

水坠法筑坝技术 在中、重粉质壤土地地区的应用*

张伯平

(西北农学院水利系)

一、前言

水坠法筑坝技术是陕北、晋北人民创造的一种多快好省的新型筑坝技术,目前已在全国十三个省区推广应用。尤其是在轻粉质壤土地地区和砾质粘土地区,如陕北、晋北、广东、广西和内蒙等地,显示了工效高、工期短、造价低、便于施工等优点。但在中、重粉质壤土地地区,如关中、晋南、豫西、陇东等地区,由于土的含粘量较高,渗透系数小,土体中孔隙水压力消散缓慢,影响冲填体的脱水固结速率,所以坝体强度增长较慢,在施工期常常发生坝坡裂缝及鼓肚,甚至发生滑坡现象,造成工程事故。

为了在中、重粉质壤土地地区应用水坠法筑坝这一筑坝技术,近年来一些地方的群众先后采用了埋砂井或砂垫层、层泥层土等排水措施,以促进冲填体的脱水固结。特别是采用层泥层土的筑坝方法,有成功的,也有的发生了不少问题。因此,关于这一筑坝技术的科学性、可靠性及设计与施工的一些合理技术指标,都是工程上急待解决的问题,也是直接影响这一筑坝技术推广应用的实际问题。作者结合陕西省凤翔县页沟水库层泥层土水坠坝进行了大型模拟固结试验,从理论和实践的結合上对层泥层土水坠坝的脱水固结机理进行了研究,探讨了层泥层土水坠坝的强度增长规律,提出了层泥层土水坠坝的一些合理技术指标,而且直接应用于页沟层泥层土水坠坝进行了实践。本文目的就是 from 理论和室内大型固结试验结果与现场实际观测资料的对比上说明这些问题。

二、层泥层土水坠坝脱水固结机理

所谓层泥层土水坠坝就是采用冲填一层泥浆,然后在泥浆上垫一层天然土料,使其冲填体中大量水分从垫土层排出坝体或暂时被垫土层吸收,这样将冲填泥浆与天然土垫层交替铺设筑成的坝就叫层泥层土水坠坝。其断面形式如图1所示。

*本试验研究得到刘祖典教授、张君常付教授和沙际德讲师的多次热情指导及宝鸡市水保站刘清荣同志提供的现场观测数据,在此一并表示感谢。

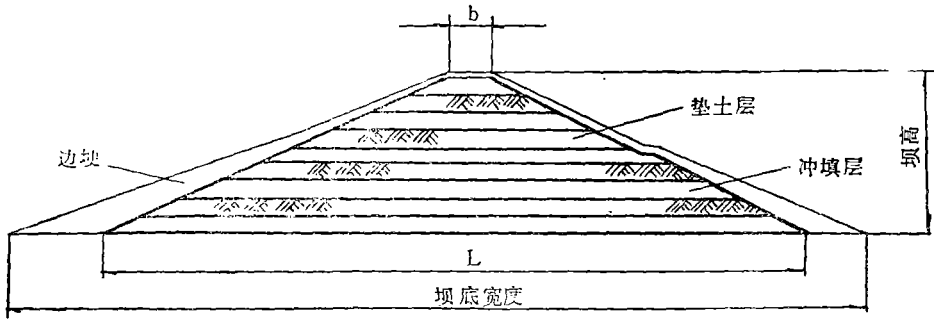


图1 层泥层土水坠坝断面示意图

层泥层土水坠坝的脱水固结过程实际上是冲填层和垫土层中各种能量转移的综合表现。根据土水势的概念，坝体中总的土水势应该等于基质势、溶质势（渗透势）、压力势、重力势及温度势之和。用代数式表示为：

$$\Psi_{\text{总}} = \Psi_{\text{基质势}} + \Psi_{\text{溶质势}} + \Psi_{\text{压力势}} + \Psi_{\text{重力势}} + \Psi_{\text{温度势}} \quad (1)$$

①在层泥层土水坠坝中，冲填体和垫土层基本是同一种土料，所以基质势的表现主要为毛细作用和土粒薄膜水厚度不同所产生的吸附作用；②由于冲填层的饱和度远大于垫土层，所以溶质势主要表现为冲填层中水分向垫土层渗透，其规律符合达西定理，其速率主要取决于导水率和水力梯度；③压力势主要包括孔隙水压力、孔隙气压力和荷载三部分，冲填层在初始状态处于流态，在上复土层压力作用下，孔隙压力很高，而相应的垫土层的孔隙压力很低，因此，压力势主要表现为冲填层中孔隙水压力向垫土层消散；④重力势包括溶质重力和水的重力，其方向始终是向下的，所以它既增大了向下的压力势，又减少了向上的压力势；⑤温度势主要表现在由于自然气温使其坝体水分的蒸发，特别是在施工过程中由天然气温使其施工坝面水分蒸发，促进坝体脱水固结。

以上分析说明，层泥层土水坠坝中水分的运动主要是溶质势、基质势和压力势的作用。其综合表现为冲填层中水分向垫土层中运动和坝体水分向坝外运动，使坝体脱水固结。

但是冲填体和垫土层都是同一含粘量较高的土，其透水性较差，渗透系数很小，因此其脱水效果与其渗径的长短关系甚大。计算结果表明，当渗径小于5米时，土体水平方向和垂直方向的渗透效率还是较强的，当渗径大于10米时，渗透效率就很差了。所以就实际效果来说，对于中、重粉质壤土层泥层土水坠坝，在靠近边埂或坝肩等部位，冲填层的排水固结问题可以按平面问题简化计算（如图2）。

其固结微分方程式可表示如下：

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_h \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - B \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

式中：u—冲填层中孔隙水压力

C_v 、 C_h —冲填层的固结系数

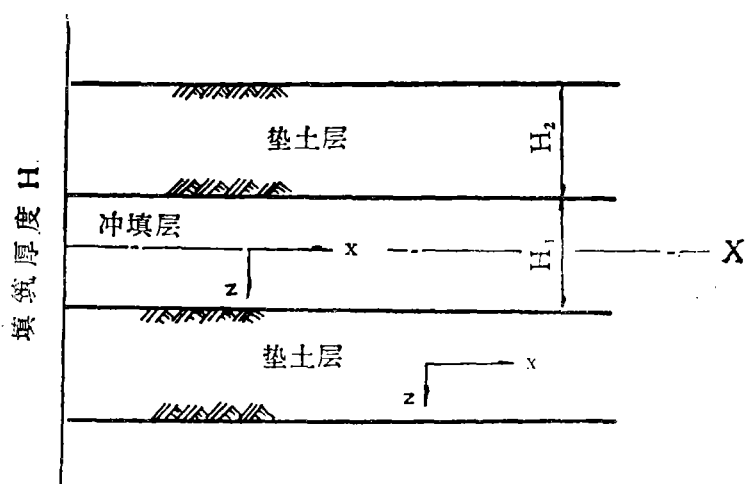


图2 层泥层土平面排水示意图

B —冲填层中平均孔压系数

t —固结时间

而在坝体中心部位由于远离坝肩或边埂，则冲填体的固结问题主要表现为垂直方向的渗透作用，所以可以按太沙基单向渗透固结理论双面排水情况简化计算。固结微分方程为：

$$C_v \frac{\alpha^2 u}{\alpha Z^2} = \frac{\alpha u}{\alpha t} \quad (3)$$

式中： C_v —固结系数

u —孔隙水压力

z —冲填层厚度

t —固结时间

另外，坝体填筑高度超过10米后，其中心部位的水分向坝肩、围埂及坝基的渗透效率都很差，为了确保坝体施工期的安全，还应考虑坝体水量平衡问题，即为了加快冲填层的脱水固结，应使垫土层的吸水量等于冲填层的脱水量。其关系式为

$$H_1 \gamma_{d1} (\omega_{o1} - \omega_e) = H_2 \gamma_{d2} (\omega_e - \omega_{o2}) \quad (4)$$

式中： H_1 、 H_2 —冲填层和垫土层厚度

γ_{d1} 、 γ_{d2} —冲填层和垫土层初始干容重

ω_{o1} 、 ω_{o2} —冲填层和垫土层初始含水量

ω_e —平衡后的含水量

三、层泥层土水坠坝的合理技术指标

理论分析和实践都表明，层泥层土水坠坝脱水固结最为不利的部位是坝体中心部

位。这个部位的泥浆水分无论是向坝肩、边埂，还是坝基渗透都很困难，只能是靠垫土层吸收泥浆水分。所以层泥层土水坠坝的设计技术指标应以满足这一部位的水量平衡要求为准。下面就以坝体10米高程处中心部位为例分析其技术指标。

分析式(4)可以看出，影响脱水固结的主要技术指标是冲填泥浆的起始浓度、垫土层的天然含水量、冲填层和垫土层的厚度比及施工速率。将(4)式整理可得冲填层与垫土层的厚度比如下式：

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\gamma_{a2}(\omega_0 - \omega_{02})}{\gamma_{a1}(\omega_{01} - \omega_0)} \quad (5)$$

(符号含意同4式)

上式中泥土水量平衡后的含水量 ω 可由坝体施工期的稳定要求选定，冲填层的起始干容重 γ_{a1} 取决于冲填泥浆的起始浓度，泥土厚度比则主要视冲填泥浆的起始浓度和垫土层的天然含水量而定。所以，垫土层含水量、泥浆层初始浓度、泥土厚度比等指标，是层泥层土水坠坝施工中需要控制的重要指标。

为了研究这些指标的内在联系和合理取值，作者研制了一台大型固结仪，分别模拟风翔页沟坝坝体10米高程处的情况进行了多次大型固结试验(试验土料物性指标见下文工程实例部分)。每次试验都是按 $P = 1 \text{ kg/cm}^2$ 、 2 kg/cm^2 、 3 kg/cm^2 逐级加荷，每级荷载下连续固结两昼夜，实测试验前后土的物理力学性质指标，根据这些指标进行水量平衡计算，计算结果如表1。

冲填层和垫土层水量平衡计算表

表 1

泥土 厚度 比		填筑指标			变形稳定后指标			排水量	吸水量	剩余水	吸水率
		层 厚 (cm)	ω (%)	ω_a (T/m ³)	层 厚 (cm)	ω (%)	γ_a (T/m ³)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)
1 : 1	冲填层	50	43.5	1.25	36.61	28	1.55	11.36		4.18	
	垫土层	50	13	1.35	42.8	23.5	1.58		7.12		63
0.70	冲填层	21	50	1.15	16.7	27	1.58	4.38		0.53	
	垫土层	30	13.5	1.35	25.2	24	1.54		3.85		87.9
0.50	冲填层	20	50	1.15	16.7	27	1.58	4.38		0.59	
	垫土层	40	15	1.35	33.6	24	1.52		4.97		113.5

从表1中可以看出：

1.当垫土层土体含水量 $\omega < 15\%$ ，冲填层泥浆含水量 $\omega < 50\%$ ，泥土厚度比等于0.70，则垫土层对冲填层的吸水率可达90%，对冲填体的初期脱水固结较为理想。若能增大冲填体的浓度，使其含水量 $\omega < 45\%$ ，则泥土厚度比可增大到1 : 1。

2.当土场土料含水量 $\omega > 15\%$ ，就应增大冲填体的浓度或减小泥土厚度比，当土场天然含水量大于塑限时，就不宜继续冲填了。

3.当冲填层与垫土层的厚度越小时，水量平衡过程越快，但为了便于施工，一般的垫土层厚度不宜小于0.5米。然后按泥土厚度比换算冲填层厚度。

4.根据前述温度势的概念，泥土厚度比的设计，还应根据施工季节决定，在干燥缺雨的春季到夏初，土场含水量一般较低，多在15%以下，同时由于日照长，气温高，气候干燥，蒸发量大。这时泥土厚度比可以增大到1：1以上。这是层泥层土水坠坝施工的最佳季节，应不失时机地抓紧施工。而在多雨阴湿的夏末和秋季，一般降雨量多，土场含水量大，经常接近于塑限含水量。同时由于气温低、蒸发量小，加之多雨又增加坝体水分，而且影响施工，是最不利的施工季节，因此就不宜进行施工。

5.另外，虽然层泥层土水坠坝按其合理技术指标可以基本上消灭流态区。但是由于冲填体的脱水固结与上复土层压力有关。即随着上复土层压力的增大而逐渐脱水固结，这是一个缓慢的过程，这个过程的初期和中期冲填体的强度是较低的，在上复土层压力作用下可能产生塑流和蠕动现象，所以仍然不能忽视边埂的作用。边埂的设计仍然应按一般水坠坝的边埂要求进行设计。

四、层泥层土水坠坝的强度增长规律

从几种不同的泥土厚度比的大型固结试验结果可以看出：当冲填层与垫土层的含水量接近均一时，其干容重都显著增大，强度指标也都比较大，尤其是垫土层的抗剪强度指标几乎接近碾压坝的强度指标（如图3和图4）。

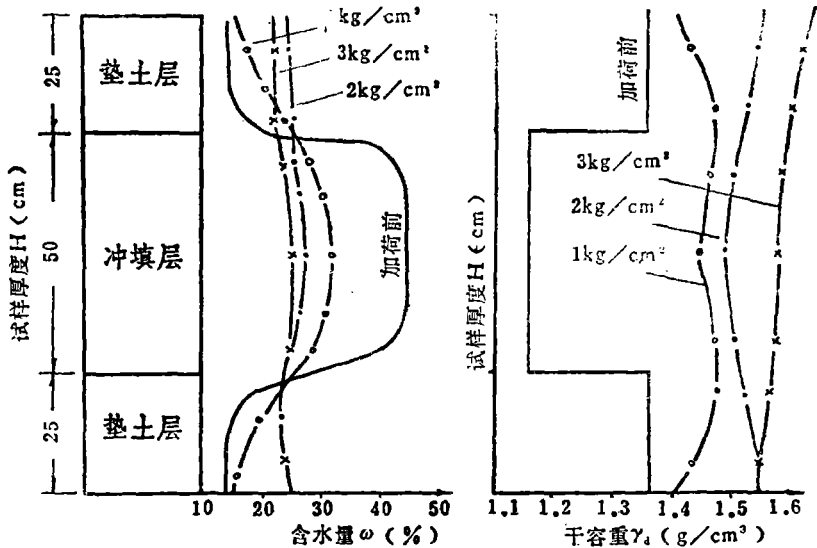


图3 各级荷载下固结两昼夜后含水、容重变化

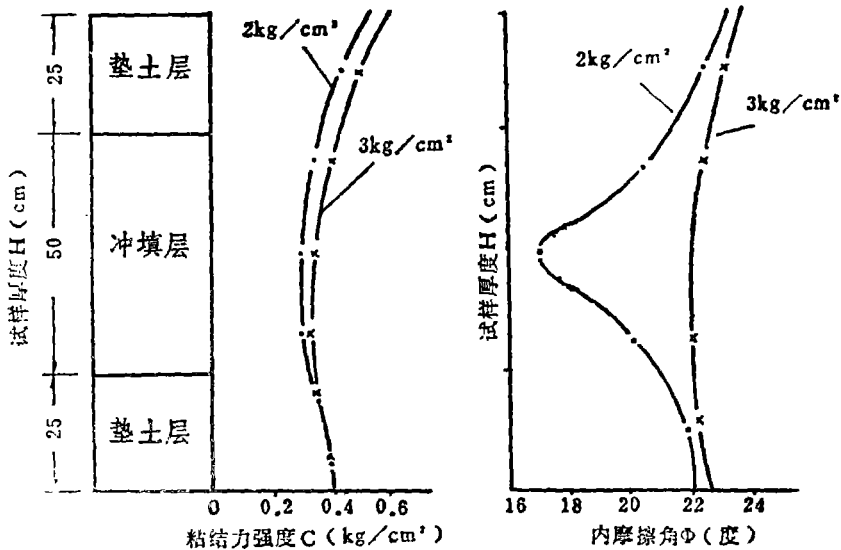


图4 固结两昼夜后抗剪强度指标的变化

同时，试验中发现，当垂直压力较小时 ($P = 1 \text{ kg/cm}^2$)，冲填体内孔隙水压力消散较慢，其孔压消散速率约为0.012；而当垂直压力增大时 ($P = 2 \text{ kg/cm}^2$)，冲填体中孔隙压力消散增快，其孔压消散速率约为0.039，是前三者的三倍多（如图5）。

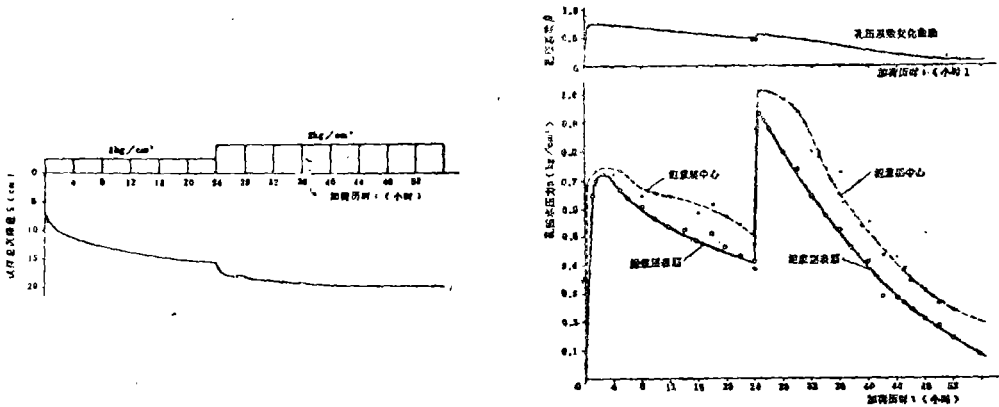


图5 不同荷载下冲填层的变形、孔压系数及孔压的变化过程线

这就说明在不同垂直压力作用下，冲填体的固结系数不尽相同。为了探讨冲填体固结系数的变化规律，作者用页沟层泥层土水坠坝的冲填层泥浆在双联固结仪上进行了各种压力下的单向渗透固结试验，试验结果见表2。从而发现冲填体固结系数的变化与垂直压力之间存在着一定的关系（如图6所示）。

从图6可以看出，当垂直压力小于 2 kg/cm^2 时，冲填层泥浆的固结系数随着垂直压力的增大而相应增大；当垂直压力大于 2 kg/cm^2 时，冲填层泥浆的固结系数随看垂

表2 冲填层在各种压力下的固结系数

垂直压力 P (kg/cm ²)	固 结 时 间 T (分)	稳定后含 水量 ω (%)	稳定后干 容重 γ_d (g/cm ³)	稳定后 孔隙比 e	压缩系数a (cm ² /kg)	固结系数 C _v (cm ² /sec)	试验 次数
0.5	60'	28.00	1.47	0.85	0.65	7.03×10^{-4}	1
1.0	36'	25.65	1.53	0.78	0.39	7.33×10^{-4}	6
1.5	100'	25.00	1.54	0.76	0.06	7.56×10^{-4}	1
2.0	36'	24.40	1.56	0.74	0.05	1.30×10^{-3}	6
3.0	36'	24.10	1.60	0.70	0.04	9.57×10^{-4}	2
4.0	36'	23.60	1.62	0.68	0.03	6.10×10^{-4}	2
5.0	36'	22.60	1.64	0.66	0.02	4.98×10^{-4}	2

注: 1. 试验冲填泥浆起始浓度为 $\omega = 43.5\%$ $\gamma = 1.788/\text{cm}^3$

2. 试验在双联固结仪上进行, 试样高 $h = 2\text{ cm}$, 模拟工地固结时间 $T = 15.625\text{ 天}$

3. 固结系数 C_v 均为时间平方根法求得 $V_t = 90\%$ 时的数值, 其中 $P = 1\text{ kg/cm}^2$ 和 $P = 2\text{ kg/cm}^2$ 值曾用时间对数法验算过。

直压力的增大而相应减小; 当垂直压力接近 2 kg/cm^2 时, 其固结系数最大。这说明冲填体的脱水固结在垂直压力接近于 2 kg/cm^2 时最快。分析其原因: 当垂直压力小于 2 kg/cm^2 时, 冲填体密度小, 孔隙比大, 随着垂直压力的增大而渗透水头增大, 渗透速率相应增大, 所以固结系数相应增大; 当垂直压力大于 2 kg/cm^2 时, 冲填体的固结度变大, 土体密度相应变大, 孔隙比变小, 相应的渗透系数变小, 随着垂直压力的增大, 虽然渗透水头也相应增大, 但固结速率相应变小, 而且越来越小, 因而固结系数相应的减小。这一规律也可以从图7中明显看出, 当垂直压力小于 2 kg/cm^2 时, 含水量和干容重变化都较快, 但当垂直压力大于 2 kg/cm^2 时, 含水量和干容重变化速率都变得较慢。

以上试验结果表明: 当冲填体上复土层自重压力为 2 kg/cm^2 左右时, 冲填体固结速率最快, 即冲填体内孔隙水压力消散最快, 有效应力强度增长最快; 当冲填体上复土层自重压力小于 1 kg/cm^2 或大于 3 kg/cm^2 时, 冲填体固结速率较慢, 特别是当上复土层自重压力大于 3 kg/cm^2 后, 冲填体的固结速率随着上复土层压力的增大而逐渐变慢, 冲填体内孔隙水压力相应增大, 对冲填体的稳定越为不利。因此就应降低施工速度, 给冲填体以充分的脱水固结时间。这就是说层泥层土水坠坝坝体填筑容重若以 1.66 T/m^3 计算时, 对于坝体10米高程处的冲填层, 当其上复土层压力小于 3 kg/cm^2 , 即厚度不超过18米(而总坝高不超过28米)时, 坝体各部位冲填层的脱水固结速率较快, 因而坝体较为安全。当总坝高超过28米后, 由于坝体10米高程处冲填体的脱水固结较慢, 因而应降

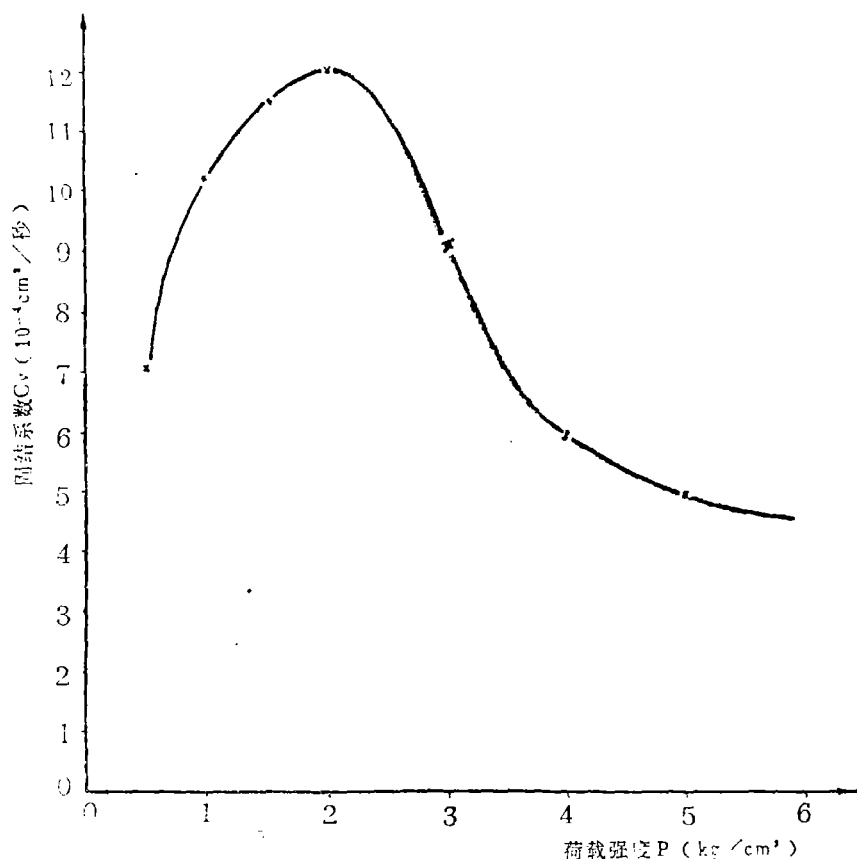


图6 冲填体固结系数与垂直压力的关系

低施工速度。特别是当总坝高超过34米，即坝体10米高程处冲填层的上复土层压力大于 $4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 时，该冲填层的固结系数就很小，孔隙压力消散很困难，所以更应谨慎。同时为了有利于坝体的脱水固结，在施工期最好不要在库内蓄水。

另外，从大型固结试验和页沟坝钻探取样试验结果分析，可以看出，冲填层和垫土层的强度与含水量有着明显的关系（如图8和图9所示）。

从图9可以看出，当冲填体固结含水量小于25%时，土体抗剪强度指标都较大。其总应力法强度指标 $\Phi \approx 12^\circ \sim 17^\circ$, $C = 0.25 \sim 0.40 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ；当含水量大于30%时，抗剪

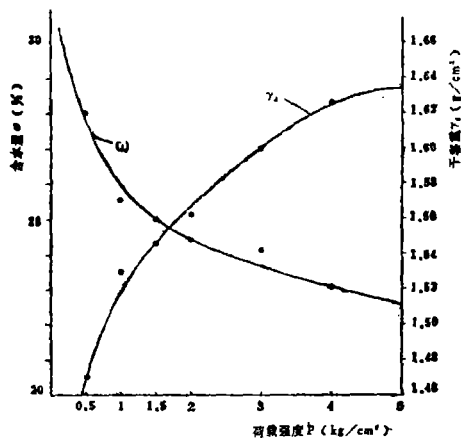


图7 冲填体含水量、干容重的变化与垂直压力的关系

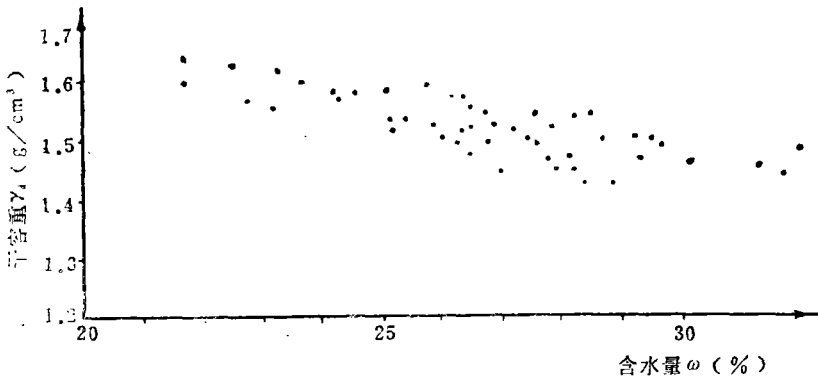


图8 冲填体固结干容重与含水量的关系

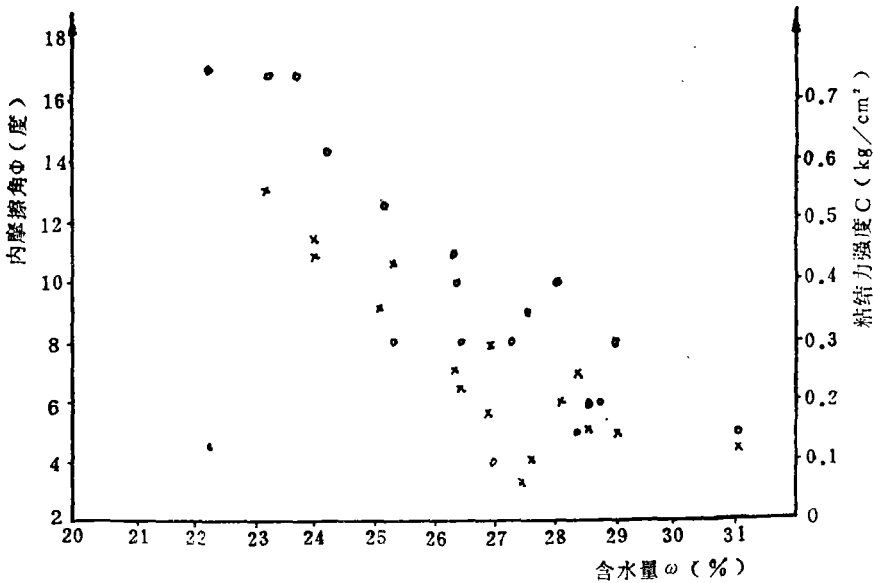


图9 抗剪强度指标与含水量相关图

图中点均为不固结快剪值

×—代表粘结力系数C值

○—代表内摩擦角Φ值

强度指标都很小，总应力法强度指标 $\Phi \approx 2^\circ \sim 4^\circ$ ， $C = 0.05 \sim 0.1 \text{ kg/cm}^2$ ；而当含水量在25~30%间时，其总应力法强度指标 $\Phi \approx 5^\circ \sim 12^\circ$ ， $C = 0.1 \sim 0.25 \text{ kg/cm}^2$ 。

五、工程实例

页沟坝设计坝高25米，坝坡在15米高程以下为1：3，在15米高程以上为1：2.5，

坝底宽144米,坝顶宽4米,边埂厚12米,考虑到重粉质壤土脱水困难,在坝体内焊接了九根竖直排水管,用水平管从下游边埂左侧坡脚伸向坝外,并在坝基下游设置了三条宽0.4米、深0.3米,长65米的横向平行排水沙沟。

筑坝土料比重为2.70~2.72,含粘量27~30%,以颗粒分类属于重粉质壤土或粉质粘土,流限含水量为30.7~32%,塑限含水量为19.4~20.7%,塑性指数界于10.9~12.5之间。

该坝于一九七九年十一月开工,八〇年三月下旬当坝高七米时,开始进行各项观测工作,八〇年十月份坝上游边坡十四米高度处出现鼓肚,当时采用贴坡处理,制止了鼓肚的发展,到八一年五月坝高达20米时,因劳力和经费等困难而停止,到八一年十一月九日重新施工,十一日当坝高达22米时,坝下游坡12米高程部位发生了滑坡,滑坡土方约八千余立方米,滑坡最大距离为110米。

其后,作者协同施工单位对滑坡部位进行了勘测和一系列的试验,并查阅了全部的施工记录和观测资料,分析了滑坡的原因:

1. 沟筑坝修建的两年过程中,恰逢当地丰水年份,两年降雨量共1518.5毫米,降雨天数共323天,降雨给坝体净增加含水量23%,而且降雨最多的八〇年秋季,连续降雨两个多月,正好施工在滑坡高程部位。致使这个部位始终含水量很大,形成很深的流态区。

2. 由于降雨多,土场天然含水量较大,一般为17~22%,而且由于难于搬运,群众垫土很薄,有时只有20厘米左右,相反地冲填层很厚,有时达1米以上,所以实际泥土厚度比为3~5,几乎成为纯冲填坝,实测流态区深度为8米,最大含水量为35%,抗剪强度指标 $\Phi = 0$, $C = 0.01 \text{ kg/cm}^2$ 。

3. 滑坡部位边埂宽度变窄,从施工记录查得只有8米,又因后来钻探取样时布设钻机平台挖去3米,所以有效宽度只有5米,而且由于坝体水分的渗透使边埂处于饱和状态,在滑出层并有胡须状渗流水逸出,实测滑坡前边埂的抗剪强度指标 $\Phi = 5^\circ \sim 10^\circ$, $C = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ 。

4. 滑坡前突击施工,连续二天日强度为1米。又有两台拖拉机和几十个人的压力和振动,致使这个部位产生过大位移。

5. 观测没有起到对坝的监督作用,以至于坝坡水平位移达50厘米时,还在继续施工,直到滑坡发生。

事后,用滑坡前的钻探取样试验指标推算坝体的安全系数,其下游边坡均小于1,最小的只有0.86,所以滑坡是必然的。

分析了滑坡的客观原因和主观因素,总结了经验教训,按照前述试验研究结果重新进行了设计,于八二年五月七日从原滑坡部位按层泥层土水坠坝进行施工,并严格地控制了各项技术指标。

实测土场天然含水量为17%,采用泥浆浓度为含水量 $\omega = 47\%$,泥土厚度比为1:1,边埂宽度为8米,边埂质量为履带拖拉机碾压三遍,其干容重 $\gamma_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$,边

坡由于前述滑坡的影响,下游实际坡比为1:4,施工日强度为0.21米,并加强了观测监督工作,到五月底共23天加高到21.5米高度,到达重新设计高程。实际平均加高5米,加高土方9370立方米,坝体未出现任何异常现象。

页沟坝总计坝体土方量为9万立方米,总投资为2539.85元,单价为0.38元/M³,比碾压坝经济的多,竣工后对坝体继续进行观测了半年,截止十月底,坝体未发生沉降和裂缝,十一月初对工程进行了全面验收,各项指标均符合标准,受到一致的肯定。

六、结束语

总的说来,层泥层土水坠坝的脱水固结机理是垫土层吸收或转移了冲填层的水分,促使了冲填体孔隙水压力的消散,加速了冲填体的脱水固结。同时增大了垫土层的含水量,促使了垫土层的压密变形。而且在水分转移的过程中,使黄土湿化崩解,天然结构被破坏,在上复土层压力作用下,形成新的密实结构。也就是说,一方面是垫土层加速了冲填层的脱水固结;而另一方面是冲填层促进了垫土层的压密变形。

因此,层泥层土水坠坝对加快冲填体的早期固结很有作用。但后期的固结仍然取决于土的力学性质,所以不能忽视围埂的作用。

另外,无论是从大型固结试验结果,还是坝体钻探取样试验资料都可看出,水量平衡过程中垫土层的强度指标始终大于冲填层的强度指标,对坝坡稳定很有利,显示了层泥层土水坠坝的优越性。同时,层泥层土水坠坝把黄土的湿陷性消灭于施工过程中,这就把黄土湿陷的不利因素变为施工的有利因素,避免了土坝运行期的湿陷、沉陷和裂缝。

所以,层泥层土水坠坝是结合中、重粉质壤土性质筑坝的较好方法,在中、重粉质壤土地区值得推广应用。

最后,必须指出,层泥层土水坠法筑坝仍是一种施工技术要求很严格的筑坝方法,必须严格控制其质量技术指标,才能保证质量,达到多快好省的效果。

参考资料与文献

- 1.《水坠坝》,(1980年),陕晋水坠坝试验研究组编。
- 2.层泥层土水坠坝孔压和排水效果的试验研究,刘祖典、张伯平《水坠坝科研成果汇编》1982、第4期。
- 3.The efficiency of Borizontall drainage layers for accelerating consolidation of clay embankment
By R. E. Gibson & G. C. shofford
Geotechnique No3 1968.
- 4.An assessment using three field studies of the theoretical concept of the efficiency of drainage layer in an embankment.
By G. C. sills. Geotechnique No4 1974.
- 5.Permeability and Consolidation of normally consolidated soils
By A. Mahinda Samarasinghe, Yang H. Huong, F. Asce, and vincent P. Drnevich, M. Asce
Journal of the geotechnical engineering division No. GT6 June,1982.

The Application of The Hydraulic Fill Dam Building Techniques In The Areas with Medium- Heavy-Fine Clay soils

Zhang Bai-ping

(Northwestern College of Agriculture)

Abstract

This paper deals with the mechanism of dewater consolidation, the law of strength increase and the rational technical index for construction of the hydraulic fill dam by interchanging horizon soils and slurry. The research is based on the tests with large-scale consolidation apparatus in the lab and the field actual observation. In addition, the changing law of loess consolidation coefficient was analyzed in this paper. A reasonable procedure of construction of this kind of dam with an appropriate height was also discussed in accordance with the law. In conclusion, an actual example was given to illustrate the above research.