

14 水库的工程地质研究

水库蓄水后，水文条件发生变化，水位上升、水深增大、流速减慢，库区及邻近地区的地质环境受到影响。可能的工程地质问题：水库渗漏、库岸稳定、水库浸没、水库淤积、水库诱发地震等。

14.1 水库渗漏

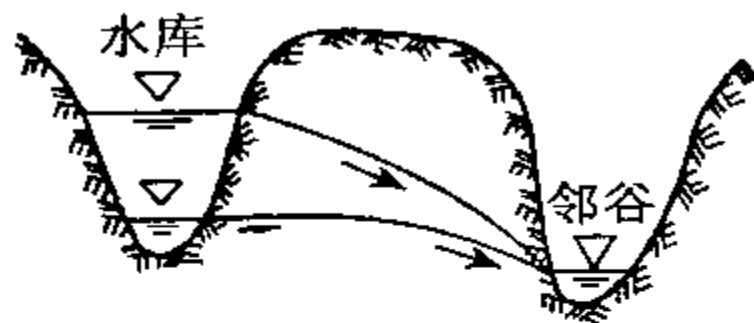
❖ 渗漏方式：暂时性渗漏，永久性渗漏。

（1）暂时性渗漏

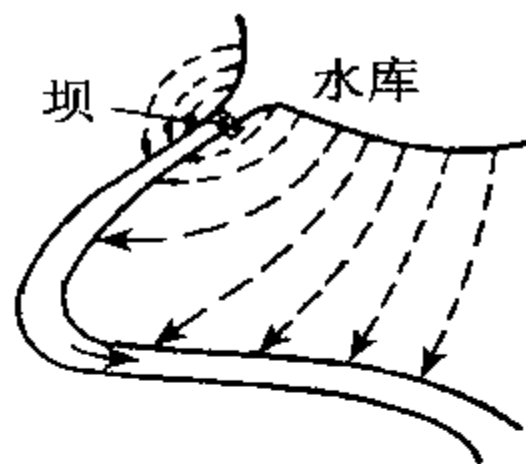
- ❖ 水库蓄水初期，由于库水位逐渐抬高，因湿润、饱和和库水位以下岩土层的孔隙、裂隙和空洞，导致库水量损失。但库水不漏出库外，因此，水量损失是暂时的。

（2）永久性渗漏

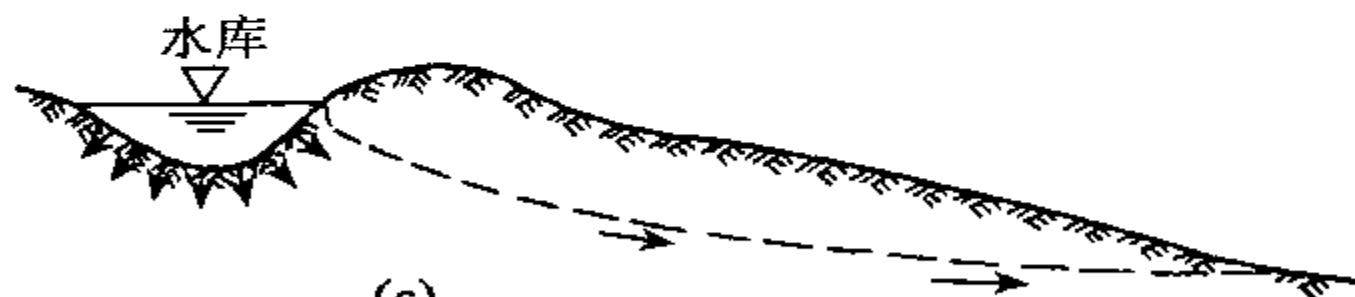
- ❖ 指水库蓄水后，库水通过库岸或库盆底部的岩土体中的孔隙、裂隙、断层及溶隙、溶洞等渗漏通道，向库外邻谷、低地或远处低洼排水区不断渗水。
- ❖ 永久性渗漏，大多沿下列部位发生：
 - （1）通过库岸分水岭向邻谷或低地渗漏；
 - （2）坝下游河道是弯道，库水通过库岸向下游河道渗漏；库水通过库底向远处低洼排泄区渗漏。



(a)



(b)



(c)

库区三种永久性渗漏示意图

(a) 邻谷渗漏 (b) 河弯处绕坝渗漏 (c) 向远处低地渗漏

❖ 渗漏通道的地质条件分析：

（1）岩性条件；（2）地形地貌条件；（3）地质构造条件；（4）水文地质条件。

水库发生渗漏的条件主要有三个：

- ❖ 构成库盆的岩体是透水的，如果水库坐落在粘土岩地区，或库盆被厚层粘土所覆盖，这种水库基本上是不漏水的；
- ❖ 库外存在有比库水位低的排泄区；
- ❖ 库水位高于库岸的地下水位，库水才能向库外渗漏。

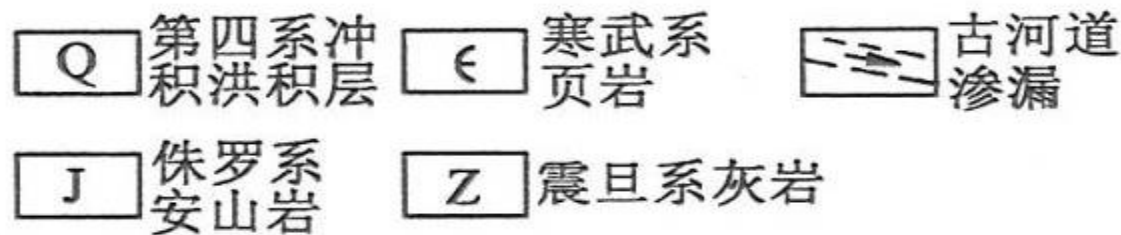
由此可见，水库渗漏的发生主要与岩性和地质构造、地形及水文地质条件有关。具备上述三个条件的水库，就可能发生渗漏。

(1) 岩性条件：有透水岩层存在，如第四纪松散沉积层、裂隙基岩；

基岩一般比较坚硬致密，孔隙率小。库水如果要通过基岩发生渗漏，主要取决于各种裂隙和溶洞的存在情况，以及沉积岩的层面充填情况。

在第四纪的松散沉积层中，对水库渗漏有重大意义的是未经胶结的砂砾(卵)石层，这些砂砾石、砾石、卵石层空隙大、透水性强，如果库区存在这些强透水层并沟通库区内外，就可以成为水库渗漏的通道。

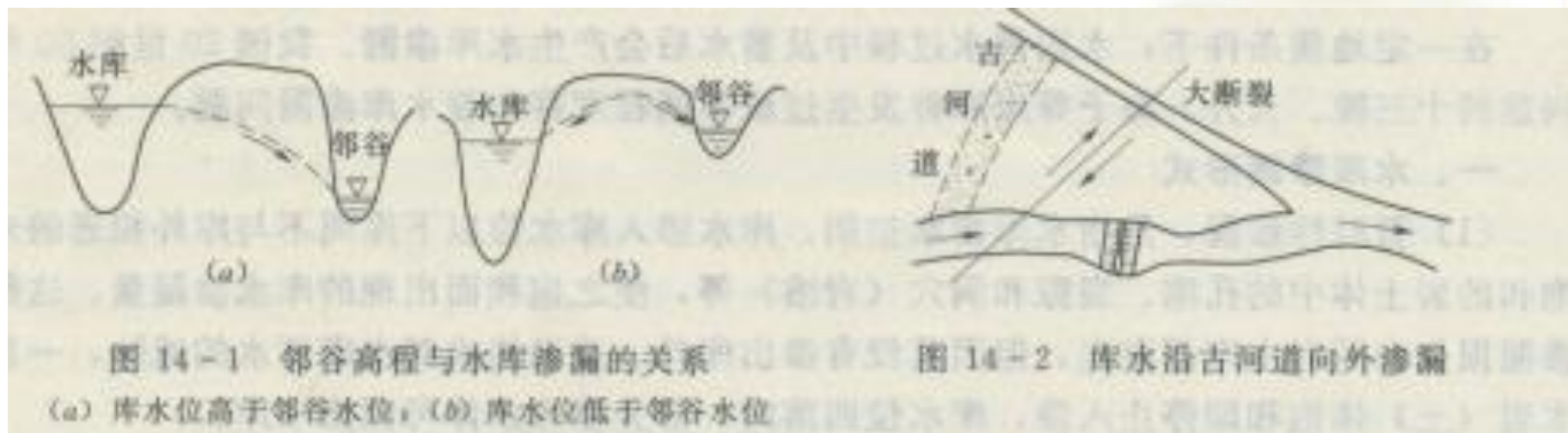
水库渗漏水
通道有两条
一条是大宫
门古河道 另
一条是坝下
地基处理层
(砂土层)



十三陵水库右岸古河道水库示意图

(2) 地形地貌条件:

- ❖ 分水岭单薄、邻谷切割深度深。
- ❖ 平原河流建库：如位于曲流段或现代河床一侧的古河道通向库外或坝下游河道时，会构成库水渗漏通道。



❖ 当有强渗透性岩土体分布时，要特别注意下列地形地貌部位的水库渗漏问题：

河湾地段的水库；

地表分水岭单薄的水库；

大坝位于与支流或干流或深切河谷汇口处不远的水库；

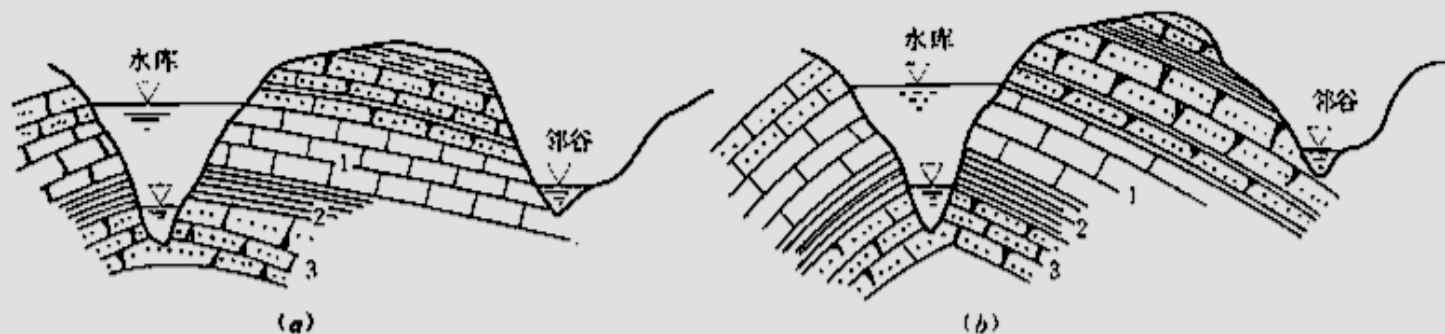
建于岩溶化高原或坡立谷和岩溶洼地上的水库；

悬河水库；

与相邻河谷谷底高差悬殊的水库。

(3) 地质构造条件

- ❖ 纵向河谷地段：向斜部位、单斜构造、背斜部位；一是背斜和向斜核部伴生的节理密集带或层间剪切带可能成为渗漏的通道；另一方面主要由透水层与隔水层相互配合和产状情况来决定。
- ❖ 横向河谷地段：发生渗漏的必要条件：渗漏通道一端出露于库区库水位以下，并穿过分水岭与邻谷相通，在邻谷低于库水位的高程出露，则易渗漏。
- ❖ 有断层通过的河谷地段：未胶结的大断层横穿分水岭或隔水层被断层切断，使水库失去封闭条件，不同透水层联通，成为渗漏通道。有些则由于断层效应，起隔水作用。



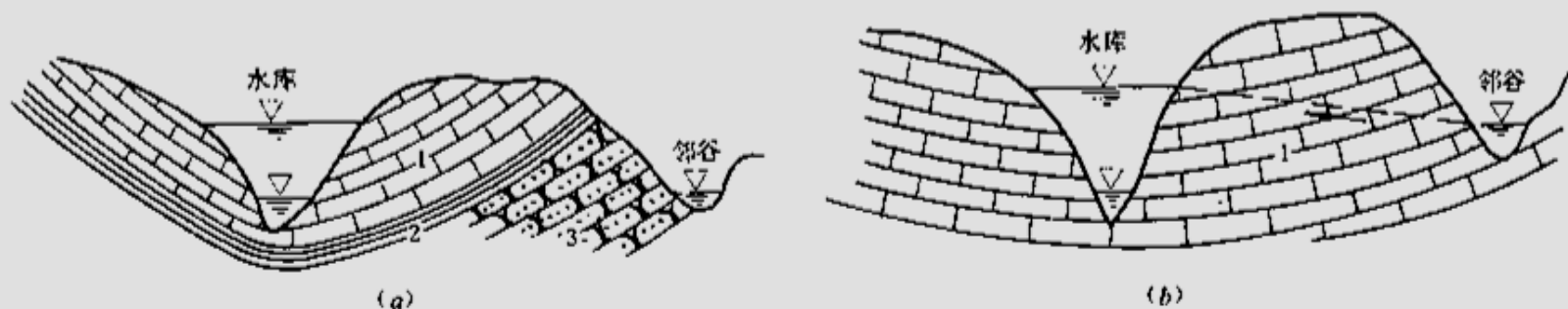
背斜构造与水库渗漏

(a) 透水岩层倾角较小，且被邻谷切割出露，可能导致库水向邻谷的渗漏；

(b) 透水岩层倾角较大，未在邻谷中出露，不会导致库水向邻谷的渗漏

1—透水石灰岩；2—隔水页岩；

3—透水性小的砂岩



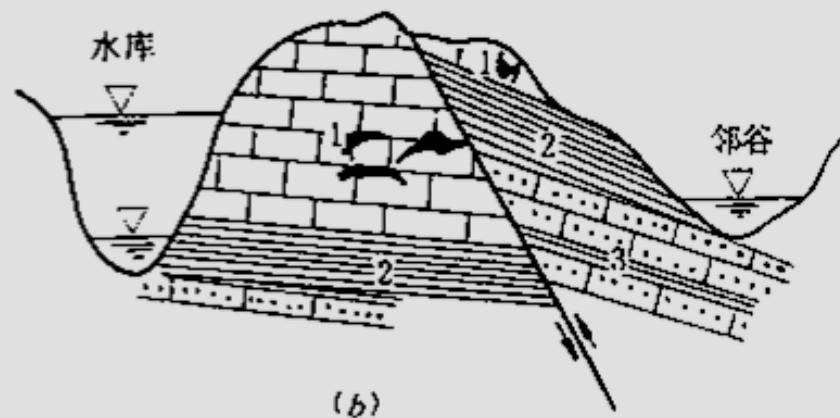
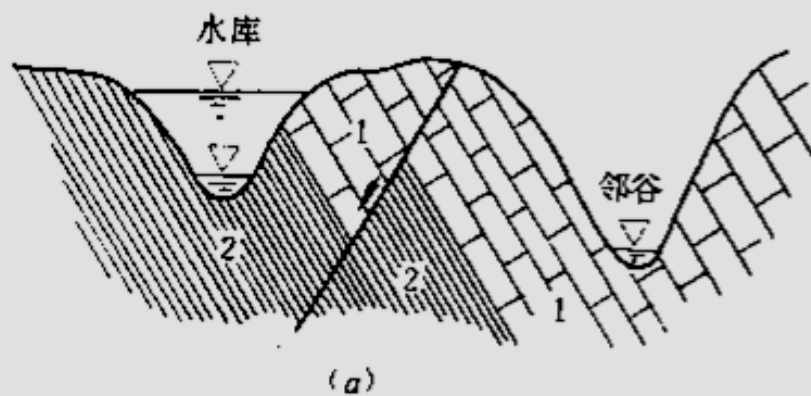
向斜构造与水库渗漏

(a) 有隔水层阻水的向斜构造，不会引起向邻谷的渗漏；

(b) 无隔水层阻水，又与邻谷相通的向斜构造，可能引起向邻谷的渗漏

1—漏水石灰岩；2—隔水页岩；3—透水性小的砂岩

断层与水库渗漏的关系



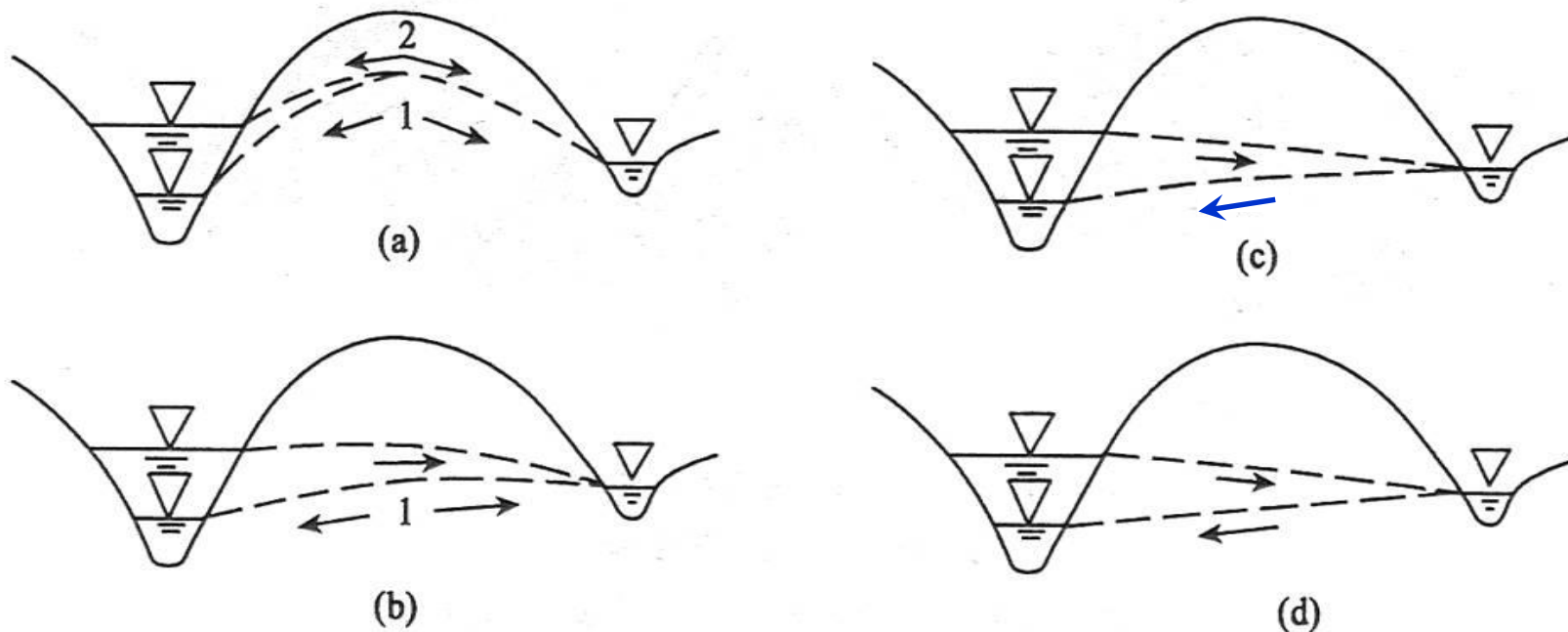
断层与水库渗漏

(a) 可能引起水库渗漏的断层；(b) 可阻止库水渗漏的断层

1—透水石灰岩；2—隔水页岩；3—渗水性小的砂岩

(4) 水文地质条件

- ❖ 潜水分布区：水库与邻谷河间地块的潜水地下水位、水库正常高水位和邻谷水位三者关系，是判断水库是否渗漏的重要条件。



地下水分水岭的四种情况

- (a) 地下水分水岭高于库水位 (b) 地下水分水岭低于库水位 (c) 地下水受库区河水补给
(d) 地下水向库区河谷排泄，但水面低于库水位

❖ 岩溶水分布区：渗漏量大，处理技术措施复杂。

在岩溶地区，当建库河谷是地下水补给区时，是最容易产生大量渗漏的建库地区，库水会沿库区的落水洞、盲沟、溶洞等岩溶通道大量外漏；

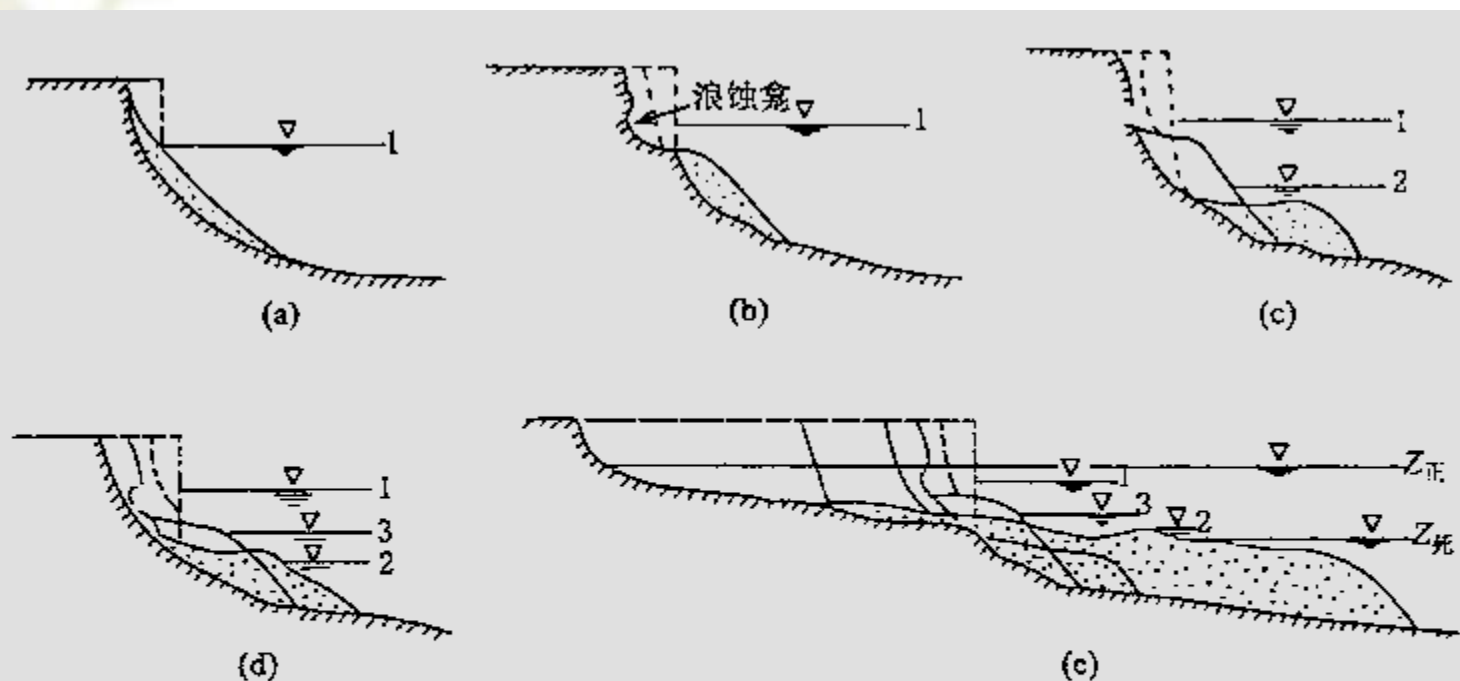
在覆盖型岩溶洼地建库时，如果覆盖层厚度不大、抗渗性不强，则覆盖层会因库水渗漏而产生塌陷或因地下岩溶空腔中的气、水体击穿覆盖层引起库水大量渗漏；

在河床下存在与河床平行或迭置的地下径流，其排泄点在库外时，会发生库水渗漏；

在河湾地段，凸岸地下岩溶强烈发育时，可形成与河流大致平行的纵向径流带，因纵向径流带的地下水位低于水库蓄水位而产生渗漏。

14.2 库岸稳定

- ❖ 水库蓄水后，水库周边岸坡在水位升降及风浪冲刷作用下，发生坍塌破坏，并经逐渐再造形成新的稳定岸坡的现象，称水库塌岸或水库边岸再造。



水库塌岸过程示意图

(a) 水库岸坡的初期破坏 (b) 浪蚀坑及浅滩的形成 (c) 库水位下降时的塌岸作用
(d) 库水位上升时的塌岸作用 (e) 最后岸坡的形成

1、2、3—分别为库水位变化 $Z_{正}$ 、 $Z_{死}$ —分别为正常高水位及死水位

水库塌岸因素分析：

- ❖ 地貌地质条件：岸边地形坡度、岩土性质及地质构造是影响塌岸的基本因素；
- ❖ 水文气象条件：波浪作用强度、冻融作用、岸流和片流作用；
- ❖ 其他因素：岸坡植被、自然地质现象、水文地质条件等。

水库建成蓄水后，库岸自然条件发生急剧变化，使之处于新的环境和动力地质作用下表现为：

①原来处于干燥状态下的岩主体，在库水位变化范围内的部分因浸湿而经常处于饱和状态，其工程地质性质明显恶化 f 、 c 值下降。

②岸边遭受人工湖泊波浪的冲蚀淘刷作用，较原来河流的侵蚀冲刷作用更为强烈。

③库水位经常变化，当水位快速下降时，原来被顶托而壅高的地下水来不及泄出，因而增加了岸坡岩土体的动水压力和自重压力。因之，使得原来处于平衡状态下的斜坡，有一部分发生变形破坏，直至达到新的平衡状态为止。

（2）危害：库岸的变形破坏，危及滨库地带居民点和建筑物的安全，使滨库地带的农田遭到破坏。库岸的破坏物质又成为水库的淤积物、减小库容。近坝库岸大塌滑体的安然滑落激起的涌浪，还会危及大坝安全，并给坝下游带来灾难性后果。

(3)库岸失稳破坏的类型

①塌岸

在库中库岸土石体在库水波浪及其他外动力作用下，失去平衡而产生逐步坍塌，库岸线不断后移而进行边岸再造，以达到新的平衡的现象和结果，称水库塌岸(或称水库边岸再造)。可见，水库塌岸是不同于岩土体崩塌和滑坡的一种特殊的破坏形式。这种现象主要发生于土质岸坡地段。

水库蓄水最初几年内塌岸表现最为强烈，随后渐渐减弱，可以延续几年甚至十几年以上。因而，塌岸是一个长期缓慢的演变过程。最终塌岸破坏带的宽度可达几百米，如我国黄河三门峡库最大塌岸带宽度284m。



CRInline | 新闻
国际在线

© www.cfp.cn 版权作品 请勿转载

②滑坡

库岸滑坡在大部分水库蓄水后都会发生，只是规模不同而已，它往往是岸坡蠕变的发展结果。按库岸滑坡发生的位置，可分为水上滑坡和水下滑坡，以及近坝滑坡和远坝滑坡。近坝的水上高速滑坡危害尤大。



③岩崩

岩崩是峡谷型水库岩质库岸常见的破坏形式，它常发生在由坚硬岩体组成的高陡库岸地段。水库蓄水后，由于坡脚岩层软化或下部库岸的变形破坏，而引起上部库岸的岩体崩塌。



14.3 水库浸没:

水库蓄水后, 引起库岸周围一定范围内地下水位抬升, 当抬升后的地下水位接近或超出地面时, 除了地表水体形成淹没及移民损失外, 还可能导致农田沼泽化、土地盐渍化、建筑物地基饱水恶化、地下工程和矿坑充水等不良后果。

危害: 浸没对滨库地区的工农业生产和居民生活危害甚大, 它使农田沼泽化或盐碱化; 建筑物的地基强度降低甚至破坏, 影响其稳定和正常使用; 附近城镇居民无法居住, 不得不采取排水措施或迁移他处。浸没区还能造成附近矿坑渗水, 使采矿条件恶化。因此, 浸没问题常常影响到水库正常高水位的选择, 甚至影响到坝址的选择。

- ❖ 产生水库浸没问题的条件和影响因素：库岸的地形地貌、岩土性质、地质构造、水文地质条件、水文气象条件、水库的运行管理及某些人为活动。
- ❖ 水库浸没防治措施：降低浸没库岸段的地下水位，可采用设置防渗体或布设排渗和疏干工程等；适当降低正常高水位；考虑被浸没对象，如调整农作物种类、改进耕作方式和改变建筑设计等农业措施；灌溉、排水工程措施相结合的综合防治方法等。

14.4 水库淤积

- ❖ 水库为人工形成的静水域，河水流入水库后流速减缓，水流搬运能力下降，所挟带的泥砂就发生沉积，从而堆积于库底，形成**水库淤积**。淤积的粗粒部分堆于上游，细粒部分堆于下游，随着时间的推延，淤积物逐渐向坝前推移。
- ❖ **研究水库淤积的重要性：**

淤积不仅缩短水库使用寿命，而且会给上下游防洪、灌溉、航运、排涝治碱、工程安全和生态平衡带来影响。

水库的兴建，极大地改变了原河流的水动力条件和河流地质作用，使其侵蚀、搬运和沉积作用发生了大幅度的变化，并在自我调整中取得新的动态平衡。其间，库内沉积作用加剧，将影响水库的寿命、航运(包括航道和港口)的通畅、库尾的洪水位等；

在坝下游，由于清水下泄，冲刷作用增强，底蚀显著，河道下切，河流变直，可导致部分河段岸坡稳定性下降，出现裂缝、坍塌等现象，河道还可能出现负比降，影响汛期行洪等。

- ❖ 水库淤积的固体径流来源问题
- ❖ 防治水库淤积的措施：加强上游各支流的水土保持工作，整治冲沟、植树造林及建拦砂坝，加固库岸，排洪蓄清和异重流排沙等。

14.5 水库诱发地震

水库蓄水后，使库区及其邻近地带地震活动明显增强的现象。

- ❖ 水库诱发地震的主要影响因素：库水荷载，构造应力环境，断层的活动性，岩性，地震活动背景，水文地质结构面的发育规模、透水深度等。

1 .水库诱发地震的基本特征

从已有地震资料来看，水库诱发地震具有下列特征：

（1）震中多分布在水库影响区域内(包括通过活动断裂传递到库外几十公里的地方)，时间分布复杂

根据统计，水库地震的震中区，除少数在坝址附近以外，主要分布在库区中部及尾部。这说明大坝的位置一般选在地质条件较好的地方，故诱震几率低。另外，震例资料还说明，震中常沿构造线分布。

(2) 震级小，震源极浅

据统计，水库诱发地震的震源深度，一般不大于5 km，也有超过10 km的，达20km者少见。由于震源浅，故震中区烈度偏高，即水库诱发地震烈度，较同震级的天然地震烈度偏高。

(3) 地震形式的特点

诱发地震形式，常以前震—主震—余震型(即茂木Ⅱ型)为主，也有群震型，孤立型则罕见。

(4) 震波垂直分量作用显著

水库诱发地震震波垂直分量的作用显著，一般 $M_s=5$ 甚至 $M_s=4$ 级地震，都可造成明显的破坏作用。

(5) 分布特征

水库诱发地震，大部分发生在低烈度区，强度不大，烈度偏高。

(6) 水库地震与坝高、库容关系

- A. 诱发地震的水库占已建水库总数的比例很小，但在高坝中比例明显增加，且坝愈高，比例越大，坝高超过200m，水库发震震例占1 / 4。
 - B. 从库容看，库容愈大，水库发震率愈高，当坝高大于100m，库容大于1 000亿m³时，比率高达40%。
 - C. 一般来说，震级大的水库坝高和库容都较大，震级Ms在6级以上，其坝高大于100m，库容大于25亿。
- ❖ 因此，高坝大库产生水库诱发地震的概率较高。

(7) 水库地震与蓄水过程的关系

A. 水库水位的影响

统计资料表明，多数水库地震强度和频度与水位相关，按其相关性分成两大类，一类是有明显主震，另一类是蓄水后微震频度明显增多。

B. 水库地震持续时间一般较长，由十几年到几十年，如新丰江、胡佛等水库。

C. 水库蓄水对地震活动的抑制作用

对大多数水库来说，蓄水导致地震活动加剧。但也有地震活动减少的实例，如美国胡佛坝上游佛莱敏谷(Flaming Gorge)和格兰峡(Clan Canyon)蓄水后，连同胡佛坝地震活动都见减少。

2. 水库地震发生的条件

目前对水库诱发地震的机制有不同的观点，认为水库诱发地震的发生条件，大体上有：

(1) 地质构造条件

- A. 易发震地区多数处于性脆，裂隙多，易向深部渗漏的灰岩地区，以及易发生膨胀、水化的岩体内。岩溶发育区的震型为坍塌坐落的波型，且震级小于4，震源不到一公里，与库水位关系较小。
- B. 处于中、新生代褶皱带，断陷盆地和新构造活动明显的特殊部位，容易发震。

- C.易于发震的活断层，震中一般分布在断层弧形拐点、交叉部位及断陷盆地垂直差异运动较大的部位。
- D.易于发震的活断层多为正断层和走向断层，倾角大于 45° ，发震多在正断层下盘。
- F.周围有温泉、火山活动或地热异常区，建库后易形成新的异常。

(2)水库蓄水

水的诱发作用与水库蓄水有明显的依赖关系，水位高时，活动性强，水位猛涨时，更常发生，且滞后现象明显，近则一月，长则几年。

- A.库水的静水压力使岩体变形。
- B.库水作用在深部剪切面上，促使极限平衡状态改变
- C.孔隙水压力增大，有效摩擦力降低。
- D.深部岩体软化作用加剧，岩体强度降低。
- E.亲水性矿物膨胀。
- F.下渗吸热产生气化，造成局部地热异常，热能积聚。

（一）水库地震的特征

与一般构造地震相比，水库地震主要有以下特征：

1. 震中分布在水库的边缘或库底，特别是大坝附近的峡谷区，常密集在特定范围内，一般不超过库周外**10公里**，空间上重复率较高；
2. 蓄水初期，地震活动与库水位变化相关性密切；
3. 震级有限，多为微震、弱震，少数为强震。一般震级小，但震中烈度大，破坏性强。
4. 震型上常为前震—主震—余震型（少数为群震型），与天然地震相比，余震衰减率缓慢的多；
5. 具有较高的地面峰值加速度，但持续时间短。

（二）诱发水库地震的工程地质条件

1. 岩性

以碳酸盐岩地区水库诱震率较高，但震级则以火山岩特别是花岗岩地区较高。

2. 地质构造

水库地震大多出现在活动性大地构造环境中，尤其以新生代断陷盆地、第三纪以来的断陷谷地及其边缘为多。

3. 地应力

大多数的发震构造的力学性质是剪切破裂，已有断裂能否产生新的剪切破裂，取决于区域最大主应力与断裂走向的夹角。因此，查明现代地壳活动的应力场是十分重要的；

4. 水文地质条件

库区周围隔水层的分布，可形成大致封闭的水文地质条件，有利于保持较大的水头压力，使库水得以向深部渗入，增加构造裂隙及断层中的孔隙水压力，降低岩体的抗剪强度，因而容易诱发水库地震；

5. 坝高和库容

高坝诱发水库地震的机率大，高坝与诱震强度有明显的正相关。

（三）水库地震的成因

1. 水库荷载成因说

其依据是：

- 1) 水库蓄水前，库区没有或很少有地震历史，蓄水后库底库区边缘地带地震活动频繁，集中或局限于库区周围；
- 2) 地震的频度和强度随着库水位的升降而增减；
- 3) 地壳变形的精密水准网复测成果和理论计算结果相符；
- 4) 库水位的猛涨，意味着水体自重对库底和边坡急剧的迭加和挤压，导致岩层破裂而产生一系列小地震。

（三）水库地震的成因

2. 地质构造成因说

其依据是：

- 1) 震中并未集中在库水最深的部位；
- 2) 震中分布的走向和库区周围的断层走向一致；
- 3) 震源浅，这与地壳上部的地震多数是断层错动引起是一致的；
- 4) 大量震源机制解的成果说明，水库地震的震源力学机制基本上是构造地震；
- 5) 库水和地下水只有沿着断层、节理、裂隙活动时，才能产生孔隙水压力。

（三）水库地震的成因

3. 岩溶塌陷与气爆成因说

浅部岩溶洞穴在水库荷载的作用下，顶板塌陷而引起浅源地震；

深部岩溶和古岩溶，可能有残留古岩溶水，水库荷载和渗透可引起古岩溶束缚水发生气爆而产生地震。