

第四届全国岩土与工程学术大会 论文集

中国岩石力学与工程学会
中国建筑学会工程勘察分会
中国土木工程学会土力学及岩土工程分会
中国地质学会工程地质专业委员会
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司
浙江大学建筑工程学院

编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

第四届全国岩土与工程学术大会 论文集

中国岩石力学与工程学会
中国建筑学会工程勘察分会
中国土木工程学会土力学及岩土工程分会
中国地质学会工程地质专业委员会 编
中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司
浙江大学建筑工程学院



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书收录了国内最新岩土工程方面的论文 100 篇, 分别涉及岩土体工程特性、地基与基础工程、边坡工程、地下工程、岩土工程新技术新方法、水文地质与环境工程、工程灾害分析与处理等 7 个方面的内容。

本书可供从事岩土工程专业及相关专业人员参考借鉴。

图书在版编目 (C I P) 数据

第四届全国岩土与工程学术大会论文集 / 中国岩石力学与工程学会等编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-5170-1313-6

I. ①第… II. ①中… III. ①岩土工程—学术会议—文集 IV. ①TU4-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第248226号

书 名	第四届全国岩土与工程学术大会论文集
作 者	中国岩石力学与工程学会 中国建筑学会工程勘察分会 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 中国地质学会工程地质专业委员会 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江大学建筑工程学院
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 (发行部)
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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 48.5印张 1152千字 2插页
版 次	2013年10月第1版 2013年10月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	128.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

组织机构名单

大会顾问委员会

主席：孙 钧 王思敬

委员：（按姓氏笔画排序）

王梦恕	卢耀如	朱维申	宋振骐	张 雁	张苏民
李广信	李焯芬	杨志法	杨林德	陈祖煜	周 镜
周丰峻	郑颖人	顾宝和	黄鼎成	黄熙龄	程良奎
蒋国澄	葛修润	谢和平	魏汝龙		

大会学术委员会

主席：钱七虎 龚晓南

副主席：尚岳全 杜时贵 黄润秋 白世伟 余诗刚

委员：（按姓氏笔画排序）

于 斌	丰明海	化建新	王卫东	王中平	王长科
王兰民	王明洋	王金华	王 清	叶阳升	司富安
刘汉龙	刘松玉	刘厚健	朱合华	郭爱清	孙红悦
何满潮	余诗刚	吴世勇	吴永红	宋二祥	宋胜武
张建民	张 炜	张鸿儒	张超然	李 宁	李术才
李永盛	李 晓	李海波	李耀刚	杨 强	杨书涛
杨光华	杨更社	杨春和	汪 稔	沈小克	沈 俊
陈云敏	陈正汉	陈祖煜	周 平	单 昶	武 威
郑 刚	郑炳旭	金丰年	侯伟生	姚仰平	施 斌
赵阳升	赵明华	唐春安	唐辉明	徐张建	殷跃平
袁建新	袁 亮	郭熙灵	顾国荣	顾金才	康红普
康景文	梁金国	黄宏伟	黄茂松	彭建兵	温彦锋
董忠级	蒋树屏	谢永利	缪协兴	蔡正银	蔡美峰
蔡袁强	滕延京	潘一山	戴一鸣		

秘书长：周才全

副秘书长：方祖烈 徐 前 张建红 宋玉环

大会组织委员会

主 席：张春生 冯夏庭

副 主 席：吴关叶 侯 靖 王立忠 张建民 武 威 伍法权
刘大安 吴德兴 项小珍 朱福尧 单光炎

委 员：(按姓氏笔画排序)

化建新	方祖烈	王中平	包旭范	丘建金	石振明
刘云祯	刘金光	刘新荣	祁生文	许 强	闫德刚
吴江斌	吴志坚	宋玉环	张永双	张建红	张海东
李广诚	李光伟	李丽慧	沈 扬	陆文琳	周才全
周宏磊	尚彦军	罗战友	郑建国	胡黎明	原振华
唐祥达	徐 前	徐杨青	贾永刚	钱建固	崔永圣
梅国雄	黄理兴	彭土标	雷华阳	裴向军	

论文集编辑委员会

主 任：龚晓南 尚岳全

委 员：陈剑平 徐日庆 孙红月 方火琅 杨建辉 吴关叶
侯 靖 罗战友 周才全 程 平 吕 庆 赵 宇
孙红磊 于 洋 范立峰 杜丽丽 贾义鹏 支墨墨
陈晓芬

前言

Preface

当前工程建设无论在规模上还是环境条件复杂程度上都是空前的。大多数工程建设已经从场地选择转变到主要考虑工程布局要求,不仅需要实现工程自身的稳定与变形控制,而且还需要实现建设区域的环境安全控制。深基坑开挖、大跨桥梁建设、城市地下空间开发、大型水电工程建设、不良地质条件区域交通系统构建、地下深层矿产资源开发、跨区域能源资源配送等,给岩土与工程界提出了更高的要求。继前三届全国岩土与工程学术大会之后,第四届全国岩土与工程学术大会于2013年11月在浙江省杭州市召开,此次会议将深入探讨近年来岩土工程创新和可持续发展问题,充分交流我国岩土与工程领域取得的成绩,全面推动岩土与工程领域的科技进步。

第四届全国岩土与工程学术大会自2012年9月发出1号通知后,得到了全国岩土与工程界同行的积极响应。共收到论文360余篇。大会学术委员会与《岩石力学与工程学报》编辑部、《岩土力学》编辑部共同组织专家评审,选出部分论文载入《岩石力学与工程学报》与《岩土力学》正刊和增刊,其余论文由大会学术委员会组织专家评审选出100篇汇编成集。

在本论文集的编辑与出版过程中,得到了会议主办单位中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和中国地质学会工程地质专业委员会以及会议承办单位中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司、浙江大学建筑工程学院等单位的大力支持与帮助,有关专家为论文的评审付出了辛勤劳动,中国水利水电出版社为论文集的出版作了认真细致的编辑工作,正是大家的精诚合作和共同努力,才使论文集得以顺利出版。在此一并衷心感谢!

尽管我们对入选论文作了细致的审编,但由于时间短、工作量大,不能精雕细刻,疏漏之处在所难免,请读者谅解。

编者

2013年10月

目 录

Contents

前言

岩土体工程特性

浅层脆性断裂结构面发育的物理规律探讨	程万强 单治钢 (3)
滩坑水电站火山集块岩胶结物工程地质特性及处理	林 健 王美玲 (8)
大足宝顶山摩崖造像岩体表层风化特征及风化深度研究	李宏松 (16)
汶川地震后魏家沟松散土力学性质研究	鲁晓兵 李 驰 朱文会 张旭辉 (24)
粗粒土土样配备对物理力学性能影响分析	赵云川 (30)
岩体复合结构面强度参数取值的数值模拟研究	程东幸 刘大安 姜升萍 (36)
膨胀土干缩裂隙网络定量分析方法及量度指标研究	唐朝生 王德银 刘 春 施 斌 (44)
西湖疏浚泥炭质土的物理特性	张 珏 赵朝发 林锦涛 杨仲轩 (52)
桂林红黏工程特性及其路基施工技术控制	陈学军 齐运来 卢丽霞 肖桂元 (60)
基于 UDEC 的丹巴片岩各向异性数值模拟研究	周 勇 褚卫江 张 伟 刘 宁 (65)
抽水蓄能电站石渣堆石料压缩性能试验研究	赵晓菊 齐俊修 郑海伦 (76)
某低中放废物处置回填材料性能测试	许肖锋 张虎元 袁革新 肖礼华 郑杨琳 (86)
模拟月壤的力学特性试验研究	钟世英 黄 博 凌道盛 杨建中 (95)

地基与基础工程

渠式切割水泥土连续墙 (TRD) 的工程应用和实例分析	袁 静 刘兴旺 何一飞 (105)
地下连续墙变形特性及对策研究综述	张世民 袁腾坤 李登辉 王吉涛 (114)
双排桩-水泥土墙复合基坑支护方法机理数值模拟研究	贾敏才 张志勇 (121)
预应力管桩桩端受力分析	那云龙 (127)
双排桩支护结构优化设计及工程应用	王大伟 汤 芃 冯莉梅 (132)
不同直径不同长度素混凝土组合桩复合地基试验研究	章学良 颜光辉 杨致远 贾 鹏 余超贵 康景文 (137)
圆形煤场大面积堆载下桩侧负摩阻力研究	梁冠军 孙卫春 (146)

双向螺旋挤土灌注桩极限承载力试验与理论计算研究	罗利锐 刘 钟 杨 松 郭 刚	(153)
刚性桩复合地基桩、土承载性状与厚径比相关关系研究		
.....	佟建兴 闫明礼 孙训海 王明山 罗鹏飞	(160)
软土地基上临时围堰填筑期稳定性分析		季家俊 (169)
软土城市轨道交通基坑开挖引起的地面沉降估算及分析	吴 勇 黄江华	(176)
采用不同本构模型对深基坑的数值模拟	侯 伟 尹宏磊 韩 煊	(188)
基于 ABAQUS 对重力坝坝基岩体计算模型选择的探讨	徐金英 李德玉 郭胜山	(198)
深基坑三维应力场和渗流场耦合分析与数值模拟	梁志松 陈晓平	(205)
长径比对离心模型试验中粒径效应的影响研究	柳 飞 吴炼石	(213)
浅谈某工程大基坑围护方案设计及施工	吴朝峰 戴胜生 章胜南	(220)
武汉某逆作法基坑的设计与实践		陈 畅 (225)
基于变形控制的陈家祠广场地下空间基坑工程支护方案比选与设计	周 森 潘 健	(235)

边 坡 工 程

滑坡排水研究现状与充气截排水方法可行性分析	杜丽丽 尚岳全	(247)
越南某水电站开关站土质高边坡滑坡治理	熊平华 田迎春 陈建林	(254)
深圳某超一级建筑边坡治理工程	付文光 赵苏庆 张家铭 张俊峰	(260)
GY 型一次注浆后张预应力锚杆在上三线边坡防护中的应用	王 勇 王桂军 李周峰	(268)
燕子崖砂石加工系统边坡危险岩体的治理	陈义军 王瑞贵 吕国轩 任金明	(275)
清水河格里桥电站 Dr2 危岩体处理与大坝结构协调布置研究		
.....	徐 林 罗洪波 肖志愿 阮祥明	(281)
重庆三处滑坡工后锚索承载性能试验对比分析	赖国泉 张俊德 张红利	(287)
隧道穿越大坪滑坡的稳定性与抗滑桩优化设计分析		
.....	杜升涛 马惠民 张红利 吴红刚 张良峰	(297)
基于可靠性指标的边坡单元失稳概率分析	刘振坤 付海军 谢谟文 刘翔宇	(305)
库水位上升对万州中学滑坡稳定性的影响		张卓燕 (311)
模糊信息检索法在滑坡预报中的应用	方世跃 杨 军	(318)
基于 SMP 破坏准则的边坡稳定性分析	李会明 朱建明	(324)
滑带土中黏粒含量及含水量的变化对其强度及稳定性影响的试验研究		
.....	彭 鹏 单冶钢 董育烦 陈长河 付钦祯	(331)

地 下 工 程

锦屏二级引水隧洞大型原位试验研究 I—试验方案		
.....	张春生 褚卫江 侯 靖 陈祥荣 吴旭敏 刘 宁	(341)

龙开口水电站胶带机隧洞设计与施工

- 陈义军 任金明 吕国轩 董宝顺 赵凯 吴迪 (354)
- 锦屏二级水电站地下厂房岩壁吊车梁开挖优化 方丹 万祥兵 (360)
- 软弱破碎围岩调压竖井组合柔性支护措施研究
- 胡炜 陈新 杨兴国 徐富刚 周家文 (365)
- 锚杆支护在岩爆防治中的应用 李周峰 (373)
- 贵阳北京东路1号隧道施工监控量测分析 路家伟 胡鹏 蔡建华 陈俊栋 (378)
- 复杂岩溶隧道地质灾害的预报及处治——以龙潭特长隧道为例..... 韩行瑞 叶志华 陈宏峰 (383)
- 喀斯特岩体结构的CT识别以及地面塌陷与隧道突水诊断预报预警——以京珠粤北高速公路洋
- 碰隧道为例..... 黎华清 甘伏平 卢呈杰 喻立平 甘文华 (392)
- 复杂地质条件下的公路隧道综合超前地质预报技术研究 王春 张成良 赵晓霞 (402)
- 基于地下水位控制的隧道渗漏变形分析..... 张世华 熊晓亮 张文君 (409)
- 地应力分期释放对地下工程围岩稳定和支护结构受力影响的研究 熊平华 (416)
- 基于能量释放率的地下工程稳定性研究..... 张成良 王春 杨绪祥 (421)
- 层间错动带对地下洞室围岩稳定影响研究..... 李良权 方丹 钱军 黄可 吴家耀 (430)
- 地铁盾构盾尾管片上浮数值分析 蔡岳良 赵宇 薛勇利 (438)
- 基坑下部地铁隧道变形数值模拟 刘杰 袁博 陈杰 王庆浩 张波 (445)
- 综合物探方法在南湖路湘江隧道勘察中的应用
- 彭柏兴 刘颖炯 宣跃仁 苏红葵 王会云 段坚堤 (454)

岩土工程新技术新方法

- 岩土工程作精细探查的新技术——陆地声纳法 钟世航 孙宏志 王荣 王泽峰 (463)
- 一种隧道(洞)施工期快速智能化分析与评价新方法
- 李宁 刘波 刘乃飞 安晓凡 伯洋洋 (475)
- DCP型多重防腐锚杆的研制及应用 项小珍 王勇 周书明 (483)
- 同步辐射光源地基微振动测试及工程实例分析
- 贾辉 陈昌彦 张辉 白朝旭 孙增伟 (490)
- 地下厂房施工中氡调查及降氡措施初探..... 王丽峰 刘世建 江长森 康银红 (497)
- 多功能声波检测仪器的设计 曾克 张晓飞 王营超 (502)
- 浅析密度计法颗粒分析试验读数时间 刘学芹 (507)
- SDDC法在博斯腾湖东岸新近堆积黄土地基处理中的应用
- 赵楠 许肖锋 吴润江 闫长红 肖礼华 (511)
- 基于无网格流形MSIM方法的虚拟裂纹闭合法 苏锋 蔡永昌 (516)
- 基于三剪强度准则的朗肯土压力计算 吕志 朱建明 郑建岳 (525)

论稳定浆液在水平缝中的扩散半径	李念军	贺修安	李瑜霞	(530)
单排管冻结温度场经典解析解对比分析	龚琛杰	丁文其		(536)
振冲碎石桩处理新近沉积土试验研究	杨生彬	刘志伟		(545)

水文地质与环境工程

碎石土防渗性能试验研究	李瑜霞	齐俊修	孙莉萍	贺修安	(553)
电阻率法监测地下水作用下滨海盐渍土水盐运移试验研究	连胜利	单红仙	贾永刚	张 顺	付腾飞 (560)
基于原位观测的胶州湾海底沉积物侵蚀再悬浮动力机制研究	郭腾飞	单红仙	陈小英	曹 柯	贾永刚 刘晓磊 郭 磊 (568)
泥石流机理与运动特征研究现状分析	魏振磊	张文君	潘 攀	孙红月	张世华 (576)
川西甘孜地区简槽沟高频泥石流发育特征及其危害性研究	宋 志	铁永波	巴仁基	刘宇杰	符 浩 (583)
基于逻辑回归模型和确定性系数 CF 的崩滑流危险性区划	刘明学	陈 祥			杨姗姗 (595)
泥石流防治中的治水技术	潘 攀	张文君	魏振磊	孙红月	熊晓亮 (602)
群体工程活动对地铁隧道的影响分析					梁振宁 (610)
工程建设场地形成与土方调配实现	康景文	曾德清	唐建东	张 芬	(616)
北京东部区域地面沉降对城市规划与建设的影响研究	罗文林	沈小克	周宏磊	韩 煊	侯 伟 王军辉 (623)
西北某区低中放废物处置场场址特征研究进展	袁革新	赵振华	陈剑杰	闫长红	白友良 许肖锋 (631)
苏北故黄河泛滥区的工程地质分区与评价					朱志锋 (639)
基于 DEM 雅鲁藏布江流域的构造地貌分析 ...	李利波	王敬勇	彭 鹏	付钦祯	张玉兰 (645)

工程灾害分析与处理

逆作法深基坑立柱桩隆起特性分析					许 杰 (657)
某桩锚支护基坑工程险情处理及原因分析	付文光	刘仕全			罗小满 (665)
某基坑边住宅小区地陷事故的技术调查分析	付文光	刘仕全			卓志飞 (674)
PHC 管桩送桩口破坏分析					吴 强 (686)
岩溶地区的基础处理论述	林金洪	周陈静			刘振强 (692)
风机地基不良地质作用及处理措施	李红有	吴 勇	王 震		兰艇雁 (699)
天津滨海新区某管桩质量事故处理	郝金山	王士国			孟令智 (709)
真空预压法处理上海软基若干问题研究	唐海峰	曾德清	彭永辉	康旭辉	谢森根 唐建东 (714)

大面积真空预压对周边环境影响分析	汤永良 (722)
公路桥头跳车现象分析	吴敏捷 范立峰 (728)
桥头基础动力夯实影响的 FLAC-PFC 耦合分析	徐清清 马宗源 党发宁 (737)
未按设计施工成因病险小型水库工程典型实例分析与评价	李宏恩 李 铮 何勇军 (745)
地铁矿山法隧道衬砌的病害类型及其探地雷达图像特征	余海忠 陈 鸿 欧阳宇峰 (752)
交叠隧道下穿既有建筑物的风险评估方法研究及工程应用	王 法 韩 煊 (759)

岩土体工程特性

浅层脆性断裂结构面发育的物理规律探讨

程万强^{1,2} 单冶钢¹

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 310014;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 断裂结构面的几何参数是水电工程中坝基和边坡稳定性评价的重要参数。通过对大量浅层脆性断层产状几何参数的统计分析认为浅层脆性断裂面在空间上物理规律明显。总结和归纳了断层断距 (D)、沿走向延伸长度 (L)、断层切割深度 (H) 与断层岩厚度之间的定量关系。结论有助于检验获得的断层面三维数据准确性, 同时为断裂面三维产状预测提供理论依据。在断层深部数据无法获取时, 可利用断层的地表几何参数近似推断深部参数, 提高稳定性评价的准确性。

关键词: 脆性断裂 深部产状 结构面

1 引言

人类工程活动的直接作用范围已扩展至地下 5km 范围内。该构造层以不同规模的脆性断裂活动为特征^[1]。这些浅层脆性断裂面相对于工程结构的产状方位、延伸规模等几何参数, 在很大程度上决定着能否存在不稳定条件和过度变形的发展^[2]。断裂面几何形态的力学效应作为一个科学问题受到工程地质学家的高度重视, 如节理岩体的载荷能力与节理倾角呈正相关^[3], 而隧洞开挖中底板断层的倾角越缓, 则越容易造成底板突水^[4], 断裂的切割深度和连通情况则直接影响坝基和边坡的稳定性^[5]。

由于断层深部几何特征的不可直接观测性, 而借以揭示断裂结构面深部形态的地球物理和钻探成本过高不易普及, 借助断层的地表几何特征间接推断断层深部情况具有重要意义。地质和地球物理资料表明, 发育于地壳浅层的脆性断裂是受相邻岩层的岩性、弹性模量、厚度、所处构造位置、局部变形应力场方向和变形温压条件等控制的复杂有序的三维地质体^[6]。探索断层各几何要素的耦合关系是一个既充满挑战又十分必要的课题。地质学家曾尝试将断裂作为地壳内普通物理现象进行定量化, 试图建立断层几何参数(如倾角、长度、宽度、断距等)之间的函数关系, 并取得了一些初步成果。本文利用已有浅层陆壳不同构造带的脆性断裂几何数据, 重点讨论沿走向长度 (L)、最大断距 (D)、断层核部宽度 (T) 和断层切割深度 (H) 几个几何参数之间的数值关系, 在此基础上探讨浅层地壳断裂结构面发育的物理规律^[7-11]。

2 断裂结构面物理规律

本文主要讨论的断裂面定量参数为断裂面地表沿走向的延伸长度 (L)、断裂面地表

可见最大断距 (D)、断层核部或断层岩宽度 (T) 和断裂面向下切割深度 (H)。数据主要来源于已经发表的文献, 部分数据为本单位工程地质勘测中获取。

2.1 最大断距 (D) 与沿走向长度 (L) 之间的关系

断层的 $D-L$ 关系是研究最为广泛, 也最为深入的一个问题。一般认为脆性断层是由变形岩体中微观裂隙扩展合并而来, 自中心向末梢位移距离逐渐减小直至消失。对于同一断层, 在水平面上断层尾端的位移距离肯定比断层中心要小^[12]。为使 $D-L$ 关系具有可

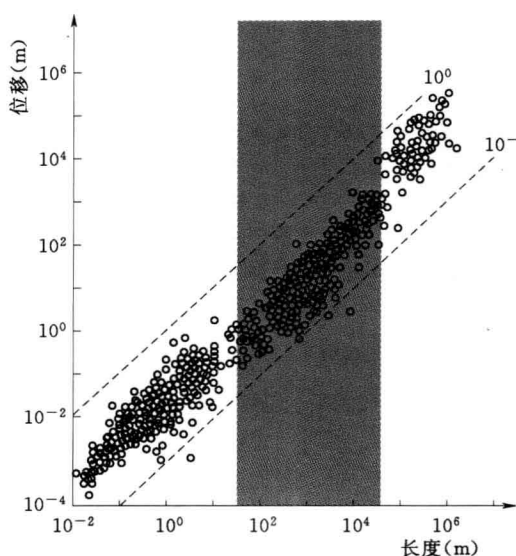


图1 脆性断层断距/长度统计 (阴影区为工程地质重点关注断层规模)

比性, 一般规定 D 值取断层中部最大位移距离。 L 则为相应断层沿走向长度。Schultz 等^[10]统计了断层、节理、脉体、火山岩墙和剪切变形带等各种构造不连续面的位移—长度比数据, 认为 D 值总体与 L 值呈正比关系, 比值系数 k 一般介于 $0.1 \sim 0.01$, 其大小与岩石强度和应力大小有关。相比正断层, 走滑断层和逆断层的 $D-L$ 指数线性关系更明显^[10]。Torabi 等^[8]统计了全球不同构造环境、不同规模断层的断层长度、断距等数据, 得到了类似的认识, 并认为 $D=f(L)$ 与岩性、构造背景没有明显影响。断层从最初的裂隙到成熟的地质断层, 不管它的尺寸、类型和岩性, 它们的 D/L 比从 10^{-5} 增至 100。我们对前人文献中的浅层脆性断层 $D-L$ 数据进行了汇总分析^[7-11, 13], 结果见图 1。图 1 显示了

与 Schultz 等^[10]结论相似的规律。 D/L 比值随断层规模具有增大趋势。图 1 还可看出自然界断层长度并非均匀分布, 而是呈现一定阶梯状, 一般可分为厘米—米级, 百米级, 公里级。对于小型裂隙, 有 $D \propto L^{0.5}$ 。而当断层达到公里级时, 有 $D \propto L$ 。上述现象与断层的递进连通生长模式和断层分段性有关。据此得到 $D=f(X)$ 一般表达式: $D_{\max} = k \cdot L^n$, 一般有 $0.01 \leq n \leq 1.0$ 。

2.2 断层岩的厚度 (T) 与最大位移量 (D) 的关系

野外断层面往往是包含复杂结构的带状强应变层^[11]。自内而外包含断层核 (断层岩)、断层岩两侧的断层面、断夹石和断层相关破碎带^[14]。断层形成初期, 断层带在平面和剖面上均呈不连续的裂隙存在, 在持续应力作用下断层面贯通为一条不规则断面^[15, 16]。随着断层的发展, 断层面的不规则性受到改造, 而且由断层面夹的透镜体被进一步磨碎, 形成断层泥。所以断层岩的厚度和结构与断层的活动情况 (位移量) 密切相关^[14, 17], 一般认为断距越大, 则断层岩厚度越大^[18, 19], 其比值关系则与围岩的产状、岩性、流变性、断层岩的应变硬化以及断层的几何形态和分段情况有关^[20, 21], 受断层几何形态和分段情况控制尤为明显^[14]。Hull 等^[19]认为浅层脆性断层核部厚度与位移量之间基本呈线性相关, 有 $D=63T$, 但认为 D/T 值有随断层发育过程变小的趋势, 在糜棱岩带中 D/T 比

值甚至接近 2。图 2 是统计的不同地区、不同规模、不同性质断层的 $T-D$ 关系。也可看出 $D-T$ 之间有正相关性。总体随着断层位移的增加, T/D 值有减小的趋势, 与 Hull 等结论一致。根据图 2 同样可以得到 $T=k' \cdot D^n$, $0.01 \leq k \leq 1.0$, n 趋近于 1。根据经验公式, 可以根据断层泥的厚度, 结合围岩性质推断断层的位移量。

2.3 断层走向长度 (L) 与垂向切割深度 (H) 关系

断裂切割深度是岩体稳定性评价的重要参数之一。但由于断层深部数据无法直接获得, 只能通过物探和钻探等勘探手段获得, 数据收集受到明显制约, 因此研究程度明显不如断层平面物理参数。

金属矿脉往往充填于断裂空隙中。因此断裂的切割深度是计算矿床储量的必要参数。一般认为矿脉最有可能的深度在数值上等于或大于该矿脉沿走向长度的 $1/2$ 。即中小规模裂隙的 H/L 值约为 0.5。石油勘探中利用高精度浅层反射地震剖面获得了部分公里级断层深度/长度比, 其值介于 $0.14 \sim 0.25$ ^[12, 22]。而室内脆性小标本物理模拟得到的裂隙切割深度与延伸长度明显正相关, 其经验公式为 $H=0.24L+0.3\text{cm}$, $r=0.83$ ^[23]。根据上述 3 种类型断层的 H/L 比值可以看出随着断裂规模的增大, H/L 之比具有逐渐减小的趋势。上述现象同样可用断层的分段性解释。但由于目前收集到的数据有限, 详细的数值关系和回归方程仍有待下一步工作。

3 讨论

脆性断裂作为上地壳的一种普遍物理现象广泛存在。定量研究这些结构面几何形态的普遍规律是当前岩体力学和工程地质研究中的紧迫任务之一。这种定量化为研究断裂长度和最大断距、断层带厚度和断距关系、断层平面延伸与垂向深度之间的共同属性提供了依据。从大量统计数据来看, 断裂结构面的上述几何参数之间存在着明显的规律性, 证明了地壳中断裂网络发育存在着可以用数理公式表达的普遍规律。这些方程式为预测岩体深部结构面的几何规律提供了可能性, 从而减少不必要的花费, 同时也为三维地质建模提供重要依据。

对断层面几何参数的统计显示断层断距 (D) 和断层长度 (L)、断层断距 (D) 与断层岩厚度 (T)、断层长度 (L) 与切割深度 (H) 之间存在着相似的幂律相关函数关系。3 对参数之间均存在着正相关性, 其函数关系在一定范围内趋于稳定。且函数关系与断层所处地层、构造带位置等无关, 显示方程式具有普遍适用性。

自然界中的断层规模相差迥异, 小者为厘米级, 而大者可达几十公里甚至上百公里。无论从哪种规模的断层得出的函数关系如果无限推广到其他规模断层中显然是不合适的。统计数据显示, 自然界的断层规模绝非连续的随机分布, 而是呈现一定区段性^[8]。图 1 清楚的显示断层规模的发育可以划分为 3 段, 厘米至几十米级小断层遵循相似的规律, 几百

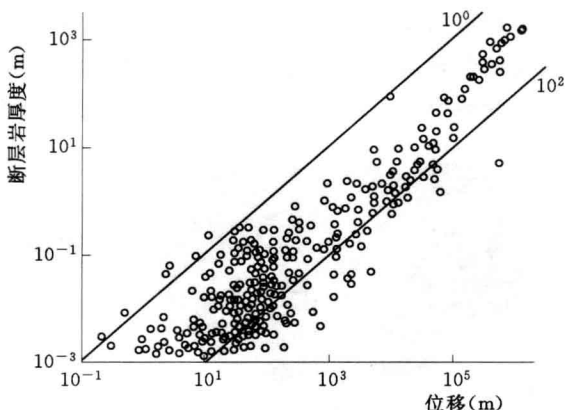


图 2 断层岩厚度/断层位移统计

米至公里级断层物理特征上与第一阶段略有区别，而几十公里以上的断层又表现为区别于前两者的物理属性。断层长度的不连续分布显然与其递进式扩展模式和分段性有关。遗憾的是，受研究程度限制，上述分段性产生的物理规律仍无法精确的表述。

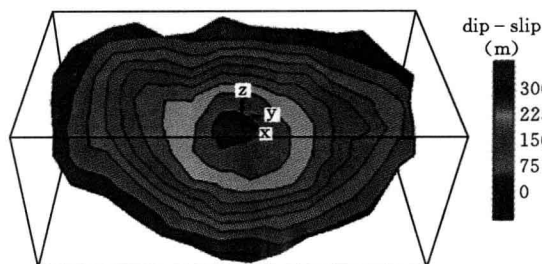


图3 裂隙岩体中脆性断裂发育的数值模型^[24]

还需要指出的是，断层面实际上是以断裂中心点为最大位移点，向断层面四周边缘逐渐减弱直至消失的似椭圆状面状体（见图3），其在形成之初可能是隐伏的，即断层的最大断距和沿走向最大长度可能并非地表所示，而可能在更深处。受剥蚀程度影响，断层断距和沿走向长度等物理量存在变化，且这种变化并非线性，而可能是抛物线型。这种

情况下断裂面的物理规律更不易从地表情况判断。加之在大多数露头不好的地方准确确定断层的长度和断距也并非易事。精确定义地壳内断层面发育的物理规律仍任重道远。

4 结论

(1) 浅层脆性断裂的断距 (D)、沿走向延伸长度 (L)、断层核部厚度 (T) 和垂向切割深度 (H) 之间存在明显正相关，其一般函数表达式可概括为 $D_{\max} = k \cdot L^n$, $T = k' \cdot D_{\max}^n$, $H = k \cdot L$ 。上述公式与断层围岩岩性和断层所处构造位置无关，但不同规模断层参数取值存在差异。

(2) 脆性断层面几何参数之间的数学规律说明浅层地壳断层面断裂发育的物理学普遍意义。为断层面三维定量化提供了保障和依据。

参 考 文 献

- [1] MATTAUER M. 地壳变形 [M]. 孙坦, 等译. 北京: 地质出版社, 1984.
- [2] 孙广忠. 岩体结构力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [3] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟, 等. 节理密度对围岩变形及破坏影响的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (11): 1737-1741.
- [4] 卜万奎, 茅献彪. 断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, (02): 386-394.
- [5] 周瑞光, 成彬芳, 张向东, 等. 三组结构面状态下不同产状结构面的力学效应研究 [J]. 工程地质学报, 1997, 5 (4): 318-322.
- [6] 庄培仁. 断裂构造研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [7] ROCHE V, Homberg C, Rocher M. Architecture and growth of normal fault zones in multilayer systems: A 3D field analysis in the South-Eastern Basin, France [J]. Journal of Structural Geology, 2012, 37: 19-35.
- [8] TORABI A, BERG S S. Scaling of fault attributes: A review [J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28 (8): 1444-1460.
- [9] DAWERS N H, ANDERS M H. Displacement-length scaling and fault linkage [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17 (5): 607-614.