

拱坝坝肩岩体稳定分析

GONGBA BAJIAN YANTI WENDING FENXI

王毓泰 周维垣 毛健全 顾 悦



贵州人民出版社

拱坝坝肩岩体稳定分析

王毓泰 周维垣 毛健全 顾 悦

贵州人民出版社

责任编辑 扬 帆
技术设计 夏 晓
封面设计 谢元庆

拱坝坝肩岩体稳定分析

王毓泰 周维垣 毛健全 顾 悦

贵州人民出版社出版

(贵阳市延安中路5号)

贵州新华印刷厂印刷 贵州省新华书店发行

787×1092毫米 16开本 12印张 291千字

印数 1—3000

1982年11月第1版 1983年2月第1次印刷

书号: 15115·145 定价: 1.26元

前 言

拱坝坝肩岩体稳定分析是拱坝设计、施工、运行的首要问题。从国外有关资料得知，拱坝失事绝大多数是由于坝肩岩体失稳所引起的。在工程地质地形条件合适的情况下，拱坝是经济合理、安全可靠并为广大群众所欢迎的坝型。但它是建立在坝肩岩体稳定的基础之上的。因此在拱坝设计中，必须对坝肩岩体进行周密的勘探及详细的稳定分析和计算，在施工中，必须进行认真的基础处理；在运行中，必须经常观测监视。所有这些，近年来都已引起国内外水利、水电领导部门的重视，并在拱坝规范中有所体现。

本书较系统地介绍、总结、概括了国内外近年来关于拱坝坝肩岩体稳定分析和计算的方法，并将我们提出的两次赤平极射投影（即双面投影法）和抗滑稳定的矢量代数方法以及用有限元法研究坝肩岩体稳定分析等写入了书内。

本书主要内容有：拱坝坝肩基岩工程地质条件简述、分析拱坝坝肩岩体稳定的赤平投影法、数学解析法电算程序、有限元法以及改善拱坝坝肩岩体稳定性的技术措施。

本书第一章、第二章由毛健全编写，第三章由王毓泰、顾悦编写，第四章由顾悦编写，第五章由周维垣编写，第六、七章由王毓泰编写。本书有些内容是直接引用国内外专家学者的研究成果，特此申明并表示感谢。

由于我们水平不高，书中不当之处敬请批评指正。

编著者

一九八二年五月

目 录

前 言

第一章 拱坝坝肩基岩的工程地质条件简述	(1)
第一节 概 述.....	(1)
第二节 岩体结构面的成因类型及主要特征.....	(2)
一、原生结构面.....	(2)
二、构造结构面.....	(3)
三、次生结构面.....	(4)
第三节 构造结构面的组合特征及岩体结构.....	(6)
一、断裂组合型式的划分.....	(6)
二、岩体结构.....	(7)
第四节 坝肩岩体滑移边界条件及河谷地质结构.....	(8)
第二章 拱坝坝肩岩体抗滑稳定分析的赤平极射投影方法	(18)
第一节 概 述.....	(18)
第二节 在分析拱坝坝肩岩体稳定中常用的赤平投影方法.....	(18)
一、赤平极射投影原理简介.....	(18)
二、投影网.....	(21)
三、几种基本的赤平投影作图方法.....	(22)
第三节 用赤平极射投影方法确定坝肩滑移体的形态与规模.....	(25)
第四节 求各外力合力的赤平投影方法.....	(28)
第五节 摩擦锥的概念及其赤平投影作图方法.....	(30)
一、摩擦锥的概念.....	(30)
二、摩擦锥的作图方法.....	(32)
第六节 三维空间岩体稳定分区及求抗滑稳定系数的赤平投影方法.....	(34)
一、三维空间岩体稳定分区的概念.....	(34)
二、岩体稳定分区的空间全赤平投影法.....	(36)
三、岩体稳定分区的两次赤平投影法(即双面投影法).....	(37)
第三章 拱坝坝肩岩体抗滑稳定分析的解析法	(45)
第一节 概 述.....	(45)
第二节 平面稳定分析.....	(45)

一、坝肩稳定岩体线·····	(46)
二、U型河谷的平面稳定分析·····	(47)
三、V型或梯型河谷的平面稳定分析·····	(48)
四、沿坝肩基岩表面的平面稳定分析·····	(52)
五、沿折线滑移的平面稳定分析·····	(53)
六、绕坝一端作旋转的平面稳定分析·····	(55)
七、平面稳定分析的若干问题·····	(55)
第三节 空间稳定分析的刚性块体法·····	(58)
一、沿单一面滑移的情况·····	(59)
二、沿两个面滑移的情况·····	(61)
三、在坝肩岩体中有倾斜的侧向结构面和水平的底部结构面的情况·····	(62)
四、在坝肩岩体中有倾斜的侧向及底部结构面但二者的走向相平行的情况·····	(64)
五、在坝肩岩体中有成组的结构面的情况·····	(65)
六、坝肩山头单薄有可能被切穿的情况·····	(65)
第四节 空间稳定分析的矢量代数法·····	(66)
一、合力的计算·····	(66)
二、滑移类型的确定·····	(69)
三、稳定分析中安全系数的计算·····	(73)
四、计算实例·····	(86)
五、滑移四面体体积及滑移面面积的计算方法·····	(92)
第五节 空间稳定分析的分段法·等 K_c 值法·····	(97)
一、分段法·····	(97)
二、在坝肩岩体中有底部水平结构面及两个铅直结构面呈折面滑移的空间 稳定分析·····	(98)
三、在坝肩岩体中有三个任意结构面呈折面滑移的空间稳定分析·····	(101)
四、在坝肩岩体中有多于三个任意结构面呈折面滑移的空间稳定分析·····	(101)
五、沿坝基深层滑移的空间稳定分析·····	(103)
第六节 坝体与基岩空间稳定分析的整体法·····	(105)
一、平行滑移的整体稳定分析·····	(105)
二、水平旋转的整体稳定分析·····	(106)
三、上部绕下部旋转的整体稳定分析·····	(106)
四、分段平行滑移的整体稳定分析·····	(106)
第七节 边墩的稳定分析·····	(109)
一、底面为水平的重力墩稳定分析·····	(110)
二、底面为倾斜的重力墩稳定分析·····	(110)
第八节 坝肩基岩空间稳定分析的渗透压力的计算问题·····	(111)

第四章 拱坝坝肩抗滑稳定分析数解法的 ALGOL 程序·····	(113)
----------------------------------	-------

第一节	计算安全系数的ALGOL程序	(113)
一、	数学方法	(113)
二、	计算步骤	(113)
三、	主要标识符	(113)
四、	输入与输出	(115)
五、	开关使用说明	(115)
六、	ALGOL程序	(115)
第二节	计算滑移四面体体积及结构面面积的 ALGOL 程序	(120)
一、	数学方法	(120)
二、	计算步骤	(120)
三、	主要标识符	(120)
四、	输入与输出	(121)
五、	ALGOL程序	(122)
第五章	用有限元方法分析基岩稳定	(124)
第一节	概 述	(124)
第二节	有限元方法的基本原理与步骤	(126)
一、	单元分析	(127)
二、	结点荷载	(132)
三、	结点平衡方程及整体刚度矩阵	(135)
四、	有限元方法的基本步骤	(136)
第三节	用平面弹性有限元法分析基岩稳定	(136)
一、	基本原理及步骤	(137)
二、	岩体的线弹性力学模型	(137)
三、	稳定安全系数的计算	(139)
四、	平面弹性分析稳定应用中的问题	(144)
第四节	非线性有限元分析法	(145)
一、	初应力法	(146)
二、	变刚度法	(147)
三、	增量综合法	(147)
四、	岩体材料的非线性应力应变关系及模型	(149)
五、	块体模型有限元计算	(163)
六、	稳定安全系数计算	(165)
第五节	关于有限元方法的探讨	(167)
一、	破坏机理问题	(167)
二、	有关安全系数的问题	(170)
三、	选用计算方法的问题	(171)
四、	关于计算程序	(171)

五、关于计算荷载问题	(171)
六、非线性有限元分析的问题	(172)
第六章 改善拱坝坝肩岩体稳定性的技术措施	(173)
第一节 进行基础处理	(173)
一、坝基开挖处理	(173)
二、坝基灌浆处理	(173)
三、坝基排水	(174)
四、断层软弱带的处理	(174)
第二节 局部加大拱端厚度, 采用推力墩或人工扩大基础	(174)
第三节 深开挖	(175)
第四节 改变拱坝的平面布置	(175)
第七章 坝肩岩体稳定的安全系数	(176)
第一节 概 述	(176)
第二节 作用于滑移体的荷载及力系	(177)
一、滑移体自重	(177)
二、坝体传给滑移体的推力及剪力	(177)
三、渗透压力及排水设备	(177)
四、地震力及地应力	(179)
第三节 坝肩岩体稳定分析方法评价	(179)
第四节 抗滑稳定安全系数	(180)
参考文献	(181)

第一章 拱坝坝肩基岩的工程地质条件简述

第一节 概 述

解放以来,在全国,特别是在山区峡谷中,修建了许多混凝土或浆砌石大中小型拱坝。在合适的地形地质条件下,拱坝具有工程量小、劳动力少、施工速度快、安全度高等优点。在劳动力多且能采取料石的地方,拱坝又是就地取材及节约水泥、钢材的坝型。然而拱坝对地形地质条件的要求较其它任何坝型都高,故在拱坝设计中必须注意基岩的抗滑稳定问题。这是拱坝设计的首要问题。拱坝结构的优越性是在基岩稳固的基础上体现出来的。

法国马尔巴塞拱坝(双曲拱坝,坝高66米,拱顶中心角 135° ,底厚6.91米,顶厚1.5米,库容5千万立方米)于1954年建成,1959年12月破坏,死亡421人。失事的主要原因是:左岸上部基础为页岩,没有处理好,蓄水后水渗入裂隙,产生扬压力;左岸重力墩的页岩基础受水浸蚀和风化后,强度降低,摩擦系数减小,致使重力墩位移208厘米,从而招致拱坝破坏。这是世界上第一个拱坝破坏事故。在拱坝设计时,首先应对岸坡的地形地质条件进行充分的勘探和分析,并对坝肩岩体的稳定问题的性质及可能的滑移方式有一个明确的概念。正如朗德(P·Londe)所指出:“拱坝坝肩岩体稳定问题是工程界所面临的最困难的问题”。自马尔巴塞拱坝左岸遭受破坏以后,许多国家的拱坝规范都规定:必须进行稳定核算。由此看来,拱坝结构的优越性是建立在基岩稳定(包括抗滑和承载力)的条件之上的。只要基岩稳定,拱坝一般是不会从上部各层或坝底基础上滑动的。

意大利瓦依昂双曲薄拱坝(高261.6米,顶厚3.4米,底厚22.1米,库容1.7亿立方米)于1960年9月建成。河谷两岸节理裂隙很发育。1957年开挖坝基时,发现两岸坡不够稳定,为此在两岸坝肩内布置了大量预应力深孔锚杆。1960年2月水库开始缓慢蓄水,坝区上游左岸约2平方公里的范围内有裂隙和位移现象。1963年10月9日晚(当时水库蓄水高225.4米),库内左岸滑坡体突然下塌,体积达3亿立方米。滑坡体以每秒28米的速度下滑,激起了巨大的水浪,高150米的洪水溢过坝顶,死3000人,水库库容被淤满而报废。坝体由于施工质量较好,坝肩经过锚固处理,虽然大坝受到巨大涌浪荷载冲击但没有遭到破坏。这个事实说明了保证坝肩具有足够的稳定是非常重要的。

从以上拱坝失事的事例来看,或者是对坝肩的处理不善而丧失抗滑稳定性,或者是对地质工作做得不够而招致滑坡或者失去稳定。总而言之,地质工作、坝基处理和稳定分析是修建拱坝能否成功的关键。

拱坝是一个空间壳体结构,在立面上可以看作是由许多水平拱圈叠成,在横断面上看,它是由许多弯曲或铅直的悬臂梁组成。当承受水压力等外荷载时,借助于水平拱圈的作用,将大部分外荷载传授给两岸,少部分荷载靠悬臂梁作用传递给地基。由于拱是推力结构,内部主要是压应力,而且应力可以设计得很大,混凝土等材料的性能得到最充分的发挥。由于拱坝将大部分荷载传给两岸,因此对地形、地质条件的要求,较其它任何坝型都高。理想的

地质条件是两岸岩石完整、均匀、坚固、透水性小，耐风化、上下游岸坡稳定，无较大的断层，尤其是顺河断层通过，在坝肩下游无影响坝肩岩体稳定的横向临空面的地形（冲沟、河流急转弯，或岸坡突出地段），或其它地质现象（如密集的张性断裂带、潜伏溶洞等）的发育。这样的地质条件在自然界是罕见的，是一种纯理想的条件。

在地形条件适宜的情况下，影响坝肩岩体抗滑稳定的地质因素是多方面的，主要有：

岩体中软弱岩层、大型构造破碎带、风化带等，它们在整体抗剪强度及变形模量上不能满足要求；

岩体中软弱结构面的存在。它们的抗剪强度低，在一定的组合形式下与地形条件相配合，对稳定尤为不利；

地下水对坝肩岩体的不良作用。如渗透变形、渗透压力以及对软弱岩层及构造破碎带的软化；

其它作用的影响。如地震、地应力、滑坡、风化作用和工程开挖中的卸荷作用等。

由此可见，岩体的强度和结构特征以及工程荷载的作用是控制坝肩岩体稳定和滑移的基本条件。

这里所指的岩体是由各种地质结构面所切割的不同形态、不同大小岩块的综合体。它是由结构面、结构体这两个基本单元组成的。

结构面是指在地质发展中，在岩体内形成具有一定方向、一定规模、一定形态和特征的面、缝、层、带状的地质界面。

岩体稳定问题实质上就是探讨在工程荷载作用下，岩体变形、破坏的规律，即力与介质对立统一的规律。

影响岩体稳定的因素很多，有地质因素，也有工程荷载的问题。在工程实践中人们可以清楚地看到：完整坚硬的岩体，一般处于稳定状态；有的岩体易于变形，只要外界稍有变化，就会失去平衡状态；有的岩体在一定时间内是稳定的，而随着时间的持续，逐渐向不稳定方向转化；也有的岩体在这类工程力作用下是稳定的，而在另一类工程力作用下就趋于失稳等。因此岩体稳定的问题也就是结构体与工程力之间的配合问题。

就影响拱坝坝肩岩体稳定的地质因素而论，各种破裂结构面，尤其是各种软弱结构面在工程力的作用下压密、位移，或局部岩块在应力集中条件下遭到破坏是影响岩体稳定的主要地质因素。在岩体中那些力学强度较低、压缩性较高的一些结构面及夹层就是软弱结构面。

第二节 岩体结构面的成因类型及主要特征

岩体中成因不同的结构面各具特征，对岩体稳定的影响也就有一定的差异。按地质成因，可以分为原生结构面、构造结构面和次生结构面。

一、原生结构面

包括所有在成岩阶段形成的结构面。其特征与岩体成因紧密相关，可分为：

(一) 沉积结构面 是指在沉积建造中, 沉积和成岩过程中所形成的物质分界面。它包括层面、层理, 不整合面、假整合面, 原生软弱夹层等。其主要特征有: 一般呈成层状分布, 延续性较好, 产状与岩层产状一致; 一般层面结合良好, 普遍平整, 紧密接触, 如不受后期构造、风化影响, 接触面较为完整; 沉积间断面往往起伏不平, 是一个形态多变的软弱结构面; 层间软弱夹层易受后期构造运动和地下水的作用而恶化。

(二) 火成结构面 是指岩浆侵入、喷溢、冷凝过程中所形成的结构面。它包括火成岩与围岩的接触界面、软弱的蚀变带、挤压破碎带, 岩浆岩中冷凝的原生节理, 岩浆间歇性喷、溢所形成的软弱结构面等。其主要特征有: 产状受岩体与围岩接触面控制。由于岩浆侵入时成分、温度等条件及围岩性质的差异, 接触面的情况很不一致, 其产状、形态、规模以及特性均受侵入岩与围岩性质所控制, 所以情况较为复杂。因此对岩浆岩体与围岩的接触变质带要深入研究; 火山熔岩间古风化壳夹层, 往往强度较低, 构成软弱结构面; 原生节理延续性不强, 往往密集, 且有一部分为平缓产状, 对稳定不利。

(三) 变质结构面 变质作用包括区域变质、接触变质、动力变质等, 这里主要指的是在区域变质作用中所形成的结构面, 如片理、片麻理、板理、劈理等。其主要特征有: 在浅、中、深变质带中, 由于变质程度不同, 变质结构面的性质甚为不同, 需深入研究; 变质结构面由于片理面是矿物定向排列, 如滑石、绢云母、绿泥石等富集带, 往往是岩体中的薄弱部位, 在地下水的作用下易泥化, 对工程影响很大。

二、构造结构面

是指地壳的构造运动所形成的结构面。它是在构造应力的作用下, 岩体中广泛产生的、规模不同、性质不同的破裂面, 包括断层、层间滑动面、节理、劈理等。

(一) 断层。是指断裂两侧的岩石沿断裂面发生了较大位移的破裂结构面。

断层按其运动类型可分为正断层、逆断层、平移断层等; 按其力学性质可以分为压性断层、张性断层、扭性断层、压扭性断层和张扭性断层。

压性断层是指凡成因上与压应力作用有关, 走向上与压应力垂直, 表现出挤压特征的断层。

张性断层是指凡成因上与拉应力作用有关, 走向上与拉应力垂直, 表现出张性特征的断层。

扭性断层是在扭(剪)应力的作用下形成的断层, 表现出剪切的特征的断层。

压扭性断层是在压应力与剪应力同时作用下形成的, 既具有挤压的特征, 又具有剪切的特征。

张扭性断层是在张应力与剪应力同时作用下形成的, 既具有拉张的特征, 又具有剪切的特征。

断层的运动类型分类与力学性质分类是一致的。在绝大多数情况下, 逆断层是压性断层; 正断层是张性断层; 平移断层是扭性断层; 斜冲断层是压扭性断层; 斜落断层是张扭性断层。

一般来说张性、扭性、张扭性断层倾角较陡, 往往构成坝肩岩体的切割面; 压性、压扭

性断层除高角度的断层仍可构成切割面外，还有相当一部分缓倾角的压性和压扭性断层，往往形成滑移控制面。

压性、压扭性断层的构造岩以断层泥、糜棱岩、片理化为主，且呈带状分布，在地下水的的作用下往往成为软弱结构面。

扭性断层以糜棱岩为主，一般胶结较牢，有一定的强度。

张性、张扭性断层以角砾岩为主，一部分已胶结的角砾岩，工程地质特性较好；未胶结的或其中有软弱夹层的，则工程地质性质较差。

(二) 节理。是指断裂两侧的岩石沿断裂面没有发生明显位移或仅有微量位移的破裂结构面，按其形成的力学机制，可以分为张节理和剪节理。

张节理是由于张性破裂面所产生，其两侧相对位移垂直于破裂面，剪切分量为零。因此张节理面应该是张开的，多数情况下已为各种矿物所充填，如石英脉或方解石脉。一般矿物纤维垂直于节理面生长。

张节理的表面常粗糙不平，在砾岩中出现绕过砾石而偏转的现象。

张节理一般倾角较陡，往往构成坝肩岩体的切割面，当节理面有泥质薄膜或粘土充填时，则力学强度较低。

剪节理为剪切破裂所产生，平行破裂面发生一定量的相对位移。剪节理面多紧闭、平直，面上有时可见擦痕。

剪节理一般延伸较远，方向稳定，常形成共轭的X型节理。依共轭X节理产出的部位可分为平面X节理和侧面X节理，它们可以构成坝肩岩体的边界条件：当其倾角平缓时可以构成滑移控制面；倾角陡立时组成横向与纵向切割面。

当剪节理面为摩擦镜面并附有泥质薄膜如高岭石、绿泥石、石墨等矿物组成的薄膜或粘土充填时，力学强度较低。

(三) 层间滑动面。层面是一种原生的沉积结构面。在构造运动的进程中，往往沿层面尤其是层间软弱夹层产生层间滑动，形成层间滑动面和层间滑动断层，从而改变了原来夹层的原生结构。在后期地下水的作用下，存在机械潜蚀和泥化的趋势，对坝肩岩体稳定的影响是很不利的。

层间滑动面和层间滑动断层往往具有压性破裂结构面的性质。它们一般顺层发育，也有局部切层的现象。

(四) 劈理。按其形态和形成方式，这类构造均较复杂，可以把它看成是岩石在构造变形与一定程度变质作用的联合作用下所形成的相当密集的破裂面。沿着它可以把岩石劈成许多薄片。它影响着局部地段岩体的完整性和强度。

三、次生结构面

次生结构面是指在地表条件下，由于外营力，如风化、地下水、卸荷、人工爆破等的作用在岩体中产生的结构面。包括风化裂隙、卸荷裂隙以及爆破裂隙等。它们的发育往往受原生或构造结构面的控制，或在上述结构面的基础上发育起来的。

(一) 卸荷裂隙。是在地表特别是深切河谷，由于构造应力释放和调整，进一步受到上

覆岩体的重力作用、风化作用和斜坡物理地质作用所产生的剪张裂隙和小量位移，或由于其它外营力作用而产生的。

卸荷裂隙的产状主要与临空面有关，多为曲折的、不连续状态，延续性和延深性不强，其发育深度各地不一，随岩体的初始应力状态、岩体的结构及强度特性而定。在块状、脆性的砂岩中卸荷裂隙最常见。

卸荷裂隙属次生的张性破裂面，粗糙不平，常张开，充填物包括气、水、泥质碎屑。卸荷裂隙由于普遍发育在河谷地带，故对坝肩岩体稳定有很大影响。陡倾的卸荷裂隙常构成纵向切割面，缓倾的可构成滑移控制面。

(二) 风化裂隙。一般沿原生夹层或原有结构面发育，在地表形成不同的风化夹层；不同深度的风化沟、槽，以及地下水淋滤沉积所形成的次生夹泥层等，其形态是不规则的，多被泥质碎屑所充填。

可溶性碳酸盐岩，在一定的水文地质条件下，往往被溶蚀形成各种地表及地下岩溶洞穴、沟、槽，成为碳酸盐岩地区主要的工程地质问题。

岩体中各种不同成因的结构面可归纳为表1-1。

表1-1 各种成因的结构面分类简表

大 类	小 类	举 例
原生结构面	沉积结构面 火成结构面 变质结构面	层面、层理、不整合面、假整合面、原生软弱夹层 原生节理、火成岩与围岩接触界面、软弱蚀变带 片理、片麻理、板理
构造结构面	断 层 节 理 劈 理 层间滑动面	逆断层、正断层、平移断层、斜冲断层、斜落断层 张节理、剪节理 破劈理、流劈理、滑劈理、折劈理 层间滑动面、层间滑动断层
次生结构面	卸 荷 作 用 风 化 作 用	卸荷裂隙 风化裂隙、溶洞、溶沟、溶槽、溶隙

虽然岩体结构面的成因类型繁多，性质特征也很复杂，但从工程地质的观点来看，这些结构面中有以下几点值得注意：

1. 力学强度低、平缓的、延续性的软弱结构面对岩体的稳定影响最大，往往构成滑移控制面。

2. 水、风化和其它营力常易沿着各种破裂结构面积极活动，并不断以物理的或化学的作用改变这些面的性质，因而当某一结构面所处的地貌、水文地质部位有利于水及其它营力沿之积极活动时，这一结构面就将成为岩体中强度变化最剧烈的部位。控制岩体稳定的正是这类结构面。

3. 岩体是否滑移除受缓倾的滑移面控制外，还涉及到其它边界条件的配合。这包括纵向及横向切割面以及临空面，并由于它们的切割而形成可能的滑移体及滑移的自由空间。

第三节 构造结构面的组合特征及岩体结构

在层状岩体中原生结构面是层面，在块状岩体中原生结构面主要是岩浆岩体中的流层、流线。这些是较易识别的被称为所谓透入性构造 (Penetrative)，即这种构造均匀而连续地分布于地质体中，它反映了这一部分岩体作为一个整体均匀地发生了变形。各种构造结构面只作为分隔面个别地存在于地质体中，称为非透入性构造或叫分隔性 (Discrete) 构造，它较透入性构造复杂，然而运用地质力学的分析方法，则可以找到同一构造体系中同一序次的构造结构面发育及组合的规律。

应当指出，层状岩体中构造结构面发育规律及组合型式主要取决于构造应力场的强度、岩性、边界条件，同时也与岩层倾角的陡缓变化有关。在同一地区，当遭受到不止一次构造运动时，断裂组合型式就复杂得多；同一次构造运动，由于构造序次不同、边界条件及岩性不同，断裂的组合型式也是有差别的。就一般情况而论，断裂有如下几种组合型式。

一、断裂组合型式的划分

在层状岩体中，岩层的产状在一定程度上反映了构造应力作用的强弱，在不同产状的区域，断裂的组合型式是不同的。

(一) 近水平岩层区

即岩层倾角在 10° 左右的岩层分布区。构造应力作用较弱，在这样的地区，基本上是高角度断裂，并且以节理裂隙为主，断层较少，且规模较小。平面X节理发育，一般无压性、压扭性断层，在平面上构造网络为X型剪切断裂，可称为网格型。

(二) 倾斜岩层区

即缓倾至一般倾斜岩层分布区，岩层倾角在 10° 至 40° 之间。在这种产状的岩体中，构造网络就逐渐复杂，构造应力作用较强，既有平面X扭性断裂亦能出现横张性断裂；在与最大主压应力近于垂直的方向上还出现压性断层。在平面上构造网络为“米”字型，即压性断裂与横张断裂近于直交，与扭性断裂斜交。

(三) 陡倾倒转岩层区

构造应力作用进一步增强，岩层受水平挤压显著变位，岩层倾角在 40° 至 60° 以上；压性、压扭性、张性，张扭性及扭性各种断层、节理均较发育；断裂组合与交切关系亦较复杂。在平面上构造网络显示“州”字型，即横张断裂和扭性断裂走向上交角较小与压性断裂近于垂直。

(四) 陡立岩层区

构造应力作用最强，岩层倾角大于 60° ；压性、压扭性、张性、张扭性、扭性断裂构造发育；构造网络复杂，往往发育低角度、迭瓦状压性断层，扭性断裂与横张断裂走向近于平行与迭瓦状压性断裂直交。断裂组合型式为“井”字型。

(五) 褶皱轴部地区

在线性褶皱背斜轴部及邻近地区不但容易出现压性断层与纵张断层，而且还会出现次一级的共轭X节理，它们彼此交切形成较复杂的断裂系统。

在向斜轴部及邻近地区，在变形过程中则处于围压状态下，其断裂没有背斜区发育。

表1-2为在层状岩体中，不同倾角岩层区断裂组合型式表。

表1-2 不同倾角岩层区同一构造体系第一序次断裂组合型式

特 征 岩层分区	岩层的平均 倾 角	断 裂 发 育 特 征	扭性断裂产状		构造应 力场相 对强度	断裂组合 型 式
			走向夹角	倾 角		
近水平岩层区	$\alpha < 10^\circ$	高角度X型扭性断裂较发育，往往一组发育，另一组不发育。压性、张性断裂很少	$60^\circ \sim 90^\circ$	90°	弱	网格型
倾斜岩层区	$10^\circ \sim 40^\circ$	压、张、扭断裂均较发育；横张性断裂与压性断裂直交，扭性断裂与压性断裂斜交	$40^\circ \sim 60^\circ$	$70^\circ \sim 90^\circ$	强	米字型
陡倾岩层区	$40^\circ \sim 60^\circ$	压、张、扭断裂均发育；横张断裂与扭性断裂走向上交角甚小，与压性断裂近于直交	$30^\circ \sim 40^\circ$	$60^\circ \sim 70^\circ$	较强	州字型
陡立岩层区	$\alpha > 60^\circ$	压性断裂最发育，在剖面上组成迭瓦状断裂，横张断裂与扭性断裂走向上平行	$0^\circ \sim 30^\circ$	$45^\circ \sim 60^\circ$	最强	井字型

在块状岩体中断裂发育特征、组合型式与层状岩体中的近水平岩层区相似，不同的是块状岩体中存在原生节理。块状岩体断裂组合型式有网格型、米字型，在少数情况下为井字型。

二、岩体结构

岩体被各种类型的地质结构面切割成不同形状和大小的块体，称为结构体或岩块。在层状岩体中，结构面是层面及各种构造和次生结构面；在块状岩体中结构面则为原生节理及各种构造和次生结构面。由于断裂有一定组合规律，原生结构面为透入性构造，有一定分布规律。次生结构面发育深度有限，又往往受原生及构造结构面控制，因此，有一定的断裂组合型式就有一定的岩体结构类型。而研究岩体结构的目的在于确定岩体中滑移体的边界条件。

就块体的形态而言，大都为有菱角的多面体，如立方体、长方体、柱体、梯形体、菱形体、楔形体、锥体以及其它多角形块体，但最简单、最基本的是四面体。总之岩块的形状是有规律可循的，因为它是受到岩层产状与断裂组合型式所控制的。

块体的形态及其所处的方位不同，不仅影响块体的稳定，而且控制了块体的运动方式和机制。此外块体间的相互组合对稳定也有一定的关系，表1-3所列的就是层状、块状岩体中各种结构体的形态。尽管断裂组合型式不同，但许多结构体形态大体是相近的，区别在于结构面的成因不同，其特性则不一；其次在于结构体的大小和空间展布状态不同。

表1-3

断裂组合型式与岩体结构关系

岩 类	结构面	构造变形 强 度	结 构 面 组 合 型 式	结 构 体 形 态	组合成结构体的结构面成因类型
层 状 岩 体	构 造 结 构 面	缓倾岩层区	网 格 型	长方（柱、块）体	层面与高角度的X型扭裂
			入 字 型	三棱柱（楔形）体	层面与入字型断裂
		陡倾岩层区	歹 字 型	似楔（梯）形体	层面、压性断裂与入字型断裂
			米 字 型		层面、压性断裂与张性断裂
			陡立岩层区	角 锥 体	扭性、层面与反倾压性断裂
					棱形（柱）体
		州 字 型		相交的扭性断裂与层面	
				方（柱、块）体	张性断裂、层面与逆掩断层
				三 棱 柱 体	对倾扭性断层与逆断层、层面
				四 面 体	张性、扭性断裂与层面、逆断层、逆掩断层
		倒转缓倾 岩层区	井 字 型 或 梯 型	棱 柱 体	张性、扭性断裂与反倾向冲断层、层面
				立 方 体	张性、扭性断裂与层面、压性断裂
块 状 岩 体	原 生 结 构 面		网 格 型	立 方 体	侵入岩原生节理
				多角柱体	喷出岩原生节理
			米 字 型	方（柱、块）体	扭性断裂与平缓的原生节理
			井 字 型	棱 柱 体	压性断裂、张性断裂、扭性断裂与平缓 的原生节理
				楔 形 体	
				多角柱（块）体	

(据谷德振)

第四节 坝肩岩体滑移边界条件及河谷地质结构

拱坝坝肩岩体的抗滑稳定问题，归纳起来主要取决于以下三方面的因素：坝肩岩体结构；坝肩岩体受力条件；水文地质条件。

坝肩岩体结构控制岩体滑移的基本条件有：

结构面的组合型式。各种结构面都有可能成为滑移控制面，但能否滑移还取决于其它因素；

临空面的存在。岩体有了临空面，才具备块体滑移的自由空间。坝肩岩体的自然边坡面就是纵向临空面，如果坝肩岩体突出或下游还有冲沟、深槽等则构成横向临空面；