



第六次国际大坝会议论文选集之二

拱坝的计算、模型试验 和观测成果的比較

G. 奥 倍 蒂 等 著

水利水电科学研究院译

水利电力出版社

內 容 提 要

本书系第六次国际大坝會議論文选集之二，共包括有关拱坝的計算、模型試驗和观测等問題的論文13篇。

本书广泛地介紹了世界各国在拱坝試驗研究方面的成果，各篇論文中不仅提出了比較成功的理論計算方法，大量的实测資料与模型試驗資料，并且通过理論計算、模型試驗与实地观测成果的比較，提出了設計拱坝的合理步骤与方法。

本书可供水利水电設計、科研等方面人員使用，亦可供高等院校的水利系师生参考。

拱坝的計算、模型試驗 和观测成果的比較

G. 奧 倍 蒂 等 著
水利水电科学研究院譯

*

2244 8 684

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里沟）

北京市书刊出版业营业許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 开本*7 $\frac{1}{2}$ 印張*14.8千字

1960年2月北京第1版

1960年2月北京第1次印刷(0001—2,430册)

統一书号：15143·1817 定价(第10类)1.20元

目 录

坝内实测应变与模型試驗成果的比較	2
派夫狄卡杜尔坝的实测位移与計算和模型試驗所得位移的比較	17
派夫狄卡杜尔坝实测平均应力的初步研究及其与理論計算、模型 試驗成果的比較	38
派夫狄卡杜尔坝实测应变与計算及模型試驗所得成果比較的初步 报告	49
普勃林諾坝实测变形与分析及小比例模型試驗所得成果的比較	63
鮑卡坝的模型試驗和原型观测	70
奥格坝原型观测与模型試驗測得的撓度比較	101
嗎子拱坝的实驗研究	105
皮恩太来舍我坝性能的实体量測及其与靜力計算和模型試驗所得 成果的比較	130
圣太杰斯汀納坝頂拱冠位移的分析(根据最初六年的观测)	153
圣太杰斯汀納坝在最初观测的五年間所測得的位移及其与一些校核 計算成果的比較	166
庫空及庫滿期間的衣索拉多坝	194
衣索拉多坝在观测的最初三、四年間的实测成果与一些校核計算 成果的比較	212

壩內實測應變與模型試驗成果的比較

(意大利)G.奧倍蒂 E.富馬賈利 E.路勒泰

摘 要

本文對壩內應變的觀測和靜力模型試驗的成果進行了比較。

在引論中列舉了能影響實際應變並從而使模型所得應變不能同實際應變比較的各种現象：所有這些有影響的現象，均與儀器的作用、邊界條件、溫度和壩的施工方法有關。

第二部分敘述了几个有特殊代表性的壩，並將實體上面測得的總應變與模型試驗所得的應變進行了比較：比較結果表明在薄拱壩中是完全相同的，而在較厚的重力拱壩中，則往往有一些不能忽視的偏差。

此外，還敘述了這種現象的一些可能的解釋。接着給出了有關熱源應變，以及結構模型試驗研究所在模型上測定應變所用準則的簡短說明。

第三部分分析了現場量測所用的儀器中可能具有的誤差。並且介紹了結構模型試驗研究所採用振動弦進行試驗的經驗，在這些儀器中顯示出了因邊界條件和埋設方法所產生的影響，特別說明了對於直接埋設在混凝土內部的儀器進行檢查和校準的必要性。

1. 引 論

在混凝土壩中，人們能有效地測到那些數據；而採用這些數據就可與模型試驗或計算成果進行有用的比較。

至今我們可以認為，在實體上面的總應變、位移和轉動的量測，得出的成果較好，這些量測是可以通过外面精確的實測（三角網測量和視准測量），或者採用埋設在壩體內部特殊廊道中的內部儀器（弦綫垂直座標儀、光學垂直座標儀、傾斜鏈），得到良好的近似值。

人們可以应用在澆注混凝土时埋設在坝內的各种型式的电測和弦式应变計，求得局部的应变。而这种应变量測显然会受到埋置地点的特殊条件和混凝土物理力学性能的局部条件的影响。其次，应该指出：代表坝体靜力問題的基本未知因素的应力觀測，是相当困难的。首先，区分实測应变，就会遇到困难；其次，按照认为材料是各向同性、均匀和彈性的規律，从应变換算到应力所得的最后成果，一般是不可靠的，很少能直接地与模型試驗(或計算)上面所得的成果比較。

最后，众所周知，可以用埋設在混凝土內部的压力計、应力計等仪器求測应力，虽然它們和应变計一样，也受到局部条件的影响，但却具有不必从应变換算到应力的优点。不过这种仪器却存在着与仪器制造有关的一些缺点，或者有着另外一些只能量測压应力的缺点，因而至少在意大利这种仪器远比应变計使用得少。

在坝体模型上面的量測一般是靜水压力的作用或自重引起的应变，而在周圍边界条件完全肯定时，則可进行位移量測或应变計量測。当完全明确知道模型材料的下陷和湿度等特性时，就可很容易地从应变量測中确定相当的应力数值。在比較坝和模型的成果时，应该說明的是除了上面所說的因素以外，还有一些因素对于所得的結論有不可忽略的影响。現将这些因素依次論述如下：

1. 在模型上通常可量測到上下游面的任一点的应变(应力亦然)，而在实际的坝体中，这样的量測有时是不可能的，或則是不可靠的，因为坝的表面层受到伸縮縫的开裂、每日的温度和水情变化等引起的許多局部的影响，而这些因素会使得出現不可靠的結果。因而最好是将应变計埋設在內部离开坝面 1 米地方，这样在比較时是有些差別的。

2. 实际坝体基座与基础的接合条件非常复杂，且不一律，由于这些情况，便局部地受到基座和岩石的不連續的影响。在基础岩石最不利的情況下，可以采用或深或淺的灌漿加以改善。在模

型上可在一定情況下，重新造成岩石各向異性的基本特性和最顯著的裂縫等，而特別在可疑的情況下，則通常對於實際邊界條件一點也不明確，或只能部分肯定。這就給應變（尤其是在靠近填端部分的）的比較造成困難。

3. 由於填的施工以及季節變化的關係，可能会有：混凝土澆筑中止，比設計計劃提前或延遲封閉伸縮縫，以及改變混凝土力學性能（特別是水泥或水的配合比的改變）等現象；這些工地情況都將影響應變，特別是對於局部應變更有影響，而其實測應變與在進行設計或制作模型時認為實際情況與假設相同時所得的應變，是有所不同的。

4. 填體混凝土的力學特性（彈性模數、彈塑性極限、破損荷重），根據混凝土的澆注方式或凝固時間等，在填體的各部分還會有所不同。根據意大利從填體鉆探取得的直徑相當大（25~30厘米）的試件進行試驗，証實了在內力相等的點子上各點量測應變之間的顯著差別。

所有上面的這一切，都是我們初步的意見，應該確信，在考慮總應變（位移亦然）比較時它們是有效的。在考慮比較填和模型所得的成果時，對於混凝土和基礎岩石的物理力學特性的數值來說，可採用靜力平均數值。

如果位移的量測實際上僅用來比較，則應變計量測（特別是在施工期間）能得出有用的記錄；但是，所有這些情況，在混凝土中埋設儀器時，都必須嚴格地進行校核，至於原因何在，將在第三部分中介紹。

最後應當注意的是，由於年溫度變化和混凝土凝固時散發熱所造成的作用，對於總變形（位移）和局部的應變（應變計測得的）有時起着決定性的影響。將靜水荷載和自重所造成的應變區分開來，往往是件不容易的事。這是由於許多原因所造成的：混凝土的熱膨脹系數和導溫系數的數值不可靠，以及靜水荷載與溫度變化作用的双重影響等；這些問題通常在模型中如同計算一樣，是无法想象的，而在分析實際量測成果時全會遇到。

最近結構模型試驗研究所正在進行在承受溫度影響時的模型靜力性能的試驗研究（如同將在本文第二部分中所要介紹的一樣）。這就可以使得實驗室試驗成果與實際結果更為相近。

2. 意大利某些壩的位移量測及其與模型試驗成果的比較

1. 意大利在模型試驗和實體之間所得量測成果的比較，一般僅限於位移的比較，因為已經掌握了大量有用的位移資料，此外還可以採用許多不同的方法進行位移量測（視准儀、垂綫座標儀），而各種方法所得的成果，彼此都是相同的。

如果邊界材料特性能在模型上正確地重新產生的話，那麼模型試驗所取得的成果就可以與第一部分所進行的觀測成果完全一致。

模型上得到的位移成果能在不同荷載下，和壩體所承受的現象（靜水荷載、溫度、收縮、徐變等）產生的位移比較，以及和在壩體建造的实际條件下（混凝土和岩石性質，伸縮縫等）所得到的壩體靜壓力性能進行比較，所得的比較成果是很有應用價值的。

表 1 列出了派夫狄卡杜爾壩、皮恩太來舍我壩、脫拉維格諾

表 1

壩 名	高度① H (米)	跨度 C (米)	$\frac{H^2}{Br}$ ②	實測 位移 D_r (毫米)	模型 位移 D_m (毫米)	模型彈性模數④ E_m (公斤/平方厘米)	$n = \frac{E_b}{E_r}$ ⑤
派夫狄卡杜爾	50	310	0.71	8	22	200000	0.15
皮恩太來舍我	75	387	0.80	25	48	250000	0.7
脫拉維格諾洛	80	282	1.65	20	30	250000	0.45
留 米 意	127	127	27.3	10	10	350000	—
伐 茄 列 納	67	190	5.6	17.5	19.1	300000	0.5

注：①周界縫上的高度。

②托爾基方法所採用的無因次比值。

③靜水荷載位移。

④在模型中所假定的壩體楊氏模數。

⑤模型中混凝土與岩石彈性模數的比值。

洛坝、留米意坝和伐尔茄列纳坝的实体和模型上的顶拱位移数值和坝的主要尺寸；这些坝具有与本研究有关的各种不同的特征，因而可以认为是有价值的例子。

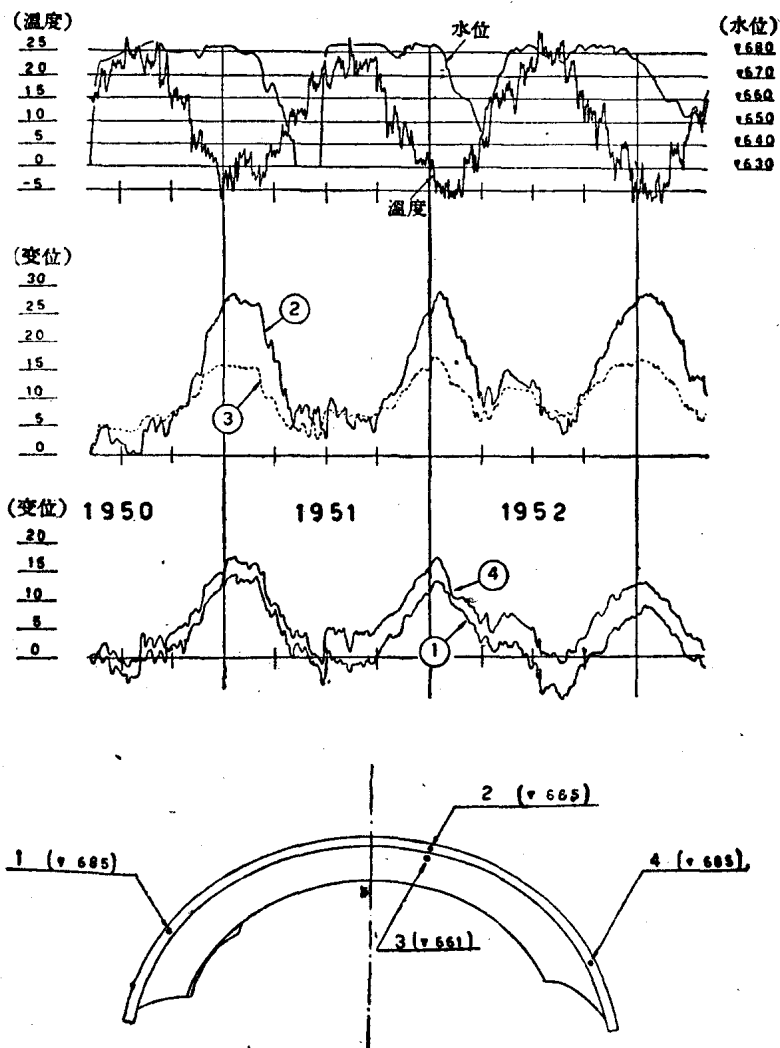


图1 派夫狄卡杜尔坝的水位高程(N)、温度(θ)和位移(D)

2. 图 1, 2 和 3 为派夫狄卡杜尔坝(属于亚得里亚蒂电力公司)、脱拉维格诺洛坝(属于史米雷尔公司)和皮恩太来舍我坝(属于托利诺亚齐达电业公司)实测所得的水位、位移和温度的情况。

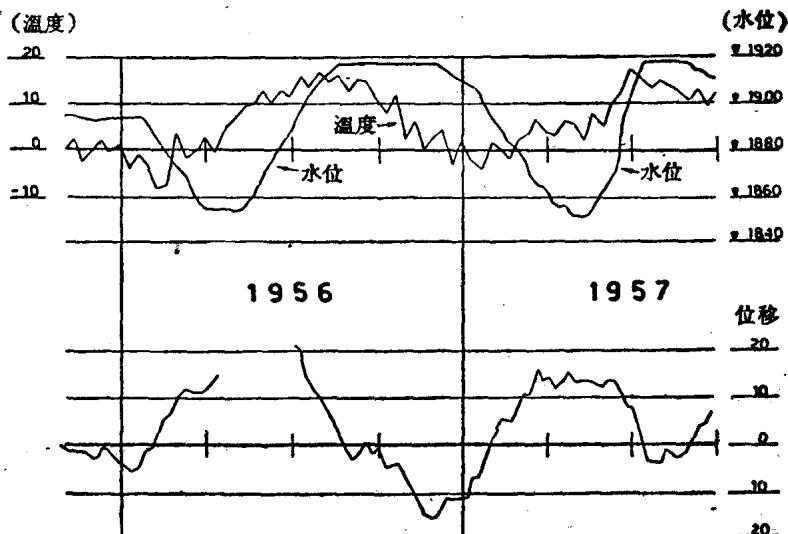


图 2 皮恩太来舍我坝的水位高程(N)温度(θ)和顶拱位移(D)

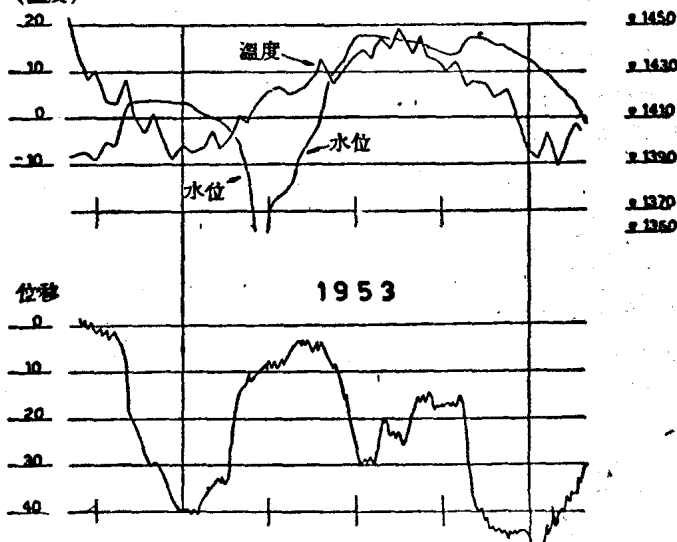


图 3 脱拉维格诺洛坝的水位高程(N)温度(θ)和顶拱位移(D)

3. 单由曲线和数值，就可认为：

a. 坝的位移大部分是由温度影响所决定的。

依我们看来，为了求得温度影响目前所可能提供的计算方法是很不够的，而在模型上进行试验，目前也还只是开始。事实上也只是尚未建成的坝才可进行模型试验，因而不可能将实测成果 and 理论推算进行比较。然而比较的重要性在于证实并指导实验研究，而特别是在温度应变数值的误差能掩盖由静压力所引起主要的而难以预料的位移情况时，则更为重要。下面一段将要介绍结构模型试验研究所在这方面的研究和所做的初步试验；

b. 在拱坝和薄拱坝情况下，实测的静水荷载应变和模型成果是相同的；然而在重力拱坝的情况下，实测成果与模型成果之间的一致性显著降低；这情况将在第 5 和第 6 点中阐述。

4. 模型上温度作用的试验研究有：

a. 由于模型材料的力学特性和混凝土相似，以及可制成不连续伸缩缝，并且可以具有实际坝体的“膨胀”，因而在模型上可以重新产生实体的应变。

b. 在温度变化情况下结构物内部温度分布规律可在模型上重新产生。

结构模型试验研究所用浮石混凝土做成的模型是非常适宜于温度试验的，因为首先这种材料很容易满足 a 和 b 的两个条件，其次，米兰的两个新数值的比例，即由 a 和 b 导出的温度和时间比值（亦即为由热弹性理论和热扩散理论得来的比值），都还是合适的。结构模型试验研究所在为米兰的爱迪生公司和屠齐斯的国际莱茵电站所做的莱茵地雷依坝模型试验研究中，采用了下列的比值：

$$\text{长度} \quad \lambda = \frac{L}{b} = 66.6$$

$$\text{温度} \quad \theta = \frac{\theta_r}{\theta_m} = 1$$

$$\text{应力} \quad \zeta = \frac{\sigma_r}{\sigma_m} = 6.4$$

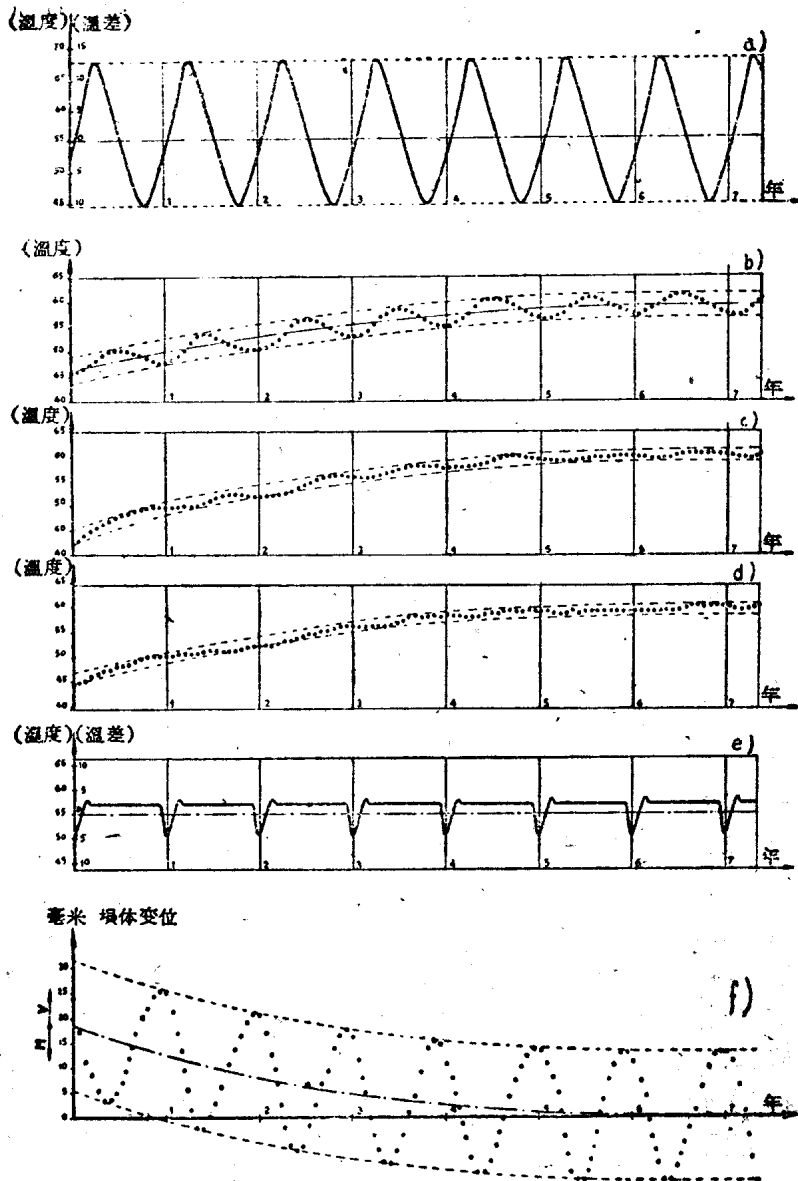


图4 模型上温度试验成果的例子

a—上游面温度；b、c、d—坝高一半地方在其厚度 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{3}{4}$ 处的坝体内
部温度；e—在相同水位情况下的下游面温度；f—坝顶拱一点的位移。

時間

$$T = \frac{T}{t} = 1, 150, 860, 720 \text{ (1)}$$

热荷载所用的仪器是由不仅随時間变化、也还可以沿着坝的水平高程变化、并可在受拉时伸长的热电阻系統組成，这样就可以体现出决定热荷载的两条基本規律的联合作用。

今举出如图 4 所示的表示中央澆注坝段在坝的一半高度处的内部温度和頂拱一点位移的两个量測成果曲綫。

5. 茲將有关在靜水載荷情况下坝体实测和模型試驗所得位移的比較結果說明如下：

在派夫狄卡杜尔坝情况中，除了1951年5月(在15天内加载)的例外情况以外，可以滿意地測得单在靜水荷載情况下的影响，采用亚得里亚蒂电力公司研究所制造的量測仪器，可很容易地求得这些成果。

現除表 1 中所列的数据以外，再列出其他各点的变位：

	位 移 (毫米)		
高程	685P.14	661P.14	685P.14
实体	6.7	5	6.1
模型	23	20	10

在模型和实体上面所得的位移非常相似，而实测绝对数值却較小。这个差别可以用实体混凝土的彈性模数，肯定比模型中假定的200,000公斤/平方厘米高来解釋；但也不能采用实体和模型的位移相同时的彈性模数390,000公斤/平方厘米，因为混凝土的龄期为2年时，測得的彈性模数才是390,000公斤/平方厘米。而且，一部分的差别应归之于另外一些現象，按照我們的意見，主要应归之于蓄水对于庫底的影响(这将是今后研究的对象)，尤其应归之于实体岩石远較模型岩石坚硬的緣故。

由于結構物的自重作用还相当大，在皮恩太来舍我坝中具有相似現象，但很不显著；此坝实测的拱冠最大位移为20毫米，而

① 应考虑到实体混凝土的导温系数 $\frac{\lambda}{\sigma \gamma}$ 并不可靠。

模型所得者則為42毫米(楊氏彈性模數 $E=250,000$ 公斤/平方厘米, $n=0.6$)。与此相反,脫拉維格諾洛堤的差別更不顯著;因為混凝土凝固時的連續散熱作用往往非常劇烈,以及由於缺少總荷載的迅速循環過程等緣故,所以估計在靜水荷載情況下的位移還是很困難的。在1953年4月到6月期間的荷載產生約20毫米的位移,而模型中則約為30毫米。

我們認為產生這些差別的原因,還由於在水庫作用下及當地基礎條件優越的情況下,混凝土的彈性模數比模型上測得者為大的緣故。

再者,在派夫狄卡杜爾和皮恩太來舍我兩種情況中所得的差別較小;事實上應該認為它們雖然是重力拱堤,但還是比較薄的(不過還是與厚拱差不多),於是它們幾乎可以代表介於重力拱堤和純拱堤之間的一種堤,這兩堤的模型和實體間的成果差不多是完全相同的。

6.在留米意堤的模型中(假定 $E=300,000$ 公斤/平方厘米及岩石非常堅硬)所得的位移為10毫米,這是與實測位移相同的。

事實上人們可以認為具有相反作用的兩種現象 ($n_m > n_r$; $E_m < E_r$)^①,彼此是可以相互調整的。留米意堤的成果對我們說來是有價值的,其理由有二:第一是關於設計的問題,我們認為由理論可知 n 比值的正確估計對於薄拱堤的位移並無很大影響;第二則是關於試驗研究問題,為了精確地測定結構的安全性,而無需很好的估算位移時,就可以在拱堤模型中引入一些相當小的比值。第二點已為伐爾茄列納堤的觀測成果所証實。

我們業已詳細介紹了本文研究的內容;這裡僅再說明一點,即在表示岩石的可變性試驗研究中,可採用與實際岩石相近的數值;其次,為了在模型中重新造成基礎岩石的不對稱形狀,這些

① n_m ——在模型中堤體與基礎的彈性模數的比值;

n_r ——在實體中堤體與基礎的彈性模數的比值;

E_m ——模型的堤體彈性模數;

E_r ——模型的基础彈性模數。——譯者

数值在各个地区之間可以是不同的。

通过三个連續的試驗，就可使得模型与坝体实测成果的完全一致(所得形状及其成果列出于图 5 的曲线和表 2 的数值中)。

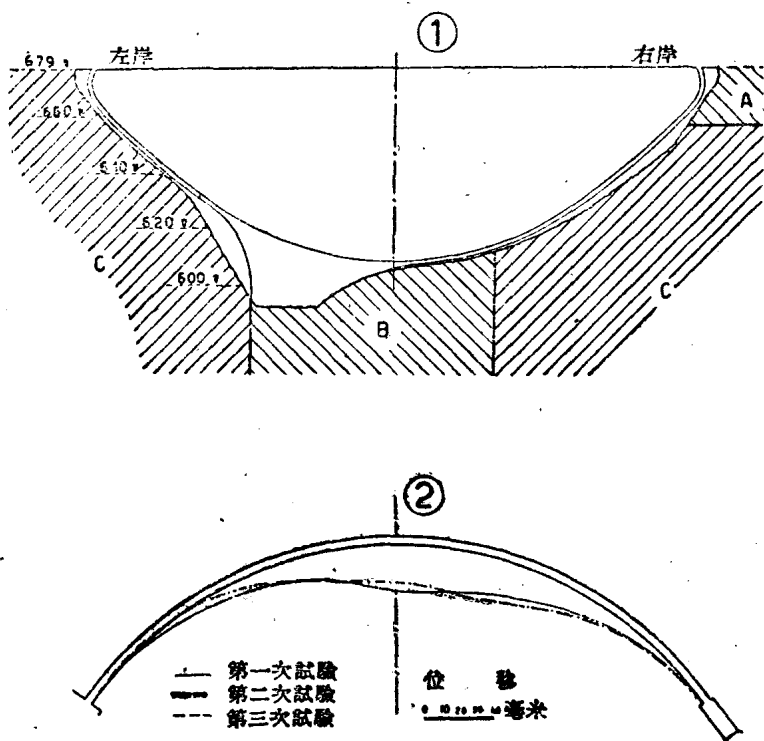


图 5

a—伐尔茹列納坝第二次模型的岩石分区图(表 2); b—模型和实体的顶拱位移。

7. 余論：当考虑到温度影响或岩石的可变性时，采用相当完善的試驗研究，便可以很准确地得出坝的位移。众所周知，这个能得到許多正确結果的方向，正是結構模型試驗研究所几年来所追求的方向。

現已介紹了模型的溫度試驗所用的設備；已經在模型上能够正确地造成下列岩石的特性：

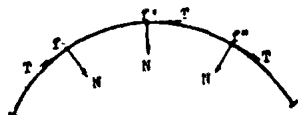
表 2

伐尔茹列納坝

岩石的可變性

坝与基础的特性	楊 氏 模 数 (公斤/平方厘米)			
	坝	A区	B区	C区
第 I °个模型				
第 I °次試驗	35,000	17,500	17,500	17,500
第 II °个模型				
第 I °次試驗	42,000	12,500	12,500	12,500
第 II °次試驗	42,000	38,000	12,500	12,500
第 III °次試驗	42,000	38,000	30,000	12,500

位 移

(单位: 毫米 $E=3 \cdot 10^5$ 公斤/平方厘米)

测点的徑向位移(N) 与切后位移(T)	f_N	f_T	f'_N	f'_T	f''_N	f''_T
第 I °个模型	4.2	—	19.1	—	8.8	—
第 II °个模型						
第 I °次試驗	6.6	3.1	26.0	0.4	13.2	3.1
第 II °次試驗	3.5	2.3	24.4	0.8	15.4	5.0
第 III °次試驗	3.5	4.6	21.6	1.6	16.2	5.4
实体	4.0	6.0	17.5	2.5	16.5	3.0

a. 別雷茹特的 $\frac{E_r}{E_0}$ 的比值(模型中混凝土与基础彈性模数的比值)很低, 仅为0.1;

b. 剛加諾坝的非各向同性的岩石(非各向同性比值为1:4);

c. 黑部第四坝的岩石具有很大的裂隙及其周圍用粘土回填。

3. 埋設混凝土中量測儀器的校核

对于澆注混凝土时埋設在坝內的仪器(应变計和应力計)來說, 在量測时是会产生誤差的; 因而在仪器埋設以前、埋設时候、以及在混凝土澆筑以后, 对所有的仪器加以严格的校核是极

其重要的，目的是保證它們作用時的規律性，在這裡不可能詳細介紹各種儀器不同的埋設方法。

因此，需要介紹的只是結構模型試驗研究所進行研究和試驗的特殊方法。這種方法能校正埋設在混凝土內部儀器量測所得的一些不合理的成果。單獨一個儀器的校核和將儀器埋設在一個適當尺寸的立方體中校核，二者是有區別的。

在受壓狀態下進行正常校核時，需要作出儀器分段讀出的應變計的應變曲線，或應力計的應力曲線，這些儀器顯示出近似直線的綫性函數關係，以及可以減少滯後現象；與此相反，當將儀器埋設在混凝土中以後，即使很小心埋設，也會顯著地產生各種複雜的特性。為了進行這類研究，必需用出力大及型式非常特殊的試驗機，因為為了忽略邊界條件的影響，混凝土立方體的尺寸應該比儀器的尺寸顯然大得多，結構模型試驗研究所備有一架2,000噸的機器，試驗台的大小達 150×150 厘米，這是歐洲唯一的機器。

用應變計或者應力計進行試驗時（二者都具有振動弦），從所得到的曲線中可以說明在增加到較高的荷載時，校正曲線的變化相對地穩定了。看來這種穩定是在兩次加載、退載循環以後才達

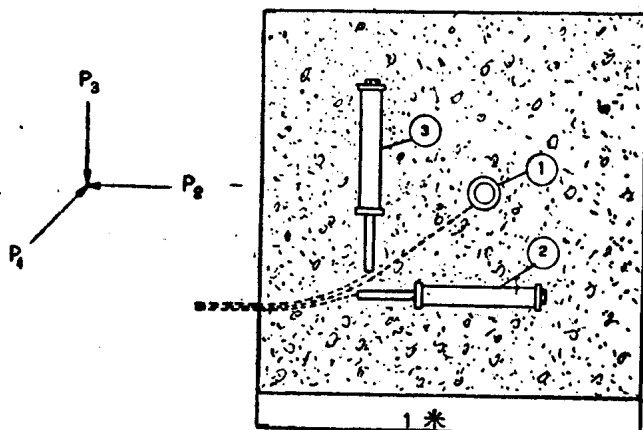


圖 6

P_1 、 P_2 和 P_3 —1、2和3應變計的荷載方向。

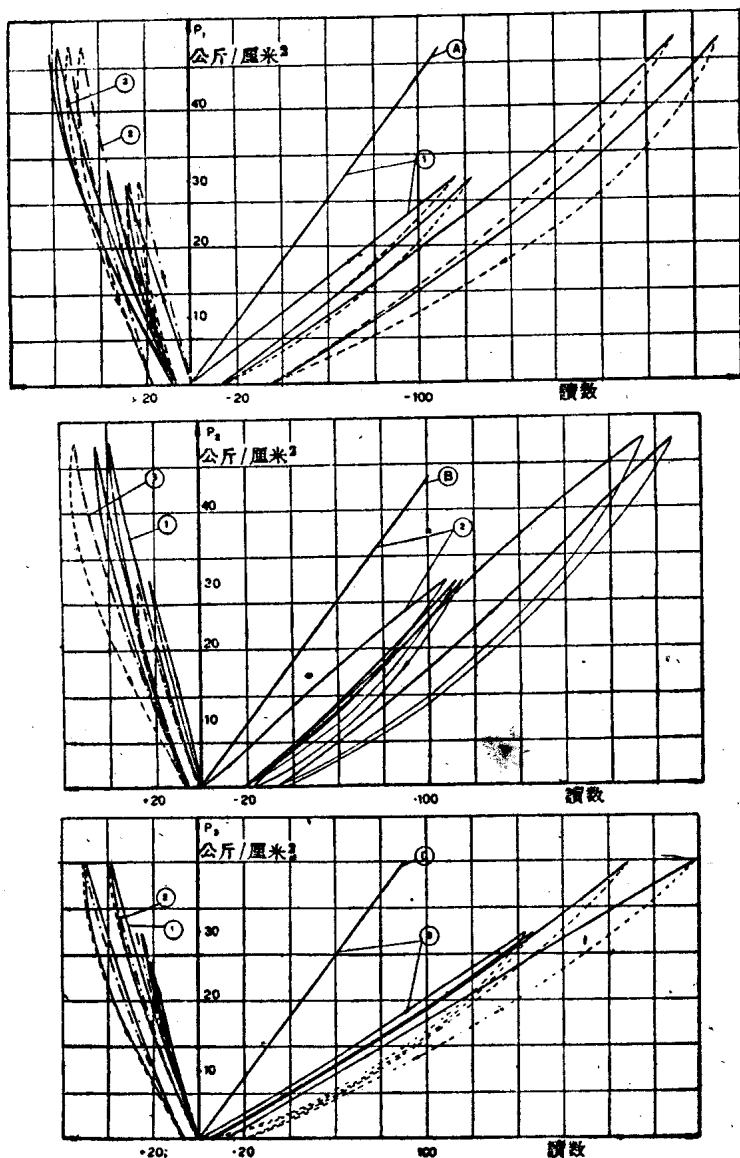


图 6 (續) 埋設在混凝土中的应变計的校核曲綫

1、2、3--应变計編号； P_1 、 P_2 、 P_3 —相应的荷載方向；A、B、C—无应力应变計的校核曲綫。