



南亚抗震不利地段海陆交互复杂互层 地基加固性能研究

胡小波, 王海燕

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对孟加拉国某港口工程海陆交互复杂互层地基加固中遇到的地层特性复杂、加固效果难以预测以及软黏土和粉细砂互层土场地地震液化的问题, 结合场地地质条件、使用功能、工程特点等, 对插板预压联合降水强夯在该场地条件下的加固效果展开研究。依托项目试验区块, 通过对加固前后土体物理力学指标的对比分析和沉降-时程曲线、孔隙水压力-时程消散曲线等的研究, 得到插板预压联合降水强夯加固的过程特性以及对原状土和吹填土的加固效果。研究表明, 插板预压联合降水强夯法对于复杂互层土上吹填砂场地具有较好的适应性, 加固效果可满足设计承载力和工后沉降控制要求, 该法对于减轻砂土层的液化具有一定作用。研究成果对于南亚地区复杂互层土吹填场地设计具有指导意义。

关键词: 海陆交互沉积; 复杂互层地基; 砂土液化; 沉降特性

中图分类号: U652; TU472.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0165-06

Reinforce performance of complex interlayer foundation with sea-land interaction in disadvantageous seismic regions of South Asia

HU Xiaobo, WANG Haiyan

(CCCC Third Harbor Scientific Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This article focuses on the complex geological characteristics encountered in the reinforcement of the complex interlayer foundation between land and sea in a port project in Bangladesh, which makes it difficult to predict the reinforcement effect, as well as the problem of seismic liquefaction in the soft clay and fine sand interlayer soil site. Based on the geological conditions of the project site, functional requirements for site use, engineering characteristics and other conditions, the reinforcement effect of the combination of plate pre compression and precipitation dynamic compaction under the site conditions is studied. Based on the experimental block of the project, by comparing and analyzing the physical and mechanical indicators of the soil before and after reinforcement, and studying the settlement time history curve, pore water pressure time history dissipation curve, etc., the process characteristics of inserting plate preloading combined with precipitation dynamic compaction reinforcement and the reinforcement effect on the original soil and hydraulic fill soil are obtained. The results show that the combination of plate precompression and precipitation dynamic compaction method has good adaptability for complex interlayer soil filling sand sites, and the reinforcement effect can meet the design bearing capacity and post construction settlement control requirements. This method has a certain effect on reducing the liquefaction of sand layers. The research results have certain guiding significance for guiding the design of complex interlayer soil reclamation sites in South Asia.

Keywords: sea-land interaction sedimentation; complex interlayer foundation; sand liquefaction; settlement characteristics

收稿日期: 2023-07-12

作者简介: 胡小波 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水运工程地基处理、深基坑工程等。

1 工程概况

孟加拉国属南亚国家,位于南亚次大陆东北部的恒河和布拉马普特拉河冲击而成的三角洲,国土面积约45%位于恒河三角洲,该国主要港口、航道区域的土层为松散-稍密状态的粉细砂或淤泥质黏土、粉质黏土。孟加拉国平均海拔较低,不少地区尤其是临近港口的地区国土高程在设计洪水位以下,需要对场地进行回填加高处理^[1]。而其港口、航道附近存在的大量粉细砂具有疏浚难度低、储量大、吹填落淤快、地基处理相对简单等特点,被广泛用作陆域形成的填料。当地典型的地层分布为吹填粉细砂、软黏土、细砂、黏土,透水性好的粉细砂和透水性差的黏土呈交互状出现。孟加拉地震频发,对于饱和砂土场地,抗地震液化设计是工程设计时需重点考虑的事项^[2]。本文结合孟加拉国某港口和码头项目开展复杂软硬互层土地基上吹填粉细砂场地条件下插板预压联合降水强夯地基加固效果研究^[3-4],重点研究和评价该加固法对于原状土和吹填砂层加固后的物理力学指标变化,以及可液化粉细砂层的液化特性。

2 地层特性分析及地基处理适应性

项目场地面积约120万m²,场地原始高程3.3~3.6 m,吹填高程6.2~6.9 m,吹填料为粉细砂,设计要求50%以上的粒径大于0.075 mm。场地主要为第四系全新统海相与海陆交互相沉积层,自上而下主要为黏土层、淤泥或淤泥质黏土层、黏土夹粉砂层、粉砂夹黏土层、粉砂层。场地的土层条件复杂,软硬土层相互交错,土质不均匀,分布不连续,软硬土层层厚比为6:1~10:1,典型土层渗透系数见表1。

表1 典型土层渗透系数

土层编号	土层名称	垂直渗透系数/ ($\times 10^{-7}$ cm·s ⁻¹)	水平渗透系数/ ($\times 10^{-7}$ cm·s ⁻¹)
②	黏土	0.48	1.02
③ ₁	淤泥	2.55	5.75
③ ₂	淤泥质土	1.88	8.58
④ ₁	淤泥质粉质黏土夹粉砂	13.36	73.15
⑥ ₁	淤泥质粉质黏土夹粉砂	12.03	85.12

根据砂源报告,吹填砂0.075 mm以上的颗粒含量约为79%,满足设计要求。地基处理需要同时满足减小深部土体工后沉降和提高表层吹填砂承载力、降低压缩性的要求。采用低能强夯对表层粉细砂进行处理,强夯前采用轻型井点降低地下水位以利于能量传递和砂土压密,土体深部采用塑料排水板进行插板预压处理,插板预压联合降水强夯地基加固方式在南亚复杂互层土上吹填砂的场地具有较好的工艺适应性。

3 插板预压联合降水强夯处理复杂互层地基的效果

根据使用要求场地可分为一般建筑物区和自然沉降区。对于一般建筑物区,插板预压联合降水强夯主要起到消除场地沉降的目的,针对可能出现的液化问题,主要采取桩基础进行处理;对于自然沉降区,在场地设计时,主要目标为提高表层承载力,消除表层沉降,并不要求地基处理消除场地的液化性能。本场地回填层厚度在3~5 m,回填材料为粉细砂。插板预压的作用为在回填层上插板,促进深部土层的固结,消除深部沉降。预压完成后,进行轻型井点降水并对回填层进行强夯,提高表层承载力,消除表层沉降。堆载预压联合降水强夯加固工艺的加固机理首先是通过堆载预压阶段充分发挥太沙基固结理论的三相介质排水固结的作用,其次是通过强夯时的动力固结作用对表层土进行动力压密。在强夯过程中,对强夯区域的主要监测内容为方格网、地表沉降、孔隙水压力和地下水位。方格网测量按10 m×10 m密度进行,每1 200~1 500 m²面积布置1个地表沉降标。

对于插板预压区,应在预压期进行监测,预压期前30 d每天观测1次,后面每3 d观测1次。在上述区块强夯施工时均应进行上述项目的监测,监测频次为从强夯开始前起每天1次至强夯结束后7~10 d。原状取土孔和标准贯入试验的检测点布点原则均为每个区块2个、深度20 m。

以B₁₁区为例对降水强夯过程进行效果分析,其地下水位-时程曲线如图1所示。由图可知,本场区地下水位最低降至地表以下约3.5 m(地表高

程以填土面高程 7.1 m 计), 后逐步稳定至地表以下 2.5 m 左右。

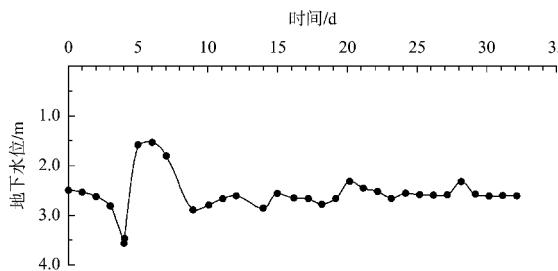


图 1 B_{11} 区地下水位-时程曲线

如图 2 所示, 本区共布设 3 个孔压计, 编号分别为 $B_{11}K_{1-1}$ 、 $B_{11}K_{1-2}$ 、 $B_{11}K_{1-3}$, 埋设深度分别为地表以下 1、3、5 m。由图可知, 孔压计 $B_{11}K_{1-3}$ 观测到 3 次夯击对应出现 3 个孔隙水压力峰值。其中第 1、2 个峰值孔压基本接近, 其夯击能均为 1 000 kN·m 左右, 第 1 个峰值孔压从出现峰值至消散为正常值历时约 2 d。从曲线上可看出, $B_{11}K_{1-3}$ 峰值约 72 kPa, 第 1 次夯击孔压瞬时升高约 40 kPa; $B_{11}K_{1-2}$ 峰值约 49 kPa, 孔压瞬时升高约 39 kPa。 $B_{11}K_{1-1}$ 第 1 个瞬时峰值约 10 kPa, 增量约 15 kPa。根据上述数据分析可知, $B_{11}K_{1-1}$ 孔压初始值及夯击时增量较低的原因是其埋设位置在稳定地下水位以上, 只有在夯击时由于水位上升从而测到较小的孔压值。而 $B_{11}K_{1-2}$ 、 $B_{11}K_{1-3}$ 在夯击过程中的孔压增量及消散时间非常接近, 据此可知轻型井点降水发挥了很好的作用, 把地下水位控制在了设计值以下。此外, 孔压 $B_{11}K_{1-2}$ 、 $B_{11}K_{1-3}$ 虽然埋设于不同的深度, 但其孔压增量非常接近, 说明本次夯击能的选择是合理的, 其夯击效果可以非常有效地传递至填土层的下部。从图 2 可看出, 3 次夯击的孔压消散速度均较快, 夯击后 2 d 左右孔压基本消散完成。对于此类土, 可以根据孔压消散曲线确定下一次夯击的时间, 并据此加快施工速度。上述分析表明, 降水强夯对于场地的粉砂工艺选择是合理的。

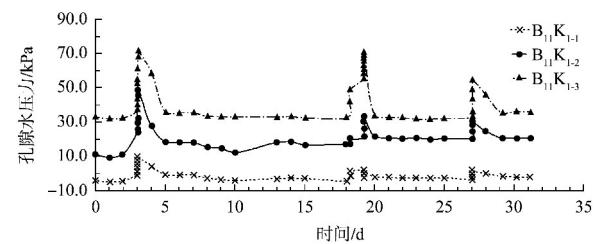


图 2 B_{11} 区块孔隙水压力-时程曲线

施工过程对区块表层沉降进行了监测, 显示沉降量与强夯时间和夯击能呈现良好的相关性, 见图 3。本场地吹填层厚度约 3.8 m, 表 2 为沉降监测数据, 由表可知, 插板预压加强夯期总沉降约 0.852 m, 由于强夯引起的沉降为 0.204 m, 压缩比约为 6.7%, 小于预估的比例, 说明吹填砂的质量较好, 经前期自然沉降已经达到相对较好的状态。

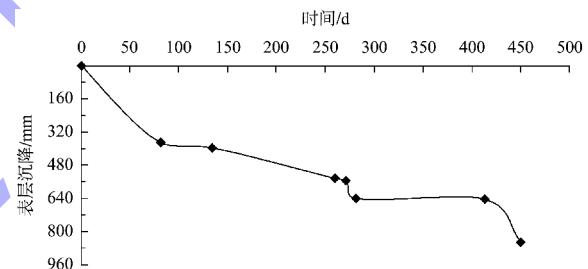


图 3 B_{11} 区块表层沉降监测曲线

表 2 B_{11} 区块表层沉降监测结果

日期	阶段	平均高程/m	沉降/m
2020-10-16	原泥面	3.350	-
2021-01-06	吹填结束	7.126	0.372
2021-02-27	检查	7.100	0.026
2021-07-03	插板前	6.952	0.148
2021-07-14	插板结束	6.940	0.012
2021-07-25	插板后	6.425	0.085
2021-12-04	强夯前	6.420	0.005
2022-01-09	强夯后	6.216	0.204
总沉降	-	-	0.852

施工完成后, 根据检测要求, 采取现场不扰动试样的室内土工试验, 结果见表 3。

表 3 加固前后室内土工试验指标对比

地层编号及名称	阶段	含水率 w/%	密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	孔隙比 e_0	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	无侧限抗压强度 q_u/kPa	压缩系数 $a_{0.1-0.2}/MPa^{-1}$	压缩模量 $E_{S,0.1-0.2}/MPa$
① ₂ 黏土	加固前	40.8	1.766	1.143	23.8	0.67	20.6	0.799	2.68
	加固后	35.6	1.864	0.912	22.8	0.047	62.0	0.464	4.12
	差异	-5.2	0.098	-0.231	-1.0	-0.20	41.4	-0.335	1.44
③ ₂ 淤泥质黏土	加固前	47.4	1.785	1.077	19.7	1.29	16.6	0.591	3.51
	加固后	34.3	1.820	0.989	14.8	0.97	23.0	0.483	4.38
	差异	-13.1	0.035	-0.088	-4.9	-0.32	6.4	-0.108	0.87
④ ₁ 淤泥质粉质黏土夹粉砂	加固前	34.6	1.858	0.897	13.2	1.21	27.4	0.421	4.71
	加固后	34.1	1.871	0.892	14.5	1.00	28.1	0.401	4.80
	差异	-0.5	0.013	-0.005	1.3	-0.21	0.7	-0.020	0.09
⑥ ₁ 淤泥质粉质黏土夹粉砂	加固前	34.3	1.831	0.965	13.1	1.20	26.6	0.565	3.68
	加固后	33.5	1.849	0.936	12.3	1.29	26.9	0.484	4.10
	差异	-0.8	0.018	-0.029	-0.8	0.10	0.3	-0.081	0.42

地基处理前后 B₁₁ 区块现场标准贯入试验 (standard penetration test, SPT) 测试结果见表 4。

表 4 B₁₁ 区块加固后 SPT 测试结果

地层编号	地层名称	时期	件数	标准贯入击数/击			增长 rate / %
				最大值	最小值	平均值	
① ₁	细砂	加固前	6	15	6	10.3	45.2
		加固后	6	22	11	15.0	
③ ₂	淤泥质黏土	加固前	2	2	1	1.5	100.0
		加固后	1	3	3	3.0	
④ ₁	淤泥质粉质黏土夹粉砂	加固前	6	5	3	3.8	17.4
		加固后	2	5	4	4.5	
⑤ ₃	粉砂	加固前	2	13	10	11.5	30.4
		加固后	3	19	12	15.0	
⑥ ₁	淤泥质粉质黏土夹粉砂	加固前	10	9	4	6.1	16.4
		加固后	10	10	6	7.1	

不同区块土层的主要物理力学指标加固前后对比见表 5。从表中数据可看出：1) B₁₁ 区③₂ 层经

预压+降水强夯加固，土体含水量明显下降，根据液性指数划分，加固前土体液性指数为 1.29，处于流塑状态；加固后该层土体液性指数小于 1.0，处于软塑状态；无侧限抗压强度从 16.6 kPa 提高到 23.0 kPa，提高 38%；假如该层土为表层土，按照标准贯入击数和经验公式推算，则其承载力特征值从 58 kPa 提高至 81 kPa，加固前后该土层的压缩模量从 3.51 MPa 提升至 4.38 MPa，提升 25%。

2) 根据液性指数指标分析，加固前 B_{9.1} 区② 层为软塑状态，加固后，其液性指数为 0.66，处于可塑状态，该层土无侧限抗压强度从 17.8 kPa 提升至 25.4 kPa，提升比例为 43%。3) B_{3.1} 区③₂ 层加固后，土体状态由流塑状态变为软塑状态，无侧限抗压强度由 17.0 kPa 提升至 22.1 kPa，提升比例为 30%，压缩系数由 0.902 MPa⁻¹ 下降至 0.546 MPa⁻¹，下降比例为 40%。

表 5 不同区块土层加固前后指标对比

区块土层	含水率/%	密度/ $t \cdot m^{-3}$	孔隙比	液性指数	无侧限抗压强度/kPa	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa
B ₁₁ 区 ③ ₂ 层	加固前	47.4	1.785	1.077	1.29	16.6	0.591
	加固后	34.3	1.820	0.989	0.97	23.0	0.483
	变化	-13.1	0.035	-0.088	-0.32	6.4	-0.108
B _{9.1} 区 ② 层	加固前	40.5	1.766	1.145	0.79	17.8	0.661
	加固后	39.6	1.785	1.097	0.66	25.4	0.634
	变化	-1.1	0.019	-0.048	-0.13	7.6	-0.027
B _{3.1} 区 ③ ₂ 层	加固前	38.6	1.773	1.086	1.15	17.0	0.902
	加固后	35.0	1.818	1.014	0.97	22.1	0.546
	变化	-3.6	0.044	-0.072	-0.18	5.1	-0.356

根据表5检测数据分析, 经加固后, 土体表层和测试深度以内的深层均有较明显的提高, 其中表层的SPT值提高50%以上, 其压缩性和表层承载力有了明显的提升, 可满足场地后续使用要求。深层土体的SPT值及其他各项物理力学指标也有明显的提升, 软弱土层含水量下降, 流动性减小, 压缩性降低。由此可见, 预压+插板降水强夯可以较好地满足软弱土地基表层及深部加固处理的需求, 地基处理达到了预期效果。

4 插板预压联合降水强夯对复杂互层地基液化性能影响

地基液化是地基基础地震破坏的主要震害之一, 对于饱和砂土场地, 在地震动荷载作用下, 土体中的孔隙水压力急剧上升, 有效应力降低为零, 土体处于悬浮状态, 土体的抗剪强度显著降低, 地基失去了承载能力, 发生破坏。地震液化分析是复杂互层砂质土地基加固分析的重要工作。

对于液化潜力的评估和液化等级的判别, Seed和Lee^[5]在循环荷载试验的基础上定义了液化现象, 认为液化有2个过程, 即初始液化和完全液化。初始液化为孔隙水压力等于围压时的状态, 完全液化定义为在很宽的应变幅宽范围内的抗剪强度完全丧失。对于松散砂, 初始液化和完全液化几乎同时发生; 对于密实的砂土, 液化状态则和循环荷载产生的应变幅值相关, Seed和Lee认为密实砂土的部分液化对应的应变幅值通常为5%~20%。Kuerbis等^[6]认为砂土抗液化的能力不仅与密实度相关, 还和砂粒间的摩擦角和围压相关, 在同等围压下, 角砾比圆砾具有更好的抗液化性能。一些学者指出, 饱和砂土的液化潜力和动剪切强度和动模量密切相关, 而上述2个指标取决于土体密度、应变模量、颗粒级配、应力历史^[7]。我国对于地震液化的判别主要采用未经杆长修正的标准贯入击数法, 即实测标准贯入击数大于临界标准贯入击数时认为不液化。而临界标准贯入击数则依据标准贯入击数基准值、地下水

位深度、黏粒含量、设计地震分组确定, 其中液化判别标准贯入击数基准值依据设计基本地震加速度确定。

依托项目针对各区块建筑功能的不同, 采用不同的设计原则。对于单体建筑区, 主要采取桩基础或者浅基础解决地震液化问题。对于无建筑物区(一般道路、草坪、管线), 不针对地基液化问题作专门的处理, 主要采取插板预压联合降水强夯法分别针对工后沉降、表层承载力问题进行处理。插板预压和降水强夯均能在一定程度上促进土体的固结和密实, 减轻地震液化问题, 但其改善程度需要结合加固前后的检测数据进行对比分析。

项目场地按照等效剪切波速换算的场地类别为IV类, 设计基本地震加速度为0.15g。根据规范对场地饱和砂土场地的液化可能性进行初判, 对可能液化的情况依据标准贯入试验判别法进一步判别液化情况。液化判别标准贯入锤击数临界值 N_{cr} 可按式(1)计算^[8]:

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/M_c} \quad (1)$$

式中: N_0 为液化判别标准贯入锤击数基准值; β 为调整系数, 设计地震第1组取0.80, 第2组取0.95, 第3组取1.05; d_s 为饱和土标准贯入点深度, m; d_w 为地下水位在地面以下的深度, m, 当地面位于水下时, 取0; M_c 为黏粒含量百分率, 小于3或为砂土时, 取3。

当 $N < N_{cr}$ 时为液化; 否则为不液化。勘察结果表明, 场地20 m深度范围内存在的饱和砂土和粉土主要为⑤₁粉砂夹粉质黏土、⑤₂粉砂夹粉质黏土、⑤₃粉砂、⑤₄粉砂及⑤₅粉砂夹粉质黏土。采用先初判, 后用标准贯入试验法进行复判的方法对全部85个钻孔进行了地震液化判别。

对⑤₁、⑤₂及⑤₅粉砂夹粉质黏土进行液化判别时, 依据JGJ 83—2011《软土地区岩土工程勘察规程》^[9]6.3.2条, 黏粒含量百分率 M_c 采用各夹层土实测值的平均值, 确定各孔液化等级, 得到场地根据液化等级分布的液化程度, 见表6。

表 6 液化等级统计

液化等级	钻孔数量/个	占比/%
不液化	21	24.7
轻微液化	34	40.0
中等液化	12	14.1
严重液化	18	21.2

以 $B_{9.1}$ 区加固前后的 SPT 进行液化判别对比分析, 加固前液化判别点 S_{33} 、 S_{36} 、 Y_{69} 、 Y_{71} 、 Y_{72} 等的液化等级均为严重。加固后 SPT 试验结果见表 7。

表 7 $B_{9.1}$ 区块 SPT 试验结果

地层 编号	地层名称	阶段	件 数	标准贯入击数/击			增长率 %
				最大值	最小值	平均值	
① ₁	细砂	加固前	6	11	6	7.8	57.4
		加固后	6	14	11	12.3	
① ₂	(黏土)	加固前	1	8	8	8.0	25.0
		加固后	1	10	10	10.0	
②	黏土	加固前	1	3	3	3.0	33.3
		加固后	1	4	4	4.0	
④ ₂	粉砂	加固前	1	5	5	5.0	20.0
		加固后	1	6	6	6.0	
⑤ ₁	粉砂夹粉质 黏土	加固前	5	13	7	10.6	41.5
		加固后	2	16	14	15.0	
⑤ ₃	粉砂	加固前	9	14	6	10.1	20.5
		加固后	11	16	9	12.2	
⑥ ₁	淤泥质粉质 黏土夹粉砂	加固前	6	12	4	7.3	26.6
		加固后	7	12	7	9.3	

根据初判, ⑤₁、⑤₃、⑥₁ 层存在液化的可能, 根据式(1)进一步判别, 各土层的临界标贯击数分别为 19.8、23.8、26.5 击, 加固后各土层的标贯击数分别为 12.2、15.0、9.3 击。对存在液化砂土层、粉土层的地基, 应探明各液化土层的深度和厚度, 按式(2)计算钻孔的液化指数 I_{IE} :

$$I_{IE} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{N_i}{N_{cr,i}} \right) d_i W_i \quad (2)$$

式中: n 为在判别深度范围内每一个钻孔标准贯入试验点的总数; N_i 、 $N_{cr,i}$ 分别为 i 点标准贯入锤击数的实测值和临界值; d_i 为 i 点所代表的土层厚度, m ; W_i 为 i 土层单位土层厚度的层位影响权函数, m^{-1} 。

液化等级与液化指数的对应关系: $0 < I_{IE} \leq 6$ 为

轻微液化, $6 < I_{IE} \leq 18$ 为中等液化, $I_{IE} > 18$ 为严重液化。计算得加固前区块液化指数为 35.2, 液化等级为严重。经插板预压联合降水强夯后, 根据上述液化指数计算公式得到的液化指数为 26.0, 液化等级仍然为严重液化。根据计算结果分析, 插板预压联合降水强夯法对于降低液化层含水量、提高其标准贯入击数在内的各项物理力学指标起到了明显的作用, 该法对于提高地基表层承载力、减少工后沉降有明显作用, 能够一定程度上降低液化指数, 但是该加固方法本身的液化处理效果有一定的局限性, 如果场地对于液化控制要求较为严格, 经该法处理后的地基仍应采取桩基础等方式应对液化问题, 或者采用挤密砂桩、振冲碎石桩等更为有效的方式处理。因此, 针对地基液化的设计是合理、经济的。

5 结论与建议

1) 插板预压联合降水强夯可以较好地发挥吹填土自重力对于原状土的预压作用, 轻型井点真空降水对于场地吹填土具有快速排水的作用, 可以减少强夯过程夯击能在水中的消耗, 提高夯击能量利用率, 促进动力固结, 避免强夯过程超孔隙水压力的存在而产生的液化现象, 说明该工艺对于复杂互层土上吹填粉细砂的场地条件具有良好的适应性。

2) 通过插板预压联合降水强夯过程中的监测、原状钻孔检测和加固前后的原位测试, 结果表明, 轻型井点对场地吹填土排水效果良好。对不同深度孔隙水压力监测数据的分析表明, 不同深度的孔压增量非常接近, 说明夯击能在不同深度的传递效果良好。孔压消散时间曲线表明夯击后 2 d 孔压消散基本完成, 说明强夯对于加固表层土具有良好的适应性; 且由于孔压消散速度较快, 可以根据孔压消散曲线合理缩短夯击间隔时间, 从而加快施工工期。上述分析表明, 对于吹填粉细砂、下为软硬互层的场地, 插板预压联合降水强夯工艺的选择是合适、有效的。

(下转第 183 页)