



岩土渗流损伤力学

理论与数值分析

薛新华 张我华 著

Theory and Numerical Analysis
of Seepage Damage Mechanics
of Geo-materials



四川大学出版社

内容简介

NEIRONG JIANJIE

本书全面系统地总结了各向同性弹塑性有限变形理论及各向同性双标量损伤变量理论，并从连续损伤力学的角度，对岩土体的渗流力学特性进行了研究，提出了孔隙介质完备有效的Darcy定律，并在此基础上发展了渗流微分方程的基本形式以及孔隙率和渗透系数演变的岩土体渗流损伤模型，并以软土路基模型为例进行了详细的计算与分析，得出了一些有益的结论。

本书可供土木工程及水利工程等科研人员及高等院校有关专业的师生参考。

岩土渗流损伤力学

理论与数值分析

薛新华 张我华 著

Theory and Numerical Analysis
of Seepage Damage Mechanics
of Geo-materials



四川大学出版社

致 谢

本研究得到以下科研项目的资助：

国家自然科学基金（50379046）

教育部博士点基金（A50221）

本研究得到以下教授、专家和领导的帮助：

浙江大学：龚晓南院士、丁皓江教授、蔡袁强教授、陈云敏教授、谢康和教授、唐晓武教授、凌道盛教授；

浙江工业大学：丁伯阳教授；

中国海洋大学：刘红军教授、贾永刚教授；

四川大学：陈建康教授、李嘉教授、杨兴国教授、张建海教授、何昌荣教授、陈群教授、周成教授；

中国中铁二院工程集团有限责任公司：魏永幸教授级高工

本书得到四川大学水利水电学院岩土结构所的资助出版。

在此一并表示感谢！

薛新华

2012 年 4 月 20 日

前 言

岩土体是自然界中一种内部富含各种缺陷（如微裂纹、孔隙等）的多相体，地下水在微裂纹、孔隙中的渗流作用会影响岩土体中应力场的分布，同时岩土体中应力场的改变又使裂隙产生变形发展，影响裂隙的渗透性能，所以裂隙渗流场问题是一个多场（应力场、变形场、损伤场、渗流场等）、多相介质（流体、固体、颗粒体等）耦合的复杂动力学问题。因此，它是近年来工程理论研究的热点问题，对它进行深入研究，不仅在理论上而且在工程应用上都有重要意义。

如何引进损伤力学理论的优势，并对其进行合理的改进，同时考虑饱和水的影响，建立岩土体的渗流损伤本构模型是本书一个重点研究和探讨的问题。为此，本书在以下几个方面做了一些力所能及的工作。

1. 在前人研究工作的基础上，发展了各向同性弹塑性损伤的有限变形耦合理论。首先基于构形方法，对应力张量与应变张量、有效弹性能、塑性应变增量等进行了一些不同观念的描述，然后对基于构形的弹塑性损伤耦合模型进行了讨论，研究并发展了损伤材料的演化方程以及本构方程等，提出了各向同性弹塑性损伤有限变形耦合理论模型，即损伤有限变形运动学方程以及损伤本构方程等。

2. 在前人研究工作的基础上，推广并发展了各向同性双标量损伤变量理论。推导了各向同性双标量损伤弹性应变能释放率和损伤演化方程的表达式，并对各向同性双标量损伤变量模型的特征、可易性性质等进行了讨论和分析，为本书研究内容的创新点打下基础。

3. 从连续损伤力学的角度，对岩土体的渗流力学特性进行了研究，提出了孔隙介质完备的有效 Darcy 定律（模型），并在此基础上发展了渗流微分方程的基本形式以及完备有效渗流场中孔隙介质渗透系数和孔隙率演化方程模型等。尽管上述理论的分析、推导、建立、论证在逻辑上是完备合理的，但是，鉴于时间、条件和经费等原因，上述完备有效渗流场的理论还必须实验充分验证后才能是具有原创意义和新价值的结果。目前的研究水平只能算是一种探索性的尝试研究。

4. 在各向同性双标量损伤变量模型以及改进的孔隙介质完备的渗流微分方程、达西定律等基础上，修正 Biot 固结理论的基本方程，编制了岩土体渗流损伤有限元程序。然后以软土路基有限元简化模型为例，利用自主编制的岩土渗流损伤程序，对计算模型的沉降、孔压、应力、应变以及损伤和弹性能释放率等进行分析讨论，并以典型节点为

例，计算了模型沉降、孔压值等的变化曲线。此外，对由于不同时间差分格式在预测路基工作性状方面究竟会引起何种偏差等目前尚不清楚的问题，本书利用编制的岩土渗流损伤有限元程序对此进行了计算、分析、讨论，得出了一些有益的结论。

限于时间和作者水平，书中错误和不当之处在所难免，欢迎读者批评指正！

薛新华

2012 年 4 月 20 日

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 岩土材料流—固耦合研究现状	(2)
1.3 损伤力学在岩土力学中的应用	(5)
1.4 双标量参数损伤模型的发展	(8)
1.5 本书主要内容	(8)
第 2 章 损伤力学基础	(10)
2.1 引 言	(10)
2.2 损伤力学基本概念	(11)
2.2.1 损伤变量	(11)
2.2.2 有效应力	(12)
2.2.3 基本假定	(13)
2.3 热力学基础	(15)
2.3.1 热力学第一和第二定律	(15)
2.3.2 损伤材料的自由能和耗散不等式	(16)
2.3.3 损伤材料的机械耗散势与对偶关系式	(18)
2.3.4 损伤应变能释放率	(19)
2.4 最小耗能原理表达的损伤及其本构理论	(20)
2.5 本章小结	(23)
第 3 章 双标量损伤变量理论及其发展	(24)
3.1 弹塑性损伤的有限变形理论	(25)
3.1.1 基于构形的应力张量描述	(25)
3.1.2 应力和应变转换	(27)
3.1.3 弹塑性损伤耦合模型	(31)
3.1.4 弹塑性损伤有限变形理论	(34)
3.2 双标量损伤变量理论	(46)
3.2.1 各向同性损伤变量	(46)

3.2.2	损伤材料的应力—应变关系	(47)
3.2.3	双标量损伤变量	(47)
3.2.4	损伤应变能释放率	(53)
3.2.5	双标量损伤变量模型特征的讨论	(58)
3.2.6	双标量损伤变量的可易性	(63)
3.2.7	多孔介质损伤效应函数问题分析	(71)
3.2.8	多孔介质孔隙度问题	(74)
3.2.8.1	Mori-Tanaka 理论	(74)
3.2.8.2	考虑温度和孔隙压力的动态损伤演化模型	(76)
3.2.8.3	孔隙度与分形维数之间的关系	(77)
3.3	本章小结	(77)
第4章	孔隙介质损伤渗流分析模型研究	(79)
4.1	前言	(79)
4.2	管涌计算模型概述	(80)
4.3	管涌发生过程的描述	(81)
4.4	岩土介质的有效渗透特性	(84)
4.4.1	孔隙率与损伤变量的关系	(84)
4.4.2	孔隙介质完备的有效 Darcy 定律	(84)
4.4.3	岩土体渗透特性的讨论	(87)
4.4.3.1	常规渗透系数的特性	(87)
4.4.3.2	有效渗透系数的特性	(89)
4.4.3.3	层状介质的有效渗透特性	(90)
4.5	渗流分析的完备有效基本方程	(91)
4.5.1	完备有效渗透孔隙介质的渗流微分方程	(91)
4.5.2	用体积孔隙率表示的微分方程	(95)
4.6	渗流场中的势函数和流函数	(96)
4.6.1	孔隙介质中流体的有效势函数与有效流函数	(96)
4.6.2	孔隙介质中流体的流线和流网	(97)
4.7	孔隙介质渗流的损伤破坏准则	(99)
4.8	孔隙率和渗透系数演化的数学模型	(102)
4.9	本章小结	(106)
第5章	流—固耦合损伤有限元程序编制	(107)
5.1	有效应力应变及损伤影响张量	(107)
5.1.1	损伤材料的应力—应变关系	(107)
5.1.2	双标量参数各向同性损伤模型	(108)

5.1.3 单标量参数的各向同性损伤模型	(112)
5.2 基本方程	(112)
5.2.1 应力平衡方程	(112)
5.2.2 损伤孔隙介质的有效应力	(112)
5.2.3 变形几何方程	(113)
5.2.4 渗流力学方程	(117)
5.2.5 损伤孔隙介质的应力—应变本构方程	(119)
5.2.6 损伤孔隙介质的演化方程	(125)
5.2.7 边界条件	(127)
5.3 有限元方程的建立	(129)
5.3.1 空间 8 结点等参元	(129)
5.3.2 位移和孔压的离散模式	(130)
5.3.3 Biot 固结方程的变分离散格式推导	(131)
5.3.4 损伤孔隙介质流—固耦合有限元变分与离散	(135)
5.3.5 损伤孔隙介质流—固耦合有限元方程	(137)
5.4 有限元方程的求解	(141)
5.4.1 迭代概述	(141)
5.4.2 一般原理	(141)
5.5 程序研制与使用说明	(145)
5.5.1 编程步骤	(145)
5.5.2 其他问题	(146)
5.5.3 程序使用说明	(147)
5.6 程序验证	(149)
5.7 本章小结	(153)
附录：弹塑性塑性矩阵及损伤增量等公式的详细推导	(154)
第 6 章 Biot 固结损伤有限元在软土路基沉降中的应用	(156)
6.1 软土路基有限元简化模型	(156)
6.1.1 损伤固结问题有限元分析	(156)
6.1.2 有限元模型参数	(156)
6.2 结果分析	(159)
6.2.1 单标量和双标量损伤模型计算结果对比分析	(159)
6.2.2 小变形和有限变形损伤模型计算结果对比分析	(170)
6.2.3 时间差分格式对 Biot 固结损伤有限元分析的影响	(171)
6.2.4 损伤变量与损伤应变能释放率的性态	(176)
6.2.5 应力曲线和应变曲线	(180)

6.3 本章小结	(183)
第7章 结论与展望	(185)
7.1 本书的主要工作及结论	(185)
7.1.1 本书的主要工作	(185)
7.1.2 结 论	(186)
7.2 下一步工作的展望	(187)
参考文献	(188)

第1章 绪论

1.1 引言

自从岩土力学成为一门真正的独立学科,对岩土材料本构模型的研究一直是整个学科研究的基石和最为关键的问题。能否合理地建立岩土材料本构模型,决定着岩土力学学科能否由经验转化为公理化。因此,岩土工作者从未放弃过对岩土材料本构模型的研究。严格地讲,目前的岩土材料本构模型可分为两大部分,即与时间有关的各种时效本构模型和与时间无关的准静态本构模型。其中,准静态本构模型主要包括以下几种,现概述如下:

(1) 弹性本构模型。

岩土材料的弹性本构模型是岩土材料本构模型中历史最为悠久、发展最为成熟的一类模型。这类本构模型假定岩土材料为弹性材料,其应变可以恢复,利用弹性理论的成熟体系,建立了一系列本构模型。它主要包括线弹性模型、非线性弹性模型、次弹性模型和超弹性模型等几种,其中有代表性的一些模型主要有邓肯—张模型、Domaschuk-Valliappan 模型、Naylor 模型、Lzumi-Verruijt 耦合模型、沈珠江模型等。

由于弹性理论发展较为完善、求解相对简单,故岩土材料的弹性本构模型仍然有着较为广泛的应用,目前主要集中在岩基、地基沉降计算,土的固结计算等领域。对于简单加载,弹性模型简单实用,但笼统地假定岩土材料为弹性材料是明显不完全符合实际的。对于岩土材料的一些重要特性,弹性模型难以反映,故这类模型有很大的局限性。

(2) 塑性本构模型。

由于弹性本构模型和岩土材料的力学特性有较大的差别,特别是假定应变可以恢复是明显错误的,故利用塑性理论建立岩土材料的本构模型就成了一个重要的途径。岩土材料的塑性本构模型是建立在塑性增量理论的基础上,将总应变 ϵ_{ij} 视为由可恢复的弹性应变 ϵ_{ij}^e 和不可恢复的塑性应变 ϵ_{ij}^p 组成,即

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p \quad (1-1)$$

或

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (1-2)$$

弹性应变增量 $d\epsilon_{ij}^e$ 用弹性理论求解,塑性应变增量 $d\epsilon_{ij}^p$ 由塑性增量理论计算。相对于弹性本构模型,岩土材料的塑性本构模型更能反映岩土材料的力学特性,如剪胀性、静压屈服性、应变不可恢复等特点,但是这些本构模型都存在参数多、空间屈服面不光

滑、数学求解困难等问题。目前,岩土材料的弹塑性模型中应用最为广泛的是剑桥模型、拉得—邓肯模型、清华模型、Drucker-Prager 模型等。

(3) 黏弹—塑性本构模型。

弹性、塑性和黏性是连续介质的三种基本性质,在一定条件下各自反映材料本构关系一个方面的特性。理想弹性模型、理想塑性模型和理想黏性模型是反映这三种性质的理想模型,通常称为简单模型。实际工程材料的本构关系可以用这些简单模型的各种组合来构成。比如,由理想弹性模型和理想塑性模型可以组合成理想弹塑性模型;由弹性模型和黏性模型可以组合成各种黏弹性模型;由黏性模型和塑性模型可以组合成各种黏塑性模型;由弹性模型、塑性模型和黏性模型可以组合成各种黏弹塑性模型等。常见的主要模型有:Maxwell 模型、Kelvin 模型、三元件黏弹性模型、Bingham 模型、三元件黏弹塑性模型等。

(4) 损伤本构模型。

岩土材料特别是土体,基本上不是弹性的,而且当岩土材料一受到外载,其内部结构就会产生一系列的破坏和失效。岩土材料的力学性状十分复杂,归纳起来主要包括以下几个特点:① 非线性和非弹性;② 静压屈服特性和剪胀性;③ 摩擦性材料;④ 受应力路径、应力历史、中主应力和初始应力状态等的影响;⑤ 结构性;⑥ 弹塑性耦合现象等。严格意义上讲,岩土材料也不是一种塑性材料,所以单纯利用弹性或塑性理论都不能很好地描述岩土材料的力学机理,故必须寻找新的力学工具来推动岩土材料本构模型的研究工作。

损伤力学作为近年来新发展起来的一种力学体系,由于其更能反映固体材料的缺陷本构关系,故它从诞生以来就引起了广大岩土工作者的注意。损伤力学的一些基本思想和主要的研究手段都比较符合岩土材料,因此不少学者从事这方面的研究工作,并且取得了很多重要成果。

如何引进损伤力学理论的优势,并对之进行合理的改进,同时考虑饱和水的影响,建立岩土体的渗流损伤本构模型是本书一个重点研究和探讨的问题。

1.2 岩土材料流—固耦合研究现状

岩土介质是自然界的产物,同时又是一种内部富含各种缺陷(如微裂纹、孔隙等)的多相体,它们的存在为地下水提供了储存和运移的场所。地下水渗流并以渗透应力作用于岩土介质体,影响岩土介质体中应力场的分布,同时岩土介质体应力场的改变往往使裂隙产生变形,影响裂隙的渗透性能,这种相互影响称为渗流—应力耦合(coupling of seepage and stress)。

对岩土介质流—固耦合相互作用的研究,经历了由一个非耦合研究到耦合研究的历程。非耦合研究,即单纯的渗流力学研究,一般假定流体流动的多孔介质是完全刚性的,在孔隙流体压力变化过程中,固体骨架不产生任何弹性或塑性变形,即没有考虑流

体渗流与岩土变形之间的相互作用,这种简化可以得到问题的近似解。但实际的多孔介质大多为可变形体,在许多情况下,必须考虑孔隙流体在变形多孔介质中的流动规律及其对多孔介质本身的变形或者强度造成的影响。因此,流—固耦合问题越来越受到人们的重视,是当前岩土力学和流体力学研究的热门课题和重大课题^[1-4],也是多学科交叉性质的前沿研究课题。

流—固耦合问题是流、固两场同时存在时的基本问题,它们之间的相互作用将在不同条件下产生形形色色的流—固耦合作用,这使流—固耦合问题广泛存在于许多工程问题中,如地下水抽放引起的地面沉降^[5]、垃圾填埋场污染渗液、气体扩散、软土地基固结^[6-7]、水库诱发地震^[8]、岩坡和堤坝稳定性^[9-12]、煤层瓦斯渗流^[13-18]等;流—固耦合问题也广泛存在于石油工业中,如注采过程中的油藏渗流^[19-22]、井壁稳定、油井和套管的破坏、产层出砂、水力压裂、地层失稳坍塌等。在上述问题中,孔隙流体压力的变化会导致岩土有效应力的改变,从而影响岩土骨架的变形。与此同时,岩土固结的变形又会反过来导致储渗特性和孔隙流体压力的改变,从而影响渗流过程。因此,必须将经典的渗流力学修正并和岩土力学结合起来,全面考虑渗流和岩土变形之间的耦合过程,建立流—固耦合模型。

由此可见,流—固耦合问题存在以下几方面的特点^[23]:①普遍存在性。只要固体和流体同时存在于一个系统中,在这个系统中就一定有流—固耦合现象发生。②动态性。固体场和流体场两场中的任一场都随时间和空间不断地发生变化,两场在某种条件下也可以处于相对平衡的状态,但只要其中一场被扰动而发生变化,另一场即随之变化,并且往往是系统中一场或两场发生剧烈的和反复性的扰动变化时,流—固耦合效应非常强烈。③基础性。一方面,流—固耦合理论研究耦合状态下固相变形和流体流动的最基本的规律;另一方面,流—固耦合理论研究为大量相关问题提供流场和岩土应力场的原始性和基础性参数。④多学科多方法交叉性。流—固耦合理论是一个涉及范围非常广泛的学科,包括流体力学、固体力学、动力学、热力学、计算力学、岩土力学、材料结构学、构造地质学、地球物理学、地下工程学等,并且将这些学科的知识交叉、综合运用。⑤多工程应用性。流—固耦合问题由于其研究范围甚广,在许多工程技术领域得到应用,如土木、航空航天、船舶、动力、海洋、机械、核动力、地震地质、生物工程、石油、环境保护等均有联系,而且随着科学技术的发展,将被更加广泛地应用。

流—固耦合问题的研究无论在理论上还是在实际工程中都有重要的理论意义和应用价值,但是对地下流—固耦合问题,如土体^[24-25]固结过程中的流—固耦合问题,由于人们对土的认识不够,这方面的研究还处于探索阶段。对土体固结过程中的流—固耦合问题进行研究可以解决许多实际工程问题,推动整个流—固耦合问题研究向前发展。

对渗流中流—固耦合问题的研究,最早来源于土体固结理论。当外载增加时,土体逐渐压缩,同时部分水量从土体排出,荷载也相应地从孔隙水(或气)上转移到土骨架上,导致土骨架应力增加,土体也进一步变形,直到土骨架应力、孔隙压力与外载平衡时为止,土体的这一变形全过程称为固结。

1925年, Terzaghi 根据有效应力原理提出了饱和土体的一维固结理论。由于 Terzaghi 提出的固结理论是基于一定的假设, 所以 Terzaghi 固结理论仅局限于分析土体一维变形和一维渗流的情况。Terzaghi 的一维固结理论虽然考虑了渗流对土体固结的影响, 但流体渗流不受土体变形的影响, 因此未考虑渗流中流—固耦合效应。Biot(1941) 从较严格的固结机理出发, 考虑孔压消散和土骨架变形的相互关系, 得出更为普遍的三维固结理论。Biot 将孔隙流体压力和水容量的变化也增列为状态变量, 此方程是七对状态变量之间的物理关系, 是考虑渗流中流—固耦合效应的第一个力学理论^[26]。该理论认为, 在缓慢渗流的准静态情况下, 孔隙水压力不能引起各向同性的多孔介质的剪切变形, 但对各个方向正应变的影响是相同的。同样, 剪应力对水容量增量的变化无影响, 而各个法向应力对水容量增量的影响是相同的。Biot 建立的三维固结理论只考虑了介质变形对流体质量(孔隙变化量引起的孔隙储水性变化)守恒的影响, 但没有考虑其对渗透率(孔隙变化量引起的流量的变化)的影响, 因此只能反映流—固之间的线性耦合作用。Biot 的耦合理论适合于多孔介质、孔隙变化量和渗透率的关系方程, 有效应力原理是该理论的基本框架, 孔隙变化量是影响渗透率和孔隙水压的关键指标, 所以渗流—应力耦合问题确切地说是渗流—孔隙变化或介质应变耦合问题。

20世纪50年代, Lubinski^[27] 和 Geersman^[28] 在关于多孔介质^[29] 的弹性理论中都曾讨论过 Biot 方程。Verrujit 进一步发展了多相饱和渗流与孔隙介质耦合的理论模型。Mikasa、Gibson^[30] 等把小变形的理论推广到更普遍的大变形^[222-228] 固结理论。

20世纪70年代以来, 在石油开发领域相继提出了一系列新的研究课题, 如注蒸汽导致的地应力变化、水力压裂、软地层井壁稳定、产层出砂以及油气开采引起的地面沉降等。有些学者针对这些问题开展了油藏工程地质问题的研究, 在开发机理、流—固耦合理论及工程应用方法的研究方面进行了创造性的研究工作, 并在某些方面取得了一定的研究成果。此外, Savage 等^[31] 将 Biot 的三维固结理论应用到了横观各向同性的孔隙弹性介质中。Zienkiewicz 等^[32] 考虑了几何非线性和材料的非线性, 并在 Biot 的三维固结理论基础上提出了广义 Biot 公式。国内张洪武等^[33] 利用了 Zienkiewicz 等建立的广义 Biot 公式对饱和土壤固结的非线性问题的理论和算法进行了研究。

近年来, 地下流—固耦合的研究又有了长足的发展, 其特点是: 由单相流到多相流; 由单一介质向更复杂的双重或多重连续介质及拟连续或非连续的裂隙网格模型发展; 放弃了固相介质小变形的假设, 改为考虑更为实际的非线性本构关系。新的数学理论方法得到了更为广泛的应用, 从而改善了对理论模型的评定和求解能力。国内董平川等^[34] 将 Biot 理论推广到多相流体和岩体耦合的弹塑性情形; 冉启全等则以同相质点速度为耦合变量, 分别建立了弹塑性饱和储层中多相渗流耦合模型, 并得到了数值解, 且在石油工程一些领域中有了一定程度的应用。

在土壤固结的研究方面, 陈正汉^[35] 把非饱和土视为不溶混的三相混合物, 用混合物理论的观点研究了非饱和土的固结问题。他所用的控制方程组以增量形式给出, 包含的未知数和材料参数少, 为工程应用提供了方便, 并且分别给出了一维问题和二维问题

的解析解和有限元解。李宁、陈飞熊^[36]考虑了土体中土骨架的动态响应与土中孔隙水的渗流—固结之间的相互耦合作用,在时间域内利用 Newmark 法系统推导了三维流—固两相介质动力响应有限元解析格式与数值分析方法,并且利用日本学者的试验结果对其力学模型与分析系统进行了检验与验证。杨林德^[37]把饱和土视为均质、连续的各向异性弹塑性多孔介质,根据虚位移原理推导出饱和土体内各向异性渗流直接耦合的有限元计算公式,用 MATLAB 语言编写出平面条件下的计算程序,对各向异性弹性多孔介质中的 Mandel 效应进行了数值模拟。浙江大学岩土所的陈云敏及其课题组^[229]在垃圾填埋场、环境岩土工程领域非饱和和多相流等方面做了许多卓有成效的工作,如把垃圾填埋场简化为非稳定单向气体渗流场,采用 Gibson 和 Lo 一维压缩模型及 U.S.EPA Landgem 产气方程,结合达西定律、气体状态方程、有效应力原理和多孔介质流体动力学理论,建立了考虑气固耦合的填埋场沉降计算模型等,在国内开创了这方面的先河。

1.3 损伤力学在岩土力学中的应用

岩土类材料(岩石、混凝土、土等)是岩土工程的普遍对象。当前,国内外岩土工程发展迅速,涌现出越来越多民用、交通、能源、矿山、水利和国防领域内的大型岩土工程,其工程设计、施工、稳定性评价和基体加固等都直接依赖于岩土类材料的强度、变形、破坏等特征。因此,对岩土类材料力学特性的正确描述以及组成结构的精确分析,直接影响着这些结构的设计,这一问题的研究对保证结构的安全使用具有十分重要的意义。

试验研究表明,岩土类材料在外荷载作用下的应力—应变变化过程是其内部微裂纹的萌生、演化和发展的过程。现有的非线性弹性理论和弹塑性理论都只是对应力—应变关系曲线的拟合,而不能从本质上反映这一过程。岩土类材料的弹塑性断裂理论也仅能处理宏观裂缝出现以后裂缝对结构的影响,无法解决宏观裂缝出现以前材料中的微裂缝问题。而近二十年发展起来的损伤力学通过定义损伤变量来反映材料在受力过程中内部结构的变化,并将损伤变量引入到材料的本构方程中,使本构方程能从本质上反映材料演化的力学行为,因而日渐受到工程界和力学界的重视,成为当前国内外学者研究的热点^[70-78]。

研究表明,由于局部变形不协调而引起的损伤局部性是土体(或岩体)损伤的一个重要特征^[79]。损伤力学在岩土类材料中的应用最早见于 Dougill(1976)的文章。此后,Dragon 等(1979)^[80]利用断裂面概念对岩石和混凝土的连续损伤进行了理论探讨。Desai(1987)^[81]建立了考虑应变软化的弹塑性损伤模型,并对应变软化本构模型作了分析和讨论。Krajcinovic(1981, 1983, 1985, 1986, 1991, 1993, 1995)^[82-87], Kachanov(1980, 1982, 1987)^[88-91], Costin(1983, 1985)^[92, 93], Chaboche(1988)^[94], Ju(1989, 1990, 1991, 1994)^[95-98], Lubarda(1994, 1995)^[99, 100], Stumvoll M 和 Swoboda(1993)^[101], Swoboda et al.(1995, 1999)^[102, 103], Halm 和 Dragon(1996, 1998)^[104, 105], Zhang Wohua 和 Valliappan^[106, 107]

等学者从不同角度将损伤力学用于岩土类材料,并建立相应的理论和模型,从而使岩土类材料损伤力学的研究不断丰富和完善。

经典的损伤力学是针对金属材料发展起来的,当用于土体材料时就不完全适用。由于土体主要是在压应力状态下工作,土体在损伤以后仍可承担压应力,在一定应力条件下仍具有抗剪强度。土体的结构性包括土体的组成、排列变化和粒间胶结等因素。土体的塑性变形是源于土粒间相互位置的移动和土粒的破裂,因而土的塑性理论模型主要是土颗粒排列关系的描述,以塑性应变为函数的硬化参数实际上是土中颗粒相互位置及排列积累的一个尺度。从这个意义上讲,土的塑性理论模型也能反映土体的结构性及其变化。但是当颗粒间存在以粒间作用力为主的相互联系时,损伤可反映这种作用的破坏过程。与塑性应变一样,损伤及其引起的应变也是不可恢复的,因而在这个过程中损伤变量是个递增函数。在建立土的损伤模型时,最常用的方法是将原状土在初始状态下作为一种初始无损材料,而将完全破坏的土体作为损伤后的材料,在加载变形过程中土体可认为是原状土与损伤土两种材料的复合体。

张土乔^[108]在1992年应用损伤力学时描述了水泥土的力学特性。他借鉴混凝土的弹脆性损伤模型,建立了一个水泥土的损伤演化方程:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \begin{cases} E\epsilon_1, & \epsilon \leq \epsilon_d \\ E\epsilon_1(1 - \Omega_1), & \epsilon > \epsilon_d \end{cases} \\ \Omega_1 = a(\epsilon_1 - \epsilon_d)^b \end{cases} \quad (1-3)$$

式中, a, b 为材料系数; ϵ_d 为损伤应变阈值。

童小东(1998)^[109]依据水泥土的应变硬化规律和损伤硬化规律,假定了塑性本构方程和损伤演化方程的形式,通过损伤试验确定有关参数,建立水泥土无侧限轴向压缩下弹塑性正交各向异性损伤模型。

沈珠江、章为民(1998)^[110]最早提出土体的损伤理论。他们首先定义一种理想的原状土和一种理想的完全损伤土。前者指天然沉积土,后者指原状土受到力学因素的作用后“结构性”完全丧失的土体。现实土体的变形和破坏过程可以视为由原状土到损伤土的演变过程。沈珠江(1993)^[111]在上面论述的基础上,提出了一个土体结构性的弹塑性损伤模型。沈珠江假定土体的塑性应变由原状土的屈服、损伤土的屈服和损伤比的增加三部分组成,即

$$\{\Delta\epsilon^p\} = (1 - w)\{n_l\}\langle A_i \Delta f_l \rangle + w\{n_d\}\langle A_d \Delta f_d \rangle + \{\Delta\epsilon_d\} \quad (1-4)$$

式中, f_l, f_d 分别为原状土和损伤土的屈服函数; 塑性系数 A_i, A_d 及矢量 $\{n_l\}, \{n_d\}$ 分别为 f_l, f_d 增加一个单位时两种分量的大小和方向; $\{\Delta\epsilon_d\}$ 代表损伤应变。若把原状土简化为弹性体,弹塑性损伤模型如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D](\{d\epsilon\} - \{d\epsilon^d\}) \\ [D]_{ep} &= [D]_e - \frac{wA_d[D]_e\{n_d\} \left\{ \frac{\partial f_d}{\partial \sigma} \right\}^T [D]_e}{1 + wA_d \left\{ \frac{\partial f_d}{\partial \sigma} \right\}^T [D]_e\{n_d\}} \\ f_d &= \frac{\sigma_v}{1 - \left(\frac{\eta}{\eta_m} \right)^n} \\ w &= 1 - e^{-(a\epsilon_v + b\epsilon_s)} \end{aligned} \right. \quad (1-5)$$

式中, $\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$; $\epsilon_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2}$; a, b 为材料参数。

沈珠江(1993)认为其提出的弹塑性损伤模型比较复杂,之后又提出非线性弹性损伤模型。孙林(1997)^[112]在殷宗泽椭圆-抛物线双屈服模型的基础上,提出了考虑土体剪损的损伤模型:

$$\left\{ \begin{aligned} F_1 &= p + \frac{q^2}{M_1(p + p_r)} - \frac{h\epsilon_v^p}{1 - m\epsilon_v^p} \\ F_2 &= \frac{aQ}{G} \sqrt{\frac{q}{M_2(p + p_r) - q}} - \epsilon_s^p \\ w &= 1 - exp[-a(\epsilon_s - \epsilon_0)], \epsilon_s > \epsilon_0 \end{aligned} \right. \quad (1-6)$$

式中, a 为材料参数; $\epsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2}$; ϵ_0 为剪损应变阈值。

孙红、赵锡宏(1999)^[113]采用损伤力学观念对地基沉降进行了研究,他们建议的瞬时沉降公式为

$$\left\{ \begin{aligned} s_d &= k \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i \Delta h_i}{E_i(1 - \Omega_i)} \\ \Omega_i &= a(P - P_d) \end{aligned} \right. \quad (1-7)$$

式中, ΔP_i 为土层中心高程处的附加应力; Δh_i 为土层厚度; E_i 为初始弹性模量; Ω_i 为损伤变量; k 为综合位移系数; a 为材料参数; P_d 为初始损伤应力阈值。对于固结沉降,他们认为与应力水平有关:当应力小于先期固结压力时,土体没有发生损伤,压缩变形小,应取相应的压缩指标 C_s ; 当应力大于先期固结压力时,土体发生损伤,压缩变形大,应取相应的压缩指标 C_c 。同时,他们对软土初始损伤门槛值做了真三轴试验研究,通过三轴试验^[114]得出损伤变量与剪应力成正比,初始损伤门槛值与固结压力呈指数函数关系的结论,并将软土的弹塑性损伤模型^[115]用在 Biot 固结有限元中^[116],取得了较为理想的成果。该弹塑性损伤模型假设损伤过程与塑性过程是两个独立过程,塑性本构关系与传统塑性本构关系类似。