

DOI: 10.11779/CJGE201802019

辽西冻风积土动力测试与动损伤机理研究

张向东, 李军*, 易富, 孙琦, 曲直, 胡跃龙

(辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 风积土颗粒间包含的孔隙自由水在冬季负温作用下会发生冻结现象。为研究冻风积土在行车等动荷载作用下产生的动力损伤机理及其特征, 利用GDS冻土三轴测试系统对不同条件下的冻风积土试样进行三轴加载, 获得了不同条件下的动应力-应变曲线, 并利用有效应力分析法对损伤有效应力及累积塑性变形进行确定。将Helmholtz自由能作为塑性势函数建立了损伤演变率与损伤释放率之间的数学关系, 并依照塑性势函数和累积塑性变形率间的线性假设建立损伤演化模型。利用本文所提出的有效应力分析法对建立的P模型参数进行拟合, 结果表明P模型计算结果与相关文献动损伤模型计算结果比较吻合。对比由循环加载造成的疲劳损伤与塑性区发展造成的塑性损伤发展过程, 得到了冻风积土初期动损伤以塑性损伤为主, 后期以疲劳损伤为主的结论, 并且确定各条件下塑性损伤的阈值, 为冻风积土路基的动力灾害防治提供理论依据。

关键词: 冻风积土; 塑性损伤模型; 动力测试; 有效应力分析法; 疲劳损伤

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)02-0370-08

作者简介: 张向东(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail:jwd101@126.com。

Dynamic tests and damage mechanism of frozen aeolian soil in western Liaoning area of China

ZHANG Xiang-dong, LI Jun, YI Fu, SUN Qi, QU Zhi, HU Yue-long

(College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The pore free water contained in the aeolian soil particles will freeze under the negative temperature in winter. In order to study the dynamic damage mechanism and characteristics of frozen aeolian soil under dynamic load, triaxial loading tests on frozen soil samples under different conditions are carried out by using the GDS frozen soil triaxial test system. The dynamic stress-strain curves under different conditions are obtained, and the effective stress analysis method is used to determine the damage effective stress and cumulative plastic deformation. The mathematical relationship between damage evolution rate and damage release rate is established by using the Helmholtz free energy as the plastic potential function, and the damage evolution model is established according to the linear assumption between plastic potential function and cumulative plastic deformation rate. The parameters of the model are fitted by the proposed effective stress analysis method. The results show that the calculated results of the model are in agreement with the calculated ones of damage model in related literatures. It is concluded that the dynamic damage of frozen aeolian soil is mainly caused by plastic damage initially, while fatigue damage later. By comparing the two damage development processes, the initial damage to the frozen soil and the threshold of plastic damage under each condition are determined. It may provide the theoretical basis for dynamic disaster prevention and control of frozen aeolian roadbed.

Key words: frozen aeolian soil; plastic damage model; dynamic test; effective stress analysis method; fatigue damage

0 引言

风积土在辽西地区分布广泛, 被大量用于地基或路基填土。由于风积土具有疏松多孔的结构, 地下水在其内部毛细现象比较明显, 在寒冷冬季负温作用下会形成季节性冻土。主要承受的荷载一方面来自于行车或是上部结构动荷载, 另一方面是来自于地震波的动荷载。受地域气候环境的影响, 辽西地区风积土颗

粒排列相对致密, 浸水后湿陷性较弱, 虽与其他地区的风积土在结构性特征方面表现出相似的规律, 但在数值上具有较大差异性^[1]。因此, 研究辽西风冻风积土路基在动荷载作用下的力学特性及强度损伤机理对

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774166, 51504125, 41774163)

收稿日期: 2016-11-08

*通讯作者(E-mail: lj0801@126.com)

防治该地区路基灾害具有重大意义。

国内外研究人员在岩土强度损伤模型及演化机理领域进行了大量研究。孔宪京等^[2]联合采用混凝土塑性损伤模型和堆石料弹塑形本构模型, 建立弹塑性动力分析方法; 蒋明镜等^[3]将基于微观力学机制的损伤演化规律引入结构性土的硬化规律, 利用室内三轴压缩试验初步验证模型的合理性和适用性; 张超等^[4]在深入探讨岩石压缩机理及变形过程基础上, 建立了能反映损伤阈值影响的岩石单元强度度量方法与损伤演化模型; Li 等^[5]用残余塑性应变来描述混凝土材料受损程度, 研究弯曲荷载对材料抗冻性能的影响; 刘增利等^[6]利用 CT 观测技术对冻土在单轴压缩情况下的细观损伤发展过程进行测试。

循环荷载作用下的冻土随着荷载强度的增加会产生不可恢复的塑性累积变形, 在其内部伴随着细小裂隙的萌生。随循环次数发展积累的疲劳损伤会加快内部损伤进程。因而, 冻土内部的损伤是强度和疲劳破坏共同作用的结果, 可根据累积塑性变形来阐明冻土在加荷和疲劳破坏共同作用下的损伤机理。

传统研究冻土塑性损伤的方法大都借助于塑性势函数与塑性增量间的正交关系建立塑性损伤模型。但是, 这种方法要求塑性势函数要充分考虑到各影响要素, 并且不太容易确定模型参数。本文拟通过实测试验曲线, 利用有效应力分析法来确定损伤模型参数, 研究不同条件下冻土损伤演化过程, 并分析疲劳损伤影响。

1 塑性损伤模型

1.1 屈服准则

根据实测加载曲线冻土在循环荷载作用下并未发生强度硬化, 屈服面并未随着内部塑性区的扩展而变化。假定冻土发生的是理想弹塑性变形, 在屈服过程中产生体积膨胀, 因而可以采用 Drucker-Prager (D-P) 屈服准则。

在主应力空间中, 冻土内部某一点发生屈服时, 屈服函数 f 满足如下条件^[7]:

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 = k , \quad (1)$$

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 是由冻土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 所确定的模型参数。根据加载特征, 采用压缩性 D-P 屈服准则, 模型参数可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} , \\ k &= \frac{6c \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} . \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.2 损伤演化分析

根据弹塑性流动法则, 假定冻土屈服面各点应力状态满足相关联流动法则, 塑性应变增量 $\dot{\varepsilon}_p$ 与该点屈服面呈正交关系, 即

$$\dot{\varepsilon}_p = \lambda \frac{\partial f(I_1, \sqrt{J_2})}{\partial \sigma} , \quad (3)$$

式中, λ 为非负的标量塑性流动因子。

冻土从无损伤到发生损伤时发生的总动应变 ε_d 包括弹性应变 ε^e 和塑性应变 ε^p 两部分。因此, 也可将 Helmholtz 自由能 ψ 分割为弹性自由能 ψ^e 和塑性自由能 ψ^p 两部分^[8]。

$$\psi = \frac{1}{2}(\varepsilon_d - \varepsilon^p) : \tilde{\mathbf{C}}(D) : (\varepsilon_d - \varepsilon^p) + \psi^p(\gamma, D) , \quad (4)$$

式中, γ 为塑性强化参数, $\tilde{\mathbf{C}}(D)$ 为损伤刚度矩阵, $\tilde{\mathbf{C}}(D)$ 与无损伤刚度矩阵 $\mathbf{C}(D)$ 之间的关系为

$$\tilde{\mathbf{C}}(D) = \mathbf{M}^T : \mathbf{C}(D) : \mathbf{M} , \quad (5)$$

式中, \mathbf{M} 为损伤变量的矩阵形式, 在主应力空间内可表示为

$$\mathbf{M} = \text{diag}\{1/W_{11}, 1/W_{22}, 1/W_{33}, 1/W_{12}, 1/W_{23}, 1/W_{31}\} , \quad (6)$$

其中, $W_{ii} = 1 - D_i$, $W_{ij} = [(1 - D_i)(1 - D_j)]^{1/2}$ 。

本文将 ψ 作为热力学耗散势函数, 由正交关系及式 (3), 参照文献[9]给出损伤释放率 Y 的形式, 冻土的损伤状态方程为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon^e}, \dot{D} = \frac{\partial \psi}{\partial Y}, Y = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon^p} , \\ Y &= \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} S_t . \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中 E 为初始无损伤弹性模量; σ_{eq} 为 VonMises 应力 ($\sigma_{eq} = \sqrt{3\text{tr}(\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\sigma})/2}$, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量), 可引起微裂缝伸长; μ 为泊松比; S_t 为三轴应力因子。

为了描述冻土损伤的状态, 需建立冻土损伤准则方程。在无塑性应变增强条件下, 冻土的损伤准则方程为

$$F_D(Y, D) = Y - r(D) \begin{cases} \leq 0 & (\varepsilon \leq \varepsilon_f) \\ > 0 & (\varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases} , \quad (8)$$

式中, $r(D)$ 为损伤阈值, ε_f 为冻土的比例极限点对应的应变。

对于循环加载的冻土实际上发生的是延性破坏, 累积塑性应变率 $\dot{\varepsilon}_p$ 为

$$\dot{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3} \text{tr}(\dot{\varepsilon}^p : \dot{\varepsilon}^p)} . \quad (9)$$

若冻风积土发生的是各向同性损伤, 可将耗散势函数 ψ 看成是关于 $\dot{\varepsilon}_p$ 的线性函数^[10], 即

$$\psi = \frac{s}{s+1} \left(\frac{Y}{s} \right)^{s+1} \dot{\varepsilon}_p , \quad (10)$$

式中, s 为依赖于温度的冻风积土待拟合参数。

根据式(7)可得冻土损伤演化方程为

$$\dot{D} = \frac{\partial \psi}{\partial Y} = \left(\frac{Y}{s} \right)^s \dot{p} \quad . \quad (11)$$

结合式(7)中的第2式, 损伤演化方程为

$$\dot{D} = \left[\frac{K^2}{2Es} \left(\frac{2}{3}(1+\mu) + 3(1-2\mu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right) \right]^s p^{\frac{2s}{M}} \dot{p} \quad , \quad (12)$$

式中, $K^2/(2Es)$ 和 M 为与材料特性有关的待测参数; σ_m ($\sigma_m = \text{tr}(\sigma)/3$) 为正的静水压力, 可引起冻土内部产生空洞。

1.3 有效应力分析法

根据 ramberg-osgood 硬化定律^[11], 三向加载下的冻土有效动应力 $\tilde{\sigma}_d$ 与累积塑性变形 p 之间的关系为

$$\tilde{\sigma}_d = \frac{\sigma_d}{1-D} = K \cdot p^{\frac{1}{M}} \quad . \quad (13)$$

在 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 曲线上, BD 段内发生的应变为 $d\varepsilon_d$, 应力为 $d\sigma_d$ 。 $d\varepsilon_d$ 可分为塑性分量 $d\varepsilon^p$ 和弹性分量 $d\varepsilon^e$ 两部分(如图1)。加载过程中, 塑性应变 $d\varepsilon^p$ 会伴随总应变 $d\varepsilon_d$ 逐渐积累, 从塑性损伤角度来看, 这就是微损伤逐渐积累的过程。由应力-应变关系, BD 段内任一点动弹性模量 E_t 可表示为

$$E_t = d\sigma_d / d\varepsilon_d \quad . \quad (14)$$

根据以弹性模量定义损伤变量的方法, 式(13)可改写成

$$d\sigma_d = (1-D)Ed\varepsilon_d \quad . \quad (15)$$

若 $d\varepsilon_d$ 段内发生的是无损伤变形, 名义应力应为 $d\sigma_d$ 与 $d\sigma^p$ 之和, 即

$$d\sigma_d + d\sigma^p = Ed\varepsilon_d \quad . \quad (16)$$

由式(15)、(16), 对照有效应力法, 损伤变量与应力间的关系为

$$1-D = \frac{d\sigma_d}{d\sigma_d + d\sigma^p} = \frac{d\sigma_d}{d\tilde{\sigma}_d} \quad . \quad (17)$$

这说明 $(d\sigma_d + d\sigma^p)$ 为损伤后的有效应力 $d\tilde{\sigma}_d$, 即

$$d\tilde{\sigma}_d = E(d\varepsilon_d - d\varepsilon^p) + Ed\varepsilon = Ed\varepsilon_d \quad . \quad (18)$$

对式(18)两边进行积分, $\tilde{\sigma}_d$ 可表示为

$$\tilde{\sigma}_d = \int_0^{\tilde{\sigma}_{dB}} d\tilde{\sigma}_d = \int_0^{\varepsilon_{dB}} Ed\varepsilon_d \quad . \quad (19)$$

利用图1所示的有效应力分析法可对式(13)中的损伤后的有效应力 $\tilde{\sigma}_d$ 进行确定, 从而实现对式(13)参数拟合的目标。利用有效应力分析法对 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 曲线进行分析可确定冻风积土在加载过程中的损伤演化规律。因此, 通过试验方法确定其塑性损伤是可行的。

2 冻风积土动力特性测试

2.1 测试用土与设备

试验用土取自辽西阜新市人民桥附近的风积土路基填土。将现场取回的土样放入密闭包装袋内带回实验室, 取土相关操作及基本指标测试符合《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 的要求, 相应测试结果见表1。将取土切成均匀碎块拌合均匀, 然后在105℃~110℃条件下对土样进行烘干碾散, 将碾散后的风干土进行筛分, 粒径分布见表2。

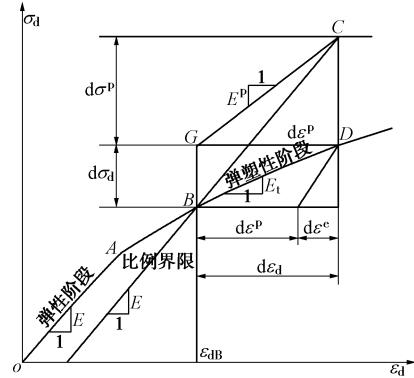


图1 有效应力法原理示意图

Fig. 1 Principle of effective stress method

表1 原状土基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indice for undisturbed soil

重度 /(kN·cm ⁻³)	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	压缩 模量/MPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /kPa
19.21	22.63	28.42	18.35	3.59	21.2	23.6

表2 颗粒分析结果

Table 2 Analysis results of particles

粒径/mm	>0.5	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075
含量/%	1.9	21.7	70.5	5.9

经过烘干、碾压、过筛的风积土按照天然含水率进行配水, 利用GDS自带的三瓣饱和器分层碾压制成直径为39.1 mm, 高为80 mm的圆柱形标准重塑土试样。在冷冻处理前抽真空饱水2 h。将饱和的试样脱模并放入负温制冷装置中, 使其在负温-20℃条件下静置48 h, 待其达到预定温度后进行动三轴试验。

试验采用英国进口的GDS冻土三轴加载设备, 该设备主要由加载系统、控制系统和数据采集分析系统组成。该装置温度控制精度±0.1℃, 最低负温-30℃, 最大加载值10 MPa, 满足试验要求。

2.2 测试方案

(1) 荷载选取

冻结状态下的风积土路基受到行车等荷载作用可看做是不同振幅、不同频率简单正弦波的叠加。研究表明: 车辆荷载振动频率一般在10 Hz以下, 本文选取2, 4, 8 Hz进行研究^[12]。考虑到负温对土体强度的增强作用, 最大轴向动应力 σ_{dmax} 一般按各温度下单轴抗压强度 q_u 的0.2~0.8倍进行选取^[13]。室内试验测

得该地区风积土在-2℃、-5℃和-10℃下的 q_u 分别为2.2, 2.7, 3.5 MPa。最小轴向动荷载 $\sigma_{d\min}$ 按照 $q_u/2$ 为正弦波平衡位置对称确定。以恒定频率, 下一级振幅为上一级振幅0.1倍逐级递增的形式进行动力测试, 直至达到最大振幅。

(2) 振动次数

采用逐级循环加载形式对试样进行加载, 通常每级荷载下的循环次数一般为2~10次。由于冻风积土变形延迟特征, 若振动次数过少, 在前一级荷载下变形尚未达到稳定就施加了下一级荷载; 若振动次数太多, 冻风积土会发生疲劳损伤, 发生软化现象^[14]。综合考虑, 本文选取每一级荷载作用下振动3次, 加载波形如图2所示。具体试验方案见表3。

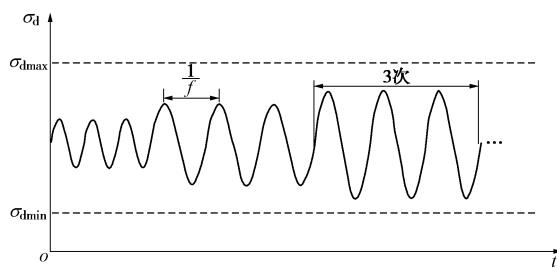


图2 等效正弦波形图

Fig. 2 Equivalent sine waveform

表3 试验设计方案

Table 3 Design schemes of test

试验编号	影响因素		
	负温 T/℃	围压/kPa	f/Hz
1	-2	50	8.0
2	-5	50	8.0
3	-10	50	8.0
4	-2	50	8.0
5	-2	100	8.0
6	-2	200	8.0
7	-2	50	2.0
8	-2	50	4.0
9	-2	50	8.0

2.3 测试结果与分析

按照1~9组的试验方案, 冻风积土试样在不同的测试条件下, 动应力-应变骨干曲线如图3~5所示。

由图3可知, 当 σ_d 较小时, 动应力-应变曲线接近于直线, 发生的是弹性变形; 当 σ_d 较大时, 动应力-应变曲线偏离直线, 并且偏离的程度越来越严重, 说明开始发生了塑性累积变形。温度越低, 曲线的初始直线段斜率越大, 对应的比例极限越大, 强度越高。

由图4可知, 不同围压下的冻风积土试样初始加载弹性模量相同。围压越高, 达到比例界限对应的 σ_d

越大。说明提高围压可以提高冻风积土抵抗塑性变形破坏的能力, 延缓冻风积土试样内部各点进入塑性区。

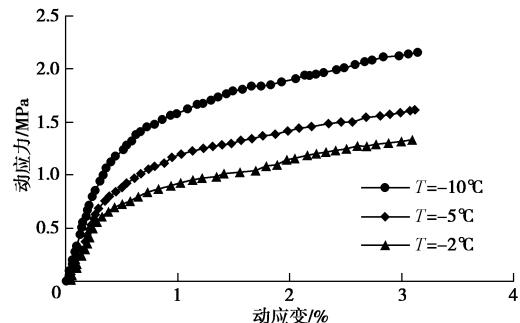


图3 不同温度下动应力-应变曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curves under different temperatures

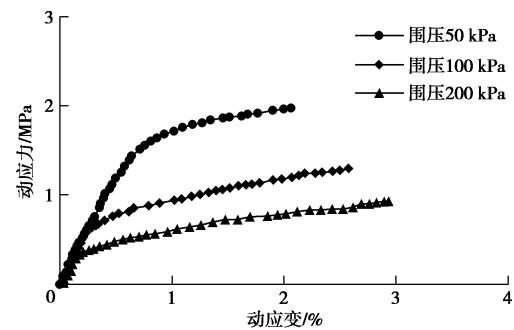


图4 不同围压下动应力-应变曲线

Fig. 4 Dynamic stress-strain curves under different confining pressures

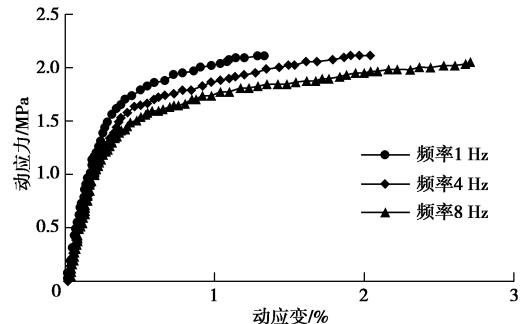


图5 不同频率下动应力-应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curves under different frequencies

由图5可知, 不同频率下的试样具有相同的弹性模量, 随着 σ_d 的增加试样开始进入塑性区。频率越大, 对应的 σ_d 比例界限越小, 说明试样在较大加载频率下而产生的疲劳损伤将使其提前进入塑性阶段。进入到塑性区后, 频率越低, 产生塑性变形越不明显。

3 损伤演化分析

3.1 塑性损伤分析

若取 $\sigma_d-\varepsilon_d$ 曲线初始点的切线斜率为 E , 与试件上下底面垂直的轴向为第一主应力方向。根据屈服条件式(1)及流动法则式(3), 在主应力方向上的 ε^p 得

以确定, D-P 屈服参数计算结果见表 4。根据图 1 所示的塑性变形发展 $d\epsilon^p$ 与总应变 $d\epsilon_d$ 对应关系, 假定冻风积土在进入塑性区之前内部各点的抗剪强度指标 c , φ 值相同, 各条件下的 ϵ^p 变化过程如图 6 所示。

表 4 屈服参数计算结果

Table 4 Calculated results of yield parameters

试验编号	c /kPa	$\varphi/^\circ$	α	k /kPa
1	25.23	18.56	0.137	10.37
2	33.80	20.43	0.152	15.42
3	42.85	22.27	0.167	21.46
4	25.36	18.57	0.137	10.43
5	28.73	19.52	0.145	12.47
6	31.83	21.46	0.160	15.31

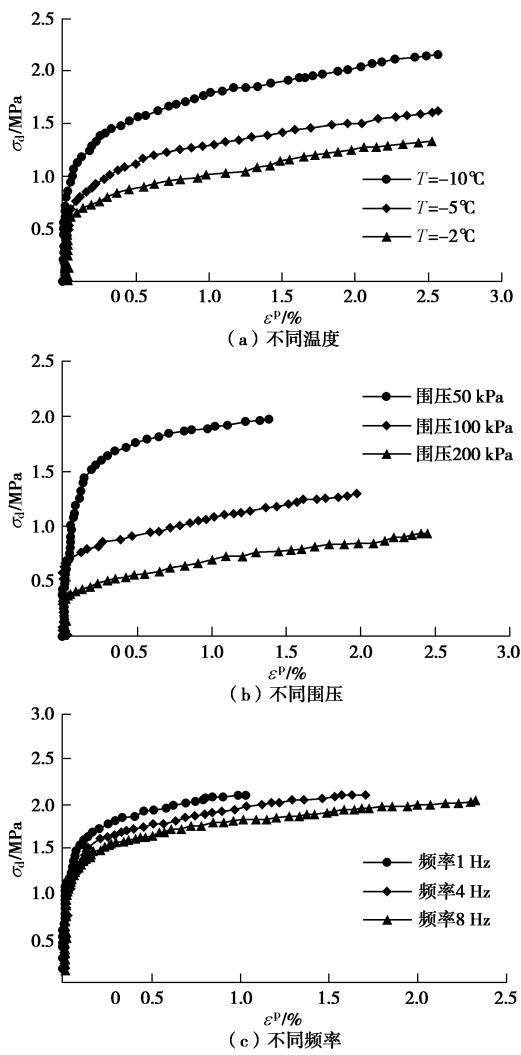


图 6 不同条件下的塑性应变曲线

Fig. 6 Plastic strain curves under different conditions

从图 6 中 (a) ~ (c) 可看出, 当 σ_d 较低时, 塑性变形发展缓慢; 当 σ_d 较高时, 塑性变形急剧发展。塑性变形的发展和动应变的发展具有相同的发展趋势, 即都经历了从加速到稳定的过程。在温度降低, 围压升高以及频率降低的情况下, 冻风积土塑性变形

发展缓慢。可以表明围压、负温对冻风积土的强度损伤具有抑制作用, 而提高频率会加快冻土发生疲劳损伤, 对冻风积土强度损伤具有促进作用。

目前对由影响的参数 s 研究甚少, 本文选定 s 为 1。根据式 (9) 中 p 与 ϵ^p 及图 6 中 $\epsilon^p - \sigma_d$ 的对应关系, 利用有效应力分析法, 对式 (13) 两边取对数, 可变为

$$\ln \tilde{\sigma}_d = \frac{1}{M} \ln p + \ln K \quad . \quad (20)$$

拟合直线的斜率为 $1/M$, 截距为 $\ln K$, 这样参数 M , K 得以确定。结合式 (19) 中本文给出的依据试验曲线对有效应力 $\tilde{\sigma}_d$ 的确定方法, 进行参数拟合, 拟合结果见表 5。

表 5 力学参数及模型拟合参数

Table 5 Mechanical and model fitting parameters

编号	E /MPa	μ	M	K	$\frac{K^2}{2E_s}/10^{-3}$	R^2
1	27.36	0.25	1.62	0.53	5.13	0.972
2	33.21	0.24	1.33	0.54	4.39	0.983
3	47.36	0.25	0.86	0.57	3.43	0.994
4	27.32	0.25	1.27	0.68	5.54	0.977
5	36.25	0.25	1.16	0.57	4.48	0.991
6	53.17	0.23	1.08	0.52	2.54	0.985
7	26.36	0.24	1.28	0.31	1.82	0.982
8	26.24	0.25	1.06	0.29	1.60	0.993
9	27.31	0.25	0.84	0.27	4.95	0.982

依据表 5 中所确定的模型参数, 考虑塑性损伤边界条件: $p \leq p_D$ 时, $D=0$ (p_D 为损伤累积塑性应变阈值), 对式 (12) 进行积分可得塑性损伤演化模型 (P 模型) 为

$$D = \frac{M+2s}{M} \left(p^{\frac{M+2s}{M}} - p_D^{\frac{M+2s}{M}} \right) \cdot \left\{ \frac{K^2}{2E_s} \left[\frac{2}{3}(1+\mu) + 3(1-2\mu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \right\}^s , \quad (21)$$

式中, p_D 为发生塑性损伤时累积塑性变形的阈值, 可按照文献 [15] 来确定。

将 P 模型与文献 [16] 中的塑性损伤模型确定的损伤变量进行对比, 对比结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 塑性损伤随着 p 发展而演化。当 $p=0$ 时, 并没有发生塑性损伤。负温越低, 发生塑性损伤阈值越大; 围压可以抑制冻风积土发生侧向变形, 围压越低, 塑性损伤阈值越小; 反复加载容易使其发生疲劳破坏, 频率越高, 损伤阈值越小。9 组试验中, 最小阈值 $p_D = 0.51\%$, 最大阈值 $p_D = 0.83\%$ 。

P 模型所确定的损伤演化为衰减类型, 这与文献 [16] 得到的结论是一致的。当 p 较小时, 二者较接近; 当 p 增加时, 二者间出现了微小偏差, P 模型计算的损伤变量相对于参考文献 [16] 损伤模型计算的损伤

变量略小。这说明本文利用有效应力分析法确定的塑性损伤演化规律是合理的。

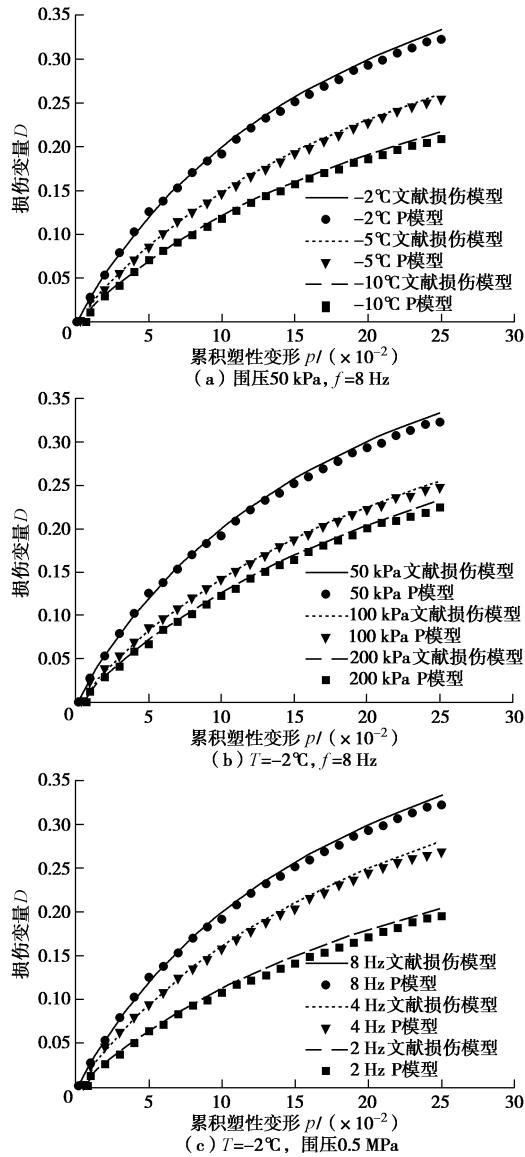


图 7 不同条件下损伤模型对比

Fig. 7 Comparison of damage models under of different conditions

3.2 加载疲劳损伤分析

多次循环荷载作用后, 造成冻风积土发生破坏的直接原因是疲劳损伤。假设发生的损伤是各向同性的, 应力幅 $\Delta\sigma_d$ ($\Delta\sigma_d = \sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}$) 造成疲劳损伤的驱动
力^[17]。依据损伤的边界条件: $N = 0$ 时 $D_N = 0$; $N = N_f$ 时, $D_N = 1$ (N 表示振次, N_f 表示由于疲劳损伤失去承载能力的振次)。冻风积土发生疲劳损伤的损伤变量 D_N 可表示为^[18]

$$D_N = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{1+\alpha}}, \quad (22)$$

式中, α 为与温度、围压和频率有关的疲劳损伤参数。

由于对冻风积土试样进行的循环加载试验采用的是应变控制模式, 根据损伤力学相关理论, 按照实测

的循环应力幅可以计算出相应的疲劳损伤变量 D_N 。对式 (22) 两边取对数可得

$$\ln(1 - D_N) = \frac{1}{1 + \alpha} \cdot \ln\left(1 - \frac{N}{N_f}\right)。 \quad (23)$$

因此, 参数 α 可由式 (23) 所对应拟合曲线的斜率来确定。损伤模型参数的拟合结果见表 6, 疲劳损伤演化随着循环比 N/N_f 的变化规律如图 8 所示。

表 6 参数拟合结果

Table 6 Fitting results of parameters

试验编号	控制要素	$N_f / 10^3$	α	R^2
1	-2°C	1.857	0.3633	0.977
2	-5°C	2.106	0.1165	0.991
3	-10°C	2.571	0.0623	0.991
4	50 kPa	1.845	0.3627	0.987
5	100 kPa	2.251	0.1597	0.996
6	200 kPa	2.764	0.0184	0.991
7	2.0 Hz	1.554	0.3625	0.988
8	4.0 Hz	1.732	0.4243	0.988
9	8.0 Hz	1.876	0.5172	0.993

由图 8 可以看出, 当循环比 N/N_f 较小时, 疲劳损伤发展缓慢; 当 N/N_f 增大时, D_N 表现出损伤加速的形式, 这是不同于塑性损伤的。利用式 (23) 线性

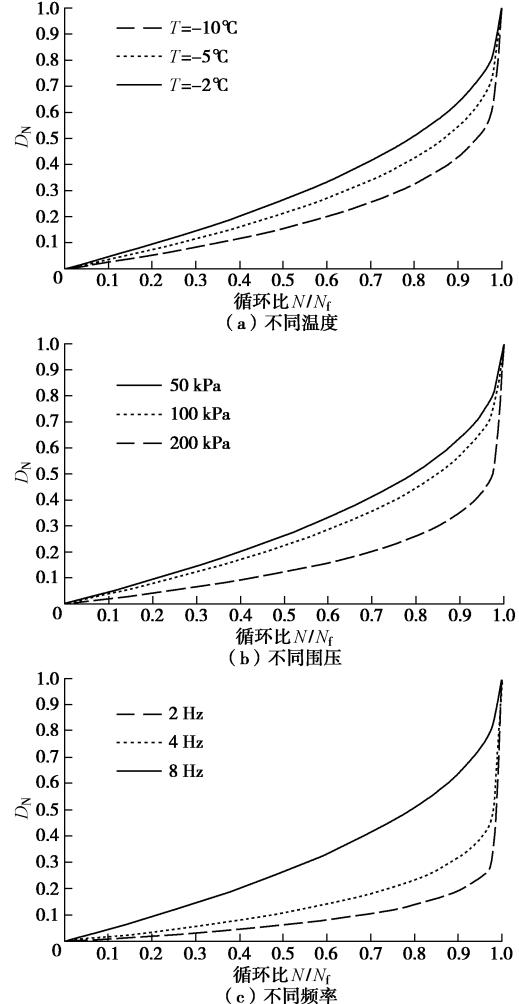


图 8 不同条件下拟合关系图

Fig. 8 Fitting diagram under different conditions

拟合的方法可以较好地确定疲劳损伤参数, 最小的 R^2 为 0.977。其他条件相同情况下, 负温越低, 围压越大及频率越低的时候, 疲劳损伤演化越缓慢。以上 3 种条件相比较, 频率变化对疲劳损伤影响最为显著。

通过降低负温可以增强冻风积土抵抗疲劳破坏的能力。究其原因, 一方面, 负温在其内部形成的负温梯度使得未冻结区的水不断地向冻结区迁移, 使得颗粒形成的骨架更加密实; 另一方面, 随着冰夹层的形成, 提高了松散土体间的黏结强度, 使其整体稳定性能提高, 增强其抵抗疲劳破坏的能力。提高围压可以控制土体发生侧向膨胀的能力, 抑制其因发生较大的体积变形而发生整体失稳破坏。对于受循环加载的冻风积土, 振动频率是必须要考虑的因素, 较大的频率是导致其发生疲劳损伤的最主要原因。

3.3 塑性损伤与疲劳损伤对比

循环加载状态下的冻风积土强度发生的损伤主要包括塑性损伤和循环疲劳损伤。塑性损伤主要是由于在动应力作用下发生的塑性变形不断积累, 造成内部塑性区不断扩大, 影响其继续承载的能力; 反复加载下的冻风积土受到周期性循环荷载作用, 当频率提高时, 易发生疲劳损伤, 失去承载的能力。

在加载初期由于应力幅不断增大, 塑性变形发展比较快, 此阶段发生的损伤主要是塑性损伤, 当循环次数增多时, 疲劳损伤占主导地位。由于冻风积土在进入塑性阶段前要经历弹性变形阶段, 所以塑性损伤存在阈值。然而疲劳损伤从加载开始便逐渐地积累, 随着加载次数增加越来越明显, 因此疲劳损伤不存在阈值。

4 结 论

本文通过对冻风积土开展动三轴试验, 本文利用塑性损伤模型及疲劳损伤模型对试验数据进行分析, 获得了如下 4 点结论。

(1) 采用有效应力分析方法确定的 P 模型参数 M , K 可以使 P 模型较好地描述冻风积土在各条件下循环加载过程中的变形规律及塑性损伤特征。

(2) 造成冻风积土发生强度损伤的主要原因是塑性变形的不断积累, 塑性区范围不断扩大。9 组试验中, 最小阈值 $p_D = 0.51\%$, 最大阈值 $p_D = 0.83\%$ 。

(3) 本文所推导的 P 模型与文献[16]的模型确定的损伤规律具有一致性, 在数值上也比较接近, 用 P 模型来研究冻风积土强度损伤演化规律也是合理的。

(4) 冻风积土在循环加载时发生的疲劳损伤初期发展较慢, 后期发展较快, 是一种加速损伤的形式。加载初期发生的损伤主要是塑性损伤, 循环加载后期

则是以疲劳损伤为主。

参 考 文 献:

- [1] 张向东, 刘功勋, 于 崇, 等. 辽西地区风积土结构特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 691 - 695. (ZHANG Xiang-dong, YU Gong-xun, YU Chong, et al. Testing study on structural character of aeolian soil in western area of Liaoning Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 691 - 695. (in Chinese))
- [2] 孔宪京, 徐 斌, 邹德高, 等.混凝土面板坝面板动力损伤有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1594 - 1600. (KONG Xian-jing, XU Bin, ZOU De-gao, et al. Finite element dynamic analysis for seismic damage of slabs of concrete faced rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1594 - 1600. (in Chinese))
- [3] 蒋明镜, 周 卫, 刘静德, 等. 基于微观力学机制的各向异性结构性砂土的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3347 - 3355. (JIANG Ming-jing, ZHOU Wei, LIU Jing-de, et al. A constitutive model for anisotropic structured sandy soil based on micromechanical mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3347 - 3355. (in Chinese))
- [4] 张 超, 展旭财, 杨春和. 粗粒料强度及变形特性的细观模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2077 - 2083. (ZHANG Chao, ZHAN Xu-cai, YANG Chun-he. Mesoscopic simulation of strength and deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2077 - 2083. (in Chinese))
- [5] LI W T, SUN W, JIANG J Y. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously[J]. Construction Build Mater, 2011, 25(5): 2604 - 2610.
- [6] 刘增利, 张小鹏, 李洪升. 基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 542 - 546. (LIU Zeng-li, ZHANG Xiao-peng, LI Hong-sheng. A damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing[J]. Rock and Mechanics, 2005, 26(4): 542 - 546. (in Chinese))
- [7] YANG Q, THAM L G, SWOBODA G. Micromechanical basis of non-linear phenomenological equations as damage evolution laws[J]. Mechanical Research Communications, 2002, 29: 131 - 136.
- [8] 李兆霞. 损伤力学的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (LI Zhao-xia. Theories and application of damage mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))

- Chinese))
- [9] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. Journal of Engineering Material and Technology, 1985, **107**: 83 - 80.
- [10] HE P, ZHU Y L, CHENG G D. Constitutive model of frozen soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**: 811 - 816.
- [11] HAYAKAWA K, MURAKAMI S, LIU Y. An irreversible thermodynamics theory for elastic-plastic-damage materials[J]. Eur J Mech A/Solids, 1998, **17**(1): 13 - 32.
- [12] 李剑, 陈善雄, 姜领发, 等. 应力历史对重塑红黏土动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(9): 1657 - 1665. (LI Jian, CHEN Shan-xiong, JIANG Ling-fa, et al. Experimental study on influence of stress history on dynamic properties of remolded red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(9): 1657 - 1665. (in Chinese))
- [13] 程学磊, 李顺群, 孙世娟, 等. 围压和负温对冻土强度和微结构的影响研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, **39**(1): 95 - 104. (CHENG Xue-lei, LI Shun-qun, SUN Shi-juan, et al. Effect of confining pressure and negative temperature on strength and microstructure of frozen soil[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2014, **39**(1): 95 - 104. (in Chinese))
- [14] 曹文贵, 张超, 贺敏, 等. 考虑空隙压密阶段特征的岩石应变软化统计损伤模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1754 - 1761. (CAO Wen-gui, ZHANG Chao, HE Min, et al. Statistical damage simulation method of strain softening deformation process for rocks considering characteristics of void compaction stage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1754 - 1761. (in Chinese))
- [15] 关虓, 牛荻涛, 王家滨, 等. 考虑塑性应变及损伤阈值的混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, **35**(6): 777 - 784. (GUAN Xiao, NIU Di-tao, WANG Jia-bin, et al. Study on freeze-thaw damage constitutive model of concrete considering plastic strain and damage threshold[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, **35**(6): 777 - 784. (in Chinese))
- [16] 孙星亮, 汪稔, 胡明鉴. 冻土弹塑性各向异性损伤模型及其损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 119 - 123. (SUN Xing-liang, WANG Ren, HU Ming-jian. An elastoplastic anisotropic damage model for frozen soil and its damage analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 119 - 123. (in Chinese))
- [17] 唐雪松, 郑健龙, 蒋持平. 连续损伤理论与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (TANG Xue-song, ZHENG Jian-long, JIANG Chi-ping. Continuum damage theory and application[M]. Beijing: China Communication Press, 2005. (in Chinese))
- [18] 郑战光, 蔡敢为, 李兆军. 一种新的疲劳损伤演化模型[J]. 工程力学, 2010, **27**(2): 37 - 40. (ZHENG Zhan-guang, CAI Gan-wei, LI Zhao-jun. A new model of fatigue damage evolution[J]. Engineering Mechanics, 2010, **27**(2): 37 - 40. (in Chinese))