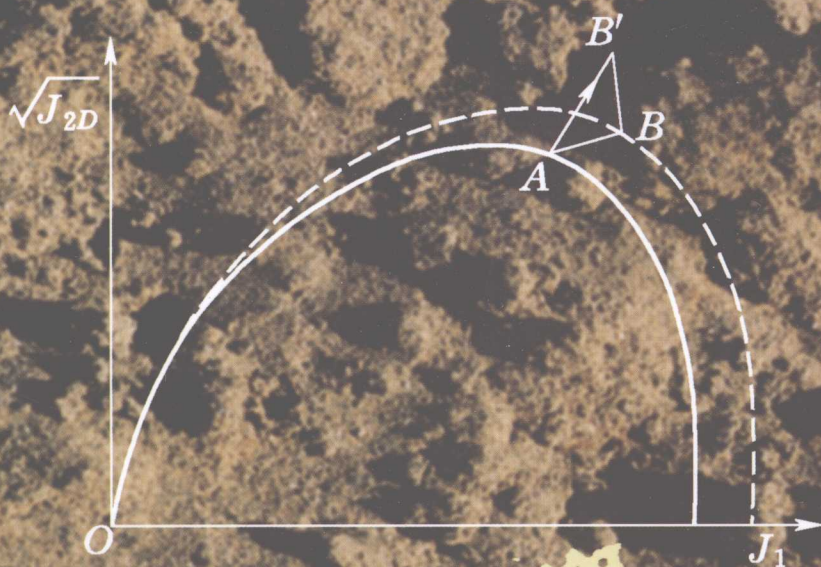


基于扰动状态理论的 若干岩土力学基础问题研究

◎ 郑建业 葛修润 孙 红 著

STUDY ON GEOMECHANICAL FUNDAMENTAL PROBLEMS
BASED ON DISTURBED STATE CONCEPT THEORY



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于扰动状态理论的 若干岩土力学基础问题研究

◎ 郑建业 葛修润 孙 红 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 摘 要

本书针对扰动状态理论体系的逻辑合理性作出细观判断；应用扰动状态理论得到岩石材料的应力应变关系和体应变变化曲线；通过求解扰动状态理论与比奥固结理论相结合的水土耦合方程组，描述结构体的位移和有效应力的变化情况；给出扰动因子的应力各向异性表述方式，制定分级单屈服面模型与各向异性扰动因子相结合的有限元分析步骤。本书理论系统，逻辑清晰，参数明确，程序完备，可供土木工程，尤其是从事岩土力学与工程研究和应用的同行参考，也可作为研究生的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于扰动状态理论的若干岩土力学基础问题研究/郑建业，葛修润，孙红著. —北京：中国水利水电出版社，2009

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6568 - 5

I. 基… II. ①郑…②葛…③孙… III. 岩土力学 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 091410 号

书 名	基于扰动状态理论的若干岩土力学基础问题研究
作 者	郑建业 葛修润 孙红 著
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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 8 印张 190 千字
版 次	2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	23.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

工程问题的最终解决与三大方程的求解紧密相关。三大方程中，平衡方程相对易得，位移连续方程可以给出简化结果，而本构方程必须人为确定，且确定难度较大。材料进入塑性阶段后，本构方程的复杂性更加凸显。继续跟踪模拟材料的各种特性，比如间断、黏性、损伤、大应变、体积改变、水土耦合、非关联性、各向异性、加载卸载等，则本构方程的复杂性更为可观。如果本构方程比较简单则模拟结果不完备，如果本构方程过于复杂则不实用。为了接近材料的天然性和不可设计性，新的本构方程及其修正方法不断出现。

以增加少量参数为代价，充分利用现有的本构方程解决更多的问题，将是一种经济有效的方法。扰动状态理论就是一种利用现有资源解决现时问题的思路：利用本构模型得到参考响应之后，对参考响应进行加权平均处理或修正处理，可以得到满意的模拟结果。

本书各章节的内容重点依次是：介绍理论发展概貌、给出理论合理性证明、应用理论解决问题、扩展理论应用范围。本书提出的扰动因子演化方程把细观实验现象和宏观实验现象沟通起来。本书改进了实验曲线弹性段压密点前后弹性模量的变化对计算结果的影响；模拟了岩石常规三轴受压实验中扰动因子参数随着围压变化的情况；描述了单轴受压情况下岩石体应变的变化规律。本书将扰动状态理论引入比奥固结理论，利用修正剑桥模型和扰动因子相结合，得到水土耦合的联合方程组，求得给定边界条件下任意时刻的位移、孔压和有效应力的变化。本书讨论了扰动因子的各向异性表述方式和相应有限元的实现过程、漂移修正和物理量初始值确定方案，确定了各向异性扰动因子引入分级单屈服面模型的实现步骤，有限元程序源代码利用 MATLAB 和 FORTRAN 混合编写，并在书后的附录中列出。

扰动状态理论仍然属于经典的弹塑性岩土力学范畴。但是，通过平均化方法或修正方法解决问题的方式，为推进问题的逐步解决提供了可能性。扰动状态理论的本质就是充分挖掘现有资源的应用潜力，利用简单方法解决复杂问题。

作 者

2008 年 12 月

符 号 表

RI	相对完整状态	μ_m	单位质量对 X 射线的衰减系数
FA	调节后状态	ρ	密度
AV	平均响应状态	I_1	X 射线入射强度
D	扰动因子	I_2	X 射线出射强度
HISS	分级单屈服面模型	l	X 射线穿透长度
ϵ_v	体应变	k_H	X 射线衰减系数比例因子
v	下标, 表示与体积相关	$\overline{H}_4$	试样整体的 CT 数均值
$\bar{\gamma}$	剪应变	$\overline{H}$	试样某扫描层面内 n 个点的 CT 数均值
p	静水压力	δ_H	试样某扫描层面内 n 个点的 CT 数方差
q	剪应力	$\Delta \overline{H}_4'$	试样整体的 CT 数均值的相对变化量
i	上标, 表示 RI 状态	$\Delta \overline{H}'$	试样某扫描层面内 n 个点的 CT 数均值的相对变化量
e	上标, 表示 FA 状态	$\Delta \delta_H'$	试样某扫描层面内 n 个点的 CT 数方差的相对变化量
a	上标, 表示 AV 状态	A_1	扰动因子参数
A	扰动因子参数	A_2	扰动因子参数
Z	扰动因子参数	V	材料体积
D_u	扰动因子参数	e	孔隙比
ξ_D	有效塑性偏应变	e_0	初始孔隙比
E_{ij}^p	塑性偏应变	τ_r	剪应力比
p	上标, 表示塑性	m'	FA 状态材料参数
ξ	有效塑性应变	λ_1	FA 状态材料参数
s	下标, 表示固体材料	e_α	FA 状态材料参数
M	材料质量	M_s^c	极限状态材料的质量
$f(\sigma_{ij}, p_e, \mathcal{R})$	弹塑性加载函数	M_s	总质量
p_e	累积塑性应变	J_1	应力张量第一不变量
$\mathcal{R}$	损伤		
f	屈服势函数		
ψ	损伤势函数		
$f(\sigma_{ij}, p_e)$	扰动状态理论加载函数		
H	CT 数		
μ	物质对 X 射线的衰减系数		

J_{2D}	应力偏张量第二不变量	F^a	实际观测力
J_{3D}	应力偏张量第三不变量	F^i	RI 状态材料部分受到的力
K_E	RI 状态的弹性模量	F^c	FA 状态材料部分受到的力
p_a	大气压	A	材料总面积
K	RI 状态的弹性模量材料常数	A^i	RI 状态材料部分面积
$\bar{s}$	RI 状态的弹性模量材料常数	A^c	FA 状态材料部分面积
v	下标, 表示空隙	r_e	应变比
η_z	硬化指标相关参数	ν	泊松比
γ	极限状态参数	S_{ij}	应力偏量
ξ_v	ξ 中与体积变化相关的量值	H	硬化函数
ξ_D	ξ 中与静水压力相关的量值	κ	非关联参数
C	弹性刚度矩阵 (本构矩阵)	κ_1	非关联参数
σ_{ij}^*	转换应力	κ_2	非关联参数
R	材料的抗拉强度	γ_v	体积比例参数
$\bar{c}$	材料的黏聚力	λ	塑性流动因子
Q	分级单屈服面模型塑性势函数	e_c	先期固结压力对应的孔隙比
α_Q	塑性势函数硬化指标	p_c	先期固结压力
α_0	塑性势函数硬化指标初始值	E_v	体积模量
A_3	扰动因子参数	I	单位矩阵
Z_1	扰动因子参数	$\{F\}^e$	单元结点的力
Z_2	扰动因子参数	B	单元转换矩阵
Z_3	扰动因子参数	σ'	有效应力
F	分级单屈服面模型屈服函数	h	水头高度
h_i	各向异性相关参数	N_h	水头高度的形函数
$\bar{w}$	孔隙水相关参数	H_h	渗透矩阵
N	黏性相关参数	B_h	渗流系数的转换矩阵
$\bar{\gamma}$	黏性相关参数	k_w	渗流系数
β	形状参数	W_2	结点流量
n	体积改变参数	θ	时间的插值比例
m	材料性质参数	Δt	时间增量
S_r	应力比	γ_w	水的重度
α	硬化指标	$\Delta\delta$	结点位移增量
α_1	硬化指标相关参数	$\{h_{t+\Delta t}\}^e$	$t + \Delta t$ 时刻单元水头高度
η_1	硬化指标相关参数	N_i	形函数
C^p	弹塑性刚度矩阵 (本构矩阵)	L_h	渗流与变形耦合矩阵
γ_F	硬化模式参量	λ_c	压缩指数
		κ_c	回弹指数

M	临界模量
Δe^p	孔隙比增量
A_h	硬化模式变量
G	剪切模量
ξ_i, ψ_i	局部坐标
u	单元水平位移
v	单元竖向位移
w_i	Gauss 积分点权系数
Ω	单元面积
Γ	单元边界
$M^i(D)$	RI 的扰动叠加矩阵
$M^e(D)$	FA 的扰动叠加矩阵
γ_m	材料重度
K_0	侧压力系数

dW	荷载增量
dq_i	位移增量
J	Jacobian 矩阵
$\widetilde{C}^e$	弹性损伤刚度矩阵 (本构矩阵)
$\widetilde{C}^p$	弹塑性损伤刚度矩阵 (本构矩阵)
q_w	单位宽度渗流量
$\sum_{j=1}^{n-1} [C_j^{(ep)}] \{d\epsilon_j^i\}$	应力增量累加得到的当前应力
p_w	孔隙水压力

目 录

前言

符号表

第1章 绪论	1
1.1 地质材料的本构关系研究	1
1.2 扰动状态理论的平均化思想	2
1.3 扰动状态理论的特点	5
1.3.1 与内时理论比较	6
1.3.2 与损伤理论比较	7
1.3.3 与非局部模型理论比较	8
1.4 扰动状态理论研究现状	8
1.5 本书主要内容和创新点	10
本章小结	12
参考文献	12
第2章 扰动状态理论合理性的细观分析	18
2.1 理论合理性问题的提出	18
2.2 计算机层面扫描	19
2.3 硬化和软化与CT数变化规律的关系	20
2.3.1 试样整体和整体分层扫描结果	21
2.3.2 试样薄弱区分层扫描结果	25
2.3.3 扰动状态理论的合理性	27
2.4 扰动因子演化方程的CT数统计值引入	28
本章小结	29
参考文献	30
第3章 基于扰动状态理论的岩石受压响应描述	31
3.1 典型岩土工程问题的扰动状态理论方法	31
3.1.1 排水土问题	32
3.1.2 不排水土问题	33
3.1.3 岩石问题	34
3.1.4 平均化思想	34
3.2 岩石单轴受压应力应变关系描述	35
3.2.1 岩石应变软化描述的直接迭代法	35
3.2.2 三种典型岩石应力应变关系描述	37
3.2.3 弹性压密点之后的响应描述	37

3.3	岩石单轴受压体应变变化描述	40
3.4	岩石常规三轴受压应力应变关系描述	40
3.5	应用 HISS 模型的岩石受压响应描述	42
3.5.1	分级单屈服面模型 HISS	43
3.5.2	模型参数的物理意义	47
3.5.3	模型与扰动因子的结合	48
3.5.4	初始刚度矩阵	51
3.5.5	模型参数选取	52
3.5.6	本构公式说明	53
	本章小结	55
	参考文献	56
第 4 章	基于扰动状态理论的 Biot 固结有限元分析	58
4.1	利用修正剑桥模型描述土的反应	58
4.2	扰动状态理论导入平衡方程	60
4.3	渗流连续方程	61
4.4	综合方程	62
4.5	有限元程序编制	62
4.6	算例	65
	本章小结	68
	参考文献	68
第 5 章	基于扰动状态理论的应力各向异性响应描述	70
5.1	各向异性扰动因子	70
5.2	土的各向异性响应有限元模型	73
5.2.1	基于 HISS 模型的有限元实现	73
5.2.2	硬化漂移修正	77
5.2.3	物理量初始值确定	78
5.2.4	各向异性扰动因子的引入	79
5.2.5	扰动因子的叠加	81
5.3	算例	81
5.3.1	混合编程	81
5.3.2	轴对称问题算例	82
5.3.3	平面应变问题算例	85
5.3.4	参数调试	88
5.4	关于扰动状态理论本质的讨论	89
	本章小结	89
	参考文献	89
第 6 章	结论与展望	91
	参考文献	94
附录		95

第 1 章 绪 论

只利用一种本构模型有时不能很好地描述材料响应。如果利用两种本构模型作为参考,取其各自描述结果的加权平均值作为最终结果,就有可能大大提高响应描述的准确性。当然,这两种参考本构模型的选用不是随意的。本构模型必须对应材料的本质特征。扰动状态理论 (disturbed state concept theory, 简称 DSC) 的意义在于利用本构模型来达到描述材料响应的目的。扰动状态理论认为,材料受到外部荷载作用时的响应是两种参考响应的加权平均,处于相对完整状态的材料的响应和处于调节后状态的材料的响应以一个扰动因子作为权相加构成材料的真实响应。相对完整状态 relative intact state, 简称 RI。调节后状态 fully adjusted state, 简称 FA。平均响应状态 average response state, 简称 AV (平均响应状态也可称为真实响应状态 actual response state, 简称 AR)。扰动因子 disturbance factor, 简称 D 。RI 是理想化或人为规定的“完美”状态,FA 是理想化或人为规定的“极限”状态。在外部荷载作用初期,材料中处于“完美”状态的部分多而处于“极限”状态的部分少;随着外部荷载作用的发展,材料内部颗粒结构性质发生变化,越来越多的“完美”状态部分自动转变为“极限”状态部分,直到材料内部每一点都达到“极限”状态。“扰动”的涵义是在外部荷载作用下材料内部颗粒结构性质自动发生变化。两种参考响应都与材料本身的性质有关,每一种参考响应对应一种本构模型。扰动状态理论认为两种参考本构模型得到的响应都是材料本身固有的响应。扰动是材料的自身性质,外部荷载作用只是诱因。材料性质的变化过程是自发发生的。

扰动状态理论是一种适合多种工程材料的应力应变响应描述理论。本书将扰动状态理论应用于土和岩石的力学响应描述。扰动状态理论的两大核心内容是本构模型 HISS 和扰动因子 D 。理论的应用步骤是利用 HISS 模型或其他合适的模型,通过扰动因子 D 的作用,描述材料的响应。分级单屈服面模型 HISS 一般用来描述相对完整状态 RI 的材料响应。扰动状态理论利用本构模型的最终目的是描述材料受荷时的响应,不在于深入研究本构模型本身。

1.1 地质材料的本构关系研究

地质材料作为最常见的工程材料,最先进入岩土工程的研究领域。地质材料不同于混凝土材料:混凝土是可以设计的,先知道了材料的性质,再去应用它,情况就会相对简单,可以采用规范要求等强制措施保证其工作在弹性阶段;在宏观上混凝土的变形又是位移连续的。而地质材料是天然形成的,性质复杂,离散性显著^[1,2]。同样的材质,即使所处位置相距很近,物理力学性质也可能会完全不同^[3]。即使是同一种材料,在不同的应力路径下力学性质也不一样^[4]。由于地质结构面的存在,地质材料具有位移不连续,各向异

性等显著特点^[5,6]。

地质材料的位移不连续性是最大的问题,大多只能采取等效连续或拟连续的处理方法。一般取若干材料试件,得到几种加载方式下的实验数据,标定参数,提出一个本构模型^[7],用这个本构模型来描述材料性质。但是这个本构模型只适合用来计算试件所在地某种荷载条件下的材料响应^[8]。它可能适合计算静态加载,而不适合动态加载和循环加载。这样,只能尽量多做实验,其实验条件模拟实际荷载作用方式,然后按不同的本构关系计算材料响应,取各种响应结果的包络图作为参考。由于多种限制因素的存在,很难提出普遍适于各种材料,或是适合于各种工况的本构模型^[9]。

在岩土工程开挖以后才能更详细地了解地质材料真实的产状分布情况,因此采用“勘测—设计—施工—再设计—调整施工措施”这样及时反馈、互相促进的问题处理过程是必然的。在施工过程中,计算所需的初始条件和边界条件在不断变化,使得设计和校核工作不可能一劳永逸。这也更加显示出监测工作的重要性。有学者提出,某些岩土工程是开放的复杂巨系统,半经验半理论公式的使用是合理的^[10]。一些绕开本构关系的方法也属于半经验范畴,不具有普遍适用性。

一般的,描述岩土材料的力学响应,需要反映剪胀性和压硬性。剪胀性,是指剪应力不仅产生弹性和塑性的剪变形,而且会使材料的体积发生膨胀或收缩。压硬性,是指静水压力不仅产生弹性和塑性的体应变,而且还会引起剪应变刚度的增大,即材料强度的提高。图 1.1 中 ϵ_v 表示体应变, $\bar{\gamma}$ 表示剪应变, p 表示静水压力, $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, q 表示剪应力, $q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ 。从图 1.1 中可以看到 p 、 q 与 ϵ_v 、 $\bar{\gamma}$ 之间相互交叉影响的关系。

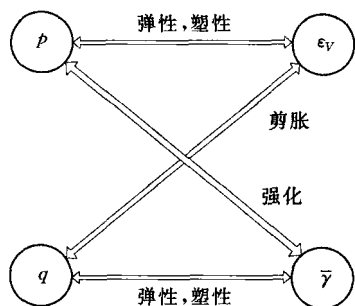


图 1.1 岩土材料的本构关系内涵

本构关系的研究值得进一步加大力度。研究侧重也需要多元化^[11]。从物理力学机理角度出发,或从唯象的角度出发^[12],本构理论的研究取得了很多成果,多种相应的计算方法也不断出现^[13]。扰动状态理论就是一种本构理论。在物理力学机理方面,它有自己的假定条件^[14];在应用过程中,它是唯象的^[15]。扰动状态理论与其他本构理论并无本质的不同,仍然是针对简单物质的有限变形情况的,是基于连续介质力学和经典热力学理论体系的。但是,扰动状态理论的侧重点是反映材料响应,而不是深入研究本构模型本身。

1.2 扰动状态理论的平均化思想

“扰动”是指材料内部颗粒结构性质的变化。材料响应和扰动因子相互关联。解决问题时,可以选择合适的参考状态,用室内实验方法标定扰动因子的有关参数。

扰动状态理论认为,外部作用引起材料内部微观结构的扰动,致使材料内部每一点的微观结构发生变化,各点从相对完整状态 RI,经过一个自发自动的调整过程,达到调节

后状态 FA。在变形过程中，材料中的每一点都是由处于 RI 的部分和处于 FA 的部分组成的混合物。荷载引起两部分的相互作用，导致材料微结构的变化。材料总体上的变化，等价于每一点上的变化。自动自发的调整过程意味着材料能够调整自身的内部结构，在一点处失稳后可以马上调整到使其能够再次有效地承受外部作用，如图 1.2~图 1.4 所示。这些调整包含颗粒的转变、颗粒的旋转、微裂纹的产生等。RI 可以用线弹性、弹塑性或其他合适的模型来表示^[16,17]。FA 可以用临界状态模型或其他模型来表示，FA 对应着因材料裂纹或孔隙的扩展而导致的接近破坏的状态。

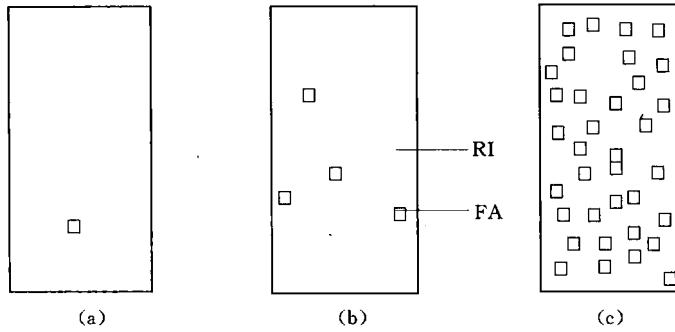


图 1.2 材料自调整过程

(a) $D=0$ 或 D_u ; (b) $D>0$; (c) $D \rightarrow D_u \rightarrow 1$

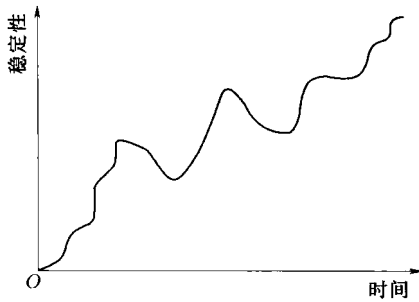


图 1.3 材料单元体局部失稳后的调整

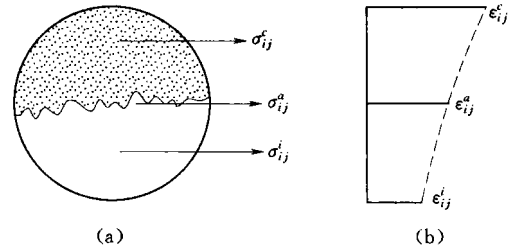


图 1.4 材料每一点的应力应变

(a) 应力; (b) 应变

RI 部分的弹性模量可以取为材料的初始弹性模量值。由于微裂纹产生等因素的影响，受荷时材料实际的响应不等于 RI 能够表现出的响应。假定材料中的某一部分不受扰动的影 响，则 RI 可以基于这部分材料的弹塑性硬化特性而定义。处于 FA 的材料部分已达到极限状态。因为 FA 部分受到 RI 部分的包围和限制，所以把 FA 看成具有一定的强度和变形能力比把它看作孔洞更为合适。FA 部分的材料也可以假定为能够像 RI 状态的材料那样受荷，应力应变关系与 RI 状态相似，但强度小很多。以字母 a 表示材料的实际受荷状态 AV (即 Average state, 也可称为平均状态、实际响应状态或观察状态)， i 和 c 分别表示 RI 和 FA 状态， D 为扰动因子，有

$$\sigma_{ij}^a = (1 - D)\sigma_{ij}^c + D\sigma_{ij}^i \quad (1.1)$$

扰动因子 D 的表达式, 即 D 的演化方程为

$$D = D_u(1 - e^{-A\xi_D^Z}) \quad (1.2)$$

$$\xi_D = \int (dE_{ij}^p dE_{ij}^p)^{\frac{1}{2}}$$

式中 A 、 Z ——扰动因子的参数;

D_u ——扰动因子的参数, $0 < D_u \leq 1$;

ξ_D ——塑性偏应变 E_{ij}^p 的累积值;

E_{ij}^p ——塑性偏应变的轨迹值, 或称为有效塑性偏应变, 上标 p 表示塑性;

σ_{ij} —— D 的函数, 而 D 是塑性偏应变 E_{ij}^p 的函数, 因而也是 σ_{ij} 的函数。

应力、应变和扰动因子之间相互关联。

扰动状态理论方法是这样一种思路: 只要选定两种状态及其相关参数, 并通过监测计算出材料当前的塑性应变值, 就可以求得材料的响应。在解决工程问题时, 可以本着简单实用的原则选取 RI 和 FA 的状态参数。标定扰动因子 D 的参数 A 和 Z 时, 取原状样品做室内实验, 实验条件尽量模拟现场条件, 并选择与实际情况相似的应力路径加载方式。如果某工程荷载情况很简单, 不需要考虑卸载和动力效应等因素, 则只需通过常规受压实验来完成参数标定工作。

RI 和 FA 有各自的本构关系。Desai (1986 年) 使用一种硬化模型 HISS 作为 RI 的本构关系。但经过 RI 与 FA 的加权平均, 实际状态可以表现出软化特性。这一点恰好可以用于体现岩石材料的如下特征: 在峰值后区, 材料的一部分已遭破坏, 这部分可视为一种介质, 但其他的部分仍然未遭破坏, 此部分可视为另一种介质, 这时材料处于一种复杂状态^[18], 此时的后区曲线, 只是这种复杂状态的综合特征的反映^[19]。RI 的本构是理想的本构, 认为 RI 中没有扰动的参与, 所以 RI 曲线不需反映全过程, 并可能一直硬化下去。引入 D 之后才能反映真正的全过程响应, 如图 1.5、图 1.6 所示。

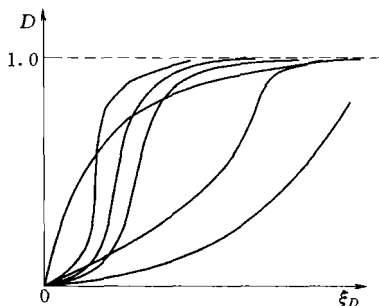


图 1.5 扰动因子演化方程的曲线形式

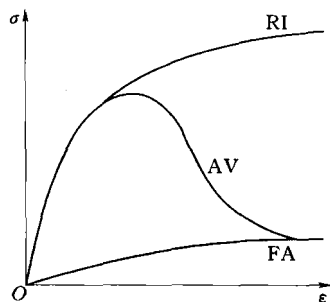


图 1.6 参考状态的加权平均

扰动状态理论体系是建立在 RI、FA、 D 这三个基础之上的。

处于相对完整状态 RI 的那部分材料的响应不受引起扰动的因素的影响, 这些因素包括摩擦、微裂纹、损伤、软化等。RI 状态表示一种相对于受扰动状态而言的“完美”状态。相对完整状态下的材料通常可以通过弹性、弹塑性或黏弹塑性等模型来表达。Desai 提出分级建模的方法, 采用符合关联流动法则的各向同性硬化条件的模型 HISS 来描述材

料在相对完整状态下的本构关系。

处于调节后状态 FA 的材料已达到了极限状态，这个极限状态具有一定的能力，但能力有限。调节后状态的材料通常可以用如下四种状态模型描述：①材料不具有任何强度，如同连续介质损伤模型中的孔隙；②材料不具有抗剪强度，但能承受静水压力，类似受到约束的液体；③材料在给定的静水压力下具有抗剪强度并达到临界状态，此时只发生剪切应变而无体积应变，可当作受约束的液固混合体来处理；④材料能够像 RI 状态的材料那样受荷，应力应变关系与 RI 状态相似，但材料强度小得多。

扰动因子函数 D 描述材料从相对完整状态逐步演化为调节后状态的动态过程。扰动因子 D 通常是依赖于方向的，因此是一个向量。对简单问题，它通常被假定为一个标量，表示在各个方向上扰动程度一致。扰动因子本身的变化规律即扰动因子演化方程可以有多种函数形式，最一般的情况下采用威布尔函数^[20]形式。

扰动状态理论方法最直接地适用于连续场的、小变形的、适用有限元方法求解的问题。利用此理论解决问题的步骤是：①勘察现场的受力状况，如围压、加载和卸载情况等；②设计实验，取得理想化的 RI 的本构关系，并选定几组应力应变关系实验值作为 RI 状态的本构表现，以此为依据确定 RI 的屈服函数中的参数；③取原状样品做室内实验，实验条件模拟现场条件，标定出 D 的参数 A 和 Z ；④确定了 RI、FA 和 D 的数学表达式，则任一实际状态的应力可由此时的塑性应变、扰动值、应力值三者迭代求出。扰动状态理论最适合解决连续场有限元问题。它有自己的接触单元处理方法。接触单元也具有相应的 RI、FA、 D ，这表明接触单元实际上还属于连续问题范畴。既然是连续场，裂隙等还需要做平均化处理，使其转化为连续问题。

塑性偏应变轨迹 ξ_D 和塑性应变轨迹 ξ （或称为有效塑性应变，是 HISS 模型的重要变量）表明扰动状态理论的理论体系中包含有合适的内变量^[21]。在不可逆热力学中，内变量能够宏观地表征材料内部组织结构的不可逆变化。加载历史可以用内变量的一组集合值代替。能量耗散过程表现为广义摩擦力阻止内变量变化的过程。在变形中引入内变量记录材料的热力学历史，可以将各种变形统一到一个参数中。 ξ 和 ξ_D 就是扰动状态理论定义的内变量。材料在外部作用下的力学行为，与材料的内部结构相关，宏观变形的描述联系着微观结构的变化。

1.3 扰动状态理论的特点

根据需要，参考状态的描述能够选用从简单到复杂的一系列模型，例如从线弹性模型到黏弹塑性模型。扰动状态理论的重要特性之一是它有能力描述弹性、塑性、硬化、软化、循环荷载、疲劳破坏等材料响应。

扰动状态理论适用于多种地质材料和金属材料。适用于多孔介质的有效应力概念，适于建立排水或不排水条件下土的本构模型。扰动状态理论模型表现出一种分级模型的理念：首先是关联流动的各向同性硬化模型，稍做修改就成为非关联流动的各向同性硬化模型；接着引入扰动因子 D ，就可以考虑软化；或者在 D 中再引入若干参数，就可以考虑循环加载情况。

扰动状态理论继承了损伤力学的思路。然而，扰动状态理论认为“空洞”也是可以

承受载荷的,这一点与损伤理论有本质区别。可以认为扰动状态理论发展了损伤理论的思路。损伤力学主要研究微裂纹成核之前的材料性能,微裂纹成核之后的研究方法是断裂力学要考虑的事情。此理论还是在研究“微孔洞”,而不是裂纹,属于成核之前这一阶段,因此把微孔洞做平均化处理。如果做类比,可以说它是岩石力学方法而不是岩体力学方法。岩体力学中的节理是不适宜平均化的,不能把节理平均到岩石中去形成等效体,研究节理一般要用到断裂力学的方法。此理论在处理节理时,采用的办法是定义节理单元,把节理看作特殊的岩石单元,使材料拟连续化。节理单元也是用本方法来描述的。

一般认为,硬化材料是稳定材料,软化材料是不稳定材料^[22]。扰动状态理论要用稳定材料的模型来描述不稳定材料的响应,这样就回避了很多不稳定材料研究中的难题。软化效果是由硬化效果通过扰动因子 D 修正得来的,刚度矩阵保持正定。扰动状态理论吸收了前人提出的临界状态概念,把它作为一种参考状态,临界状态概念成为理论的一部分。把“损伤”做平均化处理的思想,对孔洞的力学性能的改进,以及分级解决问题的理念,是理论的创新之处。使用模型时无需考虑损伤局部作用效应,无需考虑材料软化带来的计算稳定性问题。

扰动状态理论是建立在已有力学理论基础上的新理论。它吸收了包括自组织理论、临界状态理论及损伤力学等理论的优点,认为材料在外界作用下产生的变形和破坏是其自我调整的过程,它的基本原理简单,思想方法新颖。扰动状态理论是一种机理性的研究方法。扰动状态理论是通过材料的相互作用机制来模拟实际响应的,它虽然强调对微结构的考虑,但并不要求在微观尺度上定义本构关系。扰动状态理论是一种整体性的研究方法。扰动状态理论能反映材料的完整力学响应,包括峰值前后的行为及其变形破坏特性。

扰动状态理论较其他理论方法的优势在于:①扰动状态理论既可表示材料的硬化过程,又可表示软化过程;②扰动状态理论把两部分构成的混合物作为一个整体进行统一的描述,而不是把材料的响应与裂隙的响应做叠加;③扰动状态理论在分析问题,不需要考虑微裂纹相互作用和微观力学模型;④基于扰动状态理论的数值计算能有效克服网格相关性问题,从而提高计算效率。

以下将扰动状态理论与其他三种理论做比较。

1.3.1 与内时理论比较

内时理论^[23]即内蕴时间理论。理论认为塑性材料的现时应力状态是该点邻域的变形和温度历史的泛函。变形历史由一个内蕴时间值来度量,内蕴时间值取决于材料特性和变形程度。材料内部组织的不可逆变化要满足热力学条件,这个不可逆变化通过内变量来表征。得到内变量的演变规律,就可以给出显式表达的本构方程。内蕴时间模型不关注屈服面这个概念,不把确定屈服面作为理论的基本工作。不过,屈服面、硬化规律等可以作为内时理论模型的特殊情况。该理论必须定义恰当的内蕴时间标度,建立起相应的内变量相对于内蕴时间的变化率。扰动状态理论同样是受到热力学约束,从内变量理论出发的,也需要定义一个可以表示耗散材料不可逆变化的度量值 ξ_D ,但扰动状态理论必须确定屈服面。

1.3.2 与损伤理论比较

扰动状态理论与损伤理论都遵守热力学第二定律这一本构方程建立的最基本原则^[24]。扰动状态理论在某种程度上类似于传统的损伤理论，如扰动叠加矩阵与损伤变量的定义是相似的，扰动因子的表达式与损伤的演化方程是相似的。威布尔函数形式并不为扰动状态理论或损伤理论所特有，自然界的许多事物的进化与衰退现象都表现为这种较通用的函数形式。耦合损伤理论内涵如图 1.7 所示。

扰动状态理论可以解释当材料变形过程中因扰动减小，材料强度在软化后又发生强度增长的现象。传统的损伤理论解释不了这种现象。扰动状态理论通过 RI 和 FA 两部分之间相互作用机制来描述微裂纹的相互作用结果。RI 和 FA 两部分的定义依赖于对宏观试件的实验观察结果。扰动状态理论源于微结构，但不需要在微观上考虑本构定义。更无需考虑微裂纹的相互作用这样的难题。扰动状态理论的物体单元如图 1.8 所示，损伤理论的物体单元如图 1.9 所示。

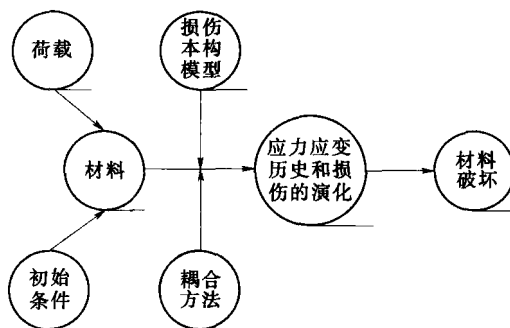


图 1.7 耦合损伤理论内涵

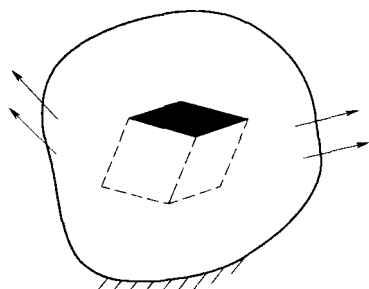


图 1.8 扰动状态理论的物体单元

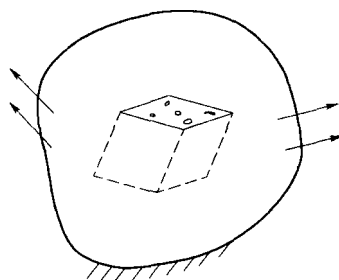


图 1.9 损伤理论的物体单元

在弹塑性损伤介质的增量形式本构方程中，加载函数的一般形式为 $f(\sigma_{ij}, p_e, \mathcal{R})$ ，其中 p_e 是累积塑性应变， $\mathcal{R}$ 是损伤。一般 p_e 和 $\mathcal{R}$ 互相独立，但加载函数 f 却与二者相关。需要通过一致性法则得到流动因子。 f 是包含了损伤的屈服势函数。相应还需要提出一个

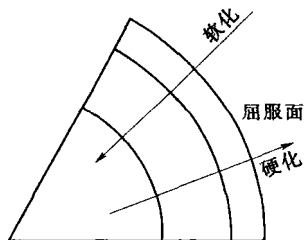


图 1.10 应力空间偏平面上的加载面变化

损伤势函数 ψ_D ，用来确定损伤 $\mathcal{R}$ 的演化方程。一般认为屈服势 f 和损伤势 ψ_D 互不相关。而扰动状态理论中所用到的加载函数形式为 $f(\sigma_{ij}, p_e)$ ，与 $f(\sigma_{ij}, p_e, \mathcal{R})$ 相比，损伤 $\mathcal{R}$ 被排除在外^[25]。或者说，这里的损伤 $\mathcal{R}$ ，不带有耦合性。同时，扰动状态理论的工作始终是在应力空间之中进行，无需因为存在软化现象而把问题转化到应变空间之中。如图 1.10 所示，硬化问题和软化问题都可以在应力空间解决，软化效果是平均化的结果而不是模型本身描述的结果。软化问题的加载面并不需要真正缩小。

1.3.3 与非局部模型理论比较

发生变形局部化现象是材料不稳定的重要表现。局部化的产生意味着控制方程椭圆性的丧失,即刚度矩阵正定性的劣化,导致应变的连续性被破坏。变形局部化表现为材料局部形成应变的不均匀分布现象,即存在应变梯度。非局部模型^[26]认为介质中某一点的应变不仅与该点的应变有关,而且与该点周围一定范围内其余点的应变有关,这就需要定义点的一个附属区域,求得附属区中应变的加权平均值。非局部模型应用于弹性体是成功的。模型并不能模拟应变软化现象。对应变的非局部平均化处理可以克服网格依赖问题。特别的,在扰动状态理论与非局部模型 Cosserat 介质^[27]的比较中,认为 Cosserat 介质是具有微观结构并且具有非均匀性的介质。介质的微观结构由介质的特征尺寸表示。材料的单元体有一个特征尺寸,表明点的影响范围。介质单元体各个面上的应力、应变不是均匀分布的,而是具有一定的梯度。单元体上除作用有应力外,还作用有偶应力,即反映应力梯度的单元面积力矩。需要在基本方程中引入与偶应力相应的变形分量。这些变形分量包含了平动位移和微观转动。这样就增加了自由度数。而扰动状态理论不增加自由度,虽然它一样可以考虑非局部效应。扰动状态理论不依赖网格。它的平均化思想,就已经将应变梯度问题考虑在内了。这里的平均化是广泛的平均化处理,不是只限制在某一点上。扰动状态理论中 RI 部分和 FA 部分之间相互作用,包含了塑性应变和塑性应变梯度的作用,实际已经考虑了非局部效应。特征尺寸的概念已经被隐含,所以不存在网格依赖性。网格依赖性与网格细化不同,网格依赖性是一种病态的。传统损伤模型描述局部化反应,随着有限元网格的逐渐细分,局部化区域会随之缩小以致消失,破坏将在能量耗散很小的情况下发生,这是不合理的,是网格依赖性的表现。

1.4 扰动状态理论研究现状

国外学者已经取得的成果多为参数的标定验证,或将已标定的模型应用在各向同性的,小变形平面问题中,如应用在焊料合金、混凝土、黏性土、岩石、密实砂、结构性土等的实验现象解释工作中。由这些文献可以看出,理论基本上没有进入到各类岩土工程的实际应用领域中。理论有着深远的实际应用潜力。这里主要对国外学者的工作在七个应用领域范围内做一些介绍。

1. 在应变软化方面

Varadarajan 等(2001 年,2003 年)提出了堆石坝材料和片岩的本构模型^[28,29],模型较好地反映了材料的剪胀性,但是所需的实验设备要求比较高。Michael(2001 年)使用非破坏性的声波分析法描述结构物下部基础模型试件的应力应变关系^[30]。Siriwardane 等(1999 年)从宏观的角度来分析应变局部化及相关的应变软化现象,建立了相应的有限元模型^[31]。Desai 等(1997 年)讨论了模型参数的一般标定过程,介绍了新开发的实验设备^[32],设备在做循环剪切实验时可以同时测得孔隙水压力变化。Frantziskonis 等(1997 年)在文献[33,34]中认为调节后状态是应力释放区域材料的状态。Desai 等(1996 年)建立了基于应力应变和非破坏行为的材料本构模型。参数通过测量超声波波速等方法获得,实验材料是水泥砂浆和陶瓷复合材料^[35]。Katti 等(1995 年)预测了处于循环荷载作用下饱和非扰动黏土不排水实验的材料变形和孔隙水压力的变化规律^[36]。