

RUANYANGONGCHENG
SHEJILILUNYUSHIGONGSHIJIAN

软岩工程 设计理论与施工实践

刘特洪 林天健 编著



中国建筑工业出版社

Tu4
2001265

软岩工程设计理论与施工实践

刘特洪
林天健 编著

中国建筑工业出版社

序

随着我国经济与技术的迅速发展,涉及岩土工程的建设项目在城乡建设、水利水电、交通、矿山、建筑、海港,以及国防军事与人民防空工程等领域都急剧增多,其规模也越来越大,在整个国民经济中占有举足轻重的地位。

岩土力学与工程的实践性和工程应用性都很强,为了学以致用,就必须以理论为依据、工程为纽带,在实践中灵活运用基本理论解决实际问题。岩土力学与工程的研究对象是多相、各向异性的裂(孔)隙地质介质体,这就决定了它正是由多学科相互依赖和补充而派生出来的一门边缘学科。岩土力学在岩土工程中的表现形式,与地质和水文条件密切相关,与工程类别、施工工艺、支护方式,以及时空域等因素也都有相辅相成的关系。这些特点决定着对岩土力学与工程问题必须采用多种方法、多种技术来进行综合性的分析研究。事实上,近年来这种综合性的研究方法已经日益成为各国岩土力学与工程界的共识。

岩石力学与工程是一门既富理论内涵、实践性又很强的应用学科。现代岩石工程的规模日益宏大,其勘测、设计和施工方面的技术课题也愈趋复杂,如何将源于工程和生产,从实践中产生的问题上升到理性高度,运用科学实验与测试以及数学力学、计算机科学等现代化手段使能从其本质与机理上来认识、理解与探讨,进而得以深刻地论述、剖析与鉴别问题的实质;再将分析结果返回到实践中去检验,这样经过多次反馈、修正与进一步升华,最终得到问题的优化抉择与解决。这种研究问题的方法与手段就构成了现代岩石力学与工程学科的主要内容。

我有幸拜读了由刘特洪、林天健先生编著的《软岩工程设计理论与施工实践》一书的初稿。书中论述的观点和研究方法是与我以上的看法吻合一致的,深感非常难能可贵。在本书中,对遍布我国大部分地区的软岩进行分类,阐明软岩的地质与工程特征及其环境效应,还系统介绍了软岩的变形和强度特性及其间的物理关系与本构方程。书中重点研讨了软岩的流变属性,这种依附于时间增长的变形发展——蠕变,与在应变保持常值不变条件下岩体应力随时间而持续降低(松弛)及其长期强度的衰减三者构成了软岩流变的特色。本书还概括了膨胀性软岩的洞室稳定、坝基软弱层的抗滑稳定以及软岩边坡和软岩桩基等几乎涵盖了软岩工程的主要型类和内容,所有这些在本书中均有清晰的论述。

本书有别于一般教材的传统论述方法,致力于将工程地质、地质力学、岩体构造、工程类比等各种技术手段有机地渗入到软岩力学与工程分析研究领域,体现了学科之间相互交叉、渗透与融合,并在其结合点上派生出新的学科分支生长点的新思想。

本书可说是理论密切联系工程实际的佳作,我认为它是当之无愧的。本书的付梓问世,当使广大读者从学习本书中汲取营养、备受教益,这是可以预期的,实在可喜可贺,故乐于写述了上面的一点文字,谨供参考、指正。

中国科学院院士
国际岩石力学与工程学会副主席
同济大学校务委员
岩土工程系名誉系主任

孙钧

千禧龙年早秋
于上海同济大学

前 言

软岩是世界上分布最广泛的一种岩石,其中泥岩与页岩就占地球表面所有岩石的 50% 左右。在建筑工程、水利水电工程、铁路、道路和港口工程、矿山工程以及国防军事工程等领域中都常常遇到与软岩有关的复杂技术问题。可以说,工程的兴建与否、成败、造价与安全大多与软岩密切相关。因此,分析与总结软岩的许多试验研究成果和工程实践经验,对指导今后的岩土工程建设无疑地具有重要的现实意义。

岩土工程的实践表明,软岩工程与硬岩的情况大不相同,软岩工程有其独有的特点,用硬岩的弹性理论和弹塑性变形理论不能充分说明软岩的变形和破坏机制。已有的硬岩施工工艺和施工、设计规范不能照搬用于软岩工程。软岩工程实践和一些文献已发现和指出:传统的岩石力学中关于坚硬岩石的脆性破坏模式和强度准则、松动压理论、普氏塌落拱理论等已不能解释和处理软岩的膨胀、流变、滑移、位错和阳离子交换等现象。而且,在环境条件变化时,硬岩也可转变出现软岩特征。软岩科学发展的客观形势要求而且正在实现一系列的改革和突破,例如进行了综合性完整实验研究,丰富了软岩工程支护的技术工艺和理论基础,发展了软岩工程二次支护,联合支护及多次支护理论、促进了软岩粘弹塑性理论的充实和发展、成功地实践了像一次支护锚喷再加上各种二次支护等许多施工新工艺、构思了许多新的软岩工程设计以及现场监控量测手段的提高等。

面对这许多新的复杂的情况和科研成果、许多工程对正确的软岩工程理论指导的迫切需要以及运用软科学方法去解释复杂工程问题的前景,在新世纪到来的时候,为软岩工程科学的系统和完善以及反映本专业的最新发展,撰写这本《软岩工程设计理论与施工实践》,向广大读者展示出软岩工程科学的绚丽多彩的内容,这就是作者的一点心愿。

本书的基本素材来源于四个方面:(1)作者参与主持一些软岩工程的勘察设计、试验研究与施工,获得了丰富的第一手可贵的资料;(2)作者参与国家“六五”科研复杂地基工程地质研究,吸取了许多专家提供的一些大型水利水电工程的理论研究成果和工程实践经验;(3)作者在七八十年代参观考察了国内许多大型水利水电工程的软岩技术难题的处理措施,收集了大量的工程实例;(4)书中有些主要内容和观点摘引于各章所附的有关参考文献。在此,谨向给作者提供过资料的专家以及参考文献中的原作者致以衷心的感谢。

本书的主要内容有如下几个方面:

1. 软岩的类型及结构特征

论述了国内外软岩的分类原则,工程建设中常遇到的缓倾角软岩层的发育规律,软岩的结构特征和物质成分。并介绍了我国一些著名学者对当前岩石力学研究发展方向的新观点,如分叉与突变理论,浑沌理论、损伤细观非线性力学理论,非线性岩石力学的数值分析,以及扩容膨胀效应等。

2. 软岩工程性质的环境效应

全面系统地分析了软岩的环境应力场与工程性质的关系;软岩浸水软化崩解、侵蚀、冲刷、渗透稳定性、水环境效应的利用等与水作用的有关工程问题,以及高温与负温条件下软岩的工程性质。

3. 软岩的变形与强度特性

根据大量工程软岩的抗压强度、变形模量、抗剪强度、抗钻进爆破作用的强度等试验成果分析,

建立了软弱层的主要物理性指标与抗剪强度参数的近似相关方程,并讨论了软岩强度的结构效应以及影响软岩强度的主要地质因素。同时综述了软岩变形与强度的复杂关系及数学表达式、中间主应力对变形与强度的影响,提出了屈服面的复杂本构方程的一些见解。

4. 软岩弹塑性本构方程

介绍了一些工程典型软岩的常规应力应变实验曲线与流变试验曲线,以及所建立的弹塑性本构方程,弹塑性损伤本构方程、软岩的流变方程,并对它们的实用性作了评述。同时还探讨了软岩变形速率过程理论、软岩破坏后本构关系的数学表达及流变的机理问题。

5. 软岩洞室工程的设计与治理

根据膨胀性软岩的变形机理,分析了软岩洞室工程锚喷支护设计和治理措施的有关问题,并提出了变形监测设施的原则和特定条件下围岩失稳的评判标准。

6. 坝基软弱层抗滑稳定的分析方法

根据大量的工程实例,从力学角度考虑将软弱夹层分为三种类型,即泥化夹层、碎屑夹层和碎块夹层,并评述了坝基稳定分析中软弱层抗剪强度参数的选择准则和各类软弱层面的不同组合形式与各种型式的下游抗力体的抗滑稳定计算模型,同时总结了坝基软弱层的处理方法。

7. 软岩边坡稳定性问题

全面系统地介绍了软岩边坡破坏类型特征、稳定性的分析方法、软岩边坡的动力稳定性和软岩滑坡速度问题,以及软岩边坡加固的技术和监测预报系统理论及其进展。

8. 软岩桩基承载性状分析

根据大量工程实测资料分析,软岩灌注桩不同长径比的桩侧阻力和端承力的分配性状特征,并论述了软岩桩基承载力的确定方法以及可靠性分析。

在本书编写过程中,水利部长江勘测技术研究所的领导给予了大力的支持。孔宪立、殷宗泽、刘祖德、陆士强、郑颖人、杨裕云等教授审阅了本书,提出了许多宝贵的修改意见,作者向他们表示深切的谢意。

本书由高大钊教授主审,中国科学院院士孙钧为本书作序,是作者莫大的荣幸。

刘特洪

林天健

2000年5月

目 录

第一章 软岩的地质特征及其研究现状与发展方向	1
一、软岩分类	1
二、软岩分布区域特征	5
三、软岩物质成分	8
四、软岩结构特征	12
五、软岩研究现状及发展方向	16
第二章 软岩工程性质的环境效应	22
一、软岩工程性质与环境应力场	22
二、软岩与水作用的危害和利用	34
三、软岩的渗透稳定性	41
四、高温和负温下软岩的环境效应	46
五、软岩的冲刷效应	55
六、软岩工程性质环境效应理论综述	57
第三章 软岩的变形特性和强度特性	79
一、关于现象学观察与分析的若干信息	79
二、软岩的残余强度及残余强度理论	89
三、软岩抵抗机械性钻进和炸药爆破作用的强度	92
四、软岩强度的结构效应	96
五、软岩物理性质与强度的相关性	105
六、影响软岩强度的地质因素分析	114
第四章 软岩的变形与强度的关系	124
一、从“假想”的途径说起	124
二、软岩变形与强度关系的现象学分析	125
三、软岩变形与强度关系的数学表达	129
四、屈服面模型的缺陷——角隅和尖点	132
五、中间主应力 σ_2 对软岩的变形与强度关系的影响	135
六、“回避”也是一种途径	137
第五章 软岩弹塑性本构方程	139
一、软岩应力应变实验曲线	139
二、软岩弹塑性本构方程	148
三、弹塑性损伤本构方程	155
四、软岩变形速率过程理论	159
五、软岩变形破坏机理分析	161
六、关于软岩弹塑性本构方程若干问题的说明及评述	163
第六章 软岩的流变特性	171
一、软岩流变的实验曲线	171
二、软岩流变的本构方程	175

三、软岩的长期强度	191
四、弹粘塑性体的有限元法解析	196
五、软岩流变的机理探讨	201
六、软岩流变特性研究的新进展	203
第七章 膨胀软岩洞室稳定问题	207
一、膨胀软岩洞室的膨胀压力讨论	207
二、膨胀软岩的本构方程	214
三、膨胀软岩洞室锚喷支护设计	217
四、无支护地下洞室稳定性检验	224
五、膨胀软岩隧道工程治理	225
六、膨胀软岩隧洞变形监测	228
七、关于软岩洞室稳定的若干非常规概念	233
第八章 坝基软弱层抗滑稳定问题	238
一、软弱层分类的研究现状	238
二、软弱层面的本构关系	243
三、稳定分析抗剪强度参数的选择	248
四、软弱层抗滑稳定分析	253
五、坝基软弱层的处理方法	263
第九章 软岩边坡工程	267
一、软岩边坡破坏类型特征	268
二、软岩边坡防治工程的特殊预备性工作	272
三、软岩边坡稳定性分析方法	278
四、软岩边坡的动力稳定性	337
五、软岩滑坡速度分析	345
六、软岩边坡加固技术	347
七、软岩边坡稳态趋势预报	359
第十章 软岩桩基础	377
一、软岩桩基承载性状分析	377
二、软岩桩基承载力的确定	394
三、原位测试法确定单桩承载力	417
四、人工挖孔灌注桩	425
五、软岩桩基可靠性分析	428

第一章 软岩的地质特征及其研究现状与发展方向

软岩,虽然这个名词在工程界已为人们所熟知,但实际上人们对软岩的概念还是模糊的,怎样才算软?软岩的定义又是什么?在本章中将尽可能给出明确的说明。

软岩在世界上分布非常广泛,泥岩与页岩就占地球表面所有岩石的 50% 左右。它与工程建设息息相关,特别是对大坝、隧洞、边坡工程的稳定性起控制作用,如丹江口、葛洲坝、铜街子、小浪底、桓仁、上犹江、朱庄等大型水电工程坝基都存在软岩类的软弱夹层,其中葛洲坝工程是一个典型,坝基下埋藏产状近水平的软弱夹层有 50 多层,为探明软弱夹层成因类型和分布规律,采用小口径钻孔、大口径钻孔、平硐、探井、钻孔彩色电视与地球物理勘探以及现场地应力测量等方法;达开水库输水隧道软岩引起的坍方占坍方量的 70%;四川中江县马鞍山隧洞粘土岩膨胀导致变形与垮塌;贵州各地区边坡滑动灾害中由软弱层引起约占 60%。在世界上有关水工建筑物事故的统计中,由于软岩的存在而引发的,可以举出如下一些较突出的实例:美国圣佛兰西斯坝,因粘土胶结的砂砾岩被水浸润软化而引起滑动;美国俄亥俄河 26 号坝,沿坝基下 5cm 厚的页岩层发生滑动;美国奥斯丁重力坝,沿石灰岩内的页岩夹层而滑动;法国布泽坝,沿坝基龟裂的红色砂岩上的粘土层发生滑动;印度的堤格拉坝,在砂页岩互层中发生滑动等等。因此,探讨软岩的成因类型与空间展布规律、物质成分与结构特征、软岩与围岩的接触形态、地质时代与强度的关系等都是研究软岩特殊工程性质和优化工程治理的至关重要问题。

软岩的分类及其特征是作为工程环境和对象的软岩发挥其工程功能的物理基础,为此,本章将对其作较为详细的叙述。

一、软 岩 分 类

软岩的分类是当前国际土力学与基础工程界、岩石力学与工程地质界所关注的问题;许多研究者认为,软岩是介于松散介质和坚硬岩石之间的岩类。它可以来源于松散介质经沉积作用、成岩作用向坚硬岩石过渡的岩类,也可以来源于坚硬岩经构造作用或风化作用向松散介质转化的岩类。例如蓄厚增提出图 1-1 的软岩形成基本模式。因此,广义的软岩应该包括原生软岩、风化软岩、断层破碎软岩,而膨胀岩是作为软岩的一个重要组成部分。

1. 软岩按强度分类

从力学方面考虑,软岩是具有变形大、强度低,赋存环境效应和时间效应强烈的岩体。目前,岩体分类按照建筑物的不同种类,如大坝、隧洞、边坡工程等有各种方法。岩体分类需要考虑岩体的强度、变形特性、透水性、稳定性等,但工程种类不同,考虑的因素是有区别的。这里将岩石按强度标准划分列于表 1-1。此外,为了与国外的分类标准对比,在表 1-2 和 1-3 中给出了日本两个坝址软岩分级的实例。

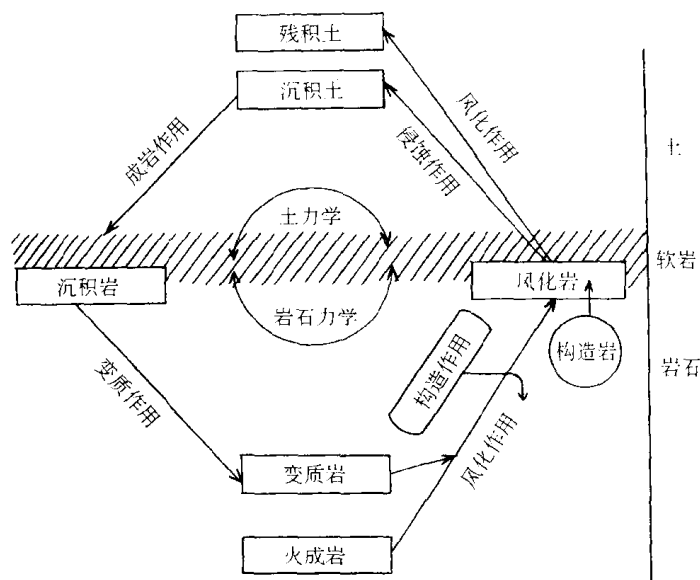


图 1-1 软岩形成模式

国内岩石坚硬程度的强度划分

表 1-1

名 称	硬质岩 R_c (MPa)			软质岩 R_c (MPa)		
	极硬岩	坚硬岩	软硬岩	较软岩	软 岩	极软岩
建筑地基基础设计规范 (GBJ 7—89)	>30			<30		
公路与桥涵地基基础设计规范 (JTJ 024—85)	>30			5~30		<5
国防工程锚喷支护技术暂行规定 (总参, 1984 年)	>60	30~60		15~30	5~15	<5
铁道工程地质技术规范 (TBJ 12—85)	>60	30~60		5~30		<5
隧道工程岩体分级探讨 (中国铁道出版社, 1987 年)	>100	60~100	30~60	10~30		<10
工程地质手册 (1992 年)	>60	30~60		5~30		<5
岩土工程勘察规范 (GB 50021—94)	>60	30~60		5~30		<5
水工隧洞设计规范 (SD 134—84)	>120	60~120	30~60	15~30		<15
水电站大型地下洞室围岩稳定和支护的研究和实践成果汇编 (1986 年)	>100	60~100	30~60	15~30	5~15	<5
工程岩体分级标准 (GB 50218—94)	>60		30~60	15~30	5~15	<5

日本 B 坝岩石分级标准

表 1-2

岩石分级	岩 相	凭肉眼观察分类	岩石的单轴抗压强度 (kgf/cm ²)	岩石的针入强度 (kgf/mm)	岩石的抗剪试验值 (kgf/cm ²)
软岩 C _L	细粒砂岩凝灰 岩海绿石砂岩	2cm 大小的岩片, 经指压成为砂状	不足 20	不足 0.5	$\tau_0 = 20 \sim 35, \phi = 45^\circ$
坚硬岩石 C _M	微粒砂岩	岩片指压不碎	20 以上	0.5 以上	$\tau_0 = 37 \sim 62, \phi = 45^\circ$

日本坝基岩石分级标准

表 1-3

岩 石 分 级	组成颗粒状态		节 理 状 况			钻芯的地质特征	备 注
	风化状况	岩石及其 本身的硬度	节理间距	节理的 开口状况	节理面状况		
C	C _{Mh}	新鲜	坚硬, 锤重敲 时略有凹陷	50cm 以上	闭 合	新鲜, 完 全未风化	新鲜, 节理面未粘 附风化生成物, 用锤 轻敲不开裂, 芯样为 条状—长条状
	C _M	一般新 鲜, 仅沿裂 隙面稍有 风化	坚硬, 锤重敲 时略有凹陷	20~50cm	一般闭合	略有污 染呈褐色	一般新鲜, 节理面 污染成褐色, 芯样为 短条状
	C _L	已风化, 呈褐色的 部分较多	质地稍软, 用 锤轻敲岩块剥 落	20cm 以上	呈开口状	风化污 染成褐色, 有风化物 薄层粘附	风化稍有发展, 用 锤轻敲即易开裂, 芯样为角砾状—片 状
D	强风化, 呈红褐色	明显软化, 用 锤轻敲即遭破 坏	强风化, 变成了土块状, 节理面 不明显			风化已有发展, 芯 样呈软弱泥砂状, 用 指尖即可破碎岩片	岩石试验强度 无明显差别, 在 岩石分级图上统 一为 C _{M:τ₀} = 10kgf/cm ² ; $\phi =$ 35°左右, 不适于 作为坝基

2. 软岩的成因类型

软岩从成因方面考虑可分为原生类型和次生类型, 后者还可划分为风化软岩与断裂破碎软岩。

(1) 原生软岩, 主要是指沉积岩。它是由松散堆积物在温度不高和压力不大的条件下形成的, 是地壳表面分布最广的一种层状岩石, 粘土基质含量高, 胶结程度差, 吸水时往往具有膨胀性与易溶性, 其工程性质与胶结物成分及含量密切相关, 如粘土岩、泥质砂砾岩、页岩、泥灰岩、疏松砂岩、云母片岩、岩盐、石膏等。在宏伟的南水北调中线总干渠穿过粘土岩与泥质砂砾岩的地层约 205km, 占全线的 16.7%, 部分建筑物的桩基也以这类岩体作为持力层。

(2) 风化软岩, 岩体的风化程度随深度增加而减弱, 完整的风化剖面其风化程度可划分为五带: 未风化带、微风化带、中等风化带、强风化带及全风化带。对于硬质岩石风化成的软岩主要是全风化带与强风化带及少数中等风化, 如表 1-4 所示。对于软岩的风化程度分类可参见表 1-5。

花岗岩按风化程度划分

表 1-4

岩石类型	风化程度	声 波 试 验		点荷载试验		回弹仪试验
		纵波速 V_p (m/s)	风化系数 k_f	标准点荷载强度指数 $I_s(50)$	点荷载抗拉强度风化降低率 $f_{st}(\%)$	回弹值 R (次)
广义软岩	全风化岩	<2000	0.6~0.8	<0.5	>85	<20
	强风化岩	2000~3000	0.4~0.6	0.5~3.0	55~85	20~35
硬质岩	中等风化岩	3000~4000	0.2~0.4	3.0~6.0	10~55	35~50
	微风化岩	4000~5000	0~0.2	>6.0	<10	50~65
	新鲜岩体	>5000	0			>65

注：1. 风化系数, $k_f = \frac{V_p - V'_p}{V_p}$ 式中 V_p 和 V'_p 为新鲜和风化岩的波速；

2. 点荷载抗拉强度风化降低率, $f_{st} = \frac{S_t - S'_t}{S_t}$, 式中 S_t 和 S'_t 为新鲜和风化岩的点荷载抗拉强度。

软岩按风化程度分类

表 1-5

岩石类别	风化程度	野 外 特 征	风化程度参考指标			地基承载力 (MPa)
			纵波速 V_p (m/s)	波速比 K_v	风化程度 系数 K_R	
软 岩	未风化	岩质新鲜, 未见风化痕迹	>4000	0.9~1.0	0.9~1.0	2.0~3.0
	微风化	组织结构基本未变, 仅节理面有铁锰质渲染或矿物略有变色。有少量风化裂隙	3000~4000	0.8~0.9	0.8~0.9	1.2~2.0
	中等风化	组织结构部分破坏, 矿物成分发生变化, 节理面附近的矿物已风化成土状。风化裂隙发育, 岩体被切割成 20~50cm 的岩块, 锤击易碎, 用镐难挖掘。岩芯钻方可钻进	1500~3000	0.5~0.8	0.3~0.8	0.5~1.2
	强风化	组织结构已大部分破坏, 矿物成分已显著变化, 含大量粘土质粘土矿物。风化裂隙很发育, 岩体破碎。岩体被切割成碎块, 干时可用手折断或捏碎, 浸水或干湿交替时可较迅速地软化或崩解。用镐或锹可挖掘, 干钻可钻进	700~1500	0.3~0.5	<0.3	0.2~0.5
	全风化	组织结构已基本破坏, 但尚可辨认, 并且有微弱残余结构强度, 可用镐挖, 干钻可钻进	300~700	0.1~0.3	<0.2	<0.2

注：1. 波速比(K_v)为风化岩石与新鲜岩石压缩波速度之比。

2. 风化程度系数(K_R)为风化岩石与新鲜岩石饱和单轴抗压强度之比。

(3) 断裂破碎软岩, 是由构造应力作用形成的软岩, 主要包括断裂带中的软弱糜棱岩、火成岩侵入过程中的接触变质破碎软岩、层间错动的软弱层。如表 1-6 所示。这类软岩对工程稳定影响最严重的是层间错动的软弱层。

断层破碎软岩分类

表 1-6

类 别	地 质 特 征	抗剪强度参数		变形模量
		$C(\text{kPa})$	$\text{tg}\phi$	$E_0 \times 10^3(\text{MPa})$
断裂糜棱岩带	多出现在压扭性断层中,厚度变化大	35~80	0.35~0.55	0.25~7.00
蚀变破碎软岩	厚度与产状变化较大	20~55	0.20~0.50	0.20~4.00
层间错动软层	连续分布,倾角平缓,厚度薄	10~40	0.15~0.45	0.03~0.70

3. 软岩按时代划分

有的研究者通过实验结果表明,不同地质时期形成的软岩其经受的构造运动次数不同,成岩和压密作用不同,因而粘土矿物成分及含量也各不相同。按生成时代和粘土矿物特征可将软岩分为三种类型:

(1) 古生代软岩,主要包括中上石炭系及二叠系软岩,其主要的粘土矿物为高岭石,其次为伊利石和伊蒙混层矿物,基本上不含蒙脱石。

(2) 中生代软岩,主要包括侏罗、白垩系及部分三叠系软岩,主要粘土矿物为伊蒙混层,其次为高岭石、伊利石,蒙脱石含量一般低于 10%。

(3) 新生代软岩,主要是第三系软岩,粘土矿物以蒙脱石为主,其次是伊蒙混层和高岭石。

分类是一种晰化的手段,软岩的分类实质上是借助于某种标准使表征软岩特性的一些潜信息显现,它有助于软岩工程设计中的初步分析,但绝不能代替试验和测定。此外,国际上存在着多种软岩分类方法和分级方式,有兴趣的读者可以参阅文献^[1.15]等。

二、软岩分布区域特征

软岩的分布区域与气候、地形、生物、地质构造等因素密切相关。原生软岩常见于新生代海相沉积或陆相沉积的碎屑岩中,如泥岩、页岩、泥灰岩和泥质砂岩等,其岩性在水平方向与垂直方向常不稳定;多见泥岩与砂岩互层或泥岩呈夹层分布。在古气候干旱山间盆地则为红色碎屑岩系,例如西北地区呈东西向延伸的红色碎屑岩夹石膏;西南地区四川盆地和北方鄂尔多斯盆地的红层。在我国东南及东北地区广泛分布侵入岩,因此该地域常见构造软岩或风化软岩。

以湖南的碎屑岩为例,可分三种类别:(1)元古界变质碎屑岩,以绢云母、绿泥石片岩、千枚岩或砂岩夹板岩,在绢云母或绿泥石富集的岩层多为软岩,在软硬岩层间产生层间错动形成破碎夹层或泥化夹层;(2)古生界碎屑岩;多为硅质岩系、砂页岩、泥板岩、砂岩等,其中页岩、泥板岩易破碎形成软岩;(3)中、新生代红层碎屑岩,它是典型的内陆盆地河湖相建造,分布面积占湖南省面积的 13%左右,该类地层中有较多的粉细砂岩和泥岩,易软化形成软弱夹层。因此,湖南省的许多工程如风滩、五强溪、双牌、江垭等都遇到这类软岩形成的软弱夹层。

四川省广泛分布白垩系陆相红色碎屑岩。其下部为砂岩,中部为泥岩、泥灰岩、白云岩夹钙芒硝层,上部为粉砂岩、泥岩、泥灰岩。红层成因是古川盆地周围山地火成岩与变质岩类在印支运动以后,受风化剥蚀搬运沉积于盆地后,再经后期成岩作用形成的。由于红层产

状平缓,岩性岩相多变,软硬相间,软弱层众多,并含可溶盐类。许多水利水电工程都遇到这类软岩,例如葫芦口、紫坪铺、升钟、桐济桥、江口等工程。据调查,四川盆地侏罗系、三叠系岩层中的泥岩最为丰富,约占 55%。

峨眉山玄武岩在四川、贵州和云南三省具有广泛的分布,在东经 $102^{\circ}50' \sim 105^{\circ}$,北纬 $24^{\circ}20' \sim 29^{\circ}30'$ 的范围内分布面积达 9.3 万 m^2 。它是多次玄武岩喷发轮回的产物,据有关资料分析高达 13 次,在其喷发轮回之间常有软弱层,与水利水电工程建设密切相关,例如大渡河下游铜街子坝址第四和第五层玄武岩间沉积的页岩夹层厚 0.2~0.9m,经后期构造作用形成了软弱层。

在软岩工程中,广泛分布着缓倾角软弱层,从其形成条件及地质作用特征考虑可划分以下六种基本地质类型:

(1) 沉积岩,河湖相碎屑岩、潮汐相碎屑岩、海相碎屑岩、海相碳酸岩夹碎屑岩等,不同的岩相建造所形成的软弱层(或软岩层),从沉积环境、岩相、岩性及厚度变化,分布的连续性,成岩固结程度,物理力学属性等特征,有其共性,又有明显差别。这些软弱层是形成层间剪切带或泥化夹层的物质基础。

(2) 火山喷发的玄武岩或安山岩,多次轮回的间歇期沉积的软弱物质;陆相火山碎屑岩沉积的凝灰岩软弱层。

(3) 变质岩,有区域浅变质的碎屑岩沉积的软弱层;区域深变质的软弱层;岩脉侵入围岩接触变质的软弱带。

(4) 各类岩体受构造应力作用,普遍产生的层间错动软弱层(剪切带)和缓倾角断裂软弱带。

(5) 各类岩体中由风化溶滤作用形成的夹层状风化或脉岩蚀变风化带。

(6) 由地下水的携带、搬运作用,使细颗粒物质在断裂带、裂隙、溶隙中沉积充填的软弱带。

碎屑岩系中的泥灰砾岩、泥砾岩、泥灰粉砂岩、粘土岩通称为泥质软岩,其性状与分布,受沉积环境、后期构造变动和风化作用等因素控制,其基本规律有以下两点:

(1) 原生泥质软岩,除泥砾岩与泥质胶结砾岩外,均属缓流、静水悬浮物垂向落淤而成。它分布在具有韵律性沉积物的顶部,不显层理或具水平和微斜层理,在洪泛平原时期沉积的泥质软岩厚度大、分布广,而河漫滩区沉积的厚度变化较大、层数多、分布范围相对较小。泥砾岩属漫滩涨水时冲刷搬运前期半固结的泥岩在沟槽中堆积而成,分布在沉积韵律层的底部,呈斜列或树枝状,分布不稳定。泥质胶结砾岩属山前洪积泥流河床相堆积,常伴有炭质碎屑,分布不稳定,多呈透镜状。

(2) 近水平岩层在水平扭动构造应力作用下,岩层最易沿岩体中的软岩界面或其内部发生层间错动,当软岩厚度大、分布广和其上、下岩层刚度差异大的地段错动最为严重。错动破坏的机理:由均匀变形→剪断→剪切位移→追踪剪切滑动→连续顺层滑动。这种构造错动模式,在不同类型的软岩中有着不同的反应,一般在粘土岩中发育齐全,它使粘土岩结构破坏进而成为鳞片散粒体,为软岩泥化创造了基本条件;其他几类软岩(泥砾岩、泥质粉砂岩)的性状相对较好,错动模式发育不完整。这种层间错动除受岩性控制外,还显示出一定的等距性,即每相隔 30~40m 厚的岩层就有一个较大的层间错动带。另外,在岩层褶曲部位和断层附近层间错动现象也比较普遍。

缓倾角软弱层总体分布规律如下：

(1) 软弱层的不同成因类型在各类岩体中分布的差异性很大,据国内 80 个水电工程统计规律表明:各类岩体中的软弱层以构造型最多,约占 50.5%;其次是充填型,约占 18.2%;再次是沉积型和风化型,约占 14.1%与 12.1%;而火成型、变质型出现最少,分别占 3.0%、2.0%。

(2) 软弱层不同成因类型在不同年代地层中分布的差异性也大,太古界至新生界的地层中均广泛分布有软弱层。从统计规律看出,沉积型以中至新生代沉积岩中居多,特别是白垩系到第三系的河湖相碎屑岩沉积层中最发育;构造型在前古生代和古生代的发育强烈,而中新生的强度相对较弱。

(3) 软弱层在岩体中分布具多层性,这也是受沉积环境和沉积韵律性所控制。层状岩体中原生软弱层在沉积剖面中的重复出现,表现了多层韵律性特征。如葛洲坝、五强溪等工程;火山岩的喷溢轮回,形成多层间歇面的软弱层。这些夹层多受后期层间错动形成层间剪切带。有些地区层间剪切带的分布,还具有一定的等距性,如彭水坝址的层间剪切带间距一般为 32~43m。

(4) 软弱层分布具有区域性,即沉积型和构造型中的层间剪切带主要分布在构造变动轻微的中、新生代断陷盆地的单斜构造区及古生代至中生代的褶皱强烈的单斜构造区;构造型中的缓倾角断裂带,在岩浆岩地区及陡倾岩层区较发育;充填型多分布在岩浆岩及碳酸盐地区;风化型常发育在各岩类地区岩体浅部全、强风化带中。

构造型软弱层可分为层间错动软弱层和断裂错动软弱带,其分布规律大体如下:

(1) 层间错动软弱层普遍发育在软硬相间或硬岩夹软岩的岩性组合、褶皱构造或单斜构造的层状岩体中,如葛洲坝、宝珠寺、五强溪等十余个工程。而且,层间错动软弱层的分布与沉积韵律相协调,即与每一韵律中的砂泥质细粒沉积物(粘土岩、页岩、板岩、粘土质粉砂岩等)有一致性,随着原生软弱层的层次增多,发生层间错动的机率也增高,如表 1-7 中的五强溪工程。此外,层间错动软弱层的分布连续性与沉积环境和构造作用强度有密切关系,沉积环境稳定、构造作用强烈时,连续性好,具有明显的构造分带性,如恒仁火山碎屑岩是湖相沉积,层位稳定,连续分布。反之,沉积环境不稳定、构造作用较弱时,连续性差,如大藤峡坝址地层是典型的潮汐相沉积,沉积环境动荡不定,岩性变化频繁,层次多变,交错层、肠状或透镜状层理发育,加上水道的切割使岩层缺失、突变、尖灭和渐变,形成的层间错动软弱夹层为“多、薄、短”的特点。

五强溪层间错动软层与原生软岩关系

表 1-7

层 数 \ 岩组代号	P_{12}^2	P_{14}	P_{15}^{1-1}	P_{15}^{1-2}	P_{15}^2
泥 质 板 岩	43	8	22	22	19
剪 切 带	29	7	14	17	10

(2) 缓倾角断裂软弱带的发育与分布受构造部位所制约,同一地区不同构造部位,其发育程度有明显差别,如安康坝基岩体中缓倾角断裂发育密度是右岸大于河床、河床又大于左岸,其原因是河床偏右岸有后期北东向构造叠加,再者右岸临近火成岩背斜倾伏端,导致局部应力场的应力集中。红石坝基缓倾角断裂的发育也有类似情况。同时,缓倾角断裂软弱

带的分布具有集中成带性和等距性特征,安康坝基缓倾角断裂剖面上大致间距为 15~30m,随着规模增大,间距也增大;大化工程缓倾角断裂在剖面上有强弱分带集中发育特征;红石、龙羊峡、三峡等工程也有类似情况。在陡倾主干断裂的一侧,或两断裂带间所夹岩体,常发育有低序次的规模小的平缓断裂和裂隙,呈斜列式、羽列式断续展布,如龙羊峡、三峡、安康等工程。岩浆岩和变质岩岩体中低序次缓倾面均有不同程度的发育。此外,缓倾角断裂的分布常被陡倾角断裂切割,形成梯坎或阶梯状展布特征,如大化、铜街子等坝址均可见到。

从构造型软弱层形成的力学机制分析,可以得出:

(1) 层间错动软弱层的形成是层状岩体在区域构造应力场作用下(水平挤压或扭动构造应力场),岩层发生褶皱变形,在背斜或向斜的两翼单斜构造区,软硬相间的层状岩层,处于力偶扭动的应力场中,层间发生剪切错动,在很多构造模拟试验中已得到证实。成都地质学院为铜街子工程成功地作了相似材料的构造模拟试验,即给试体施加一定量级的水平挤压力,当岩层拱曲时开始产生层间错动,随着应力增加,层间错动位移加大,并形成剖面 X 型逆冲断裂,应力继续加大,缓倾角断裂(相当于 F_0)切割软弱夹层 C_5 ,与坝址区实际构造图像基本相似。同时还进行了有限元分析,所得成果与物理模型基本一致。葛洲坝工程也作了构造模型试验,对于认识软弱层形成的力学机制提供了论证资料。

(2) 缓倾角断裂带和缓倾角裂隙,形成于两种构造应力场条件:一种为区域性构造应力场作用下,产生高序次剖面 X 型压扭性断裂或裂隙,如大化、安康等工程的主要缓倾角断裂带,多发育在岩浆岩岩体及陡倾、陡立的岩层地区;另一种为主干断裂派生的局部构造应力场作用产生的低序次平缓断裂和裂隙,属于压扭性、扭性和张扭性结构面,见于龙羊峡、红石、三峡等工程。

综上所述,软弱层可以出现在各种岩类和地质环境中,其中在红层地区或软硬相间的地层中尤为发育。软弱层种类繁多,成因复杂,性状各异。各岩类的主要分布特征可归纳如下:

(1) 沉积岩中的软弱层往往出现在层间或层面,火成岩和变质岩的软弱带则常出现在构造间断处,如断层、裂隙面;

(2) 沉积岩中的软弱层倾角往往较平缓,连续分布,火成岩软弱带往往有起伏,分布不规则,延伸范围不一;

(3) 沉积岩中软弱层厚度一般较薄,仅几毫米或几厘米,火成岩中软弱带厚度变化很大,从几毫米到几米;

(4) 沉积岩中的软弱层的矿物成分与母岩大致相同,化学成分主要是胶结物含量的区别,火成岩中的软弱带的矿物成分可能与围岩不同。

三、软岩物质成分

1. 颗粒组成

不同成因类型的软岩,其各粒级的含量有很大的差异。南水北调中线工程第三系粘土岩的颗粒分析结果,粒径 $d > 0.05\text{mm}$ 占 18%~37%, $0.05 \sim 0.005\text{mm}$ 占 26%~43%, $< 0.005\text{mm}$ 占 30%~50%,其中胶粒含量($< 0.002\text{mm}$)占 15%~30%。软弱砂岩的砂粒($d > 0.05\text{mm}$)含量一般大于 50%,花岗岩风化成的软岩,粘粒含量一般都少于 20%,而粘土

岩形成的软弱夹层的粘粒含量却很高,一般为 30%~70%。表 1-8 列出了我国部分工程软岩的粒级组成。可以看出,泥化层的粘粒含量都大于 30%。泥岩具有较高的粘粒含量,在变形与破坏过程中细颗粒起控制作用。因此不同成因类型和不同母岩形成的软岩,其工程性质也不一。

国内部分水利工程软岩颗粒组成

表 1-8

序号	工程名称	软岩类型	粒级含量(%)			
			>0.05(mm)	0.05~0.005(mm)	<0.005(mm)	<0.002(mm)
1	葛洲坝	粘土岩	16	50	34	17
2	南水北调中线	粘土岩	22	33	45	28
3	五强溪	泥化板岩	16	30	54	35
4	桓仁	泥化带	38	28	34	21
5	官厅	夹泥层	25	31	44	33
6	双牌	泥化夹层	45	25	30	14
7	大化	断层泥	60	27	13	5
8	安康	软弱夹层	20	40	40	19
9	铜街子	软弱层	53	28	19	7
10	小浪底	夹泥层	32	33	35	22
11	龙门舌头岭	泥化层	28	40	32	21
12	隔河岩	泥化层	10	37	53	35
13	龙羊峡	断层泥	55	16	29	26

2. 矿物化学成分

软岩的矿物成分包括碎屑矿物(石英、长石、云母、方解石、石膏等)和粘土矿物(伊利石、蒙脱石、高岭石等),而影响软岩工程性质主要是粘土矿物。不同环境地域、不同类型的软岩其粘土矿物成分是不同的,例如邯郸上第三系泥岩小于 0.002mm 颗粒的主要粘土矿物为蒙脱石—伊利石混层粘土矿物和少量高岭石,其中蒙脱石含量为 19%~25%;石鼓泥岩小于 0.005mm 的主要粘土矿物是高岭石和伊利石,其中高岭石占 49%~62%,伊利石占 26%~31%;北京地区的一些泥岩蒙脱石含量很高,可达 30%,因此浸水后不仅体积膨胀,而且一次浸水即可成泥状物;葛洲坝泥化夹层粘土矿物主要是伊利石及混合型,伊利石含量占粘粒含量 40%~68%,蒙脱石占 10%~34%;大藤峡软弱夹层粘土矿物主要为水云母,少量高岭石、蒙脱石。因此,随矿物成分与其相对含量不同,表现在影响软岩的变形和强度性质,如蒙脱石的吸水膨胀性,伊利石的塑性,石膏的溶解性。表 1-9 列出了我国部分工程软岩的矿物成分。

国内部分水利工程软岩矿物成分

表 1-9

工程名称	软岩类型	粘土矿物	碎屑矿物
葛洲坝	粉砂质粘土岩	伊 61,蒙 25,绿 14	云母,石英
南水北调中线	粘土岩	伊 54,蒙 24,高	石英,云母,长石
小浪底	夹泥层	伊,蒙,高	石英,云母,长石

续表

工程名称	软岩类型	粘土矿物	碎屑矿物
五强溪	软弱夹层	水,蒙,高	云母,石英
万安	绢云绿泥千枚岩	绿40,绢30	长石,方解石,石英
彭水	软弱夹层	伊,高,绿,蒙	方解石,石英
龙羊峡	断层泥	蒙65,绿18,伊15	长石,石英
铜街子	软弱层	伊,蒙,绿	角闪石,针铁矿
碛口	泥化夹层	伊,蒙,绿	云母,石英
八盘峡	砂页岩	伊,高	石英,云母,长石

注:伊61—伊利石含量61%;蒙—蒙脱石;高—高岭石;绿—绿泥石。

试验表明,软岩膨胀性与其矿物成分、结构连接类型与强度、以及密实度等结构特征密切相关。粘土矿物的含量,尤其是以晶层间吸水膨胀为主、具有强亲水性的蒙脱石的含量越高,其膨胀性越强。胶结连结对膨胀有重要的抑制作用,胶结强度越高,越不利于膨胀的发生和发展。结构紧密程度则影响到膨胀量的大小,在其他条件一定的情况下,孔隙度小,结构紧密则膨胀量较大。

软岩的化学成分含量虽有很大的差异,但主要是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 , 三种氧化物的总和约占70%以上。例如大藤峡泥岩三种氧化物之和为86.44%;万安泥质粉砂岩为68.8%;南水北调中线工程泥质岩为78.63%;铜街子的软弱夹层为78.73%,如表1-10所示。软弱层中的化学成分可以用来分析夹层的形成条件,一般来说,泥化后的CaO含量比原岩低,而

国内部分水利工程软岩主要化学成分

表 1-10

工程名称	软岩类型	化学成分(%)						
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
南水北调中线	泥灰岩	59.22	15.92	3.49	2.80	0.63	1.58	0.42
大藤峡	泥岩	60.15	21.97	4.31	0.34	1.46	6.04	1.10
万安	泥质粉砂岩	47.17	14.33	7.39	11.34	1.56	3.94	0.54
五强溪	泥质板岩	48.82	28.79	2.78	1.40	2.02	9.77	0.17
八盘峡	页岩	48.50	24.35	9.00	1.00	2.20		
葛洲坝	粘土岩	52.80	14.10	4.70	8.30	3.30	2.90	
铜街子	软弱层	47.18	15.72	15.83	4.01	3.14	0.85	0.55
龙门舌头岭	泥化夹层	48.39	22.58	3.40	2.09	0.60	5.62	0.50
小浪底	页岩夹泥	49.46	16.26	8.04	7.48	2.38	3.97	0.18
龙羊峡	断裂夹层	58.87	21.41	5.09	3.58	4.26	0.50	3.03
彭水	软弱夹层	25.39	8.84	3.70	35.65	4.96		
宝珠寺	夹泥层	65.78	16.67	3.90	0.32	1.40	4.31	1.39
朱庄	页岩泥化	49.00	28.24	8.32	0.34	1.51	4.10	0.83

Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的含量比原岩高。这是由于钙的溶失和游离氧化物凝聚的结果。这些软弱夹层的化学成分还同原岩或围岩的性质有关。如彭水坝基软弱夹层CaO含量很高,因为围岩是灰岩;青山坝基软弱夹层MgO含量很高,这与围岩是大理岩的高镁含量有关。