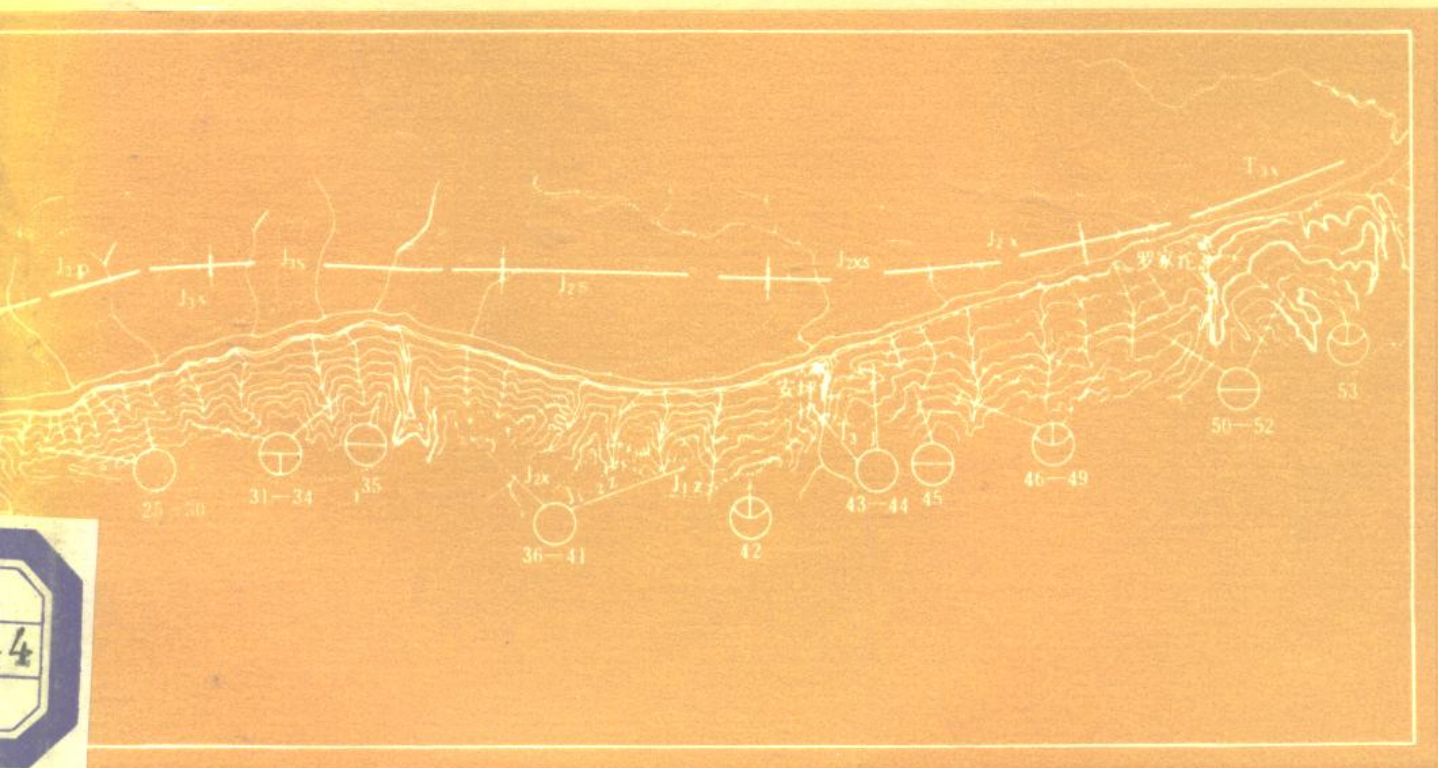


中国科学院地质研究所
工程地质力学开放研究实验室

长江三峡工程 库区顺层岸坡研究

张年学 盛祝平 著
孙广忠 王效宁



地震出版社

中国科学院地质研究所
工程地质力学开放研究实验室

长江三峡工程 库区顺层岸坡研究

张年学 盛祝平 著
孙广忠 王效宁

地震出版社

1993

(京) 新登字 095 号

内 容 提 要

本书是对举世瞩目的长江三峡工程库区一类潜在危险性最大的岸坡——顺层岸坡的变形破坏机制及稳定性评价研究的专著。以顺层岸坡的地质环境为出发点,着重从古今气候环境,河谷地文史,内外动力因素、边坡岩体结构与弱层矿物、物理力学性质等方面阐明岸坡变形破坏的机理。从野外调研实例出发,总结出顺层岸坡的多种变形破坏模式,进行了变形破坏与时效机制,地质力学模拟实验与数值分析,对重点研究段边坡进行了包括极限平衡、敏感因素、破坏概率、板裂介质力学等多种方法的稳定性评价。对变形破坏后的滑速滑程进行了研究与预测。最后对顺层岸坡段用自然坡危险与破坏概率法等进行了稳定性预测。上述研究内容与方法充分考虑了顺层岸坡的特点,可为其它地区广泛分布的顺层边坡研究作参考。

本书可作为工程地质、环境地质、交通、水利水电、城乡建设规划等有关专业工作者和高等院校师生的参考书。

长 江 三 峡 工 程 库 区 顺 层 岸 坡 研 究

张年学 盛祝平 著
孙广忠 王效宁

责任编辑: 商宏宽

※

地 震 出 版 社 出 版
北京民族学院南路9号
北京丰台丰华印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
全国各地新华书店经售

※

787×1092 1/16 印张 14.25 340 千字
1993年4月第一版 1993年4月第一次印刷

印数 0001-1000

ISBN 7-5028-0825-6/P·521

(1218) 定价: 9.50 元



前 言

顺层边坡是自然界中一类分布相当广泛的边坡。随着人类工程活动的规模和范围日益扩大,在水利水电,铁路公路交通建设,露天开采等方面都碰到了大量的顺层边坡问题。以往的工程实践表明,顺层边坡发生的问题最多,危害最大,对人类工程建设和生命财产造成了不可估量的损失,例如瓦依昂滑坡、塘岩光滑坡都是顺层岸坡失事的著名例子。由于顺层坡出现过许多工程事故,工程勘测、设计、施工人员也更加重视对它的研究。但是迄今为止,对顺层边坡的变形破坏机理、破坏模式、破坏过程、破坏后果和稳定性评价预测等还缺乏系统深入的研究,理论上也有许多不成熟的地方。长江三峡工程库区顺层岸坡广泛分布,这些岸坡在历史上曾发育了众多大、中、小和巨型滑坡,是一个研究顺层自然坡的理想地区。三峡工程的兴建、对顺层岸坡地区有何等程度影响?或者说顺层岸坡对水库运营、交通运输、人民生命财产以及城乡搬迁选址等环境工程地质问题应该作出论证和评价。为此,国家科委设立了“七五”攻关课题。这一研究不仅为三峡工程兴建与否和利弊提供科学论证,为三峡工程库区建设服务。而且可以作为一个特型样板或实例为其它工程建设所借鉴。

本书是中科院地质所科技人员对这一问题进行研究的总结,本书对岸坡的过去和现状、河谷发育史、古今气候环境、岸坡地质环境、内外动力因素以及岩体结构与力学特性等进行研究、分析岸坡变形破坏机理和过程,进行物理与数值模拟实验、对岸坡和滑坡的破坏后果与稳定性进行多种方法分析预测,提出了一些新观点、新方法和新结论。

本项研究和本书出版得到了中国科学院地质研究所工程地质学力学开放研究实验室的大力支持、荣幸地作为该室研究重点方向的环境工程地质第一批成果出版。

本书稿件经张咸恭教授、孙玉科研究员悉心审阅并提出宝贵意见,在此深表谢意。

本书著术人员为张年学——第一章至第四章和九章;盛祝平——第五章至第七章、王效宁第八章;孙广忠——第七章和简要小结。参与各章研究工作的有:第五章岩石力学试验由张年学、盛祝平、成彬芳和周瑞光完成;第六章物理与数值模拟试验由刘竹华、张年学、张文彬、盛祝平、陈月娥和邢民完成;第七章工作则由盛祝平、张年学、孙广忠、张文彬完成。第八章由王效宁独自完成,其余各章主要由张年学承担,盛祝平也参与了第九章部分工作。

本书的大多数资料是我们进行了大量野外工作获得的。还曾和中国地质大学、成都地质学院水文工程地质系师生、长办三峡大队库岸稳定调查组联合进行过三次野外考察,对他们参与的野外工作合作和帮助,在此一并表示感射。

目 录

绪 言	(1)
第一章 云阳—奉节段顺层岸坡的地质环境、 类型划分与破坏状况的发育分布规律	(5)
一、顺层岸坡区段的地层岩性与构造概述	(5)
二、顺层岸坡的工程地质岩组划分	(5)
三、顺层岸坡的地貌特征	(6)
四、顺层岸坡的类型划分	(9)
五、顺层岸坡破坏状况的发育分布规律	(12)
第二章 岸坡演变的古环境气候分析与河谷发育史讨论	(18)
一、一些滑坡年龄测试结果	(18)
二、古滑坡发育与古环境气候的关系	(21)
三、近 40 万年来的古环境气候变化与滑坡年龄的对比	(22)
四、河谷发育史与问题讨论	(26)
五、结 语	(31)
第三章 云阳—奉节段顺层岸坡变形破坏的 主要动力与稳定影响因素分析	(33)
一、云—奉地段降雨特点及降雨对滑坡产生与复活的概率分析	(33)
二、河流动力作用分析	(52)
三、地下水对岸坡稳定性的影响	(60)
四、人类活动对岸坡变形的影响	(61)
五、软弱岩层与滑带土的矿物组成及其对岸坡稳定性的影响	(62)
六、区域地震活动性与影响	(69)
第四章 顺层岸坡重点研究段的变形破坏 调查与破坏演变机制模式	(71)
一、安坪典型地段顺层坡变形破坏研究	(71)
二、其它典型岸段变形破坏研究	(89)
三、破坏演变机制模式分析	(94)
四、一般典型破坏模式的形态与影响因素分析	(101)

第五章 顺层岸坡的岸体力学特性研究	(111)
一、各类岩石的强度指标与特性.....	(111)
二、结构面强度.....	(118)
三、滑带土的物理力学特性与强度.....	(120)
四、泥岩的流变特性.....	(120)
五、建议的岩体强度指标.....	(123)
第六章 物理与数值模拟研究.....	(126)
一、地质力学模型试验.....	(126)
二、自重流变变形时效机制模拟试验.....	(132)
三、平面有限元分析.....	(138)
四、从物理与数值模拟分析结果讨论顺层岸坡演变机制.....	(143)
第七章 典型岸坡和滑坡的稳定性与失稳机制分析	(145)
一、安坪典型岸坡稳定性分析.....	(145)
二、岸坡稳定性敏感因素分析.....	(148)
三、岸坡失稳概率分析.....	(152)
四、板裂结构岩体力学方法的稳定性评价.....	(158)
五、三个典型顺层岸坡滑坡稳定性的敏感因素分析.....	(161)
六、滑坡体与完整岸坡稳定性以及各自的敏感因素比较.....	(165)
七、未滑岸坡失稳机制及护坡对策讨论.....	(166)
第八章 岩质顺层高边坡失稳后的运动特性分析和滑速滑程计算	(169)
一、岩质顺层高边坡失稳后的运动特征分析.....	(169)
二、建立在野外地质调查基础上的滑坡灾害性灰色分析法.....	(180)
三、根据热释光温度确定滑坡滑动速度.....	(187)
第九章 顺层岸坡的稳定性评价	(192)
一、自然坡危险与破坏概率分析法原理与方法	(193)
二、各类顺向岸坡分析结果与稳定性评价.....	(197)
三、模糊综合评判方法及其评判结果	(203)
四、顺层岸坡稳定性回归方程预测.....	(216)
五、稳定性评价结果的分析与讨论.....	(219)
简要小结	(222)
主要参考文献.....	(223)

绪 言

一、长江三峡工程库岸稳定问题研究综述

长江三峡工程自 1956 年开始勘探的初期,就注意到了库岸稳定性问题的重要性,对这一问题的研究,大致可分为四个阶段。第一阶段从 1957—1965 年,早期的研究主要在地矿部系统进行,偏重于库区的工程地质测绘和对已发现的个别滑坡进行调查,虽不够深入和全面,但已注意到建库前后库区岸坡可能存在的一些问题。随后长办、中科院、交通部等单位亦参与了库区工作。例如王士天⁽¹⁾ 1958 年对碚石至重庆的塌岸工程地质进行过调查;胡海涛⁽²⁾ 刘广润⁽³⁾ 最早(1959)论述了三峡水库工程地质条件,并把库岸再造作为重要的工程地质问题之一提了出来;地质部三峡大队在 1959 年和北京地质学院的师生联合组队、对水库干流和主要支流进行过库岸稳定性调查,编写了 1:10 万“三峡水库工程地质测绘”报告。在此之后至 1975 年还进行过几次类似的调查⁽⁴⁻⁶⁾。

第二阶段是从 1965—1980 年,在初期的调查之后,就开始了近坝地段的个别重点滑坡崩塌的调研工作:1965 年地质部三峡工作处对链子崖进行了 1:2000 的工程地质测绘⁽⁷⁾;1968 年开展了长期监测和勘探试验工作,与此同时,水电部长办也开始了对新滩滑坡 1:2000 的工程地质测绘⁽⁸⁻¹⁰⁾,随后也逐渐进行了一些勘探、试验研究与观测(1977 年)工作。这一阶段主要的研究重点集中在新滩与链子崖两处,作了较深入的工作,为新滩滑坡的复活滑动准确预报打下了良好的基础。除此而外,库区其余地段的研究工作也开展起来,发现了数十处滑坡与崩塌。例如⁽¹¹⁾例举了九处重要的崩塌和 11 处滑坡。但对多数的滑坡与崩塌的认识还不深入,主要是调查了解地质背景,滑坡地形地貌、结构与性状等,对滑坡的形成机制和稳定性评价,还没有作深入的工作。

第三阶段是 1980—1986 年,随着改革开放政策的实施,国家建设对能源的需求增长,三峡工程逐渐提到日程上来,对三峡库区的研究也活跃起来。同时更由于这一时期在这个区域发生了一系列重大的崩塌、滑坡事件,加深了人们对库区环境地质问题及其重要性的认识。例如 1980 年盐池河崩塌、造成严重生命财产损失。1982 年 7 月川东地区暴雨,造成鸡扒子等大型滑坡复活,严重妨碍长江航运。1983 年 6 月新滩滑坡重新大滑动、摧毁了新滩镇,对航运造成威胁,以及黄腊石滑坡开始出现活动等。这一系列事件促进了各单位对库区勘探研究工作的深入,加深了人们对三峡库区问题的认识和环境地质问题的重视。地矿部各单位、长办、湖北岩崩调查处等单位不仅对新滩、链子崖、鸡扒子和黄腊石滑坡进行了测绘、勘探、监测等较深入的工作,在总结鸡扒子、新滩滑坡的勘探研究成果基础上⁽¹²⁻¹⁶⁾同时对库区的调查工作也更深入、更广泛,对许多滑坡的发生、变形、破坏机理有了深一步的认识了解,进行了稳定性评价。其中尤以新滩滑坡⁽¹⁶⁾,鸡扒

子滑坡研究有较深入的进展,同时对库区的许多大中型滑坡的发现数量不断增多。认识有了深化。反映这一阶段各单位工作的总结性文献有:长办1985年“长江三峡水利枢纽初步设计阶段工程地质勘察报告”的库岸稳定性评价,文献^(17、18)指出在库区干流河段发现一定规模滑坡崩塌66处,其中规模大于 $1 \times 10^6 \text{m}^3$ 的有33处,内有崩塌危岩体11处,滑坡22处,主要分布在庙河至云阳间,而地矿部门⁽²⁰⁾则在庙河至重庆592km河段内发现岩崩滑坡203处,其中大于1千万方的30处, $1-10 \times 10^6 \text{m}^3$ 的65处。1986年长办三峡大队和勘测科研所的长江三峡水利枢纽库岸稳定性研究⁽²³⁾,统计了长寿以下干流库岸有一定规模的危岩和滑坡173处。1987年地矿部水文地质工程地质司长江三峡工程前期阶段库岸稳定性研究报告,系统总结了该部门的研究成果⁽²⁴⁾,是以前研究报告中最全面、最深入的总结。该报告表明在三斗坪至江津间690km干流两侧岸坡已发现不同规模滑坡崩塌体277处,总方量达 $18 \times 10^8 \text{m}^3$ 。以上这些数据反映了这一阶段各单位调研工作蓬勃的进展和深化。

第四阶段是七五期间(1986-1990)国家把库岸稳定性作为长江三峡工程重点攻关课题之一,这是一个新阶段,其特点是对三峡库区整个库岸稳定性和大型滑坡进行全面和重点相接合的研究和稳定性评价,对岸坡的变形破坏机制进行深入的理论分析探讨阶段。本书是对库区潜在破坏性最大的顺层岸坡研究的总结。

二、课题的提出

从研究综述可知,1986年前的工作,库岸稳定性研究主要是个别重点滑坡和危岩变形体的深入研究以及全库段滑坡崩塌变形体和松散堆积体的普查性质工作,在工作和理论认识的深度和广度上都有待深化,而且满足不了三峡工程大、长库区库岸稳定性预测和城乡环境工程地质以及淹没搬迁选址评价的要求,主要的工作都在已经发生的滑坡崩塌体上,而对尚未发生滑坡或滑坡后部岸坡体稳定性预测评价只有定性的判断,对造成岸坡变形破坏的机制研究也远未深入和全面展开。

事实上岸坡的稳定性评价包括两部分:一是已有的众多滑坡、崩塌体、变形危崖体的稳定性;二是尚未破坏岸坡的稳定性。尤以后者是以往研究的薄弱环节、有待大量的进行工作。此外,为了深刻认识岸坡的变形破坏演变机理与演变史,预测岸坡的稳定性,提出进一步深入工作的地段,以及防护岸坡发生破坏的措施原则,研究岸坡演变机制显得非常重要。

基于上述认识,一个重要的想法和问题在1985年逐渐形成并提了出来。可以用如下的几个典型认识作为这一想法的代表:刘广润⁽²⁰⁾根据地矿部,长办等单位过去大量调研资料的统计分析指出:“就岸坡类型而言,变形强度具有顺向坡>逆向坡>切向坡的规律,它们线变形模数的比例关系是1:0.43:0.08。变形方式,顺向坡以滑坡为主。逆向及切向坡则岩崩滑坡大致相当”。同时又指出:“稳定性明显具有切向坡>逆向坡>顺向坡的趋向”。从而明确指出了顺向坡问题的严重性,因此顺向坡理应成为研究的重点之一。陈德基⁽¹⁹⁾建议:“对纵向谷顺坡河段尤其是奉节罗家沱至云阳兴隆滩河段进行专门性调查,确

定出可能产生基岩顺层滑坡的地段进行专门性研究”。“针对三峡水库库岸的特点，进行必要的专题研究。如典型岸坡物理数学模型的研究；水（降水、库水、地下水）对岸坡稳定性影响的研究…”。明确提出了顺向坡稳定性重点研究地段及一些理论研究课题。孙广忠^[22]认为“研究库岸稳定性问题只研究滑坡体的稳定性是不够的，必须对未发生滑坡的岸坡稳定性进行研究，这是评价库岸稳定性时不可缺少的一部分，为此，必须加强基础理论研究，这是指导性的，是对问题判断的依据…，这些问题不搞清楚，必然使我们的工作带有一定的盲目性”。并指出“必须对岩质高边坡破坏机制等基础理论课题进行研究，这是三峡库岸研究薄弱部分”。

由于三峡库区的全部三个巨型（>1亿方）和许多大中小型滑坡都发生在顺层岸坡地段，它们过去的破坏史表明了顺层岸坡潜在破坏问题的严重性，上述认识正是这些事实的代表看法，因此当七五攻关任务提出时，这些思想的集中和统一，就产生了“岩质顺层高边坡变形破坏机制及稳定性评价”这一课题。

三、顺层岸坡研究的特点

顺层岸坡是一类自然边坡，对自然坡的研究与人工边坡研究的不同之处就是自然坡仍然遭受着各种原始自然营力的作用，没有人为保护措施，所以要求确定自身具有何种稳定程度；对它比对人工边坡更偏重于自然环境条件和作用营力，历史及其发展，变形破坏过程与机制方面的研究。同时对破坏后的运动状态与灾害预测也更关切。这一切与环境工程地质问题及其评价更紧密联系，这是自然坡研究的特点之一。

此外，滑坡是岸坡变形破坏的结果，是河谷与岸坡演化的重要方式，因此研究滑坡及其产生的环境条件、滑坡发生历史、对岸坡变形破坏的环境条件认识与变形破坏机理分析、河谷发育史分析，岸坡稳定性评价等都有重要的作用与指导意义。所以除了对未变形破坏的岸坡进行研究外，还对典型岸段的滑坡及一些重点滑坡进行调研，把滑坡研究与岸坡变形破坏的机制研究密切结合起来，也是这一研究的特点。

顺层岸坡最主要的结构面是层面和软弱夹层或层间错动面，其次是节理面，因此从结构控制稳定性的观点出发，应该主要考虑层向结构面在边坡中的产状、位置及其变化。这是边坡分类，稳定性评价，破坏机制分析以及模拟试验等必须贯彻始终的原则。离开了这一点，就不可能得到符合实际的结果。

由于大自然的变化是长期的、缓慢的过程，在野外调查中见到的许多现象只是片段的或阶段变形与破坏的结果，其过去与未来的变化过程全貌以及某些因素所起的作用则看不见，所以物理与数值模拟研究不可缺少。虽然这些模型较之自然实体大大简化，但对一些重要破坏现象的发展过程与破坏结果的直观了解，仍是十分有益的。

对大范围区域分布的自然边坡，除了地表的调查研究外，不可能做很多的勘探工作和岩石物理力学试验，因此对已经比较成熟的边坡工程方法——岩石力学与岩体工程地质力学定量分析法的应用，受到很大限制。因而边坡稳定性分析与评价不能只立足于这些方法的基础上，必须拓展其它方法的应用。边坡稳定分析除上述定量方法外，其它还有工程地

质比拟法（定性法），数值定性或量化法——包括模糊综合评判法，信息法（半定量）、统计与概率方法（准定量法）、数值模拟法、物理模拟法等。其中半定量与准定量方法多采用环境地质与边坡几何、结构形态特征等容易获得的自然信息参数，是筛选稳定性较差，缩小重点研究范围的良好方法。本书尽量采用多种分析方法，在相互比较综合分析基础上评价岸坡的稳定性。

以上是本书对顺层自然坡研究的一些主要特点。

四、顺层岸坡主要研究内容与研究段选择

从库岸实际状况和基础理论两个方面进行研究，对三峡库区未产生滑坡的顺层库岸稳定性进行评价。具体地说有如下几方面：

1. 地质环境、动力环境与岩土力学特性研究；
2. 岩质顺层高岸坡的变形破坏过程和演化机制研究；
3. 岩质顺层高边坡的物理与数值模拟研究；
4. 变形破坏与运动特性的预测预报原理和方法研究；
5. 岩质顺层高边坡稳定性评价。

实现上述研究目标的技术路线是通过野外调研、对典型地段与典型现象进行重点解剖。充分应用各种分析测试手段获取必须的分析数据，结合物理与数值模拟研究，寻求边坡变形破坏的机制和规律，弄清边坡变形破坏的时空分布规律。尽量作到半定量到定量的稳定性预测和评价。

三峡工程 180 方案、库区干流长 690km，干支流库岸总长约 3000km，顺向坡段长 665km，占库岸总长 22.2%，占干流岸坡总长的 25%。

顺层岸坡典型研究区段选择云阳复兴场到奉节附近（如图 1-1），该段总长约 70km。部分岸段滑坡十分发育。已发现大、中、小滑坡约 90 个，其中巨型 2 个，大型 7 个、中型 14 个，是库区顺层岸坡中滑坡最发育的地段，为研究顺层岸坡变形破坏规律和机制模式提供了丰富实例。研究段分为一般调查与稳定性评价段，对岸坡地质地貌，动力环境、变形破坏状况以及重要滑坡进行调研；重点评价段为复兴场到宝塔附近，以及故陵至罗家沱附近，采用不同方法进行半定量到准定量分析预测其稳定性；重点典型研究与稳定性定量评价段为安坪附近，较详细地作了水文工程地质调查，岩石力学试验以及变形破坏体调查，采用物理数值模拟试验研究，进行多方面定量计算与机制分析评价稳定性，以便获得具有普遍意义的影响稳定性的机制因素，以指导顺层岸坡的变形破坏机制分析与稳定性评价，并与准定量和半定量方法进行对比，判断后者的精度和可用性。

最近以来，修建三峡水利枢纽工程的呼声日高，鉴于该工程对长江中下游的防洪起到关键作用，以及对我国电力供应和长江航运的巨大经济效益，这一举世瞩目工程的动工有可能很快提到日程上来。作者希望本书的出版、对三峡工程修建后库区地质环境的变化预测、地质灾害防治及城乡建设与搬迁具有实际意义。同时也希望对其它区域广泛分布的顺层边坡和河谷顺层岸坡的研究能有参考价值。

第一章 云阳—奉节段岩质顺层岸坡的地质环境、 类型划分与破坏状况的发育分布规律

本章主要介绍云阳复兴场至奉节段岩质顺层岸坡的一般地质环境、地貌特征与岸坡类型。这是岸坡演变机制和稳定性研究不可或缺的基本情况。在此基础上认识一下岸坡变形破坏的发育分布状况与规律，从而涉及到影响顺层岸坡变形破坏的一些几何与结构因素。

一、顺层岸坡区段的地层岩性与构造概述

从云阳复兴场至奉节、长江河谷发育于川东褶皱带故陵向斜中（见图 1-1），故陵向斜为万县大向斜之东部，在此段内轴向为 NEE，具有川东褶皱带向斜之一般特点：两翼较陡（ 30° — 50° — 70° ）轴部平缓，为箱状或梳状的开阔向斜，但故陵向斜在安坪以东逐渐扬起抬升收缩，箱形特征不明显，在北面大巴山弧和南面八面山—七曜山弧的夹持下，在罗家沱以东三叠系地层中，向斜两翼形成一些次级小褶皱，其轴向常与主向斜轴斜交。也可能是印支运动所形成。

从奉节向上游，故陵向斜中的河谷岸坡地层，（由东到西）从老到新分布，计有巴东组（ T_{2b} ）、须家河组（ T_{3XJ} ）、珍珠冲组（ J_{1-Z} ）、自流井组（ J_{1-2Z} ）、新田沟组（ J_{2X} ）、沙溪庙组（ J_{2S} ）、遂宁组（ J_{3S} ）和蓬莱镇组（ J_{3P} ）。构成岸坡各组岩性及分布地段见表 1-1 及图 1-1。其中巴东组为海相振荡运动的碳酸盐粘土岩建造。上三叠世开始，海水退出扬子陆台，开始内陆河湖相沉积。因此包含了碎屑岩为主，化学和生物沉积岩为次的交互沉积，岩性纵横向变化大，成层性相当复杂。

二、顺层岸坡的工程地质岩组划分

工程地质岩组是根据岩石组合或岩套具有的主要工程地质性质或特性划分的，而岩组的工程地质性质往往与岩石材料性质、组合关系与强度、新老、经历构造运动多少、强弱，以及其中结构面发育情况，地下水等因素有关。针对岸坡稳定性特点，顺层岸坡段的岩组划分如表 1-2。

工程地质岩组中 T_{2b} 地层因经受印支及其以后运动，节理组数较多，也最发育，弱夹层较少，但灰岩、泥灰岩、白云岩层段中发育小规模岩溶，地下水相对较丰富。

T_{3XJ} 以上各岩层岩组，只经受燕山及其以后运动影响，节理一般 4—5 组，其中 3—4 组较发育，与所在构造部位有关。夹多种弱层，其中 T_{3XJ} 主要为碳质页岩， J_{1-Z} 至 J_{2X} 地

层夹多层碳质页岩，暗色页岩及泥岩软弱夹层， J_{2S} 以上主要弱层为含蒙脱石较多的泥岩与页岩，顺层岩体强度主要取决于软弱岩层强度。切层强度、岩体流变特性及抗弯性能与其夹砂岩层多少、厚薄和节理裂隙发育程度有关。

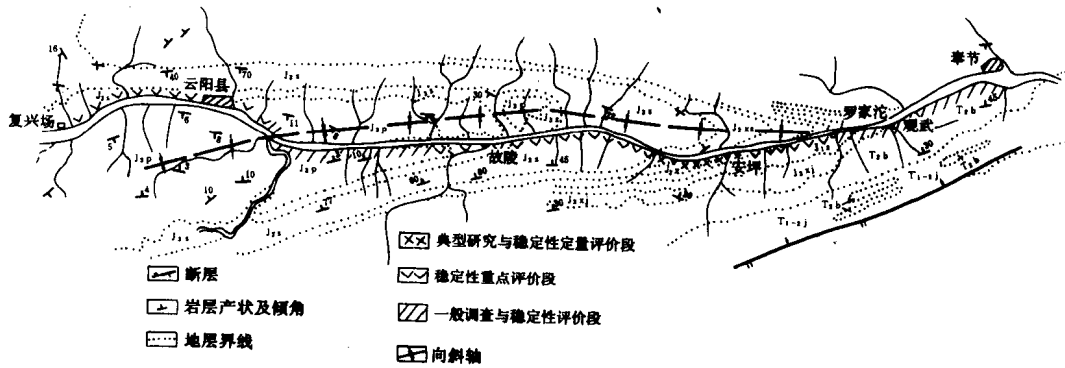


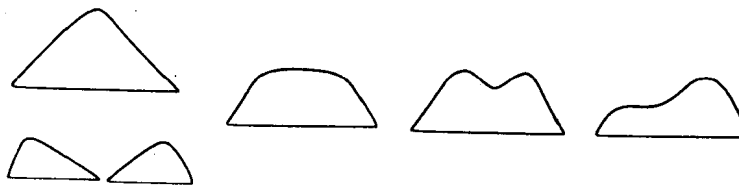
图 1-1 云阳复兴场至奉节段顺层岸坡区的地层构造与研究段分区图

三、顺层岸坡的地貌特征

本段顺层岸坡属“湿润流水作用的中低山”纵向谷⁽²⁵⁾，相对高度在 200-800m 间。岸坡平均坡度约在 15° - 42° 之间。

岸坡地貌的形成受多种因素制约，主要有岩性及地层结构，成层厚薄与软硬，产状陡缓及变化，与河流冲沟夹角关系，节理裂隙发育规模与方向，冲沟与河流蚀向等。这诸多因素影响形成顺层岸坡地貌的多种模式。

顺层岸坡一般很少见有河流阶地，台阶主要为滑坡平台。此外有岩性软硬不均及差异风化形成的小型台阶。



a 三角形； b 梯形； c 驼峰形； d 不规则形；

图 1-2 顺层岸坡临江面坡形景观类型

表 1-1 云阳奉节段顺向坡地层岩性

地 层					岩 性	分布地段
界	系	统	组	符号		
中生界	侏罗系	上统	蓬莱镇	J _{3P}	下部中厚层长石砂岩、石英砂岩夹泥岩、上部与泥岩互层，泥岩含钙质团块	故陵以上至云阳
			遂宁组	J _{3S}	中下部钙、泥质长石石英砂岩、粉砂岩，中厚层为主，夹泥岩、砂质泥岩、上部与泥岩互层、泥岩含钙质结核	故陵附近及云阳至旧县坪一带
		中统	沙溪庙组	J _{2S}	上下部泥岩、砂质泥岩夹厚层长石石英砂岩、中部互层或砂岩夹粘土岩，泥岩有的含钙质结核	庙坪至故陵段
			新川沟组	J _{2X}	长石石英砂岩夹黑色碳质页岩、页岩和泥岩	安坪至庙坪段
		下统	自流井组	J _{1-2Z}	页岩、砂质页岩、泥岩夹砂岩、泥质砂岩、粉砂岩和少量灰岩、介壳灰岩	藕塘至安坪
			珍珠冲组	J _{1-Z}	砂岩、泥质砂岩、泥岩、泥质粉砂岩、黑色页岩、底部有煤层、少量灰岩、泥页岩	罗家沱至藕塘附近
	三迭系	上统	须家河组	T _{3XJ}	上部长石石英砂岩、含砾砂岩、砾岩，次为粉砂质泥岩、碳质页岩，下部粉砂岩、泥质砂岩、薄煤层	百换坪至罗家沱
		中统	巴东组	T _{2b}	上下部泥岩、钙质泥岩、砂质、粉砂质泥岩、次为泥灰岩、白云质灰岩、砂岩、泥质砂岩、中部泥灰岩灰岩为主，夹少量泥岩	奉节至百换坪

顺层岸坡在坡面方向可见顺坡陡壁或陡坎，大多数陡坎为厚层砂岩，一般高度不大，方向多与坡面斜交。所以顺向坡有崩滑，但崩塌少且规模很小。

表 1-2 工程地质岩组及其性质

工程地质岩组	地层	构造运动	软弱夹层	节理裂隙	岩体强度		地下水	岩体力学性质	抗风化侵蚀性
					顺层	切层			
碳酸盐与泥质岩混和岩组	T _{2h}	印支及其以后运动	夹少数泥页岩弱层	中等到发育有 6 组, 其中 4 组较发育	取决于少量泥、页岩强度	由于垂直层面节理发育、切层强度较低	有轻度岩溶发育, 潜水和承压水相对较富	抗拉强度差, 易结构造面流变	碳酸盐抗风化较好。抗冲刷侵蚀差
砂岩夹砾岩及泥质砂岩和煤系地层	T _{3XJ}	燕山及其以后运动	碳质页岩或煤系地层	主要发育四组高倾角节理和一组低倾角节理	取决于碳质页岩层和含蒙脱石较高弱层强度	中等到较高	富水性较差裂隙潜水	多中厚层, 抗弯强度大、抗拉强度较差	较强
砂岩、粉砂岩泥质砂岩夹泥、页岩	J _{1z} J _{1-2z} J _{2x} J _{2s} J _{3s} J _{3p}		J _{2x} 以下的碳质页岩及各地层中的含蒙脱石较高的泥岩、页岩	一般到中等有四—五组节理其中三到四组较发育、局部有一组不很发育的低倾角节理。发育情况常与构造部位有关	取决于页岩、碳质页岩和含蒙脱石较高泥岩弱层强度	较高	富水性差的潜水及承压水	多中厚层, 抗弯强度较好、流变主要在弱层中沿层向发生	较好
砂岩类与泥质岩类互层			不发育到一般, 有四到五组, 二到三组较发育	一般	富水性差但能形成高水头承压水	抗弯、抗拉强度一般, 沿层切层向较易发生流变	较差		
泥岩、页岩夹砂岩岩组					较低	富水性很差, 能形成中低水头承压水	抗弯强度差易流变	差	

顺向坡常由过岭冲沟或小溪河切割成单个坡体。坡体长或沟口距约 200—2400m。

顺层岸坡的横剖面坡形大致有五种。如表 1-3 所示。剖面坡形主要受岩层产状及其

变化以及岩性软硬控制。

顺层岸坡体的临江坡面形状有四种基本类型。如图 1-2 所示，其中以对称和不对称三角形最多，梯形和驼峰形次之。不规则形主要分布在观武到奉节对县 T_{2b} 的变倾岸坡段。

顺层岸坡除少数为平坡面外。多数岸坡都发育有小地形，坡面小地形主要是岩层软硬相间、岩层倾向与坡面总倾向有夹角造成，当夹角小于 $3^\circ - 5^\circ$ 时，可形成表 1-3 中 I、II、III、IV 剖面坡形。当夹角 $> 3^\circ - 5^\circ$ 时，砂岩层由于大横节理较发育，常在坡面形成近垂直或斜交的陡坎，坡面岩层形成三类叠压形式：横向叠压；纵向叠压与纵横向叠压，如图 1-3 所示。这些叠压形成的陡坎和平台常控制了冲沟的发育方向，也常是一些滑坡的约束边界和未来滑坡的无约束侧限边界。由于冲沟常沿软硬相间层处发育，所以坡体中地下水的补给除面上的下渗外，还可沿冲沟渗入。也可沿冲沟中泉水排出。对于长度较大的岸坡体，纵横向叠压地貌表面积较大、补给量较多。排泄路径较长，所以有形成较高承压水位的条件。

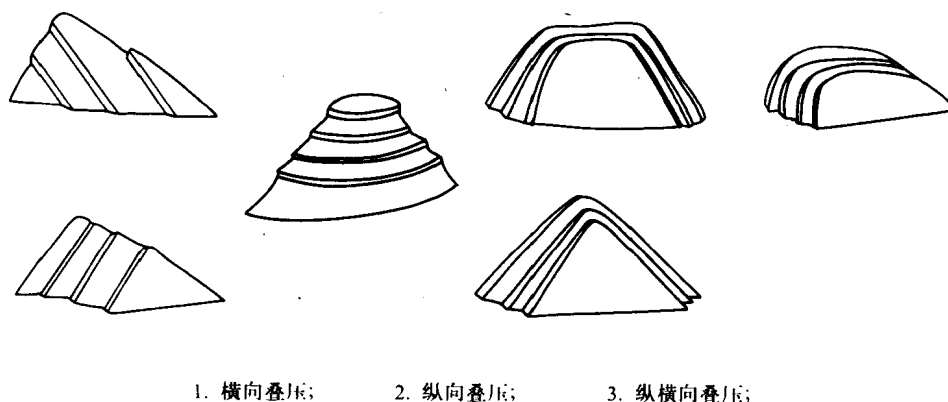


图 1-3 顺层岸坡坡面的小地形

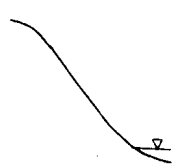


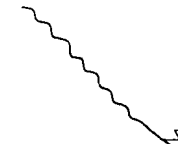

四、顺层岸坡的类型划分

长江三峡库区岸坡类型很多。岩质顺层岸坡只是其中的一大类。从奉节到云阳复兴场段的顺层岸坡其中罗家沱以下为三叠系巴东组和须家河组地层，多有次级小褶皱，不是典型顺层坡，可称顺层变倾或复倾坡，此外还有故陵西王家码头到云阳下游 2.5km 处之顺层岸坡为倾角小于 10° 的近水平缓倾层状坡外，其余地段都是具有不同特点的顺层岸坡，我们仅研究这一地段顺层岸坡的自然分类。

岸坡类型的划分原则、方法，可从不同目的或角度提出，通常有两种目的：一种是以其自身包含的特点来达到自然区分；一种是以某一工程目标或评价目标为目的，例如以稳定性评价为目的的划分。岸坡的稳定性是一非常复杂的事物，有许多影响因素，并且各自对

不同岸坡体起着大小不等的作用，若选用的影响稳定的分类因素或划分原则不全面，或不能获得确切的影响因素数据，必然对稳定性分类得出偏颇的结果，从而不能达到正确评价的目的。所以，以稳定性评价为目的的类型划分往往只是一些定性评价原则或指标（参数）划分的类型。事实上，在以往的一些岸坡分类评价中，同一类型的岸坡有稳定好的和稳定性差的，而在不稳定的类型中，也有稳定的。所以像岸坡稳定性这样复杂的事物，除了初期评价阶段外，目前已不宜用定性评价方法来划分稳定类型。

表 1-3 顺层岸坡剖面形态特征分类

类号	剖面形态	坡角 α	岩层平均倾角 β	主要分布段与地层	主要坡面形状类型
I	 直线形	$< 25^\circ$	$> 20^\circ$	云阳以上至旧县坪，故陵以下至四方田 J_{3S} 、 J_{2S} 、 J_{2XS} 、 J_{1-2Z}	a、b、c
II	 直线梯形	$> 25^\circ$	$> 20^\circ$	上述地段零星分布、地层同上	a、b、c
III	 下凹曲线形	$15^\circ - 25^\circ$	上坡部 $> 25^\circ$ 下坡部 $< 15^\circ$	云阳至宝塔、故陵、藉塘至二沱湾 J_{3P} 、 J_{3S} 、 J_{1-Z} 、 J_{1-2Z}	a、b
IV	 阶梯形	$> 30^\circ$	$< 10^\circ$	云阳下游 2.5km 至故陵西 2.0km. J_{3P}	a、b
V	 圆丘形	$> 20^\circ$	变角倾	观武以下 T_{2b}	a、d

我们的目的是认识顺层岸坡的差别，以其自身的特征来自然划分岸坡的类型。在划分前不加入人为划分的标准，以分类判别的结果来提取标准，并比较其差别。下面用多变量样本的图分析分类法——星座图法来分析。

由 Wakimoto 和 Taguri 提出来的星座图分析法如下：设有 n 个样本 X_1, X_2, \dots, X_n ，各有 P 个变量 x_1, x_2, \dots, x_p ，用 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p$) 表示第 i 个样本的第 j 个变量的值，从而有数据矩阵 $\{x_{ij}\}$ ，将 $\{x_{ij}\}$ 作一线性变换，使变换后的数据 $\{\xi_{ij}\}$ 落在 $[0, \pi]$ 内。用如下极差标准化变换：

$$\xi_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{R_j} \pi, \quad (1.1)$$

$$\text{式中: } x_{\min j} = \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij}, \quad x_{\max j} = \max_{1 \leq i \leq n} x_{ij}, \quad R_j = x_{\max j} - x_{\min j}.$$

取一组权 $\{\omega_j\}$ ，使得

$$\omega_j \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, p, \quad \sum_{j=1}^p \omega_j = 1, \quad (1.2)$$

可根据变量的重要性取权大小。在本书中，认为所取变量是同等重要的，故取等权，所以

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_p = \frac{1}{p}, \quad (1.3)$$

由此可确定某样品 i 的星座图座标

$$\left(\sum_{j=1}^p \omega_j \cos \xi_{ij}, \quad \sum_{j=1}^p \omega_j \sin \xi_{ij} \right). \quad (1.4)$$

把各样品的座标点在半园中，由点的成群分布构成星座，从而明显区分出组或类来。

从上述分析方法过程可知，多因素星座图分析法对构成星座的每个样品只要求最终座标相近，而不管它们中间经过何种路线，因此某些样品的某些因素可以具有同类样品相反的性质，只要多数主因素相近就能满足这种情况。为了获得同类具有的共性，应以其类平均值来代替类的性质。

把复兴场到罗家沱段的每个顺层岸坡从上游向下游顺序编号作为样号，共计 43 个坡体，1—51 号（其中 13—21 为阶梯状缓倾坡）。取如下四个分类变量（判据）：二个单因素变量，平均坡角 α 和岩层走向与岸坡走向夹角 γ ；二个复合变量，岸坡上部岩层倾角与平均坡角之比 $\frac{\beta_u}{\alpha}$ 与岸坡下部岩层倾角与平均坡角之比 $\frac{\beta_s}{\alpha}$ 。后三个参数主要在于考虑顺层岸坡的结构。分类结果的星座图如图 1-4 所示，可见有六个星座（六类）。但它们之间相互只有不大的距离，表明是同一大类而区别不很明显。六种样品分类结果类平均的统计指标载于表 1-4，同样可以看出这六类指标的上下限多数相互重叠，并无明显的界限，而均值则较明显，所以这些顺层岸坡的自然再分类是很细微的划分。表中典型剖面是据平均值来作的，根据平均值反映的结构特征，可将顺层岸坡分成三类：I 类是中低角坡 $\beta_u > \beta_s$ 且 $\beta_u \approx \alpha$ 、 $\beta_s > \alpha$ ， γ 为小交角；II 类可分成三小类，共同特点是略呈凹形、中低坡度、