

寒区工程理论与应用

Theory and Application of Cold Regions Engineering

赖远明 张明义 李双洋 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

寒区工程理论与应用

Theory and Application of Cold Regions Engineering

赖远明 张明义 李双洋 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据作者多年来的科研积累和国内外学者的成果撰写而成,力求反映当前寒区工程方面的最新理论。全书共十章,内容主要有:冻土的强度准则和本构关系,寒区道路主动冷却路基的降温效果及其理论计算方法,冻土路基在静力、火车荷载、地震荷载作用下的变形分析方法,季节冻土区路基的冻害防治理论及技术,寒区隧道温度和力学特性分析方法,寒区隧道的冻害及其综合防治措施,寒区涵洞和桩基础温度特性分析方法,寒区水利工程温度和力学特性分析方法。

本书资料翔实,内容丰富,可供建筑工程、铁路公路、煤炭矿山、水利水电、岩土力学与工程等方面从事勘察、设计、施工、科研与教学的科技人员和研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

寒区工程理论与应用/赖远明等著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024133-7

I. 寒… II. 赖… III. 冻土区-建筑工程 IV. TU752

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 025684 号

责任编辑:彭胜潮 关 焱/责任校对:邹慧卿

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社出版发行 各地新华书店经销

*

2009年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年3月第一次印刷 印张:23 1/2

印数:1~1200 字数:543 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

致 谢

在本书部分成果的研究、撰写和出版中得到了以下项目的资助,作者谨致谢忱。

- 国家杰出青年科学基金项目(40225001)
- 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA11Z103)
- 中国科学院“百人计划”项目(200019)
- 国家自然科学基金项目(40730736,40171019 和 40601023)
- 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室出版基金

前 言

全世界有3 576万 km^2 的多年冻土,约占陆地面积的24%。在我国,多年冻土约占国土面积的22%,季节冻土约占国土面积的48%;我国是世界第三冻土大国。由于我国经济建设的飞速发展,在寒区修建的工程越来越多,这些工程的修建改变了原有冻土环境的热平衡状况,加上全球气候变暖的影响,冻土退化日益严重。冻土和其他岩土的根本区别在于冻土中由于冰和未冻水的存在,其性质极其复杂,且对温度十分敏感,温度升高,承载力降低。对于高含冰量冻土,如果融化,由于土中孔隙水无法快速排除,可导致其丧失承载力。如何消除冻胀、融沉病害便成了寒区工程亟待解决的问题。早在20世纪40年代,由于冻土融化导致阿拉斯加和加拿大北部地区军事工程和公路病害频发,这促进了冻土研究的快速发展。

在我国,1956年青藏公路首次改建时发现了多年冻土问题。国道109(青藏公路)、214(青康公路)、227(宁张公路)穿越多年冻土区千余公里,多年冻土与寒区工程建设关系密切。50余年来,我国一批批的寒区科技工作者在寒区工程建设中不断认识冻土,发展了寒区工程的修筑技术,积累了丰富的工程实践经验,为寒区国民经济建设做出了巨大贡献。

在20世纪,寒区工程因受经济条件的制约,主要采用被动保温措施来延缓冻害对工程的破坏,无法解决气候变暖和工程活动引起的多年冻土退化导致冻胀、融沉等冻害对寒区工程的破坏问题。本书内容之一是讨论在无法人为改变外界气候条件的情况下,如何采取各种有效措施,尽量消除或减轻上述冻害现象的发生,保持寒区工程的热学、力学稳定性,从而实现寒区工程的安全稳定。本书的另一内容是讨论如何分析寒区工程的温度和力学特性,为设计部门提供计算理论。

本书是作者基于多年研究积累和国内外学者的成果撰写而成。全书共分十章。第一章着重介绍了冻土的基本力学性质,为后面的寒区工程力学分析准备理论基础。第二章阐述了主动冷却路基的降温机理,给出了其温度特性的数值分析方法,深入研究了几种主要主动冷却路基的降温能力。第三章介绍了冻土路基冻胀、融沉变形的分析方法。第四章详细阐述了冻土路基在地震、火车荷载作用下动力响应的分析方法。第五章系统阐述了季节冻土区道路冻害防治理论及技术方法。第六章详细论述了寒区隧道温度特性分析方

法。第七章论述了寒区隧道力学特性分析方法,内容主要包括寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析方法,以及寒区隧道冻胀、融化大变形固结耦合问题的非线性分析方法。第八章阐述了寒区隧道的冻害及其防治技术。第九章介绍了寒区涵洞和桩基础温度与力学特性的分析方法及冻害防治技术。第十章介绍了寒区水利工程的理论分析方法和冰冻害防治技术。

参加本书撰写的人员:第一章由赖远明、张淑娟、张建明执笔;第二章由赖远明、张明义、俞祁浩执笔;第三章由李双洋执笔;第四章由李双洋、赖远明执笔;第五章由喻文兵、童长江执笔;第六章由赖远明、吴紫汪、张学富执笔;第七章由赖远明、张学富、吴紫汪执笔;第八章由赖远明、吴紫汪、邓友生执笔;第九章由张明义、赖远明执笔;第十章由张明义、黄志军、李双洋执笔。全书由赖远明构思、编排与审定。

在这里特别感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所编辑出版部的金炯编审和郝美玲、祝国存女士,他们为本书的出版在编辑、审校、排版和制图方面付出了辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中定会存在欠妥乃至错误之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 冻土的基本力学性质	(1)
第一节 冻土的应力应变关系	(1)
第二节 冻结砂土的强度特性	(5)
第三节 冻土蠕变模型	(11)
第四节 冻土长期强度	(16)
第五节 冻土弹塑性本构关系的试验研究	(20)
第六节 冻土的弹粘塑性本构方程	(31)
参考文献	(32)
第二章 冻土道路工程温度特性分析方法	(35)
第一节 多年冻土区路基冻土工程地质类型的划分	(35)
第二节 冻土路基的设计原则	(38)
第三节 多年冻土区路基临界高度的确定方法	(40)
第四节 保温材料对路基温度特性的影响	(40)
第五节 块碎石层的降温机理和最佳粒径	(43)
第六节 开放边界块碎石路基的温度特性分析方法	(50)
第七节 封闭边界块碎石路基的温度特性分析方法	(63)
第八节 U形块碎石路基的温度特性	(73)
第九节 多年冻土路堤块碎石层高度研究	(77)
第十节 开放倾斜块碎石层降温特性及最佳降温粒径	(81)
第十一节 利用块碎石护坡调节冻土路基阴阳坡的温度分布	(86)
第十二节 多年冻土区块碎石换填路堑热稳定性分析	(92)
第十三节 多年冻土区管道通风路堤气-固耦合传热模型及其数值分析方法	(104)
第十四节 复合温控隔热门通风路基温度特性分析	(116)
第十五节 多年冻土区高等级公路通风管-块碎石层复合路基温度场特征非线性分析	(121)
第十六节 多年冻土区热管路基温度特性分析方法	(124)
第十七节 冻土路基的随机温度场分析方法	(127)
参考文献	(134)
第三章 冻土路基变形分析方法	(137)
第一节 冻土路基的蠕变变形分析	(137)
第二节 冻土路基的冻胀变形	(147)
第三节 冻土路基的冻胀、融化变形的简单计算方法	(150)
参考文献	(152)
第四章 冻土路基的动力响应分析方法	(153)
第一节 冻土路基在火车荷载作用下的动力响应分析方法	(153)

第二节	冻土路基在地震荷载作用下的动力响应分析	(161)
第三节	冻土路基地震液化分析方法	(167)
	参考文献	(177)
第五章	季节冻土区道路冻害防治理论及技术	(178)
第一节	季节冻土区道路冻害机理	(178)
第二节	季节冻土区道路防冻层厚度计算方法	(185)
第三节	季节冻土区路基的冻害防治技术	(190)
第四节	冻土区涎流冰防治技术	(197)
	参考文献	(214)
第六章	寒区隧道温度特性分析方法	(217)
第一节	寒区圆形截面隧道温度场的摄动解法	(217)
第二节	寒区隧道水分场和温度场耦合问题的非线性分析方法	(220)
第三节	寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的非线性分析方法	(229)
第四节	寒区隧道空气与围岩对流换热和围岩热传导耦合问题的非线性分析方法	(235)
	参考文献	(245)
第七章	寒区隧道力学特性分析方法	(247)
第一节	寒区隧道围岩冻胀力的粘弹性解析解	(247)
第二节	隧道围岩和衬砌初始应力的弹塑性有限元分析	(253)
第三节	温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析方法	(255)
第四节	寒区隧道冻胀、融化大变形固结耦合问题的非线性分析方法	(261)
	参考文献	(304)
第八章	寒区隧道的冻害及其防治技术	(305)
第一节	寒区隧道的冻害	(305)
第二节	寒区隧道的冻害防治措施	(306)
第三节	寒区隧道隔热层设计参数的实用计算方法	(315)
	参考文献	(319)
第九章	寒区涵洞与桩基础	(320)
第一节	寒区涵洞现浇混凝土基础水化热的影响分析	(320)
第二节	高温多年冻土区旱桥桩基础温度特性分析	(327)
第三节	冻土区桥梁群桩基础的混凝土水化热的放热过程及温度场的非线性分析	(332)
第四节	桩的抗冻拔计算	(338)
第五节	季节性冻土区冻胀反力的计算方法	(340)
第六节	寒区涵洞和桩基冻害防治技术	(343)
	参考文献	(346)
第十章	寒区水利工程理论分析与冰冻害防治	(347)
第一节	寒区大坝温度场和渗流场耦合问题的非线性数值模拟	(347)
第二节	寒区水渠的热力耦合数值分析	(349)
第三节	寒区水利工程的冰冻害及其防治技术	(357)
	参考文献	(363)
	作者简介	(364)

Contents

Preface

Chapter 1 Basic Mechanical Properties of Frozen Soils	(1)
1.1 Stress-Strain Relationships of Frozen Soil	(1)
1.2 Strength Characteristics of Frozen Sandy Soil	(5)
1.3 Creep Model on Frozen Soils	(11)
1.4 Long-Term Strength of Frozen Soils	(16)
1.5 Experimental Study on Elasto-Plastic Constitutive Relationship on Frozen Sandy Soil	(20)
1.6 Elasto-Viscoplastic Constitutive Model on Frozen Soil	(31)
References	(32)
Chapter 2 Analysis Methods for Temperature Characteristics of Road Engineering in Permafrost Regions	(35)
2.1 Permafrost Engineering-Geological Classification for Embankment in Permafrost Regions	(35)
2.2 Design Principles of Permafrost Roadbed	(38)
2.3 Computational Methods for Critical Height of Embankment in Permafrost Regions	(40)
2.4 Effect of Insulation Material on Temperature Characteristics of Roadbed	(40)
2.5 Experimental Study on Cooling Mechanism and Optimal Cooling Particle Size of Crushed-Rock Layer	(43)
2.6 Numerical Analysis Method for Temperature Characteristics of Open Crushed-Rock Embankment in Permafrost Regions	(50)
2.7 Numerical Analysis Method for Temperature Characteristics of Closed Crushed-Rock Embankment in Permafrost Regions	(63)
2.8 Temperature Characteristics of U-Shape Crushed-Rock Embankment in Permafrost Regions	(73)
2.9 Study on the Critical Height of the Crushed-Rock Layer in Embankment in Permafrost Regions	(77)
2.10 Experimental Study on Cooling Characteristics and Optimal Cooling Particle Size of Open Sloped Crushed-Rock Layer	(81)

2. 11	Adjusting Temperature Distributions under Northern and Southern Slopes of Embankment by Crushed-Rock Revetment in Permafrost Regions	(86)
2. 12	Analysis for Thermal Stability of Embankments with Crushed-Rock Filling in Cuttings in Permafrost Regions	(92)
2. 13	A Gas-Solid Conjugate Heat Transfer Model on Duct-Ventilated Embankment in Permafrost Regions and Its Numerical Solution	(104)
2. 14	Investigation on Temperature Characteristics of Duct-Ventilated Embankment with Temperature-Controlled Shutters in Permafrost Regions	(116)
2. 15	Non-linear Analysis for Temperature Characteristics of Expressway Embankment with Ventilated Ducts and Crushed-Rock Layer in Permafrost Regions	(121)
2. 16	Analysis Method for Temperature Characteristics of Two-Phase Closed Thermosyphon Embankment in Permafrost Regions	(124)
2. 17	Numerical Analysis for Random Temperature Fields of Embankment in Permafrost Regions	(127)
	References	(134)
Chapter 3 Analysis Methods of Deformation of Embankment in Permafrost Regions		
	Regions	(137)
3. 1	Creep Deformation Analysis for Embankment in Permafrost Regions	(137)
3. 2	Frost-Heave Deformation of Embankment in Permafrost Regions	(147)
3. 3	Simple Computational Method for Frost-Heave and Thaw Deformation of Embankment in Permafrost Regions	(150)
	References	(152)
Chapter 4 Analysis Methods for Dynamic Responses of Embankment in Permafrost Regions		
	Permafrost Regions	(153)
4. 1	Dynamic Response Analysis for Embankment in Permafrost Regions under Train Load	(153)
4. 2	Dynamic Response Analysis for Embankment in Permafrost Regions under Earthquake Load	(161)
4. 3	Liquefaction Analysis for Embankment in Permafrost Regions under Earthquake Load	(167)
	References	(177)

Chapter 5 Frost Damage Prevention Theory and Technology for Road in Seasonally Frozen Regions	(178)
5.1 Frost Damage Mechanism of Road in Seasonally Frozen Regions	(178)
5.2 Computational Method for Anti-frost Layer Depth of Road in Seasonally Frozen Regions	(185)
5.3 Frost Damage Prevention Technology for Road in Seasonally Frozen Regions	(190)
5.4 Drift Ices Prevention Technology in Seasonally Frozen Regions	(197)
References	(214)
Chapter 6 Analysis Methods for Temperature Characteristics of Tunnels in Cold Regions	(217)
6.1 Perturbation Solution for Temperature Field of Circular Tunnel in Cold Regions	(217)
6.2 Nonlinear Analysis Method for the Coupled Problem of Moisture and Temperature Fields of Tunnel in Cold Regions	(220)
6.3 Nonlinear Analysis Method for the Coupled Problem of Seepage and Temperature Fields of Tunnel in Cold Regions	(229)
6.4 Nonlinear Analysis Method for the Coupled Problem of Heat Transfer of Surrounding Rock and Heat Convection between the Air and the Surrounding Rock of Tunnel in Cold Regions	(235)
References	(245)
Chapter 7 Analysis Methods for Mechanical Characteristics of Tunnels in Cold Regions	(247)
7.1 Visco-Elastic Analytical Solution for Frost Force of Tunnel in Cold Regions	(247)
7.2 Elasto-Plastic Finite Element Analyses on Initial Stress in the Surrounding Rock and the Lining of Tunnel in Cold Regions	(253)
7.3 Nonlinear Analysis Method for the Coupled Problem of Temperature, Seepage and Stress Fields of Tunnel in Cold Regions	(255)
7.4 Nonlinear Analysis Method for the Coupled Problems of Freeze-thaw and Large Deformation Consolidation of Tunnel in Cold Regions	(261)
References	(304)
Chapter 8 Frost Damages and Frost Damage Prevention Technology for Tunnels in Cold Regions	(305)
8.1 Frost Damage for Tunnels in Cold Regions	(305)

8.2	Frost Damage Preventions for Tunnels in Cold Regions	(306)
8.3	Practical Computational Method for Design Parameters on Insulating Layer of Tunnels in Cold Regions	(315)
	References	(319)
Chapter 9	Culvert and Pile Foundations in Cold Regions	(320)
9.1	Hydration Heat Effect Analysis of Cast-in-situ Concrete Foundations of Culverts in Cold Regions	(320)
9.2	Study on Temperature Characteristics of Land Bridge Pile Foundations in Warm Permafrost Regions	(327)
9.3	Nonlinear Analyses for the Exothermic Process of Concrete Hydration Heat and Temperature Field of Bridge Cluster-Pile Foundations in Permafrost Regions	(332)
9.4	Heaving Resistance Calculation of Piles	(338)
9.5	Calculation Method for Frost-Heave Reaction in Seasonally Frozen Regions	(340)
9.6	Frost Damage Prevention Technology for Culvert and Pile Foundations	(343)
	References	(346)
Chapter 10	Theoretical Analyses for Hydraulic Engineering in Cold Regions and Ice Frost Damage Prevention Technology	(347)
10.1	Nonlinear Numerical Simulation for the Coupled Problem of Temperature and Seepage Fields of Dam in Cold Regions	(347)
10.2	Numerical Analysis for Thermal and Mechanical Coupled Problem of Ditch in Cold Regions	(349)
10.3	Ice Frost Damage for Hydraulic Engineering in Cold Regions and Ice Frost Damage Prevention Technology	(357)
	References	(363)
Brief Introduction to Authors		(364)

第一章 冻土的基本力学性质

冻土作为由固体矿物颗粒、冰、未冻水和气体组成的复杂多相多成分体系,其力学性质主要取决于其中冰的含量、强度及其性质(特别是各向异性和流变特性),而冰的这些特性的变化主要依赖于温度、作用荷载及其历时,这就构成了冻土力学性质随外界温度、压力及荷载作用时间而变化,即其性质的不稳定性也是冻土的特性所在,更是人们在设计利用冻土作地基或构筑物时必须正视与谨慎处理的课题。

第一节 冻土的应力应变关系

根据等应变率压缩试验,Vyalov 认为冻土的单轴应力应变关系适合于幂函数关系^[1],即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = A \epsilon_1^m \quad (1-1)$$

式中, $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力; ϵ_1 为相应的轴向应变,单轴情况下 $\sigma_3 = 0$; A 和 m 为参数。但朱元林等根据大量的单轴试验发现冻土的应力应变关系十分复杂,不能用式(1-1)来描述所有的应力应变曲线形式,而是将应力应变曲线分为 9 种类型,并根据这 9 种类型适用的土质、含水量、温度和应变率条件,编制了冻土应力应变关系类型图,然后根据土质等参数从该图中查出相应的应力应变关系类型和方程^[2]。基于恒应变速率冻结黏土三轴压缩试验,发现冻土在变形过程中表现出了明显的粘塑性特征,考虑体变的冻土应力应变关系^[3]可表示为

$$\begin{cases} f_1(p, q, \epsilon_v) = 0 \\ f_2(p, q, \epsilon) = 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

式中, p, q, ϵ_v 和 ϵ 分别为八面体的应力及相应的应变,其中 $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)$; $q = \sigma_1 - \sigma_3$; $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$; $\epsilon = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ 。令锋等引入了分形几何理论来拟合冻土应力应变曲线,并给出了逼近冻土应力应变曲线的 LHIFS 和求曲线分形维数的算法^[4]。

我们对冻结兰州细砂也进行了恒应变率条件下的三轴压缩试验,结果表明,现有的应力应变关系在围压较大时并不能很好地描述其应力应变的发展过程,于是对原有的邓肯-张模型进行了改进,提出了适合于较大围压范围内能高精度地描述冻土应力应变关系的改进的邓肯-张模型。

1. 应力应变关系

试验材料采用兰州细砂,颗粒成分见表 1-1。试样的平均含水量为 12.8%,平均干

表 1-1 试样的颗粒组成

粒径范围和百分比/%			
>0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.1 mm	<0.1 mm
3.8	17.4	45.6	33.2

密度为 $19.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。试验过程中围压变化范围为 $0 \sim 18.0 \text{ MPa}$, 加荷速率为 $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。下面就以 -4°C 和 -6°C 的试验结果为例进行讨论。

在试验数据的处理过程中对试样横截面积变化进行了校正, 得到两温度下冻结兰州砂土的应力应变关系(图 1-1)。此图表明冻结砂土的应力应变关系, 当围压小于 3.0 MPa 时, 具有明显的应变软化现象; 当围压超过 3.0 MPa 时, 则具有明显的应变硬化现象。

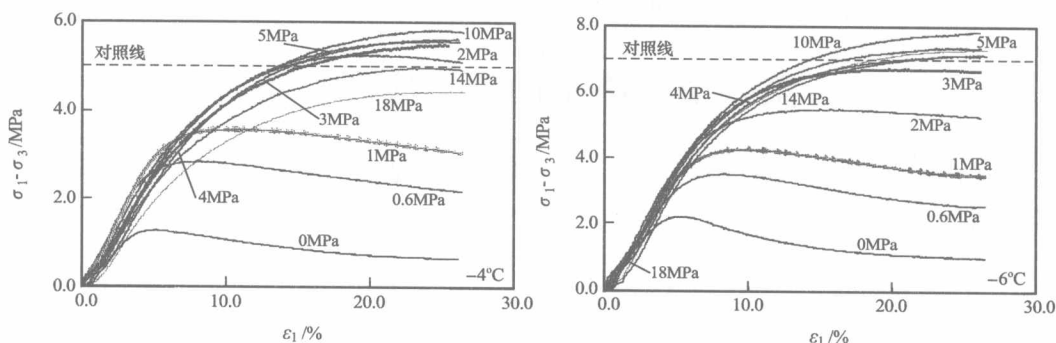


图 1-1 兰州冻结砂土的应力应变关系曲线

对于软土的应变软化现象, 沈珠江曾用下面的广义双曲线模型^[5]来描述:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1(a + c\varepsilon_1)}{(a + b\varepsilon_1)^2} \quad (1-3)$$

式中, a, b, c 为试验常数, 其值为 σ_3 的函数。其应力应变硬化现象也可用邓肯-张模型^[6]来描述

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \quad (1-4)$$

式中, a, b 为与温度和压力有关的试验参数。

在对试验数据拟合的过程中, 我们发现采用式(1-3)中的广义双曲线模型并不能很好的描述冻结砂土在围压小于 3.0 MPa 时的应力应变关系, 更不能描述其在围压大于 3.0 MPa 时的应变硬化现象; 而式(1-4)也不能理想的反映围压大于 3.0 MPa 时冻结砂土的应力应变关系。所以为了较高精度地描述冻结砂土在围压为 $0 \sim 18.0 \text{ MPa}$ 范围内的应力应变关系, 在此基础上我们对邓肯-张模型, 即就式(1-4)进行了改进, 得到

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1 + c\varepsilon_1^2} \quad (1-5)$$

式中, 参数 a, b, c 为试验常数。

2. 参数确定

在试验过程中, 由于 $d\sigma_3 = 0$, 所以对式(1-5)求导数则可得到土的切线变形模量 E_t

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon_1} = \frac{a - c\epsilon_1^2}{(a + b\epsilon_1 + c\epsilon_1^2)^2} \quad (1-6)$$

在试验的起始点, $\epsilon_1 \rightarrow 0, E_t = E_i$, 则

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (1-7)$$

当 $\epsilon_1 \neq 0$ 时, 根据 $\frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon_1} = 0$, 解得

$$c = \frac{1}{E_i \epsilon_{1m}^2} \quad (1-8)$$

当 $(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3)_m$ 时, 解得

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_m} - \frac{2}{E_i \epsilon_{1m}} \quad (1-9)$$

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ 和 ϵ_{1m} 分别为极限应力和应变, 其物理意义见图 1-2。式(1-5)中, a, b 值随围压变化而变化的范围不大, 在给定温度下可以分别取恒值; c 值随围压的变化而变化。经过参数 a, b 和 c 值的分别比较, 表明 -4°C 的 a, b 和 c 值大于 -6°C 时的相应值, 并且在两温度下的 a 值基本上为常数, 可用不同围压下的平均值分别表示, 即为 0.018 和 0.012; 在同一温度下 b 值没有规律可循; c 值与围压之间存在指数关系, 可表示为

$$c = \begin{cases} 0.39 + 6.79e^{-3.56(\frac{\sigma_3}{p_a})} & T = -4^\circ\text{C} \\ 0.28 + 5.53e^{-2.73(\frac{\sigma_3}{p_a})} & T = -6^\circ\text{C} \end{cases}$$

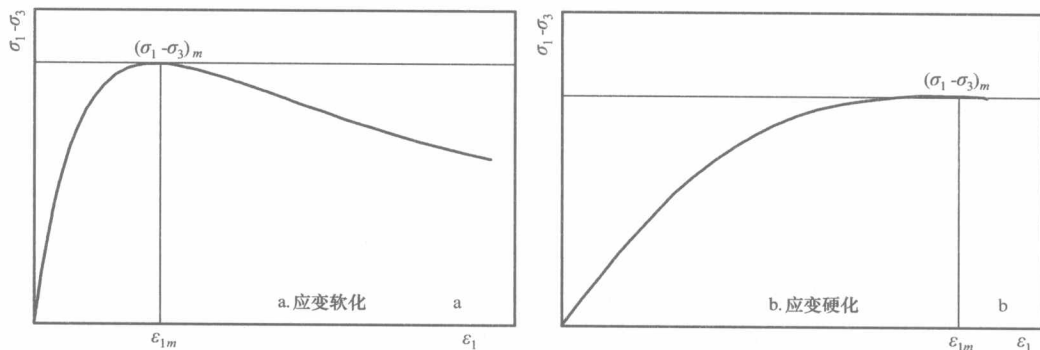
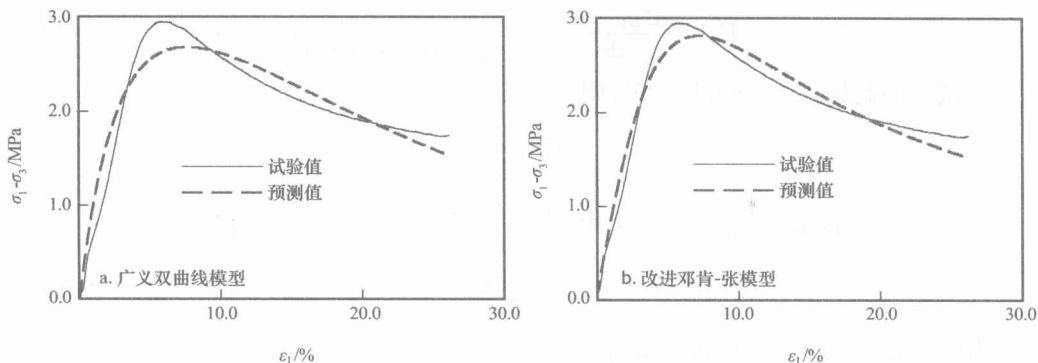
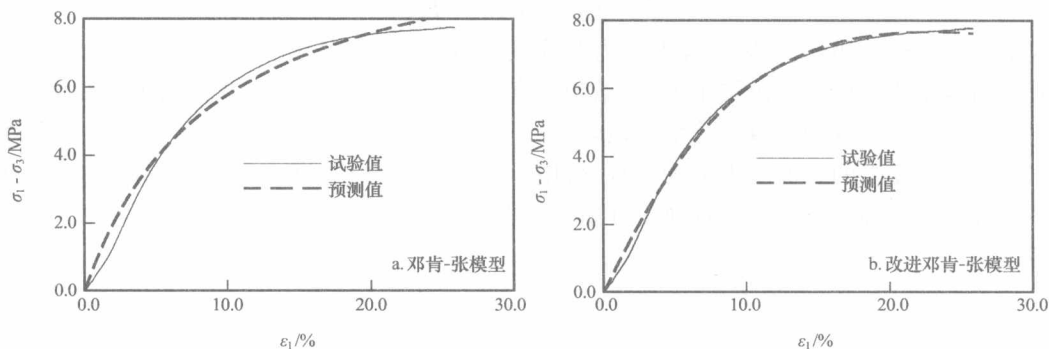


图 1-2 $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ 和 ϵ_{1m} 的物理意义

3. 精度讨论

为了比较上面 3 种模型在模拟冻结砂土应力应变关系时存在的差异, 这里分别给出了 3 种模型在 $\sigma_3 < 3 \text{ MPa}$ (取 $\sigma_3 = 0.3 \text{ MPa}$) 和 $\sigma_3 > 3 \text{ MPa}$ (取 $\sigma_3 = 10.0 \text{ MPa}$) 时 -6°C 砂土的典型数据处理结果(图 1-3 和图 1-4)。

用 E_1, E_2 分别代表 $\sigma_3 = 0.3 \text{ MPa}$ 时广义双曲线模型和改进邓肯-张模型与试验数据间的最大残差, 可得在不同应变范围内的残差值(表 1-2)。总体表现为 $|E_1| > |E_2|$, 在 $\epsilon_1 < 10.0\%$ 范围内, 两者差别更大, 所以, 当应力应变曲线表现为应变软化时, 改进邓肯-张模型的预测结果比双曲线模型的更接近于试验值, 尤其在小应变范围内。

图 1-3 $\sigma_3=0.3$ MPa, -6 °C 时模型预测结果与相应试验值间的比较图 1-4 $\sigma_3=10.0$ MPa, -6.0 °C 时模型预测结果与相应试验数据间的比较表 1-2 不同应变范围内的 E_1 和 E_2 值

最大残差 /MPa	应变 ϵ_1 /%		
	0~5.0	5.0~10.0	>20.0
E_1	-0.46	-0.15	0.22
E_2	-0.28	-0.14	0.23

用 E_3, E_4 分别代表 $\sigma_3=10.0$ MPa 时邓肯-张模型和改进邓肯-张模型与试验数据间的最大残差(表 1-3)。显见,在整个应变范围内改进模型的预测结果与试验数据间的残差绝对值要比原邓肯-张模型与试验数据间的小得多。

表 1-3 不同应变范围内的 E_3 和 E_4 值

最大残差 /MPa	应变 ϵ_1 /%		
	0~5.0	5.0~20.0	>20.0
E_3	-0.70	0.29	-0.41
E_4	-0.37	0.16	0.16

从上述可知,广义双曲线模型可以大致描述冻结砂土的应变软化现象,邓肯-张模型也可以描述其应变硬化现象,但改进邓肯-张模型不但能描述其应变软化现象,而且也能描述其应变硬化现象,并且模拟的结果比其他模型的预测结果更接近于试验结果,误差小,精度高,所以改进邓肯-张模型可以很好地描述冻结砂土的应力应变曲线形式。

同时我们将改进的邓肯-张模型用于描述青藏高原超饱和和冻结砂土在三轴抗压试验过程中的应力应变关系(在整个围压范围内均表现为应变软化)。结果表明,模型预测结果与试验结果间的一致性相当好,模拟精度也较高。其中试验温度为 -0.5°C , -1.0°C , -2.0°C , -4.0°C , -6.0°C ,试样的平均含水量(饱和含水量约为22.0%)及相应的平均干密度见表1-4。试验采用应变控制,应变速率为 $1.67\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。

表 1-4 试样初始干密度及相应含水量

干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.43~1.44	1.05~1.06	0.74
含水量/%	30.0	50.0	80.0

第二节 冻结砂土的强度特性

当土体接近破坏时,就不能用应力应变关系来评价其状态,必须用合适的破坏准则来描述。

早期人们在低围压的情况下发现在同一条件下,冻土强度随围压的增大而增大,于是就提出了线性的 Mhor-Comlomb 准则^[7]、Drucker-Prager 准则^[8]和 Von Mises-Botkin 准则^[9~10]等。随后,一些非线性强度准则^[11,12]相继由 Ladanyi、Gorodetskii 等提出。Parameswaran 等对低围压下冻结砂的破坏强度随法向正应力线性变化的部分用线性的莫尔-库仑准则进行了分析^[13];马巍等在假定冻土为均质且各向同性材料的情况下,提出了中高围压下冻结砂土的强度随围压呈抛物线型屈服准则,并将该准则推广到冻土三轴蠕变中,进而提出了冻土蠕变破坏准则^[14~15],较好地丰富了冻土力学理论。我们依据试验结果,也提出了围压为 $0\sim 18.0\text{MPa}$ 范围内,不同试验温度和含水量下冻结砂土强度随围压的变化方程。

依据冻结砂土的试验结果画出了应力圆(图1-5)。冻结砂土强度取值: $\epsilon_1 < 20\%$,且 $\sigma_1 - \sigma_3$ 有最大值时,取其峰值作为本试验冻结砂土的强度;当 $\epsilon_1 < 20\%$,且 $\sigma_1 - \sigma_3$ 没有最大值时,取 $\epsilon_1 = 20\%$ 对应的应力值作为其强度。

图1-5a和b表明,当 σ 小于临界值 σ_c 时,兰州砂土的剪切强度 τ 随围压的增加而线性增加;当 σ 大于 σ_c 时,由于压融现象的存在,剪切强度 τ 随围压的增加开始非线性增加,随着围压的进一步增大,逐渐表现为非线性减小。显然,线性莫尔-库仑准则 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 只能高精度地反映 σ 小于 σ_c 的情况,而对于较大 σ 下的情况并不能反映(图1-5中的直线所示)。

通过作图比较发现在本节的研究温度范围内对于青藏高原砂土来说,当试样初始等效含水量分别为30.0%、50.0%和80.0%,试验温度为 -0.5°C 、 -1.0°C 和 -2.0°C 时,其莫尔应力圆包络线随法向正应力的增大没有明显变化,也就是围压对其强度的影响不明显(图1-5c和d);但当温度为 -4°C 和 -6°C 时,在不同含水量下莫尔应力圆包络线随法向正应力的增大呈线性减小(图1-5e和f)。下面针对不同情况分别提出了相应的冻土强度准则。