

343820

成都工学院图书馆

日. 日 罗贊諾夫著

基本館藏

負压与高速水流 情况下的 过水建筑物設計問題



中国工业出版社

序 言

在苏联，大规模的水利建设要求全面地采用先进、经济而又可靠的结构物。目前正在愈来愈多地设计与建造高水头水利枢纽，特别是高水头的水力发电枢纽，其过水建筑物系在高速水流的条件下进行工作。属于这类的建筑物有，例如，正在施工中的布拉茨克与克拉斯诺亚尔斯克巨型水电站，和设计中的水头约130米之察尔瓦克水电站，以及其他许多枢纽。鉴于苏联水利建设有着巨大的发展前途，特别是由于西伯利亚各大河流的计划性动能开发，显然高水头的建筑物今后还会采用得更加广泛。此外，在大量的中水头过水建筑物中，也发生相当大的流速。

设计过水建筑物（泄水道、泄水闸、堤下涵管及其它）时，特别是在高速水流条件下工作的过水建筑物，通常都避免有负压存在。因为正如一系列的现有建筑物之工作经验所证明的，如有负压存在，有时导致极其不良的振动现象，以及砌筑体因气穴而剥蚀的现象（参看，例如参考文献58、76、81、87、93、101、124）。不过，大家也知道（参考文献41、42、45），在许多情况下虽有负压存在，但建筑物的工作却完全令人满意，而且由于允许负压存在，在许多情况下，又可加大过水建筑物（如：虹吸溢洪道，真空型溢流坝）的过水能力，从而使得工程设计更为经济。同时，必须指出，真空型过水建筑物中的一种，即永远要在必需的负压下进行工作的虹吸溢洪道，在水利工程实践中应用得相当广泛，而其负压的存在从未遭到过反对；至于其它的建筑物（溢流建筑物，

泄水建筑物等等)，照例是不允許有負压的(或者对負压的大小严加限制)，并采用各种措施使負压不致形成，也就是說，要象杜絕某些不良現象那样地同負压进行斗争。在哪些情况下，可以并且宜于允許負压存在，反之，又在哪些情况下，不应当或不宜于允許負压存在呢？显然，为了闡明这一問題，首先必須分析各种水工建筑物在負压下工作的已有經驗，同时也要考虑到其它技术部門的經驗(船舶发动机之螺旋桨、水輪机等在負压时工作的經驗)。同时也必須研究現有的实验資料(包括實驗室試驗的資料)，以及理論性研究的資料。这对正确地判断运行数据是很重要的。其結果是要确定負压区、負压值等是否有害(或不适宜)，是否容許。

其次，必須探討这一問題，即在哪些情况下，容許負压存在(当然，这里指的是无害于事的負压)是具有实用意义的，即这負压的存在能够产生某种效果——譬如，显著提高水工建筑物的过水能力，給出經濟效益，以及其他好处。这一問題，对于某些情况，已在一定程度上进行过探討，不过，在相应情况下，仍需补充研究。

因此，对于在負压及高流速下进行工作的过水建筑物及其构件，应当制訂几項基本的合理設計原則。

在設計允許負压存在的真空型建筑物，或設計坚决防止負压存在的建筑物时，发生了許多問題，要想解决这些問題，还需要进行多方面的实验研究和理論研究(例如，負压模型試驗，特別是負压区有吸气現象时的負压模型試驗方面的研究，以及負压脉动方面的研究等等)。在这些研究尚未实现之前，前述問題之中，有些則不得不近似地加以解决，但这种近似应是附有理智的安全余裕的，而非盲目地保証安全。同时，由于对許多問題研究得不够，自然也会稍許限制真空

型建筑物的采用范围，因为設計人員总是考虑到在一定条件下負压可能变得有害或不适宜。这就表明，今后有必要对有关在負压与高流速条件下工作的建筑物的各种問題，进行全面的研究所。

論及研究和采用在有意識地容許存在的負压之下进行工作的过水建筑物之新型結構时，或論及使通常力求避免发生負压的一些已有結構型式(例如，过水建筑物下游的消能工，为了避免負压，曾限制了它們的应用范围)容納显著的負压时，应当指出：据我們看来，在这方面还有着很大的、远未充分利用的可能性，而应当基于对建筑物工作情况的进一步詳尽研究，以及近代科学成就，加以利用。为了証实上述看法的正确性，可以举出另一技术領域——造船业中的一个极具代表性的例子。大家知道，在設計船舶发动机的螺旋桨时，长时期来都在力求避免气穴現象，达成无气穴的工作情况，但是，在对气穴过程作了詳細的研究之后，查明了所謂分离气穴形状(超气穴)存在时并无气蚀发生(或气蚀不大)，于是就有了可能在一系列情况下，合理地应用所謂超气穴螺旋桨，这种螺旋桨的轉数极高，并有許多优点(參閱，例如，参考文献37)。

本书的編排大致与以上所述相同。本书拟探討涉及負压存在时，过水建筑物及其构件的工作情况之各种問題，同时試图确定这些建筑物合理設計所需遵循的某些普遍原理和建議。故本书的主要目的是探討下列普遍原理与規律性：确定在哪些情况下允許負压存在是适宜的，又在哪些情况下不能允許或不宜于允許負压存在；确定負压区的型式及其詳細的特性，和关于負压模型試驗的一般規律性。至于在負压与高流速条件下工作的各种过水建筑物(溢流坝、豎井式溢洪道、

虹吸溢洪道、大坝泄水孔及其閘門等)的設計問題,則因有关各該建筑物的专著中已分別作了适当的闡明,故本书不再作詳尽的論述。在上述这些专著中,已以适当的方式应用了本书中列举的一般原則,自然,在很多情況下,还把这些原則作了相应的发展,使之具体化。

但是,尽管如此,在本书中还不得不以各不相同的詳尽程度来論述各种类型的建筑物,以及各种具体的建筑物,以便基于这些討論,来查明和分析出某些普遍規律,或者論証各种不同的建議。同时还要更加詳尽地研討已經拥有相应研究資料的那些建筑物的型式,以及我們过去已經作过比較詳細的研究的建筑物或其构件(真空型溢流坝,豎井式溢洪道,消能工,某些“管型”建筑物)。

关于本书的名称,这里应作一点說明。名称中所提的高速水流字样,請勿理解为本书将涉及在高速水流条件下工作的建筑物設計方面的全部問題,如水流掺气現象,高速水流对河床与护面的影响等等。这些問題需要作專門性的論述,本书仅仅研討能引起負压的高速水流問題。

最后,鉴于功勋科学技术工作者、建筑与建筑艺术科学院院士、技术科学博士 М.М.格里兴(М.М.Гришин)教授和本书評閱者、技术科学博士 И.И.阿格罗斯金(И.И.Агроскин)教授和技术科学博士 А.Н.阿呼庆(А.Н.Ахутин)教授在审閱本书手稿时所作的宝贵指示,謹对他們致以深切的謝意。

作者在參觀伏尔加水电站中遭受气蚀的那些結構物时,蒙建筑与建筑艺术科学院院士 Н.В.拉晉(Н.В.Разин)和工程师 Н.Ф.薩宗諾夫(Н.Ф.Сазонов)多方协助,并惠賜有关資料(图片等等),在此一并致謝。

目 录

序 言

第一章 在負压及高流速条件下过水建筑物的

工作情况 1

1-1 概論 1

1-2 溢流坝及其閘門 2

1-3 泄水建筑物、封閉型溢洪道、船閘輸水廊道及
这些建筑物的閘門 29

1-4 虹吸溢洪道 35

1-5 泄水建筑物下游的消能工 38

1-6 其余的建筑物与設備 43

1-7 簡短的主要結論 46

第二章 負压与高流速情况下的水流現象。負压区的

种类与最大容許負压值的确定 49

2-1 負压区的种类及其特点 49

2-2 气穴及其形状。气蚀性剝蝕 52

2-3 水中所溶空气在負压下自水中分离出来的問題 57

2-4 压力(負压)脉动及其作用 58

2-5 水流的捲气及其作用 124

2-6 時間平均負压(包括負压脉动)最大容許值之确定。

气穴历时系数 129

第三章 有負压的水工建筑物之模型試驗問題 134

3-1 有負压时模型試驗之一般問題 134

3-2 有負压而又有气穴出現可能性的水工建筑物之
近似模型試驗 151

3-3 真空型水工建筑物气穴模型試驗用的减压箱 162

3-4	关于压强脉动模型律問題的补充論述	172
第四章	在負压及高速水流条件下工作的各种过水 建筑物及其构件的若干一般性設計原則	183
4-1	建筑物宜于容許負压存在的情况	183
4-2	在負压和高速水流情况下工作的或有时会产生負压的 水工建筑物及其构件之若干一般性設計原則	196
参考文献		211

第 一 章

在負压及高流速条件下过水 建筑物的工作情况

1-1 概 論

現有文献中載有許多在負压及高流速条件下过水建筑物工作的例子，其中既有工作十分滿意的例子，也有工作不能令人滿意的例子(发生振動，气穴現象引起了材料的剝蝕)。本书沒有必要詳細論述这方面的大量例子，因为其中很多是尽人皆知的^①。我們基本上将只涉及对确定某些普遍規律性必需的而又富有代表性的例子。同时，在对建筑物工作得不能令人滿意或工作得十分滿意的可能原因(有时是推測中的原因)作了研究之后，我們試圖肯定建筑物在負压及高流速条件下工作不能令人滿意和工作得十分滿意的 主 要 条 件。此外，还需对无負压或負压很小的情况下，建筑物工作得不够令人滿意的某些情况(振動)进行研討，这对評定負压作为建筑物发生振動的一个影响因素究起何种作用，是极为重要的。

在某些情况下，如果个别試驗研究成果与理論性假設对分析本章所論各問題有所裨益的話，也得順便提及这些成果或假設。

① 应当指出，这些例子的詳尽的系統敘述，并附以相应的分析，一般說来是很有益处的，并且可以作为对水工建筑物的設計額为重要的专题著作的課題。

1-2 溢流坝及其閘門

对許多溢流坝在負压不大的条件下工作的情况，作者已在“真空型溢流坝”一书內作了詳尽的分析(参考文献41)。編著該书时，既討論了坝頂无閘門的坝，也討論了坝頂有閘門的坝，后者的閘墩上的門槽是过坝水流发生扰动的源泉。可是，該书所論述的坝頂有閘門的坝，其坝頂以上的水头并不十分大(水头最大为6.85米——康諾温果坝)。本书不再列述“真空型溢流坝”一书中已載的全部資料，而只述及其中的主要資料，以及該书未及載入的晚近資料。

現有的在負压下工作的各种溢流坝，可划分为四种基本类型：

1. 棱角式剖面的坝，在絕大多数情况下，其工作方式为水舌自由跌落，或水舌在断面某些部分与坝体分离。此类坝絕大多数为二十世紀以前或二十世紀初期修建的老坝。

2. 匀滑曲綫形剖面的溢流坝，其坝頂呈圓弧形曲綫，并在絕大多数情况下，进水口边緣为傾斜的。这种剖面的溢流坝在上世紀末与本世紀初在美国得到最广泛的采用(参考文献123)。

3. 匀滑曲綫形剖面的溢流坝，其坝頂溢流面絕大多数呈抛物綫形或近乎抛物綫形。

4. 完全有意識地采用某种在給定条件下相当合理的真空型剖面的溢流坝。

前三类溢流坝的特点是，它們不但沒有追求負压的存在和利用負压所具的优点(加大流量系数、縮窄簡單断面)，相反，第三类溢流坝(和第二类溢流坝中的一部分)还力求不发生負压。

第四类溢流坝不久以前才开始采用，通常只建筑在岩基或半岩性地基上并且坝的高度不大。目前暂时采用得还很少。在已建的溢流坝之中，可以举出下列各坝：哈萨克苏维埃社会主义共和国契台尔梯河上的溢流坝与乌克兰苏维埃社会主义共和国境内的新阿尔汗盖尔斯克水电站（参考文献 42）；在已完成设计而最近期间必将修建的溢流坝之中，可以举出乌克兰的拉狄任斯克与克罗鲍臣斯克水电站之溢流坝（系乌克兰国家农村电业设计院所设计）。在苏联，已建成的第四类真空型溢流坝，还未曾有过其工作情况不佳的报道。在最近期间，应当进行相应的原型观测来专门观察这些溢流坝。根据技术科学副博士 Д. Е. 美尔尼琴柯 (Д. Е. Мельниченко) 副教授的报导，拟在施工中的克罗鲍臣斯克水电站溢流坝上进行相当广泛的试验，因而将在该坝上装置相应的测量仪器。值得指出的是，拟定将此溢流坝修得既有真空坝面段 (Д. Е. 美尔尼琴柯建议的第 4 号剖面，见参考文献 29)，也有非真空坝面段，以便能在相同条件下，比较真空坝面与非真空坝面的工作情况。

高斯夫河上相当高的希罗考夫大坝采用临时性真空型坝顶一事，是很有意义的。此事连同所引用的原型观测的数据，将在下文中加以叙述。

1. 第一类溢流坝面及闸门过水时发生的振动现象

当这一类溢流坝有自由跌落的水舌时，在某些情况下（如弗莱敏格姆、菲特契堡、缪尔格塔尔、劳伦司及其它各坝），如水舌之下通气量不足，就会使空气突然撞入水舌下形成的真空区，同时产生爆破声，以及产生附近物体振动等等现象（参考文献 126）。但是，也可能发生这样的情况，即

在一些情況下，水舌下之空間兩側雖與大氣很好地溝通，却仍能產生振動現象（見下文）。

必須指出，根據文思洛 Winslow 的介紹（參考文獻126），在兩座弗萊敏格姆大壩，壩體振動得這樣劇烈，以致使距大壩約1哩外的房子上的窗子因共振而呈現震動，碟子從架子上掉下來，堆得不齊的箱子也塌了下來，而振動之聲有時猶如一系列的小爆炸一般；K. 別特里卡特 K. Pefrikaf 指出（參考文獻111）：加密爾境內的一座大壩發生了自由跌落水舌的振動，引起了很大的聲音，并使大壩附近房尾的門窗發生振動。

值得指出，在上述各溢流壩上，每次最大振動都是在壩上一定的水頭之下發生的，而且水頭都是不大的（例如，在弗萊敏格姆與菲特契堡大壩上，水頭約0.15米，而在勞倫司大壩上，水頭約0.305米），也可以說水舌是很薄的。在許多情況下，應該設想這些水頭是相應於不穩定的水舌狀態的，如壓縮水舌或貼附水舌，或者這兩種水舌交替發生的狀態，但也可能是其他的水舌形狀。雷伯克 Rehbock（參考文獻116，123）根據他的觀測，描述繆爾噶勒河上一座溢流壩過水時的聲響猶如雷聲震鳴，遺憾的是他沒有提及壩的剖面。然而雷伯克肯定地指明，這種現象的發生是由于水舌下方進氣量不足，而致交替形成壓縮水舌與自由水舌的結果。

必須指出，這些壩的溢流水舌下方不可能有大的負壓。因為，按照我們的偏於安全的（即負壓偏大的）近似計算（參考文獻41），這些溢流水舌下方的負壓值為：弗萊敏格姆大壩的 $\bar{h}_{\text{負壓}} \approx 1.85$ 米水柱，菲特契堡大壩的 $\bar{h}_{\text{負壓}} \approx 2.56$ 米水柱。

然而對於這一類中的其它一些大壩，在工作時其水舌與

下部溢流面完全分离(如別脫瓦大壩)或局部分离(如阿維尼奧諾大壩)者,文献中未見指出有振動現象,尽管这些壩的剖面必定会使水舌下方发生負压,甚至在空气能從兩側进入水舌下方时,也还会产生局部的負压。

下述的情况是极其重要的,即实践中,不論原型观测或模型試驗(参看,例如,参考文献 27、111),即使水舌下方有大量空气进入时,也就是說,在水舌下方空間的时间平均压强实际上等于大气压强时,或者水舌下方空間的中央部分有微不足道的時間平均負压时(由于空气从兩側进入),会发现自由跌落水舌与建筑物的振動現象。

在这方面,极其富有代表性的例子就是:为了美化的目的,而在命亥諾市修建的尼姆芬堡薄壁堰(参看,例如,参考文献27)。此堰水舌下方进气情况很好(图1-1),但系兩側进气(即脉动水舌下方的局部压力,在堰的兩側附近同堰的中央部分可能彼此有稍許差別)。

因此,如自由跌落水舌下方实际上不存在平均負压,或

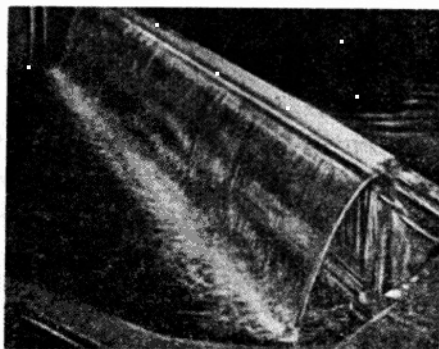


图 1-1 命亥諾市尼姆芬堡中的薄壁堰

負壓值極微時，在相應條件下就可能產生振動。對於這些振動產生的條件，如所周知（參看，例如，參考文獻6、27、85、106、111、118），曾針對溢流壩頂上的閘門，特別是舌瓣型閘門，詳盡地進行了研究。因為在許多情況下，這些閘門都發生了振動。K·別特里卡特（參考文獻111）同時還研究了自剛性檻跌落的水舌之振動現象。

在此，不再詳細論述這些研究的著名成果，因為業已根據這些成果，提出了一些上述型式的閘門的振動發生理論，並且制訂了各種防止水舌振動，從而防止閘門振動的有效措施（各種散流設備及其它措施等，參見，例如，參考文獻27、111）。我們僅指出下列各點：

1) 從兩側向水舌下方空間通入空氣以及採用勻滑的非真空型閘閥外形，並不能消滅閘門的振動，而僅僅減少閘門的振動；把水舌分散為許多股個體水舌時，振動即可停止。剛性結構的水舌散流設備，其效果可能較柔性結構者為小（參考文獻111）。

2) 研究振動時，必須把下述幾方面聯繫起來加以研究：水舌的波動和水舌下方空間範圍內下游水體的波動，以及水舌下方空氣的波動（這種空氣波動又傳給水舌與建築物）。

3) 薄的水舌最常振動（在高水頭下，幾乎永遠如此）。

4) 閘門建築物的最大振動要在一定的條件下（溢流水層的高度及其它等）才能發生，即發生在閘門自振頻率與振動過程相互作用因素（水舌，水舌下方的空氣，水舌處下游水體的振動）的振動頻率吻合之際。

5) 關於引起振動的原動力問題，則存在着一系列的假說。其中認為，對於薄的水舌，主要因素是表面張力，而對於中等水舌與厚的水舌，主要因素是下游水墊的震動，如果

水舌之下有这样的水垫的话^①。

此外，我們設想大坝上游的波浪也是引起水舌波动与振动的因素之一。以 B.B. 古比雪夫命名的莫斯科土建工程学院水利与海港教研室最近所作的研究証明（参看，例如，参考文献15），即使在普通的实用剖面堰的情况下，上游的波浪对水舌和下游的脉动也有影响。

总之，可以确认：同大坝坝体或閘門分离开来的水舌，其下方有负压存在，并不一定总是造成振动的原因，但是如有这样的负压存在，纵使是不大的负压，振动的可能性就增加，并且当空气有可能間歇地突破负压区时，振动就可能是很显著的。

2. 第二类与第三类溢流坝工作概論

在文献中尚未見有关于第二类与第三类溢流坝发生危害性振动之資料，因为这两类坝的坝面常常被认为是非真空型的。然而，实际上（从一系列实验室試驗的数据看来，参看，例如，参考文献 32、33、41），此两类坝在工作时，有着不大的時間平均负压存在，其值約为 0.5~1.5 米水柱，也就是說，就负压的大小而論，这两类坝是接近于第一类坝的。同时必須指出，正如研究所表明的（参看，例如，参考文献 7、32），溢流坝上的閘墩会使得二元流条件下的溢流坝非真空型坝頂产生负压。A.P. 別列津斯基 (A.P. Березинский) 指出（参考文献 7），根据 1934 年 Н.П. 茲列洛夫 (Н.П. Зрелов) 所进行的第聶泊大坝原型觀測的資料，該坝非真空型剖面上的

① 必須指出，在我們对某一个水舌自由跌落的溢流堰所进行的实验室試驗中，曾发现在一定条件下，水跃的脉动对水舌有所影响。

負压实测值为 1.533 米水柱。

大家知道，第二类及第三类溢流坝上也发生无害于建筑物工作的不大的振动，在观测一系列的非真空型大坝（依凡尼考夫大坝、希罗考夫大坝、第聶泊大坝及其它的坝）时，都记录到这样的不大的振动。

上述情况又一次使人确信，在一系列的第一类溢流坝上观测到的显著振动，其决定性因素并不是負压的绝对值^①，而是有利于破坏負压的一些条件。在这些条件下，发生水舌与溢流坝砌筑体分离的现象和水舌下方进气不足的现象，一般說来，在相应的条件下，还会使自由跌落的水舌产生相当大的振动。

至于上述各类溢流坝砌筑体的气蚀问题，则在极大多数情况下是不产生的，仅仅在个别情况下，才发生气蚀现象。这些情况将在本节第四项中加以论述和分析。

3. 希罗考夫水电站钢筋混凝土溢流坝

临时性真空型坝顶泄洪的情况

高斯夫河上希罗考夫钢筋混凝土溢洪道（溢流坝）修有临时性的真空型坝顶，对这种坝顶进行的研究是有很大意义的。^②

这座溢洪道具有按克里格坐标繪成的非真空型溢流坝面（见图 1-2 之虚线）。溢流槛高度约 28 米时，溢流坝在河床以

① 因为負压未达到气穴的临界值。

② 这项研究是由工程师 Г. Г. 馬智格爾 (Г. Г. Майзингер) 和 Э. А. 喀尔特維格 (Э. А. Гартвиг) 进行的。研究工作的組織，是在建筑与建筑艺术科学院院士 Н. В. 拉智 (Н. В. Разин) 的指导下进行的。研究結果載于 Г. Г. 馬智格爾所著“有真空型坝顶的溢洪道的泄洪情况” (Пропуск наводки через водосбор с вакуумным оголовком), 1948 年。

上的总高度为32.7米。溢洪道的结构是輕型的，坝型为支墩坝(蜂窩坝)，其空腔由砂质砾石填充(参看，例如，参考文献43的图14)。此坝的坝基是砂岩与粘土頁岩。1947年汛期前，此坝尚未竣工，因考虑到洪水必需經此坝下泄，同时还考虑到必需防止此坝空腔内部填方受到水流影响，于是就不得不在汛期来到之前修建临时性的坝頂。如图1-2所示，在未竣工的各坝孔段，坝頂上临时性水平板同已建成的拋物綫形下游坝面連接处，系做成橢圓曲綫形，也就是說，此坝頂为真空型的(参考文献41)①。其中有一坝孔(第五孔)，曾装設了一些测压計，其装設位置示于图1-2。負压先用水銀負压計来測定，然后用純水負压計来測定，一昼夜測量三次，測量期間相当长，自1947年5月1日起至7月9日止。泄洪时溢流坝工作全景示于图1-3。

1947年的洪水，通过临时性真空型坝頂下泄的情况是十分順利的；溢洪道負压区沒有产生振动与损坏。同时負压最大值(图1-2所示的第7号测压計所测得)，如計入負压的脉动，則当坝頂上水头为 $H=8.09$ 米时，其实测值为3.13米水柱。这时，時間平均負压值(即該测压計所测得的最大負压讀数与最小負压讀数的平均值)为2.95米水柱。必須指出，在平板頂面高程为27米的各坝孔段內(图1-2)，由于不可能把橢圓形坝頂完全匀滑地銜接起来，故在坝頂与拋物綫形下游断面連接处，也曾发生过损坏現象。此种损坏就必然引起了水舌与溢流面之間发生不大的局部分离現象，并使水舌下方产生渦流。这种情形从图1-4上所示的第6号与第7号测压計之关系曲綫 $\frac{\bar{h}_{\text{負压}}}{H} = \varphi\left(\frac{H}{r_{\phi}}\right)$ 也可看出。这里， r_{ϕ} 为坝

① 这种解决办法系征詢本书作者意見后才采用的。

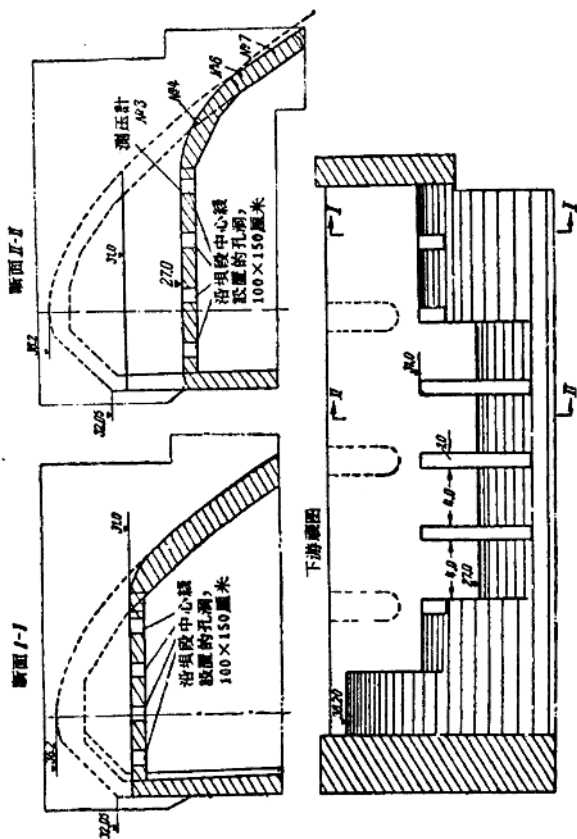


图 1-2 希罗考夫水电站钢筋混凝土溢洪道的临时性真空型坝顶

1) $\nabla 31.0$ 高程的溢流面，其 $\alpha=2$ 与 $r\phi=2.5$ 米；2) $\nabla 27.0$ 高程的溢流面，其 $\alpha=2$ 与 $r\phi=5$ 米；3) 沿着堰顶高程各为 $\nabla 27.0$ 与 $\nabla 31.0$ 的各坝段的中心线，在水平板上各设 4 个孔，尺寸均为 100×150 厘米，各孔均用钢板盖闭。