

前 言

青藏高原作为“地球第三极”，不仅塑造了亚洲乃至全球的气候格局与生态体系，更是我国乃至亚洲重要的生态安全屏障与战略资源储备区。川藏关键廊道纵贯青藏高原东缘及横断山区，是连接中国内地与青藏高原的主动脉。从茶马古道到川藏高速，自古以来这条廊道便是汉藏文化交融、经济往来与民族团结的生命线，其战略地位、经济价值与社会意义不言而喻。在新时代背景下，川藏廊道是国家综合立体交通网主骨架的重要组成，不仅承载着区域协调发展、国土空间连通与边疆巩固提升的多重战略使命，也是探索极端地质环境下重大工程建设、深化地球系统科学研究的前沿阵地。

然而，川藏关键廊道穿越的青藏高原东缘横断山区具有极端的高寒环境、活跃的构造运动与复杂的地质条件，是地球上最为独特且挑战重重的自然地理单元之一。廊道自东向西依次穿越川滇菱形地块、金沙江缝合带、澜沧江缝合带、怒江缝合带、嘉黎断裂带，直至喜马拉雅东构造结，地质历史上经历了多期次、多类型的强烈构造运动。廊道沿线地形陡峻，深切峡谷与高山岭谷相间分布，区域地壳稳定性问题突出，岩体结构破碎，岩性组合多变，地应力环境复杂，崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害极为发育。这一区域的任何工程扰动都可能引发链式地质响应，其勘察、设计、施工和长期维护堪称世界级难题。

面对川藏关键廊道这一极端地质环境，工程地质力学分析理论与方法以其独特的地质与力学相结合的系统思维，展示出在地质条件复杂区域重大工程建设中的适用性。工程地质力学分析的独特性在于，它将地质体视为具有特定演化历史的自然产物，强调从构造体系、地应力条件、岩石组合、岩体结构等本质出发，运用力学原理分析其当前与未来的工程行为，从而实现从定性描述到定量评价、从静态判断到动态预测的转化。近年来，在一系列重大工程规划建设的驱动下，针对川藏廊道的系统性、精细化工程地质力学研究全面展开，旨在从区域构造体系、地应力环境、岩石组合与岩体结构到具体地质灾害机理进行多层次、全链条的解析与评价，为工程规划、设计、施工与长期运营安全提供坚实的科学依据。

本书正是立足于这一国家需求与工程实践前沿，以地质力学理论为基础，融合现代工程地质学、岩石力学、构造地质学等多学科知识，对川藏廊道这一特殊且极端复杂的工程地质区进行系统性力学分析的专著。全书共分七章：第1章系统阐述了工程地质力学的基本原理与分析框架，为后续研究奠定方法论基础；第2至第5章，遵循由西向东的空间顺序，依次对喜马拉雅东构造结关键区、嘉黎断裂关键区、横断三江关键区（怒江、澜沧江、金沙江缝合带）及川滇菱形地块区四大关键构造单元，选取数百处典型露头、工程场地及灾害点，进行翔实的野外地质调查与工程地质力学分析，查明川藏关键廊道的工程地质力学背景，厘清廊道不同区段的岩石组合特征，揭示廊道构造体系、地应力场的地质力学特性，明确结构面、结构体的类型及其力学属性，评估典型实例的工程地质力学稳定性；第6章在前述区域分析基础上，对廊道尺度的重大工程地质风险进行综合分析评价，并附

以系列专题图件；第 7 章展望了工程地质力学在应对复杂地质环境与全球气候变化挑战时需深化的主要研究方向。

本书的撰写，旨在实现以下目标：一是系统梳理与构建适用于极端复杂山区的工程地质力学分析理论与方法体系；二是通过对川藏廊道内关键构造段与工程节点的精细化分析，揭示其控制性的工程地质力学特性；三是为廊道内拟建或在建的重大工程的选址选线、结构设计、风险分析及灾害防治提供直接的地质依据与决策支持；四是通过在活跃构造区、复杂岩性区重大工程建设中的实践创新，推动工程地质力学分析理论的不断发展与完善。

本书是国家自然科学基金重大专项项目“CZ 铁路重大灾害风险识别与预测”（项目编号：41941019）、中华人民共和国科学技术部国家专项计划“第二次青藏高原综合考察·重大工程扰动灾害及风险”（项目编号：2019QZKK0904）等重要科研项目成果的凝练与总结，并受“高等学校学科创新引智计划”（项目编号：300201000088）资助。本书的完成，得到了众多单位与同仁的大力支持与帮助。在此，著者衷心感谢国家自然科学基金委员会、科技部、中国国家铁路集团有限公司等部门的支持；感谢长安大学、中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质大学（北京）、中国地质大学（武汉）、成都理工大学、西南交通大学、中铁第一勘察设计院集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司等单位在野外考察、数据共享与学术交流中提供的帮助和支撑；感谢项目组成员田朝阳、田乃满、李郎平、仇义星、张宁、曹益铭、姚佳明、张文哲、都奎建、王瑞、张迪、黄晓磊、陈钊、袁逸齐、刘长青、梁晨涛、任轩承、陈浩扬、王小婵、梁秦源、李洲辰、甘玥、杜钰靓等，在长期艰苦的野外工作、深入的数据分析与反复的文稿讨论中付出的辛勤汗水与智慧；感谢所有在考察期间给予我们支持与便利的地方政府、相关部门与藏族同胞。

由于川藏廊道地质条件的极端复杂性与认知的阶段性，以及著者学识与水平的局限，书中疏漏、不足之处在所难免。我们诚挚希望本书能为从事青藏高原工程地质、地质灾害防治、重大工程建设的科研人员、工程技术人员、管理者及高校师生提供有益的参考，并恳请各位读者、专家不吝批评指正。期望本书的出版，能抛砖引玉，促进学界与工程界针对川藏廊道乃至全球类似极端区域的工程地质力学问题开展深入探索，共同为提升我国重大基础设施建设的科技保障能力，服务国家发展战略贡献力量。

作 者

2025 年 12 月 30 日

目 录

前言

第 1 章	工程地质力学分析原理	1
1.1	概述	1
1.2	工程地质力学分析简明原理	2
1.2.1	工程地质力学分析发展简史	2
1.2.2	工程地质力学的基本原理	3
1.2.3	岩石组合的工程地质力学分析	4
1.2.4	构造体系的地质力学分析	5
1.2.5	初始地应力场及其地质力学分析	6
1.2.6	岩体结构面及其力学属性	9
1.2.7	岩体结构类型及其特征	14
1.2.8	工程地质力学的稳定性分析	15
1.3	川藏关键廊道工程地质力学分析方法	17
1.3.1	区域工程地质力学背景分析	18
1.3.2	构造体系的地质力学分析	20
1.3.3	工程地质力学分析	22
1.3.4	典型工程地质实例评价	23
第 2 章	喜马拉雅东构造结关键区工程地质力学分析	25
2.1	雅鲁藏布江缝合带西界米林断裂带工程地质区	25
2.1.1	工布江达大型复式背斜段	25
1.	工程地质力学背景	25
2.	构造体系的地质力学分析	26
3.	初始地应力场及其地质力学分析	28
4.	工程地质力学分析	29
5.	典型工程地质实例评价	34
2.1.2	米林断裂雅江二级阶地段	34
1.	工程地质力学背景	34
2.	构造体系的地质力学分析	36
3.	初始地应力场及其地质力学分析	37
4.	工程地质力学分析	38
5.	典型工程地质实例评价	39
2.1.3	米林断裂羌纳乡段	40

1. 工程地质力学背景	40
2. 构造体系的地质力学分析	41
3. 初始地应力场及其地质力学分析	44
4. 工程体地质力学分析	44
5. 典型工程地质实例评价	49
2.2 东构造结核心区派镇拆离断裂带工程地质区	50
2.2.1 派镇拆离断裂索松村段	50
1. 工程地质力学背景	50
2. 构造体系的地质力学分析	51
3. 初始地应力场及其地质力学分析	54
4. 工程体地质力学分析	54
5. 典型工程地质实例评价	57
2.2.2 派镇拆离断裂蹦蹦嘎村段	59
1. 工程地质力学背景	59
2. 构造体系的地质力学分析	60
3. 初始地应力场及其地质力学分析	62
4. 工程体地质力学分析	62
5. 典型工程地质实例评价	65
2.2.3 派镇拆离断裂雅江峡谷段	65
1. 工程地质力学背景	65
2. 构造体系的地质力学分析	67
3. 初始地应力场及其地质力学分析	68
4. 工程体地质力学分析	68
5. 典型工程地质实例评价	70
2.3 雅鲁藏布江缝合带东界墨脱断裂带工程地质区	71
2.3.1 墨脱断裂德兴乡段	71
1. 工程地质力学背景	71
2. 构造体系的地质力学分析	72
3. 初始地应力场及其地质力学分析	74
4. 工程体地质力学分析	75
5. 典型工程地质实例评价	76
2.3.2 墨脱断裂果果塘段	78
1. 工程地质力学背景	78
2. 构造体系的地质力学分析	79
3. 初始地应力场及其地质力学分析	81
4. 工程体地质力学分析	81
5. 典型工程地质实例评价	85

2.3.3 墨脱断裂解放桥段	87
1. 工程地质力学背景	87
2. 构造体系的地质力学分析	87
3. 初始地应力场及其地质力学分析	88
4. 工程体地质力学分析	89
5. 典型工程地质实例评价	91
第3章 嘉黎断裂关键区工程地质力学分析	93
3.1 嘉黎断裂嘉黎-易贡工程地质区	93
3.1.1 嘉黎断裂忠玉段	93
1. 工程地质力学背景	93
2. 构造体系地质力学分析	94
3. 工程体地质力学分析	97
4. 典型工程地质实例评价	98
3.1.2 嘉黎断裂八盖段	100
1. 工程地质力学背景	100
2. 构造体系地质力学分析	101
3. 工程体地质力学分析	102
4. 典型工程地质实例评价	105
3.1.3 嘉黎断裂易贡段	107
1. 工程地质力学背景	107
2. 构造体系地质力学分析	108
3. 初始地应力场及其地质力学分析	110
4. 工程体地质力学分析	111
5. 典型工程地质实例评价	113
3.2 嘉黎断裂易贡-波密工程地质区	114
3.2.1 嘉黎断裂通麦段	114
1. 工程地质力学背景	114
2. 构造体系地质力学分析	116
3. 初始地应力场及其地质力学分析	120
4. 工程体地质力学分析	122
5. 典型工程地质实例评价	126
3.2.2 嘉黎断裂古乡段	128
1. 工程地质力学背景	128
2. 构造体系地质力学分析	129
3. 工程体地质力学分析	132
4. 典型工程地质实例评价	133
3.2.3 嘉黎断裂嘎隆寺段	138

1. 工程地质力学背景	138
2. 构造体系地质力学分析	140
3. 工程体地质力学分析	141
4. 典型工程地质实例评价	141
3.3 嘉黎断裂波密-然乌工程地质区	142
3.3.1 嘉黎断裂盍甲山段	142
1. 工程地质力学背景	143
2. 构造体系地质力学分析	143
3. 工程体地质力学分析	145
4. 典型工程地质实例评价	147
3.3.2 嘉黎断裂然乌湖段	148
1. 工程地质力学背景	148
2. 构造体系地质力学分析	150
3. 初始地应力场及其地质力学分析	151
4. 工程体地质力学分析	151
5. 典型工程地质实例评价	154
3.3.3 嘉黎断裂来古冰川段	154
1. 工程地质力学背景	154
2. 构造体系地质力学分析	156
3. 初始地应力场及其地质力学分析	158
4. 工程体地质力学分析	159
5. 典型工程地质实例评价	162
第4章 横断三江关键区工程地质力学分析	164
4.1 怒江缝合带工程地质区	164
4.1.1 在建 GLS 隧道进口段	164
1. 工程地质力学背景	164
2. 构造体系地质力学分析	165
3. 初始地应力场及其地质力学分析	167
4. 工程体地质力学分析	168
5. 典型工程地质实例评价	169
4.1.2 在建 BD 隧道出口段	170
1. 工程地质力学背景	170
2. 构造体系地质力学分析	172
3. 初始地应力场及其地质力学分析	174
4. 工程体地质力学分析	174
5. 典型工程地质实例评价	176
4.1.3 怒江某水电站右岸段	177

1. 工程地质力学背景	177
2. 构造体系地质力学分析	178
3. 初始地应力场及其地质力学分析	180
4. 工程体地质力学分析	180
5. 典型工程地质实例评价	184
4.2 澜沧江缝合带工程地质区	187
4.2.1 澜沧江缝合带色曲段	187
1. 工程地质力学背景	188
2. 构造体系地质力学分析	188
3. 初始地应力场及其地质力学分析	191
4. 工程体地质力学分析	192
5. 典型工程地质实例评价	195
4.2.2 在建 DDS 隧道、GJ 隧道口段	195
1. 工程地质力学背景	195
2. 构造体系的地质力学分析	197
3. 初始地应力场及其地质力学分析	198
4. 工程体地质力学分析	199
5. 典型工程地质实例评价	202
4.2.3 在建 HLS 隧道口段	203
1. 工程地质力学背景	203
2. 构造体系地质力学分析	204
3. 工程体地质力学分析	205
4. 典型工程地质实例评价	207
4.3 金沙江工程地质区	209
4.3.1 金沙江缝合带贡觉沙东段	209
1. 工程地质力学背景	209
2. 构造体系地质力学分析	210
3. 初始地应力场及其地质力学分析	213
4. 工程体地质力学分析	214
5. 典型工程地质实例评价	217
4.3.2 金沙江缝合带白玉绒盖乡段	218
1. 工程地质力学背景	218
2. 构造体系地质力学分析	220
3. 初始地应力场及其地质力学分析	222
4. 工程体地质力学分析	223
5. 典型工程地质实例评价	225
4.3.3 金沙江缝合带在建某特大桥段	227

1. 工程地质力学背景	227
2. 构造体系地质力学分析	228
3. 初始地应力场及其地质力学分析	230
4. 工程体地质力学分析	231
5. 典型工程地质实例评价	233
第 5 章 川滇菱形地块工程地质力学分析	235
5.1 川滇地块西部巴塘-理塘工程地质区	235
5.1.1 巴塘断裂带巴塘-日雨段	235
1. 工程地质力学背景	235
2. 构造体系的地质力学分析	236
3. 初始地应力场及其地质力学分析	239
4. 工程地质体力学分析	240
5. 典型工程地质实例评价	242
5.1.2 理塘断裂带甘孜禾尼乡段	244
1. 工程地质力学背景	244
2. 构造体系的地质力学分析	245
3. 初始地应力场及其地质力学分析	246
4. 岩土体工程地质力学分析	248
5. 典型工程地质灾害实例及分析	249
5.2 川滇地块中部雅砻江工程地质区	251
5.2.1 雅砻江同达沟断层段	251
1. 工程地质力学背景	251
2. 构造体系地质力学分析	252
3. 初始地应力场及其地质力学分析	253
4. 工程体地质力学分析	254
5. 典型工程地质实例评价	256
5.2.2 PML 隧道、WJ 隧道口段	256
1. 工程地质力学背景	257
2. 构造体系地质力学分析	259
3. 初始地应力场及其地质力学分析	260
4. 工程体地质力学分析	261
5. 典型工程地质实例评价	263
5.2.3 在建雅砻江某特大桥段	264
1. 工程地质力学背景	264
2. 构造体系地质力学分析	266
3. 初始地应力场及其地质力学分析	268
4. 工程体地质力学分析	269

5. 典型工程地质实例评价	271
5.3 川滇地块东部鲜水河、大渡河工程地质区	272
5.3.1 鲜水河折多塘断裂带瓦泽乡段	272
1. 工程地质力学背景	272
2. 构造体系的地质力学分析	274
3. 初始地应力场及其地质力学分析	276
4. 岩土体工程地质力学分析	276
5. 典型工程地质灾害实例及分析	279
5.3.2 鲜水河断裂带金龙寺段	279
1. 工程地质力学背景	280
2. 构造体系的地质力学分析	281
3. 初始地应力场及其地质力学分析	284
4. 岩土体工程地质力学分析	284
5. 典型工程地质灾害实例及分析	287
5.3.3 大渡河在建某特大桥左右岸段	287
1. 工程地质力学背景	288
2. 构造体系地质力学分析	290
3. 初始地应力场及其地质力学分析	292
4. 工程地质力学分析	292
5. 典型工程地质实例评价	295
第 6 章 川藏关键廊道重大工程地质风险分析	299
6.1 川藏关键廊道地应力特征及分析	299
6.1.1 地应力背景条件	299
1. 研究区背景及数据分布	299
2. 数据处理	300
6.1.2 实测地应力特征分析	301
1. 应力梯度随深度变化规律	301
2. 侧压力系数随深度变化	303
3. 应力积累特征	304
4. 实测应力方向特征分析	304
6.1.3 地应力状态的指示意义	306
1. 应力状态对构造动力学特征的指示意义	306
2. 地应力状态对重大地下工程稳定性分析	307
6.2 川藏关键廊道易贡藏布流域地质灾害易发性评价	309
6.2.1 地质灾害易发性评价方法	310
1. 频率比模型 (FR)	310
2. 归一化频率比模型 (NFR)	310

3. 二元逻辑回归模型 (LR)	311
4. 耦合模型 (NFR-LR)	311
6.2.2 地质灾害空间分布特征	311
1. 地质灾害解译	311
2. 地质灾害总体分布特征	312
3. 地质灾害空间分布影响因素分析	312
6.2.3 地质灾害易发性评价	315
1. FR、NFR 值计算	315
2. 评价因子相关性分析	315
3. 单一频率比模型易发性评价	317
4. 耦合模型易发性评价	317
6.2.4 评价结果分析	319
1. ROC 检验	319
2. 崩滑比验证	320
3. 崩滑易发性结果分析	321
6.3 川藏关键廊道地表-地下风险综合分析	322
6.3.1 地表工程地质风险评价	324
1. CZ 工程地表灾害综合密度分布规律	324
2. CZ 工程地表灾害综合危险性分布	325
3. 地表地质灾害综合强度 (脆弱性) 分布	326
4. 地表地质灾害综合风险	327
6.3.2 地下重大地质风险分析	329
1. 断裂活动性	329
2. 岩爆风险	331
3. 大变形风险	334
4. 地下工程复杂地质状况综合风险	336
6.3.3 地质风险综合分析	337
第 7 章 展望	339
7.1 深化地质体工程地质力学特性的区域时空分异研究	339
7.2 揭示特殊地质体及其结构的工程地质力学多尺度关联特征	339
7.3 探究工程地质力学特性的长时效演化规律与预测	340
7.4 评估气候变化与极端事件下工程地质力学多过程响应特征	340
7.5 拓展面向地球系统科学的工程地质力学理论前沿	341
参考文献	342
附图	353

第1章 工程地质力学分析原理

1.1 概 述

工程地质力学是一门以地质体为研究对象，融合地质学与力学理论的交叉学科。它强调地质体是地质历史的产物，其结构、特性及力学行为受控于复杂的成岩过程、构造演化及环境条件。与侧重于岩石材料力学性能测试与计算的经典岩石力学相比，工程地质力学不仅关注岩块的力学参数，更核心的是将岩体视为赋存于特定地质系统中的结构体，强调从地质成因和演化历史的角度，系统分析其结构性、非均质性、不连续性和各向异性。因此，它超越了将岩石简化为均质材料的传统力学分析框架，主张工程稳定性问题的本质是地质结构在工程扰动下的响应与再平衡，从而在理论根基和实践取向上，对传统岩石力学形成了重要的深化与拓展。

工程地质力学分析的发展简史，清晰地展现了其从传统岩石力学中独立出来并不断强化的过程。早期研究可追溯至 19 世纪末至 20 世纪初，如李四光先生等人运用力学原理分析地质构造。然而，系统性的学科构建始于新中国成立后的大规模工程建设实践。在谷德振先生的引领下，中国学者在 20 世纪 60 年代明确提出“岩体结构”的核心概念，认识到控制工程稳定性的关键是地质结构而非仅仅是岩石材料，这标志着对传统岩石力学分析范式的首次重大突破。1972 年，以王思敬先生为主要执笔人的“工程地质力学的原理和方法”一文正式确立了学科命题。随后，通过金川镍矿等重大工程的系统研究，理论框架日趋成熟。20 世纪 70 至 90 年代，随着《岩体工程地质力学问题》系列文集及《岩体工程地质基础》等专著的出版，以及国内外学术交流的深入，工程地质力学从强调“地质与力学结合”的阶段，发展到形成以“结构控制论”为核心的独立理论体系。近年来，更吸收了系统科学、非线性理论，其研究范畴从单一工程岩体稳定性延伸至环境工程领域，完成了从附属工具到主导理论的范式转变。

将工程地质力学分析应用于川藏廊道这一全球地质构造最为复杂、工程挑战最为严峻的地区之一，具有极其紧迫的必要性。川藏廊道横跨全球地壳活动最剧烈的青藏高原东缘，新构造运动活跃，深大断裂带密集分布，高地应力、高地震烈度、强烈河谷下切等内外动力地质作用交织并存。在此兴建高速公路、铁路、水利枢纽等重大工程，将不可避免地遭遇前所未有的极高地应力、高位远程地质灾害、活动断裂带错断等极端地质问题。因此，必须运用系统性的工程地质力学分析方法，开展川藏关键廊道工程地质力学调查与分析（附图 1），深刻揭示廊道内特殊地质现象的形成机理与生成规律，为重大工程方案的比选优化、地质风险的识别与防控提供科学依据。

本章作为全书的开篇与理论基础，旨在系统阐述工程地质力学分析的核心原理及其在川藏廊道这一特殊环境下的应用方法论。主要内容将首先回顾并梳理王思敬院士所提出的

工程地质力学分析的基本原理,包括岩石组合、构造体系、岩体结构、水文地质、不良地质等方面的工程地质力学分析方法。随后,将介绍适用于川藏廊道极端复杂地质条件的工程地质力学分析的方法论,从而为后续各章节针对川藏廊道具体工程地质问题的深入分析奠定坚实的方法论基础。

1.2 工程地质力学分析简明原理

1.2.1 工程地质力学分析发展简史

地质学家应用力学的理论探讨地质构造的形成和演化可以追溯到 19 世纪末至 20 世纪 20 年代初,如德国的 Hans Cloos 和我国李四光先生等,他们采用“泥巴试验”模拟了褶皱断裂的组构机制。但是,应用力学的理论来研究地质体的结构及其工程特性则应归功于在谷德振先生指导下中国科学院地质研究所工程地质学家数十年的努力成果。

新中国成立之前,我国长期战乱,国弱民贫,工程建设规模甚小,虽有些工程地质学家从事工程建设中的地质工作,但严格的工程地质学科尚未建立起来。新中国成立后突飞猛进的各类工程建设,促进了工程地质学科的发展,当时苏联的工程地质学理论对中国工程地质工作者曾有过重要的帮助。在新中国成立十年的工程地质工作中,谷德振先生从当时将岩性、构造、地下水作为工程地质三大主要条件的共识的基础上侧重地指出构造的重要性(谷德振,1963);随后他又从构造发展并概括成结构的概念。在“岩体结构”概念的指导下,1962~1965 年谷德振先生和水电部建设总局李杰先生合作主持了中国科学院和水电部的“水利水电工程地质”总结工作。通过这项工作,得到的共识是要发展工程地质力学理论和方法,就是要以力学的理论和方法来认识地质构造现象,评价工程地质条件,分析工程岩体的稳定和渗漏,把地质研究与力学分析紧密结合起来(谷德振,1965;孙玉科和李建国,1965;王思敬,1965,1966)。

在“文革”期间,谷德振先生和他的研究集体于 1969~1970 年及以后几年中在甘肃金川镍矿开展了系统的研究,对岩体结构的类型划分、岩体变形破坏机理及稳定性分析等都提出了新的成果,工程地质力学的框架才初步构成。第 24 届国际地质大会前夕,王思敬院士主笔撰写了《岩体工程地质力学的原理和方法》,在《中国科学》1972 年第一期上以集体署名发表,正式提出了工程地质力学的学科命题。随后,经过扩展,并由王思敬、黄鼎成在铁道部第一设计院作了系统讲学,于 1976 年在科学出版社出版《岩体工程地质力学问题》。1979 年,谷德振先生专著《岩体工程地质基础》问世,系统地论述了工程地质力学的理论和工作方法。

自 20 世纪 70 年代末到 80 年代初,工程地质力学研究得到蓬勃发展,王思敬院士于 1978 年在“第一届全国工程地质学术会议”介绍了有关成果(谷德振和王思敬,1983);于 1981 年在“奥地利萨尔茨堡地质力学第 30 届讨论会”作了特邀报告(Gu and Wang, 1981, 1982);于 1980、1984 年在国际地质大会上作了交流。有关金川露天矿变形破坏机制和结构控制的研究在第四届国际岩石力学大会上也作了交流,并在 *Rock Mechanics* 上发表(Wang, 1981)。20 世纪 80 年代和 90 年代,中国科学院地质研究所工程地质力学开放

研究实验室在此期间出版了 10 集《岩体工程地质力学问题》、3 册《工程地质力学研究》共刊登有关论文 198 篇。工程地质力学的研究方向和理论渐趋成熟(王思敬, 1984; Wang, 1986), 研究工作转入到更广泛的实践和深入的应用, 撰写了系统的专著, 如《地下工程岩体稳定分析》(王思敬等, 1984)、《边坡岩体稳定性分析》(孙玉科等, 1988)、《岩体结构力学》(孙广忠, 1988)、《坝基岩体工程地质力学分析》(王思敬, 1990)、《区域地壳稳定性研究理论与方法》(李兴唐等, 1987), 所有这些成果构成了工程地质力学的理论体系和工作方法。

经过六十余年的发展, 工程地质力学已经从地学范畴的一门边缘学科, 发展成为工程地质学的基本理论之一。它的理论研究重点内容有两方面: ①探索地质体结构在地质历史中的演化过程, 从而取得对工程建设前的地质体结构和特性的认识, 这实际是地质力学作用的研究; ②探索工程建设作用下地质体结构的转化过程, 从而获得对工程岩体稳定性的认识, 并作为可靠预测的基础, 也就是工程地质力学作用的研究。通过上述研究, 在掌握地质体结构和力学特性的基础上, 考虑地壳应力状态和水文地质条件进行工程地质体的稳定性评价和变形破坏规律预测, 为工程建设的规划、设计、施工和运营服务。

1.2.2 工程地质力学的基本原理

通过多年的工程实践, 工程地质力学研究形成了一些必须遵循的准则。可以将它们概括为工程地质力学的基本原理。

(1) 地质体有特定结构。即具有结构性。工程地质力学的研究对象是工程建设涉及的上部地壳。它是由各级地质体组合构成的。应将地质体看作结构物, 而且它是有特定结构的。工程地质力学研究的中心环节是抓住地质体的结构分析, 认识工程地质力学作用的本质和规律。可以说, 工程地质力学就是地质问题的结构控制学说的发展。

(2) 地质体结构由结构面和结构体组合构成。上部地壳中各级地质体的结构, 可以用结构面、结构体组合模式来描述和分析。地质体中的各种断裂和界面形成了结构面系统, 而结构面组合围限则形成结构体。结构面和结构体的有规律组合, 规定着地质体的结构特性, 决定其工程力学特性和工程地质条件。

(3) 地质体结构是通过地质演化形成的, 并具有应力历史。地质体结构是在一定的地质历史过程中形成的, 包括岩石建造、构造变形和次生改变。在岩石建造阶段中, 沉积过程、岩浆活动和变质作用所形成的物质组成与原生结构, 在很大程度上控制着后期的构造变形和次生改变。但是, 构造结构和次生结构对岩体特性的影响很显著, 往往造成突出的工程地质问题。地质体结构的工程地质特性与其成因及类型虽然有密切联系, 但是, 总体上仍是多期地质作用的结果。

(4) 地质体结构具有分级性, 不同尺度结构具有相似性。按结构面的规模进行分级, 在此基础上作相应的地质体分级。对不同规模的工程地质问题, 要抓住相应级别的地质体及相应的结构进行评价。地质体可划分为五级, 即地块、山体、岩体、块体和岩块, 以及其相应的工程地质问题。对某一工程地质问题而言, 其更高级别的地质体的研究给出背景条件, 本级的研究给出问题的边界, 次一级地质体的研究给出问题的特性参数。所以, 工程地质研究的范围往往比工程建设直接涉及的范围更大。

(5) 地质体结构具有多样性, 可用以划分类型。根据工程的实践经验, 可将岩体结构划分为块状、层状、碎裂结构三大类。块状和层状结构基本上保持岩石建造阶段形成的原生结构, 当然, 一般说来也会发生一定程度的构造变形和次生改变, 但本质不变。碎裂结构是受到强烈的构造变形和次生改变作用而形成的。原生结构受到强烈的扰动和破坏, 最严重者变为松软结构, 属于土类 (Hwong, 1978)。

(6) 地质体的工程力学特性主要取决于它的结构性。这是通过结构的力学效应反映出来的。地质结构面的影响最关键, 它造成地质体的不连续性, 因而使它区别于理想的连续介质。地质体中结构面的不同组合, 一方面影响到应力的传递, 造成应力的局部集中和不均匀分布; 另一方面, 从根本上影响到地质体的变形和强度特性, 造成其各向异性和不均匀性。地质体的应力应变关系是很复杂的, 往往包括节理的压密段 (表现为硬化)、线性变形段, 以及屈服点以后的强化段和峰值后的应变软化。因此, 应以非线性本构关系来表征。地质体变形的时间效应往往很明显, 应作为结构流变体来描述。地质体的本构性质取决于结构类型, 因而它也有类型划分。不同的介质结构所具有的不同力学介质特性, 可采用不同的本构关系或力学模型来表征和分析。

(7) 地质体结构对岩体的变形、破坏起主导的控制作用。地质体结构是岩体稳定性的内在因素。结构控制作用主要表现于对稳定程度, 失稳范围和规模的影响, 对变形、破坏机制的影响, 以及对变形、破坏发展阶段和过程的影响。正确评价岩体稳定性的前提, 是在结构研究的基础上做好变形、破坏机制的预测。

(8) 地质体结构分析是成功的工程力学分析的基础。应力分析、变形分析及稳定分析是工程地质力学评价的中心环节, 应建立在地质体结构分析的基础上。在地质研究的基础上得到地质模型, 经过结构特性及边界条件的分析, 建立地质力学模型, 并采用适当的数学或物理分析方法来解决实际问题。

(9) 地质体和工程建筑物之间具有相互依存和相互作用关系。地质体和工程建筑物的相互依存关系表现为工程地质力学作用。地质体对工程建筑物的影响, 往往表现为地质体自身的失稳运动对工程的威胁; 而工程荷载作用下引起的地质体运动, 同样也影响工程建筑物的安全。工程建筑物作用下, 地质体结构的改变所导致的间接影响, 有时有更大的危害, 而事先不易觉察, 常难于可靠地预测。

(10) 工程地质力学的研究方向是地质学和力学的结合。工程地质力学研究要求应用力学的基本理论、分析方法和测试方法。但是, 地质研究方法仍然是基本的方法, 包括地层、岩石、地质年代和构造分析、新构造、地貌分析等。在力学分析中, 不连续介质力学的应用和发展是工程地质力学的特色, 而数值分析途径和电子计算机的应用使得工程地质力学问题有可能得到实际解决。

1.2.3 岩石组合的工程地质力学分析

岩石是岩体结构的物质组成, 它是影响形成不同岩体结构的重要因素。工程所辖地区的岩体是由各种不同岩石组合而成的 (附图 2), 很少是单一类型的岩石。因此, 探讨岩石的组合特征是研究岩体结构的物质基础所必须的。岩石组合各种各样, 从岩性上看, 有性质坚硬且脆的岩石, 亦有软弱半坚硬的岩石。在岩石组合中, 每种岩石的组织结构也不同, 有粗粒

和细粒组合、薄层和厚层组合、块状和层状组合，有时有夹层、透镜体等。

岩体可由各种均一的、坚硬的岩石组合而成。岩石的组织结构也近似一致，这种岩体就可视为坚硬均质、各向同性的介质。岩体若由组织结构一致的软弱柔韧岩石组成，这种岩体可视为软弱均质、各向同性的介质。若岩体由坚硬及柔韧岩石以不同比例组合而成，组织结构也有很大差异时，这种岩体就可看作非均质的、各向异性的介质。在工程地质力学研究中，岩组是就岩石的工程地质组合而言。每一岩组都有其一定的岩石组合特征，并应具有相似的工程地质特性，如块状石英砂岩岩组、泥质条带灰岩夹薄层页岩岩组、中厚层大理岩岩组、云母石英片岩岩组等。工程地质岩组的划分必须以工程地质力学的观点为出发点，主要考虑岩石的成因类型和岩性、岩相的变化以及岩石的成层条件和厚度变化。岩组类型也必须在建造类型的基础上进行划分（表 1.1）。

表 1.1 岩组的类型及特征

岩组类型	沉积环境	岩石组成	工程地质特性
碳酸盐建造	震旦系到三叠系以前海相沉积，陆相淡水沉积	石灰岩、白云岩、泥状灰岩，生物碎屑灰岩、礁灰岩、红色细粒灰岩、白云岩化灰岩和各种泥灰岩	岩溶发育，形成架空结构
碎屑岩建造	各个时代海相沉积，内陆河湖相沉积，滨海滨湖粗粒沉积，远海远湖细粒沉积	砾岩、砂岩、砂质页岩、页岩、黏土岩、少量灰岩（常呈透镜体出现）	多是软弱相间组合，含软弱夹层层状不均匀性
复理式建造	地槽褶皱带及地台区的活动带	泥灰岩、砂质页岩及钙质页岩等组成的海相沉积地层组合，具有明显的韵律层理特征	薄层组合，层状不均一性，各向异性
含煤建造	陆相碎屑沉积，泥盆纪以后各个时代	黏土岩、页岩、砂岩有时夹有灰岩及火山沉积岩	多层组合，层状不均一性，含有软弱夹层
含盐建造	陆相，滨海相，滨湖相	黏土岩、页岩、砂质页岩及钙质页岩等，含钾盐、钠盐、石膏、芒硝等	多层组合，层状不均一性，含有可溶夹层
岩浆岩建造	深成、浅成各个地质时代岩浆结晶分异相	深成及浅成岩浆岩如橄榄岩、辉绿岩、闪长岩、花岗岩、伟晶岩、细晶岩……呈基岩、岩株、岩脉等形式产出	均一块体组合
火山岩建造	岩浆喷出及溢流形成的岩石	玄武岩、流纹岩、安山岩、凝灰岩、凝灰质砂岩、斑脱岩等	厚层组合，含软弱夹层及沉积间断面
变质岩建造	高温高压变质形成的岩石，有接触变质、动力变质、区域变质岩	各种片岩，片麻岩，石灰岩，大理岩，闪长角闪岩等	层状各向异性，夹相对软弱层
构造岩建造	由构造运动所形成的各岩体	各种矿物成分的断层泥、糜棱岩、角砾岩、压碎岩等，厚度不一，视断面规模而不同，可由几十厘米到几十米，甚至上千米（1km 左右）	构造破碎结构
风化岩建造	风化作用为主而形成	风化壳，风化囊或风化沟，不同风化系数的岩土	风化壳分层结构，破碎泥化

1.2.4 构造体系的地质力学分析

1) 构造体系的形成过程

构造体系包括褶皱、断层和岩石圈中的其他变形构造。从数百公里长的特征到微观细节，构造发生在许多不同的环境中，并经历了应力和应变变化。它是地质体的一部分，是长时期地质历史发展的产物，是岩体内部应力应变依时间进程的具体表现。

2) 构造体系地质力学分析

进行岩体范围内构造体系的地质力学分析有助于认识岩体褶皱、断裂形成过程及分布规律, 分析方法步骤如下。

(1) 确定构造线。构造线是指与构造运动压力相垂直的平面与地面的交线。它是岩体受压缩而产生三维变形的最大延伸方向。垂直构造线的方向, 代表压力的最大主应力的方向, 它是变形、破裂的主导因素。因此, 抓住了构造线, 就等于抓住了关键, 便于掌握整个应力场的情况。构造线的方向可用下列构造形迹的方向表示:

①褶皱轴的走向, 尤其是紧密线性褶皱最具代表性。但要注意是否为横断层切割, 错动拖拉, 而引起方位上的改变; ②区域性陡倾岩层、直立岩层、片理、片麻结构等, 要注意避免对局部现象的误解; ③冲断层(包括仰冲、俯冲, 逆掩断层, 层间错动面等)的走向, 也要注意是否因为横断层切割错断而改变方位。④平卧柱状构造轴向、帚状构造走向、线排列展布方向、应力矿物的定向排列等, 这些小型构造及微构造, 经过细致研究, 也可作构造线的标志。确定构造线是构造体系分析的基础, 要根据多种标志综合判断。并且应结合区域构造地质情况分析, 以免将局部变位了的构造方向误认为构造线方向。

(2) 分析构造线的次序。一个地区往往经受多次强烈的构造运动, 应力场也发生过不止一次的变化, 在一个地区可能发现几组构造线方向。分析构造线的次序各代表哪些构造运动幕次, 也就是认识不同应力场的先后次序。为此, 要调查区域地质发展史(包括沉积过程、地层时代、岩浆活动及变质特征等), 注意发生地层不整合的时期, 同时分析各组构造线对不同岩系的切割关系, 以及各组构造线的互相穿插关系。最后, 确定每组构造线所代表的构造运动和构造层。

(3) 构造体系及其复合关系的分析。划分构造体系的工作就是构造配套, 即确定在每次构造运动的应力场中产生的, 有成生联系的各组构造形迹相对于构造线的从属关系。

总之, 由于长期地壳变动的结果, 构造体系十分复杂。在分析时要具有应力场、应力-应变, 强度理论、破坏机制、断裂面组合, 应力场转化、构造线, 运动轮回, 应力再分配、构造复合等等基本概念, 这就是地质力学方法。正确运用这些概念的关键是掌握地质建造及构造形迹特征的第一性资料。但是由于地质条件的复杂, 往往仍有许多构造现象一时不能认识清楚, 有待于深入、认真研究。

1.2.5 初始地应力场及其地质力学分析

1) 初始地应力场的构成

岩体中任何一点都受到力的作用, 处于受力状态中。在工程开挖之前岩体中已经存在着的地应力场, 称为初始地应力场。在工程开挖后, 初始地应力场受严重影响, 引起变形, 产生应力重分布, 形成围岩的应力状态, 称为次生地应力场。

初始地应力的主要组成部分有自重应力、现今构造应力、残余构造应力等。

(1) 自重应力: 岩体中任一点上覆一定厚度的岩石产生重力作用引起的应力状态, 称为自重应力。

(2) 现今构造应力: 由于各种内力和外力的作用, 地壳中现今仍存在着构造应力, 驱动着地壳的构造形变和构造运动。地震的产生就是现今构造应力的反映, 现今构造应力的

研究中地震机制分析是一项重要的手段，它的局限性在于地震区资料多，而非地震区资料缺乏；只能提供主应力方向资料，并不能获得绝对数值。除地震机制外，长期的缓慢变形，如地形变和断层蠕变等也可被用作现今地应力场的反演分析。

(3) 残余构造应力：岩体在形成过程中经受了建造阶段和构造形变阶段形成的原生应力状态，经过次生变化阶段，由于风化、卸荷而部分释放，但是还有一部分仍然保留在岩体中，称为残余应力。这里可分为两种情况，一种是边界约束未完全解除而保存的应力，另一种是内部约束造成的内应力。

岩体在地质建造和构造历史上形成的应力状态，在外力作用已经改变条件下，能够保存下来形成内应力，可以由黏弹性及弹塑性变形或应变能在内约束下储存来解释。岩体在高温高压条件下，矿物结晶和重结晶的温度压力不同，在外力移去后，后结晶的晶体格架可约束早时在温度较高、压力较低时结晶的或较柔软的矿物的应力释放。这就使很多结晶岩浆岩体和变质岩体保存较高的内应力。

岩层在褶皱和构造受压过程中，在一定条件下，即构造形变还不是十分强烈的条件下，出现黏弹性变形，经过很长时期的作用，由于构造运动变迁在外力移去后，变形逐渐恢复，但是过程缓慢，有相当一部分应力贮存在岩层中而不能一时释放出来。在进一步开挖的条件下还可释放出贮存的应变能。

2) 构造应力场地质力学分析

构造应力场地质力学分析的任务是根据岩体中构造变形的形迹，反推构造作用力的性质和方向。构造应力场分析是在构造体系分析的基础上进行的。首要的工作是寻找由于最大压应力作用而形成的构造形迹，它们的走向为构造线。与构造线有成生关系的构造形迹亦应加以综合考虑。对产状比较平缓的层状岩体，上述构造线在工程区不明显，则可以根据层面错动的逆向擦痕确定，其倾向方位即能代表最大构造压力的方向。扭性断裂面上根据其逆向错动或斜向错动也能确定最大构造压力的方向。在岩层没明显的褶皱或构造形变不太强烈的块状岩浆岩中，根据X型共轭断裂，考虑其错动方向和错列特征确定水平构造作用力的方位。这时断裂的交线为中间主应力轴，并由图1.1所示求出最大和最小主应力的方向。

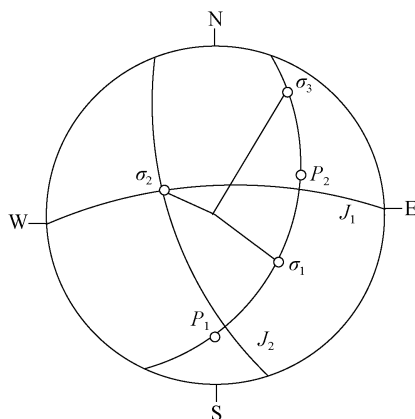


图 1.1 X 型共轭断裂的应力分析

P_1 、 P_2 为构造压力方向； σ_1 为最大主应力； σ_2 为中主应力； σ_3 为最小主应力； J_1 、 J_2 为节理方向

后期构造运动往往是沿原有断裂活动的, 所以为了确定后期的构造应力场, 要求对各组扭断裂多次活动的错动方向进行分析。走向滑动断层情况比较复杂, 往往根据它的滑动方向还不易准确确定最大主应力方向。因为这时最大主应力不一定和正反扭组合的交叉断裂的交角平分线重合, 但根据原来是平缓的压扭性断裂上再次活动的斜向错动迹向, 尚可大致确定水平构造力的方向。当地质体受到构造形变时, 在主构造应力场的基础上还会产生局部的和主应力场不一致的次级构造应力场。有时工程部位的岩体初始应力状态却主要受次级应力场的影响。典型的次级构造应力场和褶皱、断裂有关。

(1) 走向滑动断层被动盘的次一级应力场。如图 1.2a 所示, 当断层一盘的地块产生相对另一盘的运动时, 主动盘作用在断层上的法向力可以向被动盘传递, 而切向力只能传递相当于断层抗滑阻力的那一部分, 不能完全传递过去。因此, 在断层另一侧被动盘中, 构造作用力方向有所改变。一般来说, 被动盘中经断层传递过来的力和断层面法线间的夹角等于断层的内摩擦角。在断层带经过大距离错动, 产生断层泥条带, 强度降低到残余强度后, 抗滑阻力很小, 因此, 被动盘中作用力方向和断层法线夹角很小, 接近平行。在具有蠕变滑动的断层带也有类似的情况。上述被动盘的次级应力场中常伴生“入”字型构造, 出现与断层走向呈锐角相交的褶皱轴、剪切断裂或呈锐角相交的张性断裂等组合。

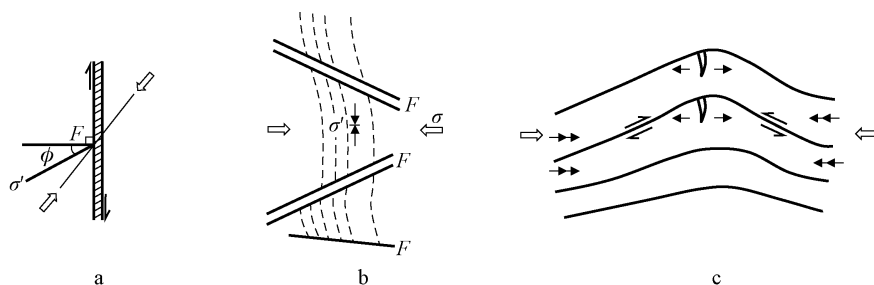


图 1.2 次级构造应力场

F 表示断层, σ 、 σ' 表示应力

(2) 横断层之间的次级应力场。当地层受横断层或斜向剪切断裂切割, 受推挤力作用产生错动时, 柔性地层错到和刚性地层接触的部位, 这时地层向侧面沿走向伸长受到约束, 相反有所缩短。地层中产生侧向压力, 并诱导出和主构造压力有较大夹角的次一级压力, 形成次级褶皱和次级构造线 (图 1.2b)。

(3) 侵入岩体周围的次级应力场。在深部物质上涌, 形成侵入岩体的过程中, 虽然同化部分上覆岩层, 但同时也对岩层起顶托作用, 从而产生和区域构造应力场不一致的局部应力场。由于这一应力场的作用, 常在围岩中产生局部的沿接触面的侵入挤压破碎带。

(4) 褶皱不同部位的次级应力场。岩层在褶皱过程中, 尽管区域构造应力场可能保持不变, 但在不同部位应力场有不同的变化。如图 1.2c 所示, 在褶皱初期, 地层内应力场分布比较均匀, 并和区域构造应力场一致。随着褶皱发育, 首先可能引起褶皱顶部产生和区域最大压应力平行的局部拉应力场。进一步褶皱, 层面滑动导致复杂的应力分布, 以及顶部的层面拉裂。当褶皱发展到紧逼褶皱阶段, 尽管地层的褶曲很复杂, 伴有很多范围不大的局部应力场, 但由于强烈塑性变形致使各部位在整体上挤压紧密, 而具有比较一致的应

力场。对于褶皱地层,除在背斜轴部出现局部拉应力场外,在褶皱的端部也可能出现次一级拉应力,和区域构造压力方向平行。当褶皱端部遇到刚度很大的断块,如岩浆岩体等轴向伸长受到约束,这时可产生局部的压应力场,和区域构造压力的方向垂直。

3) 初始地应力场量级的地质力学评价

构造应力场量级的资料较少,目前还很难根据地质资料作出比较准确的估计,只能大致在量级上作出定性的评价。在相当于 100~200m 上覆岩层条件下,初始地应力可分为三个量级:

①初始地应力场的水平应力超过 15MPa 的为高构造应力区,这时 $\sigma_H \geq 3\gamma H$,即水平应力大于三倍的上覆岩体自重(γ 为重度, H 为上覆岩体高度);②初始应力场的水平应力达 5~15MPa,为一般构造应力区,即 $\gamma H < \sigma_H < 3\gamma H$;③初始地应力场的水平应力低于 5MPa 的为低应力区,即 $\sigma_H < \gamma H$ 。

除地质构造背景外,在勘测期间根据钻孔出现饼状岩心也可估计初始地应力的量级。在我国西南西北地区几个出现饼状岩心的工程地区,地应力量测资料表明初始地应力场的最大主应力达 15~20MPa 以上,个别也有仅 10MPa (在灰岩中)。在平洞或导洞中,断层泥、断层破碎带或软弱夹层的挤入,节理的错动,以及洞壁、洞底边角或拱顶、拱脚等不同部位岩石剥裂或剥落等现象,也表示初始地应力较高。

4) 水平和铅直应力的比值估价

水平和铅直应力的比值很重要,是设计中非常关键的资料。这个问题的分析要点应放在自重应力场、残余应力和活动构造应力场的相对幅度评价上。首先,初始水平应力和铅垂应力的比值可按照许多实测的资料和设计分析的需要分为五级:① $\lambda < 1.0$; ② $\lambda < 1.0$; ③ $\lambda \approx 1.0$; ④ $\lambda > 1.0$; ⑤ $\lambda \gg 1.0$ 。在单纯自重应力的作用下,若地面平整初始地应力场的应力基本上符合 $\lambda \ll 1.0$,或在埋深较大,岩性较软弱的条件下 $\lambda < 1.0$ 。存在残余应力的岩体中 $\lambda \approx 1.0$ 或 $\lambda > 1.0$,对有些残余应力条件比较好的岩体,在浅埋的情况下可能达到 $\lambda \gg 1.0$ 。在有活动水平构造力的作用下, $\lambda > 1.0$,在浅埋的条件下 $\lambda \gg 1.0$ 。由于地形影响,即使没有残余应力或构造应力的作用,也可能出现 $\lambda \approx 1.0$ 或 $\lambda > 1.0$ 的情况,然而这可以根据地形和埋深进行分析。

1.2.6 岩体结构面及其力学属性

1) 结构面及其成因类型

结构面是岩体内具有一定方向、延展较大、厚度较小的二维面状地质界面,包括物质的分界面及结构的不连续面,如层理、层面、节理、断层等。结构面是在岩体形成、演化过程中产生和发展而来的(表 1.2)。在岩体建造、形变和次生蜕变过程中,岩体内不断形成结构面,它们的特性还在不断变化。不同成因的地质结构面往往在产状、分布及特性上有所不同,因而在岩体变形破坏过程中作用也不同。

(1) 沉积结构面:沉积结构面是沉积和岩石成岩过程中形成的,包括层理、层面、层间错动面、软弱夹层,以及沉积间断面和不整合面。层理是岩石成层的不均一物质分界面,在构造或风化作用下才分开成为层面。当沉积物质逐次分层沉积,且物质差异较大时,则成岩后保留不连续界面,即成为层面。层面一般结合较好。岩层的褶皱作用使层面产生错

动, 结合破坏, 形成层间错动面。软弱夹层是沉积结构面中常遇到的工程地质问题。尤其是经过构造和次生作用往往形成泥化夹层, 对岩体稳定性影响更加显著。原生软弱夹层常见的有碎屑岩中的页岩、碳质页岩、黏土岩夹层; 浅变质类复理石建造中板岩、页岩夹层; 碳酸岩系中钙质页岩、泥质灰岩夹层等。沉积间断及不整合面对工程而言是大型软弱结构面, 但不是经常能遇到的。不整合面一般波状起伏, 结合不良, 常是地下水通道。

(2) 火成结构面: 火成结构面是岩浆侵入、喷溢、冷凝所形成的结构面, 包括岩浆岩与围岩的接触面、流线、流层和原生冷凝节理等。侵入岩体与围岩的接触面有不同的特征, 有的呈热力变质接触, 胶结良好; 有的则呈蚀变带, 结合松软, 成为软弱结构面。在热力接触带附近的围岩中有时也发育挤压破裂结构面, 岩石比较破碎。流线、流层在一般情况胶合良好, 仅在风化带中有所剥开。火成岩系中在多次岩流间, 往往夹有凝灰岩夹层或古风化夹层, 成为软弱结构面, 影响岩体的稳定。侵入岩体中在与围岩接触面平行的方向上冷凝节理发育。在火成岩及浅成侵入岩体中往往形成陡立的节理, 构成柱状结构体。

(3) 变质结构面: 变质结构面是区域变质作用所形成的结构面, 如片理、板理、剥理及其他片麻状结构, 以及由于原岩物质组成不均一或变形过程流动分异造成的软弱夹层, 如云母片岩、绿泥石片岩、滑石片岩等。

(4) 构造结构面: 构造结构面是受构造应力作用在岩体中所产生的破裂面或破碎带, 包括节理、断层及层间错动面等统称为构造结构面。它们的工程地质性质与力学成因、构造规模、活动期次及次生变化有密切关系, 而其产状、分布主要取决于构造应力场条件。劈理是在岩层褶皱变形及断裂错动中产生的密集剪切破裂面。节理的力学成因或为平面 X 型剪切面, 或为侧面的 X 型剪切面, 少数张性裂隙追踪 X 型节理而发育。由于节理分布较密, 几组节理的组合往往影响到岩体的局部稳定性。断层为规模较大的构造结构面, 有显著位移, 并形成构造岩。如前所述, 断层可分为冲断层 (包括仰冲、俯冲、逆掩断层)、撕裂断层及横断层等。断层面的特征及破碎带物质状态主要取决于断层的力学成因及岩层岩性。在工程范围内断层大都对岩体稳定有一定影响, 其中有些直接威胁到工程的安全, 需进行处理。原生软弱夹层经构造运动影响而产生层间错动面, 往往形成破碎泥化夹层。它们的特点是沿薄层软弱夹层或其顶部发育, 受错动成为碎屑及鳞片, 间夹泥质物或是成为角砾状碎屑含于塑性夹泥中。构造运动作用除了促使夹层错动成破碎泥化夹层外, 又可将夹层错断, 使之成为不连贯的透镜体, 对岩体稳定有利。

(5) 次生结构面: 由于岩体受卸荷、风化、地下水等次生作用所形成的结构面为次生结构面, 如卸荷裂隙、风化裂隙、风化夹层、泥化夹层、次生夹泥层等。卸荷裂隙是岩体在地表, 尤其是受深切河谷影响地带, 构造应力释放及调整所形成的破裂。它可以进一步受重力、风化及岸坡物理地质作用的影响而张开或位移。在块状脆性坚硬岩体中较为常见。风化裂隙一般沿原结构面发育, 且限于表层风化带内。但含易风化矿物的岩层所形成的风化夹层则可能延伸至岩体较深部位, 如断层风化、岩脉风化、夹层风化等。泥化夹层及次生夹泥层主要是在地下水作用下形成的。泥化作用在黏土岩、黏土页岩、泥质板岩、泥质灰岩等软弱夹层的顶部较为发育。其上覆砂岩或灰岩岩性坚硬, 沿层面往往有过错动, 地下水循环集中, 以致形成泥化夹层。次生夹泥可沿层面、节理、断层形成, 在两岸地下水活动带内, 尤其是河床深槽两侧常见, 主要是地下水所携细颗粒泥质物, 重新沉积、充填