

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.007



# 填海作用对海积软土的抗剪强度影响 试验研究

刘汉民<sup>1,2</sup>, 周东<sup>1</sup>, 吴恒<sup>1</sup>, 焦文灿<sup>1</sup>, 王业田<sup>1</sup>

(1. 广西大学 土木建筑工程学院; 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004;

2. 湖南科技学院 土木与环境工程学院, 湖南 永州 425199)

**摘要:**以钦州港临海园区和防城港企沙工业园填海场地海积软土为研究对象,分析了填海场地海积软土赋存环境要素的变化规律。采用机制模拟技术装置,对海积软土的孔隙水离子化学组分浓度和上覆填海层厚度发生变化的情况进行了人工模拟制样,获得了“印记”了赋存环境要素的人工软土样品,并对人工软土样品进行了直剪试验。结果表明:填海层对海积软土层的附加荷载应力、水力联系变化、水化学场变化三大赋存环境要素可采用“一种土的浸泡荷载联动装置”进行模拟;随着填海层附加荷载应力的增大,人工软土样的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随之增大;随着浸泡液不同离子成分浓度变化,对人工软土样的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  影响效果不一,随着离子浓度的增加,  $\text{Ca}^{2+}$  比  $\text{Mg}^{2+}$  对抗剪强度指标的影响大;填海层附加荷载应力与浸泡液离子组分双因素同时作用下,对土样的抗剪强度指标存在相互耦合效应,其耦合效应对黏聚力影响明显,对内摩擦角影响较小。

**关键词:**填海造地;海积软土;赋存环境;抗剪强度;耦合效应

**中图分类号:** TU447      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0054-10

## Experimental analysis on coastal reclamation impact on shear strength of marine soft soil

Liu Hanmin<sup>1,2</sup>, Zhou Dong<sup>1</sup>, Wu Heng<sup>1</sup>, Jiao Wencan<sup>1</sup>, Wang Yetian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan, P. R. China)

**Abstract:** The variation of the environmental factors of marine soft soil in industry zones of Qinzhou Port and Fangcheng Port was analyzed. The soil soaking load linkage is a self-developed device for mechanism simulation, used to examine the environmental factors of marine soft soil when the thickness of coastal reclamation layer and concentration of chemical constituents of pore water ions changed. The soft soil

**收稿日期:** 2017-11-14

**基金项目:** 国家自然科学基金(51178124, 51378132)

**作者简介:** 刘汉民(1981-), 男, 博士生, 主要从事环境岩土工程研究, E-mail: liuhanmin81@126.com.

周东(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhd516@163.com.

**Received:** 2017-11-14

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51178124, 51378132)

**Author brief:** Liu Hanmin (1981-), PhD candidate, main research interest: environmental geotechnics, E-mail: liuhanmin81@126.com.

Zhou Dong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhd516@163.com.

samples were obtained artificially. Direct shear tests of these artificial soft soil samples were carried out. The test results showed that cohesive force  $c$  and internal friction angle  $\varphi$  of artificial soft soil samples changed with calcium ion larger than magnesium ion when concentration of calcium ion or magnesium ion increased. There is certain coupling effect between the additional load stress of coastal reclamation layer and ion concentration of soak liquid for the shear strength indexes of the soil. However, the coupling effect of cohesive force is obvious while that of internal friction angle is less significant.

**Keywords:** coastal reclamation; marine soft soil; environmental factors; shear strength; coupling effect

进入 21 世纪以来,中国进行了大规模的填海造地工程<sup>[1-3]</sup>,其中很大一部分成为工业及城市建设用地。钦州港临海园区和防城港企沙工业园填海造地工程形成的陆域就是用来作为工业及城市建设用地,填海区域分布大量的海积软土<sup>[4-6]</sup>。这类填海造地工程有几个特点:1)填海形成的陆域面积大。钦州湾填海面积截止 2011 年已达约 20 km<sup>2</sup><sup>[7]</sup>,根据钦州市城市总体规划,2008—2025 年期间的总围填海工程面积将达到约 79 km<sup>2</sup>。2)填海造陆的速度快。从施工到形成陆域,再到用于工业及城市建设用地的时间较短,钦州港临海园区和防城港企沙工业园填海造地工程由吹砂填海完成,然后进行地基处理<sup>[8-9]</sup>,之后直接用于相应的工程建设。3)填海造地过程中填海层对下伏地层施加的荷载重。随着填海造陆施工工艺技术的成熟,以及对土地使用面积的需求,迫使填海由滩涂逐渐向浅海延伸,填海层的厚度大幅增加,因此,填海层对下伏地层的荷载也大幅增加,其中钦州大榄坪至保税港区铁路支线的吹填工程,吹填深度深达十几米。与海积软土地质形成的自然演变过程相比,填海造地对海积软土赋存环境的扰动极其剧烈。海积软土与其形成的自然地质环境在填海造地之前处于相对稳定的动态平衡状态,经过填海造地的剧烈扰动之后,海积软土的赋存状态迅速地发生变化,并与环境达到一种新的动态平衡状态。

海积软土具有高含水量、高压缩性、低抗剪强度的特点。已有学者对海积软土的抗剪强度进行了研究,并取得了一些成果<sup>[10-14]</sup>。填海造地工程对海积软土的赋存环境造成了极大的扰动,随着赋存环境的变化,作为海积软土力学性状之一的抗剪强度也随之发生改变,但尚未见到关于填海作用引起的海积软土的赋存环境变化对海积软土的抗剪强度影响研究的报道。

## 1 填海场地所取扰动土样的基本物理性质

填海场地所取扰动土样基本物理性质见表 1。

表 1 海积软土物理性质

Table 1 The physical properties of marine soft soil

地点	天然含水率/%	土粒比重	塑限/%	液限/%	塑性指数	液性指数
钦州	52.57	2.70	20.0	42.5	22.5	1.45
防城港	65.07	2.69	25.3	49.2	23.9	1.67

采用筛分法和静水沉降法中的密度计法综合测定钦州港临海园区和防城港企沙工业园填海场地海积软土的颗粒级配,密度计法测试试样中加入分散剂为 4% 的六偏磷酸钠,颗粒级配试验分析结果如图 1 所示。

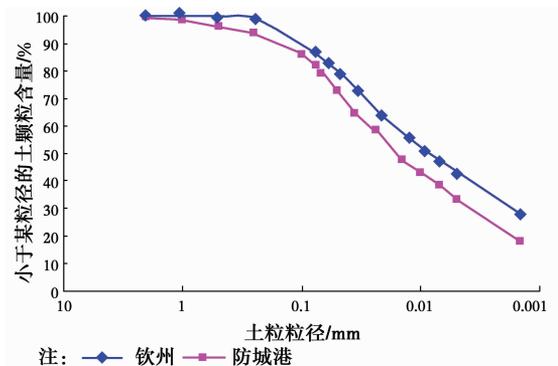


图 1 钦州港临海园区和防城港企沙工业园颗粒级配累积曲线

Fig. 1 Cumulative curve of grain size in Qinzhou and Fangchenggang

钦州港临海园区海积软土样本中粒径小于 0.075 mm 的细粒土含量达到 80.55%,粒径小于 0.005 mm 的粘粒含量达到 43.69%。防城港企沙工业园海积软土样本中粒径小于 0.075 mm 的细粒土含量达到 82.2%,粒径小于 0.005 mm 的粘粒含量达到 33.3%。

## 2 “印记”填海作用下环境要素变化“痕迹”的人工软土土样的制取

### 2.1 试验方案

人工软土土样赋存环境要素变化“痕迹”的“印

记”通过机制模拟装置“一种土的浸泡荷载联动装置<sup>[15]</sup>”来实现。填海层对海积软土层的附加荷载应力采用 80、130、180 kPa 共 3 种荷载等级工况进行加载模拟;水力联系变化通过“一种土的浸泡荷载联动装置”四周侧壁密布细孔进行模拟;水化学场变化通过改变浸泡液的化学组分来进行模拟。填海前海积软土与海水直接相接处,海积软土孔隙水的游离

态离子化学组分与海水的游离态离子化学组分相同,浓度也一样。因此,可以用海水的游离态离子化学组分及其浓度作为填海前海积软土孔隙水的游离态离子化学组分及其浓度的初始情况。钦州港临海园区和防城港企沙工业园区填海区域的海水离子组分见表 2。

表 2 填海区海水主要化学成分

Table 2 Chemical composition of seawater in coastal reclamation district

地点	Na <sup>+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Al <sup>3+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Fe <sup>2+</sup> 或 Fe <sup>3+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	pH 值
钦州	5.285	0.356	0.235	0.236	—	—	7.67
防城港	10.26	0.401	0.443	1.25	—	—	7.58

注:游离态的 Fe<sup>3+</sup>或 Fe<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>离子成分含量接近零。

试验主要对海水中的 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>离子含量对海积软土性状的影响进行研究。已有研究<sup>[16-17]</sup>表明,Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的溶解度较大。作为工业用地,尤其是化工业用地的填海造地区域,有可能出现大浓度 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的情况。相对于 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的溶

解度,海水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的含量很小。在实验过程中采用较大的级差,即以填海区的海水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>的浓度为基准,以海水中 Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>浓度的 10 倍和 100 倍作为浸泡液。填海区海积软土浸泡液方案如表 3 所示。

表 3 填海区海积软土浸泡液方案

Table 3 Soak liquid of marine soft soil in coastal reclamation district

地点	工况	溶剂	溶质	Ca <sup>2+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	Na <sup>+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )
	工况 1	海水(钦州)	未加	$\omega_1$ 钙 = $\omega$ 钦海钙	$\omega_1$ 镁 = $\omega$ 钦海镁	$\omega_1$ 钠 = $\omega$ 钦海钠	$\omega_1$ 钾 = $\omega$ 钦海钾
	工况 2	海水(钦州)	CaCl <sub>2</sub>	$\omega_2$ 钙 = 10 $\omega$ 钦海钙	$\omega_2$ 镁 = $\omega$ 钦海镁	$\omega_2$ 钠 = $\omega$ 钦海钠	$\omega_2$ 钾 = $\omega$ 钦海钾
钦州	工况 3	海水(钦州)	CaCl <sub>2</sub>	$\omega_3$ 钙 = 100 $\omega$ 钦海钙	$\omega_3$ 镁 = $\omega$ 钦海镁	$\omega_3$ 钠 = $\omega$ 钦海钠	$\omega_3$ 钾 = $\omega$ 钦海钾
	工况 4	海水(钦州)	MgCl <sub>2</sub>	$\omega_4$ 钙 = $\omega$ 钦海钙	$\omega_4$ 镁 = 10 $\omega$ 钦海镁	$\omega_4$ 钠 = $\omega$ 钦海钠	$\omega_4$ 钾 = $\omega$ 钦海钾
	工况 5	海水(钦州)	MgCl <sub>2</sub>	$\omega_5$ 钙 = $\omega$ 钦海钙	$\omega_5$ 镁 = 100 $\omega$ 钦海镁	$\omega_5$ 钠 = $\omega$ 钦海钠	$\omega_5$ 钾 = $\omega$ 钦海钾
	工况 6	海水(防城港)	未加	$\omega_6$ 钙 = $\omega$ 防海钙	$\omega_6$ 镁 = $\omega$ 防海镁	$\omega_6$ 钠 = $\omega$ 防海钠	$\omega_6$ 钾 = $\omega$ 防海钾
防城港	工况 7	海水(防城港)	CaCl <sub>2</sub>	$\omega_7$ 钙 = 10 $\omega$ 防海钙	$\omega_7$ 镁 = $\omega$ 防海镁	$\omega_7$ 钠 = $\omega$ 防海钠	$\omega_7$ 钾 = $\omega$ 防海钾
	工况 8	海水(防城港)	CaCl <sub>2</sub>	$\omega_8$ 钙 = 100 $\omega$ 防海钙	$\omega_8$ 镁 = $\omega$ 防海镁	$\omega_8$ 钠 = $\omega$ 防海钠	$\omega_8$ 钾 = $\omega$ 防海钾

填海区浸泡荷载联动试验的加载荷载为 80、130、180 kPa 共 3 种工况,浸泡液为表 3 所示 8 种工况;浸泡荷载联动试验制备土样工况组合,钦州为 15 种工况组合,防城港为 9 种工况组合,共 24 种工况组合。

## 2.2 试验步骤

浸泡加载过程如图 2 所示。

1)容器采用不锈钢容器,并在不锈钢的内壁刷一层防腐漆。刚性土模采用不锈钢制造,并在土模上刷一层防腐漆。刷防腐漆是为了防止容器和土模在浸泡液的作用下出现腐蚀。

2)按方案要求配置好相应的浸泡溶液。

3)在刚性土模内侧壁垫一层透水土工布膜,目

的是为了防止软土在加载的过程中从刚性土模的侧壁细孔挤出。

4)将填海场地所取扰动土样装入刚性土模,将



图 2 土样浸泡加载联动试验

Fig. 2 The soaking-load experiments of soil samples

土模置于容器中进行初始加载(30 kPa),倒入准备好的浸泡溶液,浸泡液须淹没整个土模。

5)加载过程中同时按要求记录百分表的读数,以监测土模内土样的竖向位移变形。

6)待土样竖向变形稳定(稳定标准为竖向变形速率 $\leq 0.005$  mm/d)后施加下一级荷载,每级荷载为 25 kPa,直到最后一级荷载值。加载方案如表 4 所示。

表 4 浸泡荷载联动制样加载方案

Table 4 Loading scheme of the soaking-load experiments of soil samples

荷载 / kPa	加载方案
80	30 kPa→55 kPa→80 kPa
130	30 kPa→55 kPa→80 kPa→105 kPa→130 kPa
180	30 kPa→55 kPa→80 kPa→105 kPa→ 130 kPa→155 kPa→180 kPa

7)模拟荷载工况为 180 kPa 完成最后一级荷载加载,在最后一级荷载(180 kPa)作用下竖向变形达到稳定要求之后,再继续浸泡 15 d,让浸泡液中的离子与土样中的离子进行充分交换。整个制样过程约需 3 个月时间。荷载工况为 80 kPa 和 130 kPa 的试样在完成荷载加载后,在最终的荷载加载作用下持续浸泡,保持浸泡时间与荷载工况为 180 kPa 的浸泡荷载联动制样时间相同,都为约 3 个月。

8)整个制样过程当中,为了弥补蒸发导致的容器内溶液减少,进而引起离子浓度的变化,每天定时监测水位变化,通过补充去离子水平衡蒸发造成的影响。“一种土的浸泡荷载联动装置”还可以进一步进行优化,对容器进行密封处理可以解决蒸发问题。由于制造工艺比较复杂,试验未对容器进行密封处理,而是采用通过定时补充去离子水的方式来解决这个问题。

9)整个制样过程完成之后,即得到“印记”有不同赋存环境要素的人工土样,可用于后续物理力学性质试验(抗剪强度、固结试验、蠕变试验、渗透试验、离子组分的测定等)和细观结构试验(压汞实验、扫描电镜等),以研究填海作用下环境要素扰动对物理力学性质和细观结构的影响,进而基于物理力学性质试验和细观结构试验数据研究填海作用下环境要素扰动对物理力学性质和细观结构影响机理。

对制得的人工土样进行后续物理力学性质试验和细观结构试验的取样及其编号如图 3。抗剪强度试验仅为后续试验的一部分。



图 3 浸泡荷载联动试验所得人工土样

Fig. 3 Soil samples obtained through soaking-load experiments

### 3 人工土样的含水率和孔隙比

钦州港临海园区和防城港企沙工业园区填海场地所取扰动土样在不同工况条件下通过浸泡荷载联动试验获得的人工土样的含水率  $\omega$  和孔隙比  $e$  见表 5 和表 6。

表 5 人工土样含水率

Table 5 Moisture content of artificial soft soil samples

地点	浸泡溶液	含水率 $\omega/\%$		
		加载荷载 80 kPa	加载荷载 130 kPa	加载荷载 180 kPa
钦州	工况 1	41.6	36.5	28.9
	工况 2	34.6	34.7	35.0
	工况 3	33.3	30.3	29.1
	工况 4	34.8	33.5	33.2
	工况 5	27.7	25.8	24.3
防城港	工况 6	50.54	47.83	45.20
	工况 7	49.25	47.06	44.62
	工况 8	46.37	42.94	41.01

表 6 人工土样孔隙比

Table 6 The void ratio of artificial soft soil samples

地点	浸泡溶液	孔隙比 $e$		
		加载荷载 80 kPa	加载荷载 130 kPa	加载荷载 180 kPa
钦州	工况 1	1.10	1.00	0.85
	工况 2	0.96	0.95	0.94
	工况 3	0.90	0.83	0.77
	工况 4	0.95	0.94	0.89
	工况 5	0.80	0.77	0.72
防城港	工况 6	1.47	1.38	1.31
	工况 7	1.43	1.36	1.29
	工况 8	1.33	1.24	1.19

土样的孔隙比  $e$  随附加荷载应力的变化规律如图 4 所示。由图 4 可知,在同一浸泡液工况条件下,人工土样的孔隙比  $e$  均随附加荷载应力的增加而减少。其原因是,在附加荷载应力的作用下发生了压缩变形,从而孔隙比减小。

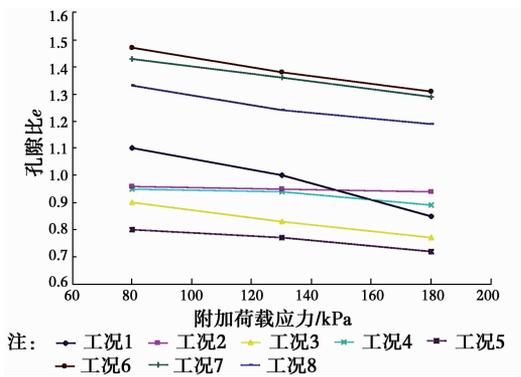
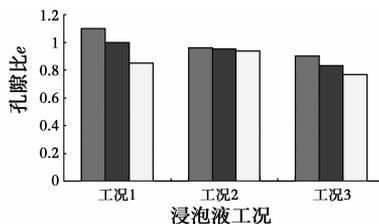


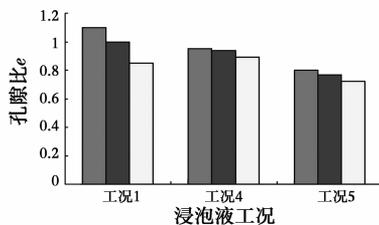
图 4 人工土样孔隙比  $e$  随附加荷载应力的变化

Fig. 4 Change of void ratio of artificial soft soil samples along with the additional load stress of coastal reclamation layer

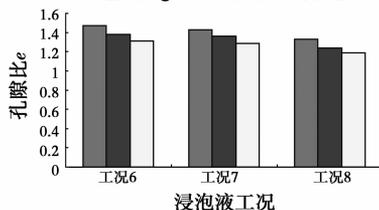
钦州土样浸泡荷载联动试验的工况 1、工况 2 和工况 3 是浸泡液离子组分中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变;工况 1、工况 4 和工况 5 是浸泡液离子组分中的  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变;防城港土样浸泡荷载联动试验的工况 6、工况 7 和工况 8 是的浸泡液离子组分中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变。人工土样的孔隙比  $e$  随浸泡液中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的变化规律如图 5 所示。



(a) 钦州人工土样孔隙比  $e$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度的变化



(b) 钦州人工土样孔隙比  $e$  随浸泡液  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的变化



(c) 防城港人工土样孔隙比  $e$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度的变化

注: ■ 80 kPa ■ 130 kPa □ 180 kPa

图 5 人工土样孔隙比  $e$  随浸泡液离子浓度的变化

Fig. 5 Change of void ratio  $e$  of artificial soft soil samples along with the ionic concentration of soak liquid

由图 5 可知,在附加荷载应力相同的情况下,除钦州土样在 180 kPa 的情况下外,人工土样的孔隙比  $e$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的增加略有减少,其原因可能是一部分孔隙由于  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子的沉淀作用形成的胶结物质填充所致。

只有钦州土样在 180 kPa 附加荷载应力下出现不一致的情况,以  $\text{Ca}^{2+}$  成分为变化量的浸泡液工况分别为工况 1、工况 2 和工况 3,孔隙比分别为 0.85、0.94、0.77;以  $\text{Mg}^{2+}$  成分为变化量的浸泡液工况分别为工况 1、工况 4 和工况 5,孔隙比分别为 0.85、0.89、0.72。采用“一种土的浸泡荷载联动装置”制样试验是采用同一批土样进行平行试验制样,存在一定的离散差异性,从数据上看,这种差异也较小,由土样的离散差异性引起的可能性较大。

#### 4 土样直接剪切快剪试验及其结果分析

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999),采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪对钦州港临海园区和防城港企沙工业园区人工土样进行快剪试验。直剪试样的直径为 61.8 mm,高为 20 mm。钦州和防城港软土在不同工况条件下,通过浸泡荷载联动装置获得的人工制备土样的黏聚力  $c$  如表 7、图 6 和图 7 所示。

表 7 人工土样黏聚力

Table 7 Cohesive force of artificial soft soil samples

地点	浸泡溶液	黏聚力 $c$ /kPa		
		加载荷载 80 kPa	加载荷载 130 kPa	加载荷载 180 kPa
钦州	工况 1	6.33	8.59	21.70
	工况 2	7.36	11.27	17.04
	工况 3	13.15	18.78	22.10
	工况 4	7.21	9.82	16.36
	工况 5	10.07	15.08	19.97
防城港	工况 6	7.5	12.34	18.72
	工况 7	9.33	13.11	19.70
	工况 8	12.52	15.04	20.77

人工制备土样的黏聚力  $c$  随附加荷载应力的变化规律如图 6 所示。

由表 7 和图 6 可知,在同一浸泡液工况条件下,人工土样的粘聚力  $c$  均随附加荷载应力的增加而增大。粘聚力  $c$  增长的原因,是随着附加荷载应力的

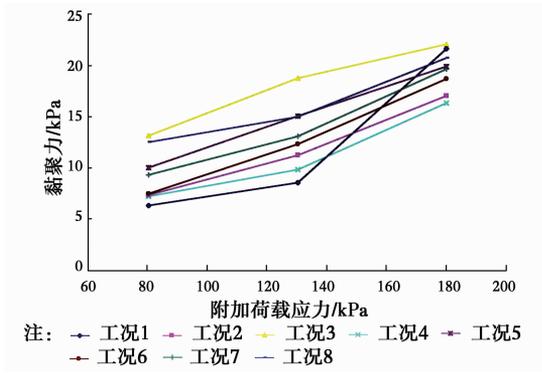


图 6 人工土样粘聚力  $c$  随附加荷载应力的变化

Fig. 6 Change of cohesive force of artificial soft soil samples along with the additional load stress of coastal reclamation layer

增加,土样的压缩变形进一步增加,土样的孔隙比和含水率进一步减少,从而造成粘聚力  $c$  进一步增大。

钦州土样浸泡荷载联动试验的工况 1、工况 2 和工况 3 是浸泡液离子组分中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变;工况 1、工况 4 和工况 5 是浸泡液离子组分中的  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变;防城港土样浸泡荷载联动试验的工况 6、工况 7 和工况 8 是的浸泡液离子组分中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变。人工土样的黏聚力  $c$ ,随浸泡液中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的变化规律如图 7 所示。

由图 7 可知,在附加荷载应力相同的情况下,除钦州土样在 180 kPa 情况下,人工土样的粘聚力  $c$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的增加而增大。推测其原因,可能是一部分孔隙由于  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子的沉淀作用而形成了胶结物质,新增的这一部分胶结物使得土颗粒之间的胶结连接加强,进而使得土样的粘聚力  $c$  增大。在 180 kPa 的情况下,钦州土样出现了例外情况,是加载过程出现了误差导致,后面的防城港的浸泡加载试验,注意了这一问题,保证了加载的准确精度,未出现相应的偏差。

由表 7 数据可知,工况 2 与工况 4 相比,浸泡液工况 2 的  $\text{Ca}^{2+}$  离子变化情况是在海水的基础上增加到原来的 10 倍,浸泡液工况 4 的  $\text{Mg}^{2+}$  离子变化情况是在海水的基础上增加到原来的 10 倍,在荷载相同的情况下, $\text{Ca}^{2+}$  离子变化对粘聚力  $c$  变化影响均大于  $\text{Mg}^{2+}$  离子变化对粘聚力  $c$  变化影响。工况 3 与工况 5 相比,浸泡液工况 3 的  $\text{Ca}^{2+}$  离子变化情况是在海水的基础上增加到原来的 100 倍,浸泡液工况 5 的  $\text{Mg}^{2+}$  离子变化情况是在海水的基础上增加到原来的 100 倍,在荷载相同的情况下,也出现了  $\text{Ca}^{2+}$  离子变化对粘聚力  $c$  变化影响均大于  $\text{Mg}^{2+}$  离

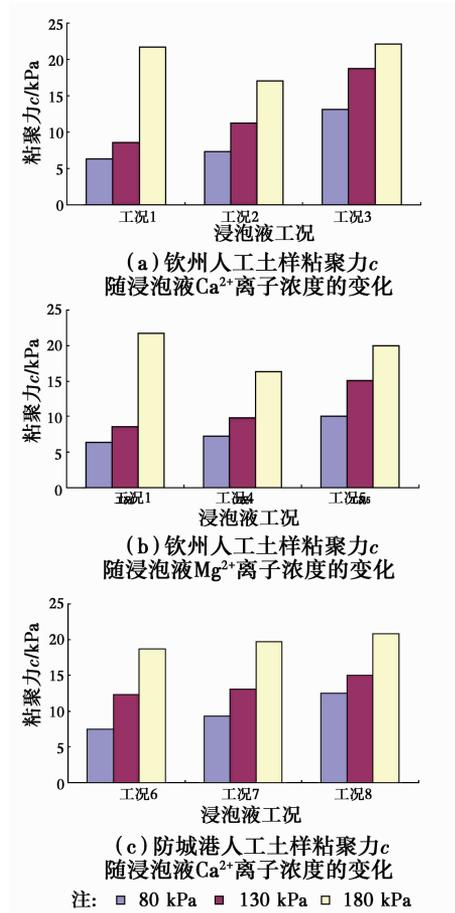


图 7 人工土样粘聚力  $c$  随浸泡液离子浓度的变化

Fig. 7 Change of cohesive force of artificial soft soil samples along with the ionic concentration of soak liquid

子变化对粘聚力  $c$  变化影响。仅从地基处理加固的角度来看,如果采用化学加固的方法,对粘聚力  $c$  的影响, $\text{Ca}^{2+}$  离子比  $\text{Mg}^{2+}$  离子的效果要好。

土的内摩擦角  $\varphi$  试验结果如表 8、图 8 和图 9 所示。

表 8 人工土样内摩擦角

Table 8 Internal friction angle of artificial soft soil samples

地点	浸泡溶液	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		
		加载荷载 80 kPa	加载荷载 130 kPa	加载荷载 180 kPa
钦州	工况 1	2.12	2.81	3.28
	工况 2	2.65	2.73	3.35
	工况 3	4.7	4.39	4.29
	工况 4	2.94	3.32	3.71
	工况 5	1.74	2.39	2.64
防城港	工况 6	3.66	3.83	4.57
	工况 7	3.60	4.00	4.86
	工况 8	4.06	4.92	5.48

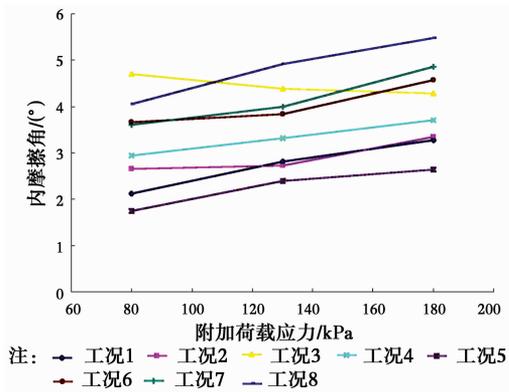


图 8 人工土样内摩擦角  $\varphi$  随附加荷载应力的变化

Fig. 8 Change of internal friction angle of artificial soft soil samples along with the additional load stress of coastal reclamation layer

由表 8、图 8 可知,除工况 3 在同一浸泡液工况条件下外,人工土样的内摩擦角  $\varphi$  均随附加荷载应力的增加而增大。推测其内摩擦角  $\varphi$  增大的原因是,随着附加荷载应力的增加,土样的压缩变形进一步增加,土样的孔隙比和含水率进一步减少,其内摩擦角  $\varphi$  进一步增大。

工况 3 的内摩擦角  $\varphi$  值分别为 4.7、4.39、4.29,没有明显的变小的趋势,推断其原因,可能是由于附加荷载应力和浸泡液中的  $\text{Ca}^{2+}$  成分相互耦合影响的关系,附加荷载应力的压密作用下孔隙比减少(孔隙比分别为 0.90、0.83、0.77),渗透系数减少,浸泡液中的  $\text{Ca}^{2+}$  成分对土样的影响减弱。

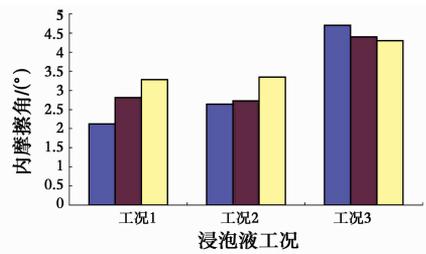
人工土样的内摩擦角  $\varphi$ ,随浸泡液中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的变化规律,如图 9 所示。

由图 9 可知,在附加荷载应力相同的情况下,人工土样的内摩擦角  $\varphi$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度的增加而略有增大,而随浸泡液  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的增加反而略有减少,其原因尚需进一步的实验探明。仅从地基处理加固的角度来看,如果采用化学加固的方法,在增加抗剪强度时对内摩擦角  $\varphi$  的影响方面, $\text{Ca}^{2+}$  离子比  $\text{Mg}^{2+}$  离子的效果要好。

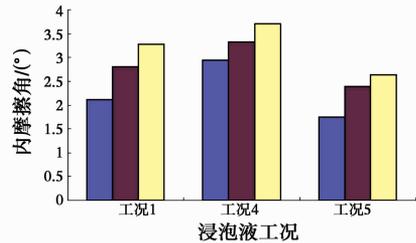
表 9 不同环境要素之间对人工土样黏聚力  $c$  的影响耦合分析表

Table 9 Coupling analysis of impact on cohesive force  $c$  of artificial soft soil samples among environmental elements

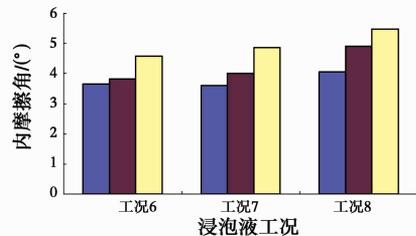
地点	环境要素		环境要素		环境要素变化量		黏聚力 $c$ 变化量 $\Delta_c$ / kPa	比较分析
	荷载/kPa	浸泡液	黏聚力 $c$ /kPa	荷载/kPa	浸泡液	黏聚力 $c$ /kPa		
钦州	80	工况 1	6.33	180	工况 1	21.7	100	6.82 + 15.37 = 22.19 kPa 由浸泡液变化单独引起粘聚力 $c$ 增大与由荷载变化单独引起粘聚力 $c$ 增大之和为 22.19 kPa,大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的粘聚力 $c$ 增大 15.77 kPa。
				180	工况 3	22.1	100	
				80	工况 3	13.15	0	



(a) 钦州人工土样内摩擦角  $\varphi$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度的变化



(b) 钦州人工土样内摩擦角  $\varphi$  随浸泡液  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的变化



(c) 防城港人工土样内摩擦角  $\varphi$  随浸泡液  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度的变化  
注: 80 kPa 130 kPa 180 kPa

图 9 人工土样内摩擦角  $\varphi$  随浸泡液离子浓度的变化  
Fig. 9 Change of internal friction angle  $\varphi$  of artificial soft soil samples along with the ionic concentration of soak liquid

综合对比  $\text{Ca}^{2+}$  离子与  $\text{Mg}^{2+}$  离子对粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的影响,在防城港的浸泡实验过程中未进行镁离子变化影响的浸泡实验。

### 5 赋存环境要素对抗剪强度指标的耦合分析

赋存环境要素对黏聚力  $c$  的耦合分析,如表 9 所示。

续表 9

地点	环境要素		黏聚力 $c$ /kPa	环境要素		黏聚力 $c$ /kPa	环境要素变化量		黏聚力 $c$ 变化量 $\Delta c$ /kPa	比较分析
	荷载/kPa	浸泡液		荷载/kPa	浸泡液		荷载变化量/kPa	浸泡液变化量		
钦州	80	工况 1	6.33	80	工况 5	10.07	0	$\Delta Mg^{2+} = \omega_3^{镁} - \omega_1^{镁} = 99\omega_{软海镁}$	3.74	3.74+15.37=19.11 kPa 由浸泡液变化单独引起黏聚力 $c$ 增大与由荷载变化单独引起黏聚力 $c$ 增大之和为 19.11 kPa, 大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的黏聚力 $c$ 增大 13.64 kPa。
				180	工况 1	21.7	100	0	15.37	
				180	工况 5	19.97	100	$\Delta Mg^{2+} = \omega_3^{镁} - \omega_1^{镁} = 99\omega_{软海镁}$	13.64	
防城港	80	工况 6	7.5	80	工况 8	12.52	0	$\Delta Ca^{2+} = \omega_8^{钙} - \omega_6^{钙} = 99\omega_{防海钙}$	5.02	5.02+11.22=16.24kPa 由浸泡液变化单独引起黏聚力 $c$ 增大与由荷载变化单独引起黏聚力 $c$ 增大之和为 16.24 kPa, 大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的黏聚力 $c$ 增大 13.27 kPa。
				180	工况 6	18.72	100	0	11.22	
				180	工况 8	20.77	100	$\Delta Ca^{2+} = \omega_8^{钙} - \omega_6^{钙} = 99\omega_{防海钙}$	13.27	

由表 9 可知:

1)填海层附加荷载应力与浸泡液离子浓度同时变化对黏聚力  $c$  变化的总效应并不简单等于填海层附加荷载应力单独变化引起的效应与浸泡液离子浓度单独变化引起的效应之和,总效应小于填海层附加荷载应力单独变化引起的效应与浸泡液离子浓度

单独变化引起的效应之和。

2)环境要素填海层附加荷载应力与浸泡液离子浓度对黏聚力  $c$  的影响存在某种相互耦合的关系。相互耦合的机理尚不清楚,须进一步试验研究探明。

赋存环境要素对内摩擦角  $\varphi$  的耦合分析,如表 10 所示。

表 10 不同环境要素之间对人工土样的内摩擦角的影响的耦合分析表

Table 10 Coupling analysis of impact on internal friction angle of artificial soft soil samples among environmental elements

地点	环境要素		内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	环境要素		内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )	环境要素变化量		内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$	比较分析
	荷载/kPa	浸泡液		荷载/kPa	浸泡液		荷载变化量/kPa	浸泡液变化量		
钦州	80	工况 1	2.12	80	工况 3	4.7	0	$\Delta Ca^{2+} = \omega_3^{钙} - \omega_1^{钙} = 99\omega_{软海钙}$	0.045	0.045+0.02=0.065 由浸泡液变化单独引起内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$ 与由荷载变化单独引起孔内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$ 之和为 0.065。由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$ 为 0.038。
				180	工况 1	3.28	100	0	0.02	
				180	工况 3	4.29	100	$\Delta Ca^{2+} = \omega_3^{钙} - \omega_1^{钙} = 99\omega_{软海钙}$	0.038	
钦州	80	工况 1	2.12	80	工况 5	1.74	0	$\Delta Mg^{2+} = \omega_5^{镁} - \omega_1^{镁} = 99\omega_{软海镁}$	-0.007	荷载同为 80 kPa 的情况下,浸泡液工况 1 到工况 5,镁离子的浓度增大到原来的 100 倍,内摩擦角,反而还略有减少。
				180	工况 1	3.28	100	0	0.02	
				180	工况 5	2.64	100	$\Delta Mg^{2+} = \omega_5^{镁} - \omega_1^{镁} = 99\omega_{软海镁}$	0.009	
防城港	80	工况 6	1.47	80	工况 8	4.06	0	$\Delta Ca^{2+} = \omega_8^{钙} - \omega_6^{钙} = 99\omega_{防海钙}$	0.007	0.007+0.016=0.023 由浸泡液变化单独引起内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$ 与由荷载变化单独引起孔内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$ 之和为 0.023。由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的内摩擦角 $\tan\varphi$ 变化量 $\Delta\tan\varphi$ 为 0.032。
				180	工况 6	4.57	100	0	0.016	
				180	工况 8	5.48	100	$\Delta Ca^{2+} = \omega_8^{钙} - \omega_6^{钙} = 99\omega_{防海钙}$	0.032	

由表 10 可知:填海层附加荷载应力与浸泡液离子浓度同时变化,对内摩擦角  $\varphi$  变化的总效应,并没

有出现一致大于或者小于填海层附加荷载应力单独变化引起的效应与浸泡液离子浓度单独变化引起的

效应之和的现象,由此初步推测,这两种环境要素对土样的内摩擦角的影响相互之间的影响较弱,对内摩擦角  $\varphi$  的耦合效应较小,其试验结果主要受试验精度控制。

## 6 填海作用下环境要素变化对海积软土抗剪强度影响的机理

海积软土的赋存环境在填海作用下将发生变化,由室内模拟试验结果可知,土样的抗剪强度受到赋存环境要素变化的影响。当附加荷载应力(填海场地由填海层的自重荷载引起的应力)增大时,土样发生压缩变形,孔隙比减小,土样的抗剪强度增大,粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  都随之增大。当浸泡液的离子组分(填海场地海积软土的孔隙液化学组分)发生变化时,不同的离子组分发生变化,对软土抗剪强度的效应有所不同,根据改变浸泡液中的  $\text{Ca}^{2+}$  离子和  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度的实验结果对比分析可知,  $\text{Ca}^{2+}$  离子和  $\text{Mg}^{2+}$  离子的浓度增大过程中,土样的胶结连接增强,粘聚力  $c$  增大,但  $\text{Ca}^{2+}$  离子对抗剪强度的影响大于  $\text{Mg}^{2+}$  离子的影响。

对抗剪强度的影响,赋存环境要素之间存在相互耦合作用。基于室内试验模拟结果来看,附加荷载应力与浸泡液的离子组分之间对粘聚力  $c$  的相互影响作用较大,对内摩擦角  $\varphi$  的相互影响作用较小。

## 7 结论

以钦州港临海园区和防城港企沙工业园填海场地海积软土为研究对象,分析了填海造地对填海场地海积软土赋存环境变化的影响,采用“一种土的浸泡荷载联动装置”对填海场地在填海层附加荷载应力与海积软土孔隙水化学组分发生变化时进行了人工模拟制样,并对“印记”了赋存环境要素的人工软土样品进行了抗剪强度室内土工试验。

1)填海造地对填海场地海积软土的赋存环境变化产生影响,从岩土工程地质的角度,主要有填海层对海积软土层的附加荷载应力、水力联系变化、水化学场变化三大赋存环境要素变化。

2)填海层对海积软土层的附加荷载应力、水力联系变化、水化学场变化三大赋存环境要素,可采用“一种土的浸泡荷载联动装置”进行模拟。

3)随着填海层附加荷载应力的增大,人工软土样的粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随之增大;随着浸泡液不同的离子成分浓度变化,对人工软土样的抗剪强度指标影响效果不一。试验结果显示,随着离子浓度的增加,  $\text{Ca}^{2+}$  比  $\text{Mg}^{2+}$  对抗剪强度指标的影响大。

4)填海层附加荷载应力与浸泡液离子组分双因素同时作用下,对土样的抗剪强度指标存在相互耦合效应,其耦合效应对粘聚力  $c$  影响明显,对内摩擦角  $\varphi$  影响较小。

### 参考文献:

- [1] 葛振鹏,戴志军,谢华亮,等. 北部湾海湾岸线时空变化特征研究[J]. 上海国土资源, 2014, 35(2): 49-53.  
GE Z P, DAI Z J, XIE H L, et al. The Northern Gulf coastline of the temporal and spatial variation characteristics [J]. Shanghai Land and Resources, 2014, 35(2): 49-53. (in Chinese)
- [2] 孙永根,高俊国,朱晓明. 钦州保税港区填海造地工程对海洋环境的影响[J]. 海洋科学, 2012, 36(12): 84-89.  
SUN Y G, GAO J G, ZHU X M. Qinzhou bonded port of reclamation reclamation project on marine environment [J]. Marine Sciences, 2012, 36(12): 84-89. (in Chinese)
- [3] 董德信,李谊纯,陈宪云,等. 大规模填海工程对钦州湾水动力环境的影响[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 357-364, 369.  
DONG D X, LI Y C, CHEN X Y, et al. The influence of large-scale reclamation on the hydrodynamic environment of Qinzhou Bay [J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(4): 357-364, 369. (in Chinese)
- [4] 刘汉民,周东,袁海波,等. 填海区水化学场变异对细粒土细观结构的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(Sup1): 1-4, 8.  
LIU H M, ZHOU D, YUAN H B, et al. Effect of variation of water chemical field in reclamation area on fine structure of fine grained soil [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(Sup1): 1-4, 8. (in Chinese)
- [5] YI Y L, GU L Y, LIU S Y. Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blast furnace slag [J]. Applied Clay Science, 2015, 103(1): 71-76.
- [6] 欧孝夺,潘鑫,殷宪太,等. 广西北部湾人造陆域吹填土生物固结试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 28-33.  
OU X D, PAN X, YIN X T, et al. Guangxi Beibu gulf artificial reclaimed soil for land consolidation test research [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 28-33. (in Chinese)
- [7] 广西壮族自治区海洋局. 广西壮族自治区 2011 年海洋环境质量公报[EB/OL]. (2012-05-31). [http://www.gxoa.gov.cn/gxhyj\\_hyhb\\_jcgcyb/2012/05/31/98313eab8fdd464886b5cb40840d43f0.html](http://www.gxoa.gov.cn/gxhyj_hyhb_jcgcyb/2012/05/31/98313eab8fdd464886b5cb40840d43f0.html)  
The Guangxi Zhuang Autonomous Region Oceanic

- Administration. The Guangxi Zhuang Autonomous Region marine environmental quality bulletin, 2011 [EB/OL]. (2012-05-31). [http://www.gxoa.gov.cn/gxhyj\\_hyhb\\_jecgyb/2012/05/31/98313eab8fdd464886b5cb40840d43f0.html](http://www.gxoa.gov.cn/gxhyj_hyhb_jecgyb/2012/05/31/98313eab8fdd464886b5cb40840d43f0.html) (in Chinese)
- [8] 刘汉民,吴恒,周东. 强夯法处理吹填砂地基机理分析及应用[J]. 施工技术,2012,41(Sup1): 58-61.  
LIU H M, WU H, ZHOU D. Mechanism analysis and application of dynamic consolidation method in treatment of blown sand foundation [J]. Construction Technology, 2012, 41(Sup1): 58-61. (in Chinese)
- [9] 胡纯龙. 广西北部湾填海造陆工程地基基础及施工方法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(6): 51-54.  
HU C L. The Guangxi Beibu Gulf reclamation engineering foundation and construction method [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(6): 51-54. (in Chinese)
- [10] WU C J, YE G L, ZHANG L L, et al. Depositional environment and geotechnical properties of Shanghai clay: a comparison with Ariake and Bangkok clays [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(3): 717-732.
- [11] BO M W, ARULRAJAH A, SUKMAK P, et al. Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(3): 600-613.
- [12] GANESAN S, KUO M, BOLTON M. Influences on pipeline interface friction measured in direct shear tests [J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(1): 1-13.
- [13] PATIÑO H, SORIANO A, GONZÁLEZ J. Failure of a soft cohesive soil subjected to combined static and cyclic loading [J]. Soils and Foundations, 2013, 53(6): 910-922.
- [14] GUO L, WANG J, CAI Y Q, et al. Undrained deformation behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 50(7): 28-37.
- [15] 吴恒,刘汉民,周东,等. 一种土的浸泡荷载联动装置[P]. 中国,CN103454154A,2013-12-18.  
WU H, LIU H M, ZHOU D, et al. The device of soil soaking-load linkage device [P]. Chinese patent, CN103454154A, 2013-12-18. (in Chinese)
- [16] 李栋婵.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ // $\text{Cl}^-$ - $\text{H}_2\text{O}$  四元体系 15℃、35℃介稳相平衡的研究[D]. 成都:成都理工大学,2007.  
LI D C. Studies on the meta-stable equilibrium of the quaternary system  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ // $\text{Cl}^-$ - $\text{H}_2\text{O}$  at 15℃ and 35℃ [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 陈美珍,余杰.  $\text{MgCl}_2$ - $\text{NaCl}$ - $\text{H}_2\text{O}$  体系的相图与盐卤中氯化镁提取的方法[J]. 海湖盐与化工,1995, 24(5): 26-27, 43.  
CHEN M Z, YU J. Magnesium chloride extraction method in phase diagram and bittern of system  $\text{MgCl}_2$ - $\text{NaCl}$ - $\text{H}_2\text{O}$  [J]. Sea-Lake Salt and Chemical Industry, 1995, 24(5): 26-27, 43. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)