

计算机方法在岩石力学及工程中的应用
国际学术讨论会论文集(中文版)
中国 西安 1993年5月24~28日

计算机方法 在岩石力学中的应用

第一卷

葛修润 主编

武汉测绘科技大学出版社

TD31-05

G-889

1

计算机方法在岩石力学及工程中的应用
国际学术讨论会论文集(中文版)
中国 西安 1993年5月24~28日

计算机方法在岩石力学中的应用

第一卷

中文本主编：葛修润

中文本编辑委员会：

丰定祥 白世伟 刘怀恒 冯树仁
余诗刚 周维垣 吴家秀 葛修润

英文本主编：刘怀恒

论文评审委员会：

陈子荫 杨若琼 张有天 郑鸿泰
傅冰骏 葛修润

武汉测绘科技大学出版社

(鄂)新登字 14 号

图书在版编目(CIP)数据

计算机方法在岩石力学中的应用/葛修润主编.

——武汉:武汉测绘科技大学出版社,1994.5

ISBN 7-81030-332-5/T · 52

I. 计…

II. 葛…

III. 岩土力学—计算机—数值—计算方法

N. TU 45

武汉测绘科技大学出版社出版发行

(武昌珞喻路39号 430070)

武汉测绘科技大学出版社印刷厂印刷

1994年5月第1版 1994年5月第1次印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:35.25

字数:900.0千字 印数:1~550册

定价:80.00元

支持单位:

中国自然科学基金委员会
中国统配煤矿总公司陕西省分公司
中国陕西省科学技术协会
西北水电勘测设计院
中国三峡工程开发总公司
中国金川有色金属公司

名誉委员会:

潘家铮, 中国岩石力学与工程学会(CSRME)主席, 总工程师
哈秋龄, 国际岩石力学学会中国国家小组主席, 总工程师
王思敬, 中国科学院地质研究所教授
张庆堂, 西北水电勘测设计院院长

会议组织机构

发起单位

国际岩土力学计算机方法与进展学会(IACMAG)
中国岩石力学与工程学会(CSRME)数学和物理模拟委员会
中国陕西省岩石力学与工程学会

组织单位

西安矿业学院
清华大学水电工程系

会议委员会

赵文杰 教授(主席), 中国西安矿业学院院长
C. S. Desai 教授(副主席), 美国亚利桑那大学
刘怀恒 教授(副主席), 中国西安矿业学院
周维垣 教授(副主席), 中国清华大学

国际顾问委员会

T. Adachi 教授, 日本京都大学

E. Alonso 教授,西班牙卡泰罗尼亚理工大学
H. Adeli 教授,美国俄亥俄州立大学
J. B. Booker 教授,澳大利亚悉尼大学
H. H. Einstein 美国麻省理工学院
C. Fairhurst 教授,美国明尼苏达大学
G. Giod 教授,意大利米兰理工学院
G. Gudehus 教授,德国卡斯鲁厄大学
J. A. Hudson 教授,英国帝国科学技术学院
T. Kawamodo 教授,日本名古屋大学
Z. Mroz 教授,波兰,波兰科学院
G. N. Pande 博士,英国威尔士大学
J. C. Roegiers 教授,美国俄克拉荷马大学
S. Sakurai 教授,日本神户大学
K. R. Saxena 教授,印度,印度土工协会
H. J. Siriwardane 教授,美国西弗吉尼亚大学
G. Swoboda 教授,奥地利茵斯布鲁克大学
S. Valliappan 教授,澳大利亚新南威尔士大学

地方组织委员会

陈至达,教授,中国矿业大学
陈子荫,教授,山东矿业学院
傅冰骏,中国岩石力学与工程学会(CSRME)秘书长
葛修润,教授,中国科学院武汉岩土力学研究所
金铭良,总工程师,金川有色金属公司
刘宝琛,教授,长沙矿冶研究院
刘同有,副经理,金川有色金属公司
邱晓真,中国陕西省科学技术协会
孙 钧,教授,同济大学
王泳嘉,教授,东北大学
夏季华,总工程师,西北水电勘测设计院
谢和平,教授,中国矿业大学
杨若琼,教授,清华大学
袁建新,教授,中国科学院武汉岩土力学研究所
张 清,教授,北方交通大学
张镜剑,教授,华北水利水电学院院长
张有天,教授,水利水电科学研究院
郑鸿泰,教授,西南交通大学
朱维申,教授,中国科学院武汉岩土力学研究所

中文版序言

一九九三年五月在中国陕西省西安市召开了“计算机方法在岩石力学及工程中的应用”国际学术讨论会,至今已近一年了。

这次重要的学术会议得到了国际岩土力学计算机方法与进展学会(IACMAG)的赞助。有20多个国家和地区的学者云集在我国的“六朝古都”,切磋在岩石力学与工程领域中使用最近代的计算机工具和方法的经验,交流最新的学术思想。这次盛会也加深了我国岩石力学和数值分析工作者与国际同行之间的学术交流和相互了解。

刊登在会议英文版文集的文章共计212篇,其中由我国的学者和工程师撰写的论文占总数的80%左右。由此可见,这次会议在一定程度上也是我国近年来在本领域内的研究深度和长足进步的一次展示。

记得在一九九二年十一月召开的论文评审委员会会议上我提出过一个建议——即同时出版中文、英文两套文集。此项想法得到与会者一致赞同。会前征文时,通知中也曾明确要求中国作者来稿需寄按规定格式的中、英文激光打印稿各一份。按照国际惯例,英文本文集是必定要有的。但是对我国广大的岩石力学与数值分析工作者和工程师们来说,有一本中文文集在手可能对他们的工作和学习更有帮助,更便于他们从中了解和掌握这个领域的动态和进展,更利于他们在工作中的应用和发展这方面的成功经验。何况这是在我国首次召开的由国际委员会赞助的岩石力学数值方法方面的规模较大的国际学术会议,能用我国的文字出一套文集,自然也有它自身的意义。

后来,因时间仓促和技术、经济上的原因,会议前已无力考虑中文本的编辑和出版事宜了。

会议结束以后,我们征得会议东道主——西安矿业学院刘怀恒教授等的同意,由中国科学院武汉岩土力学研究所主持中文本的编辑和出版工作。会议的主报告和外国作者的三十多篇论文都已译成中文。我国作者的大部分论文也已收入此套中文文集之中。少数论文因其作者未能如期向我们提交中文底稿而未被列入,对此,我们深表遗憾。这套中文的会议文集共计收入报告和论文165篇,分两卷,精装正式出版。

我要特别感谢中文本文集的编辑委员会和中国武汉测绘科技大学出版社的同仁们。他们为了提高文集的出版和印刷质量,不辞劳苦地将全部文章按统一规格重新打字、绘图和排版,编辑加工工作量之大可想而知,何况这么繁重的工作又需要在很短时间内完成。

我也愿借此机会向西安矿业学院的刘怀恒教授、清华大学的周维垣教授和中国科学院武汉岩土力学研究所的领导表示深切的谢意,是他们的大力支持使中文版文集的出版工作得以顺利进行。

愿此书对我国的岩石力学和数值分析工作者们有所裨益。



一九九四年四月二十日于武昌

英文版序言

这两卷论文集收集了在计算机方法在岩石力学及工程中的应用国际学术讨论会上提交的论文。讨论会由国际岩土力学计算机方法与进展学会(IACMAG)、中国陕西省岩石力学与工程学会及中国岩石力学与工程学会数学和物理模拟委员会发起,西安矿业学院携同清华大学水电工程系组织。

随着现代数字计算机的不断普及日新月异的发展,岩石力学中的计算机方法及其应用在近二十年间取得了长足进展,业已成为一门颇为成熟的学科。其大量成果涉及到岩石力学中的计算机模型、本构定律、材料特性、计算机辅助工程、专家系统等诸多方面,这就为计算机方法在岩石力学工程中的应用奠定了技术基础。尽管岩石力学与工程中非常复杂的理论问题和应用问题在长期内尚未得到解决,但推进计算机方法在工程实践中的应用,从而使之在科学性和经济性方面得到改善却是必要的和及时的。这次讨论会旨在为那些工作在岩石力学与岩土工程中计算机方法领域的研究人员、设计人员与工程师们提供一个论坛以交换他们在理论研究及工程实践中的观点和经验,从而唤起更多的研究者关注计算机方法在岩石力学与工程实践中的应用。

大家对讨论会《征集论文简报》响应十分热烈,大会总计收到 250 余篇摘要。大会顾问委员会由知名专家组成,同时还组成了组织委员会和编辑委员会。两卷论文集中收集了特邀主要报告以及从 20 多个国家遴选出的若干论文。这些论文表现了工程师与科研人员对这一特殊学科的浓厚兴趣。

我们祝愿讨论会的论文集对推进科学交流与增进友谊作出贡献。

值此论文集出版之际,我们由衷感谢国际顾问委员会及组委会各位成员,感谢大会支持者们以及所有为讨论会成功召开作出贡献的人们。对西安矿业学院及给予大会支持并做出贡献的各有关单位,我们亦衷心致谢。

大会组织者以及工作在岩石力学与计算机方法领域的中国同行们热烈欢迎来自各国的与会人员,愿我们愉快地相逢在西安。

刘怀恒
一九九三年二月

朱祚铎 译
冯树仁 校

目 录

主报告

利用扰动状态概念进行本构模拟	Chandra S. Desai(1)
隧道力学问题的若干进展	孙 钧(10)
各向异性岩体的分析	J. P. Carter J. R. Booker(20)
非线性大变形力学理论在岩石力学及工程中的应用	陈至达(33)
岩石工程问题的动态损伤力学分析	S. Valliappan 张沃华(46)
用现场测量结果评价人工边坡的稳定性	S. Sakurai(55)
岩石节理的分形描述	谢和平(63)
不连续岩体波传播问题的界面单元	G. Swoboda 李 宁(69)
中国岩石力学研究的现状与进展	周维垣(80)

一、理论、模型和本构关系

岩石粘塑性状态流变模型	J. Yamalomi(85)
岩石在主时间里应力应变关系的时间效应	郑鸿泰(96)
隧洞变形预报的确定性-随机性模型	黄宏伟 孙 钧(106)
斜井水压裂缝起裂判据的研究	陈 勉 黄荣椿 陈治喜(112)
裂纹在岩石混凝土类材料中扩展的数值模拟——对旋转裂纹模型的评价	Th. Zimmermann 李义军(119)
岩石板裂结构应变软化特性的非稳定后屈曲分析	王敏强(126)
复杂岩体极限平衡数值算法与应用	阮怀宁(132)
边界为曲线的半空间岩体的解析与数值分析	J. J. Golecki S. Y. Mazin(140)
用变分方法求解大变形对称弹性力学问题	赵玉祥 李欢秋 顾祥珍 宋熙太(146)
非饱和地基固结的有限元分析	陈正汉(152)
研究圆形隧道周围不稳定区的两种计算方法	Ch. Marangos N. Papacharissis(159)
节理岩体开挖面上块体随机分布及锚固方式研究	郭爱清 任放 郭玉(166)
柔性路面三层体系的弹塑性分析	胡庆安 尹冠生 夏永旭(171)
脆性岩石中节理发展的数值模拟	V. V. Silberschmidt(179)
节理岩体力学参数的数值分析与确定	袁绍国 雷化南(184)

二、数值方法和耦合方法

塑性力学空间变换的有限元方法	韩贝传 G. Swoboda(189)
----------------------	---------------------

边界元有限元耦合在地下工程中的应用.....	徐干成 郑颖人 谢定义(195)
块体-弹簧法在 Donkin-Morien 矿隧洞中的应用分析	王宝林 于延祥(202)
岩土力学中的模糊边界元法	林育梁 T. N. Little(208)
静态同步松弛离散单元法及其在边坡稳定性分析中的应用	

.....	陈文胜 谷光荣 葛修润(219)
-------	------------------

层状岩体地下洞室三维边界元分析中的体积力处理问题	
.....	李仲奎 H. A. Mang(225)

冻结壁蠕变变形的三维边界元法分析	臧沛英(233)
------------------------	----------

可变形离散元及其在岩体力学中的应用	魏延田 徐长佑(241)
-------------------------	--------------

预报长壁工作面上方地层破坏机理的数值方法	
.....	I. Sel A. G. Pasamehmetoglu D. Sari(247)

弹性半空间地基板的边界元分析	石宏达(253)
----------------------	----------

岩土工程中的非连续方法	Max Y. Ma(262)
-------------------	----------------

边界元法模拟非均质结构与多步骤开挖过程	王志宏(268)
---------------------------	----------

任意多边形块体的离散单元法数值模拟	钱志平 徐长佑(276)
-------------------------	--------------

油井稳定的弹塑性有限元分析	刘夕才 詹千红 林韵梅(282)
---------------------	------------------

三、断裂、损伤、分形

模拟岩石裂缝扩展的数值方法

.....	I. L. Lim I. W. Johnston S. K. Choi(289)
-------	--

岩石、混凝土类材料的断裂能试验及其分形几何研究

.....	刘公瑞 冯乃谦 周维垣(297)
-------	------------------

Hinterglemm 隧道的损伤力学分析	韩贝传 G. Swoboda(303)
-----------------------------	---------------------

层状裂隙岩体塑性-脆性损伤耦合模型与岩质高边坡稳定分析	杨延毅(311)
-----------------------------------	----------

单一裂隙水力特性及计算机模拟试验研究	张有天 刘中 陈平(317)
--------------------------	----------------

岩体质量的分形表征	祝玉学(324)
-----------------	----------

岩石脆性断裂的分形模拟	V. V. Silberschmidt V. G. Silberschmidt(332)
-------------------	--

四、反问题

岩体本构模型的反演辨识理论	袁勇 朱合华 陈清军(337)
---------------------	-----------------

反分析法及其在铁山土石坝中的应用	刘汉龙(344)
------------------------	----------

桩基础在水平力作用下计算长度及弹性模量的反分析

.....	张宗尧 朱文妹 孙文俊(349)
-------	------------------

高坝岩基原位观测位移资料的反馈分析	董继峰 薛玺成 王伟 孙涌(353)
-------------------------	--------------------

冻结壁变形特征参数的位移反分析	方兴华 郝楚候(361)
-----------------------	--------------

LPG 地下储存洞开挖过程中实测位移的反分析

.....	Chung-In Lee Youn-Kyou Lee(366)
-------	---------------------------------

二滩电站导流洞二维非线性有限元分析及模型试验

.....	李旭 袁文忠 屠树根(373)
龙羊峡水电站坝区三维地应力场分析.....	马启超 戚 蓝(381)
煤(岩)层古构造应力场有限元模拟分析	
.....	孟召平 张孝文 赵宗沛(389)

五、动力问题、地震、爆破

爆破荷载模型的改进.....	李 宁 G. Swoboda(398)
地形条件对地震 P 波和 SV 波所引起地面运动的影响	
.....	赵崇斌 S. Valliappan(404)
三维堆石坝横向振动分析简化方法.....	徐志英(411)
群桩动力分析的双桩系数法.....	李翼祺 杨学林(419)
动接触问题的几点探索.....	李 宁 G. Swoboda(425)
广州抽水蓄能电站复杂地质结构计算和围岩稳定分析	
.....	肖 明 俞裕泰(430)
挡土墙在地震荷载作用下的动力分析.....	赵崇斌 徐培英(436)
拱坝抗震分析中的广义自由场输入方法	赵崇斌 S. Valliappan(441)
粘弹性介质中 Love 型槽波衰减的数值模拟	程久龙 刘天放(447)
矩形装药的破岩作用	张 奇 郎永峰(453)
岩体边坡随机有限元动力分析.....	郭雪萍(459)
在动载作用下地下工程的振动分析	
.....	赵玉祥 李欢秋 顾祥珍 宋熙太(465)
岩土介质中瞬态波传播的有限元模拟.....	方 泰(472)
地震作用下平行巷道间矿柱应力的确定	
.....	N. N. Potieva S. V. Antziferov(477)
应用二维动力有限元研究松动岩体.....	陈剑平(481)

六、试验、测量和监控

节理岩体强度特性的物理模拟及其强度预测分析	
.....	朱维中 梁作元 冯光北 李 铀 徐靖南(486)
洞室掘进面围岩应力及位移试验分析	赵震英 叶 勇(494)
岩石峰值后区特性和数值模拟方法探讨	
.....	葛修润 周伯海 刘明贵 丰定祥(502)
用模拟试验预测深厚表土内的井壁受力状态	
.....	程锡禄 杨维好 周国庆 李 毅 陈先德 胡向东(508)
套钻法应力测量数据分析:优化新技术	A. Lizeur H. Baroudi. Ineris(514)
卸荷条件下岩体损伤破坏特征的研究.....	凌建明(520)
北京地铁西单车站 2# 施工横通道开口段结构静载模型试验研究	
.....	朱永全 陈豪雄 吴康保(527)

竖井冻土壁形成和变形规律的物理模拟..... 卢清国(532)

隧道流变特性的模拟试验与计算分析..... 周德培 毛坚强(541)

计算机辅助的三维采矿模型试验应力分析

..... *K. Ramachandra Rao A. G. Paithankar*(549)

利用扰动状态概念进行本构模拟

Chandra S. Desai

(亚利桑那大学 土木工程与工程力学系 美国)

摘 要 本文提出一种可供选择的统一的模拟概念,用以描述材料和界面(节理)的力学性态。它的基础是扰动状态概念(DSC),这一概念可以考虑引起材料相变化的各种微观结构变化,相变化从(最初的)完整状态经过一个“自觉的”自动调节过程,达到完全调整状态(即临界状态)。然后将观察到的材料响应用完整相和临界相响应来定义,这两种响应称为基准响应。观察到的响应对于基准响应的偏差量构成扰动,它是由作用力引起的,并受到摩擦、各向异性、微观开裂、破坏、断裂和蠕变等因素的影响。这种扰动通过一个 D 函数来定义,它表明观测的响应,完整响应和临界响应的关系。扰动状态概念的基本原理具有普遍性,“固体”和界面(即节理)的性态都可以应用数学框架加以描述。我们推导了应力和应变的增量本构方程,对得到的方程进行了积分,以便预报材料和界面在范围很广的各种初始条件和荷载下的力学响应。然后,对照一些地质材料和节理(即界面)在室内试验静力加载和循环加载条件下的性态,对根据本模型得到的典型预报值进行了验证。

我们相信,这里提出的概念可以为描述材料和界面的整个应力-应变-强度响应特性提供一个统一的,具有机能整体性的模拟方法。它可以有效地取代微观-宏观方法,这种方法的困难是:该方法根据对颗粒的微观级研究来预报复杂系统的性态,而对微观级本构响应却缺乏明确的定义。

材料系统通常是非均匀的,并常常有缺陷和不连续面。当这种材料受到外部或内部荷载的作用时,由于上述内在因素的作用,材料通常会出现非均匀应力、应变,产生裂隙、微观开裂以及破坏。因此,材料不能被看作连续介质,一点的应力(应变)的定义也不再是正确的了。当考虑非连续介质中一些区域内的局部应力应变时,必须重新定义在连续介质的假设下使用的各种变量。换句话说,必须通过考虑受到特征尺度影响的“有限”区域或非局部区域,引入材料的非连续性性质。特征尺度取决于构成材料的颗粒或颗粒团的性质。

近来,一些考虑上述效应的方法有:连续介质破坏模型, Cosserat 模型及梯度理论,以及非局部概念。由于材料的宏观响应(或称总体响应)与材料内部结构的微观级变化有关,人们常常使用微观力学方法。这些方法的一个主要缺点是:颗粒级和颗粒团级微观结构性态的本构模型没有适当地加以定义,例如,常有这样的情况,与微观级的描述有关的材料参数是根据对有限尺寸试样的宏观级测量得到的。而且,怎样定量地定义特征尺寸还是一个没有完全解决的问题。另外还有一个重要的问题有待解决,就是:根据对一些单个的颗粒响应的研究,是否可能预报复杂材料系统的性态?文献[1]对这些方法进行了简明的阐述。

1 背景

作者在 1974 年^[2]对超固结土应变软化性态提出了偏差(即修正或扰动)的概念。假定超固结土的响应可以表示为:其正常固结状态下的响应(图 1, 曲线 1)作为基准状态,加上超固结作

用(曲线2)的影响(作为扰动)。正常固结定义为:材料当前应力大于过去应力的状态,而超固结材料的过去应力却大于当前应力。图1是正常固结土和超固结土性态的示意图。超固结土软化响应由它在正常固结作用下的性态响应与扰动(超固结)引起的响应组成。

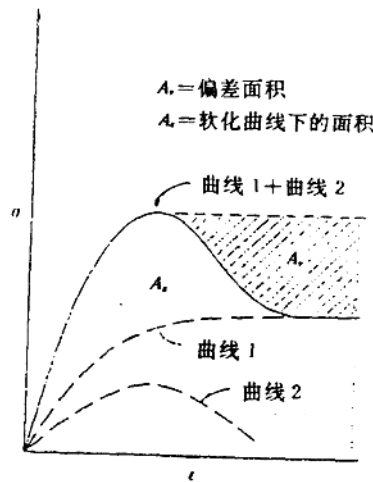


图1 观测应力-应变性状由正常固结土的性状和引起超固结的部分的性状组成

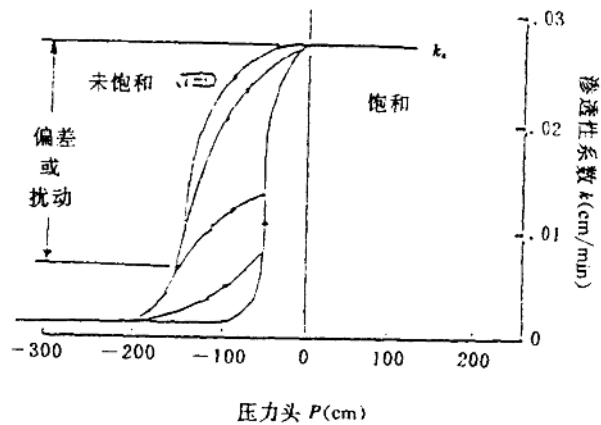


图2 被观测到的渗透性相对于饱和时渗透性的偏差(或扰动)

本文作者还提出并使用了一个类似的概念,称为偏差流方法(RFD),这个方法从1970年以来就被本文作者及其合作者们^[3,4]用于多孔材料自由表面流的情况。在该方法中,偏差,或称扰动,是与压力-渗透性本构关系有关的,完全饱和材料的渗透性 K_s 被当作基准状态,图2。 K_s 与不饱和材料渗透性之差被看作是偏差或扰动。

最近,上述想法被推广^[5,6]到了连续介质破坏模型^[1],其破坏函数(r)用材料未破坏的完整状态或局部状态下的应力与偏差状态下的应力表示,图1。

2 目的

本文的目的是阐述如何将上述扰动状态概念(DSC)推广,用于发展本构关系,以描述材料的力学响应特征。提出这个概念是为了表达地质材料和界面/节理在静力加载和循环加载条件下的性状^[7-12]。我们相信,DSC可以为描述“固体”材料和接触面(界面和节理)的力学响应提供一个具有机能整体性的、统一的框架。这种看法与最近在物理学文献中发表的自动形成的临界状态(SOC)^[13]的看法相似,SOC用于模拟雪崩、地震等灾害性事件。

3 扰动状态概念

在扰动状态概念中,我们假定作用力(机械力,热力,环境力)引起材料微观结构的扰动。结果是材料内部微观结构发生变化。在这个过程中,由于扰动,最初的完整材料逐渐变化,经历一个微观结构“自觉的”或者称为天然的自动调节过程。这里使用自动调节这个说法,是基于这样一个信念,即材料别无选择,只能以某种水平的内部自觉性“进行调整”以适应外部荷载。

在变形过程中的任何阶段,最初完整的材料连续地变化,在材料中一些随机分布的位置,

材料的一部分达到完全调整状态(FAS)。这个混合体的观测响应,或称平均响应应用它在完整状态和完全调整状态(它们称为基准状态)下的响应来表示。基准状态的细节在后面给出,本文假设完全调整状态是临界状态^[14],在这种状态下,材料可以继续承受达到这个状态的应力水平,可以在保持体积不变的情况下产生剪切变形。

4 机 理

材料颗粒的运动和微裂隙的传播引起复杂的现象:由于颗粒间的相互作用,产生相变化,由于处于临界相和完整相的颗粒团的分布是随机的,这种相变的发展也是不均匀的。这种随机的分布取决于密度,颗粒方位,颗粒间性质(摩擦、粗糙度、表面粗糙度等)这样一些特性,并引起应力应变的随机分布。

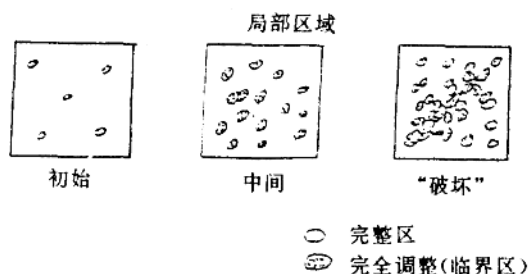


图3 扰动状态概念的机制

随着材料处于临界相的区域范围的增加,处于完整相的区域范围就减小,就达到了两种相结合的局面,这时材料单元可以认为已经“破坏”了,图3。破坏状态是这样一种工程状态,这时材料再也不能承受进一步的荷载,因为它已达到或超过了工程上容许的应力或位移标准。全部材料都处于临界状态的情况是一种只能被逼近(极端的)的情况,它可能是最终的有序状态或无序状态,但这种状态在实际情况中,在实验室和现场都是不可能达到的。文献[1]还给出了其他各种解释,例如哲理性解释:材料有趋向于各向同性状态的趋势,以及自动形成临界状态的概念,渗透和混沌理论等等。

5 用扰动状态概念进行的模拟

观测响应,或称扰动响应(R_s)可用完整响应(R_i)和临界响应(R_c)来表示,图4a:

$$R_s + R_c \Rightarrow R_i \quad (1)$$

为了将 R_s 用 R_i 和 R_c 来表示,定义了一个扰动函数。一般说来,扰动函数是一个张量, D_{ij} , 如果假设只有剪应力是引起扰动的原因, D_{ij} 就可以看作一个无迹张量。但是,在现在的情况下,为了简单起见,将它定义为一个标量(D),在加权意义下表示随机分布的临界相和完整相的作用,图3(a)。因此, D 可以写成

$$D = D(\xi, \rho_0, p_0, R, \theta, t) \quad (2a)$$

其中, ξ 是内部历史参数,如塑性(粘塑性)应变轨迹或塑性功, ρ_0 是(初始)密度, p_0 是(初始)压力, R 是颗粒间,颗粒团间的粗糙度或介面粗糙度, θ 是温度, t 是时间。 D 可以表达成一种简单形式

$$D = D_0 [1 - \exp(-\lambda_1 \xi^2)] \quad (2b)$$

这里, D_0 代表某个响应偏差状态的扰动,图3(b), λ_1 和 λ_2 是材料参数,可以表示为 ρ_0, p_0 和 θ 的函数, ξ 是不可逆应变,即塑性应变 $= \int (d \in \xi, d \in \xi)^{1/2}$ 的轨迹, $d \in \xi$ 是塑性应变张量。 ξ 的偏量部分,即 ξ_0 常在方程(2b)中使用。这个 D 的示意图见图4(b),取 $D_0 = 1$,这表示 $V^c/V = 1$ 的极端性临界状态。方程(2b)在形式上与连续介质破坏模型^[5,6,15]中所使用的相似,但应注意到,扰动状

态概念可以解释任何有关因素(摩擦,各向异性等)的影响,而不局限于通常被称为微观开裂和断裂引起的破坏的这一因素(在这种破坏中,常常假设破坏区域代表孔隙)^[1]。换句话说,扰动状态概念包括的因素不一定非要引起微观开裂和断裂不可。

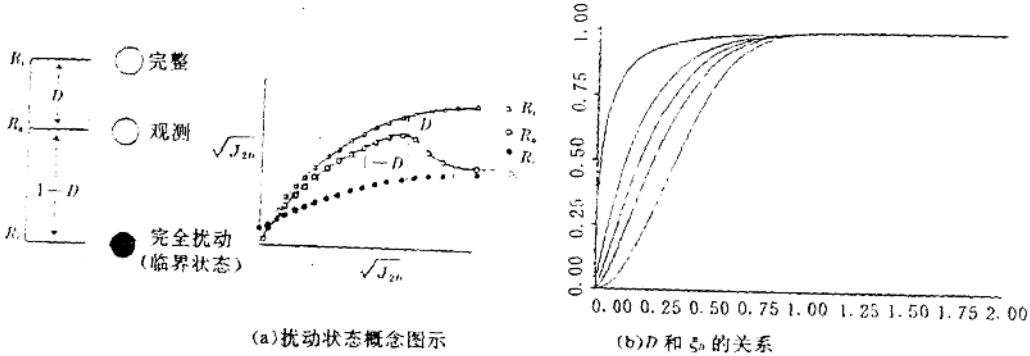


图 4 扰动状态模拟和扰动函数

5.1 基准状态

怎样定义作为基准的完全调整状态和完整状态的响应,这个问题需要加以考虑。

5.1.1 完全调整状态

可以把完全调整状态假设为材料的这样一种状态,在这种状态下,(a)没有剩余强度,如像在某些连续介质破坏模型中那样^[15],或者(b)材料没有抗剪强度,但可以承受静水压力^[6],如像受约束作用的液体,或(c)材料处于临界状态,它可以继续承受达到这一状态的剪应力和静水压力,发生剪应变而保持体积不变,这种情况可以看作是一种液体-固体材料。图 5 表示,无论颗粒材料(砂)最初是松散的还是致密的,它在一定的初始平均压力作用下受剪时,都可以趋近同样的临界孔隙率或密度。

图 6 表示临界状态下应力和体积变化响应。但是,如果静水压力发生变化,材料可能进一步受到剪应力的作用,但会进入相邻的临界状态,图 6(a)。在本研究工作中,我们假定完全调整状态就是临界状态;临界相的响应定义如下。

对于某给定的初始平均压力 $J_1(p_0 = J_1/3)$,随着剪应力 $\sqrt{J_{2v}}$ (J_{2v} 是偏应力张量 S_{ij} 的第二不变量)的增加,应力状态达到临界状态 ($J_1, \sqrt{J_{2v}^c}$)。这种临界状态通常位于一条称为临界状态线的直线上,图 6(a),其斜率为 $\bar{m}$,因此有

$$\sqrt{J_{2v}^c} = \bar{m} J_1^c \quad (3a)$$

在剪切过程中,材料的体积发生变化,其初始孔隙率 e_0 发生变化(减小或增大),取决于材料是压实还是膨胀,图 5。最后,达到临界状态,这时材料的孔隙率变成 e^c 。图 6(b)是 e^c 对 $\ln(J_1/$

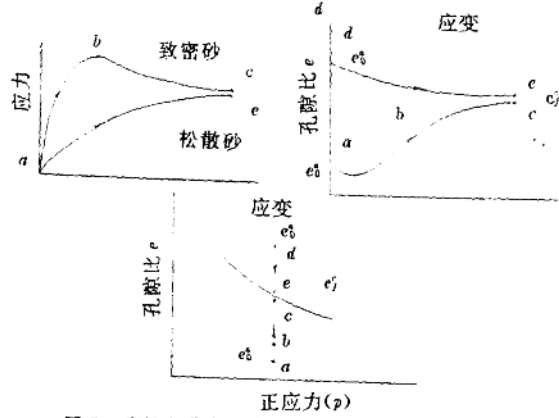


图 5 疏松和致密砂的临界孔隙比(Casagrande)

3Pa)的简图,两者的关系可以表示为

$$e^c = e_0^c - \lambda \ln(J_1/3Pa) \quad (3b)$$

其中 e_0^c 是 $J_1 = 3Pa$ 时 e^c 的值, Pa 是大气压, λ 是图 6(b)中直线的斜率。

在土力学的临界状态概念中^[14],材料在临界状态的性状用方程(3a)和(3b)定义,而达到临界状态以前的性状常常用经典的相关塑性理论来定义。土力学的经典临界状态概念和这里提出的扰动状态概念的一个基本区别

是:对于后者,在变形过程中的任何阶段,材料都是临界相和完整相的混合物。然后,这种混合物的本构响应用这两个相在整个应力-变形历史中的响应来定义,在这个历史的最终的极端状态,这种混合物只有临界相。因为找到了定义已经达到临界状态材料的性状的数学框架,即(3a)和(3b),在这里,我们把临界状态概念当作完全调整状态。但必须注意的是,如上面所讨论的那样,在定义处于完全调整状态的性状时,扰动状态概念对任何适当的描述都是允许的。

图 7(a)表示对一种致密材料的观测响应,或称平均响应,扰动响应(相对于完整响应和临界响应)。请注意这些图中表示临界状态的曲线是一些给定的平均压力值的点的集合。在 J_1 , $\sqrt{J_{2D}}$, $\sqrt{I_{2D}}$ 和 e 空间中的图形表示见图 7(b),其中 I_{2D} 是偏应变张量 E_D 的第二不变量^[12]。

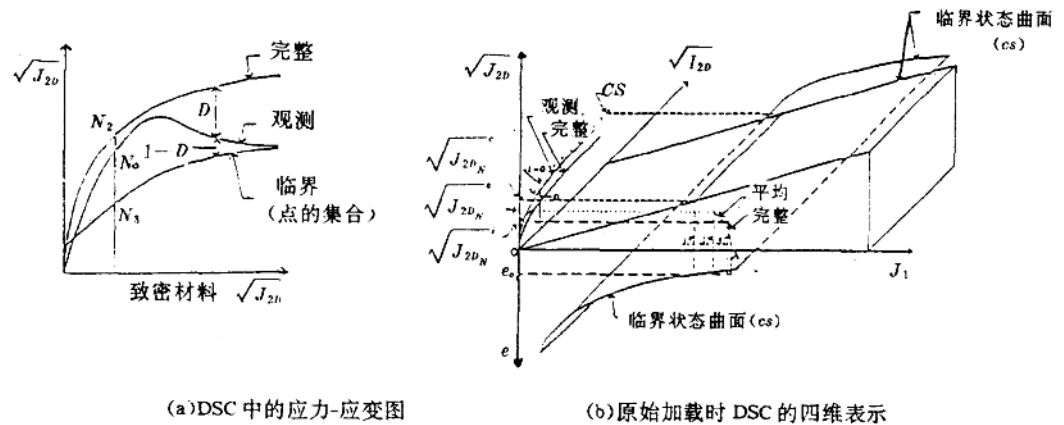


图 7 DSC 的表示法

5.1.2 完整状态

完整响应可以定义为:作为完整材料变形的最初完整材料的响应。这一状态排除被认为会引起扰动的那些因素的影响,在这种意义下,它是一种相对状态。例如,如果把引起破坏,随后又引起软化的微观开裂看作是扰动,那么,没有微观开裂的材料响应就可以看作是完整响应,图 8(b)。而且,对微观开裂引起的非线性弹性响应,线弹性响应就可看作是完整响应,图 8

(a)。

完整响应作为排除引起扰动的各种因素的响应,可以通过实验方法和/或近似方法来确定。考虑一种颗粒材料,可以对它在不同的初始密度(从最疏松到最致密)和各种静水(围压)压力下进行试验,然后可以得到一种典型材料参数变化图^[1]。然后,密度最高时的材料参数可以定义最终完整响应。事实上,每种响应(对给定的 ρ_0 和 p_0)都有自己的局部完整状态,而密度最高时的响应就是最终完整响应。换句话说,完整响应可以表达为 ρ_0 和 p_0 的函数,它可以趋近于最终完整响应(渐近方式)。

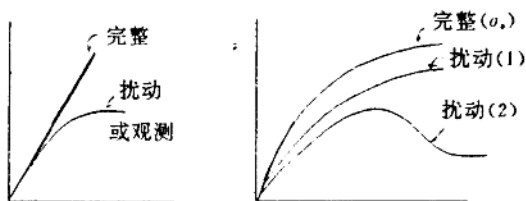


图8 完整响应和观测响应图示

上述实验方法可能比较困难,特别是牵涉到大量本构参数的时候。因此,可以利用一种近似方法。例如,分级单曲面(HISS)塑性模型 δ_1 中的一组参数($m=8$)可定义一种颗粒材料的非关联(摩擦)性状^[5]。然后,材料的响应,去掉代表性状的摩擦部分的参数($n=1$),也就是说, ($m-n=7$)个参数可以定义作为基准的完整性状,图8;这就是分级单曲面(HISS)方法中的相关模型 δ_0 ^[5]。类似地,对于破坏和软化模型(δ_{0+})^[6], $m=10, n=3$ 。与软化响应有关, $m-n=7$ 个参数可以定义完整响应(δ_0 模型)。这是一种近似方法。因为它包含 n 个参数的影响,观测性状是耦合的。

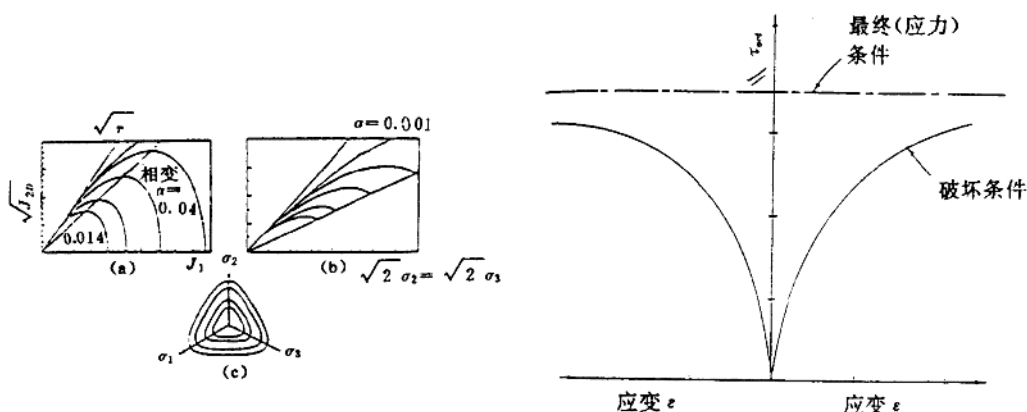
请注意,分级单曲面(HISS)方法允许系统地增加各种影响材料性状的因素,因此是一种非常适合于定义基准状态的方法。这种模型中基本的 δ_0 方法经常用来表示完整响应^[6]。下面是对此方法的简介。

5.1.3 分级单曲面(HISS) δ_0 模型

在这里,相关塑性理论与下面的屈服函数 F 一同使用:

$$F = \bar{J}_{2D} - (-\alpha \bar{J}_1^* + \gamma \bar{J}_1^2)(1 - \beta S_r)^m \quad (4)$$

其中,横道“-”表示相对于 Pa 无量纲化的量, α, n, γ 和 β 是材料参数。图9(a)是在各种应力空



(a)各种应力空间中的 F 图

(b)最终应力

图9 δ_0 模型: F 和最终应力