

结构与介质相互作用 理论及其应用

河海大学出版社

结构与介质相互作用 理论及其应用

——全国首届结构与介质相互作用学术会议论文集

曹志远 主编

河海大学出版社

(苏)新登字号013号

责任编辑 王国仪

特约编辑 任玉光

**结构与介质相互作用
理论及其应用**

曹志远 主编

河海大学出版社出版

北京文兴印刷厂印刷

1993年6月第1版 16 开本 787×1092毫米1/16

1993年6月北京第1次印刷 字数 1892千字

印数 1—400册 印张 76.625

书号: ISBN 7—5630—0544—7

TV·81 定价: 90元

《结构与介质相互作用理论及其应用》

编辑委员会

主 编：曹志远

副主编：孙 钧 黄玉盈 翁智远 卓家寿

编 委：(按姓氏笔划为序)

王承树	卢文达	冯振兴	朱德懋	陈厚群	张楚汉
林 皋	周 盛	周丰峻	居荣初	郑颖人	赵锡宏
侯忠良	钱七虎	诸德超	黄熙龄	崔尔杰	傅作新
傅冰骏	熊建国	魏汝龙			

特约编辑：任玉光

前 言

随着近代科学技术的发展与科学研究的深入,结构与介质相互作用问题越来越引起广大科技工作者与工程师的关注与重视。相互作用及耦合问题广泛存在于各种实际工程中,诸如结构工程、岩土工程、地下工程、水工工程、道桥工程、环境工程、船舶工程、化工工程、航空工程、海洋工程、核工程、地震工程、防护工程、风工程等。随着工程规模的不断扩大以及分析手段的逐步完善,加上各种重大工程建设逐渐增多,进行相互作用分析已愈来愈重要,因而在工程应用上已成为一个亟待解决的普遍问题,需要专门加以研究和探讨。结构与介质相互作用分析也是一个跨学科的新的基础研究方向,将集中体现学科间的交叉与渗透,它涉及结构力学、固体力学、流体力学、气体力学、岩土力学、生物力学、计算力学、实验力学和热、电、磁、声、地质、海洋等以及各有关工程学科,包含着一系列有待深入研究的理论与实践课题,这些问题原本在单一学科方向中是不存在或者并不重要。结构与介质相互作用问题也是力学等基础理论为工程实践服务的一个典型研究方向。可以相信,它的研究与进展必将会在很大程度上推动各工程学科的深入与发展。

结构与介质相互作用分析有着广泛含意与众多研究课题,其中主要包括地面结构与地基介质相互作用,地下结构与岩土介质相互作用,固体结构与流体介质相互作用,结构与结构相互作用,力学与其它学科问题的相互作用以及相互作用的分析、计算、实验方法等。相互作用分析将主要研究其数学模型、力学机理、耦合效应、界面特性与分析方法,并探讨由于计入相互作用影响而产生的一系列特殊与共同问题以及解决实际工程中存在的各种相互作用问题。

近年来,国内外对结构与介质相互作用研究发展很快,我国各高等院校、科研与设计部门也都有大批科技人员在从事这方面工作,而且取得不少成果与显著进展,但这些研究成果大都散落在各学科分支的学术刊物与会议资料中。同时,也有许多全国性的以及在我国召开的国际学术会议已将相互作用作为会议主题之一来开展讨论,但未曾召

开过相互作用方面的全国性专门学术讨论会。为此，由中国力学学会与中国土木工程学会、中国水利学会、中国航空工程学会、中国岩石力学与工程学会、中国振动工程学会联合发起，并由中国力学学会固体力学专业委员会与流体力学专业委员会、上海力学学会及总参工程兵科研三所具体组织，于1993年6月在河南洛阳召开全国首届结构与介质相互作用学术会议，以回顾、交流与总结在这方面的研究成果，探讨今后的研究与发展问题。会议得到全国各有关高校、科研、设计部门的大力支持与协助，得到李国豪、郑哲敏、潘家铮、黄克智、孙钧、白以龙等学部委员的关心与指导以及国际同行的参与。为了促进全国相互作用研究的深入发展，为有关科技工作者提供一份尽可能全面的综合资料，会议应征论文200余篇，遴选后编辑出版了这本《结构与介质相互作用理论及其应用》论文集。本论文集汇集了具有代表性的文章150篇，其中23篇论文为相互作用理论及应用的几个重要方面的综述文章，其中包括国际上这方面发展的概况；127篇论文为相互作用分析方面的文章。本论文集基本上反映了近年来国内外在相互作用分析研究方面的主要进展与今后发展动向，是这一领域的一本重要资料汇编。我们希望，这本论文集的正式出版将有助于全国相互作用分析与有关科技领域的研究与发展。

本论文集的论文在某一领域中的顺序是以收到论文的先后排列的，与论文的水平 and 重要性无关。

本论文集在编辑、出版过程中得到总参工程兵科研三所的支持与帮助，谨致谢意。

由于时间紧迫、水平有限，本论文集在编校工作中难免有不少疏漏和不当之处，敬请同行与广大读者批评指正。

《结构与介质相互作用理论及其应用》编辑委员会

1993年6月

目 录

A 相互作用研究综述

- 1 岩石力学与工程中相互作用问题的若干进展……孙 钧 冯紫良 陶履彬 (1)
- 2 RECENT ADVANCES IN SOIL-STRUCTURE
INTERACTION ANALYSISY.K. Cheung L.G.Tham (17)
- 3 在核工程中考虑土—结构相互作用研究的若干发展……俞智远 (28)
- 4 水工结构工程中的动力相互作用研究……林 皋 (38)
- 5 贮液容器的晃动研究……黄玉盈 刘志宏 钱 勤 (49)
- 6 具有缝隙界面结构的耦合问题……卓家寿 (57)
- 7 相互作用分析数值方法的若干新进展……曹志远 (66)
- 8 RECENT ADVANCES IN NUMERICAL ANALYSIS
OF INTERACTION PROBLEMS-THE AUSTRALIAN SCENE
.....Y.C.LOO (73)
- 9 核爆作用下浅埋土中结构荷载的相互作用
机理与试验研究……钱七虎 王明洋 赵跃堂 (92)
- 10 结构—(桩)—地基相互作用研究的若干问题……严士超 (106)
- 11 高层建筑与地基基础共同作用概论……赵锡宏 董建国 杨 敏 (118)
- 12 论微循环系统中结构与介质的相互作用……郭仲三 (125)
- 13 固—液—气三相多孔介质相互作用的动力学理论……陈正汉 (134)
- 14 岸坡变形对于桩基码头的影响……魏汝龙 (148)
- 15 机电系统耦合动力学问题……邱家俊 (157)
- 16 带有不定边界的非定常非线性流固耦合……冯振兴 (175)
- 17 双曲冷却塔系统与土壤的相互作用……卢文达 (187)
- 18 拱坝动力相互作用的现场试验验证
.....陈厚群 侯顺载 杨佳梅 张力飞 苏克忠 (199)
- 19 叶轮机械流固耦合有关模型探讨……周 盛 (208)
- 20 中国地下管线地震反应研究……侯忠良 王 筠 (216)
- 21 结构工程中的几个相互作用问题……何玉敖 (224)
- 22 近海工程中的结构—流体相互作用……毕家驹 (233)
- 23 结构—地基动力相互作用问题……张楚汉 (243)

B 地面结构与地基介质相互作用

- 1 弹性地基薄板与弹性层状体复合结构在轴对称荷载作用下的一般解

	胡长顺 王秉纲 (267)
2 垂向周期力作用下柔性圆板与弹性	
半空间的相互作用.....曾心传 井口道雄 (273)	
3 弹性地基上含裂缝水泥混凝土路面板的断裂分析.....郑传超 王秉纲 (283)	
4 粘弹性基支粘弹性圆 (环) 薄板的动力分析.....居荣初 郑建军 (288)	
5 多圆荷载下弹性板与Рахматуллин地基的相互作用分析.....朱大同 (296)	
6 考虑基础埋深的片筏基础与土的相互作用分析.....李志飏 姚祖恩 (302)	
7 桩基承台脱空机理的分析.....王成华 (309)	
8 无拉力地基上板的静、动力分析.....徐守泽 王成博 孙焕纯 (316)	
9 Winkler地基上任意变厚度圆 (环) 板的	
轴对称自由振动.....郑建军 刘兴业 (323)	
10 弹性地基梁计算方法的探讨.....杨懋杰 (329)	
11 复杂平面刚性基础与地基相互作用的试验研究.....彭安宁 (341)	
12 半空间浅圆弧状埋置基础出平面散射问题解答.....袁晓铭 廖振鹏 (347)	
13 土与基础相互作用有限元分析的病态问题及结构分离法.....王成华 (355)	
14 冻土与基础间的相互作用.....李洪升 (362)	
15 冻土与基础相互作用的实验研究.....李洪升 孙秀堂 常 成 (366)	
16 上部结构—基础—邓肯·张模型共同作用分析.....王平山 张季容 (372)	
17 在地面水平振动作用下储液罐的辐射阻尼.....徐 微 项忠权 (378)	
18 共同作用分析在某高层建筑箱形基础设计中的应用	
.....董建国 路 佳 赵锡宏 袁聚云 (387)	
19 计算拱坝动力反应的频域—时域耦合模型	
及地基动力刚度分析.....金 峰 张楚汉 王光纶 (394)	
20 混合结构与浅地下工程相互作用的有限元分析.....赵燕明 刘东升 左国华 (400)	
21 结构、地基、洞室共同工作的数值分析.....刘东升 (406)	
22 在侧力作用下高层框架与地基基础的相互作用.....刘开国 (415)	
23 地震荷载下地基—结构相互作用的动力反应分析	
.....周龙翔 王步云 朱博鸿 (422)	
24 非岩性地基核电站设计中考虑土—结构	
相互作用的计算分析.....王明弹 夏祖讽 何德炜 (432)	
25 空间框架与层状地基相互作用分析的	
超级元—有限层耦合法.....时蓓玲 刘永仁 曹志远 (441)	
26 上海电视塔群桩—土—结构相互作用桩基承台	
水平地震反应分析.....俞载道 曹国敖 查金星 (451)	
27 累积矩删去法分析非线性结构在过滤白噪声	
地震输入下的随机响应.....沈建明 俞载道 (457)	
28 三峡坝—库水—地基相互作用对坝体动态特性	
及动力反应的影响.....钱胜国 陆秋蓉 (467)	
29 考虑基础变位不确定性的上部结构随机分析.....赵锡钱 (474)	

30	地表建筑对地下结构动态性能影响分析.....	王虎栓	沈聚敏	郭胜利 (480)
31	软弱地基上坝内涵管的光弹性研究.....	赵华松	李学珍 (486)	
32	框架—剪力墙结构—筏基—地基的共同工作.....	姜广荣	谢孝忠 (493)	
33	框架结构与地基动力相互作用的试验研究.....	王天龙	费文兴	张 海 (500)
34	考虑共同工作时箱形基础优化设计的研究.....	王用琪	许铁生	周志华 (511)
35	考虑桩—土—结构共同工作的地震反应.....	刘爱珍	王稼琛 (518)	
36	地基土—非线性单自由度结构相互作用体系			
	随机临界地震响应分析.....	匡志平	俞载道 (523)	
37	双模量弹性地基上雁行褶皱分析.....		周怡之 (531)	
38	均质与非均质层状地基的动力柔度系数.....		楼梦麟 (538)	
39	软土地基上的过渡层.....		杨光煦 (547)	
40	弹性半空间非连续屏障的屏蔽分析.....	高广运	王贻荪	杨先健 (553)
41	半无限大弹性地基上旋转对称壳体的轴对称问题分析.....		贺永正 (568)	
42	建筑物作用下复杂地基稳定性分析.....		阮怀宁 (575)	
43	上部结构—筏式基础—地基			
	共同工作分析的一种新方法.....	邓安福	千腾君	李正良 (582)
44	高层建筑结构—基础—地基耦合体系的分析方法			
		秦 荣	赵艳林	张汉吉 (589)
45	水—拱坝—地基耦合体系的分析方法.....	秦 荣	燕柳斌	谢肖礼 (598)

C 地下结构与岩土介质相互作用

1	桩结构物—多层非线性地基静动力相互作用分析			
		胡维俊	孙文俊	张旭明 陈明关 (606)
2	斜拉桥桩—土结构相互作用地震反应分析及其简化			
		袁万城	叶爱君	范立础 (614)
3	群桩土体位移对相邻结构安全性分析.....		韦 林 (619)	
4	码头工程桩基震害机制的解析.....	陈国兴	张克绪	王 忆 (624)
5	共面铰接刚性斜桩结构体系的线载荷			
	积分方程法的分析.....		云天铨 (632)	
6	桩与承台共同作用的实用计算方法.....	吴永红	石曾传	翁鹿年 (636)
7	桩基贯入过程中桩锤—桩—土			
	三维动力相互作用分析.....	赵振东	傅铁铭 (643)	
8	桩与桩相互作用分析的一种弹性有限元方法.....	沈伟跃	赵锡宏	董建国 (651)
9	CFG 桩复合地基影响因素的灰色关联分析.....		张东刚 (658)	
10	锚杆与围岩相互作用的弹塑性有限元实用计算.....	高效伟	郑颖人 (662)	
11	控制软岩巷道底臃的合理锚杆支护.....	何亚男	李 晓	贺永年 (668)
12	全长锚固锚杆与岩土介质的相互作用.....	何唐镛	王建智	杨更社 (675)
13	可缩性金属支架对巷道围岩变形的控制.....	侯朝炯	周华强	马念杰 冯光明 (683)

14	在平面装药爆炸加载条件下土与复合衬砌			
	马蹄形结构相互作用分析·····	周早生	陈志林	(690)
15	与周围介质部分粘接的空心圆			
	夹杂在SH波作用下的特性·····	汪越胜	王 铎	(699)
16	浅埋复合夹层梁塑性大变形的实用计算方法·····	伍 俊		(707)
17	应力波与土中复合夹层结构的动力相互作用·····	伍 俊	周早生	(713)
18	隧道衬砌结构静力分析·····	戴正宏	滕宏伟	(721)
19	地铁对地面的振动影响·····	傅铁铭	熊建国	(726)
20	爆炸波作用下地下防护结构与围岩			
	非线性动力相互作用分析·····	曾三平	曹志远	(733)
21	围岩变形压力的粘弹性分析与试验研究·····	周德培		(741)
22	爆炸行波作用下地下室—管道—土体系动力反应分析·····	房营光		(749)
23	非线性岩土介质与结构动力相互作用的			
	三维问题及其球坐标中的求解·····	房营光		(758)
24	表土含水层水位下降时土体与井壁的相互作用			
	·····	杨维好	崔广心 程锡禄 陈先德	(769)
25	地表冲击波作用下土中浅埋结构与介质			
	相互作用动态响应的子结构模态综合法·····	宗福开	俞儒一	(775)
26	浅埋地下长矩形坑池的实用计算公式·····	李乾南		(781)
27	浅埋直墙连拱结构有限元动力分析			
	(I. 结构周边荷载) ·····	谷学东	王双进 赵银三	(794)
28	浅埋大跨度复合衬砌结构抗爆炸动载模型试验研究·····	曾荣生	陈志林	(801)
29	试论浅埋结构与土介质相互作用机理·····	李福厚	李超斌	胡井友 (808)
30	浅埋土中结构荷载模型研究·····	王双进	张守保	(813)
31	太平驿水电站地下洞室结构模型试验研究·····	陈 进	姜小兰	(821)
32	正交各向异性围岩中地下洞室的边界效应·····	倪国荣	刘庆潭	周典加 (826)
33	关于地下结构与围岩相互作用算法的几点注记·····	殷有泉	张 炜	(835)
34	地震波作用下地下管道的模糊随机反应和可靠性分析·····	赵成刚		(840)
35	弹性半无限空间中通过不同介质管线的三维地震反应·····	梁建文	何玉敖	(848)
36	动载下围岩与坑道喷锚支护的相互作用·····	王承树		(853)

D 固体结构与流体介质相互作用

1	圆柱形贮液池在竖向地震作用下的近似分析方法·····	张树华		(858)
2	弹性地基上圆柱形储液罐的自振特性分析·····	陈世一	蔡强康	吕英民 (865)
3	储液罐的动力失稳区域分析·····	曲乃泗	初良成	崔英姬 邬瑞锋 (876)
4	双层储液圆筒的耦合振动分析·····	崔英姬	曲乃泗	(887)
5	关于各国抗震设计规范中动水压力的			
	计算值及其比较 (I) ·····	陆干文	居荣初	陈音飞 (898)

6	输送流体管道振动及稳定性的研究	居荣初	梁传珏	(912)
7	原子能反应堆中工艺管的流体诱发振动问题	李德葆	诸葛鸿程等	(923)
8	基础隔震时弹性储液罐的地震响应	梁波	唐家祥	(929)
9	多跨连续梁在平行水流作用下的振动	吴万新		(939)
10	分析变形体撞水响应的BE—FE混合法	黄玉盈	钱勤 刘志宏	(946)
11	圆柱在浪流联合作用下的动态响应	姚熊亮	陈起富 李维扬	(953)
12	均匀流场中并列弹性双圆柱的 脉动压力测量及响应预报	陈起富	李维扬 姚熊亮	(959)
13	钢筋混凝土重力式海洋平台单腿锥柱地震反应分析	曹国敖	谭敏杰	(968)
14	流激巨型浮体扇形闸门的振荡	阎诗武		(974)
15	用矩量法求阻尼介质对圆柱壳 塑性动力响应的影响	李鸿都	刘福林	(980)
16	波浪与开孔直立结构相互作用试验研究	戴冠英	张芹	(989)
17	水中混凝土建筑物的软化特性	于希哲	张京春 丁继辉	(1007)
18	抽水蓄能电站拦污栅振动试验研究	严根华	阎诗武 蒋梁 骆少泽	(1014)
19	在地震时斜面水坝受到的非线性 水平动水压力的解析解	范家参		(1023)
20	水库淤砂对动水压力波反射效应的粘弹性模型	王光纶	阎承大 张楚汉	(1030)
21	海底竖向地震动估计中的力学模型问题	朱镜清	李金成	(1038)
22	土体裂隙介质中水—土相互作用 力学机制的探讨	王永红	王育平 李增学	(1043)
23	饱和多孔介质的弹性波动理论与实验研究	丁伯阳	朱九江	(1050)

E 结构间相互作用及其它

1	弹性球体和圆板的接触问题	顾赫宁		(1058)
2	再入弹头的粒子云侵蚀外形的仿真计算	任兵	潘腾	(1062)
3	Hertz 接触问题较精确的积分方程的渐近解	云天铨		(1068)
4	两类特殊的薄球壳与光滑刚板的接触问题	云天铨		(1075)
5	冲击接触面的数值处理技术	朱明程	刘烈全 曾首义	(1082)
6	铁路轨道竖向动力特性分析	李成辉	张宝珍	(1088)
7	协变载荷下轴对称耦合热弹性接触问题的综合求解	曲家棣		(1093)
8	多体接触问题的广义子结构解法	陈振雷	卓家寿	(1102)
9	用损伤力学原理分析钢—混凝土组合结构中 混凝土的工作特性探讨	韩林海	国明超	(1111)
10	铁路斜拉桥与列车相互作用的随机分析	朱汉华	郭向荣	(1116)
11	筒仓仓壁静压力的非线性有限元分析	姜勇	华云龙 冯云田	(1122)
12	钢筋混凝土加固柱新旧混凝土协同工作系数	李玉林	张昌权 赵梦龙	(1130)
13	一种弹塑性弹丸侵彻厚靶的滑移面处理	胡秀章	王肖钧 李永池	(1136)

14	瞬态接触问题分析中的几点探索·····	李 宁 雷晓燕	(1142)
15	机械载荷和温度载荷共同作用下复杂结构热屈曲分析·····	邓可顺	(1148)
16	考虑横向剪切效应的层合板的耦合热弹性动力问题·····	蒋嘉俊 顾皓中	(1155)
17	水泥混凝土路面热屈曲的力学分析·····	夏永旭 王秉刚	(1166)
18	考虑道面接(裂)缝影响的加铺层温度应力分析·····	翁兴中	(1174)
19	轴对称耦合热弹性问题有限元基本方程·····	曲家棣 贺寅彪	(1179)
20	关于耦合热弹性力学的一些基本原理·····	罗 恩	(1188)
21	软铁简支梁在磁场中的振动·····	周纪卿 徐健学	(1197)
22	电磁固体耦合动力学及应用·····	徐健学	(1203)
23	石油钻井中底部钻具组合与井壁的相互作用·····	蔡宗熙 阎晓军 严宗达	(1210)

岩石力学与工程中相互作用问题的若干进展

孙 钧 冯紫良 陶履彬

(同济大学)

摘 要

本文综合阐述了岩石力学与工程中的若干相互作用问题及其最新进展,主要包括:岩石介质及与岩石工程结构物的耦合受力相互作用问题的提出、裂隙岩体中结构体与结构面力学行为的耦合相互作用问题、岩体工程开挖二次应力场与地下水渗流场以及温度场的耦合相互作用问题,以及围岩介质与地下结构相互作用的分析模型等四个方面的内容。此外,还对岩石力学与工程中相互作用问题的研究作了概括性小结和展望。

一、岩石介质及与岩石工程结构 物的耦合受力相互作用问题 (问题的提出)

岩石力学与工程中的相互作用问题涉及到许多方面,而首先要求认识岩体。一般地,岩体介质内发育着众多贯通与非贯通的节理裂隙等软弱结构面,岩体是由被这些结构面(经常在空间呈多组状节理裂隙分布)纵横多方位切割,以及结构面之间的结构体(岩块)所组成的。结构面内可以有胶结或未胶结的各种属性的充填物,也可以未有充填。这样,在岩体的力学属性方面,结构体的变形及其刚体运动(平移或转动)受到周近结构面的制约;反之,结构面间的相互剪切、拉张或压缩也要受到结构体的约束和控制。因而,结构体与结构面两者的力学行为是耦合的,也是相互作用的。它的求解应归属于不同介质间相互作用的耦合问题。

由于上述岩体结构面的存在,使绝大多数岩体在力学行为上表现为非连续(但亦非完全贯通)、非匀质、非各向同性和非线性(物理的和几何的);同时,岩体又受到多种不同结构面的不同组合和不同的空间展布关系的控制,问题的复杂性要求人们只能寻求适合的数值方法来进行计算分析。

其次,从大类上区分,岩体的变形有:(1)结构体的粘弹塑性时效变形;(2)软弱结构面的蠕(粘)滑剪切变形,以及(3)膨胀变形等三种。结构面的蠕滑变形属剪切流变性质,主要是形状畸变,除剪胀扩容外一般不伴随体积增加。这类变形的特征是呈阶段性跳跃状,即从初始的不平衡达到新的平衡,在外力长期作用下又由新的平衡产生新的不平衡,如此缓

慢而又旷日持久地持续进行。岩石膨胀变形（特别是膨胀岩）是由于含水量变化（增加）、岩石吸水导致体积增加，对洞室情况言，周围岩土地层呈一种向洞内的大量塑性挤入（squeezing），且变形速率很快，它经常是由于围岩内地下水、洞内水和潮湿空气与毛洞表面的水分交换而产生。

值得注意的是，就上类力学问题言，岩体的这三种变形是互为影响并时效耦合作用的：膨胀变形导致围岩强度急剧降低，从而加速了蠕变的发展；结构面的蠕滑则提供了水分向深部围岩渗入的通道，进而加大了围岩膨胀变形的范围及其变形尺度。

此外，天然岩体不只是固相介质一种，而是多相介质的组合。地下水赋存于裂隙岩体内，并受不同地质构造和产状、地形地貌、地层走向、初始地应力和水文地质条件等等，以及各种耦合因素的影响。这里，地应力的大小与主向以及地质构造因素则是制约裂隙岩体中地下水运动——渗流的两种最主要因素。同样，岩体内的地应力场与渗流场二者也是相互作用的：裂隙水流及其在岩体内的渗透性在很大程度上受到地应力的影响；反之，渗流运动产生的动水压力又影响地应力分布（如产生孔隙压力所造成的有效应力等）。此外，裂隙岩体渗流与裂隙张开度密切相关，而裂隙张开度又决定于地应力状态和裂隙组合的表面形貌。这种与地应力场耦合的应力状态多取决于渗流场分布，它们之间都呈复杂多变的耦合关系。一些年来，随着人们对岩土介质水力学特性及水体流动规律认识的深化，地应力场与渗流场方面的相互耦合作用已成为当今研究的热点，并已形成了“岩石水力学”一门新的学科分支。在工程应用方面，地应力场与渗流场相互作用问题的难点还在于：渗流作用力以及地下水运动具有的冲刷与侵蚀作用不仅导致岩体强度降低，且使岩体弹模和变形也发生变化，从而降低洞室围岩的稳定性，有时渗流甚至将起到决定性作用（如对国外一次著名的溃坝事故的分析）；另一方面，岩体的地应力值及其应力状态和变形又会影响岩体渗流特性（渗透性）的变化，从而又反作用地使其渗流场发生变化，它并不指反映在岩体渗透系数（从而决定地下水渗流产生的动水压力）及其应力与变形间的相互耦合关系上，这种相互作用问题的实质还在于岩体变形引起渗流场的进一步变化。这方面研究工作的重点似在于：（1）裂隙岩体内地下水渗流运动规律；（2）地下水渗流对岩体本构关系的影响；和（3）固—液两相介质的耦合分析，等等。上述方面不只是对洞室围岩，其它如岩坡和坝基的稳定性以及水库诱发地震往往也都产生重大影响。

岩石热效应是岩体所赋存的物理环境诸因素中的另一重要方面。它涉及到地热资源（热岩）的开发和利用、核废料深埋处置导致的高温，以及液化石油气和液化天然气在地下贮存进行液化的过程中极大量地吸收周围地层热量产生的低温岩石力学问题。所有这些，都可归属为“岩石热力学”前沿学科的研究领域。有如，在核废料深埋处置问题方面，地下水系统受核废料的高温热效应作用可能造成污染物外泄，必须考虑由于热作用引起岩体温度应力及其内部流体流动变化所导致的岩体渗透性质的改变分析等等。在开发有承压作用的地热资源时，当开采而卸载减压过程中，地热区域内的地应力压强和温度变化以及岩石的渗透率与孔隙率受这种卸压变形的影响分析，等等，都是一种耦合力学的相互作用关系。此外，在油气田工程中，地应力与热效应过程对气与油两者流动影响的非线性耦合分析，也都是这一类的相互作用问题。

众所周知，只是对于简化了的线性系统问题，才能以近似地将（1）地应力场；（2）地下渗流流动；和（3）岩石热效应的三种力学过程视作个别非耦合的、互不关联的三种力学现象

予以分别考虑计算，然后简单地相迭加。而对绝大多数情况的岩体介质言，在岩体地应力场以及地下水渗流 / 地热这些地质营力的共同作用下均呈很强的非线性作用，因而就必须考虑并计入这些营力间的耦合相互作用问题。

综上所述，反映在岩石力学与工程方面的耦合力学与相互作用问题，从大类上分，似可主要列属于以下三个主要方面，即

(一) 裂隙岩体中结构体与结构面力学行为的耦合相互作用；

(二) 岩体所赋存的物理环境效应中，地应力、地下水渗流与地热（高温或低温）三者的耦合相互作用；以及众所熟知的

(三) 岩体与岩石工程结构物的耦合相互作用。

此处，第(三)项所谓的岩体与岩石工程结构物一般应包括：坝基与坝体、岩坡与挡土结构物，以及洞室围岩与地下支衬结构等几种。以地层围岩与地下结构相互作用的分析模型为例，我国自50年代引入所谓地层抗力分析方法以后，形成了以考虑地层对结构变形约束为特点的地下结构计算理论。随着计算机技术的进步，地下结构理论有了更大的发展，目前已经可以在计算分析中按连续或不连续介质力学的非线性问题考虑。在工程设计中全面计入影响地层与结构间相互作用诸因素的条件正日趋成熟。

对围岩介质与地下结构相互作用的分析，概括言之是一个高次超静定问题。此时，需着重研究结构与地层介质两者间的变形协调，一旦这些变形的响应规律确定以后，工程设计所关心的结构变形与内力即可由超静定结构分析方法求得。结构受力和变形的状态不仅与结构本身的材料和直接作用在结构上的荷载有关，而且与地层的变形以及接触界面的工作条件密切相关。此外，由于地层与结构相互作用分析的计算范围大、材料模型复杂、影响因素多，计算工作量一般都很大。这样，地层与结构相互作用分析的研究工作似应包括下列各个方面的内容：

(1) 建立结构的分析模型，研究其力学性态；

(2) 建立地层介质的分析模型，研究其力学性态；

(3) 研究地层与结构交界面的工作条件；

(4) 研究地层与结构相互作用问题的耦合分析方法。

现试以地下工程结构为例，对上述耦合相互作用力学问题的求解分别简述如次。

二、裂隙岩体中结构体与结构面力学行为的耦合相互作用

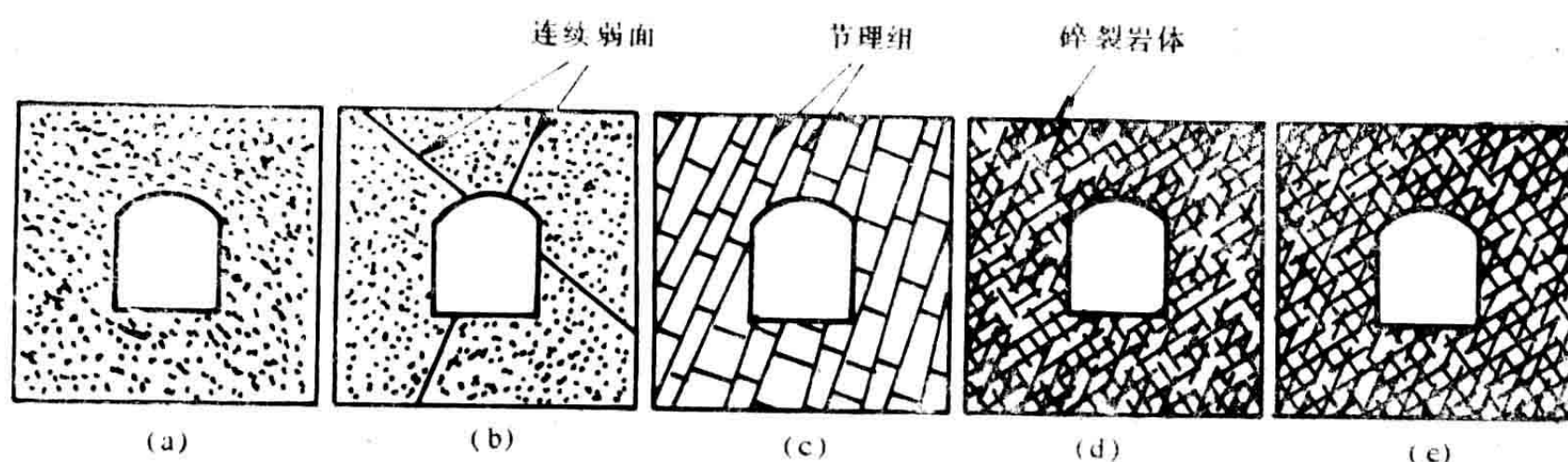


图1 岩体结构及其开挖响应的概念模型

描述岩体结构与洞室开挖响应采用的围岩性态力学模型及其相应的计算机方法, 主要视岩体结构的地质产状及其性态决定, 主要有以下几种, 如图 1 所示。

1. 完整致密岩体——连续介质模型 (图1(a))

按粘、弹、塑性数值分析方法, 其中

(1) 对“弹性”或“粘弹性”分析——边界元法 (J.W.Brady, Crouch);

(2) 对“弹塑性”或“弹—粘塑性”与“弹—粘弹—粘塑性”分析——有限单元法。

2. 具有被单一或多条连续弱面 (蚀变带、软弱夹层、断层、破碎带) 切割成块的非完整连续体模型 (图1(b))

需着重考虑围岩沿弱面的滑移与张开, 采用可计入节理 (夹层) 单元 (D.Goodman) 的有限元法, 按“弹—粘塑性”分析。

3. 受多族节理切割的节理裂隙型岩体模型 (图1(c))

既需考虑节理面的剪切滑移与张开, 又需计及节理岩块间的刚体平移与转动 (P.Cundall, 1971), 处理这类呈非连续性和高度非线性性态的岩体模型宜采用离散元-边界元耦合法作数值分析。

4. 随机分布的遍节理碎裂岩体模型 (图1(d))

围岩位移场可视为准连续性分布, 按粘弹塑性随机节理 (裂隙) 连续介质力学模型, 适宜用随机有限元-边界元耦合法分析。

5. 受节理切割的硬岩 (图1(e))

可不计岩块的变形, 按组合“关键块” (key block) 稳定问题的块体理论模型 (石根华, D.Goodman, 1981), 采用无限块体系统稳定性的关键块-块体元分析。

事实上, 上面的一些分析算法在工程实践和应用上并没有一成不变的统一模式。特别是近年来由于边界元、离散元和块体元的广泛应用, 许多复杂的工程问题已能藉这些数值分析方法及其混合算法得到很好的解决。下面试举数例分别说明。

1. 含连续弱面的非匀质岩体介质内的采场洞室 (图 2)

尽管在整个计算场域内包含有四种不同性质的岩体介质 (区域和材料 1~4), 以及被两组呈非正交状的断裂剪切带所切割的复杂洞室问题, 但也能采用边界单元法来求其弹性解, 得出整个计算域内的位移场和应力场。

2. 层状岩体内的矩形洞室 (图 3)

采用离散元-边界元相混合的数值方法分析这类洞室, 对洞室附近的层状围岩用离散元法描述各层

面的不连续性态; 而对距洞室较远的远场效应则改用边界元法作弹性连续介质体描述, 是十分恰当的。如图 3 所示, 可求得洞室顶板以上层状界面中部有开裂区; 在底板下部亦有拉张开裂情况, 而在顶板上洞室两侧的层状界面上则存在有嵌入滑动区。与现场测试结果完全

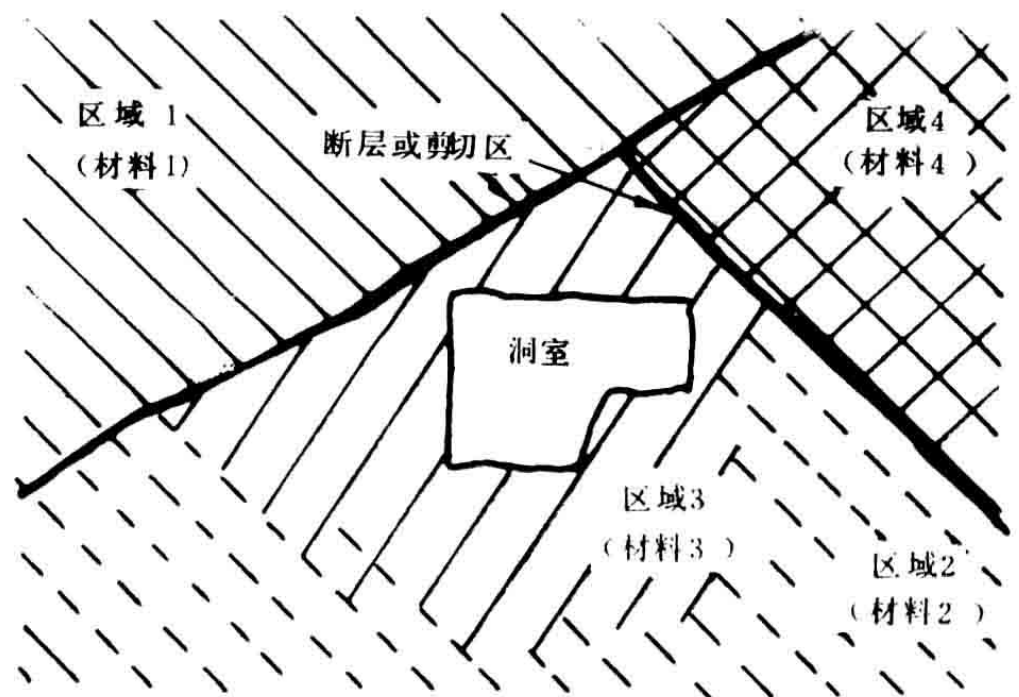


图 2 复杂围岩内的采场洞室问题

吻合。

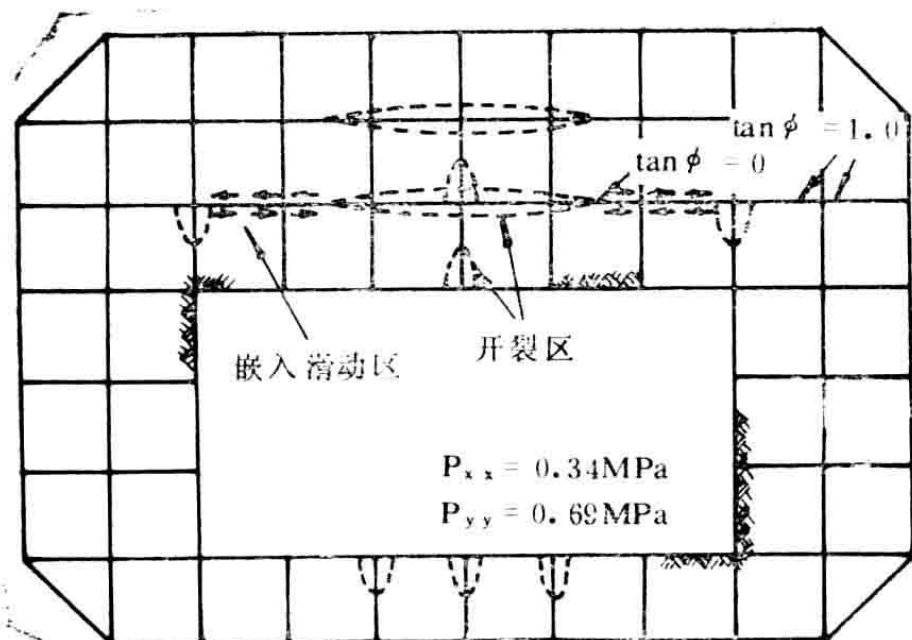


图3 层状岩体内的矩形洞室

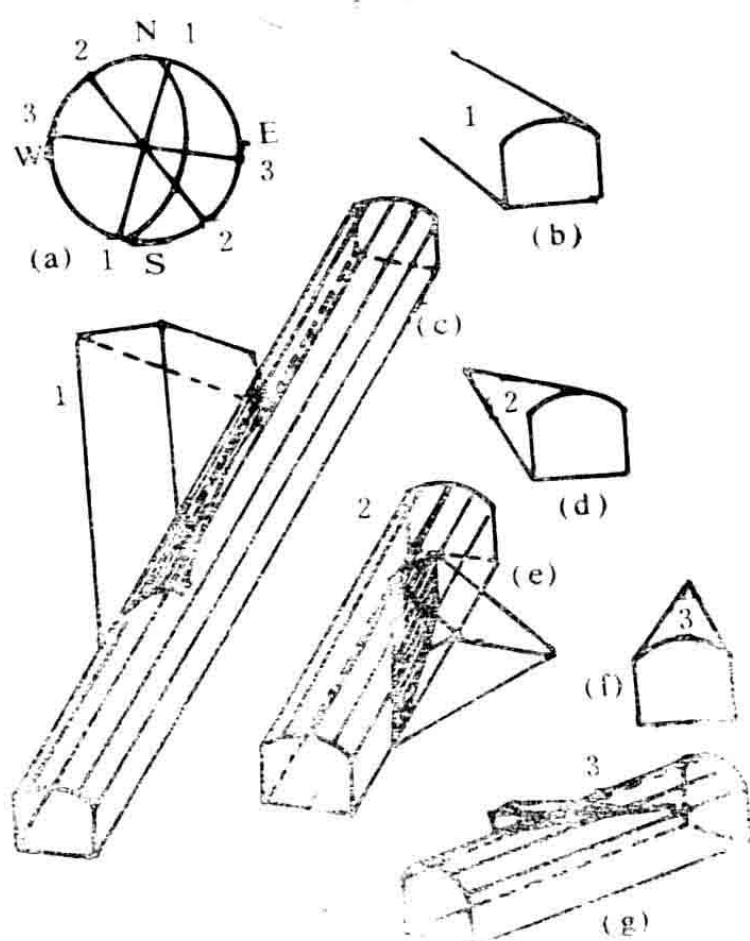


图4 用块体元理论优选隧洞轴线方位

3. 优选隧道洞轴线方位问题 (图4)

采用无限块体系统稳定性的块体理论分析于隧洞选线定位的优化问题可取得理想的结果, 对工程实践极具重要价值。

如图4所示, (a)表示在有以大圆表示的、重复出现的重要节理组(如层面节理)的岩体中通过的隧洞轴线方向1、2和3; (b)和(c)则为平行于方向1的隧洞围岩最大关键块包络与曲面块体的三维透视图; (d)和(e), 同(b)和(c), 但隧洞位置处于方向2上; (f)和(g)亦同(b)和(c), 但隧洞位置处于方向3上。通过用块体元法作如上分析比较后显然可见: (c)的关键块体最大, 即最不利(指隧洞方向1); (g)的关键块体最小, 即最有利(指隧洞方向3); 而(e)的关键块体大小居中, 位于(c)和(g)之间(指隧洞方向2)。这样, 优选后的隧洞轴线自应按方向3布置。这种分析计算方法给出了隧洞定向最佳位置的理论根据。

三、工程开挖二次应力场与地下水渗流场以及温度场的耦合相互作用

(一) 应力场与渗流场的耦合相互作用

这种固-液两相介质相互作用的耦合分析原理是: 在地下水渗流场和工程开挖二次应力场的计算中引入耦合方程, 即建立地下水渗流产生的动水压力 $[F]$ 与岩土体应力状态 $[\sigma]$ 以及渗透系数矩阵 $[K]$ 三者间的相互作用关系: $F_{ij}=f(K_{Rl})$, $\sigma_{ij}=g(F_{Rl})$, $K_{ij}=h(\sigma_{Rl})$ 。于是有 $K_{ij}=G(K'_{mn})$ 。显然, 需要反复迭代才能使耦合应力场达到平衡与稳定。

关于岩体渗透系数的变化, 建议采用以下公式考虑:

$$K=K_0 \exp(-\alpha \sigma_e) \quad (1)$$

式中, K_0 为初始渗透系数; σ_e 为有效应力; α 为实验系数。