

坝工丛书

潘家铮

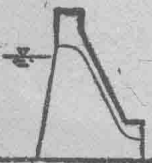
# 重力坝设计

水利电力出版社

◁ 坝工丛书 ▷

# 重力坝设计

潘家铮



水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书以国内筑坝经验为主，并吸收了近年来国外筑坝经验编写而成的，书中系统地介绍了重力坝设计的理论和方法。

书中主要内容包括：概论、重力坝的布置和水力设计、坝体断面设计和稳定分析、地基分析和基础处理设计、重力坝的应力计算——材料力学法、重力坝的应力计算——弹性理论法、重力坝的动力分析和抗震设计、重力坝的细部结构和观测体系、重力坝的分缝和温度控制、特殊重力坝等。

本书主要供水利水电工程技术人员参考，也可供高等院校水利专业的师生参考。

## 坝 工 丛 书 重 力 坝 设 计 潘 家 铮

\*

水利电力出版社出版  
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售  
水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 50印张 1145千字 1插页  
1987年12月第一版 1987年12月北京第一次印刷  
印数0001—1260册 平装 定价11.75元  
书号15143·6463



## 序 言

重力坝是一种古老而重要的坝型，具有许多明显的优点，对于我国很多河流的具体筑坝条件尤为合适。建国以来，我国兴建的大中型水利水电工程的拦河坝中，各种类型的重力坝始终占有较大的比例。因此，对重力坝的设计和施工技术进行总结和提，具有重要意义。

作者在二十年前曾编写过一本“重力坝的设计和计算”，对当时的重力坝设计经验作了些总结，但谬误之处较多。近二十年来，国内外坝工技术有了飞速的进步：新坝型不断出现、坝的高度和工程规模不断刷新、分析和试验技术不断发展、科研成果大量涌现。因此，旧作已不能适应当前的需要，而在水利电力出版社的鼓励下，作者决定进行全面改写，力图稍能跟上时代步伐，反映近年来国内外的进展和成就，并以国内的经验为主。

此次编写工作开始于1978年，并由出版社致函各有关设计单位和专家，广泛征求意见，接到了数十封热情洋溢的复信。作者十分珍惜这些极其宝贵的建议或意见，在编写中都仔细加以考虑。所以属稿七年间一再修改，希望能尽量满足广大读者的要求。

在编写过程中，得到很多专家的指导和协助。例如，有关重力坝的发展史的论述，是汝乃华工程师研究坝工史的部分成果；在撰写泄洪消能章节时，得到水利水电科学研究院陈椿庭咨询及李桂芬所长等的指导；在应力分析问题上，水利水电科学研究院于晓中所长给予协助并亲自撰写了断裂力学的内容；水利水电科学研究院陈厚群所长对动力分析一章代为编写详细提纲，进行协助；有关重力坝的监测内容多系南京自动化研究所储海宁工程师提供；温度应力及控制方面的资料，则多系朱伯芳工程师为首的研究组科研成果。成书后，全稿复承陈椿庭、沈崇刚、李浩钧、赵佩钰、朱伯芳、陈厚群、张有天同志悉心审阅、多所匡正。因此，本书实际上是一本集体创作。没有这些专家的全力协助，本书是无法完成的。

本书涉及范围较广，在编写中，作者除引用自己过去和近年发表过的论著的内容外，也引用了大量国内外的有关资料，并特别注意我国中青年同志的著述。对此，作者尽量注明出处，对公开出版的书刊，列为各章的参考文献；对某些未正式出刊的资料，则在页下注中说明。引用一些重要成果时，已征得原作者的同意，在此，表示深切感谢。但由于引用资料较多，恐不免有漏注情况。另外，坝工技术资料浩瀚，作者所见极为有限，又定有许多重要成果未能总结在内。

由于重力坝是比较简单的大体积水工建筑物，结构作用明确，分析设计比较简单，加之近年来计算机和模型试验技术迅速发展广泛应用，许多二三十年前认为不能解决的问题都已能方便地解决，似乎重力坝技术的发展已到了尽端。实际上，情况远非如此。研究工作每深入一步，就暴露出新的问题，迄今为止，有关重力坝及其地基工作状态还有很多情况未为我们掌握，大量复杂问题尚未解决，甚至可以说，重力坝的设计及建设还不能称为

是一门严谨的科学，而在相当程度上还有赖于过去的经验和工程师的判断。这就是重力坝坝工技术目前的情况。因此本书在介绍近年来的各种进展和新技术、新理论、新分析方法的同时，也经常提到存在的问题和发展的方向。基于同样原因，本书对某些似乎不很成熟的理论或方法，也加以扼要介绍。

在坝工设计中，工程界长期应用工程制单位，尤其对于力及应力单位传统采用重力（tf、tf/m<sup>2</sup>）制。遵照国务院1984年发布的“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”，本书一律改用我国法定计量单位。但在坝工计算中，应用工程制有其方便之处，所以对某些计算可以仍沿用过去的计算格式而将最后成果化为法定单位。本书在必要时详细说明两种单位的区别和实用的计算方式。书中极少数转载的曲线如不宜改动单位的，则专门加以说明。

如前所述，本书改写虽历多年，数易其稿，并得到许多专家的指导和协助，但由于受作者水平及条件所限，谬误和不妥之处在所难免，作者诚恳期待广大读者给予指正。

潘家铮

1985年10月于水利电力部

# 目 录

序言	
第一章 概论	1
第一节 重力坝的发展史	1
第二节 坝工建设中重力坝的位置及其主要特点	10
第三节 重力坝的分类	19
第四节 设计要求、设计内容及基本资料	24
第五节 常用的术语和符号	30
参考文献	34
第二章 枢纽布置和泄洪消能设计	35
第一节 枢纽总布置	35
第二节 泄洪建筑物的选择和布置	42
第三节 溢流面曲线设计和水力计算	48
第四节 溢流面的空蚀和防止	58
第五节 溢流坝的水流衔接和消能防冲	68
第六节 挑流消能设计	71
第七节 底流消能设计	81
第八节 消力戽和面流衔接	94
第九节 坝内的泄水道	103
第十节 收缩式消能工和溢流厂房	113
参考文献	122
第三章 坝体断面设计和稳定分析	123
第一节 作用在坝上的荷载	123
第二节 荷载组合和断面设计原则	143
第三节 重力坝的抗滑稳定核算	145
第四节 重力坝的经济断面选择	148
第五节 深层抗滑稳定	158
参考文献	183
第四章 地基分析和基础处理设计	185
第一节 概述	185
第二节 地基中的应力和变形分析	186
第三节 基础开挖和固结灌浆	199
第四节 软弱岩层和断层破碎带的处理	203
第五节 深层抗滑稳定问题的处理	216
第六节 基础中的渗流和阻水及排水	226

参考文献 .....	266
<b>第五章 重力坝的应力计算——材料力学法</b> .....	<b>267</b>
第一节 概述 .....	267
第二节 分应力和主应力的计算 .....	268
第三节 成果表示和计算表格 .....	277
第四节 渗透压力所产生的应力的计算 .....	282
第五节 材料力学分析法的改进 .....	290
第六节 坝体变位计算 .....	306
第七节 铰接式及整体式重力坝的分析 .....	315
第八节 施工分缝及分期施工对应力分布的影响 .....	324
第九节 坝踵裂缝的稳定性及扬压力的设计图形 .....	342
参考文献 .....	353
<b>第六章 重力坝的应力计算——弹性理论法</b> .....	<b>354</b>
第一节 概述 .....	354
第二节 无限楔体的经典解答及其应用 .....	357
第三节 自应力函数和地基刚度的影响 .....	384
第四节 有限单元法分析及其应用 .....	402
第五节 非线性有限单元分析和空间有限单元分析 .....	421
第六节 断裂力学在重力坝设计中的应用 .....	445
参考文献 .....	457
<b>第七章 重力坝的动力分析和抗震设计</b> .....	<b>459</b>
第一节 地震活动 .....	459
第二节 弹性体系的动力分析 .....	464
第三节 重力坝的动力分析 .....	479
第四节 拟静法和结构试验 .....	502
第五节 重力坝的抗震设计 .....	512
参考文献 .....	528
<b>第八章 重力坝的细部结构和观测体系</b> .....	<b>530</b>
第一节 坝内的孔口和廊道 .....	530
第二节 坝内的大孔口 .....	582
第三节 闸墩和导墙 .....	590
第四节 重力坝的监测设计 .....	597
参考文献 .....	621
<b>第九章 重力坝的分缝和温度控制</b> .....	<b>622</b>
第一节 大体积混凝土的温度控制问题 .....	622
第二节 热传导原理及混凝土的热学性能 .....	625
第三节 温度场计算 .....	628
第四节 温度应力计算 .....	652
第五节 坝体的人工冷却 .....	678
第六节 重力坝的分缝分块和温度控制措施 .....	689

参考文献	711
第十章 特殊重力坝	712
第一节 宽缝重力坝	712
第二节 软基上的重力坝和砌石重力坝	769
第三节 空腹坝	774
第四节 碾压混凝土重力坝	783
参考文献	790



# 第一章 概 论

## 第一节 重力坝的发展史

### 一、古代的重力坝和坝工技术的传播

为了征服自然和改造自然，人类很早就和河流作斗争了。通过长期的实践，逐渐知道修建一些堰坝等建筑物来控制水流。

人类修建坝、堰的历史，可以上溯到近五千年前。据考证，最早的坝建于公元前2900年埃及的第一代王朝。由曼奈斯王（King Menes）在首都孟非斯（Memphis）城附近、尼罗河上的可希西（Kosheish）处建造了一座高15m、长240m的挡水坝。随后，埃及第三或第四代王朝（公元前2650~2460年）在开罗东南30km处修建卡法拉（Kafara）或称“异教徒”坝。坝高12m，顶长108m，由上下游两道干砌石墙间填以土石料构成。两道墙相距36m，每道底宽24m，由每块重约25kg的粗琢石灰岩块垒成。这可能是人类历史上第一批挡水坝，都是利用结构自重来挡水维持稳定的。所以，利用重力挡水是坝工建设中最早形成的一个概念，重力坝也是最早出现的一种坝型。

卡法拉坝由于未设溢洪道，以致建成不久即遭洪水漫顶，冲毁了坝的中段（其遗迹犹存）。这座坝的失事，使古埃及的坝工建设遭到相当大的挫折，此后近千年似未再出现过类似的坝工建筑物。这次失事也第一次揭示了拦河筑坝必须了解河川水文特性这个道理。古埃及人还不知道水库蓄泄关系和溢洪道的必要性，这是可以理解的，遗憾的是这种错误在几千年来几乎在不同程度上一直在重复。

公元前1000~700年，位于现今北也门处的赛伯（Sheba）王国曾在其首都玛立勃（Marib）附近修建了著名的玛立勃坝。该坝最初仅3m高，至公元325年加高到14m，最终高约20m，坝顶长600m，坝的两端设有泄水道。北端另有一重力式溢洪道，完全用巨大石块干砌而成。石块纵横叠筑，整齐密实，并由10cm见方的铅楔楔接，铅楔楔入上下层石块的孔中各5cm。坝的上游面用灰浆铺面，但并未用灰浆砌筑块石。该坝使用了一千多年，直到第六世纪公元575年才毁坏，至今仍残存着遗迹。这座坝曾对古代赛伯文化和经济发生过重大影响。由于筑坝蓄水，发展灌溉，到处是果园和花园，其美丽见称于时。坝破坏后，平原逐渐变为沙漠，赛伯文化亦随之衰落。这又说明了水利工程对社会发展的巨大影响。所以，在早期阿拉伯历史文献中曾对这座坝留下了许多动人的传说。如《古兰经》中记述<sup>①</sup>：“赛伯邑族，在他们的住处……一个肥美的地方。随后，他们悖逆，所以我使水库的急流去淹没他们，我把他们的周围变成只生长苦果、怪柳和些微酸枣树的园圃……”。《伊斯兰百科全书》中说：在伊斯兰的早期历史中，很少有像玛立勃坝失

<sup>①</sup> 《古兰经》第三十四章“赛伯邑”，中国社会科学出版社，1981年版。

事那样充满幻想和渲染的记载。

公元前703~690年，亚述（Assyrian）国王西拿基立（Sennacherib）曾为其都城尼尼微（Nineveh，在今伊拉克境内）的供水，建造两座圉工重力坝，其中一座高3m，长240m，坝的上游面垂直，下游面呈阶梯形，反映出当时多少已理解到水的水平推力作用。

在我国，公元前250年左右，由李冰主持在四川岷江上修建了著名的都江堰，创造了利用竹笼填石来壅水和泄洪的经验。唐《元和郡县图志》上曾有“破竹为笼、圆径三尺，长十尺，以石实中而壅水”的记载。都江堰工程不仅因地制宜地采用竹笼式重力堰，更重要的，这是一个枢纽工程，由鱼嘴分水、飞沙堰排沙，凿开宝瓶口引水等组成，其总体布置的正确、合理，令人赞叹。传说李冰曾在岷江上审度水情流态数年之久，应该是可信的。这反映了我国人民已开始重视河川水文观察，认识到溢洪道的重要性，并妥善解决了坝的壅水、泄水、排沙和引水的功能。都江堰建成后，成都平原“水旱从人，不知饥馑，沃野千里，世称陆海，谓之天府”。秦国因之日益富强。此后，秦始皇元年（公元前246年），又在陕西修建郑国渠，渠口应当建有挡水的堰、坝建筑物。秦始皇二十八至三十三年（公元前219~前214年），在统一全国后，又修建沟通长江、珠江水系的灵渠工程，渠首也应当建有拥水建筑物，其型式应类似鱼嘴工程。秦代五十年内兴建了上述三大水利工程，杰出地显示了当时高超的水工技术水平。其中都江堰和灵渠运用至今，成为世界上运行历史最久的两项水利工程。

所有上述古代挡水坝都是利用块石干砌或松散石料建造，尚未使用灰浆胶砌，这是古代重力坝的一个特点。

罗马人是伟大的建筑家，他们不仅建造了著名的引水渠道桥和拱等砌石建筑，在广大罗马帝国范围内也建成一批圉工坝。其中有在现西班牙西南部马里达（Marida）北的普索比纳（Proserpina）坝，高19m（公元98~117年），叙利亚境内高18m的阿耳-哈巴夸（Al-Harbaqa）重力坝（这两座坝至今仍在，但后者水库已淤满），以及现土耳其境内高16m的奥留卡牙（Orükeya）坝。后者仍由两道圉工墙、其间填土石构成，和古埃及的坝相比，这时已开始用灰浆来砌筑石块，并将坝的宽高比从4~5:1减少到3:1。

埃及、罗马人在筑坝技术上积累的知识，很多在中古时代已失传。中世纪黑暗时代，使欧洲坝工建设也进入了低潮。在亚洲的阿拉伯地区、印度、锡兰、日本和我国则仍有一定进展。我国独创的石笼坝继续得到发展。南北朝梁代（公元515~516年）曾为军事目的在安徽五和县境内建造高20丈（48m）的土坝及木笼填石混合坝。坝筑成后，在秋天淮水大涨时失事，据记载死数万人，可称是一次重大的事件。唐太和七年（公元833年）在浙江宁波大溪上建成长140m、高约27m的砌石溢流坝——它山堰，堰的下游面砌成36层石级，水从堰顶逐级下泻，解决消能问题。这座堰使用了四、五百年，现库已淤满，但堰仍存在。宋神宗熙宁八年（公元1075年），在福建莆田建造木兰陂，其主体工程是一座砌石溢流坝。施工时开挖了深三丈五尺，长阔各35尺的河床基坑。《南阳木兰陂水利志》上曾有“累石其中以以为基趾，钩锁结砌，鳞次栉比，渐高渐收，至石渠乃分为三十二门，每门竖巨石为将军柱…高出水上，迭板为闸，荡则纵，旱则闭。又于上流布长石以接水、下流布长石以送水各百余丈”的记载，可见此坝基础处理慎重，坝身砌筑牢固，断面下宽上窄，

顶有泄水孔，迭梁闸门，上游有护坦，下游有海漫，已非常合理。这座坝现仍较完整保存。我国900年前的工程已与现代溢流坝相仿。

在西方，罗马帝国衰亡后，伊斯兰教影响扩大。公元632年阿拉伯人进入北非。公元711年摩尔人征服了西班牙，于是伊斯兰地区传留下来的坝工技术开始传到西班牙并进入西欧，而于十三世纪传入我国云南，公元1274年（至元十一年）元世祖忽必烈派他的维吾尔籍大臣赛义德·阿尔加·山姆斯·丁（Said Ajall Shams-al-Din，《元史》也称作赛典赤·赡思丁）任云南行省平章。赛氏熟谙工程技术，在中统二年（公元1261年）拜为平章政事兼领工部。他在昆明任职六年，与云南大理等地的劝农使张立道一起，在滇池周围山区修建了一批水坝，将伊斯兰地区的筑坝技术用于治理滇池。《元史》上亦有“为陂池以备水旱”的记载<sup>①</sup>。

表 1-1 十六至十八世纪  
西班牙修建的重力坝

坝名	坝高(m)	年代(公元)
埃耳西Elche	23	1570~1590年
梯比Tibi	46	1579~1589年
阿尔曼沙Almansa	20	1586年
非利阿Albubera de Feriç	24	1747年
英菲尔诺Infierno	35.5	1786年
阿耳坎特Alicante	36	1785年

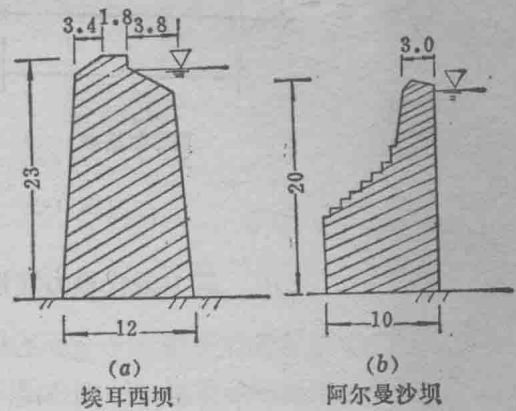


图 1-1 (单位: m)

十五世纪起，圬工重力坝在欧洲陆续出现。特别在西班牙，由于灌溉事业的发展，建造了一批用灰浆砌筑的圬工坝，见表1-1及图1-1，其中阿耳曼沙坝就是由摩尔人建造的。这些坝是近代重力坝的雏形。它们和松散土石料堆筑坝相比，断面小、强度和整体性高，因而习惯上人们开始称这种坝为圬工重力坝、简称为重力坝，而称用松散土石堆筑的坝为土石坝或填筑坝，虽然后者也是利用自身重量来挡水和维持稳定的坝。

在十六、十七世纪，西班牙是坝工建设最活跃的地区，而且随着殖民活动，筑坝技术也传到美洲。在墨西哥至今仍有二百多年以前的圬工坝存在。但是，这些坝都是凭经验建造的。直到十八世纪末，各国实际上的坝工技术并不比前人高明多少。这可以观察当时修建的坝体断面而知。图1-2所示为两座建于十八世纪的西班牙圬工坝：英菲尔诺(Infierno)坝和潘提斯(Puentes)坝。前者建于公元1786年，高35.5m，至今仍在运用，已接近二百年。后者建于公元1785~1791年，是当时世界上最高的一座坝(高50m)，施工质量也极良好。可惜由于当时尚无正确的理论指导，尤其对地基的作用和要求无知，以致在河床中的坝基开挖到一定深度仍不见基岩时，作出了将坝建造在一群木桩桩基上的错误决定。在运用11年后，坝基逐渐被渗水潜蚀而突然溃决。这座坝的失事，是继埃及卡法拉坝因漫顶失事后，进一步向人们揭示了确定重力坝安全的另一个关键因素，即坝基地质条件，使人

① 《元史》，125卷，3063页，中华书局出版。

们初步认识到这样规模的重力坝不能建造在松散地基上（尽管做了桩基），而必须建造在岩基上。

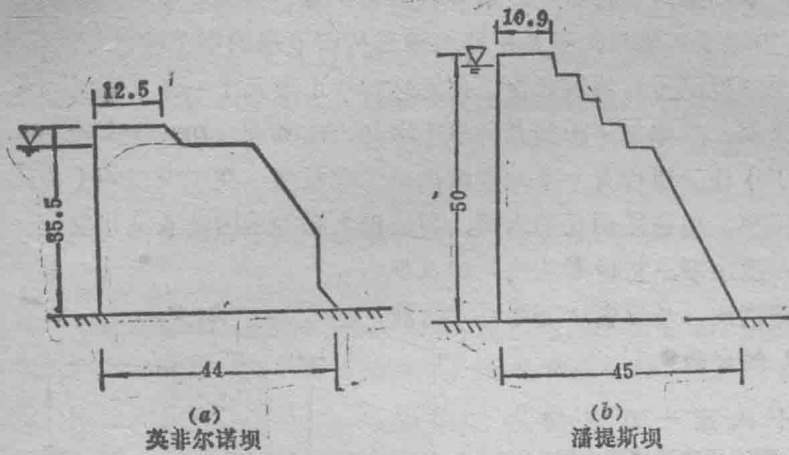


图 1-2 （单位：m）

## 二、近代重力坝设计理论的诞生和完善

重力坝的合理的设计理论从十七世纪起就在孕育着。这时正处在工业革命前夕，自然科学和工程技术已有一定发展。欧洲各国开始相继成立国家科学院和皇家学会，集中许多学者从事理论研究，其中如英国的虎克（Robert Hooke，公元1635~1703，英国皇家学会主持人），法国的马里欧特（Moriotte，公元1602~1684）已开始研究弹性体力学。虎克确定了力的大小和力所产生的变形之间的关系，即所谓虎克定律。马里欧特揭示了梁受弯时一边受拉一边受压的特性，虽然当时对中性轴的位置尚不了解，但这些成就已经为弹性力学的发展奠定了基础。进入十八世纪后，人们开始运用发展起来的理论来解决实际工程问题。当时工业革命的蓬勃发展，不仅要求科技人员具备经验，而且要有分析能力和理论依据。在这个发展过程中，法国走在最前列，建立了世界上首批工程学院。特别需要提到的是公元1747年在法国巴黎创办的桥梁道路学院（Ecole des ponts et chaussess）。第一批水工建筑书籍的问世、第一批坝工工程师的诞生和第一个合理的坝工设计理论的形成，都和这座学院密切相关。那些为我们熟悉的坝工设计先驱，几乎都是该院的师生，如别利多尔（Belidor，1697~1761）、纳维埃（Navier，1785~1838），普朗尼（Prony，1755~1839）、圣维南（Barre de Saint-Venant，1797~1886）、赛札莱（M.de Sazilly）、狄洛克儿（M. Delocre）、柯西（Cauchy，1789~1857）、包沁涅斯克（Boussinesq，1842~1927）和李维（Maurice Lévy，1838~1910）等。他们在当时既是力学理论的开拓者，又都是坝工设计师。别利多尔教授和普朗尼院长分别在1735年和1839年撰写了第一批书籍《水工建筑》（Architecture Hydraulique）两卷。纳维埃在1826年编写的材料力学教程中已指出：“当材料服从虎克定律时，中性轴必通过形心”。该校教授梅里（M. Mery）则在应用力学教程中首次引用纳维埃的应力直线分布假定，提出了“中间三分段准则”。这些工作都为不久后重力坝设计理论的诞生准备了条件。



1853年赛札莱在该校年刊上发表了一篇重力坝设计的论文，总结了当时的设计方法，并提出了两条基本设计准则，即：1) 坝或地基内承受的压力不得超过某一限值；2) 坝的任何部分必须不会沿它的底面滑动，整个坝必须不会沿地基面滑动。同时还指出，设计时应考虑库空和库满两种情况，计算自重和水压力两种荷载，并使坝的上下游面压力在上述两种情况下都达到极限值，即按所谓等强度原则设计断面。至于水平断面上的垂直压力呈线性分布的假定已早在受弯构件上采用，因而很自然地被引用到坝体计算中来。1858年，法国工程师狄洛克( Delocre )首次将这样的理论付诸实践，用来修建富伦斯( Furens )坝，见图1-3。他在1866年该坝建成蓄水后将设计方法和改进意见写成论文，发表在该校1866年刊上，于是第一个实用的重力坝设计理论诞生了。

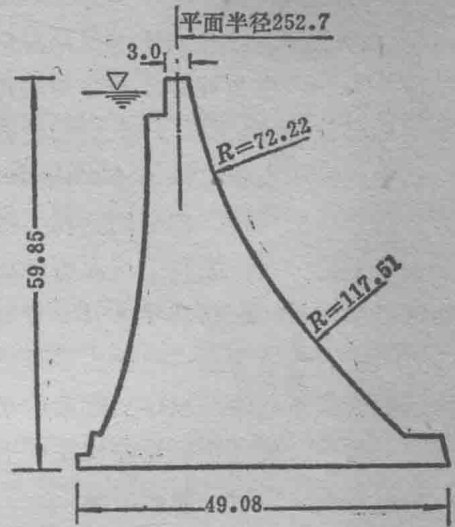


图 1-3 (单位: m)

圣维南毕业于该校，是纳维埃的学生。他是一位杰出的水工工程师，曾在法国尼佛内斯( Nivernais )运河和阿登尼斯( Ardennes )运河上工作过六、七年，解决过许多实际问题。然而他又是一位致力于用弹性理论来解决工程问题的科学家，他的两位学生包沁涅斯克和李维在他的指导下进一步将重力坝坝体和地基的应力分析推向弹性力学水平。包氏提出了半无限体中由已知力作用于边界上所产生的应力和应变的解法，从而解决了坝基内的应力分析问题，而李氏则得出了无限楔形体在重力和边界力作用下的二维应力分布经典解答，为重力坝的二维应力分析提供了一个弹性力学解答。

在上述法国工程师们的努力下，从1853年到1890年，法国桥梁道路学院的年刊上发表了十多篇重力坝设计的论文，从而开辟了重力坝应力分析中至今仍存在的两条途径：即从水平断面上正应力呈直线分布为出发点的实用分析方法(以后美国工程师们称之为重力分析法)和以弹性理论为基础的分析方法。

十九世纪是法国对坝工建设作出重要贡献的时期，上述理论的产生正适应了当时城市兴起和工业发展需要建造更多水库来满足供水的要求，在1860~1910这五十年内，欧洲、美洲、非洲阿尔及利亚及亚洲印度等地建成近70座高30m以上的圉工重力坝。坝的断面都和富伦斯坝相似，和1860年前没有理论指导建造的坝相比，断面明显地减小。

坝工设计理论发展的第二个里程碑是无拉应力原则的确立和扬压力的发现。1881年法国在阿尔及利亚建造的哈勃拉( Habra )坝失事。1895年法国的布泽( Boczey )坝失事。1900年美国德克萨斯州的奥斯汀( Austin )坝失事。失事的坝为数虽少，但它们都是按上述理论设计的，这就使人怀疑设计理论和假定中是否有缺陷，是否有某种重要因素尚未为人所知。上述各坝失事后都作了专门调查和广泛讨论。新产生的设计理论受到严格的检验。

1880年当印度孟买城筹建贝立雅(Periyer)重力坝时,曾请求英国格拉斯哥大学的朗金(Rankine I.M.)教授“对坝的最优断面作一次严格的数学研究”。1881年,朗金写出一份报告,指出:1)法国工程师们发展的方法大部分是正确的;2)但他们所计算的水平断面上下游处最大压力只是总应力中的垂直分量,最大总应力应平行于坝面;3)坝内应不容许产生拉应力,即合力的作用点应保持在断面宽度的中间三分段之内。这样,朗金对原有设计方法作了一次重要的改进,尤其是上述第3)点。1884年,意大利都灵工学院的卡斯提里安诺(L.A.Castigliano, 1847~1884)教授同样被要求对重力坝的应力进行一次详尽的研究。朗金的无拉力准则直到1895年布泽坝失事后才引起人们重视。因为该坝失事后的分析,发现上游面有 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 的拉应力。法国科学院会员李维在研究了布泽坝的失事原因后,在1895年8月5日给法国科学院的一篇报告中更进一步指出了坝体上游面的裂缝中存在着扬压力,提出了重力坝设计中的一条著名的李维准则:为了防止扬压力可能造成的失事危险,坝体上游面的正应力应保持为压应力,其数值不能小于该点的水库水压力。此外,他还正确地建议在近上游面的坝内设置一道垂直排水管和廊道系统,来作为消除过大扬压力的“保护措施”。

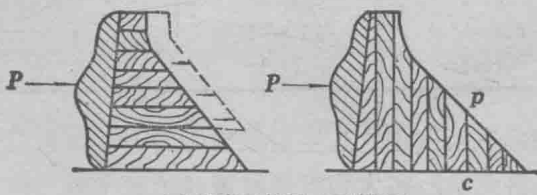
经过1860~1890近三十年的努力探索,人们终于发现了作用在重力坝内的一种重要而隐蔽的荷载——扬压力,认识到依照法国工程师们发展的方法设计的重力坝断面是偏小了,其主要原因是没有考虑扬压力的影响。考虑扬压力以后设计的坝,其断面有所增大,而且逐渐形成下游面大致呈均一直线坡度的实用断面。

值得指出:在探索扬压力的过程中,德国和英国学者们曾作出过较多的贡献:费奇特(Fecht)在1889年设计阿尔菲尔德(Alfeld)坝时已在稳定计算中考虑了扬压力。同年,基尔(Kiel)发表了水压力渗入坝体裂缝的论文,雷克菲尔德(Lieckfeldt)于1898年又建议在稳定分析中假定坝基水平裂缝发展到垂直正应力等于0的地点。1910年林克(Link)提出假定扬压力图形从上游按两段直线变化到下游面的建议,并可根据经验判断乘以一个小于1.0的折减系数。这个假定在欧洲直到现在仍在使用。1912年鲁特洛夫(Rudeloff)和潘泽比特尔(Panzerbieter)首先用砂浆试件进行室内渗透试验。1901~1904年德国在尤夫特(Urft)河上建造当时德国最高的尤夫特重力坝,该坝高54m,由因茨(Intze)教授负责设计,坝体内已设有二排直径6.2cm的排水管,排距2m,并用15cm的集水管引入排水廊道。在英国,谭康(G.F.Dencon)曾仔细研究过坝内应力分布,并早在1882年就认识到扬压力的存在。在1882~1891年建成的凡威(Vyrnwy)坝上,就在坝内设置碎石排水系统以降低扬压力。此后30年,英国建造的许多坝都采取这种措施。

在美国,第一座在设计中考虑扬压力的重力坝是1900~1906年在波士顿附近修建的瓦丘珊特(Wachusett)坝。但是,虽然在本世纪初已开始在设计中将扬压力作为一种荷载计入,而对其本质的认识还继续经历了几十年的探索和争论,有些问题,至今仍不能认为已彻底阐明。正如克里格(W.P.Creager)指出,扬压力始终是重力坝设计中了解得最少而争论最多的一种荷载。

坝工设计理论发展的另一个重点是坝体应力分布的探索。这方面英国工程师们作出很多贡献。十九世纪法国工程师们比较偏重于理想断面的应力分析理论研究,英国工程师们

则更多地通过试验和实践进行探索。布泽坝的失事，再引起英国工程师们对坝内应力分布的重视。如前所述，朗金教授曾为此作为专门研究。这里还发生过一次有趣的插曲：1903年英国伦敦达拉柏 ( Dreper ) 公司曾以 1000 英镑的研究费资助伦敦大学应用力学系，要求阐明重力坝内的应力情况，并找出合理的分析方法。该系前主任著名数学力学家皮尔逊 ( Karl Pearson ) 和阿契莱 ( Atcherly ) 教授以硬木进行了历史上第一次重力坝应力试验，并经过理论研究，在1904年发表了一篇论文，声称：设计重力坝时不能只计算坝体水平断面上的应力，平行坝轴线的垂直平面才是最危险的，拉应力首先发生在这些平面的底部  $c$  点附近 ( 见图 1-4 )。这篇文章哄动了坝工界，这意味着原先按照经典方法三分点准则设计的坝都不安全。由于皮氏当时声誉较著，英国两院因此推迟了埃及老阿斯旺坝的加高计划，好几座正在施工的坝为此停工。经过四年持续的争论、试验和计算，终于证明原先的经典方法是正确的。皮氏承认了错误，因为其模型试验所用的材料——木板，显然不适当。为证明这点，威尔逊 ( John Singismund Wilson ) 和古里 ( William Gore ) 利用弹性橡皮模拟坝和地基进行结构模型试验，首次阐明了重力坝在自重和水压力作用下坝和地基内的应力分布规律 ( 图 1-5 )，即 1 ) 离地基较远的坝体水平断面上，垂直正应力呈直线分布； 2 ) 靠近地基的水平断面上垂直正应力不再呈直线分布； 3 ) 上游坝踵存在局部拉应力区，在角缘更有应力集中现象，将角缘修圆可以局部减轻拉应力； 4 ) 下游坝趾最大正应力不超过按直线分布假定得出的数值，最大压应力平行于下游坝面； 5 ) 从主应力图形看，坝踵拉应力引起的裂缝并非具有危险的水平方向，而是近于垂直的方向。这些成果已堪与现代最先进的有限元计算成果相媲美，而试验工作是在 70 多年前进行的，英国工程师们的成就是杰出的。他们在英国本土上所建的坝不太多，但在印度、澳大利亚、加拿大、美国曾建过不少圉工重力坝。他们的试验技术随后被美国垦务局沿用了近三十年。



(虚线表示模型变形情况)

图 1-4

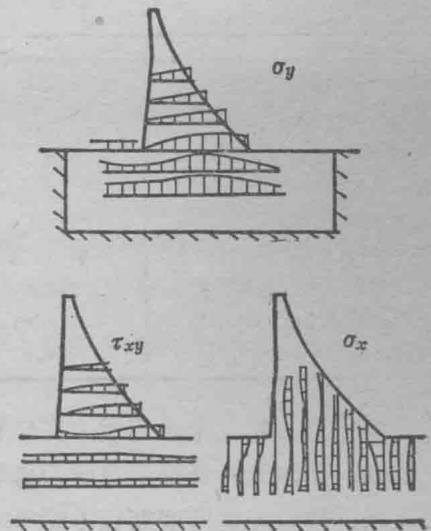


图 1-5

### 三、现代重力坝建设技术体系的形成

进入二十世纪后，现代重力坝的建设技术体系逐步形成。首先是建坝材料由浆砌石过渡到混凝土，为提高强度和大规模机械化施工创造条件。十九世纪以前，重力坝基本上都

用浆砌毛石修建，即在底面铺一层砂浆，放上未经修琢的毛石，并用砂浆和碎石填实石块间的缝。坝的上下游面砌筑一层整齐的条石，并用灰浆勾缝以形成防水层。砂浆中的胶结料最初用石灰，从十九世纪开始逐渐用水泥代替。美国的新克洛顿 (New Cruton, 1892~1899) 坝和瓦丘珊特 (1900~1906) 坝，就是美国最后一批采用这种方法建成的圬工重力坝。这种坝在我国仍大量应用于地方中小工程，并称为砌石坝，它们除上游有防渗层外，坝内有较多孔隙，足以排除渗水，因而不会在坝内形成过大扬压力。

十九世纪后期，逐渐开始用混凝土筑坝，但当时认为混凝土强度不如砌石，只使用在低强部位，如1890~1891年英国在印度建造的巴特加 (Bhatgur) 坝，规定混凝土只能用在压应力小于 $5\text{kg/cm}^2$  (约 $0.5\text{MPa}$ ) 的部位。十九世纪末开始出现块石混凝土坝 (Cyclopean concrete dam)，即用混凝土填塞石块间空隙，石块底部仍用砂浆铺筑，石块约占总体积的50%，如美国1905~1911年修建的罗斯福坝。随后石块底部也改用混凝土铺筑，石块所占体积下降到18~25%，如美国的奥立维桥 (Olive bridge) 坝和克洛顿滩 (Croten falls) 坝都是。

二十世纪初，由于混凝土工艺和施工机械的迅速发展，暴露出埋石施工进度慢、两套施工系统复杂不便等缺点，逐渐改为全用混凝土浇筑，形成现在的混凝土重力坝。美国的箭石 (Arrow rock, 1912~1916) 坝和象岗 (Elephant Butte, 1902~1916) 坝，就是最先的几座，从此现代混凝土重力坝登上了历史舞台。表1-2内列有代表上述几种不同类型重力坝的特性指标，可供对比

表 1-2 几种不同类型重力坝的特性指标

坝 名	瓦 丘 珊 特	罗 斯 福	奥 立 维 桥	箭 石
施工年份	1900~1906	1905~1911	1908~1913	1912~1916
坝 高(m)	62.5	79.3	67	107
坝体体积( $10^4\text{m}^3$ )	21.4	26.3	37.3	439
大 块 石(%)	54	39.6	}25.3	
碎 石(%)	17	10.4		
砂 浆(%)	29	13.8		
混 凝 土(%)		38.2	74.7	100
每立米坝体水泥用量(kg)	116.4	86.2	117.6	223.0
每台起重机工效( $\text{m}^3/\text{h}$ )	29~46	6.9~13.8	15.3~21	
平均工效( $\text{m}^3/\text{h}$ )	<4.2	12.6	16.1	

混凝土重力坝大量采用后，在结构上就相应有所改进，这主要发展于美国。因为二十世纪初，美国为了开发干旱的西部和摆脱经济危机，需大力发展灌溉和给水工程，修建许多大坝。1902年美国罗斯福 (Theodore Roosevelt) 总统颁布垦务法，同年成立垦务局 (U.S.B.R)，负责美国西部十七个州的水利开发，同时，水力发电事业蓬勃兴起，重力坝建造的数量更迅速增加，世界坝工建设的重心也从西欧转到美国。在结构上，开始在坝内近上游面设置垂直的排水管和近地基的廊道以削减扬压力。为了控制大体积混凝土中由于水化热产生的温度裂缝，开始设置纵横分缝、发展接缝灌浆和坝体温控技术。在坝体内，开始设置阻水的灌浆帷幕和排水体系。例如箭石坝高107m，每30.5m设置横缝一



道, 坝内埋有直径15cm的排水管, 间距约3m, 检查、排水廊道设在尾水位以上, 从廊道向下设直径30cm的排水孔深入地基内约6m, 在上游坝踵则有两排帷幕灌浆, 孔距3m, 这已接近现代的布置了。

由于坝的规模不断增大, 对地基的要求也逐渐重视起来。例如1900年施工的瓦丘珊特坝, 曾对坝基作过充分勘探, 共打900多个水冲钻孔、35个金刚钻岩心钻孔, 最大孔深达50m, 钻孔中已开始作压水试验, 作出坝址水文地质剖面图。但那时对这个问题的认识是不一致的, 在1986年施工的圣法兰西斯坝(St. Frances)坝高也是62.5m, 施工前就没有做钻孔勘探, 对坝基岩石性质也未试验研究, 未发现基岩是一种遇水易崩解的砾岩。坝基内未设灌浆帷幕, 排水孔仅设置在河床段局部部位。此坝运行二年后, 因基岩受潜蚀而突然失事。除河床中23m一段保存在原处外, 两侧坝段全部冲毁, 死亡400多人, 财产损失达一千万美元, 这是重力坝建筑史上一次重大破坏事故, 有力地说明了坝基质量是保证坝体安全的首要关键。此后, 地质勘测和试验工作得到重视和加强, 对坝基普遍采用了岩心钻、竖井、平洞等手段勘探。地基的处理包括坝基开挖、固结灌浆、帷幕灌浆、排水系统和断层槽处理等措施被普遍采用, 并成为常规措施, 这是重力坝勘探设计上的一项重大进步。没有对地基勘探、设计和处理技术的进展, 要修建高坝甚至是特高的坝将是不可思议的。

圣法兰西斯坝失事后, 加州当局开始重视大坝的安全管理, 制定大坝安全法规, 并责成加州水利局专司州内大坝的安全检查。随后美国各州以至联邦和世界各国都相继仿效, 制订大坝安全法规和建立相应的管理机构, 有的并直属国家元首或政府首脑领导。实践证明, 对大坝安全这样一个重大问题, 这种做法是必要的。

二十世纪三十和四十年代是重力坝设计理论和施工技术发展最有成效的年代, 美国工程师们对此作出的贡献最多。在这段时间里, 美国建成了高221m的胡佛(Hoover)坝, 高185m的沙斯塔(Shasta)坝、高168m的大古力(Grand Coulee)坝等一批大型重力坝。1932年美国成立田纳西流域管理局(T.V.A.), 负责该流域的开发, 又兴建了一大批重力坝。为了兴建上述高坝, 垦务局T.V.A.和陆军工程师团等开展了大量科研工作。在应力计算方面完善了重力法并发展了弹性理论法, 后者如韦斯特加德提出的拟板法、布拉兹(J.H. Brahtz)的角缘函数法。理查德(Richard)和克恩(Kirn)则提出了考虑空间作用的整体式重力坝分析法——试载法, 使人们能较准确地计算坝体和地基内的二维和三维应力分布状态。在构造方面, 坝内有了完整的分缝、排水和廊道系统以及温度、变形、应力等监测系统。在施工方面, 机械化程度有显著提高, 发展了栈桥门机及缆机浇筑、冷却水管散热和接缝灌浆等整套施工工艺。1937~1942年施工的大古力坝, 最高年浇筑量达2700000m<sup>3</sup>, 至今仍列前茅。1941年美国土木工程学会召开圪工重力坝学术讨论会, 系统总结了一整套重力坝设计施工经验, 对以后的重力坝建设起了重要作用。实践证明, 只要地基的强度和稳定有保证, 溢洪道有足够泄量, 按现代技术设计和施工的重力坝很少会发生破坏事故, 甚至发生超标准洪水时, 坝体也能经受一定程度的漫流而不致破坏, 这是土石坝和轻型坝所不能比拟的。

五十年代以后, 美国修建重力坝的数量下降, 并且基本上遵循已定型的设计施工技术进行建设, 而瑞士、中国、苏联、印度等国则兴建了一批规模较大的重力坝。在这阶段