

中日合作项目

水压致裂裂缝的形成 和扩展研究

中国地震局地壳应力研究所
日本电力中央研究所

地震出版社

PDG

序

“水压致裂裂缝的形成和扩展研究”是中国地震局地壳应力研究所和日本电力中央研究所自 1991 年完成“中日合作 AE 法与水压致裂法的比较研究”以来的又一项合作研究计划。水压致裂已被用于岩石应力测量和制造人工热干岩水库。在油气田开发和核废料的地质储存中水压致裂也得到广泛应用。有效地应用水压致裂需要弄清裂缝的形成和扩展的机制并开发出一种估计裂缝扩展的技术。为了弄清机制，有必要在新鲜均匀的岩体中进行试验。中日双方在中国选到了适合试验的花岗岩体，并在深 300m 的钻孔中进行了试验。

在 40~300m 深度之间共进行了 44 次小型水压致裂试验，研究渗透率和加压速率对裂缝形成的影响。在渗透率相对较高 ($10^{-7} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$)、中等 ($10^{-8} \sim 10^{-9} \text{cm/s}$) 和较低 ($10^{-9} \sim 10^{-10} \text{cm/s}$) 的三个区段中，分别采用快速 (15 L/min) 和慢速 (0.3 L/min) 加压速率进行水压致裂。在低渗透率区段，快速和慢速水压致裂的破坏压力几乎相同 (20MPa)。在高渗透率区段，慢速压裂的破坏压力明显地低于快速压裂 (低 20%~40%)。利用 P_0 准则计算岩石应力必须考虑上述结果。试验还发现水压致裂产生的裂缝为垂直裂缝并在 N-S 方向，因此水平最大压应力在 N-S 方向。

在 60~140m 深度之间进行了七次大流量水压致裂 (最大注入流量 500 L/min)，同时用声发射 (AE) 监测裂缝的扩展。只在 118.5m 深的压裂试验中观测到了 AE 事件。AE 事件的震源自注水井开始沿 N-S 方向分布，大部分事件集中在注水段的同一深度。根据 AE 事件的震源分布，证实水压致裂产生的裂缝在 N-S 方向扩展。由于观测到的 AE 事件较少，未能确定裂缝扩展区的形状。AE 事件的震源机制揭示所有 AE 事件都是由剪切破坏造成的。水平最大压应力在 N-S 方向，这点与水压致裂应力测量的结果一致。

大流量水压致裂时，还用自然电位 (SP) 估计裂缝的扩展。观测 SP 的变化可以估计水压致裂产生的裂缝中水流的方向。水压致裂试验时，在注水井和水池周围观测到了分别为正和负的 SP 异常。这种异常与花岗岩中水流的理论预测一致。注水井周围正 SP 异常似乎以两个椭圆为主。它们的长轴大致符合于水压致裂裂缝和最靠近注水点的天然节理的走向。

上述水压致裂试验的结果将被用于日本电力中央研究所正在进行热干岩开发工作的秋田县雄胜试验场未来的试验。

这次合作研究于 1993 年签约，1993~1995 年进行野外试验和实验室试验，并由中日双方分工用英文编写报告初稿。1996 年双方对初稿进行了讨论和修改，最后由日方经过必要的编辑加工，于 1998 年 3 月用英文发表。为了方便中国有关人员阅读，双方同意在中国出版报告的中文版。本书合作研究报告分两个部分。第一部分是英文版的中文译文。考虑到中国读者对岩石应力测量方法和技术细节有兴趣，第二部分包括合作研究中有关岩石应力测量结果的介绍和评述，也包括已在国外期刊和学术会议上发表论文的中文译文以及关于岩石应力测量技术细节的介绍。

这次合作研究计划前后历时 5 年多，中日双方人员互访达 360 人日，双方直接参与工

作的研究人员和技术人员达 27 人，对此中方和日方两个研究所的历届所长给予了极大的重视和支持。我们相信此书的出版将使中国对此项技术有兴趣的研究人员和工程师们更好地了解此项技术的最新进展，有利于中日两国开展进一步的合作研究。

张伯崇、李方全

1998.9

致 谢

电力中央研究所方面

我们十分感谢电力中央研究所的樱井彰雄博士、江刺靖行博士、栗原千鹤子博士、井上大荣博士和西好一博士对此合作研究项目的鼓励。本报告的 AE 数据的收集和分析，是在吉泽技研计测株式会社的佐藤节雄先生和田泽芳博先生的帮助下完成的。分析某些水压致裂压力数据时，我们得到 Nihon Public Co., Ltd 株式会社的田仲正弘先生、西条博幸先生和三浦玲子女士的帮助。我们也十分感谢事务部的小岛裕二、入内岛英光、高野俊一等人协助，顺利执行这个研究项目。我们也深深地感谢新能源工业技术组织（NEDO）允许我们使用他们的设备。

中国地震局地壳应力所方面

我们也十分感谢中国地震局地壳应力研究所的杜振民教授、唐荣余高级工程师、郭志涛高级工程师、许厚德教授、赵国光教授、苏恺之教授和李克副教授，他们在讨论和安排合作研究项目方面给与我们很大的帮助。

中日合作研究项目组成员

日本电力中央研究所

组 长：角田隆彦

副组长：佐佐木俊二

组 员：堀义直 北野晃一 金川忠 海江田秀志
新孝一 芝良昭 池川洋二郎

中国地震局地壳应力研究所

组 长：张伯崇

副组长：李方全

组 员：陈宏德 祁英男 李 宏 毛吉震
江南生 陈群策 马元春 柴建中
张治国 陈景崧 张 钧 王福江
张明珍 邱泽华 安美建 杨新华

合作研究报告作者名单

中国地震局地壳应力研究所

张伯崇 李方全 祁英男 李 宏
毛吉震 江南生 陈群策 马元春
陈景崧 王福江

日本电力中央研究所

佐佐木俊二 新孝一 海江田秀志 金川忠
芝良昭 角田隆彦

目 录

第一部分 水压致裂裂缝的形成和扩展研究

引言	(3)
第一章 野外试验概况	(5)
1.1 试验场地和地质条件	(5)
1.1.1 试验场的地理位置	(5)
1.1.2 房山花岗岩体的地质构造	(7)
1.1.3 试验场的岩石学特性和地质构造	(7)
1.2 定向取芯钻进和钻孔布置	(7)
1.2.1 概述	(7)
1.2.2 AE 钻孔取芯钻进和岩芯定向试验研究	(10)
1.2.3 FR 钻孔定向取芯钻进	(13)
1.3 岩体描述	(17)
1.3.1 节理分布	(17)
1.3.2 渗透系数测试	(19)
1.4 水压致裂概述	(34)
第二章 水压致裂应力测量过程中破裂的性状	(35)
2.1 目的	(35)
2.2 实验过程	(35)
2.2.1 仪器及设备	(35)
2.2.2 测量过程	(36)
2.3 实验结果及讨论	(37)
2.3.1 破裂	(37)
2.3.2 重张压力	(39)
2.3.3 关闭压力	(41)
2.4 原地应力计算	(42)
第三章 水压致裂试验过程中诱发的声发射	(44)
3.1 目的	(44)
3.2 水压致裂实验概况	(44)
3.3 AE 观测方法	(46)
3.4 AE 数据分析的结果	(49)
3.4.1 AE 活动性、压力和流量	(49)

3.4.2 AE 的震级	(49)
3.4.3 AE 的震源分布	(50)
3.4.4 AE 的震源机制解	(55)
3.5 结论	(55)
第四章 自然电位 (SP) 测量	(57)
4.1 目的	(57)
4.2 SP 的测量方法	(57)
4.2.1 测量步骤	(57)
4.2.2 数据处理和分析	(58)
4.3 数据分析的结果	(59)
4.3.1 背景观测	(59)
4.3.2 压裂过程中 SP 观测	(60)
4.4 讨论与结论	(64)
第五章 实验室研究	(67)
5.1 显微结构分析	(67)
5.1.1 试件加工	(67)
5.1.2 显微镜和观测方法	(67)
5.1.3 观测结果	(67)
5.1.4 小结	(77)
5.2 物理力学特性	(77)
5.2.1 巴西试验	(77)
5.2.2 单轴压缩试验	(82)
5.2.3 岩石的容重	(83)
5.3 声学各向异性	(83)
5.4 用 AE Kaiser 效应试验确定应力	(84)
5.4.1 引言	(84)
5.4.2 定向岩芯试件的 AE Kaiser 效应试验	(85)
5.4.3 AE Kaiser 效应试验结果的评价	(94)
第六章 结论	(96)
6.1 原地岩石应力	(96)
6.2 水压致裂试验时诱发的 AE	(96)
6.3 自然电位(SP)观测	(97)
6.4 实验室试验	(98)
参考文献	(99)
附录 I 水压致裂试验的压力和流量随时间变化的记录	(101)
附录 II 北京房山井下电视观测结果	(110)
附录 III 岩矿鉴定报告	(122)

第二部分 应力测量结果的评述及其它

用 AE Kaiser 效应估计原地应力的可靠性	张伯崇 (129)
中日合作水压致裂法原地应力测量的改进及其主要结果	李方全 (145)
完整花岗岩体中的水压致裂法地应力测量	新孝一 李方全 大久保诚介 (149)
加压速度对破坏压力的影响	
——在节理少的中国花岗岩地区的水压致裂实验	
.....	新孝一 张伯崇 李方全 金川中 大久保诚介 (157)
北京房山地区的水压致裂应力测量	
——在不连续面较少的中国花岗岩地区的水压致裂实验	
.....	新孝一 李方全 大久保诚介 (166)
北京房山迎风坡水压致裂钻孔裂缝印模定向结果与分析	祁英男 (177)
水压致裂应力测量数据分析——对关闭压力 P_g 值判读方法的讨论	
.....	陈群策 毛吉震 张 钧 (191)
北京房山花岗岩钻孔岩芯定向	李 宏 江南生 张伯崇 (195)

第一部分

水压致裂裂缝的形成和扩展研究

引 言

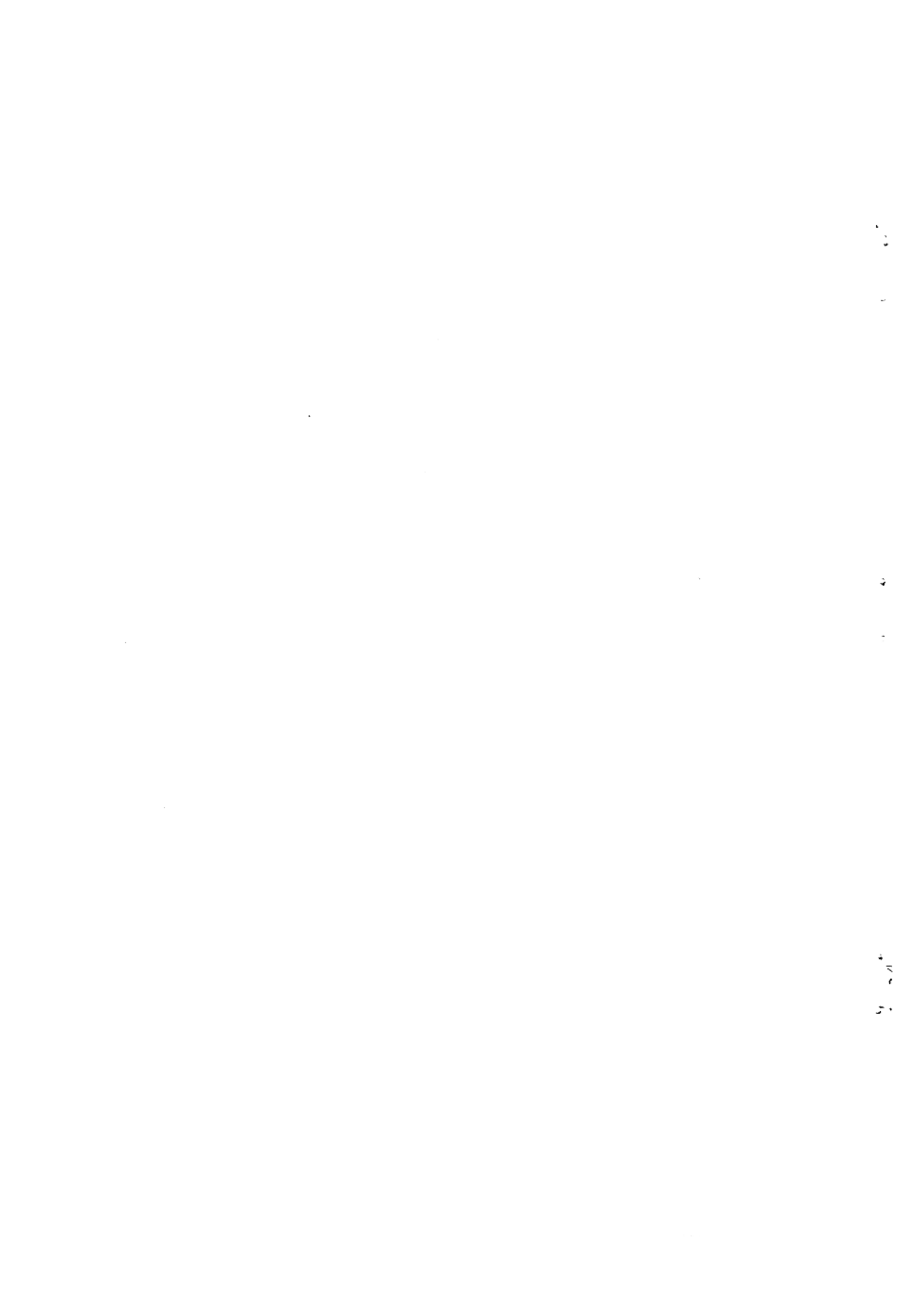
最初作为油田增产技术的水压致裂已经发展成为一种岩石应力测量技术。最近，它也被用于热干岩发电系统中产生人工热交换面。

为了估计和得到最好的水压致裂结果，我们需要了解裂缝如何在岩体中产生和发展。例如在热干岩中制造热交换面时，为了布设注水井和取水井，预测所产生裂缝面的扩展区域是十分重要的。对于岩石应力测量，为了提高应力测量技术的可靠性，也需要了解水压致裂时裂缝的性状。

为了发展裂缝产生和扩展的预测技术，我们需要弄清它们的机制。岩体有时含有预先存在的不连续面，但我们通常不知道它们的分布和特性。为了弄清产生原地裂缝的性状的机制，在没有裂缝、均匀的岩体中进行试验是十分重要的。

我们指望在欧亚大陆找到这种已有不连续面频度很低的岩体，日本电力中央研究所和中国地震局地壳应力研究所合作开展了这项研究计划。

本报告在第一章中描述了岩体的地质情况和岩土力学条件以及水压致裂试验概况。在第二章中描述了岩石应力测量中低流量水压致裂条件下，水压致裂裂缝性状的机制。第三章描述热干岩电站中可能用来制造热交换面的大流量水压致裂时观测到的声发射。第四章涉及大流量水压致裂时的自然电位(SP)观测。第五章论述取自现场的岩石试件的实验室试验结果。第六章是基于声发射和自然电位观测的原地岩石应力和裂缝扩展过程以及实验室试验的结论。



第一章 野外试验概况

1.1 试验场地和地质条件

1.1.1 试验场的地理位置

试验场选择在北京西南郊距市中心约 50km 处，那里有 38 km² 巨大的花岗岩侵入体出露，是晚中生代非常完整的岩石。该处属房山县，地理上属海拔 60~110m 的丘陵地带，恰好在燕山山脉和华北平原的边界。

由于房山是石油化学工业中心，公路和铁路交通十分发达。试验场在房山县城西约 5km。可以直接驱车到达。

房山气候属温带，7 月份平均气温 26℃，1 月份平均气温 5℃，平均年降水 651 mm，主要集中在夏季，特别是 7 月到 8 月。

在花岗岩体内，我们选择迎风坡作为试验场（见图 1.1-1）。主要原因是：1) 它受其东边羊尔峪—大洪寺断裂的影响较小；2) 在迎风坡没有采石场和农田，对我们的试验有利；3) 迎风坡的地形和交通条件较好。试验场的地形如图 1.1-2 所示。地图的等高线是相

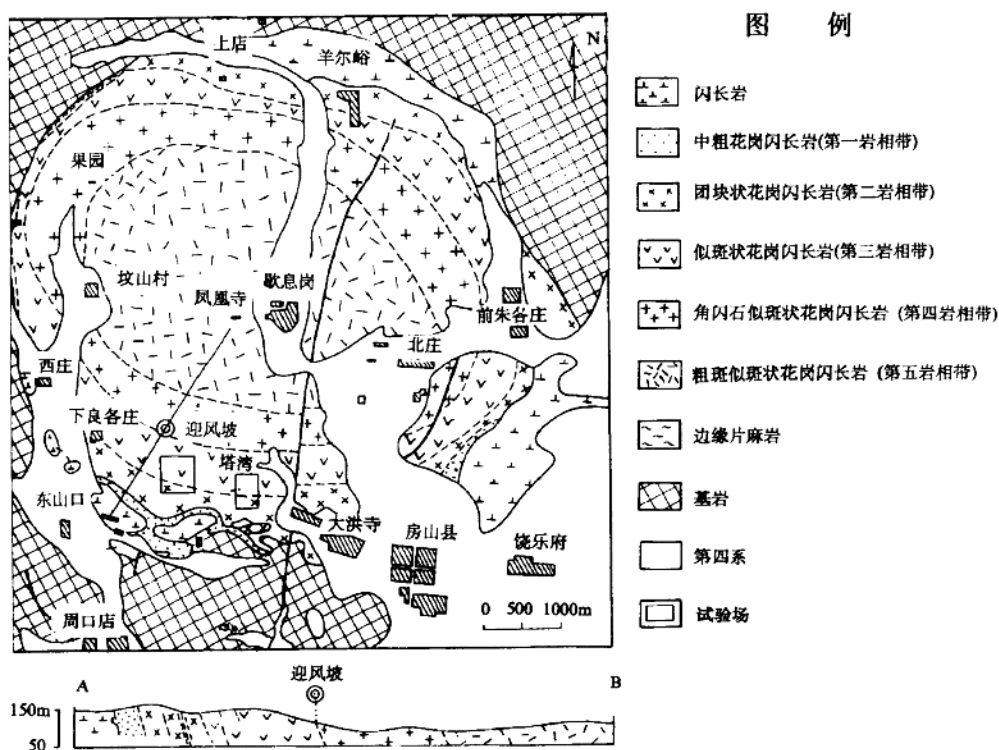


图 1.1-1 房山花岗岩侵入地质图

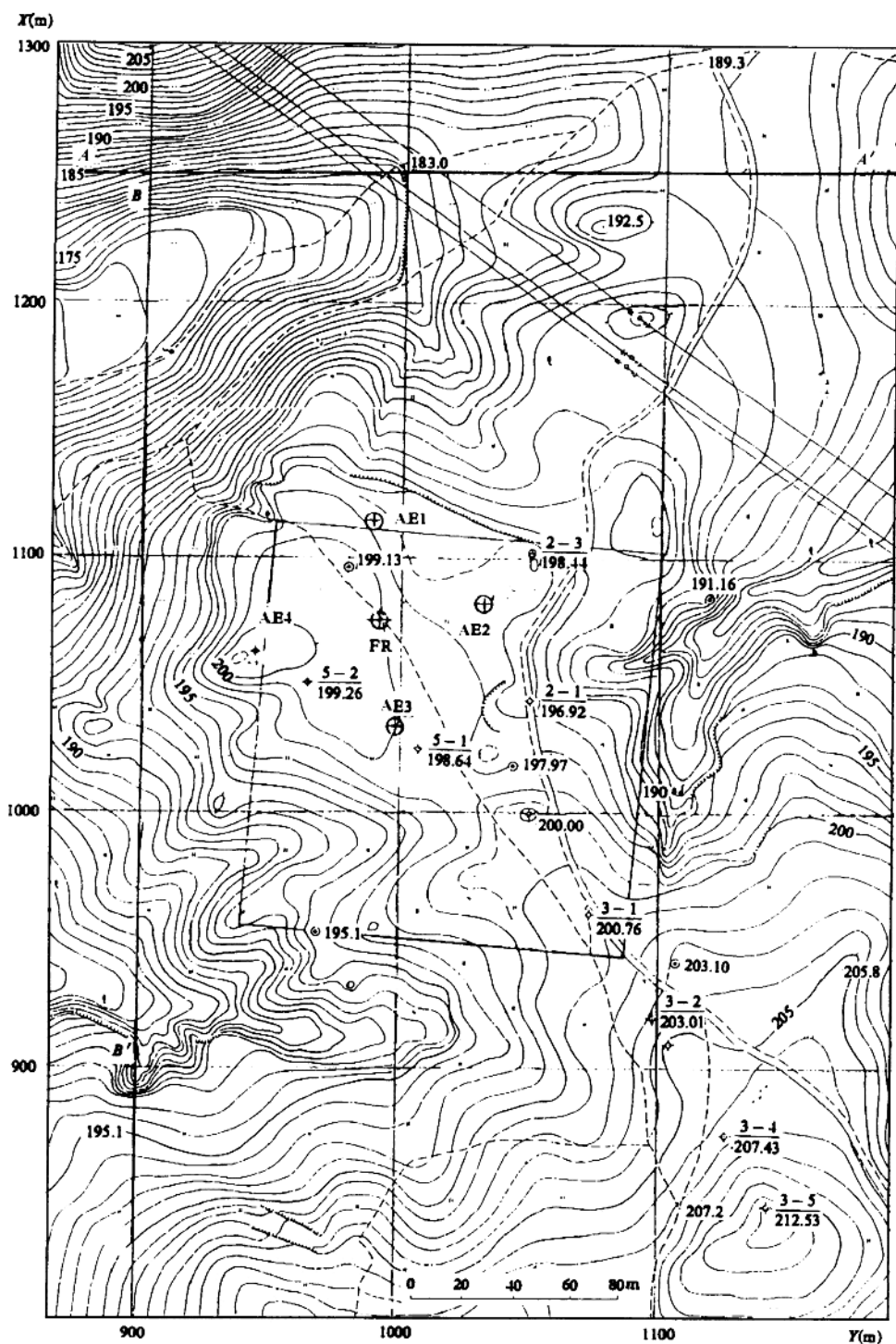


图 1.1-2 迎风坡试验场地形图和钻孔分布图

对高程；它大致高于真实高程 110m。5 个钻孔 (AE1、AE2、AE3、AE4 和 FR)的位置也表示在地形图上。

1.1.2 房山花岗岩体的地质构造

房山花岗岩体是中生代燕山运动晚期侵入的，岩石学上属中性到酸性原生侵入。现在暴露于地表的岩体近似圆形，面积约 38 km^2 (图 1.1-1)，根据过去的某些研究，认为侵入体较少受到后来构造运动的影响。然而，已发现一个重要的断裂带，它从羊尔峪到大洪寺切割侵入体（在塔湾以东），走向 NNE (见图 1.1-1)。根据野外观察，它属于压性断裂带，有某种左旋剪切趋势。受其影响，断裂两侧的某些节理已经位移，在节理面上形成擦痕和深绿色绿泥石。

根据某些研究者的意见，侵入体可用五个岩相来描述。如图 1.1-1 所示，它们是：(1)中粒花岗闪长岩，(2)团状花岗闪长岩，(3)似斑状花岗闪长岩，(4)角闪石似斑状花岗闪长岩，(5)粗斑状花岗闪长岩。它们可以简化为边缘相、转变相和中心相。试验场位于转变相带内，其岩石学特性和地质构造将在后面详细讨论。

1.1.3 试验场的岩石学特性和地质构造

根据野外调查和实验室观察表明所有采自试验场的岩石试样被证实为中到粗粒黑云母花岗闪长岩。主要造岩矿物为长石(74%~80%)、角闪石(2%~7%)、黑云母(5%~8%)、石英(10%)和某些磁铁矿。在薄片上发现的唯一次要矿物是榍石（见附录 III 岩矿鉴定报告）。

试验场侵入岩体在各处都出露良好，植被覆盖很少。风化带很薄。岩石非常完整，呈大块状。在侵入体中已形成三或四组原生节理和剥离。我们在迎风坡试验场沿两个剖面对它们进行了测量。一个剖面大致沿北部边界，而另一剖面大致沿西部边界（见图 1.1-2）。迎风坡试验场的两个剖面如图 1.1-3(a) 和 1.1-3(b) 所示。

总之，一组平卧节理或剥离破裂平行地表（或山坡），因此倾向和地形有关，各处不一样。其它节理组倾角较陡，经常达 $70^\circ \sim 80^\circ$ ，甚至更陡。根据迎风坡北部的统计，两组陡节理方位约 $N24^\circ E$ 和 $N86^\circ W$ ，倾角约 80° （见图 1.1-3(a)）。在图 1.1-3(b) 所示剖面中两组节理方位变为 $N15^\circ E$ 和 $N63^\circ W$ ，具有 $70^\circ \sim 80^\circ$ 的高倾角；在此剖面内发现一条宽 5 cm 长石充填的岩脉，走向 $N15^\circ E$ ，倾角 $N84^\circ W$ 。在塔湾，平卧节理也平行于地表发育。根据统计，两组陡节理方位约为 $N2^\circ E$ 和 $N68^\circ E$ 。即使在裂缝比较密集区内，裂缝之间的距离都可能大于几米。

1.2 定向取芯钻进和钻孔布置

1.2.1 概 述

根据试验计划，钻出了 4 个声发射观测钻孔（简称 AE 钻孔）和一个压裂钻孔（简称 FR 钻孔）。其参数列于表 1.2-1，井口坐标列于表 1.2-2。

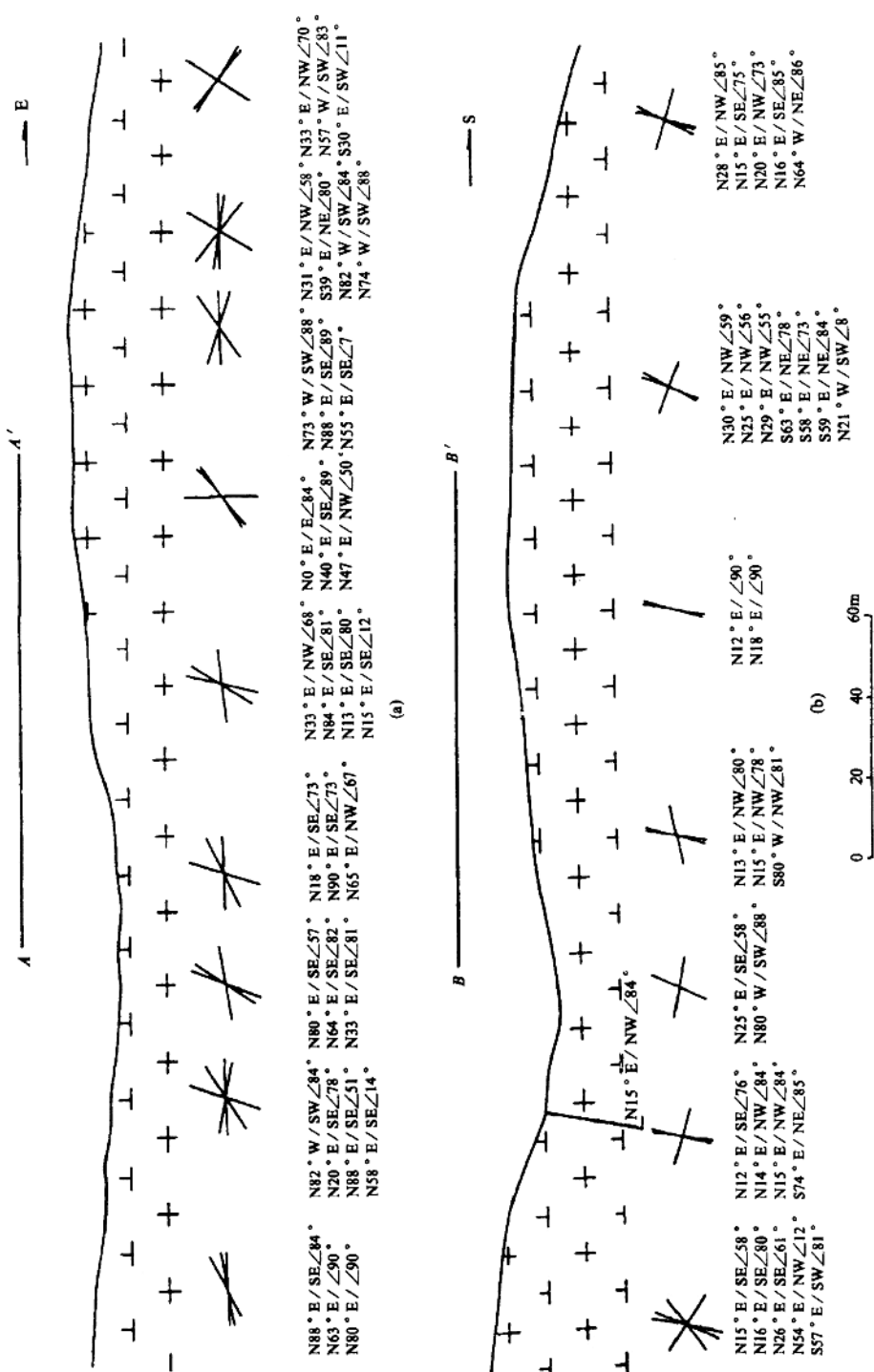


图 1.1-3 迎风坡试验场地节理产状的两个剖面
(a)图 1.1-2 中的 A-A'剖面, (b)图 1.1-2 中的 B-B'剖面

表 1.2-1 钻孔参数

参数 \ 钻孔	AE1	AE2	AE3	AE4	FR	注 释
直径 / mm	91	91	91	91	111	
深度 / m	120.40	120.20	120.20	120.20	301.00	
岩芯直径 / mm	62	62	62	62	86	
套管深度 / m	18.92	10.67	12.33	7.10	17.00	
最大倾斜 / (°)	57	27	12	50	45	见附录IV
地下水位 / m	12.10	8.15	14.00	16.50	—	1993-10-25~27

表 1.2-2 井口相对坐标 (1994-9-9)

钻孔	方 位	距离 / m	坐 标 / m			地下水位 / m (1995-9-22)
			横坐标(x)	纵坐标(y)	高程(z)	
FR	357° 16'49"	40.14	1074.24	991.81	198.93	10.15
AE1			1114.33	989.91	197.32	
FR	77° 53'49"	41.38				6.80
AE2			1082.92	1032.27	197.26	
FR	169° 38'08"	40.48				11.00
AE3			1034.42	999.09	198.70	
FR	257° 47'01"	40.55				17.80
AE4			1065.64	952.18	200.02	
AE1	126° 33'25"	52.73	—	—	—	—
AE2						
AE2	214° 22'37"	58.76	—	—	—	—
AE3						
AE3	303° 38'42"	56.35	—	—	—	—
AE4						
AE4	37° 46'20"	61.60	—	—	—	—
AE1						