

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.004

## 冻结水泥固化土 SHPB 实验及其冲击变形特性\*

黄建华<sup>1,2</sup>, 李宏<sup>2</sup>, 李龙真<sup>2</sup>, 严耿明<sup>2</sup>, 叶剑波<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福州 350118; 2. 地下工程福建高校重点实验室, 福州 350118)

**摘要:** 为研究冻结水泥土的动态冲击力学性能, 利用分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB), 分析了当水泥掺量为 0%、9% 和 18%, 冻结温度为  $-15^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$  和  $-35^{\circ}\text{C}$ , 冲击气压为 0.20 MPa、0.30 MPa 和 0.40 MPa 时对冻结水泥土破坏特征的影响。试验结果表明: 单轴动力状态下动态应力-应变曲线最多经历压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、应变软化阶段和破坏阶段 5 个阶段; 随着温度的降低以及冲击速度和水泥掺量的增加, 试样黏塑性破坏特征逐渐减弱, 试样破裂形成的碎块数量越来越多, 几何尺寸越来越小, 破碎程度从岩样边缘向中心逐渐加剧; 随着冲击速度的增大, 破坏形态由大裂纹张拉破坏逐渐转变为整体压碎破坏, 表现出明显的应变率效应; 温度越低试样硬度越大、脆性越高, 峰值应力随加载速率增长越明显; 冻结水泥固化土的动态抗压强度与水泥掺量呈正比例关系, 呈现出明显的应力强化特征。

**关键词:** 冻结; 水泥固化土; 水泥掺量; 温度效应; 应变率效应

中图分类号: TD608

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)04-0025-06

## SHPB Experiment and Impact Deformation Characteristics of Frozen Cement Solidified Soil

HUANG Jian-hua<sup>1,2</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, LI Long-zhen<sup>2</sup>, YAN Geng-ming<sup>2</sup>, YE Jian-bo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory in Universities of Underground Engineering, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic impact mechanical properties of frozen cement soil, the split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to analyse the failure characteristics of frozen cement soil while the cement content was 0%, 9% and 18% respectively, the freezing temperature was  $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$  and  $-35^{\circ}\text{C}$  respectively, and the impact pressure was 0.20 MPa, 0.30 MPa and 0.40 MPa. The test results showed that there were five stages in the dynamic stress-strain curve in state of uniaxial dynamic test: compaction stage, elastic stage, plastic stage, strain softening stage and failure stage. With the decrease of temperature and the increase of impact velocity and cement content, the viscoplastic failure characteristics of the sample gradually weakened, the amount of rupture fragments from the crack samples increased, the geometric size became smaller, and the degree of fragmentation gradually increased from the edge to the center of the rock sample. With the increase of impact velocity, the failure mode of samples changed from tensile failure of large crack to integral crushing failure, showing obvious strain rate effect. The lower the temperature of samples was, the greater the hardness and brittleness were, and the more obvious the peak stress increased with the loading rate. The dynamic compressive strength of frozen cement-stabilized soil was proportional to the cement content and showed obvious stress strengthening characteristics.

**Key words:** freezing; cement stabilized soil; cement content; temperature effect; strain rate effect

滨海地区地基内大范围沉积着深厚的软土层,在此地质条件下地铁建设的联络通道工程施工过程,采用水泥搅拌加固等工法经常无法满足工程安全施工条件,因此常在水泥搅拌桩加固基础上再进行人工冻结形成冻结水泥土围护体系,保障工程施工安全。目前上述联合加固方法已在我国工程实践中得到应用<sup>[1-3]</sup>。

实际应用中,冻结水泥固化土常常承受爆破地震波、空气冲击波及列车振动荷载等引起的冲击力作用,因此本文主要研究冻结水泥土冲击破坏的影响因素及其变形演化规律。以往专家主要进行天然或人工冻土冲击破坏影响因素研究,认为动态破坏时最大应力与冲击应变率成正比,与温度成反比<sup>[4]</sup>;冻土破坏强度与振动频率成反比,冻土残余应变与振动幅值成正比<sup>[5,6]</sup>。在变形演化规律方面则认为随着应变率增大,冻土破坏过程从塑性破坏逐渐转变为脆性破坏<sup>[7]</sup>;破坏模式由张应变破坏向压剪破坏转变<sup>[8,9]</sup>;应变收敛是冻土 SHPB 实验过程典型变形特征<sup>[10]</sup>。

上述研究成果为冻土动力特性研究及其工程应用提供了科学基础和依据,研究对象主要集中在原状土冻土,对冻结水泥固化土的动力特性研究尚未发现。因此基于现有成果基础,通过 SHPB 实验研究冻结水泥固化土冲击变形特性,分析不同影响因素下的动力学特征,完善其动力学特性研究成果,为冻结技术推广应用提供理论基础和经验借鉴。

## 1 土样制备与试验设计

### 1.1 试验设备

试验采用实验室的  $\phi 80$  mm 钢质分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 试验系统,主要由发射腔、冲头、

入射杆、透射杆、能量吸收杆和数据采集系统组成。试验开始前首先进行一次空打,检测压杆是否共轴、入射波形是否满足要求,试验时子弹以一定的速度沿轴向冲击入射杆,在入射杆内产生一个弹性压缩应力波(入射波),置于两杆之间的试件在该脉冲作用下发生高速变形,当入射波到达试样时,一部分将反射一个波返回到入射杆中(反射波),另一部分则透过试样透射到透射杆中(透射波),最后由阻尼器吸收。SHPB 杆的弹性模量为 210 GPa,入射杆长 2.4 m,透射杆长 1.2 m,密度为  $7.8 \text{ g/cm}^3$ 。

### 1.2 土样制备

试验淤泥质土样取自福州滨海区域,孔隙比 1.290,天然重度  $16 \text{ g/cm}^3$ ;具体物理指标见表 1。水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,土样制备过程分为 3 步:(1)试验采用的是重塑的土壤,为确保试样加水搅拌前具有均匀的内部结构和恒定的水分含量,将取的原状土样置入温度为  $108^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干 24 h 后取出,边喷洒蒸馏水边搅拌,制成含水率为 25% 的重塑土,水泥含量按干土重的 0%、9% 和 18% 掺入;(2)使用尺寸为  $\phi 70 \text{ mm} \times H 35 \text{ mm}$  的钢质套筒模具,首先将一层薄凡士林涂于套筒内壁,然后用胶带封住套筒一端,称取规定质量的重塑土放于套筒内,分层击实,并用切刀将套筒端突出的土壤削平,然后将击实完成的土样和套筒一起移养护室养护 3~4 d;(3)将养护完成的土样脱模放入低温试验箱中,在  $-15^\circ\text{C}$ 、 $-25^\circ\text{C}$  和  $-35^\circ\text{C}$  的不同温度条件下冷冻 24 h。

### 1.3 试验方案

试验以冻结水泥土的冻结温度、水泥掺量和冲击气压为变量,具体试验方案见表 2。

表 1 淤泥质土物理力学指标统计表

Table 1 Statistical table of physical and mechanical indexes of silty soil

承载力 特征值/kPa	天然重度 /( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 /kPa	内摩擦角/ $^\circ$	含水率/%	孔隙比	液性 指数	压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$
60	16	11.9	4	47.51	1.29	1.18	0.83

## 2 试验结果与分析

### 2.1 SHPB 试验可靠性分析

实验过程规范科学,才能提高实验测试数据的准确性,实验前将入射杆、撞击杆和透射杆的轴线调整在同一直线上,整平样品边缘并涂上适量凡士林来减小摩擦效应对实验的影响,然后将试样夹在透射杆和入射杆之间,并确认试样稳固粘附在杆的端面上,试样与杆端面间无明显空隙,保证试样与两压

收稿日期:2020-07-11

作者简介:黄建华(1969-),男,教授、博士(后),从事岩土与环境、地铁与隧道、地下围护与结构等研究和教学,(E-mail) huangjh@fjut.edu.cn。

通讯作者:李宏(1995-),男,福建工程学院土木工程学院硕士,主要从事岩土与环境、地铁与隧道工程等研究,(E-mail) 836625107@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678153);福州市科技计划项目(2018-G-42);校产学研合作开发基金项目(GY-Z17145)

杆同轴时采集到的典型波形如图1所示。由图1可知透射波几乎平行于x轴,入射波上升段近似平行于y轴,水平段近似平行于x轴,这样的波形特征有利于提高其应力均匀性。

入射杆和透射杆中部贴有应变片,按照一维应力波理论和均匀性假定,采用“二波法”处理公式,得到试件上的应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 、应变 $\epsilon(t)$ 和动态平均应力 $\sigma(t)$ 分别为<sup>[11]</sup>

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{2C_0}{l_s} \dot{\epsilon}_r \quad (1)$$

$$\epsilon(t) = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \dot{\epsilon}_r dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_s} E \dot{\epsilon}_i \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}_i$ 为入射波应变; $\dot{\epsilon}_r$ 为反射波应变; $\dot{\epsilon}_t$ 为透射波应变; $l_s$ 、 $A_s$ 为试样的长度和横截面积; $A$ 、 $E$ 为压杆的横截面积和弹性模量; $C_0$ 为应力波在压杆中的传播速度。

表2 滨海冻结水泥土 SHPB 试验方案统计表

Table 2 Statistics of SHPB test plan for coastal frozen cement soil

冻结温度/°C	冲击气压/MPa			水泥掺量/%		
-15	0.2	0.3	0.4	0	9	18
-25	0.2	0.3	0.4	0	9	18
-35	0.2	0.3	0.4	0	9	18

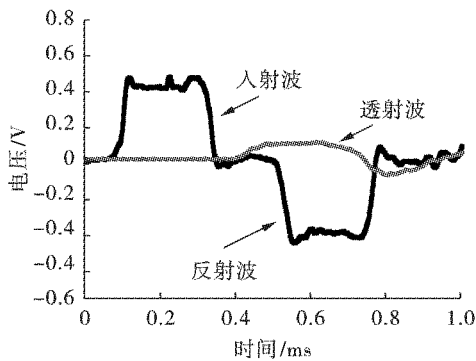


图1 SHPB 试验典型原始波形

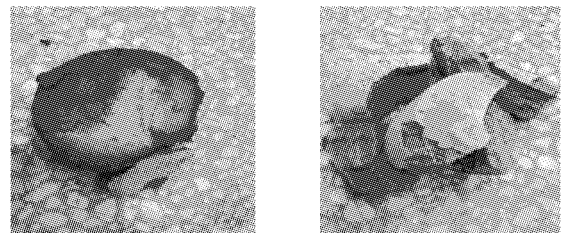
Fig. 1 Typical raw waveform of SHPB test

## 2.2 破碎特征分析

冻结水泥土中液态水的存在形式有自由水和结合水两种,图2(a)中实验冻结温度达 $-15^\circ\text{C}$ ,自由水在 $-5^\circ\text{C}$ 至 $-20^\circ\text{C}$ 时可完全转化成冰,而结合水则仍保持液态形式游离于试样的孔隙当中,这部分结合水称为未冻水。自由水冻结产生的冻胀力为未冻水在孔隙中的游离扩散提供便利,使未冻水渗入到新产生的裂纹中,随着温度的进一步降低,未冻水逐

渐冻结成冰产生冻胀力,再诱发产生新的裂纹,如此循环往复,导致试样内部微裂隙的扩展及新裂隙的萌生,宏观上表现为图2(b)中试样强度的劣化。

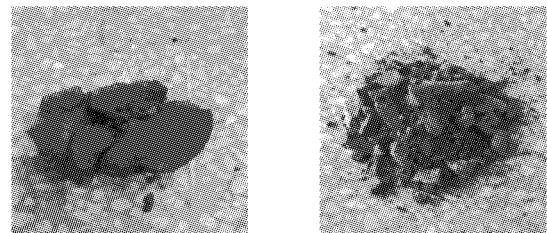
冻结水泥土中随着水泥掺量的增加,如图3(a)中,水泥水化胶结作用增强了内部微裂隙闭合能力,试样破坏程度逐渐降低,碎块破坏几何尺寸由小变大,碎块破坏数量由多变少,破坏形态由整体压碎逐渐向张拉剪切破坏过渡,破碎结构由片状层裂结构和块状碎裂结构逐渐向锥形体劈裂结构发展。



(a)  $W_p=9\%$ ,  $P=0.3\text{ MPa}$ ,  $T=-15^\circ\text{C}$  (b)  $W_p=9\%$ ,  $P=0.3\text{ MPa}$ ,  $T=-35^\circ\text{C}$

图2 不同冻结温度下冻结水泥土的破坏形态

Fig. 2 Deformation of frozen cement soil at different freezing temperatures



(a)  $W_p=18\%$ ,  $P=0.3\text{ MPa}$ ,  $T=-25^\circ\text{C}$  (b)  $W_p=9\%$ ,  $P=0.3\text{ MPa}$ ,  $T=-25^\circ\text{C}$

图3 不同水泥掺量下冻结水泥土的破坏形态

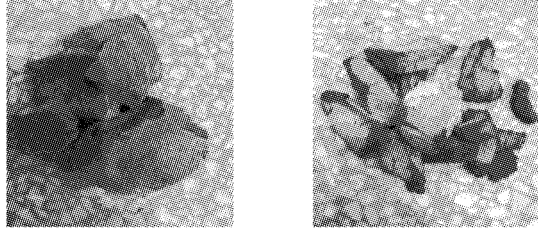
Fig. 3 Failure morphology of frozen cement soil under different cement contents

如图4(a)当冻结水泥土冲击气压较低,冲击速度较小时,动力冲击波仅仅能够激活试样内部较大缺陷处的微裂纹,激活后的微裂纹尖端出现应力集中进一步加速了缺陷的增长演变,随后演变为张拉大裂纹,宏观上表现为试样破碎成若干较大碎块,破裂面平行于压杆轴线,其破坏为裂纹面的张拉破坏。但随着冲击气压的增加,冲击速度的增大,如图4(b),动力冲击波不仅限于激活较大缺陷处延伸扩展速度有限的微裂纹,其他小的缺陷或者亚缺陷处微裂纹来不及阻止就被激活,宏观上破碎区域由外围逐渐向岩样中心扩散,破碎更为明显,试样破裂形成的碎块数量越来越多,几何尺寸越来越小,破碎的形态从块体状到碎末状,属于整体压碎破坏。

## 2.3 动态应力-应变关系分析

取3种不同变量中对应的应力-应变曲线其中的3条,其余的动态应力-应变曲线离散程度类似,

这是材料本身的特殊性和动态实验的特点决定的, 为了避免离散性, 将 3 组平行试验下得到的应力应变曲线数据进行平均, 对平均后数据形成的曲线特征进行分析研究。



(a)  $P=0.2$  MPa,  $T=-25$  °C,  $W_p=18\%$  (b)  $P=0.4$  MPa,  $T=-25$  °C,  $W_p=18\%$

图 4 不同冲击速度下冻结水泥土的破坏形态

Fig. 4 Deformation of frozen cement soil under different impact speeds

### 2.3.1 冲击速度对冲击动力学特性的影响

当  $W_p = 18\%$ ,  $T = -15$  °C, 冲击气压分别为 0.2 MPa、0.3 MPa 和 0.4 MPa 时, 对应的冲击速度分别为 8.55 m/s、13.86 m/s 和 18.44 m/s, 对应的最大应力分别为 6.17 MPa、8.66 MPa 和 9.08 MPa, 最大应变分别为 0.0220、0.0210、0.0150; 冲击速度为 13.86 m/s 和 18.44 m/s 的冻结水泥土峰值应力分别为冲击速度 8.55 m/s 试样的 1.40 倍和 1.47 倍, 增幅分别为 40.35% 和 47.16%。当  $W_p = 18\%$ ,  $T = -25$  °C, 冲击气压分别为 0.2 MPa、0.3 MPa 和 0.4 MPa 时, 对应的冲击速度分别为 8.53 m/s、14.50 m/s 和 18.05 m/s, 对应的最大应力分别为 5.71 MPa、9.13 MPa 和 20.79 MPa, 最大应变分别为 0.0215、0.0231、0.0230。

在  $W_p = 18\%$  和  $T = -15$  °C 的状态下, 冲击速度在 18.44 m/s 时的动态抗压强度分别为 8.55 m/s 的 1.47 倍和 13.86 m/s 的 1.05 倍; 在  $W_p = 18\%$  和  $T = -25$  °C 的状态下, 冲击速度在 18.05 m/s 时的动态抗压强度分别为 8.53 m/s 的 3.64 倍和 14.50 m/s 的 2.28 倍, 由图可知冻结水泥土的峰值

强度随冲击速度即应变率的增大而增加, 表明冻结水泥土有较强的应变率效应。

当  $W_p = 18\%$ ,  $T = -15$  °C 时, 冲击速度 18.44 m/s 的峰值应力是冲击速 8.55 m/s 峰值应力的 1.47 倍, 当  $W_p = 18\%$ ,  $T = -25$  °C 时, 冲击速度 18.05 m/s 的峰值应力是冲击速度 8.53 m/s 峰值应力的 3.64 倍。由于  $T = -25$  °C 时试样冻结温度更低, 硬度显著提高, 表现为试样脆性特征更突出, 峰值应力随加载速率增加而增大的趋势越明显, 此时增大冲击振幅试样破坏更快; 相反  $T = -15$  °C 时试样硬度较小、塑性较强, 随加载速率的增加峰值应力的增长不明显, 此时增加冲击频率试样破坏更快。

当  $W_p = 18\%$ ,  $T = -35$  °C,  $P = 0.3$  MPa 时应力-应变曲线分为 4 个阶段, 分别为压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和应变软化阶段。压密阶段试样内部原有张开性结构面或微裂隙缓慢压密闭合, 宏观上呈现出早期非线性变形, 曲线呈上凹型, 此阶段试样横向膨胀较小, 试样体积随动荷载增大而减小, 此阶段变形对裂隙化试样来说较明显, 而对坚硬少裂隙的试样则不明显; 弹性阶段曲线近似直线型, 反映试样内部孔隙进一步被压密; 随后应力达到屈服点试样进入塑性阶段, 屈服点是试样从弹性变形转为塑形的转折点, 相应于该点的应力为屈服应力, 进入此阶段后冻结水泥土材料发生不可逆的塑性变形, 微裂隙量变的发展引发了试样内部结构质的变化, 破裂结构面不断产生并演化直至试样完全破坏, 伴随着体积应变率的急速增大, 试样宏观变形上由体积压缩转变为扩容; 塑性阶段结束时达到峰值应力, 试样内部结构遭到破坏, 但试样基本保持整体状, 此阶段称为应变软化阶段, 本阶段裂隙发展率增大到峰值, 破坏结构面交错、穿插且彼此联结形成宏观断裂面, 随后试样主要表现为宏观断裂面的块体滑移, 应力应变曲线呈负相关且斜率迅速增大, 但应变不断增加的情况下应力并未降到零, 说明试样仍能保持一定的承载能力。见图 5。

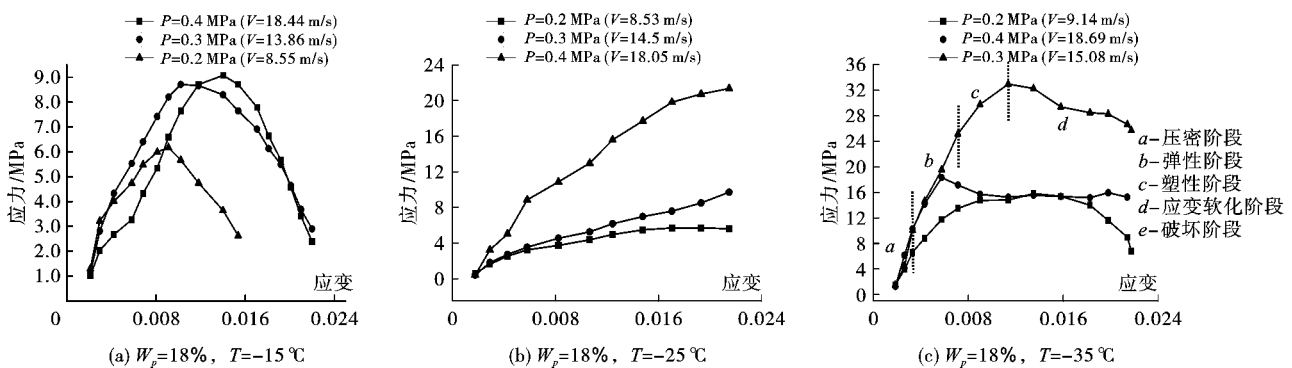


图 5 不同冲击气压下冻结水泥土的轴向应力-应变曲线

Fig. 5 Axial stress-strain curves of frozen cement soil under different impact air pressures

### 2.3.2 冻结温度对冲击动力学特性的影响

当  $W_p = 18\%$ ,  $P = 0.3$  MPa, 冻结温度  $-35^\circ\text{C}$ 、 $-25^\circ\text{C}$  和  $-15^\circ\text{C}$  时, 对应的最大应力分别为 8.73 MPa、24.85 MPa、37.44 MPa, 最大应变分别为 0.0197、0.0197、0.0238。当  $W_p = 9\%$ ,  $P = 0.4$  MPa, 冻结温度  $-35^\circ\text{C}$ 、 $-25^\circ\text{C}$  和  $-15^\circ\text{C}$  时, 对应的最大应力分别为 7.24、19.65、19.95 MPa, 最大应变分别为 0.0219、0.0251、0.0258。当  $W_p = 0\%$ ,  $P = 0.3$  MPa, 冻结温度  $-35^\circ\text{C}$ 、 $-25^\circ\text{C}$  和  $-15^\circ\text{C}$  时, 对应的最大应力分别为 2.03 MPa、5.34 MPa、9.22 MPa, 最大应变分别为 0.0291、0.0286、0.0275。

当  $W_p = 0\%$ ,  $P = 0.3$  MPa,  $T = -15^\circ\text{C}$  时试样动态应力-应变曲线经历弹性阶段、塑形阶段、应变软

化阶段和破坏阶段, 弹性阶段试样初始模量较大, 抗变形能力较强, 塑性阶段内部微裂隙由稳定扩展过度至失稳扩展, 最终在峰值应力点处发生宏观破坏, 随后应力应变曲线经历一段很短的应变软化过程后快速下降, 表明低温状态下水泥土由延脆性向脆性转变。

冻结水泥土是一种非均质的四相复合材料, 由固体颗粒, 液态水, 气体和冰组成, 呈现出明显的各向异性。随着温度的降低试样未冻水含量逐渐减小, 土体内部颗粒之间冻胀力逐渐增大, 水泥水化热反应减弱, 试样峰值应力随温度的降低而逐渐减小, 表现出较强的温度效应, 土样随着温度降低而变脆, 破坏形态由塑性转变为脆性。见图 6。

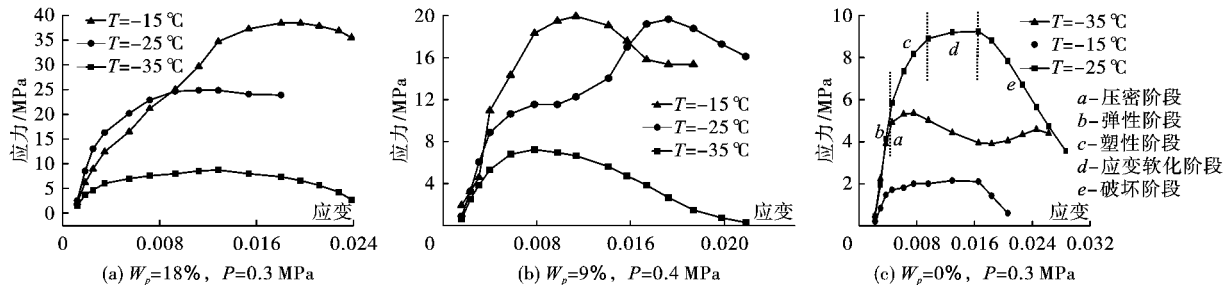


图 6 不同冻结温度下冻结水泥土的轴向应力-应变曲线

Fig. 6 Axial stress-strain curves of frozen cement soil at different freezing temperatures

### 2.3.3 水泥掺量对冲击动力学特性的影响

当  $P = 0.3$  MPa,  $T = -15^\circ\text{C}$ , 水泥掺量分别为 0%、9%、18% 时, 对应的最大应力分别为 4.67 MPa、5.97 MPa、8.69 MPa, 最大应变分别为 0.0272、0.0263、0.0258, 水泥掺量分别为 9% 和 18% 时, 此条件下冻结水泥土的动态应力-应变曲线均可分为弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段; 掺水泥冻结土试样的动态抗压强度均高于不掺水泥的冻结土试样, 呈现出明显的应力强化特征, 土样动态抗压强度随着水泥掺量的增加而增大; 但是最终的压缩应变不会随水泥掺量的增加而变化, 并且不同水泥掺量的应力-应变曲线都显示出明显的应变汇聚现象。

当  $P = 0.4$  MPa,  $T = -25^\circ\text{C}$ , 水泥掺量分别为 0%、9%、18% 时, 对应的最大应力分别为 8.69 MPa、15.63 MPa、18.47 MPa, 最大应变分别为 0.0104、0.0186、0.0234, 水泥掺量为 9% 和 18% 的冻结水泥土最大应力分别为水泥掺量为 0% 的 1.8 倍和 2.12 倍, 增幅分别为 79.86% 和 112.54%。当  $P = 0.3$  MPa,  $T = -35^\circ\text{C}$ , 水泥掺量分别为 0%、9%、18% 时, 对应的最大应力分别为 13.69 MPa、20.27 MPa、31.41 MPa, 最大应变分别为 0.0182、0.0165、0.0180, 水泥掺量为 9% 和 18% 的冻结水泥土最大应力分别为水泥掺量为 0% 的 1.49 倍和

2.29 倍, 增幅分别为 48.06% 和 129.43%。这是因为水泥、水及土中矿物质发生一系列物理化学反应生成的胶结体填充了土样微裂隙, 土体骨架间的咬契力和摩擦力增大, 冻结水泥土试样在动荷载下的抗变形能力增强, 试样峰值强度增大。见图 7。

## 3 结论

通过冻结水泥固化土 SHPB 冲击力学实验及其各项实验结果指标分析, 重点研究冻结水泥土动态破坏影响因素与变形演化规律, 得到如下结论:

(1) 随着温度降低、冲击速度和水泥掺量增加, 冻结水泥土黏塑性破坏特征逐渐减弱, 破坏形态由张拉剪切破坏逐渐向整体压碎过渡, 破碎结构由锥形劈裂结构逐渐向片状层裂结构和块状碎裂结构发展。

(2) 在冻结温度和水泥掺量确定的情况下, 随着冲击速度增加, 冻结水泥土破坏峰值应力逐渐增大, 且温度越低冻结水泥土硬度越大、脆性越高, 峰值应力随加载速率增长越明显。

(3) 在冲击速度和水泥掺量一定时, 冻结水泥土随着温度的降低, 破坏状态由塑性破坏逐渐向脆性破坏转变, 其峰值应力也随温度降低而逐渐减小, 表现出较强的温度效应。

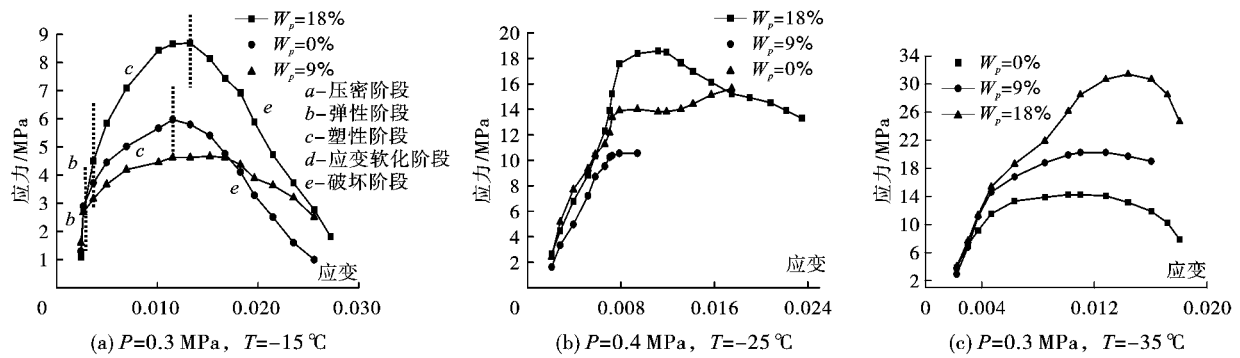


图7 不同水泥掺量下冻结水泥土的轴向应力-应变曲线

Fig. 7 Axial stress-strain curves of frozen cement soil under different cement contents

(4) 当冲击速度和冻结温度确定时,冻结水泥土的破坏强度均高于原状土冻土,且破坏强度与水泥掺量成正比例关系,呈现出明显的应力强化特征。

### 参考文献 (References)

- [1] 杨平,余才高,董朝文,等.人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J].岩土力学,2015,24(S2):388-391.
- [1] YANG Ping, SHE Cai-gao, DONG Chao-wen, et al. Application of artificial freezing method in Zhang Fuyuan station of Nanjing subways [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 24(2): 388-391. (in Chinese)
- [2] 王文灿.冻结法和水平注浆在天津地铁盾构接收中的组合应用[J].现代隧道技术,2016,50(3):183-190.
- [2] WANG Wen-can. Application of the freezing and horizontal grouting methods to the shield arrival for the Tianjin Metro [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 50(3): 183-190. (in Chinese)
- [3] 樊文虎,杨平,蒋大有,等.全断面注浆管棚矩形冻结加固技术与实测分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(2):551-558.
- [3] FAN Wen-hu, YANG Ping, JIANG Da-you, et al. Rectangular freezing reinforcement technology of full-face grouting pipe-roof and measuring analysis [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 551-558. (in Chinese)
- [4] 赵淑萍,马巍,焦贵德,等.长期动荷载作用下冻结粉土的变形和强度特征[J].冰川冻土,2013,33(1):144-151.
- [4] ZHAO Shu-ping, MA Wei, JIAO Gui-de, et al. The features of strain and strength of frozen silt under long-time dynamic loading [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 33(1): 144-151. (in Chinese)
- [5] 杜海民,马巍,张淑娟,等.三轴循环加卸载条件下高含冰冻结砂土变形特性试验研究[J].岩土力学,2017,38(6):1675-1681.
- [5] DU Hai-min, MA Wei, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental investigation on deformation characteristics of ice-rich frozen silty sands under triaxial loading-unloading cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1675-1681. (in Chinese)
- [6] 马芹永,张经双,陈文峰,等.人工冻土围压 SHPB 试验与冲击压缩特性分析[J].岩土力学,2014,35(3):637-640.
- [6] MA Qin-yong, ZHANG Jing-shuang, CHEN Wen-feng, et al. Analysis of SHPB test and impact compression in confining pressure for artificial frozen soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 637-640. (in Chinese)
- [7] 郭东明,闫鹏洋,凡龙飞,等.喷层混凝土-围岩组合体波动特性及动力特性研究[J].振动与冲击,2018,37(24):85-91.
- [7] GUO Dong-ming, YAN Peng-yang, FAN Long-fei, et al. study on the stress wave characteristics and dynamic mechanical property of the sprayed concrete-surrounding rock combined body [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(24): 85-91. (in Chinese)
- [8] 刘志强,柳家凯,王博,等.冻结黏土动态力学特性的 SHPB 试验研究[J].岩土工程学报,2017,36(3):409-506.
- [8] LIU Zhi-qiang, LIU Jia-kai, WANG Bo, et al. Dynamic characteristics of frozen clay by using SHPB tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 36(3): 409-506. (in Chinese)
- [9] 马冬冬,马芹永,袁璞,等.主动围压状态下人工冻结砂土 SHPB 试验与分析[J].岩土力学,2017,38(10):2957-2961.
- [9] MA Dong-dong, MA Qin-yong, YUAN Pu, et al. SHPB tests on artificial frozen sand and its analysis under active confining pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2957-2961. (in Chinese)
- [10] ZHANG Hai-dong, ZHU Zhi-wu, SONG Shun-cheng, et al. Dynamic behavior of frozen soil under uniaxial strain and stress conditions [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018, 34(2): 229-238.
- [11] MA Qin-yong. Experimental analyses of dynamic mechanical properties for artificially frozen clay by the split Hopkinson pressure bar [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2018, 51(3): 1-5.