

# 电阻率法监测黄河口海床沉积物 固结过程现场试验研究\*

刘晓磊<sup>2</sup> 单红仙<sup>1,2</sup> 贾永刚<sup>1,2①</sup> 李红磊<sup>2</sup> 郑杰文<sup>2</sup>

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院 青岛 266100)

**提要** 为了研究黄河口海床沉积物固结过程中电阻率同工程力学性质指标的对应关系,探索海床土体固结过程的新型原位监测技术,本文在黄河口刁口流路三角洲叶瓣潮坪上,现场取土配置黄河口快速沉积形成的流体状沉积物和观测研究粉质土海床的固结过程。利用静力触探、十字板剪切试验、孔隙水压力监测等原位土工测试手段,实时测定固结过程中海床土强度变化和孔隙水压力消散过程;同时通过埋置自行研制的环形电极探杆,实时测定海床土固结过程中的电阻率变化。通过对比分析海床土电阻率与工程力学性质指标的同步测定数据发现:黄河口饱和粉土的电阻率与微型贯入试验测得的土体贯入强度,静力触探试验测得的比贯入阻力,十字板剪切试验测得的不排水抗剪强度(峰值强度、残余强度)均呈乘幂关系,且相关性良好;海床沉积物在固结过程中的电阻率与孔隙水压力呈负线性相关性。

**关键词** 黄河口, 沉积物, 原位监测, 固结, 电阻率

**中图分类号** P714

黄河口海床沉积物主要由粉质土组成,由于长期以来受到波浪和潮流作用(赵鹏等, 2010),以及黄河水下三角洲复杂的沉积环境影响,其工程地质性质十分复杂,容易发生崩塌、滑坡、液化和塌陷等多种工程地质灾害(杨作升等, 1994; 冯秀丽等, 1994, 1999)。研究黄河口粉质土体的固结过程,确定海床沉积物的固结程度,对于该地区地质灾害的预防和预测具有重要意义。

土体的电阻率是土的基本物性参数之一,它与土体其他物理力学指标之间存在密切的关系,国内外学者自 20 世纪 40 年代开始便对此进行了大量研究与应用(Archie, 1942; Keller *et al.*, 1966; Waxman *et al.*, 1968; 刘松玉等, 2001; 郭秀军等, 2003; 刘国华等, 2004)。在土体电性研究不断深入的同时,电阻率原位测试技术也越来越多地被人们用来解决工程与环境

问题,目前已经成功被运用在研究土的微结构形态(Fukue *et al.*, 1999)、监测砂土液化过程(Jinguuji *et al.*, 2007)以及测试土体污染程度(Fukue *et al.*, 2001)等多个领域,然而应用于土体固结过程的监测研究还不多见。

本文在现代黄河三角洲潮滩开挖试验坑,模拟快速沉积的粉质土海床固结过程,利用静力触探、十字板剪切试验、孔隙水压力监测等原位土工测试手段实时测定海床土强度变化和孔隙水压力的消散过程。同时在前人电阻率探杆思想(Won, 1987; Ridd, 1992, 1994)的基础上,自行研制环形电极探杆,实时监测海床土体的电阻率变化,试图通过监测数据研究黄河三角洲海床粉土的固结过程中电阻率和其它各项指标的对应关系,探索该地区海床沉积物固结过程研究的新颖原位监测技术。

\* 国家 863 计划资助项目, 2008AA09Z109 号; 国家自然科学基金项目, 40876042、41072215 号。刘晓磊, 博士, E-mail: ffnlx1\_001@sina.com

通讯作者: 贾永刚, 教授, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2011-02-04, 收修改稿日期: 2012-02-10

## 1 研究区概况

### 1.1 研究区选择

研究区选在黄河三角洲北部刁口流路三角洲叶瓣潮坪上, 位于胜利油田海港采油区桩 19 (38°04'05.2"N, 118°56'48.9"E) 附近(图 1A), 是由黄河 1953—1976 年行水刁口河、神仙河等流路入海形成的。此处水下斜坡表面坡度极缓, 距离 10 余公里的海域, 水深也只有十几米, 退潮时数公里的潮坪露出水面, 这为在潮坪上开展研究工作提供了便利(贾永刚等, 2000)。该区内为不规则半日潮, 平均潮差 0.7—1.7 m, 最大潮差 2.17 m, 最大潮流流速大于 120 cm/s。波浪以风浪为主, 波浪的大小随风速的改变而变化, 常见波高小于 0.5 m, 最大波高 3.3 m, 极端海况下波高可达到 5.8m(成国栋等, 1997)。在 2008 年 7 月现场试验期间, 风力较小, 无明显风浪, 波浪波高在 0.02 m 左右。

### 1.2 表层土特征

对研究区 1 m 深度范围原状土样分析, 土体为粉土, 砂粒含量在 0%—9.6%之间, 粉粒含量在 85.6%—99.2%之间, 粘粒含量在 0.8%—4.8%之间; 基本物理力学指标为: 含水量为 22.6%—29.3%, 密度为 1.88—2.00 g/cm<sup>3</sup>, 孔隙比为 0.67—0.81, 饱和度为 95%—100%, 均看作饱和土。塑性指数为 7.7—8.7, 液性指数为 0.34—0.71, 粘聚力为 10—25 kPa, 内摩擦角  $\phi$  为 49.3°—52.2°, 压缩系数为 0.119—0.205 MPa<sup>-1</sup>, 属于中压缩性土。

研究区海床土主要矿物为石英、长石、方解石和白云石, 可能存在钙质胶结。部分粘土矿物为伊利石、绿泥石、高岭石和蒙脱石。具体矿物成分见表 1。

## 2 现场试验

### 2.1 试验现场布置

为研究现代黄河口沉积物天然固结过程中电阻

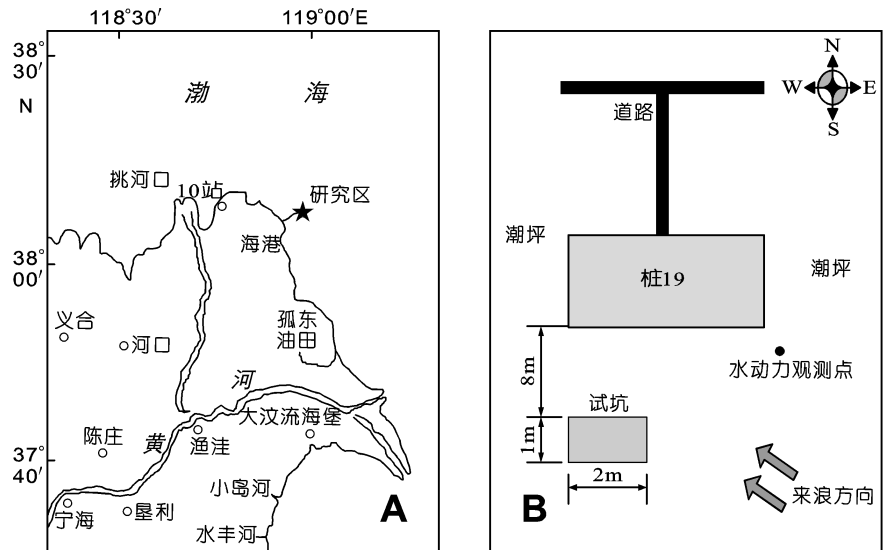


图 1 研究区位置(A)及试验现场布置图(B)

Fig.1 Location of the study site and experimental setup

率同孔压、强度等指标的对应关系, 在潮滩上开挖一个 2 m×1 m×1 m 的试验坑(图 1b 和图 2)。将坑中挖出的土在容器中全部撵细使之不出现结块, 再加海水充分搅动, 使之成为均匀的流态泥浆, 最后将该泥浆回填到开挖的试验坑中, 模拟黄河口沉积物的天然堆积与固结过程。在图 1 试坑中不同深度放置孔隙水压力探头, 在试验坑中心处埋置电极探杆, 试坑填满后, 开始测定土体的孔隙水压力和电阻率值。在整个试验期内(2008 年 7 月 13 日—7 月 27 日)连续测定孔隙水压力、电阻率、静力触探值和十字板剪切试验值的变化。

### 2.2 土体原位强度测试

试验所用仪器为南光地质仪器厂生产地 CLD-3 型静力触探-电测十字板两用仪, 数据记录采集系统为 DN-1 型多用数字显示器。静力触探探头采用南光地质仪器厂生产的单桥探头, 探头编号为 4474, 工作面积为 10 cm<sup>2</sup>, 探头系数  $kq=4.5337$  kPa。测试时每 0.05 m 记录一个读数。十字板探头为南光地质仪器厂生产的 WKS50×100 型, 探头编号 1024, 标定系数 860。沿深度测量了 10、30、50、70 cm 深度上相应土体的不排水抗剪强度。

采用沈阳建科仪器研究所生产地 WG-V 型电子普式贯入仪进行微型贯入测试。仪器最大量程为 1000N, 灵敏度 0.01 N, 最大贯入深度为 150 cm。现场采

表 1 海床粉质土的主要矿物和粘土矿物成分含量  
Tab.1 Mineralogy and clay composition of seabed silty soil

主要矿物成分 (%)					粘土矿物成分 (%)				
石英	长石	方解石	白云石	碎屑矿物	伊利石	绿泥石	高岭石	蒙脱石	粘土矿物
43.68	20.71	9.47	1.94	75.8	13.67	4.44	5.78	0.31	24.2

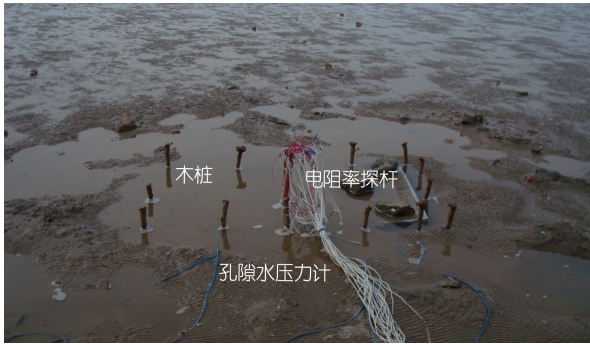


图2 黄河口潮滩试坑照片

Fig.2 Photograph of the test pit on the tidal flat

用连续贯入方式,以2 cm/s 匀速贯入,每贯入5 cm 记读一个贯入阻力值。本试验直接利用贯入阻力值作为土体的强度对比指标,不进行相关的土体强度指标数值换算。

### 2.3 孔隙水压力监测

孔隙水压力采集设备采用美国 Iotech, Inc. 生产的 DAQLab/2005 高级动态信号采集分析器,可进行高频率连续采集。孔隙水压力探头采用压阻式压力传感器,探头尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。探头在埋入土中之前,提前 24 h 在水中浸泡,并不时摇动,使气体完全排除。用洛阳铲成孔,孔径 80 mm—100 mm,成孔深度达到最底部测点位置以下 50 mm,注入干净中粗砂 40 mm,然后放入孔压探头,再注入 60 mm 干净中粗砂,最后用半风干膨润土球封孔至上一测点位置以下 50 mm 处,开始第二测点的埋设,方法同上。共布置 2 个探头,深度分别位于 30、50 cm。

### 2.4 电阻率监测

采用 Geopen E60BN 型高密度电法采集仪进行现场电阻率连续采集。试验中自制环形电极探杆(图 2),材料为有机玻璃,直径为 5 cm,表面等间距布有环形铜电极,电极截面积  $1.5 \text{ mm}^2$ ,相邻电极间距为

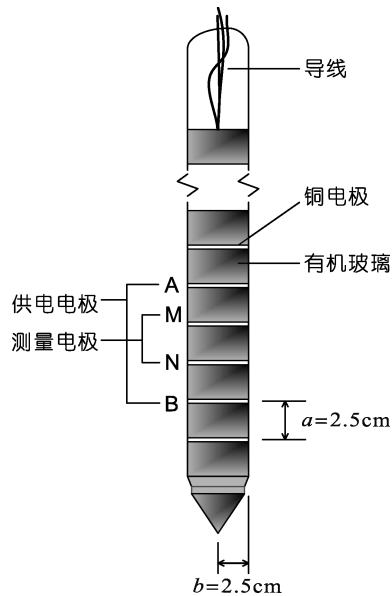


图3 环形电极探杆示意图

Fig.3 An illustration of the monitoring probe with ring electrodes

2.5 cm,各电极从管壁内部引出,通过导线与电阻率采集仪的电缆线开关相连。试验中的电阻率测试均通过直流供电的方式实现。

不同深度土体电阻率测定通过 Wenner 法实现,供电电极 A、B 和测量电极 M、N 的相对位置关系见图 3,第一次采集时最底部 4 个电极作为供电电极和测量电极进行采集,采集结束间隔 1 s 后上移一个电极位置继续进行 Wenner 采集,依此方法可以得到自下而上不同深度处土体的电阻率值。

对于环形电极产生的电场形式及其电阻率计算,已有学者均进行了相关研究(Won, 1987; Ridd, 1994; Fukue, 2001),通过室内试验对比结果,本文中土体电阻率采用下式(1)计算:

$$\rho_a = 4\pi G \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

其中:  $G = \frac{\pi b}{4} \left[ \ln \frac{4a + 2\pi b}{4a + \pi b} \right]^{-1}$ ,称为几何因子;  $\rho_a$  为土体电阻率;  $\Delta U$  为测量段电位差;  $I$  为供电电流强度;  $a$  为相邻电极间距;  $b$  为环形电极圈半径。

### 2.5 试验结果

试坑土体固结过程中各项测试结果见表 2 所示。其中,各原位强度测试指标与电阻率数据均为各深度位置土体的测试平均值。

## 3 土体固结过程中电阻率同工程力学性质指标对应关系讨论

### 3.1 试验区粉土电性影响因素分析

土体是由固体颗粒、水和气体组成的三相分散体系,同土体众多性质一样,土体的电阻率也受各相物质的相对含量、各相物质的特性以及各相物质的相互作用程度的影响。根据表 1 中结果可知,研究区土体所含主要矿物成分均为高阻矿物,因而固体颗粒对研究土体的电阻率影响可以忽略。同时气体组分的导电性也可忽略,故孔隙水的导电性与含量将决定黄河口饱和粉土的导电性与电阻率大小。

以往众多学者进行了研究,根据推广的求取土体电阻率的 Archie 公式(1942):

$$\rho_0 = K \phi^{-m} S_r^{-n} \rho_w \quad (2)$$

式中:  $\rho_0$  为土样的电阻率;  $\phi$  为土样的孔隙率;  $S_r$  为土样的饱和度;  $\rho_w$  为孔隙水的电阻率;  $K, m, n$  均为与土性有关的参数。刘国华等(2004)通过正交试验得出,影响电阻率的各因素由主至此顺序为:含水率、孔隙

表 2 试验综合成果表  
Tab.2 Experimental results

时间 (年.月.日)	静力触探试验		十字板剪切试验			微型贯入试验	电阻率( $\Omega \cdot m$ )
	比贯入阻力(mPa)	峰值强度(kPa)	残余强度(kPa)	灵敏度	贯入阻力(kPa)		
2008.7.13	0.49	—	—	—	—	1.7	0.589
2008.7.14	1.18	2.3	1.2	1.917	45.9	45.9	0.687
2008.7.15	—	—	—	—	71.8	71.8	0.718
2008.7.16	2.67	12.7	7.2	1.764	64	64	0.743
2008.7.17	2.09	13.9	12	1.158	87.1	87.1	0.739
2008.7.19	—	—	—	—	41	41	0.735
2008.7.20	1.28	8.7	4.4	1.977	—	—	0.743
2008.7.22	2.92	19.6	12.6	1.556	—	—	0.765

水的导电性、饱和度、土的种类。郭秀军等(2007)认为,影响黄河三角洲潮坪区饱和粉土导电性的主要因素为土体的孔隙率,随着孔隙率增大,粉土的含水率增高,电阻率变低。这些结论均适用于研究区土体。

综上所述,矿物成分、饱和度、天然含水率与孔隙比等是影响黄河三角洲粉质土体电阻率的主要因素,而这些又恰恰是决定土体的工程力学性质的主要因素,因此可以利用现场土体的电阻率与各项工程力学性质的同步监测结果,建立黄河口饱和粉土固结过程中电阻率与各项性质指标的对应关系,试验结果具有一定的代表性。

### 3.2 电阻率与微贯试验指标的关系

根据表 2 中电阻率与微型贯入试验的同步测试数据,作黄河口饱和粉土自然固结过程中贯入强度与电阻率的关系曲线(图 4A)。如图 4A 所示,贯入强度与电阻率呈幂乘关系,前者随后者的增大而增大。当电阻率较小时,说明土体的含水量与孔隙比均较大,此时为固结过程初始阶段,土体的贯入强度也较低( $<10$  kPa)。随着电阻率逐渐增大,即土体发生固结,贯入强度不断增大。随着固结过程逐渐趋于完成,电阻率增大变缓,而贯入强度仍然不断增大,故二者在整个过程中表现出较为明显的乘幂关系。电阻率与贯入强度之间的这种幂函数关系与先期室内模拟试验所得结果(单红仙等, 2010)相吻合,但相关系数略低,这可能是由于现场复杂的水文气象因素所导致。

### 3.3 电阻率与静探试验指标的关系

根据表 2 中电阻率与静力触探试验的同步测试数据,作黄河口饱和粉土自然固结过程中比贯入阻力与电阻率的变化曲线(图 4B)。与微型贯入试验的结果相似,土体的比贯入阻力与电阻率之间也呈现一定的乘幂关系,比贯入阻力随电阻率的增大而增大,

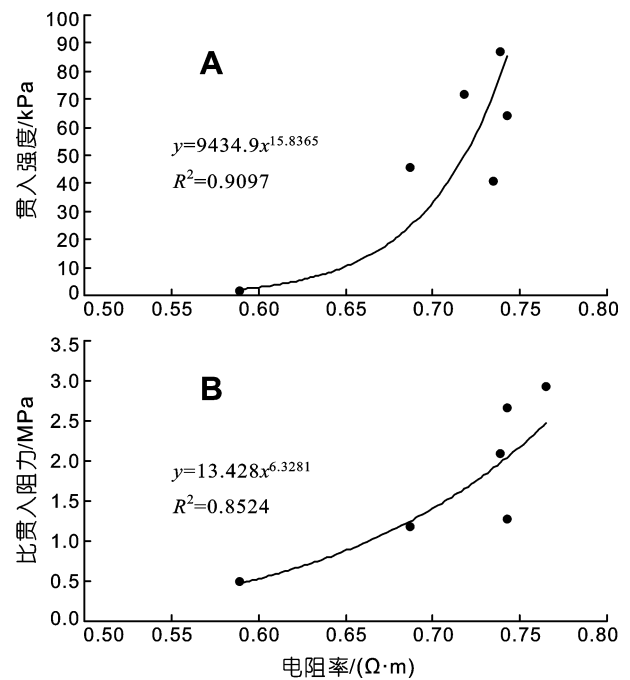


图 4 (A) 电阻率与贯入强度关系曲线; (B) 电阻率与比贯入阻力关系曲线

Fig.4 (A) Relationship between resistivity and penetration strength; (B) Relationship between resistivity and specific penetration resistance

且随着土体固结过程的进行,比贯入阻力的增大幅度相对于电阻率逐渐增大,二者的回归方程及相关系数见图中所示。

### 3.4 电阻率与十字板剪切试验指标的关系

根据表 2 中电阻率与十字板剪切试验的同步测试数据,分别作黄河口饱和粉土自然固结过程中剪切峰值强度、剪切残余强度及灵敏度与电阻率关系曲线(图 5)。从图 5 中可以看出,十字板剪切试验测得的峰值强度和残余强度均与电阻率呈较为明显的乘幂关系,随着电阻率的增大,土体的抗剪强度也不断

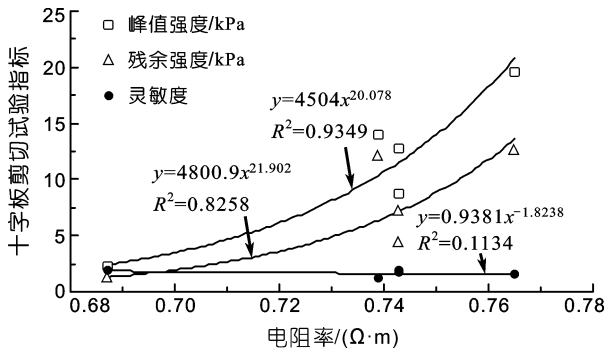


图5 电阻率与剪切峰值强度、残余强度及灵敏度关系曲线  
Fig.5 Relationships between resistivity and peak strength, residual shear strength and sensitivity

增大,二者均可看成是土体固结过程中孔隙水压力的消散引起的。十字板剪切试验另一重要指标灵敏度与电阻率之间则无明显相关关系。

### 3.5 电阻率与孔隙水压力的关系

根据电阻率与孔隙水压力的同步监测数据,作黄河口饱和粉土自然固结过程中孔隙水压力与电阻率的关系曲线(图6)。图6中的孔隙水压力值是孔隙水压力探头的实测孔压值与其埋置位置至海水表面静力压力值的差值。该孔压数据采集时,土体表面为潮水面,故该孔隙水压力为超静孔隙水压力。

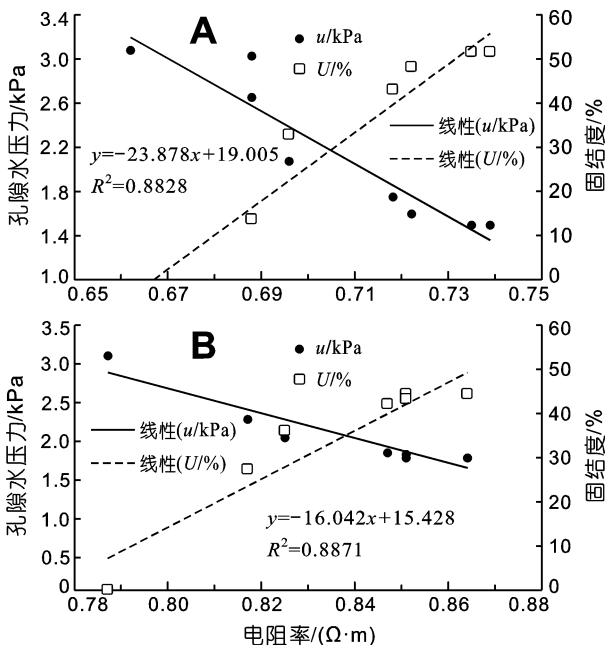


图6 电阻率与孔隙水压力、固结度关系曲线(A. 30 cm 土体; B. 50 cm 土体)

Fig.6 Relationships between resistivity and pore water pressure, degree of consolidation

由图6可以看出,黄河口饱和粉土在自然固结过程中,产生超静孔隙水压力与电阻率大致呈负线性相关关系,试验测得30 cm和50 cm深度处二者的线性相关系数均大于0.8。当均匀泥浆刚刚回填到试验土坑中时,各深度处孔隙水压力(即超静孔隙水压力)达到最大值,30 cm和50 cm深度两处超静孔隙水压力均大于3 kPa,此时由于饱和土体的含水率和孔隙比较大,电阻率值较低。随后,随着土体发生固结,孔隙比逐渐减小,含水率降低,电阻率不断增大,超静孔隙水压力逐渐消散。当超静孔隙水压力消散为0时(图6中电阻率与孔压线性拟合曲线延伸到x轴),表明自重固结过程完毕,土体电阻率达到该过程的最大值。

在黄河口饱和粉土的自然固结过程中,电阻率同超静孔隙水压力之间存在较好的线性关系,故可通过土体电阻率估算该过程中土体的固结度。固结度即在某一附加应力下,经某时间t后,土体发生固结或孔隙水压力消散的程度,可通过式(3)计算:

$$U_t = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{\sigma - u}{\sigma} = \frac{u_0 - u}{u_0} \quad (3)$$

式中:  $U_t$  为 t 时刻土体的固结度;  $\sigma$  为附加应力,  $\sigma'$  为附加有效应力,  $u_0$  为初始超孔压,  $u$  为 t 时刻的超孔压。本试验固结过程中土体电阻率与固结度的关系曲线见图6所示。

## 4 结语

(1) 矿物成分、饱和度、天然含水率与孔隙比等是影响黄河三角洲粉质土体电阻率的主要因素,又是决定土体的工程力学性质的主要因素。黄河口饱和粉土的电阻率与微型贯入试验测得的土体贯入强度,静力触探试验测得的比贯入阻力,十字板剪切试验测得的不排水抗剪强度(峰值强度、残余强度)均呈幂关系,且相关性良好。

(2) 黄河口饱和粉土固结过程中,土体电阻率与孔隙水压力呈负线性相关性,电阻率监测方法是研究黄河口粉质土体固结程度的有效原位测试手段。

本文的研究成果是基于特定地段开展的初步试验研究,仍有待于开展更深入细致地综合性研究。

## 参 考 文 献

冯秀丽,沈渭铨,杨荣民,1994. 现代黄河水下三角洲软土沉积物工程地质性质. 青岛海洋大学学报(增): 132—137  
冯秀丽,林霖,庄振业等,1999. 现代黄河水下三角洲全新世

- 以来土层岩土工程参数与沉积环境之间的关系. 海岸工程, 18(4): 1—7
- 成国栋, 薛春汀, 1997. 黄河三角洲沉积地质学. 北京: 地质出版社, 36—40
- 刘松玉, 于小军, 缪林昌, 2001. 水泥土的电阻率特性研究. 地基处理, 12(3): 30—36
- 刘国华, 王振宇, 黄建平, 2004. 土的电阻率特性及其工程应用研究. 岩土工程学报, 26(1): 83—87
- 单红仙, 刘晓磊, 贾永刚等, 2010. 黄河口沉积物固结过程电阻率监测研究. 岩土工程学报, 32(10): 1524—1529
- 贾永刚, 单红仙, 2000. 黄河口海底斜坡不稳定性调查研究. 中国地质灾害与防治学报, 11(1): 1—5
- 郭秀军, 刘涛, 贾永刚等, 2003. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究. 地球物理学进展, 18(1): 151—155
- 郭秀军, 张志阔, 贾永刚等, 2007. 黄河口饱和粉土的电性特征及其工程地质应用. 岩土力学, 28(3): 593—598
- 杨作升, 陈卫民, 陈樟榕等, 1994. 黄河口水下滑坡体系. 海洋与湖沼, 25(6): 573—581
- 赵鹏, 江文胜, 毛新燕等, 2010. 2000—2005 年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素. 海洋与湖沼, 42(1): 12—23
- Archie G E, 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of American Institute of Mining Engineers, 146: 54—62
- Fukue M, Minato T, Horibe H *et al*, 1999. The micro-structures of clay given by resistivity measurements. Engineering Geology, 54(1—2): 43—53
- Fukue M, Minato T, Matsumoto, M *et al*, 2001. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers. Engineering Geology, 60: 361—369
- Jinguuji M, Toprak S, Kunimatsu S, 2007. Visualization technique for liquefaction process in chamber experiments by using electrical resistivity monitoring. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27: 191—199
- Keller G, Frischknecht F, 1966. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. New York: Pergamon Press, 33—35
- Ridd P V, 1992. A sediment level sensor for erosion and siltation detection. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 35(4): 353—362
- Ridd P V, 1994. Electrical potential due to a ring electrode. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 19(3): 464—467
- Waxman M H, Smits L J M, 1968. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand. Society of Petroleum Engineers Journal, 65: 1577—1584
- Won I, 1987. The geometrical factor of a marine resistivity probe with four ring electrodes. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 12(1): 301—303

## IN-SITU MONITORING OF SEABED SEDIMENTS CONSOLIDATION PROCESS IN YELLOW RIVER ESTUARY BY ELECTRICAL RESISTIVITY METHOD

LIU Xiao-Lei<sup>2</sup>, SHAN Hong-Xian<sup>1,2</sup>, JIA Yong-Gang<sup>1,2</sup>, LI Hong-Lei<sup>2</sup>, ZHENG Jie-Wen<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Qingdao, 266100;

2. College of Environmental Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100)

**Abstract** In order to study the correlations between resistivity and mechanical properties of the seabed sediments during the consolidation process in the Yellow River estuary, and to explore a new in-situ monitoring technique for the process, a series of experiments were conducted on the tidal flat of Diaokou delta-lobe that lies in the north of the Yellow River Delta. The fluid sediments imitating the rapidly depositing seabed silts were taken in situ, and the fluid sediments were promptly filled into a one-meter deep pit excavated on the tidal flat. Using field-testing methods, including static cone penetration test, field vane shear test and pore water piezometer test, variations in mechanical strength and dissipation of pore water pressure were measured in real time. A homemade monitoring probe with ring electrodes was also buried in the sediments to measure the real-time resistivity during the sediment consolidation process. Based on the experimental data, good power correlations were found between resistivity and penetration strength, specific penetration resistance and undrained shear strength (including peak strength and residual shear strength) of the saturated silty soil in the Yellow River ESTUARINE area. There was a negative linear correlation between resistivity and pore water pressure. We propose that resistivity method can be used as an effective way to obtain the degree of consolidation of the silty soil in the Yellow River estuarine area.

**Key words** Yellow River estuary, Sediment, In-situ monitoring, Consolidation, Resistivity