

青岛胶州湾软土的物理力学性质分析

郭彦雪^{1,2}, 李大勇^{1,2}, 冯磊^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:以胶州湾营旧高速公路软土地基为研究对象,选取沿线有代表性地段软土,进行室内土工试验,对其力学参数进行分析,为胶州湾地区工程设计与施工提供依据。与我国南方地区代表性软土的物理力学特性进行对比,发现胶州湾地区软土具有相对密度大、孔隙比小、含水率低、液性指数低等特点;通过直剪实验得出胶州湾软土的抗剪强度指标 c 值在 5~15 kPa 范围内(均值为 9 kPa)、 φ 值在 $1^\circ\sim 8^\circ$ 范围内(均值取 5°),且与 c 相比, φ 值受含水率影响较大;动三轴试验发现动应变 ϵ_d 是影响动剪切模量比和阻尼比的主要因素。

关键词:软土;力学特性;抗剪强度;动应变

中图分类号:TU435

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)04-0045-07

Mechanical Properties of Soft Clay in Jiaozhou Bay

Guo Yanxue^{1,2}, Li Dayong^{1,2}, Feng Lei^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Laboratory soil tests were conducted on representative soil samples collected from the Jiaozhou Bay to study its mechanical properties, with the physical and mechanical parameters determined. Compared with the representative soft clay in southern China, the soft clay of Jiaozhou Bay has a larger relative density, lower porosity, lower water content and lower liquidity index. Through direct shear test, it is concluded that cohesion c is about 5~15 kPa with an average value of 9 kPa, and frictional angle φ is round $1^\circ\sim 8^\circ$ with an average value of 5° . In addition, compared with c , the value of φ is influenced more seriously by water content. By the dynamic triaxial test, it is found that the dynamic strain ϵ_d is the principal factor influencing the dynamic shear modulus ratio and the damping ratio.

Key words: soft clay; mechanical properties; shear strength; dynamic strain

软土在我国分布极为广泛^[1],尤其是沿海地区(如上海、天津、宁波等)及河流湖泊附近地区(如长江中下游地区)。不同地域软土的特性存在着很大的差别,即使同一地域,由于软土的形成过程和土层分布的不同,其力学特性亦有所不同。通常意义上来讲,软土具有高含水率、低渗透性、高压缩性及具有明显的结构性等特征^[2],一般不适宜作为天然地基使用。为了更好地解决软土地质问题,首先需要充分了解软土的基本力学特性。

收稿日期:2013-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51078227);山东省自然科学基金项目(ZR2009FM003);教育部留学回国人员科研启动基金项目;山东科技大学研究生科技创新基金项目(YCB120127)

作者简介:郭彦雪(1989—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事海洋岩土工程方面的研究。

E-mail: guoyanxue123@126.com.

李大勇(1971—),男,山东泰安人,教授,博士生导师,主要从事海洋岩土工程方面研究. E-mail: ldydy@163.com

国内学者对于不同地区软土的力学特性进行过大量的研究。例如,冯铭章^[3]分析了上海软土的压缩曲线特征,对土体压缩性评价标准 α_{1-2} 提出异议,指出软土在 100~200 kPa 压力值区间 $e-p$ 压缩曲线常出现拐点段, α_{1-2} 在数值上是离散的,并且认为分段划分标准更为合理;乔小丽^[4]对不同地区软土的特性进行分析对比,发现北方软土较南方地区软土厚度小,北方软土的孔隙比变化范围小,含水率也比南方软土低;李大勇等^[5]运用 FLAC^{3D} 对土体的直接剪切试验进行三维数值模拟,模拟结果显示土体的剪应力并非均匀分布,但随着竖向荷载的增大,剪应力基本呈线性增加,这与试验所得结果类似;张启辉等^[6]针对上海黏土进行了动三轴试验分析,通过损伤力学的角度研究三轴试验中振次、频率等对于土样强度的影响,并建立模型;赵红芬^[7]、何昌荣^[8]等对某地基工程软土进行了动三轴试验研究,通过建立动应变与动剪切模量、阻尼比的关系曲线,阐述了动应变与动剪切模量比和阻尼比之间的关系。

针对青岛市营旧高速公路段的软土地基进行室内试验研究,分析了软土的力学特性,以期为胶州湾地区的工程设计和施工提供参考。

1 工程概况

营旧高速是青岛市“环湾保护,拥湾发展”战略规划中重要的一环,是青岛市规划路网系统的重要组成部分,该路建成后,将与外围的 204 国道、省道 395、胶州湾高速公路以及海湾大桥、海底隧道共同形成“一桥一隧四环路”的胶州湾区域主干道路交通网络,促进青岛更好更快地发展。

营旧公路路段工程全部位于滩涂,地质状况复杂,对软土的力学特性分析显得尤为必要。本研究选取胶州湾营旧公路沿线有代表性地段取样,通过室内土工试验对其进行力学性质分析,为沿线地基土工程特性可靠性分析与评价提供依据,并对今后的工程土性参数选取提供参考。

2 软土的基本力学试验

2.1 比重试验

采用比重瓶法得到胶州湾软土的相对密度 G_s 范围为 2.69~2.75,如表 1 所示。

通过比重试验获得土体的相对密度 G_s 后,换算可得土体的孔隙比 e 。从图 1 可以看出,该路基软土的孔隙比约为 1.1,部分区域孔隙比更小,存在一定的离散性。与南方大部分地区软黏土孔隙比(1.2~2.0)相比,孔隙比较小。

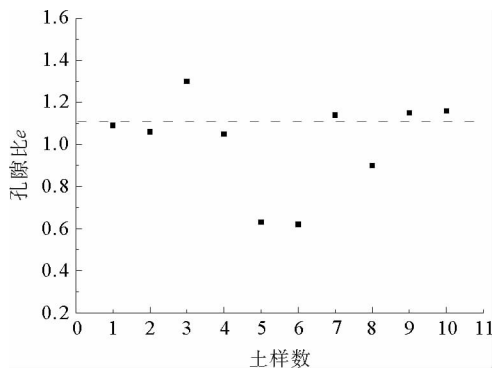


图 1 孔隙比分布图

Fig. 1 Distribution of soil porosity

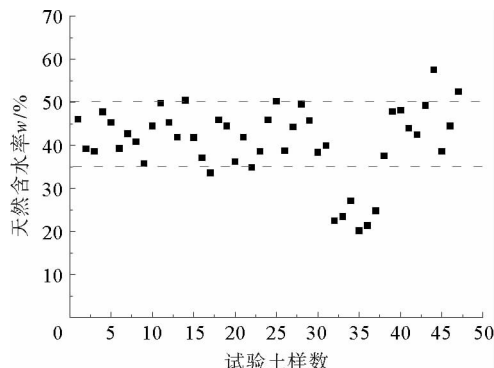


图 2 天然含水率分布图

Fig. 2 Distribution of natural moisture content

2.2 液塑限试验

图 2—图 6 给出了 47 组试验土样的天然含水率、液限、塑限、塑性指数和液性指数的分布情况。由图 2 可知,胶州湾软黏土的天然含水率 w 在 35%~50%,与南方大部分地区软黏土的含水率(一般为 40%~

60%)相比,含水率较低。图3、图4中可看出土样的液限 w_L 分布范围在40%~60%,塑限 w_p 大多分布在20%~40%。图5中的塑性指数 I_p 则分布较为离散,说明土体的黏粒和亲水矿物含量不均。图6中大部分土样的液性指数 I_L 在0.25~0.75,说明胶州湾软黏土大多处于可塑状态,而南方大部分地区软黏土的液性指数约为1.0,有的甚至超过2.0,比胶州湾地区的液性指数明显偏高,大多处于流塑状态。

表1 比重试验记录表

Tab. 1 Details of specific gravity tests

试验编号	比重瓶号	温度/℃	液体比重	比重瓶质量/g	干土质量/g	瓶、液总质量/g	瓶、液、土总质量/g	与干土同体积的液体质量/g	相对密度 G_s	相对密度平均值
K10+250-3	1	60	0.983	34.49	18.57	138.53	150.30	6.69	2.73	2.72
	2	60	0.983	34.73	12.73	136.52	142.55	4.62	2.71	
K11+675-4	1	60	0.983	34.49	14.81	138.51	147.93	5.29	2.75	2.72
	2	60	0.983	34.74	15.63	136.51	146.35	5.69	2.70	
K11+825-4	1	60	0.983	34.49	16.27	138.50	148.79	5.88	2.72	2.72
	2	60	0.983	34.74	16.13	136.51	146.71	5.83	2.72	
K10+700-3	1	60	0.983	34.48	15.28	138.53	148.21	5.50	2.73	2.71
	2	60	0.983	34.75	14.91	136.53	145.92	5.43	2.70	
K24+460-2	1	60	0.983	34.49	15.72	138.54	148.56	5.60	2.76	2.75
	2	60	0.983	34.75	14.94	136.51	146.00	5.36	2.74	
K24+600-2	1	60	0.983	34.51	15.83	138.49	148.61	5.62	2.77	2.75
	2	60	0.983	34.76	15.67	136.49	146.42	5.64	2.73	
K11+400-3	1	60	0.983	34.50	16.73	138.52	148.98	6.16	2.67	2.69
	2	60	0.983	34.75	15.62	136.51	146.37	5.67	2.71	
K11+250-3	1	60	0.983	34.49	14.93	138.54	147.98	5.40	2.72	2.71
	2	60	0.983	34.75	15.21	136.51	146.09	5.54	2.70	
K10+400-3	1	60	0.983	34.49	15.31	138.54	148.28	5.47	2.75	2.75
	2	60	0.983	34.74	15.48	136.51	146.36	5.53	2.75	
K10+825-3	1	60	0.983	34.48	15.42	138.53	148.26	5.59	2.71	2.70
	2	60	0.983	34.75	15.71	136.52	146.39	5.74	2.69	

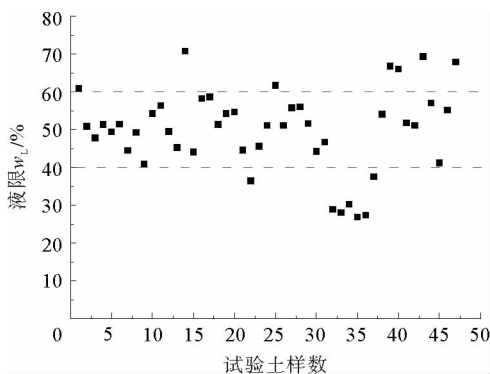


图3 土样液限分布图

Fig. 3 Distribution of liquid limit

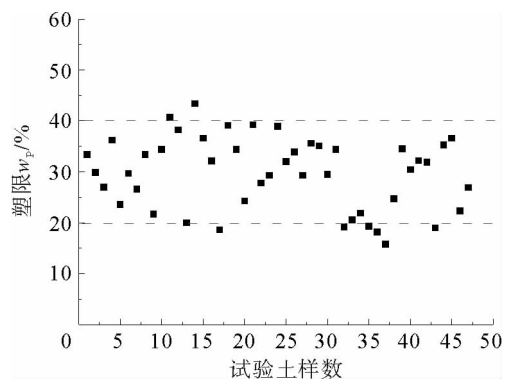


图4 土样塑限分布图

Fig. 4 Distribution of plastic limit

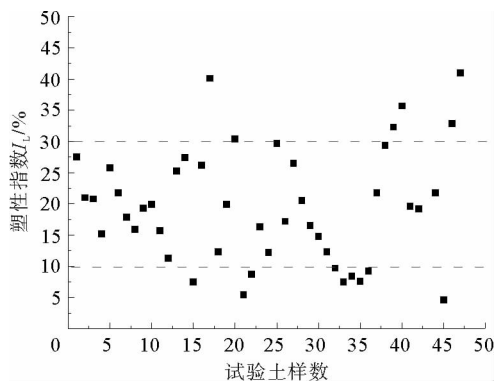


图 5 土样塑性指数分布图

Fig. 5 Distribution of plasticity index

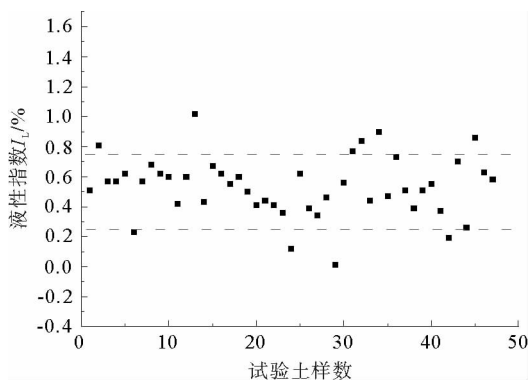


图 6 土样液性指数分布图

Fig. 6 Distribution of liquidity index

2.3 压缩试验

通过压缩试验,得到软土的 $e-p$ 曲线(图 7)。 $e-p$ 曲线初始段较陡,即对应土的压缩量较大,表明该地区软土的压缩性较大。土的密实度增加到一定程度后,土颗粒移动困难,后期随压力增加压缩量逐渐减小。

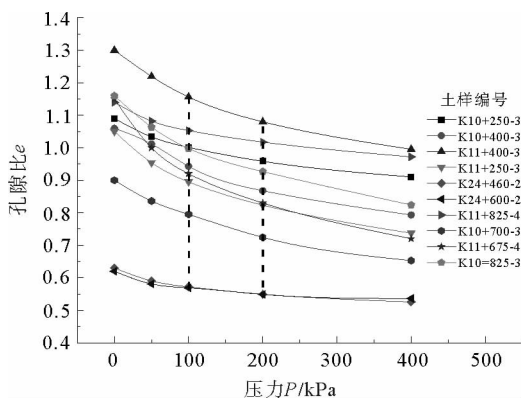


图 7 土体的压缩曲线图

Fig. 7 Compression curves of the soft soil

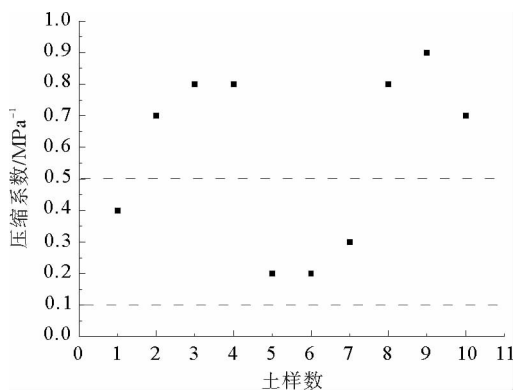


图 8 压缩系数 α_{1-2} 分布图

Fig. 8 Distribution of coefficients of compressibility α_{1-2}

根据不同土样压缩曲线可以计算得到对应压缩系数 α_{1-2} (图 8)。由图可知,压缩系数分布较离散,该区域软土压缩性存在着差异。土样压缩系数 α_{1-2} 均大于 0.1 MPa^{-1} ,多数超过 0.5 MPa^{-1} ,属于中压缩土和高压缩土的范围。

3 直剪强度试验

试验采用应变控制式直剪仪,对胶州湾软土进行快剪实验。试验中对土样施加的垂直压力分别为 50, 75, 100 和 125 kPa,土样的剪应力值^[9]为:

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10. \quad (1)$$

其中: τ —剪应力, kPa; C —测力计率定系数, $\text{N}/0.01 \text{ mm}$; R —测力计读数, 0.01 mm ; A_0 —土样的受剪切面积采用高 2 cm, 内径为 6.18 cm 环刀取样, A_0 为 29.98 cm^2 ; 10—单位换算系数。

剪应力值随上覆压力 P 变化如图 9 所示(选取 K24+460-3 路段试验结果),并得到拟合直线,则该直线与水平方向的夹角(锐角)即为土体的内摩擦角 φ ,延长直线段切割竖轴的值即为土样的内黏聚力 c 。共进行

了 40 组试样的剪切强度试验,其 c, φ 值分布如图 10 和图 11 所示, c 值分布范围在 2.7~15 kPa, 均值约为 9 kPa; φ 值则为 $1^\circ \sim 8^\circ$, 均值约为 5° 。

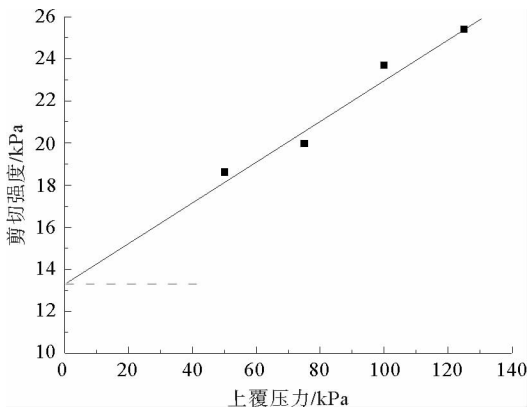


图 9 K24+460-3 路段抗剪强度和垂直压力的关系图

Fig. 9 Variations in shear strength with vertical pressure

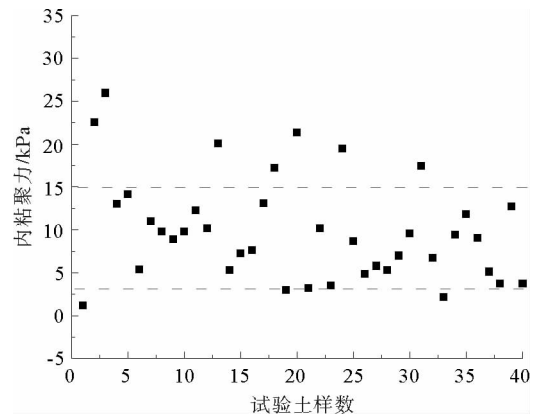


图 10 内粘聚力 c 分布图

Fig. 10 Distribution of cohesion c

从图 12 和图 13 中可以看出,含水率增加,软土的抗剪强度指标内摩擦角 φ 和黏聚力 c 均有下降趋势,反映出软土的抗剪强度随着含水率的增加而减小。与 c 相比, φ 的减小幅度较大,即抗剪强度指标中内摩擦角受含水率影响相对较大。分析可得,同一地域的软土抗剪强度指标存在着离散性,软土的力学特性受很多外在因素的影响,在实际工程中要充分考虑软黏土的这一特性。

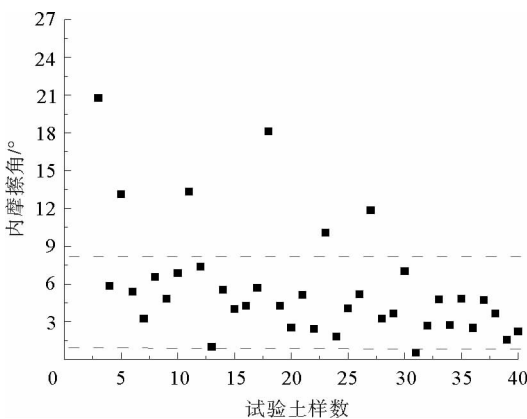


图 11 内摩擦角 φ 分布图

Fig. 11 Distribution of friction angle φ

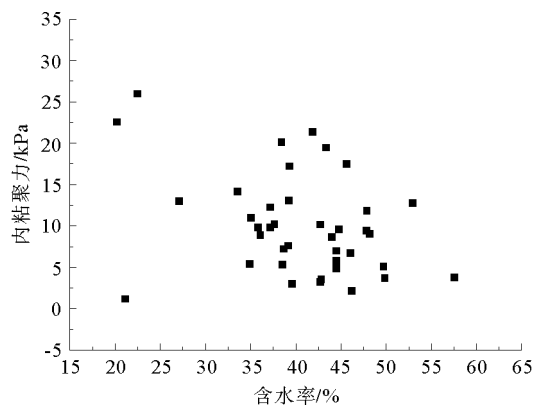


图 12 内粘聚力 c 随含水率变化图

Fig. 12 Variations in cohesion c with water content

4 动三轴试验

软土的动力特性研究通过动三轴试验进行。本次动三轴试验使用的是国产 DDS-70 微机控制电磁式震动三轴试验机。该仪器的最大侧向应力为 600 kPa;轴向激振动态负荷 1370 N;试验采用 $\Phi 39.1 \times 80$ mm 标准试样,波形选用正弦波,频率为 1 Hz。具体试验过程如下^[10]：

- 1) 制备好原状土样,用真空饱和法使土样饱和;
- 2) 将土样套上橡皮膜后安装在动三轴压力室内;
- 3) 按照该土样所代表土层受到的上覆有效土压力,给土样施加等向固结压力,使土样排水固结;

4) 土样固结完成后,在不排水条件下,沿土样轴向施加 5~10 级不同幅值的振动应力,测量土样的轴向振动应变与轴向动应力之间的关系。

在动三轴试验中,通过对试样分级加载轴向动应力,使应力幅值逐级加大,进行动剪切模量比和阻尼比的测定。得到土样在不同剪应变对应的动剪切模量比和阻尼比,如图 14 和图 15 所示。

由图 14 可以看出,剪应变 ϵ_d 是影响动剪切模量比 (G/G_{max}) 的主要因素,当 $\epsilon_d < 1 \times 10^{-5}$ 时,动剪切模量比很大,接近于 1; 当 $\epsilon_d = 1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ 时,动剪切模量比迅速减小;当 $\epsilon_d > 1 \times 10^{-2}$ 后,其值减小的趋势又明显放缓,曲线变得较平稳,剪切模量比也趋于 0。

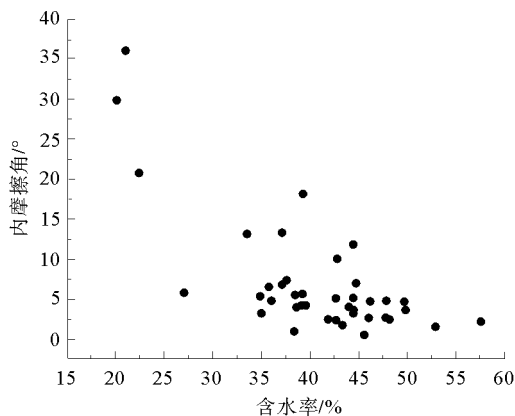


图 13 内摩擦角 φ 值随含水率变化图

Fig. 13 Variations in friction angle φ with water content

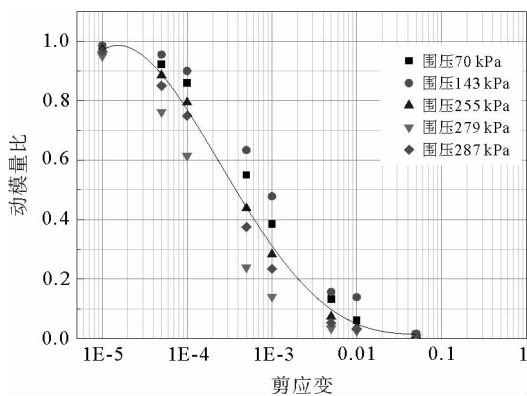


图 14 动剪切模量比与剪应变关系曲线图

Fig. 14 Variation in dynamic shear modulus ratio with shear strain

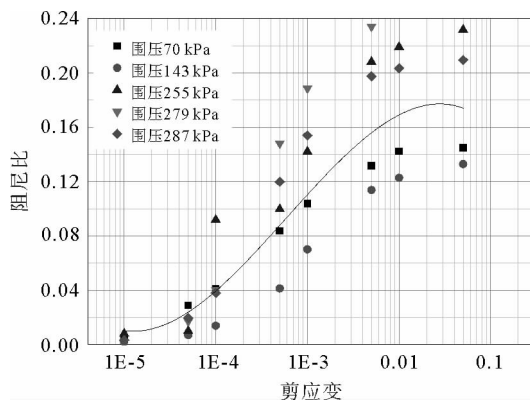


图 15 阻尼比与剪应变关系曲线图

Fig. 15 Variations in damping ratio with shear strain

图 15 中剪应变 ϵ_d 同样是影响阻尼比的主要因素,当 $\epsilon_d < 1 \times 10^{-5}$ 时,阻尼比 λ_d 很小接近于零;随着 ϵ_d 的增大,当 $\epsilon_d = 1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ 时, λ_d 值明显增大;当 $\epsilon_d = 1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ 时, λ_d 值迅速攀升;当 $\epsilon_d > 1 \times 10^{-2}$ 后,阻尼比 λ_d 值增大的趋势又明显变缓,趋于恒定值。

5 结论

通过室内试验,分析了胶州湾地区软土的力学特性,得出以下结论:

1) 该地区软黏土具有一般软土的特性;与南方地区代表性软土物理力学特性进行对比,胶州湾地区软土的相对密度高,而孔隙比、含水率、液性指数等均低于南方地区软土;土体压缩系数 $\alpha_{1-2} \geq 0.1 \text{ MPa}^{-1}$,属于中、高压缩性土;其液性指数 I_L 大部分在 0.25~1.0,处于可塑状态。

2) 通过软土的直剪试验发现该软土的抗剪强度指标 c 值分布范围在 2.7~15 kPa,均值约为 9 kPa; φ 值为 $1^\circ \sim 8^\circ$,均值约为 5° ,与 c 值相比, φ 值受含水率影响较大。且该区域软土的抗剪强度指标分布具有离散性,工程设计中选取参数时需要充分考虑这一点。

3) 动三轴试验结果表明,剪应变 ϵ_d 是影响动剪切模量比和阻尼比的主要因素。

参考文献:

[1] 秦夏强. 软土地基大型复杂基坑工程设计与施工[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(s): 1628-1632.

Qin Xiaqiang. Design and construction of large scale and complex foundation pits under soft foundation conditions[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(s): 1628-1632.
- [2] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100-111.
Shen Zhujiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 100-111.
- [3] 冯铭璋. 软土压缩曲线特征[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 96-100.
Feng Mingzhang. Characteristic of soft soil's compression curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(5): 96-100.
- [4] 乔小丽. 胶州湾地区真空-堆载联合预压软基加固技术适应性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007: 23-26.
- [5] 李大勇, 潘军刚. 土的直接剪切试验三维数值模拟研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2008, 27(6): 16-20.
Li Dayong, Pan Jungang. Research on 3D numerical simulation of directly shearing test of soil[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 27(6): 16-20.
- [6] 张启辉, 孙红, 王挥, 等. 上海软土的动三轴试验和非线性损伤模型[J]. 土工基础, 2007, 21(4): 54-57.
Zhang Qihui, Sun Hong, Wang Hui, et al. Dynamic triaxial tests of Shanghai soft soil and non-linear model[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(4): 54-57.
- [7] 赵红芬, 何昌荣, 王莉娜. 动模量阻尼的动三轴试验研究[J]. 路基工程, 2009, 145(4): 158-160.
Zhao Hongfen, He Changrong, Wang Lina. Dynamic triaxial test of dynamic modulus of damping[J]. Subgrade Engineering, 2009, 145(4): 158-160.
- [8] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴实验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 39-48.
He Changrong. Dynamic triaxial test on modulus and damping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 39-48.
- [9] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 25-29.
- [10] 中华人民共和国机械工业部. GB/T50269-97 地基动力特性测试规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 32-35.

(责任编辑: 吕海亮)

(上接第 15 页)

- [5] 申群璨. 各向异性钻土中吸力式沉箱水平承载力有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 21-25.
- [6] 李大勇, 都浩, 孙宗军, 等. 海底裙式吸力锚: 中国, ZL200920239914. 8[P]. 2010-04-27.
- [7] 李大勇, 刘小丽, 孙宗军. 海上风电塔架基础的新型吸力锚研发[J]. 海洋技术, 2011, 30(3): 83-87.
Li Dayong, Liu Xiaoli, Sun Zongjun. A novel type suction anchors for offshore wind turbines[J]. Ocean Technology, 2011, 30(3): 83-87.
- [8] Bienen B, Gaudin C, Cassidy M, et al. Numerical modeling of a hybrid skirted foundation under combined loading[J]. Computers and Geotechnical, 2012, 45(1): 127-139.
- [9] Li Y, Yang S, Zou X. Advanced concept design and numerical study of suction caisson bucket foundation in deep ocean[J]. Ocean Engineering, 2012, 54(9): 142-149.

(责任编辑: 高丽华)