

# 江苏泗阳城区浅层粉土工程地质特性分析\*

汪名鹏<sup>1,2</sup>

(1.江苏省水文地质海洋地质勘察院,江苏 淮安 223005;  
2.江苏省水文地质工程地质勘察院,江苏 淮安 223005)

**摘 要:**根据研究区158个场地近千个浅层钻孔的试验成果,从沉积特性入手分析了研究区浅层粉土的成因类型与典型沉积组合剖面。通过室内试验成果的统计分析,研究了浅层粉土颗粒组成特征、化学矿物成份及其基本物理力学性质,同时,结合静探试验与荷载试验成果,分别建立了与主要物理力学性质指标的相关性经验方程。采用变水头试验与典型工程抽水试验、取土坑击实试验以及标准贯入试验分别对研究区浅层粉土的渗透性、击实性和振动液化性进行了分析,结果表明:研究区浅层粉土通过室内变水头试验与现场抽水试验得出的渗透性指标相差1~2个数量级,现场抽水试验更接近粉土的实际渗透性指标;研究区浅层粉土具有水稳定性差、不易压实的特点;研究区浅层粉土多为可液化土层,液化等级从轻微液化至严重液化,地域性特征明显。研究成果给泗阳城市规划建设提供了一定的借鉴作用,也为进一步深入研究本地区浅层粉土提供基础资料。

**关键词:**浅层粉土;沉积特性;工程地质特性

中图分类号:TU42      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)02-0452-09

## Analysis on Engineering Characteristics of Shallow Silt Soil in Siyang Area, Jiangsu Province

Wang Mingpeng<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Province Institute of Hydrogeological and Marine Geology Investigation, Huai'an, Jiangsu 223005, P.R. China; 2. Jiangsu Province Institute of Hydrogeological and Engineering Geological Investigation, Huai'an, Jiangsu 223005, P.R. China)

**Abstract:** Base on the test results of a large of samples from 158 projects, genetic type and typical combination geological sections of shallow silt soils in Siyang Area, Jiangsu Province, were analyzed respectively in terms of the sedimentary characteristics. Components of particles and chemical mineral composition and basic mechanical properties of the shallow silt soils were analyzed with the statistical analysis of the test results, combined with the static test and load test results, the correlation equation and the main physical and mechanical properties were established. Using variable head permeability test and typical engineering pumping test, borrow pits compaction test and standard penetration test, Permeability, compaction and liquefaction were studied. Using laboratory head test and field pumping test results show that the permeability index difference of 1~2 orders of magnitude, the field pumping test index is closer to the actual penetration of shallow silt soils in the study area; the characteristics of shallow silt soils with bad water stability and not easy compaction; the liquefaction of the shallow silt soil occurred extensively in the study area, liquefaction grade from mild liquefaction to serious liquefaction, the regional characteristics of

\* 收稿日期:2017-11-13(修改稿)

作者简介:汪名鹏(1973-),男,安徽安庆人,硕士,研究员级高级工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质勘察与研究工作。E-mail:ahwmp@163.com

基金项目:江苏省省级地质勘查基金(苏财建[2011]425号)

significant. The research results provide some good advice for the planning and construction of Siyang city, and also provide basic information for further research.

**Keywords:** shallow silt soil; sedimentary environment; engineering geological characteristics

0 引言

粉土是介于砂土与黏性土之间的土体,工程地质特性复杂,具有接近砂土和黏性土的双重特性<sup>[1]</sup>。泗阳城区地处黄淮冲积平原中部,地表广泛分布粉土。浅层粉土属于新近沉积土,虽然目前规范中并没有把粉土归类到特殊性岩土,但其具有独特的工程特性,一般来讲,浅层粉土形成时代新,埋藏浅且地下水位高,具有饱水、欠压密、强度相对较低、振动液化等特性<sup>[2-3]</sup>。作为城市规划建设地基土层,浅层粉土在埋藏深度、空间分布特征、物理力学性质等方面的差异对工程经济与工程质量起着决定性的作用<sup>[4]</sup>。

本文在泗阳城区浅层粉土沉积特性和三维空间分布特征的基础上,通过各种试验对其颗粒组成、矿物组成、物理力学性质进行了分析,认识该地区粉土的工程地质特性,给城市规划建设提供了一定的借鉴作用,也为进一步深入研究本地区粉土的其他特性提供基础资料。

1 浅层粉土沉积特性

研究区位于苏北黄淮平原中部,浅层沉积物沉积相类型较多,岩性变化较大,不同沉积类型是不同环境下的产物。研究区浅层沉积物岩性岩相特

点与年代划分在很大程度上反映了全新世阶段古地理沉积环境演变特征<sup>[5]</sup>。

第四纪全新世期间,虽然海侵对研究区的影响程度很微弱,但受研究区周边海侵的影响,造成研究区区域水系紊乱,沂沭水系、淮河水系以及黄河多次泛滥影响了浅层粉土的沉积。

黄河泛滥影响苏北起始于晚更新世,全新世晚期更为明显<sup>[6]</sup>,也是研究区浅层粉土沉积环境的主导外力作用,沉积组合因海进、海退、河湖水系变化以及黄河多次泛滥而呈现明显差异。一方面河、海作用不断地改造黄河泛滥冲积物,另一方面黄河泛滥不断形成新的堆积物。有史记载的黄河夺淮以来,黄河泛滥数百次,带来大量的泥砂,使古黄河两侧堆积为粉土、粉砂,形成了宽约 30~50 km 的黄泛堆积平原。黄泛冲积物岩性以粉土为主,粉砂与粉质黏土呈多层、互层结构,古黄河河道中心带沉积厚,向两侧减薄,由于河道的摆动迁移,厚度变化较大,一般厚度变化在 5~15 m。底部可见因近期洪泽湖北部沿湖湖水泛滥沉积的灰褐色粉质黏土,含有大量的淡水贝壳、螺壳及铁锰结核;古黄河东北部低洼处可见海相沉积的淤泥以及淤泥质土,其间夹灰黄色-灰色粉土,体现了河湖、沼积以及后期黄河泛滥联合沉积的结果,如图 1。

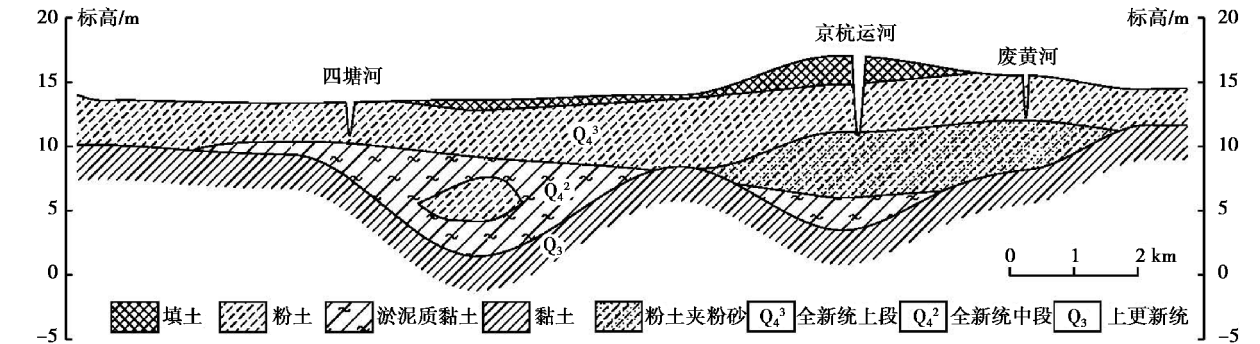


图 1 研究区浅层粉土沉积组合剖面

Fig. 1 Combination section of silt soil deposition in study area

受古地形地貌以及黄河多次泛滥的影响,研究区粉土平面上沿古黄河向两侧厚度泛滥沉积相变化较大,总体上,西南部较薄,东北部较厚,沉积厚

度一般为 1.10~14.90 m,分布呈纵长形,基本上与古黄河河道平行,高漫滩处最大厚度达到 23.20 m,如图 2。

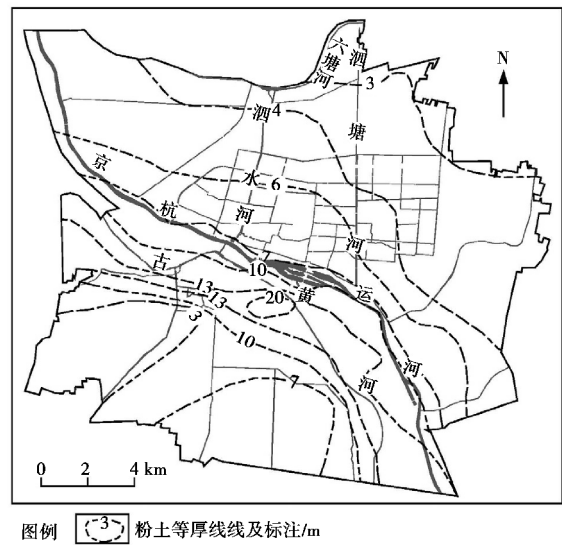


图 2 粉土等厚线图  
Fig. 2 Isopachous map of silt soil

2 粉土的基本工程地质特性

为了研究泗阳城区浅层粉土的基本工程地质特性,选取覆盖研究区的 158 个场地浅层钻孔资料及其对应的样品进行了常规物理力学与颗粒分析试验,选取了有代表性的样品进行了化学全量分析试验、矿物分析试验。同时,为了研究粉土物理力学指标之间及其与原位测试指标之间的相关性,对部分钻孔进行了对比试验。

2.1 粉土的颗粒组成及土质类型

通过对研究区各场地的取样进行颗粒分析试验,并对各粒径区间含量进行数理统计,统计结果如表 1。研究区浅层粉土粒径<0.005 mm 的颗粒含量为 6.23%,依据规范<sup>[1]</sup>,研究区的粉土土质类型为砂质粉土。从数据分布上分析,研究区粉土具有“高粉性、低黏性”特征。

表 1 粉土的颗粒组成统计表  
Table 1 Statistical data of particle size analysis for silt soil

粒径/mm	0.50~0.25	0.25~0.075	0.075~0.005	<0.005
样本数/个	1 086	1 086	1 086	1 086
最大含量/%	13.80	28.70	99.20	15.80
最小含量/%	0.00	0.00	66.30	0.10
平均含量/%	0.03	5.84	87.91	6.23

结合颗粒分析试验得到的数据,绘制研究区粉土的粒径分布曲线,如图 3。粉土的颗粒分布曲线特征整体上呈较陡的形状,其中 0.075~0.005 mm 粉粒平均占 87.91%,黏粒平均占 6.23%,曲率系数  $C_c$  平均为 1.59,不均匀系数  $C_u$  平均为 3.29,表明浅层沉积相粉土粒径比较均匀,属于以粉粒为主的级配不良土,土层疏松。

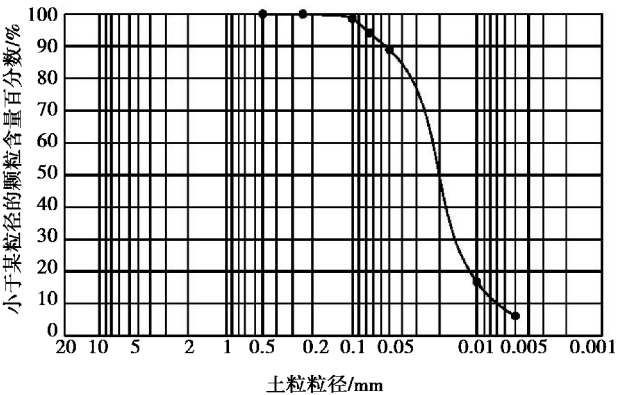


图 3 粉土粒径分布曲线  
Fig. 3 Particle size distribution curve of silt soil

2.2 粉土的化学组成与矿物成份

通过取样测得粉土的化学成分,如表 2。

表 2 粉土普通化学全量分析结果  
Table 2 Results of chemical component for silt soil

成份	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	烧失量	有机质
测试值(平均)	72.92	10.75	6.65	1.36	0.74	0.76	0.63	0.55	0.53	0.03	0.09	0.68	4.32

从粉土化学全量分析比例表中可以看,泗阳城区浅层粉土中 SiO<sub>2</sub> 含量占绝大部分,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量占 17.4%,其次是 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、MgO、CaO 等占总量的 3.49%。粉土的化学组分在一定程度上反映了矿物组成状况,化学成分中高 SiO<sub>2</sub> 含量以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高较为一致,与其中的石英、长

石含量变化一致,MgO、CaO 为碳酸盐岩经风化、淋滤后的残留成分。  
根据矿物分析结果,研究区粉土矿物成分原生矿物占 67%左右,以石英为主约 45%,微长石、正长石次之约占 12%,次生矿物占 20%,蒙脱石占 11%,伊利石占 5%,绿泥石占 4%。本次测得的结

果与研究区周边徐宿地区粉土测定的矿物成分相似<sup>[7]</sup>,非黏土矿物含量占主导地位,一般约占整个矿物组成的 75%,黏土矿物约占 20%左右。研究区粉土黏土矿物成分主要由蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石组成,其中蒙脱石含量占主导地位,表明研究区及周边的粉土的物源、成因与沉积环境共性较高。沉积物物质来源多为当地母岩风化产物,受外力对物质的搬运,并受河、湖、海作用的相互影响明显,黄泛冲积物改造强烈,黏土矿物成分、色调、岩性以及岩相交替变化强烈。

有研究表明<sup>[8-9]</sup>,粉土的化学组成与矿物成分与其工程特性有着很大的关系。研究区地下水位较高,粉土多处于饱和状态,黏土矿物蒙托石、伊利石、高岭石等具有亲水性,遇水易软化,颗粒易于散化,导致粉土土体强度变小,易于变形;有机质含量高,有利于提高土体的塑性。

2.3 物理力学性质指标分析

研究区粉土的基本物理力学性质指标统计结果如表 3。

表 3 粉土基本物理力学性质指标  
Table 3 Physical and mechanical indexes of silt soil

指标	$w/\%$	$\rho/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$e$	$I_p$	$I_L/\%$	$a_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	$E_s/\text{MPa}$	直接快剪		固结快剪		静力触探	
								$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{ }^\circ)$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{ }^\circ)$	$q_c/\text{MPa}$	$f_s/\text{kPa}$
样本数	1086	1223	1240	1209	1209	1113	1113	934	934	93	93	405	405
含量范围	21.20~	17.80~	0.576~	3.10~	0.13~	0.08~	3.24~	4.00~	1.40~	5.00~	9.90~	0.90~	7.40~
	31.60	20.40	1.036	10.00	2.39	0.20	22.19	32.0	33.80	52.00	38.20	6.18	95.00
平均值	27.52	18.89	0.804	7.06	0.97	0.23	8.88	12.62	24.86	13.80	28.53	2.59	33.89
变异系数	0.08	0.02	0.085	0.23	0.42	0.34	0.14	0.39	0.23	0.60	0.21	0.41	0.47

由表 3 统计结果可以看出,泗阳城区浅层粉土的物理力学指标离散性较大,黄泛冲积层岩性以粉土为主,杂粉砂、粉质黏土,呈互层状、透镜体状分布,含水量、孔隙比、天然密度等物理指标变异系数较小,力学指标变异系数较大。研究区粉土土质的不均匀性也反映了当时沉积环境的不稳定性,是多次泛滥沉积的结果。研究区粉土形成年代以及成因类型相同,成分与结构相似,其影响工程特性的核心物理指标是天然孔隙比和天然含水量等。以下重点分析它们之间与其他力学指标之间的相关性。

粉土的天然孔隙比是表征其密实程度的重要指标。从表 3 统计表明,研究区粉土孔隙比为 0.576~1.036,平均为 0.804。但是目前在粉土勘察时要取得 I 级原状样比较困难,而且鉴于粉土的特性,在运输、制样过程中容易导致一定程度的扰动,对于饱和粉土仅依据天然孔隙比单个指标很难评价粉土的密实度。因此,本次研究增加静探锥尖阻力来验证其密实度。通过对粉土的

天然孔隙比与静探锥尖阻力指标的对比,绘制天然孔隙比与锥尖阻力的相关性散点图(如图 4),虽然线性相关性较差,但从图 4(a)散点图可以看出研究区粉土的孔隙比大部分集中在 0.75~0.90,对应的锥尖阻力也集中在 2.0 MPa 左右。因此,研究区粉土的密实状态主要为稍密-中密,符合粉土的沉积年代特征。

根据粉土样品的压缩模量指标分别与天然孔隙比、天然含水量等指标的数据对比分析,显示压缩模量与孔隙比之间存在较好的规律性,天然孔隙比分布在 0.75~0.90,绝大多数孔隙比大于 0.75。从图 4(b)压缩模量与孔隙比散点图可以看出,粉土的压缩模量随天然孔隙比的减小而增大,表明粉土的天然孔隙比大小对力学指标影响较明显,研究区压缩模量多集中在 5~10 MPa。从图 4(c)看出,压缩模量随着含水量  $w$  的减小, $E_s$  渐渐增大,压缩模量在 7 MPa 以内,含水量变化幅度较大,大于 7 MPa 时变化幅度明显变小。



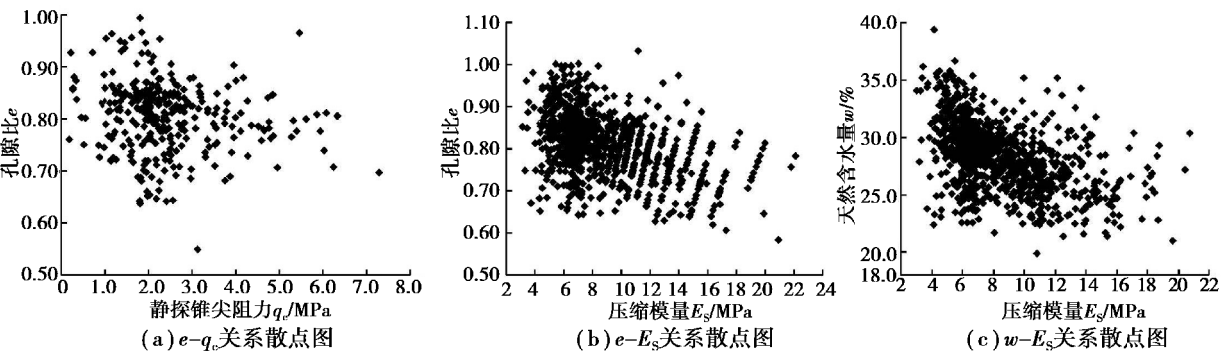


图 4 粉土各主要物理、力学指标的散点图

Fig. 4 Scatter plots of major physical and mechanical indexes of silt soil

2.4 原位测试指标与物理力学指标相关性分析

为了进一步分析研究区粉土的地基承载力特性,采取原位平板荷载试验对浅层粉土的承载力进行测定,确定其地基承载力特征值 $f_{ak}$ ,并与静力触探试验数据 $q_c$ 以及压缩模量指标 $E_s$ 分别进行相关

性分析。结果表明:粉土静力触探锥尖阻力 $q_c$ 与地基承载力特征值 $f_{ak}$ 、压缩模量 $E_s$ 与承载力特征值 $f_{ak}$ 等均有较好的线性相关性,如图 5。因此,在工程实际应用过程中,可以参考 $q_c$ 、 $E_s$ 等指标与地基承载力特征值 $f_{ak}$ 进行取值。

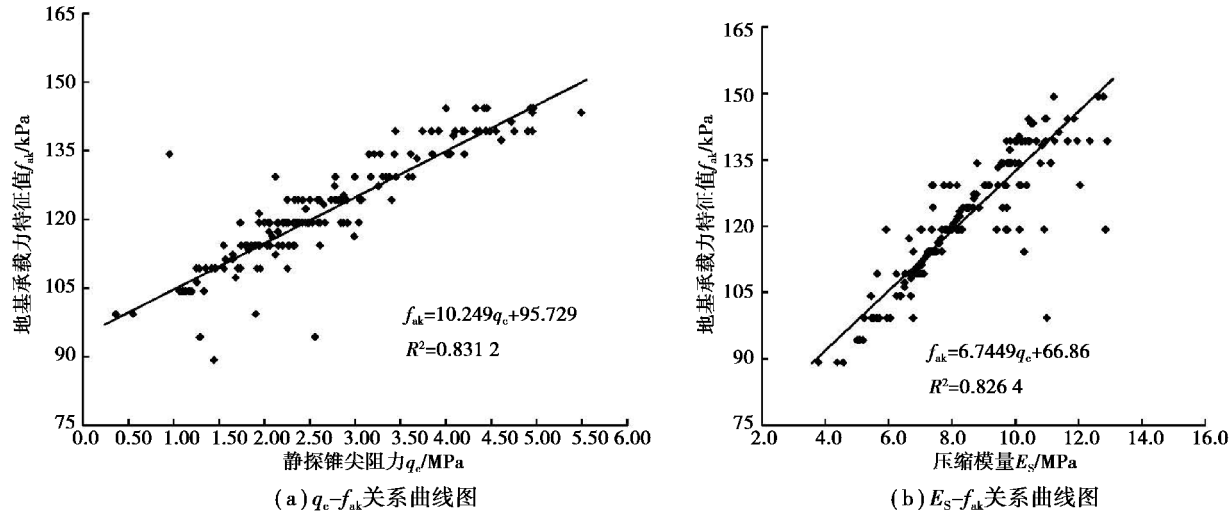


图 5 粉土各主要物理力学指标与地基承载力特征值关系图

Fig. 5 Relationship between physical and mechanical indexes and characteristic value of silt soil foundation's bearing capacity

2.5 粉土抗剪强度指标

根据粉土基本工程地质特性的分析,尤其是粉土物理力学性质指标的统计分析,研究区粉土抗剪强度指标变异系数明显偏大。粉土这种地层性质上的差异反映了研究区浅层粉土沉积环境与沉积历史的差异,导致了粉土工程地质特性存在一定的差异。根据浅层粉土沉积特性,绘制了粉土主要物理力学指标的空间变异特征分布图,如图 6。

根据室内土工直接剪切试验、固结快剪试验以及三轴剪切试验成果对粉土抗剪强度分别进行统计,如表 4,从统计结果来看,其差异很明显。

表 4 粉土抗剪强度指标空间变异统计特征值

Table 4 Statistics of soil shear strength indexes spatial variability							
分区	指标	直接快剪		固结快剪		三轴剪切	
		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
I 区	样本数	769	769	55	55	8	8
	最大值	27.70	30.90	27.70	38.20	18	30.6
	最小值	4.00	10.80	5.00	23.60	8	16.7
	平均值	12.29	25.17	12.56	30.75	13	26.2
	变异系数	0.37	0.13	0.52	0.09	0.32	0.16

续表 4

分区	指标	直接快剪		固结快剪		三轴剪切	
		c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
Ⅱ区	样本数	89	89	29	29	12	12
	最大值	17.00	33.80	16.00	35.80	18	31.90
	最小值	4.20	20.10	5.00	25.20	10	20.90
	平均值	9.91	25.90	8.13	30.99	15	27.30
	变异系数	0.26	0.14	0.33	0.07	0.20	0.11
Ⅲ区	样本数	76	76	9	9	12	12
	最大值	32.00	16.80	52.00	18.70	73	29
	最小值	6.00	1.40	15.40	9.90	10	9.5
	平均值	19.04	9.49	24.58	15.43	30	18
	变异系数	0.35	0.51	0.44	0.16	0.77	0.42

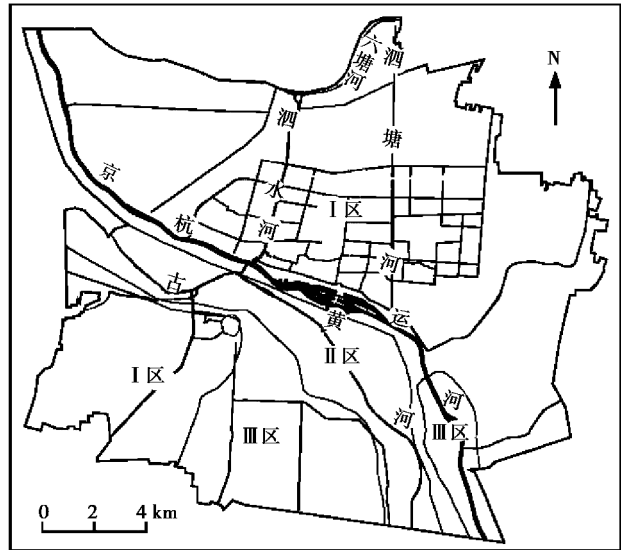


图 6 粉土主要物理力学指标空间变异特征分布图  
Fig. 6 Spatial variation characteristic distribution of main physical and mechanical indexes of silt soil

3 粉土的其他工程地质特性分析

3.1 粉土的渗透性指标分析

研究区地下水位浅,粉土基本上都处于饱水状态,研究粉土的渗透性对于解决施工工程,尤其是地下工程尤为重要。粉土的渗透性指标常用渗透系数来表示,采用室内渗透试验来测定,也可以通过现场水文地质试验来测定<sup>[10]</sup>。采取研究区 23

个场地 120 件不同深度样品的室内变水头试验结果,同时结合典型工程场地现场抽水试验结果,提出研究区黄泛冲积粉土渗透性指标。

首先,根据室内试验结果对粉土的渗透系数与含水量、重度以及孔隙比的关系分析,统计结果如表 5。

表 5 室内变水头试验测定粉土层渗透性指标统计表  
Table 5 Statistical values of the permeability coefficients through variable head permeability test

指标	$w$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$e$	$k_h/(cm \cdot s^{-1})$	$k_v/(cm \cdot s^{-1})$	$k_h/k_v$
样本数	120	120	120	120	120	120
最大值	39.20	20.40	1.036	$8.5 \times 10^{-4}$	$6.3 \times 10^{-4}$	3.63
最小值	20.30	17.70	0.596	$9.5 \times 10^{-6}$	$4.2 \times 10^{-6}$	1.02
平均值	27.35	19.18	0.769	$1.75 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$	1.51
标准差	3.45	0.56	0.080	2253.7	1626.0	0.54
变异系数	0.13	0.03	0.104	1.3	1.3	0.36

从室内试验统计结果来看,研究区粉土层水平渗透系数在  $8.5 \times 10^{-4} \sim 9.5 \times 10^{-6} cm/s$  之间,存在 2 个数量级差距。这与研究区粉土层沉积环境有关,古黄河多次泛滥导致粉土层夹杂有粉砂透镜体或夹层。研究区水平渗透系数比垂直渗透系数普遍要大, $k_h/k_v$  均大于 1,在 1.02~3.63 之间,相差不大,表明研究区粉土微具层理性,渗水性具有各向异性。

土体渗透系数的主要影响因素是上覆有效应力和孔隙比,尤其是孔隙比<sup>[11-12]</sup>。渗透系数与孔隙比的相关性研究成果较多,也很复杂,本文不作深入研究。粉土含水量、孔隙比与水平渗透系数的关系散点图表明:孔隙比、含水量与渗透系数的离散性比较大,如图 7。但是从散点图可以分析出孔隙比、含水量与渗透系数大小分布存在一些规律性:含水量小于 30%,渗透系数一般在  $4.0 \times 10^{-4} cm/s$  左右;含水量大于 30%,渗透系数大多数分布在  $4.0 \times 10^{-4} cm/s$  以上区域;总体上渗透系数随孔隙比增大而增大,研究区孔隙比小于 0.80,渗

透系数多分布在  $0.50\times10^{-4}\text{cm/s}$  附近。

对研究区 8 个场地粉土含水层进行现场抽水试验,采用完整井稳定流抽水试验,试验结果如表 6。

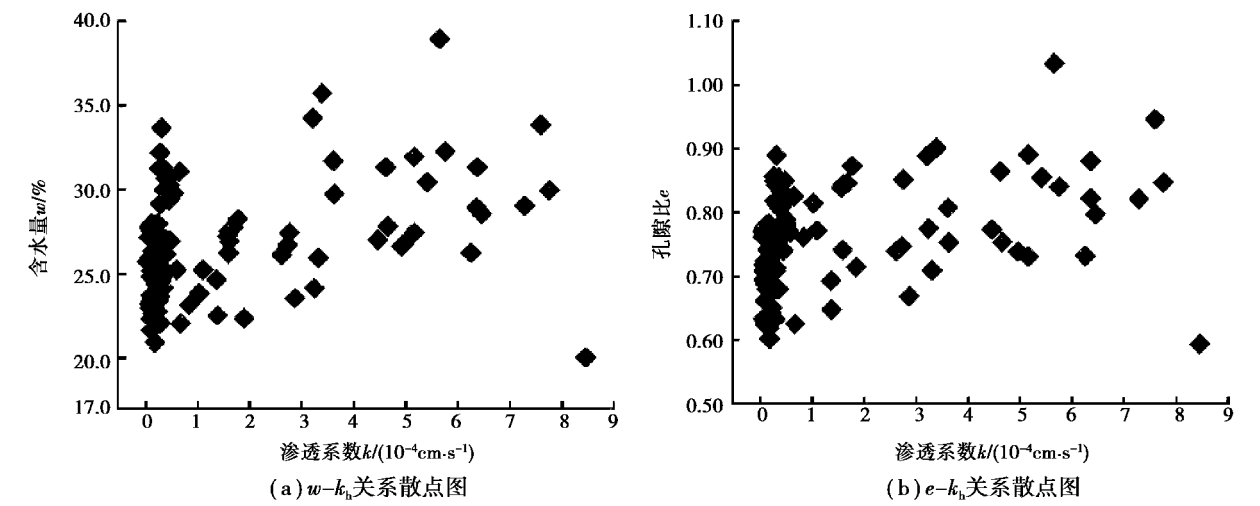


图 7 粉土孔隙比、含水量与渗透系数的散点图

Fig. 7 Scatter plots of pore ratio, natural water content and permeability coefficient of silt soil

表 6 粉土含水层现场抽水试验结果

Table 6 Calculation results of aquifer parameters with field pumping test

地点	李口镇赵庄	李口镇老街	姚圩	葛集陆庄	泗阳船闸	雨润新天地	县国土局院内	泗阳农场
$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$9.48\times10^{-3}$	$1.51\times10^{-3}$	$2.69\times10^{-3}$	$3.76\times10^{-3}$	$9.48\times10^{-3}$	$4.24\times10^{-3}$	$10.02\times10^{-3}$	$0.97\times10^{-3}$

从现场抽水试验与室内变水头试验得出的渗透系数对比可以得出,现场抽水试验测定的渗透系数较大,存在几个数量级的差距。主要是因为室内测定渗透系数的方法是选择野外一些代表点,土样体积较小,与实际土层之间差异较大,因此所测定的数据与野外实际数据之间也存在着差距。因此,现场试验测定的方法能够比较客观地反映粉土的渗透性指标。

3.2 粉土的击实性分析

采取研究区内 6 个场地取土坑击实试验,如表 7,取土坑土性为低液限粉土,天然含水率为 9.7%~16.4%,素土击实试验(95%压实度)CBR 为 2.4%~13.8%,最优含水率  $w_0$  为 13.8%~16.0%,最大干密度  $\gamma_{\text{dmax}}$  为 1.71~1.82  $\text{g/cm}^3$ 。在对 1 号样掺石灰 7%后,在 95%的压实度下 CBR 达到 13.3%,对应的最优含水率为 16.4%,最大干密度为 1.67  $\text{g/cm}^3$ ,CBR 明显增大。因此,粉土具有水稳定性差、不易压实等特点,用作路基填料土时,应掺加一定剂量水泥、石灰作固化处理。

表 7 粉土的击实试验、CBR 试验结果

Table 7 Values of compaction and CBR test of silt soil

样号	物理性指标(100 g)			击实试验		承载比	
	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p$	$w_0/\%$	$\gamma_{\text{dmax}}/(g\cdot\text{cm}^{-3})$	$K/\%$	修正 CBR/%
1	31.0	18.7	9.7	15.2	1.71	95	4.8
2	27.6	22.0	5.6	14.1	1.82	95	2.4
3	29.1	24.3	4.7	14.4	1.78	95	5.8
4	29.4	20.7	8.7	15.0	1.79	95	13.8
5	30.9	22.2	8.7	16.0	1.71	95	9.5
6	32.0	21.0	11.0	13.8	1.82	95	4.4
平均	30.0	21.5	8.07	14.8	1.77	95.0	6.8

3.3 粉土的振动液化特性分析

饱和、松散的粉土作为地基在瞬时地震力作用下易趋于密实,并完全丧失了强度和承载力,表现

出液体特性,对建筑物破坏性较大。影响饱和粉土振动液化主要有动荷载条件、场地土层分布、土性条件、地下水条件等多个因素<sup>[13]</sup>。目前岩土工程勘察行业判别饱和粉土液化的方法主要是标准贯入试验法、静力触探试验法以及剪切波速  $V_s$  判别法等。其中抗震规范<sup>[14]</sup>推荐的标准贯入试验法进行饱和粉土的液化判别是最有代表性的,在岩土工程领域广泛采用。

研究区地处黄泛冲积平原区,地震基本烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为  $0.10g$ ,设计地震分组为第二组。地下水埋深一般为  $1\sim2\text{ m}$ ,古黄河高漫滩可达  $4\sim6\text{ m}$ 。在此基础上依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[14]</sup>,对粉土振动液化特性进行分区评价。结果表明:研究区粉土多为可液化土层,液化等级地域性特征明显,如图 8。古黄河高漫滩平原五堆社区以西,液化等级严重液化,液化指数为  $31.4\sim38.5$ ,液化土层底板深度为  $10.1\sim18.2\text{ m}$ ,古黄河高漫滩以及京杭运河两岸中心城区液化等级为轻微-中等液化,液化指数为  $0.31\sim14.08$ ,液化土层底板深度中心城区一般在  $3\sim7\text{ m}$ ,液化土层厚度为  $2.00\sim15.0\text{ m}$ ,古黄河高漫滩处粉土底板埋深较大,一般为  $7\sim15\text{ m}$ ,最大达到  $20\text{ m}$  以上。古黄河两侧低平平原区,液化等级轻

微液化,液化指数为  $0.02\sim5.83$ ,液化土层底板深度一般在  $2.0\sim7.0\text{ m}$ ,液化土层厚度为  $2.0\sim7.0\text{ m}$ 。其他边缘地带饱和粉土不液化-轻微液化,液化等级为  $0.0\sim0.38$ ,液化土层底板深度为  $0\sim3\text{ m}$ ,液化土层厚度小于  $3\text{ m}$ 。

4 结论

在分析已有勘察钻孔资料的基础上,通过各种试验,分析总结了研究区浅层粉土的沉积特性与工程地质特性。

(1)黄河泛滥是影响研究区浅层粉土沉积环境的主导外力作用,沉积组合类型因海进、海退、河湖水系变化以及黄河多次泛滥而呈现明显差异。分布范围受古地理特征及地貌条件影响,沉积厚度沿古黄河向两侧厚度变化较大,总体上西南部较薄,东北部较厚,分布呈纵长形,基本上与古黄河河道平行。

(2)研究区浅层粉土颗粒组成比较均匀,级配不良。化学成分含量中  $\text{SiO}_2$  含量占绝大部分,其次是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量;黏土矿物成分主要由蒙脱石、伊利石组成。

(3)研究区浅层粉土含水量、孔隙比、压缩模量等物理力学指标之间以及物理力学指标与原位测试数据指标都有较好的线性关系,并拟合了主要物理力学指标与静力触探锥尖阻力  $q_c$  以及地基承载力特征值  $f_{ak}$  的经验公式。

(4)采用变水头室内试验与典型工程现场抽水试验对浅层粉土的渗透性指标进行对比,所测定的渗透系数相差  $1\sim2$  个数量级,现场抽水试验测得渗透性指标更接近实际。

(5)研究区浅层粉土具有水稳定性差、不易压实等特点,用作路基填料土时,应掺加一定剂量水泥、石灰作固化处理。

(6)研究区粉土具“高粉性、低黏性”特征,多为可液化土,液化等级从轻微液化至严重液化,地域性特征明显。

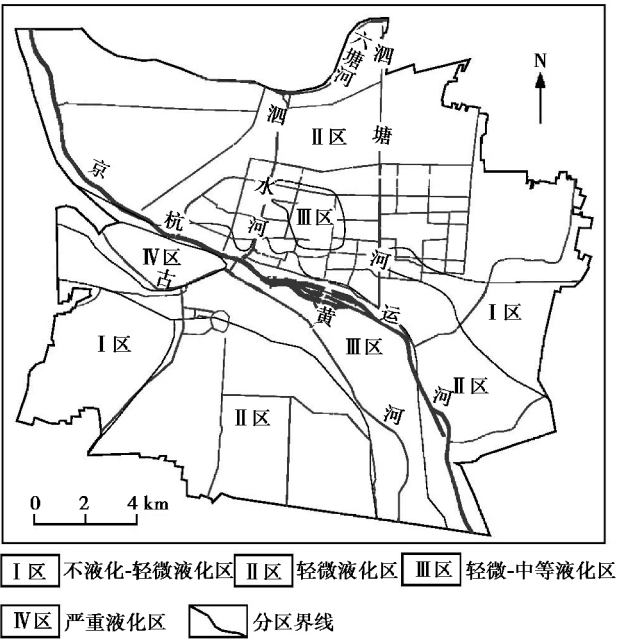


图 8 粉土液化等级分布示意图

Fig. 8 Gradation distribution diagram of silt soil liquefaction

参考文献 (References)

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.岩土工程勘察规范 (GB50021—2001) [S].北京:中国建筑工业出版社



- 社, 2009. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering (GB50021—2001) [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 陈国兴, 王炳辉, 刘建达. 新近沉积土的动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 539-543, 594. (Chen Guoxing, Wang Binghui, Liu Jianda. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of recently deposited soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3): 539-543, 594. (in Chinese))
- [3] 凌建明, 苏华才, 谢华昌, 等. 路基土动态回弹模量的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 919-925. (Ling Jianming, Su Huacai, Xie Huachang, et al. Laboratory research on dynamic resilient modulus of subgrade soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 919-925. (in Chinese))
- [4] 姜洪涛, 王富葆, 杨达源. 苏州市晚第四纪古地理与工程地质条件研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 82-86. (Jiang Hongtao, Wang Fubao, Yang Dayuan. A study on paleo-geography of late Quaternary and engineering geological condition of Suzhou urban district [J]. Sciences Geographica, 2003, 23(1): 82-86. (in Chinese))
- [5] 陈希祥. 江苏省徐淮地区第四纪地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1988. (Chen Xixiang. Quaternary geology of Xuzhou-Huaiyin region, Jiangsu province [M]. Beijing: Ocean Press, 1988. (in Chinese))
- [6] 陈希祥. 苏北黄淮平原全新统沉积特征[J]. 地层学杂志, 1989, 13(3): 213-218. (Chen Xixiang. Sedimentary characteristics of Huang-hai plains in Northern of Jiangsu province during the Holocene [J]. Journal of Stratigraphy, 1989, 13(3): 213-218. (in Chinese))
- [7] 朱志铎, 刘松玉, 孙海军. 江苏徐宿地区粉土的基本特性及加固方法研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1155-1158. (Zhu Zhiduo, Liu Songyu, Sun Haijun. Study of stabilized silt in Xu-Su area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1155-1158. (in Chinese))
- [8] 侯方. 毫阜高速公路路基填土工程性质的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006. (Hou Fang. Study on the engineering property of roadbed soil-filling of An-hui Bo-Fu expressway [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [9] 袁仁茂, 孙宏伟, 马凤山, 等. 北京平原区新近沉积土基本工程地质特性分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 93-99. (Yuan Renmao, Sun Hongwei, Ma Fengshan, et al. Physicochemical and geological characteristics of the recently deposited soils in Beijing plain region [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 93-99. (in Chinese))
- [10] 杨迎晓. 钱塘江冲海积粉土工程特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (Yang Yingxiao. Experimental study on engineering properties of Qiantang alluvial silts [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [11] 邓永锋, 刘松玉, 章定文, 等. 几种孔隙比与渗透系数关系的对比[J]. 地震工程学报, 2011, 33(增1): 64-66. (Deng Yongfeng, Liu Songyu, Zhang Dingwen, et al. Comparison among some relationships between permeability and void ratio [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Supp. 1): 64-66. (in Chinese))
- [12] 刘伟超, 杨广庆, 熊保林, 等. 低液限粉土水理特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 926-932. (Liu Weichao, Yang Guangqing, Xiong Baolin, et al. Research on the water-physical property of the low liquid limit silt [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 926-932. (in Chinese))
- [13] 汪名鹏. 淮安市区黄泛冲积粉土工程特性探讨[J]. 工程勘察, 2012, 40(2): 16-20. (Wang Mingpeng. Discussion on engineering characteristics of alluvial silt by the Yellow River in Huai'an [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(2): 16-20. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(GB50011—2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Building (GB50011—2010) [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese))