

苏联高等教育部莫斯科奧爾忠尼啓則地質勘探学院

水电建設中 对喀斯特的工程地質研究

Л. Ф. 拉澤尔 著

地质出版社

— — — — —

蘇聯高等教育部莫斯科奧爾忠尼啓則地質勘探學院

水电建設中 对喀斯特的工程地質研究

(以卡霍夫卡及巴甫洛夫斯克水电站为例)

研究生 Д.Ф. 拉澤尔

地質—礦物学候补博士論文

地質出版社

1957·北京

Министерство высшего образования СССР
Московский геолого-разведочный институт
имени С. Орджоникидзе

Аспирант ЛАЗЭР Л. Ф.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
ИЗУЧЕНИЕ КАРСТА ПРИ ГИДРОЭНЕР-
ГЕТИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

(На примере Каховской и Павловской ГЭС)

Москва—1955

水电建設中
对喀斯特的工程地質研究

著 者 Л. Ф. 拉 澤 尔
譯 者 檀 宝 山、孙 昌 淑
出 版 者 地 質 出 版 社

北京宣武門外永光寺西街3号

北京市書刊出版業營業許可證出字第050号

發 行 者 新 華 書 店
印 刷 者 地 質 印 刷 厂

北京廣安門內教子胡同甲32號

編輯: 刘大有 技術編輯: 湯 健 校對: 洪梅玲

印数(京)1—2,100册 1957年5月北京第1版

开本31"×43¹¹/₃₂ 1957年5月第1次印刷

字数15,000 印張¹¹/₁₆ 插頁 1

定价(10)0.13元

緒 言

为了解决苏联共产党十九次代表大会指示中所提出的國民經濟中最重要的任务——保證最大限度地滿足在电力方面國民經濟日益增長的要求和人民生活的需要——最好的手段是借助水电建設利用水的資源。

在建筑大型和中型的水力發電站如：古比雪夫、卡木斯克、卡霍夫卡、巴甫洛夫斯克、契博克薩雷、沃特金斯克等水电站时，它們的地質基礎的最主要問題之一是对影响建築物穩定性的因素——喀斯特進行工程地質評价。

羅馬尼亞人民共和國于执行电气化十年計劃中有几个水力發電站也是建設在喀斯特發育的条件下的。

在对喀斯特進行工程地質研究时必须研究其發展过程，并弄清由各种自然因素造成的喀斯特溶洞分布的規律性。

本書的目的是以在德聶泊河的卡霍夫卡和烏法河的巴甫洛夫斯克水力發電站区域内对喀斯特的全面研究为例，闡明为了保証这些建築物正常進行工作的必要措施，并提出在类似的条件下建設水电站时对喀斯特進行工程地質研究的方法的原理。

本書資料的主要來源是作者在卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克水电站建筑現場的野外工作考察，以及作者所提出的研究这些区域岩石溶解度的實驗室試驗的結果。此外，作者还广泛地利用了烏克蘭水电設計院和全苏水电設計院工程地質勘察的存档資料和已經發表的文獻。

一、研究喀斯特的基本問題

作者把喀斯特作为有規律的進行着的地質作用來研究，这种作用造成發生机械潛蝕的危險，引起水从水庫中大量滲漏，并且能夠導致建筑物的毀坏。

虽然在評價建筑物的穩定性时，喀斯特有着極其重要的意义，但到現在为止研究喀斯特的工程地質方法还是探討得不夠。

喀斯特的研究應該解决兩個主要的問題：

1. 查明決定喀斯特分布基本規律性的喀斯特作用發生及發展的条件；

2. 确定喀斯特溶洞的形狀、大小和分布情况及其对建築物穩定性的危害程度。

为了在水电建設中取得最正确的对喀斯特的工程地質描述必須解决以下的基本問題：

1. 研究建設区域的地質構造；

2. 研究建設地段喀斯特化岩石所有亞类的岩石成分和化學成分；

3. 确定喀斯特化岩石的主要亞类的溶解指标；

4. 研究將來水庫的水对混凝土和喀斯特化岩石的侵蝕程度；

5. 研究区域的地質条件及其在水庫建成后的变化；

6. 研究喀斯特化岩石的裂隙；

7. 弄清在建設地段（要考慮到各个建筑物的布置）現有的喀斯特的狀況，其分布規律和喀斯特溶洞充填的性質；

8. 研究喀斯特充填物的物理技術性質，弄清充填物可能受机械潛蝕的条件；

9. 研究与区域地史直接有关的喀斯特作用，并考虑地壳升降运动对喀斯特发育的影响。

二、德蓋泊河卡霍夫卡水电站区域的工程地质条件

对卡霍夫卡水电站工程地质条件的研究可以得出以下的結論：

1. 坝址地段的地質構造的特征，是新第三紀和第四紀地層發達。

新第三紀地層是屬於薩爾馬特，默奧齊斯和蓬蒂組的海相沉積。

在地中海組第二層的砂層之上直接埋藏有下薩爾馬特的砂質粘土和粘土質砂，這些沉積对上复含水層起隔水作用。

中薩爾馬特沉積是中間夾有10—20公尺石灰岩層的兩個砂層。

在中薩爾馬特砂層之上有上薩爾馬特、默奧齊斯和蓬蒂石灰岩層。

由于沉積的海濱条件，石灰岩層的特征是岩石成分極不均一。在不大的一段距离內就有細晶体的，鲕狀的，礫岩狀的、泥灰質的、砂質的、介壳的和鱗狀介壳的各种石灰岩的互層。

石灰岩地層的特性是具有綠色粘土和似白堊的粘土灰質白云岩的薄層，以及岩石喀斯特化的程度不同。有的地方石灰岩受到再結晶作用，而且常常这样的岩層就正是最强烈喀斯特化的地帶。

按化学成分來說，石灰岩地層的特征是白云化石灰岩，弱白云化石灰岩和几乎是純的石灰岩同时存在。

2. 石灰岩層几乎是呈水平状态埋藏的。岩層总的傾斜为南南西，坡度为0.0018。德聶泊河的活动造成了岩石的強烈冲刷，其結果，左岸与右岸的構造就截然不同了。

在右岸石灰岩被埋藏在第四紀地層底部的紅褐色粘土，黃土和黃土狀亞粘土所掩复，而在左岸石灰岩則被不厚的冲積砂所掩复。

3. 在建設地段上沒有大的構造破坏。与構造裂隙有关的層理裂隙和節理裂隙对洞穴的發育及其分布的規律性起着很大的作用。

4. 由于降水的补給和滲入条件的不同，結果左右分水嶺的地下水的水动力和化学成分截然不同。

按化学成分來講，德聶泊河右岸的地下水为氯化鈉和氯化物—硫酸鈉型的礦化水。总礦化度为1.2—1.5克/公升。沒有侵蝕性的 CO_2 。

左岸的地下水是重碳酸鈣型的淡水。总礦化度0.4—0.7克/公升。侵蝕性的 CO_2 达28.6毫克/公升。

5. 喀斯特的發育与区域的地史緊密相关。

决定喀斯特發育規律的主要因素是黑海盆地中地壳升降的运动和新第三紀时期海面的層次变化。

化学成分以及岩石的薄層構造和發育良好的層理裂隙对喀斯特發育的強度及其分布的性質起着很大的作用，并且这也决定了淋濾作用的一定性質。

决定喀斯特發育進程的其他因素是石灰岩地層埋藏的性質和在新第三紀时期存在过的不良的排水条件。由于岩層的產狀几乎是水平的，地下水只能在距离相当远的排水区，即黑海盆地進行排水。石灰岩个别岩層以小的孔穴狀出現的区域性喀斯特的發育与上述条件有关。在这种情况下，孔穴發育強

度最大的地帶的位置取決於石灰岩比黑海盆地高出多少以及石灰岩位於某一高度上的時間。

上新統末和第四紀初為德聶泊河排水系統形成的初期。德聶泊河河谷的形成給現在的基岩河岸中的喀斯特進一步的發育造成了不同的條件。

左岸的蓬蒂、默奧齊斯和上薩爾馬特的石灰岩受過強烈的侵蝕。同時形成了具有局部性質的喀斯特的垂直形狀。此外，在左岸範圍內發生上薩爾馬特石灰岩中孔穴的粘土充填物的局部沖刷。

三、卡霍夫卡水利樞紐區喀斯特的工程地質研究

在這個地區內要查明喀斯特現有的狀態和作出其工程地質的評價，須要採取綜合的研究方法。

工程地質勘察證明，在德聶泊河河谷左岸第一和第二河漫灘階地範圍內，喀斯特的垂直形狀特別發育。按成因特征劃分，它們屬於溶蝕侵蝕類型，所有露出的垂直喀斯特形狀都是被砂泥質物質充填的。這些形狀埋藏在第四紀砂層之下，所以在現代地形中它們就沒有顯露出來。

喀斯特的水平形狀有很大的實際意義。溶洞多半沿着岩石沉積面分布，並且互相通連，因而岩石的透水系數很大。溶洞的規模是大小不一的，除了寬和長為 1×1 和 1×2 公分的小孔穴外，也有寬和長為 40×300 公分的大型洞穴。

在石灰岩中可以分出好幾個強烈溶蝕的溶洞帶。由於工程地質條件的不同，構成德聶泊河河谷左岸和右岸的岩石中溶洞帶的數量是不一樣的。

在左岸於中薩爾馬特層中分出第一帶，在上薩爾馬特層

孔穴的成因分类 (以卡霍夫卡和巴

孔穴的成因类型	孔穴形成的主要过程	岩石分类	受溶解和破坏的岩石单元
1. 溶蚀的	被溶物质的溶解和挑出	(1) 含石膏礦巢和亞类松軟石灰岩的充填石灰岩 (2) 繡狀和假繡狀的石灰岩和白云岩 (3) 有机碎屑石灰岩 (4) 細結晶石灰岩	石膏礦巢 (a) 繡狀顆粒, (b) 膠結顆粒的碳酸鹽 (a) 生物化石的骨架和碎屑, (b) 碳酸鹽膠結物 (a) 岩石的主要微粒基質, (b) 方解石細脉
2. 溶蚀潜蚀的	溶解松散和机械挑出	(5) 砂質石灰岩 (6) 白云岩化石灰岩和灰質白云岩	(a) 被溶解的碳酸鹽物質, (b) 在这种条件下游离出的砂質物質 (a) 較易溶解的方解石, (b) 在这种条件下沉淀出的白云岩粉
3. 潜蚀侵蚀的	冲蚀和机械挑出	(7) 有不平的粘土夾層和粘土透鏡体的石灰岩 (8) 帶破碎得剝白堊样之石灰岩夾層的石灰岩	粘土夾層和透鏡体 破碎石灰岩的夾層

表 1

甫洛夫斯克水电站建設区为例)

孔 穴 形 狀	引穴充填物的性質	例 子
管狀的和溝狀的	溶解殘渣	巴甫洛夫斯克
蜂窩狀的	溶解后剩下來的粘土質物質	卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克
海綿狀的和介壳狀的		
縫隙狀的和大小不一的渾圓形的		
大小不一渾圓形的	砂質物質	卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克
决定于岩層構造形成的各种形狀	白云岩粉	巴甫洛夫斯克
沿着層理延展的	部分再沉積的未被冲蝕的粘土殘渣	卡霍夫卡
層狀分布的礦巢	石灰岩破碎的產物	卡霍夫卡

中分出第二、三、四和第五帶。

在右岸于默奧齐斯和蓬蒂石灰岩中僅分出第一、第五和第六帶。

大多数溶洞都部分地被碎的石灰岩物質（石灰岩狀泥質物質），小顆粒的砂和褐色及綠色的粘土所充填，各个溶洞帶的孔隙率在0.4—23.3%之間。

測定各帶岩石的溶洞率采用各种方法：

- （1）目測溶洞面積和礦井總面積的比（溶洞率）；
- （2）攝影法；
- （3）根据作滲透試驗工作时水的損失程度；
- （4）在進行灌漿試驗时計算吸收泥漿耗損量（以鑽孔每公尺計）。

必須指出，前二种方法得出的結果是最好的。

根据岩石岩性研究的結果，試驗室試驗以及野外觀測的結果作者制定了表1中列举出的溶洞成因分类。

采用喀斯特工程地質綜合研究的方法，就能确定出必要的防禦措施及其規模。決定選擇防滲隔水幕規模的主要条件，是减少周边滲透量到对溶洞充填物的穩定性无危害的程度。

在左岸灌漿隔水幕的長度是940公尺，前300公尺是四排的，以后則为兩排的。

在右岸筑的灌漿隔水幕是兩排的，長100公尺。各灌漿孔的間距为0.5—1.0公尺，各排的間距为1公尺。無論在左岸和右岸灌漿隔水幕都要灌到中薩尔馬特砂層的頂板。

四、烏法河上的巴甫洛夫斯克水电站建区的 工程地質条件

为巴甫洛夫斯克水电站設計基礎進行的勘测明确了以下

的工程地質条件。

1. 坝址地段的地質構造特点是具有下二叠紀的厚層喀斯特化碳酸鹽类岩石，它为上下薩尔亭組的石灰岩—康古尔組的白云岩和石灰岩。

碳酸鹽类岩石層的特点是岩石成分为很不均一的。在垂直剖面上有珊瑚瀝青質石灰岩、隱晶石灰岩、生物碎屑石灰岩、鲕狀石灰岩和泥灰質石灰岩以及鲕狀白云岩。

在这些岩石中有的是从微弱到強烈不同程度白云化的石灰岩以及近于純的石灰岩和白云岩。

坝址地段的特点之一是烏法河的古河床重新加深其中充填有平均厚100公尺的新第三紀的沉積。

2. 在坝址地段，特別在接近河谷边缘地段喀斯特岩石的裂隙和喀斯特化很強烈。

喀斯特現象的發育和分布規律在很大的程度上决定于構造裂隙，特別是断裂裂隙。当充填物从裂隙中被往外冲刷的时候，断裂裂隙可能成为与坝肩连接地段的危險的滲透途徑。

裂隙的分布規律如下：裂隙随着深度的增大和愈接近分水嶺而减少。

3. 坝址地段的裂隙和喀斯特化的特点之一是有冰的堆積，这种情况在進行灌漿工作时必須加以考慮。

4. 地段的現代水文地質条件在很大的程度上决定于裂隙和喀斯特現象分布的規律。

喀斯特裂隙水形成了一个統一的被烏法河排洩的含水層。

喀斯特裂隙水化学成分有以下几个特点：

上層水动力帶的地下水是淡的重碳酸鈣水。侵蝕性 CO_2 的含量在61毫克/公升以下。

随着向深处运动地下水富集 SO_4 离子并逐渐变成碳酸、硫酸鈣水。侵蝕性 CO_2 的含量为 $0-47$ 毫克/公升。

5. 喀斯特發育情况与区域的地史有密切的关系。

喀斯特發育的第一階段是和碳酸鹽岩層堆積之后產生的并繼續到中上新統的長期的大陸条件有联系的。由于缺少良好的排洩条件，这一階段喀斯特的特点是發育程度很弱，主要是呈溶洞狀。

喀斯特發育的第二階段是和發生在阿克恰格尔期前并繼續到現在的烏菲姆高原大規模的上升有关。这个階段喀斯特的特点是發育程度很大，并和烏法河河谷的發育有密切联系，烏法河的排水性能对喀斯特的發育和分布規律有很大的影响。

五、巴甫洛夫斯克水电站喀斯特的 工程地質研究

烏法河河谷的地質構造和形成歷史决定了喀斯特地表形狀和地下形狀的發育。

研究喀斯特的形态及其現代状态需要采用綜合的勘测方法。

只有采用綜合的勘测方法才能得出对喀斯特的正确的工程地質評價。

在地表上喀斯特表現为无数的喀斯特漏斗，干的河谷和細谷，隱河和許多的泉。

工程地質勘查証明，从喀斯特漏斗分布的情况中，可以看出喀斯特与区域地貌特征間的关系。大多数喀斯特漏斗都分布在峽谷的底部和边坡上。按成因來講，这些喀斯特漏斗为溶蝕潛蝕的。也有时喀斯特漏斗分布在喀斯特泉出露于地

表的地方。根据成因这些喀斯特漏斗为上升泉(如“紅色泉”)的溶蝕漏斗。

地下喀斯特的典型形狀有：洞穴、落水洞、喀斯特暗河和溶洞以及發育相当良好的岩石的孔穴。

用大口徑(900~1300公厘)的鑽孔詳細研究喀斯特的地下形狀証明喀斯特地下形狀和裂隙的性質有着極密切的联系：岩石喀斯特化最厉害的地帶恰好位于裂隙最發育的地段。因此以工程地質观点來評價喀斯特，就必須共同研究岩石的裂隙和喀斯特作用。

喀斯特的工程地質研究可以弄清建設地段上喀斯特發育的基本規律：

(1)在鄰河谷的地段上，喀斯特現象随着距分水嶺距离的增加而逐漸减少；岩石喀斯特化最剧烈的地帶位于烏法河重又加深的河谷邊緣上；

(2)喀斯特的發育有一个一般規律——即随着深度而减少；

(3)喀斯特的發育和喀斯特化岩石的裂隙有密切的联系。

查明这些規律有很大实际意义，因为它们决定着对河谷每个地段所必須采取的防滲措施的性質及其規模的選擇，即：

(1)在左岸和坝的連接处建筑一个長350公尺的單排灌漿隔水幕，鑽孔的間距是2—4公尺；

(2)在河谷的中心部分，在整个長度內，建筑一个双排灌漿隔水幕，排間距离为1公尺，鑽孔間距为0.5—1.0公尺；

(3)在右岸和坝的連接处建筑一个長为130公尺的單排灌漿隔水幕，鑽孔間距为2公尺。

六、研究卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克水电站区 碳酸鹽类岩石溶解性的實驗室实验工作

用溶解岩石天然过程的模型法進行實驗室的实验工作时，作者在目前提出了以下的基本任务：

- (1) 对卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克水电站区各种类型碳酸鹽类岩石的溶解性作出比較评价；
- (2) 查明岩石的各种物理性質对岩石溶解速度的影响；
- (3) 对卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克水电站未來水庫中天然水与这些区域中碳酸鹽类岩石的相互作用作出近似评价；
- (4) 描述溶解作用和碳酸鹽类岩石的破坏，以便估計喀斯特發展的速度。

1. 对卡霍夫卡和巴甫洛夫斯克水电站 地区碳酸鹽类岩石溶解性的评价

为此目的我們研究了28个岩石样品。为了加速岩石的溶解作用在實驗室条件下加大了水和岩石顆粒的接触面，此外还采用了溶解的 CO_2 含量高的水。在蒸餾水中游离的 CO_2 含量在404—540毫克/公升之間。使水在直徑为9公厘的玻璃管中渗透，管内有5克重的粉狀岩石(顆粒由0.5到1.5公厘)。在整个試驗过程中，通过裝有岩石样品的管子的水流速度是不变的——6.78公尺/晝夜。試驗是采用大理岩作比較标准。

从这些試驗結果中可以得出下列結論：

- (1) 白云岩所有样品的溶解度比大理岩小，相对的溶解速度小于1；
- (2) 石灰岩所有样品的溶解度比大理岩大，相对的溶解速度大于1；

(3) 实验岩石的溶解度不完全决定于岩石中矿物的百分含量;

(4) 微粒再结晶的各种石灰岩具有最大的溶解度——其相对溶解速度为1.39—1.52, 特别是其中含砂质物质的石灰岩, 其相对溶解速度达1.65;

(5) 岩石的次生转化以下列方式影响着溶解作用: 岩石的再结晶作用, 岩石的多孔性和显微孔穴能增大溶解速度, 而岩石的铁化和白云岩化作用则减低这种速度。

为查明岩石成分对溶解作用的影响。我们曾研究过岩石样品并进行了长时间的溶解。

样品的鉴定列于表2中。

表2

号 序	样品 编号	比 重 克/公分 ³	孔隙度%	礦物含量% (根据化学成 分换算)		不 溶 物 質	岩柱長度 (公分)		試驗后重量 的 耗 損	
				CaCO ₃	CaMg (CO ₃) ₂		試驗 前	試驗 后	克	%
1	15	2.69	30.11	96.18	3.03	1.24	7.2	1.2	4.67	93.4
2	27	2.76	25.00	0.99	51.13	46.00	6.5	6.1	2.68	53.6
3	29	2.86	11.25	11.26	86.43	0.94	6.5	1.5	3.77	75.4
4	41	2.71	1.17	93.48	5.45	0.40	5.7	0.3	4.72	94.4

試驗持續了30个晝夜, 每个样品渗透了15公升水, 这些岩样溶解的结果列入表3。

表3

号 序	样品 编号	被溶解掉的岩石量(毫克)		溶解剩余的物質 (毫克)	冲洗液的耗損 (毫克)
		CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂		
1	15	4649	—	330	21
2	41	4560	—	280	160
3	27	—	2511	2320	169
4	29	—	2567	1230	803