



强夯加固粉煤灰及下伏的 淤泥质软土地基试验研究*

沈 正, 董 祥

(南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 以南京扬子石化储油罐地基处理工程为背景, 对粉煤灰及下伏的淤泥质软土地基进行了强夯试验研究。试验中首先对夯坑周围地表沉降以及孔隙水压力进行了检测, 然后通过室内土工、载荷、标准贯入、静力触探等试验对强夯加固效果进行了检验。试验表明: 强夯采用初始低能量夯击, 逐步增加夯击能量和夯击遍数的施工工艺, 辅以设置碎石垫层和竖向塑料排水板以及夯点采用梅花形布置的方法, 效果明显, 使地基的物理力学性能和抗变形性能显著提高, 消除了上部粉煤灰层的液化问题, 整体加固效果很好, 夯后各项指标完全达到或超过预期值; 同时通过对试验数据的分析研究, 获得强夯法加固该类地基土的最佳强夯参数和施工工艺。

关键词: 粉煤灰; 淤泥质软土; 强夯; 试验

中图分类号: U 416. 216 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)11-0160-06

Experimental study on improvement of fly ash underlying silty soft soil by dynamic compaction

SHEN Zheng, DONG Xiang

(Architecture and Civil Engineering College, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Taking a large oil tank foundation project of Yangzi petrochemical company for example, we conduct an experimental study on dynamic consolidation of the filled fly ash underlying silty soft soil. At first, the surface settlement around craters and pore water pressure are inspected, and then the improving effects are detected through laboratory soil mechanics test, load plate test, standard penetration test, cone penetration test, etc. The test shows that it is obvious to improve the foundation with construction technology of low energy in the beginning and gradually growing energy and cycles combined with gravel cushion, vertical plastic drainage board and the layout of cinquefoil for tamping point. The mechanical property and anti-deformation characteristics are improved obviously and the liquefaction problem of the upper fly ash is eliminated. The whole consolidation effect is remarkable, and physical - mechanical properties are better than the expected. At the same time, the optimal parameters and construction techniques are obtained by analyzing the measuring data.

Keywords: fly ash; silty soft soil; dynamic compaction; experiment

沿海地区广泛分布着表层为吹填砂、下伏软黏土的软弱地基, 周健等^[1-3]采用强夯法^[4-8]对此地基进行了处理, 取得良好的效果。目前沿江和沿海部分施工场地的软土地基上部覆盖了粉煤灰, 对于这些特殊地基采用强夯加固效

果是否与软土上覆砂层相类似, 需要进一步研究。本文结合工程实际, 对强夯法在处理粉煤灰和下伏淤泥质软土地基加固的适用性及相应的施工技术参数进行了试验研究, 并对加固效果进行了检验。

收稿日期: 2015-04-26
*基金项目: 住房和城乡建设部科学技术项目 (2014-K4-09)
作者简介: 沈正 (1975—), 男, 博士, 副教授, 从事软土地基处理研究。

1 试验概况

1.1 工程地质概况

拟建场地位于南京扬子石化储油罐区内,属于长江漫滩区,地下水位埋深为 0.7 m。工程地质勘察报告揭露的土层自上而下为:①粉煤灰层:松散,厚度为 6~8 m,标准贯入击数为 1 击,经分析为严重液化层,是本次试验重点加固层;②素填土层,软塑,厚度为 2~4 m,标准贯入击数为 2~3 击;③淤泥质粉质黏土层,饱和,流塑,厚度为 3~18 m;④粉质黏土层:饱和,可塑,厚度为 2~10.0 m;⑤粉砂层:饱和,中密-密实,厚度为 11~14 m。

1.2 试夯设计

试验现场分为 I, II, III 共 3 个分区,每个分区又分为设置塑料排水板和不设置塑料排水板 2 个亚区(分别称为 A 区和 B 区),每个试验亚区选用不同的夯击参数,试验区面积均为 34 m×28 m。并且在现场试验时,试验区夯点一部分采用梅花形布置,另一部分采用正方形布置,夯点间距均为 3.0 m。夯击试验参数的设计遵照“多遍夯击、逐步提高夯击能”的原则。每个试验区具体的平面尺寸和施工参数见表 1、图 1 和图 2。

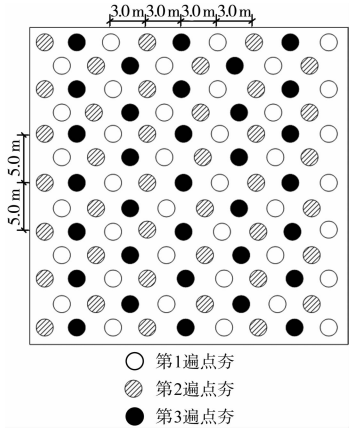


图 1 I 区和Ⅲ区夯点

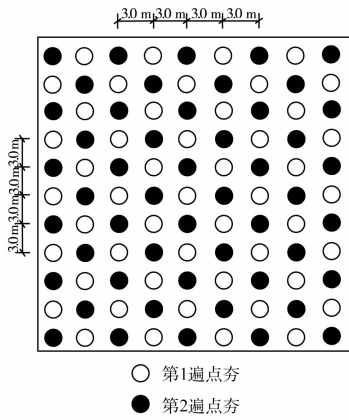


图 2 II 区夯点

表 1 强夯施工参数

夯区 编号	软基处理 方法	碎石垫层 厚度/cm	夯点 间距/m	夯点布 置方式	夯击 遍数	锤质量/t			夯击次数			夯击能/(kN·m)		
						第 1 遍	第 2 遍	第 3 遍	第 1 遍	第 2 遍	第 3 遍	第 1 遍	第 2 遍	第 3 遍
I _A	插排水板	50	3.0	梅花形	2	12	16		6	6		2 400	2 400	
I _B	不插板	50	3.0	梅花形	2	12	16		6	6		2 100	2 400	
II _A	插排水板	160	3.0	正方形	3	12	16	16	4	6	8	2 000	2 800	2 800
II _B	不插板	150	3.0	正方形	3	12	16	16	4	6	8	2 000	2 800	2 800
III _A	插排水板	145	3.0	梅花形	3	12	16	16	4	6	8	2 000	2 800	3 000
III _B	不插板	145	3.0	梅花形	3	12	16	16	4	6	8	2 000	2 800	3 000

1.3 试验内容

为研究强夯加固效果,进行了一系列的室内和现场测试工作。在强夯过程中进行不同深度土体的孔隙水压力的监测,强夯前后分别进行地表沉降、静力载荷、标准贯入试验、静力触探试验等现场测试工作,同时对表层粉煤灰及下伏软土层取样,对其进行室内土工试验。

2 试验分析

2.1 孔隙水压力

从图 3 可以看出,3 m 深处的土体的孔压消散

速度较快,48 h 内基本消散完毕,6 m 与 9 m 深度处土体则需要 72 h 以上才能基本消散完毕。另外,设置塑料排水板的试验 A 区的深部土体孔压消散速度要比单一强夯处理 B 区快;而且由于粉煤灰的渗透性好,所以设置塑料排水板对粉煤灰层的加固效果影响不大,但对深部的淤泥质软土而言,设置塑料排水板加速了深部软土的固结排水速度,从而提高了深部淤泥质软土的处理效果。由上述分析结果可知,上部粉煤灰的加固效果优于深部的淤泥质软土,并且设置竖向塑料排水板地基加

固效果优于不设置塑料排水板地基。

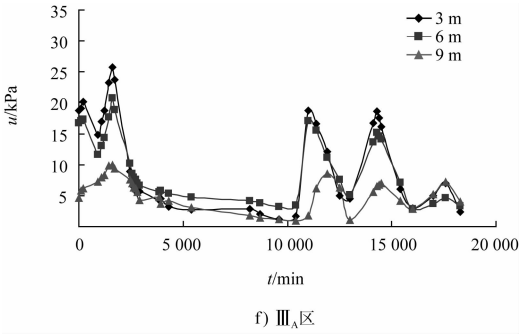
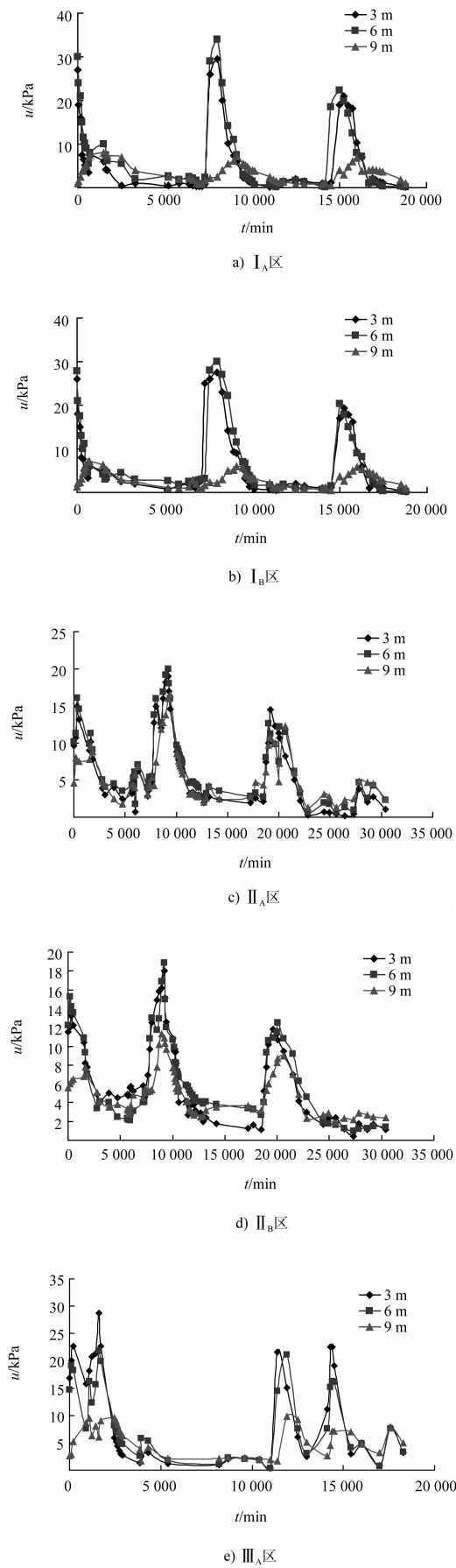


图3 强夯试验区孔隙水压力消散曲线

2.2 沉降测量

每遍强夯后，按照 10 m×10 m 方格网，用水准仪测地面高程，与夯前地面高程进行比较，其差值即为本遍强夯地面沉降值（表 2）。

表 2 沉降测量结果				m
试验区	填料前 高程	填料后 (夯前) 高程	平夯后 高程	总沉 降量
I _A	10.56	10.72	9.24	1.48
I _B	9.85	10.38	9.12	1.26
II _A	9.33	10.21	9.03	1.91
II _B	9.71	10.55	9.40	1.84
III _A	9.96	10.75	9.37	2.03
III _B	9.92	10.74	9.40	1.97

由表 2 可以看出：I 区夯沉量最小，II 和 III 区夯沉量比较接近，I、II、III 试验区加插塑料排水板比不加插塑料排水板平均夯沉量分别增大了 17.5%、3.8% 和 3.0%，原因在于加插塑料排水板能够加快地基的动力固结排水速度，夯沉量增大；同时 I 区比 II、III 区的增加幅度要大，主要是由于 I 区的夯击能量与夯击遍数均低于 II、III 区，加插塑料排水板对夯沉量的影响更大。

2.3 强夯前后地基土物理力学指标比较

强夯前后对 A 区和 B 区不同深度土层进行了室内土工试验，结果如表 3 所示。在 2.4 ~ 6.3 m 深度范围内，土体的含水率平均降低了 50% 和 45.4%，干密度平均提高了 28.6% 和 24.9%，孔隙比平均降低了 21.9% 和 18.5%，压缩系数平均减少了 86.5% 和 54.1%，压缩模量平均增加了 151% 和 99.1%。上述结果表明，强夯后，在深度 6.3 m 内的粉煤灰和淤泥质软土层的物理力学指标

得到了比较明显的改善,地基的强度显著提高;而在深度 6.3 m 以下的土层,其物理力学指标提高不很明显,且设置塑料排水板区夯后土的物理力学性质的改善优于不设置塑料排水板区。

表 3 强夯前后地基的土工性质指标

试验区	深度/m	含水率 $\omega/\%$		干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		孔隙比 e		压缩系数 a_v/MPa^{-1}		压缩模量 E_s/MPa	
		夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
I _A	2.4	80.8	42.3	7.2	8.8	2.18	2.07	0.81	0.45	3.91	6.81
	4.3	71.0	38.3	8.4	8.9	1.79	2.06	0.66	0.48	4.21	6.35
	6.3	65.2	36.9	9.1	13.9	1.64	0.99	0.61	0.37	4.36	5.43
	8.3	37.6	42.7	13.0	13.8	1.07	0.99	0.51	0.40	4.02	4.92
I _B	2.4	81.8	38.3	7.1	8.3	2.21	2.09	0.80	0.53	4.01	5.81
	4.3	72.1	34.3	8.0	8.6	1.98	2.08	0.73	0.51	4.11	6.05
	6.3	60.2	36.9	9.2	13.5	1.56	0.92	0.60	0.37	4.26	5.23
	8.3	36.6	44.7	12.8	13.6	1.09	0.96	0.50	0.42	4.18	4.72
II _A	2.4	68.8	32.3	7.3	9.0	2.28	1.97	0.79	0.27	4.14	10.83
	4.3	71.0	36.3	8.6	9.2	1.82	1.96	0.67	0.23	4.21	12.85
	6.3	67.2	34.9	9.2	14.3	1.74	0.97	0.61	0.23	4.52	8.43
	8.3	39.6	39.7	13.4	14.5	1.27	0.91	0.48	0.29	4.69	6.62
II _B	2.4	65.3	33.5	7.3	9.0	2.18	2.02	0.60	0.31	5.34	9.80
	4.3	72.1	36.3	8.8	9.2	1.96	1.85	0.62	0.24	4.61	12.12
	6.3	56.2	34.9	9.6	14.1	1.69	0.97	0.53	0.25	5.12	7.73
	8.3	38.6	41.1	13.6	14.0	1.16	0.92	0.44	0.30	4.89	6.35
III _A	2.4	70.3	33.5	7.2	9.0	2.21	2.02	0.76	0.31	4.24	9.62
	4.3	65.3	36.3	8.9	9.1	1.86	1.94	0.62	0.26	4.63	11.32
	6.3	54.4	34.9	9.5	14.1	1.79	0.97	0.52	0.27	5.32	7.26
	8.3	37.3	38.3	13.7	14.3	1.13	0.92	0.44	0.29	4.89	6.51
III _B	2.4	69.2	34.6	7.3	8.5	2.25	2.04	0.74	0.34	4.04	8.94
	4.3	71.3	36.3	8.1	8.9	1.80	1.86	0.65	0.30	4.34	9.43
	6.3	53.8	36.9	9.0	14.1	1.68	0.92	0.58	0.26	4.65	7.34
	8.3	36.7	37.6	13.7	14.2	1.18	0.96	0.46	0.34	4.76	5.84

2.4 载荷试验

为了分析强夯加固后的粉煤灰地基承载力提高情况,经过一段间歇时间后又在其上进行静荷载试验。按照 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》,载荷板的面积为 3 m×3 m,取载荷板沉降量为 0.008*b* (*b* 为载荷板宽度)时,所对应的荷载值为地基承载力(图 4)。

由图 4 可以看出: I_A、I_B、II_A、II_B、III_A、III_B 区的最大试验荷载分别为 160、130、290、200、310 和 250 kPa,3 个分区强夯加固处理后的地基承载力都超过设计承载力 120 kPa 的要求,且 II 区和 III 区加插塑料排水板比不加插塑料排水板的承载力分别大 1.45 倍和 1.24 倍,说明粉煤灰及下伏软土层中设置塑料排水板后,

地基的承载力得到了提高,原因是设置塑料排水板后加快粉煤灰及下伏软土地基的动力固结排水速度。

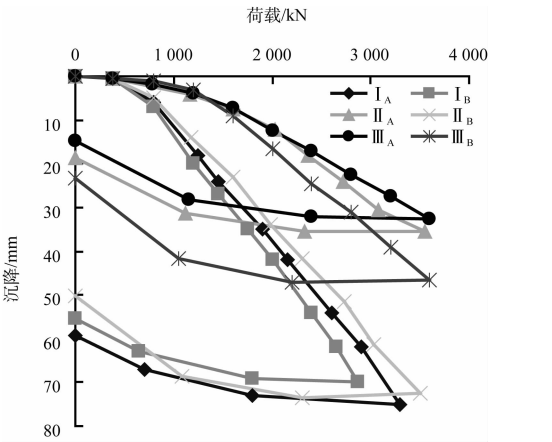


图 4 强夯试验区荷载沉降曲线

2.5 CPT 试验

强夯前后对试验区的检测点进行 CPT 试验, 试验结果见表 4。由表 4 可以看出, 对于Ⅰ区和Ⅲ区, 0 ~ 5 m 深度内土体的强夯后 P_s 值平均为 5.35 MPa, 与夯前相比增大了 10 倍, 而对于Ⅲ区, 0 ~ 6 m 深度内土体的 P_s 值平均为 6.31 MPa, 与夯前相比增大

了 11 倍, 并且设塑料排水板区比不设塑料排水板的土体强夯后 P_s 值平均大 32.8%。上述结果表明, Ⅲ区强夯有效加固深度大于Ⅰ区和Ⅱ区, 同时设置塑料排水板的土体强夯后的加固效果优于不设置塑料排水板, 分析其原因主要是设置塑料排水板区的深部土体的固结排水速度快于不设置塑料排水板区。

表 4 各试验区强夯处理前后静力触探试验结果对比

深度/m	P_s /MPa											
	Ⅰ _A 区		Ⅰ _B 区		Ⅱ _A 区		Ⅱ _B 区		Ⅲ _A 区		Ⅲ _B 区	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
0.0 ~ 1.0	0.79	6.50	0.68	7.01	0.69	6.25	0.70	6.33	0.74	6.12	0.85	4.38
1.0 ~ 2.0	0.41	8.52	0.32	7.66	0.31	7.77	0.33	6.06	0.45	8.70	0.67	6.07
2.0 ~ 3.0	0.35	8.05	0.47	6.89	0.53	6.49	0.47	4.74	0.57	8.62	0.83	6.15
3.0 ~ 4.0	0.32	5.21	0.29	4.68	0.27	3.86	0.41	2.41	0.62	6.66	0.77	5.44
4.0 ~ 5.0	0.72	2.69	0.81	2.55	0.79	2.18	0.87	1.17	0.75	3.75	0.90	3.66
5.0 ~ 6.0	0.64	1.15	0.67	1.22	0.76	1.35	0.74	1.01	0.79	3.99	0.43	2.56
6.0 ~ 7.0	1.08	1.21	1.16	1.24	1.06	1.26	0.99	0.97	0.97	1.57	0.26	0.58
7.0 ~ 8.0	1.03	1.66	1.02	1.27	1.13	1.41	0.96	0.91	1.14	0.89	0.76	0.61

2.6 SPT 试验

强夯前后对各个试验区进行了 SPT 试验, 试验结果如表 5 所示。由表 5 可以看出, 试验区 0 ~ 6 m 深度内的土体经过强夯处理后标准贯入击数有非常显著的提高, 上部土体得到了很好的加固, 而深部

的软土加固效果不明显, 但塑料排水板区的深部软土加固效果优于未设置塑料排水板区, 该结论与上述孔隙水压力、CPT 的测试结果相同。按照 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》中相关规定计算, 消除了上部 4 ~ 6 m 厚的粉煤灰液化问题。

表 5 各试验区强夯前后标准贯入试验结果对比

深度/m	$N_{63.5}$ /击											
	Ⅰ _A 区		Ⅰ _B 区		Ⅱ _A 区		Ⅱ _B 区		Ⅲ _A 区		Ⅲ _B 区	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
2.6	1	8	1	6	1	11	1	9	1	11	1	9
4.6	1	6	1	5	1	5	1	4	1	7	1	6
6.6	2	3	1	2	3	4	1	2	1	3	1	3
8.6	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3
10.6	6	6	4	4	2	2	2	2	3	3	2	2

3 讨论

分析上述试验结果发现, Ⅲ_A区地基土层的加固效果最好。首先Ⅲ_A区设置塑料排水板有利于深层软土的排水固结, 减少夯坑周围隆起, 有利于夯能向下传递; 然后Ⅲ_A区设置了一定厚度的碎石垫层, 能够减少由应力波而造成上部土层的松动, 同时加速强夯产生的超孔隙水压力的消散, 此外

Ⅲ_A区夯点布置采用梅花形布置, 跳夯施工, 和正方形布置相比, 减少了夯击过程中对夯点周围土体的振动扰动影响, 改善了加固效果; 接着Ⅲ_A区的夯击次数为 3 遍, 每遍夯击次数从 4 击逐步增加到 8 击, 每遍所采用夯击能也从逐步 2 000 kN·m 增加到 3 000 kN·m, 夯击能量和夯击次数逐步由低到高, 初始以低能量低击数夯击上覆的松散的粉煤

灰层,再以高的能量和击数加固较深的地层,这样既保证了浅层的粉煤灰层和深部的软土层都能得到有效的加固,又能有效地降低深层土的扰动,减少橡皮土的发生。

综上所述,设置一定厚度的碎石垫层,增设塑料排水板,夯点采用梅花形布置,初始以低能量夯击,逐步增加夯击能量,适当增加夯击遍数能有效加固粉煤灰及下伏淤泥质软土地基。

4 结语

1) 强夯施工处理后的现场和室内测试结果表明ⅢA区的加固效果最好。

2) 对于高含水率、大孔隙比的粉煤灰及下伏淤泥质软土层,开始以低能量将浅层加固,再以高的能量加固深的地层,适当增加夯击遍数,能够有效提高强夯效果。

3) 在强夯加固的土体中设置塑料排水板后,可以增大强夯加固的有效深度。

4) 强夯试验结果表明,粉煤灰及下伏软土层的强夯除了需要较高的夯击能外,还需要设置一定厚度的碎石垫层,与表面土体形成置换材料,提高表面持力层的强度,减少由应力波而造成上部土层的松动,同时加速强夯产生的超孔隙水压力的消散。

5) 夯点采取梅花形布置,采取跳夯的方式能够提高强夯加固粉煤灰及下伏的软土层的加固效果。

参考文献:

[1] 周健,崔积弘,贾敏才,等.吹填细砂软弱地基处理试验研究[J].岩土力学,2008,29(4):859-864.

[2] 胡修文,张唯,王坚.以吹填砂为覆盖层的饱和软黏土地基强夯试验研究[J].岩土力学,2004,25(5):818-823.

[3] 邹维列,吴国高,安骏勇,等.强夯加固软土上覆填海砂层的试验研究[J].岩土力学,2003,24(6):983-986.

[4] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3-18.

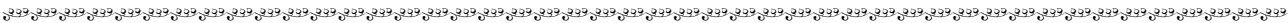
[5] 年廷凯,李鸿江,杨庆,等.不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J].岩土工程学报,2009,31(1):139-144.

[6] 刘洋,闫鸿翔.吹填土强夯加排水地基处理的数值分析与应用[J].岩土力学,2013,34(5):1478-1486.

[7] 宋修广,周志东,杨阳,等.强夯法加固无黏性土路基的现场试验与数值分析[J].公路交通科技,2014,31(3):1-6.

[8] 高政国,杜雨龙,黄晓波,等.碎石填筑场地强夯加固机制及施工工艺[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):377-384.

(本文编辑 郭雪珍)



· 消 息 ·

中交疏浚与海航基础产业集团签署战略合作协议

11月5日,中交疏浚(集团)股份有限公司与海航基础产业集团在海南省海口市签署战略合作协议。根据协议,双方将在三亚新机场、邮轮码头等项目投资建设中展开深层次的战略合作。

“打造海南国际旅游岛”和“一带一路”等国家战略给国内企业带来重大发展机遇,中交疏浚集团将与海航基础产业集团开展全方位的合作交流,打造生命共同体、利益共同体,集中各自优势资源,深化合作模式,推动海航人工岛等系列精品工程落地。此次战略合作协议的签订是双方合作的一个新起点,将会进一步推进海南临空产业经济建设,对完善海南省海上基础设施建设产生深远影响。

(摘编自《中国交通建设网》)