

水泥砂浆固化粉质黏土分离式 Hopkinson 压杆试验与分析

高常辉¹, 马芹永^{*2}

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 淮南 232001)

摘要: 为研究掺砂量(与干土的质量比)对水泥粉质黏土冲击压缩强度及能量吸收特征的影响, 采用 $\Phi 50$ mm 分离式 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验装置对不同掺砂量的水泥粉质黏土进行了 0.4 MPa 冲击气压下的冲击压缩试验。结果表明: 普通水泥粉质黏土(未掺砂)动态应力-应变曲线大致分为弹性阶段、屈服硬化阶段及破坏阶段, 而随着掺砂量的逐渐增加, 水泥砂浆固化粉质黏土动态应力-应变曲线中屈服阶段愈加不明显, 出现了理想的塑性阶段; 水泥砂浆固化粉质黏土的冲击压缩强度随掺砂量的增大而先增大后减小, 在掺砂量为 10% 时达到最大平均动强度 9.56 MPa, 较普通水泥土强度提高 9.79%; 水泥砂浆固化粉质黏土的吸收能随冲击压缩强度的增大而增大, 两者具有较好的指数关系。

关键词: 水泥砂浆固化粉质黏土; 冲击压缩强度; 能量吸收; 掺砂量; SHPB

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)06-1629-07

Analysis of silty clay stabilized by cement mortar based on split Hopkinson pressure bar experiment

GAO Changhui¹, MA Qinyong^{*2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the effects of sand content on dynamic compression strength and energy absorption characteristics of cemented silty clay, dynamic compression tests on cemented silty clay with different sand contents were conducted using $\Phi 50$ mm split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus under 0.4 MPa impact pressure. The results show that the dynamic stress-strain curve of plain cemented silty clay (without sand) can be divided into three stages of elastic deformation, yield-hardening and failure. With the increase of sand content, there is an ideal plastic stage occurring on dynamic stress-strain curve but not obvious for yield stage gradually. In addition, the dynamic compression strength of silty clay stabilized by cement mortar increases firstly and then decreases with the increasing of sand content. The maximum of dynamic compression strength of silty clay stabilized by cement mortar is 9.56 MPa at sand content of 10%, which results in 9.79% increase compared with plain cement-soil. The absorbed energy of silty clay stabilized by cement mortar increases with the increase of dynamic compression strength, which shows an approximate exponential relation.

Keywords: silty clay stabilized by cement mortar; dynamic compression strength; energy absorption; sand content; SHPB

水泥土是指将土、水泥和水按一定比例混合而成的一种工程复合材料^[1], 具有取材容易、施工方

便和价格低廉等优点, 被广泛地应用于软土地基加固工程中^[2-4]。然而, 由于水泥土强度不高, 所形成

收稿日期: 2017-05-23; 录用日期: 2017-07-07; 网络出版时间: 2017-07-27 18:10

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170727.005>

基金项目: 安徽理工大学研究生创新基金(2017CX2020)

通讯作者: 马芹永, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土工程 E-mail: qymaah@126.com

引用格式: 高常辉, 马芹永. 水泥砂浆固化粉质黏土分离式 Hopkinson 压杆试验与分析[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1629-1635.

GAO C H, MA Q Y. Analysis of silty clay stabilized by cement mortar based on split Hopkinson pressure bar experiment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1629-1635 (in Chinese).

的复合地基存在承载力不足、后期变形较大等缺点,也使水泥土在工程应用中受到极大的限制^[5-6]。近年来,国内外许多学者对水泥土的改良开展了大量研究,发现纳米硅粉^[7]、粉煤灰^[8]、纤维^[9-11]和砂料^[12-16]等均能有效提高水泥土的抗压强度,但考虑到经济因素,宜选用价格低廉的掺合料对水泥土进行改良,因此,砂作为掺合料掺入到水泥土中形成的水泥砂浆固化土得到了许多学者的关注,并对其静态特性进行了大量的研究。范晓秋等^[13]和玉海龙等^[14]对不同掺砂量的水泥土进行了无侧限抗压强度试验,发现在水泥土中掺入一定量的砂,可有效提高水泥土强度;曲涛等^[15]通过试验表明,掺砂量为 10% 时,水泥砂浆固化土的强度特性得到最大改善;赫文秀等^[16]对水泥砂浆固化土的增强机制进行分析,认为其强度主要由水泥的水化、硬化反应、砂粒增强作用及其对破坏面的约束作用决定的;Jamshidi 等^[17]进行了水泥砂浆固化土的冻融循环试验,发现冻结温度为-2℃ 的非饱和水泥砂浆固化土具有一定的自愈功能;Kutanaei 等^[18]在砂土中加入水泥后发现,其弹性模量和抗压强度有了显著提高,试样表现出明显的脆性破坏形态。

以上工作为水泥砂浆固化土的研究和应用积累了丰富的经验,然而,关于水泥砂浆固化土的研究大部分集中在准静态条件下,而冲击荷载作用下的动态力学性能研究却鲜有公开报道。工程实践中水泥砂浆固化土不仅承受静荷载作用,还往往承受冲击动荷载作用。据报道,水泥土常应用于简易机场的跑道基层^[19],当飞机以 220 km/h 速度俯冲至地面时,必将对跑道路面及水泥土基层产生剧烈的冲击作用;在已加固的水泥砂浆固化土地基周围进行机械开挖或爆破作业时,也会对水泥砂浆固化土地基产生冲击作用;此外,诸如地震、滑坡等地质灾害及车辆振动等^[20]对水泥砂浆固化土复合地基的影响,都涉及到水泥土材料的动态力学响应,而材料的动态力学特性与其静态特性差异较大^[21],因此,开展水泥砂浆固化土在冲击荷载作用下的动态力学特性研究具有重要的意义。

本文利用安徽理工大学冲击动力学实验室 Φ50 mm 直锥变截面分离式 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验装置,采用 0.4 MPa 冲击气压对不同掺砂量的水泥砂浆固化粉质黏土进行冲击压缩试验,初步探讨了水泥砂浆

固化粉质黏土的冲击压缩强度及能量吸收特征。

1 试样制备与 SHPB 试验方法

1.1 原材料与试样制备

原材料:(1)粉质黏土:取自蚌埠市某工地基坑,土样的基本物理性质指标见表 1,其颗粒级配曲线见图 1;(2)砂:淮河中砂,细度模数 2.36,颗粒级配良好;(3)水泥:P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,产自淮南八公山;(4)水:实验室自来水。

表 1 粉质黏土的基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties of silty clay

Liquid limit/%	Plasticity limit/%	Plasticity index	Optimum moisture content/%	Maximum dry density/(g·cm ⁻³)
35.40	23.82	11.58	22.40	1.69

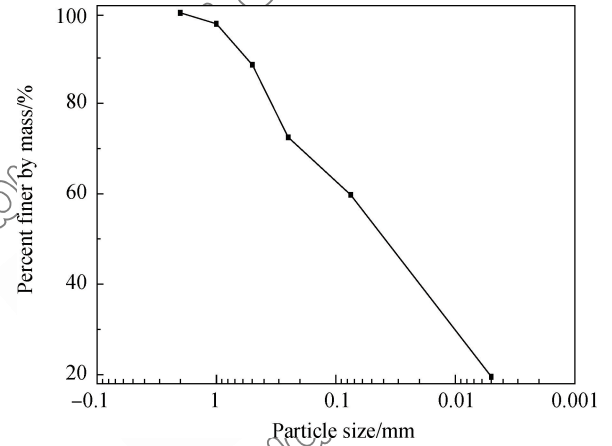


图 1 粉质黏土的颗粒级配曲线
Fig. 1 Grain distribution curve of silty clay

质量比 $m(\text{干土}):m(\text{水泥})=1:0.15$,水灰比为 0.5,掺砂量分别为干土质量的 0%、10%、15% 和 20%。试样尺寸为 Φ50 mm×H25 mm。制备试样时,首先将原状粉质黏土烘干、粉碎并过 2 mm 筛,按最优含水率 22.4% 配制土样,搅拌均匀后置入密封容器内浸润 24 h;然后,将一定质量的土样、水泥和砂搅拌均匀,采用分层击实法制备试样;最后拆模取样,将试样装入自封袋并移至标准养护室养护 28 d,温度(20±2)℃,湿度 95%。

1.2 SHPB 试验方法与数据有效性

水泥土波阻抗相对较低,电阻应变片无法采集到有效数据,故试验时在透射杆上黏贴半导体应变片以采集微弱的透射脉冲,同时在入射杆上黏贴电阻应变片采集入射和反射脉冲,然后通过三波

法^[22]计算出水泥砂浆固化粉质黏土的动力学参数, 如应力、应变和应变率。

SHPB 试验技术是以应力均匀性假设为基础^[23]。试验采集到的原始波形如图 2 所示。可以看出, 原始波形比较光滑, 其入射波上升沿时间约为 130 μs 。试验实测水泥砂浆固化粉质黏土纵波波速为 1 600 m/s, 应力波沿试样轴向一次透射-反射的时间为 31 μs , 可满足应力波在试样轴向产生 4 次透射-反射, 符合应力均匀性条件^[24-25]。因此, 可以满足应力均匀性要求。

恒应变率加载也是 SHPB 试验结果可靠性问题的关键^[26]。图 3 为水泥砂浆固化粉质黏土在 SHPB 试验中的应变率时程曲线。可以看出, 应变率时程曲线中间出现一个平台段, 即在 75~250 μs 加载时间范围内, 可近似实现恒应变率加载。

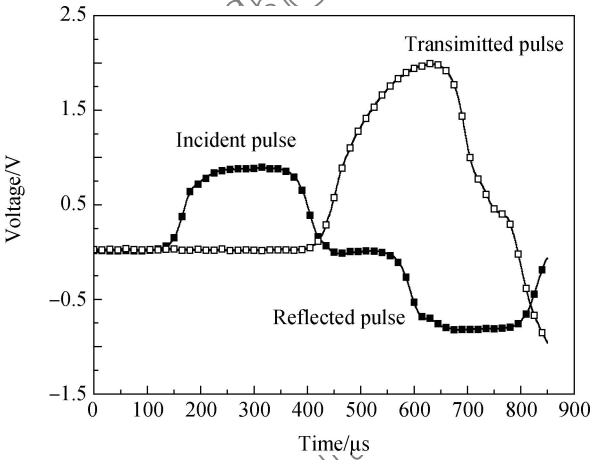


图 2 SHPB 试验原始波形
Fig. 2 Original waveform of SHPB test

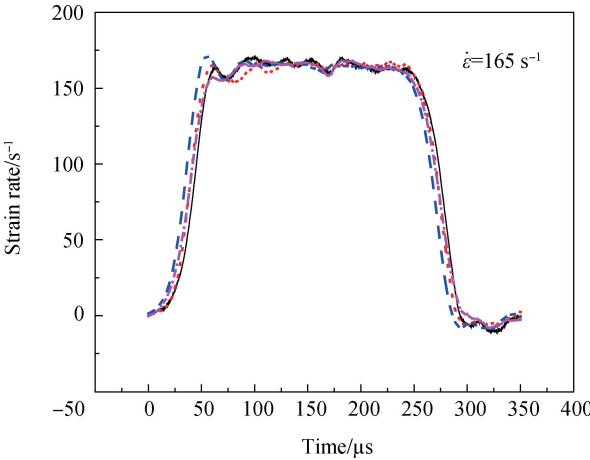


图 3 水泥砂浆固化粉质黏土在 SHPB 试验中的应变率-时程曲线
Fig. 3 Curves of strain rate to time of silty clay stabilized by cement mortar

2 SHPB 试验结果与讨论

2.1 水泥砂浆固化粉质黏土静态抗压试验结果

水泥砂浆固化粉质黏土静态抗压强度试验数据见文献^[27], 不同掺砂量水泥砂浆固化粉质黏土的静态应力-应变曲线见图 4。可以看出, 静态应力-应变曲线存在明显的残余变形阶段, 且掺砂对水泥砂浆固化粉质黏土的静态应力-应变曲线有着显著影响, 在掺砂量 0%~20% 范围内, 随着掺砂量的增大, 对应峰值应力先增大后减小, 在掺砂量为 10% 时, 应力峰值达到最大, 这与曲涛等^[15]试验结果相似; 对应破坏应变同样先增大后减小, 如图 5 所示, 掺砂量为 10% 时破坏应变达到最大值 2.72×10^{-2} 后逐渐减小。

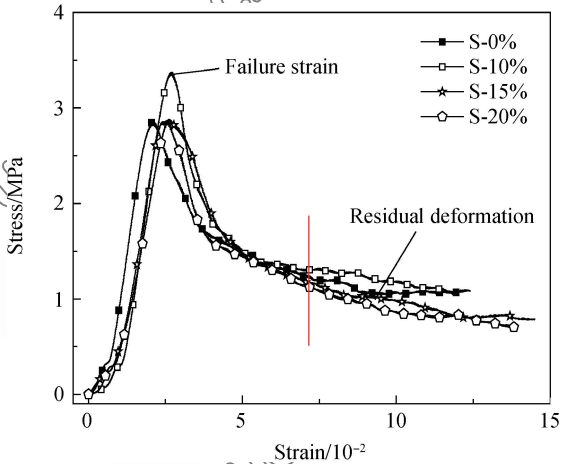


图 4 水泥砂浆固化粉质黏土静态应力-应变曲线
Fig. 4 Static stress-strain curves of silty clay stabilized by cement mortar

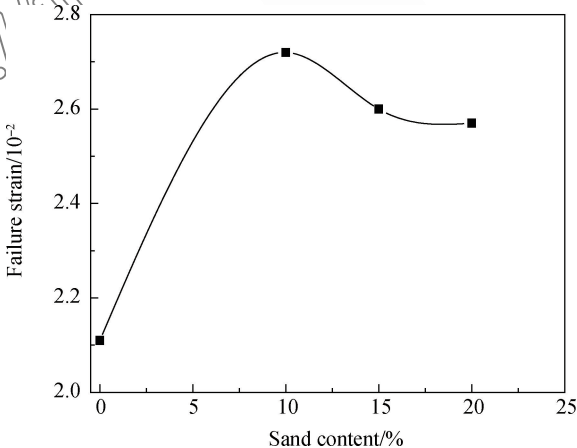


图 5 水泥砂浆固化粉质黏土掺砂量与破坏应变的关系
Fig. 5 Relationship between sand content and failure strain of silty clay stabilized by cement mortar

2.2 水泥砂浆固化粉质黏土破坏形态

冲击压缩试验中，不同掺砂量水泥砂浆固化粉质黏土试样的破坏形态如图 6 所示。可以看出，随着掺砂量的增大，破坏程度逐渐增大，表现为碎块的数目增大，碎块尺度趋于变小，尤其是掺砂量为 20% 的试样，几乎呈现粉碎性破坏。

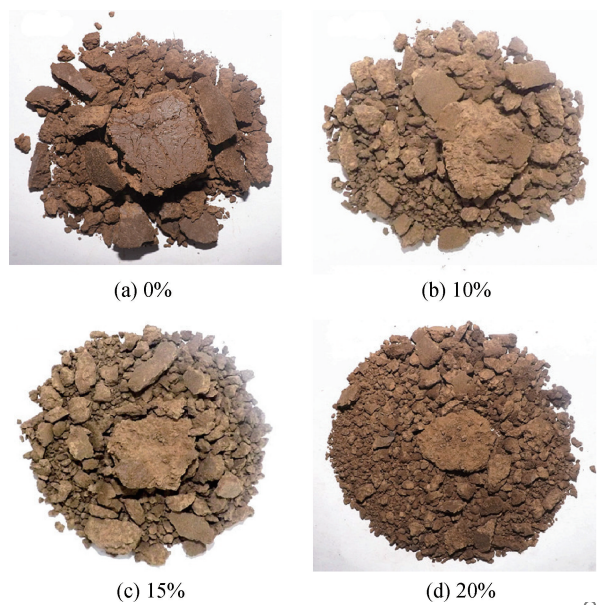


图 6 不同掺砂量的水泥砂浆固化粉质黏土破坏形态
Fig. 6 Failure modes of silty clay stabilized by cement mortar with different sand contents

2.3 水泥砂浆固化粉质黏土动态应力-应变曲线

不同掺砂量下水泥砂浆固化粉质黏土的典型动态应力-应变曲线如图 7 所示。水泥砂浆固化粉质黏土与普通水泥粉质黏土（未掺砂）的动态应力-应变曲线有所差异。普通水泥粉质黏土动态应力-应变曲线大致分为三个阶段：应力随应变近似线性增大的弹性阶段、应力随应变缓慢增长的屈服硬化阶段及应变增加不明显而应力急剧下降的破坏阶段，而随着掺砂量的逐渐增加，水泥砂浆固化粉质黏土动态应力-应变曲线中屈服阶段愈加不明显，出现了理想的塑性阶段，即应力基本保持恒定而应变不断增加。而相比静态应力-应变曲线，动态应力-应变曲线中没有明显的残余变形阶段。这是由于冲击试验时间短暂，水泥砂浆固化粉质黏土试样内部微裂隙来不及进行扩展和变形，只有通过提高应力的途径来抵抗外部荷载，当应力到达极限值后会迅速下降，并无明显的残余强度。

SHPB 试验中水泥砂浆固化粉质黏土的弹性应变和破坏应变与掺砂量的关系如图 8 所示。可以看

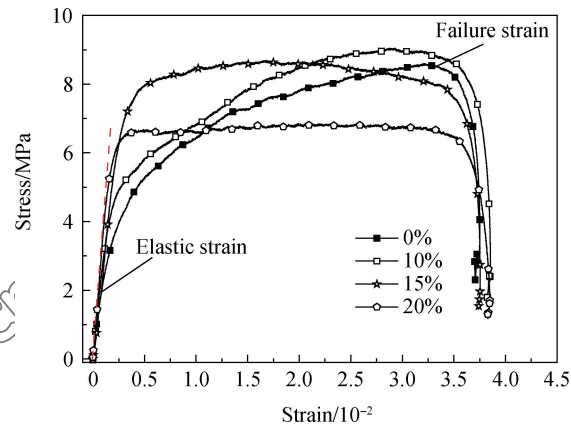


图 7 不同掺砂量下水泥砂浆固化粉质黏土动态应力-应变曲线
Fig. 7 Dynamic stress-strain curves of silty clay stabilized by cement mortar with different sand content

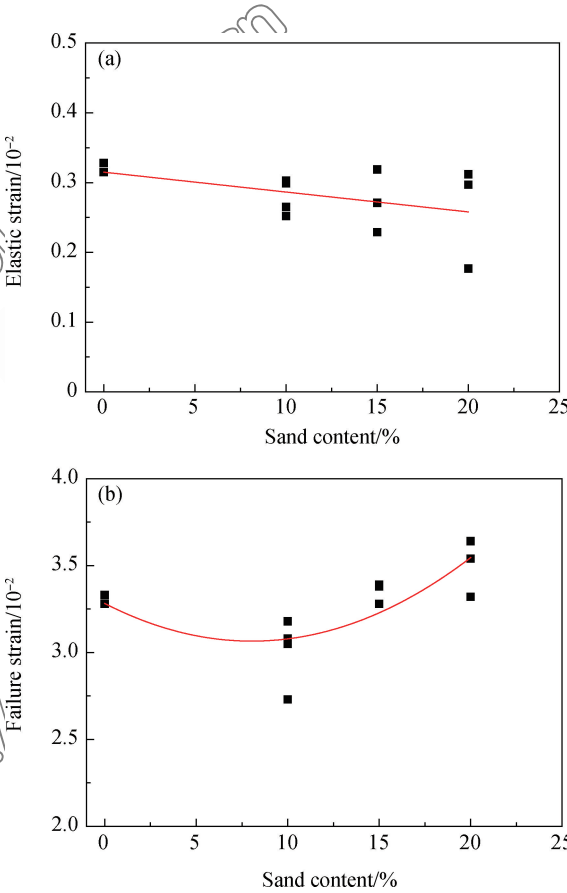


图 8 水泥砂浆固化粉质黏土弹性应变和破坏应变与掺砂量的关系
Fig. 8 Relationship between sand content and elastic and failure strain of silty clay stabilized by cement mortar

出，在掺砂量为 0%~20% 范围内，水泥砂浆固化粉质黏土的动态弹性应变随着掺砂量的增加缓慢下降，其破坏应变先减小后增大，掺砂量在 10% 时，水泥砂浆固化粉质黏土的动态破坏应变达到最低，为 3.01×10^{-2} 。

2.4 水泥砂浆固化粉质黏土冲击压缩强度

图 9 为水泥砂浆固化粉质黏土冲击压缩强度随掺砂量变化的散点图。在掺砂量为 0%~20% 范围内, 随着掺砂量的增大, 水泥砂浆固化粉质黏土冲击压缩强度先增大后减小, 在掺砂量为 10% 时达到最大, 平均动强度为 9.56 MPa, 相比普通水泥粉质黏土动态强度提高了 9.79%; 当掺砂量超过 10% 后, 水泥砂浆固化粉质黏土动态强度出现下降趋势。

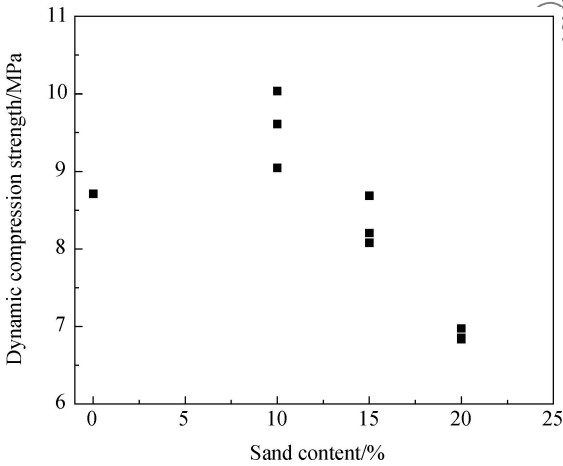


图 9 水泥砂浆固化粉质黏土冲击压缩强度随掺砂量的变化关系
Fig. 9 Relationship between sand content and dynamic compression strength of silty clay stabilized by cement mortar

在普通水泥粉质黏土中掺入 10% 的砂粒, 使粒径大小不一的黏土颗粒、砂和水泥形成了一个混合体, 提高了水泥砂浆固化粉质黏土的整体性, 同时增加了其密实度, 减少了试样内部孔隙; 再者, 砂作为硬粒, 能够有效阻止试样破坏裂纹的相对滑动, 从而提高了水泥砂浆固化粉质黏土的动态强度。然而, 随着掺砂量的进一步增大, 水泥砂浆固化粉质黏土强度出现下降趋势, 这是由于试样内部出现了较多的砂-砂界面, 当试样受到外部冲击作用时, 砂-砂界面容易发生滑移从而导致试样迅速破坏。

2.5 水泥砂浆固化粉质黏土能量吸收特征

由热力学定律可知, 能量转化是物理反应的本质特征, 材料的破坏是能量驱动下的状态失稳现象^[28]。因此, 研究水泥砂浆固化粉质黏土破坏过程中的能量变化机制, 有利于反映水泥砂浆固化粉质黏土动态强度与破坏形态的本质特征。SHPB 试验冲击加载过程中试样的吸收能 W_s ^[29] 计算公式如下:

$$W_s = W_I - W_R - W_T \tag{1}$$

式中: W_I 、 W_R 和 W_T 分别为入射能、反射能和透射能, 可分别由下式计算:

$$W_i = ECA \int_0^2 \epsilon_i^2(t) dt \quad i = I, R, T \tag{2}$$

式中: E 、 C 和 A 分别为压杆的弹性模量、纵波波速和截面面积; $\epsilon_I(t)$ 、 $\epsilon_R(t)$ 和 $\epsilon_T(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波信号。

为分析冲击压缩强度与吸收能的关系, 绘制如图 10 所示冲击压缩强度与吸收能的散点图。可以看出, 随着冲击压缩强度的增大, 水泥砂浆固化粉质黏土吸收能大致呈指数关系增长。分析原因, 水泥砂浆固化粉质黏土试样的吸收能主要用于内部裂纹的扩展和贯通, 在吸收能较低的情况下, 仅有低能量驱动下的那部分裂纹发生扩展和贯通, 试样在其他裂纹扩展之前就已经发生破坏, 故其动态强度较低^[30]; 随着试样吸收能的不断增加, 导致试样变形滞后, 出现动态强度强化效应, 使更多的裂纹参与扩展和贯通, 水泥砂浆固化粉质黏土的冲击压缩强度得到较大提高。

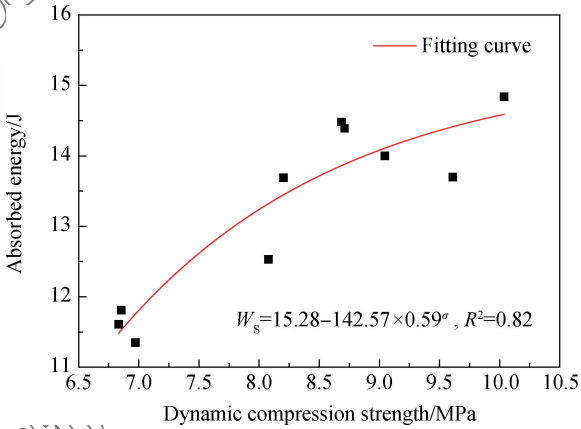


图 10 水泥砂浆固化粉质黏土冲击压缩强度与吸收能的关系
Fig. 10 Relationship between absorbed energy and dynamic compression strength of silty clay stabilized by cement mortar

3 结 论

(1) 普通水泥粉质黏土动态应力-应变曲线大致分为弹性阶段、屈服硬化阶段及破坏阶段, 而随着掺砂量的逐渐增加, 水泥砂浆固化粉质黏土动态应力-应变曲线中屈服阶段愈加不明显, 出现了理想的塑性阶段; 相比静态应力-应变曲线, 水泥砂浆固化粉质黏土的动态应力-应变曲线中没有明显的残余变形阶段;

(2) 水泥砂浆固化粉质黏土的冲击压缩强度在掺砂量为 0%~20% 范围内先增大后减小, 在掺砂量

为 10% 时达到最大, 平均动强度为 9.56 MPa, 相比普通水泥土强度提高 9.79%;

(3) 在掺砂量为 0%~20% 范围内, 水泥砂浆固化粉质黏土的吸收能随其冲击压缩强度的增大而增大, 两者呈现较好的指数关系。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
GONG Xiaonan. Development and prospect of foundation technology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014 (in Chinese).
- [2] SEDIGHI P, SCHWEIGER H F, WEHR W J. Effect of jet-grout columns on the seismic response of layered soil deposits[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 17(3): 04016085.
- [3] XIAO H, LEE F H, LIU Y. Bounding surface cam-clay model with cohesion for cement-admixed clay[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(1): 04016026.
- [4] 宋新江, 徐海波, 周文渊, 等. 水泥土应力-应变特性真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2489-2495.
SONG Xinjiang, XU Haibo, ZHOU Wenyuan, et al. True triaxial test on stress-strain characteristics of cement-soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2489-2495 (in Chinese).
- [5] 唐朝生, 顾凯. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. 土木工程学报, 2011, 44(s1): 5-8.
TANG Chaosheng, GU Kai. Strength behaviour of polypropylene fiber reinforced cement stabilized soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(s1): 5-8 (in Chinese).
- [6] 王文军, 朱向荣, 方鹏飞. 纳米硅粉水泥土固化机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 148-153.
WANG Wenjun, ZHU Xiangrong, FANG Pengfei. Analysis on reinforcement mechanism of nanometer silica fume reinforced cemented clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(1): 148-153 (in Chinese).
- [7] 王立峰, 黄洪勉. 纳米硅水泥土弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 143-146.
WANG Lifeng, HUANG Hongmian. Elastoplastic finite element analysis of nanometer silicon and cement-stabilized soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 143-146 (in Chinese).
- [8] 裴向军, 黄润秋, 靖向党. 活化粉煤灰抑制高矿化度水泥土膨胀的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 370-374.
PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, JING Xiangdang. Study on inhibiting soil-cement expansion with activated fly-ash in high degree of mineralization zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 370-374 (in Chinese).
- [9] 鹿群, 郭少龙, 王闪闪, 等. 纤维水泥土力学性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(s2): 421-426.
LU Qun, GUO Shaolong, WANG Minmin, et al. Experimental study of mechanical properties of fiber cement soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(s2): 421-426 (in Chinese).
- [10] 陈峰. 玄武岩纤维水泥土抗拉性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2016, 33(2): 188-193.
CHEN Feng. Experiment research on tensile strength of basalt fiber cement-soil[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2016, 33(2): 188-193 (in Chinese).
- [11] 吴亚明, 于广云, 赵红平. 废纸浆纤维水泥土力学性能初探[C]. 北京力学学会第 20 届学术年会, 北京: 北京力学学会, 2014.
WU Yaming, YU Guangyun, ZHAO Hongping. Preliminary study on mechanical properties of waste pulp fiber-reinforced cement soil[C]. Proceedings of the 20th Annual Conference of Beijing Society of Mechanics, Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2014 (in Chinese).
- [12] 兰凯, 黄汉盛, 鄢泰宁. 软土型水泥土掺砂试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(5): 113-116.
LAN Kai, HUANG Hansheng, YAN Taining. Laboratory test for cement-stabilized soft soil added with sand[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(5): 113-116 (in Chinese).
- [13] 范晓秋, 洪宝宁, 胡昕, 等. 水泥砂浆固化土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 605-610.
FAN Xiaoqiu, HONG Baoning, HU Xin, et al. Physico-mechanical properties of soils stabilized by cement mortar[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 605-610 (in Chinese).
- [14] 王海龙, 申向东, 王萧萧, 等. 水泥砂浆固化粉质黏土力学性能及微观结构的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(s1): 3264-3269.
WANG Hailong, SHEN Xiangdong, WANG Xiaoxiao, et al. Experimental research of mechanical properties and micro-structure for silty clay stabilized by cement mortar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(s1): 3264-3269 (in Chinese).
- [15] 曲涛, 范晓秋, 刘鑫. 水泥砂浆固化土抗压强度特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 173-179.
QU Tao, FAN Xiaoqiu, LIU Xin. Experimental study of compressive strength properties of soils stabilized by cement mortar[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(2): 173-179 (in Chinese).
- [16] 赫文秀, 申向东. 掺砂水泥土的力学特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(s1): 392-396.
HE Wenxiu, SHEN Xiangdong. Mechanical behavior of soil-sand-cement admixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,

- 32(s1): 392-396 (in Chinese).
- [17] JAMSHIDI R J, LAKE C B, BARNES C L. Examining freeze/thaw cycling and its impact on the hydraulic performance of cement-treated silty sand[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2015, 29(3): 04014014.
- [18] KUTANAEI S S, CHOBBASTI A J. Effects of nanosilica particles and randomly distributed fibers on the ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of cemented sand [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016; 04016230.
- [19] 刘军忠, 翁兴中, 张俊, 等. 简易机场纤维格栅-水泥土基层使用性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1043-1048. LIU Junzhong, WENG Xingzhong, ZHANG Jun, et al. Research on fiber grid-cement soil base performance of airstrip[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(6): 1043-1048 (in Chinese).
- [20] 朱靖塞, 许金余, 白二雷, 等. 复合纳米材料对混凝土动态力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(3): 597-605. ZHU Jingsai, XU Jinyu, BAI Erlei, et al. Effects of composite nanomaterials on dynamic mechanical properties of concretes[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(3): 597-605 (in Chinese).
- [21] 吴金荣, 马芹永. 透水沥青混凝土单轴冲击压缩特性研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(4): 195-199. WU Jinrong, MA Qinyong. Uniaxial impact compressive characteristics of permeable asphalt concrete[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(4): 195-199 (in Chinese).
- [22] 李为民, 许金余, 沈刘军, 等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2): 135-142. LI Weimin, XU Jinyu, SHEN Lijun, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 135-142 (in Chinese).
- [23] 宋力, 胡时胜. SHPB 测试中的均匀性问题及恒应变率[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3): 207-216. SONG Li, HU Shisheng. Stress uniformity and constant strain rate in SHPB test[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(3): 207-216 (in Chinese).
- [24] 王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 17-25. WANG Lili, WANG Yonggang. The important role of stress waves in the study on dynamic constitutive behavior of materials by SHPB[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(1): 17-25 (in Chinese).
- [25] YANG L M, SHIM V P W. An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(2): 129-150.
- [26] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的高应变率力学行为[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(2): 160-164. LI Weimin, XU Jinyu. High-strain-rate mechanical behavior of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2009, 26(2): 160-164 (in Chinese).
- [27] 高常辉, 马芹永. 玄武岩纤维掺砂水泥土压拉强度的试验分析[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(2): 262-266. GAO Changhui, MA Qinyong. Experiment and analysis on performance of compression and tension strength for basalt fiber-sand reinforced cement soil[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(2): 262-266 (in Chinese).
- [28] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3003-3010. XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003-3010 (in Chinese).
- [29] 施劲松, 许金余, 任韦波, 等. 高温后混凝土冲击破碎能耗及分形特征研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(5): 703-710. SHI Jinsong, XU Jinyu, REN Weibo, et al. Research on energy dissipation and fractal characteristics of concrete after exposure to elevated temperatures under impact loading[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 703-710 (in Chinese).
- [30] 刘鑫, 郭连军, 徐振洋. 岩石劈裂拉伸试验的能量耗散分析[J]. *爆破*, 2016, 33(3): 17-22. LIU Xin, GUO Lianjun, XU Zhenyang. Energy dissipation analysis of rock splitting tensile test[J]. *Blasting*, 2016, 33(3): 17-22 (in Chinese).