

335873

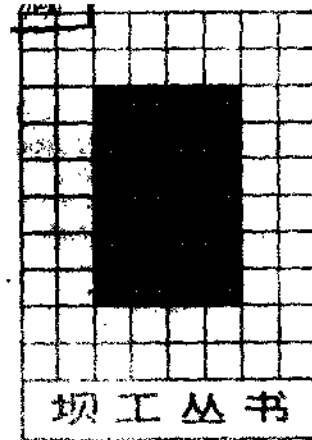
坝工丛书

拱坝的设计和计算

汪景琦



中国工业出版社



拱坝的设计和计算

中国工业出版社

672662

本书总结并探讨了拱坝设计问题及各项计算研究方法。内容有：坝址选择、枢纽布置、几何形状的设计、细部构造、滑动稳定、基础处理、基础变形和梁拱试验法的改进、施工应力、孔口应力、温度应力、渗透应力、地震应力、壳体计算方程的简化问题、蠕变的影响、网格法、变分法及振动计算，以及结构模型的相似模拟等。

本书除阐述基本概念、提供各项设计步骤、分析方法外，并附有若干应用算例和算表，可供水利水电工程设计研究人员及有关专业院校师生阅读参考。

坝工丛书

拱坝的设计和计算

汪景琦

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $29^{3/4}$ ·插页4·字数633,000

1965年11月北京第一版·1965年11月北京第一次印刷

印数0001—2,620·定价(科五)4.10元

统一书号: 15165·4074(水电-541)

序

若坝址河谷狭窄，地质条件较好，拱坝往往就是最经济的坝型。由于拱坝设计和施工的技术性均较高，故世界各国对拱坝的研究和革新，都给予极大的重视。

国内外有关拱坝计算的文献较多，但系统叙述拱坝设计和计算的较少，为了适应我国今后水利水电建设，水利水电科学研究工作者，应在总结国内外经验的基础上，结合我国的具体情况，探讨有关设计问题，改进各项计算方法，使拱坝设计水平逐步提高，并使该项设计工作，能为更多人胜任。作者近年来，曾接触了几个拱坝的设计和计算，今将工作所得，写作此书，作为上述任务的初步尝试。

书中内容共分为五部分：第一部分（第一～第五章）总结并探讨了设计中的基本问题，象坝址选择、枢纽布置、及基岩的工程处理等，影响因素多，牵涉范围广，在有限的篇幅中，很难讨论得详尽。书中提出的几何形状设计、基岩滑动稳定分析等方法，亦待今后改进。

第二部分（第六～第十章）主要讨论梁拱试载法，有关梁和拱的计算项目和计算方法很多，书中只介绍常用的和简便的，也补充推导了一些公式。关于基础变形的计算，和用简化梁拱法分析各种荷载下的应力，书中作了详细的探讨，这些研究成果，曾在一些工程设计中应用。

第三部分的施工应力和孔口应力，都是拱坝的附加应力，在过去的拱坝文献中谈得较少。由于拱坝的设计与施工技术的提高是分不开的，研究施工技术的同时，必须研究施工应力，书中提出了若干计算项目和计算方法，并结合模型试验讨论。拱坝内部的孔道，不仅使孔道附近产生应力集中，还得改变整个拱坝的应力分布，过去由于考虑孔口应力分析问题较多，而避免在坝内开孔，相应地增加了其他建筑物（如隧洞）的投资。我们对孔口分析和设计方法作了一些研究，并综合介绍了已有的计算方法。

第四部分（第十三～第十五章）讨论拱坝壳体计算方程的简化问题，边界条件的改进，双曲拱坝几何参数的计算，网格法和变分法的应用，主要为作者近年来研究工作的成果。

第五部分（第十六章）总结并探讨了结构模型的相似条件和若干新颖试验的模拟方法。

拱坝的计算方法，可以分为下列四种：（1）梁拱法，（2）网格法，（3）格棚法，（4）变分法。梁拱法适用于单曲率拱坝，承受坝面压力、温度变化、及上

游河谷水压力等。双曲拱坝宜采用网格法。我們提出的差分变分法适宜計算地震应力，黃文熙教授提出的格棚法，亦适用于双曲拱坝和振动計算，由于該法将印諸专集，故本书未作詳細介紹^①。

书中的內容，是按設計、計算、研究的次序来排列的。在应力計算方面，因梁拱試載法比較成熟，应用簡便，故在书中占了較大的篇幅；在該項內容的安排上，与美国垦务局出版的“坝論”第十章^[25]有所不同，“坝論”是一設計手册，主要介紹坝面压力作用下的計算方法和表格，未討論其他荷載及壳体理論的計算方法，我們吸取了其中关于梁和拱的計算公式，和变位調整程序，列入第六、七、九章中，而补充闡述基础变形計算的原理和改进，及簡化后梁拱法的具体应用。龙巴弟所著拱坝一书^[54]，主要討論单曲率薄拱坝的靜力計算，未涉及其他設計問題，我們吸取了他的研究方法，用来研究双曲拱坝的計算；荷載除水压力外，还增加了溫度、渗透、地震、及上游河谷的变形等。书中提出的变分法，也是受該书的启发，通过具体工程实践而发展的。我們也吸取了国内外其他学者的設計方法和研究成果。

在写作过程中，曾考虑：按計算方法排列好，还是按計算項目、作用荷載排列好，因为在叙述某一种方法，常要分述几种荷載，就溫度应力分析來說，在第二章先介紹溫度荷載計算，第十章叙述梁拱分析法，第十一、十二章分述施工溫度应力和孔口溫度应力的計算方法，第十三章介紹壳体溫度应力的計算方程和蠕变的影响，第十四章介紹网格法的計算成果，第十六章又介紹結構模型試驗方法和相似原理；渗透应力、地震应力的分析，也分散在第二、十、十五、十六各章，这使同志們閱讀起来，的确有些不便。考虑到拱坝分析方法的选择，与設計阶段、設計单位的具体条件，及設計者的爱好和特长有关，自不能只介紹一种；如按計算荷載来划分章节，則同样要分述几种分析方法，編写和閱讀的不便之处可能更多，因为計算原理和公式推导等，与分析方法的关系，可能更密切些。

本书在写作过程中，曾得到水利水电科学研究院领导的支持，黃文熙院长給予很多启引，并先后得到原錫盛、何兴材、陈厚群、魏道政、陈善銘、薛兆煒、沈增卿、董育坚、蓝仁烈、李月素等同志校閱和帮助，謹向他們表示衷心的感謝。

限于水平，书中的謬誤之处可能很多，希望讀者多多批評指正。

汪景琦

1964年，北京

① 或見參考資料[27, 28]。

符号说明

内容编排按章, 节 (§), 段 (), 小段 ()

三角函数 $\sin \cos \tan \cot \sec \csc$

对数 $\log$

双曲线函数 $\sinh \cosh \tanh \coth \operatorname{sech} \operatorname{csch}$

座标 x, y, z 方向如图 0-1 (第一~第十二章) 及 0-2 (第十三~第十六章)

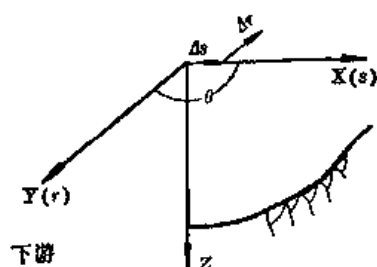


图 0-1

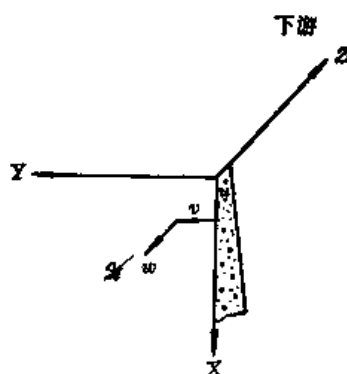


图 0-2

荷载 p (英) (第一~第十二章)

X, Y, Z (第十三~第十六章)

变位 $\Delta r \Delta s$ (第一~第十二章) w, v, u (第十三~第十六章)

容重 γ_c (混凝土)

γ_w (水) γ_s (泥沙)

摩擦系数 f

粘着力 c

弧角 φ

弧长 S, L

重量或垂直荷载 W

曲率半径 r, R_u, R_D (第一~第十二章)

r_1, r_2, r_{12} (第十三~第十六章)

坝高 H

轴向力 H_A, H_C (第一~第十二章)

N_1, N_2 (第十三~第十六章)

径向剪力 V_C, V_A (第一~第十二章)

Q_1, Q_2 (第十三~第十六章)

弧向剪力 V_r (第一~第十二章) S_1, S_2 (第十三~第十六章)

弯矩 M_C, M_A (第一~第十二章)

X

M_1, M_2 (第十三~第十六章)

扭矩 M_t (第一~第二章) M_{12}, M_{21} (第十三~第十六章)

坝厚 T (第一~第十二章) h (第十三~第十六章)

面积 A

慣性矩 I, I_n

弹性模量 E, G

波桑比 μ

应力 σ, τ

应变 ϵ, γ

計算点号 i, j, k

坝体变位系数 $a, b, c; \delta, \Delta, \theta$

基础变形系数 $\alpha', \beta', \gamma', \delta', \alpha'', \gamma'', \alpha, \beta, \gamma, \delta, \alpha_1$

宽度 b, d

混凝土龄期 τ

温度 θ, θ_m (平均)

温差 t

线膨胀系数 α

比热 c

热扩散系数 h^2

热交换系数 β

应力函数 F

势函数 $\varphi(t), \psi(t)$

地震系数 k_c

加速度 $\dot{d}$

质量 m

重力加速度 g

圓周頻率 p

安全系数 K_c, K_s

密度 ρ

目 录

序

符号說明

第一章 緒論	1
§ 1. 拱坝的构造及其特点	1
§ 2. 拱坝的发展	3
§ 3. 拱坝設計与坝址地质地形	4
§ 4. 拱坝的計算方法及今后研究方向	6
§ 5. 拱坝的安全性和耐久性	7
第二章 設計准則、作用荷載	10
§ 6. 基本資料和設計程序	10
§ 7. 荷載組合和設計規定	11
§ 8. 坝体混凝土和基础岩石的設計要求	14
§ 9. 一般荷載的計算公式	16
§ 10. 溫度荷載	20
§ 11. 地震荷載	23
第三章 樞紐布置、几何形状的选择	27
§ 12. 坝址选择	27
§ 13. 樞紐布置	30
§ 14. 几何形状选择的依据	36
§ 15. 拱圈經濟形状的选择	40
§ 16. 論拱坝的双向弯曲和倒悬	46
§ 17. 朱瑞卡的设计图表	49
§ 18. 建議的设计方法	50
§ 19. 总结, 拱坝几何形状的改进	51
第四章 坝内布置、細部构造	54
§ 20. 收缩縫及其灌浆系統	54
§ 21. 坝内廊道和交通	63
§ 22. 坝内排水	65
§ 23. 坝頂布置	66
§ 24. 坝面鋼筋及基座周界縫	68
第五章 基岩的滑动稳定和工程处理	73
§ 25. 基岩的滑动稳定分析	74
§ 26. 坝基灌浆和排水	80
§ 27. 坝头开挖、回填和加固	88

§ 28. 坝基断层软弱带的加固	90
§ 29. 坝头重力墩设计	93
§ 30. 评法国马尔巴赛 (Malpasset) 拱坝的失事	96
第六章 悬臂梁的计算	100
§ 31. 薄拱坝悬臂梁的径向变位	101
§ 32. 重力拱坝悬臂梁的径向变位	104
§ 33. 径向和切向变位系数	113
§ 34. 扭转角变系数与弯矩的增值	118
第七章 拱圈的计算	121
§ 35. 拱圈计算的基本公式	121
§ 36. 等截面固端圆拱的计算——水压力	127
§ 37. 等截面固端圆拱的计算——温度变化	136
§ 38. 等截面固端圆拱的计算——拱座变形	139
§ 39. 等截面固端圆拱的计算——地震荷载	142
§ 40. 固端抛物线拱和变截面拱的计算	146
§ 41. 开裂拱的计算及拱座倾斜的影响	151
§ 42. 厚圆拱的计算	154
第八章 基础变形的计算及其改进	184
§ 43. 基础变形计算的基本公式	184
§ 44. 在坝底力系作用下基础的变形	192
§ 45. 基础变形系数计算——伏格特公式	198
§ 46. 论基础变形计算的改进	203
§ 47. 上游河谷在水压力作用下的变形	208
第九章 梁拱试载法及其改进	220
§ 48. 梁拱试载法的基本原理和计算步骤	220
§ 49. 变位调整计算	223
§ 50. 三向主应力计算	227
§ 51. 论试载法的优缺点	231
§ 52. 以解算联立方程式来代替“试载”	232
§ 53. 论试载法的改进和简化	238
§ 54. 梁拱试载法计算与模型试验、原体实测成果的比較	241
第十章 用简化梁拱法分析各种荷载的应力	244
§ 55. 拱冠梁法——径向变位一致	244
§ 56. 拱冠梁法——径向变位与扭转角变一致	246
§ 57. 简化梁拱法的普遍方程式	249
§ 58. 渗透应力	251
§ 59. 温度应力	260
§ 60. 地震应力	264
§ 61. 上游河谷水压力作用下的应力	266
§ 62. 联立方程式的解算	272

第十一章 施工产生的初应力	275
§ 63. 坝体自重的施工应力	275
§ 64. 混凝土受基岩约束产生的初应力	278
§ 65. 天然冷却过程中产生的初应力	287
§ 66. 分期施工或坝体加高产生的施工应力	294
§ 67. 横缝灌浆产生的预应力	296
第十二章 孔口应力	298
§ 68. 拱坝孔口应力的特点及计算假定	298
§ 69. 孔口应力场的计算	302
§ 70. 用复变函数计算孔口应力的基本公式	305
§ 71. 椭圆孔的计算	315
§ 72. 矩形孔和方孔的计算	319
§ 73. 圆孔的计算	325
§ 74. 加劲圆孔的计算	333
§ 75. 孔口应力的实验成果	340
§ 76. 总结, 孔口设计中的若干问题	346
第十三章 拱坝壳体的计算方程及其边界条件	352
§ 77. 拱坝曲面的几何关系	352
§ 78. 双曲拱坝的平衡方程	355
§ 79. 双曲拱坝计算方程的简化问题	358
§ 80. 温度应力, 渗透应力, 计算方程的进一步简化	368
§ 81. 坝顶和基础的边界条件	375
§ 82. 考虑蠕变的计算方程及基础边界条件	379
§ 83. 单曲率厚拱坝的计算方程及其边界条件	390
第十四章 网格法	393
§ 84. 双曲拱坝各几何参数的计算	393
§ 85. 网格法计算中的差分式	398
§ 86. 网格法计算实例	402
第十五章 变分法和振动计算	411
§ 87. 双曲薄拱坝的变分法	411
§ 88. 单曲率薄拱坝的变分法	414
§ 89. 对称薄拱坝的近似变分法	422
§ 90. 地震力作用下的振动计算	431
§ 91. 用变分(差分)法计算地震应力	439
第十六章 结构模型的相似条件和模拟方法	441
§ 92. 拱坝结构模型试验的一般情况	441
§ 93. 静力试验相似律	444
§ 94. 温度应力、渗透应力试验相似律及当量边界荷载	448
§ 95. 破坏安全度试验的模拟方法	453

VII

§ 96. 振动試驗相似律.....	458
§ 97. 施工应力試驗的相似和模拟.....	463
§ 98. 孔口应力試驗的相似和裂縫的模拟.....	467
§ 99. 相似律的应用举例.....	469
附录 在对称各型切向、扭轉荷載作用下等截面圓拱內力和变位系数表（考虑 拱座变形）.....	471
主要参考資料.....	520

第一章 緒 論

§ 1. 拱坝的构造及其特点

拱坝是一个空間壳体結構，如按梁拱試載法的概念來說明，拱坝是由許多上下层拱圈所組成，拱圈的两端，支承于岩座，各层拱圈又相互粘結而支承于基础，故拱坝的外荷除一部分由拱的作用传至岸边外，其余，还借梁的作用传至坝底。众所周知，拱是一种經濟的結構型式，它不但使坝內产生較大的压应力，以充分利用坝体混凝土的强度，当将荷載传至两岸时，拱座下游的岩体，可以帮助抵抗坝向下游的滑动，这就是拱坝比重力坝經濟的主要原因。

拱坝的断面与河谷的几何形状有关，如坝址狭窄，荷載主要由拱来承受，梁只起上下层荷載的調节作用，則坝体断面較薄；如河谷較寬，梁的作用逐漸增大，由于梁的刚度較小，故断面較厚，当河谷寬高比（坝頂弧长与最大坝高之比）較大时，由于坝軸弧线的增长，拱坝即不比重力坝經濟。

为了設計及施工的方便，拱坝的拱圈形状采用圓弧拱的比較多，各层拱圈的半径有采用相等的，也有采用不等的，垂直剖面的形状也是多种多样，如图1-1所示。拱圈的經濟中心角約为 $110^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ，考虑到坝面垂直方向的連續性，在坝的下半部，拱圈的中心角往往較小。

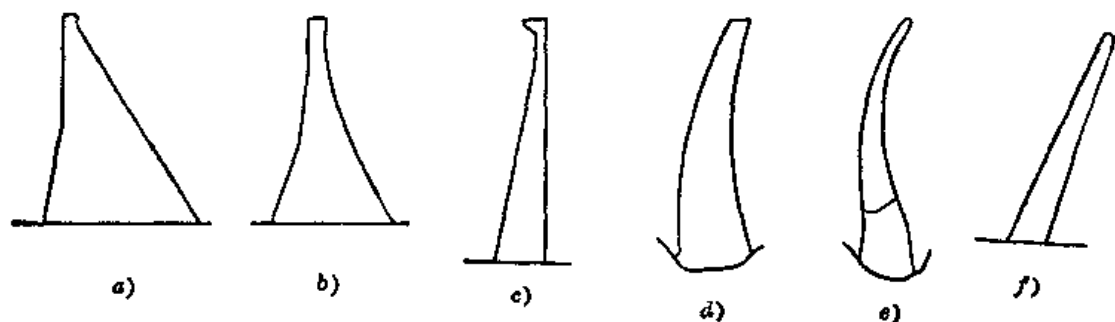


图 1-1

拱坝是分块浇筑的，待坝体充分冷却收縮后，在橫縫內进行灌漿，使坝成为整体。也有些拱坝，由于冷却条件的限制，接縫灌漿时，坝內并未充分收縮，而待以后重复灌漿。橫向（垂直坝軸线的方向）接縫一般沿半径方向划分，在变半径的拱

坝中，横缝形成一扭曲面。过去有些拱坝横缝只做键槽而不灌浆，由于键槽只能传递剪力，不能传递弯矩，相应地削弱了拱的作用，故近代采用此种型式的较少。

坝体与基岩连接的方式很多，如图27-3，拱座开挖成半径向，坝肩的稳定性较好；当利用岩石线与半径向斜交，为了减少开挖，可仅将下游一半开成半径向；如基岩较软弱，可将底座扩大，以减小坝基的承载力及沉陷量。

近年来，拱坝采用溢流的已逐渐普遍，但薄拱坝的单宽流量一般较小（10~40秒立米），重力拱坝有达100秒立米以上的。因溢流脉动具有随机性，它不会使拱坝发生共振，主要问题在于下游的冲刷和消能。重力拱坝坝内常设有引水钢管，近来也有在薄拱坝内开设较多孔口的，除需计算孔边应力集中外，还要考虑孔边裂缝渗水等问题。图1-2为我国某拱坝厂房顶溢流式示意图。

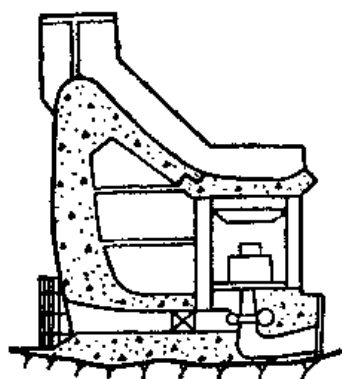


图 1-2

如两岸山岩坚固，或灌浆处理得好，当坝面拉应力过大开裂时，仅应力产生重分配，另一面的压应力提高而已，坝仍旧保持稳定，故拱坝坝面可以允许开裂；拱坝是沿整个河谷线支承的，并有弧向推力作用，而重力坝的支承面仅为河谷的水平投影面；又拱坝是一个整体结构，各部应力可以相互调整，故拱坝应力安全度和滑动安全度均比重力坝高。又其结构轻便，根据意大利及美国许多拱坝的实地观测，证明拱坝的抗震性能尚好。

因拱坝断面较薄，混凝土强度及防渗要求均较高，加上几何形状的复杂，故施工技术应较好。又温度变化对拱坝的影响较显著，坝体必须要有温度控制措施，以保证施工过程中坝面不发生过大的裂缝，并在规定的时间内降至稳定温度，以便坝缝灌浆‘封拱’。

拱坝在形成整体以前，自重应力已经产生，故该项应力可按重力坝的方法计算，以一项初应力与拱坝整体应力迭加。

如拱坝较厚，坝内一般不布置钢筋，但在双曲薄拱坝的拉力区，适当地布置钢筋，可以提高坝体该区的抗拉强度，并可略微改善坝内应力分布。

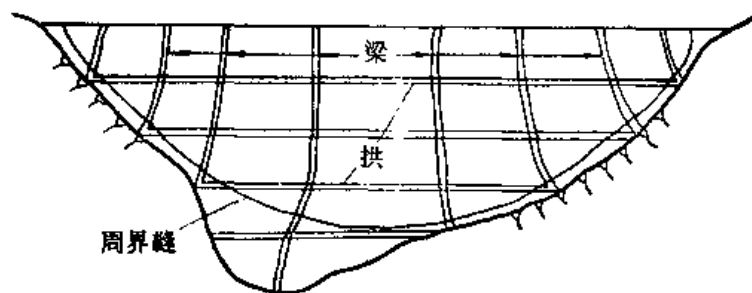


图 1-3

为了改善基础局部深槽软弱带的应力分布，可在基础附近设置周界缝，如图1-3，而以底部混凝土作为拱坝的人工垫座（底部混凝土浇好以后，不作任何处理即浇上层混凝土；也有在缝的上游附近加涂瀝青），为了增加该缝的结构作用，宜在缝边两侧布置钢筋。

§2. 拱坝的发展

早在16世纪，人们就开始修建了砌石拱坝；19世纪中，又陆续修建了一些混凝土拱坝，但高度都在40米以内，设计大多基于圆筒公式；后来，又对拱坝的设计和施工作了较系统的发展和总结，包括试荷载分析、坝体温度控制、基础处理、结构模型试验，以及混凝土的施工方法等。

第二次世界大战以后，拱坝得到了较为迅速的发展。在设计方面，有的拱坝修建得较薄，但基岩的处理却很好，坝基灌浆所花费的水泥有时比拱坝本身还多，灌浆工期也较长；有的拱坝可以坝顶溢流，在这方面也累积了许多经验。在计算方面，从过去的水平拱法、梁拱试载法，发展到用壳体理论分析，并广泛应用电子计算机。拱坝河谷宽高比（坝顶弧长与最大坝高之比）的适用范围也从过去的3.5提高到7.0以上；坝顶溢流、坝内开孔，日趋普遍。在较强烈的地震区，亦能设法修建拱坝。有的还以结构模型试验来确定坝体的几何形状和断面。近年来，由于结合拱坝野外观测资料的研究，坝体断面越来越薄，如图2-1、2-2所示。

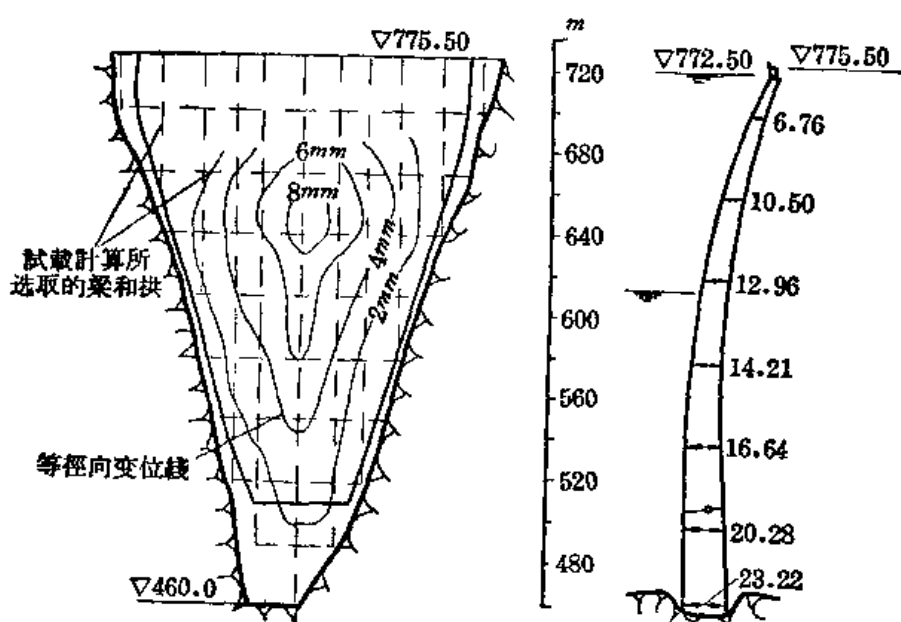


图 2-1

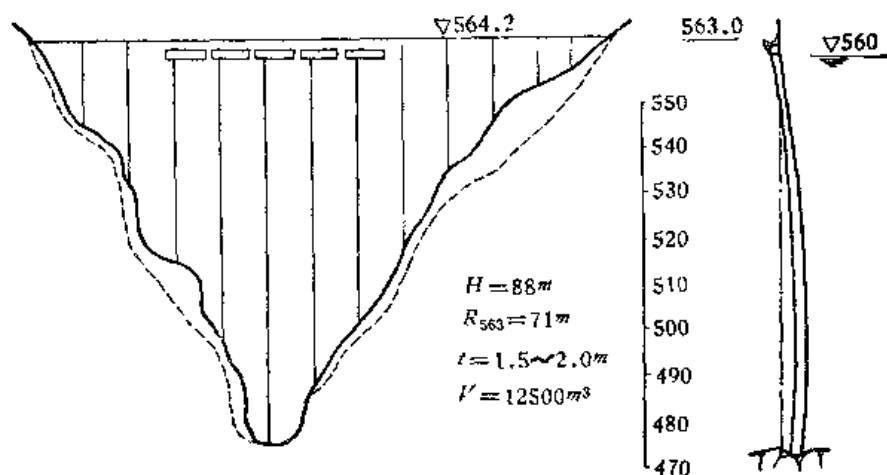


图 2-2

由于施工技术的改进，混凝土的容许压应力已从过去的40~50公斤/厘米²提高到70~100公斤/厘米²，在地质较差的河谷中，加强了工程处理，亦能修建较高的拱坝。其他如拱坝双曲倒悬部分的浇筑，温度控制等，都有了成功的经验。

§ 3. 拱坝设计与坝址地质地形

在混凝土坝中，以拱坝对基岩的要求最高，理想的条件是：两岸及河中岩石坚硬密致，质地均匀，透水性小，耐风化，两岸及上下游边坡稳定，无较大的断层（特别是顺河断层）。但一般工程选用的坝址，地质上往往带有某些缺陷，必须设法加固处理。

由于以往混凝土坝的失事多半由于基础的破坏所引起，又基础过大的沉陷（特别是不均匀沉陷），将使拱坝出现较大的应力，故国外对坝址的选择和基础处理都非常重视，如意大利留米意拱坝，坝高135米，坝基开挖深度即达50多米；瑞士莫瓦桑拱坝及意大利圣杰斯汀那拱坝，坝高分别为237米，152.5米，坝基灌浆深度均超过其坝高。莫瓦桑拱坝坝基灌浆范围，如图3-1所示。这也说明坝基地质条件较差，亦能修建较高的拱坝。

基础处理方法无统一的规定，如认为坝基开挖较深有困难，可以开挖较浅而加强灌浆，或将坝体加厚；如拱座岩石较好，为了节省工程量，亦可不开挖成半径向；其他如软弱带的加固、岸坡稳定的处理等等，都必须在确切了解情况后，因地制宜。

坝址的地形，是决定拱坝结构型式，工程布置，及其经济性的主要因素。理想的河谷应是左右对称，岸坡平顺无突变，在平面上宜呈漏斗形，如图3-2所示，这样拱座得到了天然的支承，坝基开挖量较省。

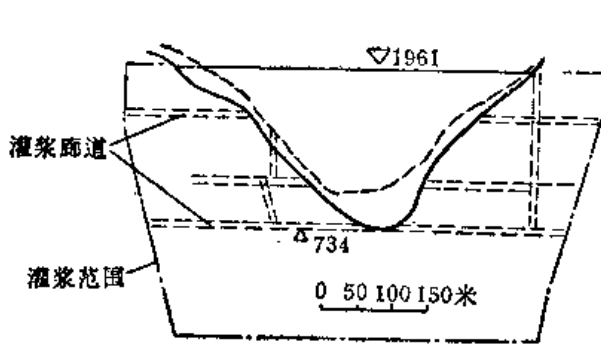


图 3-1

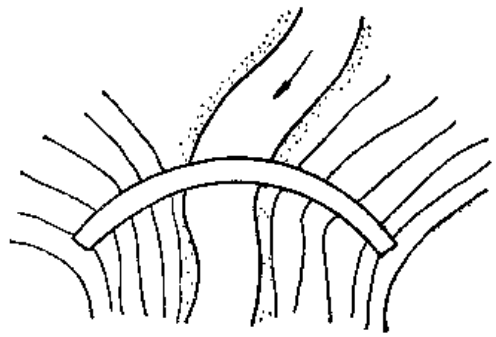


图 3-2

今列出几种典型的河谷，来说明河谷形状与拱坝结构型式的关系：如图 3-3，U 型河谷（a），因上下层拱的弦长相近，可采用等半径的圆筒形；V 型（b）及梯型（c）河谷，为了加大底部中心角及减小坝厚，宜采用变半径的双曲率拱坝；（d）型河谷宜在一岸做重力墩（人工基座），使拱坝左右对称，重力墩的一侧，可以布置溢洪道，或与其他坝型相连；（e）型河谷宜将深槽回填混凝土，作为拱坝的垫座，深槽上部做一周界缝，以减少因地形突变产生的应力集中；（f）型河谷宜将中间突出部分挖去。

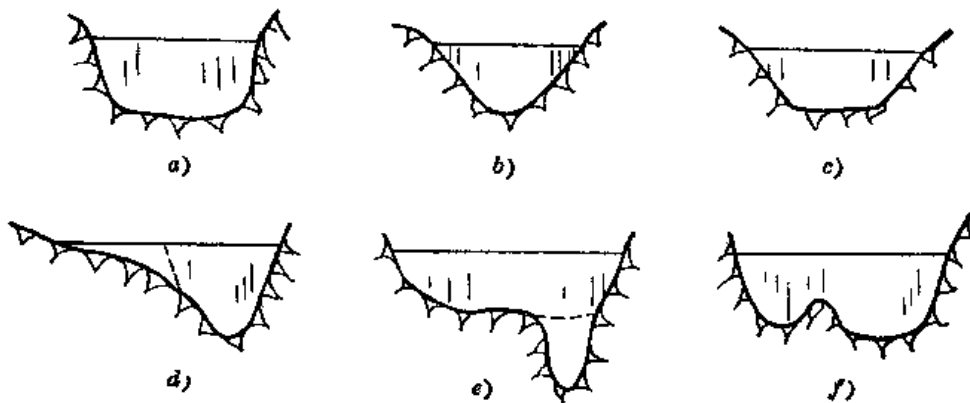
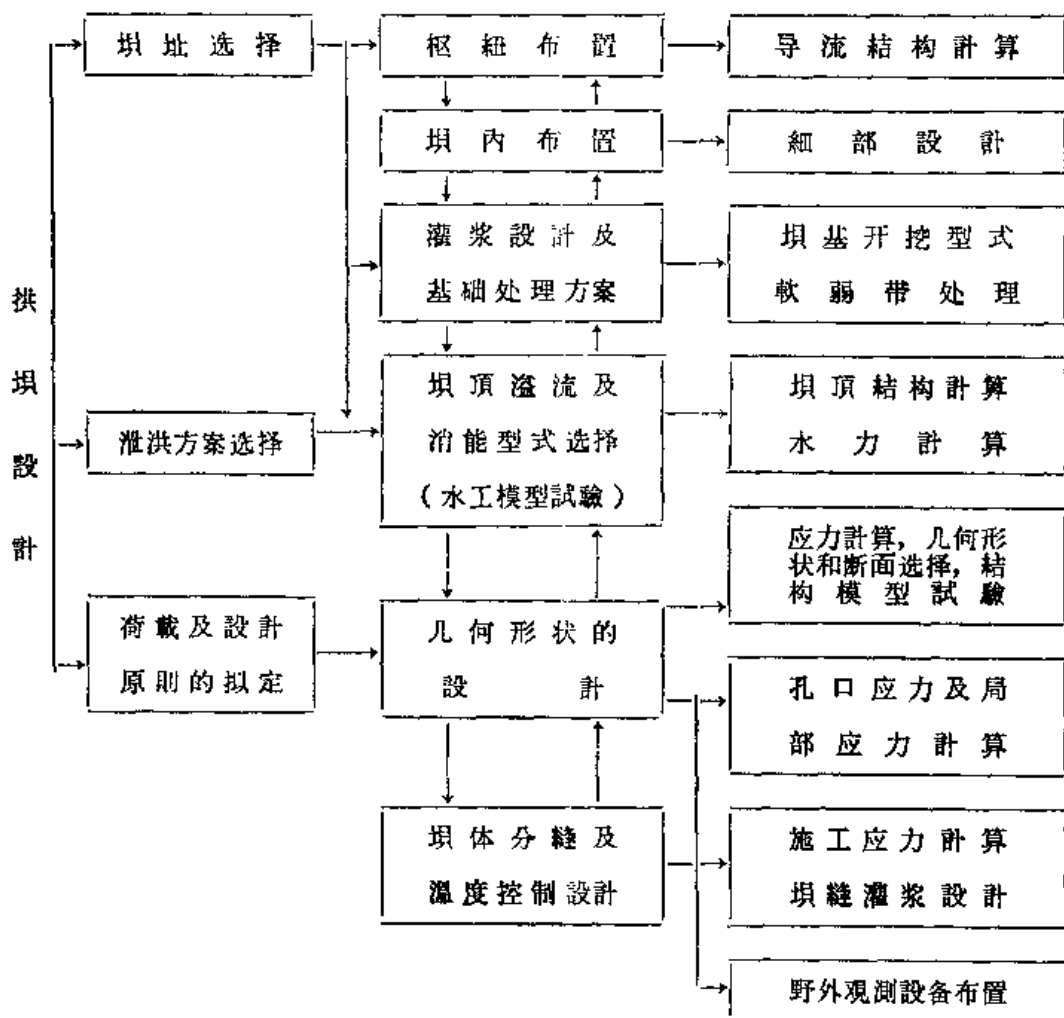


图 3-3

拱坝的工程布置与坝址地质地形有很大的关系，如河流纵波较陡，坝址下游水深较浅，或石质松软，消能条件较差，即不宜采用坝顶溢流；又当河谷为（a）、（c）型，且河面较宽时，则适宜布置坝后厂房，因坝内布置引水钢管，坝厚宜适当加大。综上所述，拱坝的几何形状和断面与工程布置有关，而工程布置是取决于整个枢纽的工程造价最省。所以，单纯地根据河谷的宽高比来比较坝体的厚薄，是不全面的。

§ 4. 拱壩的計算方法及今后研究方向

拱壩的設計步驟與一般混凝土壩大体相同，只因結構複雜，幾何形狀設計和應力分析工作量較大而已。設計項目隨工程而異，其間的關係，略如下表所示：



拱壩應力分析方法，歸納起來有下列五種：

1) 梁拱試載法^(25,26,37,31) 將拱壩切取若干水平拱和懸臂梁，如图1-3所示，根據梁拱交點變位一致的条件，求得梁和拱的荷載分配，從而求得應力。該法力學概念明晰，並有一套完整的計算表格，故國內外拱壩的設計，採用該法的最多。對於雙曲拱壩及分析地震應力，不如網格法和變分法好。

2) 網格法^(54,56,59,62,63) 將拱壩的展開面或立體，劃分許多平面或立體網格，根據殼體的平衡方程和拱頂、基礎的邊界條件，求得各網格點的變位，再按物理方程計算內力。該法適宜用電子計算機計算，為目前分析雙曲拱壩的較好方法。

3) 格柵法⁽²⁴⁾ 將拱壩以一組格柵來表示，根據格柵交接點的形變方程，和