fig. 4　Relationship between loading and settlement of single pile

分析图 4 可知，随着桩顶荷载的增加，桩身沉降量随之增加。当荷载增加到 200 MPa，沉降曲线出现明显的拐点，表现为陡降型。总体呈现出三个特点，第一阶段（0～100 MPa）沉降为初始直线段，其变化较小的原因是该阶段为桩身弹性压缩阶段；第二阶段（100～200 MPa）发生一定的变化，原因是随着荷载水平的提高，桩身发生屈服，荷载与沉降关系曲线发生弯曲，这一变化现象较短；第三阶段（200 MPa 以上），沉降量随着荷载的增加而快速增加，导致桩身出现一定的破坏。由图 4 可知，拐点处荷载约为

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

200 MPa，所以其单桩极限承载力为 200 MPa。

分析现场试验结果可知，桩身上端发生了一定的破坏，破裂情况与荷载作用方向一致，原因是桩身受到竖向荷载的影响产生次生拉伸应力导致桩身破坏。这也就代表粉质黏土地基黏结强度较低，故其在竖向荷载作用下非常容易发生张裂破坏情况。

其单桩极限承载力取决于两个因素：一是桩体材料的强度，二是桩体侧阻与端阻的限制。对粉质黏土地基而言，由于基础条件较好，桩基沉降较小时，桩基的支撑力（侧阻力和端阻力）不能得到充分发挥，力量相对不足，首先造成伤害，导致沉降曲线急剧下降。它不同于水泥搅拌桩在软土中的贯入破坏，但与软土中超长水泥搅拌桩的桩身材料的强度破坏相似。桩长增加不会增加桩的承载力，增加桩材比例（即增加桩身强度）可明显提高桩的承载力。

3.2 单桩复合地基荷载试验结果分析

在该实验中，共进行四组单桩复合地基荷载试验，荷载沉降关系曲线如图 5 所示。

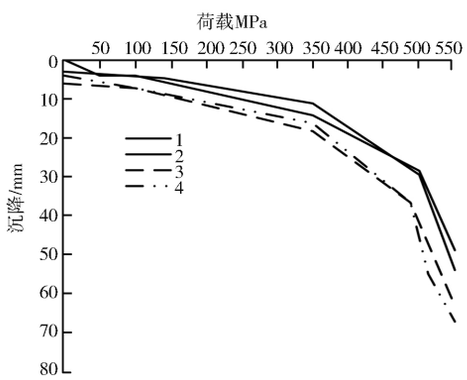


图 5 单桩复合地基荷载与沉降量的关系

Fig. 5 Relationship between testing stress and settlement of single-pile composite foundation

如上图所示，荷载-沉降关系曲线仍具有三段式的特点。单桩复合地基曲线上，直线段较长；复合地基沉降随荷载的增加而线性增加；单桩复合地基的弹性变形量较大，且单桩复合地基的承载力也较高，其初始直线段延伸约为 300 MPa；然后是曲线弯曲，复合地基屈服，不久就发生陡坡下降。同时，沉降率随荷载水平的增大而增大，说明水泥土桩复合地基在剪切竖向荷载作用下发生破坏。这一曲线特征反映了单桩复合地基的脆性变形破坏特性。实验结果表明，加载过程中桩头断裂，说明单桩复合地基的破坏模式是脆性破坏。相对于单桩荷载试验结果，复合地基承载力沉降关系曲线中初始直线段明显长于单桩。

如图 5 所示，拐点的负荷为 450～500 MPa；相应的承载能力特征值为 225～250 MPa，均大于设计要求。

3.3 地基荷载分配规律研究

在粉质黏土地基中，由于桩与桩间土的相互作用更为复杂，单桩复合地基受力后，桩与桩间土表现出不同的承载特性。因此，本文研究了复合地基中桩与桩间土的荷载分担规律。设于桩顶及桩间土上的土压箱，可测量桩与桩间土共同承受的垂直荷载。所述桩上土压箱置于荷载板的四角、边沿中心，并与桩相连。图 6 显示了单桩复合地基中桩与桩间土共同承担的荷载与作用的关系曲线。

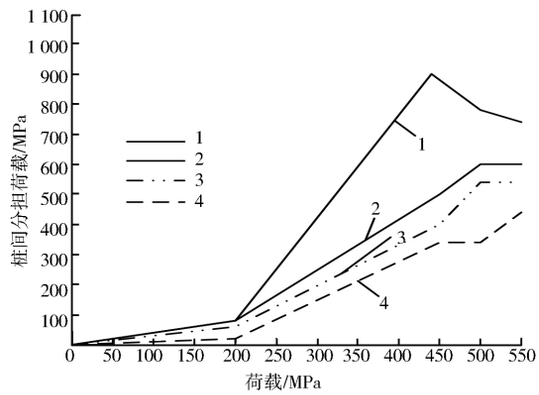


图 6 单桩复合地基桩和桩间土分担荷载与外加荷载的关系

Fig. 6 Relationship between the shared load and the applied load by single-pile composite foundation and the soil between the piles

由上图可以看出，加荷载时，桩和桩间土共同承担的承载力随总荷载的增大而增大。总荷载小于 450 MPa时，桩和桩间土共同分担承载力曲线接近于直线；该过程中，上部荷载均匀分布于桩和桩间土，桩基承载力增加幅度大于桩间土；总荷载达到 450～500 MPa 时，桩和桩间土共同承受的承载力出现拐点；这时桩的荷载达到极限值，桩就屈服了；荷载继续施加，桩的共同承载力下降。桩与桩间土共同承载能力显著提高。接着，桩的荷载达到一个相对稳定的值，这可以看作桩的剩余强度值，桩间土体共同承担的承载力达到了较高的水平，不断地使用外部荷载。尽管桩间土分担荷载仍在增加，但复合地基的沉降却急剧增加，说明复合地基已受到破坏，这时，即使桩间土能继续承受荷载，荷载也要分摊。

4 结论

对粉质黏土地基支护结构极限承载力进行了试验分析，所得结论对地基稳定性分析具有指导意义。对粉质黏土地基的承载力分析由于试验条件和施工

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时间的限制，不够完善，极限荷载分析还受到其他因素的影响。在受地层粗糙度影响较大的情况下，软硬岩土层间摩擦系数和粗糙系数的测定还缺乏统一的方法，对其参数的合理取值还需要进一步研究。因此，在后续的研究中将进一步完善此次研究的方法，以进一步提高粉质黏土地基支护结构极限承载力分析结果的准确性。

参考文献：

[1] 陆罗观，刘润，练继建，等. 考虑冲刷影响的筒型基础竖向极限承载力研究[J]. 海洋工程，2019，37(3)：69-77.
LU L G，LIU R，LIAN J J，et al. Study on vertical ultimate bearing capacity of bucket foundation considering scour effect[J]. The Ocean Engineering，2019，37(3)：69-77.

[2] 张宏博，刘源，陈晓光，等. 透水性混凝土桩在黄泛区粉性土地基中的加固机理及效果研究[J]. 中外公路，2019，39(3)：20-25.

[3] 罗亚琼，张超，马婷婷. 基于上限极限分析多滑块临坡地基承载力计算[J]. 公路工程，2019，44(3)：97-101.
LUO Y Q，ZHANG C，MA T T. Solution for bearing capacity of multi-slide ground adjacent slope based on upper limit analysis[J]. Highway Engineering，2019，44(3)：97-101.

[4] 郑刚，于晓旋，杜娟，等. 临近边坡的条形基础地基极限承载力数值分析[J]. 岩土力学，2018，39(10)：3812-3820，3829.
ZHENG G，YU X X，DU J，et al. Numerical analysis of ultimate bearing capacity of strip footings near slopes[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(10)：3812-3820，3829.

[5] 张常光，晏青，周菲，等. 不同吸力分布下条形地基极限承载力解答[J]. 岩石力学与工程学报，2018，37(5)：1237-1251.
ZHANG C G，YAN Q，ZHOU F，et al. Solution of ultimate bearing capacity of strip foundation under different suction distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2018，37(5)：1237-1251.

[6] 崔路苗，郭志宇. 地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分析[J]. 地震工程学报，2018，40(1)：54-59.
CUI L M，BU Z Y. Formulas of ultimate bearing capacity for strip foundation on unsaturated soils with different suction distributions[J]. China Earthquake Engineering Journal，2018，40(1)：54-59.

[7] 蒋鹏程. 粉土地基 CFG 桩与螺杆桩复合地基承载特性对比分析[J]. 铁道学报，2019，41(4)：125-132.
JIANG P C. Comparative analysis on bearing behaviors of CFG pile and screw pile composite foundation in silt foundation[J]. Journal of the China Railway Society，2019，41(04)：125-132.

[8] 董建华，庄超. 深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(3)：619-633.
DONG J H，ZHUANG C. Mechanical properties of the combined retaining structure of frame prestressed anchors and micro steel tube piles in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(3)：619-633.

[9] 王炜正，吉明. 某 LNG 工程软土地基深基坑支护结构受力[J]. 水运工程，2018，545(8)：154-159.
WANG W Z，JI M. Force on supporting structure of deep foundation pit in LNG project soft foundation[J]. Port & Waterway Engineering，2018，545(8)：154-159.

[10] 郎秋玲，秦凯旭，王伟，等. 基于微分方程组对基坑排桩支护结构的内力计算分析[J]. 建筑技术，2019，50(3)：324-327.
LANG Q L，QIN K X，WANG W，et al. Calculation and analysis of internal force of piles excavation supporting in view of differential equations[J]. Architecture Technology，2019，50 (3)：324-327.

[11] 刘成禹，陈淑云. 基坑围护结构增量计算法的改进[J]. 岩土力学，2018，39(5)：1834-1839.
LIU C Y，CHEN S Y. Improvement of incremental calculation method of retaining structure for foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics，2018，39(5)：1834-1839.

[12] 魏鹏飞，刘杰. 软土地基深基础组合结构支护技术研究[J]. 公路，2019，64(1)：136-140.

[13] 张震，王永军，蔡新钢，等. 考虑实测初挠度，厚度和残余应力等缺陷的耐压球壳极限承载力分析[J]. 船舶力学，2019，23(11)：1331-1338.
ZHANG Z，WANG Y J，CAI X G，et al. Ultimate strength analysis of pressure spherical hull with initial defection，thickness and residual stress imperfection[J]. Journal of Ship Mechanics，2019，23(11)：1331-1338.

[14] 赵明华，彭文哲，杨超炜，等. 斜坡地基刚性桩水平承载力上限分析[J]. 岩土力学，2020，41(3)：727-735.
ZHAO M H，PENG W Z，YANG C W，et al. Upper bound analysis of lateral bearing capacity of rigid piles in sloping ground [J]. Rock and Soil Mechanics，2020，41(3)：727-735.

[15] 朱文波，戴国亮，龚维明，等. 基于 Prandtl 破坏模式的吸力式沉箱基础抗拔承载力极限分析上限解[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2019，50(1)：158-164.
ZHU W B，DAI G L，GONG W M，et al. Upper bound solution for ultimate bearing capacity of suction caisson foundation based on Prandtl failure mode[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2019，50(1)：158-164.

（编辑：单　婕）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net