

科技著作出版资助项目

近水平复杂层状 岩体质量分级与评价研究

闫长斌 吴伟功 王贵军 李文雅 著

中原出版传媒集团
大地传媒

 河南科学技术出版社

河南省科技著作出版项目

近水平复杂层状岩体质量分级与评价研究

闫长斌 吴伟功 王贵军 李文雅 著

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书立足层状岩体结构特点,在全面调研国内外相关文献资料的基础上,从层状岩体结构类型划分标准、层状岩体结构特征对岩体质量分级的影响、层间剪切带对复合岩体稳定性影响机制、含层间剪切带的岩体质量分级方法、岩体质量分级智能预测方法等方面对近水平复杂层状岩体质量分级与评价问题进行了系统深入的研究。结合黄河中游地区某大型水利枢纽工程地质条件,建立了适用于近水平层状岩体的质量分级指标体系和评价方法体系,并利用该体系完成了坝基岩体、地下洞室围岩质量分级的工程实践。本书研究成果丰富和完善了岩体质量分级理论方法与实践体系,可为层状岩体地区相关工程设计优化与施工安全提供参考依据和科学指导。

本书可供水利、土木、矿山、铁路、公路、国防等系统的广大科技工作者、工程技术人员以及该专业领域高等院校的教师、研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

近水平复杂层状岩体质量分级与评价研究/闫长斌等著. —郑州:
河南科学技术出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-5349-8856-1

I. ①近… II. ①闫… III. ①层状构造-分级-研究 ②层状构造-
评价-研究 IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 190187 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65737028 65788613

网址: www.hnstp.cn

责任编辑: 申卫娟

责任校对: 束华杰

封面设计: 苏 真

版式设计: 栾亚平

责任印制: 张 巍

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 11.75 字数: 270 千字

版 次: 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 200.00 元

如发现印、装质量问题,影响阅读,请与出版社联系并调换。

前 言

随着国家基础设施与经济建设的蓬勃发展,水利水电、公路与铁路交通、工业与民用建筑、矿山、核电、国防等领域的岩石工程越来越多,而且呈现出规模更加宏大、体型更加复杂、功能更加多样等特点,例如深埋特长隧道、大跨度复杂地下厂房群、复杂高陡岩质边坡等,给岩石力学与工程科技工作者带来了严峻的挑战。在复杂岩体中修建岩石工程必然面临经济与安全两个互相矛盾的难题,合理确定二者的最优结合点,有赖于岩体质量及其稳定性。对岩体质量做出准确而合理的评价,不仅可以很好地反映众多因素对岩体稳定性的影响程度,而且可以用简单的等级形式表达岩体对工程建筑物的适宜性,将复杂的地质体用简单的信息传递给工程设计人员。因此,岩体质量分级是当前工程地质评价的重要内容,在岩石力学、工程地质与工程设计、施工之间起着桥梁纽带的作用。

影响岩体质量的因素多种多样,主要体现在岩块质量和岩体结构两个方面,其中岩体结构是基础,是岩体稳定性的控制性因素,层状岩体质量分级与评价应充分重视层状岩体结构特征的影响。就岩体质量分级而言,层状岩体与其他结构岩体相比,既有共性和相同点,又存在个性和差异。在进行层状岩体质量分级与评价时,应在保留共性的基础上,突出层状岩体结构自身个性的影响。例如,层状岩体往往具有横观各向同性明显、软硬岩石相间、层间间距变化大等特点。另外,近水平层状岩体往往还存在层间剪切带(含泥化夹层)发育、岩石相变大等一系列复杂问题,给原本就十分复杂的岩体质量分级和评价带来许多困难。尽管现有的岩体质量分级方法已经很多,也大多考虑了岩体结构特征,然而这些方法并不是单独面向层状岩体的,无法突出层状岩体的鲜明特征,也很难全面系统地反映层状岩体质量的影响要素,特别是近水平复杂层状岩体,例如层状岩体结构划分、层间剪切带的影响等。鉴于诸多个性因素的影响,层状岩体质量分级与评价不宜完全照搬套用现有的岩体质量分级与评价方法。基于此,有必要在现有岩体质量分级方法的基础上,紧密结合层状岩体结构特征,开展近水平复杂层状岩体质量分级与评价研究,结合具体工程实践建立适用于近水平复杂层状岩体的质量分级与评价体系。

本书第1章概论部分主要给出了研究课题的重要意义、国内外研究现状、主要研究内容及关键技术路线。第2章在总结现有规程规范有关层状岩体结构划分标准的基础上,指出了层状岩体结构类型的划分标准存在的差异和不足,提出了基于结构面间



距的层状岩体结构分类方案。第3章探讨了层状岩体结构特征对岩体质量分级评价指标的影响,重点论述了层状岩体各向异性、层间剪切带等对岩体质量分级与评价带来的诸多影响。第4章论述了层间剪切带对复合岩体稳定性的影响,借助突变理论揭示了含层间剪切带的复合岩体失稳破坏非线性力学机制。第5章根据层状岩体结构分类方案和层间剪切带发育特征,建立了含层间剪切带的层状复合岩体质量分级与评价方法。第6章结合某大型水利枢纽坝址区具体地质条件和层状岩体结构特点,对坝基岩体和地下洞室围岩质量进行了初步分级研究。第7章指出了传统距离判别法和层次分析法应用于岩体质量分级存在的不足,建立了改进的距离判别-层次分析法预测模型,并结合某大型水利枢纽工程对其有效性进行了验证。第8章紧密结合层状岩体结构特点,建立了近水平复杂层状岩体质量分级动态指标体系和三步方法体系,并利用该体系完成了某大型水利枢纽坝基岩体、地下洞室围岩质量分级的工程实践。第9章对研究成果进行了系统的总结,并提出了进一步研究展望。

本书的研究内容是在国家自然科学基金-河南人才培养联合基金(编号:U1504523)、河南省高等学校重点科研项目(15A410001)、黄河勘测规划设计有限公司自主研发开发项目(编号:2009-ky01)以及河南省科技著作出版项目的联合资助下完成并出版的,在此特表示衷心的感谢!

由于本书的部分内容属于探索性研究,有些观点和结论尚不成熟,但愿能起到抛砖引玉的作用。由于水平所限,书中不妥之处,恳请读者批评指正!

闫长斌

2017年1月

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 课题来源与研究意义	(4)
1.3 国内外研究现状	(5)
1.3.1 地下洞室围岩质量分级方法	(5)
1.3.2 坝基岩体质量分级方法	(10)
1.3.3 岩体质量智能分级方法	(13)
1.3.4 岩体质量分级方法存在的问题与发展趋势	(16)
1.4 主要研究内容与关键技术路线	(17)
1.5 本课题研究的主要创新点	(18)
1.6 研究成果的工程应用情况与推广前景分析	(20)
1.6.1 研究成果在某大型水利枢纽工程中的应用情况	(20)
1.6.2 研究成果推广应用前景分析	(21)
1.7 小结	(21)
第 2 章 层状岩体结构类型划分方案及其工程应用	(22)
2.1 引言	(22)
2.2 层状岩体结构类型划分现状	(23)
2.3 层状岩体结构类型划分方案（标准）	(28)
2.4 层状岩体结构类型划分方案及其工程应用	(29)
2.4.1 地层岩性	(29)
2.4.2 地质构造与结构面特征	(30)
2.4.3 层状岩体结构面间距统计情况	(32)
2.4.4 层状岩体结构类型划分方案	(34)
2.5 小结	(37)
第 3 章 近水平层状岩体结构特征对岩体质量分级的影响	(38)
3.1 引言	(38)
3.2 层状岩体结构对岩体质量分级指标的影响	(39)



3.3	层状岩体中的各向异性问题	(41)
3.3.1	层状岩体强度的各向异性特征	(41)
3.3.2	层状岩体变形的各向异性特征	(42)
3.4	层状岩体中的层间剪切带问题	(42)
3.5	坝址区层状岩体结构发育特征	(44)
3.5.1	地层岩性特征	(44)
3.5.2	相变与层间剪切带问题	(47)
3.5.3	节理裂隙与地下水发育规律	(50)
3.5.4	各向异性或横观各向同性问题	(52)
3.6	近水平层状岩体质量分级的几个问题	(54)
3.7	小结	(55)
第4章	含层间剪切带的层状复合岩体失稳机制研究	(56)
4.1	引言	(56)
4.2	层间剪切带对层状复合岩体稳定性影响的作用机制	(57)
4.2.1	含层间剪切带的层状复合岩体系统力学模型	(57)
4.2.2	层间剪切带对层状复合岩体系统稳定性的影响分析	(58)
4.3	含层间剪切带的层状复合岩体失稳突变理论模型	(60)
4.4	层间剪切带引起层状复合岩体变形破坏的演化过程	(64)
4.5	小结	(66)
第5章	含层间剪切带的层状复合岩体质量分级研究	(67)
5.1	引言	(67)
5.2	坝址区层间剪切带发育特征	(68)
5.2.1	坝址区层间剪切带的勘察方法与空间分布规律	(69)
5.2.2	坝址区层间剪切带的抗剪强度参数取值	(72)
5.3	含层间剪切带的层状岩体质量分级评价方法	(75)
5.3.1	有关岩体质量分级方法对层间剪切带的考虑	(75)
5.3.2	含层间剪切带的层状复合岩体质量分级评价指标	(76)
5.3.3	含层间剪切带的层状复合岩体质量分级评价方法	(77)
5.4	层状复合岩体质量分级修正 BQ 法的有效性验证	(80)
5.4.1	工程地质条件	(80)
5.4.2	考虑层间剪切带影响的层状岩体质量分级结果	(81)
5.4.3	修正的 BQ 法与其他分级方法的比较	(81)
5.5	小结	(84)
第6章	近水平复杂层状岩体质量初步分级研究	(85)
6.1	引言	(85)
6.2	岩体质量分级基本方法	(86)
6.2.1	南非地质力学 RMR 分级法	(86)
6.2.2	岩体质量指标 Q 系统分级法	(88)



6.2.3	《工程岩体分级标准》BQ 分级法	(91)
6.2.4	《水利水电工程地质勘察规范》HC 分级法	(93)
6.3	岩体质量分级考虑因素	(93)
6.3.1	分级因素的选取原则	(94)
6.3.2	分级指标的定性描述与定量划分	(94)
6.3.3	分级指标权重的分配	(96)
6.4	坝基岩体质量分级初步研究	(97)
6.4.1	坝址区地层岩性、地质构造特征	(97)
6.4.2	坝基岩体结构分类	(97)
6.4.3	坝基岩体质量分级因素与指标	(98)
6.4.4	坝基岩体质量分级初步结果	(100)
6.5	地下洞室围岩质量分级初步研究	(101)
6.5.1	洞室围岩质量分级方法	(101)
6.5.2	洞室围岩质量分级指标	(101)
6.5.3	洞室围岩质量初步分级的几种方案	(102)
6.5.4	主要建筑物洞室围岩质量初步分级结果与评价	(105)
6.5.5	四种岩体质量分级方法之间的相关性分析	(105)
6.6	小结	(110)

第7章 改进的距离判别-层次分析法及其在复杂层状岩体质量分级中的应用

		(111)
7.1	引言	(111)
7.2	距离判别法基本原理	(114)
7.2.1	马氏距离判别法	(114)
7.2.2	判别准则的有效性评价	(116)
7.3	距离判别法存在的不足及其改进	(117)
7.3.1	基于主成分分析的加权距离判别法	(117)
7.3.2	基于层次分析法的加权距离判别法	(119)
7.4	基于改进的距离判别-层次分析法的岩体质量分级	(123)
7.4.1	岩体质量分级指标的选择与级别划分的确定	(123)
7.4.2	改进的距离判别-层次分析法的岩体质量分级步骤	(124)
7.4.3	改进的距离判别-层次分析法岩体质量分级模型	(124)
7.4.4	改进的距离判别-层次分析法模型的有效性检验	(127)
7.5	改进的距离判别-层次分析法在近水平复杂层状岩体质量分级中的应用	(130)
7.5.1	近水平层状岩体质量分级指标体系	(130)
7.5.2	近水平层状岩体质量等级划分	(132)
7.5.3	基于改进的层次分析的指标体系权重确定	(132)
7.5.4	层状岩体质量分级的改进的距离判别-层次分析法模型及	



检验	(134)
7.6 小结	(138)
第 8 章 近水平复杂层状岩体质量分级评价体系与工程实践	(139)
8.1 引言	(139)
8.1.1 层状岩体质量分级的影响因素	(139)
8.1.2 层状岩体质量分级的主要原则	(140)
8.2 近水平复杂层状岩体质量分级体系	(141)
8.2.1 近水平复杂层状岩体质量分级指标体系	(141)
8.2.2 近水平复杂层状岩体质量分级方法体系	(146)
8.3 基于层状岩体质量分级方法的岩体力学参数与支护措施	(149)
8.4 近水平复杂层状岩体质量分级的工程实践	(153)
8.4.1 坝基岩体质量分级	(153)
8.4.2 洞室围岩质量分级	(154)
8.4.3 岩体力学参数建议值与支护措施	(163)
8.5 小结	(164)
第 9 章 结论与建议	(165)
9.1 结论	(165)
9.2 建议	(167)
参考文献	(169)

第1章 概 论

1.1 引言

随着国家基础设施与经济建设的蓬勃发展,水利水电、公路与铁路交通、工业与民用建筑、矿山、核电、国防等领域的岩石工程越来越多。特别是近30年来,随着西部大开发战略的顺利实施,这些不同类型、不同用途的岩石工程开始呈现出规模更加宏大、体型更加复杂以及功能更加多样等特点,例如深埋特长隧道、大跨度复杂地下厂房群、复杂高陡岩质边坡等,给岩石力学与工程领域广大科技工作者带来了严峻的挑战,出现了一系列亟待解决的热点与难点问题,例如深埋特长隧洞施工关键技术、高地应力岩爆防治、复杂工程岩体质量分级方法等。

工程岩体是指岩石工程周围的、受岩石工程影响的岩体^[1-2],这些岩石工程包括地下工程、边坡工程以及与岩石有关的其他地面工程。严格地讲,工程岩体是工程结构的一部分,与建筑物共同承受荷载,是岩石工程整体稳定性评价的对象。一般而言,所有工程岩体均属于复杂岩体的范畴,而在复杂岩体中修建岩石工程必然面临经济与安全两个互相矛盾的难题。合理确定二者的最优结合点,有赖于工程岩体自身的质量及其稳定性^[2]。岩体质量是岩体固有的、影响岩体稳定性的一种最基本的属性,是工程岩体物理力学性质的综合反映。

由于复杂岩体本身在组织结构和工程性质上千差万别,如何在工程建设的各个阶段(规划阶段、可行性研究阶段、初步设计阶段与施工图设计阶段)中区分出岩体质量的好坏和表现在稳定性上的差异,具有十分重要的工程价值和现实意义。质量好的岩体,稳定性就好,不需要或者只需要很少的加固支护措施,就能实现岩体自身稳定,保证施工安全,降低施工成本;而质量差的岩体,稳定性也差,往往对施工安全造成严重威胁,需要复杂昂贵的加固支护措施。因此,准确及时地对工程岩体质量和稳定性做出合理评价,是快速经济地利用岩体进行开挖、加固设计,保障岩石工程施工安全与运行安全的前提与基础工作,同时也是工程结构布置与参数选择、科学生产管理以及经济效益评价的基本依据之一。

针对不同类型岩石工程的具体特点,根据影响岩体稳定性的各种地质条件和岩石物理力学性质,将工程岩体划分为不同的质量等级,进而反映其稳定程度,以此为标尺进行岩体稳定性评价,这一过程或方法就是工程岩体质量分级。由此可见,工程岩体质量分级是基于岩石工程的实际需求应运而生的。Hoek 和 Brown^[3]曾经提到:“把具



体工程和别人的经验结合起来，岩体分类就起到了桥梁作用，使得工程师把从别的工程得来的经验和自己的工程结合起来。”根据岩石工程的用途、性质与要求，将工程岩体的某种属性加以概略的划分，称为岩体分类^[4]。因此，工程岩体质量分级有时也称为工程岩体分类、工程岩体分级等。工程岩体质量分级的服务对象不同，由此派生出来的与工程类型有关的叫法也不同。例如，当岩体质量分级限于地下工程时，则称围岩分类或围岩分级；当岩体质量分级限于坝基工程时，则称坝基岩体分类或坝基岩体质量分级等；当岩体质量分级限于边坡工程时，则称边坡岩体分类或边坡岩体质量分级等。与《工程岩体分级标准》（GB/T 50218—2014）考虑的问题一致^[5]，本书采用“分级”而不是“分类”，原因在于：“分类”一词通常指的是属性不同的类型之间的区分，是按照事物的性质划分不同的类别，一般是将无规律的、无序的事物划分为有规律的，各类别之间具有“质”的区别，例如姓氏的分类、论文题材的分类、按地质成因的岩石分类（岩浆岩、变质岩、沉积岩）；而“分级”则通常是针对同类事物在某种属性上的不同程度进行区分，事物之间仅仅具有“量”的差别，而不存在本质上的差异。因此，本书将划分岩体质量及其稳定性的过程统称为岩体质量分级。

工程岩体质量分级是建立在大量的岩石物理力学试验和以往工程实践的基础上的，是岩体稳定性评价的一种简易快速的方法。工程岩体质量分级的目的是评价工程岩体的稳定性。岩体稳定性的评价，不外乎三种基本方法^[2]，即岩体物理模拟试验方法、岩体数值计算分析方法和岩体质量分级方法（图 1-1）。其中前两种方法是在地质勘察和详尽的岩石力学测试的基础上，通过合理的简化模型（包括荷载、边界条件、本构关系和材料等的简化），运用模型试验、数学与计算机手段来分析岩体稳定性，研究其支护措施。而岩体质量分级方法只需要进行少量简易的地质勘察和岩石力学试验就能确定岩体质量级别，做出岩体稳定性评价，给出相应的岩体物理力学参数，为加固支护措施提供参考依据。由此可见，岩体质量分级方法不需要详尽的地质勘察和岩石力

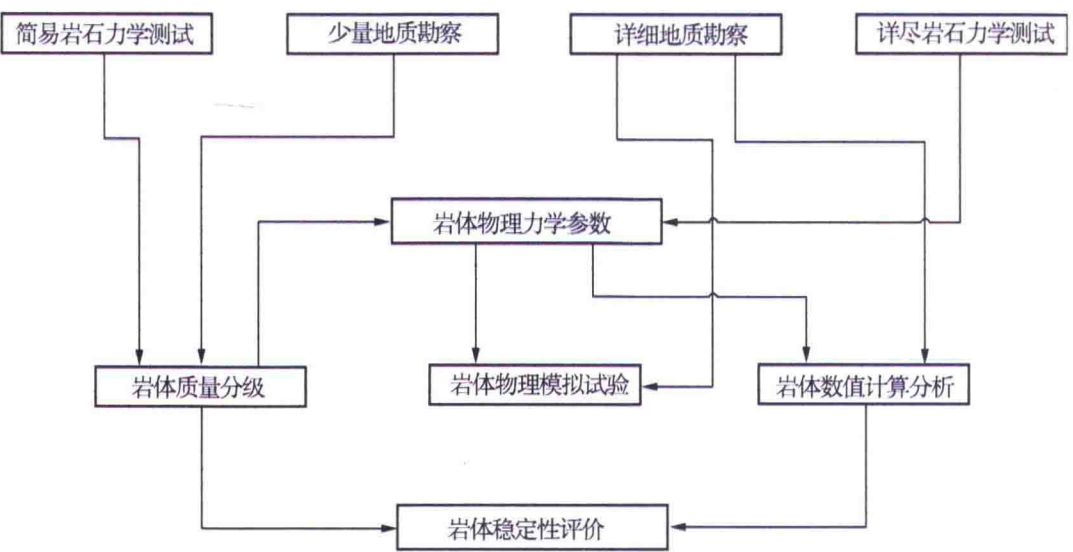


图 1-1 岩体稳定性评价的三种基本方法



学测试,尤其是现场大型测试,从而可以在大大减少勘察、试验工作量,缩短前期工作时间的情况下,为工程建设提供勘察、设计和施工等工作不可或缺的基本依据。

岩石工程的安全稳定与岩体工程地质特性密切相关,而岩体工程地质特性主要包括结构、强度、变形等,其中岩体结构是基础。从宏观上讲,岩体结构可分为块状结构和层状结构两大类^[6],其中层状结构岩体约占陆地面积的2/3,是工程建设中经常遇到的主要岩体结构类型。层状岩体是指分布有一组占绝对优势结构面(如层面、层理、片理等)的岩体,是典型的横观各向同性体。优势结构面大多属于物质分界面,平行优势结构面方向,岩体组成基本相同,而垂直优势结构面方向,岩体的组成则通常呈现频繁的软硬交替。层状岩体中的这种优势结构面多属原生结构面,当构造作用比较强烈时,会产生层间剪切错动,使得优势结构面的物理力学性质进一步弱化,甚至成为对岩体稳定性起控制作用的层间剪切带。另外,由于优势结构面多属物质分界面,层状岩体中的其他构造结构面(节理裂隙等)在很大程度上受控于优势结构面的发育和分布^[7]。层状岩体以沉积岩为主,也包括许多变质岩,由于分布范围广,在人类工程建设活动中会大量遇到层状岩体稳定性问题。对层状裂隙岩体的工程地质特性缺乏足够的认识 and 了解,往往会造成许多重大工程事故或者延长工期、增加投资等。例如,意大利瓦依昂水库近坝库段的巨型滑坡就是沿层面发生的;我国葛洲坝水利枢纽由于对泥化夹层问题认识不足,导致工程曾经几度停工,不得不进行补充勘察、设计,造成投资大幅增加。

层状岩体由于是成层性沉积,往往具有横观各向同性明显、软硬岩石相间、层面间距变化大等特点。层状岩体中不但发育有原生层面、层理等,而且还有后期改造形成的节理裂隙,甚至断层、褶皱等构造以及次生、表生结构面等。另外,层状岩体中还存在剪切破碎带和泥化夹层发育、岩石相变大等一系列复杂问题。这些问题给原本就十分复杂的层状岩体质量分级和评价带来了许多困难。

岩体结构是岩体稳定性的控制性因素,层状岩体质量分级与评价应充分重视层状岩体结构特征及其与层状岩体结构有关的影响因素。就岩体质量分级而言,层状岩体与其他结构岩体相比,既有共性和相同点,又存在个性和差异。因此,在进行层状岩体质量分级与评价时,应在保留共性的基础上,突出层状岩体结构自身个性的影响。例如,决定层状岩体基本质量的主要因素,仍然是岩石坚硬程度和岩体完整程度,然而划分层状岩体类型的单层厚度或结构面间距指标也在很大程度上决定了层状岩体的完整程度。工程地质调查发现,与层面、层理相交的节理裂隙密度往往与层状岩体的单层厚度成反比,即单层厚度越大,节理裂隙发育越少;反之,则节理裂隙越发育。层间剪切带是层状岩体经常遇到的软弱结构面,如何考虑其对岩体质量等级的影响,也是层状岩体质量分级的一个特殊点。另外,在建立岩体质量分级结果与岩体物理力学参数估算时,应充分注意方向性带来的影响。

尽管现有的岩体质量分级方法已经很多,也大多考虑了岩体结构特征,但是这些方法并不是单独面向层状岩体的,无法突出层状岩体的个性特征,也很难全面系统地反映层状岩体质量与稳定性的影响要素,例如单层厚度(结构面间距)和层间剪切带等。鉴于诸多个性因素的影响,层状岩体质量分级与评价不宜完全照搬套用现有的岩



体质量分级与评价方法。为此,层状岩体质量分级与评价应在现有岩体质量分级与评价方法的基础上,紧密结合层状岩体结构特征,针对具体工程类型和工程部位来进行,例如坝基层状岩体质量分级和地下洞室层状围岩质量分级。

由于不同区域的工程地质条件不同,现行通用岩体质量分级方法有时很难取得令人满意的效果,特别是对于一些地质条件复杂而又相对特殊的岩石工程。为此,国内外许多大型水利水电工程,基于通用分级方法,结合本工程具体特点和特定的地质条件,研究建立了适合于本工程的岩体质量分级与评价体系,例如黄河李家峡水电站、四川雅砻江二滩水电站、云南澜沧江小湾水电站和长江三峡水利枢纽等。

某大型水利枢纽作为黄河干流上的七大控制性骨干工程之一,在黄河治理开发和水沙调控体系方面具有极为重要的战略作用。该水利枢纽工程坝址区基岩主要为中生界三叠系中统的长石砂岩、钙泥质粉砂岩和少量的黏土岩,岩层为倾角 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 的单斜构造,近水平层状结构特征十分明显,且岩石相变和层间剪切带发育问题较突出。鉴于该水利枢纽工程的重要性,特别是针对层状岩体结构特征明显以及层间剪切带发育等相关特点,有必要开展近水平复杂层状岩体质量分级与评价研究,为工程优化设计和施工安全等提供基础支撑。

1.2 课题来源与研究意义

岩体质量的好坏直接关系到工程的安全性和经济性。对岩体做出准确而合理的质量评价,不仅可以较好地反映众多因素对岩体稳定性的影响程度,而且可以用简单的质量等级表达岩体对工程建筑物的适宜性,将复杂的地质体用简单的信息传递给工程设计人员。因此,岩体质量分级是当前工程地质评价的重要内容,在岩石力学、工程地质与工程设计、施工之间起着桥梁纽带的作用。

本课题瞄准岩体质量分级与评价研究前沿,立足层状岩体结构特点,紧密结合某大型水利枢纽工程实践,力争在层状岩体质量分级与评价方法的理论与应用方面取得创新性研究成果,为工程设计以及施工方案优化提供科技支撑与基础参考。本研究课题来源于某大型水利枢纽项目建议书和可行性研究阶段地质勘察与设计需求,得到国家自然科学基金-河南人才培养联合基金(编号:U1504523)和黄河勘测规划设计有限公司自主研究开发项目(编号:2009-ky01)立项支持。

本课题的总体目标是:针对层状岩体结构类型划分标准存在的差异和不足,提出合理的层状岩体结构类型划分方案;研究层状岩体结构特征对岩体质量分级的影响;结合某大型水利枢纽工程具体地质条件,研究层间剪切带对岩体质量分级与稳定性评价的力学机制,初步建立含层间剪切带影响的岩体质量分级方法;采用定性定量相结合的多因素综合方法对某大型水利枢纽层状岩体进行初步质量分级,并对初步分级结果进行相关性分析;考虑岩体质量影响因素取值的模糊性、随机性和不确定性,对传统距离判别法应用于岩体质量分级研究中存在的不足进行改进,利用建立改进的距离判别-层次分析模型对岩体质量分级进行优化预测;最终建立适用于近水平层状岩体的质量分级指标体系和评价方法体系,并在此基础上对某大型水利枢纽坝基层状岩体



和地下洞室层状围岩质量进行具体分级实践。

本研究课题的应用范围涉及水利水电工程、隧道工程、矿山工程、土木工程和环境保护等多个领域,可为层状岩体质量分级与评价等提供技术参考。鉴于层状岩体在自然界岩石中所占的比例高达75%以上,在我国各个区域均有分布,是工程建设过程中经常遇到的岩体结构类型,特别是黄河中游地区,例如小浪底、万家寨、古贤、龙口、沙坡头等大型水利水电工程,都涉及层状岩体。因此,该项目研究成果不仅可以丰富和完善岩体质量分级与评价方法体系,为工程设计和施工优化提供基础支撑,而且可以为类似工程提供较好的参考依据,为黄河治理与开发、水沙调控体系建设提供技术服务,具有显著的理论意义和工程应用价值。

1.3 国内外研究现状

岩体分级的提出与发展,是随着人们工程意识的不断转变和适应工程建设的不同需求而不断进步的。自霍夫曼(Hoffman)1774年首先对石灰岩进行系统分级研究以来,岩体质量分级伴随着资源开发、工程建设的步伐走过了200多年的历史^[8]。19世纪以前,岩体分级主要从施工角度出发,为施工服务。20世纪初,岩体分级将岩体视为荷载,还没有意识到岩体自身的承载能力。直到20世纪50年代,才陆续出现以岩体稳定性评价和支护方式确定为主要目的的分级方法。评价岩体稳定性和确定支护方式,是目前绝大多数分级方法的主要指导思想。岩体质量分级作为一种经验设计方法,已经成为岩石工程勘测设计领域的重要手段。随着世界范围内岩石工程建设的日益增多,岩体质量分级方法得到迅速发展。据不完全统计,迄今为止国内外已经提出的岩体质量分级方法不下百种。岩体质量分级与评价研究及其应用仍是当今岩石力学与工程领域的热点之一。

1.3.1 地下洞室围岩质量分级方法

1.3.1.1 国外有关地下洞室围岩质量分级的研究现状

岩体质量分级与评价研究最早始于地下工程,后来逐渐扩展到坝基工程和边坡工程中。从最初的岩石质量分级开始,地下工程围岩质量分级的发展经历了漫长的不断走向成熟的过程。国外有关地下洞室围岩质量分级研究起步较早,从起步到成熟大致经历了三个阶段:①萌芽与起步阶段(20世纪50年代以前):主要包括苏联普氏岩石坚固系数分级(1906年)、Ф. М. Садренекий分级(1937年)、Н. Н. Маслов的岩石地质技术分类(1941年)、И. В. 波波夫分级(1948年)和美国的Terzaghi岩石载荷分级(1946年)。其中,以Terzaghi岩石载荷分级为代表,该方法是通过评估岩石载荷提出的第一个适用于钢支护设计的实用分类系统,将岩石从坚硬与原状岩石到膨胀岩石分为九级^[9],20世纪80年代以前曾在美国占据统治地位,在钢支护隧道方面取得巨大成功。②承启与过渡阶段(20世纪50~70年代):主要包括H. Lauffer引入隧道无支护稳定时间概念,提出的围岩稳定时间分级(1958年);经过对围岩稳定时间分级的修正,Pacher等人提出的新奥分类法(NATM,1964年);D. U. Deere提出的岩石质量RQD分



级方法(1967年),用RQD值将岩体质量分为五级,由于RQD分级法简单实用,至今仍应用于各类岩石工程中。另外,还有日本电研式岩体分类(田中法,1960年)、日本土质土工学会岩体分类(1969年)和日本土研式岩体分类(1969年),等等。③成熟与综合阶段(20世纪70年代以后):主要包括Wickham提出的岩石结构评价分类方法(RSR,1972年),该方法是第一个将分类权值与分类参数相对重要性联系起来的系统;Z. T. Bieniawski提出的RMR分类系统(1973年),该方法根据岩石的单轴抗压强度、RQD值、不连续面方向、不连续面的间距、不连续面性状和地下水条件等六个方面的特征分别评分,然后将各项评分相加,根据总得分评判岩体质量,将岩体质量分为五级;挪威学者Barton根据隧道围岩统计提出的Q系统法(1974年),该方法用RQD值、节理组数 J_n 、节理面的粗糙度 J_r 、节理面的蚀变系数 J_a 、节理水折减系数 J_w 、应力折减系数SRF等六项参数计算岩体质量指标Q值,将岩体质量分为九级。另外,还有国际岩石力学学会(ISRM)提出的通用的岩体地质力学分类(20世纪80年代);美国农业部土壤保护局Williamson提出的统一的岩石分类系统(VRCS,1984年);以及挪威Palmstrom提出的RMI系统分类(1995年),等等。其中,Q系统法是专门为地下洞室工程提出的,RMR分类尽管最初也是为隧道等地下工程提出的,但是后来也在岩石边坡、岩石基础、地层可剥离性及采矿问题中得到应用^[9]。此后,在大量的工程实践与应用过程中,上述许多方法又得到进一步修正和改进。

1.3.1.2 国内有关地下洞室围岩质量分级的研究现状

20世纪70年代以前,我国围岩质量分级主要引用苏联的普氏坚固系数分级方法。1972年以后,随着我国岩石工程建设的广泛开展,结合我国岩石工程实践的需求,逐步提出了具有我国特色的地下工程围岩质量分级方法。其中,具有代表性的方法包括:谷德振、黄鼎成提出的岩体质量系数Z分级^[6](1979年),利用岩体完整性系数、结构面抗剪强度特性和岩块坚硬程度来计算岩体质量系数Z,根据Z值将岩体分为五种类型。陈德基^[10](1979年)提出的岩体质量分级的新指标——块度模数法(M_k),由各级块度所占百分数和裂隙性状系数来计算,可用以表征不同尺寸块体组合及其出现的概率。杨子文等(1979年)提出的岩体质量指标(M)分类^[11],以岩体完整性、岩石风化及含水性作为分级因子,通过各因子组合进行岩体分级。杨志法(1978年)提出岩体结构定量分类方法(岩体结构指标B)。孙万和、孔令誉(1984年)也分别提出了以岩体结构为指导思想的工程岩体分类及评价方法。曹永成、杜伯辉(1995年)在RMR体系基础上提出了修改的CSMR法。另外,还有王石春等人的RMQ分级,邢念信的坑道工程围岩分级,王思敬的岩体力学性能质量系数Q分级,东北大学的围岩稳定性动态分级,等等。除此之外,国家和各行业制定的有关规程、规范中提出了许多实用的围岩质量分级方法,例如《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)(BQ分级法)、《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)(HC分级法)、《铁道隧道设计规范》(TB 10003—2005)(TB分级法),等等。纵观国内常用的分级方法,主要考虑了三大因素,即岩石强度、岩体完整性及不连续面性状、岩体赋存的环境条件,例如地下水、地应力等。

由此可见,国内外学者和专家对地下工程围岩质量分级十分重视,结合众多岩石



工程实践，提出了许多可行的地下工程围岩质量分级方法，地下工程围岩质量分级研究发展迅猛，取得了丰硕的理论与应用成果。纵观地下工程围岩质量分级发展历程，不难发现围岩质量分级经历了从单因素单指标到多因素多指标并列再到多因素多指标综合等三个不同的过程，经历了从定性描述到定量评价以及定性与定量相结合的发展过程。按照地下工程围岩质量分级考虑的影响因素、采用的分级指标及其评价方式，可将众多的分级方法概括归纳为以下四大类。

(1) 单因素单指标分级。

早期的围岩质量分级，为便于不同隧道之间的对比分析，一般只考虑影响围岩稳定的最主要的某一个因素，采用某一个指标进行围岩质量分级，以简化分析评价工作。代表性的单因素单指标分级方法及其分级指标和说明见表1-1。

表 1-1 单因素单指标的围岩质量分级

围岩质量分级方法	分级指标	备注
普氏岩石坚固系数分级	f	坚固性系数 $f = R_c/100$ 或者 $f = \tan\varphi$
Ф. М. Садренекий 分级		
И. В. 波波夫分级		
Terzaghi 岩石载荷分级	H_p	隧道顶岩石载荷 H_p ，与隧道宽 B 、隧道高 H 有关
H. Lauffer 围岩稳定时间分级	t_s	隧道开挖后无支护状态下所能支撑的时间
D. U. Deere 的 RQD 分级	RQD	岩石质量指标 RQD，反映岩体完整程度
以抗拉强度为依据的捷克分级法	R_t	
日本围岩准抗压强度分类法	R_c	
法国隧道围岩分类法	R_c	
弹性系数分级	E_{cm}/E_t	只能大致反映岩体的完整性

单因素单指标的围岩质量分级以影响地下工程围岩稳定性的最主要因素评价围岩的稳定性，抓住了主要矛盾。其最显著的优点是简便、经济、快速，最适合于工程前期阶段的较粗略的围岩稳定性评价。然而，从严格意义上讲，该方法仅从连续介质角度出发对岩体进行质量分级，不符合地下洞室工程地质特征是由多种因素决定的事实。影响地下工程围岩稳定性的因素是多方面的，仅用某一项指标很难全面地反映围岩质量。单因素单指标围岩质量分级方法以 D. U. Deere 的 RQD 法为代表，RQD 值的定义为：用直径 75mm 的金刚石钻头和双层岩芯管在岩石中连续钻进取芯，长度大于 10cm 的岩芯段长度之和与该回次总进尺的比值，以百分比表示。该方法根据 RQD 值将岩体质量分为五级（Ⅰ： $RQD>90$ ，岩石质量优秀；Ⅱ： $90>RQD>75$ ，岩石质量好；Ⅲ： $75>RQD>50$ ，岩石质量一般；Ⅳ： $50>RQD>25$ ，岩石质量差；Ⅴ： $RQD<25$ ，岩石质量很差）。由于 RQD 值获取简单，意义明确，迄今仍应用于国内外的许多岩石工程中，被用作钻孔岩芯记录的标准参数。而且，RQD 还是国外最常用的两种围岩质量分级方法（RMR 法和 Q 系统法）的基本元素。但是，RQD 没有考虑节理方向、密实度及充填材



料，不能单独提供对岩体的充分描述^[9]。由于不同成因、不同规模、不同形状、不同序次的结构面的切割，实际工程中得到的 RQD 值常呈现出明显的各向异性和不均一性，而且不同钻孔得到的 RQD 值离散性很大。因此，仅凭 RQD 值指标无法真实客观地评价地下工程围岩的质量情况。

(2) 多因素多指标并列分级。

由于在围岩稳定性分析中同时考虑了多种因素，一般综合了定性的描述和定量的指标，并且将围岩质量分级与围岩力学性质以及支护设计有机地融合，因此多因素多指标并列分级评价结果更全面、更客观、更可靠。代表性的多因素多指标并列分级方法，主要有以下几种^[12]：新奥分类法 NATM（Pacher，1964 年）、结构面间距-岩块强度的双参数分类（Franklin，1974 年）、国际岩石力学学会提出的岩体地质力学分类（ISRM，1981 年），以及我国的《水工隧洞设计规范》《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》《铁路隧道设计规范》《军用物资洞库锚喷支护技术规范》等。

多因素多指标并列围岩质量分级目前在我国的研究和应用较为普遍，例如水工隧洞、铁路、公路、地下铁道、军用物资洞库等工程。多因素多指标并列围岩质量分级与设计紧密结合，取得了较好的效果。多因素多指标并列围岩质量分级的主要问题有两点：其一是各因素之间并不是完全独立的，有的因素在评价过程中出现重复；其二是所考虑的因素是并列的，当各因素的分级指标值所对应的围岩类别不一致时，很难判别该围岩归属于哪一级别。

(3) 多因素多指标综合分级。

多因素多指标综合分级属于以定量评价为主，定性分析为辅的分级系统。由于考虑多种因素组合的多因素多指标综合分级以大量实践资料为基础，同时引进了围岩的动态分析，故对判断围岩的质量和稳定性是比较合理和可靠的^[13]。按计算岩体质量的数学模型不同，可分为确定性模型、不确定性模型和专家系统三类。其中确定性模型的代表性分级方法见表 1-2。

表 1-2 多因素多指标综合分级的确定性方法

确定性方法	围岩质量综合分级方法
	Barton 提出的岩体质量 Q 系统（1974 年）
	苏联 Bynmyeb 提出的稳定性指标 S 法（1977 年）
积商法	中国水电顾问集团成都勘测设计研究院提出的岩体质量指标 M 法（1978 年）
	谷德振等提出的岩体质量系数 Z 分级（1979 年）
	总参工程兵第四设计研究院提出的坑道工程围岩分级（1985 年）
	挪威 Palmstrom 提出的 RMI 系统分类（1995 年）