

浸水预溶强夯法处理盐渍土地基试验研究

黄晓波¹, 周立新¹, 何淑军², 周虎鑫¹

(1.空军工程设计研究局, 北京 100068; 2.新疆时代石油工程有限公司勘察分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘 要: 盐渍土的盐溶特性是其最主要的病害之一, 如何有效地改良盐渍土地基以满足工程需要是研究的重点。对西北某盐渍土地基处理开展试验研究, 采用砂井加漫灌的方式进行浸水预溶, 有效地降低了地基土体的含盐量, 并调整了其含水率, 进而采用强夯的处理方法提高地基土强度, 消除或降低地基土的溶陷性。通过夯后沉降量、密实度、载荷试验等效果检测, 浸水后强夯的处理效果良好, 可以满足设计要求。

关 键 词: 盐渍土; 地基处理; 浸水; 强夯; 试验

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Study on test of saline soil ground treatment with the soaking and dissolving combined dynamic compaction method

HUANG Xiao-bo¹, ZHOU Li-xin¹, HE Shu-jun², ZHOU Hu-xin¹

(1. Air Force Engineering Design & Research Institute, Beijing 100068, China; 2. Xingjiang Shidai OELC, Kelamayi 071051, China)

Abstract: Salt dissolving of saline soil is harmful to construction. It is important to effectively treat saline soil. With the example of saline soil ground treatment of airfield in Northwest China, test of the soaking and dissolving, test of dynamic compaction for saline soil treatment are studied. The project is successfully constructed in accordance with technical requirement. The result of stabilization is well acquired according to checking.

Key words: saline soil; ground treatment; soak; dynamic compaction; test

1 引 言

盐渍土是我国西北地区广泛存在的一种不良地基, 它是盐土和碱的总称。由于它具有吸湿、膨胀、淋溶、沉陷等特性, 对在其上的建筑物有着很大的危害^[1]。而盐渍土的盐溶危害, 是盐渍土地基最主要的病害之一, 当盐溶发生时, 地基土的强度会迅速降低, 并伴随着大幅沉陷, 造成置于其上的建构物的破坏。对盐渍土地基处理的主要目的是根据盐渍土盐溶特性, 改善盐渍土的物理力学性质, 以消除或减少地基因浸水面引起的溶陷现象^[2]。

浸水预溶可使地基土盐胶结构改变^[3], 并在一定程度上降低地基土含盐量; 强夯处理可使地基土在瞬间高能的作用下被挤密, 起到提高干密度的作用。另外, 强夯处理可使一定范围内地基土达到某种程度的超固结状态而起到减少剩余沉降量的作

用。

本文针对西北某机场盐渍土地基, 进行了不同浸水(加湿)条件下、不同强夯工艺的处理试验, 并结合处理效果对比分析, 得出了指导施工的处理方法及控制参数。

2 工程概况

拟建机场场区位于湖相堆积平原地貌和风成地貌单元, 场地内地形平坦。场地自然地面以下 30 m 深度范围内地层均为第四系沉积物, 自上而下可分为①粉土、②黏土、③粉砂、④黏土、⑤粉砂、⑥黏土。地基土主要物理力学指标见表 1。

场地地基为不均匀地基, 地基土的易溶盐成份以硫酸、亚硫酸盐为主, 总含盐量在 0.054 %~1.493 %之间, 平均含盐量为 0.295 %, 其中总含盐量大于 0.3 %的试样占 39 %, 属强~中等盐渍土^[5]。

表 1 场地土层的主要物理力学性质指标
Table 1 Indices of physico-mechanical properties of soils

土层 编号	土层	平均层厚 / m	含水率 / %	湿密度 / g · cm ⁻³	干密度 / g · cm ⁻³	孔隙比	塑性指数 / %	压缩系数 α_{1-2} / MPa ⁻¹	压缩模量 / MPa	溶陷系数 δ
①	粉土	2.10	3.7	1.526	1.506	0.800	9.1	/	18.5	0.023 0
②	黏土	3.0	9.8	1.706	1.510	0.830	18.8	0.11	19.8	0.061 3
③	粉砂	1.80	2.7	1.602	1.549	0.717	/	/	17.8	0.012 0
④	黏土	2.30	20.1	1.866	1.603	0.689	17.2	0.16	12.1	0.000 3
⑥	黏土	>20	23.2	2.022	1.639	0.679	20.0	0.19	9.50	/

由表 1 可知, ①粉土; ②黏土; ③粉砂的盐渍土的溶陷系数均大于 0.01, 按《盐渍土地区建筑规范》判定为溶陷性土。道槽内地基溶陷变形量计算值为 11~30 cm, 平均可达 21.9 cm, 溶陷等级为 II 级。场区盐渍土中 Na_2SO_4 的含量在 0.002 %~0.462 %之间, 均小于 1 %的标准。因此, 场地盐渍土不具盐胀危害。

场地内无稳定的地表径流, 仅在丰水期有暂时性水流汇集于地势低洼处, 场地内出露的地下水属第四纪松散孔隙潜水, 赋存于黏土层中, 主要受大气降水、农业灌溉用水的补给。其稳定地下水位在地表下 13.5 m, 近年来由于新建水库以及农业灌溉影响, 呈逐渐上升趋势。

3 地基处理

根据场道设计, 其地基处理的要求^[6]为:

(1) 最终剩余沉降量小于 4 cm; (2) 不均匀沉降小于 1.5 %; (3) 深度 0~80 cm 处压实度达到 95 %, 深度大于 80 cm 的压实度达到 90 %。(4) 地基的似加州承载比 CBR 大于 4, 回弹模量大于 40 MPa。

分析后认为, 场道地基存在的问题主要有:

(1) 具有溶陷性, 场道地基的沉降与不均匀沉降要求不能满足水文条件变化; (2) 土基表面强度低, 一定深度土层需提高压实度。

根据地勘资料, 本场地①粉土、③粉砂层含有较多的盐胶结集粒。在遇水盐类溶解后, 集粒则可还原成细小土粒, 填充孔隙, 而使土体产生溶陷, 并且这两层土的渗透性较好: ①粉土渗透系数 $k = 1.085 \times 10^{-3}$ cm/s, ③粉砂 $k = 5.683 \times 10^{-3}$ cm/s。针对这两层土的盐溶, 最好的解决办法是浸水预溶。但对于②黏土层由于其渗透性较差 ($k = 5.405 \times 10^{-4}$ cm/s), 在该层土中的水头损失很大, 特别是该层浸水后渗流水为盐溶液, 渗流效果更差, 通过浸水预溶的方法降低其含盐量的难度很大。因而对该层土拟通过强夯法提高其干密度、降低孔隙比, 从而减少其溶陷沉降量。

②层黏土位于土层①、土层③之间, 是隔水层,

故拟在浸水时采用砂井的深层浸水方法。使用砂井的作用是: (1) 土层①溶解的盐溶液有良好的通道向较深的土层渗流, 土层③在较短时间内可实现浸水; (2) 对于土层②来讲, 由于该层土天然含水率较低, 浸水时的砂井有一定的侧渗作用, 恰好起到了对该层土的加湿目的, 有利于夯实; (3) 在地基土浸水后含水率很高, 而砂井此时则作为强夯时产生的超孔隙水压力的消散通道。对于砂井的设计则同时考虑到以上的作用效果, 使其具有很好的协调作用。

此外, 由于地基土在浸水后强度降低, 含水率偏高, 故在强夯时应加一定厚度的垫层以起到便于施工、置换以及提供超孔隙水压力的水平消散通道等作用, 而垫层的存在对于防止盐份在不利位置富集可起到隔离作用。综上所述, 最终选择的处理方法为浸水预溶加置换强夯处理。

由于场地地层情况复杂, 地基土的渗透性、浸水效果、浸水后的可夯性等诸多问题具有不确定性, 在地基处理的施工过程中, 每一道施工工序都直接影响工程的质量与投资。因此, 希望通过现场试验, 寻找质量保证、技术可行、经济合理的盐渍土地基处理方法、施工工艺及相应的施工控制办法, 以达到保证工程质量、降低工程造价、控制工程投资、确保施工工期的目的。

4 浸水试验

为确定合理的施工参数, 取得良好的浸水效果, 在现场浸水试验中选择有代表性的区域进行了现场浸水试验。按砂井间距不同分 2 个浸水试验小区进行。

浸水试验以预估浸水量来控制浸水, 预估浸水量主要以①粉土、③粉砂的洗盐进行预估。在洗盐完成的同时, 经过一定时间的晾晒, 使土层②的平均含水率能在最佳含水附近 (局部未浸透时, 在强夯作用下能很快浸透)。浸水量计算按下式^[4]计算:

$$y = knC + 0.02(50 - t) \quad (1)$$

式中 y 为对 1 m 厚盐渍土层累积的每 m^2 浸水量 (cm); k 为与冲洗水矿化度有关的参数; n 为与被处理的土壤类型有关的系数; C 为地表下 1 m 厚土层的平均含盐量(%); t 为浸水时的平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

计算后试验 I 区 (以下简称 I 区) 预浸水量为 $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 试验 II 区 (以下简称 II 区) 预浸水量为 $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。

4.1 施工工艺

4.1.1 砂井

(1) 测设砂井孔位, 采用钻机或人工成孔, 孔径为 110~127 mm;

(2) 孔深以穿透②层黏土, 并进入土层③ 50 cm 为宜, 在 I 区 (土层②厚 2.0~3.5 m) 孔深约 5.5 m, 在 II 区 (土层②厚 1.2~2.0 m) 孔深约 3.5 m;

(3) 钻孔间距在 I 区为 2.0 m, 在 II 区为 3.5 m, 正方形布置。

4.1.2 浸水

(1) 根据地面高差大小, 将场区分为若干小区;

(2) 采用淡水, 保持 20 cm 水头高度的漫灌方式进行人工浸水作业;

(3) 记录各区浸水量、浸水时间, 及时检测浸水深度及含盐量变化情况;

(4) 达到计算所得的预浸水量后进行晾晒, 直至具备下一步施工条件。

4.2 浸水过程

在开始浸水的最初阶段, 入渗速度较快, 而随着浸水时间的延长, 入渗速度明显减慢, 这是由于在渗透过程中随渗透距离的增长, 水头损失迅速增加而造成的。可以认为, 渗水速度是由土层渗透系数、渗水距离、水头高度、砂井间距等多种条件而综合确定的。

I 区、II 区分别经过 7 d 和 9 d 后, 预估浸水量的水体全部入渗, 在试验区周边水位探测井中有大量渗水; 经探坑并取样, 验证了土层①、土层③含盐量明显降低 (平均值均小于 0.1%)。入渗水基本均匀渗透, 未出现在局部位置集中渗露的现象。土层②大部分浸润, 砂井中间点未浸润部分厚度及直径一般不大于 0.8 m。

浸水完成后即进入晾晒期, 晾晒的目的主要是调整地基土含水率, 达到满足下一步施工条件; 晾晒一段时间后, 在围堰的土埂处, 出现盐结晶, 土层①含水率随晾晒时间延长很快降低, 土层②含水率降低幅度很小, 砂井中间点未浸润部分逐渐浸润缩小。

4.3 浸水后的检测及观测

在现场浸水及晾晒完成后, 进行了表面高程观测、浸水后土的常规物理力学指标试验等测试, 对预溶的效果进行检验, 并重新评价预溶后的场地土。

对比预溶前后的高程数据, 试验 I 区浸水前后高程差为 1.5 cm, 试验 II 区高程差为 2.5 cm。如果视浸水前后高程差全部为由于地基土溶陷所产生的 (由于漫灌过程中局部有溢水现象, 有少量表层土溢出或阻水时取走), 那么溶陷沉降量也较计算值小。这是由于室内的溶陷系数测定是在有荷条件下进行的, 而在现场浸水后并未采用堆载预压的方式进行处理; 另外, 由于土层③为黏土层下伏土层, 黏土层的结构强度使地表未随下层的溶陷而沉降, 因而认为, 表面沉降数据仅为土层①在自重溶陷下产生, 故而较小。

将试验 I 区浸水前后的物理力学指标对比情况列入表 2。

表 2 浸水前后地基土的物理力学指标对比
Table 2 Indices of physico-mechanical properties of soils

土层 编号	浸水 前后	含盐率 /%	孔隙比	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	压缩系数 / MPa^{-1}	压缩模量 / MPa
①	前	0.35	0.798	1.506	0.10	17.8
	后	0.08	0.816	1.476	0.41	4.3
②	前	0.47	0.843	1.502	0.09	20.4
	后	0.45	0.838	1.503	0.23	7.8
③	前	0.26	0.734	1.558	0.11	14.5
	后	0.04	0.751	1.524	\	\

由表可知, 浸水后①、③层地基土的含盐量和干密度降低, 孔隙比增大, 强度降低, 压缩性增强; 土层②的含盐量、干密度、孔隙比指标变化不大, 强度降低, 可压缩性增强。

综上所述: 场地土根据土层②的厚度采用不同间距砂井的设计是合理的, 场地土可以均匀浸润, 并在工期上相协调; 浸水可满足①、③层地基土的预溶目的, 使其含盐量降低, 同时可以使土层②充分浸润, 并起到了破坏盐胶结结构、增加含水率的作用; 场地各土层在浸水后强度降低, 可压缩性增强, 因此, 必须进一步处理以满足场道使用要求。

5 强夯试验

场区内地基土在浸水后, 强度会大幅降低, 为了提高地基土强度, 消除或降低地基土的溶陷性, 对浸水后的地基土体采用强夯法加固处理^[4]。强夯

处理的主要目的是：（1）提高地基土的干密度，减少孔隙比，以达到消除和减少溶陷沉降量；（2）满足规范的压实度要求；（3）提高地基土的均匀性及整体性，消除或减少差异沉降量及剩余沉降量。

5.1 强夯试验简述

为对比处理效果，并减少场地条件较好（含盐

量低，天然含水率高）区域的工程投资，强夯试验分浸水后场地强夯及不浸水直接强夯 2 个试验小区。首先进行了不同能击（1 500，2 000，2 200 kN·m）的单点夯试验，根据单点夯试验的夯坑体积、夯沉收敛情况、隆起以及拟处理深度的要求等最终确定的强夯试验施工参数如表 3。

表 3 强夯试验参数

Table 3 Parameters of dynamic compaction test

方法	主夯							满夯				
	夯击能 / kN·m	夯点间距 / m	遍数	布点方式	锤重 /10 ³ kg	落距 / m	击数	夯击能 / kN·m	击数	布点方式	锤重 /10 ³ kg	落距 / m
浸水	2 000	4.5	2	正方形	16.8	12	12	800	3	锤印搭接	16.8	4.8
不浸水	2 000	4.5	2	正方形	16.8	12	12	800	3	锤印搭接	16.8	4.8

强夯施工程序为：场地清盐后平整场地→测平场标高→铺设 50 cm 砂砾石→测垫层标高→第 1 遍夯点布置→第 1 遍点夯试验→第 1 遍强夯→平整场地→测平场标高→第 2 遍夯点布置→第 2 遍点夯→第 2 遍强夯→平整场地→测平场标高→平夯施工→测平场标高→检测。

5.2 夯后检测

5.2.1 平均夯沉量测试

将浸水试验 I 区、II 区以及直接强夯区的平均实测夯沉量数据列于表 4。

表 4 强夯平均夯沉量

Table 4 Result of subsidences observation

指标	浸水试验 I 区	浸水试验 II 区	直接强夯区
夯沉量 / m	0.22	0.43	0.11

根据平均夯沉量数据可得：浸水后强夯的处理沉降量大于不浸水直接强夯；浸水 II 区平均夯沉量大于浸水 I 区。

数据表明：浸水后原盐渍土胶结结构被破坏，含水率增加（接近最佳含水率），有益于密实；主要沉降发生在土层②，由于其溶陷系数相比较较大，因此，在该层较厚区域处理沉降量大。

5.2.2 标准贯入试验

在浸水试验区浸水后的强夯前后以及直接强夯区的强夯前后，分别进行了标准贯入试验，结果如图 1、图 2。

从图中可以明显看出，强夯处理后地基土强度有大幅提高，但在面层局部有所降低，可通过加强面层平夯处理，或采用冲击压实的方法加以解决，以保证地基处理的均匀性。

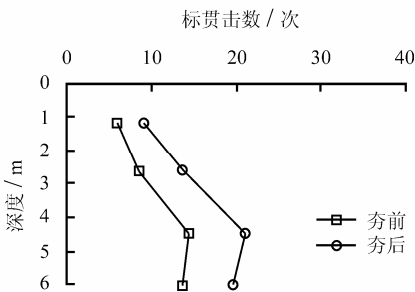


图 1 浸水强夯前后标贯资料对比曲线

Fig.1 Curve of SPT for dynamic compaction (Soaking)

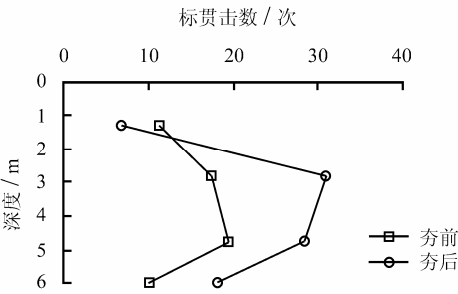


图 2 直接强夯前后标贯资料对比曲线

Fig.2 Curve of SPT for dynamic compaction (No Soaking)

5.2.3 压实度试验

强夯处理后，采用环刀法进行了处理后土基的压实度试验，将试验数据整理后列于表 5、表 6。

表 5 直接强夯试验区（不浸水）夯后压实度成果表

Table 5 Compaction effect of dynamic compaction (No Soaking)

指标	①粉土	②黏土	③粉砂	④黏土
取样深度 / m	1.0	2.0	3.0	5.0
干密度 / g·cm ⁻³	1.60	1.63	1.58	1.69
最大干密度 / g·cm ⁻³	1.61	1.80	1.61	1.84
压实度 / %	99	90	98	92

表 6 浸水强夯试验区夯后压实度成果表
Table 6 Compaction effect of dynamic
compactions (Soaking)

指标	①粉土	②黏土	③粉砂	④黏土
取样深度/m	1.0	2.0	3.0	5.0
干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.60	1.76	1.57	1.73
最大干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.61	1.80	1.61	1.84
压实度/%	99	99	98	94

由以上数据可以看出, 浸水后强夯的压实效果要优于直接强夯。

5.2.4 浸水载荷试验

浸水载荷试验的主要目的是检验强夯效果, 对处理后地基溶陷评价提供依据。另外, 对不同工法的处理效果进行对比。载荷试验主要在土层②上进行, 试验结果见表 7。

表 7 载荷试验成果汇总表
Table 7 Result of load-settlement test

指标	浸水试验 I 区	浸水试验 II 区	直接强夯区
变形模量/MPa	0.22	0.43	0.11
溶陷系数	0.008 2	0.003 2	0.025

由表可以看出, 浸水强夯处理后的溶陷系数小于 0.01, 说明场地土的溶陷性已基本消除, 经计算溶陷沉降量小于 4 cm, 满足设计要求。而直接强夯处理后地基的溶陷系数大于 0.01, 仍为溶陷性土, 故直接强夯只能用于对溶陷要求不高的区域, 并且处理后应对场地溶陷性重新评价, 以确定其使用安全性。

上接第 2079 页

(1) 陶粒粉煤灰混凝土具有轻质、高强度、高模量和易施工等诸多优点。

(2) 陶粒粉煤灰混凝土回填体作用于台背上的土压力明显小于其他材料。

(3) 陶粒粉煤灰混凝土的模量高, 自身的压缩变形小; 重度轻, 对地基 (尤其是软土地基) 和相邻路堤的附加应力小, 回填区和地基的沉降变形明显小于其他材料。

总之, 陶粒粉煤灰混凝土应用于台背回填具有明显的优越性, 是一种值得推荐的桥涵台背回填材料。

参考文献

- [1] 董金道. 发展粉煤灰和粉煤灰陶粒混凝土势在必行[J]. 粉煤灰, 1999, (6): 6—9.

6 结 论

(1) 采用不同间距砂井加漫灌的浸水工艺, 使土层①和土层③含盐量降低, 又充分浸润了土层②, 并破坏了盐胶结结构, 达到了浸水预溶的目的。

(2) 浸水预溶后地基土体干密度降低, 孔隙比增大, 强度降低, 压缩性增强。采用强夯的处理办法是必要的, 也是切合实际的。

(3) 强夯试验分浸水后强夯和直接强夯, 根据夯后沉降量、密实度、载荷试验等效果检测, 浸水后强夯效果最佳。

(4) 针对黏土层的厚薄不同, 浸水量控制标准: I 区为 $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2$, II 区为 $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。浸水后强夯处理施工参数为: 单击夯击能为 $2\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 击数为 12 击, 夯点间距为 4.5 m, 正方形布点, 夯击 2 遍, 第 2 遍夯点位于第 1 遍 4 夯点中间; 主夯完成后采用 $800 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 能击进行满夯, 1/3 锤印搭接。

(5) 对盐渍土地基处理, 采用浸水加强夯的联合处理方法是行之有效的, 处理后地基土强度、密度、均匀性增加, 各项检测结果均满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] JGJ79—2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 叶书麟, 叶观宝, 赵志缙. 地基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [3] 徐攸在, 史桃开, 洪乃丰, 等. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [4] 华南工学院, 浙江大学, 东南大学, 等. 地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- [5] GB50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [6] MH5014—2002, 民用机场飞行区土(石)方与道面基础施工技术规范[S].

DONG Jin-dao. It is a must to develop light-weight synthetic fly ash aggregate and light-weight synthetic fly ash aggregate concrete[J]. *Coal Ash China*, 1999, (6): 6—9.

- [2] 李琪, 肖鹏, 张小平. 轻质回填材料的试验研究[J]. 华东公路, 2001, (2): 55—58.

LI Qi, XIAO Peng, ZHANG Xiao-ping. Study on Light-weight Backfill[J]. *East China Highway*, 2001, (2): 55—58.

- [3] GB/T 17431.1, 轻集料及其试验方法[S].
- [4] JTJ034, 公路路面基层施工技术规范[S].
- [5] ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.3[P]. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., USA, 2003.