

中国矿业大学图书馆藏书



C01726205

国家自然科学基金 (50804002, 40972188)

资助

高等学校博士点专项科研基金 (200803610004)

深部冻结黏土蠕变损伤耦合 本构模型及应用研究

李栋伟 林 斌 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

P619.23
L-265

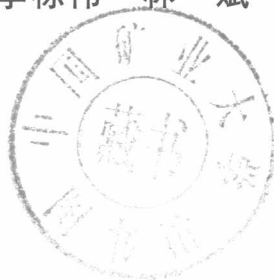
国家自然科学基金(50804002,40972188)

教育部高等学校博士点专项科研基金(200803610004)

资助

深部冻结黏土蠕变损伤耦合 本构模型及应用研究

李栋伟 林 斌 著



中国矿业大学图书馆藏书



C01726205

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书基于卸载应力路径和有限元数值计算方法研究了深部冻结黏土蠕变和损伤变形特征,并获得了人工冻土在卸载应力路径下的黏弹塑损伤耦合本构模型;提出深井冻结壁分为损伤区、黏塑区和黏弹性区的分区理论,并推导获得各个区域冻结壁的应力场和位移场理论计算公式;对深部冻结黏土冻融温度场、冻结壁内部应力和工作面位移进行现场实测,并获得了随时间发展的变化规律。研究内容为冻结法凿井设计与施工提供指导意义。

本书可供岩土工程、地下结构、隧道与地铁工程和冻土工程领域从事科研、设计、施工及管理人员参考使用,也可以作为土木工程、力学和矿业工程领域相关研究生和教师的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

深部冻结黏土蠕变损伤耦合本构模型及应用研究/李栋
伟,林斌著. —徐州:中国矿业大学出版社,2011.12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1192 - 7

I. ①冻… II. ①李…②林… III. ①冻结—黏土—蠕变—耦
合—损伤(力学)—研究 IV. ①P619.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 171540 号

书 名 深部冻结黏土蠕变损伤耦合本构模型及应用研究
著 者 李栋伟 林 斌
责任编辑 杨 洋 褚建萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州新华印刷厂
开 本 850×1168 1/32 印张 5.25 字数 132 千字
版次印次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书采用固结、低温冻结和径向卸载的三轴剪切试验方法,模拟深部人工冻黏土冻结井筒开挖卸荷力学过程。通过试验获得:偏应力不大时人工冻土应力—应变呈线性关系,偏应力水平较大时应力—应变呈明显的非线性关系,表明人工冻黏土为塑性岩土材料;高围压卸载人工冻土满足改进的 Zienkiewicz-Pande 抛物线型屈服准则,低围压卸载应力下人工冻土剪切屈服面可以选择 Mohr-Coulomb 屈服函数。

人工冻黏土三轴卸载蠕变试验结果表明:当偏应力水平较低时,只发生第Ⅰ和第Ⅱ阶段的蠕变变形,且蠕变变形占总变形量的 70% 以上;当偏应力水平高于某一临界值时出现蠕变第Ⅲ阶段,冻土发生较大的塑性流动,试件一般历时 3~5 h 后破坏,且蠕变变形量占总变形量 80% 以上,发生第Ⅲ阶段的临界应力值可以用改进的 Zienkiewicz-Pande 抛物线型屈服准则来描述。

基于人工冻土三轴蠕变和剪切试验结果,应用黏弹塑性力学、热力学和岩土损伤力学原理,推导获得人工冻黏土黏塑性损伤变量及损伤演化规律,采用改进的 Zienkiewicz-Pande 抛物线型屈服准则代替线性牛顿体,获得了卸载应力路径下的人工冻土黏弹塑损伤耦合本构模型,并推导出用于数值计算黏弹性和黏塑性损伤耦合柔度矩阵。在 Compaq Visual Fortran 6.6A 环境下编写了人工冻土蠕变损伤耦合本构有限元程序;通过用户

子程序方法嵌入非线性有限元软件 ADINA 中。通过数值模拟和试验获得人工冻土在卸载应力路径下的蠕变试验与模拟值吻合较好,数值模拟和蠕变实测值误差最大为 4.8%,表明用改进的 Zienkiewicz-Pande 抛物线屈服面屈服准则构造的非线性牛顿体表示的黏弹塑损伤耦合本构模型来描述人工冻土蠕变本构是合理的。

卸载应力路径下的人工冻土蠕变包括瞬时应变分量、黏弹性应变分量和黏塑性应变分量 3 个部分,从而将冻结壁分为损伤区域、黏塑性区域和黏弹性区域 3 个区域。假定冻结壁损伤区域满足 Mohr-Coulomb 屈服准则,黏弹塑性冻结壁采用 Laplace 变换原理从理论上求解深井冻结壁应力场和位移场。实测冻结壁位移和理论计算变化规律完全一致,表明采用黏弹塑损伤理论计算获得的冻结壁应力场和位移场是合理的。

对深厚冲积层冻结法凿井过程中的温度场、井壁内力和井筒开挖过程中的位移场进行现场实测,并获得了相应的变化规律。根据工程条件确定冻结壁空间温度场,采用人工冻土黏弹塑损伤耦合本构模型,同时考虑冻结井筒开挖动态施工力学过程,利用 ADINA 非线性有限元分析软件进行深井冻结壁温度场、应力场和位移场耦合分析,得到冻结井筒开挖过程中工作面位移分布和应力场分布规律,并且和实测规律一致。

基于统计损伤理论的人工冻土蠕变本构模型,克服了元件模型只能描述线性蠕变特性的缺陷,且本构模型通过简单试验获取计算参数,具有参数少、易确定等优点。本构方程的建立为进一步研究现场的冻土结构物力学行为提供有效研究途径,对冻土结构物长期稳定性分析与预测具有重大意义。

作者
2011.7

目 录

1	概述	1
1.1	研究意义	1
1.2	国内外研究现状	2
1.2.1	岩土蠕变损伤国内外研究现状	2
1.2.2	人工冻土蠕变损伤国内外研究现状	4
1.3	研究内容及技术路线	6
1.3.1	研究内容	6
1.3.2	技术路线	7
1.3.3	研究目标	7
2	深部黏土物理力学性质试验研究	9
2.1	试样来源	9
2.2	常规土工参数试验	11
2.3	深部土层热物理参数试验	12
2.4	深部黏土三轴应力路径试验	14
2.5	本章小结	16
3	应力路径下人工冻土三轴试验研究	18
3.1	人工冻土三轴试验系统	18

3.1.1	人工冻土三轴试验系统组成	18
3.1.2	人工冻土三轴试验系统功能	19
3.2	应力路径下人工冻土三轴剪切试验	22
3.2.1	试验方法与步骤	22
3.2.2	冻土三轴剪切应力路径试验	24
3.2.3	试验结果分析	36
3.3	人工冻土三轴应力路径蠕变试验	41
3.3.1	试验方法与步骤	41
3.3.2	应力路径下冻土三轴蠕变试验	43
3.3.3	三轴蠕变试验结果分析	52
3.4	卸载应力路径下冻土强度特性	56
3.5	本章小结	58
4	人工冻土蠕变损伤耦合本构模型研究	60
4.1	概述	60
4.2	改进的 Zienkiewicz-Pande 人工冻土抛物线型 屈服准则	61
4.2.1	Mohr-Coulomb 直线型人工冻土屈服函数	61
4.2.2	改进的 Zienkiewicz-Pande 抛物线型人工冻土 屈服函数	64
4.3	人工冻土蠕变损伤耦合本构模型	67
4.3.1	蠕变损伤耦合本构模型	67
4.3.2	人工冻土非线性黏弹性单元柔度矩阵	69
4.3.3	人工冻土非线性黏塑性单元柔度矩阵	70
4.3.4	人工冻土蠕变损伤耦合单元柔度矩阵	75
4.4	人工冻土黏弹性损伤耦合问题有限元方法	77

目 录

4.5	人工冻土蠕变损伤耦合本构模型在有限元程序中的实现	79
4.6	人工冻土本构模型参数确定及验证	82
4.6.1	人工冻土本构模型参数确定	82
4.6.2	人工冻土本构模型三轴试验验证	83
4.7	本章小结	88
5	基于黏弹塑损伤理论的冻结壁理论解	90
5.1	深井冻结壁计算模型	91
5.2	冻结壁损伤区应力场	92
5.3	深井冻结壁黏塑区应力场和位移场	94
5.4	深井冻结壁黏弹性区应力场和位移场	96
5.5	本章小结	102
6	深立井冻结法凿井过程数值模拟	104
6.1	ADINA 非线性有限元软件	104
6.2	深井冻结法凿井实测研究	106
6.2.1	工程概况	106
6.2.2	现场实测方案	108
6.2.3	测试结果及分析	108
6.3	深井冻结温度场数值模拟	118
6.3.1	冻结管偏斜建模方法	118
6.3.2	冻结温度场数值模拟结果及分析	120
6.4	深井冻结法凿井开挖过程数值模拟	125
6.4.1	建立空间冻结壁有限元计算模型	125
6.4.2	数值模拟结果及分析	125

6.5 本章小结	130
7 主要结论与创新点	131
7.1 主要结论	131
7.2 创新点	135
7.3 开展进一步工作的设想	136
参考文献.....	137
附录 人工冻土本构模型部分子程序.....	149

1 概 述

1.1 研究意义

冻结法是利用人工制冷技术使地层中的水结冰,将天然岩土变成人工冻土,增加地下工程岩土体强度和稳定性,隔绝地下水与地下工程之间的联系,以便在冻结帷幕下进行在特殊岩土地层中施工的技术。人工冻结法施工技术广泛应用于地铁隧道、桥梁深基坑和煤矿井筒建设等特殊岩土与地下工程中。1955年,冻结法凿井在我国林西风井成功应用,至今已有700余个井筒采用冻结法施工,累计冻结深度超过150 km。近年来,冻结法凿井穿越地层越来越深,例如,界沟矿冲积层厚度达620 m;山东巨野矿区表土层平均深度超过600 m,其中郭屯矿风井冻结深度达702 m;河南赵固矿副井冻结深度为575 m;江苏李堂矿井冻结深度达500 m;安徽口子东矿主井是目前国内冻结深度最深的井筒之一,其冻结深度达737.0 m。

人工冻土是由未冻水、冰、土颗粒和孔隙组成的一种四相特殊岩土材料,其物理力学性质极为复杂。在巨大的水土压力等外荷载作用下,深土冻土会表现出强烈流变效应和随时间损伤的力学特性。煤矿深井井筒一般穿越复杂岩土地层,冻结壁形成受工程地质和水文地质条件影响很大,不同地质工程条件和

多圈管冻结下形成的冻结壁内部冻胀力大小及分布、人工冻土瞬时强度、冻土蠕变、长时强度和损伤等力学特性有显著区别,因此冻结壁是一种非均质的各相异性材料,这直接影响冻结壁帷幕的设计、施工和稳定性分析。由于冻结井筒开挖卸载,冻结壁内部冻胀力释放以及人工冻土随时间发育较大的蠕变变形,最终导致冻结壁蠕变损伤破坏,从而造成冻结管断裂和冻结井壁压裂等严重工程事故。

因此,在深表土冻结壁设计计算中应该考虑人工冻土的蠕变损伤耦合特性,现有的岩土本构模型不能全面反映人工冻土的非线性蠕变和损伤耦合等综合力学特性。因此,研究应力路径下的人工冻土黏弹塑损伤耦合本构模型具有十分重要的理论意义。其成果为进一步研究现场的人工冻土力学行为和损伤破坏特征提供有效的研究途径,可为深井冻结壁设计、稳定性分析和工程预测提供科学指导。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 岩土蠕变损伤国内外研究现状

余成学等^[1-3]采用 RLJW—2000 微机控制岩石三轴流变仪,在分级加载条件下获得泥岩蠕变变形规律;基于试验结果和岩土流变模型理论提出蠕变参数变化率概念;引进岩石时效强度理论及 Kachanov 损伤理论,建立岩土损伤本构模型。王永岩等^[4-6]基于大量的岩石蠕变实验数据进行数值模拟,建立了蠕变与时间和应力之间的定量关系,获得深部软岩在高地应力作用下的蠕变方程;应用 Mohr-Coulomb 和 Griffith 破坏准则,获得高地应力岩体的蠕变破坏规律。鲜学福和姜永东等^[7-9]利用

MTS815 岩石力学试验系统,根据加载应力水平产生的蠕变差异,建立了砂岩的经验本构模型和蠕变力学模型,为岩体工程建设提供借鉴和参考。杨春和等^[10-13]进行不同含水条件下的强度试验和蠕变试验,分析含水量变化对泥岩强度、弹性模量等基本力学参数以及蠕变特性的影响。试验结果表明,含水量的增加大大降低泥岩的弹性模量和单轴抗压强度,并使泥岩的蠕变变形和稳态蠕变率显著增大。通过试验得到考虑含水量变化的泥岩蠕变本构方程,并与试验曲线进行对比。对金坛盐岩蠕变规律进行了试验研究,分析了不同应力状态和温度对盐岩蠕变特性的影响,通过试验获取了蠕变曲线和蠕变特征参数。根据其蠕变曲线特征,用黏弹塑性理论建立了盐岩蠕变本构模型。

王如宾和徐卫亚等^[14]采用先进的岩石全自动流变伺服仪,进行角砾岩渗透水压力作用下的三轴流变力学试验。当施加应力水平比较接近岩石破裂应力水平时,出现明显蠕变变形,蠕变速率开始增大,且发生加速蠕变破裂,表现出较为明显的加速蠕变特性。王登科、刘建和尹光志等^[15]自主研制了含瓦斯煤岩三轴蠕变试验系统。利用三轴蠕变试验系统对含瓦斯煤样进行一系列三轴蠕变试验,得到不同蠕变载荷、围压和瓦斯压力条件下的蠕变结果,从而建立了蠕变本构模型。唐明明、王芝银等^[16]对含泥岩夹层盐岩、纯泥岩和纯盐岩 3 种岩芯试样进行了不同围压下三轴压缩蠕变试验,分析其蠕变变形规律。在相同应力条件下,含泥质夹层盐岩试件的蠕变速率小于盐岩而大于泥岩。基于含泥质夹层盐岩试件中泥质夹层的体积分数,推导了含夹层盐岩蠕变力学参数与纯盐岩及纯泥岩蠕变参数的关系。

赵阳升等^[17-18]通过对层状盐岩蠕变特性试验研究和理论分析发现:层状盐岩的蠕变率与其组分、结构密切相关,盐岩组

分、结构不同,蠕变应变和蠕变率均不同。在常温下,随着应力水平的增大,层状盐岩的蠕变应变、蠕变率逐渐增大,层状盐岩的稳态蠕变率与偏应力之间呈良好的幂函数关系。

国内许多科研工作者^[19-50]对软岩等特殊岩土蠕变损伤特性进行了试验、数值模拟和本构参数反演研究,并取得了可喜的成绩,推动了岩土工程进步与发展。李栋伟等^[19]根据深部软岩室内三轴剪切和单试件分级加载蠕变试验结果,采用岩石蠕变力学元件模型和经验本构相结合的方法,获得描述岩石非线性蠕变本构模型,利用现场实测数据对软岩巷道开挖过程进行参数反演,获得和试验相一致的软岩本构力学模型参数,反演结果验证该模型的可行性。

1.2.2 人工冻土蠕变损伤国内外研究现状

早在 20 世纪 30 年代,著名的冻土力学专家 S. S. Vialov 和 B. Ladanyi 等^[51-52]研究在不同温度和压力条件下进行冻结砂土单轴压缩试验,发现冻结砂土的抗压强度随着应力速率的增加和温度的降低而增大。Andersland 和 I. Ainouri^[53-54]等获得人工冻土强度与时间相关。Haynes 和 J. A. Karalius^[55]研究获得温度对人工冻黏土强度的影响。S. S. Vialov^[56]研究获得人工冻土常时强度及对常时强度影响因素进行了分析,V. R. Parameswaran 和 S. J. Jones^[57]等通过三轴试验获得人工冻砂土的强度特性。T. H. W. Bake 等^[58]进行了围压对人工冻土的强度和变形特性进行大量研究,获得不同围压和温度时冻土的强度,并且剪切强度随着平均应力的增大而减小,然而随着平均应力的进一步增大,剪切强度增大。R. T. Ting, Y. L. Zhu, D. Carbee, Guryanov 和 Chamberlain C. Groves 等^[59-67]对饱和冻结黏土在不同应变速率和冻结温度下的单轴

抗压强度进行了一系列的研究,研究结果表明冻结黏土抗压强度随温度的降低呈线性增加,随应变速率的增加呈指数上升。此外,他们还提出了估算不同应变率和温度的冻黏土单轴抗压强度的模型。

O. B. Andersland(1970)和 S. S. Vialov(1973)^[68-69]相继提出了冻土蠕变的动化理论。在模型方面,一批描述冻土蠕变和屈服过程的本构方程相继出现。B. Ladanyi(1972)和 Gorodetskii(1975)^[70]等分别提出了冻土的非线性屈服准则;O. B. Andersland(1970),B. Ladanyi(1972)和 A. M. Fish(1976)^[71-72]等分别提出了冻土蠕变模型。在此期间,人工冻结壁设计中的冻土蠕变性质也得到了足够的重视(J. F. Radd,1978)^[73]。

近年来,李栋伟和汪仁和等^[74-84]在冻土本构方面的研究也获得了较大的成绩。基于卸载状态下冻土三轴蠕变试验得到如下结论:冻土具有明显的剪胀性,且体积应变不能忽略。为了全面反映冻土在卸载状态下的蠕变变形规律,以西原模型为基本流变元件,提出了冻土服从椭圆—DP 双屈服面流变本构力学模型,并通过有限元程序的二次开发将该模型嵌入 ADINA 有限元程序中。基于室内冻土宏观试验,考虑冻土蠕变过程中的损伤效应,建立了冻土蠕变损伤模型,并在冻土锥型桩模拟中得到应用。

通过高围压固结、低温冻结后再加、卸载的试验方法模拟白垩系冻结软岩地下工程施工应力状态变化过程。大量的试验结果表明,白垩系地层冻结软岩存在起始临界应力阈值,且符合 Mises 强度函数准则;冻结软岩黏滞系数是时间的一次函数,拟合相关系数达 0.99 以上。根据试验提出了冻结软岩黏弹塑非线性蠕变本构力学模型,将蠕变试验结果与计算值进行对比;两

者变形规律完全一致且数值较吻合,从而验证了低温软岩本构模型的正确性,可为冻结地下工程和寒区岩土工程数值计算提供参考。

李栋伟等^[107]假定冻土黏塑性微元损伤符合修进的莫尔—库仑准则,损伤变量服从 Weibull 随机概型分布;基于热力学原理和统计损伤理论,通过推导得到了相关联流动法则下的蠕变损伤耦合本构方程。为了便于研究冻土蠕变和损伤的耦合作用,将提出的本构模型通过用户子程序嵌入有限元程序中。最后,对冻土中桩基承载力模型试验进行了数值模拟。结果表明,基于统计损伤理论的冻土蠕变本构模型能较好地模拟冻土蠕变变形的全过程,并且与实测蠕变变形十分吻合。

但是基于卸载应力路径下的深部人工冻土蠕变损伤特性,尤其是卸载应力路径下的人工冻土蠕变损伤耦合模型数值计算方面的研究成果还未见文献报道。本书通过室内试验、现场实测和数值模拟相结合的方法研究人工冻黏土黏弹塑性损伤耦合本构关系,使其适用深部高应力条件下冻土的变形和强度等问题,为进一步研究现场的冻土力学行为及破坏特征提供有效的研究途径,其成果可为冻土结构物长期稳定性分析与预测提供指导。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

以深部冻结壁为工程背景,以试验研究为基础,采用理论分析和数值计算相结合的研究方法,获得深埋人工冻土在卸载应力路径下的蠕变损伤耦合本构模型。

(1) 通过深部土工试验,获得黏土含水率、密度、孔隙比和导热系数等物理性质,以及单轴瞬时强度、高围压下的三轴强度等力学性质;

(2) 不同温度和应力路径的三轴剪切试验研究,获得人工冻土屈服准则、应力应变关系;

(3) 不同温度和应力路径的三轴蠕变试验研究,获得人工冻土蠕变强度包络线分布规律和蠕变方程;

(4) 基于热力学原理和统计损伤理论建立人工冻土黏弹塑损伤耦合本构模型,以及模型中确定本构参数的试验方法;

(5) 将提出的人工冻土黏弹塑损伤耦合本构模型通过用户子程序嵌入有限元软件 ADINA 中;

(6) 基于黏弹塑损伤人工冻土本构模型,推导冻结壁应力场和位移场理论解析;

(7) 通过现场实测和数值模拟检验冻土蠕变损伤耦合本构模型的正确性。

本书研究成果为进一步研究现场的冻土力学行为及破坏特征提供有效的研究途径,可为深井冻结壁设计、稳定性分析与工程预测提供科学指导。

1.3.2 技术路线

将人工冻土样先固结再冻结,然后分别做不同应力路径下的冻土三轴剪切和三轴蠕变试验,获得高围压下深土力学性质及热物理参数、冻土屈服准则和蠕变数学模型。根据研究内容和研究目标制定研究的具体技术路线,如图 1-1 所示。

1.3.3 研究目标

(1) 通过冻土三轴剪切试验和三轴蠕变试验研究,获得深部冻结黏土在复杂应力状态下的瞬时变形规律和蠕变变形

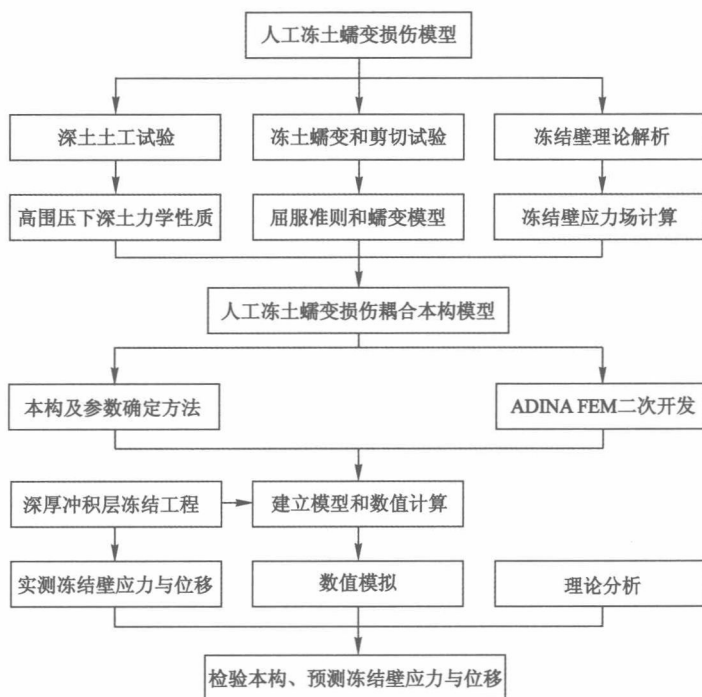


图 1-1 技术路线

规律；

(2) 分析试验结果,建立人工冻土的黏弹塑损伤耦合本构方程及确定本构模型中的参数；

(3) 开发 ADINA 有限元本构程序,二次开发人工冻土蠕变损伤耦合本构子程序。