

潘家铮 编著

工程地质计算和基础处理

水工建筑物设计丛书 潘家铮 主编

水利电力出版社

THE HYDRAULIC STRUCTURE
DESIGN SERIES
ENGINEERING GEOLOGICAL
COMPUTATION AND
FOUNDATION TREATMENT

水工建筑物设计丛书 潘家铮主编

工程地质计算
和 基础处理

潘家铮 主编著

水利电力出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了水工建筑物对地基的要求和勘查方法；其次讨论了软弱夹层对水工建筑物的抗滑稳定问题；最后叙述了地基内的应力及变位分析和计算、地基的不均匀沉陷的处理、绕坝渗漏的分析和计算，以及防渗排水的设计等。

本书文字流畅，内容通俗，说理清楚，图文并茂，并附有计算实例，可供广大水利水电设计人员参考，也可供有关大专院校师生阅读。

水工建筑物设计丛书 潘家铮主编

工程地质计算和基础处理

潘家铮 编著

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 15.125印张 335千字

1985年4月第一版 1985年4月北京第一次印刷

印数00001—12530册 定价3.70元

书号 15143·5611

序 言

二十多年前笔者曾写过一套《水工结构应力分析丛书》，虽然体例庞杂，取材不精，而且有不少讹误，但在当时尚能满足实际设计同志的需要，所以受到欢迎。直到目前，笔者还经常接到各地读者来信的鼓励，并建议重版。这不仅是对笔者的勉励，更是一种鞭策。但在跨入八十年代的今日，原书内容显然不能满足要求了，所以再重版旧笈是不适宜的。

为了满足许多读者的期望，在有关领导的关心和鼓励下，我们试图以一套新的丛书来替代旧著，这就是即将陆续与读者见面的《水工建筑物设计丛书》。编写这套丛书的目的，仍在弥合教科书、论文文献和实际设计工作间的距离，供广大的水利水电设计同志，特别是基层设计同志在实际工作中参考，还可作为有志进修者的自学材料。在编写时，我拟除力图保持原著一本书一个专题、篇幅精简短小的特点外，还想有所提高。即除了仍以结构的分析计算为中心外，适当论述一点有关设计上的问题，同时尽量反映国内外在近二十年来的成就和进展，力求跟上当前形势的需要。全书以实用为主，但也适当注意理论上的论述和概括，并不写成像手册一样。当然，要做到这些是很困难的。每种水工建筑物都有它的特点和复杂的一面，要详尽地讨论它们的设计问题，不仅是我们水平所不及，而且也断非小小的篇幅所能容纳。所以，本书在选材时力求在篇幅所及的范围内结合分析计算，择要介绍一些主要设计原则。基于同样理由，对理论分析中的许多

详细的推导过程，也不得不割爱，而只列出基本理论、假定和重要的成果和公式。当然，我们也力求写得清晰连贯，使读者不难自行导证，并尽量给出有关的文献名称，使读者在必要时可以找到出处。

要编写这样一套丛书，已非笔者个人的能力和时间所及，因此邀请了有较丰富实践经验的同志来共同撰写，笔者只分担了小部分编写任务并做了力所能及的校阅工作。

根据原丛书的内容，并在征求了一些同志的意见后，本丛书将暂定为以下十种分册：压力钢管、水工隧洞和调压室衬砌、重力坝、拱坝、土石坝、溢洪道、坝内的孔口和廊道、水工建筑物的温度控制、水工建筑物的有限单元分析以及工程地质计算和基础处理。各分册将视撰稿进度陆续出版。

最后，笔者代表所有参加编写的同志，向热情审阅和加工本丛书的同志们表示衷心的感谢。对本丛书的批评和改进意见请寄水利电力出版社转。

潘家铮

1981年

目 录

序 言

第一章	概述	1
第一节	水工建筑物对地基的要求	1
第二节	水工建筑物的地基勘探	5
第二章	地质构造面和空间力系的几何形态分析	8
第一节	地质构造面的解析几何表示	8
第二节	空间矢量的解析几何表示	28
第三节	地质构造面及空间力系的赤平投影表示法	38
第三章	软弱夹层和坝基深层抗滑稳定问题	52
第一节	问题的性质	52
第二节	单滑裂面的分析	68
第三节	复合滑裂面分析	79
第四节	有限单元分析	96
第五节	模型试验	101
第六节	增加抗滑稳定度的措施	110
第四章	坝肩岩体抗滑稳定问题	129
第一节	问题的性质	129
第二节	平面稳定核算	132
第三节	整体稳定核算	141
第四节	赤平投影分析	167
第五节	有限单元分析和模型试验	184
第五章	地基内的应力及变位	193
第一节	均匀地基的计算	193

第二节	空间问题及地应力测试	227
第三节	地基与坝体的联合分析	254
第六章	不均匀地基和地基缺陷的影响及处理	289
第一节	不均匀地基的分析	289
第二节	软弱岩体和均匀地基	303
第三节	构造断裂和软弱破碎带的处理	327
第四节	坝基开挖和固结灌浆	345
第七章	坝下和绕坝渗流分析	353
第一节	水工建筑物的渗流问题	353
第二节	基岩的渗流特性	354
第三节	渗流分析中的一些基本情况与迭加原理	361
第四节	河床段坝体下的渗流	377
第五节	抽排式设计	396
第六节	绕坝渗流	402
第八章	地基中的防渗和排水系统	410
第一节	帷幕灌浆的设计	410
第二节	帷幕灌浆的实践	420
第三节	化学灌浆	432
第四节	特殊防渗措施	439
第五节	基础排水	446
附表		453
参考文献		472

第一章 概 述

第一节 水工建筑物对地基的要求

地基的稳定和安全是保证建筑物安全的先决条件。人类在早期所修建的各种建筑物的规模较小，对地基的要求也较低，多数天然地基都能满足要求，或者只需稍加处理即能满足要求。后来，建筑物的规模日益扩大，对地基的要求也愈高。时至今日，对于高大的建筑物来讲，由于其本身的强度不足而失事的例子已经很少，而由于地基造成失事的相对比例则有所增加，这一情况是容易理解的。

在各种建筑物中，水工建筑物、特别是大型拦河坝对地基的要求更为严格，其原因也是很明显的。第一，大型水工建筑物的规模、所承受的荷载、在地基内产生的应力和变形等都很大。例如，一座300米高的坝，每米长的坝体上承受的静水压力就达45000吨左右，如果坝长500米，总压力将达千万吨的量级，这是其它建筑物中少见的；第二，修建水工建筑物后，将在地基内破坏了原来的水文地质条件，从而恶化地基条件，削弱其强度，而且这个情况是长期存在甚至是日趋不利的。例如，从高坝上游或从高压水道内部渗出的高压水，会不断对地基产生十分有害的物理和化学作用，日积月累，从量变引起质变，最后导致破坏。有些建筑物在修建后安全运行了数年甚或数十年，突然发生事故，很多就由于这一原因。第三，大型水工建筑物在国民经济中承担重要任务，其下游又往往有城镇、农村、和工业交通设施。一旦失

事，不仅将给国民经济造成严重影响，而且会对下游人民的生命财产带来灾难性的后果。国内国外的失事事例说明，甚至一座小坝的失事，也会造成无法弥补的损失。因此，在水利水电工程的设计中，地基的勘测、试验和设计工作极为重要，而且需要认真细致的施工和严密的监测及维修。正确的勘测设计、认真的施工和严格的监测维护，是保证地基及建筑物安全的三个关键。现在，在许多大型水工建筑物设计中，人们对地基问题重要性的认识已经逐渐超过了建筑物本身。有些工程人们花在地基处理上的代价也已达到和建筑物本体造价相近甚或超过的程度。

水工建筑物对地基的第一个要求，就是地基（包括有关的边坡）在所承受的荷载作用下，不会发生整体的滑动失稳，而且应保持必要的安全裕度。例如，在岩基情况下，不能发生建筑物连同一部分地基沿着地基内某些构造软弱面滑动失稳；在土基情况中，不能发生建筑物沿着地基内某一弧形破坏面失稳。其次，在各项荷载作用下，地基各点的应力及变位值要在许可的范围以内，避免产生过大的局部应力集中，和严重的不均匀变位，影响地基和建筑物的安全或影响建筑物的正常运行。当然，严格讲来，上述两个要求是不能分开的。因为任何整体性的破坏失稳都是从局部地区的应力和变形超过许可的限度而开始的。但由于分析和设计上的原因，目前我们还经常把它们作为两个问题来处理。第三，地基在渗透水的长期作用下，要能保持力学上和化学上的稳定，渗漏流量和渗透压力都要控制在容许的范围内。当然，我们还可以列出更多的对地基的要求，但主要的内容应是上述几种，本书基本上也按这个顺序叙述。

众所周知，地基按其组成材料不同，一般可分为硬基

（岩基）和软基（土基）两大类。前者由各类岩石组成，后者由天然的或人工堆筑的土层、砂卵砾石层等组成，这两类地基的性质完全不同，工程设计中所遇到的问题，设计的理论、要求和处理的措施也不相同。但是，两者间也并无绝对的划分标准，例如某些风化破碎严重的基岩或某种岩性特别软弱或沉积胶结条件很差的基岩，既可称为岩石，也可视为土壤。本书以讨论岩基问题为主，并且主要以拦河闸坝的地基为例。当然，书中许多设计原则和分析方法也可用到其它合适的情况中去。

天然的地基总是存在不同程度的缺陷。例如表层岩石常常风化破碎，比较新鲜的基岩中也存在各种的节理和裂隙，特别是由于地质构造作用，还经常存在各种断裂和软弱带，例如断层、破碎带、夹泥层等等。此外，还可能有滑坡，岩溶（在碳酸盐类基岩）等不利条件。河床中也可能存在深厚的覆盖层，其组成从大块石到淤泥都有。所以，天然地基很少可以不经处理直接用作建筑物的基础。在选择建筑物地址时，我们自然应该选择地质条件最有利、同时也能满足其它要求的地方，但一般来说，每个工程总有相当的地基处理工作量，而且，随着优良的坝址的逐渐被开发，今后我们所面临的工程地质问题也必将愈来愈多。

为了保证或提高地基（包括边坡）的整体和局部的稳定性，我们可以挖除不利的部分基岩，施加表层或深层的锚固措施，沿构造面设置抗剪的键槽，或穿过构造面设置抗剪桩，用混凝土置换一部分断层破碎带，增加地面上的压重，或用灌浆方式提高基岩的强度刚度或被动抗力。为了提高地基的承载力和减少不均匀变形，我们可以挖除地表风化破碎部分，对地基进行固结灌浆，对局部松软破碎部分进行开挖

并置换以混凝土，还可以扩大建筑物的基础面积，以减少地基的单位承载力，或设置专门的结构将建筑物的压力传递、扩散到较深的部位。

为了提高地基的抗渗能力，降低不利的渗透压力和过大的漏水量，可以在地基表面做防渗铺盖、在地基内做防渗帷幕或防渗墙，以及设置排水孔和洞。

虽然还有其它一些特殊的处理方法，但是上述开挖、置换、锚固、灌浆排水和设置键槽五大措施，是我们常采用的，如果能够根据具体工程地质情况，针对存在问题的性质，适当地采用上述综合措施，往往能够较好地弥补天然地基地质的缺陷，保证建筑物的安全。本书中将结合分析计算，择要介绍一些实际工程中采取的措施。

最后我们要指出一点：在上面曾多次提到，地基安全度的核算和地基缺陷处理，是设计工作中的重要组成部分。但是，在目前的工程设计中，对建筑物本身的分析设计工作常做得很细致，对地基问题的资料常较少，似乎和其重要程度不相称。出现这种情况，并不完全由于设计人员对地基问题的重要性认识不足，而是由于地基条件及相应问题的复杂性，使之不能如建筑物本身那样可以方便、精确地进行各种分析计算。因之，长期以来，对于十分重要的地基问题，还停留在依靠估算和经验设计的阶段。近年来，由于岩石力学的发展，各种勘探、测试和处理手段的进步，尤其是有限单元法及计算技术的突飞猛进，情况逐步有所改变，设计工作正渐渐由定性估算向定量分析进展。国内外大量有关文献的发表，可以说明这个趋势。但是，这方面的发展还远不能满足需要。地基问题的分析和处理设计在很大程度上仍然依赖于地质师及工程师的经验和判断。在基础处理设计中，实际

工程中的成功经验是很重要的参考资料。而且迄今为止，有关本课题的专门性著作仍较少见。本书所述，仅为这一课题的简要介绍。作者深信，随着我国四个现代化事业的飞速发展，一定会有更多的专著问世，来填补本领域中的空白。

第二节 水工建筑物的地基勘探

为了做出正确的设计，必需对建筑物的地基进行相应的地质勘探，查明主要问题并取得所需资料。当然，勘探工作量要视工程规模、具体条件和设计阶段而定。对于一个大型的水利水电工程来讲，需要的查勘面很广，工作量也很大，常需从浅入深、逐步进行。如果建筑物的尺寸和规模特别巨大，地基情况又很复杂，这就需要布置详尽的勘探网。反之，如地基情况简单有利，工程和建筑物又是小型或次要的，可能只需要进行简单的地表查勘就能满足要求。

本节中所说的地基查勘是指在宏观调查的基础上对某一具体的建筑物进行查勘，也就是属于细部和具体的查勘范畴。这方面的查勘要求一般包括：

1) 对组成地基的岩层、岩性和地质年代的确定，包括对岩层的细分和确定岩石的各项特性数据（容重、强度、变形模量、弹性波速、软化系数等），有时尚须对基岩进行矿物分析等工作。

2) 在宏观的地质构造调查基础上，进一步查明在建筑地区存在的各种构造条件，包括断层、破碎带、剪切带、软弱夹层等的产状、延伸情况、宽度、充填情况和有关参数；节理、裂隙组的发育规律、产状、间距和充填情况等，有时须测定地应力状态。

3) 岩层表面的风化程度、深度、分布情况和覆盖层的性质和深度等, 结合建筑物的规模提出基岩利用线和建议的开挖坡度和深度。

4) 边坡的稳定条件, 查明滑坡、崩塌、倾倒、蠕动等现象。

5) 地下水的分布和活动规律, 包括对承压水、温泉等的调查, 以及对基岩渗透特性的测定, 容许水力坡降的确定等, 进行水质分析。

6) 其它的特殊情况: 如岩溶、地震等问题。

勘测和设计人员应根据工程的规模、设计的阶段、当地条件的复杂程度来确定调查的范围、深度和工作内容, 商定应提供的数据和其他成果以满足设计需要。这里并无一定之规, 一切要根据具体条件而定。

勘探的手段和方法一般包括: 地表踏勘和测绘, 槽探、钻探和洞探以及物探(地震法和电法)等三大类。遥感遥测技术一般适用于大面积的宏观调查。对一个具体建筑物的查勘应采用什么手段, 以及具体的工作量和布置都要由有经验的地质师研究确定。经验较丰富的人员可以选用最合适的一些手段, 并且将工作布置在关键部位, 以便仅花较少的勘探工作即可取得必需的资料, 抓住关键问题, 作出结论。一般来讲, 技术愈较先进, 所需的勘探工作量也相对较少, 而且往往仅需用一种手段即可取得多种资料。例如, 打一个钻孔不仅可揭示风化层的深度、性质, 查明岩性、岩层和巨大断裂, 了解地下水的情况, 而且可以就地测试基岩的各种特性、研究地应力状态, 拍摄和观测孔壁情况做到一孔多用。勘探工作要密切针对设计要求进行, 勘测和设计人员必须紧密配合, 互相了解对方的业务。如果不讲究事前的勘探布

局、制定计划，保证质量，或勘测设计互不通气，就一定事倍功半，甚至得出错误的结论。

图 1-1 中表示各类勘探手段和能查清的问题之间的大致关系。

勘探工作告一段落后，应将成果汇总表示在平面地质图、各种地质剖面及钻孔柱状图中，并提交地质报告，其中应包括各种试验数据和分析成果。作为原始材料的观测记录、岩心等应按规定保存一定时间以供查考。

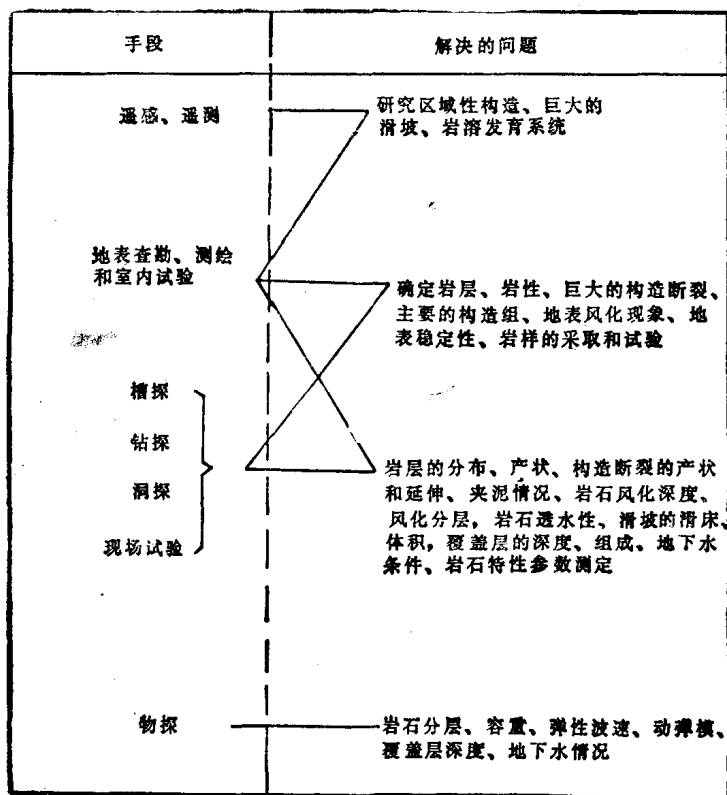


图 1-1

第二章 地质构造面和 空间力系的几何形态分析

第一节 地质构造面的解析几何表示

1. 地质构造面的三要素

为简单计，本书将岩石的节理面、层面、断层、裂隙、夹层、挤压破碎带等等都简称为构造面，虽然有一些面并不是构造原因产生的。地质构造面的几何形态多为平面或接近为平面。有时，在宏观上它们是个曲面，但在局部地区仍可近似用一个平面来表示。

地质构造面在空间的位置可称为其“产状”。构造面的产状常用走向、倾向和倾角来表示，称为产状三要素。走向是指构造面与水平面的交线（称为走向线）的方向，用方位角（从正北线顺时针向量，自 0° 至 360° ）或方向角（从正北或正南线量起，分为四个象限描述）表示，参见图2-1。倾向是指构造面倾斜的方向，即图2-1中直线 od （构造面上最陡下降线，称为倾向线）的指向。倾角是指构造面与水平面所夹的锐角，有时特称为真倾角，即图2-1中的 δ 角。图2-1中的构造面，走向为 30° （或 $N30^\circ E$ ），倾向 SE ，倾角 60° ，常连写为 $N30^\circ E, SE, \angle 60^\circ$ 。

可注意构造面的走向可以有两个值来表示，例如 $N30^\circ E$ 即为 $S30^\circ W$ ，倾向和倾角只能有一种表示法。另外，倾角 δ 的值在 0° 到 90° 间。 $\delta = 0^\circ$ 时为水平面， δ 小于 30° 的面常称为缓倾角面， δ 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 间的为中倾角面，而 δ 大于 60°

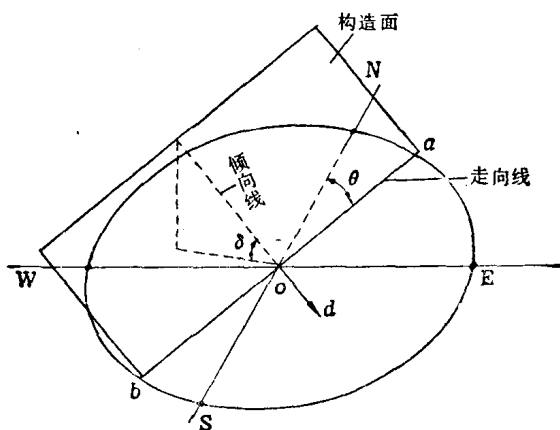


图 2-1

的为陡倾角面， $\delta = 90^\circ$ 的为直立面。

以上是在地质调查中常用的表示方式。但是在进行空间解析几何计算时，我们常常需要一种更严格的规定，而且倾向最好能用倾角的正负号来表达，以利数学处理。为此，本书以后一律采用下述规定：

任何构造面的产状都用其走向及倾角表示。走向以方位角 θ 表达，而且都量到上半平面（北半面），即 θ 的值限在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间及 $270^\circ \sim 360^\circ$ 之间（或 $0 \sim -90^\circ$ 之间）。这样，以 SE、SW 表示的走向，一概转为 NW、NE。至于倾角，其绝对值在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间，并带有正负号，表示倾向。倾向和 δ 符号间的关系，按表 2-1 的规定。

这样，设构造面的产状是走向 $S30^\circ W$ ，倾向 NW，倾角 60° ，先化为走向 $N30^\circ E$ ，倾向 NW，倾角 60° ，最后以 $(+30^\circ, +60^\circ)$ 表示。同理，设构造面走向 $S40^\circ E$ ，倾向 NE，倾角 25° ，可以用 $(-40^\circ, -25^\circ)$ 表示。括弧中的两个值，前者代表走向方位角 θ ，后者代表倾角 δ 。这样的规

表 2-1

倾向和倾角正负号的关系

走 向	正东(E)	北东(NE)	正北(N)	北西(NW)	正西(W)
方位角 θ	90°	$90^\circ > \theta > 0^\circ$	0°	$0^\circ > \theta > -90^\circ$ (或 $270^\circ < \theta < 360^\circ$)	-90° (或 270°)
倾角 δ	+ 表示倾北(N) - 表示倾南(S)	+ 表示倾北西(NW) - 表示倾南东(SE)	+ 表示倾西(W) - 表示倾东(E)	+ 表示倾南西(SW) - 表示倾北东(NE)	+ 表示倾南(S) - 表示倾北(N)

能满足解析几何要求。

每个构造面的产状，并可以在一个圆内用一点来表达。这种表达方法也很多，例如用该平面的“极点”来表示（详本章第三节）。将所有构造面的产状都用极点反映在平面图中，有利于分析其规律，找出占优势的组，以供统计、分析用。

2. 地质构造面产状的测定

对于在地面上或探洞内露头的构造面，可用地质罗盘就地测定。由于构造面不可能是理论上的平面，加上观测误差，测定的值有一定的变动幅度，可取均值供分析计算用，并可考察观测值偏离均值的情况，了解构造面的起伏程度。如果构造面产状变化较大，应当分部位提供其平均产状，或者用曲面来模拟。

有的构造面并不露头，而是从钻孔中揭露的，便需要通过计算确定其产状。从几何学可知，我们至少需要三个钻孔才能确定一个平面。例如，参见图2-2，设我们有三个钻孔，其平面坐标各为 (x_1, y_1) ， (x_2, y_2) 及 (x_3, y_3) 。 y 轴为正北轴。三个孔中，各在高程 z_1 、 z_2 、 z_3 处发现构造面 F ，求