

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.01.008

考虑 D-P 边界退化的冻风积土蠕变损伤规律研究

张向东¹, 李 军², 周军霞³, 孙汉东¹, 杨宇婷⁴

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 辽宁工程技术大学 建筑与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 4. 辽宁奥路通科技有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要:为研究季冻区冻风积土的蠕变变形规律及损伤演化规律,采用冻土 GDS 三轴测试分析系统开展了不同负温条件下三轴蠕变试验,分析了不同负温对冻风积土蠕变损伤特性的影响。根据典型蠕变曲线的三阶段特征提出了蠕变损伤时间阈值及屈服时间阈值确定方法。根据 Kachanov 对混凝土材料蠕变损伤的假设,对冻风积土的弹性模量及抗剪强度参数进行弱化,分析了不同负温条件下,不同蠕变损伤阶段冻风积土蠕变损伤规律。将西原模型中塑性元件改进成了具有损伤特征的非线性黏塑性体,并假设其服从于 Drucker-Prager 屈服准则,建立了冻风积土分阶段的蠕变损伤模型,将模型计算值与实测值进行比较,验证模型的合理性。研究结果表明:温度对冻风积土蠕变特征影响显著,温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仅出现蠕变第 I、II 阶段,温度高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会出现第 III 阶段,分阶段蠕变损伤模型可以较好地描述冻风积土在不同蠕变阶段损伤特征;屈服边界退化是导致冻风积土发生蠕变损伤的主要原因,发生蠕变损伤后会导致屈服边界不断缩小以及有效应力不断增加,塑性区的范围不断扩大,发生蠕变损伤后有效应力状态点会落在损伤后的屈服边界附近。

关键词:道路工程;蠕变损伤模型;蠕变试验;冻风积土;D-P 屈服准则

中图分类号:U416.1⁺68

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2019)01-0055-08

Study on Creep Damage Rule of Frozen Aeolian Soil Considering D-P Boundary Degradation

ZHANG Xiang-dong¹, LI Jun², ZHOU Jun-xia³, SUN Han-dong¹, YANG Yu-ting⁴

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;

2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning 110168, China;

3. School of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;

4. Liaoning Aolutong Science and Technology Co., Ltd., Shenyang Liaoning 110006, China)

Abstract: In order to study the rules of creep deformation and damage evolution of frozen aeolian soil in seasonal frozen area, the triaxial creep test under different negative temperature conditions is carried out by frozen soil GDS triaxial test and analysis system, and the influence of different negative temperatures on the creep damage characteristics of frozen aeolian soil is analyzed. A method for determining the creep damage time threshold and the yield time threshold is proposed according to the 3-stage characteristics of typical creep curve. Based on Kachanov's hypothesis of creep damage to concrete materials, the elastic modulus and the shear strength parameters of frozen aeolian soil are weakened. The creep damage rules of frozen aeolian soil in different creep damage stages under different negative temperature conditions are analyzed. The plastic element in the Nishihara model is improved to a nonlinear viscoplastic body with damage characteristics, and

收稿日期:2017-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51774166, 51774163);辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJYL053)

作者简介:张向东(1962-),男,吉林榆树人,博士生导师,教授。(jwd101@126.com)

it is assumed that it obeys the Drucker-Prager yield criterion, a staged creep damage model of frozen aeolian soil is established, and the model calculated value is compared with the measured value, thus the rationality of the model is verified. The result shows that (1) temperature has significant effect on the creep characteristics of frozen aeolian soil, the I and II stages of creep will occur only when the temperature is lower than $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, the III phase will occur when temperature is higher than $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the staged model can describe the damage characteristics of frozen aeolian soil in different creep stages; (2) the degradation of yield boundary is the main reason for creep damage of frozen aeolian soil, creep damage will cause the yield boundary shrinking, effective stress increasing, and the continues expansion of plastic zone range, the effective stress point will fall on the position near the damaged yield boundary.

Key words: road engineering; creep damage model; creep test; frozen aeolian soil; D - P yield criterion

0 引言

风积土是由岩石风化作用形成的碎屑经风力搬运作用形成的一类细粒土,在我国东北部及西部地区有着广泛的分布。由于其具有松散的颗粒结构,以风积土作为填土路基在寒冷的冬季较容易发生冻胀现象,且冻结状态下的风积土路基达到稳定的变形为一缓慢的过程,具有明显的流变特征^[1-3]。因此,研究受气候变化及工程活动影响的冻风积土蠕变特性对该类路基沉降控制及安全使用具有实际意义。

冻风积土流变模型与流变试验研究是岩土工程领域重要的方向。董连成^[4]通过对不同温度、不同加载应力下的冻结兰州黄土、黏土和砂质黏土的蠕变试验获得了3种土的蠕变特性;赵延林^[5]通过对分级加载下的岩石蠕变进行黏弹塑性分离以及对西原元件进行改进的方法建立了一种新的蠕变损伤模型;Bray Matthew T^[6]采用一个简单的松弛试验获得了冻风积土在蠕变过程中的蠕变参数;赵晓东^[7]等通过开展不同温度梯度下的三轴蠕变试验,研究了冻风积土蠕变特征和温度梯度下的冻风积土非均质特征。

在荷载作用下,冻风积土内部裂隙的发展是导致冻风积土在蠕变过程中发生损伤的重要因素。前苏联学者维亚洛夫^[8]首次将损伤力学引入到冻风积土领域进行研究,并引入一种冻风积土蠕变破坏程度的描述方法;Kachanov^[9]最先提出用连续性变量描述材料连续性受损的变形特征;孙琦^[10]通过对不同温度、不同应力下的风积土进行正交蠕变试验,获得了冻结条件下风积土蠕变损伤模型;汪承维^[11]等以西原模型为基础,采用改进的Mohr - Coulomb屈服准则,建立了3个阶段的蠕变损伤本构模型。王其虎^[12]等考虑天然岩石的初始损伤以及蠕变过程中岩石加载后裂隙扩充产生的新损伤,对岩石的蠕

变特性进行描述。

目前,有关蠕变损伤初始时间研究较少,并且大都认为冻风积土蠕变损伤发生在第III阶段,建立的损伤模型大多是对元件模型进行改进,并考虑损伤对蠕变参数的影响,但是很少对屈服边界的损伤机理进行深入研究。通过对冻风积土室内蠕变试验所获得的蠕变曲线分析,认为从衰减蠕变过渡到加速蠕变必然存在一个驻点(凹凸曲线的分界点),因此蠕变损伤开始于第II阶段的拐点。通过改进的西原模型,以损失时间阈值点和屈服临界点为界限提出了分阶段的蠕变损伤模型。最后,通过屈服边界损伤阐述了冻风积土在蠕变过程中发生屈服的机理。

1 蠕变损伤模型

1.1 蠕变损伤变量

对于蠕变损伤过程,Kachanov建议将损伤演化率 $\dot{D}$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}$ 表示为^[13]:

$$\dot{D} = \left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}(1-D)} \right)^{\nu_T}, \quad \dot{\varepsilon} = \left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}(1-D)} \right)^n, \quad (1)$$

式中, D 为蠕变损伤变量; $(\cdot)$ 为变量对时间的一阶导数; $\bar{\sigma}$, ν_T 和 n 为依赖于温度的材料待测特征参数。

设 t_0 为发生蠕变损伤的初始时间,对式(1)第1式变形,并且两边对时间进行积分可得:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{\frac{1}{1+\nu_T}}, \quad (2)$$

式中, t 为时间; t_c 为蠕变试验停止的时间,可表示为:

$$t_c = \frac{1}{(1+\nu_T)} \left(\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \right)^{-\nu_T}. \quad (3)$$

1.2 分阶段蠕变损伤模型

如图1所示,冻风积土最先发生的是瞬时变形 ε_0 ,此部分变形瞬时即可完成,满足胡克定律。接下来由于土颗粒间位错阻力不断加大,发生具有时

间延滞特性的减速蠕变, 分别对应着蠕变曲线的第 I 阶段及第 II 阶段前期。由于微裂隙随变形的不断发展, 当裂隙间连通出现空洞时开始发生加速蠕变, 蠕变曲线上的拐点 A ($\varepsilon''=0$) 为衰减蠕变和加速蠕变的分界点, 则 A 点对应的的时间 t_D 必为损伤时间阈值 (初始损伤时间); ε'' 为应变的二阶导数。

西原模型能够描述从蠕变第 I 阶段至蠕变第 III 阶段弹-黏弹-黏塑性特征而得到广泛应用, 元件模型如图 2 所示。当应力 σ 超过屈服强度 σ_s 时, 变形由第 II 阶段稳定蠕变进入第 III 阶段加速蠕变。但由于冻风积土内部产生的空洞, σ_s 是随损伤变量 D 逐渐演化的。因此, 将西原模型中黏塑性元件改进成具有损伤特性的非线性黏塑性体, 发生屈服时边界服从于 Drucker-Prager 准则。

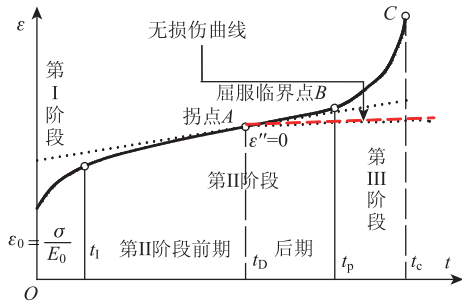
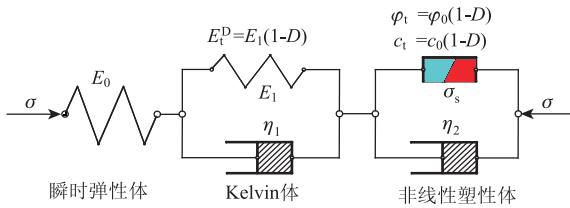


图 1 蠕变损伤阶段划分图

Fig. 1 Division of creep damage stages



注: φ_t , c_t 为发生蠕变损伤后的黏聚力和内摩擦角; φ_0 , c_0 为初始黏聚力和内摩擦角; E_1^D 为发生损伤后的弹性模量。

图 2 改进的西原非线性元件模型

Fig. 2 Modified Nishihara nonlinear element model

在拐点 A 之前发生的是衰减蠕变, 此部分的蠕变变形 $\varepsilon_{OD}(t)$ 可表示为^[14]:

$$\varepsilon_{OD}(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right], (0 < t \leq t_D), \quad (4)$$

式中, E_0 , E_1 分别为瞬时弹性体和 Kelvin 体初始弹性模量; η_1 为 Kelvin 体初始黏滞系数。

从拐点 A 到屈服临界点 B 之间的蠕变 $\varepsilon_{DP}(t)$ 可表示为:

$$\varepsilon_{DP}(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 t_D}{\eta_1}\right) \right] + \frac{E_{1,t}^D}{\tilde{\sigma}} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 \langle t - t_D \rangle}{\eta_1}\right) \right], (t_D < t \leq t_p), \quad (5)$$

式中, 定义 $\langle x \rangle = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases}$; “~” 为损伤后的有效

应力形式; t_p 为蠕变第三阶段开始时间; $E_{1,t}^D$ 为 Kelvin 体发生损伤后的弹性模量, 可根据式 (6) 来确定。

$$E_{1,t}^D = E_1(1-D) = E_1 \left(1 - \frac{t - t_D}{t_c - t_D} \right)^{\frac{1}{1+\nu_T}}. \quad (6)$$

当进入第 II 阶段后期及第 III 阶段时, 若不发生损伤, 在超过 A 点后的最终变形将接近一定值 (如图 1 的虚线)。但是大量试验结果显示负温较高时冻风积土发生图 1 中实线所示的加速蠕变现象^[15-16], 原因是裂隙连通形成内部裂纹使冻风积土内部结构发生损伤, 影响冻风积土继续承载的能力。

当 $t > t_p$ 时, 有效应力 $\tilde{\sigma} > \sigma_s$, 开始发生屈服进入到蠕变第 III 阶段后, 该阶段的演化规律为:

$$\varepsilon_{PC}(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 t_D}{\eta_1}\right) \right] + \frac{\tilde{\sigma}}{E_{1,t}^D} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 (t_D - t_p)}{\eta_{1,t}^D}\right) \right] + \frac{\tilde{\sigma} \cdot \langle t - t_p \rangle}{\eta_{2,t}^D}, \quad (t_p < t \leq t_c), \quad (7)$$

其中, $\eta_{2,t}^D$ 的损伤演化准则为:

$$\eta_{1,t}^D = \eta_1 \left(1 - \frac{t - t_D}{t_c - t_D} \right)^{\frac{1}{1+\nu_T}}, \quad \eta_{2,t}^D = \eta_2 \left(1 - \frac{t - t_D}{t_c - t_D} \right)^{\frac{1}{1+\nu_T}}, \quad (8)$$

式中, $\eta_{1,t}^D$, $\eta_{2,t}^D$ 为发生损伤后的黏滞性系数。

2 冻风积土蠕变特性测试

2.1 试样制备与测试装置

试验用土取自于辽宁省阜新市境内人民桥填土路堤下的风积砂路基填土。将采集的风积土样品通过风干、碾碎及筛分选取粒径小于 2 mm 的土样进行土工试验, 测得其基本物理参数见表 1。

表 1 土样基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of soil sample

试件 编号	液限/ %	塑限/ %	塑性指 数/%	含水 率/%	干密度/ (g · cm ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
①	31.8	18.2	13.6	21.1	1.79	21.6	17.3
②	32.5	17.8	14.7	20.8	1.73	21.9	16.9
③	30.6	17.6	13.0	20.6	1.82	22.3	17.2
平均	31.4	17.9	13.8	20.8	1.78	21.9	17.1

加入适量的蒸馏水搅拌均匀并利用模具制成圆柱形试件。抽气 2 h 并饱水 24 h, 然后放入 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的制冷箱中静置 48 h, 然后脱模套上橡胶套, 最后放在恒温压力舱中, 分别在 -2 , -5 , -10 , $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温条件下进行蠕变试验^[17]。采用英国进口的冻土 GDS 测试系统进行恒温蠕变测试, 并收集数据。围压选取为 0.08 MPa , 轴向荷载选取为不同负温下三轴抗压强度的 60%^[18]。在 30 s 内将轴压均匀增加到预定的荷载, 然后保持偏应力稳定。当试样轴向变形速率连续 24 h 每小时应变小于 5×10^{-4} 或者发生破坏出现宏观裂纹时停止加载。测得不同负温条件下的蠕变曲线如图 3 所示。

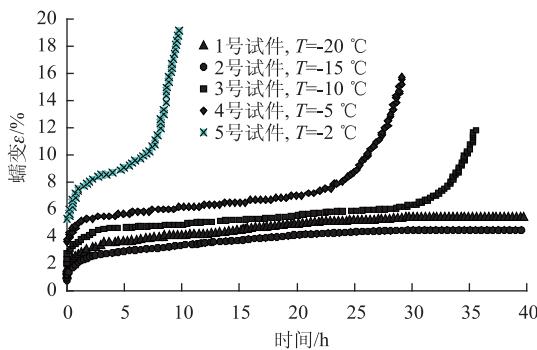


图 3 不同负温条件下的轴向变形曲线

Fig. 3 Axial deformation curves at different negative temperatures

2.2 测试结果分析

由图 3 可以看出, 温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时并未出现蠕变第 III 阶段, 说明负温较低时冻风积土强度比较大, 蠕变损伤发展比较缓慢。轴压达到预定值所产生的瞬时弹性变形会达到最终变形的 40% 以上。对于 -10 , $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻风积土试样, 均出现了蠕变第 III 阶段, 负温越低对应第 II 阶段的时间越长。所以, 温度对冻风积土蠕变损伤发展起直接作用。不同负温条件下的冻风积土初始瞬时变形及单轴抗压强度如图 4 所示。特征时间及损伤参数见表 2。不同温度下的损伤变量演化如图 5 所示。

表 2 特征时间及损伤参数

Tab. 2 Characteristic time and damage parameters

试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	t_D	t_p	t_c	n	ν_T	$\bar{\sigma}/\text{MPa}$
-10	17.61	31.72	39.53	0.76	1.12	3.65
-5	10.69	20.68	31.41	0.84	0.97	1.64
-2	2.85	5.87	8.23	0.92	0.43	0.83

由表 2 可以看出温度越高冻风积土发生损伤的

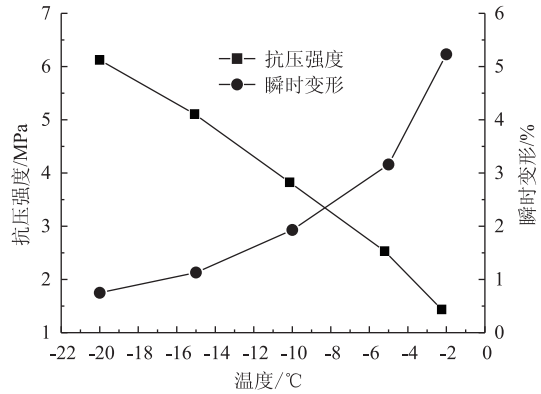


图 4 不同负温条件下瞬时变形与抗压强度

Fig. 4 Instantaneous deformations and compressive strengths at different negative temperatures

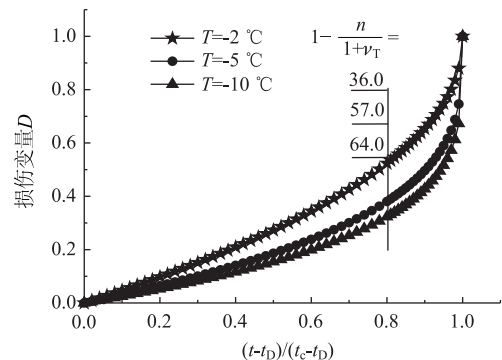


图 5 损伤变量随时间演化过程

Fig. 5 Damage variable varying with time

时间 t_D 及发生破坏的时间 t_c 越短。由图 5 可看出温变参数 ν_T 随着温度的升高而减小, ν_T 越小冻风积土内部蠕变损伤发展的越快。

3 屈服边界损伤演化规律

3.1 屈服边界损伤原理

当 $t_D < t < t_p$ 时, 冻风积土的抗剪强度指标 c_0 , φ_0 随时间逐渐发生损伤, 假设抗剪强度指标 c_t , φ_t 随时间的损伤演化率为:

$$c_t = c_0(1 - D); \quad \varphi_t = \varphi_0(1 - D)。 \quad (9)$$

德鲁克和普拉格考虑了中间主应力影响, 通过对 Mises 条件改进提出了 Drucker - Prager (D - P) 屈服准则, 适用于岩土材料^[19]。在主应力空间中, 无损伤屈服边界 σ_s 方程可表示为:

$$\sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0, \quad (10)$$

式中, I_1 为第一主应力不变量; J_2 为第二偏应力不变量; α , k 为由冻风积土黏聚力和内摩擦角所确定

的模型参数, 可表示为:

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi_t}{\sqrt{3}(3 - \sin^2\varphi_t)}, \quad k = \frac{6c_t \cos\varphi_t}{\sqrt{3}(3 - \sin^2\varphi_t)}. \quad (11)$$

围压可认为是相等的 ($\sigma_2 = \sigma_3$), 方程可退化为如式 (12) 的二维形式, 屈服边界 Γ 所围成的图形为一偏心椭圆 (图 6)。

$$\alpha(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3)/3} = k. \quad (12)$$

当时间 $t < t_D$ 时, 对于蠕变初期位于未损伤屈服边界 Γ 内某一应力状态点 $P(\sigma_{p,1}, \sigma_{p,3})$ 并未发生屈服。随着冻风积土内部裂隙不断发展而产生的空洞致使其产生蠕变损伤, 损伤后 P 点的第一、第三主应力都将变大向右上方扩展, 此时的应力状态可用 lemaître 有效应力形式来表示^[20], 即:

$$\tilde{\sigma}_{p,1} = \frac{\sigma_{p,1}}{1-D}, \quad \tilde{\sigma}_{p,3} = \frac{\sigma_{p,3}}{1-D}, \quad (13)$$

式中, $\sigma_{p,1}, \sigma_{p,3}$ 分别为应力点 P 的横纵坐标。

另一方面, 随着蠕变的发展, 屈服边界开始发生蠕变损伤而具有收缩趋势, 某一时刻扩展后的 P' ($\tilde{\sigma}_{p,1}, \tilde{\sigma}_{p,3}$) 点刚好位于损伤后的屈服边界 Γ' 上, 意味着该点开始发生屈服。随着加载时间发展, 蠕变损伤演化逐渐加剧, 冻风积土内部将有更多的点到达损伤后的屈服边界 Γ' , 冻风积土内部进入屈服区的范围不断扩大。损伤后屈服边界 Γ' 的表达式为:

$$\alpha(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3)/3} = k. \quad (14)$$

将点 P' 的横纵坐标及式 (11) 中 α_t, k_t 的表达式代入式 (14), 可得点 P' 进入到损伤屈服边界所需要的时间满足:

$$\frac{\sqrt{\tilde{\sigma}_{p,1}^2 + \tilde{\sigma}_{p,3}^2 - \tilde{\sigma}_{p,1} \cdot \tilde{\sigma}_{p,3}}}{2} = \frac{3c_t \cos\varphi_t - \sin\varphi_t(\tilde{\sigma}_{p,1}^2 + \tilde{\sigma}_{p,3}^2)}{3 - \sin^2\varphi_t}. \quad (15)$$

一般情况下, 冻结状态下风积土相对于其他类土体内摩擦角 φ_t 较小, $\sin^2\varphi_t$ 在 0.1 左右, 因此式 (15) 中 $\sin^2\varphi_t$ 可以近似忽略不计^[21]。利用泰勒级数对式中的 $\sin\varphi_t, \cos\varphi_t$ 进行展开并略去高阶无穷小的量, 可近似得到:

$$9c_0\varphi_0^2\left(\frac{t_c - t}{t_c - t_D}\right)^{\frac{4}{1+\nu_T}} - (b\varphi_0^3 + 18c_0)\left(\frac{t_c - t}{t_c - t_D}\right)^{\frac{2}{1+\nu_T}} + 9a + 6b\varphi_0 = 0, \quad (16)$$

其中, $a = \sqrt{\sigma_{p,1}^2 + \sigma_{p,3}^2 - \sigma_{p,1} \cdot \sigma_{p,3}}, b = \sigma_{p,1}^2 + \sigma_{p,3}^2$ 。

式 (16) 可转化为一元二次方程, 舍弃较大解 (该解对应 P 点到达屈服边界另一侧) 该方程的正实数解为:

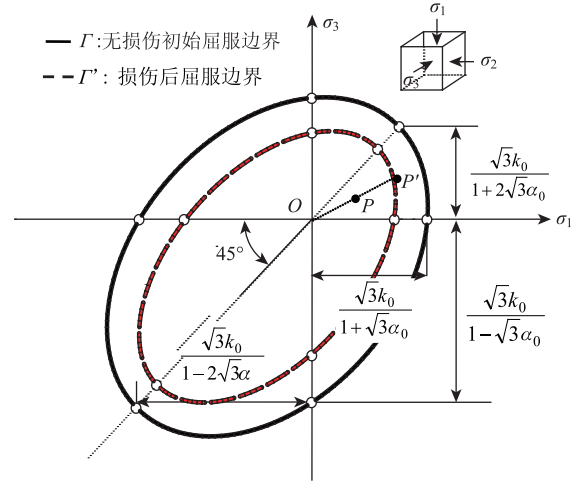


图 6 屈服边界损伤原理

Fig. 6 Yield boundary damage principle

$$t = t_c - (t_c - t_D) \sqrt{\frac{b\varphi_0^3 + 18c_0 + \Delta}{18c_0\varphi_0^2}}, \quad (17)$$

其中, $\Delta = \sqrt{b^2\varphi_0^6 - 180bc_0\varphi_0^3 + 324c_0^2 - 324ac_0\varphi_0^2}$ 。

(18)

式 (11) 给出了屈服边界参数 α, k 的演化规律, 式 (17) 给出了冻风积土内部某一点进入屈服边界所需时间的近似解, 这两个方程确定了冻风积土屈服边界损伤的规律。

3.2 屈服轨迹的初步探讨

由图 7, P 点与原点 O 连线 OP 与横轴 $O\sigma_1$ 所夹的角 θ_0 可表示为:

$$\theta_0 = \tan^{-1}(\sigma_{p,3}/\sigma_{p,1}). \quad (19)$$

设 D_1, D_3 分别为轴向和围向的损伤变量, 对于同性损伤来说 $D_1 = D_3$, 蠕变损伤后, P 点落在了损伤屈服边界 Γ' 上 P'_0 点, PP'_0 与水平轴的夹角 θ'_0 为:

$$\theta'_0 = \tan^{-1} \frac{\tilde{\sigma}_{p,3} - \sigma_{p,3}}{\tilde{\sigma}_{p,1} - \sigma_{p,1}} = \tan^{-1} \left[\frac{\sigma_{p,3}}{\sigma_{p,1}} \cdot \frac{D_3(1-D_1)}{D_1(1-D_3)} \right]. \quad (20)$$

若 $D_1 = D_3$, 发生的是各项同性损伤, $\theta'_0 = \theta_0$; 若 $D_1 < D_3$, 发生的是各项异性损伤, $\theta'_0 = \theta_1$; 若 $D_1 > D_3$, 发生的是各项异性损伤, $\theta'_0 = \theta_2$ 。

各向同性损伤时, P 点的屈服轨迹位移矢量 $\overrightarrow{PP'_0}$ 与 $\overrightarrow{OP}$ 共线。对于各向异性损伤 $D_1 \neq D_3$, 蠕变损伤后, P 点落在了损伤屈服边界 Γ' 上 P'_1 或 P'_2 点, 各向异性损伤的屈服轨迹位移矢量偏离原始 $\overrightarrow{OP}$ 方向, 如图中的 $\overrightarrow{PP'_1}, \overrightarrow{PP'_2}$ 。由损伤不可逆性, P 点的 σ_1 ,

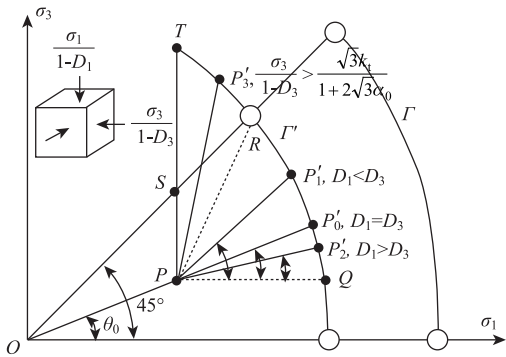


图 7 应力屈服轨迹示意图

Fig. 7 Schematic diagram of strain yield locus

σ_3 都会变大, 因此只要是 $\tilde{\sigma}_1$ 仍为第一主应力时屈服轨迹矢量只能位于图中 $PQRS$ 区域内。

当屈服轨迹角 θ'_0 增大的过程中, 屈服轨迹矢量有可能达到 $PQRT$ 区域 $\tilde{\sigma}_3$ 成为第一主应力, 此时只需满足:

$$\frac{\sigma_3}{1-D_3} > \frac{\sqrt{3}k_t}{1+2\sqrt{3}\alpha_1} \quad (21)$$

对于损伤后的屈服强度 $\tilde{\sigma}_s$ 可根据蠕变曲线由第 II 阶段进入到第 III 阶段的时间 t_p 所对应的损伤边界 Γ' 来确定。

4 蠕变损伤的验证

4.1 蠕变损伤模型验证

图 2 所示的蠕变模型初始蠕变参数可根据图 3 所测得试验数据进行拟合确定, 结果见表 3。

由表 3 可知, 较低温度下的冻风积土蠕变曲线并未出现第 III 阶段, 可认为该温度下的蠕变损伤为零, 采用式 (9) 所给出无损伤蠕变模型来计算该温度下的蠕变变形量。以 $T = -20^\circ\text{C}$ 为例, 由表 3 中的初始蠕变参数 E_0 , E_1 及 η_1 和式 (4) 所确定的模型值与试验实测值对比如图 8 (a) 所示。

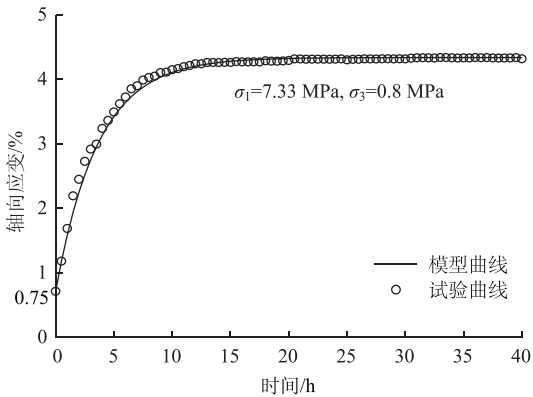
表 3 元件模型参数拟合结果

Tab. 3 Fitting result of element model parameters

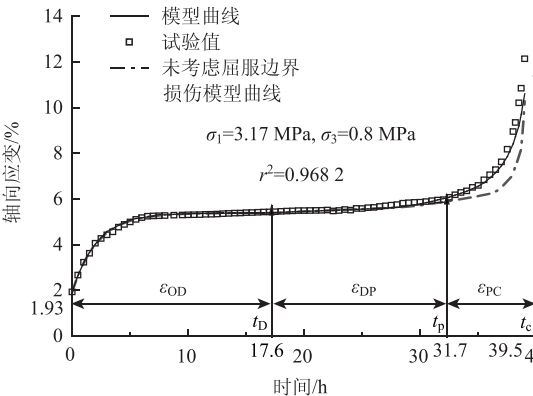
试验温度/ $^\circ\text{C}$	E_0/MPa	E_1/MPa	$\eta_1/(\text{MPa} \cdot \text{h})$	$\eta_2/(\text{MPa} \cdot \text{h})$	α_0	k_0/MPa
-20	488.8	258.3	92.3	未屈服	1.17	3.05
-15	233.7	143.1	77.5	未屈服	2.36	4.11
-10	117.5	86.5	54.2	97.6	1.17	4.86
-5	78.5	35.2	37.9	72.9	2.36	5.02
-2	15.6	2.8	18.6	51.7	3.12	7.33

温度较高时蠕变曲线出现了第 III 阶段及拐点, 从拐点所对应的时间 t_D 开始发生蠕变损伤。以负温

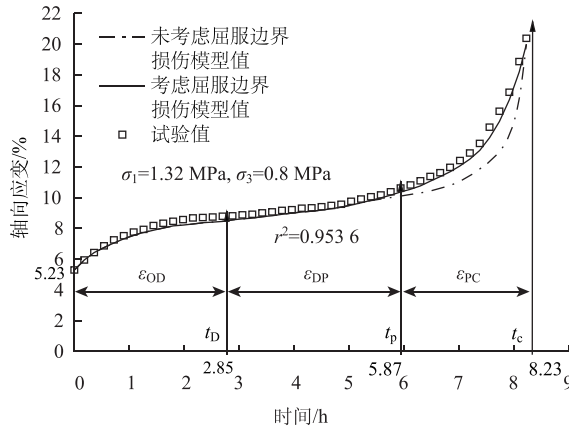
-2°C 和 -10°C 为例, 从 0 到 t_D 采用未损伤蠕变模型 ε_{OD} ; 从 t_D 到 t_p 采用损伤蠕变模型 ε_{DP} ; 从 t_p 到 t_c 采用非线性 D-P 损伤蠕变模型 ε_{PC} 。采用分阶段蠕变损伤模型计算值与实测值对比如图 8 (b) ~ (c) 所示。若不考虑屈服边界损伤的影响, 模型曲线如图中的虚线所示。



(a) $T = -20^\circ\text{C}$



(b) $T = -10^\circ\text{C}$



(c) $T = -2^\circ\text{C}$

图 8 不同负温条件下模型值与实测值对比图
Fig. 8 Comparison between model calculated values and measured values at different negative temperatures
由以上对比分析可知, 负温为 -20°C 时模型曲

线和实测曲线比较接近, 相关系数 r^2 可达到 0.974 2; 而当温度升高时模型值与试验值偏差程度有一定增加, r^2 可达 0.953 6。若不考虑屈服边界的损伤, 模型值会与实测值有较大差距, 说明所提出的考虑屈服边界损伤的分阶段蠕变损伤模型能够较好地描述冻风积土在不同负温条件下的冻风积土蠕变各阶段特征。负温越高蠕变第 II 阶段越短, 出现宏观裂纹时间越短。

从图 8 (a) 可以看出低温无损伤条件下冻风积土蠕变曲线并未出现拐点, 而图 8 (b) ~ (c) 中高温冻风积土从开始加载到破坏的蠕变曲线均出现了由凸到凹的变化过程, 因此蠕变曲线的拐点是确定蠕变损伤时间阈值的重要依据。

4.2 屈服边界损伤验证

本研究主要是研究各项同性损伤的屈服边界损伤特性, 假设内部各点的应力状态相同, 在 -2 、 -5 $^{\circ}\text{C}$ 和 -10 $^{\circ}\text{C}$ 的 σ_1 分别为 0.82, 2.27 MPa 和 3.67 MPa, 围压分别为 0.05, 0.1 MPa 和 0.2 MPa。屈服边界的损伤参数结果如表 4 所示。

表 4 冻风积土屈服边界损伤参数

Tab. 4 Yield boundary damage parameters of frozen aeolian soil

试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	c_0/MPa	$\varphi_0/(^{\circ})$	a/MPa	b/MPa	Δ
-2	28.3	17.1	0.57	0.337	0.12
-5	32.8	17.8	1.14	1.32	0.37
-10	39.6	18.2	2.55	6.55	0.48

将由式 (17) 计算得到的屈服时间与试验蠕变曲线观测屈服临界点 B 所对应的时间进行对比, 二者间相对误差如图 9 所示。按照第 4.1 节所述的屈服边界损伤原理并结合图 9 确定屈服时间。损伤后的屈服边界与有效应力间的演化关系如图 10 所示。

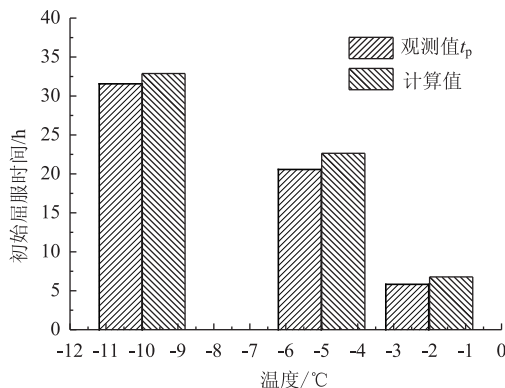


图 9 初始屈服时间计算值与观测值对比

Fig. 9 Comparison of initial yield time between calculated value and observed value

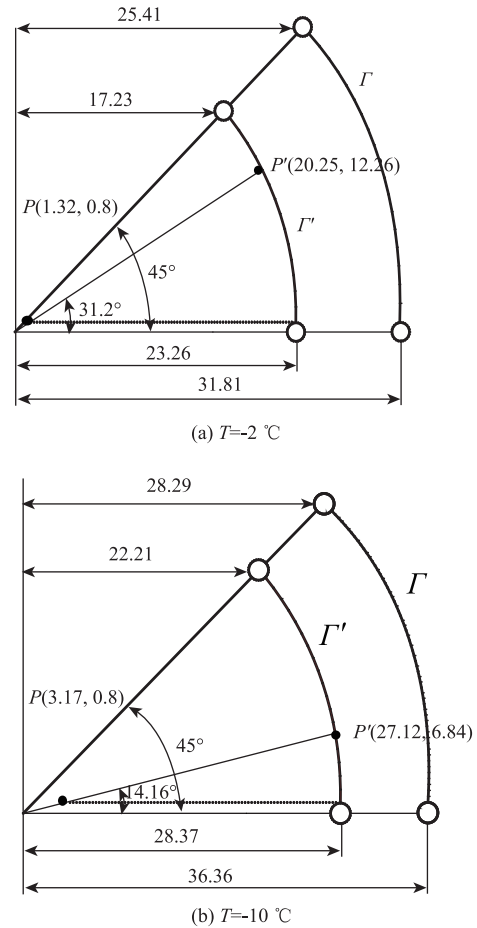


图 10 屈服边界损伤验证演示图 (单位: MPa)

Fig. 10 Demonstration graph of verifying yield boundary damage (unit: MPa)

从图 9 可看出, 由式 (12) 计算到和观测到的初始屈服时间结果比较接近, 最大的相对误差为 9.48%; 由图 10 可看出损伤后的应力点与损伤屈服边界较为接近。因此, 式 (9) 的假设及本研究提出的屈服边界损伤模型具有合理性。

5 结论

通过对不同负温条件下的冻风积土进行蠕变试验, 给出了冻风积土的初始损伤时间与初始屈服时间的确定方法, 研究了损伤变量在不同温度下的演化规律, 将其应用到蠕变损伤模型与屈服边界领域研究, 得到了如下结论。

(1) 将出现第 III 阶段的蠕变曲线的拐点作为蠕变损伤时间阈值, 将第 III 阶段初始时间作为屈服临界点, 依据这两个特征时间为分界点提出了分阶段描述的冻风积土蠕变损伤模型, 结果表明分阶段蠕变模型可以较好地描述冻风积土发生损伤时的蠕变特征, 最小的相关系数可达 0.953 6。

(2) 给出了冻风积土分阶段的蠕变损伤模型, 将西原模型中黏塑性元件改进成具有损伤特性的非线性黏塑性体来描述冻风积土发生蠕变损伤第 III 阶段变形规律, 利用试验蠕变曲线反演出模型的蠕变参数, 采用损伤后的屈服边界 I' 作为冻土发生屈服的标准, 模型可以较好地描述各阶段蠕变特征。

(3) 提出了屈服边界的损伤理论, 揭示了冻风积土蠕变过程发生损伤的机理, 初步探讨了各项同性损伤与各向异性损伤对冻风积土进入屈服边界的方式, 给出了研究冻风积土进入蠕变第 III 阶段发生损伤的一种新方法。

参考文献:

References:

- [1] 刘世伟, 张建明, 张虎, 等. 青藏高原多年冻土长期蠕变变形试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (增1): 3245–3253.
LIU Shi-wei, ZHANG Jian-ming, ZHANG Hu, et al. Research on Long-term Creep Test of Permafrost on Qinghai—Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (S1): 3245–3253.
- [2] 张向东, 傅强. 冻土三轴蠕变特性试验研究及平面冻土墙厚度的确定 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (8): 2261–2266.
ZHANG Xiang-dong, FU Qiang. Experimental Study of Triaxial Creep Properties of Frozen Soil and Thickness Determination of Flat Frozen Soil Wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (8): 2261–2266.
- [3] 刘萌心, 姚晓亮, 齐吉琳, 等. 考虑应力历史的冻土一维蠕变模型 [J]. 岩土工程学报, 2015, 38 (5): 898–903.
LIU Meng-xin, YAO Xiao-liang, QI Ji-lin, et al. 1D Creep Model for Frozen Soil Taking Account of Stress History [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 38 (5): 898–903.
- [4] 董连成, 张公, 赵淑萍, 等. 冻土蠕变指标试验研究 [J]. 冰川冻风积土, 2014, 36 (1): 130–136.
DONG Lian-cheng, ZHANG Gong, ZHAO Shu-ping, et al. Experimental Study of the Creep Indexes of Frozen Soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36 (1): 130–136.
- [5] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (7): 1297–1308.
ZHAO Yan-lin, TANG Jin-zhou, FU Cheng-cheng, et al. Rheological Test of Separation between Viscoelastic-plastic Strains and Creep Damage Model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (7): 1297–1308.
- [6] BRAY M T. Secondary Creep Approximations of Ice-rich Soil and Ice Using Transient Relaxation Tests [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 88 (2): 17–36.
- [7] 赵晓东, 周国庆. 温度梯度冻土蠕变变形规律和非均质特征 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (2): 390–394.
ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing. Creep Deformation and Heterogeneous Characteristics for Frozen Soils with Thermal Gradient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (2): 390–394.
- [8] 维亚洛夫 C C. 土力学的流变原理 [M]. 杜余培, 译. 北京: 科学出版社, 1978.
VIALOV C C. Soil Mechanics Rheological Principle [M]. DU Yu-pei, translated. Beijing: Science Press, 1978.
- [9] KACHANOV L M. Introduction to Continuum Damage Mechanics [M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
- [10] 孙琦, 张向东, 杨佳, 等. 冻结条件下风积土蠕变损伤特性及本构模型研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (5): 61–67.
SUN Qi, ZHANG Xiang-dong, YANG Jia, et al. Study on Creep Damage Characteristics and Constitutive Model of Aeolian Soil under Freezing Condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (5): 61–67.
- [11] 汪承维, 李栋伟. 深部人工冻土黏弹塑损伤耦合本构模型研究及其验证 [J]. 冰川冻风积土, 2013, 35 (5): 1219–1223.
WANG Cheng-wei, LI Dong-wei. Study and Verification of Laboratory Prepared Frozen Soil Viscoelastic-plastic Damage Coupling Constitutive Model [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35 (5): 1219–1223.
- [12] 王其虎, 叶义成, 刘艳章, 等. 考虑初始损伤和蠕变损伤的岩石蠕变全过程本构模型 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (增1): 57–62.
WANG Qi-hu, YE Yi-cheng, LIU Yan-zhang, et al. A Creep Constitutive Model of Rock Considering Initial Damage and Creep Damage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (S1): 57–62.
- [13] KACHANOV M. Effective Elastic Properties of Cracked Solids: Critical Review of Some Basic Concepts [J]. Applied Mechanics Review, 1992, 45 (8): 305–336.

(下转第86页)

- Control Method of Stress-free Status in Transition Process of Structural System for Self-anchored Suspension Bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2014, 33 (1): 21–24.
- [13] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 空间缆索悬索桥的主缆线形分析 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32 (10): 1349–1354.
- LUO Xi-heng, XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Cable Shape Analysis of Suspension Bridge with Spatial Cables [J]. Journal of Tongji University: Natural Sciences Edition, 2004, 32 (10): 1349–1354.
- [14] 周绪红, 武隽, 狄谨. 大跨度自锚式悬索桥受力分析 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (2): 42–45.
- ZHOU Xu-hong, WU Jun, DI Jin. Mechanical Analysis for Long Span Self-anchored Suspension Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (2): 42–45.
- [15] 袁明, 王同民, 黄晓航. 大跨自锚式悬索桥吊索张拉与体系转换技术研究 [J]. 世界桥梁, 2015, 43 (3): 15–19.
- YUAN Ming, WANG Tong-min, HUANG Xiao-hang. Study of Hanger Tensioning and System Transformation Techniques for Long-span Self-anchored Suspension Bridge [J]. World Bridges, 2015, 43 (3): 15–19.
- [16] 李建慧, 李爱群, 袁辉辉, 等. 空间缆索悬索桥主鞍座结构设计与分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (8): 73–76, 88.
- LI Jian-hui, LI Ai-qun, YUAN Hui-hui, et al. Design and Analysis of Main Saddle Structure for Self-anchored Suspension Bridge with Spatial Cables [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (8): 73–76, 88.
- [17] 张玉平, 董创文. 江东大桥双塔单跨空间主缆自锚式悬索桥的施工控制 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (7): 76–82.
- ZHANG Yu-ping, DONG Chuang-wen. Construction Control of Self-anchored Suspension Bridge with Two Pylons and Single Span Spatial Cables in Jiangdong Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (7): 76–82.
- [18] 张哲, 韩立中, 万其柏. 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的设计研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (6): 46–51, 71.
- ZHANG Zhe, HAN Li-zhong, WAN Qi-bai. Research on Design of Self-anchored Cable-stayed Suspension Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (6): 46–51, 71.
- (上接第62页)
- [14] 孙凯, 陈正林, 陈剑, 等. 一种基于修正西原模型的冻土蠕变本构关系 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (增1): 142–146.
- SUN Kai, CHEN Zheng-lin, CHEN Jian, et al. A Modified Creep Constitutive Equation for Frozen Soil Based on Nishihara Model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (S1): 142–146.
- [15] 彩雷洲. 青藏高原高温高含冰量砂质粉土蠕变试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- CAI Lei-zhou. Study on Creep Test of High Temperature and High Ice Content Sandy Silt [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [16] 王伸远, 李栋伟. 深部人工冻结黏土三轴蠕变试验研究 [J]. 冰川冻土, 2014, 36 (6): 1479–1483.
- WANG Shen-yuan, LI Dong-wei. Experimental Study of the Triaxial Creep Features of Deep Artificial Frozen Clay [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36 (6): 1479–1483.
- [17] 路贵林. 多年冻风积土区高温冻风积土力学特性试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- LU Gui-lin. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Frozen Aerated Soil at Multi-year Frozen Aeolian Area [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [18] 马小杰, 张建明, 常小晓, 等. 高温-高含冰量冻土蠕变试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (6): 848–852.
- MA Xiao-jie, ZHANG Jian-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Experimental Study on Creep of Warm and Ice-rich Frozen Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (6): 848–852.
- [19] 刘金龙, 栾茂田, 许成顺, 等. Drucker-Prager 准则参数特性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增2): 4009–4015.
- LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, et al. Study on Parametric Characters of Drucker-Prager Criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 4009–4015.
- [20] LEMAITRE J, SERMAGE J P. One Damage Law for Different Mechanisms [J]. Computational Mechanics, 1997, 20 (1/2): 84–88.
- [21] 王永忠, 刘雄军, 艾传井, 等. 南方短时冻土抗剪强度指标 c 、 φ 值的试验研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43 (2): 198–202.
- WANG Yong-zhong, LIU Xiong-jun, AI Chuan-jing, et al. Experimental Investigation on Shear Strength Parameters c and φ for a Temporarily Frozen Soil in South China [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43 (2): 198–202.