

文章编号: 1007-2993(2023)02-0127-08

杭州湾新区深部高液限黏土工程特性研究

陈明举¹ 池恒天^{2,3} 武维勇² 程春红²

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江宁波 315101; 2. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江宁波 315012;
3. 宁波工程勘察院有限公司, 浙江宁波 315012)

【摘要】 宁波杭州湾新区地处长江入海口南侧, 地质环境和水动力条件复杂, 沉积环境多变。该区地表以下 40~60 m 范围内普遍分布有高液限黏土层, 该层土常处于建筑工程深基础持力层范围内, 研究该层土的工程地质特性对杭州湾新区的开发建设具有重要的社会经济价值。从常规土工参数汇总、数理统计分析、结构性、损伤模型参数、三轴 CU 试验等方面研究杭州湾新区深部高液限黏土的工程特性, 结果表明: (1) 杭州湾高液限黏土物理性质表现为天然含水率高、孔隙比大、液限高等特征, 但力学性质接近于宁波地区冲湖积的第二层硬土层; (2) 通过数值计算软件检验, 各物理力学参数基本呈良好的正态分布, 可将物理指标参数视为常量, 力学指标作为变量, 同时需要考虑时空变异性 and 区域性; (3) 根据试验结果定量计算, 杭州湾高液限黏土为欠固结土、高灵敏度较强结构性黏土, 且原状土多呈现应力软化特征, 而重塑土呈现应力硬化特征。

【关键词】 高液限黏土; 工程地质特性; 物理力学参数; 损伤模型参数

【中图分类号】 TU 42

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.02.001

Engineering Characteristics of Deep High Liquid Limit Clay in Hangzhou Bay Area

Chen Mingju¹ Chi Hengtian^{2,3} Wu Weiyong² Cheng Chunhong²

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315101, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Engineering Investigation and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315012, Zhejiang, China; 3. Ningbo Engineering Survey Institute Co., Ltd., Ningbo 315012, Zhejiang, China)

【Abstract】 Ningbo Hangzhou Bay Area is located on the south side of the Yangtze River estuary. The geological environment and hydrodynamic conditions are complex, and the sedimentary environment is variable. The high liquid limit clay layer is widely distributed within the range of 40~60 m below the surface of the area. This layer of soil is often within the range of deep foundation bearing layer of construction engineering. Studying the engineering geological characteristics of this layer of soil has important social and economic value for the development and construction of Hangzhou Bay New Area. The engineering characteristics of the deep high liquid limit clay were studied from the aspects of conventional geotechnical parameters, mathematical statistics, structural properties, damage model parameters, and triaxial CU test. The results show that: (1) The physical properties of Hangzhou Bay high liquid limit clay are characterized by high natural water content, large void ratio, high liquid limit, etc., but the mechanical properties are close to the second hard soil layer of the alluvial lake in Ningbo area. (2) The physical and mechanical parameters are basically normal distribution through numerical calculation software. The physical index parameters can be regarded as constants, and the mechanical index can be regarded as variables. Time and space variability and regional characteristics should be considered. (3) According to the test results, the Hangzhou Bay high liquid limit clay can be quantitatively calculated as under-consolidated soil with high sensitivity. The undisturbed soil shows the characteristics of stress softening, while the remolded soil shows the characteristics of stress hardening.

【Key words】 high liquid limit clay; engineering geological characteristic; physical and mechanics parameters; damage model parameters

0 引言

20 世纪 20 年代, Terzaghi 指出黏土结构性在评

价黏性土的变形和强度特性时的重要性。随着人类工程活动范围的扩大, 地下工程朝更深方向发展, 深

作者简介: 陈明举, 1988 年生, 大学本科, 工程师, 从事岩土工程、水工环地质工作。E-mail: 409839327@qq.com

通讯作者: 池恒天, 1984 年生, 硕士, 注册土木工程师(岩土), 高级工程师, 从事岩土工程、水工环地质工作。E-mail: 27883329@qq.com

部土力学问题逐渐引起注意。许延春^[1]从深浅部土对比的角度对深部饱和黏土的力学性质特征进行了研究,提出了深部黏土强度的“上、下限取值法”。介玉新等^[2]通过对黄淮地区三种深部黏土的物性试验、颗粒分析、矿物成分分析、固结试验和三轴试验等室内土工试验,并与一般浅层黏土对比,总结了试验中深部黏土表现出的物理力学性质特点。李文平等^[3]指出深部黏土在高围压下载卸时,变形模量大小随围压大小而变化。孙强等^[4]对山东万福井田深部黏土工程地质特性进行了研究,电镜扫描显示,深部黏土具有显著的二维定向结构。商翔宇等^[5]认为深部黏土在不同应力水平作用下会表现出不同的力学特性,利用新提出的假设以及相应的计算方法,获得的预测计算结果与试验结果较为吻合。

蒋明镜等^[6]认为土体结构性数学模型及其破坏理论是21世纪土力学核心问题,从微观结构性指标、微观结构性模型着手,运用土体微观测试技术、统计力学以及微结构单元模型最终建立宏观力学模型。龚晓南等^[7]介绍前人对黏土结构性对其土工特性影响的部分研究成果,探讨结构性黏土的区分及黏土结构性形成原因。拓勇飞等^[8]立足于土体赋存的地质背景,以湛江地区第四系下更新统湛江组强结构性黏土地层为依托分析了该区土的工程特性,发现湛江黏土是一种典型的强结构性土,属陆相沉积为主的河控三角洲海陆交互沉积层,其中胶结作用是其具有较高结构强度的根本原因。刘恩龙等^[9]总结提出原位测试、结构性土样的制备及细观结构参数的量测方法、考虑细观结构的数值方法和建立考虑微观变形机理的宏观本构模型是进行结构性土研究的发展方向。王国欣等^[10]定性分析了杭州天然结构性软黏土的应力历史,与定量计算结果进行了比较,两者所得结果吻合,由此为求取具有较强结构性的土的先期固结压力提供了一种新的思路和方法。陈晓平等^[11]选取广州南沙典型软土为研究对象进行了剪切、无侧限抗压、固结等室内试验,结果表明结构性软土经扰动后强度明显降低,压缩性增加;原状土的固结特性与结构屈服压力有关,压缩曲线呈3阶段特征,结构屈服压力是变形规律的控制因素之一,可以通过压缩系数-固结压力曲线近似确定。张先伟等^[12]对湛江黏土的物理力学指标的相关性和变异性进行统计分析,建立重要指标间的关系经验公式,为湛江地区地基基础可靠性设计的参数选取提供依据。

深部土力学发展至今遵循着土力学学科发展的

一般规律,前期通过大量的试验研究回归分析获得了深部高压力学响应的一般规律,即问题的表象得到了描述,但对于控制该力学响应的本质机理阐述仍稍显欠缺,而这正是深部土力学学科发展成熟的标志。近年来,从微观、介观和宏观等多尺度对深部高压力学特性的基本机制展开了系统研究,取得了一定成果。

特殊土或区域性土往往具有更强烈或特殊的结构性,土的结构对土的应力应变强度的影响以及土的结构破坏后应力应变强度性质的变化是土力学理论和实践中的一个重要领域。

宁波杭州湾新区地处长江入海口南侧,地质环境和水动力条件复杂,沉积环境多变。该区地表以下40~60m范围内普遍分布有高液限黏土层,该层土常处于建筑工程深基础持力层范围内,故研究该层土的工程地质特性,对杭州湾新区的开发建设具有重要的社会经济价值。通过资料收集、专题试验,结合杭州湾新区工程实践,对该层土的基本物理力学性质、有机质含量、高压固结和灵敏度特性进行详细研究,综合分析杭州湾新区深部高液限黏土工程地质特性。

1 试验及常规土工参数

1.1 高液限黏土的取样及试验

高液限黏土性质试验主要包括室内试验和现场试验。鉴于现场试验影响因素多,难以控制变量,本课题主要以室内试验及搜集区域地质资料为主,现场测试为辅研究高液限黏土的工程性质。

根据相关资料显示,天然土的固结系数可以达到同样条件下的重塑土的10~15倍,在结构破坏以前,用薄壁取土器取样所得到的固结系数远大于厚壁取土器的土样,重塑土的结果最小,在固结压力大于结构强度之后,三者的差别不是很大^[13]。

从结构性土的宏观特征分析可以看出,取土试验时,是否保持天然土的结构,对于实验结果的影响非常大。土的结构被扰动的程度不同,试验得出的指标也不同,为此,取土试样全部采用薄壁取土器采取原状样,同时通过现场微型十字板及室内试验测试土层灵敏度。对所取土样进行进一步的室内试验,试验方法执行《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)。

1.2 高液限黏土常规土工参数

通过对杭州湾地区的大量勘察项目进行技术和区域经验总结,建立了岩土分层系统,并掌握了高液限黏土特征,通过对同类项目工程地质资料整理,将本区高液限黏土物理力学指标进行统计(见表1)。

表 1 杭州湾高液限黏土的物理力学性质指标

场地编号	项目名称	取土深度 /m	统计内容	含水量 w/%	天然重度 γ (kN·m ⁻³)	孔隙比 e	液限 w _L /%	塑限 w _p /%	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	压缩系数 a ₁₋₂ /MPa ⁻¹	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ (°)
1	杭州湾新区滨海四路陆中湾江桥	45.50 ~ 55.20	统计个数	37	43	43	43	43	43	42	37	10	10
			范围值	36.5 ~ 57.4	15.7 ~ 18.9	1.021 ~ 1.931	38.4 ~ 77.2	21.7 ~ 43.6	16.4 ~ 35.9	0.30 ~ 0.82	0.59 ~ 1.05	19.0 ~ 29.0	9.3 ~ 15.1
			平均值	45.0	17.5	1.339	52.1	29.0	23.1	0.53	0.84	24.1	11.6
2	杭州湾新区滨海五路跨陆中湾江桥梁	46.30 ~ 52.00	统计个数	23	43	29	43	43	43	39	31	14	14
			范围值	38.0 ~ 49.7	14.3 ~ 18.9	0.940 ~ 1.416	29.5 ~ 81.8	17.1 ~ 44.7	12.4 ~ 41.0	0.35 ~ 0.65	0.66 ~ 1.32	19.0 ~ 34.0	9.6 ~ 14.8
			平均值	42.8	17.4	1.169	52.1	29.0	23.2	0.47	0.90	28.0	12.1
3	宁波杭州湾新区创业创新大厦项目工程	47.80 ~ 57.20	统计个数	112	112	112	112	112	112	163	94	84	84
			范围值	50.0 ~ 85.0	14.4 ~ 17.5	1.371 ~ 2.488	50.4 ~ 88.6	28.3 ~ 50.3	20.4 ~ 39.6	0.50 ~ 1.27	0.76 ~ 0.99	19.0 ~ 49.0	11.0 ~ 17.3
			平均值	62.6	16.2	1.789	66.4	36.4	30.0	0.69	0.88	37.0	13.1
4	宁波杭州湾新区海川大道(十塘—十一塘)市政工程	46.00 ~ 56.20	统计个数	60	60	60	60	60	60	60	55	37	37
			范围值	50.4 ~ 81.7	15.3 ~ 18.6	1.242 ~ 2.278	52.4 ~ 83.2	28.1 ~ 48.2	23.1 ~ 42.2	0.33 ~ 0.79	0.58 ~ 1.15	22.0 ~ 58.0	11.1 ~ 21.3
			平均值	62.9	16.4	1.750	67.9	37.4	30.5	0.53	0.84	40.5	14.9
5	宁波杭州湾新区海川大道(十塘—十一塘)市政工程	47.40 ~ 55.40	统计个数	54	54	54	54	54	54	54	46	31	31
			范围值	50.0 ~ 87.9	14.5 ~ 17.8	1.349 ~ 2.514	53.5 ~ 90.3	25.5 ~ 51.8	23.0 ~ 43.3	0.37 ~ 0.88	0.60 ~ 0.99	22.0 ~ 44.0	10.7 ~ 18.2
			平均值	63.7	16.2	1.812	69.1	38.3	30.8	0.61	0.82	33.0	13.1
6	杭州湾市民中心项目工程	47.80 ~ 57.20	统计个数	284	284	284	284	284	284	284	280	265	265
			范围值	27.4 ~ 85.0	14.4 ~ 20.5	0.684 ~ 2.488	31.2 ~ 88.6	19.1 ~ 50.3	8.5 ~ 40.5	0.37 ~ 1.27	0.46 ~ 1.72	19.0 ~ 54.0	10.3 ~ 19.8
			平均值	51.8	17.0	1.485	55.4	30.6	24.8	0.62	0.85	37.0	13.4
7	杭州湾健康服务中心	44.30 ~ 51.50	统计个数	34	38	35	32	34	33	35	30	28	28
			范围值	48.7 ~ 59.7	16.4 ~ 17.8	1.420 ~ 1.625	52.8 ~ 63.8	27.9 ~ 35.5	22.7 ~ 28.7	0.52 ~ 1.03	0.65 ~ 0.88	21.0 ~ 36.0	11.5 ~ 17.5
			平均值	52.9	16.9	1.514	57.1	31.3	25.5	0.72	0.81	27.1	14.3
8	宁波杭州湾新区市民广场及规划展览馆项目	49.30 ~ 61.00	统计个数	110	141	126	125	126	118	93	139	125	125
			范围值	40.0 ~ 71.1	14.5 ~ 18.9	1.012 ~ 1.997	40.4 ~ 80.4	22.0 ~ 41.6	18.1 ~ 35.9	0.42 ~ 0.99	0.75 ~ 0.94	21.0 ~ 44.0	11.1 ~ 15.3
			平均值	50.7	17.1	1.377	54.7	28.8	24.5	0.61	0.85	31.8	13.0
9	宁波杭州湾新区自来水厂	50.10 ~ 60.50	统计个数	74	74	74	74	74	74	74	50	50	50
			范围值	40.4 ~ 44.9	17.0 ~ 18.2	1.160 ~ 1.286	44.1 ~ 56.4	23.4 ~ 30.5	19.9 ~ 26.2	0.24 ~ 0.59	0.48 ~ 0.82	26.2 ~ 43.9	12.0 ~ 16.4
			平均值	42.7	17.6	1.224	50.2	26.6	23.4	0.389	0.68	35.2	14.0
10	本课题专项试验	55.15 ~ 59.95	统计个数	235	235	235	235	235	235	232	235	202	202
			范围值	49.4 ~ 90.6	14.4 ~ 17.5	1.502 ~ 2.535	46.1 ~ 96.8	25.5 ~ 53.8	20.6 ~ 44.2	0.23 ~ 1.27	0.58 ~ 1.72	21.0 ~ 60.0	10.6 ~ 21.3
			平均值	64.5	16.1	1.828	53.8	37.4	31.2	0.63	0.87	40.3	13.7
			变异系数	0.133	0.036	0.129	0.123	0.126	0.186	0.278	0.230	0.127	

注: 液限试验中圆锥下沉深度为10 mm。

2 数理统计分析与研究

2.1 数理统计方法

岩土物理力学参数数据分析的本质是通过总结数据的规律,解决岩土工程参数的可靠度问题,试验指标统计方法、参数取值及应用对岩土工程设计方案、工程造价有着决定性作用。

为了更好地分析高液限黏土物理力学特性,采用正态分布理论、数理统计粗差剔除方法(箱形图理论)以及数值相关性(线性回归方程)三个理论对其物理力学指标数据进行数理统计分析。

2.2 物理力学指标统计

先利用箱型图理论对原始数据粗差进行自动剔

除,再分别从正态分布检验、二参数相关性两方面对黏土的物理力学指标特性进行研究,所得结果如下。

(1) 正态分布检验及图形

通过对试验指标的统计分布检验,表明大部分参数(物理指标 w 、 e 、 w_p 、 I_L 等)数据服从正态分布,少数或个别参数(力学指标 a_{1-2} 、 c 、 ϕ)数据大体服从正态分布,可以用对数正态分布拟合。所以在可靠性分析上进行岩土工程设计及地基基础设计时,设计参数可以用正态分布或对数正态分布函数拟合。

对比可知,杭州湾高液限黏土与宁波平原地区的同一时代形成的黏土地层物理力学参数区分度高,为工程地质特性完全不同的两种地层(见表2)。

表2 杭州湾高液限黏土与同时代宁波平原区黏土物理力学参数对照

地区	统计数据	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	液性指数 I_L	压缩系数 a/MPa^{-1}	固快 c/kPa	固快 $\phi/(\circ)$
杭州湾地区	总数 N	910	910	910	910	910	892	826	826
	均值	54.21	1.54	58.98	32.17	0.83	0.47	29.38	17.38
	标准差	9.98	0.28	11.16	6.00	0.10	0.2	14.65	7.00
	偏度	0.220	0.327	0.136	0.169	-0.244	0.025	0.286	1.117
	峰度	-0.766	-0.604	-0.835	-0.776	-0.127	-0.766	-1.151	-0.39
	变异系数	0.184	0.183	0.189	0.187	0.127	0.43	0.499	0.403
	最小值	35.1	0.97	38.9	21.4	0.53	0.08	3.0	9.2
	中位数	53.2	1.511	58.8	31.9	0.84	0.48	27.0	13.9
	最大值	81.1	2.4	87.9	48.8	1.15	0.98	62.0	33.9
	宁波平原	总数 N	816	816	809	809	805	786	764
均值		29.89	0.84	34.44	20.42	0.68	0.33	31.99	17.34
标准差		4.22	0.11	3.76	1.86	0.20	0.09	10.07	5.17
偏度		0.117	0.186	0.345	-0.026	-0.103	-0.040	0.110	1.376
峰度		-0.505	-0.399	-0.574	-0.149	-0.521	-0.858	-0.119	1.191
变异系数		0.141	0.135	0.109	0.091	0.297	0.295	0.315	0.298
最小值		19.6	0.559	26.8	15.5	0.22	0.12	7.0	6.7
中位数		29.75	0.8395	34.0	20.4	0.7	0.33	31.0	15.6
最大值		40.6	1.172	43.6	25.5	1.17	0.54	59.0	35.9

(2) 参数数值相关性及回归方程(对比宁波平原)

根据拟合结果可知,呈良好正态分布的参数可以拟合得到相关性高的回归方程,物理指标之间可以得到相关性合适的回归方程,个别力学指标与物理指标可以建立回归方程,但大部分不适用。

通过数值计算软件运用统计的方式检验各物理力学参数基本呈良好的正态分布,物理性质指标的变异系数普遍小于0.2,属低变异参数,力学性质指标绝大部分变异系数低于0.3,个别力学性质指标由

于取样存在一定的扰动、试验的方式方法不同等因素而造成变异系数偏高,故可将物理指标参数视为常量,力学指标作为变量,同时需要考虑时空变异性 and 区域性。根据各种指标的对比分析,各类测试指标之间的相互关系较为吻合,说明该工程地质单元体分布统计分析是基本合理的,用数理统计方法求取的指标是准确、可靠的。数理统计结果反映了杭州湾高液限黏土的岩性特征,即表现为天然含水率高、孔隙比大、液限高等特征,其力学性质接近于宁波地区冲湖

积的第二层硬土层。但杭州湾高液限黏土工程地质特性与宁波平原地区同一时代形成的黏土地层完全不同(见表3)。

表3 物理性质指标参数回归方程

杭州湾地区		宁波平原	
回归方程	相关系数	回归方程	相关系数
$e=0.028w+0.049$	0.953	$e = 0.026w+0.065$	0.926
$w_L=37.06e+1.87$	0.874	$w_L=23.757e+14.41$	0.515
$w_p=19.58e+1.99$	0.844	$w_p=9.28e+12.60$	0.319
$I_p=17.47e-0.12$	0.803	$I_p=14.48e+1.81$	0.371
$I_L=0.51w-0.74$	0.854	$I_L=0.40w+2.08$	0.385

3 结构性、损伤模型参数等研究

黏土的结构性强弱具有显著的时空变异性和区域性,其对工程性质的影响比其他土类更为典型,也更为重要。杭州湾高液限黏性土与宁波平原地区同类地层相比结构性更强,力学性质变化更大(见表4)。土力学对结构性的研究方法试图说明不同结构性的土具有不同的力学规律,并针对某些土的特殊性质,

提出一些表述参数,如结构屈服强度^[14]($\ln(1+e)$ - $\lg p$ 双对数直线交点即为结构屈服应力,如图1所示)、先期固结压力^[15](应用数值软件拟合先期固结压力压缩曲线模型)等。

研究土的结构性的宏观特征时,往往采用保持天然结构的土样试验与重塑土样的试验结果进行比较,从而显示土的结构性对这些工程特性的影响。

表4 杭州湾高液限黏性土结构性参数

统计数据	无侧限抗压强度			微型十字板			先期固结压力 P_c /kPa	完全损伤参数 c_c	结构屈服应力 p_y /kPa	静探锥尖阻力 q_c /MPa	标准贯入试验 N /击
	q_u /kPa	q_u' /kPa	S_t	q_u /kPa	q_u' /kPa	S_t					
样本数	10	10	10	24	24	24	18	12	12	24	56
最大值	273.3	36.2	8.4	61.6	16.8	9.25	634.5	1.1026	555	2.36	19
最小值	59.23	14.4	4.28	44.4	3.42	3.21	326.5	0.5112	477	2	8
平均值	104.15	19.52	5.34	55.61	10.22	5.44	464.17	0.69	520.25	2.1	12.8
变异系数	0.204	0.276	0.151	0.085	0.327	0.281	0.233	0.341	0.052	0.048	0.281

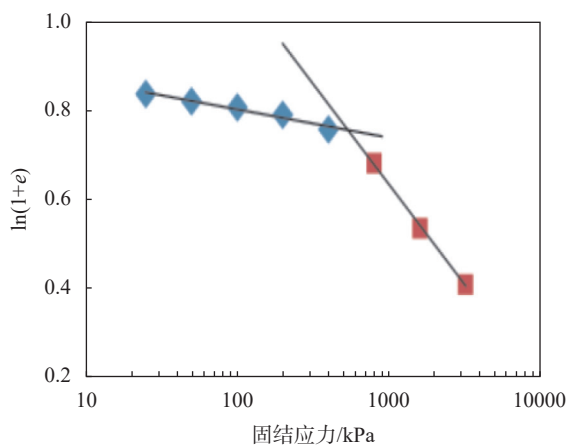


图1 双对数坐标系求结构屈服应力^[14]

3.1 先期固结压力

土的结构性使土表现为具有记忆的特性,即将历史上曾经受到过的固结压力通过结构性保留下来。由于先期固结压力离散性较大,一般不服从正态分布^[16],因而应用随机场理论研究杭州湾地区高

液限黏土得先期固结压力更为适用。杭州湾地区高液限黏土先期固结压力计算过程图见图2、图3。

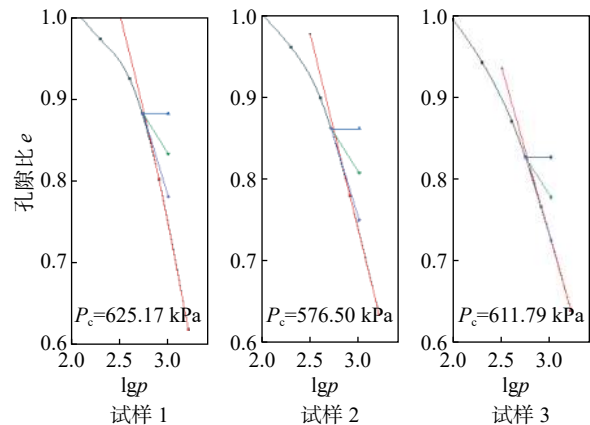


图2 埋深 57.7~58.0 m 试样先期固结压力 P_c 计算图示

由于杭州湾地区气候变化剧烈,受海平面数次升降以及新构造运动的影响,沉积物交替发生多次堆积和侵蚀作用,因而通过沉积环境便可了解本层的应

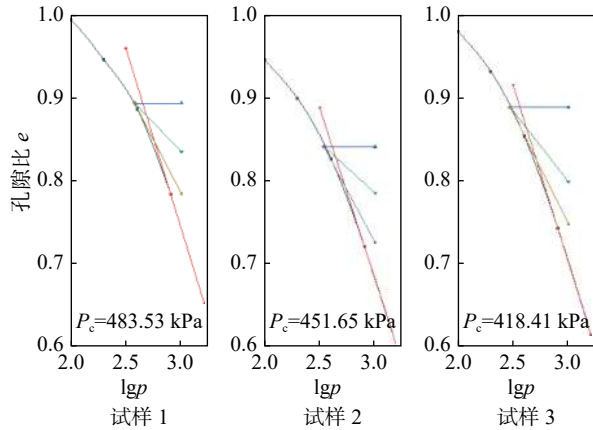


图3 埋深 55.3~55.6 m 试样先期固结压力 P_c 计算图示

力历史。历史上上覆土层厚度小于现状覆盖层厚度,在沉积历史上经历数次加载卸荷过程,且根据汇总数据可得其先期固结压力小于自重应力,即超固结比 OCR 小于 1,根据定性及定量分析,杭州湾高液限黏土为欠固结土。

3.2 结构屈服强度

一般天然沉积结构性土的压缩曲线存在一个明显的结构屈服点,当上部荷载小于结构屈服应力之前,土的压缩性很小,一旦上部荷载超过结构屈服应力,土的压缩性急剧增大,分析土的结构屈服应力大小对工程应用有很重要的指导意义,当上部荷载较低时,可以充分利用其屈服前的低压缩性,但应确保上部荷载不能超出其结构屈服应力,以避免固化土在缺乏预兆的情况下发生突然破坏。

目前确定固结屈服应力的方法较多,例如双对数法、Casagrande 法、Schmertmann 法、Burmister 法等,本研究采用 Butterfield 提出的用双对数法确定固结屈服应力。Butterfield 和 Ticof^[7]通过对大量的固结试验数据进行分析,采用比容 ($v = 1+e$) 和固结压力 p 的双对数坐标描述固结压缩曲线,以曲线的转折点对应的应力值为结构屈服应力。深部及浅部土样的 $\ln(1+e)$ - $\lg p$ 曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4、图 5 可看出,浅部及深部土样的 $\ln(1+e)$ - $\lg p$ 曲线的转折点均位于 $\lg p=2.74$ 处,据此可确定黏土的结构屈服应力 p_y 为 554.8 kPa。

结构性黏土的力学性质受结构屈服应力影响较大,龚晓南将黏土结构性分为弱结构性、较强结构性和强结构性三个等级^[7],其中当 $p_y/P_c=1$ 时称为弱结构性黏土, $1 < p_y/P_c \leq N_1$ 时称为较强结构性黏土, $p_y/P_c > N_1$ 时称为强结构性黏土。杭州湾高液限黏土 $p_y/P_c=1.12 > 1$, 故为较强结构性黏土。

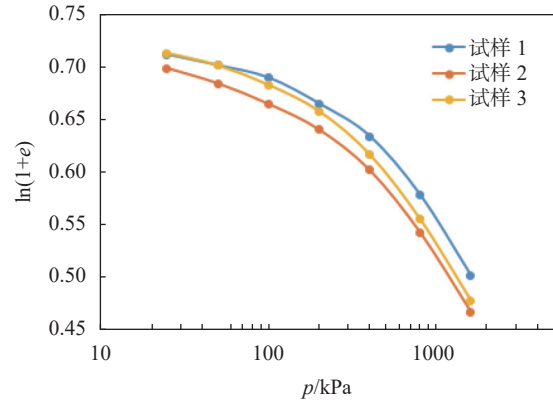


图4 浅部土样 $\ln(1+e)$ - $\lg p$ 曲线

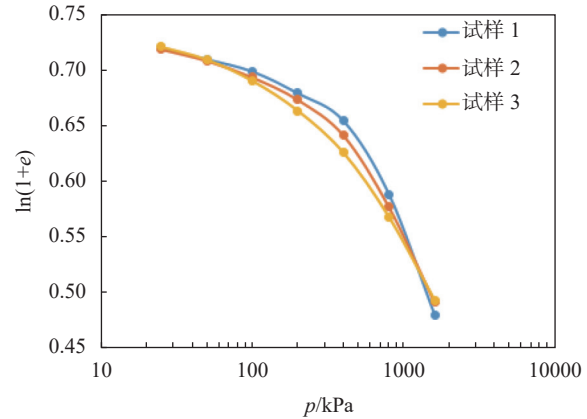


图5 深部土样 $\ln(1+e)$ - $\lg p$ 曲线

3.3 灵敏度

土体的结构性越强,灵敏度越高。根据室内无侧限抗压强度试验及现场微型十字板剪切试验可知,杭州湾高液限黏土灵敏度 S_l 为 5.3,属高灵敏度结构性土。灵敏度的无侧限抗压强度试验曲线见图 6。

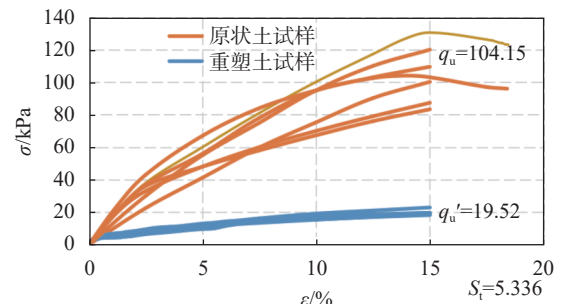


图6 灵敏度无侧限抗压强度试验曲线

3.4 完全损伤模型参数

杭州湾高液限黏土损伤主要是由于颗粒间移动造成粒间联结与原组织的破坏,此类损伤表现为塑性应变的函数。海平面数次升降以及新构造运动使得沉积物交替发生多次堆积和侵蚀作用,反复加载引起地层疲劳,地层在长期加载下发生蠕变、腐蚀、老化,此类损伤主要是时间的函数。

广义的损伤可以表现为来源于土的多种微观结构的变化。因而广义的土的损伤模型可能是反映土的结构性及应力应变特点的有力工具。

完全损伤土的变形特性由土的 3 个参数 C_c 、 C_e 和 $\sin\varphi$ 确定。

根据相关研究表明^[18], 软土的压缩指数 C_c 与 n_0 的比值 C_c/n_0 与 C_c 之间存在高度的线性关系, 针对杭州湾高液限黏土设计回归方程为:

$$\frac{C_c}{n_0} = \beta_1 C_c + \beta_0 \quad (1)$$

其中

$$n_0 = \frac{e_0}{1 + e_0} \quad (2)$$

拟合后得到 $\beta_0 = 0.00068$ 、 $\beta_1 = 0.0147$, R^2 为 0.945, 见图 7。方程具有良好的线性相关, 可以作为杭州湾高液限黏土经验公式使用。

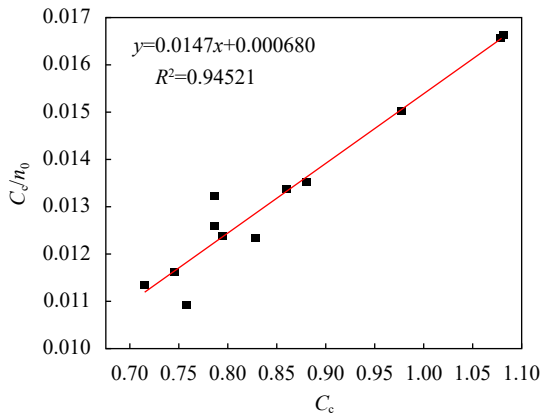


图 7 压缩指数 C_c 拟合方程

回弹指数 C_e 为卸载段和再加载段的平均斜率, 其一般不随压力 p 的变化而变化, 且 $C_e \ll C_c$, 一般黏性土 $C_e \approx (1/10 \sim 1/5) C_c$, C_e 工程应用较少且缺少样本, 本次未寻求经验公式。

相关研究^[19]表明, 重塑土 $C_c^* = 0.86w_L + \frac{0.23w_0}{w_L} - 0.39$, 本次不做进一步研究。

3.5 三轴 CU 试验

(1) 应力-应变曲线分析

杭州湾高液限黏土的原状土及重塑土在各级围压下的三轴 CU 试验应力-应变曲线见图 8、图 9。

根据试验结果, 杭州湾高液限黏土原状土多呈现应力软化特征, 而重塑土呈现应力硬化特征; 同围压下的原状土及重塑土强度对比表明, 当围压为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 时, 与原状土相比, 重塑土峰值偏应力(无峰值, 以轴向应变 15% 计)分别下降

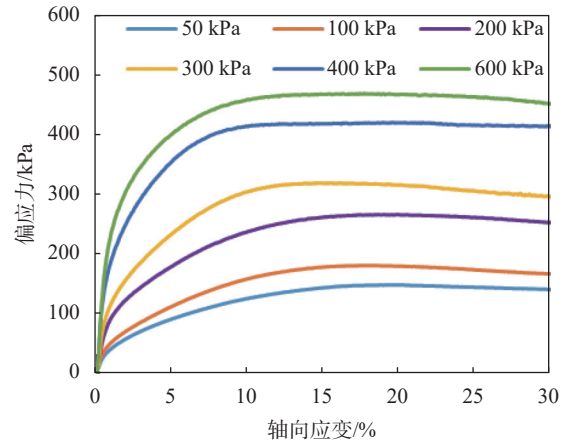


图 8 原状土 CU 试验应力-应变曲线

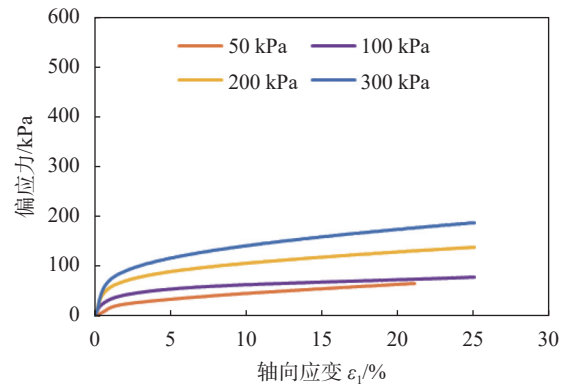


图 9 重塑土应力-应变曲线

了 69.6%、68.5% 和 62.6%, 表明扰动影响大, 原状土强度较高, 具有一定的结构强度。

(2) 抗剪强度指标

通过三轴 CU 试验获取杭州湾高液限黏土原状土及重塑土的抗剪强度指标(见图 10、图 11)。

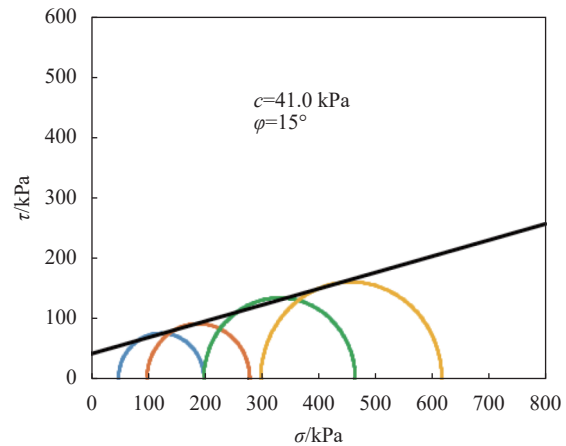


图 10 原状土总应力圆 (σ_3 小于 P_c)

从图 10、图 11 可以看出, 与原状土相比, 重塑土的内摩擦角略有下降, 但是黏聚力下降达到 60% 以上, 这与一般的黏土的原状土和重塑土抗剪强度指标试验规律一致。

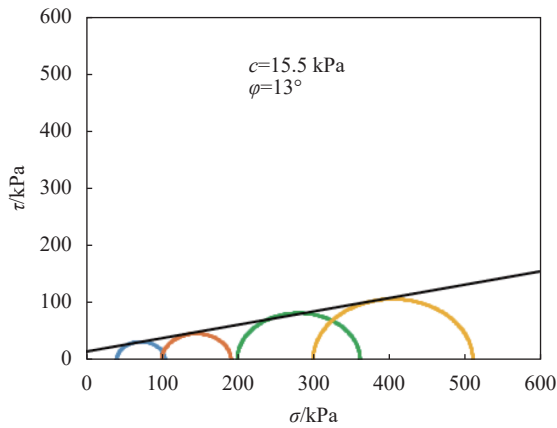


图 11 重塑土总应力圆

4 结论

通过对宁波杭州湾新区高液限黏土的力学参数的研究,得到以下结论:

(1)杭州湾高液限黏土与宁波平原地区同一时代形成黏土地层的工程地质特性完全不同,其物理性质指标除液性指数外,均接近于淤泥质土,力学性质指标接近于宁波地区冲湖积的第二层硬土层,表现为静探指标锥尖阻力高、抗剪强度指标高的特征。

(2)通过数值统计分析,杭州湾高液限黏土物理力学参数基本呈良好的正态分布。对各参数进行相关性分析,结果显示杭州湾高液限黏土的物理指标之间具有良好的线性相关。本研究建立的线性相关方程可以作为本区本层经验公式使用。

(3)杭州湾高液限黏土地层应力历史较复杂,其历史上覆土层厚度小于现状覆盖层厚度,超固结比OCR小于1,为欠固结土;结构屈服应力大于先期固结压力,具较强结构性;根据室内无侧限抗压强度试验及现场微型十字板剪切试验,为高灵敏度结构性黏土。杭州湾高液限黏土地层完全损伤模型符合经验公式 $C_u/n_0=0.0147C_c+0.00068$ 。

(4)杭州湾高液限黏土原状土及重塑土的三轴CU试验结果分析表明,原状土多呈现应力软化特征,重塑土呈现应力硬化特征;原状土的结构强度较大,与原状土相比,重塑土的内摩擦角略有下降,但是黏聚力下降达到60%以上。

参 考 文 献

[1] 许延春. 深部饱和黏土的力学性质特征[J]. 煤炭学报, 2004, (1): 26-30.
[2] 介玉新, 刘正, 李广信, 等. 黄淮地区深部黏土工程性

质试验研究[J]. 工业建筑, 2006, (3): 63-66.

- [3] 李文平, 孙如华, 王维理, 等. 深部土高压卸载变形结构量化参数确定及本构模型[J]. 工程地质学报, 2007, (3): 384-390.
[4] 孙强, 姜振泉, 李耀民, 等. 万福井田深部黏土微观特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2026-2030.
[5] 商翔宇, 余海岁, 周国庆, 等. 高应力水平下深部黏土力学特性微观分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 363-368.
[6] 蒋明镜, 沈珠江, 邢素英, 等. 结构性粘土研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(1): 26-30.
[7] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, 31(10): 43-47.
[8] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 79-83.
[9] 刘恩龙, 沈珠江, 范文. 结构性粘土研究进展[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 1-8.
[10] 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟. 天然结构性软粘土应力历史的确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1007-1010.
[11] 陈晓平, 曾玲玲, 吕晶, 等. 结构性软土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3223-3228.
[12] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 447-454.
[13] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
[14] 刘鹏, 丁文其. 双对数压缩曲线在海积软土本构中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(11): 1706-1711.
[15] 姜安龙, 赵春风, 高大钊. 确定先期固结压力的数学模型法[J]. 岩土力学, 2003, (2): 292-295.
[16] 池恒天, 席永慧, 毛红辉, 等. 象山大目湾新城浅部地层土工室内试验指标参数工程应用研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(2): 205-210.
[17] BUTTERFIELD R, TICOF J. Discussion: design parameters for granular soils[C]// Proceedings 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1979.
[18] 李雪梅, 杨敏, 李卫超, 等. 软土变形指标与初始孔隙率的相关性分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(3): 104-110.
[19] 殷杰, 苗永红. 重塑黏性土固有压缩特性的探讨[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 403-409.

收稿日期: 2021-11-30