

中国科学院
水利电力部水利水电科学研究院

研究报告

9

月子口水庫 砂砾地基中的混凝土防渗墙

水利电力出版社

目 录

提要	2
前言	3
一、概述	5
1. 工程概况	5
2. 混凝土防渗墙现状简介	11
二、鑽孔工作	16
1. 机具	16
2. 钻进及钻进前的准备工作	23
3. 人力抽筒鑽孔	35
三、泥浆	39
1. 泥浆作用及控制指标	39
2. 泥浆制备及造浆用粘土	51
3. 泥浆循环及淨化	56
四、混凝土的浇筑	60
1. 混凝土配合比及其性能	61
2. 混凝土的浇筑	67
五、工程质量评价	73
1. 試驗区开挖观测	73
2. 岩心鑽孔及压水試驗	76
3. 混凝土柱与各方面結合部分的质量	77
六、施工管理	82
1. 施工組織	82
2. 現場布置	83
3. 計劃調度与統計工作	87
七、技术经济指标	94
1. 工吋分析	94
2. 单价分析	99
八、混凝土防渗墙設計方法	101
1. 抗滲性設計原則	102
2. 結構应力計算	109
3. 混凝土防渗墙結構型式	116
九、結語	117
附录一 就地浇筑混凝土防渗墙施工操作規程	121
附录二 就地浇筑混凝土防渗墙施工用机具設備一覽表	144
参考文献	148
俄文提要	149

月子口水庫砂礫地基中的混凝土防滲牆

水利水电科学研究所
青島市月子口水庫工程指揮部
建筑工程部給水排水設計院

提 要

月子口水庫位于距离青島市郊 39 公里处。高 26 米的土坝地基系厚达 18 米、帶有大孤石的粗顆粒砂礫冲积层，其渗透系数为 250 米/昼夜。冲积层下为不透水的岩石，其单位吸水率 $\omega \leq 0.03$ 升/分。

根据月子口水庫的具体情况，以就地澆筑混凝土防滲牆作为地基防滲措施最为合适。混凝土防滲牆是砂礫地基防滲新方法之一，在中国尚系初次应用。由于缺乏混凝土防滲牆施工經驗和規程指示，在水利水电科学研究所、月子口水庫工程指揮部及其他兄弟单位协作之下，在月子口水庫工地进行了必要的研究工作，并制訂了施工規程。

混凝土防滲牆由 959 个直徑 60 厘米的混凝土柱組成，混凝土柱彼此相互搭接，穿透整个冲积层，直到基岩为止。用冲击鉆机鉆孔，泥浆护壁和提取鉆屑，并在鉆孔中泥浆下澆筑混凝土形成混凝土柱。

在正式施工前，曾做一直徑 3.0 米的圓形試驗豎井，井圈由 20 个直徑 60 厘米的混凝土柱組成，并将其土料全部挖出，直达基岩。在試驗豎井中的观测証明混凝土防滲牆质量良好，坚固而不透水。

土坝地基內的混凝土防滲牆在 1958~1959 年內修建，共历时 6 个月。1959 年夏季土坝建成，水庫部分蓄水，运用情况下的混凝土防滲牆同样显示出其良好质量，在 15 米水头（相当于設計水头的 75%）作用下，坝下游的地下水位非但没有上升，而且下降了 2 米左右。

与其他防滲帷幕相比較，混凝土防滲牆具有很多优点。在月子口水庫

的具体条件下,与大规模回填粘土的方案相比较,可以降低造价 70%,节约劳动力 11,500 人,缩短工期 2 个月。

文中讨论钻孔,泥浆和混凝土的质量及其评价,施工和设计方法,并提出今后的研究方向。附录中列出混凝土防渗墙的施工规程。

前 言

青島市月子口水庫,是国内首次采用就地澆注混凝土防渗墙的方法,来解决坝基砂砾层的渗漏問題。防渗墙的修建,从 1958 年 7 月开始,经历了試驗性的和正式施工两个阶段,于 1959 年 5 月完成。这一措施,对于水庫的提前完成和經費的节省,具有直接的意义。

用就地澆注混凝土防渗墙的方法来解决坝基砂砾层的渗漏問題,对我国說来还是一项新技术。我們过去完全没有这方面的經驗。这就决定了月子口水庫混凝土防渗墙的澆筑工作必須通过試驗来摸索前进。为此,水庫工程指挥部成立了一个專門的試驗工作組。参加試驗工作的有水利水电科学研究院曹健人、蔣元駒、葛祖立、雷祥林、潘仁根等同志,月子口水庫工程指挥部唐国瑞、徐步升、沈希林、王木乔等同志,給水排水設計院陈嘉猷同志,安徽省建筑厅張耀庆、吳光輝等同志,北京石油学院尹宏錦同志,北京地質勘探学院馮士安同志。

防渗墙的試驗和施工工作,始終是在中共青島市委和中共月子口水庫工程工委的正确领导和深切关怀下,以及各方面的大力支持下来进行的。参加这一工作的所有职工,也都充分发挥了敢想、敢說、敢做的共产主义风格。这样,才能在短短的半年多的時間内,克服了新技术、新机械、新工人的三重难关,胜利地完成了任务。从此,在資本主义国家被剝削阶级据为专利的方法,

已为我们通过自己的实践所掌握，而为我国社会主义建设服务。

在試驗过程中，我們曾得到苏联使用混凝土防渗墙成功的詳尽資料。这些資料对某些問題的闡述給了我們不少的启发，使試驗工作少走了很多弯路。在施工过程中，还得到几位在华工作的苏联专家的指导。这一事实再一次地体现了苏联对我国的无私帮助。

关于月子口水庫防渗墙的試驗結果和施工情况，在早曾有过一个初步的总结，在有关的会议上交流过。后来又分别写成了試驗总结和施工总结两个文件，前者由曹健人、葛祖立、雷祥林、張耀庆等同志編写，后者由蔣国澄、徐步升、王木乔、沈希林、張延令、梁保护等同志編写，最后都經過集体討論。

水利水电科学研究院曾进行过混凝土与泥浆联合作用及混凝土中夹有泥浆层的渗透試驗，对混凝土防渗墙的抗渗性及混凝土澆筑方法也进行了研究，由蔣元駒同志編写成“混凝土截水墙防渗效果及其水下混凝土的施工”的研究报告。

給水排水設計院曾对混凝土防渗墙的结构应力計算方法进行了一研究，推导出不同情况下混凝土防渗墙所受弯矩和切力的計算公式，由馬庆驥同志編写成“混凝土孔柱截水墙结构計算”的文章。

本书是由水利水电科学研究院蔣国澄同志根据有关資料重写而成，其中叙述了钻孔、泥浆、混凝土的澆筑、工程質量评价、施工管理、技术經濟指标等問題，对混凝土防渗墙的設計也进行了詳細的討論，在結語中还提出了設計和施工方面存在的主要問題和今后的研究方向。

由于混凝土防渗墙是一项新技术，国内首次試用，积累的經驗也不多，并且本书写得也很仓促，謬誤不当之处必不可免，希讀者多加批評指正。

一、概 述

1. 工程概況

月子口水庫位于青島市近郊嶗山西麓的白沙河上，修建水庫的主要目的是供給青島市工业及生活用水。白沙河为青島市主要河流之一，发源于嶗山中部的北九水庵及上葛場二地，在毕家村附近会合，北流至涼泉村后折向西流，在女姑口附近流入黃海胶州灣。河流全长30公里，流域面积200平方公里。

根据月子口水文站記載，年平均流量为 $1.38 \sim 1.91 \text{米}^3/\text{秒}$ ，1956年实测最大洪峯流量为 $760 \text{米}^3/\text{秒}$ ，最早季节可以断流。年平均雨量为771.6毫米，但集中于7、8两月，約占年雨量的70%左右。可見水量的季节变化很大，雨季山洪暴发，河水急流入海，旱季地面徑流断絕，造成水源不足。为此极需在此修建水庫，以滿足全市日益增长的工业及生活用水的需要。

坝址位于白沙河流出嶗山西麓的最后一个谷口，嶗山余脉隔河相峙，形成一个狭窄地带，而上游河面寬闊，形成盆地，地形极有利于修建水庫。白沙河在坝址以上长约20公里，集水面积101平方公里。拦河坝为粘土斜牆砂砾石坝型，高26米，长682米，頂寬6米，底寬171米，上游坡 $1:3 \sim 1:3.5$ ，下游坡 $1:2.5$ ，最大水头差25.4米。土坝断面見图1。形成的水庫面积4.5平方公里，回水长度約5公里，庫容为4650万 米^3 。

根据第一机械工业部武汉勘测队的勘察报告，水庫区均为花崗岩体，侵入岩脉与圍岩一般接触紧密，其原生构造节理、岩脉及构造破碎带大部分被粘土填充，透水性微弱，分水岭高而远，相邻河谷河床高出水庫回水綫标高，且河間地段均为不透水之花崗岩层，水庫两侧下降泉大部分分布在水庫回水綫以上，最早期間河谷中尚有潛水緩流，且水位变化不大，微雨后水位即上升，

說明庫區沒有向外滲漏途徑。水庫兩側還有透水微弱的第四紀粘土層分布，也有阻擋庫水外滲的作用。因而認為除溢洪道附近分水嶺較為單薄以外，水庫區並無向外滲漏的可能。此外填肩部分的岩脈、斷層破碎帶均與河斜交，尚未發現有通向庫外者，故繞填滲漏的可能性很小，而且可以用水泥灌漿方法處理。

填基下基岩為堅硬的花崗岩體，壓水試驗的單位吸水率很低，但有個別的破碎地帶。河床沖積層為砂、礫、卵石所組成，有少量粘土透鏡體，其厚度一般在15米左右，最深处達18米^①，其組成在水平和垂直方向無顯著變化，主要為粒徑10~40毫米的卵石，並有大至40~50厘米者，一般含砂粒30~50%。試驗豎井開挖時所取得的沖積層砂礫石顆粒大小分析曲線見圖2。兩岸填頭附近沖積層較薄，但有大卵石及大漂石埋入其中。沿帷幕中心綫的地質剖面見圖3。

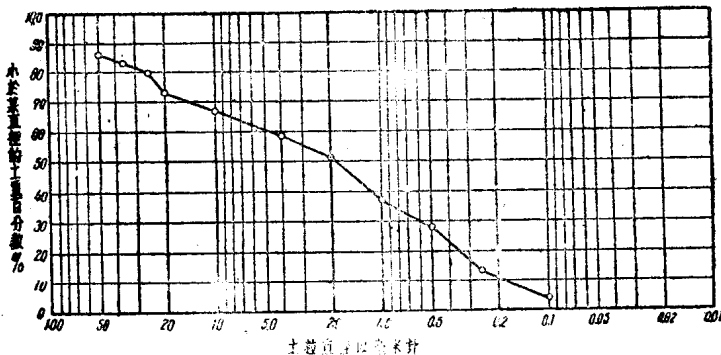


圖2 月子口水庫填基砂礫石顆粒大小分析曲線

勘探時由於供水緊張，恐影響附近水廠滲井出水量，沒有進行抽水試驗。根據青島市自來水公司經驗，用6吋單級離心泵抽水，可使直徑3米的井底滲水的井水位降低7米左右，涌水量約為150噸/小時，估計沖積層的滲透系數當在250米/晝夜左右。

① 在實際施工中发现沖積層的最大深度為20.95米。

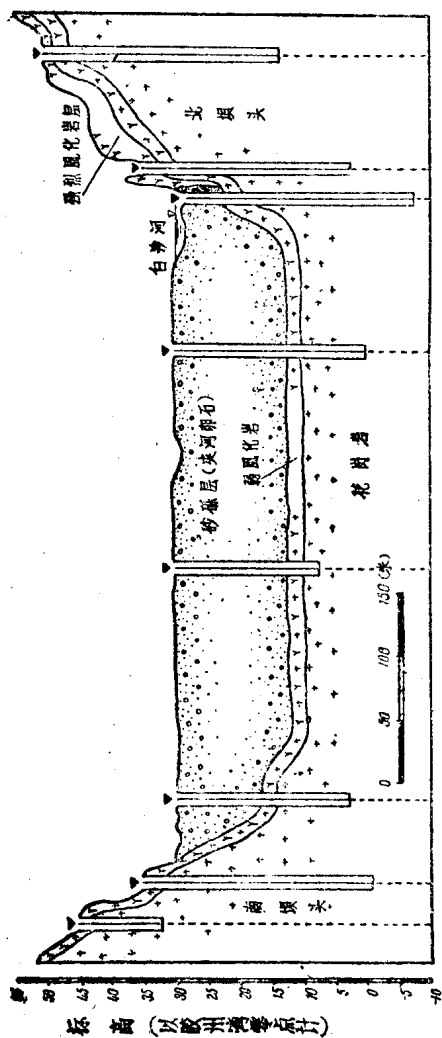


图3 防渗帷幕中心线上的地质剖面图

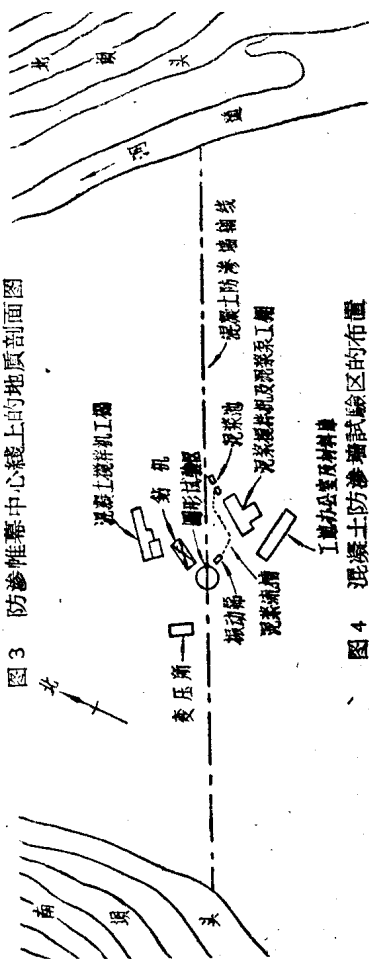


图4 混凝土防渗墙试验区的布置

在建筑工程部給水排水設計院的扩大初步設計中，估計如坝基不加处理，其渗流量将达 52,000 吨/昼夜，显然将使水庫的經济效益大受損失，为此必須研究一种有效而又經濟的防渗措施。由于防止渗漏的要求較高，粘土鋪盖不能完全防止水的渗漏損失，故需研究采用垂直防渗帷幕。

在上述扩大初步設計中曾考虑过大开挖回填粘土、就地澆筑混凝土防渗牆、水泥粘土灌浆及連鎖管柱等防渗措施，并作过比較方案。由于灌浆方法工作量大，工效低，造价高，需消耗大量鋼管；連鎖管柱施工技术和設備复杂，需大量鋼筋水泥等建筑材料，而且鎖口不易下沉，成本高，因此放弃以上方案。当时初步認為就地澆筑混凝土防渗牆是最为可行的方法，可以在設計中采用，但因为这是一項新技术，国内尚无經驗，国外也无詳尽資料，缺乏实际論証，故决定在扩大初步設計中暫按大开挖回填粘土的方案估計工作量和編制預算，同时与有关单位协商，在工地作混凝土防渗牆的施工試驗，取得适当論証后考虑采用。

試驗区由20个混凝土柱組成，混凝土柱的直徑60厘米，中心距50厘米，位于土坝的帷幕綫上，将来即作为防渗帷幕的一部分。20个混凝土柱圍成中心直徑为3.18米的圓形豎井，以备作开挖观测之用。另外在試驗区外做了一个准备性混凝土柱，深10.5米，未达岩盘。試驗区的布置見图4。試驗由1958年7月开始，到“十一”前开挖完毕。

在試驗取得初步成果以后，給水排水設計院就根据試驗情况，决定采用这一方法，并进行具体設計，同时提出設計要求和技术措施。青島市委也下决心在月子口水庫工程中采用这一新方法，由各方面調集干部和工人；由青島市有关各工厂試制鉗机、震动篩、泥浆泵、攪拌机、冲击鉗头等机械設備，及时开工。

施工由1958年9月18日开始，1959年5月4日完成，共完成959个混凝土柱，总长度15,839米。使用鉗机10台，在1959年11月陸續到齐，共用鉗机1663.3台日。两岸接近坝头部分采用明挖方法，做浆砌块石及混凝土齿牆，与混凝土防渗牆連接。地基处

理完成情况见图 5。

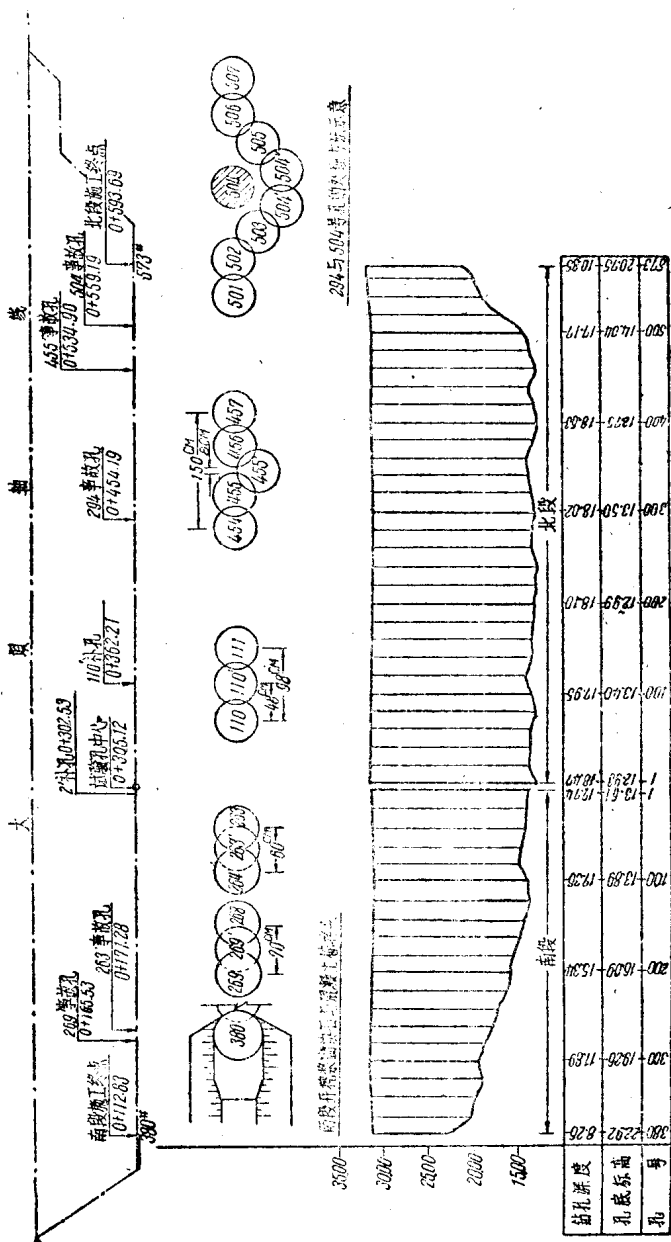


图 5 月子口水庫地基处理竣工图

2. 混凝土防渗墙现状簡介

就地浇筑混凝土防渗墙是意大利所首創的处理砂砾地基上渗透問題的方法，为意大利、法国等西欧资本主义国家某些工程公

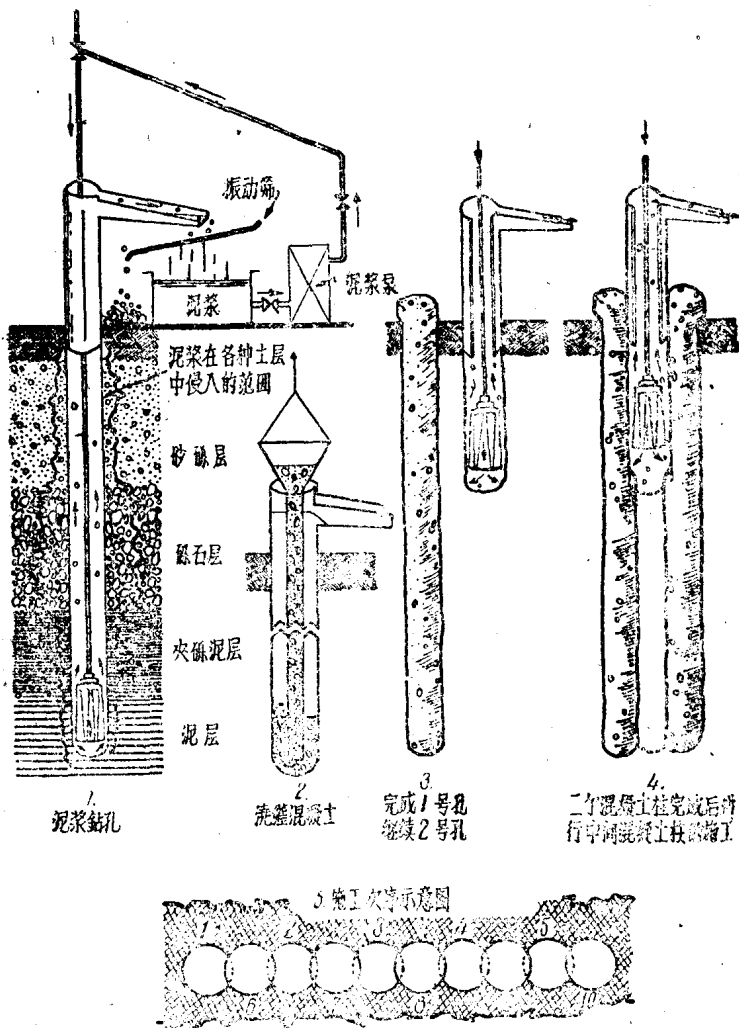


图6 圆柱形混凝土防渗墙施工程序示意图

司所專利，沒有發表過詳盡的資料，現在所能得到的都是一般情況的介紹。1957年7月至10月中國赴西歐水利考察團訪問西歐時，了解這一施工方法，但他們對某些重要問題故意避而不談。

根據中國赴西歐水利考察團帶回的資料^[1]，修築混凝土防滲牆的方法有兩種。第一種是I.C.O.S.維達爾(I.C.O.S.-Ved-er)^①型的混凝土圓柱牆；第二種是羅地沃麥可尼(Rodic-Marconi)型的混凝土板樁牆。前一種混凝土防滲牆的修築方法是用直徑60厘米(或80厘米)的鉗頭在地基上每隔1米(或1.2米)鉗一孔，鉗孔時並通過鉗杆和鉗頭中心用壓力打入斑脫土與水合成的泥漿。這種泥漿的特點是靜止時能立刻成為一種膠體，再度攪動時重新成為液體，同時它侵入無粘性或低粘性土中後，可以大大地增強土的凝聚力，這樣可使鉗孔孔壁保持直立而不坍塌。鉗好一孔後可將泥漿沖淡，然後用澆筑水下混凝土的方法造成一就地澆筑混凝土柱。以後在兩混凝土柱間加鉗中間孔，與相鄰已澆好的混凝土柱重合10厘米，在這些孔中也澆水下混凝土，從而形成由一排互相重迭一部分的混凝土圓柱組成的混凝土防滲牆。其施工示意圖見圖6。

羅地沃麥可尼型混凝土防滲牆的築法是用同樣的鉗頭和泥漿鉗成長6~15米的第一道槽，鉗好後在槽兩頭各打一管柱，在其中澆水下混凝土。其次在離開此溝5~15米處鉗第三道槽並築第三道混凝土牆。依次鉗第五道槽等。然後去掉兩端的管柱，鉗第二道槽，澆筑第二道牆等，從而連成一道連續的混凝土防滲牆。其施工示意圖見圖7。

這兩種方法適用於砂礫石以及任何細粒土，不過泥漿的濃度應該隨不同的土壤而異。用這兩種方法築牆的深度可達100米。

在中國赴西歐水利考察帶回的另一份資料^[2]中，^[2]也有I.C.O.S.維達爾型牆施工方法的介紹，並有一些工程實例。蘇聯水利工程建設雜誌也有過類似的報導^[3]。

① I.C.O.S.是意大利蘭鉗樁和灌漿工程公司的第一個字母所組成的簡稱。

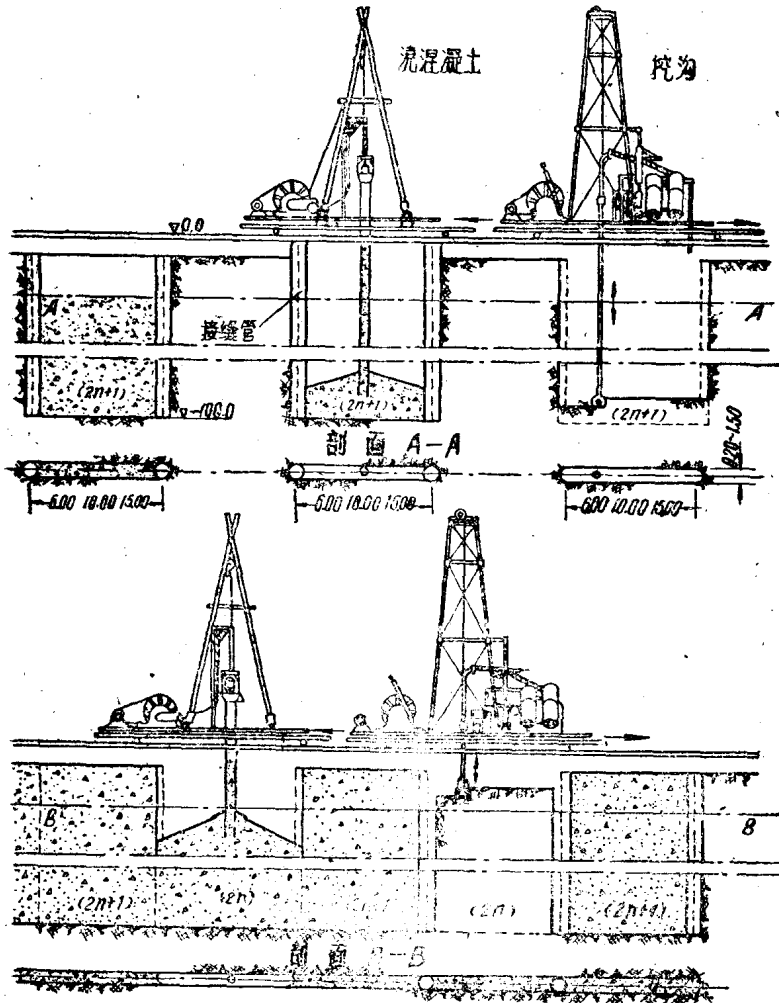


图 7

目前使用的是 60 及 80 厘米的冲击钻头，最大深度曾达 94.3 米，用泥浆循环方法钻进。此时部分泥浆渗入土中，在钻孔四周形成一粘结性很大的不透水幕，并在孔壁形成一比较密实的泥皮。在由粗砂及砾石组成的土层中，发现泥浆渗入土中达 1.5 米。

同时由于泥浆柱和外界压力差的作用，钻孔不需保护也能維持垂直。終孔后用水将泥浆冲稀，然后用混凝土罐法澆筑混凝土。

另外，混凝土柱還具有很大的承載能力，3根直徑为0.6米的混凝土柱，在120吨荷載作用下，仅发现0.4毫米的沉陷量，这表明混凝土柱除用于防滲外，也可用作桩基、豎井井圈、擋土牆等受力結構。

該資料中还介紹了几个工程实例，例如：

(1) Volturmo-Garigliano 水电站的溢流坝及取水建筑物修建在混凝土桩基上，桩的深度約为18米，直徑約为53厘米，总长度11,600米。在坝的上游面及調节池周圍修建了一道混凝土防滲墙，其长度約为1,550米，深度为12~35米，面积約为30,000米²。单桩直徑約为60厘米，中心距50厘米。

施工前做个試驗井，內徑2.3米，深度12.5米，由18根混凝土柱組成，水位低于地面0.5米。試井开挖后发现混凝土牆完全不透水，通过井底砂壤土层的渗透水量为每米牆0.001公升/秒。

工地上用13台机器日夜不停打了二年，在1952年底完成。进行钻孔及澆筑混凝土沒有一根失敗，一部分牆有一边暴露在外面，深度为5米，并在另一側承受水压力。露出的牆表明是密实的、沒有缺陷的，而且完全不透水，同时可以清楚地看出，混凝土牆周圍的粗河卵石被泥浆胶結得很緊密。

(2) S. Ambrogio 电站尾水渠的防护建筑物正在进行混凝土牆工程，以免开挖时因自流地下水而引起严重的滑坡現象。

(3) Po河右岸的 Ferrara 給水工程中第一座抽水机站修建在混凝土桩牆上，最大深度12米，面积1,000米²。溢洪道基础、沉沙池及第2座抽水机站也是修建在混凝土桩上。

(4) 那不勒斯的 Capuano 水电站基础修建在混凝土牆上，深达20米，面积1,100米²，桩牆为曲綫形的帷幕，以防止严重沉陷。

苏联經过一个时期研究后，也在某水电站成功地用这一方法建成一道混凝土防滲牆。

另外苏联建筑科学院地基基础科学研究所也研究过用泥浆下钻孔和浇筑混凝土建造深置墩柱的方法，并在实验室和半生产条件下对此方法进行实验研究，同时在莫斯科与古比雪夫間某一公路桥梁的施工中采用，成功地在水下进行钻孔和浇灌混凝土，造成直径1.8米，深13~20米的深埋墩柱^{[4][5]}。

他们在1950年举行的生产性实验是在直径各为2米、深度不足3米的试坑和两个直径各为1米、深度为9.1及18.3米的井孔中，在泥浆下浇灌混凝土。1951年研究了两根在这些井孔中灌注混凝土而筑成的实验性墩柱的整体性，检验了混凝土质量及其与土壤的接触情形。试验中也曾研究过钻孔工艺，规定清洗孔底的方法，确定泥浆的必要质量。

钻孔用回旋钻机进行的，直径可达1.0~2.0米，深可达50~60米，泥浆搅拌机容量4米³，泥浆泵泵量为100米³/小时，压力达30大气压，用正循环泥浆冲洗钻进。泥浆用当地粘土配制，比重1.1~1.3，粘度18~25秒。钻孔完毕后，冲洗井底1~2小时，以除去井底沉积的泥砂。

混凝土用导管法浇筑，导管直径25厘米，每节长1.0~2.0米，用8个螺栓及橡皮垫连接，在最下一节上还装有开关设在地面的震捣器，以便震动导管，使混凝土易于流出。在2米直径的试坑中，导管紧贴坑壁所做的试验，表明在此条件下可以获得质量优良的混凝土，没有混入泥浆和产生粘土夹层的现象，混凝土与土的接触也很好。

在意大利还有用反循环泥浆方法钻槽形孔的做法^[6]。

青岛市月子口水庫地基防渗处理采用圆形混凝土柱组成的混凝土防渗墙，这种方法在国内还是首次应用，并取得完全成功。本文将详细介绍月子口水庫的工程经验。

此外北京市密云水庫白河主坝砂砾地基处理也试验成功了由槽形孔组成的混凝土防渗墙，并已完成了部分工程。辽宁大白梨、紅山水庫也试验成功了钻槽形孔建造混凝土防渗墙的方法。安徽蒙城渦河閘修复工程也正在进行混凝土墙的施工。浙江青田甌

江水电站也正在进行这一方法的試驗，准备作为填基砂砾复盖层的防渗措施。

山东峡山水庫在1958年大跃进中，本着土洋結合的精神，仿照混凝土防渗墙的做法，用农民打井工具鉆孔，下粘土柱代替混凝土作填料，試驗成功了粘土柱防渗帷幕的施工方法，現在已完成一排这种帷幕的施工。

可見这种方法已在我国水利水电建設中得到应有的重視，在很多工程中創造性地加以应用，在施工方法上也获得不少經驗教訓，为今后普遍推广打下良好基础。

在这种混凝土防渗墙的設计方面，尙未研究出合理的計算方法，有关的参考資料也很少，今后还需要进行这方面的工作。

二、鉆孔工作

月子口水庫混凝土防渗墙在試驗及施工时采用的是60厘米圓形孔，中心距50厘米，用YKC-20 C型冲击鉆机鉆进，正循环泥浆护壁及提取鉆屑。由于混凝土防渗墙的工作条件，要求鉆孔垂直和位置正确，以免影响相邻混凝土柱的相互搭接，另外，也要求进尺快，又要保証孔壁不坍，因此它与一般地質及石油鉆井不同。在这一节中介绍机具、鉆进前的准备工作、鉆进等方面的經驗。为了土洋結合，加速工程进度，还用人力抽筒法鉆了60个孔，本节內也将介绍人力抽筒鉆孔的方法。

1. 机 具

混凝土防渗墙施工用的主要机具有YKC-20 C型鉆机、泥浆泵、震动篩、泥浆攪拌机等，大多利用原有机具，略加改装，并未作专门設計。

(1) YKC-20 C型鉆机 我們在試驗中用的是YKC-20 C型鉆机，系太原矿山机械厂出品，原系鋼繩冲击式，鉆具重量可达