

# 土石坝粘性土的压实

郭 诚 谦

(水利电力部水利水电建设总局, 北京)

## 提 要

本文总结了粘性土的压实特性, 从不同击实功能下土料的压实最优饱和度 $S_{rop}$ 为常数、标准击实功能的最优含水量 $w_{op}$ 约等于塑限 $w_p$ 这些基本概念出发, 提出了用塑限、最优饱和度来估算粘性土的最大干容重 $\gamma_{dmax}$ 。

$$\text{即 } S_{rop} = C, \quad w_{op} = w_p$$

$$\text{且当 } w_p \leq 17\%, \quad S_{rop} = (3w_p + 35)\%$$

$$w_p > 17\%, \quad S_{rop} = (0.3w_p + 80)\%$$

$$\gamma_{dmax} = \frac{G_s \cdot S_{rop}}{G_s \cdot w_p + S_{rop}}$$

在文中讨论了确定粘性土压实标准的方法, 并对施工条件系数 $m$ 进行了论证, 提出了建议数值。即

$$\text{对于中低坝: } m = 0.95 \sim 0.97$$

$$\text{对于高坝: } m = 0.97 \sim 0.99$$

## 前 言

粘性土作为土石坝的防渗材料, 是坝体的关键。要求粘土具有较小的渗透系数、较低的压缩系数、较高的抗剪强度以及对不均匀变形有较强的适应能力等。而这些指标又主要取决于土料的压实标准——压实干容重与施工含水量。因此, 研究土料的压实特性具有重要的意义。我国有些土石坝, 由于施工前对土料的压实特性研究不充分, 出现返工、停工或坝体产生裂缝等问题, 如大伙房、碧口、湖北白莲河、浙江金兰等。

其次, 粘性土料的压实问题, 不仅是土石坝设计与施工的技术关键, 也是直接影响坝体填筑速度的关键。

本文从研究粘性土的压实特性出发, 探讨了确定压实标准的合理方法, 进而提出了我国当前应推广的碾压设备。

### 一、粘性土的压实特性

某一种粘土在确定的碾压机具下，其压实的难易、所能达到的干容重的大小，与含水量和压实功能有关。因此，粘性土的基本压实性质，可用干容重、含水量与压实功能的关系来表示。当压实功能一定、含水量为某一值时，干容重达到最大值，称为最大干容重  $\gamma_{dmax}$ 。相应的含水量称为最优含水量  $w_{op}$ 。最大干容量、最优含水量都随压实功能的改变而改变。

在实际工程中，一般，首先通过室内击实试验研究土的压实特性。以下除加说明者外，本文讨论皆以南实处击实仪（以下称南仪） $86.25t \cdot m/m^3$ 功能的试验资料为依据。根据许多工程击实试验结果，粘性土的压实特性规律如下：

#### (一)最优含水量与塑限关系十分密切

根据我国大伙房、岗南、岳城、以礼河、丹江口（王大沟付坝）、清河、横山、碧口、石头河、葛洲坝等工程的试验结果，最优含水量与相应塑限  $w_p$  的相关系数约为 1，如图 1 所示，即

$$w_{op} \approx w_p \tag{1}$$

上述工程的施工最优含水量，也是相应击实试验的最优含水量。最优含水量与塑限具有良好相关关系的原因是当粘性土处在塑限含水量状态时土体具有良好的适应变形能力，起始孔隙压力系数  $\bar{B}$  一般仅 0.2 左右，因此利于压实。

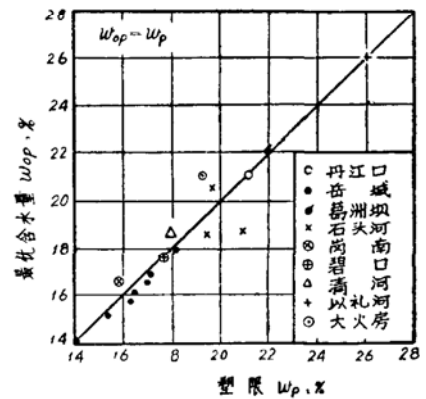


图 1 最优含水量与塑限关系曲线

#### (二)最优饱和度与塑限的关系

我们把最大干容重、最优含水量条件下的饱和度称为最优饱和度  $S_{rop}$ ，大量的试验表明最优饱和度  $S_{rop}$  与塑限、粘粒含量等有密切关系，如图 2, 3。

但是，对于同一种土料采用同一种击实试验工具时，最优饱和度则不随压实功能而变，即  $S_{rop}$  近似为一常数，如图 4。

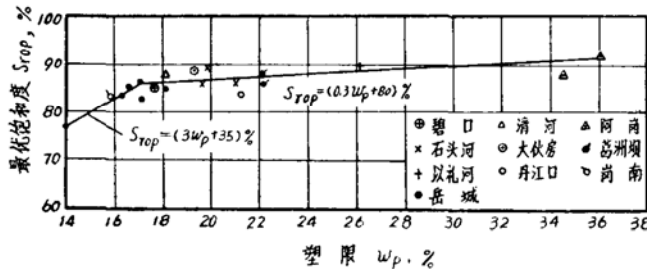


图 2 最优饱和度  $S_{rop}$  与塑限  $w_p$  的关系

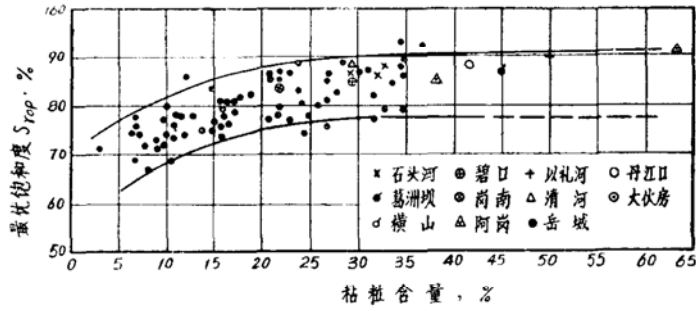


图3 最优饱和度 $S_{rop}$ 与粘粒含量的关系

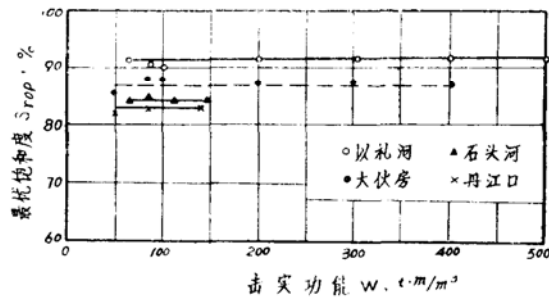


图4 最优饱和度 $S_{rop}$ 与击实功能 $W$ 的关系

上述关系是很有意义的。它表明 $w_{op}$ 与 $w_p$ ,  $w_p$ 与 $S_{rop}$ 之间有着良好的对应关系。图2  $S_{rop}$ 与 $w_p$ 的关系可用下式近似表示为

$$S_{rop} = (3w_p + 35)\% \quad (w_p \leq 17\%) \tag{2}$$

$$S_{rop} = (0.3w_p + 80)\% \quad (w_p > 17\%) \tag{3}$$

参照式(2), (3), 可推求相应的最大干容重为

$$\gamma_{dmax} = \frac{S_{rop} \cdot G_s}{G_s \cdot w_p + S_{rop}} \tag{4}$$

式中  $G_s$ 为土粒比重,  $S_{rop}, w_p$ 以小数计。

用塑限计算最大干容重是比较符合实际情况的。因为塑限综合反映了土的物理化学性质、颗粒组成以及亲水性质, 图5点绘了最大干容重与塑限的关系。图中可以看出, 式(4)与击实试验结果相当一致, 而理论公式\*的结果偏差较大。

### (三)最大干容重与粘粒含量的关系

试验表明, 粘性土的最大压实干容重随着粘粒含量增加而减少, 如图6。当粘粒含量约

\*公式  $\gamma_{dmax} = \frac{Gs(1 - va)}{1 + Gsw}$  即所谓理论公式。

为10~30%时压实干容重较大。因此,当确定填土的压实干容重时,土料的最大干容重越大,压实干容重应定得高些。不同颗粒组成的土料,不应采用同一干容重。我国以礼河、横山心墙土料,当粘粒含量为50%左右时,设计干容重仅为1.46~1.51g/cm<sup>3</sup>。

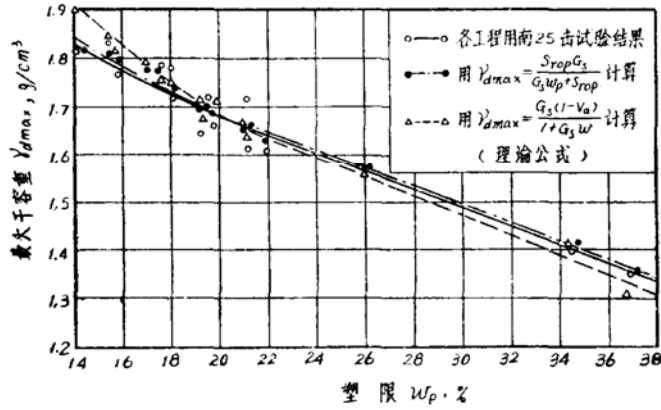


图5 一些工程用不同方法确定的粘性土最大干容重

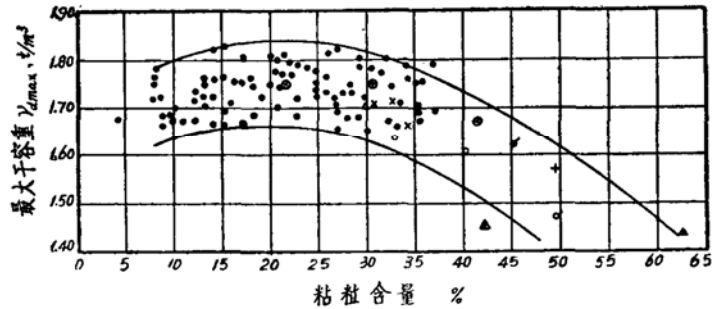


图6 最大干容重γ<sub>dmax</sub>与粘粒含量的关系

(四)最大干容重与天然干容重的关系

图7显示了若干工程的击实最大干容重与相应天然干容重 γ<sub>dn</sub> 的关系。此关系可近似表示如下:

$$\gamma_{dmax} = 0.775\gamma_{dn} + 0.46 \quad (5)$$

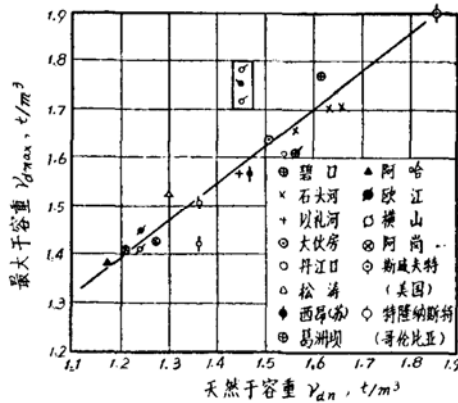


图7 最大干容重γ<sub>dmax</sub>-天然干容重γ<sub>dn</sub>关系曲线

即最大干容重约为天然干容重的1.02~1.18倍。式(5)不适用于西北、华北等地的黄土和次生黄土。

最大干容重与天然干容重的关系,对选择压实干容重是有意义的。天然干容重高的土料,压实干容重也应定得高些。

## 二、确定粘性土压实标准的方法

粘性土的压实标准应包括干容重与含水量两个不应分割的指标,即不能像有的工程那样,片面强调干容重而忽视对含水量的要求。通常,确定粘性土的压实标准,可用以下途径。

### (一)通过击实试验确定

我国过去大多数工程采用南仪25击(86.25t·m/m<sup>3</sup>)作为标准压实功能进行试验,得出多组(不少于25~30组)最大干容重的平均值,再乘以施工条件系数*m*(下面讨论),即得压实干容重

$$\gamma_d = m\gamma_{dmax} \tag{6}$$

但是,仔细分析一下各种土料的最大干容重与压实功能的关系便可发现,所谓标准功能86.25t·m/m<sup>3</sup>只是个经验数值。如图8所示,A线在击数小于15时,最大干容重随击数增长较快,以后则增长缓慢。至于B线,最大干容重则几乎与击数成直线变化。因此,对于A线,若仅从最大干容重与击数关系来看,压实功能只要选为相应15~20击即可,对于B线则难以选定。所以,如何选定标准压实功能,是用击实试验方法确定压实标准的关键。为此,笔者建议按下列原则进行:

1.用塑限作为最优含水量。从压实功能与最大干容重、最优含水量关系曲线上初步查得相应的压实功能(图9中箭头所示)。

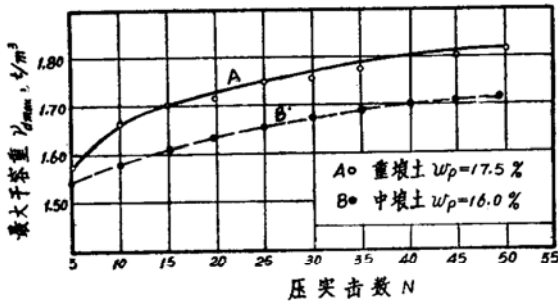


图8 最大干容重 $\gamma_{dmax}$ 与压实击数*N*关系曲线

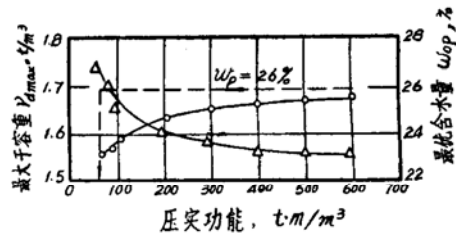


图9 某坝心墙粘土压实曲线

2.应满足沉降变形的要求,即应使选定的干容重满足压缩系数 $a_v \approx 0.01 \sim 0.02$ (指压力为1~2 kg/cm<sup>2</sup>的压缩系数,下同)。控制压缩系数,对于高坝、两岸接坡以及与混凝土坝的连接尤其重要。例如岳城水库(坝高51.5m)坝下埋管式泄洪洞两侧,由于填土干容重较坝体1.65t/m<sup>3</sup>提高到1.70t/m<sup>3</sup>,使 $a_v \approx 0.021$ ,运行约20年来没有产生过裂缝。

3.天然含水量情况,当天然含水量与塑限接近且易于施工时,应选择天然含水量作为最优含水量来确定压实功能,这样可减少対土料含水量的处理,简化施工。

下面将以某坝心墙粘土压实功能与压实标准的选定来说明以上原则。

某土坝高80.5m,心墙为粘土, $w_p$ 为26%,天然含水量一般为30%左右。若单纯从最大干

容重与压实功能关系曲线(图9)来看,压实功能可选为 $150\text{t}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ;但从塑限( $w_p$ 为26%)来看,压实功能应定为 $86.25\text{t}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ;而从压缩系数来看,当干容重 $\gamma_d = 1.50\text{t}/\text{m}^3$ (相当于最大干容量 $1.55\text{t}/\text{m}^3$ 、施工条件系数 $m = 0.97$ )时,其 $a_0 = 0.010\text{cm}^2/\text{kg}$ ,故已满足设计要求。进一步分析图9的压实曲线,当压实功能为 $60.4\text{t}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 时,相应最大干容重为 $1.54\text{t}/\text{m}^3$ ,最优含水量为27%。这与当压实功能 $86.25\text{t}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ 时之最大干容重 $1.55\text{t}/\text{m}^3$ 很相近,而最优含水量可提高1%,因此更能适应土料天然含水量偏高的特点,有利于施工,而其他指标完全满足心墙的设计要求。综上所述,最后选定了压实功能为 $60.4\text{t}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ (普氏击实仪)。实践证明,该土坝运行情况良好。

此外,在确定压实标准时,还应考虑到较高的抗剪强度和适宜的渗透系数。一般情况下,选定的干容重亦不应低于其天然干容重。对于具有团粒结构的土,应适当提高压实干容重。

### (二)按本文建议的公式确定

用塑限、最优饱和度近似确定最大干容重、最优含水量,即根据本文式(2),(3),(4)和(6)进行计算。只要预先测定土料的比重 $G_s$ 与塑限 $w_p$ 即可。

### (三)参考已建工程的成功经验

附近已建成的土石坝土料压实标准可作为确定压实干容重、含水量的重要参考。

### (四)确定施工含水量

从击实试验曲线得到的最优含水量仅是一个值,而实际土料的天然含水量总是在某一范围内变动。因此,为适应施工的要求,必须围绕最优含水量规定一个范围,即含水量的上、下限。施工含水量范围的大小,首先应与击实曲线型式有关,如图10所示。A型曲线较平缓,B型曲线较陡,因此满足 $\gamma_d = m \cdot \gamma_{d\max}$ 的含水量范围两者是不同的,前者比后者大得多。其次,含水量不仅对压实起重要作用,对土体适应变形的能力也起着十分重要的作用。据国外统计,当含水量低于最优含水量5%时(按普氏标准压实功能),填筑土体发生严重裂缝。当含水量从小于最优含水量(或塑限)2~3%增加到接近最优含水量时,土的柔性大大增加。

此外,施工含水量的范围还要考虑施工碾压的可能性。例如,当含水量超过塑限2%左右,羊足碾碾压困难。

根据上述情况,并参考国外工程实践(表1),对于压实标准要求较高的土石坝,施工含水量上限一般不宜超过最优含水量(或塑限)2~3%;下限一般不低于2%。

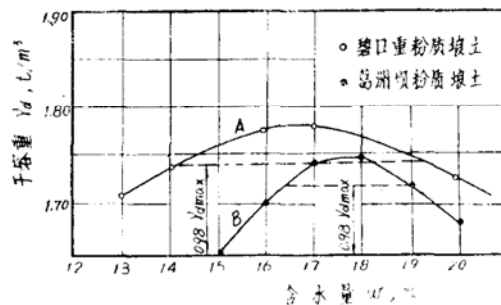


图10 干容重与含水量的关系

表1 国外若干工程、规范采用的施工含水量范围和施工条件系数

规范或工程名称	施工条件系数 $m$	施工含水量范围 (%)	备注
坝工手册(美国)	0.95~1.00	$w_o + (2\sim 3)$ $- (1\sim 2)$	普氏击实仪标准击实功能
土石坝的设计与施工总则(美国陆军工程兵团)1971年	0.95~1.00	$w_o + 3$ $- 2$	同上
拱坝、土石坝、重力坝近代设计施工的实践经验(美国)1967年	0.95~0.98	$w_o + 6$ $- 2$	同上
福尔纳斯(巴西)	0.99~1.01		
波太基山(加拿大)	0.99		
△施工法(日本)	$\geq 0.95\sim 1.00$		

### 三、施工条件系数 $m$ 的确定

当土料的最大干容重确定后,还要进一步确定施工压实干容重。因此最大干容重只有在最优含水量条件下才能达到,而土料的施工含水量是在某一范围内变化,实际施工条件也总不象室内试验那样严格。因此,必须把最大干容重乘以施工条件系数作为施工压实干容重。一般确定施工条件系数需考虑以下几点。

#### (一)参考国内外已有的工程、规范

表1, 2为国内外工程实际采用的  $m$  值。从表中可看出,一般 I、II 级工程或高坝,采用 0.97~0.99; 中等高坝,可采用 0.95~0.97; 中小型工程采用 0.92~0.95。

应该指出,我国 I、II 级土石坝,如官厅、以礼河、碧口、岗南等,按照上述施工条件系数 0.97~0.99 确定压实标准,未曾或很少发生裂缝,而不少中小型土坝采用 0.92~0.95,发生了不同程度的严重裂缝。这说明施工条件系数  $m \leq 0.92\sim 0.95$  是过低的。从表 2 还可看出,国外大多数工程亦采用  $m = 0.95\sim 1.00$ 。

#### (二)根据土体压缩变形确定

土体的压缩性,一般可用压缩系数  $a_{v,2}$  来判断。图11是根据施工条件系数确定压实干容重

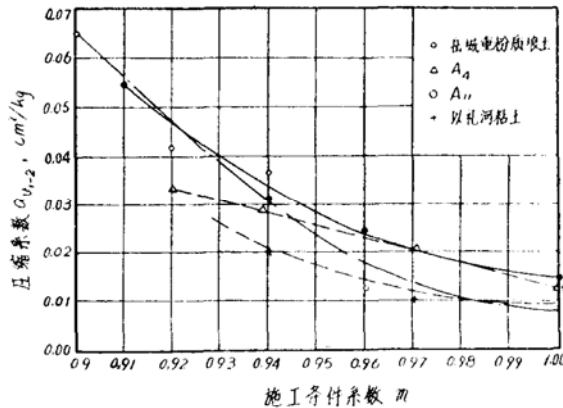


图11 施工条件系数与压缩系数的关系

表2

坝名	土坝坝型	坝高(m)	颗粒级配(%)			塑限(%)	压实标准				施工情况			
			>0.05	0.05~0.005	<0.005		分类	设计合格率(%)	施工条件系数m	设计干容重(t/m <sup>3</sup> )	压实功能(t·m/m <sup>3</sup> )	施工含水量(%)	平均干容重(t/m <sup>3</sup> )	实际合格率(%)
大伙房	心墙	48	11~12	47~52	36~45	粉质粘土	18~21	90	0.99	1.70	200	17~19	1.74	99.9
清河	斜墙	39.4	19	52	23~35	粉质粘土 重粉质壤土	16~20	100	0.97	1.66	90*	16~20	1.70	100
岗南	斜墙	59	17	61	16~22	中、重粉质壤土	15.6~16.3	90	0.95	1.65	86.3	14~17	1.70	
岳城	均质	51.5	17~24	44~66	8~27	轻、中、重粉质壤土	15.4~17.6	90	0.95~0.97	1.65	86.3	14~17	1.74	93
官厅	心墙	45.0	28~40	56~64	4~7.5	轻、重粉质壤土	17.8~20.1		0.93	1.75	86.3	11~13	1.80	94.3
密云	斜墙	66.0	13~40	42~63	14~29	中、重粉质壤土	14.5~18.9	95	0.96~0.98	1.70	90*	15~19	1.73	98.4
松涛	均质	78.7			5~20	砾质轻壤土			0.93	1.65	112.5*	16		
南湾	心墙	34.7			20.5~46	重粉质壤土	19.4			1.70		18.5~20	1.74	
毛家村	心墙	80.5	13~18	31~32	50~56	粘土	26~27	95	0.97	1.51	86.3	24~26.5	1.59**	95**
丹江口付坝	斜心墙				39~45	粉质粘土、粘土	19.1~22.1	90	0.99	1.58	86.3	19~23	1.64***	95***
碧口	心墙	100	20	50	30	重粉质壤土、 粉质粘土	16~19	90	0.97	1.71	86.3	16~19	1.75	78~80

\*为仿苏击实仪；\*\*为碾压试验结果；\*\*\*部分土场土料碾压试验结果。

与其相应的压缩系数的关系曲线。

可以看出,对于 $A_4$ ,  $A_{11}$ 两种土料,如采用 $m = 0.92$ ,压实干容重分别为 $1.44, 1.64\text{t/m}^3$ ,相应压缩系数为 $0.033, 0.041$ ;当 $m = 0.95$ 时,压实干容重分别为 $1.49, 1.69\text{t/m}^3$ ,相应压缩系数为 $0.028, 0.030$ 。显然压缩系数过大。当 $m$ 大于 $0.95 \sim 0.96$ 后,压缩系数 $a_v$ 明显减小,之后,减小的趋势变缓。因此,自变形观点而言,施工条件系数宜大于 $0.95 \sim 0.96$ 。

### (三)参照天然干容重确定

很多工程的天然干容重相当于最大干容重乘以施工条件系数 $0.92$ ,有的天然干容重更大,需乘以 $0.95$ 的系数。因此,参照天然干容重,一般也应选择施工条件系数 $m \geq 0.95$ 。

根据以上分析,笔者建议,对于高坝或I、II级坝,应选取施工条件系数 $m = 0.97 \sim 0.99$ ,对于低坝和III级以下的坝,可采用 $m = 0.95 \sim 0.97$ 。

## 四、施工碾压设备的选择

当压实标准确定后,选用什么样的碾压设备,是很关键的。

土石坝与混凝土坝比较,一个很重要的优点,是土石坝的填筑速度基本上可不受控制(个别受沉陷变形、孔隙压力控制者除外)。但是,这一优点在国内没有得到充分发挥。例如国内土石坝的平均月上升速度只有 $3 \sim 7\text{m}$ ,日上升速度 $0.3 \sim 0.5\text{m}$ ,仅龙口处达 $9 \sim 12\text{m/月}$ 。而国外日上升速度达 $0.6 \sim 1.0\text{m}$ ,月上升速度达 $12 \sim 20\text{m}$ ,一座高 $120 \sim 240\text{m}$ 的土石坝,只需 $3 \sim 4$ 年即可完成。那么控制坝体上升速度的关键因素是什么呢?

从国内土的施工压实情况来看,一般多采用双联羊足碾或轻型气胎碾( $26 \sim 30\text{t}$ )。铺土厚度较薄,仅 $20\text{cm}$ 左右(推土机散料)。如以一个台班平均填筑一层,一天之内心墙约能上升 $0.3\text{m}$ ,且由于铺土厚度薄,大吨位的汽车上坝卸料、推土机散料的施工组织形式,往往容易产生铺土厚薄不匀,因此难以保证压实质量,速度也无法提高。

对于坝壳堆石或砂砾料的压实,由于采用重型振动碾和夯板,铺土厚度可达 $1.0 \sim 2.0\text{m}$ ,坝壳单独月上升最大填筑速度可达 $20\text{m}$ ,远远超过心墙上升速度。

可见,粘性土的填筑控制了坝体的上升速度。关键是铺土厚度。用夯板压实,虽能达到增大铺土厚度的目的,但生产率仍难大幅度提高。如岳城水库采用夯板,铺土厚 $80\text{cm}$ ,夯2遍,平均台班生产率也仅能达 $400 \sim 500\text{m}^3$ 左右。

根据以上分析,我们认为用 $50 \sim 100\text{t}$ 重型气胎碾压实粘性土,是较为理想的。不仅铺土厚度大,而且具有压实遍数少、工效高、质量均匀、对含水量适应性强等优点。既适用于推土机铺土,也适用于压实砂砾料、反滤料,可以简化施工工序。如国内某土坝工程,曾使用YTZ-50型气胎碾压实,铺土厚达 $50\text{cm}$ ,碾压6遍,有效压实厚度可达 $25 \sim 30\text{cm}$ 。与羊足碾比较,同样工序,同样工时,坝体上升速度提高了 $1.5 \sim 2$ 倍。如果保证土料的上坝运输强度,仍以每班一层计算,则一天之内坝体填筑高度近于 $1.0\text{m}$ 。这一速度是很可观的。

## 五、结束语

本文分析了粘性土的压实特性,提出最优含水量与塑限的相关系数约为1,最优饱和度为常数,进而提出用塑限、最优饱和度直接计算最大干容重的方法,其精度较高。当确定土

料的压实标准时,应首先进行击实试验,但其标准压实功能并不是一个定数,应根据土料的塑限、压缩系数、天然含水量情况以及其他因素,综合分析确定。

根据本文的分析,对于高坝和 I、II 级土石坝,建议施工条件系数  $m = 0.97 \sim 0.99$ ,对于中低坝和 III 级以下的土石坝,  $m = 0.95 \sim 0.97$ 。

为了充分发挥土石坝的优点,参考国外施工实践,建议国内推广使用重型气胎碾(50~100 t)来压实粘性土,这对加速坝体上升速度,保证铺土厚度与压实质量,具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 大伙房水库技术专题总结,1958年。
- [2] 打破土坝红粘土填筑标准的“框框”,水利水电技术,1965年10月。
- [3] 坝工建设技术经验汇编,第1集,水利电力出版社,1975年。
- [4] 白龙江碧口水电站心墙土料现场压实试验报告,水利电力部第五工程局试验室,1973年6月。
- [5] 潮湿多雨地区土石坝工程粘土料施工中的两个问题,云南省电力工业局勘测设计院水工室,1978年。
- [6] 石头河水库心墙粘土及坝壳砾卵石碾压试验综合报告,陕西省石头河水利工程指挥部试验室,1979年。
- [7] 美国坝工手册,土坝设计,电力部昆明设计院译,1979年。
- [8] 美国陆军工程兵团,土石坝的设计与施工准则,电力工业部水力发电建设总局技术处译,1980年。
- [9] 美国拱坝、土石坝、重力坝近代设计施工的实践经验,美国土木工程学会,美国大坝委员会,1967年。
- [10] 日本全国大坝委员会坝工设计规范,水利电力部科学技术情报研究所译,1978年。
- [11] Sherard, J.L., Woodward, S.F., Gizienski and Clevenger W.A., Earth and Earth-rock Dams, 1963年。

## Compaction of Clayey Soil in Earth-rock Dam

*Guo Cheng-qian*

(Bureau of Capital Construction, Ministry of Water Conservancy and Electric Power, Beijing)

### Abstract

The paper describes the compaction characteristics of clayey soil. In view of the basic conception that the optimum degree of saturation  $S_{rop}$  under various compaction energy is constant, and the optimum moisture content of the standard compaction energy is approximately the plastic limit, a method by using plastic limit  $w_p$  and optimum saturation for estimation of the maximum dry density is presented as follows:

$$\gamma_{dmax} = \frac{S_{rop} \cdot G_s}{G_s w_p + S_{rop}}$$

where  $G_s$  is the specific gravity of the soil particles,

$w_p$  is the plastic limit.

Methods of determining the compaction criterion of clayey soil are discussed and the coefficient of construction  $m$  is introduced and demonstrated with suggestion value  $0.95 \sim 0.97$  for medium and low dams, and  $0.97 \sim 0.99$  for high dams.