

122091

基本馆藏

埧工設計

埃 · 波 尔 金

水利出版社

PDG

原 序

近年來，在水利開發的事業中，對於重力壩作了相當細致的研究，其設計方法的發展是值得注意的；另外方面，拱壩是在總結階段。

目前設計重力壩的方法已經有所規定，但是關於拱壩的理論仍然是廣泛研究的對象，這些研究工作的資料可從法國以及其他國家的一些技術期刊中或者不公開的專門設計文件中找到。

我們現在是要研究一整套的拱壩設計理論。本書並沒有詳細為讀者們寫出關於梯形定律，梁的理論，勃里斯（Bresse）公式以及圓筒公式的材料力學，靜力學和圖解靜力學方面的來源。

至於彈性理論方面我們只為研究本書所涉及的范围提出了一些概念和說明；但是對於摩爾（Mohr）圓，內極限曲綫以及安全系數等的应用則作了足夠詳細的研究。

本書是作者許多年講授本課程的成果，希望這一工作能够彌補學術方面的缺陷，并同时能够作為學生和工程師們的工具。

埃·波爾金（A. Bourgin）

英文版譯者的說明

原作者的“堤壩的計算教程”(Cours de calcul de Barrages)一書包括了作者在法國格侖諾勃尔(Grenoble)水力工程學校已經發表的講授材料。對於英文版譯本，作者惠予有效的說明和修正從而增加了譯本的价值，並且事實上等於一種第二版本。

譯者已經盡量使得譯本符合於法文原著的意思，並且力求英文譯辭不作任何誇張。譯本中如有任何不完善以及錯誤之處完全由譯者負責。

目 錄

導 論.....	1
----------	---

填筑壩—重力壩—薄拱壩—混合式或拱形重力壩—梯級壩—錐形壩

第一部分：理論基礎

第 一 章

彈性理論.....	13
-----------	----

變形—拉应力与變形之間的关系—平面彈性問題—对于一点拉应力的詳細研究—圖解表示法：摩尔(Mohr)圓—內極限曲綫—彈性系数

第 二 章

梁和拱的理論.....	55
-------------	----

总体平衡—局部平衡—梁的基本單元体積的平衡：梯形定律—超靜定梁—分析說明—基本變形：勃利斯(Bresse)方程式—厚拱方程式—內極限方程式

第二部分：重力壩

第 三 章

歷史記載.....	81
-----------	----

第 四 章

一般的穩定条件.....	85
--------------	----

傾复条件—浮托力的影响—滑动条件—地震的影响—压力曲綫—受力繩索的应用

第 五 章

应力計算.....	100
-----------	-----

無拉应力条件—莫列斯列維(Maurice Lévy)的条件—沿壩面的主压应力—抗压强度—剪力—实用断面形状和計算的理論—水庫水位突然上升或者其密度增加的影响

第六章

三角形壩体的平衡：昂高德(Pigeaud)法..... 116

彈性平衡方程式—表面条件—主压应力—壩面应力的詳細研究—穩定条件—特性綫—实用断面的計算—冰压力—浮托力—水庫水位的上升

第七章

变 形..... 139

承受靜水压力等厚度懸臂構件的彈性綫—承受靜水压力三角形壩体的彈性綫—应用彈性理論計算重力壩的变形：上游面垂直的情况

第三部分：拱壩

第八章

拱壩的發展..... 153

設計方法

第九章

圓筒方程式..... 157

圓管或圓筒方程式—轉化压力—变形—应用彈性理論分析圓筒—拱的形式—各种拱壩型式的实例—極限高度

第十章

承受均匀垂直压力的等断面圓形鑲座拱..... 174

支座的补充反力—反力 Q 的研究—作用力 F 的研究—常数的研究—鑲座拱的变形：彈性曲綫—鑲座拱理論的效用—最优中心角

第十一章

特殊荷載情况和鑲座拱的一般理論..... 196

承受垂直綫变压力的等厚度圓形鑲座拱的計算—承受部分自重的等厚度圓形鑲座拱的計算—任意拱圈和任意荷載的一般理論

第十二章

拱圈的擴張及鑲嵌作用..... 214

由于拱圈擴張所引起的推力—承受垂直压力情况—鑲座薄拱理論的概述：符号說明

第十三章

溫度变化的影响.....	227
--------------	-----

热量傳播定律—牆壁問題—無限物体：正弦擾動—有限厚度的牆壁：正弦擾動—物体的平均溫度—由于溫度变化所引起的应力—溫度的真实分布情况

第十四章

由于溫度变化引起的应力.....	240
------------------	-----

拱的物理条件—產生極限应力的条件

第十五章

自然拱的方法.....	249
-------------	-----

無拉应力条件—自然拱尺寸的計算—極限拱的計算

第十六章

懸臂拱的方法.....	261
-------------	-----

水平和垂直断面的連續性—連續近似法—懸臂拱的方法—懸臂拱法的效用—拱冠的徑向校正—懸臂構件的彈性綫—試荷載法—水平和垂直鑲嵌

第十七章

混合式橋.....	279
-----------	-----

斜拱法—鉸点位置的確定—斜拱的計算

第四部分：支墩壩和空心壩

第十八章

支墩壩和空心壩.....	291
--------------	-----

支墩壩—壩体的一般穩定—支墩計算—壩面—錐形壩

附 錄.....	315
----------	-----

参考文献.....	324
-----------	-----

導 論

自从远古时代以來，人們就已經相信可以应用技術的措施來保护他們的城市，存蓄水量以供应他們自己和牲畜的生活消耗或者解决耕地的灌溉問題；于是，因为需要日益擴展，人們就必須去建造堤壩以控制河道，供应渠道用水，控制洪水以增加枯水季節流量。近代，人們更必須为工業上的多项目标來供应水量。

在上世紀的末叶，由于水电事業的發展，这些壩已經达到相当大的尺寸，最初認為需要当年或者多年調節的蓄水量用以在高峯負荷期間集中發電，現在不再这样考慮了，一座壩的任务可以有好几項；事实上水利資源的開發，一般应考慮到如何更有效地滿足發電、農業以及河道航运等各項不同的要求。

因为水庫蓄水有几千万或者几億公方，而蓄水高度在正常河槽以上有好几十公尺，所以对于公共安全是有威脅的。在壩体失事的情況下，于結構开始破坏的瞬間洪水水头等于蓄水深度，洪水总量超出自然洪水数倍；壩体破坏后，洪水以大大超过自然洪水的速度向下游河道宣泄，致釀成毀滅性的灾难。

这类灾害，过去曾数見不鮮，例如：欧洲的波恩德斯(Puent s)，格倫諾(Gleno)，摩雷亞(Molare)和鮑瑞(Bouzey)；美國的聖弗倫西斯(St. Francis)以及印度的泰格拉壩(Tigra)。每一座水壩的失事都造成了許多生命財產的損失。在第二次世界大战期間，德國的摩恩(Möhne)和埃特(Eder)壩遭受轟炸而破坏，潰決的水量造成了下游泛濫區域內巨大的損失。所以，二十至三十公尺以上的高壩，應該慎重地以最精確的方法來進行設計。

对于壩体穩定計算的數學家們，我們在後面可以看到他們是遇到過一些困難的；但是必須承認這些計算只代表問題的一方面，另外設

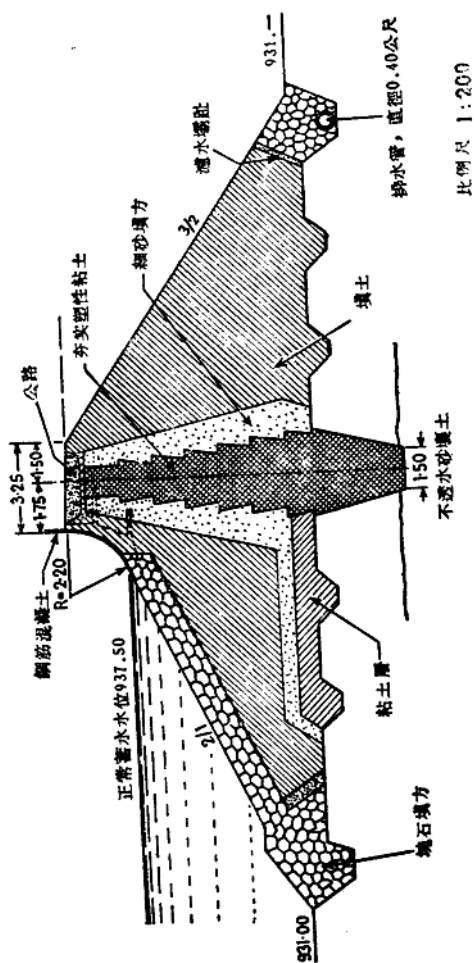


圖1. 勒克莫脫 (Lac Mort), 北堤典型剖面

計者應系統地研究基礎的物理特性以及洪水流量的分析方法。

縱使壩存在有嚴重的缺點，它要求大量的建築材料，並且因為淤積的緣故，使用壽命受到一定的限制，在設計和施工中一定要設法使它能長期利用。設計技術的改進是緩慢的，顯然壩工概念的發展也就是設計工作的一種趨向。下面我們將分別敘述各種壩型。

填 筑 壩

填筑壩是最古老的壩型，曾經著稱于亨特斯（Hindus），美索波達米亞（Mesopotamia），羅馬（Roman），埃斯賓克斯（Aztecs）和英薩斯（Incas）；現在又有回復到這類型式的趨勢。

這類壩是一種簡單的填方工程，土料可以由壩址附近找到；形狀為上下游坡面平緩的三角形；以不同的比例將粗砂和粘土級配的混合料，經壓實至一定程度，以保證不透水性。這種壩型的種類很多包括有粘土心牆壩或混凝土心牆以保證其不透水性。

按層次或者不按層次填筑的塊石填方稱為堆石壩，上游面常鋪上一種不透水材料的蓋面，如混凝土、鋼板、木板等等。

堤壩本身是不作精密計算的，其構造大多是依靠經驗和施工人員的熟練技術決定的。洪水的宣泄常常是一個重要問題，要求通過堰檻溢流或者隧洞泄流至遠離壩體的地方；土壩漫頂是不允許的。

在法國本土近年沒有土壩的建造實例，而在法屬北非地區則有許多實例。聖弗利沃爾（St. Ferréol）壩是由銳奎特（Riquet）于公元1666年至1675年為控制米狄運河（Canal du Midi）而修建的，具有最大壩高為31公尺，蓄水量為630萬公方，這是長久保存下來的世界上最重要的壩之一。其構造是在中央有不透水圬工心牆和上下游趾牆的土壩。

在阿爾及利亞（Algeria）于公元1930~1940年間法國工程師曾經在那里建造過數座堆石壩，其中有巴克達（Bakadda）（49公尺），李格列勃（Le Ghrib）（75公尺）和鮑亨尼菲亞（Bou Hanifia）（58公尺）。

美國的福特皮克（Fort Peck）壩最大高度為75公尺，底寬為875

公尺，壩長為 2,750 公尺，並包括 7,500 萬公方的填方，應該列入近代世界大壩紀錄中。

重 力 壩

因為筑壩的高度在增長，因此必須考慮其他的建築方法。根據基礎允許條件，起初採用了白灰砂漿砌築的圬工結構，隨後又採用了水泥砂漿的圬工結構，後來又改用了具有各種改良措施的塊石混凝土結構，這些改良措施包括如發散壩體水化熱量的冷卻措施，火山灰的應用以及分塊澆築等等。重力壩基本上是考慮由一種三角形剖面構成，壩頂呈直綫形，或圓弧形或拋物綫形。假定作用力（水平方向作用的水壓力和垂直作用的圬工重量）直接傳遞至基礎岩石；選用單位長度的垂直斷面以研究壩體的設計。

重力壩對於水庫水位的增漲是很敏感的；在後面可以見到這種壩型有傾復或者滑動的危險。壩體平面曲率半徑一般是不大的*；因為在設計中並不考慮在內，所以可以增加壩體的穩定程度。

最古老的一些圬工壩是在十六和十七世紀間建造於西班牙（Spain）的：埃列肯脫（Alicante）（1500），隨後有波恩德斯（Puentés）（1791）和尼嘉（Nijar）；所有這些壩的斷面都是梯形的。

公元 1780 年在法國為供應米狄運河（Canal du Midi）而建造的倫波（Lampy）壩也是梯形的，不過是用支墩加固的，其高度為 16.2 公尺。

在十九世紀建造了許多供應城市用水的蓄水壩；這些壩的剖面逐漸接近於三角形，形成唯一的合理形式。

在公元 1914~1919 年和 1939~1945 年兩次世界大戰之間的期間，建造了許多非常高的重力壩，其中在法國有埃格岑（Eguzon）（63 公尺），琴姆鮑（Chambon）（135 公尺），薩倫斯（Sarrans）（105 公尺），畢索脫（Bissorte）（65 公尺），格尼安（Gnioure）（75 公尺），琴尼遜脫（Génissiat）（103 公尺）*。（*注：所有的壩高都

* 見 B.F. Jakobsen: “拱形重力壩的說明”，美國土木工程師學會學報，1928 年第 92 卷。

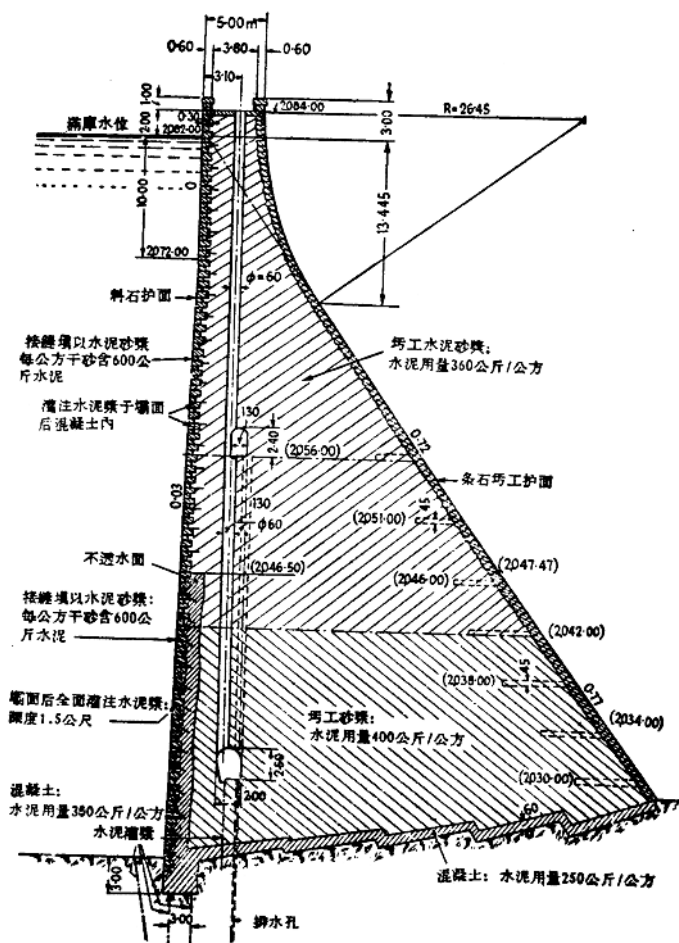


圖2. 畢索脫 (Bissorte) 壩橫断面圖

是由基礎高程算起的)，曾經應用過的各種構造形式有：外面石料砌筑的圬工、混凝土以及塊石混凝土。目前世界上最大的重力壩是美國的大菩利壩（Grand Coulee），壩高為 165 公尺，底寬 148 公尺，混凝土體積為 7 百萬公方。

重力壩已經演進至某些新的型式，例如扶垛壩和支墩壩。后者是很古老的型式，曾在南美洲的埃斯德克斯（Aztecs）和印度建造過，在印度有海德拉巴德（Hyderabad）的密亞埃倫姆壩（Meer Allum），高度為 11.9 公尺，建造於公元 1800 年，用以供應海德拉巴德市的用水。

在法國最近的實例有綏侖恩（Sèlune）河上凡辛斯壩，壩高 36 公尺，聖密契爾壩（St. Michel）以及格洛脫壩（Girotte），壩高 44 公尺。

薄 拱 壩

拱壩與直綫重力壩不同，其主要的作用力是通過拱的作用傳達至壩址峽谷兩側的岩石上。壩體建築材料是在最優的條件下傳遞荷載，這種壩型所用的材料數量與重力壩比較是非常經濟的。

拱壩是按一系統的水平拱圈來設計的，每一個拱圈都設想與其相鄰的拱圈無關並承受固定徑向的靜水壓力。

為了最經濟起見，壩址應該在最狹窄的峽谷間並有均勻坡度的岸牆；峽谷岩石應該能夠承擔由建築物傳來的重荷載。

應該注意：溫度變化對於薄拱壩是會產生應力的，而這種應力是難以正確計算的。

拱壩對於水庫水位的升漲不如重力壩那樣敏感，利用拱壩壩頂來溢流往往是可能的而且是有用處的。

第一批著名的拱壩是西班牙在十六世紀所建造的埃爾區壩（Elche）和埃爾門查壩（Almanza）以及意大利的曾多次加高的蓬塔爾多壩（Pontalto）（1612 年）。在法國新型的拱壩是於公元 1840 年開始在英弗納脫河上由左拉（Zola）所修建的，這壩高度為 36 公尺。在美國和澳大利亞於十九世紀末葉曾經修建了許多拱壩；其中許多壩

在概念上是大胆的；这些壩是皮尔凡雷壩（Bear Valley）（1884年），里沃格翁特壩（Rio Grande）和巴罗薩壩（Barossa）。旭助壩（Shoshone）（1910年）的高度在基礎以上达 100 公尺，这是第一座真正的高拱壩。

在法國僅于公元 1930 至 1940 年才恢复建造拱壩，計有勒索塔脫壩（Le Sautet）（125 公尺），卡斯狄龍壩（Castillon）（95 公尺）以及馬雷杰斯壩（Maréges）（90 公尺）；事实上，勒索塔脫壩并不是真正的拱壩。

無論何時，如果壩址選擇恰當，修建拱壩总是經濟的，这种概念已經成为很普遍的了，因此近年來又回到拱壩設計問題的理論研究。已成拱壩的实例有：勒色尔凡斯壩（La Selves）（66 公尺），法勃里杰斯壩（Fabrèges）（55 公尺），馬席勒克壩（Marcillac）（50 公尺），洛西奇（Luzège）（40 公尺）以及高尔諾亞壩（Gour Noir）（40 公尺）。以下几座拱壩目前正在施工：凡尔登（Verdon）河上的屈台恩壩（Chaudanne），其高度將达 70 公尺；伊薩亞（Isère）河上的泰格納斯壩（Tignes），其高度为 180 公尺（現在已經完成）；这两座壩在紀錄上是屬於高的薄拱壩。

拱壩有下列值得注意的布置上的变化：勃沃奇（Bioge）壩（49 公尺）和蓬脫-恩-洛揚斯壩（Pont-En-Royans）（25 公尺）是一种等厚度的純圓筒結構；此外还有在下游方向傾斜的壩，如恩琴納脫壩（Enchanet）（70 公尺）和考埃斯奎壩（Couesque）（65 公尺）。

混合式或者拱形重力壩

拱壩对于很寬廣的壩址是不合適的，因为这是不經濟的而且拱的作用也是可以怀疑的。在这种情况下，我們采用一种混合式壩的办法來解决：或是縮小断面的拱形重力壩，或者加厚断面的拱壩，其跨度中央壩坡为 0.5，而拱座处还要加厚。

这些加厚拱壩的計算不僅僅要考慮拱圈本身的影响，而且还應該考慮到半重力断面的作用；亦即計算應該同时考慮水平拱圈和垂直断面的联合作用。

混合式壩是非常適用於壩體與電站和溢流段結合的情況，這種壩已經建成的在法國有埃爾埃格爾壩（L'Aigle）（95公尺），聖埃丁恩肯塔爾斯壩（St. Etienne Cantales）（70公尺），鮑脫壩（Bort）（120公尺）和卽斯登壩（Chastang）（85公尺）。美國考洛雷多（Colorado）河上的波爾德壩（Boulder）也是一種混合式的拱形重力壩，高達220公尺，是目前世界上最高的壩。

梯 級 壩

梅斯納杰（Mesnager）大約在二十五年以前建議水庫以一系列高度逐一降低的拱壩來修建；連續拱壩之間的空間充水至下游壩的壩頂高程；根據這種布置方法，在每一個拱壩上的壓力限於連續兩拱壩的高度差；結果，所有的拱壩都是等厚度的，並且可以希望達到材料的經濟使用。

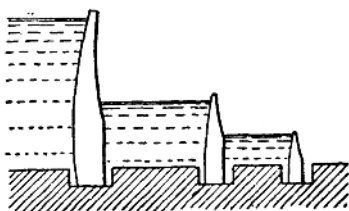


圖3.

錐 形 壩

錐形壩的下游面具有一種複雜的幾何輪廓，這種壩型的結構介乎重力壩和支墩壩之間，設計是根據應用簡化假定的三向彈性理論。

前面我們對近代一般採用的各種壩型作了扼要的敘述，我們現在要討論筑壩的最新趨向。

壩的設計是不能大量生產的，必須使得設計適宜於壩址和基礎的特殊條件。在較老的國家中，最好的壩址有很早就作過勘探的，而我們今天的設計者和施工人員面臨着相當困難的問題。

在法國應尽可能趨向於採用一種薄的或者厚的拱壩，這是對於高壩的一種經濟的解決辦法。在法屬北非（French North Africa）地區基礎情況往往很壞，因而堆石壩認為是比較最適宜的。在美國則對於目前正勘探中的很寬闊的壩址，土壩是最合適的（包括大量的筑壩材料）；然而，很大的重力壩還是在修建着。意大利工程師們沒有規定

任何特殊壩型，但是他們已經設計過若干非常單薄的拱壩。在瑞士建造了一些空心壩，例如狄克遜斯壩（Dixence），圖 245。

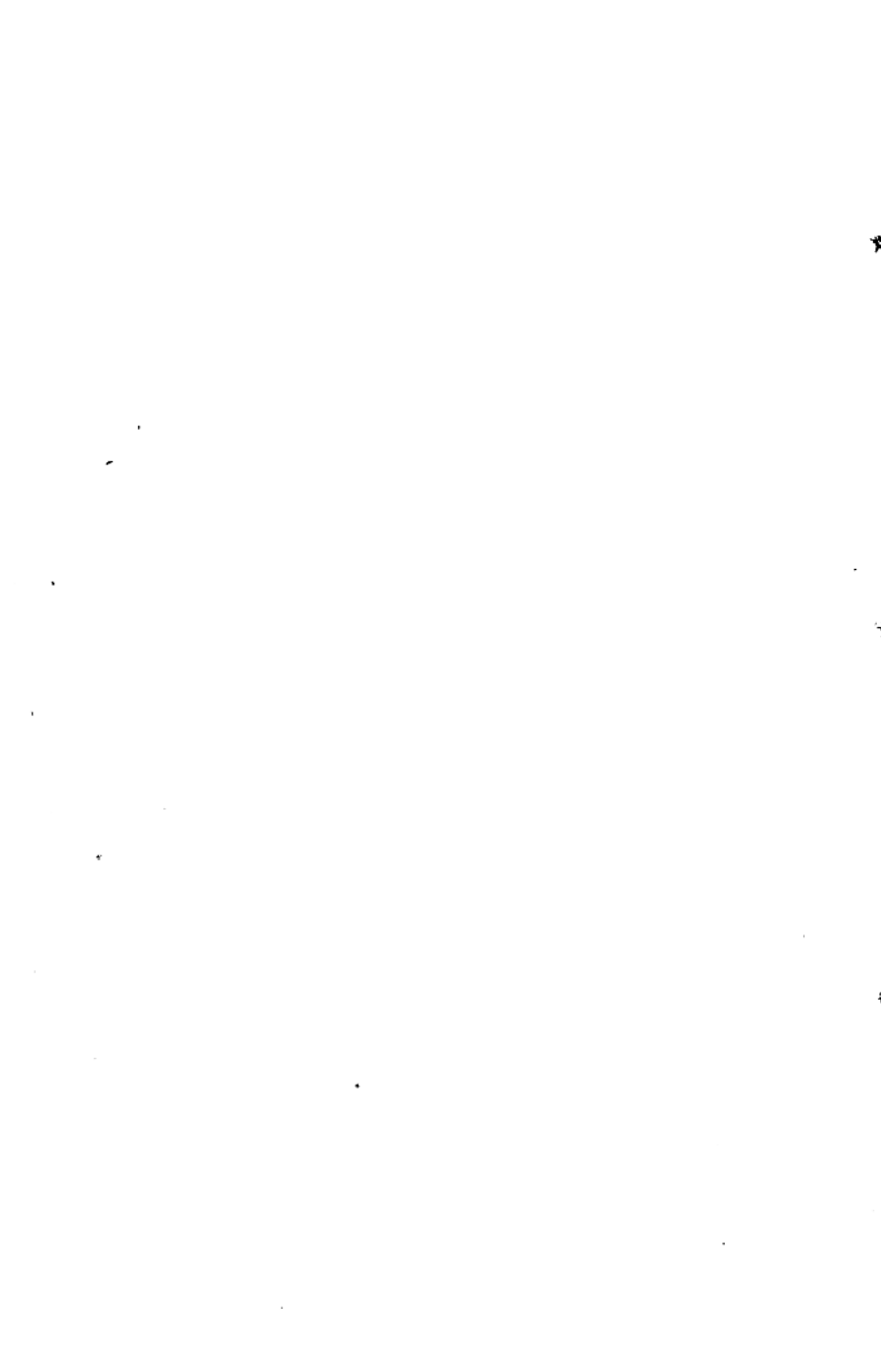
在選擇壩型中國防要求已經開始被考慮為壩工設計的一個因素。由於轟炸所引起的洪水潰決直接威脅着交通，人類安全，或者戰時工業，這對國防軍事方面是一種重要的影響。

公元 1943 年 5 月 17 日德國的埃德壩（Eder）和摩恩壩（Möhne）遭到英國皇家空軍轟炸所破壞；但是在索伯壩（Sorpe）的情況，則是失敗了；這就引起了一系列的討論。支墩壩或者連拱壩從國防軍事觀點來看是不恰當的，因為這類壩型結構單薄的特性容易遭到襲擊而毀壞。

重力壩因為其不穩定性，所以保護國防安全只有降低水庫蓄水水位；這種措施非常不經濟。空心壩由於其結構的單薄所以是比較容易損壞的。薄拱壩比較厚拱壩遭受轟炸危害的嚴重性要小一些，因為地震波的傳播可以減弱一些。

土壩由於其體積大和壩底寬，所以如索伯壩（Sorpe）的經驗證明，能夠經受反復的空襲。

然而，在戰時水壩應該也像其他重要工程一樣需要以偽裝、煙幕和高射炮等防空的辦法來加以防護。



第一部分

理論基礎