

# 强夯法加固碎石土填方地基

## 大连周水子货场强夯试验研究小结

沈阳铁路局工程处

### 一、前言

我国自1978年末,由法国引进强夯法,为加固软弱地基提供了一项新技术。近年来全国各地,路内路外对强夯这门新技术作了不少的研究试验工作,取得了一些成果,摸索了不少有益的经验。但到目前为止尚有不少问题值得进一步的研究。例如有效影响深度的理论计算问题;强夯震动波对周围建筑物的有害影响问题;粗颗粒土的强夯机理问题等。本文通过该工程的具体实践,对以上问题作了深入一步的研究,并提出了一些新的看法和具体的计算方法,作为抛砖引玉供进一步深入研究的参考。

本工程修建在碎石土填方上,填方高度一般在3.0~4.5米,填筑时间不足一年,且填筑时未经分层碾压,结构松散。为了解决地基的稳定和强度问题。经过多方案的比较,决定采用强夯法对碎石土填方地基进行加固。实践证明用强夯加固碎石土填方地基,确实是一种行之有效的好方法。技术效果较显著,经济效益也很大。经与深基础比较,单此一项工程便可节省近12万元的投资。可以预料随着强夯法这项新技术的广泛推广应用将在各项工程建设中必会取得越来越大的经济效益。本工程是我局采用强夯法加固地基的第一个工程。由于是第一个,所以缺乏经验,无所遵循,错误缺点一定不少,恳切希望工程界的同志们给予批评指正。

### 二、工程概况

#### (一) 工程简介

周水子货物仓库和站台工程、系大连周水子货物的组成部分。货物仓库建筑面积5067m<sup>2</sup>,跨度18m,柱距分别为4.2m、4.8m、5.4m三种,柱子为490mm×790mm砖砌与钢筋混凝土组合柱。仓库总长281.20m库前后两侧设有3.0m长的钢架、上铺石棉瓦的悬挑两蓬。屋面系V型预应力钢筋混凝土折板。基础为独立基础,地基设计承载能力 $[R] \geq 12t/m^2$

站台总长334m,宽25m,站台墙为浆砌毛石结构。

#### (二) 场地地质情况

地层由上至下为:

1. 碎石土:厚度3.0~4.5m,于1982年4月~1982年10月新填筑,填筑时未经分层碾压,结构松散。

2. 耕植土:厚度0.2~0.5m,黄褐及棕红色,可塑。

3. 砂粘土: 厚度1.0~2.3m硬塑到可塑。
4. 石灰岩风化层: 埋深由南向北逐渐加深自0.5m至2.30m。无地下水。

### 三、强夯法加固碎石土填方地基设计

#### (一) 地基分析与强夯试验

库址位于3.0~4.5m高的碎石土填方上。填料来源于许家屯采石场的碎石土(俗称山皮土)由汽车和拖拉机倾填, 填筑时间不足二年, 填筑时未经分层碾压。碎石土成份比较复杂。为了对地基进行分析和强夯对碎石填土的强夯效果我们共做了七项试验。

#### (I) 夯前夯后的现场荷载试验

##### 1. 承压板直径的选取

考虑到此碎石土中含有个别块石。参考路内经验, 采用直径为81.7cm的圆形承压板。按土力学理论其应力扩散深度虽为1.6~2.5m; 但直径2m, 重量8t, 落距8m的夯锤根据梅纳公式, 其有效加固深度为 $H = \sqrt[3]{8 \times 8} = 8\text{m}$ 乘以0.7的系数还有 $8 \times 0.7 = 5.6\text{m}$ ; 而我们碎石土层最深4.5m。所以, 只要按规定, 夯后的地基做浅层的荷载试验也是有代表性的。

##### 2. 荷载量的选定

查资料碎石填土的地基允许承载能力为 $30\text{t/m}^2$ , 若取3倍的安全系数则极限承载能力为 $90\text{t/m}^2$ , 因承压板面积为 $0.524\text{m}^2$ , 所以实际加荷重量应为 $90 \times 0.524 = 47\text{t}$ 。考虑强夯后允许承载能力还要提高, 故采用荷载量为 $60.0\text{t}$ 。

##### 3. 荷载试验点的选定

将试验点选在建筑条件较差, 填筑最深的第20号轴线上。承压板设在基础底面标高处

##### 4. 加荷方法及观测设备

采用油泵千斤顶自动加压系统, 四只观测沉降的百分表分别设在三角支架上, 百分表的测杆落在承压板底部成对角布置的角铁上, 如图一

##### 5. 加荷分级及观测方法

加荷系分级进行的, 强夯前的加荷每级为 $5.0\text{t}$ , 强夯后的加荷每级为 $10\text{t}$ 。两次荷载试验的卸载均是分两次卸完。每级荷载施加后, 百分表数值的间隔时间为0, 20, 0, 20, 20, 20, 20, 30, 30, 30, 30, 60, 60……分钟直至沉降稳定为止; 沉降稳定的标准为最后一小时的平均沉降值不大于 $0.1\text{mm}$ 。

强夯前和强夯后的两次荷载都没有加到极限值, 千斤顶活塞便上升到 $18\sim 19\text{cm}$ (最大允许值 $20\text{cm}$ )。为安全计便没有再继续加荷。每级卸荷后、观测回弹量的间隔时间为4小时。

##### 6. 千斤顶的标定

因千斤顶活塞的摩阻作用, 所以由压力表上读出的数值并不是加荷的实际吨位。其修正曲线应在试验室将加压系统进行标定后求得如图二。

##### 7. 试验资料的整理

将各级荷载记录整理后绘出荷载与沉降关系曲线图三; 沉降与时间关系曲线图四、五

##### 8. 根据试验成果确定允许承载能力

从图三中看强夯前的曲线 $18.5\text{t}$ 是比例限界。以后地基便开始发生剪切变形, 但最后仍

没有达到另一拐点；卸荷沉降回弹4.5mm。再看图四最大荷载时，12小时20分沉降即达稳定。说明此荷载尚未加到极限值。强夯后沉降显著减少，荷载与沉降关系曲线至最大级时仍呈直线。从图五也可看出各级荷载加上后，沉降便很快发生并趋于稳定。所以说其比例界限值 $>53.0t$ 。

据TJ7—74规范第17条则：

$$\text{强夯前其允许承载力 } R = \frac{18500}{5240} = 3.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{相应的形变模量 } E = (1 - U^2) \frac{P}{S_d} = 0.93 \times \frac{18500}{1.07 \times 81.7} = 196.8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{强夯后其允许承载力 } R = \frac{53000}{5240} = 10.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{相应的形变模量 } E = (1 - U^2) \frac{P}{S_d} = 0.93 \times \frac{53000}{1.98 \times 81.7} = 304.8 \text{ kg/cm}^2$$

按形变模量知：强夯前和强夯后的地基，均属低压缩性土壤。强夯后其允许承载力提高 $10.1/3.5=2.9$ 倍，形变模量提高 $304.8/196.8=1.6$ 倍。

### (II) 大容重试验

将地面整平后，挖断面为 $0.6m \times 1.2m$ ，深 $1.0m$ 的试坑，用磅称过重量；均粒砂量体积，天平烤盘测含水量。夯前夯后各做三次其平均值为：

$$\text{强夯前：} \delta = 1.87 \text{ t/m}^3, \text{空隙比：} \varepsilon = \frac{2.73}{1.87} - 1 = 0.460$$

$$\text{强夯后：} \delta = 2.2 \text{ t/m}^3, \text{空隙比：} \varepsilon = \frac{2.73}{2.2} - 1 = 0.241$$

### (III) 探槽试验

是通过大容重和荷载试验开挖的坑槽来进行观察其结果为：

强夯前：开挖要先用镐和钢钎撬松，铁锹外除但挖掘较易。从坑壁看骨架颗粒疏密不均，部份不连续，孔隙填满碎石块、砂、粉土、粘土。但较松散。小坑能保持陡坡，荷载试验的大坑仅能保持 $45^\circ$ 的坡脚。

强夯后：从坑底表面看，由散体结构变成一组整体。开挖很困难，洋镐砸下去能看到白痕。垂直坑壁稳定，大块颗粒被夯碎，彼此交错紧密看不出空隙，呈三合土状。密实程度随深度逐渐变小至 $0.8m$ 以下大块骨架仅棱角破碎。

### (IV) 颗粒级配试验

颗粒级配试验是利用在工地做大容重试验时挖出的土壤，以筛子和磅称分析其结果如表：

试样总量：2169kg

粒 径 (毫米)	230~160	160~80	80~40	40~20	20~10	10~5	5以下
筛 余	63.3	396	581.9	366.8	185.3	203.6	372.1
平 均 %	2.9	18.2	26.8	16.9	8.5	9.4	17.2
累 计 %	2.9	21.1	47.9	64.8	73.3	82.7	99.9

查碎石土的分类表,因其大于20mm的颗粒为64.8%大于50%,故为碎石土壤。

### (V) 最佳夯击能试验

夯锤沉落量用水准仪观测的,测点设在夯锤顶部中心。夯点选在填方较深处,一共进行了五次如图六。锤坑周围地面变形的观测是在锤周成十字线布置两行测杆,测杆和锤坑边的距离为:0.5m、0.5m、0.5m、1.0m、1.0m。测杆系12m/m钢筋打入地面400~450m/m,外露50m/m地面变形如图七。

从图六知尽管填筑密实度有所差别,但锤击次数和沉落量的关系曲线都能看出拐点来其变化为:4击、5击、6击。所以施工控制应以6击为准。且最后一击沉落量应小于5cm。

### (VI) 震动危害试验

对于震害我们虽则进行了宏观的比较和观察但已满足施工要求 1.在纯碎石土区选择一夯击点在距夯击点中心5m处建造了一座2m×3m,层高3.0m的平房其屋内外标高与夯击点同;同样距夯击点中心5m处,标高低于夯击点4.5m砌一面3m×0.24m的砖墙。砖墙未做基础直接砌在填碎石土方地基上。砖房设有0.5m×0.5m的毛石基础。采用25号混合砂浆砌筑。为便于观察裂缝砖墙和砖房均进行了勾缝。经夯击试验观察如下:观察在夯击中进行,砖墙和砖房均看不出有摇动现象;用手贴墙也感觉不出有振动之感。经全部夯击完后进行检查,砖墙和砖房均没有出现任何裂纹,砖房门窗玻璃完好,连房顶空心盖板的勾缝也无错动和裂纹现象。说明强夯震动波在碎石土地基中的传播范围是很小。对周围建筑物的有害影响几乎很小,很小。 2.在粘土含量占70%,碎石土含量占30%的区域内选择一夯击点此点中心距站台墙5m经夯击观察站台墙不但有严重的摇动现象而且石块砌缝有明显的错动,裂痕。说明震动波在粘土和粘土含量较高的区域传播得比较快,且范围较广对周围建筑物的有害振动较大。

从上面两处夯击点震害现象经过分析可以得出这样的结论:强夯法施工对周围建筑物的有害影响的范围、震动烈度是与该地基土的变形模量成反比的。

### (VII) 深层效果试验

目的是求取强夯后对下卧层砂粘土层的影响也即验证有效影响深度的计算的正确与否。采用地质钻孔取土样送试验室进行试验其结果如下:

#### 1. 锤击数为三击

##### (1) 夯前夯后下卧层土的物理力学变化情况如下表

	天然含水量 %	天然容重 g/cm <sup>3</sup>	比 重	饱 和 %	天然孔隙比	压缩系数 $a_{1-2}$ cm <sup>2</sup> /kg	土的性质
夯 前	24.1	1.95	2.71	90.1	0.725	0.02	砂 粘 土
夯 后	24.0	1.90	2.70	84.0	0.765	0.37	"
	降 低	降 低	降 低	减 小	增 大		

##### (2) 动力触探——标贯试验成果对比

	土的性质	深 度 m	锤击数	钻杆全长 m	修正后锤击数	容许承载力
夯 前	砂粘土	1.90~2.20	6	4	5.52	1.7kg/cm <sup>2</sup>
夯 后	"	2.75~3.05	7	7	6.02	1.8kg/cm <sup>2</sup>

## 2. 锤击数为六击

## (1) 夯前夯后土的物理力学性质变化

	天然含水量 %	天然容重 g/cm <sup>3</sup>	比 重	饱 和 %	天然孔隙比	压缩系数 a <sub>1-2</sub> /kg	土的性质
夯 前	20.1	1.88	2.70	74.9	0.725	0.045	砂粘土
夯 后	18.7	1.91	2.70	72.5	0.696	0.063	"

## (2) 动力触探——标准贯入试验成果对比

	土的性质	深 度 m	锤 击 数	钻杆全长 m	修正后锤击数	容许承载力
夯 前	砂粘土	2.35~2.65	5	3.95	4.6	1.52kg/cm <sup>2</sup>
夯 后	"	2.65~2.95	6.5	7.00	5.6	1.72kg/cm <sup>2</sup>

## 3. 锤击数为 9 击

## (1) 夯前夯后土的物理力学性质变化

	天然含水量 %	天然容重 g/cm <sup>3</sup>	比 重	饱 和 %	天然孔隙比	压缩系数 a <sub>1-2</sub> /kg	土的性质
夯 前	24.1	1.95	2.71	90.1	0.725	0.02	砂粘土
夯 后	18.8	1.99	2.71	82.6	0.616	0.028	"

## (2) 动力触探——标准贯入试验成果对比

	土的性质	深 度 m	锤 击 数	钻杆全长 m	修正后锤击数	容许承载力
夯 前	砂粘土	1.9~2.20	6 锤	4.0	5.5锤	1.7kg/cm <sup>2</sup>
夯 后	"	3.1~3.45	10 锤	7.0	8.6锤	2.32kg/cm <sup>2</sup>

## 4. 锤击数为17击

## (1) 夯前夯后土的物理力学性质变化

	天然含水量 %	天然容重 g/cm <sup>3</sup>	比 重	饱 和 %	天然孔隙比	压缩系数 a <sub>1-2</sub> /kg	土的性质
夯 前	38.1	1.77	2.75	91.4	1.146	0.057	粘 土
夯 后	26.5	1.85	2.70	84.6	0.846	0.079	"

## (2) 动力触探——标准贯入试验成果对比

	深 度 m	锤 击 数	钻杆全长 m	修正后锤击数	容许承载力	土的性质
夯 前	2.30~2.60	3.5锤	4.0	3.2锤	1.2kg/cm <sup>2</sup>	粘 土
夯 后	3.55~3.85	10锤	7.0	8.6锤	2.32kg/cm <sup>2</sup>	"

从上述四组钻探资料可以看出: 1. 在8.0t夯锤, 8m落距的不同锤击数时, 在7.0m深的范围内的下卧层土壤的承载力都有不同程度的提高。说明强夯的影响度在7.0m以内。2. 在8t夯锤, 8m落距时对于下卧层土来说锤击数9击为其最佳夯击能, 9击时下层卧土的承载能力由 $1.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 提高到 $2.32\text{kg}/\text{cm}^2$ , 承载力提高了193%。而继续加大击夯能至17击时其承载力仍然是 $2.32\text{kg}/\text{cm}^2$ 。说明不合适的加大夯击能, 对地基土壤的承载力是不起作用的。

从上述七项试验成果中可以得出两点结论: (1) 此种地基承载力虽然能满足设计要求, 但其动力特性却很差, 不作加固处理是不行的。(2) 强夯加固碎石土填方地基是一种行之有效的好方法。

## (二) 强夯法加固碎石土地基的机理

强夯加固地基土壤的一大特点, 它是以极大的冲击能与冲击波, 压实压密地基土壤。它与静载压实地基, 重锤夯实地基均有原则的区别。从土力学理论可知: 土壤受外力的压缩基本上是三部份受到挤压。1. 土粒固体部份的压缩; 2. 土体内孔隙中水的压缩; 3. 水和空气从空隙中被挤出来以及封闭气体的压缩。一般静载的压缩主要属于第三项压缩。而强夯除了第三项压缩外还包括第一项和第二项压缩。

就单点夯击试验的结果看, 强夯加固碎石土基本遵循以下规律: (1) 第一击至第4击主要是压缩碎石土的孔隙。表现在此期间每锤的沉陷均比较大, 每击平均下沉量在16cm左右。(2) 当夯击数增到5~7击时下沉量明显变小基本稳定在2~4cm之间即击数与沉降量关系曲线上自夯击数4击时出现了第一个拐点。说明此时的夯击能主要消耗在浅层块石的碎化上, 使碎石土的级配重新调整并且把碎化了的中小颗粒夯入到深层土的孔隙中去, 使土壤进一步压实压密。(3) 如果夯击能继续加大即由7击加大到10击左右时下沉量又有增加这些夯击能主要消耗在下层块石骨架的碎化上, 并进一步压实下卧层土壤。详见图六。

另外从动载与静载对地基土压实的效果来分析强夯的机理。我们在做静载试验时在 $0.524\text{m}^2$ 的承压板上分级加荷至53t即每平方米上加了101t的压力, 压缩时间为一周累计下沉量6.5cm。在同一点上锤重8t, 落距8m一击下沉量16cm。我们利用物理学的动力学原理求出夯锤对地面的平均冲力。锤重8t, 落距8m, 锤夯入地面16cm。锤接近地面时速度 $V = \sqrt{2gH}$ , 锤进入地基后做匀减速运动, 最后速度为零, 这个匀减速运动的路程即为入地深度 $h = 16\text{cm}$ 所以锤的加速度即为 $V_t^2 = V_0^2 + 2as$ ,  $V_t = 0, a = \frac{V_0^2}{2S}$ 方向向上。由牛顿第三运动定律地基对夯锤的反作用力 $F'$ 和锤对地基的作用力 $F$ 相等。那么由牛顿第二运动定律得 $F' - mg = ma$ 即 $F' = ma + mg = m g + m \frac{V_0^2}{2S} = P + m \frac{2gH}{2h} = P + P \frac{H}{h}$ 。H——落距, h——夯击下沉量, P——锤重。用数字代入上式得 $F' = P + P \frac{H}{h} = 8 + 8 \times \frac{8}{0.16} = 408\text{t}$ 。夯锤底面积 $W = 3.14\text{m}^2$ 即每平方米受到冲力130t。

静载与动载相比:  $(101 + 130) \times 100\% = 78\%$ , 而下沉量且为 $(0.065 + 0.16) \times 100\% = 41\%$ 这说明什么问题呢? A、碎石土的静摩擦系数(0.4~0.5)与动摩擦系数相比要大得多。B、碎石土在静载作用下其附加应力基本沿1:1.25的扩散角下传, 而动载几乎按1:0.5的角度下传。以上两点说明静载与动载下沉量相差悬殊的两条主要依据。再者从土壤的固结理论来看就周水子这个地基的具体情况。填土时间很短属于次固结阶段。在次固结碎石土壤上

进行强夯加固与粘土截然不同, 碎石土以瞬时沉降为主固结沉降次之, 而蠕变沉降几乎没有。而粘性土壤则以固结沉降为主, 瞬时沉降次之, 蠕变沉降占有一定比例。

### (三) 强夯设计参数的确定

要取得较好的强夯加固效果。正确选择各种强夯参数是极其重要的。这些参数与土壤类别, 土壤的物理力学性质等因素密切相关。目前各工程采用时均处于试验摸索阶段。虽有一些经验公式但局限性比较大, 需结合工程具体实践应用。本工程主要参数的选择, 一方面取自夯前的地质钻探资料, 做了单点的夯前, 夯后的大型静载试验, 单击点最佳夯击能试验资料及夯后的勘探资料。另一方面是依据一些工程的经验总结和资料进行类比分析而确定的。

#### (I) 有效加固深度

关于有效加固深度问题目前唯一的依据就是梅纳的经验公式:

$$H = \sqrt{MH}$$

H —— 影响深度, m  
M —— 锤重 t  
h —— 落距 m

梅纳公式的缺陷在于它仅仅考虑了影响深度与锤重, 落距的关系而没有考虑与地基土质, 锤底面积和锤质的关系。所以计算结果误差也较大。为了求得较比正确的影响深度我们认为采用下述计算方法较比合理。

1. 利用物理学中的动力学原理或者功能原理求出夯锤对地面的冲击力并把它转换成地面的静载。即在需加固地基的现场找一个典型地段进行单点夯击求出夯击一下最大下沉量, 利用此值算出夯锤对地面的冲击力。
2. 把此冲击力作为地面均布静载用弹性理论的方法求出荷载对地基土产生的附加应力。
3. 求出附加应力且其等于土自重应力的20% (软土10%) 此深度即为强夯的有效深度。

本计算方法的优点在于考虑的因素较全面且理论根据较充分同时计算时也较简捷。下面就我们的工程实例计算如下:

#### (1) 基本资料

夯锤8吨, 落距8m, 单点最佳夯击能时

一击最大下沉量为20cm; 土的夯后容重 $2.2\text{t/m}^3$ ; 夯锤底面直径为2.0m底面积为 $3.14\text{m}^2$ 。

#### (2) 夯锤对地面的平均冲力

$$F = P + P \frac{H}{h} \quad P: \text{锤重}, H: \text{落距}, h: \text{一击最大下沉量}$$

$$F = P + P \frac{H}{h} = 8 + 8 \times \frac{8}{0.20} = 328\text{t}$$

均布荷载  $q = 328 \div 3.14 = 105\text{t/m}^2$

(3) 把夯锤底面近似分4小格正方形, 利用角点法计算出A点和O点的附加应力与自重应力(图4-7)。

根据上述两点计算结果与钻探取下卧层土验证是附合实际情况的所以影响深度定为7.0m

## (II) 夯击击数的确定

夯击击数的确定是通过最佳夯击能试验确定。从图六知, 尽管填筑密实程度有所差别, 但锤击次数和沉落量的关系曲线都能看出拐点来其变化为 4 击, 5 击, 6 击。所以施工控制应以 6 击为准, 但最终一击沉落量不能大于 5 cm。

## (III) 夯点间距

本工程为独立基础, 柱间距离为 4.2m, 4.8 米 5.4m。图七是多次地面变形测试结果, 它说明不但夯击坑内被夯实而夯锤周围的填石层, 也是由松变密的。其影响范围达 3.5m, 所以夯击点布置按轴线布置, 其外不再加设夯击点。

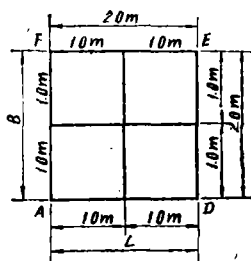


图 (一)

$$\sigma_{zA} = acq \quad q = 105 \text{ t/m}^2$$

$\begin{matrix} L/B \\ Z/B \end{matrix}$	$1.0ac$	土层深度 m	角 点 $A\sigma_{zA}$	土自重应力 $\times 0.2$	说 明
0.00	0.2500	0.0	26.25	0.0	$\therefore$ 影响深度即为 7.4m
1.00	0.1752	2.0	18.396	0.88	
2.00	0.0840	4.0	8.82	1.76	
3.00	0.0447	6.0	4.69	2.64	
3.60	0.0326	7.2	3.42	3.17	
3.80	0.0296	7.6	3.11	3.34	
4.00	0.0270	8.0	2.84	3.52	
4.20	0.0247	8.4	2.59	3.70	

$$\sigma_{zD} = 4acq \quad q = 105 \text{ t/m}^2$$

$\begin{matrix} L/B \\ Z/B \end{matrix}$	$1.0ac$	土层深度 m	角 点 $O\sigma_{zD}$	土自重应力 $\times 0.2$	说 明
0.00	0.2500	0.0	105.00	0.00	$\therefore$ 影响深度为 7.4m
1.00	0.1752	1.0	73.58	0.44	
2.00	0.0840	2.0	35.28	0.88	
3.00	0.0447	3.0	19.77	1.32	
4.00	0.0270	4.0	11.34	1.76	
5.00	0.0179	5.0	7.52	2.2	
6.00	0.0127	6.0	5.33	2.64	
7.00	0.0094	7.0	3.95	3.08	
8.00	0.0073	8.0	3.07	3.52	

## (IV) 夯击遍数

由于地基是碎填石土方且对下卧层无加固要求。碎石土既无粘性也无塑性且无地下水在强夯过程中将很快得到固结所以确定夯击遍数为一遍。

## (四) 施工设计

1. 选用抚顺产 1001 型 15t 履带吊车一台; 东方红堆土机一台; 江阴振冲机械厂产自动脱钩装置一台; 圆柱形 8 吨夯锤一个底面直径 2.0m, 底面积 3.14m<sup>2</sup>; 方形 6 t 夯锤 一个底面



积  $2 \times 2 = 4 \text{ m}^2$ 。自由落距  $8 \text{ m}$ 。圆柱形锤用于夯击仓库独立基础。方形夯锤用于夯击仓库横墙条形基础, 站台墙基础, 站台面, 仓库地面。

2. 施工劳动组织由 7 人组成, 正副吊车司机各一名, 堆土机司机一名, 两名挂钩手, 一名测量人员。

3. 施工进度: 按照设计要求对库房独立基础每点夯击 6 击, 站台墙基础 4 击普夯, 平均日进度为  $150 \sim 180 \text{ m}^2$ 。

4. 施工中两个值得注意的问题

#### (1) 夯锤排气孔的设置

在 6t 平锤试夯前发现原设置的 5 个  $\phi 80$  毫米的气孔堵塞了一个。经用很大气力也未凿通。便决定试夯, 经多次试验后, 发现堵塞气孔的一角, 总是沉落偏小因而夯锤倾斜, 经分析认为气孔不通, 在夯锤下落时在锤底形成气垫, 降低了夯击能的有效作用所致, 后把气孔凿通便没有再发生夯锤倾斜现象。这说明设置足够的气孔, 也是提高效果的一项措施。

#### (2) 自动脱钩装置的改进意见

这次我们的自动脱钩装置是由江阴震冲机械厂购进的。但在试夯时却不能自动脱钩, 分析其原因是在脱钩时夯锤下滑力小于夯锤吊环与吊钩之间的摩擦力。要想自动脱钩必须使夯锤在自动脱钩时夯锤的下滑力大于吊钩与夯锤吊环之间的摩阻力。要解决这个问题有两条途径:

① 增大吊钩轴与夯锤吊环之间力矩如图 a、b。图 a 为不能自动脱钩的示意图, 图 b 为能自动脱钩的示意图

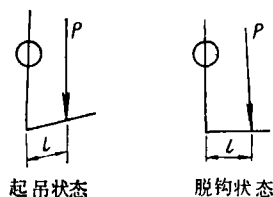


图 a

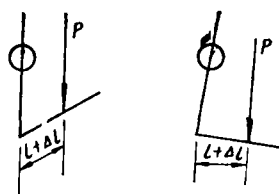


图 b

② 增大脱钩时夯锤吊环向下滑动的角度。原购脱钩器的吊钩向上弯起  $10^\circ$  角。观察脱钩时的一瞬间, 吊钩在夯锤脱钩时只能向下摆动  $15^\circ$ , 因此夯锤吊环沿吊钩面下滑角度实有  $5^\circ$  仍然不能脱钩。

改进意见是将自动脱钩装置的吊钩由原来向上弯起  $10^\circ$  改为平角。夯锤在脱钩时实际上是沿  $15^\circ$  的斜面下滑便能顺利脱钩。

以上两种办法我们认为都是可行的, 不过比较起来我们认为前者比后者更安全些。

同时目前脱钩装置的吊钩背均做成鱼背式从表面看来似乎可以减少脱钩时的摩阻力, 其实不然因为摩阻力只与正压力和摩阻系数有关而与接触面大小无关。相反造成夯锤吊环与吊钩之间的接触为点或线接触引起夯锤左右移动导之夯锤落点不准, 影响强夯效果为此建议脱钩装置的吊钩背面不要做成鱼背式而改为平面。

### 三、强夯技术效果分析

由现场荷载试验、大容重试验, 深层效果试验等七项试验手段测得:

#### 1. 承载能力

碎石土填方层承载能力由夯前的 $3.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 提高到夯后的 $10.1\text{kg}/\text{cm}^2$ 计2.9倍。下卧层土夯后平均提高了54%。

#### 2. 干容重

碎石土填方由夯前的 $1.87\text{t}/\text{m}^3$ 提高到夯后的 $2.2\text{t}/\text{m}^3$ 提高了18%

#### 3. 变形模量

碎石土填方由夯前的 $196.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 提高到夯后的 $304.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 提高了60%。

#### 4. 空隙比

碎石土填方夯前0.460; 夯后0.241

#### 5. 横向影响范围为3.5m

#### 6. 强夯震害影响

对于纯碎石土强夯震动对周围建筑物基本无有害影响。

综合上述各项技术指标说明, 碎石土填方地基经强夯加固后, 不但增加了密实性减少压缩性能, 而且改善了土壤的动力物性。所以说地基经强夯加固后作为建筑物的地基是安全可靠的。

### 四、强夯的经济效益

评价这项新技术的经济效益主要考虑了两个方便, (一) 工程质量和工程进度, (二) 节省投资、材料、劳力。

#### (一) 工程质量和工程进度

地基处理的目的有三 (1) 改善剪切特性及压缩性能 (2) 改善透水性 (3) 改善动力特性。以增加基底的承载能力, 本工程地基经强夯加固后上述三项指标都有了明显的提高。对于工程基础的质量起到了保证作用它与其它类型基础相比它的保证率要大得多。在工程进度方面与其它类型相比至少可以缩短一半工期同时劳动力也大大节省。

#### (二) 节省投资及三大材料

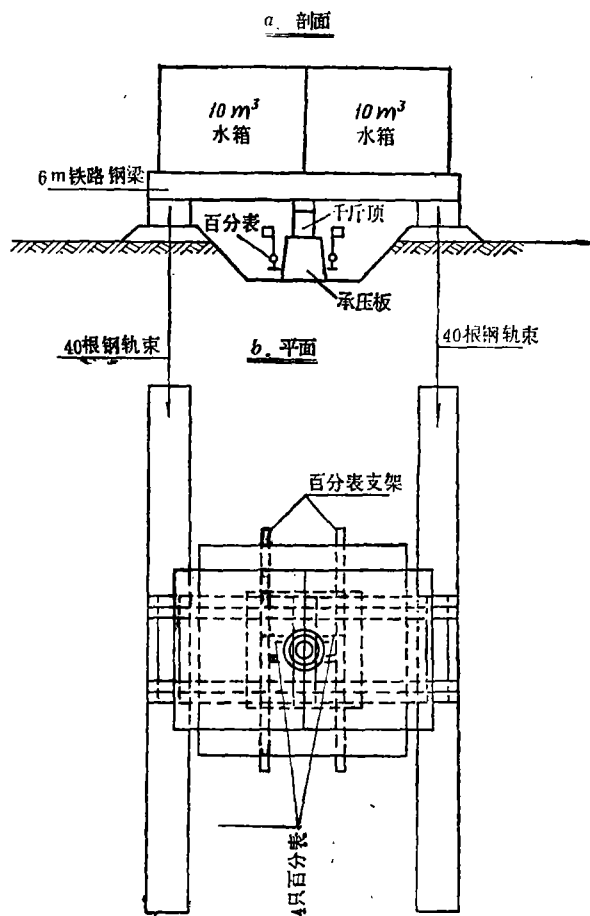
以本工程而论, 强夯加固基础与深基础相比可: 节省水泥321t, 节省钢材102t, 木材 $140\text{m}^3$ , 节约投资十二万, 本项技术在我局是首次采用, 随着在全局的普遍推广将会取得越来越大的经济效益。

### 五、后 记

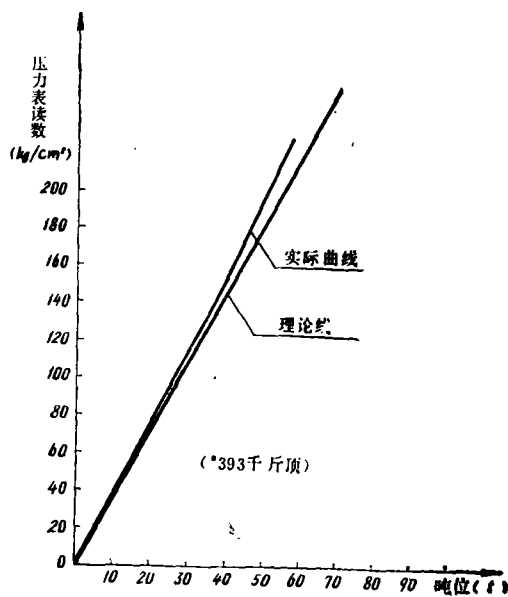
该工程由沈阳铁路局勘测设计所设计, 沈阳铁路局工程处第二工程段第二工程队具体施工, 工程处试验室同时参加了测试, 沈阳勘测设计所地勘队负责地质钻探。

本小结由设计所陈顺泰, 工程处技术科王文侠, 施工科孙文华三人共同研究由陈顺泰执笔王文侠校核。

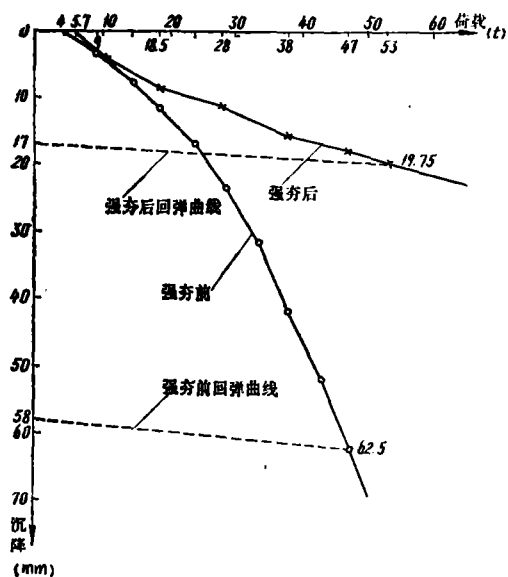
## 六、附 工 程 图



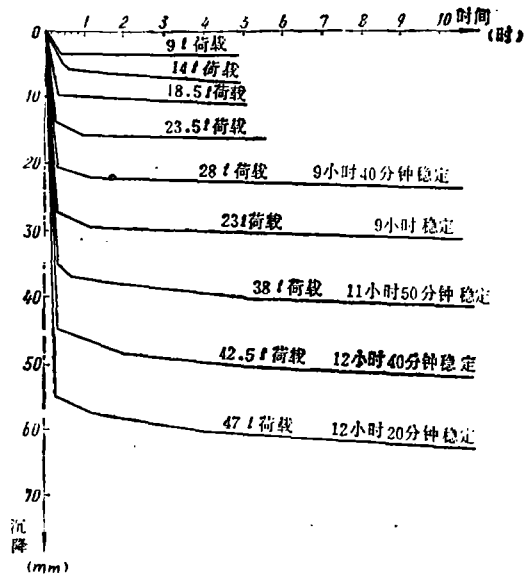
图(二) 载重试验装置示意图



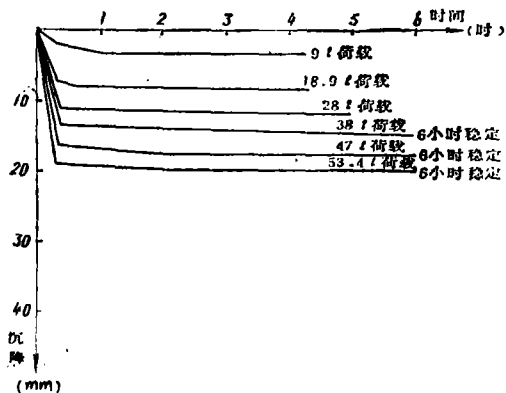
图(三) 200t千斤顶校正曲线



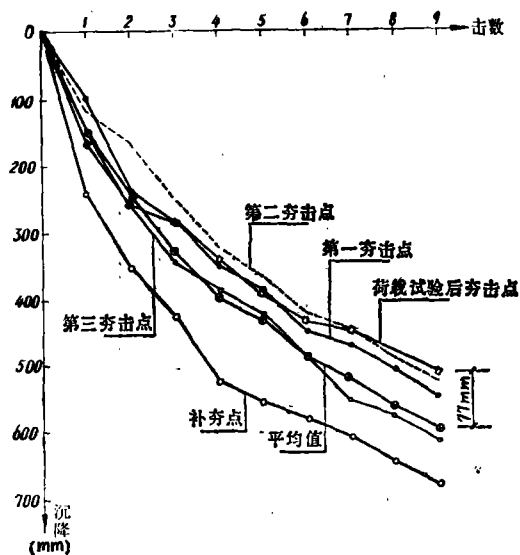
图(四) 碎石土强夯荷载曲线



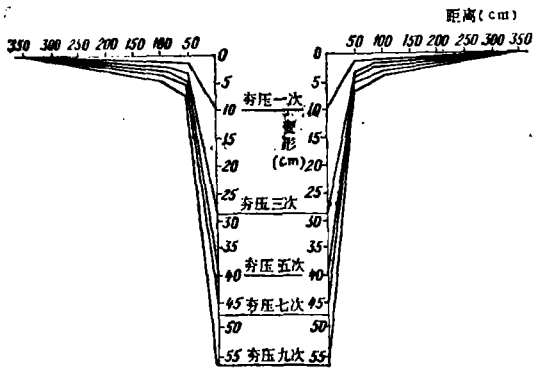
图(五) 强夯前沉降与时间关系曲线



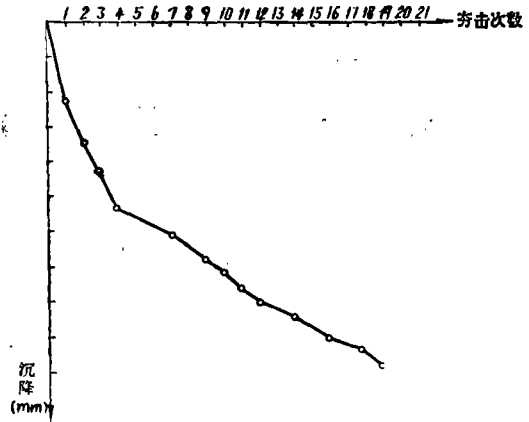
图(六) 强夯后沉降与时间关系曲线



图(七) 夯击次数与沉降关系曲线



图(八) 实测夯压地面变形图



图(九) 夯压试验曲线