

苏联 Г. И. 阿卡林編著

石灰岩上筑坝的 工程地质条件 与勘察特点

水利电力出版社

石灰岩上筑坝的 工程地质条件 与勘察特点

苏联 I. II. 阿卡林編著
长江流域规划办公室专家工作室譯

水利电力出版社

内 容 提 要

本书阐述了三十九个建筑在石灰岩地区的坝例，其中有成功的，也有失败的；有在喀斯特实际不发育地区的，也有在喀斯特极端强烈地区的。其中有三个坝例是我国的，而对长江三峡的阐述尤为详细，并对其工程地质条件做了一些预测。在这三十九个坝例的描述中，除了一般地质条件叙述外，主要是说明了这些坝施工过程中所遇到的各种问题及对这些问题的处理办法和取得的效果。另外叙述与喀斯特或其他漏水有关的特点，篇幅虽然不大，但实用价值却不小。

本书可供水利水电工程的工程地质、设计和施工人员参考。

· 石灰岩上筑坝的 工程地质条件 与勘察特点

苏联 Г. П. АГАЛИН 編著
长江流域规划办公室专家工作室译

*

2276 S 698

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里沟）

北京市书刊出版业营业登记证出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168毫米开本*2 $\frac{1}{2}$ 印张*65千字*定价(第9类)0.41元

1959年12月北京第1版

1959年12月北京第1次印刷(0001—1,730册)

前 言

在水利工程建設中，当解决許多因当地工程地质条件的特点而引起的設計与施工的問題的时候，极其迫切地需要弄清我們的任务，拟制最有效地加固坝下岩石基础的办法。

当在石灰岩区修建拦河坝的时候，这种問題特別多，因为喀斯特現象通常都是与石灰岩联系在一起的，这种情况迫使我們采取特別有效的措施来加固基础、防止繞坝滲漏与水库漏水，以及解决其他專門性的問題。

本文是我正在編写的一部著作中的一章，这部著作专门討論如何由水工方面解决因当地特殊的工程地质条件而引起的問題。

由于很难得到我所感到兴趣的水电站所采取的措施的原始資料，也由于日常业务工作較重，我不能很快的完成这项已开始的工作。

但是，中国特别是三峡地区以及黔桂两省（这些地区是喀斯特发育的典型地区）水利工程建設的迅速发展，迫切需要一本关于曾采用过的措施的資料汇编，这就促使我把所完成的一部分文稿交付出版，以供地质工作人員参考。

在再作某些补充工作，主要是着重补充一些其他工程的典型例子之后，上述的著作即将完成，并将提出全文的最后定稿。

編著者

目 录

一、石灰岩发育地区工程地质条件的特点	3
二、筑坝工程地质条件特性的比較	5
(一)分組根据	5
(二)分組描述	8
第Ⅰ組 没有喀斯特現象的不透水石灰岩上的拦河坝	8
第Ⅱ組 裂隙发育,但没有喀斯特現象的石灰岩上的拦河坝	10
第Ⅲ組 具有已被填塞的古喀斯特的石灰岩上的拦河坝	21
第Ⅳ組 喀斯特不甚发育的石灰岩上的拦河坝	23
第Ⅴ組 喀斯特強烈发育的石灰岩上的拦河坝	29
第Ⅵ組 大量漏水的水庫	61
第Ⅶ組 发生过事故的拦河坝	63
三、石灰岩发育地区工程地质勘察的特点	65
四、結語	76
参考文献	77

一、石灰岩发育地区工程地质条件的特点

在自然界所見到的可溶岩石当中，碳酸盐类岩石分布最广，而一般來說，在沉积岩当中，它也是分布最为广泛的岩石，因此，很容易理解：为什么人們对碳酸盐类岩石如此关心，为什么在进行工程地质勘察时，不得不对碳酸盐类岩石特加注意，不得不考虑它們所具有的特点。

由于碳酸盐岩类中主要的岩石是石灰岩，因此在以下的叙述中对它将特別注意，同时，在必要情况下，也指出其他岩类，主要是白云岩所具有的特点。

应当指出，純石灰岩以及純白云岩都是較為少見的，根据化学分析来看，一般石灰岩均含有一定数量的碳酸鎂，因而使其属于白云化岩类。

在許多情况下，“石灰岩”是一个籠統的名称；无论較純的或是弱白云化的岩类均可称为石灰岩，而并不反映其白云化的程度。

在其他可溶性的硫酸盐岩类和氯化物岩类（石膏，硬石膏，岩盐等）上筑坝的問題在这里不予研究，这个題目将另外闡述。

在石灰岩上筑坝时所产生的主要实际問題，首先就是喀斯特問題，包括因有喀斯特溶洞存在而引起的基础岩石变坏和漏水；其次为沿片理化夹层产生滑动的問題。

石灰岩，与其他沉积岩一样，通常为裂隙和层面所切割。但是，与其他不溶的沉积岩以及所有火成岩和变质岩不同，这些裂隙和层面在石灰岩中有着特殊的意义，因为喀斯特形态在石灰岩中的分布通常是与这些裂隙或层面有密切联系的。喀斯特形态的生成是由于地下水的渗入，扩大了原生的、有时极为狭窄的裂隙，并把它們变成形形色色、有时极为巨大的喀斯特通道和溶洞密集

网。

根据各地区石灰岩的性质、隔水夹层的存在与否、岩层的厚度、裂隙发育强度、构造破坏程度、岩石埋藏条件、水文地质特点和地史等情况，喀斯特可以具有多种多样的发育形态和不同的强烈程度，小者仅是稍被扩大的裂隙，大者可为直径几十米、长1公里以上的喀斯特溶洞。

石灰岩的机械强度变化很大，如最软弱的，一般为第三纪的贝壳碎屑灰岩，其极限抗压强度每平方厘米仅10~15公斤，而最坚硬的，例如致密的砂质灰岩，其极限抗压强度每平方厘米达2,000公斤，而在个别的情况下可达2,500公斤。极限抗压强度为400~1,200公斤/平方厘米的灰岩分布得最广泛。

根据上述的石灰岩强度来看，大多数石灰岩同样具有相当大的抗切强度，因此，滑动一般只可能沿岩面特别是沿着泥质成分较多的夹层面发生。因此必需注意查明泥质夹层并详尽仔细地研究其物理力学性质。

如果由地质时代的角度来看的话，石灰岩的溶解速度是极快的，在漫长的地质时代中一直处在有利于喀斯特发育条件下的石灰岩，有时完全为大小不同的各种喀斯特洞孔密集网所贯穿。

如果用人类的纪时标准来看喀斯特形成的速度的话，那么可以肯定地说，石灰岩的溶解进行得非常缓慢，并且可以认为，在水电站正常使用年限内，石灰岩的不断溶解未必会使裂隙及现存喀斯特洞孔的宽度增加很多。

在分析这个问题的时候，应当将下列两种现象截然分开：一种是因石灰岩的溶解而使喀斯特洞孔扩大，另一种是喀斯特洞孔部分或全部充填有泥质或其他成分的次生产物，由于其管涌而使这些洞孔中的渗透通道扩大。当渗透速度很大，同时具有有利于潜蚀作用发生和发展的条件时，这种现象能够使渗流越来越大，如在修建阿朗、卡馬拉扎、赫尔斯·巴尔等坝时，曾见到此种情况。

在预测水库往邻近河谷渗漏或漫坝渗漏的可能漏水量时，地

下水水位的意义非常重要。喀斯特石灰岩和其他岩石中的地下排水网均有分水岭，这些分水岭与地表水流分水岭可能一致，但更多的情况是不一致的。

这些地下分水岭与水库壅水高程的相对高程位置以及其平面位置(特别在坝肩地区)都是很重要的，从这方面来研究地下水含水层对以后的预测工作会有很大的帮助。在对含水层作此种研究时，查明悬挂含水层有特殊的意义。因为如果认为它们是主要含水层，而它们下面却是干燥的岩石，这样会使关于渗漏损失的结论产生很大的错误。

所有这些情况以及在勘测过程中所能查明的其他情况均应详细研究，以便确定喀斯特发生的原因，喀斯特洞孔发育的阶段和空间位置。虽然石灰岩构成的基础给施工带来了许多严重的困难，影响了设计和施工中的信心，可是就在这样的基础上，甚至在喀斯特发育极为强烈的基础上，仍然建成了很多目前运转得十分顺利的拦河坝。

成功地修建在喀斯特石灰岩上的拦河坝，其普遍特点是基础处理的工作量很大，其中包括堵塞喀斯特洞孔和设置大而复杂的防渗帷幕等工作。建筑的成功与否要看是否能正确和及时的完成这些工作。

二、筑坝工程地质条件特性的比较

(一)分组根据

为了说明在喀斯特石灰岩上筑坝时实际上所遇见的困难和评定所采取措施的效果，下面将引述很多实例。

在举这些例子的同时，自然也就有必要按某个较有根据的标准将工程地质条件加以分类。

首先就会想到用石灰岩的化学成分作为这种分类的标准，亦即根据泥质和其他阻碍淋蚀的杂质的含量将石灰岩分类。但是许

多例子表明，这个标准远称不上是万能的。在自然界中，可見許多由构造破坏作用所引起的极明显的矛盾現象(例如福特-勞丹，薩拉格里馮等)。因此，上述标准可以用来比較在其余各方面完全相同地区的工程地質条件。但因为所有其余的条件完全相同的情况实际上是不可能的，所以不可能利用化学成分作为分类的标准。

利用地質构造作为工程地質条件分类的标准是很誘人的，因为它毫无疑问地对喀斯特的形成有着巨大的影响，有时也是决定性的影响。

例如，著名的工程地質专家洛桑和 M. 柳若安教授，在这个問題上肯定地說：“根据我的經驗，我可以說，如果石灰岩的层理是垂直并橫切河谷的，或者岩层向上游傾斜很大的話，那就可以安心的筑坝。岩层的产状应当是正常的，沒有断裂痕迹，沒有破碎或糜棱化的迹象。

与此相反，如果石灰岩产状水平或傾向下游，或者被构造断裂所破坏，那末，在这种地基上筑坝，就應該注意多少比較严重的坝基或繞坝滲漏，因而必須考虑很細致的进行保証不透水的工作”。

虽然我們不反对这个論点在一般情况下的正确性，但是不能利用石灰岩的构造条件作为工程地質条件分类的单值标准。因为在个别情况下，前述的其他因素都有自己的影响，这些影响有时并超过岩层构造条件所产生的影响。談到岩石的构造条件問題时，不能不指出，在个别情况下，当坝基以下不深埋藏有不透水的、通常为泥質或泥灰質的岩石时，这种构造条件对坝址的工程地質条件产生有利的影响。

在一些情况下，这种埋藏条件仅减少了灌浆工作量，例如在修建桑杰尔·赫尔，宾·埃里·威当等坝时就是这种情况。

在另一些情况下，例如卡馬拉扎大坝，这种不透水层的存在成了拯救这个水电站使其能够运轉的决定性因素。

利用石灰岩的年代进行分类也是不可能的，因为在各种不同

年代的石灰岩上都成功地修起了拦河坝。

由于不可能孤立地用这三个基本标准中的某一个进行工程地质分类，而且除它们之外，还必须考虑其他的因素，所以就不得不采用岩石当前总的状态作为分类的主要标志。岩石的这种总的状态表现为其裂隙和喀斯特现象的发育程度，而喀斯特现象本身又决定着坝址和库边的渗透性质。

对石灰岩坝区实际观察到的工程地质条件进行比较后，可以把它分为下面七组。

在每一组内，将尽可能考虑上述的分类特征，以便查明它们对石灰岩目前喀斯特化总状态的可能的影响。

(1)在坝址区分布着没有任何喀斯特特征的石灰岩，岩石的裂隙很细，与不可溶岩石中所发育的裂隙相似，或者完全没有裂隙。防渗措施要求不多，通常只需要不大的灌浆帷幕。

(2)在坝址区分布着没有任何喀斯特特征的石灰岩，但具有因构造作用所引起的强烈发育的裂隙。在裂隙当中可見到有不同宽度的开裂隙。需要进行复杂的防渗措施，其中包括个别裂隙的堵塞工作。

(3)在坝址区分布着具有古喀斯特的石灰岩，但其中的洞孔后来完全被成因不同强度较大的沉积物所填充。

(4)在坝址区分布着喀斯特发育不甚强烈的石灰岩，喀斯特在局部地带和整个岩层中均可見到。修建普通的防渗帷幕即使基础不透水。

(5)坝址整个石灰岩体中喀斯特发育强烈。在防渗措施方面要求在坝址应用复杂的灌浆工作，其中包括用各种方法堵塞个别大型的喀斯特洞孔。这种灌浆工作甚至在水电站运转过程中也常需要多次重复进行。

(6)在水库范围内分布着喀斯特和裂隙特别强烈的石灰岩，喀斯特和裂隙的发育，使得不可能抬高水库水位或迫使我們放弃该坝址。

(7)在坝址内分布着性质恶劣的石灰岩，以至引起了大坝失

事。

当然，大致划分的这七组之间的关系是渐变的，但这并不妨碍我们进行分类，因为分类之后更容易弄清在自然界中实际观察到的现象。

(二) 分組描述

第 I 組 沒有喀斯特現象的不透水石灰岩上的拦河坝

与在其他完整的弱裂隙沉积岩上修坝相比较，这里没有任何特殊的困难。

1. 奥地利什普利尔捷坝(在奇楼尔城)

这个坝可以作为第一个很有代表性的例子。这里有两个重力拱坝(北边的坝高 25.3 米，南边的高 35.3 米)，建筑在里阿斯统(下侏罗纪)石灰岩和泥灰岩之上。

石灰岩与泥灰岩中裂隙发育微弱，因此防渗帷幕的深度不大，仅 5 米。水泥耗量不大，只在个别钻孔中达 1,200 公斤，也就是约每米 240 公斤。水泥灌浆是在未超过 6 个大气压的低压下进行的。

灌浆之后，北坝下面的渗漏量由 1.7 升/秒降低到 0.8 升/秒，南坝则由 5.0 升/秒降低到 1 升/秒。

2. 法国波尔特·鳩·費坝(在罗纳河的支流狄耶河上)

这个坝施工的例子更具有代表性(图 1)。坝建筑在上侏罗纪

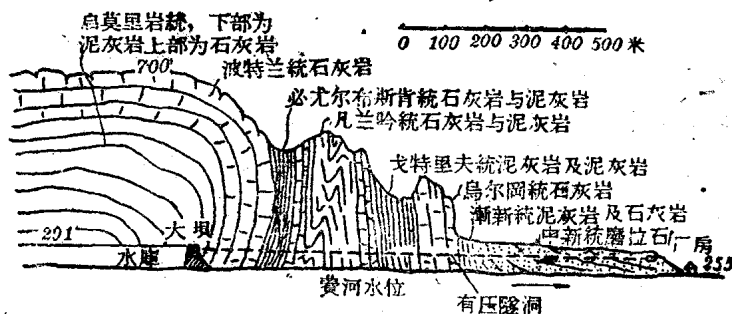


图 1 波尔特·鳩·費坝

珊瑚相石灰岩之上。石灰岩的产状几乎垂直，甚至有些倒轉，造成了箱状褶皱的西翼。

在河谷岸坡范围内，石灰岩表面具有强裂发育的裂隙，给人造成不良的印象。

但是，在开挖基坑时查明，冲积层下面是很致密和没有裂隙的石灰岩。

基坑中所开挖出来的石灰岩，其表面是完全新鲜的，并且被水磨得很光滑。为了保证石灰岩与混凝土很好的结合在一起，只需要在岩石上刻凿麻面就行了。

该坝于1917年建成，当时还没有认为岩石灌浆有什么重大的意义，虽然如此，直到目前尚未发现任何明显的水庫和繞坝渗漏的现象。

看来在这方面的有利因素正是珊瑚相石灰岩的岩相特点(即岩石呈厚层整体状)，以及岩石的垂直产状及其横交河谷的走向，在这种情况下，石灰岩层間泥质較多的夹层起到了天然隔水障碍物的作用。

同时可以指出，在大坝基坑开挖时会发现一个很有趣的现象，就是在基岩河床中有一个深达20米的深槽，并为砂砾石冲积层所填充。深槽两壁很不規則，而且凸凹不平，常呈反坡状，局部地点深槽变得很狭窄，槽中还可見到很多鍋状穴。槽底具有倒坡，在100米左右的距离間(上下圍堰之間)造成了10米上下的高差。

在上述地方石灰岩的埋藏条件与柳若安认为是最良好的那种情况相一致。

3. 法国薩拉格里馮坝
(在瓦尔河右岸支流埃斯特隆河上)

在这个地区也能見到类似的情况(图2)。



图2 薩拉格里馮坝順河地質剖面图

目前这个工程还没有建成，但它早就引起了人们的注意，因此在那里曾进行了勘测和设计工作。

在拟定的坝址地段，河谷呈狭窄的峡谷状，并横切向上游陡倾的上侏罗纪厚层纯质石灰岩。

在这些石灰岩之上为倍里节系石灰岩(白垩纪的底部)，再往上为极厚的凡兰吟统泥灰岩。在倍里节系石灰岩分布的范围内河谷开始展宽，而在凡兰吟统的泥灰岩中正是河谷最宽的部分，库区主要是分布在这一带。

在上侏罗纪石灰岩上的坝址的工程地质条件方面，曾有人担心可能会因为这些石灰岩成分很纯而产生喀斯特。

但是，在石灰岩中没有裂隙，没有表面可见的喀斯特洞孔和通道，同时也没有作为古泉水存在的标志的石灰华，所有这些现象造成了对这些石灰岩的良好印象。

为校验这个印象打了一些钻孔，在最初几个孔里就发现倍里节系石灰岩的透水性最高(根据吸水试验)，而上侏罗纪均质石灰岩的透水性却随深度逐渐减小到完全不透水。

这样，透水性的研究表示出了均质块状灰岩的情况比薄层灰岩与其他岩石(如泥灰岩和泥质页岩)互层的情况来得优越。

以上三个例子表明，当石灰岩裂隙不发育而且没有受喀斯特作用时，在其上筑坝的条件与其他坚硬沉积岩发育区内筑坝的条件没有区别。前者甚至还具有某些优点，那就是石灰岩中容易找到适于建筑拱坝及其他轻型坝的地点。

第Ⅱ组 裂隙发育，但没有喀斯特现象的石灰岩上的拦河坝

这一组可以用大量的例子来说明，这些例子同时还表示出由地质构造特点而形成的区别。

由于例子很多，有可能对地质构造不同的地区分别加以说明。可以分出以下几种情况：河谷顺岩层走向发育(桑塔·久斯庭纳和嘎斯狄里昂)；岩层几乎水平(索特)；岩层垂直河谷发育并倾向上游：(1)倾角平缓(宾·埃里·威当)，(2)中等倾角(乌耶特·福达)，(3)倾角陡(布旺特)；构造复杂、基础不均一的情况

(善姆邦和維茨塔里)。

4. 意大利桑塔·久斯庭納堤(在諾斯河上)

我們从这个例子(图3)开始研究裂隙强烈发育而河谷平行走向的石灰岩地区的条件。

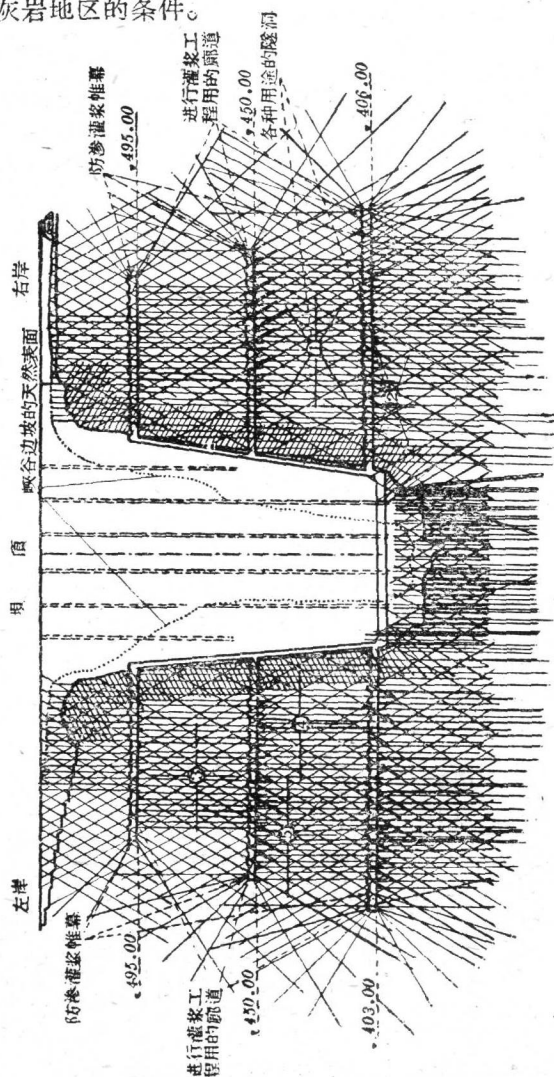


图3 桑塔·久斯庭納堤灌浆帷幕剖面图

意大利特兰托省諾斯河上的桑塔·久斯庭納拱坝是在石灰岩上筑高坝极好的例子。这个拱坝高 153 米，是欧洲第二座高坝，仅次于法国薩瓦地方名为亨的坝。

该坝建筑在上三迭纪白云质石灰岩所构成的两岸直立的狭窄峡谷中。由于岩层呈水平埋藏，又有許多裂隙和断层存在，峡谷的工程地质条件是不利的。

为了防止渗漏，曾向两岸进行了很深的开挖工作，尤其是在岸坡的下部，开挖深度可达 15~20 米，此外还設置了巨大的钻孔，很密的防渗帷幕。有一部分灌浆孔是在河谷底部和岸坡上打的，但主要还是在两岸专门开挖的三层平洞内打的。利用这种方法钻孔的深度可不致太大，通常不超过 50 米。为了截穿各种不同方向的裂隙，从平洞钻进的灌浆孔有三个方向：一组垂直的及两组对向倾斜的，峡谷岸坡上所打的钻孔很平缓，与水平面约成 25° 的夹角。

大的断层裂隙曾进行了单独的处理，一般是清理后再用混凝土填筑起来。

5. 法国嘎斯狄里昂坝(在維尔頓河上)

这个拦河坝(图 4 和图 5)的施工条件是极为典型的例子。此处河谷沿倾斜相当陡的石灰岩的走向发育。在坝区内发育的上侏罗纪厚层石灰岩組成“射朝”背斜，背斜軸距河谷右岸不远。在褶

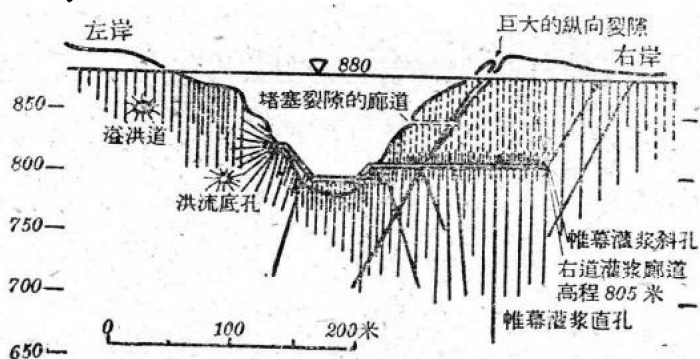


图 4 維尔頓河上嘎斯狄里昂坝灌浆帷幕剖面图

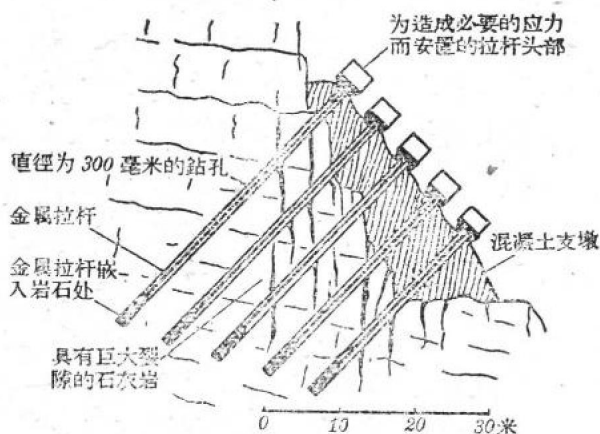


图5 嘎斯狄里昂坝支墩剖面图

鐵軸部附近岩层破碎較厉害，产状也較陡，峡谷右岸的石灰岩产状亦如此。在距褶鐵軸較远的左岸，石灰岩不甚破碎，并且埋藏較为平緩。

該坝是布置在硬而脆的石灰岩悬崖上。岩层甚厚，可达数米。沿层面含有泥灰质夹层，其厚度由几毫米到几厘米。

左岸岩层沒有遭受破坏，尽管傾角达 45° （傾向上游），但它們并不破碎，在其中也沒有見到大量的裂隙。

但是，在右岸岸坡地表上，看得見許多很寬的裂隙，这些裂隙集中在背斜的穹部并与其軸向平行。此外，也可以見到大量其它方向的裂隙；但无法加以整理并查明其規律性。

对这些断裂的調查，不仅在剝土工程、試坑和在地表打的鉆孔中进行，而且还在回水高程以內所挖的五层平硐內进行。平硐中所遇到的一些裂隙，都用开挖專門的支硐和暗井的办法进行了追索。

某些裂隙部分被从地表渗入的紅色粘土质土壤所充填，但另外有一些則完全是空的，如高在20米以上、寬为2~4米的順裂隙发育的卡菲德拉里那雅岩洞。沙登松洞及其他許多洞穴的規模也很大。

所有的洞穴中都未发现喀斯特的痕迹，这些洞穴的两壁并且保存了在构造运动时造成的磨面和滑动面。因此，它們和喀斯特现象没有任何共同的地方。

在初步勘测的时候，有人曾經推測所有这些开口裂隙都与岸边剪切现象有关，但在岸边剪切现象影响不到的深处，岩体中也找到很多这样的裂隙。

把所有的条件加以比較之后，不得不认为这些裂隙是构造裂隙，而且和背斜鞍部的断裂有关。裂隙年代較新，大約是上新統的，而石灰岩体受冲刷以及河谷形成的時間則更晚，大約在第四紀末，沒有喀斯特也就是这个原因。

但是，不管裂隙的成因如何，密集的裂隙网使整个石灰岩体变得象篩子一样。在岸坡頂上裂隙中利用加螢光紅的水进行的注水試驗表明，水很快地滲到河谷底部而沿着整个坝基的邊緣流溢出来。

这样一来，就只好进行大量的岩石灌浆工作，主要是在右岸边坡。当然，首先是用混凝土填住所有从地表或从平硐中发现的裂隙和洞穴，然后再进行压力灌浆。为了不致消耗过量的水泥，負責該項工作的“岩石不透水协会”建議采用下述方法：

(1) 确定将承受大坝压力的梯形岩体的界綫；

(2) 用弱压力順着梯形岩体的四壁压入濃水泥浆，不使其滲入很深的地方和吸浆不多的較小的裂隙中；

(3) 然后再往已造成的象箱子似的空匣中压入較稀的水泥浆，把小裂隙填起来，这样水泥浆也不会越过“箱子”的四壁。

用这样的方法获得了圓滿的效果，而且在水庫充水后未发现任何有水冒出的现象。

在右岸边坡下部見到的和岸坡平行的大量裂隙，与岸边剪切现象有关。为了加固这一部分岸坡，除用堵塞构造裂隙的那种方法堵塞这些裂隙以外，这里还采用了特种结构，这种结构由三个支墩組成，用二十多根金属拉杆同坚硬的岩石固結起来，每一根金属拉杆的应力是按1,000吨計算的。拉杆的头部是特制的，能造