**文章编号：**1000－7598－(2008) 08－2199－04

# 固化粉质土应力应变特性试验研究

朱志铎，郝建新，周礼红

（东南大学 交通学院，南京 210096）

**摘　要：**对固化粉质土进行了单轴和三轴应力应变试验，分析了单轴应力-应变曲线和不固结不排水三轴应力-应变曲线的特点，初步探讨了龄期、固化剂掺量及围压对曲线形状的影响。单轴应力应变试验结果表明，固化粉质土后期的强度和变形特性变化较小，随着固化剂掺量的增加，单轴应力-应变曲线形状变化明显。三轴应力应变试验结果表明，随着固化剂掺量的增加，其破坏应变和破坏偏应力均呈现正向增长的态势，曲线在高围压下呈现弱软化型，在较低围压时呈现软化型。

**关　键　词：**粉质土；固化；应力应变；不固结不排水三轴试验

**中图分类号：**TU 411　　**文献标识码：**A

## Experimental study of stress-strain characteristics of stabilized silt

ZHU Zhi-duo,　HAO Jian-xin,　ZHOU Li-hong

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Uniaxial and triaxial tests are performed to study the stress-strain characteristics of the stabilized silt by stabilizing agents. The stress-strain curves of uniaxial and unconsolidated-undrained triaxial tests are analyzed; and the influence of age, mixture ratio, and confining pressures on the shape of curves are discussed. Uniaxial stress-strain test results show that the latter part strength and deformation characteristics of silt change small and with the increase of stabilizer amount, the curve of uniaxial stress-strain changes significantly. Triaxial stress-strain test results show that destruction of strain and stress damage shows a partial positive growth trend with the increase of stabilizer amount. When the curve at high confining pressure it shows weak softening type, when at low confining pressure it shows softening type.

**Key words:** silt; stabilization; stress and strain; unconsolidated-undrained triaxial test

## 1　引　言

土的应力-应变关系是描述荷载作用下其变形与强度特性的基础，也是评价土体变形与强度特性的前提条件。分析固化粉质土的应力应变特性，可为实际工程提供可靠的设计参数。本次采用 3 %，4 %，6 %和 8 %掺量的 SEU－2 型固化剂固化粉质土，进行固化粉质单轴和三轴应力应变试验。土样取自江苏南通，根据击实试验结果，应力应变试验取对应压实度为 95 %的干密度进行制备，成型后饱和，然后进行试验，击实试验结果见表 1。

**表 1　击实试验结果**
**Table 1　Results of compaction test**

| 序号 | 方案 | 最大干密度 /g·cm$^{-3}$ | 最佳含水率 /% | 压实度 95 % 时的干密度 /g·cm$^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 %固化剂掺量的固化粉质土 | 1.674 | 14.2 | 1.590 |
| 2 | 4 %固化剂掺量的固化粉质土 | 1.664 | 14.4 | 1.581 |
| 3 | 6 %固化剂掺量的固化粉质土 | 1.654 | 15.9 | 1.571 |
| 4 | 8 %固化剂掺量的固化粉质土 | 1.652 | 16.1 | 1.570 |

## 2　单轴应力-应变特性

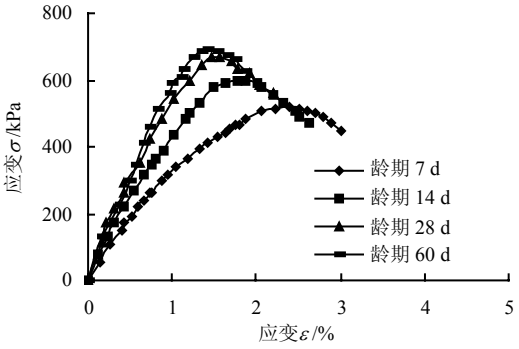
### 2.1　单轴压缩试验结果分析

单轴压缩试验采用改装的 CBR 试验仪，根据荷载及位移变化情况设置量程，进行应力和应变测

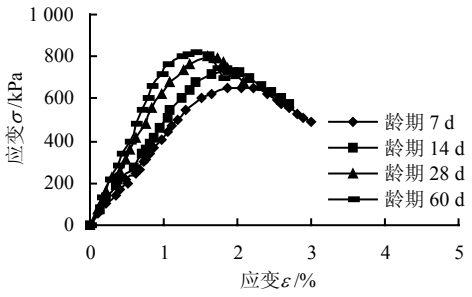
收稿日期：2007-08-10
作者简介：朱志铎，男，1963 年生，副教授，主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: zhuzhiduo63@sohu.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

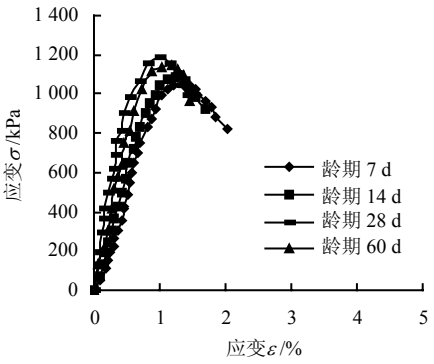
试。试验结果见图 1，不同固化剂掺量的固化粉质土应力-应变曲线基本相似，有明显的峰值应力，应力-应变曲线呈现软化型。该曲线分为 3 个阶段，第一阶段是直线段，初始加载时随着应变增大，对应的应力不断增大，在达到屈服应力之前，应力-应变关系接近于线性关系，说明试样处于弹性变形状态，尚无明显的裂缝出现，原有裂缝被压密，变形可以完全恢复；第二阶段为材料的塑性屈服阶段，随着荷载的增加，试样出现了新的裂缝，原有裂缝也有所发展，土由收缩变为膨胀，此时应变的增长速度大于应力的增长速度，应力-应变关系明显地转为曲线，应力达到峰值；第三阶段是破坏后阶段，应力下降，曲线的坡度变成负值。



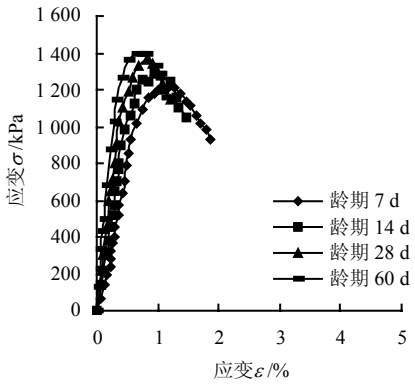

（a）3 % SEU－2 型固化剂掺量




（b）4 % SEU－2 型固化剂掺量




（c）6 % SEU－2 型固化剂掺量




（d）8 % SEU－2 型固化剂掺量

**图 1 粉质土单轴应力-应变曲线**

**Fig.1 Curves of uniaxial stress-strain**

### 2.2 齡期对单轴应力-应变特性影响

随固化剂掺加量的不同，粉质土中生成的水化物结晶程度不同，宏观上表现为应力-应变特性随固化剂掺入比增加而变化，7 d 与 14 d 的破坏应力和破坏应变差异较大，而 28 d 与 60 d 的破坏应力、破坏应变差异较小，说明掺加 SEU－2 型固化剂在后期的强度和变形特性变化较小。以掺加 6 % SEU－2 型固化剂的固化粉质土为例，7，14，28 d 和 60 d 的破坏应力分别为 980，1 090，1 190 kPa 和 1 200 kPa，破坏应变分别为 1.4 %，1.2 %，1.1 % 和 1.0 %左右，可见其前期应力应变变化幅度大，而后期小。

### 2.3 固化剂掺量对单轴应力-应变特性影响

对 SEU－2 不同掺加量 28 d 齡期的应力-应变曲线分析，见图 2。SEU－2 型固化剂掺量为 3 %，4 %，6 %，8 %的 28 d 的应力-应变曲线的曲线类型都呈软化型，但随着固化剂掺加比例的增加，其形状变化明显，弹性阶段的曲线变陡，即初始弹性模量增大，相应的峰值应力也增高，峰态由平缓逐渐变为尖峰状，说明材料脆性增强，破坏应变逐渐减小。

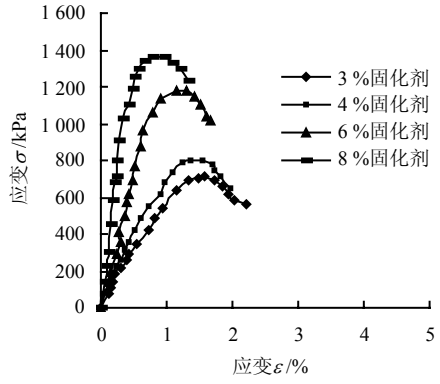



**图 2 28 d 不同固化剂掺量粉质土单轴应力-应变曲线**

**Fig.2 Curves of uniaxial stress-strain (28 d SEU－2)**

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不同固化剂掺量粉质土的破坏应力的差值分别为 140，370 kPa 和 210 kPa，破坏应变差值分别为 0.2 %，0.6 %和 0.4 %，其变化规律一致，峰值应力随固化剂掺量的增加而增加，但并不是呈正比增加，破坏应变也不是呈正比减少，在固化剂掺量 4 %~6 %之间的变化较大，说明在这个比例之间存在最优掺加比。

## 3　固化粉质土的三轴应力-应变特性

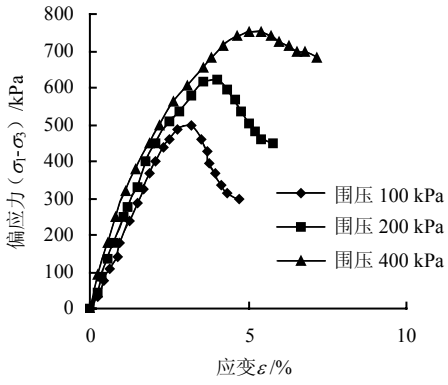
### 3.1　三轴应力应变试验结果分析

固化粉质土三轴压缩试验是研究围压作用下应力-应变特性的变化规律和抗剪强度指标，本次试验中分析了固化剂掺入量等因素对抗剪强度指标的影响以及固化粉质土的破坏基准，其中不固结不排水（UU）试验是模拟固化粉质土在工程应用时受到快速荷载或快速施工中被剪破的情况。UU 试验是采用固化剂掺入比为 3 %，4 %，6 %，8 %和 95 %的压实度和龄期为 7 d 的饱和试样。试验得到的应力-应变曲线如图 3 所示。

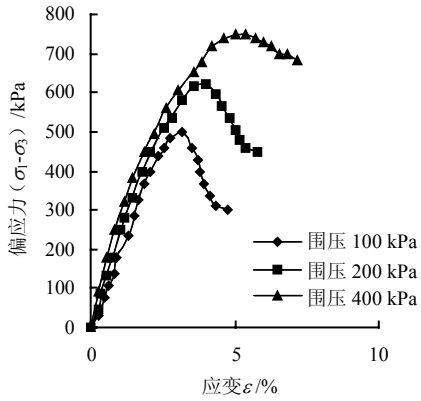
从不同围压、不同固化剂掺量下的固化粉质土三轴应力-应变曲线可以看出，其应力-应变关系是非线性的，尤其在高应力作用下非线性更加明显，这主要是由于固化粉质土内部结构中存在着固化剂生成的凝胶与晶体、未水化的固化剂颗粒、土颗粒游离水分和气泡，这就决定了固化粉质土具有非均质性。在受力开始阶段，应力-应变关系大致接近于直线，该直线段的斜率，即曲线的正切模量，且将随着围压、掺加比不同而不同，随着围压和掺加比的增长，直线段稍微变陡，然后又变缓，即正切模量先有所提高，而后又降低。从试验结果可以看出，固化土土的初始切线模量和正切模量相差不大。图 3 显示，当偏应力达到破坏偏应力值的 80 %左右时，应力-应变曲线开始明显弯曲，且变形增长速率逐渐增大，偏应力增长速率逐渐减小，直至软化而破坏。

### 3.2　围压对三轴应力应变特性的影响

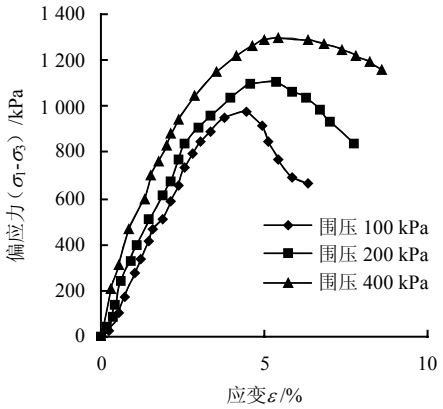
从不同围压下的应力-应变曲线可以看出，尽管固化剂掺加比例不同，但其三轴应力-应变曲线有着相似的特性。围压与初始模量的关系密切，随着围压的增加，初始模量不断增加。随着轴向应变的不断发展，偏应力也在不断增大，呈现较为明显的弹性性质。在较低围压（100 kPa 和 200 kPa）下曲线有明显的峰值，随后随着轴向应变的增加主应力差变化较大，呈现脆性破坏特征，围压为 400 kPa 时曲线也有峰值，不过随着轴向应变的持续发展达



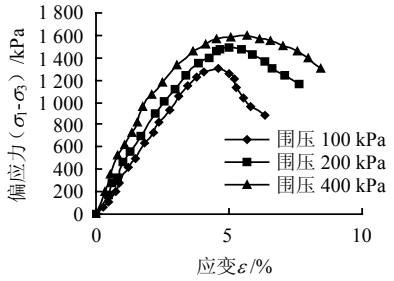

（a）3 %SEU－2 型固化剂掺量




（b）4 %SEU－2 型固化剂掺量




（c）6 %SEU－2 型固化剂掺量




（d）8 %SEU－2 型固化剂掺量

**图 3　粉质土 UU 试验应力-应变曲线**

**Fig.3　Curves of unconsolidated-undrained triaxial stress-strain**

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

到峰值后曲线的主应力差变化不大，有塑性破坏的趋势。当围压为 100 kPa 和 200 kPa 时，应力-应变曲线为应变“软化型”；当围压为 400 kPa 时应力-应变曲线已呈现向硬化发展的趋势，但仍为应变“弱软化型”。

固化粉质土土粒颗粒之间的黏结作用比较强，三轴剪切过程可视为稳定土本身的结构破坏过程。在围压小于屈服强度时，围压越高，破坏应变和破坏偏应力将随之增大。从图 4、图 5 可以看出，同一掺加比在不同围压下破坏应变增加值几乎相等，同一围压下不同掺加比的破坏应变随围压的增加幅度不大；同一围压下随着掺加比的增加破坏偏应力增加非常大，3 %掺加比时的破坏偏应力在 500 ~ 750 kPa 之间，而 8 %的掺加比时的破坏偏应力达到了在 1 300~1 600 kPa 之间，增加程度与围压的增加呈正比关系。

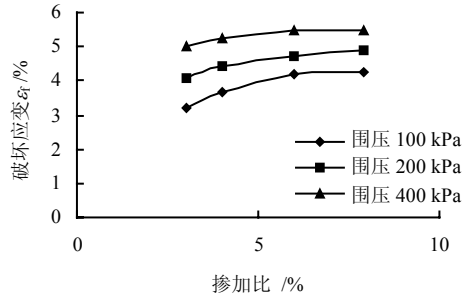



**图 4 破坏应变与 SEU－2 型固化剂掺量关系**
**Fig.4 Relationship between failure strain and the ratio of additive**

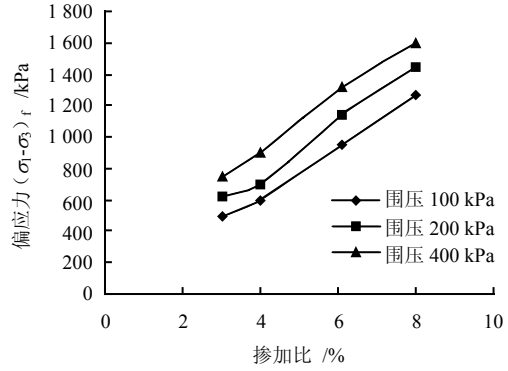



**图 5 破坏偏应力与 SEU－2 型固化剂掺量关系**
**Fig.5 Relationship between failure strain and the ratio of additive**

### 3.3 固化剂掺量对三轴应力应变特性的影响

从图 3 中可以看出，掺加比变化对应力-应变曲线的形状影响不大，主要规律是随围压的增加由软化型向弱软化型转变。从图 4 及图 5 可以看出，随着掺量的增加，同一围压下的初始模量也逐渐增加，但增加幅度很小。同一围压下不同掺加比的破坏应变分布范围为 3.2 % ~ 5.7 %，虽然破坏应变是逐渐增加的，但增量很小，而且掺量越大围压越大，增加的幅度越小，如围压为 400 kPa 时，掺入比为 3 %，4 %，6 %和 8 %的破坏应变分别为 5.0 %，5.2 %，5.5 %和 5.7 %。

掺量对破坏偏应力的影响很大，破坏偏应力分布范围在 500 ~ 1 600 kPa 之间。不同围压作用下，随着掺入比的变化破坏，应变发展趋势存在差异，围压 100 kPa 时，随着掺入比增加，破坏偏应力增加幅度较大，从 500 kPa 发展到 1 280 kPa。随着围压的增加，破坏偏应力增加速度和趋势变缓，在围压 400 kPa 时，尤其是掺入比从 6 %到 8 %时，破坏应变的增加幅度比其他情况要慢。

## 4 结 论

（1）固化剂固化粉质土的单轴应力-应变曲线基本相似，有明显的峰值应力出现，为软化类型曲线。

（2）固化剂固化粉质土 7 d 与 14 d 的破坏应力、破坏应变差异较大，而 28 d 与 60 d 的破坏应力、破坏应变较小，说明掺加 SEU－2 型固化剂在后期的强度和变形特性变化较小。随着 SEU－2 型固化剂掺量的增加，单轴应力-应变曲线形状变化明显，弹性阶段的曲线变陡，即初始弹性模量增大，相应的峰值应力也增高，峰态由平缓逐渐变为尖峰状，说明材料脆性增强，破坏应变逐渐减小。

（3）从试验得到的固化粉质土三轴应力-应变曲线可以看出，随着掺量的增加，其破坏应变和破坏偏应力均呈现正向增长的态势，但破坏应变增加缓慢，破坏偏应力增加较快。曲线在高围压下呈现弱软化型，在较低围压时呈现软化型，属于脆性破坏。

同一固化剂掺量在不同围压下破坏应变增加值几乎相等。同一围压下不同掺量的破坏应变随围压的增加趋势很缓慢。同一围压下随着掺量的增加破坏偏应力增加非常大，其增加程度与围压的增加呈正比关系。

## 参 考 文 献

[1] 中华人民共和国交通部. JTJ051－93 公路土工试验规范[S]. 北京：人民交通出版社，1993.

[2] 钱家欢，殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京：中国水利水电出版社，1996.

[3] 朱志铎，刘松玉，邵光辉，等. 粉土及其稳定土的三轴试验研究[J]. 岩土力学，2005（12）：1 967－1 971
ZHU Zhi-duo, LIU Song-yu, SHAO Guang-hui, et al. Research on silts and silts treated with stabilizers by triaxial shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (12): 1 967－1 971.

[4] 东南大学交通学院. 高性能固化剂固化粉质土技术研究报告[R]. 南京: 东南大学，2006.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net