

冻结黏土单轴动态加载过程的能量耗散特征

王 博^{1,2}, 姚昌瑞², 张洪乐³, 牛 圳²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 徐州中国矿大岩土工程新技术发展有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为研究动态加载条件下人工冻结黏土的动力学特性, 使用 SHPB 动力学试验系统进行了人工冻结黏土的单轴动态加载试验, 分析了不同加载应变率及温度条件下人工冻结黏土的动强度和初始动弹性模量的变化规律, 并重点讨论了动态加载过程中试样的能量耗散特征. 结果表明: (1) 在单轴动态加载条件下, 人工冻结黏土的动弹性模量、动强度随应变率的增大或温度的降低而增大, 但结果数据在低应变率区有一定波动; (2) 随着试样内部塑性变形和裂纹扩展增加, 试样弹性应变能密度与耗散应变能密度比值逐渐减小, 试样也更容易呈现脆性破坏. 以上结果有助于认识人工冻土的冲击破坏能量特征, 为人工冻土工程设计与施工提供一定的参考.

关键词: 人工冻结黏土; SHPB 试验; 单轴动态加载; 动力学特性; 能量耗散

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0479-06

Energy dissipation characteristics of frozen clay under uniaxial impact loading

WANG Bo^{1,2}, YAO Changrui^{1,2}, ZHANG Hongle³, NIU Zhen²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. CUMT Geotechnical Engineering & New Technology Development Co., Ltd, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to study the dynamic property of artificial frozen clay under impact loadings, a series of uniaxial dynamic compression test of artificial frozen clay are conducted by using the SHPB test device. The dynamic strength and initial elastic modulus of the artificial frozen clay are analyzed, and the related energy dissipation characteristic under impact loading are also discussed emphatically. The results show that: (1) under uniaxial impact loading, the dynamic strength and initial elastic modulus of the artificial frozen clay increase as the strain rate increases and the temperature decreases, but the test data has a certain randomness at low strain rate; (2) with the increase of plastic deformation and crack propagation in the specimen, ratio of elastic strain energy density to dissipation strain energy density decreases gradually, and the specimen is also more prone to brittle failure. The above results are conducive to deeply understanding energy dissipation characteristic of artificial frozen clay under impact loading and provide effective reference for the design and construction of the artificial freezing soil project.

Key words: artificial frozen clay; SHPB test; uniaxial impact loading; dynamic property; energy dissipation

人工冻结法以优越的隔水和抗变形性能, 在地铁等城市地下工程建设中的应用日益广泛^[1-2]. 施工过程中, 人工冻结土体不可避免要受到复杂的动力荷载作用, 研究人工冻结土体的动力性能是人工冻结工程安全和高效施工的重要保障.

目前, 国内外学者针对人工冻土体的动力学

性质已经做了大量试验和理论研究, 在冻土动应力-应变关系、动强度等方面取得了很多研究成果^[3-5]. 何平等^[6]通过饱和冻结粉土进行动单轴压缩试验, 分析了最大应力、应变以及温度对动弹性模量的影响规律. 刘增利等^[7]利用 CT 技术给出了冻土试样单轴动态压缩过程中内部微观结构变

收稿日期: 2020-12-10

修改稿日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51874286); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(FRF-BD-19-004A); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX20_0803)

第一作者: 王 博(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土动力学、冻土工程的研究. E-mail: wangbo1983@cumt.edu.cn

化特征,与岩石弱化不同,冻土的弱化阶段性明显:首先是弹性阶段的微小压密、塑性变形压密;其后是裂隙的出现与汇聚直至破坏。以上成果多采用常规静动力加载装置获得,岩土试样的加载应变率小于 10^2 s^{-1} ,为研究较高加载应变率 ($10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) 条件下的冻土力学性质,许多学者采用霍普金森压杆(SHPB)开展试验。Ma 等^[8]在大量人工冻结黏土 SHPB 试验基础上,分析了人工冻结黏土动态荷载作用下 ($-5 \sim -20^\circ\text{C}$, $260 \sim 1\,470 \text{ s}^{-1}$) 的温度效应和应变率效应。丁育青等^[9]将石英压电晶体技术嵌入到冻土 SHPB 试验中,分析了应变率、含水率对非饱和黏土动态力学性能的影响:非饱和黏土试样的单轴抗压强度随应变率的提升而上升,随含水率的提升而下降。在试验基础上,冻土动力学性质的理论研究方面也取得了显著的成果^[10]。Zhang 等^[11]分析冻土 SHPB 试验结果 ($-3 \sim -28^\circ\text{C}$, $900 \sim 1\,500 \text{ s}^{-1}$),建立了基于 Johnson-Cook 模型的冻土动态本构关系。刘志杰^[12]在不同土颗粒粒径、冻结温度和应变率的 SHPB 试验基础上,基于 Drucker-Prager 屈服准则,引入微孔洞损伤和微裂纹损伤,构建了冲击加载下塑性和损伤耦合的冻土细观本构模型。

由于人工冻土成分、结构的复杂性,加之测试仪器、试验方法等因素影响,目前关于人工冻土动态力学响应的认识仍不充分。研究动态加载下冻土的能量耗散规律,将有助于反映动态荷载作用下冻土的强度与破坏特征^[13]。本文以人工冻结黏土 SHPB 试验为基础,重点从能量耗散角度对人工冻结黏土的动力学强度特征进行分析,研究结果可为实际工程中人工冻土体爆破与机械挖掘等提供一定的参考。

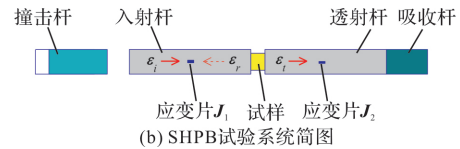
1 冻土单轴动态压缩试验

1.1 SHPB 试验系统与原理

文中试验采用深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的 SHPB 试验系统开展,设备照片及简图如图 1 所示。



(a) SHPB试验系统实物



(b) SHPB试验系统简图

图 1 SHPB 试验系统实物及简图

Fig. 1 Schematic of SHPB test system

试验选用 $\varnothing 37 \text{ mm}$ 的 LC4 超硬铝压杆,撞击杆长度 600 mm,入射杆、透射杆长度 2 000 mm,吸收杆长度为 1 000 mm。为了解决接触面平整度问题^[14],在透射杆与试件接触的一端安装一个万向转头,万向头直径、材料与压杆相同。杆件与支座之间以及压杆与试件之间要保证足够的润滑,以减小摩擦效应。试验时撞击杆以一定初速度撞击入射杆,入射杆会产生一个入射脉冲 ϵ_i ,入射脉冲传到试样时,试样将会发生高速变形并同时产生反射脉冲 ϵ_r 和透射脉冲 ϵ_t 分别进入入射杆和透射杆。入射和反射脉冲由粘贴在入射杆上的应变片 J_1 测定,透射脉冲由粘贴在透射杆上的应变片 J_2 测定。

加载应变率 $\dot{\epsilon}(t)$,试样应变 $\epsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$ 可通过三波法计算公式获得

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{C_0}{l_s} (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_0 E_0}{2A_s} (\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (3)$$

式中: C_0 、 A_0 和 E_0 分别为弹性杆的波速、横截面积和弹性模量; l_s 和 A_s 分别为试样的初始长度和横截面积。

对于人工冻土类低波阻抗材料,也可引入应力均匀性假设,即 $\epsilon_t = \epsilon_i + \epsilon_r$,得到二波法计算公式。

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \epsilon_r \quad (4)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_r dt \quad (5)$$

$$\sigma(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \epsilon_i \quad (6)$$

1.2 土样与制样过程

试验采用重塑的黏土试样,土样的基本物理参数见表 1。冻结黏土试样直径 34 mm,厚度 18 mm,初始含水量 22%。

表 1 土样参数

Tab. 1 Soil parameters

干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	比重	塑限/%	液限/%
1.59	2.74	24.7	57.4

试验中冻结黏土试样的制备过程如下:

(1)首先将天然土样粉碎, 过筛, 剔去杂质后烘干;

(2)按照设计含水量进行土样配制, 均匀搅拌后的土样装入密封袋中静置 24 h;

(3)将上述土样在均分成三份, 分 3 层填装进制样模具, 每层锤击 10 次, 制样完成后称量并记录试件重量;

(4)制作好的试件用保鲜膜包裹紧实后放入低温试验箱中随模具 -15°C 恒温冻结 24 h 后拆模;

(5)拆模后冻土试件继续放入低温试验箱中在试验温度下继续恒温 24 h. 至此, 冻结黏土试样制备完成, 可供 SHPB 试验用.

1.3 试验安排与结果示例

本文共进行了 21 组三种不同温度 (-10°C 、 -5°C 、 -1°C) 和不同加载应变率 ($75\sim 400\text{ s}^{-1}$) 条件下的人工冻结黏土单轴动态压缩试验, 具体的试验加载条件如表 2 所示.

表 2 人工冻结黏土 SHPB 试验结果汇总
Tab. 2 Summary of SHPB tests results

序号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变率/ s^{-1}	动强度/ MPa	动弹模/ MPa
1	-10	75	2.72	1 118
2	-10	100	4.4	1 243
3	-10	125	4.55	1 006
4	-10	150	5.74	1 209
5	-10	175	4.74	826
6	-10	200	6.55	1 005
7	-10	400	9.86	944
8	-5	125	3.33	500
9	-5	150	3.54	577
10	-5	200	3.61	400
11	-5	250	4.97	556
12	-5	300	5.08	748
13	-5	400	6.39	678
14	-1	75	0.78	170
15	-1	100	1.2	186
16	-1	125	1.74	314
17	-1	150	1.73	253
18	-1	200	2.44	261
19	-1	225	3.05	307
20	-1	325	5.23	640
21	-1	350	6.37	636

SHPB 试验获得的原始波形数据示例, 如图 2 所示. 采用前述二波法对获得的原始波形数据进行处理, 可以得到冻结黏土试样的动态应力-应变关系曲线, 如图 3 为加载应变率 100 s^{-1} 条件下试

样的动态应力-应变关系曲线, 该加载条件下试样呈现脆性破坏特征(如图 4 所示), 出现明显的贯穿性裂缝, 破坏后试样块度较大.

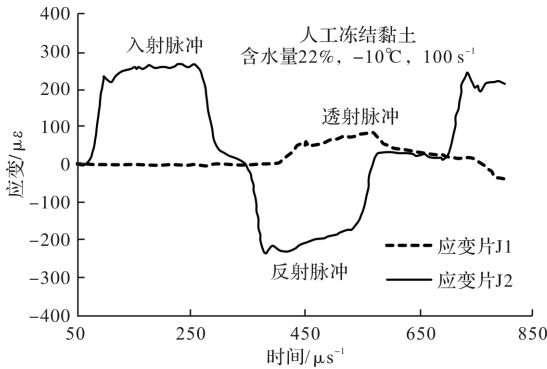


图 2 原始 SHPB 波形曲线

Fig. 2 Original SHPB wave curves

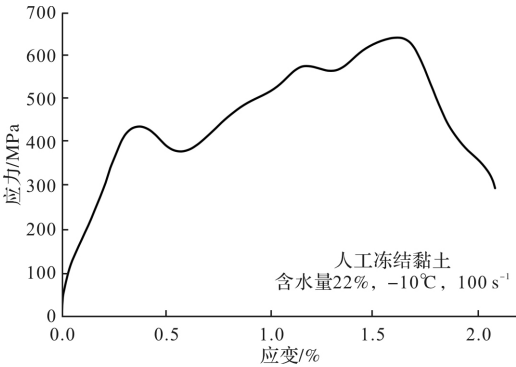


图 3 动态应力-应变关系曲线

Fig. 3 Dynamic stress-strain curve



图 4 加载后试样

Fig. 4 Specimen after test

2 试验结果与分析

如图 5 所示, 试验结果分析中试样动态应力-应变关系特征点的选取标准如下:

- (1)选取试样动应力-应变曲线首次到达的峰值点为动强度 σ_d ;
- (2)初始段斜率为动弹性模量 E_d ;
- (3)首次峰值后, 试样动态应力-应变关系曲线

振荡上升至某一极值后陡降至破坏,选取曲线达到的最大应变为试样破坏应变 ϵ_{\max} 。

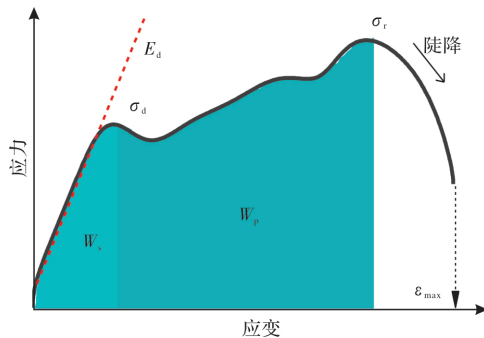


图5 试样动态应力-应变关系曲线特征点

Fig. 5 Characteristic points of dynamic stress-strain curve

2.1 应变率及温度的影响

以下分析由动态应力-应变曲线初始阶段确定的试样动强度和动弹性模量随温度和应变率的变化规律,参见图6和图7。图6为不同温度下人工冻结黏土动强度与应变率关系。可以看出,冻结黏土试样的动强度随应变率的增大而增大,在试验应变率范围内两者基本呈线性相关关系。人工冻结黏土试样的动强度表现出显著的应变率效应。另一方面,在一定加载应变率条件下,人工冻结黏土的动强度又随温度降低而增大,这与人们的一般认识和其他学者的研究结论一致。

与动强度随应变率演化规律不同,图7为冻结黏土试样动弹性模量与应变率关系。整体而言,在低应变率区域,冻结黏土试样的动弹性模量随应变率增加波动明显,随机性较强,此时温度对试样的动弹性模量影响较大。高应变率区域,不同温度条件下试样动弹性模量的差异减小,随应变率增加有汇聚现象,这与高应变率下冻结试样多呈脆性破坏特征有一定关联。马悦等^[14-15]较深入分析了冻土动态应力-应变关系曲线出现的应变汇聚现象,认为加载过程中冻土试样裂纹损伤类型和演化方式直接影响汇聚现象中应力-应变关系曲线的形状,同时温度损伤也是产生应变汇聚现象的重要原因。

可以看出,由于冻土是多相和多成分的复杂体系,其基本成分包括土颗粒、冰、未冻水和气体,冻土的强度由它们的强度及它们之间结合强度所决定。温度越低,冰的强度越大,冰与土颗粒间的胶结能力也越强,冻土的强度越大。另一方面,冻土强度受加载应变率的影响也十分明显。当加载应变率较高时,冻土的各组分共同承担外

荷载,冻土表现出较高的抗力,此时冻土的强度较高;当加载应变率较低时,冻土中会涉及部分冰晶融化及未冻水迁移,将失去部分承担荷载的能力,此时冻土强度较低。

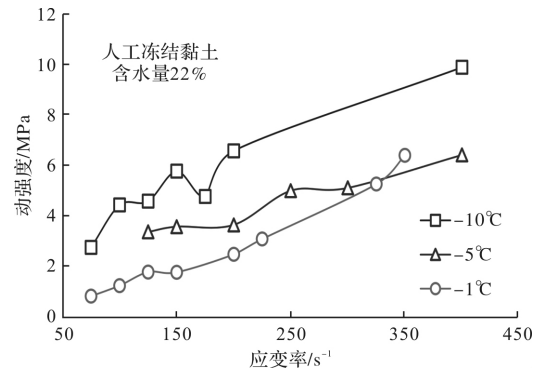


图6 动强度与应变率的关系

Fig. 6 Relations between dynamic strength and strain rate

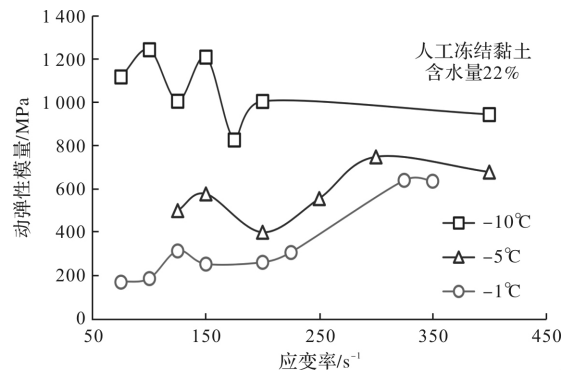


图7 动弹性模量与应变率的关系

Fig. 7 Relations between dynamic elastic modulus and strain rate

2.2 应变能与破坏特征分析

从能量耗散角度分析人工冻结冻土的动态加载特性,有利于反映冻土试样动强度与破坏的本质特征。冻土是典型的非均匀材料,其内部含有很多微裂隙和孔洞。冲击动态加载过程中,微裂隙和孔洞处会产生应力集中,微裂隙或孔洞经历闭合、扩展、贯通,最终冻土破坏。与此同时,冻土内部冰晶和未冻水会随温度和压力条件动态变化,当外界能量传递到冻土内部时,一部分转化为耗散能,引起冻土弹塑性应变,另一部分则转变成热能,使冻土内部冰晶融化,使得加载过程中冻土试样的能量耗散过程尤为复杂。根据试验土工学知识,单轴加载过程中试样的应变能密度为:

$$w_s = \int_0^{\epsilon} \sigma(t) d\epsilon(t) \quad (7)$$

式中: σ 为冻土试样中某点的轴向应力; $d\epsilon$ 为某点在轴向荷载作用下的轴向应变。则冻土试样内部

累积的应变能即为试样应力-应变曲线与应变轴围成的封闭区域的面积。

将人工冻结黏土试样动态加载过程峰值前累积的弹性应变能密度记为 W_s , 峰值后塑性变形和裂纹扩展的耗散应变能密度记为 W_p (参见图5), 统计获得的冻土试样动态单轴加载下的试验结果如图8和图9所示。

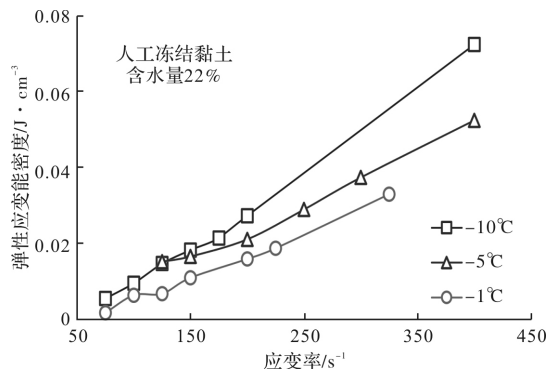


图8 人工冻结黏土试样弹性应变能密度

Fig. 8 Elastic strain energy density of artificial frozen clay

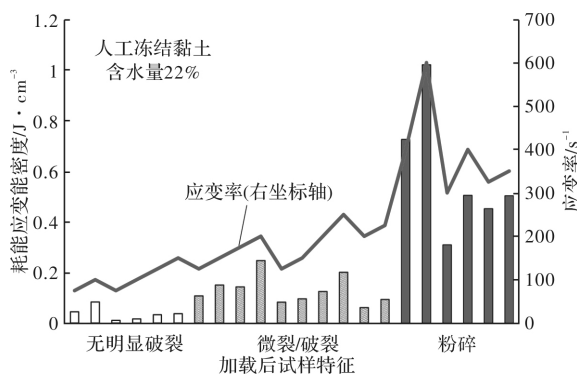


图9 人工冻结黏土试样耗散能密度与破坏特征

Fig. 9 Dissipation energy density and failure characteristics of artificial frozen clay

可以看出, 人工冻结黏土试样的弹性应变能密度随着应变率增加和温度的降低呈增大趋势, 说明冻结黏土试样内部能量耗散具有明显的温度和应变率相关性。随着冻结温度降低和应变率增加, 冻土材料变脆, 冻土试样内部微裂隙增加, 导致其弹性应变能密度增加。冻土的初始温度越低, 其温度上升潜热释放所需吸收的能量也就越多。从加载应变率角度分析, 加载应变率增大会引起冻土试样内部微裂纹增多, 试样内部裂纹扩展所需能量增加; 加载应变率增加还会导致冻土试样中冰晶升温甚至相变, 使冻土试样弹性应变能密度随加载应变率呈正相关关系。进一步地, 统计的冻土试样耗散能密度、加载应变率与试样的破坏特征关系汇总于图9。试样耗散应变能密度

随加载应变率的增加呈的增大趋势, 且与人工冻结黏土试样的破坏特征逐渐从无明显破裂至粉碎破坏特征转变相一致。由此说明, 试样的能量耗散属性可以很好的反映冻土试样动强度和破坏特征, 开展动态加载条件下的冻土试样能量耗散规律研究, 对于掌握人工冻土的动力学特性具有重要的理论和工程意义。

3 结论

本文开展了不同温度和加载应变率条件下的人工冻结黏土单轴 SHPB 实验, 讨论了冻结黏土试样的动强度、破坏特征及能量耗散规律, 主要结论如下:

(1) 在单轴动态加载条件下, 人工冻结黏土试样的动弹性模量和动强度随着加载应变率增加或冻土温度降低而增大, 冻土呈现动脆性和冻脆性破坏特征;

(2) 能量耗散角度分析可较好反映冻结黏土试样单轴动态加载下的破坏特征。随着试样内部塑性变形和裂纹扩展的增加, 试样耗散应变能密度逐渐减小, 试样的破坏特征也逐渐从无明显破裂向粉碎状态转变。

参考文献 References

- [1] 张婷, 杨平. 人工冻结法在地铁建设中的应用与发展[J]. 森林工程, 2012(6): 76-80.
ZHANG Ting, YANG Ping. The application and development of artificial freezing method in the subway construction[J]. Forest Engineering, 2012(6): 76-80.
- [2] 魏新江, 庄家煌, 丁智, 等. 地核循环荷载作用下冻融土滞回曲线及阻尼比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019(10): 2092-2102.
WEI Xinjiang, ZHUANG Jianghuang, DING Zhi, et al. Research on the characteristics of hysteretic curves and damping ratio of frozen-thawed soils under cyclic subway loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019(10): 2092-2102.
- [3] 马芹永. 人工冻土动态力学特性研究现状及意义[J]. 岩土力学, 2009(S1): 10-14.
MA Qinyong. Research status of dynamic properties of artificial frozen soil and its significance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S1): 10-14.
- [4] 齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010(1): 137-147.
QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechani-

- cal properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(1):137-147.
- [5] 肖东辉,马巍,赵淑萍,等. 冻土动力学参数研究的成果综述与展望[J]. 冰川冻土, 2015(6):1611-1626.
XIAO Donghui, MA Wei, ZHAO Shuping, et al. Study of the dynamic parameters of frozen soil: achievements and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015(6):1611-1626.
- [6] 何平,朱元林,张家懿,等. 饱和冻结粉土的动弹模与动强度[J]. 冰川冻土, 1993(1):170-174.
HE Ping, ZHU Yuanlin, ZHANG Jiayi, et al. Dynamic elastic modulus and dynamic strength of saturated frozen silt[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993(1):170-174.
- [7] 刘增利,李洪升,朱元林,等. 冻土单轴压缩动态试验研究[J]. 岩土力学, 2002(1):12-16.
LIU Zengli, LI Hongsheng, ZHU Yuanlin, et al. A timely experimental study of uniaxial compression for frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002(1):12-16.
- [8] MA Qinyong. Experimental analysis of dynamic mechanical properties for artificially frozen clay by the split Hopkinson pressure bar[J]. Journal of Applied Mechanics & Technical Physics, 2010(3):448-452.
- [9] 丁育青,汤文辉,徐鑫,等. 单轴压缩下非饱和黏土动态力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2013(9):119-123.
DING Yuqing, TANG Wenhui, XU Xin, et al. Experimental study of dynamic mechanical behaviors of unsaturated clay subjected to uniaxial loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(9):119-123.
- [10] XIE Qijun, ZHU Zhiwu, KANG Guozheng. A dynamic micromechanical constitutive model for frozen soil under impact loading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2016(1):13-21.
- [11] ZHANG Haidong, ZHU Zhiwu, SONG Shuncheng, et al. Dynamic behavior of frozen soil under uniaxial strain and stress conditions[J]. Applied Mathematics and Mechanics(English Edition), 2013(2):229-238.
- [12] 刘志杰. 冲击加载下冻土的细观本构模型研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
LIU Zhijie. Micro-constitutive relations of frozen soil under impact loading[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [13] 马冬冬. 动静组合加载下人工冻土动态力学特性及本构模型研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2018.
MA Dongdong. Study on dynamic mechanical property and constitutive model of artificial frozen soil under coupled static and dynamic load[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [14] 马悦,朱志武,马巍,等. 冻土冲击动态应力-应变曲线特征及汇聚现象分析[J]. 工程力学, 2015(10):52-59.
MA Yue, ZHU Zhiqu, MA Wei, et al. Characteristics of stress-strain curves and convergence phenomenon of frozen soil under dynamic loading[J]. Engineering Mechanics, 2015(10):52-59.
- [15] 时伟,张亮,杨忠年,等. 冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 480-485.
SHI Wei, ZHANG Liang, SHI Zhongnian, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil of artificial preparation under freeze-thaw cycle conditions[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 480-485.

(编辑 桂智刚)