

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.02.18

滨海盐渍土改良试验及钉形搅拌桩承载力评估

马永政^{1,2}, 王开太³, 盛初根³, 陈 斌^{1,2}, 李占涛^{1,2}

(1. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315016; 2. 岩土力学与工程国家重点实验室宁波工程学院工程
软土实验分中心, 浙江 宁波 315016; 3. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315192)

摘要: 针对滨海盐渍土地区水泥土搅拌桩地基处理问题, 通过室内试验研究了含海盐量对土体塑液性指标等物理参数的影响, 以及对三轴剪切强度力学参数的弱化作用; 此外, 通过不同材料配合比的改良试验, 研究了水泥盐渍土强度随含盐量等变化的规律, 表明水泥土含盐或者浸泡海水, 对于强度都有弱化影响, 水泥、粉煤灰固化剂都可以一定程度抵消海盐的不利影响, 而且后者效果更明显。在上述试验基础上, 从水泥土材料强度、桩-土侧摩擦与端部阻力、 $P-S$ 计算曲线等方面, 综合计算评估钉形水泥土搅拌桩单桩以及复合地基承载力特征值, 表明固化剂改良的搅拌桩处理后, 含盐软基能满足承载力设计要求。在钉形的异形桩的承载力理论计算以及工程验证等方面, 仍有待进一步深入。

关键词: 滨海盐渍土; 土工试验; 钉形水泥土搅拌桩; 材料配合比; 承载力特征值; 综合评估

中图分类号: U213.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)02-0134-07

Experiment on improvement of coastal saline soil and evaluation of bearing capacity of nail shaped cement-soil mixed pile foundation

MA Yongzheng^{1,2}, WANG Kaitai³, SHENG Chugen³, CHEN Bin^{1,2}, LI Zhantao^{1,2}

(1. Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China; 2. State Key Laboratory of Geo-Mechanics and Geotechnical Engineering, Ningbo University of Technology Soft Soil Experimental Sub-center, Ningbo Zhejiang 315016, China; 3. Ningbo Traffic Planning & Design Institute Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315192, China)

Abstract: To handle the problem on foundation treatment with cement soil mixing piles in coastal saline soil area, laboratory tests were taken to study the influence of sea salt content on physical parameters, such as plastic index of soil, as well as on the mechanical parameters of three axis shear strength; In addition, the strength of saline soil mixed cement, which is changed with salt content, was studied by improving tests with different mix ratio of materials, It is indicated that the soil mixed cement has decreased strength due to containing salt or soaking into saline water, and as the curing agents both the cement and the fly ash can increase the strength to a certain extent, moreover, the latter effect is more obvious. On the basis of the above tests, the bearing capacity of the single pile and the composite foundation is evaluated comprehensively by utilizing the strength of cement-soil material, pile soil side friction and end resistance, pile $P-S$ curves and so on. The results show that the soft foundation containing salt can have required bearing capacity by treated with the improved cement-soil-mixing piles. Since nail shaped pile is different from equal diameter pile, this research need more validation by theoretical study and engineering practice for further.

Keywords: seashore saline soil; soil tests; nail-shaped cement soil mixing pile; material mix ratio; pile bearing capacity eigenvalues; comprehensive assessment

收稿日期: 2018-06-28; 修订日期: 2018-07-18

基金项目: 宁波市交通委课题(201506); 浙江省自然科学基金(LY16E040002)

第一作者: 马永政(1975-), 男, 湖南常德人, 博士, 副教授, 主要从事岩土数值方法与物理试验研究。E-mail: 107723274@qq.com

0 引言

盐渍土即指地表下一定深度的含盐土层,其易溶盐平均含量大于 0.3%,且具有溶陷、盐胀、腐蚀等不良工程特性(公路工程地质勘察规范 JTG C20—2011)。滨海盐渍土的形成主要是海水倒灌渗入到滨海软土层地下水中,以及围海造地、退潮晒盐等人工活动,通过地表蒸发导致滨海土含盐量的增高,成分主要为氯盐以及少量硫酸盐。盐渍土中含盐矿物往往对土体工程性质产生不利影响,含盐矿物的沉积、溶解和迁移,会改变土体结构、孔隙分布,对土体压缩性、渗透性、承载力等产生影响;另外含盐矿物与土颗粒之间存在离子交换等电化学作用;特别是含盐量大时,如超过 5%,对土体工程性质会有较大影响,危害建筑、构筑物的安全使用。

国内外在盐渍土工程性质及病害机理与防治方面有诸多研究^[1],如:(1)通过室内土工试验研究土工参数随含盐量变化影响规律:物理参数如粒度组成、塑性指标随着盐分增大呈现有规律的变化;力学指标如土体内摩擦角先增大后减小,压缩系数也随之减少;抗剪强度随含盐量增加而减少,到谷底后由于固态盐相变化反而增加等^[2-4];(2)开展含盐土溶陷、盐胀及腐蚀等不良灾害特性的室内外试验与监测分析研究,如杨保存等^[5]开展室内与现场盐胀变形监测试验;陈炜韬等^[6]开展冻融循环对土工参数影响的耐久性试验;张洪萍等^[7]进行溶陷特性的试验研究等;(3)进行盐渍土改良与地基处理措施研究^[8],如采用高分子材料 SH 固土剂、石灰、水泥、粉煤灰、沥青等进行盐渍土改良,相关的研究甚多^[9],经外加剂改良的盐渍土,其强度、抗变形能力和水稳性能有显著的提高。盐渍土路基处理方法很多,包括盐化处理、高路基法、隔断层处理、浸水预溶加强夯法、化学处置等。

另外传统挤密桩法等仍是有效的地基处理方

法,其桩类型包括如水泥搅拌桩法^[10-11]、石灰砂桩、沉管砂石桩法、砾石桩法^[12]等。特别是钉形双向搅拌桩工法,作为变截面水泥搅拌桩工法中的一种,具有搅拌均匀、阻断冒浆;扩大头可起到类似承台作用,使得桩基与地基土保持变形协调^[13],更具有良好的应用价值。但现场经验表明,受含盐的不利影响等,常规水泥搅拌桩的成桩质量会偏低,表现在 28 d 成桩的取芯率低、抗压强度也偏低,经过加外加剂改良后,则可大幅提高水泥搅拌桩等的成桩质量,不失为有效的地基处理方法。目前除了内陆旱地盐碱土,针对滨海盐渍土路基上的搅拌桩软基处理研究还是比较缺乏。

本文依托浙江宁波象山 71 省道盛宁线工程,通过对滨海盐渍土土工实验研究含盐土的相应工程特性,探讨利用水泥粉煤灰等混合固化剂改良的材料配合比试验研究,取得相应试验分析参数,并进一步通过理论计算分析,探讨含盐钉形水泥土双向搅拌桩基承载力计算方法并进行评估分析,供设计分析与工程实践参考。

1 滨海盐渍土实验

1.1 盐渍土物理力学性质实验

试验场地内各土层基本情况如下:(1)①层(^meQ)素填土:位于表层,不均匀,为新近回填土;(2)②₁层(^{al-1}Q₄³)粉质黏土(“硬壳层”):软塑、韧性高,可作持力层;(3)②₂层(^mQ₄³)淤泥质黏土:埋深 1.9~4.0 m,流软塑、韧性中等;(4)③₁层(^mQ₄²)淤泥:流塑,性质差;(5)③₂层(^mQ₄²)淤泥质粉粘土:流塑,夹粉土,韧性中等;(6)③₃层(^{al}Q₄¹)砂砾、卵石:性质好,可为持力层。主要土层物理力学参数平均值如表 1 所示,各层土地基承载力容许值(kPa)与桩侧土摩阻力值(kPa)见表 2。

表 1 各土层基本物理力学参数

Table 1 Basic soil physical& mechanical parameters of the stratum

土层编号	重度 (kN·m ⁻³)	天然含水量 w/%	孔隙比 e	液限 /%	塑限/%	液性指数	泊松比*	固结快剪		压缩	
								黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa
①	18.5	25.6		27.8	17.6	0.78	0.24	20.0*	18.0*		4.50*
② ₁	19.1	30.8	0.865	35.5	20.0	0.69	0.32	21.5	15.3	0.393	5.14
② ₂	18.7	35.9	0.98	35.5	20.1	1.03	0.35	12.7	10.2	0.56	3.94
③ ₁	17.5	48.4	1.33	43.7	22.9	1.22	0.42	11.5	8.7	0.93	2.63
③ ₂	18.2	38.2	1.06	34.0	19.5	1.29	0.38	12	12.2	0.67	3.13
③ ₃	18.0*	21.4		28.1	17.7	0.36	0.21	20.0*	15.0*		4.80*

注:带*数据是计算时参考取值,非地勘报告资料提供原始数据,以下表 2 中*号意义相同。

表 2 各土层地基承载力及侧摩阻力参数

Table 2 Bearing capacity and frictional resistance parameters of the stratum						
土层	①	② ₁	② ₂	③ ₁	③ ₂	③ ₃
工程性质						
地基承载力基本容许值/kPa	100 ~ 120 *	80 ~ 90	60 ~ 70	50 ~ 60	60 ~ 70	350
桩侧土摩阻力标准值/kPa	20 ~ 40 *	20 ~ 30	15 ~ 18	12 ~ 15	15 ~ 19	90

既有研究表明,含盐量对盐渍土的塑性指标影响较大^[4-5]。本文试验时分别以②₁、②₂、③₁层土为样品,烘干后掺入一定质量的海盐细颗粒,再按表 1 天然含水量要求进行掺水拌匀,测试不同含海盐量下土的塑性指标,由图 1 知,三组土的试验结果表明:土的液限、塑限都随含盐量的增加而降低,在 10% 的含盐量以内,液限有 25% ~ 35% 的下降,而且在含盐量 5% 以内下降较快,而后半部分下降较缓慢;塑限随含盐量增加而下降得相对比较缓慢。

一般研究表明,含盐量和含水量的变化均一定程度影响剪切强度值(包括黏聚力和内摩擦角)^[4],只要是易溶盐,一般对黏聚力和内摩擦角等强度参数有衰减作用,其机理上为饱和卤水土颗粒表面水化膜增厚,

表 3 滨海含海盐土三轴实验剪切强度参数

Table 3 Three-axis test on shear strength parameters of coastal saline soil

含盐量	测试应力值/kPa		强度值		含盐量	测试应力值/kPa		强度值	
	围压	轴压	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)		围压	轴压	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1%	100	208.6	20.1	13.0	5%	100	177.8	13.8	10.5
	200	366.3				200	322.2		
3%	100	195.1	15.5	12.7	10%	100	178.6	12.5	11.9
	200	351.4				200	326.8		

1.2 滨海盐渍土固化剂改良实验

上述研究表明,含盐量 10% 以内的海盐土其物理力学性质都有一定程度的降低,采用水泥搅拌桩进行地基处理时,除了采用水泥作为单一固化剂,可以研究引入包括粉煤灰在内的复合型固土剂,对滨海盐渍土进行改良。本文通过材料配合比试验,研究评估含盐量变化对拌合料常规强度以及耐久性的影响。试验基本步骤如下:(1)取③₁层淤泥质土样,进行烘干、捣碎,用细筛去除夹杂物,拌和均匀,然后加水调整至天然含水量的土样,放置 24 h 后进行试验;(2)各种材料用量按以下配合比(表 4)准确称量,采用机械拌和,倒

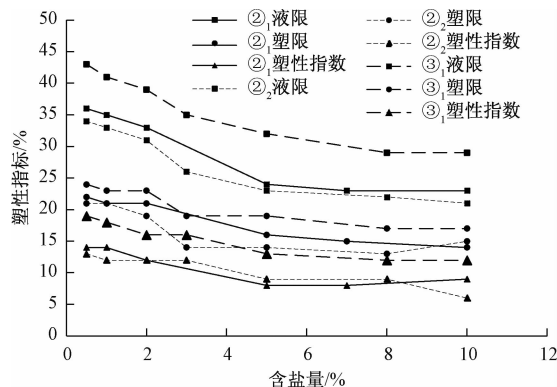


图 1 塑性指标与含盐量关系

Fig. 1 The relationship of soil plastic indexes with the salinity

削弱了土颗粒间的联结力,从而降低了卤水饱和状态下土的抗剪强度;另外,超过饱和度后则部分易溶盐以固态形式存在,含盐量增加对强度参数有增强作用。本文以②₁层滨海土拌合一定海盐进行三轴不排水剪切实验,实验分四组不同含盐量百分比,设极限应力状态为轴向变形 12%,位移控制加载速率为 0.5 mm/min,由极限莫尔圆近似确定剪切强度参数,获得数据结果如表 3 所示,试验结果表明,含盐量 10% 以内的海盐土,其黏聚力和内摩擦角参数值随含盐量增加而降低明显,其中黏聚力下降比内摩擦角下降多。

入 70.7 × 70.7 × 70.7 立方体模具,然后用塑料薄膜覆盖试件,以防水分蒸发过快;(3)试件 2 d 后拆模,一部分进行常规养护和强度试验,一部分放置于温度为 22 ± 2℃、浸泡水中至试验龄期满。

本试验共分 4 类:水泥 + 无盐土、水泥 + 海盐土、复合固土剂(水泥 + 粉煤灰) + 无盐土、复合固土剂 + 海盐土,对应不同海盐、水泥、粉煤灰掺量,另外常规养护 7 d、28 d 以及分别浸泡纯水和含盐水至 90 d,再进行无侧限抗压强度试验,一共 47 组,每组 3 个用于取平均值,共计 141 个有效试样,具体如表 4 所示。

表 4 不同材料配合比土体改良试验结果

Table 4 Soil improvement test results with different material mix propotions

类别说明	试样 编号	海盐掺 入比/%	水泥掺入比/% (水灰比 0.5)	粉煤灰掺 入比/%	7 d 平均强 度 σ_{7d}^*	28 d 平均强 度 σ_{28d}^*	90d 平均强度(浸泡)*		
							浸泡无 盐水 σ_{ns}	浸泡含 盐水 σ_s	弱化系数 σ_s/σ_{ns}
水泥 + 无盐土	S1	0	10.0	0	0.46	0.75	0.97	0.72	0.74
	S1	0	10.0	0	0.46	0.75	0.97	0.72	0.74
水泥 + 海盐土	Q1	0.3	10.0	0	0.31	0.66	—	0.76	—
	Q2	1.0	10.0	0	0.68	1.09	1.33	1.05	0.79
	Q3	2.0	10.0	0	0.67	1.05	1.28	1.08	0.84
	Q4	3.0	10.0	0	0.40	0.65	0.79	0.71	0.90
	Q5	5.0	10.0	0	0.36	0.6	0.81	0.68	0.84
	Q6	8.0	15.0	0	0.40	0.77	0.94	—	—
	Q7	10	15.0	0	0.32	0.66	0.75	—	—
复合固土剂 + 无盐土	R1	0	15.0	6.0	0.78	1.27	1.29	1.32	1.02
	T1	5.0	15.0	3.0	0.68	1.32	—	1.51	—
复合固土剂 + 海盐土	T2	5.0	15.0	6.0	0.79	1.50	1.77	1.57	0.89
	T3	8.0	15.0	3.0	0.57	1.15	—	1.26	—
	T4	8.0	15.0	6.0	0.69	1.48	1.67	1.45	0.87

注:带*表示强度单位为 MPa。

从图 2 结合表 4 可看出:水泥搅拌海盐土试样的平均强度随养护时间(7 d、28 d、90 d(养护 28 d 后再浸泡海盐水,浓度 10%))增加而增加,随着海盐含量的增加其强度略有增加,但在海盐含量大于 3% 左右,强度随着海盐含量增加而减少。而且值得注意的是,养护 28 d 后再浸泡盐水到 90 d 的强度相比 28 d 强度增加并不明显,说明盐水浸泡对强度有一定弱化作用。从养护 28 d 再浸泡无盐水(或含海盐水)直到 90 d 的强度对比图 3,浸泡海盐水的试样强度要比浸泡无盐水的平均低 15% 左右(R1 组试样除外),表明含盐水对强度起到一定程度的弱化影响。

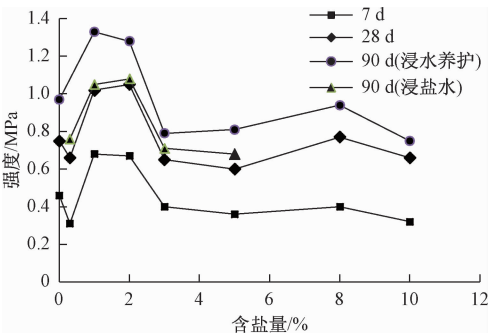


图 2 水泥 + 海盐土的强度随含盐量变化关系
Fig.2 Relationship of the baysalt mixing cement soil strength and salinity

另外从表 4 可知,试样 Q4 - Q5 两组水泥掺入比比 Q6 - Q7 两组试样的要低 5%,但强度结果对比发现,前两组与后两组的 7 d、28 d 强度结果没有明显变化,表明通过增加水泥掺入比,可以抵消海盐含量增加

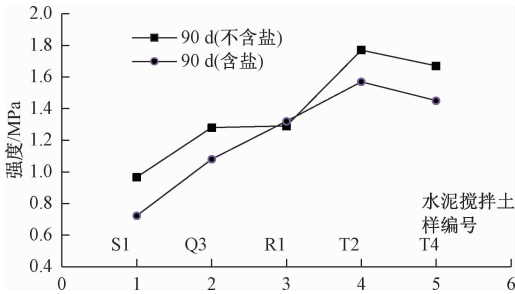


图 3 不同试样浸泡无盐水与含盐水后的强度对比
Fig.3 Contrast of 90d strength of samples in water with that in baysalt solution

对强度弱化的不利影响。粉煤灰含量和水泥含量相同时,通过试验组 R1、T2 和 T4(或试验组 T1 与 T3)试验结果对比说明,海盐含量越多则强度越低,但粉煤灰含量较高时强度变化不明显;而试验组 T1 与 T2 或试验组 T3 与 T4 的结果表明,海盐含量和水泥含量均相同时,粉煤灰含量越大则试样强度越高。

总之,上述试验表明,水泥土桩芯直接含盐或者浸泡海盐水,对于强度都有弱化影响,增加水泥掺入比可以一定程度抵消海盐对强度的弱化影响,而增加粉煤灰对于提高试样强度有更为明显效果。

2 钉形搅拌桩基承载力计算分析

2.1 计算模型及参数说明

上述试验研究表明,含盐量变化对滨海土以及水泥搅拌桩的物理力学性质包括水泥土耐久性能,起到一定减弱影响。本节依托浙江宁波象山 71 省道盛宁

线工程,基于数值分析进一步评估在上述影响下钉形搅拌桩盐渍土复合地基承载力变化特征。

主要设计计算参数如下:(1)土层物理力学参数参考表1,其中弹性模量取压缩模量的5.0倍;①、②₁、②₂、③₁、③₂等各土层厚度分别为:3.5 m、2.5 m、1.5 m、8.0 m、2.0 m;(2)钉形水泥土搅拌桩复合地基设计桩间距一般为1.8~2.4 m(计算取2.2 m),大头直径 R 为0.9 m,高度3.5 m,小头直径 r 为0.5 m,设计总深度12.5 m;(3)在桩体参数方面,重度为20 kN/m³,压缩模量 E_s 一般可取 $(100 \sim 120) \cdot f_{cu}$,本文中水泥搅拌淤泥土平均 $f_{cu} = 0.75$ MPa,即可取 $E_s = 90$ mPa,弹性模量320 mPa,泊松比0.18;(4)在桩-土接触参数方面,剪切刚度模量为 5.8×10^4 kN/m³,法向刚度模量为 6.4×10^5 kN/m³,取接触面平均黏聚力12.0 kPa和内摩擦角10.0°。设计要求单桩竖向抗压承载力标准值不小于170 kN,复合地基承载值标准值不小于100 kPa。

本文主要从数值分析和利用规范公式两方面计算桩基承载力。数值分析时采用MIDAS GTS有限元计算软件进行建模,所建单桩和四桩复合地基模型见图4。研究含盐量变化对承载力影响时,主要考虑的计算参数包括:各土层黏聚力和内摩擦角、水泥搅拌桩抗压强度;桩-土接触面上粘聚力、内摩擦角,以及剪切刚度模量。参考前述研究结果,确定桩土参数随含盐量增加而弱化的系数列于表5,其中土体粘聚力和内摩擦角弱化系数选取参照表3,桩抗压强度(取28d强度)弱化系数选取参照表4,桩-土接触面粘聚力和内摩擦角弱化系数暂假设与土体相应参数一致。

表5 含海盐桩土的力学指标弱化系数表

Table 5 The weakening coefficient table of mechanical parameters of pile and soil with sea salt

受影响参数	含盐量/%				
	0	1.0	3.0	5.0	10.0
土(桩-土界面)黏聚力	1.0	0.93	0.72	0.64	0.58
土(桩土界面)内摩擦角	1.0	0.85	0.83	0.69	0.78
桩抗压强度	1.0	1.33	0.87	0.80	0.88
桩-土剪切刚度模量	1.0	0.93	0.72	0.64	0.58

2.2 单桩P-S曲线及承载力特征值分析

利用上述有限元模型及随含盐量变化的桩土参数,分别计算单桩P-S曲线如图5所示,表明随着含盐量不断增加,相应桩土力学参数弱化,P-S曲线中沉降趋势愈加明显,但其中含盐10%的试验组因增加了水泥掺量5%,沉降趋势并非最大的。承载力特征值则

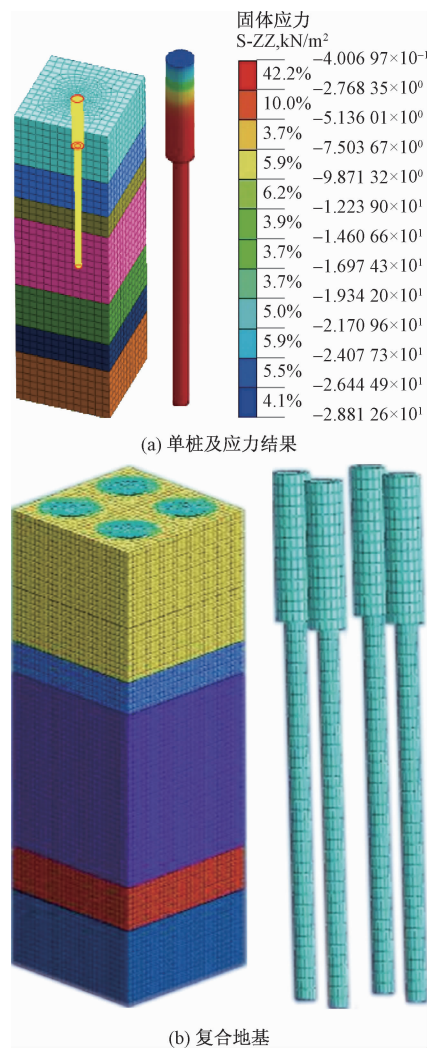


图4 桩基模型

Fig. 4 Pile foundation analysis model

按P-S曲线初值段末尾对应的极限值减半计算。

此外参考相关规范中关于等直径桩的桩基承载力计算公式,对作为异形桩的钉型桩,本文建议分别从材料强度、桩侧桩端阻力参数等方面,按以下二式计算承载力特征值:

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (1)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha_2 q_{p2} (A_2 - A_1) + \alpha_1 q_{p1} A_1 \quad (2)$$

式中:系数 $\eta = 0.3 (0.2 \sim 0.33)$;

$\alpha_1, \alpha_2 = (0.4 \sim 0.6)$;

A_p ——桩径横截面面积(表示下部桩径截面积,
 A_2 为上部扩大头横截面积);

u_p ——扩大头或下部桩的周长;

l_i ——第*i*层土桩长;

f_{cu} ——立方体试样90 d单轴抗压强度;

q_{si} ——第 i 层土的摩擦阻力特征值;
 q_{p1} ——桩端地基土承载力特征值,
 q_{p2} ——扩大头端部地基土承载力特征值。

暂假定土层摩擦阻力以及地基承载力特征值随土层含盐量变化的弱化规律与土层粘聚力的相似,分别按上述不同方法确定的单桩承载力计算结果见图 6,其中利用公式(1)计算时,分别按桩大头和小头横截面积计算的结果得到曲线①和②,彼此差别大,比较合理的结果显然应该介于二者之间;按公式(2)计算结果曲线③明显偏大;而按 P - S 曲线取特征值所得结果如曲线④相对合理,本文拟以曲线①、②和④的均值为最终结果(表 6)。

2.3 复合地基承载力标准值分析

复合地基承载力标准值计算仍参考等直径桩基相关计算规范,按如下式进行计算:

$$f_{sp,k} = m \cdot \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{s,k} \tag{3}$$

其中面积置换率 m 为 0.13, R_a 为单桩竖向承载力特征值, A_p 为桩的截面积(取桩大头或小头截面积), β 为折减系数可取 0.75(0.5~1.0), $f_{s,k}$ 为地基土承载力特征值(表 2),结果见表 6。

对比不难发现,非改良的含盐滨海土搅拌桩单桩承载力低,通过加水泥和粉煤灰改良后得到明显提高,如含盐 5% 的搅拌桩承载力计算为 110.8 kN,改良后

可达 190.6 kN;同样,复合地基承载力相应地也可以提高约 25%~40%,达到设计要求。

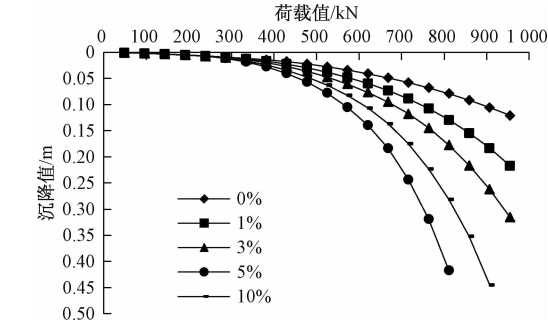


图 5 不同含海盐量的单桩 P - S 曲线
Fig. 5 P - S curves of Piles with different sea salt content

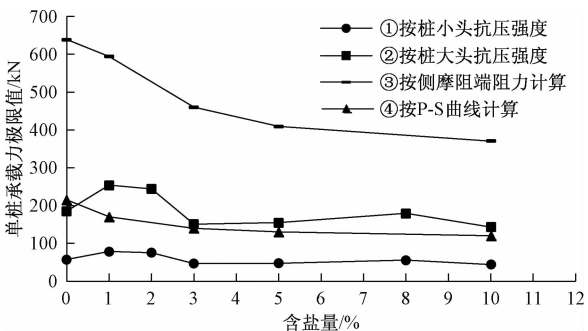


图 6 单桩承载力特征值的不同方法分析结果
Fig. 6 Different results of single pile bearing capacity eigenvalues

表 6 单桩及复合地基承载力特征值计算结果

含盐量		0	1%	3%	5%	10%	复合固化剂改良土*
承载力值(kN)							
单 桩		152.4	167.4	112.4	110.8	102.4	190.6
复合地基/kPa	按桩大头计算	96.6	99.7	88.4	88.0	86.3	104.5
	按桩小头计算	167.1	177.2	140.4	139.3	133.7	192.7

* 号注释:以表 4 中 T2 试样的 90d 强度结果为参照,对应土体含盐量 5%,复合固化剂为 21%。

3 结论

(1)通过滨海盐渍土物理与力学试验,表明含海盐量增加对土体塑性液性指标参数的不利影响,以及对三轴剪切强度的弱化影响;

(2)通过水泥及粉煤灰固化剂改良的水泥土桩芯材料配合比试验;发现直接含盐或者浸泡海盐水,对于强度都有弱化影响,水泥、粉煤灰可以一定程度抵消海盐的不利影响,而且后者效果更明显;

(3)从水泥土材料强度、侧摩阻与端阻力、 P - S 计算曲线等方面综合计算评估单桩承载力特征值,在此基础上分析了复合地基承载力,表明含海盐增加对承

载力的不利影响,通过复合固化剂改良能满足搅拌桩处理含盐量大的软基承载能力设计要求。

本文桩基承载力计算部分参照等直径桩的相关规程,并提出了一些修改建议,实际上钉形搅拌桩作为异形桩其承载机理比等直径桩更为复杂,有必要进一步研究桩基承载力计算方法,以及结合更多工程实践进行验证。

致谢: 本项研究受浙江省自然科学基金(LY16E040002)、宁波市交通委规划课题(201506)的联合资助,在此致谢。

参考文献:

- [1] 张文,张彬,慎乃齐.盐渍土岩土工程特性研究现状与进展[J].勘察科学技术,2008(3):7-11.
ZHANG Wen,ZHANG Bin,SHEN Naiqi. Research on geotechnical engineering [J]. Site Investigation Science and Technology,2008(3):7-11.
- [2] 陈伟韬,王明年,王鹰,等.含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J].中国铁道科学,2006,27(4):1-5.
CHEN Weitao, WANG Mingnian, WANG Ying, et al. Influence of salt content and water content on the shearing strength parameters of chlorine saline soil [J]. China Railway Science, 2006,27(4):1-5.
- [3] 柴寿喜,王沛,魏丽,等.含盐量对滨海盐渍土物理及水理性质的影响[J].煤田地质与勘探,2006,34(6):47-50.
CHAI Shouxi, WANG Pei, WEI li, et al. Effect of salt content on physical and hydrological properties of saline soil in inshore[J]. Coal Geology&Exploration, 2006,34(6):47-50.
- [4] 赵海艳,韩文峰,张渊.滨海盐渍土的工程特性研究[J].天津城市建设学院学报,2004,10(3):161-164.
ZHAO Haiyan, HAN Wenfeng, ZHANG Yuan. Research on engineering properties of salinized soil in littoral area[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction,2004,10(3):161-164.
- [5] 杨保存,刘新荣,贺兴宏,等.盐渍土路基盐胀性试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):594-603.
YANG Baocun, LIU Xinrong, HE Xinghong, et al. Test study on saline soil subgrade saltfrost deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2009,5(3):594-603.
- [6] 陈伟韬,王鹰,王明年.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J],岩土力学,2007,28(11):2343-2347.
CHEN Weitao, WANG Ying, WANG Mingnian. Test study on saline soil subgrade salt-frost deformation [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007,28(11):2343-2347.
- [7] 张洪萍,杨晓华.盐渍土溶陷特性的试验研究与分析[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):95-100.
ZHANG Hongping, YANG Xiaohua. Experimental study and analysis of saline soil's collapsibility [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2009,20(4):95-100.
- [8] 王小生,章洪庆,薛明,等.盐渍土地区道路病害与防治[J].同济大学学报,2003,31(10):1178-1182.
WANG Xiaosheng, ZHANG Hongqing, XUE Ming, et al. Road disease and treatment in saline soil area[J]. Journal of Tongji University, 2003,31(10):1178-1182.
- [9] 王沛,王晓燕,柴寿喜.滨海盐渍土的固化方法及固化土的偏应力-应变[J].岩土力学,2010,31(12):3939-3944.
WANG Pei, WANG Xiaoyan, CHAI Shouxi. Solidifying methods for inshore saline soil and its deviator stress-strain [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2010,31(12):3939-3944.
- [10] 刘浩斌,顾长存,张浩.水泥搅拌桩在盐渍土软基处理中的应用[J],低温建筑技术,2015,37(2):108-109.
LIU Haobin, GU Changcun, ZHANG hao. Application of cement mixing pile in soft saline soil foundation treatment [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015,37(2):108-109.
- [11] 李世争.盐渍土路基水泥搅拌桩处理技术的试验研究[M].上海:上海交通大学,2005.
LI Shizheng. Experimental study on improvement technique of cement-salinized soil mixing column under highway [M]. Shanghai: Journal of Shanghai Jiao Tong University,2005.
- [12] 虞海珍,赵怀义.砾石桩加固公路盐渍化软土路基施工技术[J].华中科技大学学报,2008,25(2):83-86.
YU Haizhen, ZHAO Huaiyi. Construction technology of gravel pile strengthening salinized soft soil subgrade [J]. Journal of HUST. (Urban Science Edition), 2008,25(2):83-86.
- [13] 范俊海,徐松山.钉形搅拌桩扩大头直径与其承载力机理关系研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):237-240.
FAN Junhai,XU Songshan. Study on relation between expanding head diameter of T-shaped mixing pile and its bearing mechanism [J]. Journal of Water Resources& Water Engineering, 2014,25(2):237-240.