

332867

成都工学院图书馆

基本馆藏

水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 5 集

(结构、材料)

中国工业出版社

40:4

目 录

岩基垂直破碎带对混凝土坝体应力的影响·····	黄永权 陈际明 汪成梁 (1)
混凝土坝模型破坏试验及其安全系数的探讨·····	沈崇刚 陈厚群 (14)
各式矩形孔附近的应力集中·····	汪景琦 梁学礼 居 鏊 (29)
重力坝斜块加高的应力计算·····	胡积龄 (48)
混凝土分区对重力坝分期施工应力的影响·····	储海宁 (56)
非均质重力坝分期施工的溫度徐变应力·····	朱伯芳 王同生 (67)
粘弹性介质内地下建筑物所受的山岩压力·····	朱伯芳 (83)
混凝土坝稳定溫度场的电模拟试验·····	丁宝瑛 (97)
二维溫度应力的薄板比拟试验·····	郭之章 陈莲芳 (106)
混凝土坝抗地震设计资料总结分析·····	陈厚群 (116)
比例电桥的簡易率定法·····	經萱祿 赵志仁 (151)
关于水泥混凝土极限拉伸变形性能的探讨·····	吕宏基 楊德福 (167)
混凝土轴向拉伸变形试验中的几个問題·····	楊德福 (180)
提高大坝混凝土质量、合理降低水泥用量的 途径·····	关英俊 蔡正詠 甄永严 (192)
水工混凝土抗高速含沙水流磨損的探讨·····	姜福田 (207)
塑料和橡皮止水片的试验及其应用·····	胡錦学 (222)
大坝混凝土受压徐变试验研究·····	金学龙 (233)

岩基垂直破碎带对混凝土坝体 应力的影响*

黄永权 陈际明 汪成梁

【提 要】断层破碎带的研究和处理一直是混凝土坝工程设计最为关心的问题之一。本文对存在断层破碎带时混凝土坝体应力分析方法, 断层破碎带的不同位置 and 不同宽度对坝体应力的影响, 以及考虑断层破碎带具有承载能力时对坝体应力的影响等问题, 进行了初步的理论分析和试验研究。

一、引 言

混凝土坝的岩石基础, 由于受到地质构造的影响, 常存在着断层破碎带。有的断层破碎带虽已被坚硬岩石冲填胶结, 但仍在不同程度上破坏了坝基的整体性, 对坝体应力和稳定有不同程度的影响。坝基破碎带的处理, 是一项极为复杂的综合措施, 它和坝型方案选择、施工方法、坝体分缝分块、以及施工质量等各种因素均有关系。对断层破碎带的处理, 除了要防止坝体应力恶化, 减少不均匀沉陷以外, 还必须严格进行防渗处理, 以确保坝基的稳定性。

坝基破碎带的处理, 国内外都积累了不少经验。国外的夏斯塔及巴克拉混凝土坝都是大家熟知的工程, 国内通过新安江、三门峡、桓仁等工程的实践, 取得了一些经验, 为今后水利建设提供了宝贵的资料。

为防止坝基破碎带所引起的应力恶化而采取的处理措施, 主要有以下几种类型: 开挖回填、混凝土塞或钢筋混凝土梁、混凝土拱以及混凝土管柱等等。

混凝土塞是一种采用最广的处理方法。其基本设想是: 希望通过混凝土塞的作用, 将坝体的压力传至破碎带两侧的坚硬岩石上。混凝土塞的设计都是假定作为两端固定的梁来考虑的, 将坝体的垂直应力作为荷载, 不考虑坝体刚度的影响。在夏斯塔的设计中, 设计的控制指标是以塞底的最大变形作为依据的。后来在巴克拉及国内的若干工程中, 改用塞底最大允许应力作为设计控制指标。这种处理方法, 要求断层破碎带两侧的岩石要比较坚硬。

* 本文曾于1963年11月在中国水利学会年会上宣读过。北京大学数学力学系固体力学班华云龙、毕遂成两同学参加了部分计算工作。

国内水利工程实践表明：由于混凝土塞施工复杂，常常难于保证它的整体性；而且由于混凝土收缩影响，也难以与基础很好结合。因此，实际上很难真正使混凝土塞达到设计意图——整体固端梁的作用。同时，混凝土塞的计算由于未考虑坝体刚度的影响，又是按梁来计算的，这和实际情况也有较大出入。

开挖回填，主要适用于较小的断层破碎带，一般在3米以内。而这种较窄的破碎带，在很多工程中都可能遇到，因此这种处理方法也就应用得十分广泛。开挖回填，从其作用来分析，与混凝土塞相似。处理时是将破碎带的软弱部分挖除，然后回填混凝土，以保证坝基的整体性，防止应力集中和不均匀沉陷。国内新建的某些工程（如响洪甸等）都是采用这种处理方法。

混凝土拱从结构上分析，是一种比较合理的处理方法。它是利用拱的作用原理，将坝体应力通过混凝土拱传至破碎带两侧的坚硬岩石上。由于拱承受压力，因此避免了采用混凝土塞时所出现的拉应力，但是这种处理方法，在工程实践中应用得尚不广泛。其主要原因是：施工较复杂，工程质量难以保证，而且在一定程度上影响施工进度；同时分析计算也还没有一套可行的方法。采用这种处理方法的，有法国的埃歇勒-当尼巴尔拱坝（坝高50米），及墨西哥的罗德里格斯支墩坝（坝高76米）等。

混凝土管柱是在断层软弱带中用大口径钻机打孔至新鲜岩石，然后浇灌混凝土，形成混凝土桩，以传递坝体应力。这种处理方法，只适用于下列情况：断层破碎带与地面成斜交，而且倾角较小，破碎带较窄，难以进行开挖；或破碎带附近由于受到挤压作用，岩石比较破碎等。

坝基破碎带处理，虽然在工程实践中积累了一些经验，但是在工程设计中下列问题仍未很好解决：合理地选择处理方式；考虑断层破碎带后的坝体应力分析方法；不同宽度和不同位置对坝体应力的影响；存在断层破碎带时坝轴线的合理选择；当断层破碎带的宽度很小时是否还需要进行处理；混凝土塞的作用；以及考虑断层破碎带承载能力的影响等等。本文系就上述问题假定断层破碎带为垂直时，对坝体应力情况进行了初步的分析研究，为合理选定处理方案提供参考。

实际上，断层破碎带的存在，不仅影响坝体的应力分布，而且还影响坝体和坝基的稳定。由于稳定问题比较复杂，涉及面较广，尚待今后进一步研究。

二、在具有无承载力垂直破碎带弹性 基础上的坝体应力分析方法

现行的断层处理设计，对混凝土塞深度的计算，都是沿用夏斯塔坝设计所提供的固端梁法。它的实质是把平面无限楔——不考虑基础影响所得的坝体正应力，作用在作为固端梁的混凝土塞上，利用弹性力学或材料力学方法，就可以分析梁底的沉陷。在考虑梁底弹性反力时，利用“能者多劳”的概念模拟软弱层的存在。很显然，当梁的荷载一定时，梁愈深，则梁底的沉陷或拉应力愈小。根据梁底的沉陷不宜过大，而

且即使增加梁的深度亦对减少梁底沉陷量并无显著影响的原则,来选定梁经济合理的深度。此外,也可根据梁底允许拉应力来选定梁深。

实际上,混凝土塞上的荷载并非用无限楔方法得来的坝体最大正应力。很显然,塞子深度变化后,坝底所产生的正应力,亦即作用于梁上的荷载相应地也改变了。同时梁顶变位和坝底变位的协调,并未考虑。因此,这种计算方法是合理的。

1961年全苏水工科学研究院С.Г.Шульман^[1]对具有断层岩基的计算,实际上是把坝体作为平面无限楔所得的应力作为荷载,作用于坝基被断层切割而成的无限楔上,并利用前人已得的公式,求得该楔的应力,而所作用的荷载是按直线分布的正应力和剪应力。但是,由于没有考虑坝和基础的接触面上的连续条件,因此,所得出的楔体应力并不是基础的真正应力。

考虑坝基和坝体具有不同弹性模数的坝体应力分析方法,有不少人进行了研究,例如 F.托尔克(Tölke)^[2], H.A.布拉兹(Bratze)^[3], A.П.新尼岑(Сяницын)^[4], Ф.И.尤素福(Юсупов)^[5], 张宪宏^[6], I.K.西沃曼(Silverman)^[7]等。这些研究的基本出发点都是利用平面无限楔求得相当于基础和坝体接触面上的应力和变位,再把这些应力作用在半平面上,求得基础表面上的变位,从而获得无限楔和半平面在接触面上的变位差。为了考虑接触面的连续条件,必须在无限楔上迭加一无体积力坝体,上下游不受荷载,仅在接触面作用上述变位差的自应力函数解答。因此,各种考虑基础影响的坝体应力分析方法,总是归结为求解不同的自应力函数的解答。但是,上述工作都是只考虑坝基为同一种弹性模数。至于断层对坝体应力影响的计算方法,迄今尚未见人探讨过。

不考虑承载能力的垂直断层对坝体应力影响的分析方法,也可根据同样的概念来处理。它和上述问题的区别,仅在于将坝体作为无限楔所得相当于接触面上的应力,作用在无限的两个1/4平面上,而不是作用在无限半平面上。如断层并非垂直的,而与地面成一定的倾角时,则将此与地面成一定倾角的无限楔代替无限1/4平面。仿上述方法,先求得接触面上的变位差,然后求得考虑存在断层的坝体应力分布。

兹将弹性基础具有无承载能力断层的坝体应力分析方法介绍如下。

(1) 自应力函数解答(见图1):

我们选用:

$$\Phi = [A_k \cos k\theta + B_k \cos(k-2)\theta] r^k \quad (1)$$

显然此应力函数满足重调和方程,当无体积力时并可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -(k-1)r^{k-2} [A_k k \cos k\theta + B_k (k-4) \cos(k-2)\theta] \\ \sigma_\theta &= k(k-1)r^{k-2} [A_k \cos k\theta + B_k \cos(k-2)\theta] \\ \tau_{r\theta} &= (k-1)r^{k-2} [A_k k \sin k\theta + B_k (k-2) \sin(k-2)\theta] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

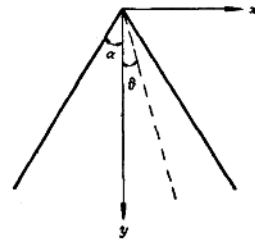


图 1

点的表面变位。

③根据自应力函数，求解接触面上的应力和变位。并将此应力作用在基础的两个 $\frac{1}{4}$ 平面上，再求解接触面上的表面变位。

④根据交面上应力变位連續条件，即可求解待定系数 A_k 和 B_k （見公式(10)）。

(4) 算例：

为了闡明本方法实用的可能性，我們計算了上、下游坡度为1:0.503、坝高为1米、在自重作用下而座落在具有两条断层的刚性基础上的坝体应力分布（见图3）。这个问题要求 $a \sim b$ 和 $c \sim d$ 間无应力，在 $b \sim c$ 間无变位，亦即自应力函数解答在 $b \sim c$ 間的变位、在 $a \sim b$ 和 $c \sim d$ 間的正应力和剪应力，等于无限楔解答相应处的变位、正应力和剪应力。在計算中，第三边混合边界条件中，只考虑正应力和垂直变位，这是只适宜于本算例的适当简化。

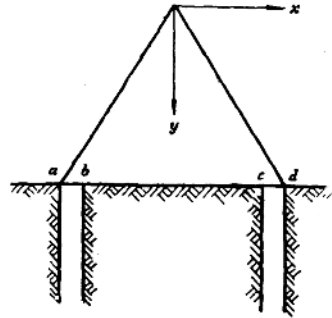


图 3

利用座标变换，不难把(1)中用級数形式表示的应力和位移表式，改用狄氏座标表示，再应用逐点滿足所給混合边界条件，就可定出 A_k 和 B_k 。計算成果見表1。

表 1

X 軸座标 (M)	0.504	0.286	0.189	0.094	0	-0.094	-0.189	-0.286	-0.504	备 注
$\sigma_y, T/M^2$	0	0	1.352	2.667	3.642	2.667	1.352	0	0	$y = 1 M$

假設基础中垂直断层具有承载力，或基础中具有非垂直断层，則考虑这些基础影响的坝体应力分析方法，由于基础变位求解有困难（求解这些变位理論上是可解的，但是实用上还不方便），尚需进一步分析研究。

三、垂直断层破碎带的不同位置和寬度对坝体应力的影响

断层破碎带常常是很难避免的，有些工程中甚至有数以百計的断层破碎带。这就給設計者提出了一些重要的問題：破碎帶寬度的改变，对坝体应力有何影响；破碎帶的不同位置，对坝体应力又有什么变化；坝軸线如何选择等。

为了从应力角度来分析上述問題，我們采用光弹性試驗方法进行了比較多的試驗研究工作。試驗中采用坝高为100米，上、下游边坡为1:0.5，混凝土容重为 $2.4T/m^3$ ，水容重为 $1.0T/m^3$ ，坝体与坝基的弹性模数相同，垂直断层内的弹性模数为0，即假

定断层无承载能力。試驗中未考虑坝体和基础內的渗透水压。試驗研究的組合見表2。

表 2

編 号	断 层 位 置 (米)		断 层 寬 度 (米)
	离坝趾距离	离坝趾距离	
1	5	—	2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25
2	10	—	3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25
3	20	—	3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25
4	—	5	2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25
5	—	10	3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25
6	—	20	3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25

参考夏斯塔⁽⁹⁾和巴拉克⁽¹⁰⁾的試驗研究,我們采用了水压和坝体自重同时加荷的方法,并将自重均布力来代替。

在水压和自重作用下的成果见图4和图5,现将这些成果分析如下:

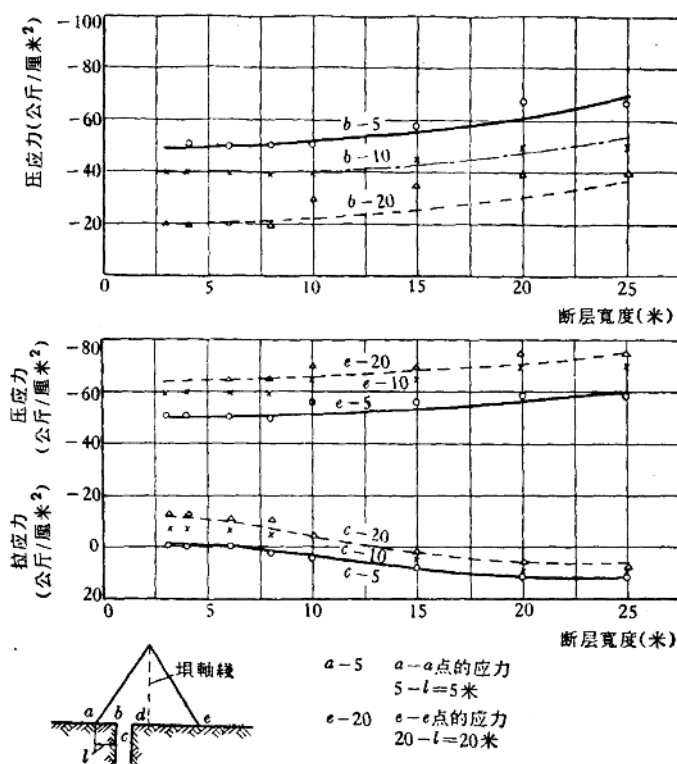


图 4

(1) 当断层破碎带位于坝轴线的前部分时, 断层破碎带的存在对坝踵应力状态没有不利影响, 并略有改善。当断层宽度很小(例如为0.06倍坝底宽以下)时, 断层顶部也未发现拉应力。但是当断层破碎带宽度较大, 例如超过0.06倍坝底宽时, 则在断层顶中部(c点)开始出现拉应力, 如图4所示。

在c点产生拉应力, 是由于c点以上的垂直力所引起的, 而断层愈宽, c点的拉力愈大; 但是断层较小时, c点的拉力亦减小, 甚至不出现拉应力, 这是由于水平力作用的缘故。

(2) 当断层位于坝轴线下游时, 则在b点(断层顶左侧)总是出现拉应力, 其拉应力值随着断层宽度的增加而增加, 并且离坝趾愈近而愈大; 同时在d点(断层顶右侧)和c点(坝趾)产生很大的应力集中, 尤以d点最为严重, 见图5。

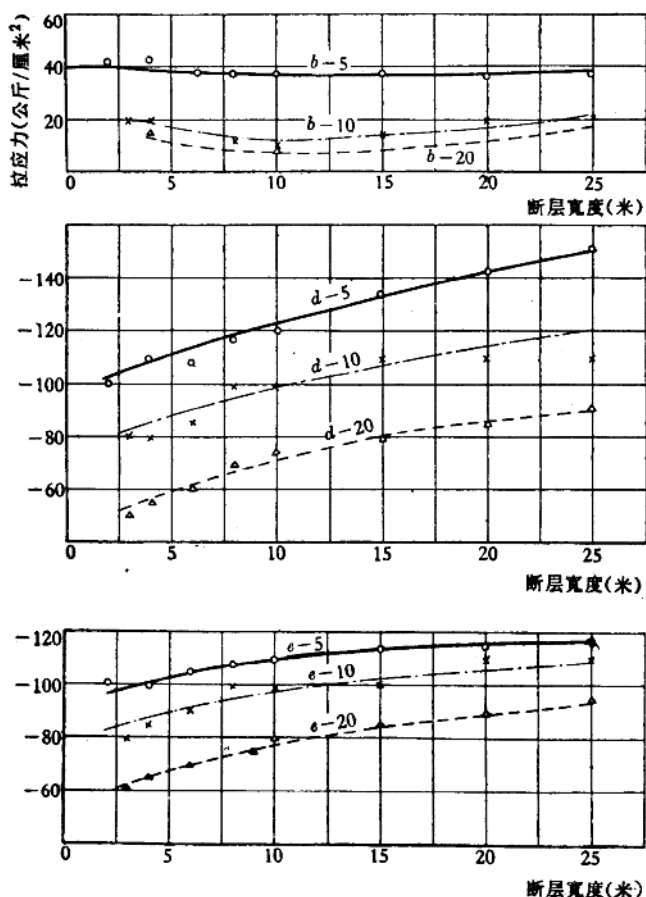


图 5

产生上述拉应力的原因是：由于靠近下游的第二主应力很大，而其方向接近平行下游面，因而此主应力对 b 点总是产生拉应力；而断层愈宽，离坝趾愈近，则此第二主应力愈大，因此拉应力也愈大。 d 点和 c 点的应力集中，是由于断层部分所失去的承载能力，完全传到该二点的结果。由于下游部分的应力远较上游部分为大，因而该处的应力集中，也比上游部分要大。

(3) 根据以上分析，我们可以推断断层位于坝轴线附近的情况。如果断层较小，则可能使断层部分不产生拉应力；如果断层较宽，则可能在断层的中点偏上处产生拉应力。但可以断定，这种拉应力较断层位于下游时为小。

根据以上分析，我们认为：

(1) 在库满时断层破碎带对坝体应力影响很大，但是如果在选择坝轴线时考虑这种影响，可使断层向坝踵靠近；对较小的断层说来，可以不使断层顶部出现拉应力；对较宽的断层破碎带，虽有某些拉应力，但也远较位于坝轴下游方向有利。

(2) 如果断层的宽度较小，例如小于 $0.05B$ (B ——坝底宽度)，而且当断层位于坝轴线的上游部分时，则可以避免较大拉应力的出现，亦即从应力观点分析，这种小断层的存在，不致使坝体应力有较大的恶化。

四、混凝土塞的作用及考虑断层承载能力的影响

混凝土塞作为处理断层破碎带的重要方法，已被广泛采用，但是对混凝土塞的实际作用，还是一个没有完全解决的问题。为了从应力角度阐明这个问题，我们仍用光弹性试验方法进行了研究。试验仍采用前述断面和各种数据。根据上节所得成果，断层位于靠近下游是比较危险的。为了避免这种情况，同时又不使应力过于集中，我们

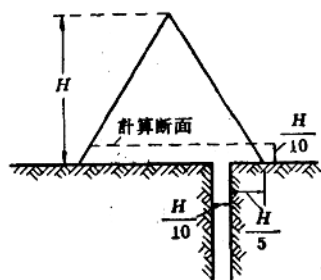


图 6

选用断层破碎带宽度为 $0.1B$ ，即10米。断层离坝趾为20米（图6）。为了研究混凝土塞的作用，我们进行了下列四种情况的试验研究工作，即无断层，混凝土塞深20米，10米以及无混凝土塞。

试验所得的成果见图7a, b, c, d。现将这些成果分析如下：

(1) 由图7a和7d可见，当存在断层时，在断层附近的下游侧 σ_y 急剧增大，几乎较无断层时增加了三分之一；在断层附近的上游侧 σ_y 降低了，形成了较大的应力集中。同时在坝底中部约40米的区域内， σ_2 出现0~3.5公斤/平方厘米的拉应力。由此可见，断层的存在，将使应力恶化。

(2) 由图7a和7b可见，如果混凝土塞的深度达20米（即二倍的断层宽度），则应力将大大好转，使应力集中大大削减，几乎与无断层时的情况相近，而且 σ_2 的拉应

力部分,也完全变为压应力。

(3) 如果混凝土塞子的深度取为10米(1倍断层宽度),则由图7c和7d可见,垂直正应力 σ_y ,虽然略有改善,但并不显著, σ_x 的拉力区域只是略有减小,拉应力值也没有什么变化。

(4) 图7a到7d是最大拉力和最大应力集中。从这些图可见,在d点及c点,由于断层的存在将出现很大的应力集中;在b点无论有塞或无塞总是出现拉应力。塞子的存在和深度的增加,虽对这些点的应力有所改善,但不很显著。

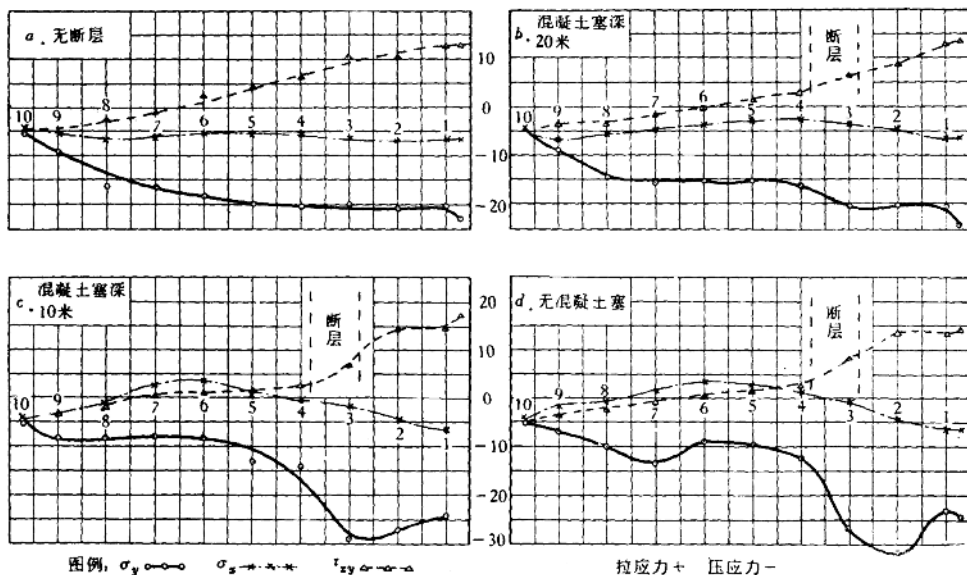
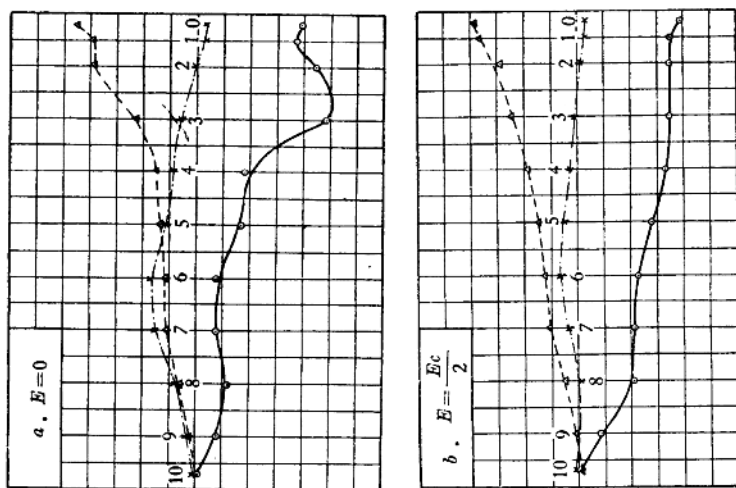


图 7

(5) 由图 8 还可以看出,当存在混凝土塞时,则在混凝土塞附近形成很大的应力集中,亦即使塞子附近的坝基承受很大的应力集中。由此可见,如果断层破碎带两侧的岩石强度较低,则采用混凝土塞处理时是需要对此加以考虑的。

为了研究考虑断层承载能力的影响,我们又对塞深10米的情况(假定断层的弹性模数为基础弹性模数的一半),采用减薄的模拟办法进行了试验。所得成果见图9a和9b。

从所得成果可见,当断层的弹性模数为坝基弹性模数的一半时,断层附近 σ_y 的应力集中现象几乎完全消除,而且在坝底中部出现的水平拉应力 σ_x 也完全消除了。我们再拿图7a无断层情况的应力进行比较可见,当考虑断层承载能力后($E = \frac{E_c}{2}$),其应力情况和无断层时相接近。由此可见,考虑断层承载能力对应力是有利的。这是由于当不



图例: σ_y — 应力+ 应力-
 σ_x — 应力+ 应力-
 τ_{xy} — 应力+ 应力-
 E_c — 坝基弹性模数 E — 断层弹性模数

图 9

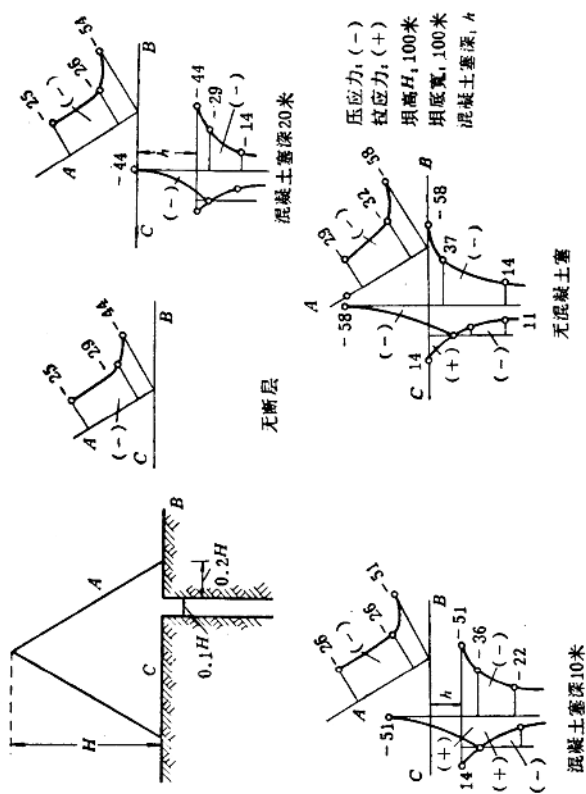


图 8

考虑断层承载能力时,断层部分所失去的承载能力,都传给断层两侧基础,因而形成了很大的应力集中。而当考虑断层承载力后,只是部分地将力传给断层两侧,显然可以减少应力集中。

五、对处理设计原则的探讨

正如第一节中已经指出的,断层破碎带的处理是一项极为复杂的综合措施。在进行处理设计以前,必须对断层破碎带的实际情况,进行全面的、详细的勘测,查明断层破碎带的产状、宽度、影响带的大小、破碎带及两侧岩石的物理力学性能和水文地质条件,为处理设计提供充分的依据。破碎带的处理,主要解决下述两方面的問題:第一方面的問題是提高破碎带的承载能力及坝基的整体性,减小不均匀沉陷和应力集中。第二方面的問題是减小渗透压力,以保证大坝及基础具有足够的稳定性。

最常用的处理手段是混凝土塞,以往在施工上都是与坝体同时进行浇筑的,因此,混凝土塞究竟是坝体的一部分还是基础的一部分是不够明确的。实际上,我们认为混凝土塞应作为基础的一部分。其作用是提高破碎带的承载能力和坝基的整体性。当然需要指出,混凝土塞在基础中的实际作用是比较复杂的。塞上面的坝体刚度、塞下面的破碎带承载能力、以及两侧岩石的弹性模数,对它都有影响。看来混凝土塞在基础中传递应力时,既起“梁”的作用,又起“楔”的作用。

从处理的目的在于加固基础这个概念出发,在施工程序上,就应该先浇混凝土塞,越冬完成塞壁接触灌浆后,再浇坝体。这样,可以把混凝土塞作为基础的一部分来看待。笔者认为,强调上述概念是重要的。因为第一,处理的目性比较明确。既然破碎带降低了基础的承载能力和整体性,那么就應該设法加强基础。第二,破碎带处理必须严格保证施工质量。明确上述概念后,就可能使基础处理达到设计要求后再浇坝体,这就没有“隐患”的顾虑了。第三,可以避免混凝土塞给分缝分块上带来的麻烦。

为保证施工质量,温度控制应从严,应有一定冷却设备和防裂措施,并应预备灌浆设备,保证接触灌浆的质量。破碎带开挖应尽可能清除软弱部分,混凝土塞的边坡也应根据岩石的具体情况来决定,但不宜过陡,以保证两侧岩石的稳定性,并使力量传给两侧坚硬岩石。

混凝土塞的深度,应该根据破碎带的宽度及其承载能力以及两侧坚硬岩石的情况,并参照试验成果,加以综合选定。其确定的原则是:经过处理后,破碎带部分的不均匀沉陷不要太大,以防止坝体应力恶化;同时破碎带两侧的岩石要保持足够稳定。

最后还需要强调,断层破碎带的处理设计是一个综合性的措施。除了加固基础以外,还可以从改善坝体结构来考虑,例如合并坝块或在破碎带上设置沉陷缝等等。同时处理的方法也很多,已在第一节中简要提及。至于选择那一种处理方法,需要根据

具体情况加以选定。同时破碎带处理涉及勘测、设计、施工三方面的问题，只要各方面对此予以足够重视，并进行因地制宜地综合考虑，就完全有可能使处理工作达到既经济又安全的目的。

六、結 語

存在断层破碎带将直接影响混凝土坝体应力和稳定，因此必须进行正确的工程处理。根据上述对应力问题的研究，我们初步得出如下几点关于存在垂直断层坝体应力分布概念的初步看法：

(1) 当破碎带位于坝底中线至坝趾区域内，而且其宽度小于坝底宽度的5%时，断层顶部可以避免出现拉应力（或拉应力较小）。不过也需要指出，当库空时断层顶部会出现一些拉应力，它与坝体上游坡度和断层宽度有关。但是，实际上断层破碎带总是具有一定承载力的，考虑这个影响应力情况会更好一些。因此，对于这种破碎带，从应力观点考虑，即使不作处理，对坝体应力亦无显著影响。但当破碎带位于坝底中线至坝趾区域内时，则将在断层附近出现拉应力和应力集中。这在选择坝轴线和进行处理设计时，需要特别注意。

(2) 当断层具有一定承载能力时，则对坝体应力有较大影响。例如在本文所研究的情况下，当破碎带的弹性模数较坝基弹性模数减少一倍时，则其应力情况与无破碎带时的情况相近似。

(3) 混凝土塞的存在，对坝体应力有一定改善。但当其深度较小时（例如本文第四节所采取的试验断面，当混凝土塞深为断层宽一倍时），对坝体应力的改善并不显著。

(4) 算例表明，本文提供的考虑无承载力垂直断层的坝体平面应力分析方法，在理论和实用上是可行的。它的试验验证和断层有承载力及有倾角断层的坝体应力分析，尚需今后进一步研究。

(5) 破碎带处理是一项复杂的综合措施，必须因地制宜地全面考虑，并应严格控制施工质量。常用的处理方法——混凝土塞，我们认为应作为基础的一部分来看待。

参 考 文 献

- [1] А. Л. Гольдин, С. Г. Шульман, К расчету скального основания, ослабленного трещиной, «Сборник докладов по гидротехнике», Вып. 3, Госэнергоиздат, 1961.
- [2] F. Tölke, Talsperren Ständanne und Staumausrn, 1936, Berlin.
- [3] J. A. H. Bratze, Effect of the relative foundation rigidity on the stresses in gravity dam with application to the Grand Coulee Dam, U. S. Bureau of Reclamation, T. M. 494.

[4] А. П. Синицин, Б. Н. Жемочкин, Практические методы расчета фундаментных далок и плит на упругом основании, Госстройиздат, 1962.

[5] Ф. Ш. Юсупов, Приближенный метод расчета пространственных Сооружений, имеющих плоскость симметрии, «Известия внииг», 1958.

[6] Чжан Сянь-Хун, Влияние зуба на Прочность подо швенного шва, бетонных плотин на скальных основаниях, Научные доклады школы строительства, 1959.

[7] I. K. Silverman, Approximate Stress Function for Triangular wedges, Journal of Appl. Mec., vol. 22, №1, 1955.

[8] M. Hetényi, A Method of Solution for the Elastic Quarter-Plane, Trans. Amer., Journal of Appl. Mec., vol 27, № 2, 1960.

[9] Treatise on Dam, Chapter 9, Gravity Dams.

[10] R. Hiltcher, B. Pant, Stresses in foundations of high dam with particular reference to Bhakra Dam (India), Proc. of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1957, London.

混凝土坝模型破坏試驗及其 安全系数的探討

沈崇剛 陈厚羣

【提 要】在探索混凝土坝結構强度储备的情况方面，目前比較可行的办法就是进行模型破坏試驗。本文闡述了目前有关混凝土坝通过模型破坏試驗以表明結構强度储备情况的几种推算方法，并扼要敘述了試驗方法与适用范围。文內附有近年来在我国以及其他各国进行的混凝土坝結構模型破坏試驗成果。

确定坝体安全性的另一控制因素，是坝体抗滑稳定情况。由于模拟岩基問題至今尚存在不少困难，因此这方面还有待繼續探索研究。本文仅就存在問題及今后探索方向提出初步意見。

一、引 言

对混凝土坝結構安全性的研究，近年来在各国都日見重視，但却难以如其他一般建筑那样进行現場破坏試驗观测。这是因为：这种承受巨大水压力的重要結構，一旦发生破坏，将造成严重后果；而且其体积庞大，难于施加超过其正常情况数倍的荷载，以使其破坏。在混凝土坝的施工过程中，有很多影响坝体結構安全性的因素难以估計，这就使試驗資料的整理发生困难。但是，在国外最初还是进行过少数坝体現場破坏試驗的嘗試。

1945年法国在埃格勒大坝附近岸边一个山凹內修建的一个高3米、寬9米、厚20厘米的拱坝⁽²⁾进行試驗，坝上游面面向山凹，形成閉合水池，并在頂上作混凝土盖，以便能貯存高压水，使作用在坝体的水压能达到23米水头。試驗共进行了2小时，破坏过程共5分钟。試驗表明：由于拱坝修建在U形河谷中，主要由拱承受荷载，梁的作用极不明显。

此后室內模型破坏試驗工作逐渐展开，最早进行的有意大利、葡萄牙，随后日本也有新試驗⁽³⁾。近五年来，我国也进行了这方面的研究工作，初步获得了一些成果。

在我所参加过模型破坏試驗的尚有王宝珍、金学龙、汪成梁、丁宝瑛、居鑣、周乾父等同志。

二、确定混凝土坝结构强度储备情况的几种方法

所谓结构破坏一般是指该项结构已经丧失承载能力而言，而裂缝的出现并不能表示已完全丧失承载能力。根据苏联全苏水工科学研究所的研究成果⁽⁴⁾，认为象混凝土这种材料，往往在荷载很小时已经出现了微细裂缝，但并未丧失其承载能力，有时甚至在出现了用肉眼能直接观察到的较大裂缝后，仍未丧失承载能力。

坝体结构强度储备情况往往以所谓结构“安全系数”来表示，但对结构“安全系数”的概念还存在着不同意见。对于简单的纯拉、纯压构件，“安全系数”通常用公式 $K_0 = \frac{\sigma_R}{\sigma_p}$ 来表示，其中 σ_R 为构件材料的破坏极限强度， σ_p 为设计荷载下最大的应力。一般设计者即通过这一公式来选择混凝土标号。但对于受力情况复杂的结构，特别是象拱坝这类超静定结构，用这个公式来表示其“安全系数”是困难的，因为达到这个“安全系数”下的相应荷载时，结构物由于局部区域的塑性变形而使应力分布情况更趋均匀，以致整个结构仍具有相当承载能力。

目前存在三种较为通行的混凝土坝结构“安全系数”的概念及计算公式：

(1) 1958年葡萄牙土木工程试验室⁽⁵⁾提出一种概念，同时据此作了一些试验。这个概念认为：应当探求在正常荷载下坝体结构实际的强度储备。要作这样的探求，就只有在正常荷载作用下不断降低模型材料的强度，直至模型在此荷载作用下开始破坏。在结构刚遭破坏时的材料强度 σ_0 和原来设计采用的材料强度 σ_R 比较，就给出了所谓结构“安全系数”的定义，即： $K_1 = \frac{\sigma_R}{\sigma_0}$ 。但按这样不断降低模型材料的强度，就要求用一系列强度不同的材料制作模型，逐个加载。这实际上是难以实现的，因而采用了在一个模型上不断同时增加自重及水压的方法，直至破坏。然后根据破坏时模型所承受的荷载，再按相似律推算 σ_0 。

(2) 鉴于混凝土坝的外荷载，可能由于某些原因超过原设计荷载，因而提出了这样一个概念，即不断增加坝体承受的外荷载，直至破坏，将这时的荷载 P_R 和坝体承受的正常荷载 P_0 比较，以 $K_2 = \frac{P_R}{P_0}$ 来表示结构“安全系数”。从外荷增加的性质，还可以区分为下列三类情况：

第一类是坝体自重不变，将加荷用的液体容重逐步增加直到模型破坏⁽⁴⁾，此时安全系数可用下式表示：

$$K_2 = \frac{\rho}{\rho'}$$

式中 ρ 为试验中使模型破坏时所用的加荷液体的容重； ρ' 为正常荷载情况下所应当采用的加荷液体的容重。