引用格式:刘汉民, 周 东, 吴 恒, 等. 填海作用对海积软土渗透性影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 332—339
Liu Hanmin, Zhou Dong, Wu Heng, et al. Experimental study on coastal reclamation impact on the permeability of marine soft soil[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 332—339

填海作用对海积软土渗透性影响的试验研究

刘汉民[1,2,3] 周 东[1,2*] 吴 恒[1,2] 焦文灿[1,2] 王业田[1,2]
(广西大学土木建筑工程学院[1],工程防灾与结构安全教育部重点实验室[2],南宁 530004;
湖南科技学院土木与环境工程学院[3],永州 425199)

摘 要 以钦州港临海园区和防城港企沙工业园区填海场地海积软土为研究对象,采用机制模拟装置(一种土的浸泡荷载联动装置)模拟了海积软土赋存环境要素:填海层附加荷载应力和孔隙水化学组分离子浓度发生变化的情况;并成功地获得了人工土样。对人工土样的渗透特性及其孔隙比进行了测试研究,分析了填海层附加荷载应力和孔隙水化学组分离子浓度发生变化对人工软土样的渗透性的影响。研究表明:人工土样的 e-lg$k$ 曲线近似呈直线关系;人工土样的孔隙比 e 和渗透系数 k,随填海层附加荷载应力和孔隙水化学组分离子浓度变化而变化;填海层附加荷载应力与孔隙水化学组分两要素对人工土样的孔隙比 e 和渗透系数 k 的影响存在相互影响、相互耦合的效应。

关键词 海积软土 渗透性 填海造地 机制模拟 赋存环境
中图法分类号 TU447; **文献标志码** B

进入21世纪以来,我国进行大规模的填海造地工程[1—3],其中很大一部分作为工业及城市建设用地。本次研究对象即钦州港临海园区和防城港企沙工业园填海造地工程主要由吹砂填海完成,然后进行地基处理[4,5];之后直接用于相应的工程设施建设。填海区域分布大量的海积软土[6—8]。在对地基处理进行分析时,下伏海积软土的渗透系数是一个很重要的参数,它直接影响到沉降速率和固结度的计算。

填海造地作用对填海场地海积软土的赋存环境变化产生了多方面的影响,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。随着填海造地作用对海积软土赋存环境的扰动变化,海积软土的物理、力学性状随之发生变化。渗透性是是土的主要工程力学性质之一。在赋存环境发生变化的过程中,海积软土的渗透性将随之发生重要的变化。

一些学者从不同的角度,对软土的渗透性进行了研究,得到了一些有益的结论。Nishida 等[9]通过大量试验研究,得出了渗透系数 k 与孔隙比 e 的经验关系式,认为黏性土的渗透系数在 $k=10^{-7}\sim10^{-4}$ cm/s 范围内,e-lg$k$ 曲线呈直线关系。Tavenas 等[10]通过大量的原状土室内渗透试验,指出 e-lg$k$ 的直线关系在实际工程中是普遍有效的。吕卫清等[11]对正常固结土渗透系数与固结应力关系进行了研究;李西斌等[12]在考虑软土流变特性和应力历史的条件下进行了渗透试验研究。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渗透性影响研究的报道。

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如表1。

表1 海积软土物理性质
Table 1 The physical properties of marine soft soil

场地	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	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。

钦州港临海园区海积软土土样样本的颗粒级配

2017年3月18日收到 国家自然科学基金(51178124,51378132)资助

第一作者简介:刘汉民(1981—),博士研究生。研究方向:岩土工程。E-mail:liuhanmin81@126.com。
*通信作者简介:周 东(1962—),教授,博士研究生导师。研究方向:岩土工程。E-mail:zhd516@163.com。

分布情况,其中粒径小于 0.075 mm 的细粒土含量达到 80.55%,粒径小于 0.005 mm 的黏粒含量达到 43.69%。

防城港企沙工业园海积软土土样样本的颗粒级配分布情况,其中粒径小于 0.075 mm 的细粒土含量达到 82.2%,粒径小于 0.005 mm 的黏粒含量达到 33.3%。

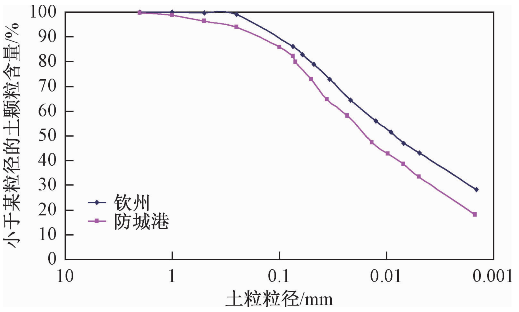


图 1　钦州港临海园区和防城港企沙工业园颗粒级配累积曲线

Fig. 1　The cumulative curve of grain size in Qinzhou and Fangchenggang

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[13]”来实现。

填海层对海积软土层的附加荷载应力采用 80 kPa、130 kPa、180 kPa 三种荷载等级工况进行加载模拟。

水力联系变化通过装置“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。填海前海积软土是与海水直接相接处的,海积软土的孔隙水的游离态的离子化学组分与海水的游离态的离子化学组分是相同的,浓度也一样。因此可以用海水的游离态的离子化学组分及其浓度的初始情况可作为填海前海积软土的孔隙水的游离态的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,如表 2 所示。

本次试验,主要针对海水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子作为变量对海积软土性状的影响进行研究。由文献资料可知[14,15],Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 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,是有可能出现大浓度 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的情况的。海水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量相对于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的溶解度而言是很小的,在实验的过程中采用较大的级差,即以填海区的海水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度为基准,在此基础上约为海水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度的 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。

填海区的浸泡荷载联动试验,荷载加载为 80 kPa、130 kPa、180 kPa 三种工况,浸泡液如表 3 中的八种工况,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。

表 2　填海区海水主要化学成分

Table 2　The main chemical composition of seawater in coastal reclamation district

场地	$Na^+/(g \cdot L^{-1})$	$K^+/(g \cdot L^{-1})$	$Ca^{2+}/(g \cdot L^{-1})$	$Mg^{2+}/(g \cdot L^{-1})$	$Al^{3+}/(g \cdot L^{-1})$	Fe^{2+} 或 $Fe^{3+}/(g \cdot L^{-1})$	pH
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^{3+} 或 Fe^{2+}、Al^{3+} 离子成分含量接近空白。

表 3　填海区海积软土浸泡液方案

Table 3　The soak liquid of marine soft soil in coastal reclamation district　　$/(g \cdot L)^{-1}$

场地	工况	溶剂	溶质	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
钦州	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)	$CaCl_2$	$\omega_{2钙}=10\omega_{钦海钙}$	$\omega_{2镁}=\omega_{钦海镁}$	$\omega_{2钠}=\omega_{钦海钠}$	$\omega_{2钾}=\omega_{钦海钾}$
	工况 3	海水(钦州)	$CaCl_2$	$\omega_{3钙}=100\omega_{钦海钙}$	$\omega_{3镁}=\omega_{钦海镁}$	$\omega_{3钠}=\omega_{钦海钠}$	$\omega_{3钾}=\omega_{钦海钾}$
	工况 4	海水(钦州)	$MgCl_2$	$\omega_{4钙}=\omega_{钦海钙}$	$\omega_{4镁}=10\omega_{钦海镁}$	$\omega_{4钠}=\omega_{钦海钠}$	$\omega_{4钾}=\omega_{钦海钾}$
	工况 5	海水(钦州)	$MgCl_2$	$\omega_{5钙}=\omega_{钦海钙}$	$\omega_{5镁}=100\omega_{钦海镁}$	$\omega_{5钠}=\omega_{钦海钠}$	$\omega_{5钾}=\omega_{钦海钾}$
防城港	工况 6	海水(防城港)	未加	$\omega_{6钙}=\omega_{防海钙}$	$\omega_{6镁}=\omega_{防海镁}$	$\omega_{6钠}=\omega_{防海钠}$	$\omega_{6钾}=\omega_{防海钾}$
	工况 7	海水(防城港)	$CaCl_2$	$\omega_{7钙}=10\omega_{防海钙}$	$\omega_{7镁}=\omega_{防海镁}$	$\omega_{7钠}=\omega_{防海钠}$	$\omega_{7钾}=\omega_{防海钾}$
	工况 8	海水(防城港)	$CaCl_2$	$\omega_{8钙}=100\omega_{防海钙}$	$\omega_{8镁}=\omega_{防海镁}$	$\omega_{8钠}=\omega_{防海钠}$	$\omega_{8钾}=\omega_{防海钾}$

图 2 土样浸泡加载联动试验

Fig. 2 The soaking-load experiments of soil samples

试验过程说明如下。

(1)容器采用不锈钢容器,并在不锈钢的内壁刷上一层防腐漆。刚性土模采用不锈钢制造,并在土模上刷上一层防腐漆。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,目的是为了防止在加载的过程中软土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,并将土模置于容器中进行初始加载(30 kPa)和倒入准备好浸泡溶液,浸泡液须淹没整个土模。

(5)加载的过程,同时按记录表分表的读数,用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≤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。具体加载方案如表 4。

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 /kPa

荷载工况	加载方案
80	30→55→80
130	30→55→80→105→130
180	30→55→80→105→130→155→180

(7)完成最后一级荷载(180 kPa)加载,当最后一级荷载(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相对比较充分的交换。整个制样过程,约需 3 个月时间。

(8)整个制样过程当中,为了弥补因为蒸发而引起的容器内的溶液体积减少,进而引起离子成分的浓度的变化,每天都定时监测水位的变化,通过补充去离子水来平衡因为蒸发发生的影响。从这一点看,装置"一种土的浸泡荷载联动装置"还可以进一步进行优化,在装置的构造上,对容器进行密封处理,这样就可以解决蒸发问题了。由于制造的工艺上,相对比较复杂,本批次试验尚未对容器进行密封处理,而是采用通过定时补充去离子水方式来解决这个问题。

(9)整个制样过程完成之后,就得到"印记"有不同赋存环境要素的人工土样,就可采用人工土样进行后续的物理力学性质试验(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),研究环境要素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环境要素对物理力学性质和细观结构影响机理。

对成功制得的人工土样,进行后续的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。本文的渗透试验,仅为后续试验中的一部分试验。

图 3 浸泡荷载联动试验所得人工土样

Fig. 3 The 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 ω 和孔隙比 e,如表 5 和表 6。

表 5 人工土样含水率

Table 5 The moisture content of artificial soft soil samples /%

场地	浸泡溶液	填海层附加荷载应力/kPa		
		80	130	180
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

土样的孔隙比 e,随附加荷载应力的变化规律,如图 4。

由图 4 可知,人工土样的孔隙比 e,在同一浸泡液工况条件下,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,发生了固结变形,从而孔隙比减少。

表 6　人工土样孔隙比 *e*

Table 6　The void ratio *e* of artificial soft soil samples

场地	浸泡溶液	填海层附加荷载应力/kPa		
		80	130	180
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

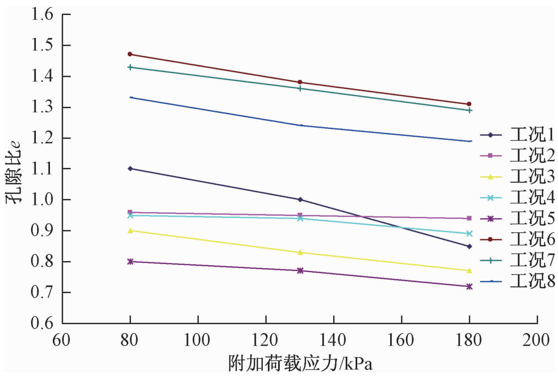


图 4　人工土样孔隙比 e 随附加荷载应力变化图

Fig. 4　The change chart of void ratio e 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 是的浸泡液离子组分是 Ca^{2+} 离子浓度发生了变化,其他离子浓度未变;钦州土样浸泡荷载联动试验的工况 1、工况 4 和工况 5 的浸泡液离子组分是 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是 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 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的变化规律,如图 5。

由图 5 可知,人工土样的孔隙比 e,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,随浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加略有减少。孔隙比 e 随浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加略有减少的原因可能是一部分孔隙由于 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子的沉淀作用而形成的胶结物质而填充所致。出现钦州土样在 180 kPa 的例外情况,其原因推测可能是浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加对人工土样的孔隙比 e 影响较小,被实验过程中的误差所掩盖。

不同赋存环境要素之间对人工土样的孔隙比 e 影响的耦合分析,如表 7。

由表 7 可知,在上述试验过程中,由荷载因素单独引起的孔隙比减少量与由浸泡液因素单独引起的孔隙比减少量之和大于由荷载因素与浸泡液离子组分变化因素同时变化共同一起引起的孔隙比减少量。这表明,两种因素共同作用的情况下,两因素的作用效应之间存在某种相互影响相互耦合的效应,使得共同作用时的效应并非等于单因素单独作用的效应之和。共同作用时的效应小于单因素单独作用的效应之和的结果表明,两因素共同作用时,由于一个因素的效应使得另一因素的作用效应弱化。

4　人工土样的渗透试验

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999),采用变水头渗透试验方法对钦州港临海园区和防城港企沙工业园区所取扰动土样通过机制模拟装置“一种土的浸泡荷载联动装置”进行浸泡荷载联动试验所得的人工软土土样进行渗透试验。渗透试样的直径为 61.8 mm,高为 40 mm。

钦州和防城港不同赋存条件下,通过浸泡荷载联动装置获得的土样的渗透系数,如表 8。

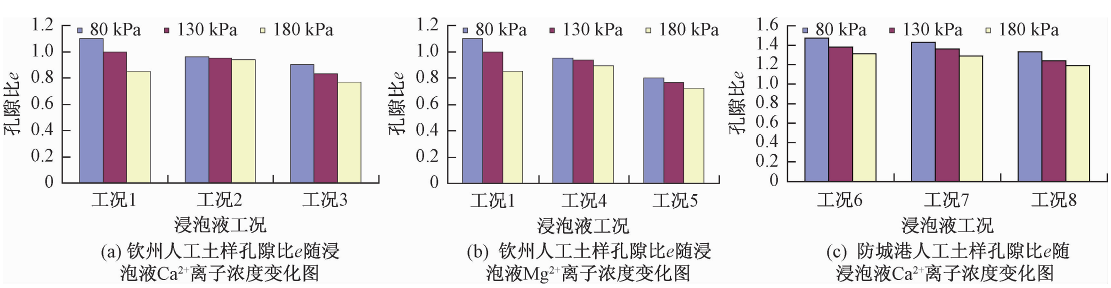


图 5　人工土样孔隙比 e 随浸泡液离子浓度变化图

Fig. 5　The change chart of void ratio e of artificial soft soil samples along with the ionic concentration of soak liquid

表 7　不同环境要素之间对人工土样的孔隙比 e 影响的耦合分析表

Table 7　The coupling analysis of impact on void ratio e of artificial soft soil samples among environmental elements

场地	环境要素 荷载/kPa	环境要素 浸泡液	孔隙比 e	环境要素 荷载/kPa	环境要素 浸泡液	孔隙比 e	环境要素变化量 荷载变化量/kPa	环境要素变化量 浸泡液变化量	孔隙比变化量 Δ_e	比较分析
钦州	80	工况 1	1.10	80	工况 3	0.90	0	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{3钙}-\omega_{1钙}=99\omega_{钦海钙}$	-0.20	-0.20+(-0.25)=-0.45 由浸泡液变化单独引起孔隙比减少与由荷载变化单独引起孔隙比减少之和为 0.45,大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的孔隙比减少的 0.33
				180	工况 1	0.85	100	0	-0.25	
				180	工况 3	0.77	100	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{3钙}-\omega_{1钙}=99\omega_{钦海钙}$	-0.33	
钦州	80	工况 1	1.10	80	工况 5	0.80	0	$\Delta_{Mg^{2+}}=\omega_{5镁}-\omega_{1镁}=99\omega_{钦海镁}$	-0.30	-0.30+(-0.25)=-0.55 由浸泡液变化单独引起孔隙比减少与由荷载变化单独引起孔隙比减少之和为 0.55,大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的孔隙比减少的 0.38
				180	工况 1	0.85	100	0	-0.25	
				180	工况 5	0.72	100	$\Delta_{Mg^{2+}}=\omega_{5镁}-\omega_{1镁}=99\omega_{钦海镁}$	-0.38	
防城港	80	工况 6	1.47	80	工况 8	1.33	0	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{8钙}-\omega_{6钙}=99\omega_{防海钙}$	-0.14	-0.14+(-0.16)=-0.30 由浸泡液变化单独引起孔隙比减少与由荷载变化单独引起孔隙比减少之和为 0.30,大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的孔隙比减少的 0.28
				180	工况 6	1.31	100	0	-0.16	
				180	工况 8	1.19	100	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{8钙}-\omega_{6钙}=99\omega_{防海钙}$	-0.28	

表 8　人工土样渗透系数 k

Table 8　The permeability coefficient k of artificial soft soil samples /(10^{-8} cm·s^{-1})

场地	浸泡溶液	填海层附加荷载应力/kPa 80	130	180
钦州	工况 1	14.1	11.2	6.09
	工况 2	12.0	9.65	7.92
	工况 3	10.3	7.65	4.94
	工况 4	11.3	9.06	7.15
	工况 5	7.16	6.09	4.02
防城港	工况 6	15.8	12.5	8.62
	工况 7	14.1	10.6	8.02
	工况 8	11.0	9.35	7.49

人工土样的渗透系数 k,随附加荷载应力的变化规律,如图 6。

由图 6 可知,人工土样的渗透系数 k,在浸泡液工况相同的情况下,均随附加荷载应力的增加而减少,与孔隙比 e 变化规律一致。

人工土样的渗透系数 k,随浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的变化规律,如图 7。

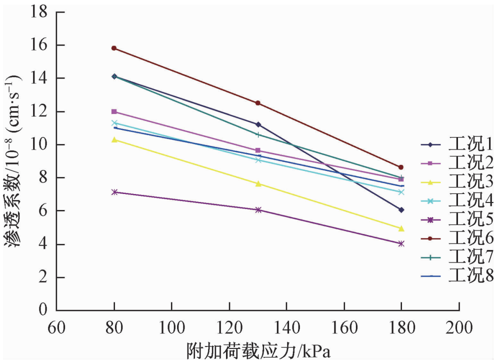


图 6　人工土样渗透系数 k 随附加荷载应力变化图

Fig. 6　The change chart of permeability coefficient k of artificial soft soil samples along with the additional load stress of coastal reclamation layer

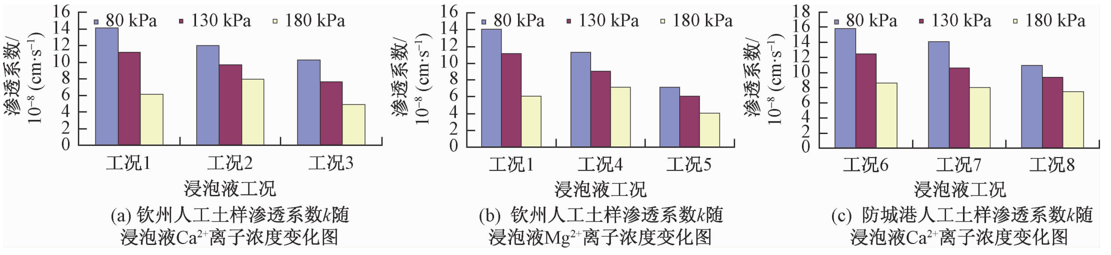


图 7　人工土样渗透系数 k 随浸泡液离子浓度变化图

Fig. 7　The change chart of permeability coefficient k of artificial soft soil samples along with the ionic concentration of soak liquid

表 9　不同环境要素之间对人工土样的渗透系数 k 影响的耦合分析表

Table 9　The coupling analysis of impact on permeability coefficient k of artificial soft soil samples among environmental elements

场地	环境要素		渗透系数 k/(10^{-8}cm·s^{-1})	环境要素		渗透系数 k/(10^{-8}cm·s^{-1})	环境要素变化量		渗透系数变化量 Δ_k/(10^{-8}cm·s^{-1})	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		
				80	工况 3	10.3	0	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{3钙}-\omega_{1钙}=99\omega_{钦海钙}$	−3.8	
钦州	80	工况 1	14.1	180	工况 1	6.09	100	0	−8.01	−3.8+(−8.01)=−11.81 由浸泡液变化单独引起渗透系数减少与由荷载变化单独引起渗透系数减少之和为 11.81，大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的渗透系数减少的 9.16
				180	工况 3	4.94	100	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{3钙}-\omega_{1钙}=99\omega_{钦海钙}$	−9.16	
				80	工况 5	7.16	0	$\Delta_{Mg^{2+}}=\omega_{5镁}-\omega_{1镁}=99\omega_{钦海镁}$	−6.94	
钦州	80	工况 1	14.1	180	工况 1	6.09	100	0	−8.01	−6.94+(−8.01)=−14.95 由浸泡液变化单独引起渗透系数减少与由荷载变化单独引起渗透系数减少之和为 14.95，大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的渗透系数减少的 10.08
				180	工况 5	4.02	100	$\Delta_{Mg^{2+}}=\omega_{5镁}-\omega_{1镁}=99\omega_{钦海镁}$	−10.08	
				80	工况 8	11.0	0	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{8钙}-\omega_{6钙}=99\omega_{防海钙}$	−4.8	
防城港	80	工况 6	15.8	180	工况 6	8.62	100	0	−7.18	−4.8+(−7.18)=−11.98 由浸泡液变化单独引起渗透系数减少与由荷载变化单独引起渗透系数减少之和为 11.98，大于由浸泡液和荷载同时变化共同一起引起的渗透系数减少的 8.31
				180	工况 8	7.49	100	$\Delta_{Ca^{2+}}=\omega_{8钙}-\omega_{6钙}=99\omega_{防海钙}$	−8.31	

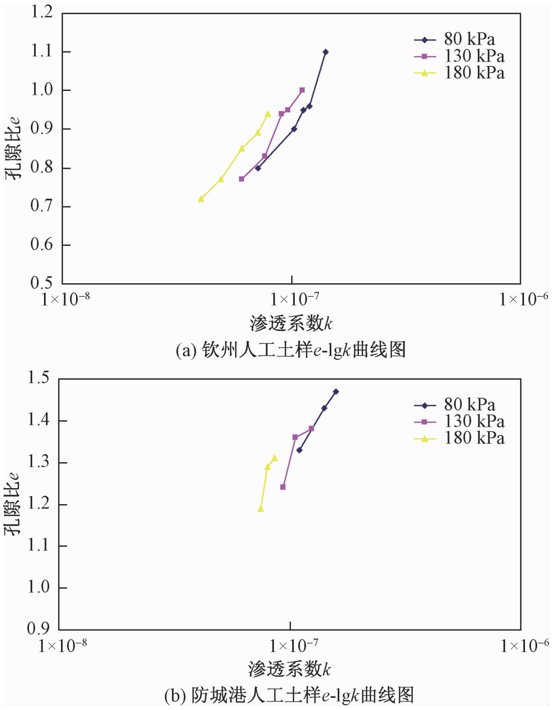
由图 7 可知，人工土样的渗透系数 k，在附加荷载应力相同的情况下，除钦州土样在 180 KPa 的情况下，随浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加略有减少，与孔隙比 e 变化规律一致。

不同赋存环境要素之间对人工土样的渗透系数 k 影响的耦合分析，如表 9。

由表 9 可知，在上述试验过程中，由荷载因素单独引起的渗透系数减少量与由浸泡液因素单独引起的渗透系数减少量之和大于由荷载因素与浸泡液离子组分变化因素同时变化共同一起引起的渗透系数减少量。这表明，两种因素共同作用的情况下，两因素的作用效应之间存在某种相互影响相互耦合的效应，使得共同作用时的效应并非等于单因素单独作用的效应之和。共同作用时的效应小于单因素单独作用的效应之和的结果表明，两因素共同作用时，由于一个因素的效应使得另一因素的作用效应弱化。渗透系数的变化规律与孔隙比的变化规律一致。

5 人工土样的渗透系数与孔隙比的关系

人工土样的渗透系数与孔隙比的关系,如图 8 所示。



(a) 钦州人工土样e-lgk曲线图

(b) 防城港人工土样e-lgk曲线图

图 8 人工土样 e-lg$k$ 曲线图

Fig. 8 The curves e-lg$k$ of artificial soft soil samples

由图 8 可知,人工土样的孔隙比 e 与渗透系数 lg$k$ 曲线近似呈直线关系,与Nishida 等[9]和 Tavenas 等[10]的结论是一致的,再次实验验证了 e-lg$k$ 曲线的直线关系。

6 结论

本文以钦州港临海园区和防城港企沙工业园区填海场地海积软土为研究对象,采用机制模拟装置(一种土的浸泡荷载联动装置)模拟了海积软土赋存环境要素填海层附加荷载应力和孔隙水化学组分离子浓度发生变化的情况,并成功的获得了人工土样。对人工土样的渗透特性及其孔隙比进行了测试研究,分析了赋存环境要素填海层附加荷载应力和孔隙水化学组分离子浓度发生变化时对人工软土样的渗透性的影响。其结论如下。

(1)人工土样的孔隙比 e 和渗透系数 k,在同一浸泡液工况条件下,均随附加荷载应力的增加而减少。

(2)人工土样的孔隙比 e 和渗透系数 k,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,随浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加略有减少。孔隙比 e 随浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加略有减少的原因可能是一部分孔隙由于 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子的沉淀作用而形成的胶结物质而填充所致,出现钦州土样在 180 kPa 的例外情况,其原因推测可能是浸泡液 Ca^{2+} 离子与 Mg^{2+} 离子浓度的增加对人工土样的孔隙比 e 影响较小,被实验过程中的误差所掩盖。

(3)由荷载因素单独引起的孔隙比 e 和渗透系数 k 减少量与由浸泡液因素单独引起的孔隙比 e 和渗透系数 k 减少量之和大于由荷载因素与浸泡液离子组分变化因素同时变化共同一起引起的孔隙比 e 和渗透系数 k 减少量。这表明,两种因素共同作用的情况下,两因素的作用效应之间存在某种相互影响相互耦合的效应,使得共同作用时的效应并非等于单因素单独作用的效应之和。共同作用时的效应小于单因素单独作用的效应之和的结果表明,两因素共同作用时,由于一个因素的效应使得另一因素的作用效应弱化。

(4)人工土样的孔隙比 e 与渗透系数 lg$k$ 曲线近似呈直线关系,与 Nishida 等人和 Tavenas 等人的结论是一致的,再次实验验证了 e-lg$k$ 曲线的直线关系。

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. 上海国土资源, 2014;35(2):49—53

Ge Zhenpeng, Dai Zhijun, Xie Hualiang, *et al*. The northern gulf coastline of the temporal and spatial variation characteristics. Shanghai Land and Resources, 2014;35(2): 49—53

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. 海洋科学,2012; 36(12):84—89

Sun Yonggen, Gao Junguo, Zhu Xiaoming. Qinzhou bonded port of reclamation project on marine environment. Marine Sciences, 2012; 36(12):84—89

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. 广西科学,2014; 21(4):357—364,369

Dong Dexin, Li Yichun, Chen Xianyun, *et al*. The influence of large-scale reclamation on the hydrodynamic environment of Qinzhou Bay. Guangxi Sciences, 2014; 21(4):357—364,369

4 刘汉民,吴 恒,周 东. 强夯法处理吹填砂地基机理分析及应用. 施工技术,2012;41(S1):58—61

Liu Hanmin, Wu Heng, Zhou Dong. Mechanism analysis and application of dynamic consolidation method in treatment of blown sand foundation. Construction Technology, 2012;41(S1):58—61

5 胡纯龙. 广西北部湾填海造陆工程地基基础及施工方法. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009;36(6):51—54

Hu Chunlong. The Guangxi Beibu Gulf reclamation engineering foundation and construction method. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009;36(6):51—54

6 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. 土木建筑与环境工程,2014;36(增刊1):1—4,8
Liu Hanmin, Zhou Dong, Yuan Haibo, *et al*. Effect of variation of water chemical field in reclamation area on fine structure of fine grained soil. Journal of Civil, Architectrual & Environment Engineering, 2014; 36(S1):1—4,8

7 Yi Y L, Gu L Y, Liu S Y. Micro-structural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag. Applied Clay Science,2015;103(1):71—76

8 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. 岩土力学,2015; 36(1): 28—33
Ou Xiaoduo, Pan Xin, Yin Xiantai, *et al*. Guangxi Beibu Gulf artificial reclaimed soil for land consolidation test research. Rock and Soil Mechanics, 2015; 36(1): 28—33

9 Nishida Y, Koike H, Nakagawa S. Coefficient of permeability of highly plastic clays. Proceedings of 4th Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,1971;219—224

10 Tavenas F, Jean P, Leblond P, *et al*. The permeability of natural soft clays, part Ⅱ: permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal,1983;20 (4): 645—660

11 吕卫清,董志良,陈平山,等. 正常固结软土渗透系数与固结应力关系研究. 岩土力学,2009;30(3):769—773
Lü Weiqing, Dong Zhiliang, Chen Pingshan, *et al*. Research on relationship between permeability coefficient and consolidation stress of normal consolidation clay. Rock and Soil Mechanics, 2009; 30(3): 769—773

12 李西斌,谢康和,陈福全. 考虑软土流变特性和应力历史的一维固结与渗透试验. 水利学报,2013; 44(1):18—25
Li Xibin, Xie Kanghe, Chen Fuquan. One dimensional consolidation and permeability tests considering stress history and rheological characteristic of soft soils. Journal of Hydraulic Engineering, 2013;44(1):18—25

13 吴 恒,刘汉民,周 东,等. 一种土的浸泡荷载联动装置,中国专利,CN103454154A,2013-12-18
Wu Heng, Liu Hanmin, Zhou Dong, *et al*. The device of soil soaking-load linkage device. Chinese Patent, CN103454154A, 2013-12-18

14 李栋婵. Na^+, K^+, Ca^{2+}/Cl^-, H_2O 四元体系 15 ℃、35 ℃介稳相平衡的研究. 成都:成都理工大学,2007
Li Dongchan. Studies on the meta-stable equilibrium of the quaternary system Na^+, K^+, Ca^{2+}/Cl^-, H_2O at 15 ℃ and 35 ℃. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007

15 陈美珍,余 杰. $MgCl_2$-NaCl-H_2O 体系的相图与盐卤中氯化镁提取的方法. 海湖盐与化工,1995; 24(5):26—27,43
Chen Meizhen, Yu Jie. Magnesium chloride extraction method in phase diagram and bittern of system $MgCl_2$-NaCl-H_2O. Sea-Lake Salt and Chemical Industry,1995; 24(5):26—27,43

Experimental Study on Coastal Reclamation Impact on the Permeability of Marine Soft Soil

LIU Han-min[1,2,3], ZHOU Dong [1,2*], WU Heng[1,2], JIAO Wen-can[1,2], WANG Ye-tian[1,2]

(College of Civil Engineering and Architecture[1], Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education[2], Guangxi University, Nanning 530004, China; College of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Engineering[3], Yongzhou 425199, China)

[**Abstract**] The research object is marine soft soil in Linhai Park of Qinzhou Port and Qisha Park of Fangchenggang Port. The marine soft soil environment factors, additional load stress of coastal reclamation layer and pore water ionic concentration changes of chemical composition, were simulated by using a soil soaking-load linkage which is mechanism simulation device. And the artificial soil samples were acquired successfully. The permeability and void ratio of the artificial soft soil samples were tested. Impact on the permeability of artificial soft soil samples was analyzed for additional load stress of coastal reclamation layer and pore water ionic concentration changes of chemical composition. Studies have shown that the following: the e-lg$k$ curve of artificial soft soil samples is approximation linear relationship. The void ratio and permeability coefficient of artificial soft soil samples change along with the additional load stress of coastal reclamation layer and pore water ionic concentration changes of chemical composition. There is a mutual coupling effect for void ratio and permeability coefficient of artificial soft soil samples between additional load stress of coastal reclamation layer and pore water chemical composition.

[**Key words**] marine soft soil permeability coastal reclamation mechanism simulation environment