

THE HYDRAULIC STRUCTURE
DESIGN SERIES

**DESIGN OF GRAVITY
DAMS**

水工建筑物设计丛书 潘家铮主编

重 力 坝

汝丹华 编著

水利电力出版社

目 录

序 言

第一章 概论	1
第一节 古代的重力坝	1
第二节 筑坝技术的传播	3
第三节 设计理论的诞生和改进	7
第四节 四十年代形成的技术体系	13
第五节 高坝建设中重力坝的地位	20
第六节 重力坝的主要优点	39
第二章 荷载、材料和设计准则	42
第一节 荷载	44
第二节 荷载组合	70
第三节 材料	71
第四节 安全准则	77
第三章 坝体应力分析——重力法	92
第一节 应力分析的发展历史	92
第二节 坝内应力的弹性理论解答	97
第三节 地基弹性对坝体应力的影响	105
第四节 两种实用的应力分析方法	109
第五节 重力法	111
第六节 孔洞周围的应力集中和配筋	132
第四章 坝体应力分析——有限元法	136
第一节 概述	136
第二节 结构的离散——抽象化	138
第三节 单元的特性——刚度	141

第四节	整个结构——单元组合体——的整体分析	154
第五节	结构的整体刚度矩阵 $[K]$ 的形成	157
第六节	边界条件的引入	159
第七节	节点力和单元应力	162
第八节	结构的抽象化	166
第九节	数据准备	170
第十节	建立整个结构的平衡方程组	174
第十一节	求解线性方程组	175
第十二节	成果输出的整理及衡量	175
第十三节	单元的选择	179
第十四节	附录——矩阵 $[S]$ 和 $[K]$ 的推导	180
第五章	重力坝的抗震设计	186
第一节	概述	186
第二节	地震的工程特性	190
第三节	重力坝的抗震能力	200
第四节	重力坝的抗震计算方法	206
第五节	抗震工程措施	214
第六章	坝基处理设计	216
第一节	概述	216
第二节	坝基开挖	220
第三节	固结灌浆	224
第四节	灌浆帷幕和排水幕	226
第五节	闭路式抽水减压排水系统	235
第六节	两岸坝座的排水	247
第七节	软弱带处理	249
第八节	坝基的深层滑动稳定	254
第七章	温度控制和分缝	263
第一节	概述	263
第二节	坝内的温度状况	264

第三节	体积变形和温度应力	273
第四节	坝体强度计算中不计温度应力的原因	286
第五节	水管冷却柱状块浇筑法	288
第六节	预冷骨料通仓浇筑法	295
第七节	隔热法	304
第八章	坝和地基的观测与分析	318
第一节	概述	318
第二节	水位、水质观测	324
第三节	坝基扬压力观测	325
第四节	坝和地基的漏水量观测	328
第五节	坝和地基的垂直位移观测	331
第六节	坝体水平位移的观测	334
第七节	位移观测数据的分析	342
第八节	地基水平位移观测	350
第九节	温度观测	352
第十节	应力和应变观测	358
第十一节	实测应力及其分析	364
参考文献	370

第一章 概 论

第一节 古代的重力坝

利用筑坝材料的自重挡水是坝工设计中最早形成的一个概念。重力坝也是最早出现的一种坝型。据考证^[1]，最早的坝建于近五千年前。公元前2900年埃及第一代王朝，曼奈斯王（King Menes）在首都孟非斯城（Memphis）附近的尼罗河上，建造了一座高15米，顶长240米的挡水坝。随后，埃及第三代或第四代王朝时（公元前2650~2460年），在开罗东南30公里处修建成一座名为异教徒（Saddel Kafara）的坝。坝高12米，顶长108米，由上下游两道干砌块石体其间填以土石料构成。两道砌体相距36米，每道底宽24米，边坡1:1.3，由每块重约25公斤的粗砾石灰岩块垒成。该坝由于未设溢洪道，旋即遭洪水漫顶冲毁。这座坝的失事，第一次向人们揭示了拦河筑坝必须了解河川水文特性和设置溢洪道的重要性。

在现今的北也门，公元前1000~700年，古代希伯（Sheba）王国曾在其首都玛立勃（Marib）附近建造了著名的玛立勃坝。该坝高约20米，顶长600米，完全用巨大石块干砌成。石块纵横垒筑，整齐密合，并由10厘米见方的铅质楔块上下楔接。即楔块插入下部石块的孔内约5厘米，另5厘米则凸入上部石块的相应孔中。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570年才毁坏。

在我国，战国秦孝文王元年（公元前250年），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溢流坝或称作堰。秦始皇七年（公元前240年）在陕西瓠口郑国渠渠首建成30米高的石笼坝。秦始皇三十三年（公元前214年），又在连通长江与珠江流域的灵渠工程上（今广西的兴安县），建成了砌石溢流堰，断面见图1-1。

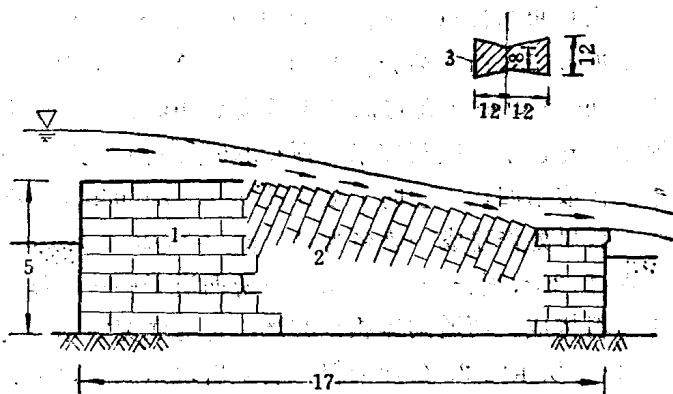


图 1-1 中国灵渠渠首的砌石溢流堰示意图（单位：米）

1—大块砌石；2—鱼鳞石；3—铁键详图

上下游都用 1~4 吨重的长方形块石砌筑，石块间用铁水浇铸的键锭联结[见图中 3]，这种溢流堰古称“天平”，低水时挡水，高水时泄洪，在两种情况下，都能引水入渠。成功地解决了低坝的挡水与泄洪的矛盾。秦代在五十年内建造了上述三大水利工程。其中上述的灵渠工程，集中了前两工程的经验，动员了十万劳动力，历时四年建成，运行迄今已有二千多年。这是世界上现存使用历史最久的一座重力坝。二千多年内共维修过 25 次，平均 90 年一次。

这些都是人类历史上第一批出现的利用材料自身重量来维持稳定的挡水结构，它们都利用松散石料建造，尚未使用灰浆胶砌，这是最早期重力坝的一些特点。

进入初世纪后，重力坝的修建渐多。罗马人是伟大的建筑家，他们不仅建造起著名的引水渠道桥，而且也建成过一批圉工重力坝，其中有现西班牙西南部马里达 (Maride) 北的普索比纳 (Proserpine) 坝，高19米，公元98~117年建成；叙利亚境内高18米的阿耳-哈巴夸 (Al-Harbaqa) 重力坝 (坝至今仍在，但水库已淤满)，以及现在土耳其境内高16米的奥笛开牙 (Orükeya) 坝。与最早期的坝相比，此时已开始使用灰浆来砌筑石块，从而将坝的底宽和高度比从4~5:1减少到3:1，这是建坝技术上的一次大改进。

中世纪黑暗时代，欧洲坝工建设也进入了低潮。但在亚洲的阿拉伯地区，印度、锡兰、日本和我国，仍有一定进展。我国在坝工建设中独特创造的竹笼填石坝，继续得到发展。南北朝梁武帝时 (公元514年)，曾在安徽凤阳淮水的浮山峡处，建造用木框代替竹笼的填石坝。别具风格的引水堰在各地灌溉工程中得到应用和改进。公元833年，唐太和七年在浙江宁波大溪上，建成长140米高约27米的砌石溢流坝——它山堰。堰系用长2~3米，宽0.5~1.4米，厚0.2~0.35米的条石砌成，下游面砌成36层石级，水从堰顶逐级下泻，解决了溢流的消能问题。这座堰一直到现在仍在，但已被泥沙埋埋至堰顶。

第二节 筑坝技术的传播

罗马帝国衰亡后，回教影响扩大。公元632年穆罕默德

死后，阿拉伯人从北非进入西班牙。于是在伊斯兰地区的坝工技术，开始流传到西班牙，并进入西欧（图1-2）。

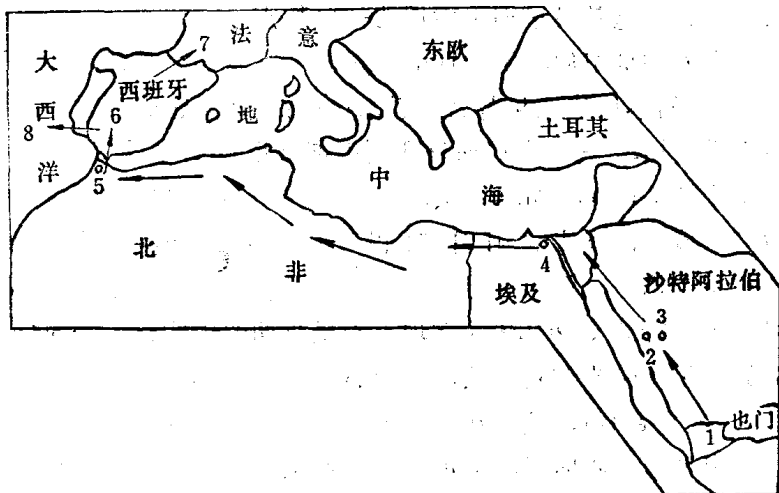


图 1-2 重力坝筑坝技术的传播

1—希伯王国(公元前1000年); 2—麦加; 3—梯也夫; 4—开罗(公元600年); 5—丹吉尔; 6—传入西班牙(十四世纪); 7—传入欧洲(十五世纪); 8—传入美洲(十六世纪)

十五世纪起，在西班牙，由于灌溉事业的发展，建造了一批用灰浆砌筑的圉工坝（见表1-1和图1-3）^[2]。这些坝是近代重力坝的雏形。它们和松散土石料堆筑的坝相比，显示出砌筑体断面小，强度和整体性高的特点，因而在习惯上，人们就开始称这种坝为圉工重力坝；虽然利用松散土石堆筑的坝，事实上也是以其自身重力来挡水维持稳定的坝，但人们称这种坝为土石坝。

在十六、十七世纪，西班牙是坝工建设最活跃的地区，而且当时西班牙向外开拓殖民地，筑坝技术也随之传到美洲（现今的美国和墨西哥等地）。在墨西哥至今仍有运行超过

表 1-1 早期西班牙的圪工重力坝

坝 名	坝 高 (米)	建 造 年 份
埃耳西Elche	23.2	1640~1842
梯比Tibi	46	1579~1589
阿尔曼沙Almansa	20.7	1586
非利阿Peria	24	1747
阿尔坎特Alicante	36	1785

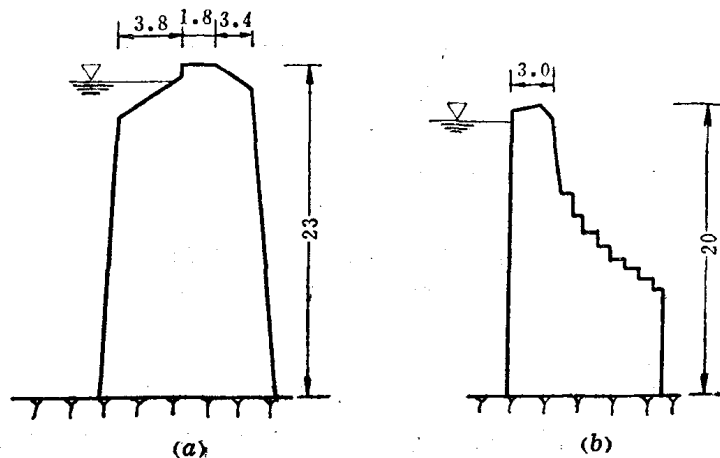


图 1-3 西班牙圪工重力坝 (单位: 米)

(a)埃耳西坝, (b)阿尔曼沙坝

二百年的圪工坝。1274年,我国元朝委派伊朗工程师赛典赤瞻思丁(Sáid Ajall Shoms-al Din, 1210~1279)到西南昆明任总管。他在我国工程师张立道配合下,曾在滇池一带建造了一批圪工坝。这时,阿拉伯筑技术也传入到我国^①。

① Science and Civilization in China 1971, Vol 4 pt.III combridge university.

似乎可以认为直到本世纪末，各国人民掌握的坝工技术并没有本质上的进步。这可以从观察当时修建的一批坝的断面中得到论证。图1-4所示为两座建于十八世纪的西班牙圪

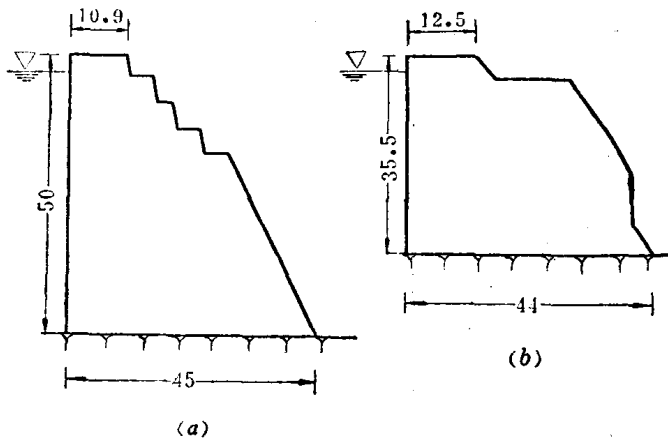


图 1-4 十八世纪西班牙重力坝（单位：米）
 (a)英菲尔诺坝(1785~1791); (b)潘提斯坝(1785~1791, 1802年
 毁坏, 1884年重建)

工重力坝：英菲尔诺（Infierno）坝和潘提斯（Puentes）坝。前者高35.5米；后者是当时世界上最高的一座坝，高50米，施工质量良好。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达到一定深度仍不见岩层时，作出了将坝建造在一片木桩桩基上的错误决定。在运行十一年后，坝基逐渐被渗水潜蚀而导致溃决^[3]。这座坝的失事，向人们揭示了涉及重力坝安全的另一个关键的因素，即开始认识到这样规模的圪工重力坝，不能建造在松散地基上（尽管打入了密实的桩基），而必须建造在岩石地基上。

第三节 设计理论的诞生和改进

1. 法国工程师的贡献

合理的设计理论是从十七世纪起开始孕育的。十七世纪正处在工业革命前夕，欧洲各国开始相继成立国家科学院或皇家学会，集中许多学者从事理论研究。其中如英国的虎克（Robert Hooke, 1635~1703，是英国皇家学会的主持人），法国的库伦（C.A Coulomb, 1736~1806）等。十八世纪工业革命的蓬勃发展，不仅要求科技人员具备经验和实际知识，而且要求有合理的分析能力和正确的理论指导。在这个发展过程中，法国走在最前列，成立了世界上首批工程学院，其中特别需要提到的是1747年在法国巴黎创立的桥梁道路学院（École des ponts et chaussées）。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，都和这个学院密切相关。那些至今为我们所熟悉的坝工理论先驱，如普朗尼（Prony, 1755~1839），纳维埃（Navier, 1785~1838），圣维南（Barré de saint-venant 1797~1886），柯西（Cauchy, 1789~1857）等，都是该学院的师生。在1826年该校编写的力学教程中对于梁的弯曲理论，已指出：“当材料服从虎克定律时，中性轴必通过形心”。并首次提出了应力直线分布的假定。这些都为重力坝设计理论的诞生准备了条件^①。

1853年该校毕业生、法国工程师赛扎莱（De.Sazille）在学校年刊（Annalas des ponts et chaussées）上发表了

① 《History of strength of materials》，S.Timoshenko, 1953.

一篇重力坝设计的论文，总结了当时的设计方法，提出两条基本设计准则。即（1）坝或地基内承受的压力必须不超过某一安全限值；（2）坝的任何部分必须不致沿它的底面滑动，整个坝必须不致沿地基发生滑动。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，即用所谓等强度原则设计断面。至于水平断面上的垂直压力呈直线分布的假定，则在此之前，已在受弯构件上采用，因而很自然地被引用到坝体计算中来。1858年，另一毕业生、工程师狄洛克里(M. Delocre)第一次将这样的理论付诸实践，用于建造富伦斯(Furens)坝。见图1-5。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

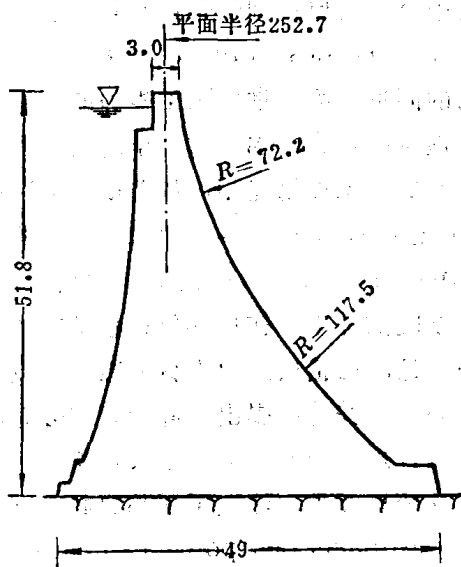


图 1-5 法国富伦斯坝(又名Gouffre坝)，1862~1866
(第一座有理论指导设计的坝)单位：米

在该校1866年年刊上，于是一个实用的重力坝设计理论诞生了。

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。同时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（Boussinesq, 1842~1929）和李维（Maurice L'évy 1838~1910），在他的指导下，进一步将重力坝坝体和地基的应力分析提高到弹性力学水平。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完整的弹性力学解法。

在上述法国工程师们的努力下，从1853年到1890年，在法国桥梁道路学院的年刊上曾发表过十多篇重力坝的论文，从而开辟了重力坝应力分析中至今仍遵循的两条途径：即以水平断面上正应力呈直线分布为出发点的实用分析方法（以后美国工程师称之为重力法）和以弹性理论为基础的二维或三维分析方法。

上述理论的产生正适应了当时城市兴起和工业发展的要求：需要建造更多的水库来满足城市工业的供水。在1860~1910这五十年内，欧洲（法国、西班牙、意大利和英国等）、美洲（美国、墨西哥、加拿大）和非洲的阿尔及利亚、亚洲的印度等地建成近70座高30米以上的圉工重力坝。若干代表性的坝，见图1-6。从图中可见，坝的断面都和富伦斯坝相似，与1860年以前没有这种理论指导而建设的坝相比，断面

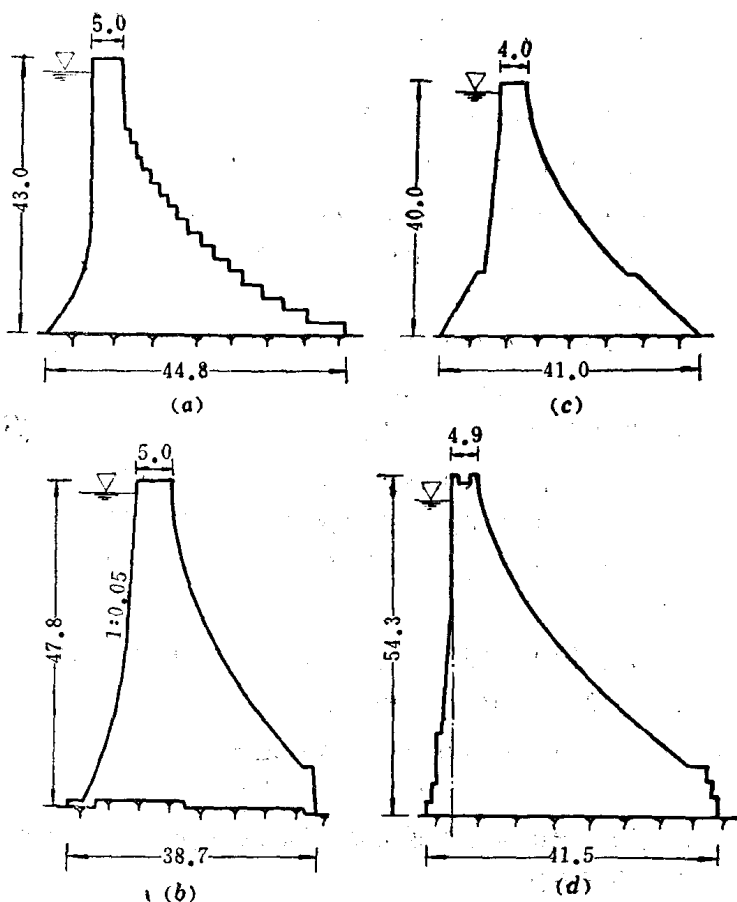


图 1-6 十九世纪后期各国建造的重力坝(单位, 米)

- (a)海加(Hija)坝1880~1887, 西班牙, (b)贝恩(Ban)坝1866~1870, 法国, (c)格兰·恰尔法斯(Gran Cheurfas)坝, 1882~1886, 阿尔及利亚, (d)比利雅(Periyar)坝, 1889~1896, 印度

明显地减小。

2. 扬压力的发现

然而新产生的设计理论是否完备? 依照这种理论建造的

坝是否安全可靠？实践又对此作了回答。

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（Bouzey）坝失事；

1900年美国得克萨斯州的奥斯汀（Austin）坝失事。

这些重力坝的失事，虽说为数极少，不能不使人怀疑设计理论中的基本假定和分析方法有无缺陷？是否有某种重要因素尚未为人们所知？对上述各坝的失事都作了专门调查，并开展了广泛讨论。新产生的理论受到严格的检验。

1880年，当印度孟买城筹备建造比利雅（Periyar）重力坝（图1-6，d）时，曾要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）但是他们所计算的水平断面上、下游处的最大压力只是总压力中的一个垂直分量，并非最大总压力，最大总压力应平行于坝面；（3）坝内应不允许产生拉力，即合力的作用点应保持在断面宽度的中间三分段之内。朗金对原有设计方法作了一次重要的改进，尤其是上述第三点。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，因为该坝失事后分析，发现上游面有1.5公斤/平方厘米的拉应力。法国工程师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。即为了防止渗透水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上的一种重要和隐蔽的荷载——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,其原因主要是没有计入扬压力的影响。考虑扬压力后的坝,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。图1-7为美国瓦丘珊特(Wachusett)坝,这是第一座在设计中考虑扬压力的重力坝,位于麻省波士顿城附近。但实际上对于扬压力的认识远未真正解决,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得最多的一种荷载。直到现在,扬压力的分布和控制还是人们所研究的问题,以求进一步减少重力坝的工程量。

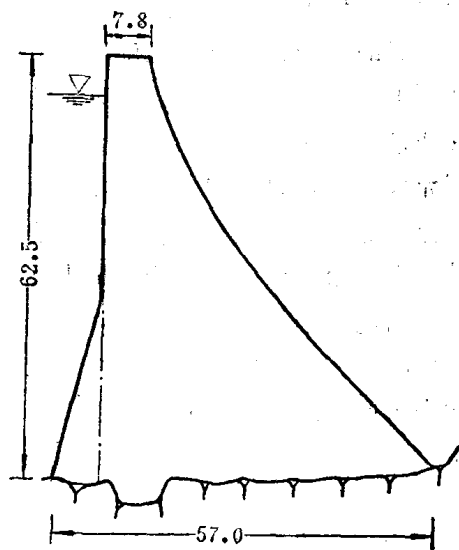


图 1-7 美国瓦丘珊特(Wachusett)坝(1900~1906)(单位:米)

3. 英国工程师对坝内应力的研究

十九世纪法国工程师们比较偏重于最优断面和应力分析的理论研究,而英国工程师们则更多地通过试验和实践进行探索。事实上,英国工程师谭康(G.F. Deacon)曾经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。

1882~1891年建造的凡威(Vyrnwy)坝,就在坝内设置了碎石排水管系统以降低扬压力。此后30年,英国建造的许多坝都采取了这种措施。

布泽坝的失事还引起了英国工程师们对重力坝内应力分布的极大重视和热烈讨论(详见第三章),1908年威尔逊(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,即(1)在坝内距地基一定高度以上的水平断面上,垂直正应力呈直线分布;(2)近地基部分的水平断面上垂直正应力不再呈直线分布;(3)在上游坝踵存有局部拉应力区,角缘处更有应力集中现象,将角缘修圆可以局部降低拉应力;(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,最大压应力平行下游坝面;(5)从主应力图形看,坝踵拉应力引起的裂缝并非是有危险的水平方向,而是近于垂直的方向。值得指出,相同的弹性理论解答,虽经许多著名的弹性力学专家努力,但由于边界条件复杂,直到四十年后(1947年),才由辛克维茨(O.C.Zienkiewicz)用迭弛法求得。七十多年前,英国工程师们的试验成果已堪与目前的有限元计算成果相媲美。他们的试验成果被坝体应力分析研究人员作为理论检验的标准,引用了近四十年。

第四节 四十年代形成的技术体系

1. 从浆砌圪工坝过渡到混凝土坝

有关重力坝的实际施工情况,在十九世纪以前,基本上都是浆砌毛石坝(*rubble masonry dam*)。毛石从料场开