

SEG

系统工程地质 导论

崔政权 著

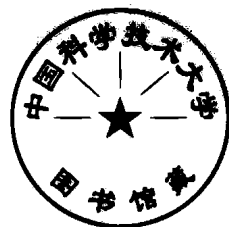
An Introduction
on
Systems Engineering Geology

水利电力出版社

系统工程地质 导论

崔政权 著

Introduction
of
Systems Engineering Geology



水利电力出版社

(京)新登字115号

系统工程地质导论

崔政权 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 29印张 660千字
1992年5月第一版 1992年5月北京第一次印刷

印数 0001—1930册

ISBN 7-120-01437-4/TV·523

定价：30.40元

序

《系统工程地质导论》一书，从分析工程地质向地质工程转化过程中所存在的一系列不协调问题入手，提出了一套系统工程地质的理论与研究方法。它融地质学、工程物探、岩体力学和岩体水力学诸参数为一体，从而推进了工程地质学研究的系统化、模型化和定量化。本书不失为一部具有探索性强、学术思想创新明显、理论与方法先进系统的优秀科学专著。

本书将系统工程原理引入到工程地质研究中来，寻找到地质问题、工程勘察、工程设计和工程施工四者之间的交叉点和结合点，把四者作为一个系统整体问题考虑，揭示了从自然地质环境到工程建筑对自然环境的反作用全过程中的相关联系，从而为工程地质学的发展提供了新的生长点。本书系统地提出了工程地质研究的静态分析、动态分析及静、动态分析相结合的分析方法，建立了针对不同勘测对象的三种状态的分析原理、过程和方法，将工程地质研究更推向于动态分析、目标分析和预测分析的新阶段。

为将地质问题研究模型化，该书划分出地质、水文地质、岩石力学、物性等四大参数，并详细地论述了各参数之间的相互依赖和相互制约的辩证关系，完美地体现出整体性原则和协调性原则的系统科学思想。同时，本书将形变场与渗流场结合起来，将自然形变场与附加形变场结合起来，将自然渗流场与附加渗流场结合起来考虑，并具体应用于边坡稳定和岩体力学分析过程中。作者还提出了岩体水力学的新概念，并建立了岩体水力学研究规范及程序，这为涉及到该领域的问题研究提供了新的理论和新的方法。

本书在系统分析中实现了目标分析、预测分析和优化设计，尤其是二次优化设计：研究并揭示了各类岩体临界应变、初始优化设计结果和动态条件参数三者之间的相互关系，并提出了具体数学模型，在理论和方法方面均有创新。此外，该书在一些基本理论问题上提出了自己的新见解，如关于风化层问题，裂隙发育强度与等价体以及裂隙单元概念等，进而提出了对各种地质界面的处理原则及分类方案，等等。

本书将系统工程原理、概率分析原理和渗流场理论等引入到工程地质勘察中来，使工程地质勘察的各项地质指标参数化、定量化，为提高工程地质勘察的精度和速度创造了条件。

按作者所提出的系统分析程序，工程地质学家将从接受工程任务的一开始就把所有的工作围绕着建立地质数学模型和实现优化设计这一总目标上加以全盘考虑。其结果将是最合适的勘探量提交高质量的成果。作者还解剖了各种典型工程地质问题处理实例，可供同类问题借鉴，具有普遍性指导意义。

作者研究和论述的重点及主要篇幅是围绕作者最为熟悉的水利水电勘察中的系统工程地质问题。作为系统工程地质学，尚应在基本理论、研究范围更加展开，形成系统工程地质学的总体大格局，特别对具有战略意义的区域工程地质研究尚需充实，使之避免造成

“成功的设计，失败的战略”宏观失控的事件发生。

总之，该书理论上自成体系，研究方法独到创新，反映出作者实际工作经验丰富、科学基础雄厚、数学力学基础扎实、知识面广阔、科学思维活跃且系统；反映出作者站到了当代工程地质学发展的前沿。本书是一部具有很高理论价值和应用价值的优秀科学专著。

刘国昌

1991年2月14日

前 言

顾名思义，工程地质学是研究同工程建设有关的地质问题的学科。它的研究对象之广泛、内容之丰富、项目之繁多，在自然学科中还是不多见的。只要泛览一下各工程，尤其是同水利水电工程建设有关的勘察报告，便可看出它们包括从区域（大地）构造环境、地震到各建筑物基础的稳定性评价，从地质学、岩石力学、地下水动力学、地球物理学、水化学到天然建筑材料等等，几乎无所不包。

鉴于此，工程地质学与其说是一门独立的学科，毋宁说是一门综合性很强的科学技术领域。或许是这个缘故，工程地质勘察往往被称为综合工程地质勘察，它的成果称为综合工程地质勘察报告。这样便产生了如何处理“综合”同“工程”两者之间的相互关系问题。

以坝基稳定性评价为例，勘察报告中论述了影响坝基稳定的各个方面，但有时偏重于地质现象的描述，仍嫌不甚切题。似乎以“综合性”代替了“工程性”。而勘察设计的目的是建坝蓄水，所以正确的理解应该是：工程（性）是目的，综合（性）是实施工程（性）的一种手段。

理顺了这一关系之后又产生了第二个问题，那就是所谓工程性同综合性两者之间的结合点问题。比如，勘察成果的主要图件是综合工程地质平面图和各建筑物轴线地质剖面图。当然，这些是必须认真编制的最基本的图件。但另一方面，如果勘察工作仅仅停留在这一阶段，从工程观点看还嫌不足。因为编制上述图件的主要依据是岩石类型、地质构造和水文地质、岩溶洞穴等等能观察到的地质问题和现象，但从工程观点而言，并不是图面上所反映的所有地质现象都具有等同的意义。比如在分布有为数较多的夹层地区，按地质学的观点，所有夹层都要反映在地质图上，但从工程观点考虑，哪些夹层应重点研究，则取决于建筑物的类型及其基础岩体的变形形式、建筑物荷重大小等等。其次，从工程观点看，立足于岩石学的岩石分类并不完全适用，因为成因不同和主要造岩矿物不同的岩类，它们的物理力学性质可能是同一个范畴（量级）。

以上例子说明，要使综合工程地质图变成利于各种数值分析、模型试验以及工程设计的直接依据，尚需进行工程（观点）处理，使工程地质勘察同工程设计紧密结合，这样就有结合点问题。

再举一例。人们称岩石力学（实际上还应包括岩体水力学）是岩土工程的“金钥匙”，那么需要打开的那把“金锁”又是什么？事实是，这把（些）“金锁”我们还不明确或还没有完全找到。比如在稳定性分析问题中，若没有建立一个能代表实际情况的形变渗流场模型（主要是各种边界条件和必要的计算参数），就无法得出符合实际情况的分析结果。这个模型和计算参数就是我们要寻找的那把“金锁”。

可见，一个结合点、一把锁（实际上这把锁也是结合点问题），就是工程地质学和工程

地质勘察不同于普通地质学和普通地质勘察的主要方面,是作者探索新理论新方法的认识基础。

找到了问题的症结并不意味着问题的解决。要解决这个症结还要走漫长而艰难的路程。

其中,作者感到最迫切又最艰难的一件事是知识境界的扩充。不具备广博的知识和活跃的科学思维,结合点的寻找便无从谈起。

著名学者、工程专家潘家铮教授曾在1985年撰文建议从事水利水电工程地质勘察的技术人员“应该有系统地学习水工建筑物的基本设计理论,计算方法,以及地基缺陷的影响,各种处理的措施,各种成功和失败的经验”;“最好补习一些数学、力学、水力学、岩土力学、岩石试验、有限元分析和计算机应用等方面的基础课。学习这些东西并不困难,更不神秘,只要有决心和信心,是完全能够学进去的”。此后,我国有些院校相继开办的“水工—地质”班就是开阔地质人员知识境界的具体措施之一。作者30多年的勘察实践也证明,要使工程地质勘察更体现工程性,必须找到上述结合点与金锁,而要做到这点,首先要扩充知识境界。

其次是如何对待和认识一个地质体的问题。作者初步体会需要解决以下三个方面的认识论问题。

(1) 我们现在所看到的每个地质体(称为现状),是过去演化发展的产物,并仍在进一步演化发展之中(称为未来)。一个地质体的过去、现在和未来的演化,一方面有它自身的内在规律,另一方面又受控于客观环境的变化。所有现象都是这两个方面的表现形式。但凭现象判断地质体的固有特性是一个随机的认识论,所有现象都是随机现象。而对地质体的演化发展进程而言,它具有双重随机性。其一是影响因素的随机性;其二是人类认识论中的随机性。这两个随机性可统称为概率过程。

上述概率现象(或称为变量)和概率过程,是以地质体的演化发展规律为核心的概率系统。

(2) 对于一个确定的工程对象如坝基的稳定性评价等而言,所有有关学科必须构成一个整体,但从研究的侧重点而言各个学科又相对地独立。这样就有保证实现整体目标的协调性问题。这里,整体同协调之间的相互关系就是系统关系,称为以一个工程对象为核心的各学科之间的系统组合。

(3) 对一个确定的工程而言,并不是所有地质问题都具有等同的意义。比如以水利水电勘察中的一个重要参数——单位吸水量为例,在坝基渗流场分析中它是一个不可缺少的基本参数,但在边坡和地下结构等工程问题中它并不重要,需要采用另外一种水文地质参数,等等。这就意味着立足于工程观点的勘察成果不应该是对所有地质问题的简单综合,而应该是以对象问题为核心的诸地质问题的系统处理。

上述地质体的概率系统,以对象工程为核心的各学科的系统组合和诸地质问题的系统处理这三大系统必然要产生一个新的认识论即系统分析论,而新的认识论又必然要开拓相应的基础理论和实施这一理论的方法论。这一新的领域以系统化为其最大特点。所以,综合工程地质勘察宜改称为系统工程地质勘察,支撑这一勘察的基础理论可称为系统工程地质(Systems Engineering Geology, 以后简称SEG),它的方法论就是系统工程方法。

有了上述认识之后,作者从1985年开始采用SEG这一名称,先后在长沙、南宁、北京、

武汉和宜昌等地举办讲座进行学术交流，广泛征求了意见。1986年11月9日，蒙著名岩石力学专家陈宗基教授推荐，在“复杂岩石中的建筑物”北京国际会议上第一次宣读了题为《系统工程地质与岩土工程》的论文，得到了大会执行主席、西德M.朗格教授的肯定。嗣后，在日本神户（1987.4.）、印度新德里（1988.1.）、美国华盛顿（1989.7.）等国际学术会上分别发表了SEG中的部分内容。其中，《岩溶作用动态平衡理论》为国际水文地质学家协会(IHA)1989年《水文地质论文专辑》特邀论文。作者还同日本、美国、法国、瑞典和意大利等国同行们进行了广泛的交流。

从此，SEG逐渐引起了工程地质界和岩土工程界的关注，特别是从事工程地质勘察第一线的地质师和年轻一代，希望SEG能早日出版。为满足这一要求，作者在水利电力出版社全力支持下先撰写这部导论。其宗旨是立足于工程应用，深入浅出地介绍一些基本概念、思路与方法，尽可能地避免繁琐的数学论述。至于那些复杂的岩体力学、岩体水力学方面的计算全部采用专用程序，书中不作详述。

为了检验SEG的可行性与社会经济效益，在原水利电力部科技司的大力支持下，作者同湖南省水电勘测设计院和长江水利委员会三峡区勘测大队通力合作，在鱼潭、高坝洲和隔河岩等工程中进行了初步尝试，获得了一批成果。

SEG的研究始终是在潘家铮教授的亲切关怀和指导下进行的。潘家铮教授身负重任，在百忙之中对本书的编写思想、编写原则提出了具体意见，并对书稿进行了精心推敲和审定。不仅如此，象概率论那样艰涩难懂的章节还亲自改写，使其通俗易懂。可以不夸张地说，这部导论得以问世，是与潘家铮教授所倾注的热情和心血分不开的。

著名的工程地质学家刘国昌教授和张倬元、晏同珍、谭周地教授，傅冰骏研究员等对本导论送审稿进行了评审，并提出了极其宝贵的意见，这些意见均已具体地贯彻到有关章节中。而刘国昌教授“将SEG进一步扩充到工程地质学全领域”的建设性意见，将成为作者今后继续奋斗的目标。

在SEG的研究、写作过程中，还得到曹乐安、金德濂、周思孟、梅剑云、陈德基、韩福初、刘效黎、徐瑞春、朱建业、韩文峰、邹成杰、王家骏、霍效光等高级工程师和王照瑜编辑的支持和帮助。年轻的一代——李宁、刘传正、赵作权、刘明寿、查方强、王军怀、陈嬭和汪益敏等，为SEG的开拓也做出了贡献。

在这里还需要感谢的是日本神户大学桜井春輔教授和他的研究室全体成员。他们提供了SEG所需的若干软件。

作者还要特别感谢妻子徐凤芝女士，她为SEG的研究和本书的撰写作出了无私奉献。

这部导论仅仅是SEG的起步，还有许多具体问题有待深入研究，所提出的新理论与研究方法有待通过实践加以检验和完善。所以，作者热诚欢迎来自各方面、特别是来自勘察第一线的工程技术人员的批评指正。

作者

1991年3月

目 录

序
前言

第一章	SEG的形成	1
第一节	SEG诞生的背景	1
第二节	SEG的主要思路	4
第三节	SEG的基础理论与若干新概念	8
第四节	SEG的构成	24
第二章	SEG对主要地质问题的处理	31
第一节	综述	31
第二节	形变场岩体分类	33
第三节	裂隙问题的处理暨等价体概念	39
第四节	地质单元判断与工程地质分区	49
第五节	多光谱相片分析	52
第六节	物性参数分区	60
第七节	断层破碎带问题的处理	62
第八节	风化带问题的处理	64
第九节	岩溶问题的处理	65
第三章	SEG对岩体力学问题的处理	92
第一节	综述	92
第二节	自然形变场类型的宏观判断	93
第三节	岩体形变特性及表征参数	98
第四节	目标参数及其确定	99
第五节	界面单元参数	116
第六节	附加形变场GMM的建立	128
第四章	SEG对岩体水力学问题的处理	133
第一节	岩体自然渗流场类型的宏观判断	133
第二节	岩体渗流场的研究方法及其表征参数	140
第三节	岩体水力学概念	154
第四节	渗流场岩体分类	161
第五节	岩体渗流场均质程度判断	163
第六节	渗流场GMM的建立	164
第五章	坝基附加形变渗流场	169
第一节	外荷条件	169
第二节	附加形变场形变类型判断	173

第三节	附加渗流场类型的判断	187
第四节	最优建基面选择	204
第五节	初始优化设计	216
第六节	二次优化设计	218
第七节	补强方案选择原则	225
第六章	地下结构附加形变渗流场	229
第一节	围岩形变渗流场地质问题预测	229
第二节	围岩分类	231
第三节	围岩渗流特性分类	235
第四节	岩爆问题及其预测	239
第五节	围岩稳态分析暨支护设计	242
第六节	NATM施工及其监测管理系统	274
第七节	勘探洞的综合利用	278
第七章	边坡形变渗流场	283
第一节	综述	283
第二节	静态系统稳态分析	286
第三节	边坡渗流场分析	320
第四节	动态系统分析	321
第五节	边坡失稳破坏时间预测(报)	328
第六节	人工边坡设计	339
第七节	可靠性分析	346
第八节	边坡补强方案的选择原则	353
第九节	边坡破坏动力学与灾害预测	359
第八章	工程建设中的地震问题	368
第一节	综述	368
第二节	宏观地震	369
第三节	地震参数与地震区划	378
第四节	地震参数的工程应用	383
第五节	地震预测(报)	393
第六节	微震	412
第七节	微震信息——地质体动态表征信息	421
第八节	水库诱发地震	426
第九章	信息处理系统	433
第一节	综述	433
第二节	信息分类及各信息间相互关系	435
第三节	程序库	439
第四节	常用的分类程序和规划程序	441
第五节	常用的岩体力学岩体水力学问题分析程序	442
后记		444
主要参考文献		445
CONTENTS		450

第一章 SEG 的形成

基本上依赖于其它学科的发展而发展的工程地质学，与其说是一门独立的学科，毋宁说是一门综合性的科学技术领域。

作为一门综合性的科学技术领域，工程地质学不断地面临着新的形势、新的挑战，它表现在如何有效地集其它学科的新理论与新方法之大成去解决工程建设中出现的复杂的地质问题。这就是SEG的基础。

第一节 SEG 诞生的背景

一、工程地质勘察面临新的形势

我国水力资源居世界首位。以装机容量为1万kW以上的河流为统计对象，我国水电蕴藏量有6.76亿kW。其中，单站容量为500kW以上的可开发容量就达3.79亿kW。

新中国成立以来，已成功地建设了为数众多的水电站，但其总容量还不到可开发容量的10%。

上述数字意味着我国以水电为能源主要组成部分之一的历史将会延续很长时间。为此，我国政府拟定了在2000年水电翻两番的总目标。按照这一目标，在2000年以前必须完成总容量达1.6亿kW的初步设计和可行性研究，其中不少是坝高超过200m、装机达200~300万kW的超大型水利枢纽。

已建水电工程的安全运行足以证明，我国已具备了应付复杂的建设环境和建设巨型水电工程的力量与水平。所以，完成上述任务在技术上并不存在太大的困难，但在勘测设计体制和勘察方法以及勘察效率等方面尚存在一些值得探讨和改进的地方。

过去，我国大中型水电工程全由国家投资兴建，勘察设计单位主要由国家指定。这种体制有时带来设计思想的保守（不是指所有工程）和勘察工作量往往超过国外同类工程的勘察工作量。保守性设计的主要表现是根据摩擦系数选择建基面与按确定型概念选择坝型和坝体断面。勘探工作量过大主要起因于这样一个认识，即初步设计阶段及其以前所投入的勘察费用只占工程总投资的0.1%~0.3%左右。为了避免因地质问题而招致施工甚或设计方案的改变，在勘察方面不妨多投资一些。这一认识无形中将勘察工作量作为评判勘察深度的基本尺度。

据不完全统计，我国大中型水电站所投入的工作量大约是：地表测绘（比例尺1:5000~1:2000）平均11km²/工程；钻探平均2万m/工程（个别达5.2~6.3万m）；钻探同勘探平硐进尺之比最大达15.1:1.0；岩基试验183组（室内）~49组（现场）/工程〔个别达519~758组（室内）和134~297组（现场）〕。

在日本，同样规模的工程，钻探进尺4000m左右的占97%，钻探同平硐进尺之比为

1:1~1.8:1.0。又如洪都拉斯埃尔卡拱坝，坝高238m，坝顶处河谷宽度375m，坝基为阿铁玛灰岩，总厚度大于700m，所投入的钻探进尺为3335m，勘探平洞2300m，两者之比为1.45:1.00（而防渗帷幕面积约53万m²，总进尺达48.5万m）。

当然，勘探量主要取决于地质情况复杂程度和河谷宽度，有些工程勘探量偏大有这方面的原因。有些工程，特别是那些由两个不同单位勘察的工程往往出现重复勘探以及超阶段勘探等也是勘探量增加的原因。但从钻探同平洞两者之比，对钻孔和平洞的综合利用以及斜孔所占的比例等方面可以看到我国同发达国家之间的差别。

今后，大型特别是巨型水电工程仍然需要由国家投资兴建，但各工程勘察设计队伍不一定全由国家指定，还会采用竞争性承包的方式。而大量的中小型工程则主要由地方自筹资金建设，勘察设计费用有限。无论是前一种情况或后一种情况，它们的共同点是要求设计先进，勘察工作量适当。这一客观形势的变化给勘察与设计都提出了新的、更高的要求。

二、工程地质学面临新的挑战

近几年来，围绕着勘察设计体制的改革和如何进一步提高勘察设计水平等问题，从领导机关到生产科研部门都进行了广泛的讨论，而且仍在进行中。其中，最引人注目的一个提法是所谓“岩土工程”。它同国外流传着的岩土工程（Geotechnique）有什么样的关系暂且不去讨论，它的主导思想是将同工程建设有关的诸学科融为一体，以求解决长期存在下来的各学科之间的脱节现象。这就涉及到工程地质学今后的发展方向问题。

在国外，创导岩土工程的代表是奥地利的缪勒（L. Müller）教授和加拿大的一些公司。瑞典电力公司也表现出这种倾向。他们的共同特点是除了上层建筑由专业设计师负责设计外，边坡和地下结构等勘察与设计、甚至包括施工设计全部由地质师和岩石力学专家共同负责。按这种方式，地质师的任务不仅仅是勘察，而且还要亲自参加设计。显然，我国现行勘察体制和工程地质师的调查研究范围不适应这一要求，同样，现行的岩石力学工作也不完全适应这一要求。

但另一方面，现阶段岩土工程存在的问题：一是它是一个新的领域还是一种泛指同岩土有关的建设工程尚不明确；二是若它是一个新的领域，它还没有自身的理论基础与方法论。比如，虽有些国家采用各专业专家协同工作的方式，但是各专业所持的理论与他们所提交的成果却仍然停留在传统理论与方法论上。显然，这种形式上的联合不应该是岩土工程的真实内容。所以，简单地将工程地质学转化成岩土工程或它的一个组成部分并不妥当。

其次，工程地质同环境地质之间的关系也是一个不能回避的现实，这是因为环境地质似乎要包含工程地质学的所有研究内容。

这里首先要弄清一个基本点，即自然界对人类活动的影响（称为正作用）和人类的活动对自然界的影响（称为反作用）。其中，正作用包括造福与灾难两个方面的内容，但研究的重点是后者。由于灾难（如地震的、山崩地滑的和气候的等等）一般非人类的力量所能抗拒。所以，正问题的研究则侧重于对自然灾害的预测（报），以求避开灾害地区或使灾难所造成的损失为最小。反作用则包括适应、利用与改造或改造与破坏两个方面。前者意指

人类的活动要尽可能地适应原有自然界所造就的优越条件并充分地利用它，这叫做顺应原则；后者意指人类的改造应尽可能避免对原有自然界平衡条件的破坏。

在水电建设中，坝基、人工边坡和地下结构，由于它们所涉及的范围有限，上述要求完全可以达到。而大容量水库可能引起的库岸再造和诱发地震等问题，它们的性质是反作用，但又不全是反作用（确切的提法应该是对于正作用的触发），而研究方法则属于正作用即预测（报）问题。

如果环境地质同时包含上述正、反两个作用，那么它是一个包罗万象的领域，环境地质专家不可能自行解决所有问题。对于包罗万象的领域，它的反倾向是各专业的自行分化。工程地质学形式上可以包容在环境地质中，但它毕竟还是要保持自身的独立性。

三、探索中的新理论、新方法之一——系统工程地质（SEG）

工程地质学之所以面临着上述向岩土工程的转化或包容于环境地质的新的挑战，是由作为边缘学科的易变性和敏感性所决定的。

所谓易变性，是指工程地质学的发展阶段及各个阶段的主要内容几乎同其它有关学科的发展相同步。所以，工程地质学对其它学科的发展相当敏感，而它自身始终没有固有独立发展的理论。

比如，50年代工程地质学这一学科的主要研究对象是松散介质，支撑该学科的是土力学与地下水动力学；自从运用李四光教授的地质力学概念以来，地质构造生成机理，构造序次分析与构造配套构成了工程地质勘察的主要组成部分；岩石力学中的块体理论的诞生与发展进一步推动了以裂隙发育强度为主要依据的岩体工程地质分类，后来加上物理力学参数又出现了所谓的岩体质量评价；模糊论的应用又带动了对一些地质问题的模糊论分析、模糊聚类分析等等。

工程地质学的易变性与敏感性又决定了它发展过程的不协调性。明显的例子表现在结构面与结构体描述上的完美性、高精度数值分析方法的发展同计算参数选择方面的停滞不前以及同工程设计间的脱节。又如岩石力学已有长足发展而地下水问题的研究仍然停留在松散介质地下水动力学水平，而它的基本参数——渗透系数实际上很难测得，所以主要局限在单位吸水量这样一个相对渗透性参数方面。

所以，工程地质学与其说是一个学科，毋宁说是一门综合性的科技领域。

既然工程地质学是一门集有关学科的理论与方法为工程建设服务的科技领域，它理应以对这些学科的相互协调为其基本特征，这一特征本身已经包含了系统概念。这就是作者开始思考工程地质学发展方向的第一认识基础。用这个系统概念考察问题时便可看到工程地质勘察存在的一些不协调情况，主要有：

- 1) 大工作量地表测绘同所搜集的资料之间的不协调和这些资料同设计需要之间的不协调；
- 2) 大勘探量同所搜集的资料之间的不协调和这些资料同设计需要之间的不协调；
- 3) 大量岩基试验及其成果同勘察成果和设计需要之间的不协调；
- 4) 大量水文地质试验及其成果的单一性同设计需要之间的不协调；
- 5) 尚未建立各阶段勘察深度评判标准从而无法进行优化工作。

解决上述不协调现象的根本途径只能是以优化为最终目标的系统工程。

作为一个方法论，系统工程原理几乎适用于所有技术领域，只是研究的对象不同，在具体实施方面有所差别，但大体上可划分为两种类型：其一是先定目标后定条件。从太空、航天技术到民用产品生产概属这一类型。比如以电视机为例，它的目标可定为高灵敏度与高稳定度。为满足这两个条件，可利用现有部件或开发新的部件以最好的方式进行组装，但灵敏度太高噪声干扰则大，所以要有一个合适的选择，以同时满足高稳定度这一要求。

而在水电工程中，除施工组合(如规定日开挖强度前提下的开挖和运输最佳组合方式)等属于前一类型外，坝工、边坡和地下结构等则是先定条件后定目标这样一个类型。换句话说，它是一种留有一定安全余度前提下的最经济的设计与施工。这里的安全余度取决于人们对地质体建设条件的认识程度并应赋以量的概念。这个阶段，研究的对象是自然界的固有特性，所以称它为静态系统和静态系统的安全余度。在进入施工阶段，或地质体出现新的形变趋势之后，该静态系统即转入动态系统，要重新评价并检验静态系统估计的安全余度。

在水电工程和其它岩土工程中，对一个特定的地质体的固有特性的了解和描述要靠地质参数、岩体力学参数、水文地质参数(SEG中称为岩体水力学参数)和地球物理参数(SEG中称为物性系数)等四个方面的参数(简称四大参数)。由于它们是该地质体固有特性的不同表现形式，相互间必然存在着内在联系。所以，只有同时考虑这四大参数才能完整地描述该地质体，进而建立相应的模型，这是SEG首先要达到的目标。但如果我们的工作仅仅停留在这个水平上，那么只能说勘察工作中的协调性得到了满足，但还不能说已经做到了系统性。这是因为系统性的前提条件是要有联系各部门(称为子系统)和前后各阶段的循环信息(称为系统参数)。在水电工程中系统参数包括静态系统参数，动态系统参数和静态、动态系统之间的联结参数等三种。

综上所述，要按系统工程原理处理地质问题和其它有关学科的问题，需要有一个基础理论，而这个理论并不是有关学科理论的形式上的综合。建立这样一个基础理论并在此基础上建立相应的方法论和付诸实施即可构成一个相对独立的学科或科技领域，作者称之为系统工程地质(SEG)。

第二节 SEG 的主要思路

一、工程地质勘察实际上是一个系统工程

一个工程的设计是怎样产生的？按理说设计产生于勘察资料基础之上。但在另一方面，以坝基问题为例，如果地质师不了解工程规模，可能采用的(比较)坝型，这些坝型所产生的附加荷重在岩体内部的传播形式及量级和主要的受力部位等，工程地质勘察将要失去针对性甚或变成纯地质学的勘察。在前言中所提到的对夹层问题的处理就是这方面的例子之一。

所以，一个地质师着手编制勘察大纲或作业计划时，首先要了解附加荷重条件进而对附加形变场(详见下节)建立一个总体概念。这里会提出这样一个问题，那就是：诸如在

规划阶段和初步设计阶段,一个确定了的设计方案都拿不出来或设计方案又经常修正甚至改变,怎样确定附加荷重?这确实是水电工程经常碰到的问题,但是我们应该看到工程规模基本上是确定的,这是基本前提,至于坝型可能有几个比较方案,坝轴线位置有待确定。各类坝型都有它们各自的基本断面,但一般地讲,岩体的承载能力有较大的回旋余地,所有的坝型不能设计成它的荷重强度大到足以破坏岩体的极限强度。所以,我们的着眼点是预测那些在各比较坝型附加荷重作用条件下处于非稳态的部位,如断层和软弱夹层等,但这是一趋势分析而不是确定性分析,分析结果是一个区间值而不是单值。这一区间值对工程地质勘察具有特别重要的意义,地质师心中有数指的正是这一区间值,所谓针对性也是指这一区间值。

其次,模型是系统工程的核心,是方案论证判断的依据,没有模型就不可能有系统工程。当然,研究对象不同,模型类型也就不同。水电工程与岩土工程中的模型属于符号型和形象型,SEG称为地质数学模型(Geological Mathematical Model,简称GMM)。该模型的基础是前面提到的四大参数。

在这里需要说明综合工程地质图与工程地质剖面图同GMM之间的相互关系和四大参数同工程地质描述之间的相互关系问题。

首先,如前言中所述,综合工程地质图和剖面图都是工程地质勘察最基本的成果,必须认真编制。但另一方面,按照过去的做法,设计人员利用这些图件进行设计时,他们感兴趣的并不是地质现象本身,而是形变场边界条件和同形变分析有关的具体参数,比如坝基础和岩体内部可能引起剪切形变的那些夹层或断层的抗剪强度。

边界条件加必要的力学参数实际上就是对一个地质体的参数化模型。

其次,所有工程除了常规地表测绘和钻探、硃探外,还要进行水文地质试验、岩体力学试验和地球物理勘探等多方面的工作。近几年来,在地质现象的数量化(通常称为定量化)描述方面有了很大进展,最典型的例子是岩体分类和岩体质量评价,它们的描述趋势是由少数几个参数描述向多参数综合评判的过渡。除此而外,地层、夹层和断层破碎带的产状、尺寸等空间分布形态参数也属于地质现象的数量化描述(SEG称这类参数为地质参数)。但如果我们的描述仅停留在文字说明和地质现象自身的数量化描述,那么这类描述仍然是地质学描述。而从工程观点考虑,需要的是上述地质学描述要同形变场特征参数相联系起来,尽可能地将前面所提到的四大参数按整体性和协调性这两条原则统筹考虑。这是否意味着测试工作量将大大增加?实际情况是,不少工程在钻孔和勘探硃综合利用方面存在着值得研究的地方。今以钻孔为例,若仅限于岩心描述和压水试验,钻探费用和所花费的劳力同所搜集的资料之间极不相称,而且当岩心采取率低和软弱夹层分布较多时,光靠岩心必然会遗漏一些层位,如果补以综合测井和井壁录像便可得到相应的物性参数和图像信息。其次,钻孔压水试验时间约占总钻进时间的1/3~2/3左右,从完成额定进尺角度考虑,试段长度越长、试验时间越短则越好,但任务书规定试段长度为5m,并保证一定的稳定时间,所以再麻烦也必须按规定完成,也就是说压水试验已经成了每个钻孔必须进行的常规工作项目。作者举这个例子,是想提出来讨论可否将综合测井和岩体力学试验也如同压水试验一样作为常规任务?目前诸如钻孔渗压仪、微流速仪、多参数综合测井仪、膨压仪与

千斤顶（又称Goodman Jack）、彩色电视及录像与模数转换等都有现成的产品提供；在勘探综合测试方面有收敛仪，多点位移计以及传统的应力解除法等也有成套仪器与解析软件提供。

实际上，钻孔和勘探的综合利用，是近几年来领导机关特别强调的重要改革措施，同时又是广大地质师所希望的勘察手段，而且有些工程在这方面也做了很好的尝试，取得了很好的效果，特别是在减少钻探、硃探等重型勘探量方面有明显成效。所以，问题的实质并不在于四大参数测定是否增加测试工作量，而是在于这些测试是否必要。只要认真推敲一下工程地质勘察报告中有关岩石物理力学性质和工程地质评价的章节便可发现上述综合测试的必要性和四大参数的实践意义。

在初步设计阶段后期，建筑物轴线和建筑物类型已确定，可以建立各建筑物的GMM，它是一个确定性模型。但从各地质单元的计算参数（SEG称为目标参数）的代表性和可靠性来说它又是不完全确定的。这样便产生了我们对该地质体的认识程度问题即目标参数的置信度问题。置信度越高，GMM就越接近于实际情况。所以，GMM又是一个建立在一定概率保证率基础上的确定性模型，它所产生的结果即建筑物设计也就必然属于具有该保证率的设计（SEG称其为初始优化设计）。这里，保证率的概念有两种不同的认识，一是对某一个确定量的保证率。比如过去常采用的坝体同建基面接合部的摩擦系数往往是确定的量，如 $f = 0.65$ ，那么人们要问该值的可靠性多大，是70%还是90%？二是对某一参数的区间值。比如同样用上面的例子，试验结果 f 值波动很大，若用单值 $f = 0.65$ ，它的保证率很低甚或接近50%（可能是也可能不是），但 $f = 0.6 \sim 0.8$ 这一区间值保证率可能很大（如80%），这时坝体抗滑安全系数主要靠正应力调整得到保证，可以得出若干个安全断面，最后用综合评判法选择最优断面形式。

在上述两种分析方法中，实际上我们所能做到的只有后一种即区间值的确定性分析。

保证率的概念意味着初始优化设计还保留有一定的不确定成分，它有待于进一步发现并加以修正。这一修正过程相当于已往的施工地质阶段，也就是信息反馈阶段，是一种动态系统。

大坝竣工并开始蓄水运行以后，很多工程都设置有监测设施，以检验设计施工质量并进行预测。这也是一种动态系统。

可见，工程地质勘察过程实质上是一个系统工程，它的构成及各阶段的相互关系可用图1-1表示。自觉地实施这一系统就是系统工程地质。

二、稳定性分析过程实际上也是系统工程

上面是从工程地质勘察整体立论的，现在取一个大坝稳定问题进行讨论。

我们的目标是保证大坝和水库安全运行前提下的优化设计。先不考虑优化问题，仅从安全运行角度出发，可以建立如图1-2所示系统图。该图主要用来说明同大坝稳定有关的各阶层影响因素构成法，所以是概略性的，每个工程因地质条件不同，各阶层构成将不同。

按图1-2所示系统，大坝稳态取决于是否发生了第一阶层A、B、C三个事件中的任何一个。这称为或门关系并用下式表示：

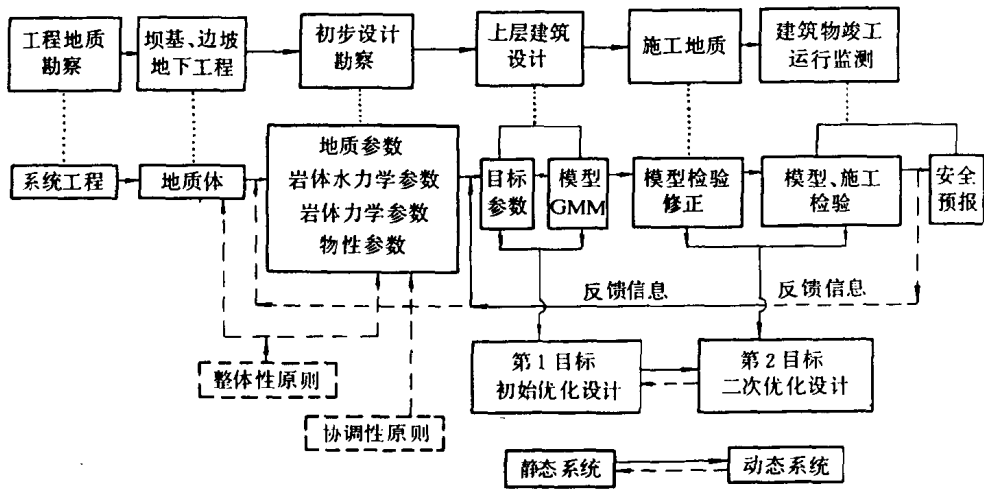


图 1-1 工程地质勘察与系统工程

$$P(T) = P(A \cup B \cup C) \quad (1-1)$$

而第一个阶层事件A、B、C又取决于第二阶层事件，用式子表示就是：

$$\left. \begin{aligned} P(A) &= P(D \cup E) \\ P(B) &= P(F \cup G) \\ P(C) &= P(H \cup I) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中，事件D和事件E可看做是不能进一步分解的事件，因为软弱夹层的厚度、空间分布和洞穴的尺寸及它们的位置都是确定的，受其它因素干扰可忽略。但事件F、G、H、I等同第三阶层事件J、K、L等有关。不过在这三个事件中只有一个事件的发生并不意味着第二阶层事件必定发生，只有三个事件同时发生时才能引起二阶层事件发生。这一关系称为事件F、G、H、I为事件J、K、L之交，并用与门表示，如

$$\left. \begin{aligned} P(F) &= P(J \cap K \cap L) \\ P(G) &= P(J \cap K \cap L) \\ P(H) &= P(J \cap K \cap L) \\ P(I) &= P(J \cap K \cap L) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

在系统工程中，称式(1-1)和式(1-2)为非赘余系统；称式(1-3)为赘余系统。其次，图1-2为串并联混合系统。

同样，其它如人工边坡和自然边坡，地下结构等方面的稳定性分析也可建立类似图1-2所示系统构成，只是阶层构成方式和阶层数不同罢了。

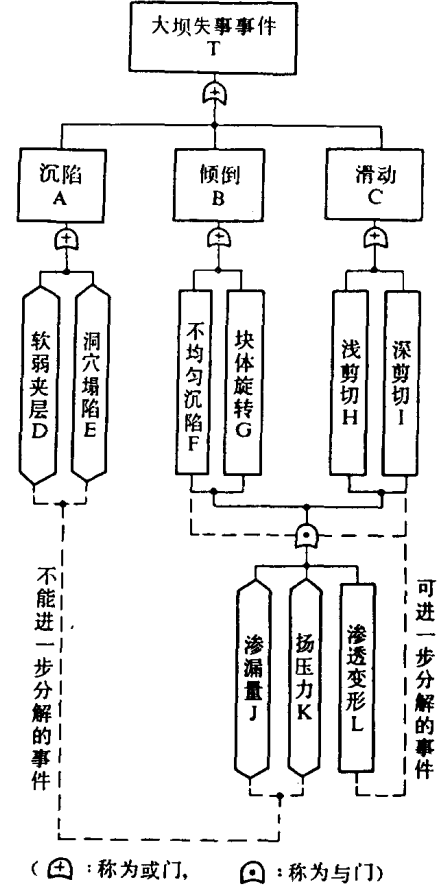


图 1-2 大坝稳态分析系统构成示例