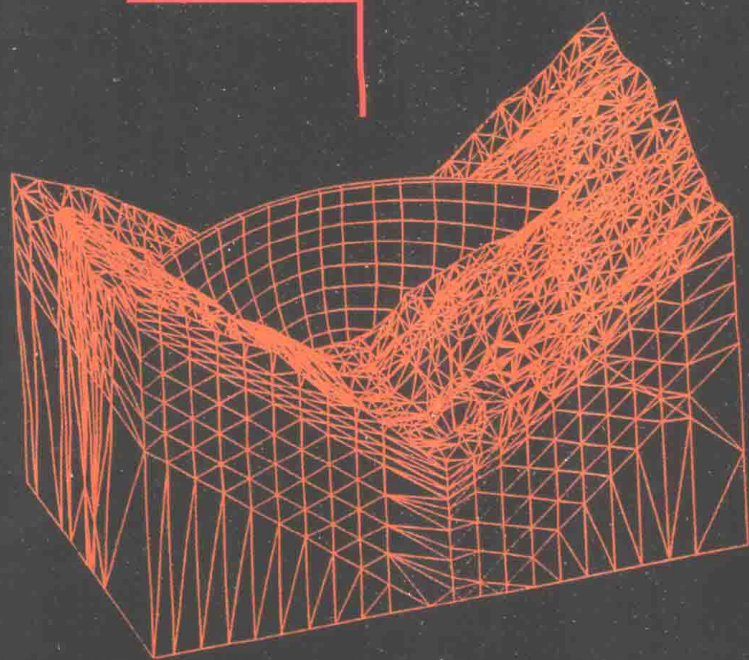


# 高坝复杂岩石地基及 岩石高边坡稳定分析

陈胜宏 著

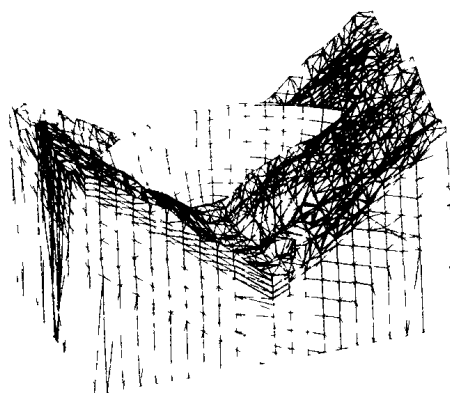


中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

武汉大学水工结构工程“211”学科建设标志性成果

# 高坝复杂岩石地基及 岩石高边坡稳定分析

陈胜宏 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 前 言

水电是我国能源工业的重点发展方向。“十五”期间,水电能源开发布局进一步向西南和西北的大江、大河及高山、峡谷转移,工程规模进一步加大。规划设计中的龙滩碾压混凝土重力坝和水布垭面板堆石坝高度已突破 200 m,锦屏、小湾与溪洛渡拱坝达到 300 m 级。高坝大库带来一系列的新课题,其中复杂岩石地基及岩石高边坡稳定是高坝枢纽建设中的关键技术问题之一。武汉大学在“211”建设项目论证中,把水工结构工程列为重点建设学科,并把高坝复杂岩石地基及边坡稳定作为重点研究方向。其研究成果成为学科建设的标志性成果。

岩石地基与岩石高边坡是一种成因复杂且岩性、结构、变形条件各异的地质体。影响地基与边坡稳定与变形的的主要内在因素有原始应力状态、地下水状态、岩石的构成及特征、地基与边坡形状、岩体结构特征、岩体中软弱带的分布特征等;影响地基与边坡稳定与变形的的主要外在因素有施工开挖引起的卸荷和应力调整、施工爆破引起的岩体损伤和动力荷载、由于库水位变化和降雨及泄洪雾化雨而引起的地下水位变化等。可以说,岩石地基与岩石高边坡的稳定是水工结构中重要而难度较大的课题。

工程界对岩石地基与边坡稳定性的评价,大体有定性评价和定量评价两大类。

定性评价,包括历史分析法和工程地质类比法,这是基本的方法,其要点是:①对地基与边坡的发育历史进行分析,从它的过去看它的现在,并推测其未来的稳定趋势;②对影响地基与边坡稳定的诸多因素进行分析,在大量调查研究的基础上,根据和本地基与边坡地质条件类似的地基与边坡的稳定状况,来评价本地基与边坡的稳定状况,并推测其未来的稳定趋势。定性评价的优点是能综合考虑各种因素,无需试验和计算,即可快速对地基与边坡的稳定状况和未来的稳定趋势进行推测,为勘测、定量评价和综合治理创造条件。

地基与边坡稳定性的定量评价常采用刚体极限平衡法,其基本假定是:视岩体为刚体,不产生变形但传递力。在此假定的基础上,通过力的平衡分析,获取滑动面的反力,进而计算相应的安全系数。刚体极限平衡法的优点是:计算简单,参数和安全系数可由室内外实验结合工程经验和设计规范确定。缺点是:不能计算岩体的变形,而在某些情况下,变形的计算是很重要的(如拱坝坝肩,山体中开挖的船闸边坡等);当滑动面由两个及两个以上平面组成时,滑动面上的反力为超静定,此时必须对反力的方向或大小进行假定,有可能引入较大的计算误差;仅能用于滑动破坏的评价,对崩塌和蠕动等变形破坏的边坡尚缺少

成熟的分析方法。

属于定量评价的应力应变分析法近年来发展很快。按理论体系大体可分为等效连续介质力学方法和不连续介质力学方法,前者包括有限单元法、边界单元法、差分法等,后者包括离散单元法、不连续变形法、刚体—弹簧元法、块体单元法等。近年来出现的数值流形元法和无单元法等方法具有综合两类方法的特性。应力应变分析法的主要优点有:可考虑复杂的边界条件、介质力学性质、结构轮廓和实际施工运行过程;可考虑岩体内不同级别的结构面的影响;可考虑与渗流及温度的耦合;可考虑综合加固的机理进行加固件的优化布设。主要缺陷有:建立合理反映岩体应力应变特点和破坏机理的模型较为困难;数值分析前处理复杂且工作量大,软件不规范,计算结果因人而异;获取参数困难且工程类比经验不多;安全系数取值无标准。针对这种状况,国内外研究者与工程界密切合作,开展了广泛深入的研究。作者所在的研究集体在为国内一些重点水利水电工程服务的过程中,也取得了有特色的成果,本书便是这些成果的总结。

本书的工作是近5年国家有关科技项目的资助下完成的,这些项目主要有:

(1) 岩体的加固机理及弹粘塑性自适应有限元分析,国家自然科学基金重大项目子题。

(2) 岩体的三维弹粘塑性块体理论与p型自适应分析,国家自然科学基金面上项目。

(3) 高拱坝抗滑稳定安全系数及岩体力学参数研究,国家“九五”重点科技攻关项目子题。

(4) 弹粘塑性块体理论与分载法的耦合分析,国家“九五”重点科技攻关项目子题。

(5) 工程岩体的不连续弹粘塑性变形分析及可靠度评价,国家教委高等学校博士学科点专项科研基金。

(6) 水工结构的自适应弹粘塑性有限元理论,国家教委高等学校博士学科点专项科研基金。

(7) 水工建筑物反馈设计与施工方法研究,国家电力公司重点科技项目。

本书的成果也是作者与同事们团结协作共同获得的,参加本书内容研究的主要有:汪卫明、陈尚法、徐明毅、程昭、曹新红、张君禄、王劲松、夏怀孝、陈敏林、李桂荣等。

作者还要感谢徐青女士,她非常细致地阅读了文稿,并提出了一些很好的建议。

陈胜宏

2001年6月

# 目 录

## 前 言

### 第一篇 弹粘塑性有限单元的理论与方法

第一章 加锚节理岩体的力学模型和有限单元法分析.....	1
第一节 加锚节理岩体的等效力学模型研究 .....	2
第二节 加锚节理岩体的离散力学模型研究 .....	12
第三节 弹粘塑性计算的时步自适应研究 .....	21
第四节 实验室试验的验证 .....	23
第五节 三峡工程应用实例 .....	25
第六节 宝珠寺工程应用实例 .....	28
第二章 自适应有限单元法研究: h 型理论 .....	33
第一节 一般概念 .....	33
第二节 平面网格生成系统 .....	34
第三节 网格误差估计及网格尺度估计 .....	36
第四节 渗流有限元计算中的 h 型自适应研究 .....	37
第五节 自适应有限元计算软件系统集成 .....	39
第六节 三维 h 型理论的初步研究 .....	41
第七节 算例 .....	47
第八节 三峡工程应用实例 .....	50
第九节 水布垭工程应用实例 .....	53
第三章 自适应有限单元法研究: p 型理论 .....	58
第一节 阶谱单元及其基函数 .....	59
第二节 离散误差估计与自适应升阶方法 .....	73
第三节 p 型有限元的关键算法 .....	79
第四节 p 型有限元程序的实现 .....	88
第五节 算例 .....	91
第四章 反馈分析有限单元法研究 .....	96
第一节 反馈分析的基本理论与方法 .....	96
第二节 三峡工程应用实例 .....	98
参考文献 .....	107

### 第二篇 弹粘塑性块体元的理论与方法

第一章 三维复杂岩石块体系统的识别与信息自动建立 .....	114
--------------------------------	-----

第一节	矢体的概念 .....	114
第二节	块体系统识别的数据结构 .....	115
第三节	块体系统识别方法 .....	116
第四节	特殊情况的处理 .....	119
第五节	块体识别的主要计算方法 .....	121
第六节	算例 .....	124
第七节	小湾工程应用实例 .....	125
第二章	岩体的三维弹粘塑性块体元法 .....	129
第一节	岩坡中楔形体稳定分析的基本问题 .....	129
第二节	有限单元法分析的结论 .....	130
第三节	刚体极限平衡法的改进 .....	131
第四节	岩体的三维弹粘塑性块体元方法 .....	134
第五节	算例 .....	144
第六节	小湾工程应用实例 .....	146
第三章	岩石块体系统的渗流分析 .....	151
第一节	渗流模型与基本方程 .....	151
第二节	基本方程的离散 .....	153
第三节	无压渗流分析 .....	153
第四节	防渗帷幕和排水孔幕的模拟方法 .....	154
第五节	算例 .....	154
第六节	小湾工程应用实例 .....	155
第四章	弹粘塑性块体元法与拱梁分载法的耦合分析 .....	158
第一节	拱梁分载法分析 .....	158
第二节	耦合分析 .....	167
第三节	小湾工程应用实例 .....	172
第五章	弹粘塑性块体元法的其他应用研究 .....	184
第一节	加固分析 .....	184
第二节	随机分析 .....	189
第六章	广义弹粘塑性块体元法的研究 .....	196
第一节	数值分析与模型试验的比较 .....	196
第二节	广义弹粘塑性块体元法的初步研究 .....	197
第三节	广义弹粘塑性块体元法的发展 .....	204
参考文献	.....	210
索引	.....	213

# 第一篇

## 弹粘塑性有限单元的理论与方法

有限单元法是研究复杂工程结构的重要手段，但其计算结果的可靠性依赖于三方面的保证：

- (1) 力学模型要合理，能基本反映特定工程对象岩体的变形和破坏的基本要素。
- (2) 模型内含的参数要正确，要考虑实验室和现场试验条件的限制以及施工期反演的可能性。
- (3) 有限元网格离散要客观，且操作简单，能被工程师乐意采用。

本篇总结了作者近几年在水工结构和岩土工程结构有限单元法方面的研究和应用心得，包含三部分内容：①加锚节理岩体流变模型和弹粘塑性有限元算法；②水工结构和岩土工程结构自适应有限元分析理论和软件系统开发；③水工结构和岩土工程结构的反馈分析与预报。

### 第一章 加锚节理岩体的力学模型和有限单元法分析

在岩石地基和边坡中，岩体不可避免地存在断层、节理等结构面，为了使结构能达到规定的安全度和减小变形，加固处理是经常被采用的有效措施。另外，在大坝结构中，一些接缝（如永久横缝）和结构钢筋（如抗震钢筋）等也都需合理模拟。

在加锚节理岩体的力学分析模型方面，国内外研究成果非常丰富，但大部分成果集中在锚固件与节理和围岩的相互作用、长锚索尾根部受力和屈服状态、群锚的弹塑性模型和损伤力学模型、常规室内和现场试验，以及反分析获取参数的方法等方面（Spang, Egger, 1990; Egger, Zabuski, 1991; Egger, Fernandes, 1983; Egger, Pellet, 1991; Kaiser et al., 1992; Yazici, Kaiser, 1992; Hyett et al., 1992; Bawden et al. 1992; 葛修润, 刘建武, 1988）。

在数值分析方面，研究方向大致可分为两类：一类是节理和锚杆的离散模拟（ST. John, Van Dillen, 1983; Aydan, 1989; Swoboda, Marence, 1991; Swoboda, Marence, 1992; Chen, Egger, 1997），另一类是节理和锚杆的等效模拟（Pande, Gerrard, 1983; Sharma, Pande, 1988; Larsson, Olofsson, 1983; 杨延毅, 1994; 朱维申, 张玉军, 1996; Chen, Pande, 1994; Chen, Egger, 1999）。两类方法各有所长，离散模拟有可能对锚杆和节理的细节进行详尽的描述，而等效模拟则可处理大规模的复杂三维问题。两类方法的基本难点

都是锚固件在节理面上的力学行为和锚固件—砂浆、砂浆—岩体接触面的正确简捷的模拟。

## 第一节 加锚节理岩体的等效力学模型研究

### 一、流变模型

#### (一) 基本原则

锚固件与节理岩体的相互作用机理和力学模型是加锚节理岩体研究的基础之一。在系统锚杆方案中，锚杆对已有或可能产生的节理裂隙的限剪和限裂作用是其加固作用的主要机理，力学模型应能加以反映。对预应力长锚索，张拉阶段锚根段与围岩的相互作用、传力方式、破坏机理以及二次灌浆后全锚索在围岩中的作用等问题也有赖于正确的力学模型。

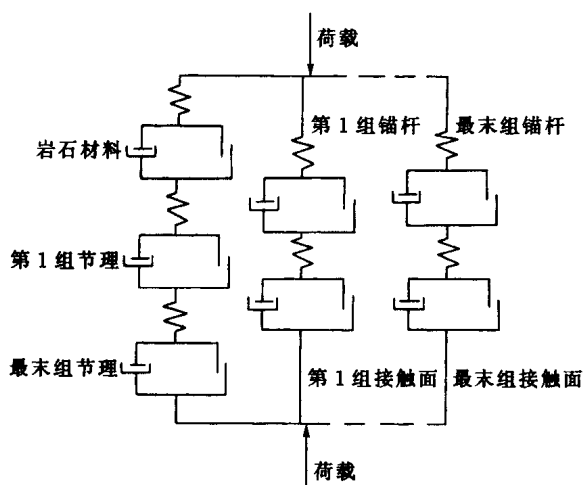


图 1-1-1 Pande 采用的流变模型

图 1-1-2 (a) 所示的代表单元，含两组节理和一组锚杆，受均匀铅直荷载作用，在锚杆与第 1 组和第 2 组节理的交点 1 和交点 2 上，由于变形条件不同，锚杆的应力也将不同，而按图 1-1-1 的模型，锚杆应力在代表单元内被均化，不能反映这种差别。图 1-1-2 (b) 所示的代表单元，两组节理倾角都是 45°，物理力学参数也相同，锚杆水平布置，在均匀铅直荷载作用下，没有宏观剪应

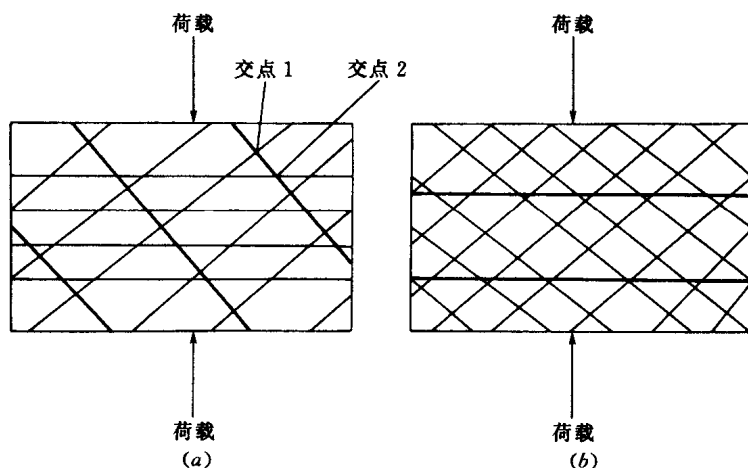


图 1-1-2 含两组节理一组锚杆的代表单元

——锚杆；——节理



力产生，从而按图 1-1-1 的流变模型，锚杆仅受拉应力，不存在剪应力，实际上，由于局部剪切变形的存在，在锚杆与节理面的交点，锚杆除受拉外，还受剪切作用，忽视这种局部化应力将会过低估计锚杆的应力，从而得出不安全的结论。

为了更好地反映加锚节理岩体的变形和破坏机理，我们提出了图 1-1-3 所示的流变模型(Chen, Pande, 1994; Chen, Egger, 1999)。

该模型隐含以下 4 条基本原则：

(1) 应变叠加原则。加锚节理岩体的应变增量等于加锚岩块与各组加锚节理的应变增量之和。

(2) 应力组合原则。加锚岩块中的应力增量由岩块和锚杆共同承担；加锚节理中的应力增量由节理和锚杆共同承担。

(3) 应力一致原则。加锚节理岩体、加锚岩块及各组加锚节理的应力增量相等。

(4) 应变一致原则。加锚岩块中锚杆的应变与岩块的应变相等；加锚节理中锚杆的应变与节理的应变相等。

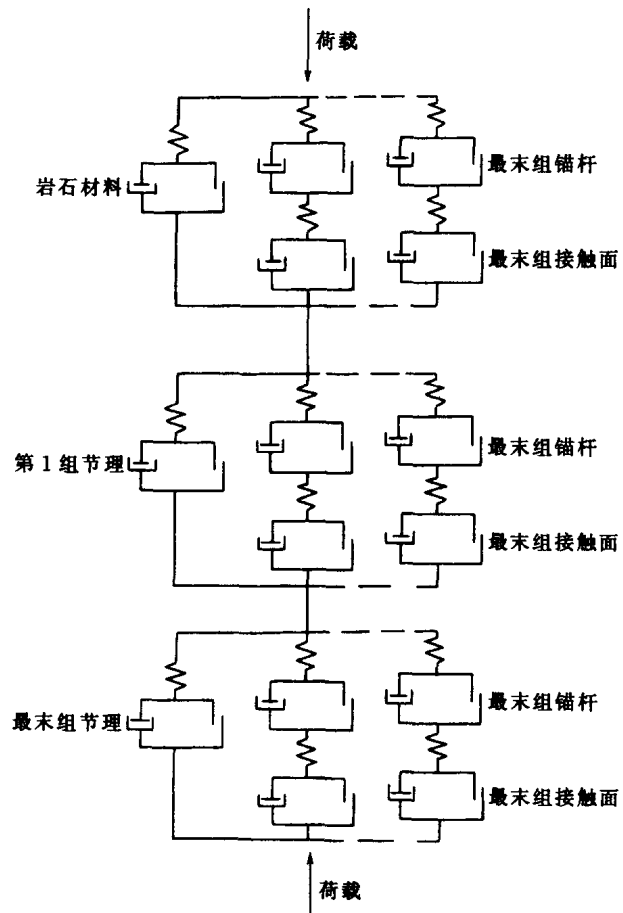


图 1-1-3 新的流变模型

推导本构关系时，可根据不同的岩石类型在以上流变模型中引入不同的节理裂隙变形和破坏机制。例如，若考虑岩体中小尺度非贯通的节理裂隙，可用损伤力学模型；若主要关注大尺度节理面或大坝结构的接触面，则可用一般 Goodman 模型描述其拉剪和压剪变形破坏。本书主要讲述后一种情况。

## (二) 坐标与转换

定义整体坐标系的  $x$  轴朝北， $y$  轴朝西， $z$  轴朝上，加锚节理岩体的本构方程将建立在整体坐标系中。

为方便公式的推导，对每组节理和锚杆都建立其各自的局部坐标系：对节理面  $j$ ， $z_j$  轴垂直于该节理面， $y_j$  轴指向节理面倾向， $x_j$  轴与  $z_j$  轴、 $y_j$  轴成右手法则；对锚杆  $b$ ， $z_b$  轴与锚杆轴向一致， $y_b$  轴指向锚杆倾向， $x_b$  轴与  $z_b$  轴、 $y_b$  轴成右手法则。在下面的公式中，没有下标的量表示等效后的加锚节理岩体。下标  $r$ 、 $j$  和  $b$  分别代表岩块、第  $j$  组节理和第  $b$  组锚杆；下标  $(br)$  和  $(bj)$  分别表示岩块和第  $j$  组节理中的锚杆； $r(b)$  和  $j(b)$  分别表示加锚岩块和第  $j$  组加锚节理。所有下标中，小写字母表示在局部坐标下的量，大写字母表示在整体坐标下的量。

定义整体坐标和局部坐标下的应力和应变相互转换关系如下

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\}_j &= [T]_j \{\Delta\varepsilon\}_j \\ \{\Delta\sigma\}_j &= [T]_j^T \{\Delta\sigma\}_j \end{aligned} \right\} \quad (1-1-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\}_b &= [T]_b \{\Delta\varepsilon\}_B \\ \{\Delta\sigma\}_B &= [T]_b^T \{\Delta\sigma\}_b \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

式 (1-1-1) 和式 (1-1-2) 中的转换矩阵为

$$[T] = \begin{bmatrix} l_{11}^2 & l_{21}^2 & l_{31}^2 & l_{21}l_{31} & l_{11}l_{31} & l_{11}l_{21} \\ l_{12}^2 & l_{22}^2 & l_{32}^2 & l_{22}l_{32} & l_{12}l_{32} & l_{12}l_{22} \\ l_{13}^2 & l_{23}^2 & l_{33}^2 & l_{23}l_{33} & l_{13}l_{33} & l_{13}l_{23} \\ 2l_{12}l_{13} & 2l_{22}l_{23} & 2l_{32}l_{33} & l_{22}l_{33} + l_{23}l_{32} & l_{12}l_{33} + l_{32}l_{13} & l_{12}l_{23} + l_{22}l_{13} \\ 2l_{11}l_{13} & 2l_{21}l_{23} & 2l_{31}l_{33} & l_{21}l_{33} + l_{23}l_{31} & l_{11}l_{33} + l_{13}l_{31} & l_{11}l_{23} + l_{21}l_{13} \\ 2l_{11}l_{12} & 2l_{21}l_{22} & 2l_{31}l_{32} & l_{21}l_{32} + l_{22}l_{31} & l_{31}l_{12} + l_{11}l_{32} & l_{11}l_{22} + l_{21}l_{12} \end{bmatrix} \quad (1-1-3)$$

对节理组  $j$

$$[L] = [L]_j = \begin{bmatrix} -\sin\psi_j & \cos\psi_j \cos\theta_j & \cos\psi_j \sin\theta_j \\ -\cos\psi_j & -\sin\psi_j \cos\theta_j & -\sin\psi_j \sin\theta_j \\ 0 & -\sin\theta_j & \cos\theta_j \end{bmatrix} \quad (1-1-4)$$

对锚杆组  $b$

$$[L] = [L]_b = \begin{bmatrix} -\sin\psi_b & \cos\psi_b \sin\theta_b & \cos\psi_b \cos\theta_b \\ -\cos\psi_b & -\sin\psi_b \sin\theta_b & -\sin\psi_b \cos\theta_b \\ 0 & -\cos\theta_b & \sin\theta_b \end{bmatrix} \quad (1-1-5)$$

式中:  $\psi_j$ 、 $\theta_j$  分别为节理的倾向和倾角;  $\psi_b$ 、 $\theta_b$  分别为锚杆的倾向和倾角。

在节理和锚杆局部坐标系之间, 应力和应变的转换定义为

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\varepsilon\}_b &= [T]_{(bj)} \{\Delta\varepsilon\}_{(bj)} \\ \{\Delta\sigma\}_{(bj)} &= [T]_{(bj)}^T \{\Delta\sigma\}_b \end{aligned} \right\} \quad (1-1-6)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} [T]_{(bj)} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ \text{对称} & & [T]_{(bj)}^* & 0 \\ & & & 0 \end{bmatrix} \\ [T]_{(bj)}^* &= \begin{bmatrix} l_{33}^2 & l_{33}l_{23} & l_{33}l_{13} \\ l_{33}l_{32} & l_{33}l_{22} & l_{33}l_{12} \\ l_{33}l_{31} & l_{33}l_{21} & l_{33}l_{11} \end{bmatrix} \\ [L] &= [L]_j^T [L]_b \end{aligned} \right\} \quad (1-1-7)$$

(三) 流变模型基本原则的公式化

在弹粘塑性有限元计算中, 对任一时步  $n$ , 新模型的四条基本原则可分别用式子表示为

(1) 应变叠加原则。

$$\{\Delta\varepsilon\}^n = \{\Delta\varepsilon\}_{R(B)}^n + \sum_j \{\Delta\varepsilon\}_{I(B)}^n \quad (1-1-8)$$

(2) 应力分担原则。

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\sigma\}_{R(B)}^n &= A_R \{\Delta\sigma\}_R^n + \sum_b A_b [T]_b^T \{\Delta\sigma\}_{(br)}^n \\ \{\Delta\sigma\}_{j(b)}^n &= A_R \{\Delta\sigma\}_j^n + \sum_b A_b [T]_{(bj)}^T \{\Delta\sigma\}_{(bj)}^n \end{aligned} \right\} \quad (1-1-9)$$

式中： $A_R$  和  $A_b$  分别为岩体和各组锚杆的体积占有率，且有  $A_R + \sum_b A_b = 1$ 。

(3) 应力一致原则。

$$\{\Delta\sigma\}^n = \{\Delta\sigma\}_{R(B)}^n = \{\Delta\sigma\}_{j(B)}^n \quad (1-1-10)$$

(4) 应变一致原则。

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\epsilon\}_{R(B)}^n &= \{\Delta\epsilon\}_R^n = \{\Delta\epsilon\}_{(BR)}^n \\ \{\Delta\epsilon\}_{j(b)}^n &= \{\Delta\epsilon\}_j^n = [T]_{(bj)}^{-1} \{\Delta\epsilon\}_{(bj)}^n \end{aligned} \right\} \quad (1-1-11)$$

以上各式中，上标  $n$  表示  $t_n$  时刻的量。逆矩阵  $[T]_{(bj)}^{-1}$  的运算仅对其子阵  $[T]_{(bj)}^*$  [见式 (1-1-7)] 进行。

## 二、加锚节理岩体各组份的隐式弹粘塑性本构关系

为建立加锚节理岩体的隐式弹粘塑性本构关系，首先需建立各组份的隐式弹粘塑性本构关系，然后按流变模型的四原则进行组合。

根据弹粘塑性势理论 (Owen & Hinton, 1980)，各组份的隐式弹粘塑性本构关系均可写成普遍形式

$$\{\Delta\sigma\}^n = [\hat{D}]^n (\{\Delta\epsilon\}^n - \{\dot{\epsilon}^{vp}\}^n \Delta t_n) \quad (1-1-12)$$

或

$$\{\Delta\epsilon\}^n = ([\hat{D}]^n)^{-1} (\{\Delta\sigma\}^n + \{\dot{\epsilon}^{vp}\}^n \Delta t_n) \quad (1-1-13)$$

其中的隐式弹性矩阵和粘塑性应变率为

$$\left. \begin{aligned} [\hat{D}]^n &= ([D]^{-1} + [C]^n)^{-1} \\ [C]^n &= \Theta \Delta t_n [H]^n \\ \{\dot{\epsilon}^{vp}\}^n &= \gamma \langle F \rangle \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-14)$$

式中： $\Theta$  为隐式参数； $\Delta t_n$  为时间  $t_n$  的时步长； $[D]$  及  $[H]^n$  分别为弹性矩阵和隐式矩阵； $\gamma$  为流动参数； $\langle F \rangle$  为阶梯函数。

在本节和下一节的公式推导中，为了符号的简洁，在不会引起误解的情况下，略去代表时步的上标  $n$ 。

根据 Owen 等人的研究，若流动参数  $\gamma$  可由室内外试验确定，则可推求应力应变随时间变化的真实过程，并求出最终应力应变；当流动参数  $\gamma$  无法确定时，可取  $\gamma=1$ ，由此计算的应力应变过程为虚拟过程，但最终求得的应力应变与弹塑性解一致。这个特性为本篇第四章实现弹粘塑性反馈分析的参数  $\gamma$  与其他力学参数的解耦提供了极大的便利。

对岩石、节理和锚杆，可分别进行如下的本构关系具体化工作。

### (一) 岩块的隐式弹粘塑性本构关系

#### 1. 粘塑性应变率

对岩块采用 Drucker—Prager 屈服准则

$$\left. \begin{aligned} F_R &= \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \\ \alpha &= \sin\varphi_R / [3(3 + \sin^2\varphi_R)]^{1/2} \\ k &= \sqrt{3} c_R \cos\varphi_R / \sqrt{3 + \sin^2\varphi_R} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-15)$$

式中： $\varphi_R$  为内摩擦角； $c_R$  为凝聚力。

假定关联流动法则成立，即

$$Q_R = F_R$$

则

$$\{\dot{\epsilon}^{vp}\}_R = \gamma_R \langle F_R \rangle \left\{ \frac{\partial F_R}{\partial \{\sigma\}} \right\} \quad (1-1-16)$$

式中： $\gamma_R$  为流动参数。

2. 弹性矩阵

$$[D]_R = \begin{bmatrix} \lambda_R + 2G_R & \lambda_R & \lambda_R & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda_R + 2G_R & \lambda_R & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda_R + 2G_R & 0 & 0 & 0 \\ & & & G_R & 0 & 0 \\ & & & & G_R & 0 \\ & & & & & G_R \end{bmatrix} \quad (1-1-17)$$

对称

3. 隐式矩阵

$$[H]_R = \gamma_R \left[ F_R \frac{\partial \{a\}_R^T}{\partial \{\sigma\}} + \{a\}_R \{a\}_R^T \right] \quad (1-1-18)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \{a\}_R^T &= \frac{\partial F_R}{\partial \{\sigma\}} = [A] + [B] \\ [A] &= [a \ a \ a \ 0 \ 0 \ 0] \\ [B] &= \frac{1}{2\sqrt{J_2}} [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ 2\tau_{xy} \ 2\tau_{xz} \ 2\tau_{yz}] \\ \frac{\partial \{a\}_R^T}{\partial \{\sigma\}} &= \frac{\partial [B]}{\partial \{\sigma\}} = \frac{1}{2\sqrt{J_2}} [M_2] - \frac{1}{2(J_2)^{3/2}} [M_1] \\ [M_1] &= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y & \sigma_x\sigma_z & 2\sigma_x\tau_{yz} & 2\sigma_x\tau_{xz} & 2\sigma_x\tau_{xy} \\ & \sigma_y^2 & \sigma_y\sigma_z & 2\sigma_y\tau_{yz} & 2\sigma_y\tau_{xz} & 2\sigma_y\tau_{xy} \\ & & \sigma_z^2 & 2\sigma_z\tau_{yz} & 2\sigma_z\tau_{xz} & 2\sigma_z\tau_{xy} \\ & & & 4\tau_{yz}^2 & 4\tau_{yz}\tau_{xz} & 4\tau_{yz}\tau_{xy} \\ & & & & 4\tau_{xz}^2 & 4\tau_{xz}\tau_{xy} \\ & & & & & 4\tau_{xy}^2 \end{bmatrix} \\ [M_2] &= \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \\ & 2/3 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2/3 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2 & 0 & 0 \\ & & & & 2 & 0 \\ & & & & & 2 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-19)$$

对称

由于流动为关联，故隐式弹性矩阵是对称的。

## (二) 节理的隐式弹粘塑性本构关系

### 1. 粘塑性应变率

$$\{\dot{\epsilon}^{vp}\}_j = \gamma_j \langle F_j \rangle \left\{ \frac{\partial Q_j}{\partial \{\sigma\}_j} \right\} \quad (1-1-20)$$

屈服函数取 Mohr—Coulomb 模型。

$$\text{若 } \sigma_{z_j} - \sigma_T < 0 \quad \left. \begin{aligned} F_j &= (\tau_{zxj}^2 + \tau_{yzj}^2)^{1/2} + \sigma_{z_j} \text{tg} \varphi_j - c_j \\ Q_j &= (\tau_{zxj}^2 + \tau_{yzj}^2)^{1/2} + \sigma_{z_j} \text{tg} \phi_j - c_j \end{aligned} \right\} \quad [1-1-21(a)]$$

$$\text{若 } \sigma_{z_j} - \sigma_T \geq 0 \quad \left. \begin{aligned} F_j &= \sigma_{z_j} - \sigma_T \\ Q_j &= (\tau_{zxj}^2 + \tau_{yzj}^2 + \sigma_{z_j}^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad [1-1-21(b)]$$

式中： $\varphi_j$  为内摩擦角； $\phi_j$  为剪胀角； $c_j$  为凝聚力； $\gamma_j$  为流动参数。

### 2. 弹性矩阵

$$[D]_j = d_j \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_{nj} & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_{sj} & 0 & 0 \\ \text{对称} & & & & k_{sj} & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (1-1-22)$$

式中： $k_{nj}$ 、 $k_{sj}$  分别为法向和切向刚度系数； $d_j$  为节理间距。

### 3. 隐式矩阵

$$[H]_j = \frac{\gamma_j}{d_j} \left[ F_j \frac{\partial \{q\}_j^T}{\partial \{\sigma\}_j} + \{a\}_j \{q\}_j^T \right] \quad (1-1-23)$$

若

$$\sigma_{z_j} - \sigma_T < 0$$

则

$$\left. \begin{aligned} \{a\}_j^T &= \frac{\partial F_j}{\partial \{\sigma\}_j} = \left[ 0 \quad 0 \quad \text{tg} \varphi_j \quad \frac{\tau_{zyj}}{\sigma_L} \quad \frac{\tau_{zxj}}{\sigma_L} \quad 0 \right] \\ \{q\}_j^T &= \frac{\partial Q_j}{\partial \{\sigma\}_j} = \left[ 0 \quad 0 \quad \text{tg} \phi_j \quad \frac{\tau_{zyj}}{\sigma_L} \quad \frac{\tau_{zxj}}{\sigma_L} \quad 0 \right] \\ \frac{\partial \{q\}_j^T}{\partial \{\sigma\}_j} &= \frac{1}{\sigma_L^3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \tau_{zx}^2 & -\tau_{yzj} \tau_{zxj} & 0 \\ \text{对称} & & & & \tau_{yzj}^2 & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-24)$$

若

$$\sigma_{z_j} - \sigma_T \geq 0$$

$$\begin{aligned}
 \text{则} \quad \{a\}_j^T &= \frac{\partial F_j}{\partial \{\sigma\}_j} = \frac{1}{\sigma_L} [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \\
 \{q\}_j^T &= \frac{\partial Q_j}{\partial \{\sigma\}_j} = \frac{1}{\sigma_L} [0 \quad 0 \quad \sigma_{zj} \quad \tau_{yzj} \quad \tau_{xzj} \quad 0] \\
 \frac{\partial \{q\}_j^T}{\partial \{\sigma\}_j} &= \frac{1}{\sigma_L^3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \tau_{yzj}^2 + \tau_{xzj}^2 & -\sigma_{zj}\tau_{zyj} & -\sigma_{zj}\tau_{zxxj} & 0 \\ & & & \sigma_{zj}^2 + \tau_{zxxj}^2 & -\tau_{zyj}\tau_{zxxj} & 0 \\ & \text{对称} & & & \sigma_{zj}^2 + \tau_{zyj}^2 & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (1-1-25) \\
 \sigma_L &= \sqrt{\tau_{yzj}^2 + \tau_{xzj}^2 + \sigma_{zj}^2}
 \end{aligned}$$

由于流动为非关联，故节理的隐式弹性矩阵是非对称的，从而导致刚度矩阵的非对称性，可采用1993年熊文林提出的方法对其实行对称化处理。

### (三) 锚杆的隐式弹粘塑性本构关系

#### 1. 节理上的锚杆

(1) 实验规律的总结。锚杆在节理面的行为是非常复杂的。Egger等人对加锚节理岩体作了大量的实验室和现场试验 (Spang, Egger, 1990; Egger, Zabuski, 1991; Egger, Fernandes, 1983; Egger, Pellet, 1991)。其中实验室直剪试验的试件尺度是220mm×200mm×150mm和150mm×150mm×130mm，图1-1-4是试验装置。

通过试验得出以下主要结论：

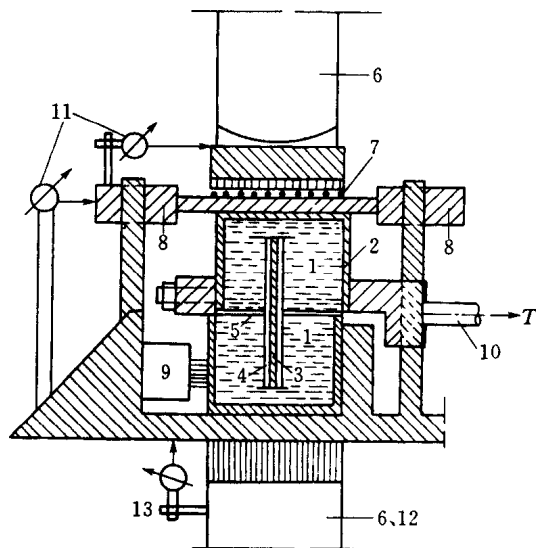


图 1-1-4 直剪试验装置

- 1—块体；2—钢盒；3—锚杆；4—砂浆；5—剪切面；  
6—铅直千斤顶；7—无摩擦上支承；8—导向环；9—  
块体千斤顶；10—剪力传感器；11—剪切位移传感器；  
12—法向力传感器；13—铅直位移传感器

1) 当锚杆与节理法向交角较小时，锚杆的弯曲非常强烈，从而在节理面两侧形成铰。由于两铰之间的锚杆应力几乎是均匀的，故锚杆的破坏位置不能确定。破坏可能发生于其中的一个塑性铰，也可能发生于节理面附近的拉剪。在相同的试验条件下，两种破坏都可能发生，但加锚节理的极限强度和对应的位移却几乎是一致的。

2) 当锚杆与节理法向交角较大时，锚杆的弯曲也会在节理面两侧形成铰，但并不强烈，大部分试件的破坏是发生于节理面附近的拉剪。

3) 弯曲锚杆的高度  $h_b$  约等于锚杆直径  $d_b$  的2~4倍，即  $h_b = 2 \sim 4d_b$ ，该高度称为有效高度，对应的有效长度  $L_b = h_b / \cos \alpha_b$  (图1-1-5)，有效高度与岩石(或砂浆)的材料特性、锚杆的材料特性、锚杆的直径、锚杆的倾角等有关。

(2) 本构关系的实现。假定沿着有效长度轴向力  $\sigma_b$  为均匀分布, 而剪切力  $\tau_{bz}$ 、 $\tau_{bz}$  为均匀分布或三角分布 (图 1-1-6)。在该有效长度, 锚杆用“真实”应力和应变表达的本构方程为

$$\{\Delta\sigma\}_b^* = [\hat{D}]_{(b,j)}^* (\{\Delta\varepsilon\}_b^* - \{\varepsilon^{vp}\}_b^* \Delta t_n) \quad (1-1-26)$$

在节理组  $j$  上锚杆组  $b$  的应变需按节理间距和锚杆有效长度作等效变换。

$$\{\Delta\varepsilon\}_b = \frac{L_b}{d_j} \{\Delta\varepsilon\}_j^* \quad (1-1-27)$$

或 
$$\{\Delta\varepsilon\}_j^* = \frac{d_j}{L_b} \{\Delta\varepsilon\}_b \quad (1-1-28)$$

式 (1-1-26) 成为

$$\{\Delta\sigma\}_b = [\hat{D}]_{(b,j)}^* (\{\Delta\varepsilon\}_b - \{\varepsilon^{vp}\}_b \Delta t_n) \quad (1-1-29)$$

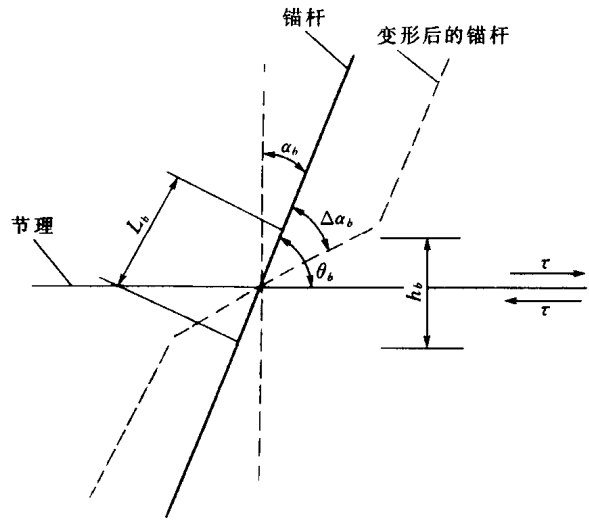


图 1-1-5 锚杆在节理面的变形

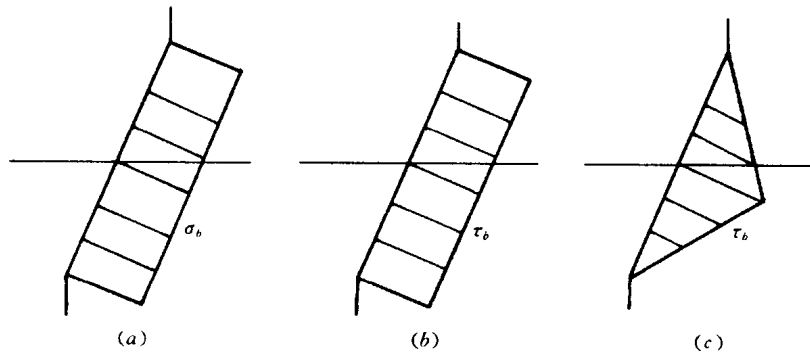


图 1-1-6 锚杆有效长度内的应力分布

其中

$$\left. \begin{aligned} [\hat{D}]_{(b,j)} &= \frac{d_j}{L_b} [\hat{D}]_{(b,j)}^* \\ \{\varepsilon^{vp}\}_b &= \frac{L_b}{d_j} \{\varepsilon^{vp}\}_b^* \end{aligned} \right\} \quad (1-1-30)$$

1) 粘塑性应变率。对锚杆采用各向同性强化的 Von Mises 屈服准则

$$\left. \begin{aligned} F_b &= [3(\tau_{zrb}^2 + \tau_{zwb}^2) + \sigma_b^2]^{1/2} - \sigma \\ \sigma &= \sigma_y + (\sigma_u - \sigma_y) \bar{\gamma}^{vp} / \bar{\gamma}_u^{vp} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-31)$$

式中:  $\sigma_y$ 、 $\sigma_u$ 、 $\bar{\gamma}_u^{vp}$ 、 $\bar{\gamma}^{vp}$  分别为屈服强度、极限强度、极限广义剪应变、当前广义剪应变。

按流动法则

$$\{\dot{\varepsilon}^{vp}\}_b^* = \gamma_b \langle F_b \rangle \left\{ \frac{\partial F_b}{\partial \langle \sigma \rangle_b} \right\} \quad (1-1-32)$$

2) 弹性矩阵。式 (1-1-30) 中的隐式弹性矩阵是分块对角的, 即

$$[\hat{D}]_{(b_j)}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 \\ \text{对称} & & [\hat{D}]_{(b_j)}^{**} & 0 \\ & & & 0 \end{bmatrix} \quad (1-1-33)$$

其中

$$[\hat{D}]_{(b_j)}^{**} = \{ ([D]_{(b_j)}^{**})^{-1} + [C]_{(b_j)} \}^{-1}$$

$$[C]_{(b_j)} = \Theta \Delta t_n [H]_{(b_j)}$$

$$[D]_{(b_j)}^{**} = \begin{bmatrix} E_b & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_b}{A\beta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_b}{A\beta} \end{bmatrix}$$

$$[H]_{(b_j)} = \gamma_b \left[ F_{(b_j)} \frac{\partial \{a\}_{(b_j)}^T}{\partial \{\sigma\}_{(b_j)}} + \{a\}_{(b_j)} \{a\}_{(b_j)}^T \right]$$

$$\{a\}_{(b_j)}^T = \frac{1}{\sigma_L} [\sigma_z \quad 3\tau_{yz} \quad 3\tau_{zx}]$$

$$\frac{\partial \{a\}_{(b_j)}^T}{\partial \{\sigma\}_{(b_j)}} = \frac{3}{\sigma_L^2} \begin{bmatrix} \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 & -\sigma_z \tau_{yz} & -\sigma_z \tau_{zx} \\ \text{对称} & \sigma_z^2 + 3\tau_{zx}^2 & -3\tau_{yz} \tau_{zx} \\ & & \sigma_z^2 + 3\tau_{yz}^2 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_L = \sqrt{3(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) + \sigma_z^2}$$

式中:  $E_b$  和  $G_b$  为锚杆弹性模量;  $A$  为锚杆断面形状系数, 对圆实心杆  $A=4/3$ ;  $\beta$  为锚杆应力分布系数, 且均匀剪应力分布 [图 1-1-6 (b)] 时,  $\beta=1$ , 三角形剪应力分布 [图 1-1-6 (c)] 时,  $\beta=\frac{1}{2}$ 。

(3) 锚杆局部变形的模拟。在塑性变形过程中, 锚杆较长  $L_b$ 、倾向  $\phi_b$  和倾角  $\theta_b$  都需逐步加以修正, 以反映节理面附近锚杆的局部变形。

$$\left. \begin{aligned} L_b^{new} &= L_b^{old} + d_j \Delta \epsilon_b \\ \phi_b^{new} &= \phi_b^{old} + \arctg \left( \frac{d_j \Delta \gamma_{zxb}}{L_b^{old}} \right) \\ \theta_b^{new} &= \theta_b^{old} - \arctg \left( \frac{d_j \Delta \gamma_{zyb}}{L_b^{old}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-1-34)$$

## 2. 岩石中的锚杆

对岩石中的锚杆, 可直接写出普遍本构关系式 (1-1-12) 中的粘塑性应变率、弹性矩阵和隐式矩阵。

(1) 粘塑性应变率。

$$\{\dot{\epsilon}^{i,p}\}_{(br)} = \gamma_b \langle F_{(br)} \rangle \left\{ \frac{\partial F_{(br)}}{\partial \{\sigma\}_{(br)}} \right\} \quad (1-1-35)$$

(2) 弹性矩阵。



$$[D]_{(br)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_b/A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_b/A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_b/A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-1-36)$$

(3) 隐式矩阵。

$$[H]_{(br)} = \gamma_b \left[ F_{(br)} \frac{\partial \{a\}_{(br)}^T}{\partial \{\sigma\}_{(br)}} + \{a\}_{(br)} \{a\}_{(br)}^T \right] \quad (1-1-37)$$

$$\left. \begin{aligned} \{a\}_{(br)}^T &= \frac{\partial F_{(br)}}{\partial \{\sigma\}_{(br)}} = \frac{1}{\sigma_L} [0 \quad 0 \quad \sigma_z \quad 3\tau_{yz} \quad 3\tau_{zx} \quad 0] \\ \frac{\partial \{a\}_{(br)}^T}{\partial \{\sigma\}_{(br)}} &= \frac{3}{\sigma_L^3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 & -\sigma_z \tau_{zy} & -\sigma_z \tau_{zx} & 0 \\ & & & \sigma_z^2 + 3\tau_{zx}^2 & -3\tau_{zy} \tau_{zx} & 0 \\ & & & & & \sigma_z^2 + 3\tau_{zy}^2 \\ & & \text{对称} & & & 0 \end{bmatrix} \\ \sigma_L &= \sqrt{3(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) + \sigma_z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-38)$$

### 三、加锚节理岩体的等效隐式弹粘塑性本构关系

把每个构件的本构方程代入式 (1-1-9)，并利用式 (1-1-1) ~ 式 (1-1-7)，可得加锚岩块和加锚节理的本构方程

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\sigma\}_{R(B)} &= A_R [\hat{D}]_R \{\Delta\epsilon\}_R - A_R [\hat{D}]_R \{\dot{\epsilon}^{vp}\}_R \Delta t_n \\ &\quad + \sum_b A_b [T]_b^T [\hat{D}]_{(br)} [T]_b \{\Delta\epsilon\}_{(br)} - \sum_b A_b [T]_b^T [\hat{D}]_{(br)} \{\dot{\epsilon}^{vp}\}_{(br)} \Delta t_n \\ \{\Delta\sigma\}_{j(b)} &= A_R [\hat{D}]_j \{\Delta\epsilon\}_j - A_R [\hat{D}]_j \{\dot{\epsilon}^{vp}\}_j \Delta t_n \\ &\quad + \sum_b A_b [T]_{(bj)}^T [\hat{D}]_{(bj)} [T]_{(bj)} \{\Delta\epsilon\}_{(bj)} - \sum_b A_b [T]_{(bj)}^T [\hat{D}]_{(bj)} \{\dot{\epsilon}^{vp}\}_{(bj)} \Delta t_n \end{aligned} \right\} \quad (1-1-39)$$

考虑到式 (1-1-11)，式 (1-1-39) 可写成

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\sigma\}_{R(B)} &= [\hat{D}]_{R(B)} \{\Delta\epsilon\}_{R(B)} - \{\Delta\sigma^{vp}\}_{R(B)} \\ \{\Delta\sigma\}_{j(b)} &= [\hat{D}]_{j(b)} \{\Delta\epsilon\}_{j(b)} - \{\Delta\sigma^{vp}\}_{j(b)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-40)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\epsilon\}_{R(B)} &= [\hat{D}]_{R(B)}^{-1} \{\Delta\sigma\}_{R(B)} + [\hat{D}]_{R(B)}^{-1} \{\Delta\sigma^{vp}\}_{R(B)} \\ \{\Delta\epsilon\}_{j(b)} &= [\hat{D}]_{j(b)}^{-1} \{\Delta\sigma\}_{j(b)} + [\hat{D}]_{j(b)}^{-1} \{\Delta\sigma^{vp}\}_{j(b)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-41)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} [\hat{D}]_{R(B)} &= A_R [\hat{D}]_R + \sum_b A_b [T]_b^T [\hat{D}]_{(br)} [T]_b \\ [\hat{D}]_{j(b)} &= A_R [\hat{D}]_j + \sum_b A_b [T]_{(bj)}^T [\hat{D}]_{(bj)} [T]_{(bj)} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-42)$$