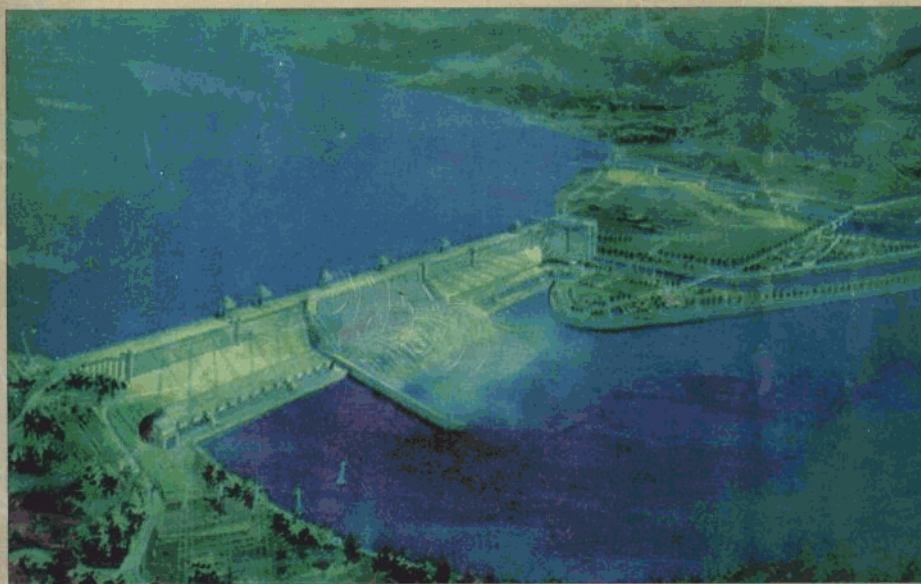


峡



三峡工程 坝基岩体工程研究

任自民 马代警 沈 泰 田 野 著

中国地质大学出版社

新华书店

PDG

序

在水利枢纽工程建设中，特别是大型水利枢纽工程建设中，坝地质条件和岩体性状是建设中首先要弄清的一个重大技术问题。根据世界已建水工建筑物的调查，在威胁建筑物安全的自然因素中，地质条件和岩体条件是最重要的因素之一；在重力坝失事原因中，因基础地质问题失事的占45%。这说明地质勘察和岩体工程研究在水利枢纽工程建设中的重要性。因此，随着坝工建设的发展，岩体工程研究也得以迅速发展，并不断有所创新。

三峡工程的基岩是坚硬完整的闪云斜长花岗岩，是非常难得的高坝基础。但正如地质上常见的现象，在完整坚硬的岩体中还存在局部软弱岩体或断裂构造等薄弱环节，而许多工程的失事往往正是由于这种局部薄弱环节所引发的。这种局部问题又往往难以为一般勘察方法所发现，取得精确定量的结果则更为困难，但这又是地质工作和岩体工程研究需要妥善解决的一大课题。三峡坝基的重大地质问题，除风化壳、断裂构造外，影响建筑物安全的主要地质问题之一是局部较发育的缓倾角结构面。另外，三峡船闸有深挖100多米的高陡边坡，边坡稳定问题也是地质和岩体工程研究需要解决的一个重大课题。为了解决好三峡工程的坝基和船闸高边坡问题，从50年代起，长江水利委员会在兄弟单位的协作下，即开展了大规模的地质勘察和岩体工程的试验研究工作；80年代以来，长江水利委员会又运用了最新的地质勘察技术和多种先进的试验研究手段继续深入研究，并将三峡工程坝基岩体工程问题和船闸高边坡稳定问题研究列入国家“七五”重点科技攻关项目，多年来的勘察研究已获得丰硕的成果。

本专著的作者任自民、马代馨、沈泰、田野同志，长期从事三峡工程及其他水利水电工程的工程地质勘察、研究和岩体工程的科研、试验工作，积累了丰富的实践经验。他们在本书中以翔实的第一手资料与数据，全面、系统地论述了三峡水利枢纽在坝基工程地质、岩石力学、地质力学模型等方面的科研成果。以国家“七五”科技攻关和三峡前期科研中有关三峡岩体工程的大量科研成果为基础，对坝基岩体工程的理论与实践问题，进行了系统的总结。因此，这部专著是著者和参加该项研究工作的科技工作者辛勤劳动与智慧的结晶。他们站在水利水电科技发展的前沿，密切结合三峡工程的实际，运用新技术、新理论、新方法进行多手段、多专业的联合攻关，多学科渗透融合，研究和解决了三峡岩体工程一系列重大问题。如岩体建造与改造的地质特征、规律、模式等的研究；岩体工程地质特性及量化评价的研究；弱风化岩体利用及加固处理的试验研究；坝基岩体质量评价及建基面优化选择的研究；岩石力学特性及工程力学参数的选择研究；坝基概化地质模式及工程岩体稳定的研究（含地质力学模型）等。在研究的深度与广

度方面，在技术方法和理论上，都有很多突破与创新。研究成果在工程实践中得到进一步应用，为工程设计与施工提供了科学依据。

本书不但总结与概括了三峡工程的实践经验，同时也总结与概括了我国几十座大型水利水电工程地质勘察与岩体工程研究的经验。总之，本书内容丰富，理论新颖，对大型、特大型水利枢纽工程的地质勘察和岩体工程研究有重要参考价值，是一部很好的有关岩体工程研究的工具书，具有很高的实用价值和学术价值。

全国工程设计大师

长江水利委员会技术委员会副主任

长江水利委员会原总工程师

教授级高级工程师

洪庆余

1997年11月

前 言

举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程,是跨世纪的宏伟工程,是具有防洪、发电、航运、灌溉等效益显著的综合利用工程,也是治理开发长江的关键工程。

长江三峡水利枢纽工程坝址位于闻名的长江三峡东段——西陵峡段中的三斗坪镇(湖北宜昌县),坝址处于黄陵背斜南端的古老结晶岩区,为长江宽河谷及低山丘陵地貌,具有兴建混凝土高坝的良好地质环境和地质条件、水工布置和施工场地条件,是一个理想的高坝坝址。

三峡工程规模特大,坝轴线总长 2 331m,最大坝高 175m,水库正常蓄水位 175m,电站装机总容量 1 820 万 kW,年发电量 847 亿 kW·h。主要建筑物由大坝(混凝土重力坝)、水电站厂房、船闸和升船机等组成。

1993 年国务院决定开始进行三峡前期施工准备,1994 年 12 月 24 日宣布正式动工兴建,标志该水利枢纽工程自 1956 年至今,历时 40 年的工程勘察、设计、科学研究和反复论证,已转入实施阶段。

岩体工程的概念,系将岩体作为工程结构物的组成部分,来研究在工程荷载作用下的地基岩体稳定问题。按不同的工程类型和受力条件,划分为坝基岩体工程、高边坡岩体工程、地下建筑物岩体工程。三峡工程以坝基岩体工程和船闸高边坡岩体工程为主。

自 80 年代至 90 年代初期,配合三峡工程设计蓄水位 150m 方案和 175m 方案的初步设计,对主要岩体工程问题和建筑物工程地质条件进行了大量的工程地质勘察、岩石力学试验及地质力学模型试验研究,取得了丰硕的成果。

1986 年至 1990 年期间,在国家“七五”重点科技攻关专题项目“长江三峡工程坝区高边坡和建基岩体工程问题研究”中,对这两大岩体工程问题开展了系统、深入的研究。其中“长江三峡工程坝基岩体工程问题研究”的攻关目标——弱风化岩体利用可能性及优化建基面选择,是重大的岩体工程问题之一,采用新技术、新理论、新方法、新思路,开展了系统、深入的现场调查及综合测试、实验室试验研究,并对此进行了科学分析论证。攻关负责单位有:长江水利委员会三峡勘测研究院、长江勘测技术研究所、长江科学院。协作单位有:中国科学院地质研究所、长春科技大学、水利水电科学研究院、长江水利委员会地球物理勘测研究院。此项研究提交了 12 项科研成果,撰写了《长江三峡工程坝基岩体工程问题研究》的总报告。该项研究体现了多学科的相互渗透,多专业、多工种的协作,并采用系统论方法,将弱风化岩体利用、岩石力学、岩体质量评价、稳定分析、加固处理灌浆试验与建基面(或利用岩面)优化选择融为一体,取得了新的进展与突破。其成果在初步设计、单项工程技术设计和施工地质工作中得到应用,具有显著的社会效益及经济效益。

本项成果于 1990 年 12 月在北京通过地质矿产部科技司组织的鉴定委员会的专家评审鉴定,成果达到国际先进水平。参加鉴定的专家有刘广润教授级高工、孙广忠教授、王思敬教授(院士)、哈秋龄教授级高工、谭周地教授、罗国煜教授、刘效黎教授级高工。

本专著在上述科技攻关成果基础上,对内容做了进一步的拓展、外延、深化,补充了著者及有关研究者的三峡工程前期科研成果;补充了地质力学模型研究,阐述了中国—意大利技术协议项目“三峡水利枢纽左厂房坝段至临时船闸坝基整体地质力学模型试验研究”成果;补充了

岩石力学试验方法和成果;补充了著者在国家“六五”重点科技攻关项目“复杂地基软弱层(带)工程地质研究”中的有关成果;补充了著者在单项工程技术设计项目“长江三峡水利枢纽左厂房坝段深层抗滑稳定研究”(1994)的有关成果。

本书在坝基岩体工程研究的内容、理论与技术方法上具有如下特点:

(1)运用地质学的基本理论,从工程地质观点出发,对岩体形成的地质基础——岩体建造与改造的地质作用和特征做一综述。列举了地质改造的工程实例——复杂地基软弱层(带)的成因分类与工程地质分类及工程岩土特性。

在以上广泛研究与讨论的基础上,应用岩浆岩岩石学、地质年代学和地质力学、工程地质学的理论与方法,对三峡结晶岩体的岩相建造与构造及外动力改造做一剖析,对岩体的形成与构造应力场的演化历史做了探讨,有助于岩体工程地质力学属性问题的研究。

(2)视不同地质环境与岩类坝区,具有不同的研究内容。对于岩浆岩(结晶岩)坝区而言,本书重点阐述了风化壳的化学风化及矿物蚀变趋势、风化壳工程地质特征及分带定量划分方法、缓倾角结构面发育特征、岩体结构及概率模型、工程地质测试及参数相关性分析、结构面粗糙度的量测及分级等六个方面的问题,进行了定性定量相结合的分析与评价。运用现代应用数学的理论与方法,建立了风化分带的数学模型、岩体结构的概率模型及结构面网络模型、结构面粗糙度(RJ 值)的数学模型、工程地质参数的概率分析与相关分析等,为岩体及结构面的量化研究提供了科学依据。

(3)本书全面地阐述了三峡工程岩石物理力学性质(取样及试件制备、物理性质、变形性质、强度性质)、岩体变形性质[承压板法、单(双)向法]、岩体强度性质(抗剪强度及影响因素)、岩石(体)的时间效应(岩石的压缩蠕变、结构面剪切蠕变及蠕变位移的数据处理)等试验方法与试验结果。对工程岩体力学参数的选择,采用了统计分析法、优选斜率法、模糊选择法(Fuzzy),体现了本工程具有特色的研究方法,最后给定工程力学参数的综合选择结果,为工程设计提供依据。

(4)在岩体工程地质分类(如风化岩分类、岩体结构分类)和大量岩体力学试验及测试基础上,建立了坝基岩体质量评价的完整体系及其数学模型:长江勘测技术研究所、长江水利委员会三峡勘测研究院建立了“三峡 YZP 法”及相应的模糊综合评判与模糊集贴近度分析的评价体系;中国科学院地质研究所建立了多参数动态定量分析法——层次分析重排序次法的评价体系。以上方法体现了本工程的研究深度及特色。

本书对弱风化岩体可利用性研究,是从岩体工程地质特性、岩体(石)力学强度及变形特性、岩体质量评价、不同利用岩面稳定性对比研究、加固处理措施和效果等五个方面,进行了综合分析评价。在大坝建基面(或利用岩面)选择方面,突破了原有按单一风化界面选择建基面的传统观念,提出按“岩体质量标准分析法”确定坝基利用岩面(或建基面)的高程和相应的岩体部位,制定了建基面岩体质量定性及定量标准,编制坝基利用岩体质量分级(区)工程地质图(1:2 000, 1:1 000),为单项工程技术设计及施工提供了地质依据。

(5)三峡工程左岸厂房局部坝段的深层抗滑稳定问题,受控于缓倾角结构面的发育程度、空间分布与规模。由于缓倾面具不连续性、随机性、极不均一性等特点,又受勘探技术条件所限,仍难以攻克具体坝段长大结构面的空间定位、定向、定规模这一难关。直至施工期在特殊环境下,采用特殊的勘探技术与钻孔彩色电视摄像、解释设备相配合,才基本解决这一多年困扰的难题。

根据实际揭露的长大结构面空间组合,提出概化地质模式,并建立考虑连通系数的计算模

式。书中引用著者在单项工程技术设计的研究成果(1994),对局部坝段坝基深层抗滑稳定及敏感度分析,从工程地质角度出发,做一深入研究与讨论。对坝基应力场、位移场特征,划分了三种类型进行弹塑性有限元分析及边界元分析。

书中还介绍了采用赤平极射投影求解空间共点力系的三维图解方法在某工程坝肩拱座稳定性分析的应用。

弱风化下亚带块状结构岩体(B级)及断层带镶嵌结构、碎裂结构岩体(C—D级)固结灌浆试验,是坝基岩体工程的重要研究内容。书中引用了早期试验成果,施工期的固结灌浆及帷幕灌浆试验正在筹备或进行中。本书对采用新材料、新工艺的设计方案做了介绍。

(6)全面、系统地阐述了地质力学模型研究中的有关理论与实践问题,如相似理论、模型材料(岩体及结构面)、模型加载方法与量测系统,列举了三峡地质力学模型应用实例。

为了研究三峡大坝稳定安全度,找出大坝在超载作用下的破坏机理及薄弱环节,水利部和意大利电力局于1989年签定并实施了中国—意大利关于三峡工程技术协议。其内容之一是吸收国际上先进经验,用大规模的整体(三维)地质力学模型研究三峡左厂房坝段至临时船闸段的整体稳定。著名的意大利模型与结构试验研究所(ISMES)为中方提供技术咨询和高精度量测设备及压模设备,由长江科学院负责实施。该项成果为进一步优化设计和基础处理提供大量可靠的科学依据。这样大规模的整体地质力学模型研究在世界上也是罕见的,标志着我国与世界先进技术差距的缩短,我国地质力学模型试验技术已跃上了一个更高的台阶。

综上所述,本书在著述过程中,对工程地质、岩石力学、地质力学模型等极其丰富的科研成果及大量的勘察、试验资料,进行了系统的总结和科学的归纳与提高。在课题研究的广度与深度上,在理论研究与技术方法上,都有了很多创新与突破。本书内容丰富,资料翔实,理论新颖,是一部很有工程实用性及科学研究价值的专著,也是一部有关三峡工程及其他工程复杂地基岩体工程研究的工具书。

著者长期从事三峡及其他工程的生产与科研实践,亲自主持科技攻关及重大课题的研究,有着丰富的工程实践经验。这本专著就是著者及参加攻关的同仁辛勤劳动的结晶。

本书各篇、章主要撰写人:前言、第一篇第一、二、三章任自民;第二篇第一章王幼麟,第二、三章马代馨,第四、五章任自民,第六章王立、任自民;第三篇第一、二、三、四、五章田野;第四篇第一章第一、二、三、四节任自民、蔡跃军,第五节徐卫亚,第二章任自民、马代馨;第五篇第一章任自民、马代馨,第二章任自民、孙云志、刘松涛,第三章任自民,第四章马代馨;第六篇第一、二、三、四、五章沈泰。

本书的出版得到了水利部长江勘测技术研究所、长江科学院、长江水利委员会三峡勘测研究院及三峡地质大队的领导热情支持与协作,同时也得到两位中国工程勘察大师陈德基、崔政权教授级高工的支持与指导,在此表示感谢。

对中国工程设计大师、原长江水利委员会总工程师、现任长江水利委员会技术委员会副主任洪庆余教授级高工为本书作序表示衷心的感谢。

本书在著述过程中,得到许多同仁的热心支持与协作,并引用了有关同志的资料。外单位主要有谭周地教授、董兆祥副教授、齐伟讲师、许兵研究员、徐卫亚教授、潘别桐教授、金淑燕副教授、李志昌高工,长江水利委员会有王幼麟、刘松涛、陈际唐、袁登维等教授级高工,于丙子、王锡类、李国彬、吴佑中等高工,满作武、姚家健、徐同海、黄正来、周习军等工程师。长江勘测技术研究所魏岩俊高工及罗红、陈嫣工程师给予了热心协助。中国地质大学出版社热情支持本书的出版。在此一并表示衷心的感谢。

限于著者水平,本书尚有欠妥或错误之处,敬请读者批评指正。

著者单位:水利部长江勘测技术研究所、长江水利委员会三峡勘测研究院、长江科学院。

著 者

1997年9月于武汉

目 录

第一篇 岩体形成的地质基础——岩体建造与改造综述

第一章 岩体建造与改造的地质作用及地质特征	(1)
第一节 岩体建造的地质作用及特征	(1)
第二节 岩体改造的地质作用及特征	(3)
第二章 地质改造的工程实例——复杂地基中的软弱层(带)	(13)
第一节 软弱层(带)的分类	(13)
第二节 软弱层(带)的工程岩土特性	(17)
第三章 结晶岩体建造与改造的地质特征	(23)
第一节 结晶岩体建造与改造的模式	(23)
第二节 结晶岩体的岩性、岩相及年代学研究	(25)
第三节 断裂构造发育特征及构造系统研讨	(30)

第二篇 岩体工程地质研究

第一章 结晶岩风化壳的化学风化及矿物蚀变趋势	(41)
第一节 结晶岩及其风化壳的物质成分和物理化学性质	(41)
第二节 化学风化特征、作用及矿物蚀变趋势	(46)
第三节 风化分带的化学风化特征值评价	(52)
第二章 结晶岩风化壳工程地质特征及分带定量划分方法	(54)
第一节 结晶岩风化壳研究回顾	(54)
第二节 风化状态分类及风化类型	(55)
第三节 风化分带及工程地质特征	(58)
第四节 风化壳的分布规律	(64)
第五节 风化分带的定量划分方法及数学模型建立	(67)
第三章 缓倾角结构面发育特征及连通系数研究	(76)
第一节 缓倾角结构面发育特征	(76)
第二节 缓倾角结构面连通系数研究	(78)
第三节 缓倾角结构面的分布规律	(86)
第四节 缓倾角结构面的形成力学机制分析	(87)
第五节 缓倾角结构面的发育程度分区	(87)
第四章 岩体结构特征及概率模型	(89)
第一节 结构面分类及分级	(89)
第二节 岩体结构分类及工程地质特征	(92)
第三节 岩体块度量测及评价指标	(96)
第四节 岩体结构概率模型	(101)
第五章 工程地质测试及参数相关性分析	(112)

第一节	简易工程地质测试技术和方法	(112)
第二节	测试成果及参数特征值	(114)
第三节	测试参数的概率分析	(119)
第四节	测试参数的相关性研究	(123)
第六章	结构面粗糙度量测及分级研究	(130)
第一节	概述	(130)
第二节	结构面表面形态的数学描述	(131)
第三节	结构面几何形态现场量测及粗糙度分级	(135)
第四节	结构面粗糙度的剪切性质	(145)

第三篇 工程岩石力学试验研究

第一章	岩石的物理力学性质	(149)
第一节	取样及试件制备	(149)
第二节	岩石的物理性质	(150)
第三节	岩石的变形性质	(156)
第四节	岩石的强度性质	(163)
第二章	岩体变形性质	(175)
第一节	承压板法	(175)
第二节	单(双)向法	(185)
第三章	岩体强度性质	(188)
第一节	抗剪强度	(188)
第二节	抗剪强度的影响因素	(191)
第四章	岩石的时间效应	(200)
第一节	岩石的压缩蠕变	(200)
第二节	结构面的剪切蠕变	(201)
第三节	工程岩体蠕变位移数据处理	(202)
第五章	工程力学参数选择	(205)
第一节	统计分析	(205)
第二节	优选斜率法	(207)
第三节	模糊选择	(208)
第四节	综合选择结果	(211)

第四篇 岩体质量评价及建基面优化选择研究

第一章	坝基岩体质量评价体系及研究方法	(213)
第一节	国内外研究概述及研究思路	(213)
第二节	岩体质量分级标准及“三峡 YZP 法”	(215)
第三节	模糊综合评判及贴近度分析	(221)
第四节	灰色聚类分析评价法	(226)

第五节 层次分析重排序次法——多参数动态定量分析法·····	(229)
第二章 弱风化岩体利用及建基面优化选择·····	(238)
第一节 国内外研究概述·····	(238)
第二节 建基面选择的历史回顾·····	(239)
第三节 弱风化岩体可利用性研究·····	(240)
第四节 坝基建基面优化选择研究·····	(246)
第五节 坝基利用岩体质量分区及评价·····	(250)

第五篇 工程岩体稳定及加固处理试验研究

第一章 缓倾不连续面岩体坝基深层抗滑稳定问题·····	(253)
第一节 问题的提出及研究现状·····	(253)
第二节 坝基概化地质模式确定的原则和类型·····	(254)
第三节 坝基深层抗滑稳定性及敏感度分析·····	(260)
第二章 坝基岩体应力场和位移场的数值分析·····	(267)
第一节 概述·····	(267)
第二节 坝基单滑面滑移类型(A型)的有限元分析·····	(270)
第三节 坝趾 F_7 断层压缩变形类型(B型)的有限元分析·····	(275)
第四节 坝基不同利用岩面选择类型(C型)的边界元分析·····	(280)
第三章 赤平极射投影求解空间共点力系的应用·····	(285)
第一节 力的概念、投影及工程实例·····	(285)
第二节 空间共点力系图解法应用·····	(289)
第四章 弱风化岩体加固处理试验及基础处理问题·····	(294)
第一节 弱风化岩体加固处理试验研究·····	(294)
第二节 大坝及厂房基础处理措施建议·····	(300)

第六篇 地质力学模型研究

第一章 概述·····	(302)
第二章 相似原理·····	(303)
第三章 模型材料·····	(306)
第一节 概述·····	(306)
第二节 岩体的模拟材料·····	(306)
第三节 结构面模拟材料·····	(311)
第四章 模型的加载与量测·····	(318)
第一节 加载方法·····	(318)
第二节 量测系统·····	(321)
第五章 三峡地质力学模型应用实例·····	(324)
第一节 三峡左厂房坝段整体稳定研究·····	(324)
第二节 三峡船闸地质力学模型结构稳定研究·····	(334)

主要参考文献.....	(339)
英文摘要.....	(341)

CONTENTS

Section 1	Introduction of Geological foundation of the formation of rock mass—construction and reformation of rock mass	
Chapter 1	Geological function and features of construction and reformation of rock mass	
	.....	(1)
1.	Geological function and features of construction of rock mass	(1)
2.	Geological function and features of reformation of rock mass	(3)
Chapter 2	Examples of geological reformation—Soft bedding in complex foundation	.....
	.....	(13)
1.	Classification of soft bedding	(13)
2.	Engineering characteristics of soft bedding	(17)
Chapter 3	Geological features of construction and reformation of crystal rock mass	.....
	.....	(23)
1.	Model of construction and reformation	(23)
2.	Study of the lithology, lithofacies and dating	(25)
3.	Development characteristics of fault structure and structure system	(30)
Section 2	Study of engineering geology on rock mass	
Chapter 1	Chemical weathering of crystal rock and weathered crust and the tendency of mineral alteration	.....
	.....	(41)
1.	Composition and physical and chemical properties of crystal rock and its weathered crust	.....
	.....	(41)
2.	Features and function of chemical weathering and the tendency of mineral alteration	.....
	.....	(46)
3.	Chemical features of weathering division	.....
	.....	(52)
Chapter 2	Engineering geological features of weathered crystal rock and their quantitative classification	.....
	.....	(54)
1.	Study history of weathered crust of crystal rock	.....
	.....	(54)
2.	Weathering types and physical classification	.....
	.....	(55)
3.	Zonation of weathered rocks and their engineering geological features	.....
	.....	(58)
4.	Distribution of the weathered crust	.....
	.....	(64)
5.	Quantitative division of weathered rocks and building the mathematical models	.....
	.....	(67)
Chapter 3	Gentle dipping discontinuity and the connection coefficient	.....
	.....	(76)
1.	Features of the gentle dipping discontinuities	.....
	.....	(76)
2.	Connection coefficient	.....
	.....	(78)
3.	Distribution of discontinuities	.....
	.....	(86)
4.	Formation mechanism of gentle discontinuities	.....
	.....	(87)
5.	Growth of gentle dipping discontinuities	.....
	.....	(87)
Chapter 4	Rock mass structure and probability model	.....
	.....	(89)

1. Division of discontinuities	(89)
2. Division of rock mass structure and engineering geological features	(92)
3. Measurement of the block degree and evaluation indeces	(96)
4. Probability model of rock mass structure	(101)
Chapter 5 In-situ Measure ment of engineering geological parameters and correlation analysis	(112)
1. Technique and method of in-situ measurement	(112)
2. Some characteristic values	(114)
3. Probability analysis of the measured parameters	(119)
4. Correlation analysis of the parameters	(123)
Chapter 6 Study of roughness of discontinuities	(130)
1. General	(130)
2. Mathematical description of discontinuity surface	(131)
3. In-situ measurement of discontinuity surface and division of the roughness	(135)
4. Shear nature of discontinuity roughness	(145)
Section 3 Laboratory mechanical study of rock	
Chapter 1 Physical and mechanical features of rock	(149)
1. Sampling and preparations	(149)
2. Physical features of rock	(150)
3. Deformation features of rock	(156)
4. Resistance of rock	(163)
Chapter 2 Deformation of rock mass	(175)
1. Bearing plate	(175)
2. One dimensional (bi-axial) method	(185)
Chapter 3 Resistance of rock mass	(188)
1. Shear strength	(188)
2. Affecting factors of shear strength	(191)
Chapter 4 Time-dependent effect	(200)
1. Compressive creep of rock	(200)
2. Shear-creep of discontinuity	(201)
3. Processing of the displacement data of rock mass creep	(202)
Chapter 5 Selection of mechanic parameters	(205)
1. Statistic analysis	(205)
2. Optimized rate of oblique method	(207)
3. Fuzzy selection	(208)
4. Comprehensive selection	(211)
Section 4 Rock mass quality and optimization selection of available rock in dam foundation	
Chapter 1 Rock mass quality system of dam foundation and evaluation method	(213)
1. General situation and study scheme	(213)
2. Division of rock quality and YZP method	(215)

3. Fuzzy-comprehensive appreciation and similarity degree method	(221)
4. Gray cluster analysis	(226)
5. Multiparametric dynamic quantitative analysis	(229)
Chapter 2 Availability of weakly weathered rock mass and optimization selection of available foundation	(238)
1. General situation both at home and abroad	(238)
2. History of selecting available foundation	(239)
3. Availability of the weakly weathered rock	(240)
4. Optimization selection of foundation rock	(246)
5. Quality division of foundation rock and appreciation	(250)
Section 5 Rock stability and reinforce treatment	
Chapter 1 Deep slide-resistant stability along gently dipping discontinuity	(253)
1. Existing Study	(253)
2. Geologic model of the foundation rock	(254)
3. Deep slide-resistant stability and sensibility study	(260)
Chapter 2 Mathematic model of the stress and displacement fields of foundations	(267)
1. Introduction	(267)
2. Finite element analysis of plan slide (type A)	(270)
3. Finite element analysis of compressive deformation along the fault F7 (type B)	(275)
4. Boundary element analysis of foundations with different foundation rocks	(280)
Chapter 3 Application of the stereography	(285)
1. Concept of force, projection and examples	(285)
2. Graphic interpretation and friction circle method	(289)
Chapter 4 Reinforce treatment of weakly weathered rock and treatment of dam foundation	(294)
1. Reinforce treatment of weakly weathered rock	(294)
2. Proposal on the treatment of foundations of dam and powerhouse	(300)
Section 6 Study of geomechanical model test	
Chapter 1 Introduction	(302)
Chapter 2 Principle of similitude	(303)
Chapter 3 Model materials	(306)
1. Introduction	(306)
2. Simulate materials of rock mass	(306)
3. Simulate materials of faults and joints	(311)
Chapter 4 Loading and measurement of models	(318)
1. Loading methods	(318)
2. Measuring system	(321)

Chapter 5 Examples of geomechanical model application on Three Gorges Project	
.....	(324)
1. Study on Monolithic stability of Three Gorges left power plant dam sections	(324)
2. The geomechanical model test on the stability of Three Gorges ship lock	(334)
References	(339)
English Abstract	(341)

第一篇 岩体形成的地质基础—— 岩体建造与改造综述

第一章 岩体建造与改造的地质作用及地质特征

自然界各种地质环境中的岩体，均经历了漫长地质历史的岩相建造及成岩后改造的地质作用过程，形成了多裂隙、多断层、多软弱层（带）或剪切带的不连续岩体，破坏了原岩完整性及均一性，增大了透水性，构成了现今的岩体结构及岩体赋存的环境条件——地应力、地下水、地温。岩体工程地质的基础研究，就是应用地质学诸学科的理论与方法，对其形成和演化的不断发展的地质环境——地壳变动的构造环境与岩浆活动、沉积环境、外动力地质作用环境做进一步分析，从而对岩相建造与改造的地质特征做进一步剖析，是工程地质学的重要研究内容之一。

第一节 岩体建造的地质作用及特征

岩体建造系指岩石形成过程、物质组成、岩性岩相变化及物理化学条件。按成因可划分为三大类：沉积岩建造、岩浆岩建造、变质岩建造。而每个大类中又根据不同的生成环境特点及物质组成划分出若干岩相建造。

一、沉积岩建造

由于沉积环境及物质组成不同，形成了各种沉积相：深海相、浅海相、滨海相、河湖相、三角洲河口相、潮汐相以及水域过渡相（如滨海-浅海相）等，由化学沉积和机械沉积而形成的碳酸盐岩与碎屑岩，具层状岩体特征。其中河湖相和潮汐相的碎屑岩常形成于相对不稳定或动荡不定的沉积环境中，沉积韵律、物质组成、厚度均变化较大，形成的原生软弱岩层或夹层，层次多，厚度薄，连续性差，有的呈多层透镜状分布，成岩作用差，力学强度低，如富含粘土矿物的粘土岩、粉砂质粘土岩、页岩、粘土质粉砂岩。浅海及滨海相沉积的碳酸盐岩及碎屑岩，形成于相对稳定的沉积环境中，岩相变化小，层位稳定，连续分布，沉积韵律间隔大，成岩作用好。原生软弱岩层或夹层主要为泥质粉砂岩、页岩（泥质、砂质、碳质）、粉砂质粘土岩，以及富含碳酸盐的泥灰岩、泥质白云岩，呈极薄层、薄层—中厚层状。

沉积岩建造经后期构造改造后，层状岩体普遍发生不同程度的褶皱和断裂，软硬相间的

岩层普遍发生层间错动，层间剪切带发育。软弱夹层及泥化夹层是工程地质研究重点。对软弱夹层的发育及分布规律、物质组成（粒度成分、矿物成分、化学成分）、微观结构、物理力学属性等需要进行详细的勘察、试验研究。

二、岩浆岩建造

岩浆岩建造的形成条件与沉积岩建造有显著区别，按成因及岩相建造特征，划分出两种基本类型：火成岩型岩相建造；喷溢型火山岩相建造。其形成都与不同时期的地壳构造运动相伴而生。

火成岩型岩相建造，形成于高温、高压的物理化学条件和环境中，经过岩浆结晶分异作用、同化混染作用、热液浸染的蚀变作用，在不同的温度和压力下，形成了超基性、基性、中性、酸性的各类结晶岩侵入体，并伴有捕掳体、包体。残余岩浆又经多期脉动式侵入，形成了从酸性—基性的不同期岩脉、岩株或岩墙。在岩浆处于流动和冷却过程中，常形成原生流动构造——流层、流线和原生节理（L、S、Q）。岩体呈原生的块状特征，岩石普遍具有结晶连结，岩性较均一，力学强度高，透水性微弱，是该类岩相建造的共性特征。但是经过后期改造后的岩体，却发生了很大变化，主要表现在经受多期构造运动影响，断裂构造发育，风化、卸荷作用影响显著，破坏了岩体均一性和完整性，是工程地质研究的重点。

喷溢型火山岩相建造，由火山喷发和溢流物经沉积而成。火山喷发沉积的软弱层——陆相火山碎屑岩，如凝灰岩、脱玻珍珠岩，分布连续，厚度变化大，成岩作用较好。而玄武岩具有多期间歇性喷发轮回，有明显的风化剥蚀面，堆积了火山碎屑的砂泥质物质，成岩作用差，厚度变化大，经构造改造及次生地质作用，形成多层性状差的软弱夹层。如我国吉林镜泊湖玄武岩，四川峨眉山玄武岩都是典型实例。由于熔岩流动和冷凝作用，形成了独特的原生构造——原生流动构造、气孔状构造、杏仁状构造以及柱状节理。该类岩相建造，岩性、岩相变化及岩面起伏均较大，岩体工程地质性质差别颇大。

三、变质岩建造

变质岩建造是在沉积岩和岩浆岩建造的基础上，又遭受区域动力变质作用和接触变质作用（如热接触变质作用和接触交代变质作用）改造而成。由于温度（高温、中温、低温）和压力的组合条件及环境不同，形成了复杂的具有不同变质程度（深、中、浅）的变质岩系的岩相建造，主要有变质的碎屑岩型、变质的碳酸盐岩型（如大理岩）、变质的复理石型、变质的火山岩型。岩性、岩相变化复杂，岩石类型繁多，其形成与母岩的物质组成和变质过程中的物理化学环境有密切关系。浅变质或中等变质的碎屑岩型、复理石型，均系砂岩与页岩、板岩互层，具有明显的沉积韵律，层位稳定，分布连续。经构造改造后，层间错动普遍发育，软弱岩层或软弱夹层多，特别是泥质板岩易风化，常成泥化板岩，性状差，力学强度低。如湖南五强溪、凤滩工程，属前震旦系板溪群，为滨海—浅海相的类复理石建造，砂岩、长石石英砂岩、石英岩与板岩、砂质板岩、千枚状板岩、块状泥质板岩互层。各类板岩均含有大量绢云母，少量石英、绿泥石、碳酸盐、氧化铁、粘土矿物为原生云母类，含少量高岭石、水云母、蒙脱石。各类板岩岩性软弱，极易风化。

深变质的碎屑岩型，如副变质岩的片岩类：云母片岩、绿泥片岩、滑石片岩、石墨片岩等，矿物成分以绢云母、绿泥石、滑石为主，物质组成复杂，为软弱的岩性组合，由于受构造应力作用，矿物呈定向构造，片理、流劈理、扭曲褶皱极为发育，岩性不均一性及各向