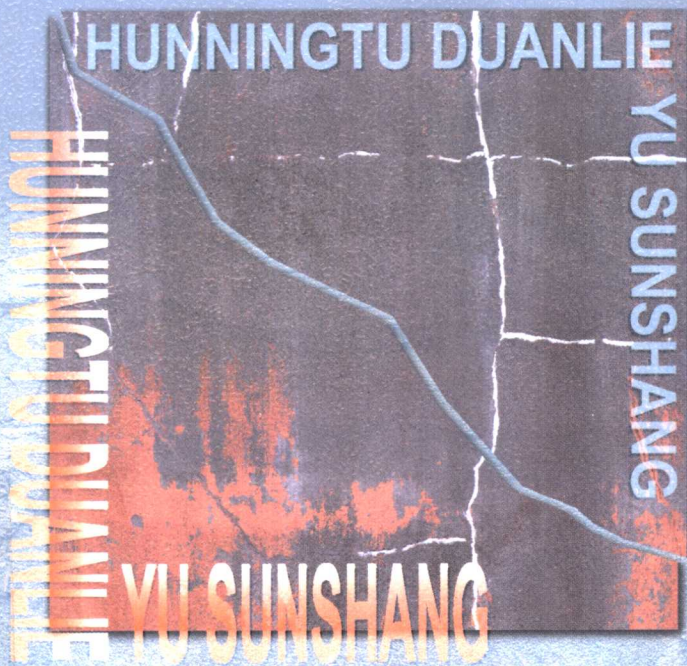


混凝土断裂与损伤

沈新普 鲍文博 沈国晓 著



冶金工业出版社

混凝土断裂与损伤

沈新普 鲍文博 沈国晓 著

北京
冶金工业出版社
2004

内 容 简 介

本书采用了非连续介质力学和连续介质力学两种方法,即层间界面断裂力学分析方法和连续介质的固体力学弹塑性及塑性损伤耦合理论,从不同的角度深入研究了混凝土、岩石类材料与结构的破坏失效这一课题。书中所述成果的理论模型和算法,可用于工程中诸如混凝土大坝及桥梁等复杂且重要的混凝土岩石类结构的力学分析,为此类工程结构的设计提供准确的设计参考。

本书可作为高等学校研究生教材,亦可供相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土断裂与损伤/沈新普等著. —北京:冶金工业出版社,2004. 12

ISBN 7-5024-3668-5

I. 混… II. 沈… III. ①混凝土—断裂力学
②混凝土—损伤(力学) IV. TU528. 01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 125283 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 宋 良 美术编辑 李 心

责任校对 杨 力 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004 年 12 月第 1 版,2004 年 12 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 3.75 印张; 120 千字; 111 页;1-3000 册

15.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

混凝土、岩石类材料的损伤塑性,是工程中混凝土结构破坏、采矿过程中的岩爆、地震等现象发生的主要原因。描述上述现象主要的力学方法有两类,一是断裂力学的准脆性断裂理论,二是固体力学的弹塑性理论以及塑性损伤耦合理论。针对上述问题,本书采用了非连续介质力学和连续介质力学两种方法,即层间界面断裂力学分析方法和连续介质的固体力学弹塑性及塑性损伤耦合理论,从不同的角度深入研究了混凝土、岩石类材料与结构的破坏失效这一重要课题。主要内容有:

(1) 在弹性力学和准脆性断裂力学分析的基础上,提出了用于岩土结构的准脆性断裂分析的“剪切梁模型”,能够解析求解侧压力作用下混凝土结构在剪切载荷作用下的界面断裂问题,并能够进一步准确计算出结构失稳时释放出的能量(即结构对外界做功)的数量。

(2) 以混凝土大坝的节理界面断裂分析为主要应用目标,结合混凝土准脆性断裂力学和固体塑性理论,提出了一种“分段线性塑性本构模型”,其中的塑性加载条件考虑了渗透水压的影响。

(3) 提出了一种新的数学上较为完善的岩石混凝土类材料的宏观本构损伤模型。在连续介质一般热力学分析的基础上,提出了一种弹塑性与二阶张

量损伤耦合的本构关系,从而使得损伤塑性的耦合可以不采用常规的有效应力的方式进行。

(4) 在一般热力学分析的基础上,提出了一种新的梯度依赖损伤模型;并针对梯度依赖损伤模型,提出了一种新型的梯度项的数值计算方法,从而将常规有限元与梯度依赖本构结合起来。

本书所述成果的理论模型和算法,可以用于工程中诸如混凝土大坝及桥梁等复杂且重要的混凝土岩石类结构的力学分析,为此类工程结构的设计提供准确的设计参考。

本书所述的工作主要是在辽宁省自然科学基金(项目号:2001101023)资助下完成的。此外,课题组成员在课题研究过程中,得到奥地利国家自然科学基金国际合作项目、波兰科学院博士后基金、意大利大学与科学技术部(MURST)课题、法国特鲁瓦技术大学博士后基金、沈阳工业大学博士后启动资金的资助。本书的出版还得到沈阳工业大学固体力学学科建设项目资金的资助。作者在此对资助各方表示诚挚的感谢。

作者
2004.10

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
现代建筑设备工程	郑庆红 等编	45.00
混凝土及砌体结构	韩晓雷 主编	41.00
建筑施工技术	王士川 主编	29.50
建筑工程经济与项目管理	李慧民 主编	28.00
建筑施工组织	赵仲琪 主编	25.00
结构力学	赵 冬 等编	25.00
材料力学	王克林 等编	33.50
无机非金属材料实验教程	王瑞生 主编	30.00
简明建筑设计实用手册	王晓鹏 等编	24.00
桩基动力学	雷林源 著	29.80
现行冶金工程施工标准 汇编(上册)	冶金工业出版社 编	198.00
现行冶金工程施工标准 汇编(下册)	冶金工业出版社 编	198.00
二氧化硫减排技术与烟气 脱硫工程	杨 颀 编著	56.00
现代除尘理论与技术	向晓东 著	26.00
环境污染控制工程	王守信 等编著	49.00
城市地下管线探测与测漏	雷林源 著	20.00

目 录

1	塑性梯度依赖模型研究文献综述	1
	参考文献	5
2	剪切梁模型的数学描述及基本特性	8
	2.1 引言	8
	2.2 问题的描述及剪切梁模型	8
	2.3 刚塑性损伤界面层模型下界面裂纹的 解析解	13
	2.3.1 刚塑性损伤界面层模型	13
	2.3.2 裂纹稳定扩展时界面层上剪应力 及位移的解析解	14
	2.4 结束语	18
	参考文献	18
3	剪切梁模型的失稳行为研究	20
	3.1 引言	20
	3.2 刚塑性本构模型下层间裂纹萌生阶段 的解	20
	3.3 尾区的解	21
	3.3.1 刚塑性本构模型结构失稳模式 分析	21
	3.3.2 失稳过程中平衡路径上的解	22
	3.3.3 失稳过程中的能量释放讨论	28

3.4 结束语	29
参考文献	30
4 用剪切梁模型求解循环载荷下层间界面反平面剪切破坏的	
解析解	31
4.1 引言	31
4.2 问题的描述及剪切梁模型	31
4.3 卸载过程的剪应力及位移解	35
4.3.1 反向摩擦滑动区 $[0, s_{31}]$ 内的剪力及位移解	37
4.3.2 卸载二次损伤区 $[s_{31}, s_{32}]$ 内的剪应力及位移解	37
4.3.3 卸载二次损伤区边界点 s_{31} 的确定方法	39
4.3.4 卸载过程中加载端 $x=0$ 处的位移载荷关系	39
4.4 再加载过程分析	40
4.4.1 再加载摩擦滑动区的解: $[0, s_{51}]$	41
4.4.2 再加载三次损伤区剪应力及位移解: $[s_{51}, s_{52}]$	41
4.4.3 卸载二次损伤区边界 s_{31} 的确定方法	43
4.4.4 加载端处的载荷位移关系曲线	44
4.5 关于综合响应的分析	45
4.6 结束语	47
参考文献	48
5 混凝土准脆性断裂的节理界面力学模型	49
5.1 引言	49
5.2 模型的数学描述	49
5.2.1 节理变量的分段线性弹性软化塑性本构模型	50
5.2.2 节理材料分段线性塑性模型的增量形式	56
5.3 模型的数值实验	56
5.4 结束语	58
参考文献	59

6 混凝土的损伤塑性理论:标量损伤与塑性耦合	60
6.1 引言	60
6.2 模型的理论描述	61
6.2.1 基于塑性的 Saanouni 损伤塑性耦合本构模型基本 关系	61
6.2.2 损伤塑性耦合的损伤演化及塑性增量应力应变 关系	61
6.2.3 有限增量 $\Delta \epsilon_{ij}$ 对应的应力增量计算	63
6.3 局部水平上的本构特性数值验证	65
6.3.1 外部平衡迭代	65
6.3.2 数值算例	67
6.4 结束语	69
参考文献	69
7 岩土材料弹塑性正交异性损伤耦合本构理论	71
7.1 引言	71
7.2 模型的一般热力学描述	72
7.2.1 连续介质的热力学	72
7.2.2 塑性流动准则及损伤准则	74
7.2.3 关于损伤应变与扩容计算的讨论	75
7.3 塑性损伤耦合描述	75
7.3.1 正交异性张量损伤模型	75
7.3.2 Mohr - Coulomb 准则的均匀化	76
7.4 结束语	78
参考文献	79
8 梯度增强的弹塑性损伤非局部本构模型理论研究	81
8.1 引言	81
8.2 已有相关模型简要介绍	81

8.2.1	面积加权平均的非局部模型	81
8.2.2	梯度增强的非局部本构模型	83
8.2.3	讨论	88
8.3	梯度增强的损伤塑性耦合本构关系	88
8.3.1	梯度增强损伤塑性的连续介质热力学	88
8.3.2	梯度增强的损伤模型	89
8.4	弹塑性损伤耦合本构模型的具体形式	92
8.4.1	损伤材料有效应力/应变关系	92
8.4.2	内变量演化律及加载条件	93
8.5	结束语	94
	参考文献	94
9	梯度增强的弹塑性损伤非局部本构模型数值计算研究	97
9.1	引言	97
9.2	用移动最小二乘法近似求解 Laplacian 值的原理与 格式	97
9.2.1	移动最小二乘法的数学原理	97
9.2.2	矢量 \mathbf{a} 的计算	99
9.2.3	二维问题的基矢量 \mathbf{p}	100
9.2.4	三维问题的多项式基矢量 \mathbf{p}	101
9.3	数值应用	102
9.3.1	双面预制缺口平面应变试件的拉伸试验	102
9.3.2	金属板条的塑性损伤数值模拟	107
9.4	结束语	110
	参考文献	111

1 塑性梯度依赖模型研究文献综述

混凝土类材料与结构的破坏失效,是以材料内部裂纹萌生、扩展,并最终导致结构断裂破坏失去承载能力为特征的。固体力学的弹塑性与损伤耦合模型是目前较为常用的处理上述问题的理论工具^{[1],[2],[3]}。材料损伤演化的结果是非弹性变形的局部化,即:非弹性变形在变形后期随着外载增加而向物体的某一局部集中,而物体的其他部分则处于弹性卸载状态。具体到混凝土类材料,这个过程为:原来成片的微裂纹区最后汇集成一条主要的宏观裂纹,形成结构断裂,宏观裂纹外的微裂纹随之闭合。

基于 Noll 定义的简单材料^[4]框架内的连续介质局部本构理论,可以通过稳定性分析(Thomas-Hill-Mendel 条件)来确定非弹性变形局部化的发生条件,但是却无法确定局部化区域的宽度,从而也就无法很好地完成整个加载过程的力学分析。在数值计算方面,应用现有局部理论计算时,在载荷极点后的数值结果通常严重依赖网格划分。因此,有必要建立非简单材料的非局部理论,以消除数值分析结果的网格依赖性,同时计入裂纹间的相互影响。

另一方面,连续介质的非局部理论^[5]认为:物体内一个点的非弹性力学行为不仅取决于外载荷作用下该点的力学量(如应力、应变等)的状态,而且与该点邻域内的点的力学量有关。该理论还认为,变形的一阶梯度不足以描述复杂材料的运动学及材料的力学行为。1909年,Cosserat 首先提出了著名的 Cosserat 本构理论。其后,20世纪60年代,在高阶变形梯度等方面有了进一步的发展。限于求解手段,20世纪80年代以前,上述理论一直仅限于材料的理论研究,在固体力学结构分析中没有重大应用实例的报道。

20世纪80年代以来,非局部本构理论重新受到了重视。目前已有的理论模型除了上述的 Cosserat 模型外,主要的还有两大类:

(1) “面积加权平均”的非局部非弹性模型^[6]。在这一类模型中,引入了材料的特征尺寸的概念,同时引入权函数来表示物质点间力学量相互影响的数学关系,从而确定了局部化区域的宽度,并有效地消除了数值结果的网格依赖性。

(2) “梯度依赖”的非局部模型。这一类模型的理论及应用研究是目前国际上最为活跃的本构研究课题。由于数学上并没有严格的理论来规范本构行为中梯度依赖项的细节(阶数及形式等),目前的文献中有多种不同的梯度依赖形式。其中主要的有:

1) 金属塑性研究的应变梯度理论。文献^[7]对国内外金属塑性梯度依赖模型进行了详细的综述,文献^[8]、^[9]则分别有详细的模型介绍和新进展报告。这一类模型主要包括高阶应变张量模型、偶应力理论等模型。以高阶应变模型为例,这一类模型的缺点是:由于3阶应变张量的引入,数值求解时需要引入特殊单元,计算量十分大。在国际上,未见有该类模型在混凝土的损伤塑性分析中应用的例子。

2) Aifantis 的梯度依赖模型^[10]、^[11]。Aifantis 和他的合作者首先提出了一种应变软化塑性的梯度依赖模型:将等效塑性应变的 Laplacian 项和特征长度一起引入到塑性屈服条件中,从而使得物体内一点的弹塑性状态不仅取决于传统的等效应力和材料的屈服极限,还有赖于该点与相邻物质点之间的塑性应变场的 Laplacian 值和特征长度值的积。这一类模型数学表达简单,但是由于其梯度依赖项没有相应的热力学共轭量,因此在理论上是不完善的。

尽管其热力学理论不完善,但由于其数学表达简洁,实践上实用有效,Aifantis 类的梯度依赖模型依然在混凝土的损伤塑性分析中得到了广泛应用。例如,DeBorst 和他的合作者们将 Aifantis 的梯度依赖模型应用到混凝土标量损伤与塑性耦合的模型中,建立了梯度依赖的损伤塑性耦合模型^[12],并进一步结合面积加权平均非局部理论的思想,提出了隐式的梯度依赖模型^[13]。

除了上述两类主要的梯度依赖塑性损伤本构模型之外,近三年来一些研究者开始从热力学原理出发,提出混凝土的新的梯度依赖非局部本构模型:Nedjar^[14]将标量损伤的一阶梯度视作新的独立的内变

量,推导了相应的虚功率原理的形式,给出了相应的计算格式。Liebe 和 Steinmann 和 Benallal 一起^[15],本着“能量耗散的非局部化”的理念,提出了“损伤一阶梯度依赖”的自由能表示式。但遗憾的是,他们却最终得出了类似于 Aifantis 的依赖于损伤标量的 Laplacian 项的损伤加载条件。虽然从数值结果上看效果不错,但数学推导过程明显牵强。

我国学者李锡夔和他的合作者^[16]提出了用于塑性理论的 Aifantis 类的“等效塑性应变”的梯度依赖的混合有限元算法,其数值结果较合理地反映了变形软化塑性下的变形局部化现象;潘一山和徐秉业等^[17]结合 Aifantis 的梯度依赖模型研究了岩石塑性屈服的尺寸效应问题。由于损伤和塑性是本质上不同的两类内变量,用塑性理论近似代替断裂损伤模型虽然有一定的效果,但其缺陷是明显的。目前这一做法在国际上愈来愈少见。国内目前还没有文献报道把 Aifantis 类梯度依赖模型应用到混凝土的损伤塑性耦合分析中的实例。

虽然有了以上文献报道的工作,但是这一研究领域仍然存在若干问题,主要有:

(1) 在理论上,已有的 Aifantis 类的梯度依赖损伤塑性模型,主要是假设了加载条件的塑性应变梯度或标量损伤梯度依赖,不是从“能量耗散梯度依赖”原理推得的。其内变量的梯度依赖项没有相应的热力学共轭力,原模型的热力学理论基础不完善。

(2) 已有的梯度依赖非局部损伤塑性本构模型都是仅限于标量损伤与塑性的耦合的情况,没有混凝土张量损伤情况与塑性耦合的梯度依赖模型的研究文献。

(3) 将梯度依赖非局部模型与有限元结合时损伤和塑性应变的梯度依赖项的数值计算问题尚未完善解决。目前大型有限元程序多数采用常规有限元框架(区别于特殊混合型有限元和特殊扩展有限元^[14]而言)。将梯度依赖模型应用于常规有限元数值程序时,由于损伤变量和塑性变量均为数值求解的目标变量(高斯点上的待求未知量),没有解析表达式,所以其梯度和 Laplacian 值也就无法解析求得。将损伤/塑性应变的梯度依赖项作为节点变量而开发的混合有限元法

和扩展有限元法,都不仅需要大量额外的工作,而且在使用上也有限制。因此,如何解决梯度依赖模型应用于常规有限元数值程序时的相关数值问题,是目前亟待解决的。

(4) 关于特征长度值的定义和计算取值,目前还没有普遍为人们所接受的定论,主要争议在于:

1) 面积加权非局部模型定义特征长度为表示体元的尺寸,而梯度依赖模型则认为特征长度是非弹性行为相互影响的物质点间的最大距离。有少数人认为特征长度值是与混凝土中砂石颗粒尺寸相关的裂纹区宽度尺寸。也有人认为特征长度值只是梯度项对加载条件的影响系数,并且实际上在数值计算时有人也是这么做的。

2) 尽管多数人在计算中将特征长度值取为常量,但是这种做法并没有实验支持。而且近来 Geers 和 DeBorst 等^[13]还提出了“时变型”的特征长度的理论模型,认为特征长度的值随着裂纹的扩展是变化的。

(5) 虽然混凝土的塑性损伤局部本构理论研究近年来在国际上有很大发展,但也有若干重要问题尚未解决。塑性损伤本构的局部理论主要包括:塑性及损伤的加载条件、塑性流动和损伤演化律等。库伦类的加载条件^[18]是混凝土材料破坏分析中最实用的。由于 Mohr-Coulomb 类的屈服条件承载力项中含有已闭合了的裂纹(损伤)面间的摩擦力因素,而这一因素不能用有效应力来确切表达。为此国际上若干研究者的做法是不采用“有效应力”的概念。随后采用的计算方法主要有两种:一是将损伤导致的混凝土材料的“刚度降低”和“强度劣化”两方面分别考虑^{[19]、[20]}。“刚度降低”因素通过损伤变量计算,而把“强度劣化”则仅作为“塑性应变软化现象”,用试验拟合得到的强度参数的“应变软化律”来计算,从而避免了“有效应力不能同时表达刚度降低和强度劣化”的弊病。二是引入正交异性损伤张量。理论上讲,一方面,二阶损伤张量通过适当的数学运算,能够精确区分裂纹闭合时的“强度劣化”和“刚度部分恢复”两方面的力学行为;另一方面,引入二阶损伤张量后,可以不采用有效应力的概念,而从细观上用损伤张量的不同分量来表达“刚度降低”和“强度劣化”两方面的行为特

性。但是,二阶损伤张量引入后,不采用有效应力相应的塑性/损伤加载准则、损伤演化和塑性流动的描述还没有成熟的理论。近三年来,Mroz 等人^{[21]、[22]、[23]、[24]}在建立“各向异性损伤”与“损伤导致的各向异性塑性”耦合时不采用有效应力的 Coulomb 类屈服/加载条件的研究方面提出了很有意义的宏观模型,但是尚未涉及各向异性损伤塑性耦合时的塑性流动和损伤演化律的理论及数值求解。这个方向的研究在国际上仍处于初级阶段。

综上所述,从理论上、实验上并结合数值方法对混凝土的正交异性损伤塑性耦合分析的梯度依赖非局部本构模型,建立相应梯度依赖项的高效的数值求解格式,开发出具有网格稳定性(即数值结果对网格划分不敏感)的有限元软件,是目前本领域国际固体力学界的一个亟待解决的热点课题。对这一课题的完善研究,将建立理论上完善、使用上有效的混凝土梯度依赖非局部损伤塑性耦合本构模型,能为相关工程的混凝土结构的力学分析提供更加准确有效的理论工具。因此,对这一课题的深入研究,具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 谢和平. 岩石·混凝土损伤力学. 徐州:中国矿业大学出版社,1990
- [2] 周太全,贾军波,李兆霞. 弹塑性损伤分析的参变量原理. 东南大学学报(自然科学版),2001,31(5),67-71
- [3] Bazant Z. P., Cedolin L. *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture and damage theories*, Oxford University Press, 1991, Oxford, New York.
- [4] Noll W. Materially uniform simple bodies with inhomogeneities. *Arch Rational Mech. Anal.* 1967, 27, 1-32
- [5] Maugin G. A. Remarks on the thermomechanics of weakly nonlocal theories. In: *Nonlocal Aspects in Solid Mechanics*, Abstracts of the *EuroMech Colloquium* 378, Mulhouse, France, 1998,2-9
- [6] Bazant and Pijaudier-Cabot. Nonlocal continuum damage, localization instability and convergence. *ASME J. Appl. Mech.*, 1988, 55, 287-293
- [7] 陈少华,王自强. 应变梯度理论进展. *力学进展*. 2003,33(2), 207-216.

- [8] 黄克智,黄永刚. 固体本构关系. 北京:清华大学出版社,1999
- [9] Wei YG(魏悦广). Constraint effects on the elastic plastic fracture behaviour in strain gradient solids. *Fatigue Frac. Engng. Mater Struct.*, 2002, 25(2), 433-444.
- [10] Aifantis E. C. On the role of gradient in the localization of deformation and fracture. *Int. J. Engng. Sci.* 1992, 30, 1279-1299
- [11] Aifantis E. C. Update on a class of gradient theories. *Mech. of Mater.*, 2003, 35(1), 259-280
- [12] de Borst R., J. Pamin M. G. D. Geers. On coupled gradient-dependent plasticity and damage theories with a view to localization analysis, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 1999, 18, 939-962
- [13] Geers M. G. D., R. de Borst W. A. M. Brekelmans, R. H. J. Peerlings. Strain-based transient-gradient damage model for failure analysis. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 1998, 160, 133-153
- [14] Nedjar B. Elastoplastic-damage modelling including the gradient of damage: formulation and computational aspects, *Int. J. Solids and Structures*, 2001, 38, 5412-5451
- [15] Liebe T., P. Steinmann A. Benallal. Theoretical and computational aspects of a thermo-dynamically consistent framework for geometrically linear gradient damage. *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 2001, 190, 6555-6576
- [16] Li XK(李锡夔), S. Cescotto. A mixed finite element method in gradient plasticity for pressure dependent materials and modelling of strain localization, *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 1997, 144, 287-305
- [17] 潘一山,徐秉业,王明洋. 岩石塑性应变梯度与Ⅱ类岩石变形行为研究. *岩土工程学报*,1999,21(4), 471-474
- [18] Yu MH(俞茂宏). Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century. *Appl. Mech Rev.*, 2002, 55(3), 169-218.
- [19] Lubliner J., J. Oliver S. Oller E. Onate. A plastic damage model for concrete. *Int. J. Solids Struct.*, 1989, 25(3), 299-326
- [20] Govindjee S., G. Kay and J. C. Simo. Anisotropic modelling and numerical simulation of brittle damage in concrete. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 1995, 38, 3614-3633
- [21] Mroz Z., Maciejewski J. Failure criteria of anisotropically damaged materials based on the critical plane concept. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2002, 26(2): 407-431

- [22] Pietruszczak S. and Z. Mroz. On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials. *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 2001, 25, 509-524
- [23] 沈新普, 王建学, Zenon Mroz. 正交各向异性损伤材料的 Mohr-Coulomb 条件. *煤炭学报*, 2003, 28(1): 26-30
- [24] 沈新普, Zenon Mroz, 徐秉业. 岩土材料弹塑性正交异性损伤耦合本构理论. *应用数学和力学*, 2001, 22(9): 1028-1034