层间错动带力学特性及其工程影响研究

赵阳 著

CENGJIAN CUODONGDAI
LIXUE TEXING JI QI
GONGCHENG YINGXIANG YANJIU

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

层间错动带力学特性及其工程影响研究

赵阳 著

CENGJIAN CUODONGDAI
LIXUE TEXING JIQI
GONGCHENG YINGXIANG YANJIU

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书以层间错动带为研究对象，介绍了现场取样方法及多种室内试验手段，探讨了不同应力条件下层间错动带的工程地质特性；通过对比原状样与重塑样的力学性质，揭示了不同含水率条件下层间错动带的破坏机理；采用数值分析为遭遇层间错动带出露的地下洞室合理开挖设计和安全施工提供科学依据。

本书可供岩土工程、水利水电工程等相关专业的高年级本科生、研究生，及相关科研人员、工程技术人员等参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

层间错动带力学特性及其工程影响研究 / 赵阳著
. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2020.8
ISBN 978-7-5170-8740-3

Ⅰ. ①层… Ⅱ. ①赵… Ⅲ. ①水利水电工程－工程地质－地质力学－研究 Ⅳ. ①P642

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第145668号

书　　名	**层间错动带力学特性及其工程影响研究** CENGJIAN CUODONGDAI LIXUE TEXING JI QI GONGCHENG YINGXIANG YANJIU
作　　者	赵阳　著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座　100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	清淞永业（天津）印刷有限公司
规　　格	184mm×260mm　16开本　10.25印张　212千字
版　　次	2020年8月第1版　2020年8月第1次印刷
定　　价	**68.00**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

FOREWORD

在工程实践中，夹杂有层间错动带的岩体强度往往具有不均匀性，在开挖卸荷过程中应力重分布变形、破坏发生在最薄弱的部位。对于埋藏位置较深的层间错动带，考虑赋存环境条件，其所处地应力较大，高压力条件下会获得与低压力条件下不同的力学特性；此外，受降雨和水文地质条件的影响，地下水位的变化会造成层间错动带含水率的变化。从工程角度看，在大型工程施工期前，需要采用防渗帷幕或排水等截（导）流工程措施来减少施工区的水流，从而导致层间错动带中含水量的降低，含水率的降低可能会引起层间错动带（水）力学性质的差异。鉴于此，本书以层间错动带为研究对象，系统总结了其力学特性及破坏机理。

本书共7章：第1章绪论，根据层间错动带工程地质特性介绍了国内外研究现状与主要研究内容和特点；第2章主要介绍了层间错动带现场取样方法及装置，和物理性质；第3章在基于现场应力状态的三轴试验，探讨了影响层间错动带力学特性的主要因素及力学特性，揭示了影响其抗剪强度的机理；第4章通过环剪与反复直剪试验，对比了原状样和重塑样之间残余强度力学性质的差别；第5章讨论了不同含水率和不同初始颗粒粒径对颗粒破碎和剪切强度的影响，并建立残余强度的初步预测公式；第6章利用滤纸法对其水力学特性进行了分析，并通过压汞法对试验结果进行相互验证，探讨不同因素影响下层间错动带的非饱和特性；第7章基于层间错动带的三轴（剪切）试验结果，使用合理的模型对含有层间错动带的大型地下洞室进行整体稳定性分析。

本书的主要研究成果是在国家自然科学基金（51409102）和中国博士后科学基金（2018M640683）等项目的资助下完成的。在本书的撰写过程中得到了周辉研究员、邵建富教授和崔玉军教授的悉心指导，方宏远、徐荣超、刘

娉慧、杨永香、葛飞、张培培、肖志阳、王乐乐为本书的撰写提供了帮助，谨向他们致以衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正！

作者

2020 年 8 月

目 录

CONTENTS

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　研究背景及意义 …… 3

1.2　层间错动带力学特性 …… 3

1.3　主要研究内容 …… 10

参考文献 …… 11

第 2 章　研究材料与方法 …… 19

2.1　现场取样 …… 21

2.2　物理性质分析 …… 26

2.3　小结 …… 28

参考文献 …… 28

第 3 章　高压力下层间错动带三轴力学特性 …… 31

3.1　高压力三轴不排水试验 …… 33

3.2　三轴力学特性 …… 36

3.3　常含水率三轴试验 …… 40

3.4　小结 …… 52

参考文献 …… 53

第 4 章　层间错动带残余强度特性及破坏机理 …… 57

4.1　环剪试验 …… 60

4.2　大剪切位移下强度特性 …… 63

4.3　高压力反复直剪试验 …… 66

4.4　高压力下层间错动带残余强度特性 …… 72

4.5　小结 …… 77

参考文献 …… 78

第 5 章　初始物理性质对层间错动带剪切强度和颗粒破碎影响 …… 83

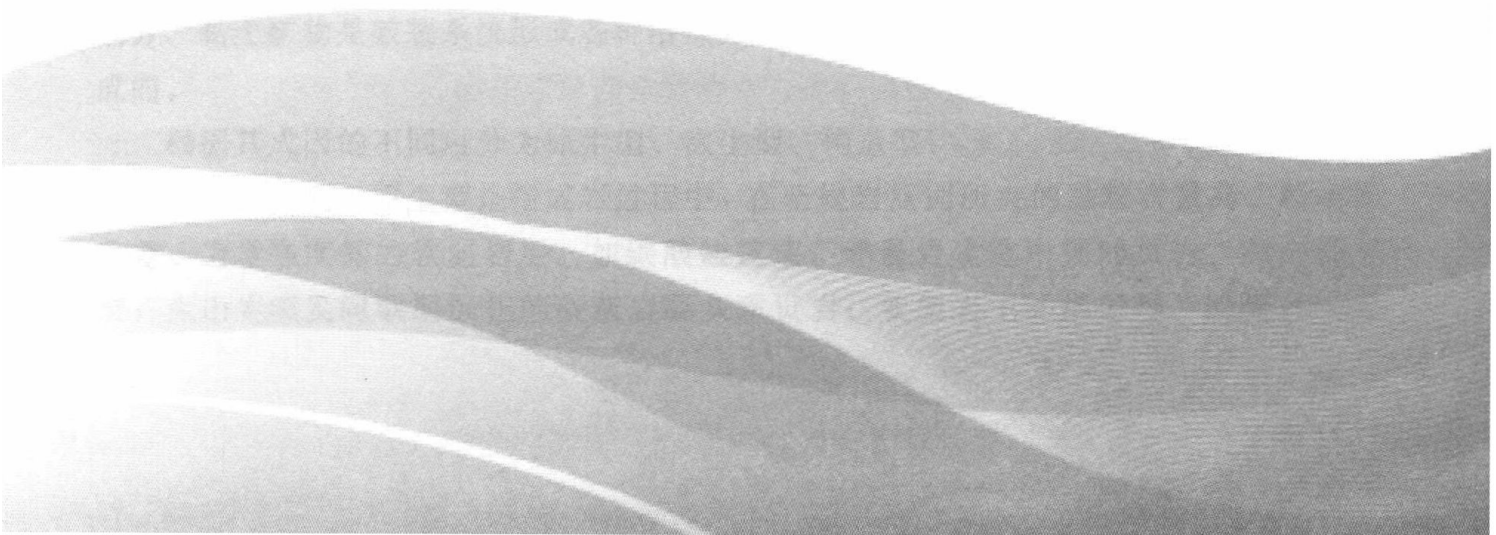
5.1　高压力固结排水剪切试验 …… 85

5.2　颗粒破碎与剪切强度分析 …… 87

5.3 小结 …… 98
参考文献 …… 98
第 6 章 初始物理性质对层间错动带非饱和特性影响 …… 101
6.1 基本理论 …… 103
6.2 滤纸法测定基质吸力 …… 107
6.3 非饱和层间错动带细观及吸力特征 …… 111
6.4 小结 …… 123
参考文献 …… 124
第 7 章 层间错动带对工程稳定性影响分析 …… 127
7.1 层间错动带力学模型及参数 …… 129
7.2 工程应用 …… 137
7.3 小结 …… 154
参考文献 …… 155

第1章

绪　　论



1.1 研究背景及意义

我国已进入新的发展时期，随着国民经济持续快速增长、工业现代化进程加快，资源和环境约束趋紧，能源供应愈发紧张，生态环境压力持续增大，加快西部水力资源开发，对于解决国民经济发展中的能源短缺问题、改善生态环境、促进区域经济的协调和可持续发展，具有非常重要的意义。我国已在金沙江、雅鲁藏布江规划和兴建了一系列水利水电工程，但这些水电站集中在岩体环境构造复杂，地质环境脆弱的西部深山峡谷，其规模和建设难度都是空前的。其中，大多数采用大型或超大型地下洞室群作为主要的水工建筑物，地下厂房洞室规模巨大，如：二滩水电站（280m×25.5m×64m）、向家坝水电站（245m×31m×85m）、白鹤滩水电站（439m×32m×78m）等。在如此之大的地下空间中，洞室群的选址很难回避所揭露的层间错动带。层间错动带是岩流层顶部较软弱的岩体在构造运动中发生破碎、错动，从而形成破碎夹层，并在地下水及风化作用下软化甚至泥化的软弱夹层。认识不同物理性质的层间错动带在天然赋存环境下的力学特性并进行工程计算具有十分重要的实际工程意义。鉴于此，本书以白鹤滩水电站地下厂房区域所揭露的层间错动带为背景，系统研究其工程地质特性和破坏机理，研究成果可为层间错动带地下洞室的安全建设提供理论与方法支撑。

1.2 层间错动带力学特性

1.2.1 形成与分类

层间错动带是地壳岩体遭受地质构造作用和后期地质环境演变形成的。其初期破碎是母岩机械破碎的产物，尽管它们有黏土颗粒成分，但是不会有泥化后的黏土矿物成分。黏土矿物是破裂系统形成各种溶液介质的渗入经历长时间的物理化学作用下形成的。

根据其成因的不同可分为原生型、次生型、构造型：

（1）原生型。原生型是指成岩过程中，在坚硬岩层间所夹的黏粒含量高、胶结程度差、力学强度低的软弱岩层。如碳酸盐建造、碎屑岩建造中夹的页岩、黏土岩薄层；火山岩喷发间歇期沉积的凝灰岩凝灰质页岩；变质岩中的绢云母、绿泥石富集

带等。

（2）次生型。次生型是指原生软弱夹层、蚀变破碎带、次生矿物充填的节理等在风化、地下水等外应力作用下，产生泥及碎屑物质而形成的层间错动带。其多分布在浅表地层，往往受地形、水文地质条件、岩性发育情况所控制，常呈局部软化或泥化，黏粒含量及含水率均较高。

（3）构造型。构造型是指岩层在构造作用下形成的层间错动带。岩体在构造应力作用下，沿软、硬岩层接触带或软岩内部发生层间剪切错动；剪切错动带受到多期构造变动而发生剪切破坏，形成大量细颗粒物质和裂隙，经地下水的渗透和物理化学作用而使原生夹层软化、泥化形成软弱夹层。

曲永新等对软弱夹层、泥化夹层和层间剪切带定义的比较，并结合大量资料，指出层间错动带等同于层间剪切带与软弱夹层，而泥化夹层则是特指在已发生泥化的层间错动（剪切）带或软弱夹层。本书将统一将这种夹杂着错动后残留有岩石碎屑（块）软弱物质表述为层间错动带。

由此可见，其天然状态下的颗粒粒径分布并不均匀。层间错动带的组成物质包括泥质、碎屑、角砾较软弱的岩石等。层间错动带分为全泥型、泥夹碎屑型、碎屑夹泥型、泥夹粉砂或粉砂夹泥型。层间错动带对某些结构的稳定性起着不同程度的控制作用。因此，必须对其每一层型剪切带作出准确的评价，并给出设计使用参数。表 1.1 为层间错动带根据粒径分布的分类。

表 1.1　　层间错动带根据粒径分布的分类

类　　型	小于 0.005mm 的颗粒/%	大于 2mm 的颗粒/%	砂砾组 VS 黏粒组
全泥型	＞20	＜10	砂砾组＜黏粒组
泥夹碎屑	10～20	10～30	砂砾组＞黏粒组
碎屑夹泥	＜10	＞30	砂砾组＞黏粒组
泥夹粉砂或粉砂夹泥型	＜20	＜20	砂砾组＜黏粒组

注　砂砾组为粒径大于 2mm 的颗粒组；黏粒组为粒径小于 0.005mm 的颗粒组。

不同的颗粒粒径分布会产生不同的微结构，与一般的沉积黏土相比，层间错动带具有以下特点：①泥化夹层的微结构类型及连接方式，受原岩及上下岩组岩石成分的控制；②原岩所受的层间错动，使层间错动带的微结构具有不同程度的分带性；③地下水对层间错动带的微结构的形成和改造起关键作用，不同的地下水作用形成不同的微结构类型；④在次生的泥化微结构中，常见残余的原岩结构。

当黏粒含量较高时，层间错动带呈蜂窝状结构，虽然从整体上来看杂乱无章，但依然在其中部可发现定向排列的条带，并且带中蜂窝状团聚体常被拉长压扁顺剪切方向排列，两侧可见牵引现象。当黏粒含量高于原岩时，砂砾、粉粒颗粒呈弥散状存在于黏粒基质中，粗颗粒之间无接触。而当粗颗粒含量较高时，粗颗粒被细粒或黏土矿

物单片所包围，呈致密状分布相互嵌合称为镶嵌状结构。

层间错动带是多种矿物组成的复杂高分散体系。采用电子显微镜、X 射线衍射和差热分析等手段进行综合检验可以得到各类层间错动带的主要黏土矿物是蒙脱石、伊利石（水云母）和高岭石等。泥化夹层的矿物成分与母岩性质和后期改造程度有关。蒙脱石是在排水条件不好，周围具有 MgO、CaO 和碱金属氧化物的碱性环境中形成的，可交换离子被吸附在质点表面最多，矿物构架是活动的，浸水时表面积增大，有明显的膨胀性。高岭石是在排水条件良好和发生溶滤作用的酸性条件下形成的，它在水中膨胀很微弱，是相对稳定的黏土矿物。伊利石则介于两者之间，膨胀性较弱。

1.2.2 工程危害

层间错动带的分布随机、延展性强、危险性大，是力学性质最差的结构面，岩体受其切割而丧失完整性和连续性，对水利水电工程造成极大的威胁，极易造成地下洞室围岩的不稳定。如意大利 Vajont 水库溃坝事件的调查结果表明：由于地面以下 100～200m 侏罗纪地层中夹有一层厚 5～15cm 的黏土层，滑动面沿黏土层发展而成，最终导致大滑坡。另外，美国 Austin 水库大坝、法国 Bouzey 水库大坝、澳大利亚 Mount Isa 矿区等工程中均有层间错动带导致地下洞室结构变形失效或破坏的实例。白鹤滩水电站地下洞室群也遭遇了由玄武岩岩流层顶部的凝灰岩发育而来的多条层间错动带，其多在高边墙厂房顶部或边墙中上部斜交，所带来的危害程度尚未明确。

夹杂有层间错动带的岩体强度往往具有不均匀性，在开挖卸荷过程中应力重分布变形，破坏发生在最薄弱部位。也就是说地下洞室失稳的决定性因素在于层间错动带，其本身力学特性的研究将成为重中之重。但其力学性质不仅与其物理性质（如矿物成分、颗粒分布和化学成分）相关，也受其赋存的环境条件（如地应力，地下水的流动）的影响。考虑到赋存环境条件，对于埋藏位置较深的层间错动带，其所处地应力（上覆岩体自重应力）较大，高压力试验条件下（一般指法向压力大于 1 MPa）往往会获得与低压力条件下不同的力学特性；此外，受降雨和水文地质条件的影响，地下水位的变化会造成层间错动带含水率的变化；从工程角度看，在大型工程施工期前，需要采用防渗帷幕或排水等截（导）流工程措施来减少施工区的水流，从而导致层间错动带中含水量的降低。含水量的降低可能会引起层间错动带（水）力学性质的差异。

1.2.3 强度和变形特性

不同地区层间错动带的物理力学特性和规律不尽相同，但据国内一些地区的层间

错动带分析，主要是由其物质成分和结构特征决定的。因此，众多学者建立了层间错动带强度指标与其物理指标的关系。聂德新等在研究龙羊峡坝区层间错动带工程性质时，提出用天然状态指标$\frac{W}{W_p}$（W 表示夹泥天然状态下的含水量；W_p 表示塑限含水量）表征层间错动带强度性质；肖树芳等根据层间错动带宏观组构的力学效应，采用模糊综合评判法定量预测其强度参数值并通过建立层间错动带的分维模型定量预测其强度；王在泉采用非等间距灰色模型预测层间错动带的长期抗剪强度；冯夏庭等采用人工神经网络方法对已有样本进行学习，建立了层间错动带残余强度与各个因素之间的非线性映射关系。

层间错动带抗剪强度参数的正确选取，对水工建筑物及其地基的稳定分析是至关重要的。但是，抗剪强度参数受试验方法的影响较大。

徐国刚归纳了大型原位抗剪试验过程中得到的剪应力-位移曲线，其形态大致可分为三种类型，如图 1.1 所示，不同类型剪切曲线反映了不同的层间错动带的强度特征和剪切破坏机制。

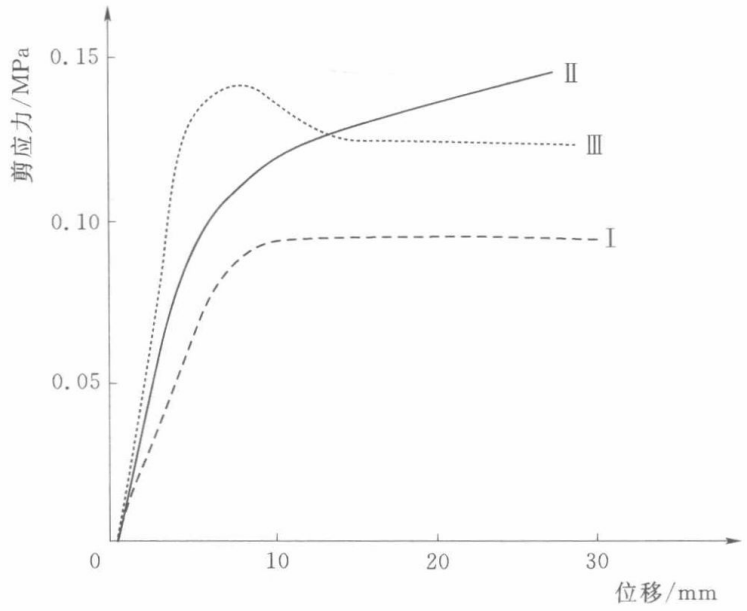


图 1.1　原位抗剪试验剪应力-位移曲线

（1）Ⅰ类为塑性曲线。剪切过程中不存在应力降低现象，试件屈服后很快达到峰值，峰值强度与残余强度近于相等，且强度值较低。全泥型和泥夹碎屑型层间错动带具有这种剪切破坏类型的曲线。

（2）Ⅱ类为塑性强化曲线。屈服强度较低，但试件屈服后呈应力强化趋势，强度明显增高。呈这种类型曲线的试样大多数也为全泥型和泥夹碎屑型，多发生在未限制层间错动带膨胀条件下试件的剪切试验中。由于试件在剪切过程中发生层间错动带膨胀挤出现象，泥质成分减少，碎屑颗粒相互咬合力增大，因而强度提高。

(3) Ⅲ类为脆性曲线。试件存在较高的峰值强度，过峰后曲线明显下降，进入平缓的残余剪切阶段。碎屑夹泥和泥膜型层间错动带一般呈这种类型的剪切曲线。

王先锋等将黄河小浪底层间错动带的饱和固结快剪试验分为塑性曲线、准塑性曲线、过渡型曲线和准脆性曲线。据统计，塑性曲线出现较多，约占试样的50%以上，黏泥型与部分泥夹碎屑性、泥夹粉砂型夹泥表现为此种曲线类型；而碎屑夹泥-碎屑型夹泥常表现为准塑性曲线；过渡型曲线在达到屈服值后，常经过几个阶梯或一次较大的应力增加才达峰值，呈阶梯状，泥夹碎屑型与泥夹粉砂型夹泥常表现为该种曲线类型；准脆性曲线线屈服值与峰值都很高，过峰值后曲线急骤下降，出现较大的应力降，表现出脆性材料的变形特征，仅限于碎屑型和起伏差较大的泥膜型夹泥中出现。

冯光愈根据葛洲坝坝基层间错动带的剪切试验结果，认为层间错动带是一个具有弱结构连接的黏-弹-塑性的分散体系。其剪应力-剪应变位移关系曲线有两种类型：屈服型和轻微软化型。两种曲线的起始段为很陡的直线段。对于屈服型的曲线，直线段末端的剪应力略低于残余强度；对于软化曲线则接近残余强度，在很小的剪切位移下（约1mm）剪应力随位移迅速增长，其抗剪强度就能大部分发挥出来。

许宝田等采用自制试验装置，进行边坡岩体中的层间错动带的力学特性试验。分析实测的剪应力-变形曲线发现，该曲线有明显的比例极限、屈服点和峰值点，表明在试件受力变形初期，剪切力-变形近似呈线性关系，剪切刚度为常量；随法向应力的增大，峰值剪应力呈线性增长，达到峰值强度之后，随剪切变形增大，抗剪强度变化不大，残余强度近似等于峰值强度，表明试样发生剪切破坏，其破坏类型呈“塑性”破坏型，如图1.2所示。软弱夹层的剪切变形可分为三个阶段，各个阶段的强度参数不同，对建筑边坡工程来说，应避免其达到临界状态，软弱夹层强度参数应取其低值。

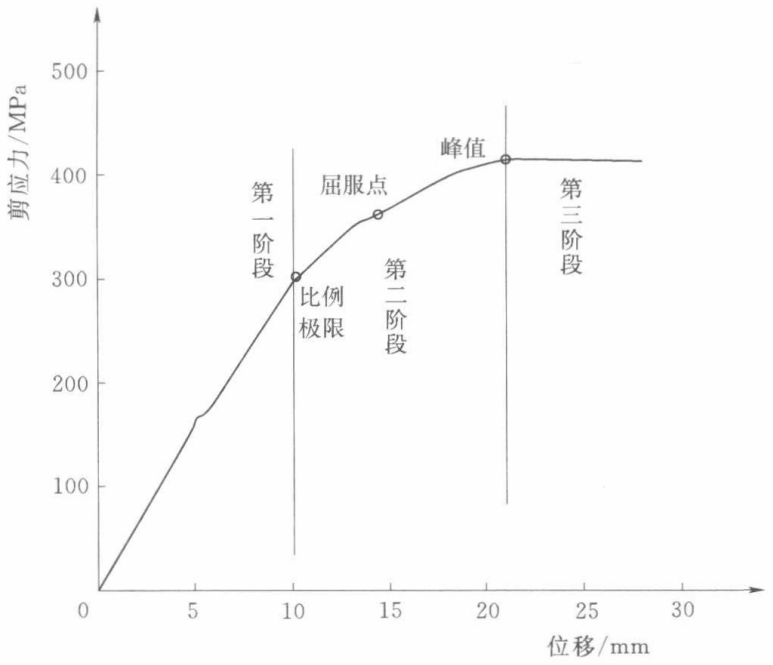


图1.2 层间错动带剪应力-变形曲线

闫汝华、樊卫花对马家岩水库坝区的层间错动带进行研究后发现，其中构造型剪切应力、应变特征表现为塑性破坏特征，曲线一开始有明显的线性段，随剪应力的增大，进入曲率不大的非线性段；当剪力继续增加，约为峰值的0.8倍时，位移速率增

大，曲线出现即屈服点，此后剪应力少量增加，位移却大量增加，出现塑性变形破坏，峰值强度与残余强度基本一致。风化型曲线表现为塑性破坏特征，破坏性质与正常固结土的破坏特色类似，即峰值过后强度明显下降，出现残余强度。

层间错动带的力学模型是进行围岩稳定性分析的基础和前提，也是计算岩土力学的核心问题。岩土体本构理论是研究岩土体在作为建筑结构物的地基、环境或材料本身的应力-应变关系规律，是理论岩土力学的基本内容，也是岩土工程学科的重要基础理论。

在岩土力学发展的萌芽时期，岩土本构理论还没有形成自己独立的体系，其材料特性还没有从一般性的工程材料中被认识、分离出来。英国科学家胡克最早发现了材料的变形与引起变形的外力成正比，称之为胡克定律。该发现为岩土力学的发展提供了客观条件，大多数的理论因循弹性力学的理论框架，将岩土体的性质、加荷条件和边界条件理想化，从而获得一些重要的解答。Boussinesq 和 Cerruti 分别提出了均匀的、各向同性的半无限弹性体表面在竖直或水平力作用下的位移和应力分布理论；Dachy 和 DuPult 通过室内试验建立了有孔介质中水的渗流理论；Terzaghi 在 1923 年所发表的论文《黏土中动水应力的消散计算》中提出了土体的一维固结理论，又在另一重要文献中提出了著名的有效应力原理，标志着岩土力学作为不同于一般连续介质力学的独立学科的建立，岩土体作为一种三相非连续介质材料的特殊性开始被逐渐接受，并加以正确理解；Biot 建立了土骨架压缩和渗流的耦合理论，从而把岩土力学推向更高的发展阶段。

虽然，在此阶段引进和借用了大量弹性力学的方法和理论来研究岩土体的破坏问题，但由于岩土体的复杂性，简单的弹性模型已无法解释。在实际工程中遇到的岩土力学非线性、不连续性、不均质性、各向异性等问题已无法用古典岩土力学理论解决。一些非线性弹性本构模型得以发展。这种非线性反映在应力-应变关系上，表现为柔度矩阵或刚度矩阵不再是常量，而是随应力状态而变。虽然非线性弹性本构模型反映土体应力-应变关系中的非线性、剪胀性、应力路径相关性，超弹性本构模型与次弹性本构模型常被提及，但由于采用的参数较多，且物理意义不明晰，所以较少实用。

1773 年 Coulomb 首先提出土的破坏条件：Coulomb 破坏准则，后来推广为 Mohr - Coulomb 破坏准则。20 世纪 50 年代末期，随着传统塑性力学、近代土力学、岩石力学以及有限元法等数值计算方法的发展和金属塑性力学理论的突破，岩土弹塑性力学逐渐形成一门独立的学科。1957 年 D. C. Drucker 等首先提出平均应力和体应变会导致岩土材料产生体积屈服，因而提出在 Mohr - Coulomb 的锥形空间屈服面上加一簇强化帽形屈服面，这是岩土弹塑性力学理论的一大进展。1958 年，Roscoe 等出版了《临界状态土力学》专著，这是世界上第一本关于岩土塑性理论的专著，详细研究了

土的实用模型，他们将“帽子”屈服准则、正交流动准则、加工硬化规律系统地应用于剑桥模型之中，并提出了临界状态线、状态边界面、弹墙等一系列物理概念，构成了第一个比较完整的土塑性模型，开创了土体的实用计算模型；1984 年，Desai C S 等进一步阐明了岩土材料变形机制，形成了较系统的岩土塑性力学理论。

概括起来说，经典塑性理论由屈服准则、流动法则和硬化规律三部分组成。屈服准则由屈服函数（初始屈服面）来表示，它定义了产生应变的应力水平；流动法则通过定义一个塑性势函数（塑性势面）来体现，塑性应变的方向始终垂直于塑性势面的外法线，即塑性势面确定了塑性应变增量的方向；硬化规律与屈服函数类似，但其中增加一项硬化参数，它与塑性应变增量有关，此时的屈服函数也称为后继屈服面，它的作用在于求解塑性应变增量的大小。基于经典塑性理论的本构模型将应变增量分解为弹性应变增量与塑性应变增量，弹性应变增量与应力增量遵守胡克定律，塑性应变增量则通过流动法则和硬化规律来确定。当屈服函数与塑性势函数相同时，此时的流动法则即为关联流动法则，即塑性应变增量的方向与屈服面外法线方向一致。当屈服函数与塑性势函数不同时称为非相关联流动法则。基于经典塑性理论所建立的本构模型为数众多，其提出的背景与合理性各有特点。

岩土类摩擦材料本构理论的某些假设与实际情况不符，导致理论计算结果与试验结果出现矛盾：①岩土材料不具有塑性应变增量方向与应力唯一性假设，亦即不遵守传统塑性势理论，岩土材料塑性应变增量的方向不仅取决于应力状态，而且主要取决于应力增量；②岩土类材料不遵守关联流动法则和德鲁克公设；③经典塑性力学没有考虑应力主轴旋转。

随着现代科学技术的发展，大量非线性科学的基本理论被引入到岩土本构模型的研究中。如 Mandelbrot 等提出的分形几何、Rene Thom 创立的突变论、人工神经网络（ANN）等理论，为岩土本构模型的进一步研究提供理论文持。人工神经网络最早是由生物学家和数学家共同提出的，它是由大量的简单处理单元以某种拓扑结构广泛地相互连接而构成的复杂的非线性系统，是一个大规模并行分布式存储与处理系统，还具有自组织、自适应与容错性等优点。因此，特别适用于处理需要同时考虑许多因素和条件的、不精确的和模糊的信息。将 ANN 应用于岩土本构模型的建立，是与传统数学建模方法有本质区别的新方法，它避免了数学规则和表达式的建立，但是这种建模方法的优越性、准确性、适用范围都还有待于进一步探讨。近年来，有研究学者借助神经网络强大的自组织、自学习功能来反演岩土体的本构关系，探索一条岩土体本构模型研究的新途径。

本构理论作为岩土力学理论的重要内容，其发展和岩土力学的发展有密切关系（如岩土损伤模型、细观力学模型、应变软化模型、特殊土模型、非饱和土模型等），同时引入正如多位应力轨迹、动力荷载、循环荷载等因素，以模拟土在复杂应

力轨迹条件下所出现的剪胀效应、磁滞现象、应变主轴旋转、应力引起的各向异性等。因此，选择合适的岩土介质本构模型将会对计算结果产生较大的影响。

1.2.4　颗粒破碎研究进展

早在 1948 年就有关于岩土体颗粒破碎现象重要性的研究，颗粒破碎会直接改变岩土体的自身结构（孔隙比和颗粒粒径分布），为了研究颗粒破碎影响下岩土体的变形破坏特性，许多学者从不同角度、利用不同的试验方法和设备进行了各式各样的试验研究，这些研究成果为岩土力学模型的研究提供了基础数据，也是岩土力学学科发展的基础。

静态三轴压缩和剪切试验的主要目的是提供岩土变形和强度参数，在岩土力学试验中被广泛使用。考虑到颗粒破碎影响的三轴试验，针对颗粒易碎材料如堆石料、钙质砂、冰渍土、风化岩和层间错动带等岩土介质，众多研究者得到了不同围压或剪应力条件下颗粒破碎的规律，其中包括颗粒破碎对应力-应变关系或剪胀规律的影响，试验结果表明颗粒破碎是造成强度包线非线性的重要原因且对剪胀有抑制作用；蒙进等和杨光等针对应力路径对颗粒破碎的影响开展了大量研究；魏松等得到了湿化条件下颗粒破碎的特性，认为应力水平不是很高的条件下，堆石料颗粒湿化也会发生很显著的破碎；不同含水率（吸力）条件下颗粒破碎程度并不相同。

压汞法和滤纸法是测定岩土体水力学特性——吸力的常规方法，试验成果丰富并涉及不同岩土体。描述吸力特性的土水特征曲线（SWCC）会随不同的结构状态而变化。许多学者采用不同的吸力测试方法对不同孔隙比和颗粒粒径分布的岩土体进行了研究，认为孔隙比对吸力的影响较大，但部分研究者认为可以不考虑孔隙比对 SWCC 的影响，可见孔隙比对 SWCC 的影响尚有矛盾之处；此外，还有一些专家、学者，研究了混合和配比不同组分的颗粒粒径对 SWCC 的影响，试验结果表明细粒含量越高吸力越大且 SWCC 曲线上移。颗粒破碎改变了岩土体的结构（孔隙比和颗粒粒径分布），反映层间错动带工程地质特性的水力学性质还需进一步研究。

1.3　主要研究内容

本书针对层间错动带的力学特性及其破坏机理进行了系统深入的研究，主要内容如下：

（1）利用研发的可开合取样工具以及合理的取样方法获得了层间错动带原状样及其工程地质特性。