

某防波堤下卧层软土的工程特性状态分析

Analysis on engineering property of underlying soft soil stratum of a breakwater

孔令伟¹, 吕海波², 汪 稔¹, 郭爱国¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 类比分析了琼州海峡铁路轮渡工程北港东防波堤下卧软土层与对应港池内软土基本工程特性, 结果表明防波堤下卧软土层虽然含水率、孔隙比、渗透系数稍有所减小, 但其力学指标和微观结构无实质恶化的改变, 仍具有结构性软土的典型特征, 软土层在防波堤荷载作用下, 其结构性基本保持完整, 尚没有引起明显的结构破损, 下卧层结构性软土可以作为防波堤的持力层; 防波堤稳定性分析与变形监测结果以及防波堤运营现状验证了结构性软土作为防波堤持力层的科学合理性。

关键词: 软土; 结构破损; 防波堤

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0454-05

作者简介: 孔令伟(1967-), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事特殊土的力学特性与成灾机理研究。

KONG Ling-wei¹, LU Hai-bo², WANG Ren¹, GUO Ai-guo¹

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The comparative analysis on fundamental engineering properties of the soft soils in the underlying stratum of eastern breakwater and corresponding sea area inside the breakwater of north harbor is investigated for the Qiong Zhou Strait railway ferry project. The results show that the moisture content, void ratio and coefficient of permeability for the soft soils in the underlying stratum of eastern breakwater decrease slightly after construction, however, its mechanical index and microstructure do not deteriorate, and have the typical feature of structural soft soil compared to the corresponding soft soils in sea area. Therefore, the underlying soft soil still keep its structure intact relatively, and have not been damaged apparently under the loading of breakwater, and can be used as bearing stratum of breakwater. The results of stability analysis and deformation monitoring as well as the existing state of breakwater verify the above conclusion.

Key words: soft soil; structural damage; breakwater

0 问题的提出*

琼州海峡铁路轮渡工程是我国第一条跨海铁路通道, 2003年1月7日已正式通车。但在1999年的南北两港防波堤爆炸挤淤施工中, 北港湛江海区防波堤出现按通常爆填施工抛石层未能达到原设计标高的异常现象, 施工单位采用加大炸药量、缩短进尺、提高堤头抛填高度等措施, 均未能达到预期效果; 而在南港海口海域防波堤按正常爆填施工顺利^[1]。原勘察资料表明两海域上部土层均为流塑—软塑灰色淤泥, 下部土层为硬塑的灰黄色粘土及强风化的玄武岩, 设计方案使防波堤抛石穿过淤泥层, 下部土层作为持力层^[1,2]。北港防波堤能否用下卧软土作为其持力层, 是何种原因造成南北两港防波堤爆炸挤淤的不同效果, 都需要作深入的论证。为此, 业主粤海铁路有限责任公司立项开展科研工作, 以期弄清南北港两海域软土影响爆炸挤淤施工的机理, 论证利用北港防波堤的下卧软土作为持力层的可行性。

基于上述工况, 以类比分析的研究思路, 分别在北港湛江海域港池内距东防波堤 90 m 处、南港海口海域

港池内距北防波堤 90 m 处以及北港东防波堤堤上 0+50~0+220 地段延轴线各钻探了 5 个孔, 重新进行了取样工作, 并开展了较为系统的试验研究^[1]。文献[3~5]报道的南北两港防波堤港池内软土工程特性的差异性及其微观机制表明: 琼州海峡铁路轮渡工程南北两海域软土的物理特性均很差, 按土质分类均属于淤泥; 但湛江海域软土属极高灵敏性粘土, 具有一定的结构强度, 呈现典型结构性粘土的特征; 而海口海域软土属一般的淤泥, 基本无结构强度, 正是两海域软土具有完全不同的工程特性, 才导致了爆炸挤淤施工的不同效应; 北港湛江海域软土具有一定结构强度的主要原因由其矿物成分、孔隙结构以及土颗粒间的排列方式所引起, 并非游离氧化物的胶结作用所致。本文在此基础上, 对北港港池内软土与东防波堤下卧软土的工程特性作类比分析, 初步对防波堤下卧软土层的结构性破损程度作定性分析, 为利用防波堤下卧结构性软土作为持力层的可行性提供依据。

* 基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程项目 (Q110201)

收稿日期: 2003-07-26

1 试验内容与试验方法

为分析防波堤下卧层软土的工程特性所处状态与判定其结构破损程度, 在北港东防波堤与相应港池内均进行钻探取样, 在防波堤堤上钻孔穿越抛石层采用回转岩芯钻探和锤击钻探相结合的方法, 而在港池内钻探借助专门的海洋钻孔平台, 采用回转岩芯钻探方法, 跟进的套管直径均为 146 mm, 用快速静力连续压入法取样, 取土器为敞口薄壁取土器 TB100A 和不锈钢取样管 100 mm×300 mm。防波堤下卧层软土样取自抛石层以下 1.0~5.5 m 不等, 港池内土样取自泥面以下 4.0~7.0 m, 均为灰色淤泥质粘土, 软塑, 混少量贝壳。据防波堤爆炸挤淤的施工记录与原勘察报告资料, 所取土样处于同一层位深度, 具有良好的可比性。

以测试防波堤 0+50~0+220 地段延轴线下卧层未被挤淤的 5 个钻孔(NK1~NK5)软土工程特性与微观结构为基础, 以港池内距东防波堤 90 m 处未受爆炸挤淤施工影响 5 个钻孔(NK6~NK10)软土的指标作为天然软土对照标准, 通过比较分析同层位软土的工程性状, 分析防波堤下卧层软土的结构破损状态。

按《土工试验方法标准 GBJ123-88》进行物理性指标、固结试验、无侧限抗压强度和抗剪强度试验; 十字板剪切试验在防波堤 NK2 和 NK3 两个孔位进行, 试验设备为电测试十字板剪切仪, 十字板规格为板宽 50 mm、板高 100 mm、板厚 2 mm、刃角 60°; 矿物组成、物理

化学性质测试方法详见文献[3~4]; 微观结构测试包括用英国剑桥仪器公司生产的 S-250MK II型扫描电子显微镜观察软土微观形态和用美国麦克公司生产的 9310 型微孔结构分析仪测其孔径分布特征, 样品制备采用冷冻真空升华干燥法进行^[3-4]。

2 试验结果与成果分析

2.1 防波堤下卧层软土工程特性状态

防波堤下卧软土层的物理特性、压缩变形特征、物质组成与物理化学性质、室内直接剪切试验与十字板试验结果见表 1~5, 典型的压缩曲线如图 1 所示, 无侧限轴向应力与轴向应变曲线如图 2, 十字板试验的抗剪强度 c_u 与转动角 ϕ 关系曲线见图 3, 上述图表同时给出了港池内软土的试验结果^[4], 以兹对照。

从上述图表可明显看出: 防波堤下卧层软土物理特性很差, 物性指标平均值特征中天然含水率为 60.4%, 与其液限(59.3%)接近, 孔隙比为 1.61, 塑限高达 23.5%, 渗透系数为 0.495×10^{-7} cm/s, 基本属于相对不透水层, 按照土的分类标准属于淤泥。物质组成中原生矿物以石英和长石为主, 次生粘土矿物以伊利石和绿泥石为主, 且其矿物成分含量基本各占 50%, 有机质接近 1.5%, 游离氧化物含量低, pH 值大于 8.0, 处于弱碱性环境中。现有的力学指标仍较高, 有别于一般近代沉积的淤泥质土, 快剪 c_q 、 φ_q 平均值分别为 16.3 kPa 和 4.3° , 相应的固结快剪 c_{cq} 、 φ_{cq} 平均

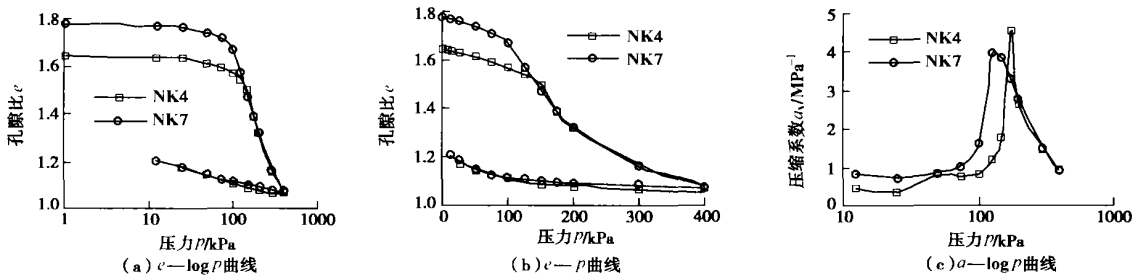


图 1 软土层原状样典型压缩曲线

Fig. 1 Typical compression curve of intact sample of soft soil

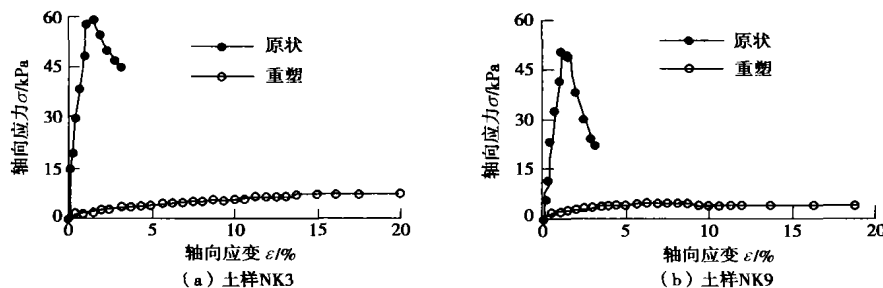


图 2 软土层无侧限轴向应力与轴向应变关系曲线

Fig. 2 The $\sigma-\epsilon$ relation curve of soft soil

表1 软土层的物理特性

Table 1 Physical properties of soft soil

样号	容重 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然含水率 w /%	比重 G_s	孔隙比 e	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	渗透系数 k / ($10^{-7}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
防波堤 NK1	16.2	60.5	2.71	1.63	56.8	22.2	34.6	0.575
防波堤 NK2	16.3	59.6	2.70	1.60	59.3	23.9	35.4	0.333
防波堤 NK3	16.3	60.4	2.70	1.61	64.4	25.6	38.8	0.569
防波堤 NK4	16.4	60.7	2.70	1.60	58.1	23.0	35.1	0.613
防波堤 NK5	16.4	60.6	2.70	1.60	58.1	22.9	35.2	0.387
平均值	16.3	60.4	2.70	1.61	59.3	23.5	35.8	0.495
港池内 NK6	15.6	67.4	2.70	1.84	65.1	22.3	42.8	1.701
港池内 NK7	15.7	69.0	2.70	1.85	59.8	21.5	38.3	
港池内 NK8	15.6	63.5	2.70	1.78	69.2	26.7	42.4	1.493
港池内 NK9	16.0	65.3	2.70	1.74	57.8	19.9	37.9	1.634
港池内 NK10	15.7	65.1	2.70	1.79	63.5	22.0	41.5	
平均值	15.7	66.1	2.70	1.80	63.1	22.5	40.6	1.609

表2 软土层的物质组成与物理化学性质

Table 2 Mineralogical composition and physico-chemical properties of soft soil

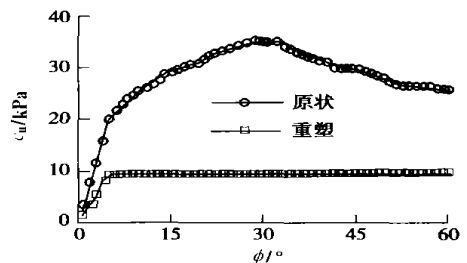
样号	矿物组成 /%					pH 值	易溶盐 总量 /%	有机质 /%	游离氧化物 /%			
	石英	长石	高岭石	伊利石	绿泥石				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	无定形 Fe ₂ O ₃
防波堤 NK3	30	20	0	30	20	8.28	1.40	1.55	2.32	1.07	0.86	0.097
防波堤 NK5	35	10	5	25	25	8.41	1.51	1.23	0.96	0.92	1.07	0.080
港池内 NK6	40	10	0	25	25	8.36	1.36	1.37	1.08	0.62	0.88	0.040
港池内 NK10	35	15	5	35	10	8.51	1.72	1.19	0.93	0.56	0.57	0.034

表3 软土层的压缩变形特征

Table 3 Compressive deformation characteristics of soft soil

样号	先期固 结压力	压缩 系数	原状土无 侧限抗压 强度 q_u	重塑土无 侧限抗压 强度 q_u'	灵敏度
	p_c /kPa	α_{v1-2} /MPa ⁻¹	强度 q_u /kPa	强度 q_u' /kPa	S_t
防波堤 NK1	100.0	3.018	39.4	5.1	7.7
防波堤 NK2	100.0	2.460	46.3	5.0	9.3
防波堤 NK3	100.0	2.376	59.0	6.9	8.5
防波堤 NK4	125.0	2.544	65.6		
防波堤 NK5	125.0	2.199	63.6		
平均值	110.0	2.519	54.8	5.7	8.5
港池内 NK6	100.0	4.075	41.1	2.8	14.7
港池内 NK7	100.0	3.497	56.6	3.8	14.9
港池内 NK8	125.0	2.296			
港池内 NK9	100.0	3.371	50.1	3.9	12.9
港池内 NK10	100.0	3.886	65.7	5.2	12.6
平均值	105.0	3.425	53.8	3.9	13.8

值分别为 8.6 kPa 和 20.4°。无侧限抗压强度均值达 54.8 kPa, 灵敏度为 8.5, 仍属极高灵敏性粘土。十字板剪切试验测得的平均不排水抗剪强度 c_u 为 37.7 kPa, 与港池内软土的三轴不固结不排水剪强度指标 (36.0 kPa) 接近。此外, 从固结试验获得的 $e-\log p$ 曲线、 $e-p$ 曲线与 $a_v-\log p$ 曲线的形状特征与变化规律看, 防波堤下卧层软土的压缩变形性状符合典型结构性粘土的压缩曲线特征^[6-7], 表明该软土下卧层仍具

图3 下卧软土层 c_u 与 ϕ 关系风线(NK2 13.50 m)Fig. 3 The $c_u-\phi$ relation curve of soil in underlying stratum

有一定的结构强度。

防波堤下卧软土层与处于同一层位的港池内软土层相比, 其界限含水率、物质组成与物理化学性质均相近, 由于防波堤下卧软土层在上覆抛土层荷载作用下, 发生了固结沉降, 其物性指标容重稍有增加, 含水率平均降低 5.7%, 孔隙比平均降低 0.19, 渗透系数降到港池内软土的 1/3, 而力学指标除灵敏度和在低应力水平下的压缩性有所降低外, 下卧软土压缩变形规律与港池内软土层相一致, 原状样无侧限抗压强度 q_u 、用卡萨格兰法求得先期固结压力 p_c 及直剪强度均没有本质的差异。因此, 防波堤下卧软土层的结构性基本保持完整, 上覆防波堤荷载尚没有引起其结构明显破损。

据不同取样扰动程度的薄壁取土器、厚壁取土器、岩芯管与重塑样品的压缩试验资料^[8], 按文献[9]介绍

的压缩曲线经验校正方法, 该下卧软土的真实原始先期固结压力 p_e 约为 180 kPa, 与防波堤的上覆荷载设计值接近, 由于随着下卧软土的固结, 其力学特性会有所改善。因此, 只要加强防波堤沉降观测, 并在疏浚航道时注意挖泥对防波堤下卧软土的卸荷与扰动影响, 可以将防波堤下卧层结构性软土作为持力层。

表 4 软土层的抗剪强度指标

Table 4 Shear strength parameters of soft soil

样号	快剪		固结快剪	
	c_q /kPa	ϕ_q / $^\circ$	c_{cq} /kPa	ϕ_{cq} / $^\circ$
防波堤 NK1	20.4	5.0	9.1	21.5
防波堤 NK2	13.1	4.4	10.2	20.6
防波堤 NK3	17.6	3.7	7.7	21.3
防波堤 NK4	17.2	4.2	11.0	18.8
防波堤 NK5	13.3	4.2	5.1	19.6
平均值	16.3	4.3	8.6	20.4
港池内 NK6	19.3	9.9	7.2	20.4
港池内 NK7	18.5	7.7	14.9	21.2
港池内 NK8	19.8	9.9	8.5	18.9
港池内 NK9	16.1	7.6	6.9	20.1
港池内 NK10	14.7	7.6	10.5	21.9
平均值	17.7	8.5	9.6	20.5

注: NK8 三轴剪切强度 $c_u = 36.0$ kPa $\phi_u = 5.4^\circ$ 。

表 5 软土层的十字板剪切强度

Table 5 Vane strength of soft soil

孔位	试点深度 /m	原状土 c_u /kPa	重塑土 c_u' /kPa	灵敏度 S_t	抛石层厚 /m
防波堤 NK2	13.50	34.8	7.4	4.7	12.5
	14.50	37.9	8.9	4.3	
防波堤 NK3	18.00	40.5	9.2	4.4	12.8
平均值		37.7	8.5	4.4	

2.2 防波堤下卧软土层的微观结构状态

防波堤下卧软土层与港池内软土的扫描电镜照片和压汞试验结果如图 4、5 所示, 为便于分析, 根据图 5 的曲线形状和变化规律, 将孔隙分为大孔隙 ($> 10.0 \mu\text{m}$)、中孔隙 ($10.0 \sim 1.0 \mu\text{m}$)、小孔隙 ($1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$) 和微孔隙 ($< 0.1 \mu\text{m}$) 四级, 孔隙结构特征见表 6。图 4 (a) ~ (d) 电镜照片表明: 港池内软土 (NK8) 除存在成絮凝结构的片状基本单元体以外, 还明显存在较大的粒状颗粒, 且片状单元体粘贴在粒状颗粒的表面和粒状颗粒之间的接触点面上, 可起一定的胶结作用, 由于基本单元体之间缺乏非常稳定的胶结连结, 其结构强度并不大; 防波堤下卧软土 (NK3) 的微观形态与港池内软土的微观形态基本相似, 但基本单元体间及粒状颗粒之间排列相对较为密实, 尚未发生过大的变形而引起定向排列。

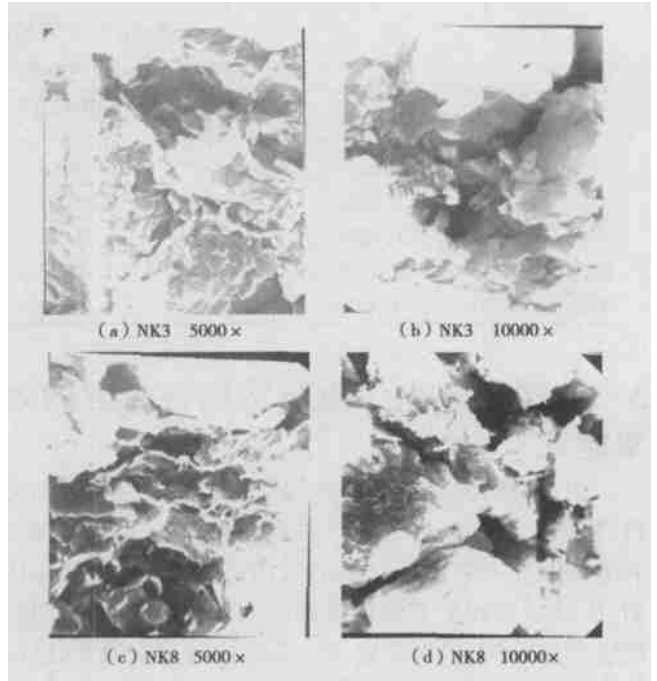


图 4 软土层的扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photos of soft soil

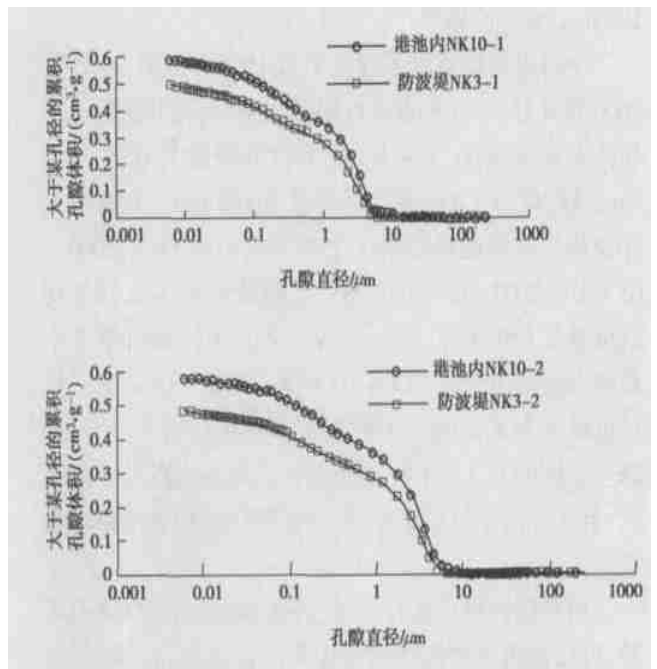


图 5 软土层的孔隙大小分布曲线

Fig. 5 Pore size distribution curve of soft soil

堤下卧层软土 (NK3) 孔隙结构的主要差别在于后者中孔隙有较大减小, 小孔隙稍有降低, 微孔隙与大孔隙基本相似, 致使其总孔隙体积有所减小, 即在防波堤荷载作用下, 其下卧软土的变形主要是中孔隙发生了压缩, 与扫描电镜观测到的微观形态相一致。

虽然微观测试存在离散性的弱点, 但防波堤下卧层软土的微观结构与其工程特性所处状态尚相吻合, 佐证了该软土的结构性处于相对完整状态的判定。

从图 5 和表 6 可看出, 港池内软土 (NK10) 与防波

表6 软土层的孔隙大小分布分析结果

Table 6 Results of pore size distribution analysis of soft soil

样号	干密度 γ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	可测范围内 孔隙总体积 $/(mm^3 \cdot g^{-1})$	体积平均 孔径 μm	孔隙体积分布 $/(mm^3 \cdot g^{-1})$			
				大孔隙 $> 10.0 \mu m$	中孔隙 $(10.0 \sim 1.0 \mu m)$	小孔隙 $(1.0 \sim 0.1 \mu m)$	微孔隙 $< 0.1 \mu m$
防波堤 NK3-1	1.1199	495.8	1.5543	3.6	283.7	128.4	80.1
防波堤 NK3-2	1.1249	482.8	1.5658	2.2	275.0	130.4	75.2
港池内 NK10-1	0.9539	590.5	1.8174	6.7	345.0	159.9	78.9
港池内 NK10-2	0.9897	581.5	1.8179	3.0	346.9	156.4	75.2

3 结构性软土作为防波堤持力层的效果验证

为验证防波堤下卧层结构性软土作为持力层的可行性,中交第四航务工程勘察设计院根据试验指标对北港防波堤4个代表性断面采用总应力法,分别用快剪、固结快剪和十字板强度指标对防波堤的整体稳定性进行过分析,抗滑稳定安全系数均满足交通部《港口工程技术规范》要求。分层总和法计算的沉降量亦在设计预留沉降量范围内,1999年9月6日至2000年4月共8次变形观测表明,防波堤的累计沉降量为29~108 mm,水平位移累计仅为3~19 mm^[2]。

中科力爆炸技术工程公司自1999年4月29日至2000年8月24日一直进行跟踪观测^[2],其中在扭王字块体安放前2000年4月,日平均沉降量为0.3~0.5 mm,该阶段364 d的累计沉降量为190 mm。安放扭王字块体后重新设置的第1个观测点历时86 d(2000-05-21-2000-08-15),累计沉降量为45 mm,日平均沉降量从初始的1.1 mm降至后期的0.3 mm;第2个观测点历时169 d(2000-03-08-2000-08-24),累计沉降量为178 mm,日平均沉降量从初始的2.6 mm降至后期的0.2 mm,观测的累计沉降量均在设计范围内,且沉降速率已逐渐变缓,亦证明防波堤处于稳定状态。

目前防波堤已运行3年,经受多次大浪、台风的考验,可以说将该结构性软土作为防波堤的持力层是成功的,是充分发挥软土结构性应用潜能的范例。

4 结 语

琼州海峡铁路轮渡工程北港东防波堤下卧软土层是一种结构性软土,与港池内相同层位软土相比,虽然其含水率、孔隙比、渗透系数有所减小,力学指标和微观结构却无实质恶化的改变,仍具有结构性软土的典

型特征,在防波堤荷载作用下,其下卧层软土尚没有发生明显的结构破损,其结构性依然处于基本完整状态,可以变更设计将防波堤的下卧层结构性软土作为持力层。防波堤稳定性分析与变形监测结果以及防波堤运营现状进一步验证了本工程充分利用软土结构性潜力的合理性,对今后在类似地基土层上进行工程建设有借鉴价值。

本研究承蒙粤海铁路有限责任公司、中国科学院力学研究所、中交第四航务工程勘察设计院有关专家的大力支持,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 中国科学院武汉岩土力学研究所. 琼州海峡铁路轮渡工程北港防波堤结构性软土地基特性及爆炸法处理后稳定性试验研究分报告之一: 南、北港软土的基本特性试验研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院. 琼州海峡铁路轮渡工程北港防波堤结构性软土地基特性及爆炸法处理后稳定性试验研究分报告之三: 防波堤整体稳定性及沉降量再验算报告[R]. 中交第四航务工程勘察设计院, 2000.
- [3] 孔令伟, 吕海波, 汪 稔, 等. 海口某海域软土工程特性的微观机制浅析[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 36-40.
- [4] 孔令伟, 吕海波, 汪 稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002(9): 82-88.
- [5] Kong L W, Lu H B, Wang R, et al. The influence of marine soil structure on foundation treatment[A]. Proc 4rd Int Conf on Ground Improvement Techniques[C]. Kuala Lumpur, Malaysia, 2002. 89-97.
- [6] 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.
- [7] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 327-378.
- [8] 吕海波, 汪 稔, 孔令伟, 等. 琼州海峡软土的结构对压缩特性的影响[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 467-470.