

建 筑 情 报 资 料

第 8011 号

1980 年 7 月

振动碾压（实）填土的试验 与应用

四川省建筑科学研究所编印

振动碾压(实)填土的试验与应用

目 录

- 一、概 述 ----- (1)
- 二、振动碾压技术特性 ----- (2)
- 三、回填土料工程地质性质 ----- (3)
- 四、振动碾压试验 ----- (4)
- 五、振动碾压填土的工程应用及经济效益分析 ----- (5)
- 六、结 束 语 ----- (16)

光面、羊足或轮胎式的静力压实机械（又常称碾子）是借用一个强大的压力作用在土面上；夯击式的夯锤，能在较短时间内产生一个较大的夯击力，使填土压实影响深度加大；振动压实机（振动碾压机）能够急速而连续的夯击，使波动的压力由土表面进入基层，而产生有效的压实作用。上述三种中，用振动技术，使压实填土的效率与质量都有显著提高。振动碾压机在国外30年代初已经得到应用，随着科学技术与工业生产的发展，它同样得到了迅速发展，如瑞典在70年代用振动碾压机占整个压实装置的50~80%，而且型式、品种和功能不断改进和提高。我国自解放以来，由于社会主义建设的需要，用振动碾压新填土得到推广和发展，应用于水利工程的坝体施工，交通部门路基与机场的筑筑，以及建筑工程大型土石方平整等。

山区筑筑，工程地质条件一般比较复杂，基岩起伏；复盖层深度参差不一，造成填料种类很多，质地不均，其中最为突出的是经常夹有大粒径块石，它的存在，导致填土压实的复杂性。应用振动碾压，将能顺利地解决一系列在静力压实中难以克服的困难，并且明显地提高了工效。本文介绍应用一种重型振动碾压机，对山区填土压实的有关试验研究，以及工程中具体使用情况，希望对目前进一步应用压实填土地基，有一定参考作用。

二、振动碾压机技术特性

考虑到许多工程项目工程量大，进度要求快，而土石方填料种类杂，在配合机械化施工中要求一次铺设层厚度大等因素，因此决定采用功率大、效率高的YZT-13型振动碾压机。其主要技术特性：

振动轮重	6~8 ^吨 （轮中加水重2 ^吨 作调节）。
机架重	约7 ^吨
机械总重	约13~15 ^吨

最大激振力 30吨

振动参数分三挡:

I 挡 高频 2100^次/分; 小振幅 1毫米左右。

II 挡 中频 1700^次/分; 中振幅 1.5毫米左右;

III 挡 低频 1300^次/分; 大振幅 2.8毫米左右。

振动轮(直径×长度) 1.7 × 1.9米

外形尺寸(长×宽×高) 5270 × 2468 × 1700 毫米。

柴油机功率 125~130 马力

采用“依发”车引擎 4VD^{14.5}/₁₂₋₁ SRW.

牵引机功率 60~100 马力,

牵引速度 3~6 公里/小时。

三、回填土料的工程地质特性

试验及施工现场, 场地处四川省东~东南部山区丘陵地带, 其主要工程地质特性如表(一)。

土料类别 主要特性	粘土夹碎石	石灰岩碎块	砂、页岩碎块
岩性描述	褐黄色, 洪 坡积层, 为红粘 土, 碎石不起骨 架作用, 压缩性 低。	灰—灰黑色, 厚层状结晶质 石灰岩, 细密坚 硬, 含方解石脉 条纹, 属硬质岩 石类。	暗红色, 泥质 砂岩与砂质泥岩互 层, 岩石风化破碎, 形成部分砂质土与 砂质泥岩碎块混合 体, 易于压碎, 块径 大小不等, 属软质岩 石类。

接下页。

· 3 ·

填土颗粒组成。	碎石含量 $<30\%$ 粒径 $2\sim8\text{cm}$ 。	最大粒径为 90cm ，一般粒径 为 $40\sim70$ （约占 80% ）。	最大粒径为 80cm 一般粒径为 $10\sim25\text{cm}$ （约占 70% ）一部分 为细颗粒土。
天然含水量(%)	$24\sim40$		$6\sim10$
塑限(%)	$30\sim40$		
塑性指数	$20\sim28$		
比重	$2.73\sim2.78$	$2.71\sim2.75$	$2.71\sim2.73$
天然容重(g/cm^3)	$1.65\sim1.75$	$2.40\sim2.60$	$2.20\sim2.40$
*试验最大干容重	$1.62\sim1.64$		$1.85\sim1.95$
孔隙比	$1.10\sim1.30$		
软化系数		$0.70\sim0.90$	$0.25\sim0.50$
极限抗压强度 (kg/cm^2)		$600\sim1000$	$100\sim300$
压缩系数	小: $p=1\sim2\text{kg}/\text{cm}^2$ 为: $0.038\sim0.050$		

*最大干容重由南式击实仪中试验求得，大于5毫米颗粒筛出。

四、振动碾压试验

(一) 密实度及有效压实影响深度测定

松散的填土通过压实，土中空隙得到容易减少，并使土中所保持水分也受到一定的限制，从而使填土得到所要求的强度而且变形亦已甚少。因此，填土地基如在整个工作过程中，只会发生较小的密实度和强度的变化，那么，填土务必具有一定的密实度。

检验密实度标准的形式，尽管国内外各部门并不完全统一，但总的说，大都是对比于击实试验中的最佳密实度；捣实试验的最

大于容重；孔隙比（即绝对密度）或相对密度等分出等级。然而各种标准，各有其优缺点。作为我国的建筑地基而言，压实度标准，将取决于压实填土的干容重 γ_d 与击实试验中最大干容重 γ_{dmax} 的比值大小而定，称之为压实系数 D_y ，作为控制密实度指标，其数学表达式为 $D_y = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}$ ，实践证明，它在很大程度上足能反映出填土质量的优劣。今将我们振动碾压有关填土土料密实度等的试验结果分述于下：

1. 最大干容重 γ_{dmax} 与最佳含水量 $w_{佳}\%$ 试验。

最大干容重的值，是受压实功与击实次数的变化而异的。所以使用的测试仪以标准，必须考虑实际应用中所能达到压实功能的原则，我国规定采用功能相对较大的“南式”击实仪。试验时将土样中大于 $5mm$ 的颗粒筛出，然后依所含百分率按公式作修正即：

$$\gamma'_d = \frac{\Delta \cdot \delta_d}{\Delta - p(\Delta + \delta_d)}$$

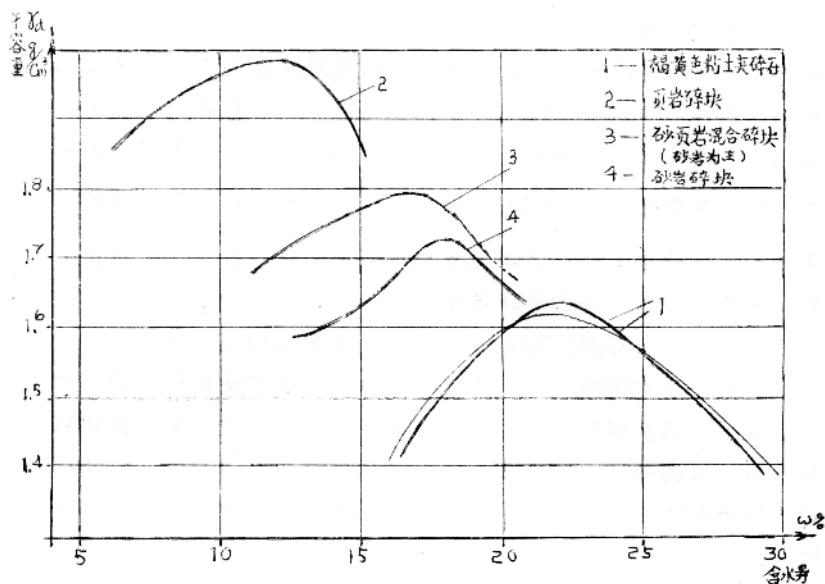
式中： γ'_d ——含有 $> 5mm$ 颗粒土干容重 (g/cm^3)

Δ —— $> 5mm$ 颗粒土比重

p —— $> 5mm$ 颗粒土占总土重的 $\%$ ，或称含石率，按小数表示。

δ_d ——扣除 $> 5mm$ 颗粒的土干容重 (g/cm^3)

击实试验的结果，可得出干容重 $\gamma_d \sim$ 含水量 $w\%$ 的关系曲线。图(2)所示，表(二)为最大干容重和最佳含水量值。



表(二)

土料类别	最佳含水率 $\omega_{佳}\%$	最大干容重 $\gamma_{d\max}(\text{g/cm}^3)$	备 注
粘土夹碎石	22~25	1.61~1.64	
暗红色页岩	12	1.98	侏罗系 重庆统 风化~弱风化
砂 岩	17~18	1.73~1.74	同 上
砂页岩混合	16~17	1.78	砂岩、碎块 占80%左右

众所周知,掌握含水率是压实填土获得良好效果的关键,通常的碾压设备,碾压含水率应为最佳含水率的 $\pm 2\%$ 。试验表明,由于YZT—13型振动碾压机压实功大,并有振动作用,碾压含水率控制范围可适当放宽,初步认为以 $\omega_{佳}\% \pm 4\%$ 为可;

一般偏小又比偏大为好。

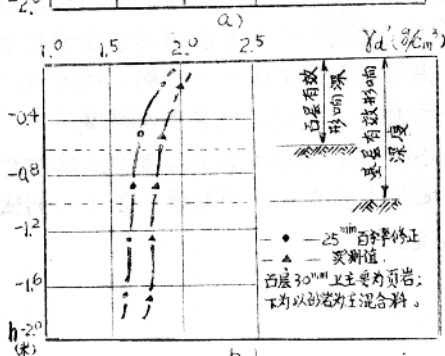
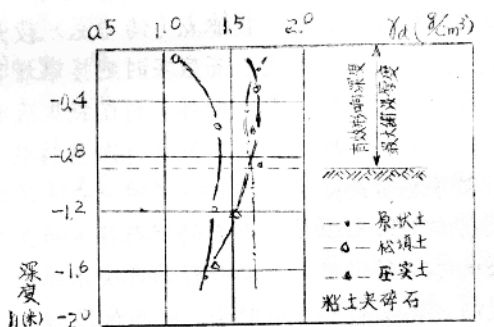
2. 压实后干容重 γ_d 测定

(1)、粘土夹碎石

土中夹有碎石，使用“注砂法”测 γ_d 值，含水率为25~30%，测得沿深度的 γ_d 变形曲线，如图(3)a 示，从图可看到土层30厘米内，受振动作用的影响 γ_d 值并不最大，而有效影响层范围内(90厘米) γ_d 均 ≥ 1.60 克/厘米³。

(2)、砂、页岩碎块

夹有粗颗粒，同样使用“注砂法”测定 γ_d 值，含水率为9~10%，测得沿深度的 γ_d 变化曲线，如图(3)b) 示。由于土料成份较杂，规律性较差，但有效影响层内，页岩碎块 $\gamma_d \geq 1.95$ 克/cm³；以砂岩碎块为主的砂，页岩混合物料 $\gamma_d \geq 1.82$ 克/cm³。



图(3)

b)

(3) 石灰岩大块石

由于石灰岩块石强度高，在振动碾压作用下，难以消除稳定骨架间孔隙，因此一般不宜用于容重大小来判断密实的程度，而使用以下二条指标进行判断：

a、在重型振动碾压机振动碾压作用下一受遍数后，其下沉量为零。

b、从探坑中观察到块石间接触点良好，相互形成“嵌楔”，坑壁极为稳定，开挖十分困难。

碾压纯粹的堆石体，有的块石，因强度低，在动静荷重作用下，容易压碎致密，如四川的砂质~泥质页岩块、风化的砂岩块等，压实后基本消除了大块骨架的孔隙。而有的块石强度高，如未风化的砂岩块、石灰岩块等，经碾压后骨架孔隙依然存在。一般地说，疏松状态的堆石骨架，接触点（传力点）较少，相互间可能处于不稳定状态而容易变位；而密实时则接触增多，骨架间形成“嵌楔”处于极为稳定状态。国外，有的提出应用一定能勇的振动压实机，按碾压遍数与相对下沉量作衡量标准，而且正常的振实效果，其下沉量是铺设层的5~8%。必须指出，作为建筑物地基的堆石体，如充填料物少而仍然存在大孔隙时，务必充分考虑岩石块体的风化特性，因为有的岩块未风化，强度甚高，压实时是稳定的，但随大气作用影响，时间的推移，而发生变质剥落后下沉变形，此时，必须要求堆石的压实标准是：已无骨架孔隙或孔隙中央有足够的充填物，否则，将仍然认为是不密实的。

2、压实系数 D_y 及碾压有效影响深度

D_y 值大小是代表压实土密实程度的主要指标，实际使用中，由于填土所在地位不同而有不同取值。表（三）列出国内有关部门所使用的控制值。

表(三)

填 土 使 用 性 质			Dy
工业与 民用建筑	砖石承重结构 和框架结构	在地基主要受力层范围内	> 0.96
		在地基主要受力层以下	$0.93 \sim 0.96$
	筒支结构 和排架结构	在地基主要受力层范围内	$0.94 \sim 0.97$
		在地基主要受力层以下	$0.91 \sim 0.93$
公 路	高级路面	0.6米内	$1.0 \sim 0.98$
		0.6米以下	0.95
	次高级路面	0.6米内	$0.98 \sim 0.95$
		0.6米下	$0.90 \sim 0.85$
	过渡式路面	0.60米内	0.85
		0.60米以下	0.80
堤 坝	高 级		≥ 0.97
	中 级		≥ 0.96
	低 级		≥ 0.95

既然因填土使用要求不同，Dy值有不同取值，而 γ_d 值沿深度变化而逐渐减小，则有效影响层厚度并不为一固定值。

对于YZJ-13型振动碾压机而言，当不同Dy值时，各种土层可根据 γ_d 值推算出有效影响层厚度，列入表(四)。

一般施工中常用铺筑厚度作为控制值。理论上铺筑厚度应比有效影响厚度大(约5~10%)，但要考虑厚度不均匀等因素，为安全计宜以有效影响厚度作虚铺厚度。

表(四)

试验的土料类别	要求 Dy 值	有效压缩层厚 (厘米)
粘土夹碎石	$0.97 \sim 1.00$	700 ($\gamma_d \geq 1.59$)
	$0.90 \sim 0.96$	800 ($\gamma_d \geq 1.48$)
砂页岩碎块	≥ 0.97	800 ($\gamma_d \geq 1.73$)
	$0.91 \sim 0.96$	1000 ($\gamma_d \geq 1.62$)
	$0.85 \sim 0.90$	1300 ($\gamma_d \geq 1.62$)
石灰岩碎块		1300 (由探坑查明)

(二). 压实土体变位测定.

填土碾压密实, 对各层土体的变位状况观察, 是决定有效压实深度的有力旁证, 我们通过几种方法进行了测试:

1. 粘土夹碎石

填土时, 沿深度按 300、300、300、300、400、400 毫米间隔加一水平的白灰薄层 (厚为 20 毫米), 并规定平面中间 5 米范围内为碾压区, 两边为非碾压区。经压实后, 中间填土产生沉降变形, 可清楚地看到白灰线相对于两侧位移的情况, 照片 1, 从而测出不同层次内土体沉降变形量。见表 (五)。计算表明, 有效影响层范围内的变形占总下沉量 90% 左右。



表 (五)

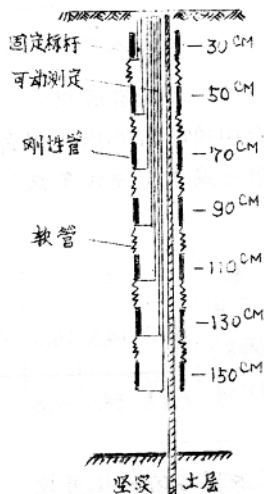
深度 (厘米)	平均压缩层厚度 S (厘米)	各层平均下沉量 Δ (厘米)	各层下沉率 $\frac{\Delta}{S} \times 100$
-38	$S_1 = 38$	$\Delta_1 = 9$	23.7
-68	$S_2 = 30$	$\Delta_2 = 6$	20.0
-96	$S_3 = 28$	$\Delta_3 = 4$	14.4
-136	$S_4 = 40$	$\Delta_4 = 1$	2.5
-176	$S_5 = 40$	$\Delta_5 \approx 0$	0

注：人工回填土，碾压10遍（中频参数，碾压3遍；低频参数，碾压2遍）。

2. 砂、页岩碎块混合料

为考究各层土在不同碾压遍数的下沉变化规律，我们专门设计使用一种观测装置，其构造简图如图(4)示。碾压过程中，刚性管随土体一起下沉。由于软管可任意变形，不使上下刚性管发生相互影响，从而测得各层土的下沉量，实用表明，该装置效果良好，测试结果见表(六)。

表中看出，当碾压遍数为6~8遍时，各层土的平均下沉率85~92%，而有效压实深度为900~1100毫米之间。



表(六)

图(4)

深度 (厘米)	平均 压缩率 (%)	各层平均下沉量Δ(厘米)					各层总下沉率%					各层下沉率 $\frac{\Delta}{S}$ %		
		二遍	四遍	六遍	八遍	十遍	二遍	四遍	六遍	八遍	十遍	六遍	八遍	十遍
-30	30	3	5	6	6.5	7	42.9	71.4	85.7	92.9	100.0	20.0	21.7	23.3
-50	20	3	4	4.5	5.0	5.5	54.5	72.7	81.8	90.9	"	22.5	25.0	27.5
-70	"	2	3	4	4.5	4.5	44.4	66.6	88.9	100.0	"	20.0	22.5	22.5
-90	"	2	2.5	3	3.5	3.5	57.1	71.4	85.7	"	"	15.0	17.5	17.5
-110	"	1	2	2.5	2.5	2.5	40.0	80.0	100.0	"	"	12.5	12.5	12.5
-130	"	1	1	1	1	1	100.0	100.0	"	"	"	5.0	5.0	5.0
-150	"	0	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/	/	/
ΣS =150		ΣΔ ₂ =12	ΣΔ ₄ =17.5	ΣΔ ₆ =21.0	ΣΔ ₈ =23.0	ΣΔ ₁₀ =24.0								

说明：1. 经开挖测另下沉值，因可动测点刚度不够，数值作另修正。

2. 表中八遍均为内插值。

3. $\eta = \frac{\Delta n}{\Delta_{10}}$ ，(假设 Δ_{10} 为下沉最大稳定值)

4. 人工回填，(中频参数)。

3. 石灰岩碎块

在回填的料坑内，用有标记的块石埋置于一定位置，并测得不同碾压遍数(中频参数)时的总下沉量，其值见表(七)。

表(七)

遍数	2	4	6	8	12	16	备 注
总下沉量 $\Sigma \Delta$ (厘米)	10.2	14.3	15.0	16.9	19.9	21.9	1. 第10遍为高频小振幅。 2. 第12遍为低频大振幅。 3. 按8遍下沉量为稳定值， 计算下沉率。
下沉率 $\eta\%$	60.3	84.6	88.8	100.0			

经振实后的石体开挖，发现表层(约50厘米范围内)有50%左右的石块被压碎，在1.3米处，块石的尖锐棱角有碎裂现象，有的已发生明显位移或转动，如图(5)示。

(三). 土中动应力测定

将电阻应变片动压力盒，按一定深度埋入土中作感应器，讯号放大使用DY-3型动态电阻应变仪，讯号记录使用MB-6描笔式记录仪，讯号记录如图(6)示。

试验槽断面开挖

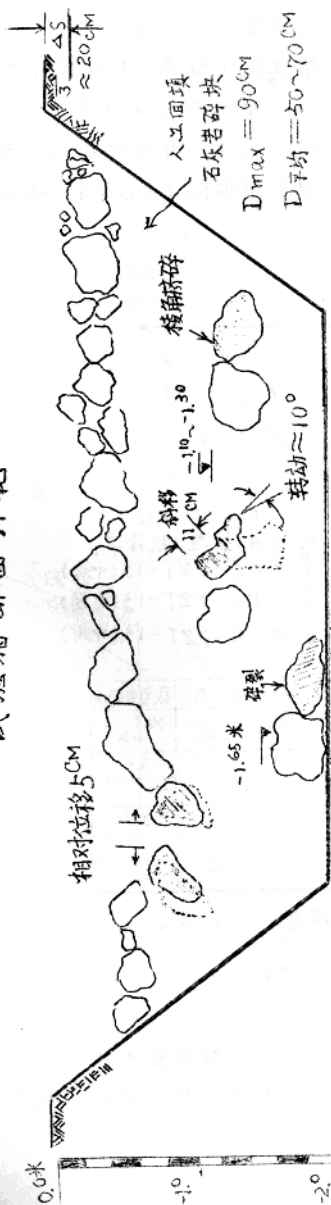


图 (5)

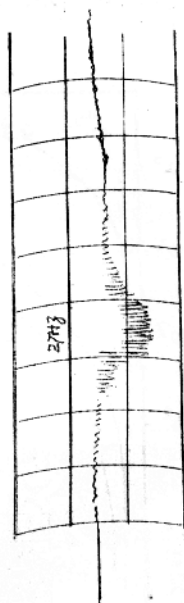
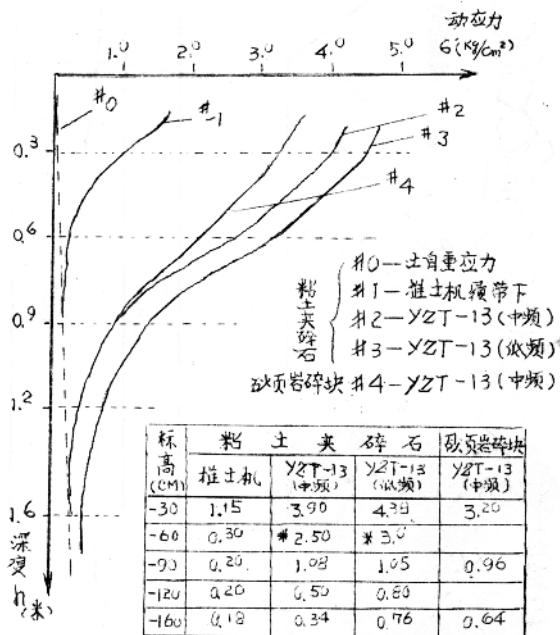


图 (6)

石灰岩大块岩石因孔隙大，无法埋设压力盒。

在粘土夹碎石中，使用一般推土机（红旗-100型），与YZT-13型碾压机，在中频（1500次/分）中振幅（1.5毫米）、低频（1200次/分）大振幅（3.8毫米）、及砂、页岩碎块混合料中，碾压机在中频（1600~1700次/分）中振幅（1.6毫米）碾压下的应力分布与大小如图(7)所示。



* 压力计误差，作修正。

图 (7)

试验结果表明，一般推土机的振动与静压应力均甚小，而碾压机的应力值均较大、传递较深，在中频参数与低频参数之间土中应力后者比前者大。

试验表明, 应力分布状态, 对二种土质基本一致; 而有效影响深度附近往往是应力衰减很快的部位, 如推土机为35~40厘米, 碾压机为75~90厘米。对于砂类土或硬质岩块, 有关资料指出: 振动效应显著, 振动滚筒与大石块接触时所产生的冲击力高, 堆石中的阻尼低, 即使应力较小, 仍有较好压实效果, 故有效影响深度也将加大。

(四) 荷载试验

因条件限制, 仅对砂、页岩碎块土进行荷载试验。

荷载板面积为2500厘米², 荷重通过油压千斤顶施加, 按1.0, 1.5, 2.0, 浸水一昼夜 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 公斤/厘米²逐级增加, 用长行程百分表测另相应的变形。压力与沉降关系值见表(八)及图(8)示。

表 (八)

试验编号 荷载 kg/cm ² 变形 mm	# 1		# 2	
	ΔS	ΣS	ΔS	ΣS
1.0	1.15	1.15	1.56	1.56
1.5	0.84	1.99	0.61	2.17
2.0	0.78	2.77	0.72	2.89
2.0 (浸水 24小时)	0.50	3.27	1.58	4.47
2.5	0.72	3.99	0.69	5.16
3.0	0.72	4.71	0.80	5.96
3.5	0.62	5.33	0.68	6.64
0	-1.71	3.62	-3.20	3.44

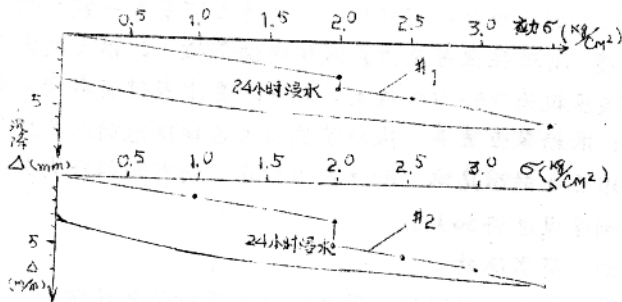


图 (8)

经压实后的砂、页岩碎块混合料，由于干容重值大 ($\gamma_d > 1.95$)，压实系数 $D_y > 0.97$ (有效影响厚度内)，变形模量 E 与承载力 R 均较高，如按 $P \sim S$ 试验曲线 $S = 0.016$ ($0.01 \times 500 = 5$ 毫米)。所对应的 P 值为 $2.5 \sim 3.5$ 公斤/厘米²；而且水稳性亦好，在 $P = 2$ 公斤/厘米²，载荷板下充分泡水 24 小时，湿润深度达 $100 \sim 150$ 厘米，湿陷量仅 $0.5 \sim 1.5$ 毫米。充分表明，该压实填土作为建筑物天然地基的允许承载力 R 取值为 2.0 公斤/厘米²，是稳妥可靠的，与现行地基规范采用值基本一致。因此说，经严格控制质量的压实填土，完全可按地基设计规范 (TJ 7-74)，确定其承载力 R ：

密实的石灰岩碎块或石灰岩碎块夹土 $R = 3 \sim 4$ 公斤/厘米²；

砂、页岩碎块土 $R = 2$ 公斤/厘米²；

粘土夹碎石 (碎石含量为 30% 左右)

硬可塑 $R = 1.8$ 公斤/厘米²；

软可塑 $R = 1.3$ 公斤/厘米²。

五、振动碾压填土的工程应用及其经济效果分析

大土方机械开挖，分层回填，采用重型振动碾压机分层压实施工，我们尚无经验，在参阅国内外资料，针对晋林机械