强夯与真空预压处理相同地基的加固效果分析

周广泉　沈昌培
（山东省机械施工公司，济南，250021）

张晓明
（济南机场建设指挥部，济南，250021）

提　要　本文介绍了对黄河冲积成因的软弱地基同时采用动力和静力固结两种加固方法。通过对加固过程的原位测试和加固效果测试，分析了两种不同方法的加固特点和差异，为今后同类地基的处理提供参考。

一　概　述

预压法是一种静力固结加固方法，在静荷载作用下土中孔隙水通过竖向排水体逐渐排出，地基发生沉降和固结。在预压期间其沉降可大部或全部完成，从而提高地基的强度和稳定性。其特点是加荷速度很缓慢，预压周期长达数月。强夯则是一种动力固结加固方法，在极短的时间内对地基土施加一个巨大的冲击能量，并立刻转化为各种波传到土体内，使土体结构破坏或液化并被强制压缩，随后排水固结、触变恢复。这两种方法在工艺原理上有较大差异。结合济南机场建设，对饱和度较高的粉土与粘性土互层的软弱地基，同时采用了动力和静力固结的加固方法。

二　工程概况

济南机场拟新建飞行区，工程地处山前倾斜平原与黄河冲积平原交接地带，黄河冲积物与山前冲积物交替沉积并间夹湖沼相沉积，形成了多层次的复杂沉积结构。地下水位埋深约 2.0m，水位以下各土层均呈饱和状态，并具触变性及地震液化特点。地层形成年代较新，浅部为欠固结土、结构松散、具中高压缩性，岩性在垂直和水平方向上差异较大。在未来场道结构静荷载和飞机动荷载附加应力作用下，计算沉降变形为 15.6~19.04cm，其中深部沉降约占 40%左右。天然地基不能满足设计和使用要求。新建跑道南北长 2600m，宽 60m，包括滑行道、站坪等需加固处理的面积约 27 万 m^2。场区典型工程地质剖面如图 1 所示，主要物理力学性质指标见表 1。

设计对地基加固提出以下技术要求：

1．预计总沉降量的 95%以上在施工过程中完成；差异沉降量，弯沉盆直径不小于 100m，盆底弯沉量不大于 25mm；

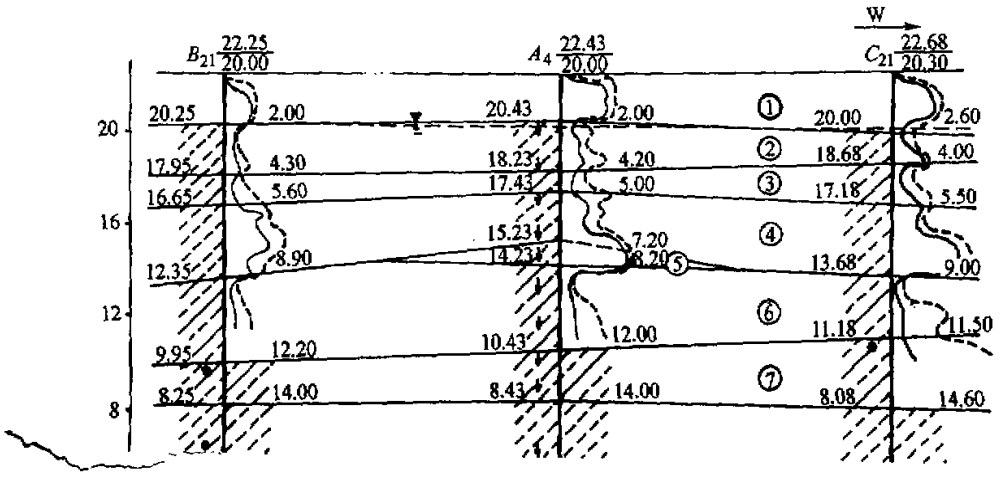


图 1　场区 B21—C21 典型工程地质剖面图

表 1　各土层主要物理力学性质指标

土层序号	岩性名称	ω (%)	ρ (kN/m³)	e	I_p (%)	I_L (%)	a_{1-2} (Mpa⁻¹)	E_s (MPa)	$N_{63.5}$ (击)	q_c (MPa)	f_s (MPa)
1	粉砂	17.89	15.6	0.975			0.20	10.55	2.95	2.75	0.031
2	粉土粉质	26.07	19.3	0.833	8.51	0.91	0.23	9.32	3.37	1.001	0.015
3	粘土	30.47	18.9	1.024	11.44	0.95	0.43	5.63	3.27	0.994	0.035
4	粉土粉土	28.36	19.2	0.883	8.32	1.14	0.25	7.33	5.03	3.245	0.042
5	(含淤泥质)	30.51	19.1	0.963	8.82	1.24	0.43	5.87	4.70	1.40	0.025
6	淤泥质粉质粘土粉质	37.93	18.6	1.199	15.21	1.067	0.54	4.16	4.17	1.027	0.021
7	粘土	28.54	19.3	0.899	13.17	0.61	0.35	7.54	5.84	1.33	0.045

2. 加固后土基的平均固结度不低于 95%，回弹模量不低于 25.0MPa，并消除地震液化。

机场场道采用混凝土刚性道面，计算道面结构荷载为 26.16kPa，飞机荷载为 51.8kPa。由此可见对地基的强度要求不高，主要是解决地基的变形问题。由地质勘察资料可知，第 2 层粉土呈饱和、可塑至流塑状态，液性指数 I_L=0.44-1.34；灵敏度 St=4.078，在外部荷载特别是动荷载作用下,土体结构极易破坏。第 3 层粉质粘土的液性指数 I_L=0.72~1.20,高孔隙比、可塑至流塑，相当一部分区域已接近或达到软土指标。第 5 层和第 6 层是淤泥质粉

土和淤泥质粉质粘土,其天然孔隙比 e 一般在 0.9~1.2,压缩系数 $a_{1\text{-}2}$=0.16~1.14MPa^{-1} ,压缩模量 E_s=3.265MPa,属高压缩性土，且含水量大于或接近液限，基本具备软土特征。由于该软弱层处在 7.0~9.0m 以下，加之渗透系数较小，处理难度较大。根据地质条件和加固技术要求，有关设计、施工和科研单位参与方案论证，共提出 6 项地基处理方案即：堆载预压；真空预压；振冲碎石桩；深部振动沉管碎石桩与浅部中小能量强夯分层处理；降水强夯和非降水强夯。通过对各方案的技术经济指标综合对比分析，确定选用真空预压和非降水强夯两方案并分别进行了加固试验。主跑道上(长 2600m，宽 49m)采用真空预压方案，加固面积为 14.5 万 m^2。道肩、南北联络滑行道、站坪等区域采用强夯，加固面积为 15.6 万 m^2。对强夯增补了 4.0m 以上密实度达到 0.95。4.0~6.0m 范围内达到 0.90 的技术要求。

1. 施工设计

真空预压在主跑道全长上分十一个施工区，每块单元面积约 1.5 万 m^2。真空预压法加载方式与堆载预压不同，其效果与膜下达到的真空度大小关系很大。本项工程采用真空预压的关键是解决上部粉砂和粉土的垂直密封问题。采用深层搅拌机械和粘土浆，沿预压区外围搅拌粘土密封墙，厚 0.8m、深 6.0m。根据固结计算塑料排水板的打设密度为 1.3×1.3m 正方形布置。为加速下部淤泥质土层的固结,排水板插入深度为 12.0m。封膜后即开始抽真空，射流泵布置的数量以使膜下真空度达到 600mm 汞柱为标准，以保证在预压期间始终保持 80kPa 的等效预压荷载。在此条件下预压时间不少于 80-90 天，当总沉降量达到或超过计算值以及最后七天的沉降速率小于 1.0mm 时，可揭膜验收。该方法的不足之处是：受真空度的限制，加固深度有限，区域地面变形呈锅底状，各处理单元之间的接合处需另作处理。

在进行初步试夯时，采用 2000kN·m 和 3000kN·m 的能量加固深度相同，只达到了第 3 层粉质粘土层的上表面，原因是第 3 层粉质粘土的存在，对夯击能量有阻尼或吸收的“软垫效应”，影响有效击实深度。对试夯参数和工艺作了调整。单夯能量为 3000kN·m，夯点中心距 4.0×4.0m 正方形布置。分主、次、插夯的施工顺序。即按 8.0×8.0m(隔点)夯距对主夯点分四遍共夯 24 击后，再夯位于主夯点对角线上的次夯点(亦按 8.0×8.0m 夯距)，一般分二至三遍共 20 击，最后夯位于主夯点前后左右的插夯点，夯能降到 2000kN.m，10 击一遍，夯距为 5.6×5.6m。每遍夯坑均用地表粉砂充填，遍间歇时间为 7 天，单位面积平均夯击能量达 2700kN·m/ m^2。经检测各项加固指标和深度都达到了设计技术要求。正式施工时完全采用了试夯工艺和参数。

2. 地基变形检测

真空预压区的地面变形在打设塑料排水板期间就已发生，平均为 100mm 左右，预压期间的沉降为 90.67~157.0mm，预压区深层沉降变形呈线性规律，变形值随深度增加而减少，8.0~10.0m 深的淤泥质土仍测得约 5.8cm，说明对深层淤泥质土的加固比较明显。

强夯区的地面变形是以夯坑周围土填入夯坑后所测得的场区平均沉降量。在强夯锤的冲击荷载作用下，夯点处产生很大的沉降变形。例如主夯点第一遍只能夯 2~3 击(有些地段只能夯 1 击)，夯坑就深达 2.0m 多。随着夯遍数的增加，每遍锤击数得到提高，全部夯完 24 击的累计夯坑深度为 5.0~6.0m。以站坪区为例，强夯结束后场区实测最终平均沉降量达 79cm。由于受强夯工艺条件所限，深层沉降观测点全部埋设在夯间，因此只能反映夯间土的变形情况，浅部测点因受土体水平变形影响呈不同程度的上升，最大深层沉降

变形多发生在 4.5~6.0m 深处，沉降值达 10.0cm，在 9.3m 深处所测变形值只有 2.0mm。

3. 孔压检测

真空预压在满载期内孔隙水压力基本趋于稳定状态，浅部测点孔压为负值约 40~60kPa，深部测点为正值，11.0m 深处的孔压值仍达 40kPa，卸荷后很快恢复到原状。

强夯在地基土中引起的孔压有如下特点：在某一锤击数下孔压达到最高值(一般为 45.0kPa 左右)后并不随锤击数的增加而累积增长，变化曲线呈锯齿状。孔压增量大小与距夯点中心的水平和垂直距离有关，距离近则增量大。在深 8.0~9.0m 范围内仍可测 30 kPa 左右的增量，说明夯能已影响到该层。孔压的消散速度较快，每遍夯击结束后间歇 1~2 天，孔压消散率即达 75%。

4. 加固效果检测与分析

对加固后的地基分别进行了静力触探、旁压、土工、静载荷板等项目的测试工作。对强夯增加了密实度检测项目。密实度的测试采用了美国产 501 型深层密度湿度核子检测仪。现将预压区和强夯区加固后地基的静探、密实度和旁压测试指标分别列于表 2。

表 2　地基加固效果试验成果表

地基处理方法	项目		深度(m) 1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
站坪	静探	夯后/	436/	630/	576/	201/	188/	194/	189/	118/	95/
		夯前	130	106	29	55	63	125	120	105	66
3000	P(kPa)	比值	3.35	5.94	19.86	3.65	2.98	1.55	1.58	1.12	1.44
kN·m	静探	夯后/	31.7/	47.0/	42.7/	13.1/	12.1/	12.6/	12.2/	6.7/	4.8/
	Es	夯前	7.5	5.7	2.1	2.7	3.0	7.2	6.7	5.5	3.3
强夯	(MPa)	比值	4.23	8.25	20.33	4.85	4.03	1.75	1.82	1.22	1.45
主跑道	静探	夯后/	254/	320/	197/	126/	101/	137/	103/	80/	79/
	P	夯前	217	155	102	82	57	102	88	78	70
真空	(kPa)	比值	1.17	2.06	1.93	1.54	1.77	1.34	1.17	1.03	1.13
	静探	夯后/	17.3/	22.5/	13.0/	7.2/	5.3/	8.1/	7.7/	3.6/	3.3/
预压	Es	夯前	14.4	9.5	5.0	3.7	2.8	5.3	4.2	3.3	3.0
	(MPa)	比值	1.20	2.37	2.60	1.99	1.89	1.53	1.83	1.09	1.10
站坪	密实度										
300	Dr(%)		0.95	0.97	1.01	0.98	0.94	0.92			
kN·m	旁压试	夯后/		150/	110/	104/	200/	191/			
	验 σ	夯前		49	32	22	105	170			
强夯	(kPa)	比值		3.06	3.44	4.73	1.90	1.12			
主跑道	旁压试	夯后/	178/		126/	129/					
真空	验 σ	夯前	125		71	114					
预压	(kPa)	比值	1.42		1.77	1.13					

从加固后的检测指标和加固技术要求来衡量，强夯和真空预压都满足了设计要求。

对真空预压区固结度是重要加固指标，实测地面沉降值(包括插板沉降和预压沉降)均

大于计算沉降值。计算总沉降量已全部在施工过程中完成，平均固结度达到 95%的要求。对于强夯虽然实测地面沉降量比计算值大得多，但强夯的加固机理不同于真空预压，不宜用固结度来评价，而采用密实度。由表 2 可知，4.0m 深度以上平均密实度达到 0.97，4.0~0.6m 范围内平均达 0.93，静探和旁压指标亦成倍增长。强夯使地基形成了厚 6.0m 多的超压密固结层(硬壳)。从在现场所做的大型荷载板试验来看，(荷载板模拟场道板块尺寸 4.5×5.0m)在 90kPa 超载作用下，稳定近两个月时间，板中心最大沉降量为 28mm，板下 7.0m 深处沉降量为 2.0mm，7.0m 以下变形为零，按弹性理论计算的沉降变形深度应达 11.0m，说明硬壳效应明显，这对于减少深层土的沉降变形非常有利。

地基回弹模量试验结果表明：在 0.2MPa 单位压力下，强夯回弹模量 E_r 值为 53.20MPa，真空预压回弹模量 E_r 值为 47.45MPa。在 0.5MPa 单位压力下，强夯回弹模量 E_r 值为 64.80MPa，真空预压回弹模量 E_r 值为 46.40MPa。

从两种方法加固前后的指标变化来看，加固后各项指标明显大于加固前。但无论是在提高的幅度上，还是绝对值。强夯区远远好于真空预压区。例如强夯区的静探值 P 和 E_s 值，在 4.0m 以上分别提高了 3 倍和 4 倍，真空预压区只提高了 67%和 104%。在 4.0~6.0m 范围内强夯区提高了 1 倍和 2 倍以上，真空预压区提高了 55%和 71%。再如旁压试验同深度内(4.0m)加固指标强夯区是真空预压区的 2.6 倍。通常认为动力固结的强夯对于深层土的加固效果不理想，但强夯区地基下部深 8.0~11.5m 的饱和淤泥质粘性土，在夯击过程有较大孔压增量。加固后静探 P 值和 E_s 值在 9.0m 深处提高幅度为 44%，同深度的真空预压区 P 值和 E_s 值只提高了 10%，说明对深部的淤泥质土，强夯亦优于真空预压。从经济指标上看，强夯比真空预压每平方米造价低 25%，节省投资 250 多万元，且大大缩短了工期。

机场飞行区建成投入运行后，经多年的沉降观测表明：真空预压的主跑道最大沉降为 3.0mm，强夯的站坪最大沉降为 10mm。实践证明采用强夯法加固机场地基完全能够达到设计使用要求，体现了工艺简便、效果好、速度快和造价低的特点。特别是在强夯施工过程中，施工单位针对浅部地层存在(第 3 层)软弱粉质粘土这一条件，通过对强夯参数的调整和工艺的改进，解决了粘性土夹层阻尼强夯能量传递的“软垫效应”，使强夯能量向深部土层的传递得到了保证。在此基础上，济南机场的飞行区二期扩建工程(新建 4E 级跑道 3600m)全部采用强夯，由山东省机械施工公司承担施工，共投入 12 台强夯机，共完成加固面积 36 万多 m^2，机场已于 1999 年 10 月正式投入运营。