



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
NORTHWEST HYDRO CONSULTING ENGINEERS, CHECC

水电技术专著系列

坝基红层软岩工程地质 研究与应用

万宗礼 聂德新 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
NORTHWEST HYDRO CONSULTING ENGINEERS, CHECC

水电技术专著系列

坝基红层软岩工程地质 研究与应用

万宗礼 聂德新 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书依据黄河上游尼那、山坪、直岗拉卡、康扬、苏只、黄丰、大河家等中型水电站的工程地质资料,通过对有关实测数据成果的统计论证,对红层软岩的矿物化学成分与物理力学特征进行了全面的分析评价,提出了相应的工程结构措施和防护处理措施。本书内容来自水电建设工程实践,技术资料丰富,并对国内其他地区的“红层”也进行了对比性探讨,具有重要的参考价值。国家电力公司已将此项研究纳入“特殊地质工程研究”课题,并得到了国家自然科学基金(40372127)的资助。本书可供水利水电工程技术人员及有关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

坝基红层软岩工程地质研究与应用/万宗礼,聂德新
著.—北京:中国水利水电出版社,2007
ISBN 978-7-5084-4371-3

I. 坝… II. ①万…②聂… III. 坝基—红层—软弱岩石—
工程地质—研究 IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021165 号

书 名	坝基红层软岩工程地质研究与应用
作 者	万宗礼 聂德新 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(总机),68331835(营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京金奥都科技发展中心
印 刷	北京瑞象今日印刷服务有限公司印刷
规 格	787mm×1092mm 16开本 14.25印张 336千字
版 次	2007年3月第一版 2007年3月北京第一次印刷
印 数	0001—2550册
定 价	45元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

黄河上游尼那、山坪、直岗拉卡、康扬、苏只、黄丰、大河家等中型电站均建于新生代盆地内的新第三系陆相红色沉积岩上,岩性主要为黏土岩、泥质粉砂岩和砂砾岩,统称为红层。该地层时代新、成岩作用差、岩性软弱、变形模量低、强度低,地基承载力(允许压应力)不高,在卸荷条件下或开挖暴露后易受环境条件的影响,岩体的工程地质性质变化较大。特别是黏土岩、泥质岩遇水后表面膨胀、崩解、软化,失水后干缩裂开,工程特性出现明显的改变。红层的这种工程特性有其特定的内在原因和外部条件,是黄河上游中型水电站建设的区域性地质工程问题。国内外在新第三系红层上修建的水工建筑物较少,资料较分散,综合专题研究成果更为少见。因此,研究第三系红层的工程地质特性,对开发黄河上游及类似地区的中型水电工程具有重要的技术指导作用,同时,对软岩的工程地质评价具有重要的理论意义。国家电力公司将红层工程地质特性的研究纳入“特殊地质工程研究”课题进行专题研究,并得到了国家自然科学基金(40372127)的资助。

本项研究以黄河上游各中型电站工程为依托,对红层进行了全面系统的研究:对红层的岩相古地理环境、粒度、矿化成分、成岩机理等进行了必要的基础性研究;从红层的基本物理力学特性和赋存条件入手,进行了红层软岩的试验方法、参数取值的分析和探讨;根据红层的工程特性,对其可能存在的承载、变形、渗透、抗滑等问题,从工程地质和结构设计两方面进行了分析评价;从红层崩解、风化、干缩的机理、程度、时效性等方面入手,对其进行了开挖保护措施、抗拉拔、可灌性等的试验研究,提出了相应的防护和工程处理措施;根据工程运行环境条件和岩体的工程特性,分析研究了红层岩体的工程适应性及长期强度。

本项研究利用了大量黄河上游中型电站工程红层岩体的各类测试成果,全面分析评价了红层的工程特性和可能存在的主要工程地质问题,提出了相应的工程结构措施和防护处理措施,对红层软岩的成岩机理、岩体力学试验方法和参数取值、红层软岩工程特性的双重控制因素等,获得了突破性的认识和进展。这些研究成果已应用于已建、在建的尼那、苏只、康扬等工程,对今后黄丰、大河

家等工程及其他类似工程具有推广应用的价值。同时,本研究对国内其他地区的“红层”也进行了对比性的探讨,如华北的三趾马“红层”,新疆准噶尔盆地侏罗系、白垩系“红层”,四川盆地侏罗系“红层”等。这些红层与黄河上游的新第三系红层既有相似性又有特殊性,水利水电工程应予以充分重视。

本书是集体智慧的结晶。中国水电工程顾问集团西北勘测设计研究院和成都理工大学众多的专家、学者和工程技术人员参与了本项研究的综合测试和专项试验工作,付出了辛勤的劳动,贡献了聪明和才智,在此表示诚挚的谢意。其中庆祖荫教高领导了本次研究,吴曾谋教高、雷凤山教高、任光明教授、李树森教授、符文熹博士、刘晓虹教高等参加了研究工作和试验工作,并参与了原研究报告的编写,在此亦当再谢。西北院杨永明、赵志祥、杨天俊、陆栋梁、马福祥、张富荣等野外一线的同志也做了大量基础性工作,为项目研究积累丰富的资料,做出了贡献,在此一并致谢。也感谢李树武、林伟风工程师为本书文字、图表清绘整理所付出的劳动。

目 录

前 言

1 概述	(1)
2 国内外软岩、硬黏土工程地质研究进展	(4)
2.1 红层软岩、硬黏土的沉积环境、岩性岩相特征	(6)
2.2 红层软岩、硬黏土的物质组成	(8)
2.2.1 颗粒组成	(8)
2.2.2 化学组成	(9)
2.2.3 矿物组成	(11)
2.3 红层软岩结构构造及岩体结构特征	(12)
2.3.1 红层软岩结构构造特征	(12)
2.3.2 红层软岩岩体结构	(12)
2.4 红层软岩的分类	(13)
2.4.1 红层软岩的工程分类	(13)
2.4.2 红层软岩的膨胀性分类	(14)
2.5 红层软岩的物理力学性质	(17)
2.6 红层软岩力学参数取值原则	(20)
2.6.1 关于抗压强度的确定	(20)
2.6.2 关于抗剪强度的确定	(20)
2.6.3 关于变形参数的确定	(21)
2.7 红层软岩的主要工程地质问题	(22)
2.7.1 坝基软化变形问题	(22)
2.7.2 抗滑稳定问题	(23)
2.7.3 渗透变形问题	(23)
3 黄河上游新第三系红层形成的地质环境分析	(25)
3.1 区域大地构造部位及构造格架	(25)
3.1.1 区域大地构造部位	(25)
3.1.2 区域构造格架	(25)
3.2 区域地质环境演变及气候特征	(29)
3.2.1 第三系红层沉积前区域地质环境	(29)
3.2.2 第三系红层沉积时的地质环境	(30)
3.2.3 黄河上游第三系红层沉积后的地质环境分析	(33)

4 黄河上游新第三系红层岩石及岩体特征	(39)
4.1 电站坝址区新第三系红层的岩性岩相特征	(39)
4.2 新第三系红层岩石的矿物化学成分	(40)
4.2.1 岩石的矿物成分	(40)
4.2.2 岩石的化学成分	(41)
4.3 新第三系红层的岩体结构特征	(45)
4.3.1 岩体的风化、卸荷特征	(45)
4.3.2 红层岩体的结构面发育特征	(46)
4.3.3 红层岩体的各向异性特征	(47)
5 黄河上游新第三系红层的水文地质特征	(49)
5.1 地下水的类型	(49)
5.2 地下水的化学类型	(49)
5.3 红层岩体的透水性特征	(50)
5.4 红层岩体的冻融特性	(51)
6 黄河上游新第三系红层的工程特性	(53)
6.1 新第三系红层岩石的物理力学特征	(53)
6.1.1 红层岩石的物理性质	(53)
6.1.2 红层岩石的力学特征	(57)
6.2 新第三系红层岩体的变形特性	(67)
6.2.1 黏土岩的变形特性与环境的关系	(67)
6.2.2 黄河上游红层区三座中型水电站坝址黏土岩变形试验成果分析、评价	(68)
6.2.3 红层开挖、暴露后松弛程度的初步分析及其对变形试验成果的影响	(69)
6.2.4 黄河上游新第三系红层岩体变形参数评价	(71)
6.3 新第三系红层岩体的抗剪强度特征	(75)
6.3.1 新第三系红层岩体的强度特征	(75)
6.3.2 新第三系红层混凝土与岩体抗剪强度特征	(77)
6.3.3 用弹性波速度对岩体强度参数评价	(79)
6.3.4 红层岩体强度参数评价	(80)
6.4 新第三系红层岩体的渗透变形特征	(81)
6.4.1 渗透变形试验成果分析	(81)
6.4.2 红层岩体的化学管涌问题	(83)
6.4.3 红层岩体的渗透稳定性初步评价	(84)
6.5 新第三系红层的胀缩性特征	(85)
6.5.1 各中型水电站坝址新第三系红层胀缩性试验成果	(85)
6.5.2 各电站坝址第三系黏土岩胀缩性评价	(86)
6.6 新第三系红层岩体的承载力评价	(90)
6.6.1 现场载荷试验	(90)
6.6.2 用岩石饱和抗压强度进行评价	(91)

6.6.3	用岩石干抗压成果进行评价	(92)
6.7	黄河上游新第三系红层黏土岩工程特性的控制因素分析	(93)
6.8	黄河上游第三系红层物理力学性质与国内外同时代红层的差异性分析	(94)
7	黄河上游新第三系红层地区中型水电站主要工程地质问题评价	(97)
7.1	黄河上游红层岩体承载力对水工建筑物影响的初步分析评价	(97)
7.2	红层上坝体及坝基岩体变形的初步评价	(99)
7.2.1	坝基岩体不同变模时变位分析	(100)
7.2.2	坝基岩体变形规律	(101)
7.3	红层坝基抗滑稳定问题的初步分析	(102)
7.3.1	坝基表层抗滑稳定性分析	(102)
7.3.2	提高坝基抗滑稳定的措施	(103)
7.4	坝基岩体渗透稳定性评价及措施	(104)
7.4.1	坝基岩体渗透稳定性评价	(104)
7.4.2	坝基岩体渗透稳定措施	(105)
7.5	开挖松弛研究及防护措施建议	(106)
7.5.1	基坑开挖松弛爆破试验研究	(106)
7.5.2	建基面保护措施及建议	(109)
7.5.3	红层软岩地基岩体的加固措施及建议	(116)
7.5.4	基坑开挖的数值分析	(125)
7.5.5	其他防护措施	(127)
7.5.6	建基面验收标准	(127)
8	黄丰电站坝基石膏岩的溶蚀性及工程防护措施研究	(128)
8.1	坝址地形地貌及地层岩性	(128)
8.1.1	地形及岩性特征	(128)
8.1.2	石膏岩的分布特征	(129)
8.2	石膏岩对坝基岩体稳定性及混凝土的影响	(137)
8.2.1	黄丰电站坝基石膏岩溶蚀状况分析及天然环境下石膏岩溶蚀判据的获得	(137)
8.2.2	石膏岩室内溶蚀试验及成果分析	(138)
8.2.3	王甫洲水电站石膏岩溶蚀试验成果对黄丰电站的借鉴意义	(147)
8.2.4	黄丰水电站坝基厚层石膏岩溶蚀后对大坝的影响分析	(147)
8.3	坝基渗流的计算和分析	(149)
8.3.1	模型的建立	(149)
8.3.2	水库蓄水前模拟	(151)
8.3.3	水库蓄水后模拟	(152)
8.4	黄丰水电站坝基泥岩、石膏岩防治措施	(153)
8.4.1	开挖过程中应防止石膏岩暴露溶蚀	(153)
8.4.2	坝基石膏岩溶蚀的防治措施	(153)

9 红层中软弱夹层的工程地质研究	(154)
9.1 嘉陵江凤仪场坝址侏罗系红层中软弱夹层研究	(154)
9.1.1 概述	(154)
9.1.2 坝址岩性及软弱夹层的分布特征	(155)
9.1.3 坝址软弱夹层的物质组成、粒度成分	(158)
9.1.4 坝址软弱夹层的物理性质及性状特征	(160)
9.1.5 坝址软弱夹层强度特征	(163)
9.1.6 坝址软弱夹层强度参数取值	(171)
9.2 凤仪场坝基软岩岩体强度参数评价	(174)
9.2.1 岩石双面剪试验及岩石、岩体强度参数分析	(175)
9.2.2 用带宽连通率网络模拟分析坝基岩体强度参数	(178)
9.2.3 岩体强度参数综合取值	(180)
9.3 积石峡坝址区软弱夹层研究	(180)
9.3.1 软弱夹层成因	(181)
9.3.2 软弱夹层分类	(181)
9.3.3 软弱夹层的分布	(184)
9.3.4 软弱夹层的化学成分和矿物成分	(184)
9.3.5 软弱夹层的物理性质	(185)
9.3.6 软弱夹层(包括断层破碎带)的强度特性	(186)
9.3.7 力学参数建议值	(187)
10 红层软岩上建坝实例	(190)
10.1 尼那泄水闸坝段及闸基	(190)
10.1.1 黏土岩开挖保护措施的实施情况	(191)
10.1.2 开挖揭露的地质条件及建基面处理措施	(191)
10.1.3 固结灌浆及效果	(193)
10.2 苏只水电站坝基	(202)
10.2.1 厂房、泄水闸坝段开挖后的工程地质条件	(202)
10.2.2 厂房、泄水闸坝段地基处理	(203)
10.2.3 泄水建筑物开挖后的工程地质条件	(204)
10.2.4 泄水建筑物地基处理	(205)
10.3 康扬水电站厂坝和泄水闸基	(206)
10.3.1 开挖保护措施的实施情况	(206)
10.3.2 建基面物探波速检测	(207)
10.3.3 灌浆处理与质量检测	(208)
结语	(216)
主要参考文献	(219)

1 概 述

黄河上游龙羊峡至刘家峡河段,是黄河上游水电梯级开发的重要河段,其间由坚硬岩石形成的深切峡谷,具有修建大型水电站的地质环境条件。目前已建、在建的大型电站有6座,总装机约1000万kW。在这些深切峡谷的上下游往往为较为开阔的山间盆地(或构造盆地)。黄河在这些河段的河床较为开阔、两岸阶地发育,但因受青藏高原隆升的影响,这些河段仍然具有一定的落差。利用这些水头,借助临近的各大型电站施工时构筑的良好交通条件,系统配套的施工机械,以及大型电站对下游工程截流、防洪带来的诸多有利条件,可以开发上百万千瓦的电力资源,共规划7座中型水电站(其中4座电站已完工)。尽管这些中型电站因河道开阔、大坝较长,坝的工程量稍大,但由于地形、地貌条件好,有利于水工布置及快速施工,因而可以缩短工期,获得较好的经济效益。

在工程地质环境方面,上述中型电站坝址均为新第三系陆相碎屑沉积岩,岩性为红色黏土岩、泥质粉砂岩、砂砾岩等,统称红层。这些岩石因时代新、成岩作用差、岩性较软弱、岩体变形模量低、强度低,地基承载力不高,在卸载条件下或开挖暴露后易受环境条件的影响,岩体的工程地质性质变化较大,特别是泥质岩遇水后,表面软化、膨胀、崩解,失水后干缩裂开,工程特性出现明显的改变,这些问题成为黄河上游第三系红层区水电开发的区域性工程问题,同时也是国内外新生代岩石、软岩上修建工程存在的共同性问题。因此,研究第三系红层形成的环境条件,岩性、岩相变化规律,现今的赋存环境,找出影响泥质岩石、岩体物理力学性质、工程特性参数变化的主导因素,合理地给定第三系红层岩体的各种工程性质参数,对开发黄河上游中型水电站以及其他地区软岩的工程评价,具有重要的工程意义、理论价值和经济意义。

同时,从目前资料查询的情况看,国内外在新第三系红层上修建的水工建筑物较少,而且系统地对新第三系红层进行全面的工程地质专题研究尚为空白。为此,国家电力公司将其列为1997年度重点研究课题,纳入岩体工程特性各向异性研究的大题目中,由原国家电力公司西北勘测设计研究院承担,初定的主要研究内容为:进行红层岩性、岩相分布规律的研究,以选择合适的建基层位;进行红层岩石、岩体的物理力学性状的试验研究,以系统地探讨红层的岩体力学特性及参数选择。根据红层的工程特性和存在的主要工程地质问题,进行现场工程处理方法和手段的研究。

为做好这一项目的研究,西北勘测设计研究院邀请成都理工学院工程地质研究所共同进行这一课题的研究。基础资料是西北院在黄河上游各中型电站所作的大量实际勘测成果及西北院在尼那、直岗拉卡、康扬等电站开展的具有开创性和重要价值的多项试验研究成果。在这一研究过程中,参与研究的人员系统地查阅了国内外有关第三系地层、岩石、岩体和土体工程地质性质研究方面的大量文献,系统调阅了有关青海黄河上游地区区域地质环境演变、区域构造、地质发展史等成果;系统地分析了青藏高原独特的地质构造背景对黄河上游第三系红层的沉积、成岩过程,以及成岩后等工程地质性质的形成、演变的制约作用。

揭示了黄河上游新第三系红层与中国其他地区新第三系红层在工程地质特性方面所存在的本质上的差异,类比了国外新第三系红层的工程地质性质,较系统地查阅了国内外在新第三系红层,以及其他软岩地区工程地质评价或研究的进展情况。在本项目的研究中,通过国内外文献查阅、青藏高原独特地质环境的分析和已开展的较多试验成果的认真分析,不仅进一步完善了原来初定的研究技术路线,而且获得了一些新的进展或形成一些新的研究路线:

(1) 青海黄河上游第三系红层是青藏高原形成过程中特定的地质环境条件下的产物,青藏高原形成过程中地质构造运动的强烈作用、地壳的差异隆升是黄河上游第三系红层沉积厚度较中国北方其他地区大得多的重要原因。

(2) 青藏高原形成过程中,区内高的古地应力环境对黄河上游第三系红层的构造压密,是本区新第三系三趾马泥质岩地层与内蒙、山西、陕西同时代三趾马红土地层相比,前者为岩、后者为土的重要原因。

(3) 泥质岩或软岩与其他非泥质岩在工程地质性质方面前者普遍较差,后者普遍较好,出现这种差异的本质原因是泥质岩含有黏土颗粒和黏土矿物,而黏土矿物的亲水性,是导致泥质岩随环境变化(指湿度)的根本因素。

(4) 泥质岩和非泥质岩都形成于一定的地壳应力环境,赋存于一定的地应力环境(包括自重应力),当开挖卸荷或暴露后,随着地应力的释放,两类岩石、岩体都会出现松弛、回弹,工程地质性质出现变化,但泥质岩还会出现对其性质降低很大的吸湿回弹、松弛或变化,因而研究泥质岩的工程地质性质既要重视地应力环境,又必须非常重视“水”环境,而且还必须注意这两个环境对泥质岩工程地质性质的影响的彼此制约作用,这方面是当前国内外研究泥质岩、软岩工程地质性质时普遍存在的重大不足。泥质岩的吸湿变化与自身所受的应力环境紧密相关,处于一定围压下的泥岩,当其吸水后的膨胀力不超过所受的围压,泥质岩“原有”的性状及工程地质性质将不会改变。纵观黄河龙羊峡——刘家峡河段,第三系红层的泥岩在不少河谷地段形成高陡的斜坡,如直岗拉卡电站坝前夏琼寺南侧黄河左岸斜坡高度在300~400m,临近黄河边斜坡的坡度有的近于直立,如果按当前评价饱水泥岩强度的方法,以其获得的强度参数、变形参数去“计算”,这种斜坡“必然会垮的”,但实际上这种斜坡是存在的,其原因在于:尽管黄河边的泥岩被水浸泡,但因其上覆岩体重量产生的围压的制约,使得泥质岩吸湿作用始终制约在一定的围压条件下,即“最大的含水量”不会超过“原岩条件下”的饱和含水量,甚至因泥质岩的成岩压密机理,含水量几乎没有变化。因此,将上述新的理论观点引入本项目的研究,必然会获得一系列新的认识,取得一些有利于工程建设的成果。

(5) 黄河上游新第三系红层,形成时代较晚,成岩作用较差,但另一方面它们经历的构造运动次数及时期也不同于其他较老的岩石,因此岩石中构造裂隙切割的密度很小,在这种情况下,岩体的工程特性和岩石的工程特性差异较小。认真研究、分析这种差异,将有可能带来泥质岩或软岩工程地质性质试验方法的改进,获得新的评价“红层”工程地质性质的方法。

按照上述路线,本研究自始至终以工程应用为目的:一是研究黄河上游红层的分布规律以选择合适的坝址位置,比较适宜的枢纽建筑物布置方案和型式;二是进行红层工程地质、岩体力学特性的研究,正确认识红层软岩在特定天然赋存条件和工程环境下的工程特

性;三是在上述研究的基础上,合理选择和使用红层软岩的岩体力学参数,并依据其特性确定合理的施工开挖保护措施。

由于当前泥质岩石、岩体工程地质性质试验、评价中存在的普遍问题,现行规范中尚存在的一些需要商榷的问题,因此本项研究除尼那电站获得了一批重要成果外,其他电站勘察中按现行规范操作所获得的泥质岩变形参数,尽管彼此的风化程度、岩性条件、环境条件相近,但量值却相差 20 ~ 50 倍(低的与软塑状态黏土的模量接近,仅为 10MPa);强度参数的差异最大的也可以差到 4 ~ 5 倍,有的摩擦系数 $f=0.15$,低于淤泥的强度。出现这种问题的原因不是试验人员、勘察人员的问题,而是当前泥质岩工程地质性质评价或试验规范中存在的问题。通过对此问题的认识,找出其原因和本质,探求新的方法和原则,以满足前述红层工程特性研究的需要,为工程经济合理、安全可靠的设计提供依据,也是本研究的又一目的。

经过多年的研究,对黄河上游新第三系红层的工程地质特性有了较全面和系统的认识,这对于在该区建坝乃至类似地区建坝具有借鉴和指导作用。研究的主要成果已在黄河尼那、苏只、康扬等水电站溢洪道、泄水闸、电站厂房的设计、施工开挖和基础处理中广泛应用,而且在今后的黄丰、大河家、山坪等电站的设计和施工中具有很大的推广应用前景,同时对国内外类似地层上的水坝建设也具有较高的参考价值。

2 国内外软岩、硬黏土工程地质研究进展*

在工程实践中,软岩中修建的各种工程越来越多,所遇到的工程地质问题日益突出。由于软岩受成岩胶结程度、成生时代、历经的构造运动和地下水活动状况等诸多因素的影响,其工程特性较差,给工程建设带来很多问题。因此,这一类岩石越来越受到广泛关注。国内一些学者(曲永新等,1987)认为这类岩石除包括泥岩、泥灰岩、页岩、黏土岩等一类富含黏土矿物的沉积岩外,还包括火成岩和变质岩风化蚀变和热液蚀变而成的黏土岩,甚至包括泥质胶结的砂岩和砾岩。这些岩石的最大特点是富含黏土矿物。因此,曲永新等(1987)统称其为泥质岩,而且从成因来说,它们大部分属泥质沉积物,分布面积极为广泛,占地壳沉积岩总体积的60%~70%。由于这一类岩石的工程特性介于传统意义上的土和岩石之间,因此,又常被称为软弱岩(weak rocks)、软岩(soft rocks)、硬土(indurated soils)、似岩土(rock-similar soils),甚至直接称为硬土—软岩(hard soils-soft rocks)等。

近二、三十年来,国内外学者在沉积岩石学、工程地质学、土质学、土壤物理化学、土力学、岩石力学等领域对泥质沉积物进行了多方面的研究。尤其在泥质岩的工程特性和工程分类的研究上取得了很大的进展。软岩、硬黏土的工程特性介于传统意义上的土和岩石之间,被认为是土力学和岩石力学研究的边缘范围,故而目前对软岩、硬黏土的研究,常常将土力学和岩石力学结合起来(图2-1)。当前的研究中,多用力学的观点去解释软岩、硬黏土的工程性质,前苏联学者B. H. 奥西波夫通过对黏土类土和岩石进行十余年的研究后,发表的专著《黏

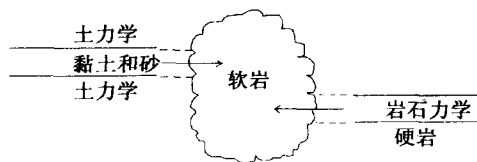


图2-1 对软岩、硬岩黏土采取的研究方法

土类土和岩石的强度与变形的本质》(李生林等译,1985)中运用物理化学、力学的观点,从微观结构去认识黏土类土和岩石的性质,成功地解释了诸如压缩、剪切、流变、长期强度、触变、胀缩等黏土类土和岩石的特殊性质,并且,在此基础上进行了工程地质分类。我国学者(罗鸿禧,1981;谭罗荣,1988;孔令伟、罗鸿禧等,1994;曲永新,1987;高国瑞,1985)也从这方面进行了大量的研究,并取得了一定进展。

人们知道,完整岩石的孔隙比(度)或干密度对岩石强度和变形起控制作用。美国学者(H. H. Rieke, III和G. V. Chilingarian)对泥质沉积物如何从土转变为岩石,通过压实作用的观点不仅证实了泥质沉积物在成岩过程中既受到上覆重力的压密,还可受到水平构造作用的压密,这一观点已广为工程地质界接受并不断得到证实。另外一些学者(D. Petely, M. Jones, C. Fanetal, 1993)对细粒软岩施加超高围压作用时,不仅观察到孔隙度的减少,而且其微结构也发生质的变化(超高围压作用下孔隙中已有胶结物质)。众所周知,软岩、硬黏土等泥质沉积物是特定环境下的产物,在一定的赋存环境下,表现出相应的物理力学性质,

* 本章符文熹参与执笔。

也就是说,软岩、硬黏土的物理力学性质具有环境效应特征。对软岩、硬黏土的湿化效应(含水量变化引起的)、结构效应(结构面引起的)、围压效应(地应力环境引起的),国内外学者(周瑞光,1983,1987;孙广忠、周瑞光,1982;Hoek,1965;Marland,1971;Lo and Milligan,1967)已做了大量研究,并取得了较多的成果。

由于软岩成岩作用、胶结程度差,而软岩、硬黏土又常富含大量的亲水性黏土矿物,具有遇水膨胀崩解、失水收缩干裂的特性,因此对软岩、硬黏土具有的胀缩特性也为工程界高度重视。我国学者曲永新(1987)认为膨胀岩属于泥质岩中性质最坏的一类,是当今岩石力学领域中最复杂的力学问题之一。软岩、硬黏土的胀缩性国内外已有大量研究,并提出相应的判别指标和分类。国内主要有:铁一院;铁三院的张金富;铁二院的刘礼成;中科院地质所曲永新等;全国首届膨胀岩学术会议(1986.7,大连);浙江人防办公室康宁;铁二院秦小林。国外主要有:日本用于隧道围岩的膨胀性判别;美国的霍尔兹;英国的泰勒;澳大利亚的B. Indraratna。另外,近年来,一些学者还提出新的判别指标和膨胀性分类,如国内谭罗荣(1994)提出用风干含水量 W_{65} (W_{65} 指湿度在65%稳定时的含水量)用作膨胀分类指标。遗憾的是,由于分类方案和分类指标太多,各分类方案中指标又不完全统一,即使同一分类方案中由于分类指标过多使各指标间常引起混乱。王小军(1995)在参照国内外有关膨胀性岩土的分类基础上,提出了膨胀性岩土的野外地质特征判别,为现场方便快捷且较为准确地判定泥质软岩的膨胀性提供了基础,具有较大的实用参考价值。

软岩,尤其是中、新生代红层软岩,岩体中裂隙不太发育,岩石完整程度高,因而适用于坚硬节理化岩石的现今岩石分类,如RMR分类和Q系统分类等用于软岩尚存在相当大的困难(李承光,1996;Maher Atta,1993;Tugral A.,Gurpinar O.,1997)。因此,对软岩进行合理的工程地质分类势在必行。尽管国内外一些学者(曲永新,1986;Williamson, Kuhn,1988;Komao ve Yaakub,1980;Tugal,1995),根据实际工程需要和经验总结提出了有关软岩的工程分类建议,有一定的适用性,但是,目前国内外的这些分类中多采用饱和抗压强度指标为依据,而饱和抗压强度的实验测定却无统一明确的规定,造成“似岩非岩、似土非土”的描述存在于各种各样的分类方案中。因此,确定合理的指标来定义软岩、硬黏土的界限,不仅给工程地质人员带来方便,而且具有重要的现实意义。

虽然近二、三十年来,国内外对软岩、硬黏土的工程地质研究取得了相当大的进展,然而却也存在不足之处。主要表现在以下方面:国内外目前多将饱和抗压强度小于30MPa的岩石定义为软岩(亦有说小于20MPa为软岩),国外有的学者将2.0MPa作为软岩、硬黏土的界限。实际上,用饱和抗压强度定义软岩、硬黏土并没有问题,问题是饱和抗压强度试验本身存在一定问题。就河底钻孔中的岩心样为例,岩石长期在河水位以下,本身应该满足测定饱和抗压强度的试验要求(即饱和岩样),而实际测定岩石的饱和抗压强度时,却又将岩块再次浸入水中,对于富含黏土矿物(尤其是蒙脱石、伊利石)等亲水性黏土矿物的软岩因具有极其显著的遇水膨胀崩解特性,即使岩石不发生崩解,由于软岩遇水膨胀,造成原有的天然孔隙度发生显著改变,因此测得的抗压强度也就显著降低,有的甚至低于1MPa。若按目前一些学者的定义,已经属硬土了,这显然与实际情况不符。这也是目前测定软岩饱和抗压强度的弊端所在,相应地按此强度进行软岩工程分类不仅脱离实际,甚至可以说是错误的。再如泥质岩的浸水软化特性试验中,软化系数常用饱和抗压强度与干燥抗压强度的比值表

示,问题是饱和抗压强度究竟是天然含水状态下饱水的,还是干燥后饱水的,也无统一规定,据曲永新(1987)研究表明,后者的软化系数通常要比前者小得多。令人欣慰的是,国内外一些学者已经认识到这一点,如 F. V. Goodarzi 和 E. Tadayon(1993)在两种不同崩解试验方法中竟获得两种截然不同的结果,他们将泥质岩块分别在无侧限条件和有侧限条件下浸水试验发现,无侧限条件浸水的岩块在不长时间就产生裂纹并逐渐崩解,而在有侧限条件下浸水,很长时间并无明显的改变。这给人们一个很好的启示:要使所获取的软岩物理力学参数具有可靠性和代表性,就应当以软岩特定的赋存环境条件为基础,这样所获得的物理力学参数才更具有现实的意义。在黄河上游的中型水电站的勘察实践中,我们也充分地认识到了这一点。第三系红层软岩由于湿化膨胀特性,使一些工程的室内、现场试验所获得的力学参数偏低(康扬、直岗拉卡),但在工程类比的基础上,给定的建议值往往高于试验值。

另外,尽管是同时代的地层,由于分布区域、所处环境特征的差异,因此所表现出的物理力学性质也有较大的差异。同是新第三系(N_2)的三趾马红层(据成都理工学院鉴定,黄河上游的直岗拉卡、康扬工程的新第三系红层中也含三趾马化石),在我国东部地区它们具有超固结土的性质,国内一些学者曲永新、周瑞光等称其为三趾马红土(黏性土)是合适的。而对于黄河上游地区的新第三系红层则具有软岩性质。这也进一步说明对于时代较新地层,单纯按时代去定义究竟是软岩还是硬土,在工程上不仅不切实际,而且可能导致错误。因此,对于红层软岩硬土不仅要从物理力学性质方面去认识,还应当结合其沉积环境、后期的构造环境以及区域性气候特征去认识,这样才不失偏颇。

黄河上游7座中型电站均位于第三系红层之上。本次工作在广泛搜集国内外有关软岩、硬黏土文献资料时,着重立足于第三系红层资料,以便与黄河上游各中型电站资料作对比分析。下面就前面所提及的问题以及国内外对软岩、硬黏土的研究进展分别作一简要的论述。

2.1 红层软岩、硬黏土的沉积环境、岩性岩相特征

一定的沉积环境有其对应的岩性岩相特征。据国内外研究,沉积环境的差异,主要从物理作用、化学作用和生物作用三个方面表现出来。R. C. 塞利(1976)认为沉积环境是上述三方面均有别于相邻地区的一块地球表面,他从五个方面来限定“相”或“岩相”,即沉积岩的几何形态、岩石学特点、古生物学特点、沉积构造特点和古流向特点。他把“相”理解为“沉积环境的古代产物”,亦就是说,一定的环境有其特定的物质表现,即“相”,在岩性方面的综合表现即“岩相”。因此,便有红层相、蒸发盐相等名称。

据文献资料,我国侏罗系、白垩系红层均沉积于大小不同的盆地,而第三系红层既见于盆地,又见于各型地堑谷和侵蚀溶蚀洼地(表2-1)。由表2-1可以看出,新生代红层盆地在我国广泛分布,而且新生代红层沉积的盆地,多数是断陷盆地或拗陷盆地。虽然新生代红层沉积环境基本都为干旱~半干旱河湖相沉积,然而不同地区,由于盆地形成的差异、所历经构造活动强烈程度以及气候等综合因素的共同影响,造成我国红层颜色、厚度、粒径、矿物组成、风化速度等均有差异,也就决定了我国不同地区、不同时代红层的工程地质特性的差异。我国四川素有“红色盆地”之称,红层在四川盆地广泛分布,然而不同地层时代的红层

形成环境仍有较大差异(表 2-2)。据搜集的文献资料表明,世界其他国家或地区的红层也有类似特点(表 2-3)。

表 2-1 我国部分地区中新代红层形成的沉积环境特征

省(自治区)	分布位置	地层时代	岩性描述	厚度(m)	古沉积环境
云南	蒙自盆地 (断陷盆地)	N ₂	灰黄、灰白、土黄、浅灰色泥灰岩	110~570	半干旱湖相沉积
内蒙古	阿巴嘎地区盆地 (第三纪形成的盆地)	N ₂	鲜红~棕红色硬黏土及夹砂质黏土(局部含石膏)	最大 16	大陆性干旱湖相沉积
山西	利民堡盆地 (断陷盆地)	N ₂	红色、棕色及紫红色黏土	最厚 250	炎热半干旱湖相沉积
河南	南阳盆地	E	含石膏红色砂岩、粉砂岩、砾岩和黏土岩		干旱气候硫酸盐型古盐湖沉积
陕西	西安地区 延安地区 陕北地区	N ₂	棕红~深红色黏土或轻黏土(底部有砂砾岩、砂岩)	40 20 60	半干旱潮湿气候沉积
青海	西宁盆地 (断陷盆地)	N	红色碎屑岩系	最厚 1395	半干旱稍湿润气候河湖相沉积

表 2-2 四川盆地红层形成的沉积环境特征

地层时代	岩性描述	古沉积环境
K ₂ -E(芦山-名山群)	砖红紫色砂泥岩	持续干旱下的河流~盐湖相沉积
K ₆ (灌口组)	棕红色砂泥岩	日趋干旱条件下的河流~盐湖相沉积
K ₅ (夹关组)	砖红紫色砂泥岩	日趋干旱条件下的沙漠间河流相沉积
K ₄ (城墙岩群)	黄红紫色砂泥岩	干旱、半干旱条件下的河流相沉积
J _p (蓬莱镇组)	棕紫色砂泥岩	较干旱条件下的河流及间歇湖相沉积
J ₆ (沙溪庙组)	灰棕紫色砂泥岩	较湿润条件下的河流相沉积
J ₄ (自流井组)	紫红色砂泥岩	温湿条件下的滨湖沼泽~浅湖相沉积
T ₆ (巴东组)	紫红色泥岩	炎热干燥条件下的大陆架沉积
T ₁ (飞仙关组)	暗紫色页岩	干燥炎热高压下的陆缘或海相沉积

注 本表引自中科院成都分院土壤研究室(著)《中国紫色土》,科学出版社 1991 年出版,略作修改。

按照沉积学岩性岩相观点,一套完整的红层软岩旋回层由底到顶一般是砾岩、含砾砂岩、砂岩、细砂岩、泥岩(或黏土岩),顶部还可能有生物化学作用的泥灰岩、石膏等生物化学沉积。红层软岩一般在盆地中部沉积最厚,向盆地边缘逐渐变薄,甚至消失,如希腊的 Thessaloniki 红层盆地(N₂),在盆地中心部位最大厚度大于 500m,而在该盆地东部边缘红层减薄直至尖灭。

表 2-3 国外部分国家或地区红层形成的沉积环境特征

国 家	分 布 位 置	地层时代	岩 性	厚 度 (m)	古沉积环境
尼日尔	伊勒姆登盆地	K	灰绿-黄绿色 片状黏土岩		干旱盐碱环境下浅海相沉积
			黄灰色块状粉 砂质黏土岩		干旱盐碱环境下浅海~泻湖相沉积
西班牙	Alcubierre Sierra 地区的 Ebro 盆地	E	含石膏泥灰岩		陆缘碎屑和蒸发岩相沉积和湖相 沉积
希 腊	Balkan 半岛地区一系 列的断陷盆地	$E_3 \sim N_2$	黏土、泥灰质土 细砂、砂、砾和 疏松砂岩	1000	湖相、浅海相、半咸水相沉积(E_3 以 前气候干旱~半干旱; N_1 气候湖 湿; N_2 气候干旱)

多数新生代红层盆地,往往是构造作用下形成的断(拗)陷盆地,盆地在不断接受泥质沉积物沉积而形成现在的红层盆地。除了在盆地早期形成过程中遭受构造运动作用,而且红层盆地形成后也还往往历经后期的构造活动。如我国云南蒙自盆地,是老第三纪的中晚期即喜马拉雅第一幕构造运动作用下,为 NW、NE、NNW 向断裂构造形成的呈 NNW 向展布的断陷盆地,在盆地内形成了上新世湖相沉积物(曲永新等,1987),在 $N_2 \sim Q_1$ 的地壳运动,即喜马拉雅第三幕构造运动作用下,蒙自一大屯断陷盆地发生差异性的断块活动,盆地周围的山体强烈抬升,盆地内 N_2 的泥灰岩在 NE~SW 向构造应力作用下产生褶皱和断裂。而希腊的 Balkan 半岛地区一系列的断陷盆地,自 E 形成以来,直到 N_2 一直遭受构造活动作用,而且在 E~ N_2 时期,不同阶段沉积中气候特征还有较大差异,即 E 以前时期气候干旱~半干旱, N_1 时期气候潮湿, N_2 时期气候又变干燥,反映了沉积后期不仅受到构造活动的继续作用,而且气候也逐渐发生变化,从而使红层的物理力学性质也相应发生变化。

据研究,第三系红层中最典型的生物化石是三趾马化石,在内蒙古、陕西、山西等地的第三系红层中均有发现,而黄河上游中型电站(直、康工程)的第三系红层中的生物化石,经成都理工大学鉴定后,也证实含三趾马化石。

2.2 红层软岩、硬黏土的物质组成

物质组成主要包括粒度成分、化学成分和黏土矿物等。而黏粒含量、化学成分的类型及含量以及黏土矿物的类型及含量对红层软岩、硬黏土的物理性质、水理性质起控制作用,分析红层的物质组成,对于揭示红层软岩、硬黏土的物理、水理性质有重要的工程意义。

2.2.1 颗粒组成

由于沉积环境的差异,不同地区红层的粒度成分也具有一定的差异,但总的趋势是黏粒含量较高(表 2-4、表 2-5),且粉砂质泥岩或泥质粉砂岩中黏粒含量较黏土岩或页岩明显偏低,这也反映了沉积环境中水动力条件的差异。