

论 水 库 滑 坡

〔日〕中村浩之

(日本土木建设厅)

提 要

本文主要论述了一些水库滑块预测性勘测、稳定性分析和计算以及模型斜坡的渗透分析和稳定性计算的方法。根据这些方法和一些水库滑坡的实例,分析了水库滑坡产生的原因,并提出预测滑坡的工程措施。经过对水库滑坡的分析及其实测研究认为,浸水和库水位急剧降低和降雨,是水库滑坡形成的主要因素。

一、前 言

1963年,意大利互依昂(Vajont)水库滑坡,使2 600多人丧生。由于此教训,在日本防止水库库岸滑坡的措施,至今还在认真地进行着研究。

众所周知,水库引起的滑坡,包括蓄水初期水位上升引起的滑坡和水位骤降引起的滑坡。

琼斯(Jones)等调查了罗斯福(Roosevelt)湖附近地区1941~1953年发生的一些滑坡,那里分布着更新世的冰川沉积物。其结果是,49%的滑坡发生在1941~1942年的蓄水初期,30%发生在水位骤降10~20m的两种场合;其余的是发生在其他时间的小型滑坡。在日本,大约60%的水库滑坡发生在库水位骤降时期,其余的40%发生在水位上升时期,包括初期蓄水。

本文报导一些水库滑坡实况及分析,以及这些滑坡的预测性勘察和预防方法。

二、滑坡的预测性勘察

为了使有效的防治措施得以防止水库滑坡,滑坡的预测性勘察是很重要的。

为此,需要了解滑坡的地理位置,预测蓄水的影响等,必要时,还要分出需采取抗滑措施的斜坡。

滑坡分布的勘察,包括可应用的资料和文献的审查、检查特别标出的地点,如易滑地点或有滑坡危险的地点,由航片和地形图上初定的滑坡分布阶段的现场踏勘。据此勘察,准备了滑坡的地形分布图,并考虑到蓄水的影响和斜坡的社会经济作用,提出需要进一步勘测的地区。当对所有的斜坡进行详细的广泛勘测实际上不可能时,这项工作是非常重要的。

根据山坡的形式,将滑坡的地质特征分为四类,如凸脊型山坡,凸台型山坡,凹台型山坡和凹形平缓山坡(图1)。对凹形山坡滑坡的危险性,通过顺凹形中心线的导线上的勘探钻孔的地质分析相对是容易确定的,从而调查可以形成滑动面的地层的分布和建造,或在地面上设置地面倾斜仪,查出滑坡的潜在位移。

相反,确定凸形山坡滑坡的危险程度是很困难的。根据经验,一般认为凸形坡是稳定的,凸形坡中存在有很低稳定性的山坡是值得重视的。由于地面的高渗透性,这些山坡对正常引起滑坡

的雨或雪的作用是稳定的，而坝后蓄水、道路切割斜坡脚和地震诸因素，很可能引起滑坡。

由于斜坡下部被淹没和道路施工中开挖斜坡下部减小阻抗力，它们对斜坡的影响基本上是相同的。

在没有水库滑坡的许多情况下，将考虑道路施工中的滑坡，伴随道路施工的滑坡常常发生在凸坡上。那么，假定滑坡发生时斜坡的稳定系数为1.0，反算出开挖前斜坡的稳定系数如图2。图2a表示78个斜坡的检验结果，图2b是除几个特殊情况外，56个斜坡的检验结果。这表示初始天然地面的稳定系数小于1.2的占有可观的比率。

受蓄水影响的斜坡包括初始稳定系数低的斜坡，而如何认为它是软弱的，这样的软弱斜坡是一个问题。

现在来看一看发生在凸坡上的滑坡，它表现出在脊上出现一个鞍形，或与斜坡的松弛有很大

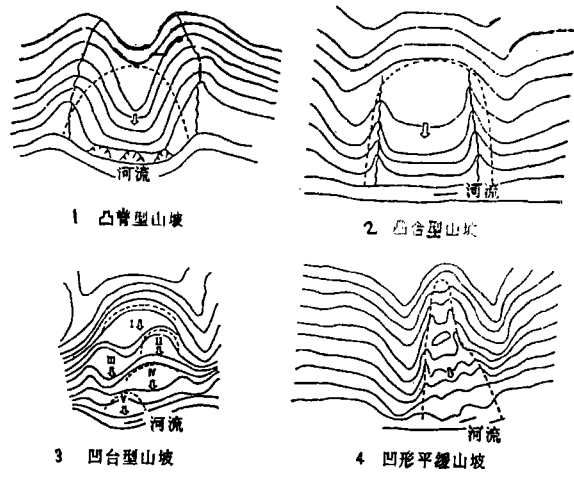


图1 滑坡斜坡的形式 (Watarai and Sakai 1975)

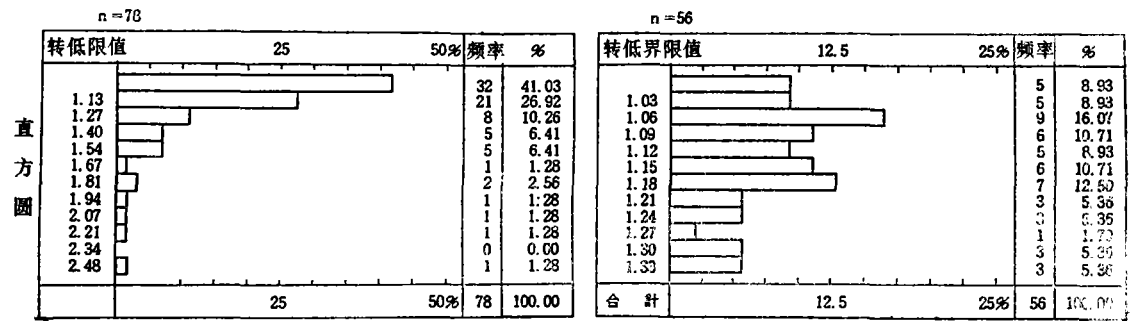


图2 初始天然斜坡的稳定系数 (高速公路勘察委员会)

关系。对这样的特征，考虑与斜坡内存在断层或破碎带或斜坡形成期间的蠕变密切相关。

通过钻孔确定每一斜坡的软弱层，同时定量评价斜坡的松弛，将有可能指出有滑坡危险的斜坡。

水库滑坡产生的特征可概括如下：

1. 崩积土滑坡，同破碎基岩一起沿层面或基岩面滑动。有很多崩积土沿基岩面滑动，要特别注意厚层崩积土覆盖在倾向坡上的情况。
2. 松散崩积土层或倾向临空的风化软岩构成的斜坡，在水位骤降时其稳定性可能被削弱。
3. 一般说来，近坝的斜坡库水位变动对它的稳定性影响更显著，滑坡的表现更急剧；而远离坝的斜坡，库水位变动对其稳定性的影响小一些，其移动将持续更长的时间。

水库滑坡易发生在地质构造和地形条件与自然滑坡相类似的地方，因此，有这样特征的地区要进行充分的调查。

对滑坡的预测性勘察提出的重要斜坡，用钻孔作地质勘探和滑动面勘测，用其它仪器观测滑坡的位移，并进行地下水观测，以便清楚地阐明斜坡的各个方面，为预防工程设计作必要的分析计算。

地质勘察主要为钻探，必要时进行挖探洞、探井或地震勘探。

在滑坡的位移观测中，滑动面的观测主要用测斜仪和管式应变计，而地面位移观测用倾斜仪和伸缩计。

在地下水勘察中，斜坡地下水位的观测是非常重要的，钻孔中的水位观测是不可缺少的，而且在必要时要进行地下水的勘探试验，渗透试验和抽水试验。

三、水库滑坡的分析

(一) 稳定性分析计算 斜坡的抗滑稳定性计算，一般用瑞典条分法（简化法）。一般说，这一方法适用圆弧滑动面，但在某些情况下也适用于非圆弧滑动面。

根据简化法，于稳定系数用下式表示：

$$F_s = \frac{\sum \{CL + (N - U)tg\Phi\}}{\sum T}$$

式中： F ——稳定系数； N ——作用在每一条块滑动面上的荷载的法向分量； T ——作用在每一条块滑动面上的荷载的切向分量； U ——作用在每一条块滑动面上的孔隙水压力；

Φ ——每一条块滑动面物质的内摩擦角； C ——每一条块滑动面物质的粘聚力； L ——每一块条滑动面的长度。

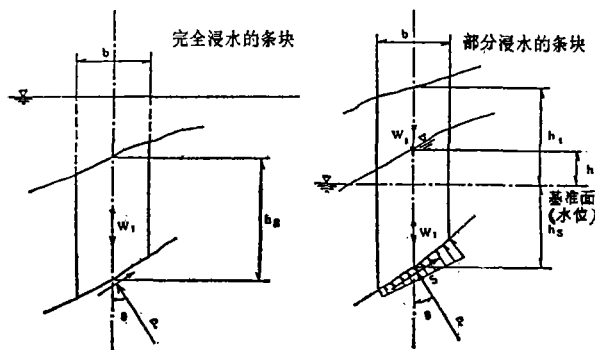


图3 条块的荷重

$$N = W \cos \theta = (W' + W_t) \cos \theta = r_{sub} h_s b \cos \theta + r_t h_t b \cos \theta$$

$$U = ul = r_w \cdot h \cdot b \cdot \sec \theta$$

$$T = W \sin \theta = (W' + W_t) \sin \theta = r_{sub} h_s b \sin \theta + r_t h_t b \sin \theta$$

式中： r_{sub} ——土的饱和容重； r_t ——土的湿容重； r_w ——水的容重。

该方法假定在基准水位以上为湿容重，其以下为饱和容重。对孔隙水压力，在基准水位以上为超孔隙水压。按此计算方法，图4所示滑坡的稳定系数是库水位的函数。

由于没有测定滑动面的强度，假定库水位为零时，斜坡的稳定系数为1.0，作为计算的条件（此时假定地下水位在图4中KLM线）， $\Phi = 28.5^\circ$ 是当 $c' = 1.0 \text{ tf/m}^2$ 时由 $c-\Phi$ 图上取得的，用这一强度参数计算出稳定系数，随库水位变化的变化值。

在计算中，假定水库水位上升时水渗入滑体达库水位一样的高度，从图4中可以看到，随库水位从零上升到超常水位（N）时，稳定系数的变化为 $J \rightarrow E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$ ，且水位在正常水

浸水条块上荷重的计算，有几种可用的方法（Watari）从理论上验证了这些方法。这里使用其中的一种，稳定系数计算的常规方法没有应用体现在简化公式中的水重。

在条块完全浸水的情况（图3a）：

$$N = W' \cos \theta = r_{sub} b \cos \theta$$

$$U = 0$$

$$T = W' \sin \theta = r_{sub} h_s b \sin \theta$$

在条块部分浸水的情况（图3b）：

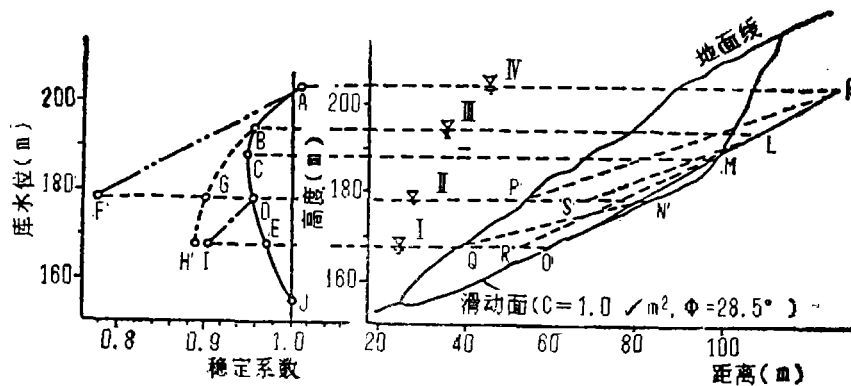


图4 斜坡的稳定系数随水库蓄水量的变化而改变的情况

位(Ⅲ)和限制水位(Ⅱ)之间时得最小值(0.95)。它指出了水位上升时产生的最危险水位。

那么,假如由于降雨在水位上升时滑体内的地下水增大,则斜坡的稳定性还将进一步降低。

下面检算一下库水位下降时斜坡的稳定性。要确定库水位骤降时在滑坡内保持着什么水压是个困难的问题,后面将讨论这个问题。这里用KP表示当水位从超常水位(Ⅳ)立即降至限制水位(Ⅱ)时的超孔隙水压力线,用限制水位PN线,滑动面和表示超孔隙水压的PK线形成的部分进行计算,得到此时的稳定系数为0.77,表示于F点。经过类似的计算,得到水位从正常水位骤降至限制水位,以及从限制水位降低至低水位时的稳定系数分别为0.89, 0.88和0.90。这些点在图4上由G、H和I表示。

在这种情况下,由于降雨滑坡内地下水增加等将进一步恶化斜坡的稳定性。

对一些模型斜坡进行了稳定性计算和计算结果的检验,其结果为:

1. 当滑动面的强度参数的粘聚力分量很小时,水库水位上升期存在一个斜坡稳定性很危险的水位。

2. 在库水位骤降期,由于滑体内的超孔隙水压力,稳定系数从水位上升期的同样位置还要进一步减小。如果在库水位降落时超孔隙压力消散了,那么稳定系数将和水位上升期相同水位时一样,消散的时间越长,稳定系数越小。

(二) 模型斜坡的渗透分析和稳定性计算 取库岸滑坡为对象,用差分法进行水位波动时的不稳定渗透分析,用简化法对水下斜坡进行了稳定性计算。模型斜坡用于分析和定量评价库水位升降期地下水的渗滤和保持情况,检验库水位波动对斜坡稳定性的影响。

这里取平均地面坡度为 40° 、滑体厚15m的模型斜坡A,和平均地面坡度为 30° 、滑体厚20m的模型斜坡B,假定渗透系数为已知,计算库水位升降时每一斜坡内渗入或保持的地下水位。

1. 水位上升的情况。图5表示当库水位以1 m/天的速率上升时,斜坡A和B内的地下水位随时间流逝的变化。虚线表示渗透系数 $K = 10^{-3} \text{ cm/s}$ 的情况,实线表示 $K = 10^{-4} \text{ cm/s}$ 的情况。从图5可以看出,随着库水位的上升,地下水从水库岸渗入斜坡的情况。但是在 $K = 10^{-4} \text{ cm/s}$ 的情况,斜坡A和B中地下水位的上升都滞后于库水位的上升,渗透以逐渐垂直上升的方式发生。对渗透系数 $K = 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、库水位上升速率为 $\Delta H = 1 \text{ m/天}$,在A和B两种情况,地下水位都不随库水位上升而变化,除去 $t = 10$ 天的计算,水力坡度是相反的。

图6表示库水位上升速率为 $\Delta H = 1 \text{ m/天}$ 、 2 m/天 和 3 m/天 ,渗透系数为 10^{-3} cm/s 的情况下,上升的最后阶段的地下水位。它表示在各斜坡内库水位的上升速率的变化超过1~3天的范

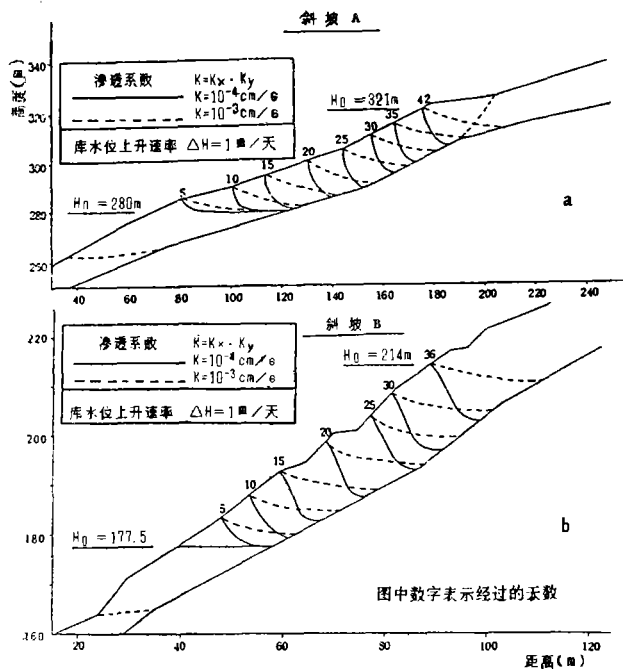


图5 随库水位上升地下水位的变化

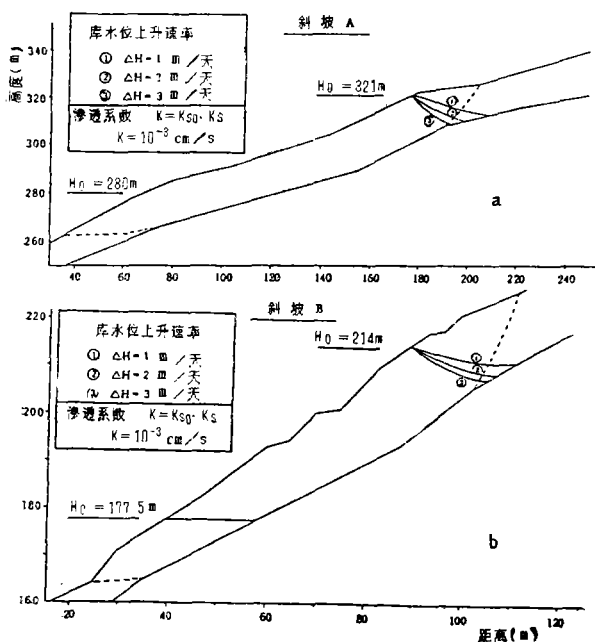


图6 上升最后阶段的地下水位

库水位降落速率与剩余率之间呈非线性关系，特别当 $\Delta H = 2$ m/天或以下时更明显， $K = 10^{-4}$ cm/s的剩余率与 $K = 10^{-3}$ cm/s时有很大差别。例如当 $\Delta H = 1.01$ m/天时，A斜坡的剩余率为55%~29%，B斜坡为42%~18%。根据这时的计算结果，当斜坡A和B的渗透系数在 10^{-4} cm/s和 10^{-3} cm/s之间时，若库水位降落速度是1 m/天以下时，则该斜坡的剩余率接近50%或更小。

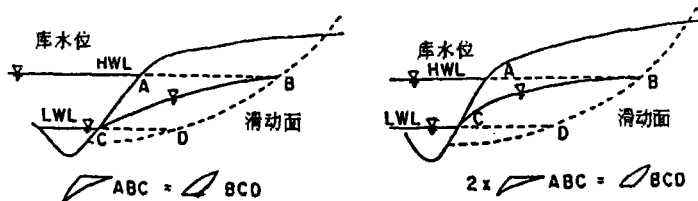
围，且在上升的最后阶段，地下水位没有大的变化。

2. 水位下降的情况。水库水位下降时滑坡内的超孔隙水压受滑坡的渗透系数、有效孔隙度和下降速率控制。正如报告所述，根据库水位下降时对滑坡体内地下水位的现场测量结果，Mesozoic（含片岩的晚更新世地层）的水下斜坡，此处滑坡体由含漂砾的崩积土组成，当以2 m/天的速率下降时，斜坡内的地下水位和粘性土滑坡或细粒崩积土的情况示于图7。

此处，用有效孔隙率固定在 $\beta\eta = 0.1$ 库水位变化速率 ΔH 在0.4~0.3 m/s之内，渗透系数 $K = 10^{-5}$ cm/s， 10^{-4} cm/s和 10^{-3} cm/s计算变化的地下水位。为了对比不同情况下保留在斜坡内的地下水量，获得降落情况下的地下水量与正常情况下（初始情况）地下水量的比率，并用剩余率（residual rate） μ （%）表示。即按图8获取剩余率。

图9表示模型斜坡A和B在 $\Delta H = 1$ m/s和 $K = 10^{-4}$ cm/s情况下各历时天数的地下水位。从图上可以看出，在斜坡A和B中，紧靠滑动面处地下水的降落是不明显的，其水面倾向水库。在最终降落段（最低水位），斜坡A和B内的剩余率分别是55%和42%，滑动面大约为20°的平缓斜坡A显示有较大的剩余率。

图10表示在不同渗透系数下，作为斜坡A和B的库水位降落速率函数的剩余率曲线。它表明，在A和B两种情况下，如果 $K = 10^{-5}$ cm/s以下，库水位的降落速率对剩余率几乎没有影响，剩余率较大，约为70%~75%。而如果渗透性好， $K = 10^{-3}$ cm/s，剩余率变化在百分之几到50%。



含漂砾的崩积土滑坡 细粒崩积土粘性土滑坡

图7 库水位降低和地下水位 (Wafari, 1977)

在水库滑坡防治措施的设计中, 估计正常水位的一半或50%为超孔隙压力的方法, 此时水位从正常水位降低到低水位, 然后对设计稳数定系的不足习惯上采用防护工程来弥补。相反, 若滑坡已发生了, 则根据经验, 取库水位降落速率为0.5~1.0 m/天, 同时观测坡滑的位移。这样考虑是合适的。图10的结果表明, 若渗透系数在 10^{-4} cm/s和 10^{-3} cm/s内, 保持库水位降落速率在1.01m/天以下, 使剩余率保持在50%以下, 因而支持基于经验的习惯方法。

其次, 对斜坡A和B进行稳定性分析。计算中, 对完全浸水的条块用饱和容重, 部分浸水者用饱和容重加湿容重, 如三(一)节所述, 仅当地下水位较基准水位(等于外部水位, 或地下水位即为基准水位)高时才估算孔隙水压力。对于计算, 假定斜坡A和B的初始地下水位 H_0 时的稳定系数为1.0, 斜坡A的 $C' = 1.8 \text{ tf/m}^2$, B的 $C' = 2.5 \text{ tf/m}^2$, 则得 $\phi' = 20.61^\circ$ 和 32.66° , 以此作强度参数。

图11表示库水位上升时, 作为库水位函数的稳定系数 F_s 的曲线, 其所依据的地下水位($K = 10^{-3}$ cm/s, $K = 10^{-4}$ cm/s, $\Delta H = 1 \text{ m/天}$)。根据这个结果, 可以看出, 在A和B两斜坡内, 当库水位上升时稳定系数仅降低5% (从 $F_s = 1.0$ 减到最小值 $F_s = 0.95$); 而当库水位降落时, 稳定系数减小约30% (到最小值0.66)。特别是当库水位降低时, 由于渗透系数的不同, 稳定系数的变化很大, 其值在0.2~0.22之间。对比渗透系数, 当 $K = 10^{-4}$ cm/s时, 最小的稳定系数在库水位上升和下降两种情况下都比较小。这是因为, 当库水位上升时, 水下斜坡渗透性较小, 在滑动方向上的下滑力没有相应减小; 而当库水位下降时, 小渗透系数使库水位和地下水位间有较大的差距, 因而增大了孔隙水压。所以, 斜坡的渗透性越大, 库水位和地下水位之间的差距越小, 库水位上升和降落在同一水位时的稳定系数彼此接近, 在同一库水位下, 地下水的渗入和排出, 库水位的升和降, 稳定系数没有差别。

图12表示斜坡A和B在库水位下降速率为 $\Delta H = 0.5 \sim 3.0 \text{ m/天}$ 、渗透系数为 10^{-3} cm/s时作为库水位函数的稳定系数曲线。它表明, 当库水位降落速率超过前述的变化范围时, 稳定系数变

图8 剩余率的计算

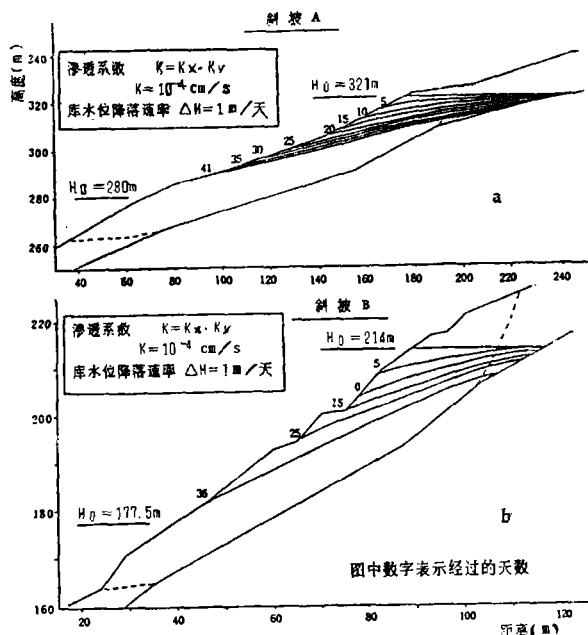


图9 库水位降落时地下水位的变化

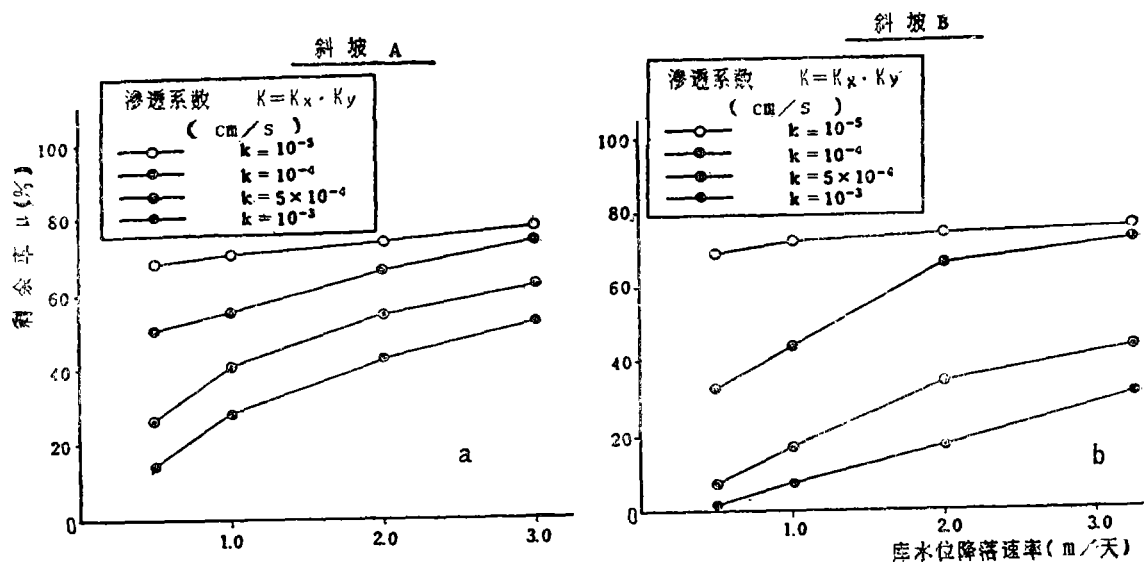


图10 库水位降落速率和剩余率的关系

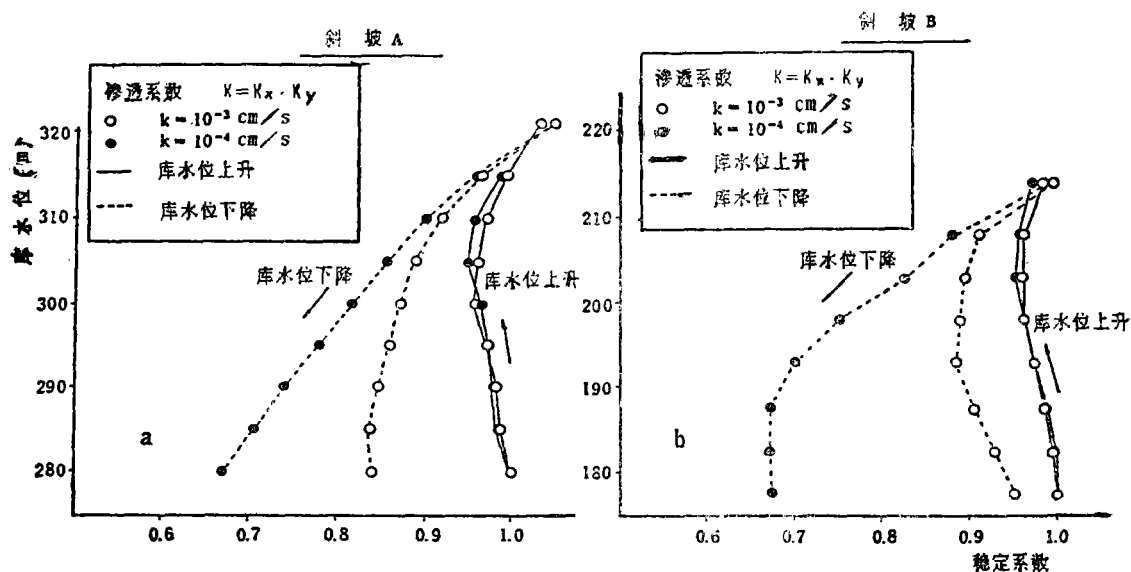


图11 库水位升降与稳定系数的关系

化在0.9~0.25间。同样，图12b表明随库水位降落速率而变的稳定系数不常是在最低水位时为最小，而是水位降落期间为最小，它出现在库水位降落速率较大的低水位时。

图13表示图12的结果或每一降落速率下稳定系数随时间变化的关系。可以看出，当库水位降落速率超过3 m/天时，稳定系数在很短时间内急剧减小，而当降落速率变小时，稳定系数的减小是逐渐下降的。例如，在斜坡A中，在 $\Delta H = 0.5$ m/天的情况下，稳定系数在第40天以后是个定值，斜坡B中反而增大。

根据上述，将可以看出，库水位降落时稳定系数的减小比其上升时更大（最小的稳定系数在上升时为 $F_s = 0.95$ ，而下降时 $F_s = 0.66$ ），而且库水位降落时的降落速率，视斜坡的渗透系数也是稳定系数的一个重要控制因素。这强调指出尽可能减小降落速率或在降落期间万一发生滑坡

时保持库水位在一恒定值的重要性。

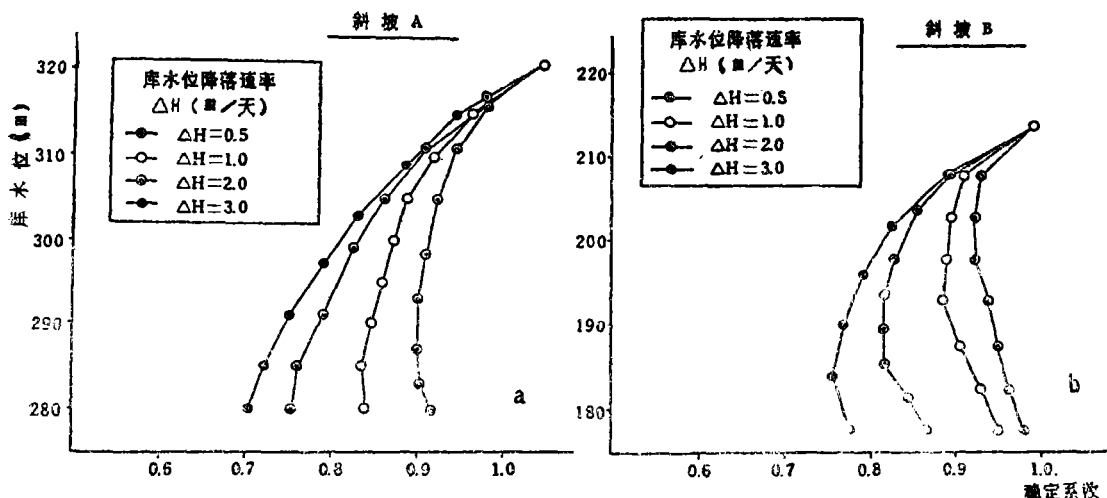


图12 库水位降落时稳定系数的变化

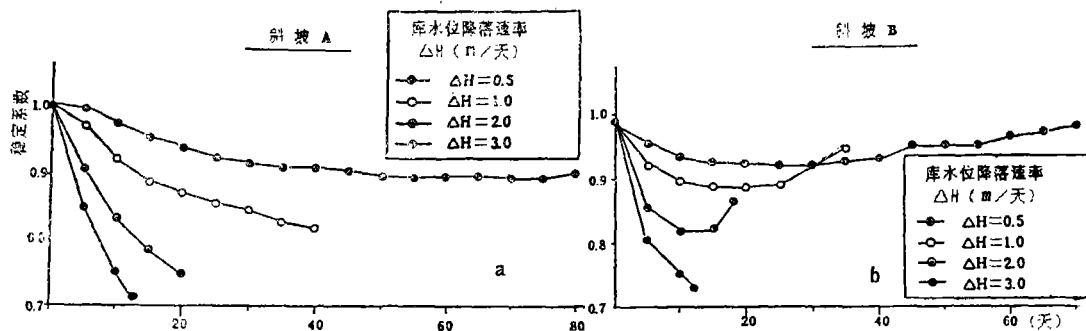


图13 稳定系数随时间的变化

四、水库滑坡实例

(一) 库水位上升时发生的滑坡 互依昂滑坡在1960年初次蓄水,当水位达到652m高程时,首先出现一个小崩塌,同时在上部平台上发生裂缝。因此接着降低水位,为防止滑坡进行了各种调查和测量。1963年第二次蓄水时,从正常水位下降之后,2.4亿 m^3 的滑体突然滑入水库,如图14所示,溢出的水流袭击了与派亚维 (Piave) 河汇合处的朗埃加罗 (Longarone) 镇,造成大量人员死亡。库水位、滑坡位移和斜坡的稳定系数曲线示于图14。

从图中可以看出,位移随库水位而变化,水位上升时位移加速,水位下降时位移减速甚至停止。大约在600m 水位高程时是一个蠕变位移的临界点,超过上述水位时开始蠕变位移。那么,假定灾难性的崩塌发生在大约710m水位,由反算法估算的滑动面抗剪强度 参数是 $C' = 0$, $\Phi' = 24.07^\circ$ 。根据分析报告,这些数值可以说是合适的。根据这些强度参数进行分析,获得图15所示的断面水位高程和稳定系数之间的关系。假定滑体内的水位与库水位相同,据此计算,估算在零水位时斜坡的稳定系数是1.08,随着水位上升稳定系数接近于1.00,导致了1963年10月9日发生灾害。图14的水位和稳定系数的关系就是根据这一计算的结果。

某坝开始蓄水,当上升的水位大约为75m时 (高水位是86m), 水库左岸的道路 (由挖方和

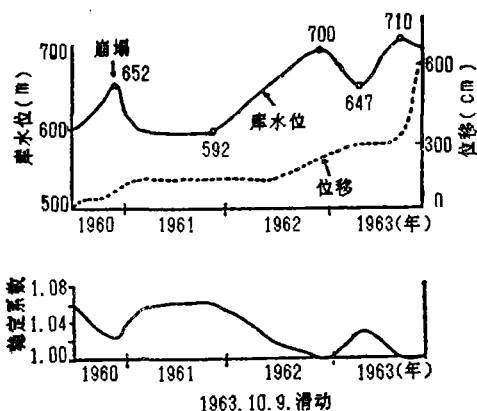


图14 瓦依昂滑坡的库水位变化

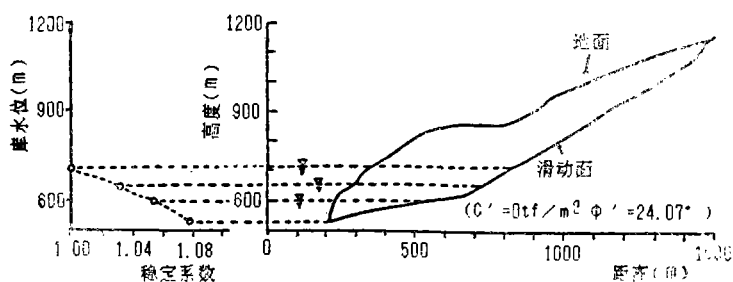


图15 瓦依昂水库水位与斜坡稳定系数的关系

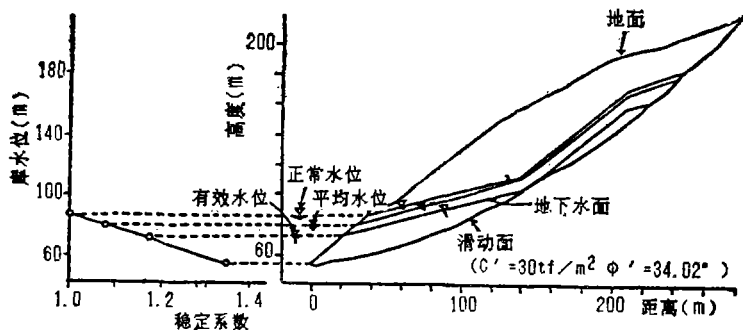


图16 某斜坡的库水位与斜坡稳定系数

库水位以 1 m/天的速率从 188.5m 高程上升到 204.0m。当库水位上升时，大约在 198m 高程时，倾斜仪开始显示变动，204.0m 高程时斜坡出现裂缝。当水库周围其它斜坡上也发现裂缝时，显示有滑坡的可能，水位不再上升。如图 18 所示，在库水位降落时也记录了倾斜仪的变化。从 1985 年 6 月 29 日到 8 月 31 日库水位保持不变，在此期间，降雨时记录了倾斜仪的变动。8 月 27 日和 9 月 25 日有第 13 号和第 19 号台风暴雨，那时，由于控制库水位在低水位上波动，所以没有记录到可看得见的倾斜变动。根据倾斜仪的测量结果，发现库水位上升和降落以及因降雨，倾斜有变化，此时斜坡的稳定性降低。可以认为，造成斜坡失稳的因素是库水位降落时坡体内的超孔隙水压或降雨时坡体内地下水位的升高。

填方形成) 崩塌约 60m，而顶部平台上有超过 10ha 的地面产生裂缝，直到降低了库水位，滑坡位移才逐渐停止。

因库水位上升而减小稳定系数示于图 16。假定滑坡发生在 75m 库水位，由反算得 $C = 3.0 \text{ tf/m}^2$ $\Phi = 34.02^\circ$ ，表示出改变水位与稳定系数间的关系。根据计算结果，估计零水位时的稳定系数为 1.31。那么，很可能是由于地下水位随库水位变化，在 75m 水位时，斜坡的稳定系数急剧降低到 1.00，从而引起了滑坡。

图 17 表示库岸斜坡内滑动面的强度与库水位上升时斜坡的稳定系数间的关系，假定蓄水前，斜坡的稳定系数为 1.00，滑动面的强度是在稳定系数为 1.0 时假定粘聚力 C 值而确定内摩擦角 ϕ ，因为要清楚地估算滑动面的强度是困难的。图上的曲线①~⑦是在不同的 C' 和 Φ' 组合下，随库水位上升而变化的稳定系数。该计算是在假定坡内饱水线与库水位线保持一样的条件下进行的。

斜坡由强风化的板岩和辉绿凝灰岩互层组成，滑体主要为风化岩。考虑到蓄水前的勘测结果，斜坡的稳定性不佳，而在斜坡上部设置了水准管式倾斜仪以监测位移。用这种倾斜仪，很小的倾斜变位也能测出。倾斜仪的位置如图 17 所示。图 18 表示库水位变化与日倾斜位移和日降雨量的关系。

取图17的资料可以了解库水位上升时斜坡的不稳定性。由于没有测试不知道滑动面的强度,如果取 $C' = 1.0 \text{ t/m}^2$, $\Phi' = 28.5^\circ$ (曲线②) 在水位为198m时,稳定系数降到最小值,尔后随水位的上升又增大。虽然不能明确地说,已考虑了简化法的精度和滑动面的强度,但考虑了水位的升高,倾斜仪的变动和斜坡的稳定性

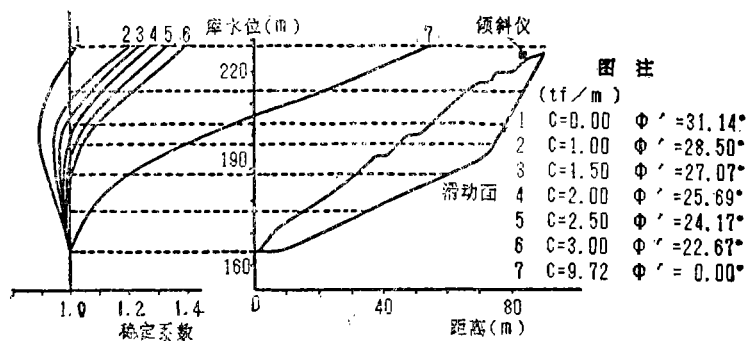


图17 滑动面强度和随库水位上升斜坡稳定系数的变化

彼此密切相关,在其它水库,用倾斜仪检查斜坡的稳定性,也记录了许多倾斜仪变动的观测实际资料,表明随库水位变化斜坡变为不稳定。

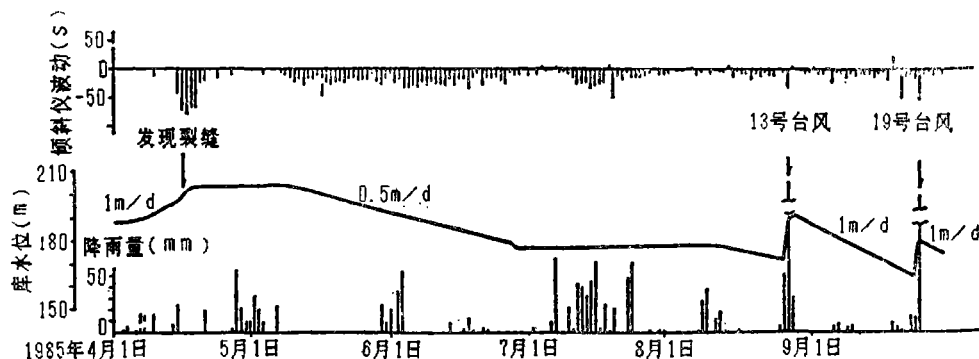


图18 库水位,倾斜仪变动和降雨量间的关系

位于水库上游1.5km处右岸的一个滑坡,其发生时库水面宽220m,水深50~70m,滑坡体沿砂岩和板岩的接触层面倾向滑动,滑过作为滑动面的破碎板岩。

对于水库滑坡,常常需要考虑滑体的滑动速度和在水库中产生的波浪高度,通过模型试验和数值分析讨论了这些问题。

(二) 水位降落时产生的滑坡 坝A,当水位从第二正常水位降落时,顺坝的道路产生了裂缝。位移随水位降落(降速为104mm/月)而活动,随水位上升而停止。重复这一过程,位移逐渐变小到停止。

坝B,为维修工程以2m/天的速率降低库水位,此时产生了滑坡。

坝C,先以平均2m/天的速率降低水位,在几个地方产生了滑坡。

由此可见,仅在水库水位降落时产生的水库滑坡,认为是由于斜坡内的超孔隙水压引起的。

因此,在可能产生滑坡的库岸,要加强水库管理,尽可能避免急剧降低水位,保持最大降落速率为2m/天左右是适宜的,尽管按渗流计算可以确定安全的降落速率。对即将发生滑坡的库岸,规定降落速率为0.5~1.0m/天是合适的。如有可能,为防止岸坡破坏,应观测滑坡的位移。

(三) 渗透试验和随水位变动的滑坡分析 把饱和—非饱和渗透分析用于渗透试验的结果,来设计模型滑坡的库水位的升降,并根据水面以上斜坡的高度和滑动面上的超孔隙压力确定斜坡的稳定性。

试验用的滑坡装置是长150cm、深80cm、宽80cm的土槽和长20cm、深80cm、宽20cm的水槽。在土槽内用半径100cm、宽80cm的钢皮作成弧形的滑动面，如图19所示。发现饱和—非饱和渗透分析的结果与试验结果及用此结果所作的分析相一致；稳定系数减到最小值的危险水位出现在水位上升和下降时，特别是仅当坡脚部分浸水、库水位上升时引起滑坡。

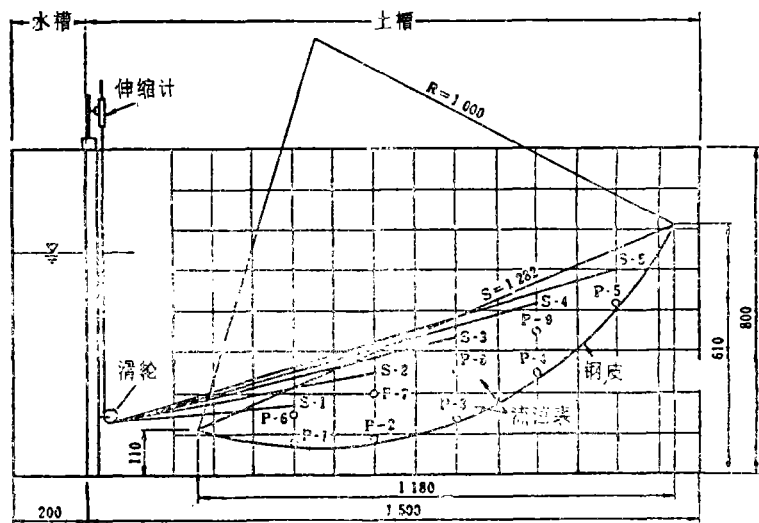


图19 试验装置

五、水库滑坡的原因

上面叙述了水库滑坡分析的结果及其实例研究，下述两个主要原因是应该考虑的：

1. **由于浸水，斜坡稳定性改变** 斜坡浸水，水位上升时滑动面上有效应力减小或浮力减小抗剪阻力，以致减小了斜坡下部的阻力，但水面以上的岩体或土体的荷重没有变化。整个斜坡的稳定性减小而引起滑坡。

2. **库水位急剧降低时，由于斜坡内超孔隙水压力的作用，斜坡变得不稳定** 渗透系数为 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ 的斜坡，是容易产生超孔隙水压力的，在此情况下常常引起库岸斜坡的大面积移动。这不仅是由于滑动面上抗剪强度的减小（因超孔隙水压力），而且由于斜坡趾部的坍塌。

除库水位变化外，因降雨增加了斜坡内的地下水加速了斜坡的不稳定。降雨使斜坡内的超孔隙水压（浮力）增大，不仅在库水位下降时，而且在库水位上升时也是促使滑坡的一个因素。

在任何情况下，库水位以上斜坡内的孔隙水压都是使斜坡稳定性减小的一个因素。

伴随蓄水，水荷重使斜坡物质的物理性质改变，使天然地面破坏等，作为库岸滑坡的原因已有报告。这些将不得不进一步去检验。

六、滑坡的预防工程

滑坡的防治工程一般分为控制工程(Control Works)和抗滑工程(Restraint Works)。控制工程在于控制地下水和其它引起滑坡的因素以停止滑坡的移动。设计抗滑工程在于用抗滑结构物从物理上阻止滑坡，从而部分地或整体上阻止滑坡转动。滑坡的防治工程概括如图20。

在水库滑坡的情况，斜坡部分浸水，对天然滑坡（因降雨或融雪引起的）很少采用控制工程为主的方法，而主要采用抗滑工程措施，且在蓄水开始以前完成该工程，因此，它们必须在较治理天然发生的滑坡短的期限内进行。同时考虑到保护库岸目标的重要性，为保安全正常采取预防工程。以下叙述几项主要的工程。

锚索工程，是把高强度的钢材放入相对小的钻孔中作抗拉材料，以阻止滑坡的一种方法。锚索工程的作用，是通过预应力增加滑动面上的垂直应力来增大抗剪阻力，由钢材的抗拉强度来减小滑动力。为预防滑坡，在设计上主要考虑其后期作用。随着滑坡的移动，锚索工程逐渐显示出

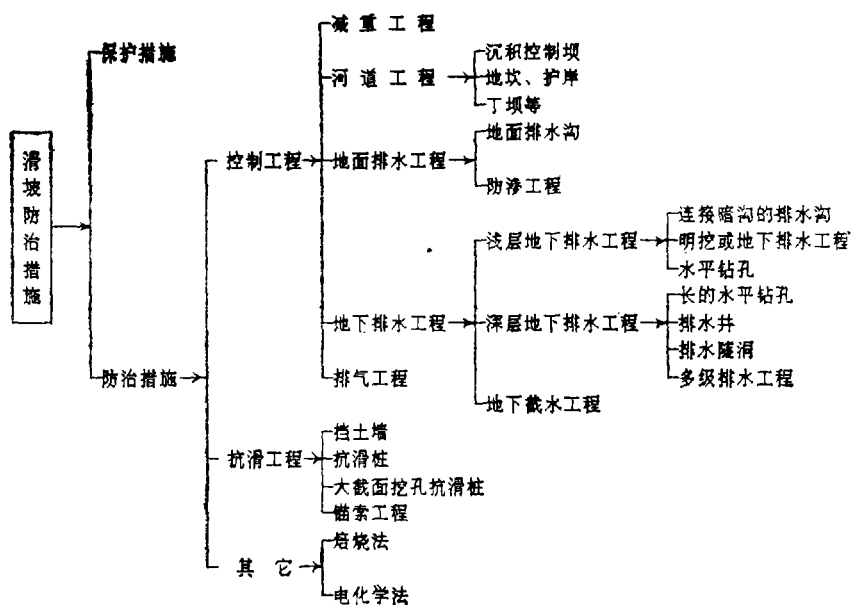


图20 滑坡的防治工程概括匡图

抗力，具有较大的抗滑效果。初期阶段给以预应力，显示其对滑坡的阻止作用。它常被用作预防库岸滑坡的一种措施。这种方法自其开始应用以来，时间还不长，在设计和施工中还有一些问题，但作为一种预防措施，它将更广泛地被应用。

抗滑桩工程是在大直径的钻孔（直径35~60cm）中在活动层和基岩间插入抗滑桩产生桩头作用来阻止滑坡的一种方法。用此工程的一个原则，是放在滑坡的下部，使桩的抗滑作用充分显示出来。桩下侧的土体不能任意移动，使之具有充分的阻力。

在含有硬的漂砾的地层或很硬的地层（如含有砾石）中，大直径的钻孔不能实施，可用在开挖的直径1.5~5.0m的竖井中浇灌钢筋混凝土的大截面挖孔抗滑桩。这种工程比插入桩工程有抵抗更大滑坡推力的能力，但工作进行中必须特别注意安全。用开挖坝基剩余的土体作加荷填堤工程，是有效而明确的一种方法。它有一个设在滑坡趾部的挡土墙（通常用框架、石筐和铅丝笼等），在其上加土重以稳定整个滑坡。减重是抑制工程的有效方法之一，通常用于防止小型坡滑。确定勘探滑坡的范围和滑动面的准确位置，经过计算，确定保安全所需的减重数量。地下排水工程是典型的控制工程，限于用在库水位以上斜坡地下水的排除。

七、坝完成后滑坡的观测及必要的措施

坝完成之后的滑坡观测，粗略分为试验蓄水期的观测和以后的观测。

蓄水时进行的观测，进行蓄水时可能引起滑坡斜坡上的防治工程效果的评价，通过观测了解斜坡内地下水位随库水位变化而变化的情况，斜坡的稳定性和外形的变化，同时也观测没有防治工程的斜坡的变化情况。

蓄水后滑坡的观测，是检验斜坡及防治工程的长期变化情况，看它们的作用是否合适并显示其长期有效性。

（下转第35页）

Application of the Central Link Formulae of Man—land Relationship in Land Use to Analyse for Population Growth and Food Production of Guyan County

Ju Ren

(Northwest Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Conservancy)

Guo Fu-guo

(Agricultural Station of Sci-tech Committee, Guyuan County)

Abstract

The population growth reaches one hundred million in the world and twenty million in China every year. The prospect of mankind is closely together with food production and so is the arable land change. How to tackle the relationship of population-food-arable land should be an important problem in face of the world. This paper applying the central link formulae and gray system in population-food-arable land relationship does an analysis of population growth and food production of Guyuan County for 9 years in the past and 12 years in the future referring to some countries in the world, and it was done under different rates controlling population growth. The conclusion is that if it is going on as the current rates of population growth and food production to the end of the century, the food shortage for Guyuan County will be very serious, and it is only controlling population growth strictly, and increasing agricultural input energetically the state in the future may be better.

(上接第64页)

在锚索工程中设置荷重传感器测量荷载的变化,观测防治工程是否有效地工作。或测量桩的应变或弯曲,看应力和挠度是否在抗滑桩设计时确定的范围内。应注意滑坡防治设施产生的初期预计荷载或变形引起周围天然地面的变化,以便实施附加的防治工程。

滑坡的变化情况和地下水的观测与正常进行的观测是相同的,同时用仪器对滑坡和结构物的变化进行定期和连续的观测。

用于地面变化观测的倾斜仪和伸缩计,通常有既定的控制值,用仪器测得的数值规划抗滑措施。为估定此控制值,收集和分析数字观测资料,现在有可能在认可的精度上预报滑坡位移。总的说来,为预测滑坡裂缝产生之前的位移,用倾斜仪进行观测;预测裂缝产生后的位移,用伸缩计观测。此外,由于有大量钻孔水位随库水位变化而变化的可用资料,现在有可能定量评价斜坡内水的补给和排泄。

在这一方面,对滑坡随库水位的变动已进行了很仔细的监测,但是为进行各种观测需要大量人力。因此,已开发了能精确地、灵敏地和高效地进行观测的仪器系列,使得有可能进行固定的观测,包括有雪地区的观测和分析,以及对大量滑坡远距离的同时观测。

(王恭先译,刘光代校)