



混凝土坝的设计和施工

水利电力部治淮委员会勘测设计院等著

水利电力出版社

目 錄

佛子岭和梅山水庫連拱壩工程的設計和施工·····水利电力部沿淮委员会勘測設計院(2)	
磨子潭水庫大体积肋墩壩的設計和施工 ·····陈善銘等(17)	
論流溪河工程拱壩設計中的若干問題 ·····潘家鏐(42)	
附件: 用試載法計算拱壩應力的簡化和改进图表·····潘家鏐(81)	
流溪河拱壩抗震試驗报告·····大連工学院601抗震試驗組(110)	

佛子岭和梅山水庫連拱坝工程的设计和施工

水利电力部治淮委员会勘测设计院

一、提 要

佛子岭水庫和梅山水庫是淮河南岸主要支流——淠河和史河上的大型山谷水庫，都是以防洪为主，灌溉和发电其次，同时改善航运的綜合利用水庫，佛庫控制流域面积1,840平方公里，总庫容5亿公方，梅庫控制流域面积2,150平方公里，总庫容22.75亿公方，佛庫于1952年1月开工，除溢洪道扩大工程在1958年完成以外，其余部分在1954年10月均告完成，梅庫于1954年3月开工，到1956年汛前除隧洞混凝土衬砌和閘門安装以外，其余基本完成，这一部分余留下来的工程已于本年內陸續完工。

佛子岭水庫和梅山水庫的拦河坝型式，均采用連拱坝，佛坝全长510公尺，有20个墩21个拱和两岸接拱重力坝，最大坝高74.4公尺，坝身混凝土195,000公方，用鋼筋4,465吨，梅坝全长443.5公尺，有15个墩，16个拱，两岸接拱重力坝和东山空心重力坝，最大坝高88.24公尺，坝身混凝土236,000公方，用鋼筋5,460吨。

佛坝梅坝选定連拱坝，是根据对五种和六种坝型选择比較的结果，从投資最经济，施工快、和方便，以及地质、地形、气候等比較适宜的条件，而最后决定的。

連拱坝是由高低不等的梁拱和两端重力坝組合成为一个整体，是一个高度靜不定結構，分析时除了考虑力的平衡外，还要顧及整个結構的連續性，依据結構和荷重的特点給予适当的假定，簡化分析的对象。設計項目包括拱、梁、面板三部分。設計成果，梅坝拱內最小受压安全因数是在基本加附加荷重情况下为2.31，庫空时特殊情况下，預防裂縫安全系数最小为1.29，面板最大主拉应力4.35公斤/平方公分，最小預防裂縫安全系数1.38，坝的防滑安全系数最小为1.67，切力摩擦安全系数最小为4.98，梁內最大压应力36.15公斤/平方公分，拉应力为3.35公斤/平方公分，側向地震时側向稳定系数3.3，梁內最小压应力0.56公斤/平方公分，梁的自由振動周期0.47~0.56，佛坝成果不再列举。

連拱坝的施工程序根据坝址的不同特点而拟定，佛坝采用东西两岸分期施工的方案，利用半个河床或坝体鋼管导流，允許拱頂在施工时期少量溢流，梅坝采用隧洞导流一期施工的方案，坝体内不埋設泄洪鋼管，为了爭取提前拦洪，解决工程量太大的問題，将坝梁上、下游6仓分成两次澆筑，先将前四仓澆到拦洪高程，再澆筑后二仓，佛坝梅坝已于1954年，1955年先后发挥了拦洪作用(附佛子岭水利樞紐布置图，梅山水庫工程布置图，佛子岭連拱标准断面图之一，梅山連拱坝坝身断面图之一，共四图)。

二、佛子岭梅山兩水庫的概况

佛子岭水庫是淮河南岸支流淠河上的一个重要水庫，建設水庫的目标，首先是控制洪水，其次为灌溉农田、水力发电及改良航运，是一个綜合利用水庫，最大总庫容5亿公方，

控制流域面积1840平方公里，占渭河流域的27.5%，樞紐主要工程如下：

1.連拱坝一座，坝頂全長510公尺，有梁20个，拱21个，和兩端重力坝，西端重力坝有一部分做成平板坝，連拱坝最大坝高74.4公尺，坝基岩石为黑色石英岩，花崗岩和白色石英岩夾片岩。坝体全部混凝土为195,000公方。

2.洩洪鋼管8道和灌溉发电鋼管3道，分別裝在7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19号等11个梁內，洩洪鋼管內徑1.975公尺，出口裝1.75公尺方形高压閘門，每套最大洩量66秒公方，灌溉发电管道出口裝1.25公尺圓形空注式閘門，最大洩量18秒公方。

3.溢洪道一座，設在东岸山凹中，原設計进口高程低于坝頂10公尺，寬26.4公尺，最大洩量1200秒公方，后因获得1954年以后的水文資料，发现原规划标准偏低，最后决定配合磨子潭水庫的兴建，扩大到淨寬度为53公尺，进口高程挖深到坝頂以下17公尺，最大洩量5710秒公方，保证千年一遇洪水不漫溢坝頂。

4.水电站一座，設于18, 19拱內，裝2台1000瓩和3台3000瓩水輪发电机，将来配合磨子潭水庫兴建尚可再扩大装机容量。

樞紐工程主要工程数量(不包括扩大溢洪道部分)共計有混凝土195000公方，鋼筋4465吨，土石方1,377,000公方，灌漿13,500公尺。

樞紐工程从1952年1月9日开工，分西东兩岸兩期施工，1952年7月澆筑一期坝身工程混凝土，1953年11月澆筑二期坝身工程混凝土，1954年6月全部坝身澆筑到頂，到1954年10月，除溢洪道外，全部完成，共投資約五千多万元。

梅山水庫是淮河流域大型山谷水庫之一，建于淮河支流史河上游，以防洪为主，同时兼筹灌溉和发电，并适当改善下游航运。也是綜合利用的水庫，最大总庫容22.75亿公方，控制流域面积2150平方公里，占史河本流域面积42%，樞紐主要工程如下：

1.連拱坝一座，全長443.5公尺，有梁15个，拱16个，兩岸重力坝和东山空心重力坝，連拱坝一般坝高84.4公尺，最大坝高88.24公尺，坝基为整体細粒花崗岩，节理較发育。

2.隧洞一道建在坝址右岸，直徑6公尺，長245公尺，在隧洞中部裝4.5公尺方形高压弧形閘門，最大洩量630秒公方。

3.洩水道一道，設在坝身第9号拱台內，裝2.25公尺方形高压閘門一个，最大洩量152秒公方。

4.溢洪道一座，設在坝的东岸，淨寬84公尺，分7孔，裝7座 12×7.2 公尺弧形閘門控制最大洩量5820秒公方。保证万年一遇洪水不漫溢坝頂。

5.水电管4道，分別裝在5, 6, 7, 8号梁內，引水到梁后水电厂房。水电站設備目前正在施工。

樞紐工程主要工程数量，共計有混凝土266,000公方，鋼筋6000吨，土石方560,000公方，灌漿10,000公尺。

樞紐工程从1954年3月26日开工，先做隧洞，圍坝，清基，1955年1月29日开始澆筑坝身混凝土，7月9日澆筑到水庫攔洪高程(約有坝高50余公尺)随即澆筑坝身二期工程混凝土(坝梁下游部分)从坝基岩石面开始高八十多公尺，1956年1月21日即將坝身建筑到頂，1956年汛前除隧洞襯砌外基本完工，1956年汛后开始隧洞襯砌和閘門安裝工作，于本年內可以全部完成，共投資六千多万元。

三、連拱壩的优缺点和佛子岭壩选用該壩型的理由

連拱壩是支撐壩中的一種，据我們現有資料，世界上已建成者約有80多個，最高者達八十餘公尺（梅山壩高88.24公尺，美國巴特萊脫壩高87.3公尺）連拱壩的优缺点大致如下：

1. 壩的上游面傾斜，可以利用水重增加壩的穩定，並能充分發揮拱和梁混凝土的應力，減少壩體重量，節省混凝土。常是較經濟的壩型。
2. 壩是空心的，在基礎上浮托力的影響很小，因而可減輕壩體重量。
3. 壩基應力分布較均勻，庫滿庫空時應力變化不太大。
4. 壩體斷面較薄，容易散熱，混凝土溫度控制影響小，可以進行快速施工。如梅山佛子岭的經驗壩身每月可以澆筑15~20公尺高度。
5. 進行正確的設計，可以抵抗地震的影響，如佛子岭壩即在施工期間也曾遭遇過地震但並無不良影響。
6. 壩體施工受季節和雨雪影響較小。
7. 經過事先全盤考慮和適當措施，可以分期建築。
8. 連拱壩對地基要求較高，但也並不是過分嚴格的。
9. 由於壩身單薄，不適宜建於嚴寒地區，因可能遭致冰凍和風化的破壞。
10. 不適宜壩頂溢流，尤其是高壩。
11. 壩面較薄容易產生裂縫滲水，增加管理工作的麻煩。
12. 壩身單薄，有人認為不耐久，對防空不安全。
13. 對溫度變化很敏感，在溫度變化大的地區，要布置較多鋼筋。
14. 設計和施工比較複雜。
15. 需要模板數量較多。

佛子岭壩曾經做過連拱壩，平板壩，重力壩，堆石壩，土壩等五個壩型的比較，梅山壩曾經做過連拱壩，平板壩，重力壩，單拱壩，堆石壩，土壩等六種壩型和下游八里灘土壩的比較，最後都是選定連拱壩做為壩型。其理由如下：

1. 佛子岭梅山都是在太別山區的山谷中，對外交通非常困難，運輸單價很高，例如每噸水泥廠內售價約50元，而運費却要70元左右。所以應選擇少運外面物資的壩型。經過計算比較連拱壩是四種混凝土壩型中最少的一個。
2. 壩址附近土料缺乏，要遠方取土，同時河谷狹窄，兩岸陡峻不適宜建築土壩，而且土壩造價很高。
3. 堆石壩（指用粘土和堆石的複式壩）也是很可考慮的壩型。但是也須要很多的土料做心牆。在石料堆筑中又須要大量的起重設備。當時不易解決。同時造價很高，故未採用。
4. 兩個水庫都要求具有較快的施工速度，使能提前攔洪，早日配合解決淮河洪水問題。

題，連拱壩具有这样的优点。

5. 经过几种壩型具体比較以連拱壩最为經濟。例如，佛子岭水庫以連拱壩投資为100，則平板壩为125，重力壩为129，堆石壩为158，土壩为127。

6. 地質地形条件較好，可以做連拱壩。

7. 梅壩建筑于佛壩之后，已积累了一定的經驗。并有不少現成設備可以利用，减少投資，也是当时梅壩选定連拱壩的理由之一。

四、壩体主要尺度的选择

壩梁形式，壩面坡度，壩梁間距，拱的跨度和中心角等，几項主要尺度，是要在正式分析以前，通过比較計算先予决定的。

1. 壩梁形式

連拱壩建筑在地震区域内，壩梁須有足够的側向剛度和稳定性，故适宜采用双梁牆空心壩梁，佛子嶺壩采用双梁牆空心壩梁，兩片梁牆外边垂直，保持壩梁外寬恆等。可以便利拱的鋼模壳安裝，同时梁牆模板安裝的标准也容易掌握，在这样的基础上，梅山壩也采用双梁牆空心梁牆，保持壩梁上游面外寬相等。但使兩片梁牆向下游面逐漸加大外寬，向底部也逐漸加大外寬，形成一个上狹下寬和上游面狹，下游面寬的空心壩梁，提高了壩梁的側向穩定程度，同样也可便利拱的鋼模壳安裝，在梁牆模板安裝的标准掌握，因已取得佛壩的經驗并未增加很多困难。

2. 上下游壩面坡度

一般說来若用同样数量的混凝土壩的上游面坡度愈坦，借用水重愈多，壩的稳定程度也愈大；但是，壩內应力却較大，尤其是靠近上游壩面的拉应力，反之，坡度愈陡，稳定情况愈差，但壩內应力情况却較好。在选择壩面坡度的工作中，首先根据壩基地質特点和施工条件，决定壩的許可滑动因数后結合混凝土的强度，就可进行上下游壩坡的选择，梅壩經過三組計算，一組是采用同一下游面坡度，不同的上游面坡度，一組是采用同一上游面坡度不同的下游面坡度，一組是同一底寬相应变动上下游面坡度，每組每种都加以計算，考虑壩的稳定，內部应力和工程数量，梅壩决定上游壩坡为1:0.9，下游壩坡1:0.35。佛壩决定上游壩坡1:0.9，下游壩坡1:0.36。

3. 壩梁間距和拱的跨度

壩梁間距是一个經濟問題，但在选定适宜的拱的跨度以后，則比較的因素却是壩梁的寬度，也就和結構的安全有很大关系，而不仅是單純的經濟問題了。

最經濟的壩梁間距，在一般資料，壩高在60~70公尺左右的双牆梁壩，通常采用20公尺左右的間距比較适宜。一般在經濟中心距左右，壩的造价变化不致太大，佛壩因限于時間来不及詳細比較計算，故采用20公尺，定拱的跨度为13.5公尺。梅壩因爭取利用

佛坝的拱的鋼模壳，以节省大量投資，將拱的跨度定为13.5公尺。在这样的条件下，采取17~22公尺等不同的坝垛間距（即空心垛的外寬3.5~8.5公尺）进行試算，在内部应力及縱向安全情况大致相似的条件，得出坝垛間距愈小就愈經濟的結論，也就是指采用單垛牆的坝垛为最經濟；但是，为了在地震时，坝垛必須有足够的側向剛度，因之寬度不能太小，从安全和經濟着眼，并結合坝垛有高低的情况，河床部分3—13号垛采用間距20公尺，其余坝垛位于兩岸，高度較小，間距采用19.5公尺。

4. 拱的中心角

現有連拱坝拱的中心角多在 140° 到 180° 之間，中心角愈大則拱內拉应力愈小，因而最好采用 180° ，或接近此值；据国外經驗，当坝高在60公尺以上时，以 180° 为最經濟；拱的中心角愈大，愈富柔順性，故在温度变化較大或地震区域，常采用較大的中心角，同时拱座切应力也以 180° 为最小，所以佛坝和梅坝拱的中心角都定为 180° 。并为了簡化施工，將主要內拱模板标准化，使拱內直徑在坝頂坝底均为13.5公尺。

5. 垛牆最小厚度与隔牆佈置

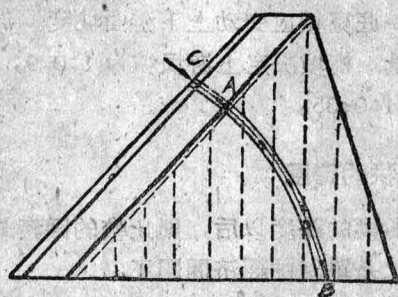
拱和垛的最小厚度，根据施工条件而定，由于兩坝一次澆筑高度均为5公尺左右，高度較大，为了便利工人能下去在模板之間操作，最小厚度佛坝定为0.5公尺，梅坝定为0.55~0.6公尺。

垛的橫隔牆起着連接和加固兩片垛牆的作用，佛坝隔牆間距定为6公尺，厚0.5公尺。梅坝定为8公尺，厚0.6公尺。

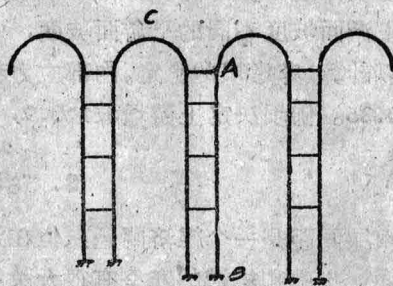
五、設計方法和成果

1. 总 述

連拱坝是由高低不等的垛，拱和兩端重力坝組合成为一个整体，分析时除了考虑力的平衡外，尚要顧及整个結構的連續性。在正常情况下，坝面上的荷重大致是沿着悬鏈綫的方向，通过坝垛傳至基础（见图1），沿着这个方向，从整个坝体結構中，截取出一



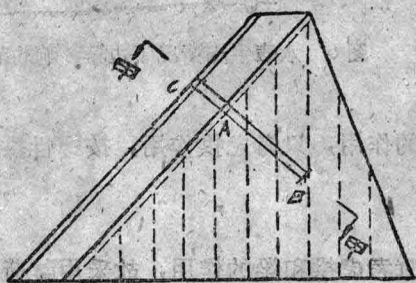
(甲) 坝身側面



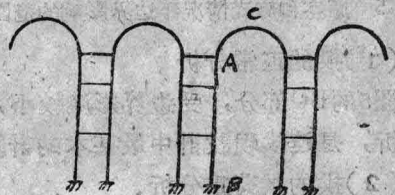
(乙) 截面CAB連拱框架

图 1

个單位寬度的連拱框架來进行分析，由于隔牆較薄，它的剛度比面板和梁牆要小的多，因此可以視為兩端鉸接的杆件，从一般結構理論得知，最上層的荷重对下層的影响很小，并据計算可以假定梁牆固定在第三道隔牆處，而能得到足够准确的結果，为簡化計算，故假定这种連拱框架固定在第三道隔牆處(如图2)进行分析。



(甲) 坝身侧面



(乙) 截面甲—甲連拱框架

图 2

由于在同一个連拱框架中，各个拱环和框架的厚度都相同，在正常情况下，各拱和面板的荷重不但相同，且对称于它们的中心綫，因为具有这两个特点，故只須考虑拱座角变位的影响，就能单独取出一个拱环来进行分析，和考虑拱的整体抗弯剛度，就能单独取出梁框架来分析；連拱框架上的荷重，分为图3，图4两种，分别进行分析，然后再將两种結果叠加，即得出所求应力。图3称为拱的分析，图4称为面板的分析。

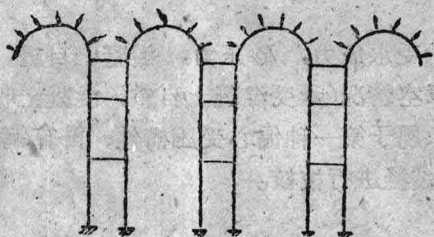


图 3 考虑拱的荷重

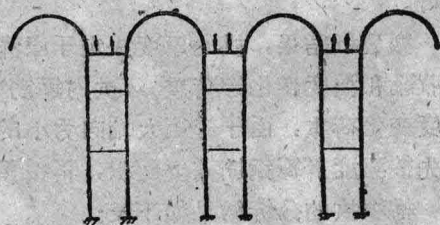


图 4 考虑面板的荷重

2. 拱的设计

按图3的結構和荷重情况来分析，根据連拱框架的特性，先算出拱座角变位系数 $\frac{\alpha}{ET}$ (即由于單位弯矩在拱座处所产生的角变位数值)，利用此系数即可計入拱座角变位影响，取出拱环，用彈性拱的理論进行分析，同时按图4計算出由于面板上的荷重在拱环內产生的应力，和前者叠加，即得拱內应力，由于拱筒在坝的頂部，底部和水面附近，受边界条件的影响，不仅有拱的作用，同时，梁的作用更为显著(图5，图6)。边界的影响范围大致如下式

$$L = 2\sqrt{rt}$$

式中 r 为拱半径， t 为拱厚。

如果底拱或頂拱設有断开伸縮縫时，則以縫为界，在其他范围内梁的作用很小。在梅坝和佛坝的实例中，我們每隔5公尺，或10公尺截取一个連拱框架来分析。

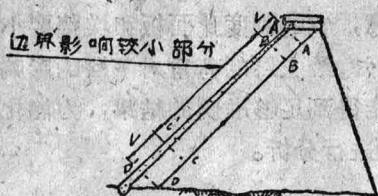


图5 庫空和庫滿情況下边界影响的范围

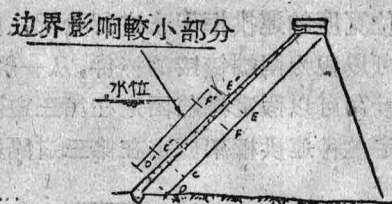


图6 水庫半滿情況下边界影响的范围

(1) 拱的正常分析

图5的BC部分，受边界影响较小，略去梁的作用，只考虑拱作用，按弹性拱理论进行分析，是連拱坝設計中最基本的計算之一。

(2) 拱的試荷重分析

图6的EF部分，因受水面边界影响，要同时考虑拱和梁的作用，故采用試荷重法进行分析，因連拱坝拱环厚度較薄，承受荷重时，拱的变位主要是向心位移，荷重分配主要根据向心位移而定，因此分析时，只需考虑拱环与梁的向心位移的調整已足够准确。

(3) 底拱分析

图5，图6的CC'以下部分，受基础边界影响，要考虑拱环和悬臂梁的作用，也用調整向心位移試荷重法进行分析。

(4) 頂拱分析

图5BB'以上部分，边界情况复杂，但荷重很小，分別用双铰拱与无铰拱的方法来分折。

据分析結果，拱的厚度决定于庫滿情况(承受水压力，砂压力，混凝土自重，混凝土收縮和温度变化等荷重)，拱內鋼筋决定于庫空情况(承受混凝土自重，混凝土收縮和温度变化荷重，由于弯矩大軸向力小的原故)。属于第一种偏心受压構件；計算鋼筋时，首先按强度計算鋼筋需要面积，再按預防发生裂縫进行校核。

梅坝拱的分析結果如下表：

壩高	庫滿时的受压安全因数		庫空时的預防裂縫安全系数	
	基本+附加荷重	基本+附加+特殊荷重	基本+附加荷重	基本+附加+特殊荷重
15	3.74	3.14	1.96	1.29
25	3.12	2.70	2.11	1.34
35	2.92	2.64	2.23	1.67
45	2.78	2.66	2.48	2.02
55	2.67	2.60	2.83	2.35
65	2.41	—	2.83	—
75	2.33	—	2.93	—
85	2.31	—	3.13	—

說明：1. 庫滿时及庫空时在基本荷重作用下，拱內无拉应力产生，故不按預防裂縫校核。

2. 地震时壩高65公尺以下增加特殊荷重甚小，从略。

3. 基本荷重包括水压力，砂压力，混凝土自重。

附加荷重包括混凝土收縮和温度变化。

特殊荷重包括地震时水的激蕩力，拱身慣性力，非常洪水压力。

3. 面板的設計

按图4所示的結構形式和荷重情况进行分析, 由于面板跨度很小, 而荷重强度很大, 一般都由切应力控制厚度, 故在设计之先, 按切应力拟定初步厚度, 然后再进行正式详细的分析, 必要时, 进行修正断面。前已指出, 由于荷重和结构的对称性, 只要将拱的整体抗弯刚度考虑后, 就可单独取出一个梁框架进行分析(如图7)。因隔牆較薄, 刚度比面板和梁牆都小的多, 因此视为两端铰接的杆件, 据计算可以假定梁牆固定在第三道隔牆处, 已足够准确, 由于 L' 和 L 相差甚巨, 分析时假定面板与梁牆连接部分的转动惯量 $J = \infty$, 或 $\frac{1}{EJ} = 0$; 即假定当框架受荷重后, 拱梁和面板仍以它们的共同节点 B 和 B' 为中心而转动, 但在阴影部分内各质点不产生相对的角度变位, 这样, 图7所示的框架, 便为各构件的中心线所组成如图8, 但在阴影部分的 $J = \infty$, 如图8, 当連拱框架的形式决定之后, 即能计算出一套表示其结构特性的常数(整体抗弯刚度, 一次传递系数, 以及弯矩系数)和固定端弯矩, 然后将弯矩一次分配, 得面板的端弯矩, 再求面板跨中心的正弯矩。

据分析结果, 面板的厚度决定于面板两端的切应力, 面板的上游面钢筋决定于端弯矩, 下游面钢筋决定于跨中央正弯矩。钢筋含量先按强度计算钢筋需要面积, 再按预防发生裂缝校核, 试算结果面板属于第二类少钢筋混凝土。

面板接近基础部分, 受到边界影响, 除了前述的框架作用外, 也产生显著的悬臂作用, 故用试荷重法分析, 布置足够的纵向钢筋。

梅坝面板分析结果如下表(基本+附加荷重):

牆 高	梁牆邊緣主拉应力安全因数 k	預 防 裂 縫 安 全 系 数 k			
		正 弯 矩		負 弯 矩	
		实 际 k	要 求 k	实 际 k	要 求 k
15	4.76	1.28	1.30	4.33	3.0
25	3.41	1.48	1.30	4.60	3.0
35	3.26	1.96	1.30	5.55	3.0
45	3.10	2.13	1.30	5.78	3.0
55	3.54	2.51	1.30	6.85	3.0
65	3.27	3.01	3.0	6.15	3.0
75	3.80	13.00	3.0	7.20	3.0
85	5.35	13.80	3.0	8.02	3.0

4. 坝塊的設計

拱和面板的荷重经过坝塊传递到基础上, 由于结构和荷重的对称, 所以假定各梁分别负担各該跨内的荷重, 采用整体的一个梁为单位进行分析, 梁的设计和计算按下列三个方法依次进行:

(1) 斜柱法

斜柱法分析的目的在于决定梁牆的经济厚度。

假定梁牆由許多彎曲的柱所組成，彎曲的方向大致與懸鏈綫相合（懸鏈綫是荷重與梁重的合力，從壩面到壩基所走的軌迹），相鄰兩柱間假定沒有應力存在，柱身內只有純壓應力。根據壩面荷重及混凝土的強度，即可求得懸鏈綫和梁牆的理論經濟厚度，結合實際施工的要求和便利，決定適用的梁牆厚度，重新修正懸鏈綫，沿此大致方向，將梁分成三個大斜柱體，計算斜柱內各部位的近似應力。

(2) 穩定分析

壩的穩定狀態的破壞，有三種原因：

即滑動、傾倒、浮舉，連拱壩上游壩面坡度很坦，合力作用點靠近斷面中心，不可能傾倒。壩體是空心的，和基礎接觸面積不大，所以壩基滲水壓力很小，不會發生浮舉，故壩的穩定情況只要復核滑動的可能性。

防滑安全係數 $K_c = \frac{f \cdot \sum p}{\sum Q}$ 要求大於 0.90~0.75 (不計粘着力)

切力摩擦安全係數 $K'_c = \frac{f_1 \sum p + CF}{\sum Q}$ 要求大於 4.5~4.0

式中：f 為壩基與混凝土間的摩擦係數用 0.65 (佛子嶺) 0.7 (梅山)；

f_1 為比例係數，用 (0.65)；

$\sum p$ 總垂直力；

$\sum Q$ 總水平力；

C 混凝土與壩基或壩身水平縫面上的單位粘着力採用混凝土受切極限強度；

F 混凝土和岩基 (或縫) 的接觸面積。

梅壩穩定分析結果如下 (正常情況)：

壩高	15	25	35	45	55	65	75	85
K_c	1.40	1.16	1.10	1.08	1.07	1.09	1.11	1.12
K'_c	8.63	5.94	5.44	4.98	5.01	5.02	5.06	5.01

佛壩穩定分析結果如下：

係數	情況	10	20	30	40	50	60	70
K_c	正常情況	1.06	0.96	0.93	0.93	0.93	0.91	0.91
	縱向地震	0.94	0.87	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83
K'_c	正常情況	22.8	10.4	7.11	5.79	5.01	4.61	4.37
	縱向地震	19.2	8.93	6.14	5.02	4.35	3.99	3.76

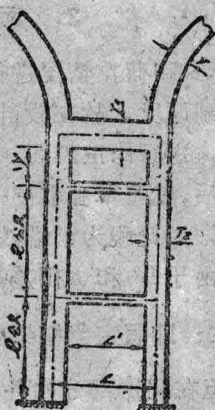


圖 7

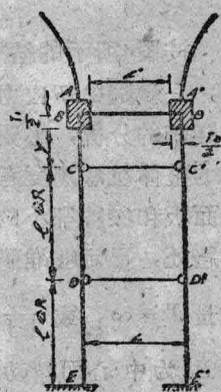


圖 8

(3) 应力分析

坝坝上游面与拱相連，本身又是空心的，边界条件很复杂，要准确完善分析坝坝应力是不可能的，只能加以必要的假定，使問題简化，然后才可能进行分析，如假定水平截面上的正应力依直綫分布，这一假定虽不十分可靠，但除靠近基础部分外，尚与实际相差不远，同时其他因素如混凝土收缩，温度变化等都会影响到应力的分布，因此也用不着过分精密的分析。

现在坝坝应力分析的方法有三：a. 估算法；b. 几何法；c. 应力函数法，概述如下：

a. 估算法

因在上下游坝面处主应力最大常为控制条件，用此法可以簡捷的估算出上下游坝面的主应力，計算公式如下：

第一种假定拱梁之間是无摩擦力的接縫

$$\text{上游面 } \sigma_1 = \sigma_n, \quad \sigma_2 = \sigma_y' \sec^2 \alpha - \sigma_n \tan^2 \alpha$$

$$\text{下游面 } \sigma_1 = \sigma_y'' \sec^2 \beta, \quad \sigma_2 = 0$$

第二种假定拱梁为一整体

$$\text{上游面 } \sigma_1 = \sigma_n, \quad \sigma_2 = \sigma_y' \sec^2 (\alpha + \Delta\alpha) - \sigma_n \tan (\alpha + \Delta\alpha)$$

$$\text{下游面 } \sigma_1 = \sigma_y'' \sec^2 \beta, \quad \sigma_2 = 0.$$

第三种假定拱荷重由梁承受，但計算断面不包括拱筒。

$$\text{上游面 } \sigma_1 = \frac{1}{2} \left(\sigma_n (1 - \tan^2 \alpha) - 3\tau \tan \alpha + \sigma_y' \sec^2 \alpha \right)$$

$$\pm \sqrt{(\sigma_n - \sigma_y')^2 \sec^4 \alpha + 6\tau \tan \alpha (\sigma_n - \sigma_y') (3 - \tan^2 \alpha + 9\tau^2 \sec^2 \alpha)}$$

$$\text{下游面 } \sigma_1 = \sigma_y'' \sec^2 \beta, \quad \sigma_2 = 0$$

上述三种假定須根据拱梁接縫，拱收缩縫構造和施工条件判断决定，但第二种假定計算結果，往往失之过大，故不常用。

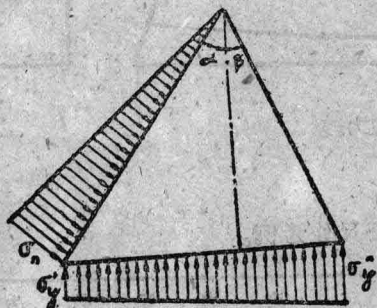


图9

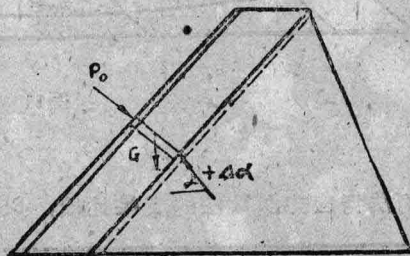


图10

6. 几何法

基本假定水平截面上正应力按直綫分布，分析时首先計算上下两个相鄰的水平断面上的正应力，来推算各点的切应力，和垂直面上的正应力，再用主应力公式求得截面上各点的第一第二主应力，和它們的方向，这种方法可以考虑坝身断面厚度的变化，但在計算中遇到同份量相减，数字一般要7位，因此必須用计算机演算，工作量过于繁重，若自坝頂至基础逐层計算太費時間，故只选择了一两个截面計算，以了解主应力的趨勢。

B. 应力函数法

此法适用于边界条件比较简单的情况(如坝面坡度为一常数, 坝面上作用力按直线变化), 假定拱梁间是光滑无摩擦的接缝, 不计上下游面板和隔墙的影响, 将结构形式及边界条件加以适当简化, 使能用弹性力学的方法, 直接推算坝内任一点的应力。经验证明, 计算结果和几何法所得者极相近似, 而本法只要使用计算尺, 计算简便, 入力和时间节省很多, 是佛坝梅坝采用的主要方法。

佛坝的应力分析成果

应力函数法

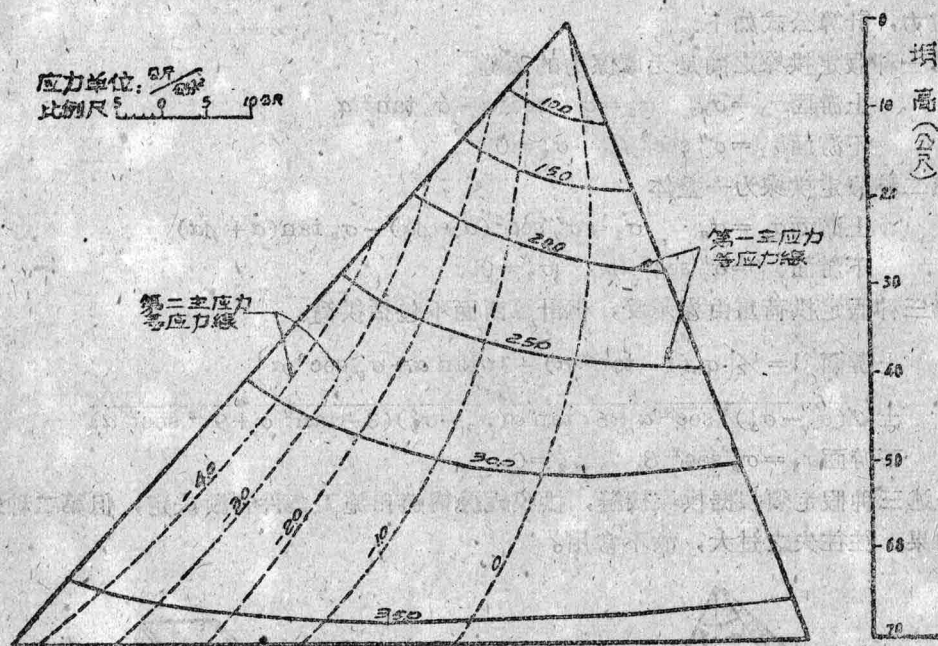


图11 主应力等应力线

几何法与应力函数法的成果比较, 以坝高 33 公尺处为例。

点次	几何法		应力函数法	
	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
1	20.3	0.12	22.0	0.1
2	20.8	0.14	22.5	0.2
3	21.4	-0.15	22.8	-0.1
4	21.9	-0.37	23.2	-0.6
5	23.0	-1.29	23.7	-1.1
6	23.8	-2.02	24.6	-1.8
7	24.6	-2.83	25.3	-2.6
8	25.4	-3.66	26.2	-3.7

估算法取得的成果

壩高	10	20	30	40	50	60	70
下游面 σ_1	4.9	10.6	15.9	20.7	24.6	28.5	31.8
上游面 σ_2	-4.2	-5.7	-6.1	-6.0	-5.3	-5.6	-5.5
上游面 σ_1	10.42	18.83	24.5	28.6	31.7	35.8	39.8

梅坝应力分析成果(估算法)

壩高	15	25	35	45	55	65	75	85
下游面 σ_1	10.23	17.05	21.45	25.20	28.20	29.50	30.60	32.20
上游面 σ_2	-2.25	-3.20	-3.68	-3.85	-3.40	-3.10	-2.90	-2.85
上游面 σ_1	16.67	24.55	28.30	31.00	32.85	33.20	34.30	36.15

(4) 壩梁鋼筋

按壩梁結構和应力情况，壩梁是属于混凝土構件，壩內拉应力一般均在混凝土允許範圍以內，但一般都是根据經驗和判断布置少量鋼筋，这是因为尚可能存在下面一些因素，使壩身产生裂縫。Ⅰ. 壩的上游面有部分拉应力存在。Ⅱ. 蓄水后壩面受湿膨胀，壩的上游部分引起拉应力。Ⅲ. 混凝土收縮受基础限制，底部产生拉应力。Ⅳ. 壩身暴露空气之中，受到温度变化脹縮的影响。因此佛子嶺梅山壩梁內也参考国外連拱壩壩梁鋼筋的資料，并結合該兩壩具体情况，在壩梁內外边放置了平行上游面方向和鉛直方向的鋼筋，在接近上游面和基础附近，以及洞孔的邊緣都适当增加了一些鋼筋，以承担額外的应力。究竟壩梁內的鋼筋怎样布置最为經濟合理还是要进一步研究的問題。

5. 地震应力分析

在地震烈度达到六度以上的地震区域内，建筑物要按抵抗地震的要求設計。

(1) 地震时增加的荷重 包括壩身的慣性力和水的激荡力。

$$\text{壩身慣性力} = M \cdot K \cdot g = KG\gamma = \frac{1}{20} G\gamma (\text{梅山}) = \frac{1}{10} G\gamma (\text{佛子嶺})$$

$$\text{水的激荡力} = K\gamma h (0.3 + 0.5 \frac{X}{h})$$

K 地震系数, $G\gamma$ 壩身重量,

γ 水單位重, h 蓄水全深,

X 离水面深度。

(2) 地震的方向

地震可能在任何方向发生，現分三个主要方向来考虑：上下方向，縱向，側向。

在上下方向或縱向的地震时，在这两个方向內，壩的剛度很大，自由振动周期可以不必考虑，如果用靜力学方法，进行地震应力分析，因在該方向內只增加原荷重 $\frac{1}{20}$ 或 $\frac{1}{10}$ ，增加的应力远在可允許提高的应力以下，故可以不計，側向地震时，因壩的側向剛度較小，自由振动周期較大，是否会产生共振須加核算，同时壩的变位較大，拱的应力須加核算，壩的側向稳定也須加以校核。因此这个方向的地震必須用靜力学和动力学

的方法进行研究和分析。

(3) 分析方法

a. 坝的侧向稳定分析 按最危险情况(在库空时发生侧向地震的情况)进行分析, 计算单独一个坝的侧向稳定系数, 要求不小于 1.3, 并计算水平截面上的正应力, 如为拉应力, 不得超过纯混凝土的容许拉应力。

6. 坝的变位 取一个单独的坝为分析单位假定坝与基础固结, 首先计算出坝悬臂的侧向变位系数(单位荷重所产生的位移数值), 然后将各高程的惯性力乘之, 迭加即得坝在各高程的侧向位移。再考虑拱的弹簧作用, 对变位进行逐步调整, 根据以往计算结果, 经调整后, 坝位移本来大的略变小, 小的略增大, 梅坝的变位假定不计拱的弹簧作用, 对坝的横向稳定和拱的相对位移来说都是偏于安全的。

b. 拱的应力校核 取相邻两坝在同一高程位移之差, 作为拱座的相对位移, 换算成温度变化的差值, 计算拱的内应力, 再与拱的惯性力所产生的应力, 及库空时正常情况的应力, 迭加而得拱内总的应力, 核算钢筋需要截面积, 如果不足则予增加, 一般在两岸坝高低相差较大, 须要增加钢筋。

r. 坝的自由振动周期 整个连拱坝的振动是一个非常复杂的问题。今以两种假定, 一是以单独一个坝, 一是以一个坝连接两个半拱, 按基本振动的形式, 来计算它的自由振动周期(此即它的最大自由振动周期)。计算方法采用变位校正法和能量法, 计算结果尚相接近。

(4) 计算结果

a. 侧向稳定系数 K 。

梅坝:	85公尺高单独一坝库空情况	$K^0 = 3.1$
佛坝:	70公尺高单独一坝库空情况	$K^0 = 1.26$
佛坝:	70公尺高单独一坝库满情况	$K^0 = 3.52$
佛坝:	70公尺高一坝两半拱库空情况	$K^0 = 1.43$
佛坝:	70公尺高一坝两半拱库满情况	$K^0 = 3.70$

6. 侧向地震时水平截面最大和最小应力

梅坝:	85公尺高单独一个坝库空情况	$\sigma_{\max} = 16.67$	$\sigma_{\min} = 0.56$
佛坝:	70公尺高单独一个坝库空情况	$\sigma_{\max} = 24.27$	$\sigma_{\min} = -7.66$
佛坝:	70公尺高单独一个坝库满情况	$\sigma_{\max} = 40.02$	$\sigma_{\min} = 2.77$
佛坝:	70公尺高一坝两半拱库空情况	$\sigma_{\max} = 17.13$	$\sigma_{\min} = -0.24$
佛坝:	70公尺高一坝两半拱库满情况	$\sigma_{\max} = 33.32$	$\sigma_{\min} = 9.33$

b. 坝的自由振动周期

方 法	梅 壩 高 8 5 公 尺		佛 壩 高 7 0 公 尺	
	单独一个坝	一坝两半拱	单独一个坝	一坝两半拱
变位校正法	0.56	—	0.597	0.484
能 量 法	0.52	0.47	0.566	0.423

六、大壩施工中的混凝土制造、运输和浇筑

佛、梅二大型水利工程中混凝土的拌和都采用了容量较小仅为 400 公升的小型拌和机,在梅山水庫虽还有每小时产量为40公方的捷克制自动化混凝土工厂一座,因該設備到工較迟,安裝費时故在梅山混凝土工程中也沒有發揮应有的作用,流态混凝土的制造及供应,我們采用集中管理的办法由專設机构(混凝土拌和站)統一供应,拌和場的布置在照顧到与施工組織上区域管理制的特性相适应以及混凝土澆筑部位随高程变化混凝土运输系統也相应演变等关系,故适当的分散布置在左右岸及坝头处較高的山頂上。

拌和場的分散布置,造成了砂石料运输系統的复杂,佛梅二坝砂石料运输均采用 610 公厘軌距的窄軌鐵路及容量为 0.6 公方的斗車,除捷制混凝土工厂系自动配料的以外,其余均根据工地材料試驗室所規定的混凝土配料單在砂石堆場按拌和机的每次拌和量配好,由人力推运至拌和机拌制流态混凝土。

山頂拌和場的砂石料运输,都采用卷揚道来担任升高工作,卷揚道的設備及建造均极簡單,且容易适应地形上的要求,卷揚道均用双軌往复式,由 2 吨电动卷揚机曳引,

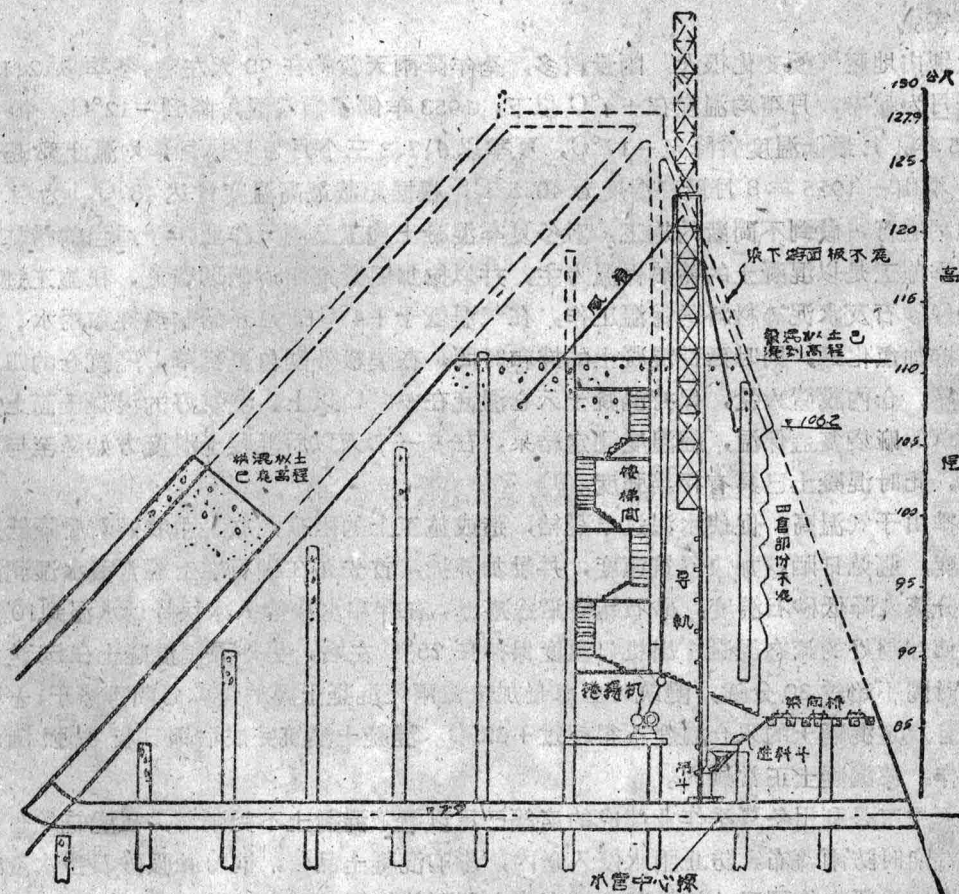


图12 鋼塔提升設備布置图

費用經濟，使用效果良好。

图13为梅山水庫混凝土系統平面布置示意图。

从拌和場拌制好的流态混凝土运送至各澆筑部位，其中水平运输仍用 610 公厘的窄軌鐵路及 0.6 公方斗車人力推运，而垂直运输主要使用鋼塔提升設備，整个提升設備包括，鋼塔，卷揚机，天輪，導軌，鋼絲繩及吊斗等六个部分，鋼塔为用小型鋼材制而成的空腹鋼構。每节長寬各为 1.5 公尺，高为 2.5 公尺，用螺栓連接，每个垛牆裝設一套，每套共 10 节，最下三节按有支座固定在二边垛牆上，鋼塔随垛牆的升高而逐层翻升，提升設備的动力为 30 匹馬力电动單筒卷揚机，起重能力为 2 吨，提升速度每分鐘 45 公尺，吊斗容量为 0.6 公方。

鋼塔提升設備結構輕巧，設備簡單，安裝拆卸也很方便，适用在澆筑混凝土仓面不太大的混凝土块，同时也可作其他材料的运输工具用，在佛、梅二工地使用的效率，平均每班产量为 60 公方，升高約 20 公尺最高曾达 75 公方，鋼塔提升設備的布置見图 12。

在佛、梅二工地，均曾試用过小型纜式起重机来担任混凝土的运输任务，因設備起重能力太小（仅 3.0 吨）效率低，故未推广使用。

混凝土的澆筑采用人工平仓，机械搗实的方法，在混凝土送入澆筑池內后，由人工用鉄鍬或扒將混凝土翻拌均匀，并鋪筑平整，再由震搗工人用 5 匹馬力电动軟軸震動器震搗密实。

大別山地区气候变化很大，雨量較多，全年降雨天数約在 90 天左右，冬季以 12、1、2 月 3 个月为較冷，月平均温度在 $+4^{\circ}\text{C}$ 以下，1953 年佛子嶺气温曾降到 -12°C ，梅山在 1955 年 1 月最低温度曾降至 -17°C ，夏季以 6、7、8 三个月为最热月平均温度都超过 25°C ，梅山在 1955 年 8 月最高温度为 40.5°C ，根据記載最高温度曾达 43°C ，为了使工程順利进行，做到不間断的施工，对冬夏季混凝土施工及雨天作业作了适当的措施。

冬季施工是以混凝土的蓄热保温为主，并以掺加促凝剂作为輔助措施，在施工过程中，做好砂石及水泥等材料的保温工作，在气温低于 $+4^{\circ}\text{C}$ 时，开始加热拌和用水、并适量的掺加氯化鈣，同时延長混凝土的拌和时间，在摸板外圍包裹稻草，澆筑仓的四周圍以草簾，仓內設置火盆，保持混凝土入仓温度在 $+5^{\circ}\text{C}$ 以上，澆筑好的混凝土面上用內盛稻草的麻袋复盖保温，經温度測定結果，在 6—7 天以后混凝土温度方始降至与气温相同，此时混凝土已具有相当强度。

夏季由于气温高，促使水泥过早凝結，造成施工上的困难，施工中我們着重降低原材料温度，避免日晒，加快澆筑速度，并勤加养护，首先是在砂石堆上經常噴水湿润，利用水分蒸发降低砂石温度，砂石运输沿途搭棚，在拌和水中掺入冰块降低水温到 10°C 左右，使拌制好的流态混凝土出机口温度保持在 25°C 左右，另外限制混凝土在运送途中所占時間不超过 30 分鐘，澆筑时应尽量加快使兩坏混凝土間的停歇時間不多于 1 小时，并且規定混凝土的入仓温度不得超过 $+32^{\circ}\text{C}$ 。混凝土澆筑完成后則日夜加强洒水养护工作，使混凝土正常凝固。

雨天施工是利用冬夏季作业建成的席篷已足以遮蔽混凝土不受雨淋，在澆筑的仓面上也鋪盖临时防雨篷布，防止雨水侵入仓內，影响混凝土品質，同时加强砂石含水量的測定，控制混凝土的稠度。这样在一般中、小型雨的情况下可以不致停工。