

石头河土石坝的压实

韩 荷 文

(陕西省水电工程局, 陕西眉县)

提 要

本文通过用各种压实机具对石头河土石坝进行压实试验研究, 确定了一套适合于机械化施工, 并在坝体实际填筑中得到证实的较为合理的压实标准和压实方法。解决了机械化施工中的坝体压实问题, 使工程建设在保证质量要求的前提下加快了速度。

另外, 对8.1t凸块振动碾压实粘土亦进行了一定的试验研究, 认为它是一种值得重视和推广的压实机具。

一、概 况

石头河水库大坝为粘土心墙, 河床砂砾卵石漂石坝壳。坝高105m, 最大填筑高度114m。总填方量 $835 \times 10^4 \text{m}^3$, 其中填土 $183 \times 10^4 \text{m}^3$; 填砂卵石 $614 \times 10^4 \text{m}^3$; 反滤料 $38 \times 10^4 \text{m}^3$ 。曾先后多次进行肋条碾、拖拉机、蛙式打夯机、羊足碾、汽胎碾、夯板、振动平碾、凸块振动碾等现场压实试验研究。

二、防渗体粘性土的压实

大坝防渗心墙土料性质见表1。依据南实处标准击实功能($86.3 \text{t} \cdot \text{m}/\text{m}^3$)确定设计含水量为19.0%, 干容重为 $1.68 \text{g}/\text{cm}^3$, 渗透系数 $k < i \times 10^{-7} \text{cm}/\text{s}$ 。见表2, 图1。

表1 粘性土性质指标

土场编号	天然含水量 (%)	天然干容重 (g/cm^3)	比重	流限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	颗粒组成 (%)			不均匀系数	土壤分类	有机质含量 (%)	易溶盐含量 (%)
							>0.05 (mm)	0.05~0.005 (mm)	<0.005 (mm)				
A	21.0	1.63	2.718	35.5	19.5	16.0	14.1	59.5	32.4	10.0	粉质粘土 重粉壤土	0.35	0.08
B	19.4	1.57	2.717	36.9	19.7	17.2	11.0	55.5	33.5	19.1	粉质粘土 重粉壤土	0.27	0.06
D	18.9	1.65	2.720	36.0	21.0	15.0	16.0	54.0	30.0	10.5	粉质粘土 重粉壤土	0.20	0.05

表2 粘性土填筑设计计算指标

含水量 (%)	干容重 (g/cm ³)	渗透系数 k ₁₀ (cm/s)	饱和固结快剪		不同压力下单位沉降量 (mm/m)					
			c (kg/cm ²)	φ (°)	0.5 (kg/cm ²)	1.0 (kg/cm ²)	2.0 (kg/cm ²)	4.0 (kg/cm ²)	8.0 (kg/cm ²)	15.5 (kg/cm ²)
19.0	1.68	i × 10 ⁻⁷	0.27	20.4	6.48	12.28	22.08	46.20	61.78	97.48

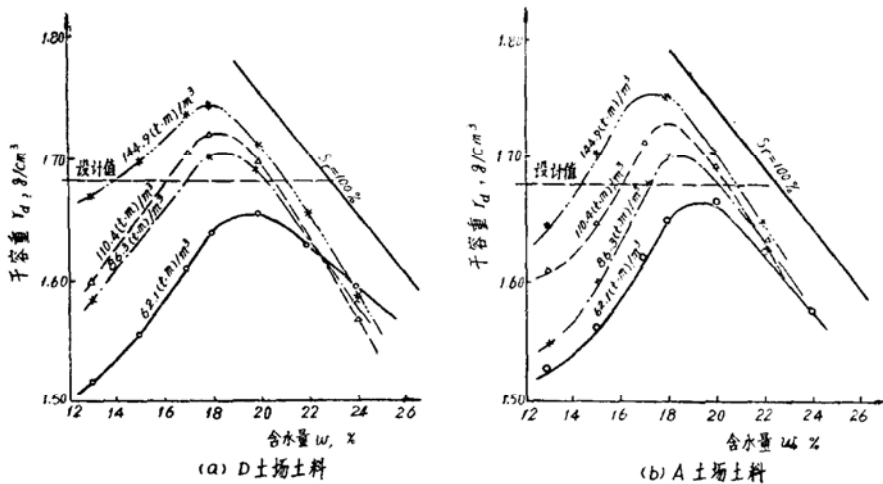


图1 南实处型击实曲线

心墙填土的压实基本采用机械施工。各种压实机具的机械性能见表3~7。

表3 电动打夯机规格

名称	夯板面积 (cm ²)	夯锤重量 (kg)	锤落高度 (cm)	机重 (kg)	夯击次数 (次/分)	电机功率 (kW)	夯锤上齿数
H8-60型蛙式	780	30	20~26	280	140~150	2.8	
自制垂直夯	889	50	115	370	40	4.3	14
仿HW-01蛙式	720	35	12~14	280	130~140	3.0	

表4 肋条碾规格

外形尺寸 (cm)			总重 (t)	碾筒长度 (cm)	碾筒直径 (cm)	肋条宽度 (cm)	肋高 (cm)	肋条数	肋条间距 (cm)	单位长度压力 (kg/cm)	最大接触压力 (kg/cm ²)
长	宽	高									
370	250	170	8	190	170	15	15	4	30	133	17.7

表5 单联羊足碾规格

外形尺寸(cm)			总重 (t)	碾筒		羊足排数		羊足			接触压力 (kg/cm ²)
长	宽	高		长 (cm)	直径 (cm)	纵向	横向	总数	长 (cm)	端面积 (cm ²)	
400	158	168	8.2	122	120	5	18	90	24	45.4	36.1

表6 分块车箱式气胎碾技术指标

外形尺寸(cm)			碾重 (t)	轮胎					压实带 宽度 (cm)	接触压力 (kg/cm ²)	牵引车 型号
长	宽	高		总数	排数	排间距离 (cm)	压地宽度 (cm)	内压力 (kg/cm ²)			
631.1	317.5	227.1	25 30 35	6	3	20	30	8~10	250	9~11	100HP 拖拉机

表7 凸块振动碾技术指标

碾重 (t)	碾 碾		凸 块					频 率 (次/分)	振 幅 (mm)	激 振 力 (t)	动 应 力 (kg/cm ²)
	直径 (cm)	长度 (cm)	高度 (cm)	排数	块数	块间距 (cm)	块端面积 (cm ²)				
8.1	140	170	10	12	108	10	96	1800	1.85	19	47~57

(一)防渗心墙大面积压实

国内已建工程中对防渗土料的压实，大多采用肋条碾、夯板、羊足碾或气胎碾等单机碾压。

石头河水库开工初期，大坝心墙底部的填土是用8t肋条碾进退法压实，成果如图2。土料含水量在14.0~18.0%，铺土厚度25cm，碾压12遍。经检验发现肋条碾对含有土核的土料压实效果不佳。碾重偏轻，肋条碾碾压后土层表面有高低不平的两条土稜，在土稜区由于剪切破坏出现裂缝。当含水量较小时，尤为明显。同时，层间结合不好，测其水平渗透系数和抗剪强度，往往不能满足设计要求，故取消了该种碾压机具，试验结果如表8。

用羊足碾压实土料，土层下部被压实，上部由于羊足翻动而土料疏松，铺土30cm，碾压30遍，上部12~14cm仍是松土层，虽然羊足碾在滚动时对土料施加垂直压力和产生侧向挤压作用，但羊足端总面积很小，碾压效率仍很低。

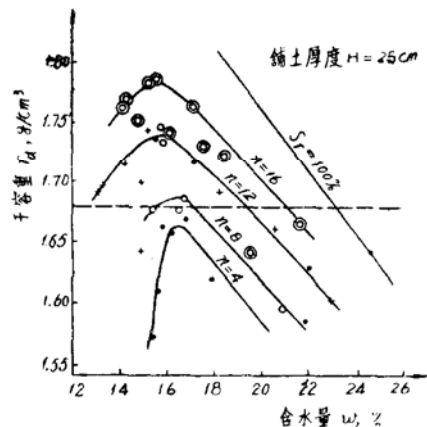


图2 γ_d-w 关系曲线

表8 结合层土样的试验结果

饱和固结快剪				渗透试验			注
w (%)	γ_d (g/cm ³)	c (kg/cm ²)	φ	w (%)	γ_d (g/cm ³)	k_{10} (cm/s)	
11.4~13.7 (12.4)	1.50~1.60 (1.56)	0.20	18°30'	14.7	1.79	1×10^{-4}	1.()内为平均值; 2. k_{10} 为两次平均值。

用气胎碾压实土料，主要是借助于揉搓作用。气胎是弹性材料，与土的接触面积大，特别是在压实过程中轮胎的刚度随土的压实而相应变化，应力分布均匀，持续时间长，故压实效率高，并可根据不同的碾重压实不同含水量的材料。但是，单独用气胎碾压实土料，由于碾重过大，在虚土上行车困难。而压几遍后，土层上部又形成硬盖，因气胎碾接触压力低，更难传递下去，继续碾压时对土层下部影响不大，碾压遍数不宜过多。另外，土料含水量偏低时，如小于16.0%，虽可用较重的气胎碾碾压，但是容易产生表层剪切破坏；当土料含水量偏高，如大于21.0%时，由于土的饱和度增高，土中孔隙水与封闭气体不能在荷重下迅速排出，产生较大的孔隙应力，抵消了压实功能。这时，不宜用较重的气胎碾碾压。工地曾用14 t气胎碾压过含水量较小的土料，收到了良好的效果。

在结合坝面实际施工中试验研究羊足碾、肋条碾、气胎碾联合碾压的可能性，成果见表9。试验结果表明，这几种碾压方法都可使25cm厚填土达到设计指标的要求，但是用上述方法，工艺复杂，有浪费现象，不宜采用。初步选用羊足碾和气胎碾作为压实土料的主要机具。

表9 羊足碾、肋条碾、气胎碾联合碾压试验成果

铺土厚度 (cm)	羊足碾碾压 遍数	肋条碾碾压 遍数	35 t 气胎碾 碾压遍数	含水量 (%)	干容重 (g/cm ³)	压实后平 均厚度 (cm)
25	4	4	4	18.3	1.70	14.8
				19.1	1.72	
				17.3	1.74	
25	4	4	8	17.7	1.73	15.0
				18.1	1.72	
				17.1	1.73	
25	4	4	12	19.4	1.73	15.0
				17.9	1.76	
				16.5	1.73	

曾专门试验研究羊足碾、气胎碾的联合碾压。用D土场土料，按天然含水量大体分为15.0~17.0%，17.0~19.0%，19.0~21.0%三个范围。

羊足碾的最大接触应力，应以下式计算：

$$\sigma_{\max} = \frac{Q}{\Omega[n + \frac{1}{2}(n' + n'')]} \quad (1)$$

式中 Q ——羊足碾重, kg;

Ω ——每个羊足顶端面积, cm^2 ;

n ——滚筒上的一排羊足个数;

n', n'' ——分别为 n 排羊足两侧的各一排羊足个数。

重羊足碾, $n = 3, n' = n'' = 2$, 故 $\sigma_{\max} \approx 36.1 \text{ kg/cm}^2$ 。根据含水量不同, 选用气胎碾重量为 25 t, 30 t, 35 t。试验选用 25 cm, 30 cm, 35 cm 三种铺土厚度。试验场地布置如图 3。

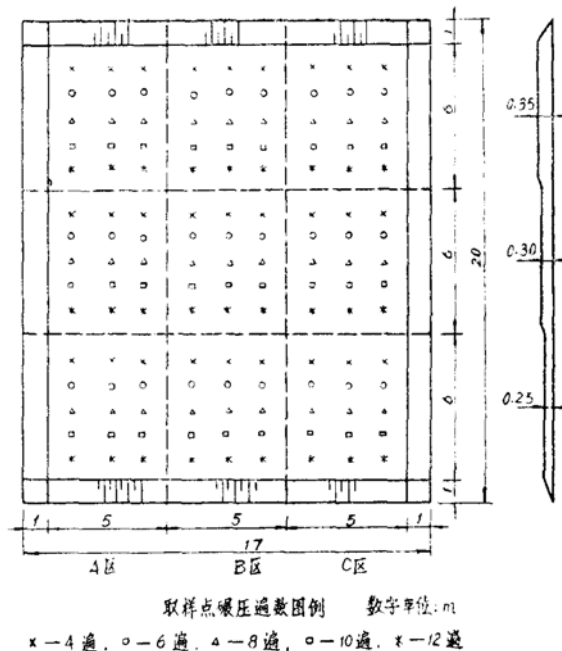


图3 羊足碾、气胎碾联合碾压试验场地布置
(单位 m)

试验分三次进行, 每次控制一种含水量, 羊足碾用进退法将试验面积全部碾压 3 遍, 再用不同碾重的气胎碾分别在 A, B, C 三区内碾压, 行车方向与不同铺土厚正交, 整机错车。按不同碾压遍数, 依次用环刀取样, 为防止测点重复, 每次取样后在测点处撒白灰作标记。试验成果见图 4。

可以看出, 当铺土厚在 30~35 cm, 土料含水量在 15.5~20.0% 之间时, 羊足碾压 3 遍后, 30~35 t 气胎碾碾压 8~10 遍, 干容重即能达到质量要求。后经研究确定, 坝面正式施工, 采用羊足碾、气胎碾联合碾压。为了防止铺土厚度不均, 漏压等现象, 施工参数定为: 含水量在 16.0~21.0% 之间, 机械铺土 30 cm (相当人工铺土 35~40 cm), 羊足碾碾压 2 个压程共 12 遍 (羊足碾滚筒宽 1.22 m), 每次错车 0.2 m, 从场地一端依次错车碾到另一端为一个压程计

1.22/0.20 = 6 遍), 30~35 t 气胎碾压 2 个压程共 10 遍(气胎碾压实宽 2.5 m, 每次错车 0.5 m)。

用羊足碾、气胎碾联合碾压发挥了羊足碾接触压力大, 先碾压底层, 使上下两层土结合优良并起到预压虚土的作用。而后气胎碾又可使上部土层均匀和平整。不仅有利于排除雨水, 免除雨水下渗浸润土层, 还可免除对前一填层的耙毛, 因而利于机械化施工, 便于汽车撒土, 推土机平土。羊足碾、气胎碾联合碾压形成连续流水作业。必须指出: 只有保证气胎内压力, 才能达到对土体设计压实度的要求。

用凸块振动碾压实粘土, 通过试验确定铺土 40cm, 碾压 6~8 遍即可使土料压实到要求的密度。试验成果见图 5。土结构在动荷载作用下, 易于重新组合, 密度增高。用橡皮球测力计测取凸块振动碾碾压时和静荷载压土时的结果见图 6。图中表明动荷载比静荷载的压实效果更显著。

(二) 边角岸坡狭窄部位的压实

大坝心墙与岸坡及混凝土建筑物接触部位的填土, 用电动蛙式打夯机压实。压实成果见图 7。

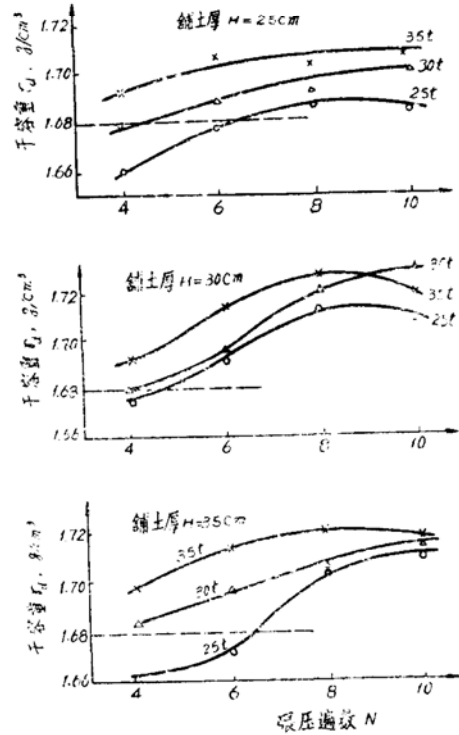


图 4 不同碾重 γ_d-N 关系曲线

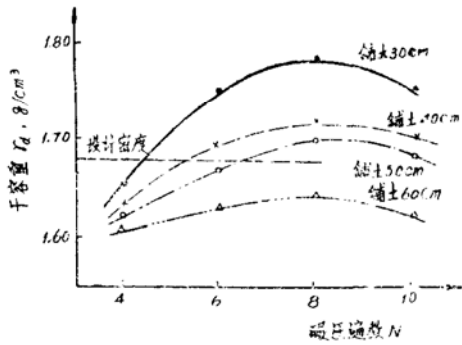


图 5 γ_d-N 关系曲线

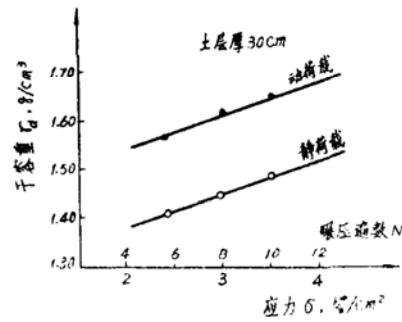


图 6 碾压遍数-应力-干容重关系曲线

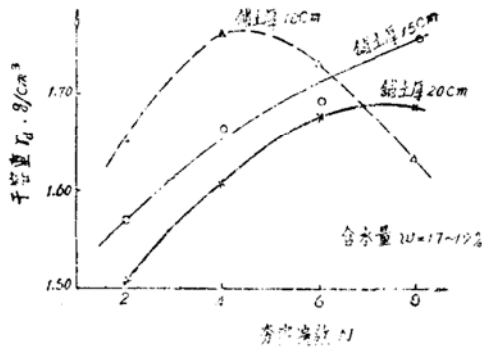


图 7 夯实成果

铺土厚15~20cm,含水量16.0~20.0%,夯实6遍,土的密度就可以达到设计要求。而铺土厚10cm,压4遍,干容重就开始下降,这是由于铺层薄,碾压遍数增多反而造成破坏之故。夯后土面很光,层间结合不好,每层必须耙毛。用自制电动垂直打夯机(夯板上带有齿足),夯击15cm厚的土层,结合面的密度和渗透系数均符合要求。结果如表10。将结合层处土样在常温下暴露风干十多天,结合层也未见明显的“张口”现象,说明两层结合得较好。

据现场检查统计,心墙粘土在碾压施工中,干容重达到设计指标的占99.3%,室内抽样检查,力学性指标达到设计指标的占78.8%。

表10 电动垂直打夯机试验成果

取样部位	铺土厚度 (cm)	压实厚度 (cm)	含水量 (%)	干容重 (g/cm ³)	渗透系数 k_{10} (cm/s)
结合层	15	10	19.6	1.68	
结合层	15	10	19.9	1.73	
结合层	15	10	19.6	1.73	6×10^{-8}
结合层	15	10	19.6	1.72	1×10^{-7}

三、坝壳砂卵石、石碴的压实

坝壳砂卵石料主要取自坝址上下游河床滩地,以花岗岩、片麻岩为主,石质坚硬,滚圆度好,砂以石英为主,云母含量<2%,洞挖石碴以绿泥石云母石英片岩为主,有少量辉岩,开采石料以花岗岩为主。河床砂卵石和开挖石碴的级配如图8。根据大型击实试验(锤击法)确定坝壳砂卵石设计填筑干容重不小于2.13t/m³,石碴填筑干容重不小于1.90~2.00t/m³。

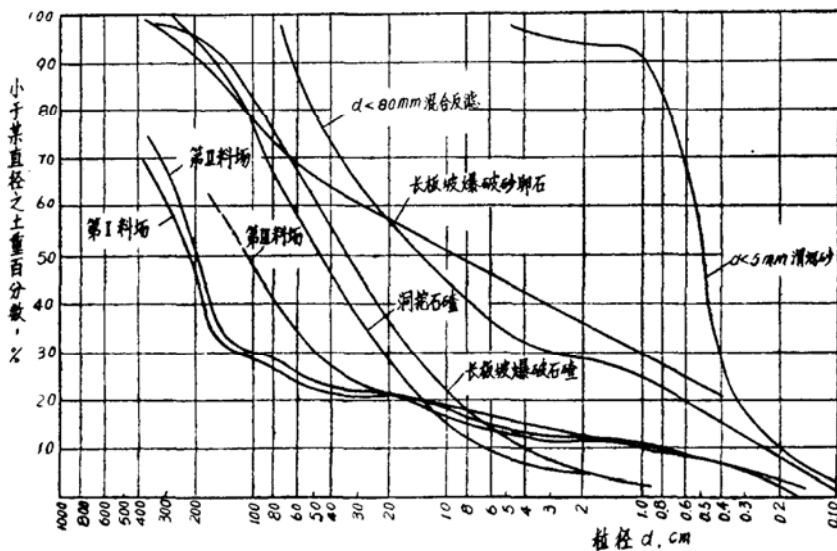


图8 颗粒级配曲线

起初坝壳是由2.5 t 夯板夯实和8 t 平碾压实,以后改为振动碾压实。振动碾技术指标如表11。

表11 QZN-18型振动碾技术指标

外形尺寸 (cm)			自重 (t)	碾筒		激振动力			振动频率 (次/分)	牵引车 型号
长	宽	高		直径 (cm)	长度 (cm)	型号	功率 (HP)	转速 (转/分)		
554	219	193	14	180	200	4135风冷 柴油机	80	1800	1500~1800	100HP 拖拉机

用夯板夯实石碴,铺料厚1 m,夯板落距3~3.5 m,夯实12遍。夯板的冲击作用可使石料达到一定的密实度,但同时也将表面石碴打成粉沫,水库水位降落时,很容易将石粉冲走,使石碴孔隙变大,密度降低。

振动碾是借助揉搓、夯实和振动原理压实土料的机具,它主要靠碾重及振动力的共同作用,以振动波向土石坝体内传播,使砂砾料颗粒易于相对移动,达到要求的密度。振动力的大小,取决于振动频率和振幅大小。

为了研究振动碾压实粗料的特性,进行了相应的试验。确定参数如下:

用第I料场河滩砂砾卵漂石,铺筑厚度为1 m,隧洞和溢洪道开挖石碴铺筑厚度为0.8 m和1 m两种;

牵引车(红旗100HP拖拉机)控制1挡中油门的速度(0.656~0.775 m/s);

振动频率为1800转/分;

碾压遍数定为4, 6, 8遍,碾压时不冲水。

振动碾以进退法碾压,每压两遍在固定点上测高程一次,最后用试坑灌砂法测其压实后干容重,成果见表12, 13。

表12 振动碾压实砂卵石试验成果表

碾压遍数	铺料厚度 (cm)	干容重 (t/m^3)		沉降量 (cm)	单位沉降量 (cm/m)	基础沉降量 (cm)
		压实前	压实后			
4	100.2	1.97	2.24	10.0	10	1.8
	90.0		2.22	6.2	6.9	2.8
	86.8		2.23	5.7	6.6	3.6
6	93.9	1.97	2.17	7.5	8.0	1.4
	91.7		2.27	5.7	5.6	2.1
	97.6			2.8	3.2	3.5
8	97.2	1.97	2.23	7.0	7.2	2.9
	95.5		2.23	5.9	6.2	2.6
	87.0		2.45	8.3	9.6	1.6

表13 振动碾压实石碴试验成果表

碾压遍数	铺料厚度 (cm)	干容重 (t/m^3)		总沉降量 (cm)	基础沉降量 (cm)
		压实前	压实后		
4	75.8	1.64	1.84	4.0	1.3
	77.2	1.64	1.86	4.6	1.0
4	100.9	1.64	1.85	12.8	1.6
	101.2	1.64	1.90	10.8	1.4
6	79.9	1.64	1.98	7.6	2.4
	76.4	1.64	2.07	5.9	1.5
6	103.0	1.64	1.90	16.6	1.2
	97.6	1.64	2.01	10.7	1.5
8	79.6	1.64	1.89	8.7	1.0
	82.6	1.64	2.03	9.6	0.8
8	100.2	1.64	2.07	14.5	1.5
	102.2	1.64	1.88	15.8	1.2

从试验成果中可看出, 碾压后基础都有沉降, 这说明当压实上一层料时, 下一层料仍在受振, 下一层相当两次受压, 故密度仍在提高。

振动碾是压实粗料的理想机具。在铺料 1 m, 碾压 4 遍, 砂卵石大都可达到填筑容重要求, 石碴在碾压 6 遍后亦可达到要求的填筑容重。

由于振动碾压实厚度较大, 避免了因剔除大粒径料而花费的工作量, 所以在以后又作过铺 1.5 m 厚砂砾卵石, 用振动碾碾压的试验。确定石头河坝壳砂卵石填筑厚度为 1~1.5 m, 碾压 6 遍, 最大粒径可达 1 m。这样就完全适应于 18 t 自卸汽车运料, 100HP 推土机摊平, 振动碾压实的施工工艺。

坝壳石料在实际碾压施工中, 干容重现场质量检查合格率达 91.4%。

四、反滤料的压实

石头河水库粘土心墙两侧的反滤料第一层为 $d < 5$ mm 的砂, 第二层为 $d < 80$ mm 的混合砂卵石, 上游砂层宽 0.7 m, 混合反滤层宽 2 m; 下游砂层宽 1 m, 混合反滤层宽 4 m。反滤砂的设计填筑密度为 $1.65 t/m^3$, 混合反滤料的设计填筑标准是相对密度 $D_r \geq 0.7$ 。反滤料的级配见图 8。

施工初期, 采用心墙填土超断面碾压, 后削坡再贴反滤料的方法, 因为此法不适用于机械施工, 经过多次试验, 改为“先砂后土”, 反滤料和粘土同时碾压“平起平上”的填筑工艺。即按设计断面尺寸先放线, 铺砂和混合反滤料 0.5 m 厚, 然后铺填第一层土 0.3 m 厚。用羊足碾、气胎碾紧靠砂边联合碾压。待第一层土压实合格后, 根据土砂混合情况, 人工将土砂混合了的部分和不密实部分清除, 清除部分用反滤砂填补, 然后再铺第二层土 0.3 m 厚。此时,

土面、砂面、混合反滤面的填筑高度基本相同,即可同时分别碾压,土用羊足碾、气胎碾联合碾压,砂和混合反滤料用振动碾压8遍。为了保证质量,在反滤层正式碾压之前先用不振动的振动碾预压1遍,待土和反滤料达到确定的碾压遍数,再用振动碾骑土砂交界缝压几遍。

现场质量检查,反滤砂的干容重合格率达100%;混合反滤料的合格率达84%;土砂交界处土的合格率达70.3%;砂的合格率达73.4%;压实后砂层的最小平均宽度,上游为0.613 m,下游为0.643 m。

五、结 语

1.粘性土的压实以羊足碾、气胎碾联合碾压较为理想,能充分发挥两种碾压机具的优点;凸块振动碾在我国还不普遍,但应引起足够的重视。对无粘性砂卵石的压实,用振动平碾较理想,如能辅以冲水,效果将更好。石头河水库对局部(如心墙两侧反滤料后的填石,坝壳与岸坡接触带)进行冲水碾压都收到了很好的效果。反滤料同心墙平起,用振动碾骑缝压实的方法更易于机械化施工,但应进一步研究如何尽量减少土砂在压实过程中的混合,保证填筑质量。

2.文中提出的压实参数,仅是在石头河坝的条件下作出的,条件改变时,应重新考虑。另外,由于大面积施工不可能像碾压试验控制的那样严格,因此,在确定施工参数时,应适当放宽。

3.气胎碾、振动碾工作时,都有一个压力和压力波传递的过程,所以行车速度的快慢,影响压实效果。在用振动碾压实较均匀的砂砾料时,第一遍行车速度应适当加快,或用低频振动为好。

4.室内击实试验与现场碾压试验的关系,有待今后继续研究。

参加本文试验工作的还有刘贞草、路焕菊、董行舒、宋银花、段建宏、朱东石等同志。

Earth-rock Dam Compaction in Shitouhe Project

Han He-wen

(Bureau of Water Conservancy and Power of Shanxi Province, Mei-xian, Shanxi)

Abstract

Through experiments of compaction on the materials used in Shitouhe earth-rock dam with various compacting equipments, rational methods and criteria for compaction are found, which are practical and available in mechanized construction and were proved satisfactory through practice. By these, problems concerning compaction in mechanized construction may be solved and the rate of construction may be much quicker.

In addition, experiments on compacting clay with a vibrating roller with pads on drum were made also. The conclusion is that such a equipment is available and worthy to be spreaded.