



· 工程地质灾害 ·

# 水泥固化锌污染黄土力学特性试验研究

陈汉江, 崔素丽, 张登飞, 李世雄, 李治嘉, 辜超颖

(西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

**摘要** 聚焦于重金属污染黄土而劣化的实际工程问题, 探究水泥固化重金属污染黄土的强度、应力-应变特性, 以水泥固化锌离子污染黄土为研究对象, 考虑水泥掺量和养护龄期的影响, 进行无侧限抗压强度的系列试验, 分析其应力-应变曲线、无侧限抗压强度、破坏应变、变形模量的变化规律, 进而构建水泥固化锌离子污染黄土在无侧限条件下的应力-应变本构模型。研究表明, 经水泥固化后的锌离子污染黄土应力-应变曲线为强软化型, 试样呈脆性破坏, 可分为弹性、弹塑性、应力下降、残余稳定4个阶段; 随着养护龄期、水泥掺量的增加, 无侧限抗压强度增大, 破坏应变基本呈现减小趋势; 变形模量与无侧限抗压强度呈现非线性关系; 构建的考虑养护龄期、水泥掺量影响的应力-应变本构模型, 可准确描述水泥固化锌离子污染黄土单轴压力下的变形全过程。

**关键词** 固化; 锌污染黄土; 重金属; 变形模量; 无侧限抗压强度; 应力-应变曲线

**中图分类号:** TU411.6 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2024-01-005

## Mechanical properties of cement treated zinc-contaminated loess

CHEN Hanjiang, CUI Suli, ZHANG Dengfei, LI Shixiong, LI Zhijia, GU Chaoying

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract** A series of studies were carried out to examine the strength and stress-strain characteristics of cement-treated heavy metal-contaminated soil, with an emphasis on the actual engineering issue of heavy metal-contaminated loess and its deterioration. The research focused specifically on cement-treated zinc-contaminated loess, taking into consideration the influence of cement content and curing time. The experiments aimed to analyze the changes in the stress-strain curve, unconfined compressive strength, failure strain, and deformation modulus, and to construct a model of the stress-strain behavior under unconfined conditions. Additionally, a stress-strain model was developed for cement-treated zinc-contaminated loess under no-lateral limit conditions. The study reveals that the stress-strain curve of cement-treated zinc-contaminated loess exhibits strong softening behavior, resulting in brittle specimen damage. The curve can be divided into four stages: elasticity, elastic-plasticity, stress reduction, and residual stability. Furthermore, the study finds that with an increase in curing time and cement content, the unconfined compressive strength improves while the failure strain generally decreases. The deformation modulus shows a non-linear relationship with the unconfined compressive strength. A stress-strain model is constructed to describe the non-linear relationships among curing time, cement content,

收稿日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(42027806, 42372324, 41907233)。

第一作者: 陈汉江, 女, 从事黄土地质灾害防治研究, 202221654@stumail.nwu.edu.cn。

通信作者: 崔素丽, 女, 副教授, 从事固体废弃物处理、特殊土处理研究, cuisli@nwu.edu.cn。

deformation modulus, and unconfined compressive strength accurately. Specifically, the model considers the effects of curing time and cement content on the stress-strain behavior of cement-treated zinc-contaminated loess under uniaxial pressure. Overall, these findings contribute to understanding the strength and stress-strain characteristics of cement-treated zinc-contaminated loess and provide valuable insights for addressing heavy metal contamination in loess engineering applications.

**Keywords** solidification; zinc-contaminated loess; heavy metal; deformation modulus; unconfined compressive strength; stress-strain curve

中国经济建设发展迅速,在化工厂、金属冶炼厂和电镀厂等工业场地,存在着严重的铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)等重金属污染的环境工程地质问题<sup>[1]</sup>。加之,黄土地区工程地质条件差,生态环境脆弱,自然灾害频发<sup>[2]</sup>,重金属污染物随着地表水或地下水的运移而渗入,污染黄土而劣化其工程地质特性<sup>[3]</sup>,对黄土区的生态环境、工程建设和人类健康造成了重大威胁<sup>[4]</sup>。因此,对重金属污染的黄土工程地质特性进行改良,已成为当前环境工程的前沿热点,也是黄土区工程建设亟待解决的实际需求。

目前,对重金属污染土的改良,多是用固化/稳定化技术来改变污染物的形态,抑制其迁移,以切断污染物的扩散途径<sup>[5]</sup>,具有处理快、成本低、工艺简单、适用范围广等优势,成功应用于株洲市霞湾港(排污渠)、上海世博会等地的场地修复。由于水泥性质稳定,原料普遍,既可降低重金属的渗出,又可提高土体强度,是较为普遍的固化剂之一。在水泥固化锌或铅污染土方面,前人研究主要聚焦于水泥养护温度、龄期条件对不同污染物浓度的污染土的改良效果及其加固机理,包括压缩系数<sup>[6]</sup>、无侧限抗压强度<sup>[7-10]</sup>、应力-应变特征<sup>[11-12]</sup>、微观加固机理<sup>[13]</sup>。

在水泥固化其他污染土方面,刘霖等研究发现,水泥固化煤化工废水污染土时,在剪切过程中,经历了典型的弹性—塑性屈服—强化破坏3阶段,呈现典型的脆性破坏<sup>[14]</sup>;李喜林等发现了水泥固化Cr(VI)和Cr(III)的弱化效应<sup>[15]</sup>;邵俐等定量分析了水泥固化镍污染土变形指标破坏应变以及 $E_{50}$ 的变化规律,构建了考虑水泥掺入量、重金属浓度相关的强度预测经验公式<sup>[16]</sup>。

纵观已有研究,学者们重点关注水泥固化重金属污染土破坏时的强度特征及其定量表征,而对于从变形发展到破坏整个过程的定量表征研究尚未进一步开展。

基于此,为探究水泥固化重金属污染土的强

度和变形特性,本研究对水泥固化后的锌离子污染黄土开展了系列无侧限压缩试验,分析不同水泥掺量、养护龄期条件下,水泥固化锌离子污染黄土的应力-应变关系及其破坏形式;评价水泥掺量及养护龄期对土体无侧限抗压强度、破坏应变的影响;探讨变形模量 $E_{50}$ 与无侧限抗压强度之间的关系;结合水泥固化锌离子污染黄土的特点,考虑水泥掺量和养护龄期的影响,构建适于描述水泥固化重金属污染黄土的本构模型。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验土取自西安某工业污染黄土场地的原状黄土,浅棕色,较硬,其主要的物理性质指标见表1。对场地重金属进行监测,发现主要为六水合硝酸锌 $[Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ ;水泥使用的是普通硅酸盐水泥(P·O42.5)(见图1)。

表1 原状黄土基本物理力学指标  
Tab.1 Basic physical and indicators of test soil

| 相对<br>密度<br>/% | 比重   | 塑限<br>/% | 液限<br>/% | 最大干<br>密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 最优含水<br>率/% |
|----------------|------|----------|----------|-------------------------------------|-------------|
| 1.80           | 2.74 | 20.9     | 35.1     | 1.76                                | 17.8        |



图1 试验材料  
Fig.1 Test materials

1.2 试验方案及方法

为考虑水泥掺量对锌污染黄土改良效果的影响,设计锌离子质量为干黄土质量的 0.1%,试验以水泥/干黄土的质量比控制的水泥掺量分别为 3%、6%、9%,标记试验编号为 C3、C6 和 C9。为研究养护龄期对其改良效果的影响,在标准养护条件下(温度 20 ℃、湿度 95%)分别养护 0、7、14、28 d。待试样达到控制的标准后,开展无侧限压缩试验,探讨水泥固化锌污染黄土的力学特性。

将无污染黄土自然风干,碾碎,过 2 mm 筛,取相应配合比的蒸馏水、污染物六水合硝酸锌  $[Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$  及 P·O42.5 水泥,首先将水泥按 3%、6%、9% 的掺量和黄土混合均匀;将重金属盐按相应质量充分溶解于蒸馏水中,再利用喷壶按照设计含水率 17.8% (重金属溶液质量/干黄土质量)向混合物中喷洒重金属溶液。接着,将搅拌均匀后的污染黄土装入塑料袋密封并闷放 24 h,再通过千斤顶压制重塑土样:无侧限抗压强度试样尺寸为直径 50 mm,高 100 mm。每个试样均用聚乙烯薄膜包裹,并在标准养护条件下(温度 20 ℃、湿度 95%)分别养护 0、7、14、28 d。试验流程如图 2 所示。



图 2 试验流程及试验仪器

Fig. 2 Test process and test instrument

将试样分别养护至 0、7、14、28 d 后,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行无侧限压缩试验。试验仪器为 YSH-2 型石灰土无侧限压力仪,控制轴向位移速度为 1 mm/min。

2 结果与分析

2.1 应力-应变及其破坏特征

图 3 为水泥掺量为 0 的锌离子污染黄土的应力-应变曲线及破坏形态。由图 3 可见,未添加水泥的污染黄土试样的应力-应变曲线呈现强软化型,试样发生明显的鼓胀开裂破坏;其应力-应变曲线可分为 4 个阶段:弹性阶段为加载初期 A 点前,轴向应变较小,这一阶段土样较为完整连续,在较小应变下呈刚性,发生弹性变形,故应力-应变曲线接近于直线,试样产生初始微裂隙;非线性上升阶段为峰值 C 点前,试样处于弹塑性变形阶段,固化后的土样孔隙不断压缩,土体变形较大,其中, B 点前,由于试样裂缝的稳定发展,导致应力增加减慢,弹性模量逐渐减小, B 点后,裂缝快速发展,较大应变下应力增长较小,直至峰值点;应力下降段在峰值 C 点后,试样内部结构破坏严重,轴向应力以较快速率减小;残余稳定阶段为 D 点后,随应变增加,应力下降缓慢,这时试样内部的裂缝已然贯通,主要由土样间的摩擦力承受轴向应力。由于未添加水泥,试样颗粒胶结较弱,实验过程中有较多土颗粒散落。

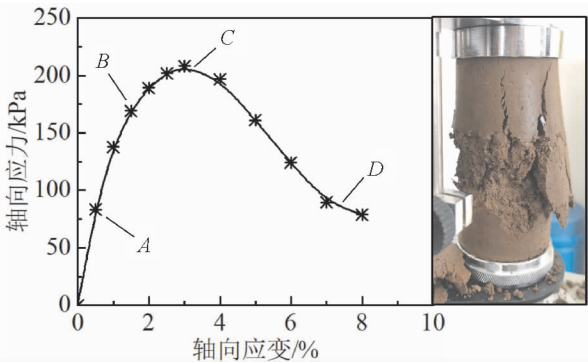


图 3 锌离子污染黄土应力-应变曲线及破坏形态  
Fig. 3 Stress-strain curve and failure pattern of zinc-contaminated loess

图 4 为 0、7、14、28 d 养护龄期下,水泥掺量为 3%、6%、9% 的固化锌离子污染黄土的应力-应变曲线。由图 4 可见,当污染黄土经过水泥固化后,应力-应变曲线由强软化型向脆性强软化型转变,仍然可分为 4 个阶段。相对于未经过固化

的污染黄土,上升段弹性阶段,即 A 点前,水泥固化反应的产物使得土样密实呈刚性,显著提高了土样的弹性模量,峰值弹性模量与其相差较小,故而非线性上升阶段不明显;土体的高弹性模量,使得小应变情况下,应力快速增加至峰值点 C,此时,裂缝已迅速扩展,峰值应力对应的轴向应变明显减小;应力下降段由于裂缝的快速贯通导致应力减小速率增大,多为由峰值应力发生陡降,试样表现为脆性破坏;D 点对应应力随着养护龄期和水泥掺量的增加而减小;残余稳定阶段,即 D 点后,轴向应变增加,土体结构不连续,无摩擦力承受轴向压力,残余应力趋近于 0。水泥固化锌污染黄土的应力-应变曲线的 4 个发展阶段与樊浩伦<sup>[17]</sup>等学者所提出的水泥土应力-应变曲线结论一致。相同养护龄期下,水泥掺量对固化锌离子污染黄土的应力-应变曲线的影响明显,主要体现在弹性阶段,初始弹性模量显著增加,峰值应力增大,破坏应变显著减小,残余强度更小。高养护龄期下(14,28 d),应力-应变曲线的上升段基本处于弹性变形阶段,试样弹性模量很高,峰值应力后,应力陡降至 0,高掺量(C9)时,现象更为明显。

养护龄期 0 d,水泥掺量 3% (0 d C3) 时,应力-应变曲线较快过渡到弹塑性性阶段〔见图 4 (a)],A 点后,试样内部产生微小裂隙,轴向应力增加缓慢;至峰值 C 点时,试样端部产生两条破坏裂纹并交叉汇合,试样强度开始减小;裂缝沿着近似平行于轴向应力的方向扩展,应力-应变曲线缓慢下降,直至裂缝贯通,残余强度接近于 0,试样破坏形态呈现为“Y”型剪切破坏〔见图 5(a)]。

养护龄期 7 d,水泥掺量 9% (7 d C9) 时,应力-应变曲线上升阶段基本呈现为直线,即弹性变形〔见图 4(b)]。接近于峰值 C 点时,试样内部微小裂缝迅速发育,沿单一剪切面发生破坏,试样强度骤降,由于剪切面不光滑,试样仍存在 500 kPa 左右的强度;随着剪切滑移强度逐渐减小,试样破坏形态呈现为单剪切带破坏〔见图 5(b)]。相对于 7 d C9,养护龄期 14 d,水泥掺量 9% (14 d C9),无明显弹塑性变形阶段,达到峰值 C 点时,对应的轴向应变更小,应力更大,仍有单一的剪切带,但破坏角度更大〔见图 5(c)],残余强度接近于 0。

养护龄期 28 d,水泥掺量 3% (28 d C3) 时,轴向应力施加的初期,一直处于弹性阶段,试样未产生裂隙;应力增加,端部摩擦也增大,试样侧面表现为拉应力,向外发生变形,土颗粒剥落,试样

剪切裂隙发育,经历较短的弹塑性变形,轴向应力增加缓慢;达到峰值时,剪切裂缝贯通,土体强度降低,随着土颗粒剥离,试样最终形成锥形破坏的形态〔见图 5(d)]。

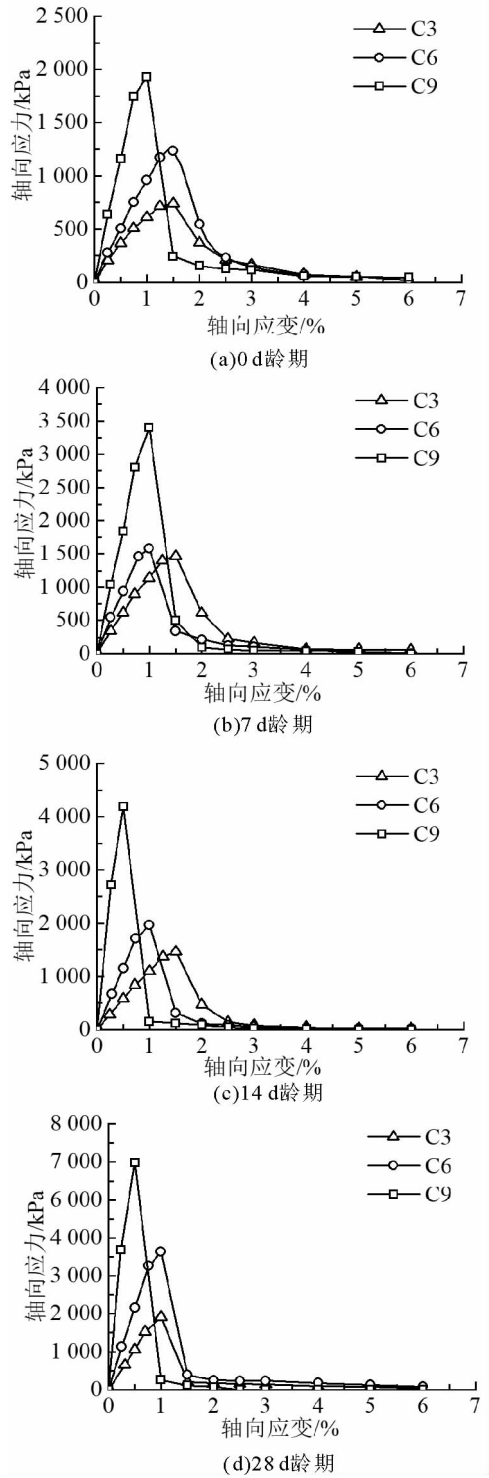


图 4 水泥固化含锌污染黄土应力-应变曲线  
Fig. 4 Stress-strain curves of cement treated zinc-contaminated loess

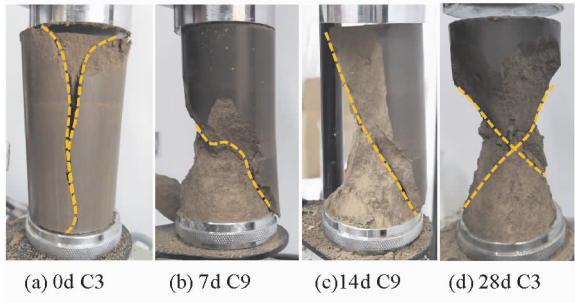


图 5 水泥固化含锌污染黄土单轴压缩破坏形态  
Fig. 5 Uniaxial compression failure patterns of cement-treated zinc-contaminated loess

2.2 无侧限抗压强度与破坏应变

图 6 是不同养护龄期、不同水泥掺量下固化污染黄土的无侧限抗压强度的柱状图。从图 6 可以看出,相对于未固化的污染黄土,掺入水泥后,土体强度得到显著改善。水泥加入到土中后,发生一系列反应,如水化反应、离子交换作用、硬凝反应、碳化反应等。其中,水化反应是决定土体强度的主要因素:水泥组分硅酸三钙( $C_3S$ )、硅酸二钙( $C_2S$ )等生成的大量水合硅酸钙(CSH)胶体,水化产物的比表面积很大,具有极强的吸附能力,能将土颗粒凝聚成块,有效提高土体强度<sup>[18-19]</sup>。综合上述因素,在相同养护龄期下,土样无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加而显著增加,仅养护 0 d,掺量 3%,土样强度就增大 3 倍,可见水泥水化反应迅速;在相同掺量下,随养护龄期的增加,土体无侧限抗压强度增高。低水泥掺量下(C3),无侧限抗压强度受养护龄期影响较小,0~28 d,强度仅提高 2 倍,且均低于 2 000 kPa;高掺量下(C6,C9),无侧限抗压强度提高近 3 倍。

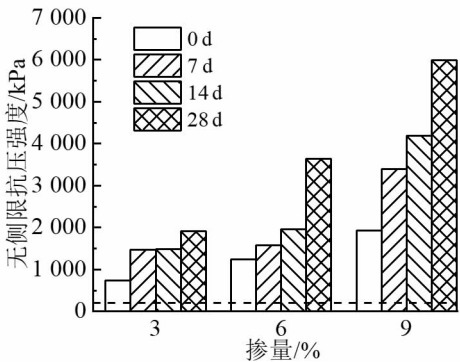
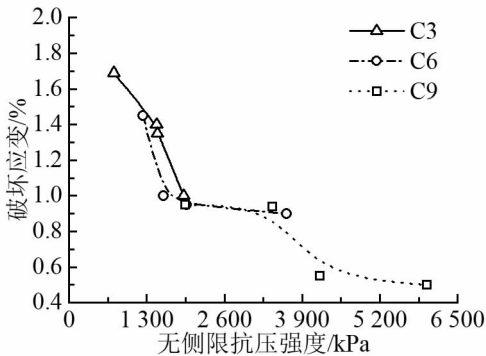


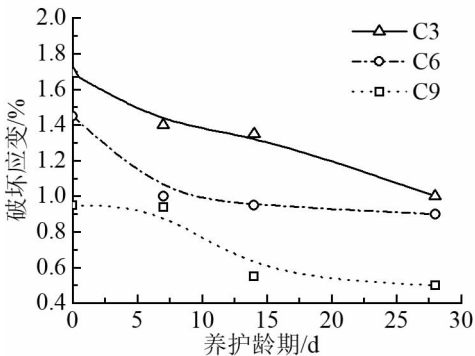
图 6 水泥固化含锌污染黄土无侧限抗压强度  
Fig. 6 Unconfined compressive strength of cement treated zinc-contaminated loess

破坏应变是衡量水泥固化重金属污染黄土变形的重要指标,可以表征土样的脆性或韧性。图

7 为破坏应变与养护龄期以及无侧限抗压强度的关系。由图 7 可知,固化后的污染黄土的破坏应变分布在 0.4%~1.8%。轴向应变基本呈现如下规律:相同掺量条件下,随养护龄期增大而减小;相同养护龄期下,随掺量增大而减小;随着无侧限抗压强度的增大呈现减小的趋势。



(a)破坏应变与无侧限抗压强度的关系



(b)破坏应变与养护龄期的关系

图 7 水泥固化含锌污染黄土破坏应变与强度及龄期的关系

Fig. 7 Relationship between failure strain strength and curing time of cement treated zinc-contaminated loess

2.3 变形模量

2.3.1 水泥掺量和龄期对变形模量的影响

变形模量是无侧限条件下压应力与相应压缩应变的比值,反映材料抵抗弹塑性变形的能力,可用于弹塑性问题的分析计算。由于水泥土材料为非线性变形,变形模量不是一个常数,通常用变形模量  $E_{50}$  (峰值应力的 50% 所对应的割线模量,也称变形系数)来表征材料的变形特性<sup>[11]</sup>。图 8 展示了不同水泥掺量、不同养护龄期下水泥固化含锌污染黄土的变形模量  $E_{50}$  的变化规律:相同的养护龄期下,随着水泥掺量的增加,变形模量增大,在高养护龄期 14,28 d 时,变形模量随养护龄期增幅明显,C9 的  $E_{50}$  大约是 C3 的 4~5 倍;相同水

泥掺量下,  $E_{50}$  随养护龄期的增大而增大。

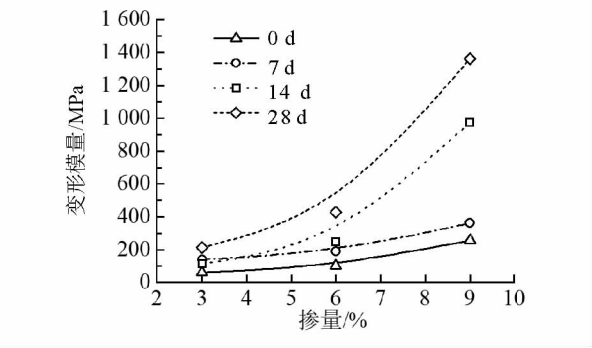


图 8 不同水泥掺量、养护龄期下的  $E_{50}$

Fig. 8  $E_{50}$  under different cement content and curing time

2.3.2 变形模量与无侧限抗压强度的关系

图 9 为不同水泥掺量、不同养护龄期下水泥固化含锌污染黄土变形模量  $E_{50}$  与无侧限抗压强度的关系。由图 9 可知, 其存在非线性关系

$$E_{50} = 40.57q_u^2, R^2 = 0.92。 \tag{1}$$

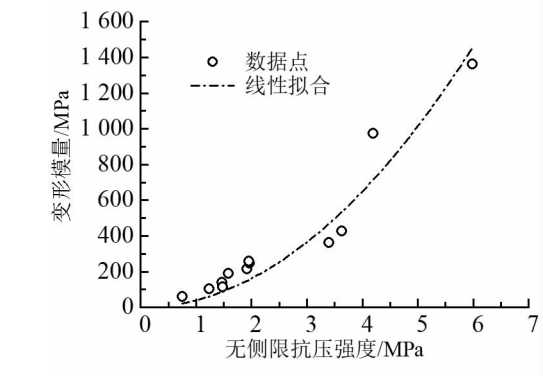


图 9 变形模量  $E_{50}$  与无侧限抗压强度的关系

Fig. 9 The relationship between  $E_{50}$  and unconfined compressive strength

2.4 考虑水泥掺量和养护龄期影响的本构模型构建

2.4.1 模型选择

据上述试验分析, 经水泥固化后的锌离子污染黄土的应力-应变曲线呈现的规律为: 达到峰值强度后, 小应变增量致使应力骤减至很低的峰后强度, 土样具有明显的脆性特征<sup>[20]</sup>, 由此可用如下分段式函数描述:

$$y = \begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{b(x - 1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $y = \sigma/q_u$ ,  $\sigma$  为轴向应力,  $q_u$  为水泥固化污染土的无侧限抗压强度;  $x = \varepsilon/\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon$  为轴向应变,

$\varepsilon_c$  为试样破坏应变。

利用公式 (2) 对试验结果进行拟合 (见图 10), 拟合参数见表 2。由图 10、表 2 可知, 模型对应力应变试验全曲线的拟合程度令人满意。

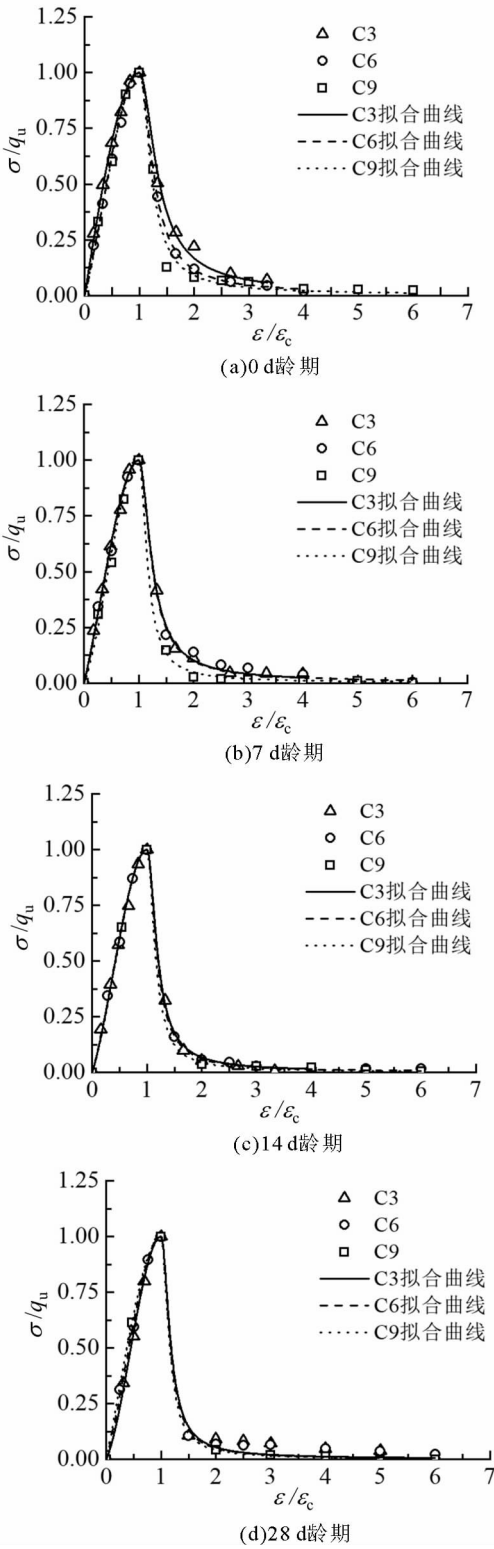


图 10 模型曲线与试验曲线对比

Fig. 10 Comparison of model curve and test curve

表 2 模型拟合参数  
Tab.2 Model fitting parameters

| 掺量/% | 龄期/d | $a$   | $r^2$ | $b$    | $r^2$ |
|------|------|-------|-------|--------|-------|
| 0    | 0    | 2.629 | 0.998 | 1.430  | 0.976 |
|      | 0    | 1.502 | 0.998 | 9.933  | 0.992 |
|      | 7    | 0.966 | 0.997 | 17.427 | 0.999 |
| 3    | 14   | 0.753 | 0.995 | 27.416 | 0.998 |
|      | 28   | 0.409 | 0.999 | 34.618 | 0.987 |
|      | 0    | 0.917 | 0.998 | 15.322 | 1.000 |
| 6    | 7    | 0.737 | 0.999 | 18.268 | 0.995 |
|      | 14   | 0.693 | 0.999 | 30.604 | 0.999 |
|      | 28   | 0.757 | 0.999 | 37.991 | 0.991 |
| 9    | 0    | 0.806 | 0.999 | 32.929 | 0.994 |
|      | 7    | 0.737 | 0.999 | 38.548 | 0.999 |
|      | 14   | 0.950 | 0.999 | 42.303 | 0.999 |
|      | 28   | 0.606 | 0.999 | 45.609 | 0.999 |

2.4.2 模型参数分析

1) 上升段模型参数  $a$ :反映了弹性变形的大小, $a$  值越小,弹性变形占总变形的比例越高。

参数  $n$  表示初始弹性模量与峰值割线模量的比值,当  $x = 0$  时,

$$n = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d(\sigma/q_u)}{d(\varepsilon/\varepsilon_c)} \right|_{x=0} = \frac{E_0}{E_c}, \tag{3}$$

式中, $E_0$  为初始弹性模量, $E_c$  为峰值割线模量。

依据实验所得结果,水泥固化重金属污染黄土参数  $a$  值与参数  $n$ 、水泥掺量  $C$  及养护龄期  $T$  相关,通过回归分析确定参数新的计算式

$$a = 1.585 \frac{E_0}{E_c} + 0.028C - 0.005T - 1.156$$

$R^2 = 0.933。$

拟合效果见图 11。

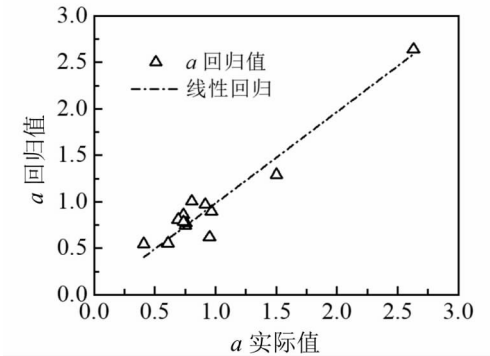


图 11 参数  $a$  拟合效果  
Fig. 11 Fitting effect of parameter  $a$

2) 下降段模型参数:参数  $b$  由强度等级和约

束方式确定。 $b$  反映了材料的峰后变形能力, $b$  值越大,脆性特征越明显。水泥固化重金属污染黄所得试验规律: $b$  值随水泥掺量、养护龄期增大而增大。考虑二者因素对  $b$  值影响,依据试验结果,进行回归分析,得公式

$$b = 2.986C + 0.735T + 2.262,$$

$R^2 = 0.916。$

拟合效果见图 12。

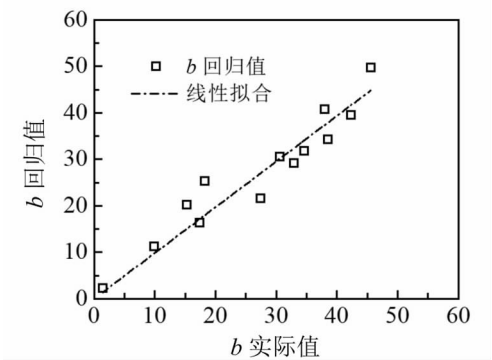


图 12 参数  $b$  拟合效果  
Fig. 12 Fitting effect of parameter  $b$

本模型具有一定的局限性,其仅适用于普通硅酸盐水泥固化后的锌离子污染黄土。

3 结论

1) 未经水泥固化的锌离子污染黄土应力-应变曲线与固化后的应力-应变曲线,均为软化型,均可分为 4 个阶段:弹性阶段、非线性上升阶段

(弹塑性变形阶段)、应力下降段、残余稳定阶段。但是,固化后的应力-应变曲线破坏应变更小,不同水泥掺量、养护龄期,应力-应变曲线形态相似:下降段应力发生骤降,且残余强度接近于 0,土体展现明显的脆性特征;试样的破坏形态分为“Y”型剪切破坏、单剪切带破坏及锥形破坏。

2)随着养护龄期、水泥掺量的增加,无侧限抗压强度增大,破坏应变基本呈现减小趋势,破坏应变也随无侧限抗压强度增大而减小。

3)水泥固化锌离子污染黄土的变形模量随养护龄期、水泥掺量的增大而增大;无侧限抗压强度增大,变形模量也递增,二者呈现非线性关系。

4)构建了考虑水泥掺量、养护龄期影响,描述水泥固化锌离子污染黄土单轴压力下,应力-应变曲线的分段模型,模型参数  $a$  与水泥掺量、养护龄期、以及  $E_0/E_c$  存在线性关系;参数  $b$  值存在随水泥掺量、养护龄期增大而增大的线性经验关系。

## 参考文献

- [1] 查甫生,郝爱玲,许龙,等. 水泥固化重金属污染土的淋滤特性试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(1): 65-70.  
ZHA F S, HAO A L, XU L, et al. Experimental study on leaching characteristics of cement-treated heavy metal contaminated soil[J]. Industrial Construction, 2014, 44(1): 65-70.
- [2] 宁昱铭. 黄土覆盖区土壤重金属污染反演及土壤生态环境评价[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [3] 丁勇,张腾瑜,康帅,等. 水泥固化法处理重金属污染土的强度特性研究[J]. 山西建筑, 2014, 40(4): 201-203.  
DING Y, ZHANG T Y, KANG S, et al. Study on strength characteristics of heavy metal contaminated soil treated by cement curing method[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(4): 201-203.
- [4] HOU Y, ZHANG T Z. Evaluation of major polluting accidents in China-results and perspectives[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2/3): 670-673.
- [5] 郝汉舟,陈同斌,靳孟贵,等. 重金属污染土壤稳定/固化修复技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 816-824.  
HAO H Z, CHEN T B, JIN M G, et al. Research progress on soil stabilization/solidification remediation technology for heavy metal contaminated soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 816-824.
- [6] 戴元志,冯中华,范成文. 水泥固化锌污染土压缩特性影响因素分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 89-93.  
DAI Y Z, FENG Z H, FAN C W. Analysis of influencing factors of compression characteristics of cement-treated zinc-contaminated soil[J]. Journal of Water Resources and Water Transport Engineering, 2020(6): 89-93.
- [7] 陈蕾,刘松玉,杜延军,等. 水泥固化重金属铅污染土的强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1898-1903.  
CHEN L, LIU S Y, DU Y J, et al. Study on strength characteristics of cement-treated heavy metal lead-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1898-1903.
- [8] 魏明刚,杜延军,张帆. 水泥固化/稳定锌污染土的强度和变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 306-312.  
WEI M L, DU Y J, ZHANG F. Experimental study on strength and deformation characteristics of cement-treated/stabilized zinc-contaminated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 306-312.
- [9] 张少华,李熠,寇晓辉,等. 水泥固化锌污染土电阻率与强度特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2899-2906.  
ZHANG S H, LI Y, KOU X H, et al. Study on resistivity and strength characteristics of cement-treated zinc-contaminated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2899-2906.
- [10] 杜盼晓,张宇,魏闻语,等. 水泥固化重金属污染土的强度及环境特性:试验及数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 146-154.  
DU P X, ZHANG Y, WEI W Y, et al. Strength and environmental characteristics of cement-treated heavy metal contaminated soil: Test and numerical simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(21): 146-154.
- [11] 陈蕾,杜延军,刘松玉,等. 水泥固化铅污染土的基本应力-应变特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 715-721.  
CHEN L, DU Y J, LIU S Y, et al. Study on basic stress-strain characteristics of cement-treated lead-contaminated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 715-721.
- [12] 王舒. 磷矿粉-水泥固化 Zn 污染土工程特性试验研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3): 267-272.  
WANG S. Experimental study on soil engineering

- characteristics of phosphate ore powder-cement solidification Zn contaminated soil[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 267-272.
- [13] 杜延军, 蒋宁俊, 王乐, 等. 水泥固化锌污染高岭土强度及微观特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2114-2120.
- DU Y J, JIANG N J, WANG L, et al. Study on strength and microscopic characteristics of cement-treated zinc-contaminated kaolin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 2114-2120.
- [14] 刘霖, 魏中曹, 樊振祥. 水泥固化煤化工废水污染土的应力-应变特性及孔隙结构研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 51-56.
- LIU L, WEI Z C, FAN Z X. Study on stress-strain characteristics and pore structure of contaminated soil in cement-treated coal chemical wastewater[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 51-56.
- [15] 李喜林, 张佳雯, 陈冬琴, 等. 水泥固化铬污染土强度及浸出试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 979-983.
- LI X L, ZHANG J W, CHEN D Q, et al. Experimental study on strength and leaching of chromium-contaminated soil-treated by cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(3): 979-983.
- [16] 邵俐, 刘佳, 丁勇, 等. 水泥固化镍污染土的强度和微观结构特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 75-80.
- SHAO L, LIU J, DING Y, et al. Study on strength and microstructure characteristics of cement-treated nickel-contaminated soil[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(2): 75-80.
- [17] 樊浩伦, 申向东, 周海龙, 等. 水泥固化锌污染红黏土力学特性及强度预测[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 3964-3971.
- FAN H L, SHEN X D, ZHOU H L, et al. Mechanical properties and strength prediction of cement-cured zinc-contaminated red clay[J]. Silicate Bulletin, 2016, 35(12): 3964-3971.
- [18] 查甫生, 许龙, 崔可锐. 水泥固化重金属污染土的强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 652-656.
- CHA F S, XU L, CUI K R. Experimental study on strength characteristics of cement-treated heavy metal contaminated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 652-656.
- [19] 许龙. 重金属污染土的固化修复及长期稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [20] 刘恩龙, 沈珠江. 岩土材料的脆性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(19): 51-55.
- LIU E L, SHEN Z J. Study on brittleness of geotechnical materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(19): 51-55.

(编辑 雷雁林)