

# Triaxial Compression Test Investigation of Sand Particles Cemetation Effects on Mechanical Properties of Coarse Sand

Jingyu Chen<sup>1</sup>, Ying Hai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Jiaying University, Jiaying Zhejiang

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaying University, Jiaying Zhejiang

Email: jxxy\_chen@126.com

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2017; accepted: Aug. 29<sup>th</sup>, 2017; published: Sep. 4<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In this paper, the mixing method is adopted to cement sand, and artificial cement sand samples of different cement content are made by mixing Portland cement with sandy soil. Triaxial consolidation drained shear tests on these sand samples are carried out to study effects of the cementation between sand particles on strength characteristics, stress-strain characteristics and the volume change characteristics. Studies show that under the same confining pressure, the higher the cement content and the stronger the bonding between the coarse sand particles, the bigger the peak shear strength of the artificial cement sand samples, but the residual shear strength of samples of different cement content is approximately equal. The higher the cement content and the stronger the bonding between the coarse sand particles, the bigger the initial compression modulus and the more obvious strain softening of the samples of different cement content under the same confining pressure. The higher the cement content and the stronger the bonding between the coarse sand particles, the more easily the artificial cement sand samples to dilate and the bigger the volumetric strain of these samples.

## Keywords

Artificially Cemented Sand, Bonding between Sand Particles, CD Triaxial Shear Test, The Strength Characteristic of Cemented Sand, The Stress-Strain Characteristic of Cemented Sand

---

# 砂土粒间胶结性对砂土力学性质影响的三轴实验研究

陈敬虞<sup>1</sup>, 海 瑛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江嘉兴学院建筑工程学院, 浙江 嘉兴

<sup>2</sup>浙江嘉兴学院机电工程学院, 浙江 嘉兴  
Email: jxxy\_chen@126.com

收稿日期: 2017年8月15日; 录用日期: 2017年8月29日; 发布日期: 2017年9月4日

## 摘要

本文采用对砂土进行胶结的混合法, 在砂土中掺入硅酸盐水泥制成不同水泥含量的人工胶结砂土试样, 通过对试样进行三轴固结排水剪切试验, 研究砂土颗粒间的胶结对砂土强度特性, 应力-应变特性及体积变形特性的影响。研究表明, 同一围压下试样水泥含量越高粗砂粒间的胶结越强, 试样的峰值强度越大; 但同一围压下不同水泥含量试样的残余强度接近相等。同一围压下, 试样水泥含量越高砂粒间的胶结越强, 试样的初始压缩模量越大, 应变软化越明显。试样水泥含量越高粗砂粒间的胶结越强, 在低围压下排水剪切时越容易发生剪切膨胀, 低围压下排水剪切时的体应变也越大。

## 关键词

人工胶结砂土, 砂土颗粒间胶结性, 三轴固结排水剪切试验, 胶结砂土强度特性, 胶结砂土应力-应变特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土中颗粒的组成、土颗粒的排列与组合、颗粒间的连接作用导致了土形成不同的结构, 土的结构性是指这种结构而造成的力学特性, 结构性的强弱表示土的结构性对于其力学性质(强度、变形性质和渗透性)影响的强烈程度。天然土体的力学特性与在试验室制备的重塑土的力学特性有较大区别, 天然土体的结构性对其力学及工程特性有非常大的影响, 天然土体相对于重塑土而言称为结构性土。土体结构性对土体力学性质及工程性质的影响是 21 世纪土力学的核心问题[1]。

上世纪八十年代以来, 许多学者对结构性土的力学特性进行试验分析和研究。张成厚等对两种未扰动的结构性粘土, 进行了固结实验和室内三轴不排水试验[2]。由于在对原状土取样的过程中, 对原状土的扰动使其结构的改变是不可避免的, 故后来一些学者尝试在试验室内人工制备结构性土, 对土的结构性开展试验研究。Malandraki 采用高温灼烧法在试验室内制备结构性土(Malandraki, 2001) [3]。蒋明镜等通过在原料软土中掺入冰粒和微量水泥, 人工设定化学胶结作用和大孔隙组构来模拟天然粘土的结构(蒋明镜等, 1997 年) [4]。谢定义等在土中掺入冰粒和微量水泥, 在试验室内人工制备类似于原状土结构的土样, 通过对人工制备的结构性土样的压缩试验, 分析研究土的结构性并验证提出了反映土结构性的量化参数(谢定义等, 1999 年) [5]。

反映天然砂土结构性的一个方面砂土颗粒的排列, 可用砂土的相对密度  $D_r$  或孔隙比  $e$  来描述; 但反映天然砂土结构性的另一个方面砂土颗粒间的胶结性, 及颗粒间的胶结性对天然砂土力学性质的影响目前正在研究。王丽等在试验室内用方解石粉和硅酸盐水泥作为胶结材料, 采用混合法在试验室内制成含 5%方解石粉、不同硅酸盐水泥含量的钙质砂试样, 对这些试样进行了不同围压下的三轴固结排水剪



### 3. 砂土粒间胶结对应力应变特性及强度的影响

#### 3.1. 应力应变特性及强度分析

A 组试样(A1, A2, A3), B 组试样(B1, B2, B3), C 组试样(C1, C2, C3)分别在围压 50 kPa、100 kPa、200 kPa 下固结排水剪切试验的  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$  关系曲线如图 2, 图 3, 图 4 所示。从图中可看出随着围压的增大, 试样的峰值强度增大, 应力应变曲线为应变软化型曲线且围压越大软化越明显, 三组试样的这些性质是相同的。从相对密实度  $D_r$  的值可看出三组试样都属于密砂, 三个图中的应力应变曲线和参考文献中报告的密砂的应力应变曲线特性相同, 说明该试验的结果有较高的准确性。

不含水泥试样、含 3%水泥试样和含 6%水泥试样, 在围压 50 kPa、100 kPa、200 kPa 下固结排水剪切试验的  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$  关系曲线如图 5、图 6、图 7 所示。从图 5、图 6、图 7 可以看出, 水泥胶结物质的添加使砂土试样的峰值强度增加, 同一围压下水泥含量越高试样的峰值强度越大, 但同一围压下不同水泥含量试样的残余强度接近相等。同一围压下水泥含量越高的试样, 初始的压缩模量越大, 应变软化越明显。随着水泥含量的增加, 试样应力峰值对应的应变减小试样的脆性增加。

Table 2. Basic physical index of sample

表 2. 试样的物理性质指标

试样编号	砂的质量(g)	水泥的质量(g)	水泥占比(%)	相对密实度 $D_r$
A(A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> )	168	0	0	0.79
B(B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub> , B <sub>3</sub> )	156	4.68	3%	0.76
C(C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> )	150	9	6%	0.78

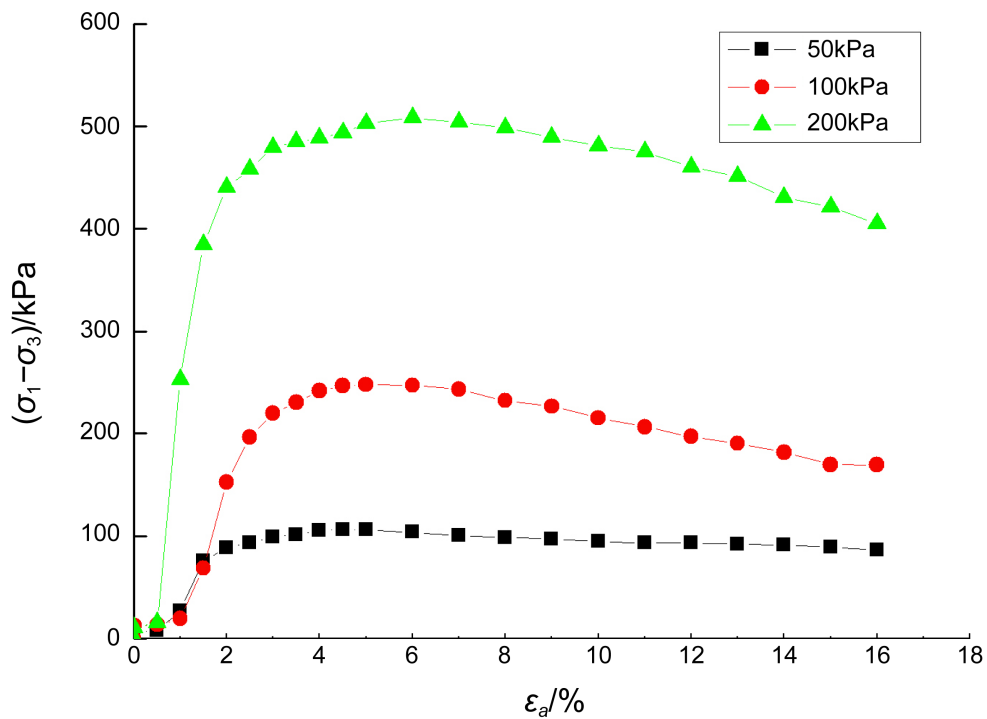


Figure 2. Deviator stress-axial strain curves of the sample contained 0% cement

图 2. 不含水泥量试样主应力差-轴向应变曲线

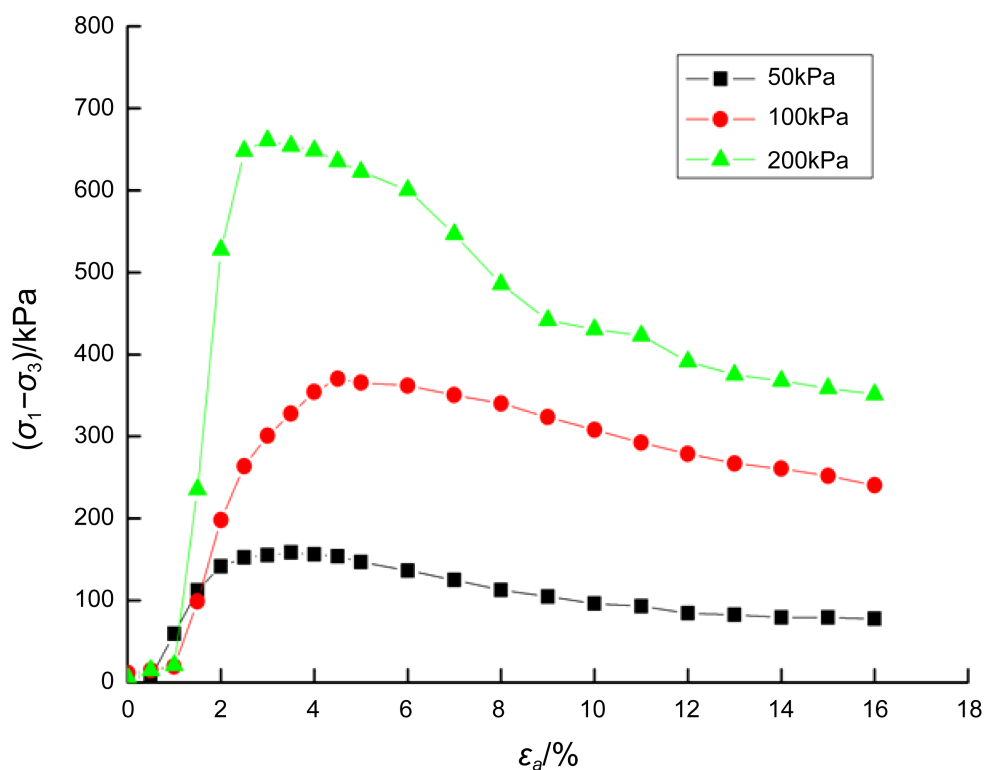


Figure 3. Deviator stress-axial strain curves of the sample contained 3% cement

图 3. 3%水泥含量试样主应力差-轴向应变曲线

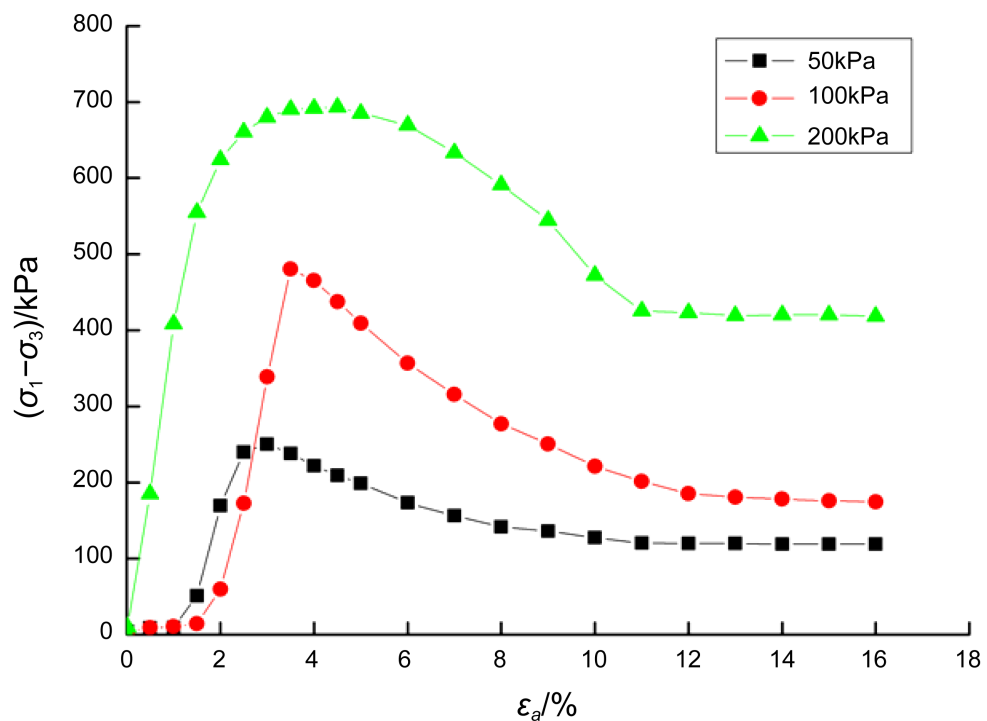


Figure 4. Deviator stress-axial strain curves of the sample contained 6% cement

图 4. 6%水泥含量试样主应力差-轴向应变曲线

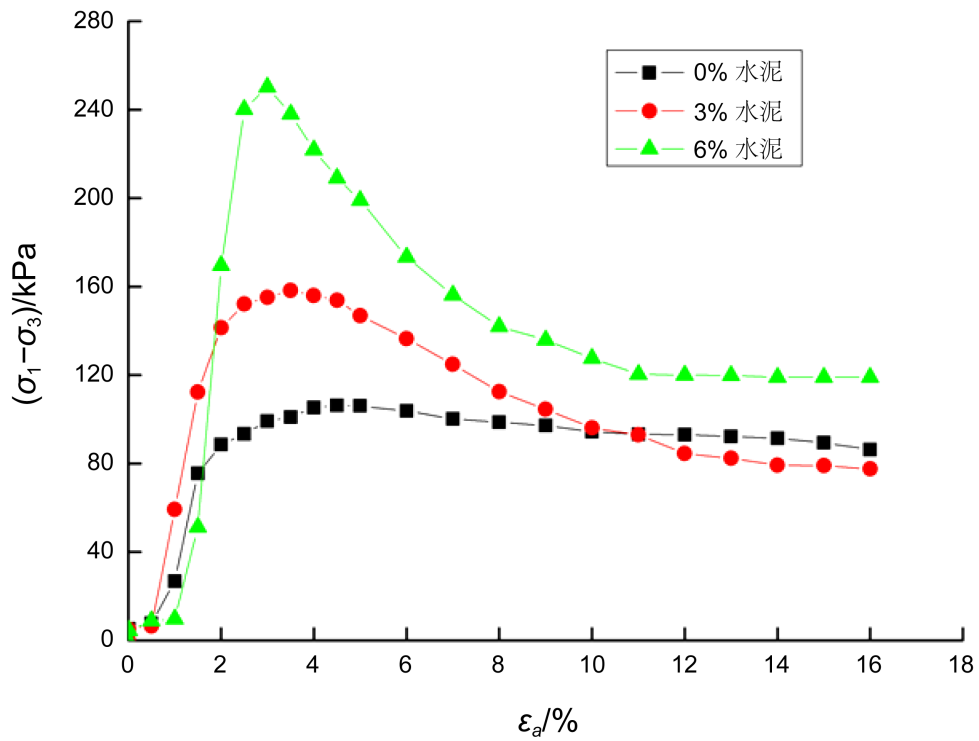


Figure 5. Deviator stress-axial strain curves under the confined pressure of 50 kPa

图 5. 围压 50 kPa 下主应力差-轴向应变曲线

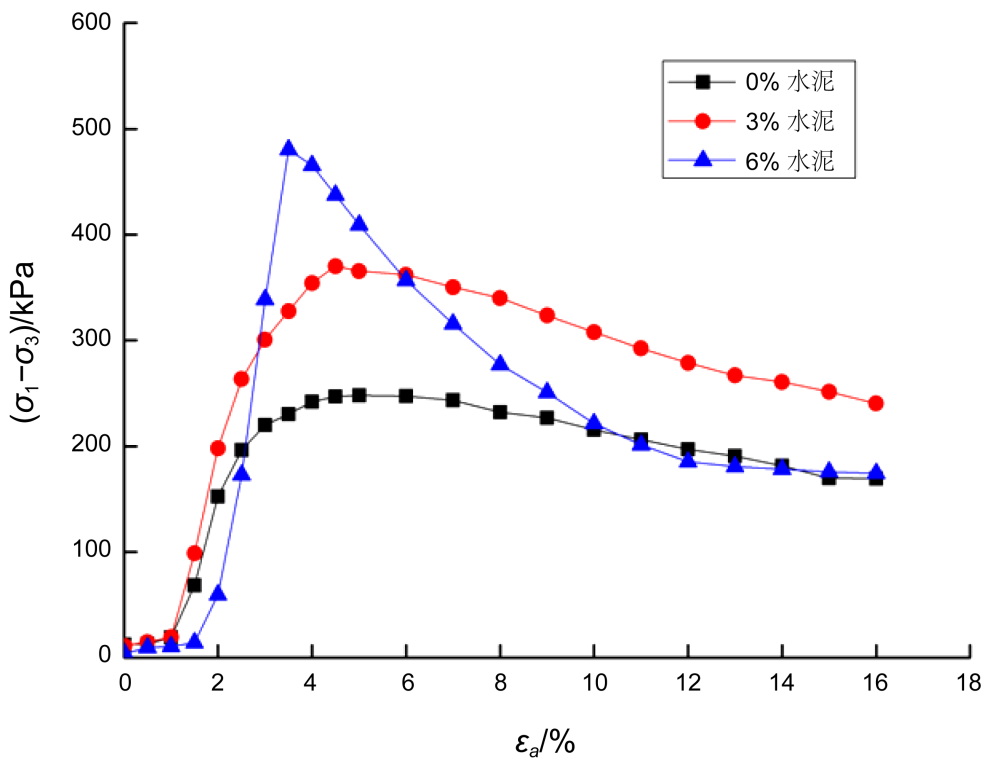


Figure 6. Deviator stress-axial strain curves under the confined pressure of 100 kPa

图 6. 围压 100 kPa 下主应力差-轴向应变曲线

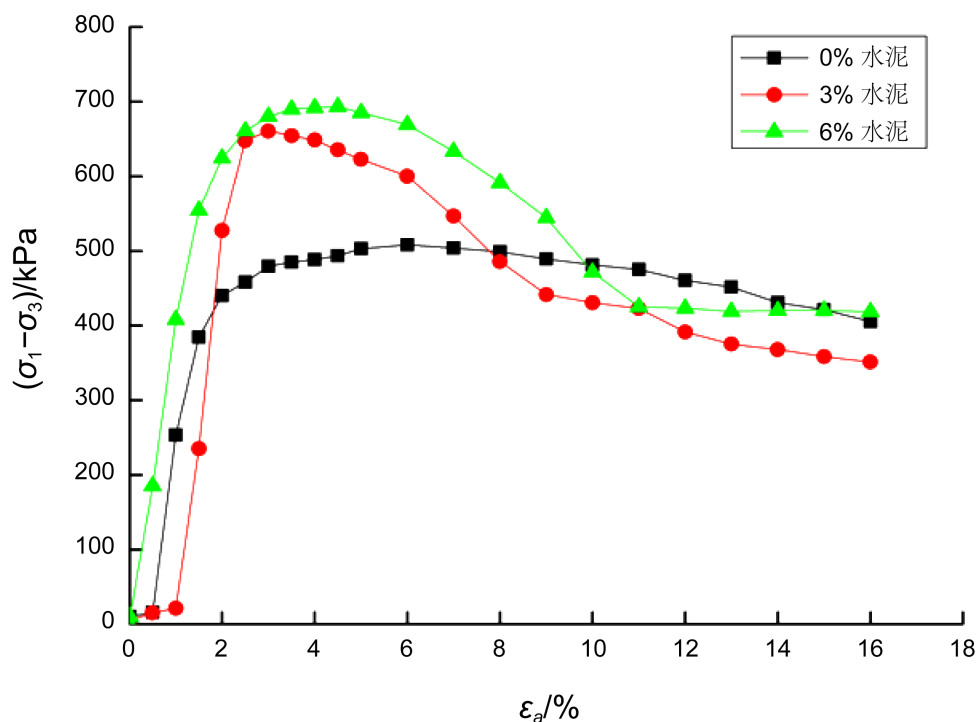


Figure 7. Deviator stress-axial strain curves under the confined pressure of 200 kPa  
图 7. 围压 200 kPa 下主应力差-轴向应变曲线

### 3.2. 体积变形特性分析

A 组试样(A1, A2, A3), 在围压 50 kPa、100 kPa、200 kPa 下固结排水剪切试验的体积应变-轴向应变( $\epsilon_v - \epsilon_a$ )关系曲线如图 8 所示。A 组试样相对密度  $D_r = 0.79$  属于密砂, 随着轴向应变的增加试样的体积应变由剪缩转变为剪胀, 试样在不同围压下的体积应变相差不大。

试样 A1、B1、C1 在围压 50 kPa 下的体积应变-轴向应变( $\epsilon_v - \epsilon_a$ )关系曲线如图 9 所示, 试样 A2、B2、C2 在围压 100 kPa 下的体积应变-轴向应变( $\epsilon_v - \epsilon_a$ )关系曲线如图 10 所示, 试样 A3、B3、C3 在围压 200 kPa 下的体积应变-轴向应变( $\epsilon_v - \epsilon_a$ )关系曲线如图 11 所示。

从图 9、图 10 和图 11 中可看出, 在同一围压下水泥含量 6% 的试样的剪胀体应变大于水泥含量 3% 的试样的剪胀体应变, 水泥含量 3% 的试样的剪胀体应变大于不含水泥试样的体应变。这说明粗砂砂粒间的胶结越强, 在低围压下排水剪切时越容易发生剪切膨胀; 粗砂砂粒间的胶结越强, 低围压下排水剪切时的剪切体应变越大。

## 4. 结论

1) 水泥胶结物质的添加使砂土试样的峰值强度增加。同一围压下水泥含量越高、粗砂砂粒间的胶结越强, 试样的峰值强度越大; 但同一围压下不同水泥含量试样的残余强度接近相等。

2) 同一围压下试样水泥含量越高、砂粒间的胶结越强的试样, 初始的压缩模量越大, 应变软化越明显。随着水泥含量的增加, 试样应力峰值对应的应变减小试样的脆性增加。

3) 试样水泥含量越高粗砂砂粒间的胶结越强, 在低围压下水泥剪切时越容易发生剪切膨胀, 含水泥试样的剪胀体应变大于不含水泥试样的体应变。试样水泥含量越高粗砂砂粒间的胶结越强, 低围压下水泥剪切时的剪切体应变越大。

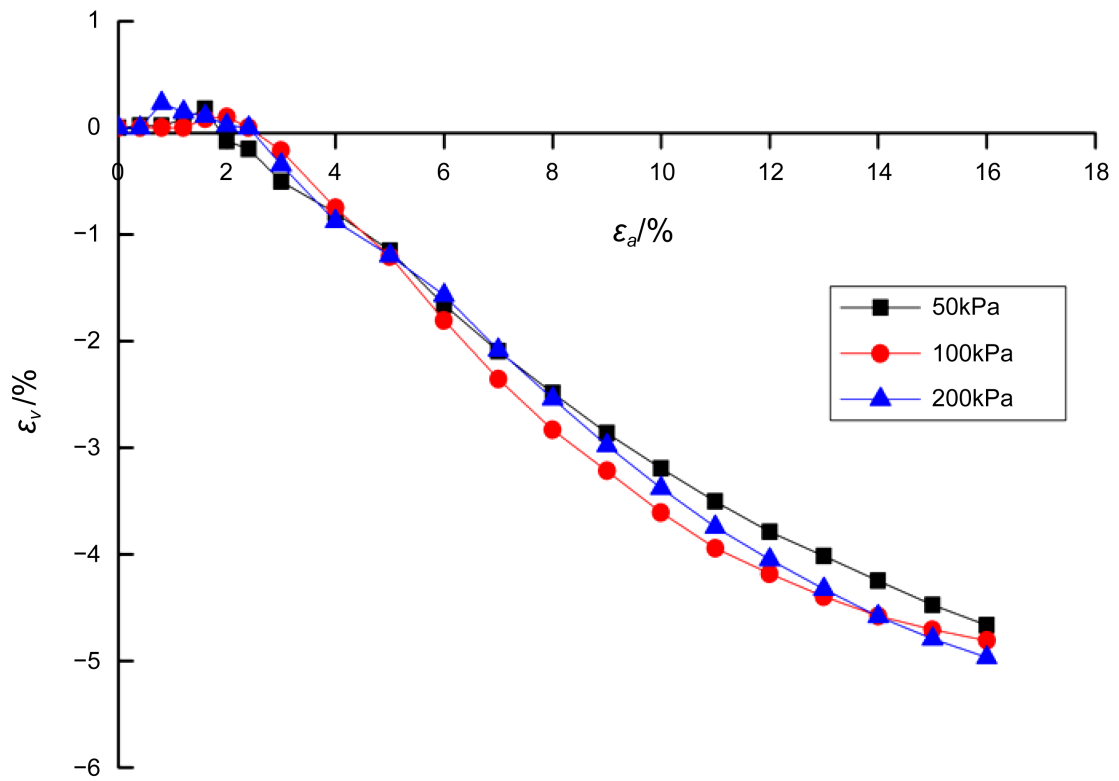


Figure 8. Volume strain-axial strain curves under different confined pressure

图 8. 不同围压下体积应变—轴向应变曲线

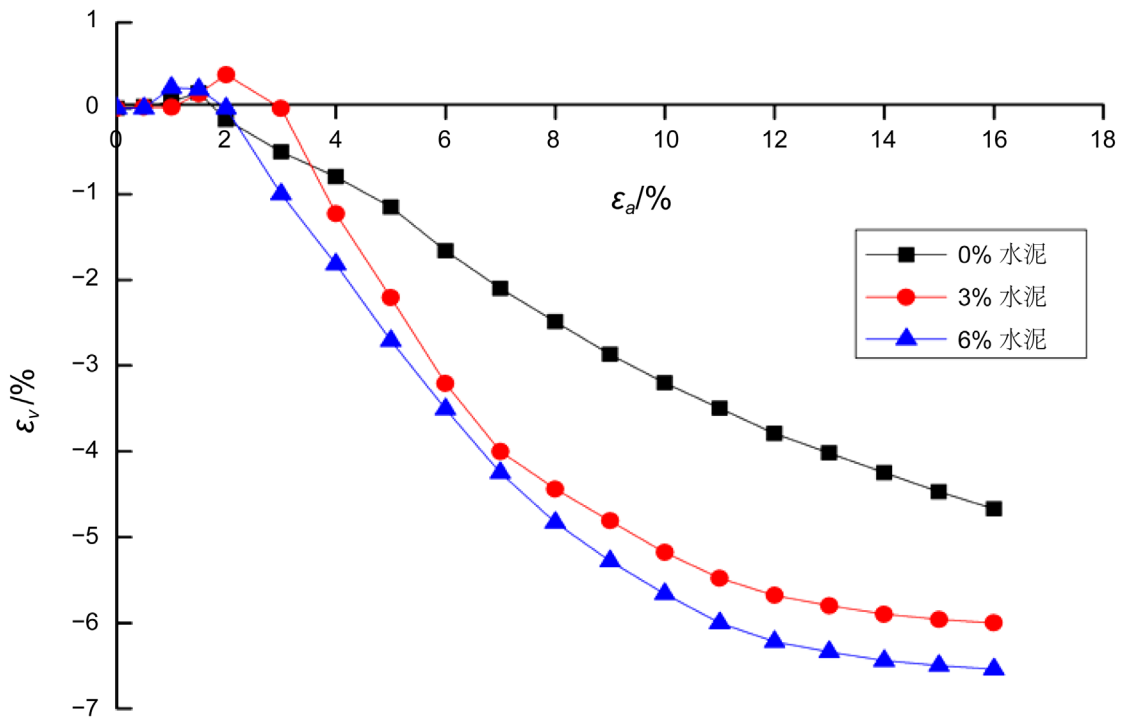


Figure 9. Volume strain-axial strain curves under the confined pressure of 50 kPa

图 9. 围压 50 kPa 下体积应变—轴向应变曲线



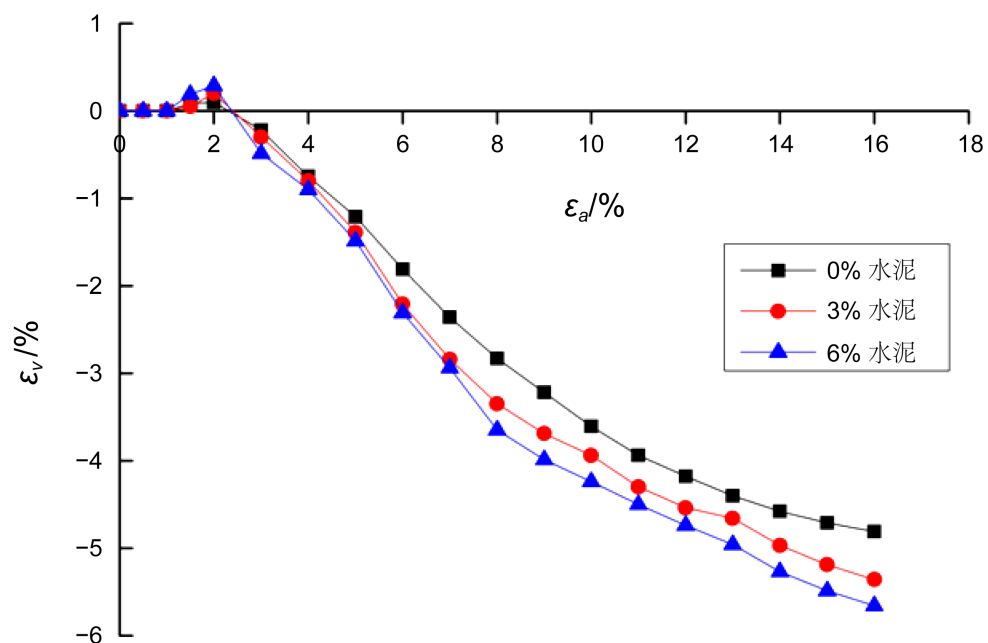


Figure 10. Volume strain-axial strain curves under the confined pressure of 100 kPa

图 10. 围压 100 kPa 下体积应变—轴向应变曲线

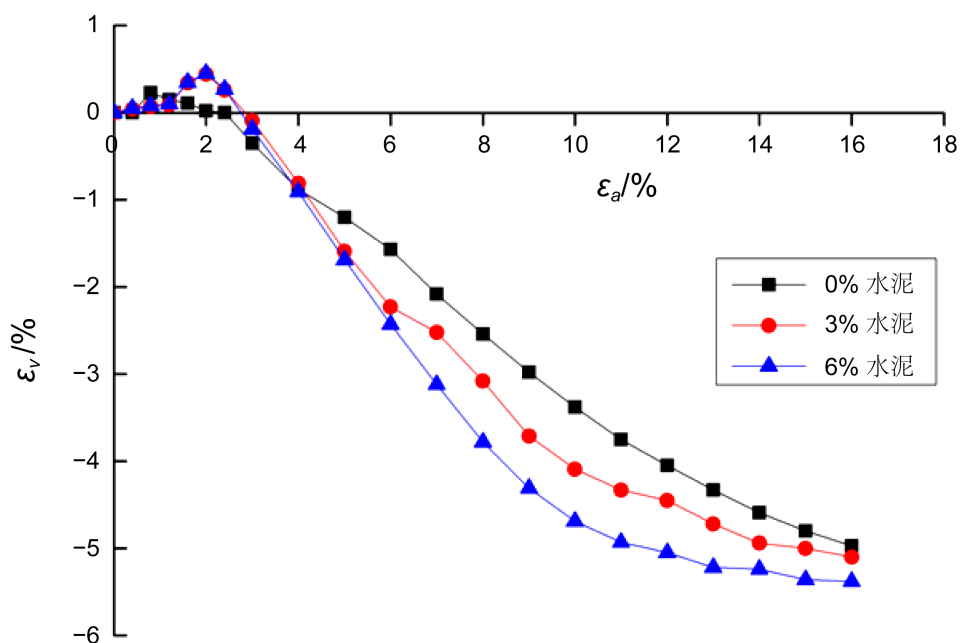


Figure 11. Volume strain-axial strain curves under the confined pressure of 200 kPa

图 11. 围压 200 kPa 下体积应变—轴向应变曲线

上述结论可供实际岩土工程设计时参考, 水泥胶结砂土在高围压下的应力-应变特性及强度特性有待进一步试验分析研究。

### 资助信息

浙江省自然科学基金项目(LY13A020005)。

## 参考文献 (References)

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型-21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
- [2] 张诚厚. 两种结构性土的土工特性[J]. 水利水运科学研究, 1983(4): 65-71.
- [3] Malanraki, V. and Toll, D.G. (2001) Triaxial Tests on Weakly Bonded Soil with Changes in Stress Path. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 282-291.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:3\(282\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:3(282))
- [4] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性黏土试样人工制备方法研究[J]. 水利学报, 1997(1): 56-61.
- [5] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
- [6] 王丽, 鲁晓兵, 王淑云, 赵京, 王爱兰. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2): 133-143.
- [7] 蒋明镜, 孙渝刚. 人工胶结砂土力学特性的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1849-1856.
- [8] 刘恩龙, 沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 679-682.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ijm@hanspub.org](mailto:ijm@hanspub.org)