



铁道科学与工程学报
Journal of Railway Science and Engineering
ISSN 1672-7029, CN 43-1423/U

《铁道科学与工程学报》网络首发论文

题目：不同应力养护条件对水泥土力学性能影响试验研究
作者：陈昌富，吕晨阳，蔡焕，张根宝
DOI：10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230515
收稿日期：2023-04-07
网络首发日期：2023-06-09
引用格式：陈昌富，吕晨阳，蔡焕，张根宝. 不同应力养护条件对水泥土力学性能影响试验研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报.
<https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230515>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

收稿日期：2023-04-07

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51978254, 52278349)；湖南省教育厅科学研究重点项目(21A0511)

通信作者：陈昌富(1963-), 男, 湖南祁东人, 教授, 博士, 从事边坡工程、岩土工程支护和地基处理等方面研究; E-mail: cfchen@hnu.edu.cn

DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230515

不同应力养护条件对水泥土力学性能影响试验研究

陈昌富^{1,2}, 吕晨阳^{1,2}, 蔡焕^{1,2}, 张根宝³

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082;

3. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南益阳 413000)

摘要: 为更好地了解水泥土在养护时期所受应力大小对其后期力学性能的影响, 研发了恒温等压或偏压条件下水泥土试样的养护装置和相应的试验方法。基于改制的恒温恒压水泥土试样养护装置, 制作等压和偏压养护条件下不同龄期的水泥土试样。通过无侧限压缩试验(UCT), 获得等压和偏压养护条件下水泥土试样的应力-应变曲线及其无侧限抗压强度 UCS 和变形模量 E_{50} 随龄期的演化规律。试验结果表明: 等压养护时围压 σ_c 从 0.1MPa 增加到 0.3MPa, 水泥土试样在龄期为 7d 和 14d 时的无侧限抗压强度和变形模量 E_{50} 均随着围压的增加而增大, 但 28d 龄期水泥土样的 UCS 和 E_{50} 随围压 σ_c 的增长而减小, 甚至 0.3MPa 围压养护试样的 UCS 已低于无围压养护试样的 UCS, 水泥土存在“高围压养护长期强度降低效应”; 不同轴压比 λ 下偏压养护的水泥土样, 其 60d 龄期的 UCS 在偏压较小(即 $\lambda < \lambda_c$, λ_c 为临界轴压比)时逐渐增加, 而在偏压较大(即 $\lambda > \lambda_c$)时逐渐下降, 即水泥土又存在“小偏压养护强度增加, 大偏压养护强度降低的效应”。通过对试验结果进行回归分析, 分别建立了等压养护下计入围压参数 σ_c 的水泥土 UCS 和 E_{50} 的演化方程、偏压养护下水泥土 UCS 和 E_{50} 与轴压比 λ 的经验关系式。研究成果对于深刻理解环境条件对水泥土力学性能的影响机制和指导工程实践, 具有重要的理论和工程实际意义。

关键词: 水泥土; 无侧限抗压强度; 变形模量; 等压养护; 偏压养护

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1672-7029 (XXXX) XX-0001-12

Experimental study on mechanical properties of cement soil under different stress curing conditions

CHEN Changfu^{1,2}, LYU Chenyang^{1,2}, CAI Huan^{1,2}, ZHANG Genbao³

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: In order to explore the influence of curing stress on mechanical properties of cemented soil, a curing device and corresponding testing methods for cemented soil samples under constant temperature and isotropic or deviatoric stress conditions were developed. The impact of curing stress on the unconfined compressive strength (UCS) and modulus of deformation E_{50} of cemented soil was experimentally investigated. Using this curing device, the specimens of cemented soil subjected to isotropic or deviator stress were prepared under varying curing time. The unconfined compression tests were carried out on these specimens of cemented soil to obtain the stress-strain relationship as well as the evolution patterns of UCS and E_{50} of cemented soil over the curing time. The following findings were obtained in this work: The high confining stress in curing period reduce the strength of cemented soil. The UCS and E_{50} of cemented soil specimen under ages of 7 and 14 days increase with the rise of confining pressure but under 28-day curing time decrease with the confining stress increasing from 0.1 to 0.3 MPa. The UCS of cemented soil specimen under 0.3 MPa confining stress is less than the specimen free of

confining stress. Comparing with that of cemented soil without confining stress, the increases in UCS can be observed under small deviator stress, while the decrease in UCS can be observed under large deviator stress. The strength of cemented soil specimen increases when cured under small deviator stress (axial stress ratio less than the critical axial stress ratio), while decreases when cured under large deviator stress (axial stress ratio greater than the critical axial stress ratio). Based on the regressive analyses of the test results, the development model of the UCS and E_{50} accounting for the confining stress under the curing condition of isotropic stress, and the correlations of the UCS and E_{50} with the axial stress ratio under the curing condition of deviator stress were established respectively. The concluded remarks obtained in this work can provide insights for the impact of environmental conditions on the mechanical properties of cemented soil, and guide the engineering practice for cemented soil applications.

Key words: cemented soil; unconfined compressive strength; deformation modulus; curing of isotropic stress; curing of deviatoric stress

我国地域辽阔, 广泛分布成因各异的软土地层。随着我国现代化进程快速推进, 大量基础设施需建在软土区。由水泥与软土搅拌凝结而成的水泥土, 因其具有施工工艺成熟、工期短、桩土复合性好、承载力高、造价较低等优点, 被广泛用于软土地基加固^[1-3]。相关研究表明^[4-5], 水泥土养护时所承受的应力

(即养护应力) 对其力学性能具有重要影响。HSIAO 和 PHAN^[6]研究了竖向养护应力对不同种类水泥的试样强度的影响, 试验表明随着竖向应力的增大, 水泥土无侧限抗压强度(UCS)增加, 破坏时的应变变小。章荣军等^[7-8]对高含水量海相黏土在完全侧限的养护条件下施加不同大小的养护应力并养护 7 天,

发现随着养护应力的增大, 试样的早期强度有明显的提高。RABBI 等^[9]、KUWANO 和 BOON^[10]以及 SUZUKI 等^[11]研究了水泥土的三轴试样在养护应力条件下强度随龄期的变化, 水泥土试样在完全侧限的条件下, 施加竖向养护压力将使得水泥土的峰值抗压强度、剪切模量、弹性模量、残余不排水抗剪强度等均有所增大, 且养护压力越大, 其值越大。YILMAZ 等^[12-14]开发了一套水泥土完全侧限下压力养护装

置, 采用分级加载施加水泥土的养护压力, 结果同样表明: 完全侧限条件下, 施加竖向压力有利于水泥土强度的增加。上述研究均表明水泥土在受到较小的压力($<0.3\text{MPa}$)养护下, 水泥土强度会有所增加。此外, 陈昌富等^[15]对水泥土立方体试样在无侧限条件(仅施加恒定的竖向应力)下进行养护并测试其无侧限抗压强度, 结果发现存在一个临界养护应力值, 当养护应力大于它时, 试样无侧限抗压强度反而降低。实际工程中, 水泥土桩虽受到侧向土压力作用, 但允许其有侧向变形, 即处于部分侧限状态, 而且水泥土桩在硬化过程中常常受到等压(竖向与径向压力相等)或偏压(竖向与径向压力不等)应力作用。对于部分侧限条件下水泥土在硬化过程中受到等压或偏压作用后, 其后期强度的变化规律如何, 目前尚缺乏较系统深入的研究。为此, 本文模拟水泥土桩在硬化过程中的实际受力状态, 通过改制的恒温恒压水泥土试样养护装置, 制作等压和偏压养护条件下不同龄期的水泥土试样, 再通过无侧限压缩试验(UCT), 就等压和偏压养护环境对水泥土后期力学性能的影响展开较深入的试验研究。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验用材料与装置

本次试验所用土料取自长沙市湘江河漫滩。经测得土样的天然密度为 1.88 g/cm^3 、天然含水量为 33.2%、土粒比重为 2.68、液限为 35.05%、塑限为 20.04%、液性指数为 0.88, 由此可判定其为软塑状低液限黏土。土颗粒级配曲线的曲率系数 $C_c=4.51$, 不均匀系数 $C_u=1.18$, 土的级配良好。试验用水泥为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥。

水泥土试样养护装置(如图 1)由三轴蠕变仪改装而成, 可精确控制试样所受偏压大小。该装置通过温度恒定, 以此来排除温度变化对试样强度的影响。

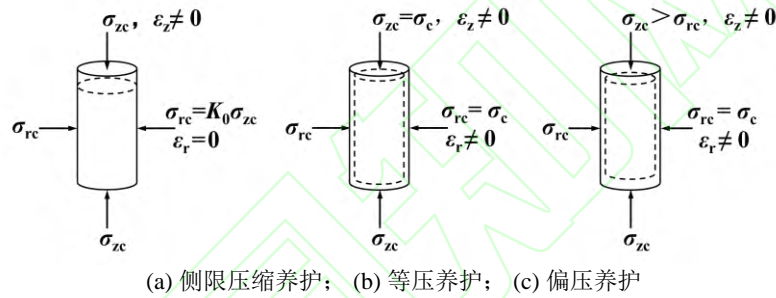


图 1 三联恒温恒压养护装置

Fig.1 Triple-specimen curing device with constant temperature and pressure

1.2 试样养护方案与试验过程

为保证混凝土试样与养护装置中压力室的形状与尺寸相匹配，将试样制作成直径为 61.8mm、高度为 125mm 的圆柱状。为模拟饱和软土地基中混凝土桩的环境条件，将试样置于水浴环境下养护，养护温度控制为 20°C，水泥掺入比（即混凝土中掺入的水泥重量与被拌和的软土重量之比）为 20%，养护方案采用等压养护和偏压养护两种方式（图 2）。



(a) 侧限压缩养护；(b) 等压养护；(c) 偏压养护

图 2 侧限压缩、等压与偏压应力养护试样受力状态

Fig.2 Stress state of specimens cured under one-dimension stress, isotropic stress and deviated stress

1.2.1 等压养护试验

与文献[6-14]中侧限压缩养护（如图 2a）的受力状态不同，等压养护是在试样轴向和径向施加相等的养护压力 σ_c （即 $\sigma_{zc} = \sigma_{rc} = \sigma_c$ ），且允许径向（侧向）有变形，如图 2b 所示。本次试验的等压养护方案如表 1，其中试样的似水灰比（即混凝土中土样天然含水与水泥砂浆水的质量之和与水泥质量的比值）参考某实际工程确定为 2.0。为了方便与文献中试验结果进行对比分析，本试验设计试样的养护围压 σ_c 分别为 0MPa、0.1MPa、0.2MPa 和 0.3MPa，养护龄期分别为 7d、14d 和 28d。

表 1 混凝土样等压养护试验方案及试验结果

Table 1 Scheme and results for isotropic stress curing test of cemented soil samples

试样编号	等压养护围压 σ_c /MPa	等压养护龄期 t /d	无侧限抗压强度 $q_{u,t}^{IS}$ /MPa
IS _{0,7d}	0	7	1.171
IS _{0,14d}	0	14	1.953
IS _{0,28d}	0	28	2.392
IS _{100,7d}	0.1	7	1.312
IS _{100,14d}	0.1	14	2.119
IS _{100,28d}	0.1	28	2.498
IS _{200,7d}	0.2	7	1.436
IS _{200,14d}	0.2	14	2.168
IS _{200,28d}	0.2	28	2.431

IS _{300,7d}	0.3	7	1.676
IS _{300,14d}	0.3	14	2.173
IS _{300,28d}	0.3	28	2.325

等压养护试验过程如下：

(1) 配制水泥土浆。将满足配比的水泥与干土初步搅拌，倒入水泥搅拌机中加水搅拌 10min，直至搅拌成均匀的水泥土浆液。

(2) 试样制作。把搅拌完全的水泥土浆液分层倒入三轴模具中，不断振捣排除气泡，将上部刮平后密封，养护 48 小时使其初凝。

(3) 试样压力养护。将初凝定型后的试样脱模后，通过称量试样质量筛除其中不合格品后，将试样装入特制的养护装置，根据养护方案（表 1）施加围压进行养护。

(4) 加载测试。试样养护至规定龄期后取出，通过电子万能试验机进行无侧限抗压强度测试，测得无侧限抗压强度 $q_{u,t}^{IS}$ 如表 1 所示。

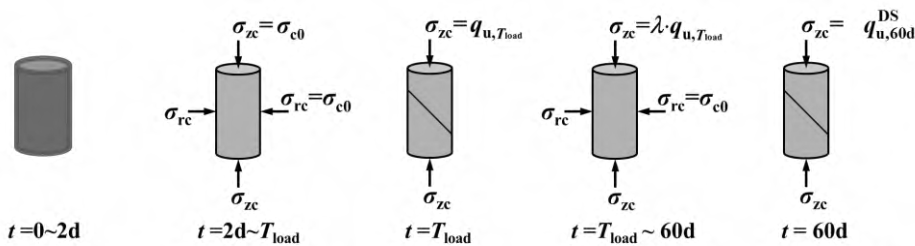
1.2.2 偏压养护试验

偏压养护是在试样轴向和径向施加不相等的养护压力（即 $\sigma_{zc} > \sigma_{rc} = \sigma_c$ ）（如图 2c）。偏压养护可很好地模拟实际工程中水泥土桩的受力状态。偏压养护试验目的，是获得水泥土样在不同龄期点（比如 7d、14d 和 28d）施加不同偏压养护应力后水泥土的强度变化。

本次偏压养护试验所用试样的似水灰比为 2.27，施加初始围压 $\sigma_{c0} = 0.1\text{MPa}$ ，具体试验方案（表 2）和试验过程（图 3）如下：

表 2 水泥土样偏压养护试验方案及试验结果
Table 2 Scheme and results for deviated stress curing test of cemented soil

试样编号	加载时刻 T_{load}/d	龄期 T_{load} 无侧限抗压强度 $q_{u,T_{load}}$ /MPa	轴向应力 σ_{zc}/MPa	轴压比 λ	龄期 60d 无侧限抗压强度 $q_{u,60d}$ /MPa
DS _{7d, 0.5}	7	1.094	0.55	0.50	1.563
DS _{7d, 0.6}	7	1.094	0.66	0.60	1.447
DS _{7d, 0.7}	7	1.094	0.77	0.70	1.354
DS _{7d, 0.8}	7	1.094	0.88	0.80	1.074
DS _{14d, 0.5}	14	1.391	0.7	0.50	1.578
DS _{14d, 0.6}	14	1.391	0.84	0.60	1.451
DS _{14d, 0.7}	14	1.391	0.98	0.70	1.413
DS _{14d, 0.8}	14	1.391	1.11	0.80	1.255
DS _{28d, 0.5}	28	1.541	0.77	0.50	1.661
DS _{28d, 0.6}	28	1.541	0.92	0.60	1.573
DS _{28d, 0.7}	28	1.541	1.08	0.70	1.467
DS _{28d, 0.8}	28	1.541	1.23	0.80	1.339



(a) 水泥土浆装模初凝 (b) 等压养护 (c) $t=T_{load}$ 时UCT强度 (d) 偏压养护 (e) $t=60d$ 时UCT强度

图 3 水泥土样偏压养护试验过程 ($\sigma_{c0} = 0.1\text{MPa}$)

Fig.3 Testing procedure of cemented soil cured under deviated stress

(1) 试样制作。按照 1.2.1 节等压养护试验的试样制作方式配制水泥土浆并装模 (图 3a)。

(2) 试样等压养护。待试样初凝后脱模, 装入养护装置, 施加 $\sigma_{c0}=0.1\text{MPa}$ 的初始围压, 再将其等压养护至设定龄期 T_{load} (图 3b), 然后在此龄期后加载继续偏压养护, 因此可称 T_{load} 为加载时刻 (表 2)。

(3) 确定偏压养护时轴向压应力 σ_{zc} 。为了防止偏压养护时因施加轴向压应力 σ_{zc} 过大而导致试样破坏,

先通过无侧限压缩试验 (UCT) 测得等压养护至龄期 T_{load} 的试样的无侧限抗压强度 $q_{u,T_{\text{load}}}$ (图 3c), 再据此确定 $\sigma_{zc} = \lambda \cdot q_{u,T_{\text{load}}} > \sigma_{c0}$, 其中 λ 为轴压比, $\lambda < 1.0$ 。

(4) 试样偏压养护。保持试样的径向压应力 $\sigma_{c0}=0.1\text{MPa}$ 不变, 根据表 2 设定的轴向压应力 σ_{zc} 和对应的加载时刻 T_{load} 对试样实施偏压养护 (图 3d)。

(5) 加载测试。将试样偏压养护至 60d 龄期, 取出试样在电子万能试验机上进行无侧限压缩试验, 测得无侧限抗压强度 $q_{u,60d}^{\text{DS}}$ 如表 2 所示。

2 等压养护对水泥土力学性能的影响分析

2.1 应力-应变曲线分析

测得水泥土试样的典型应力-应变曲线如图 4 所示, 其形态与岩石应力-应变曲线相似, 可分为压密段、线弹性段、屈服段和破坏段四个阶段。压密段 (ab 段) 位于试样加载初期, 试样在荷载作用下微裂纹闭合、空隙压密, 从而产生非线性变形, 亦即随着应变的增加, 应力的增长速度越来越大, 切线模量不断增大。

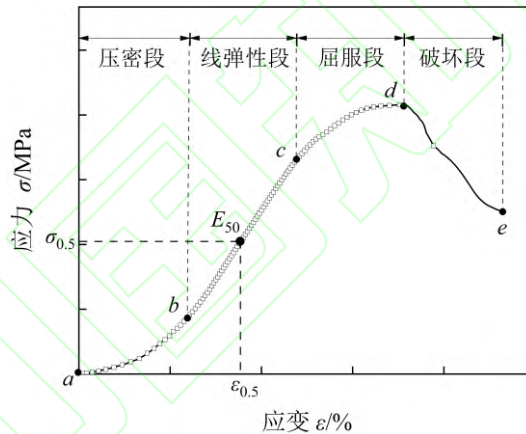


图 4 水泥土典型应力-应变曲线

Fig.4 Typical stress-strain curve of cemented soil

线弹性段 (bc 段) 近似为直线, 切线模量基本无变化。在屈服段 (cd 段), 试样内部不断产生裂缝, 应力与应变的增长速度放缓, 切线模量逐渐减小直至为 0。应力达到峰值后即进入破坏段 (de 段), 此时试样内裂纹逐渐贯通, 应力随应变的增大而减小, 切线模量通常为负值。

图 5 为不同围压养护下, 不同龄期水泥土试样的应力-应变曲线。由试验曲线可知: ① 同一养护围压下, 养护龄期越大, 水泥土试样的强度越高, 应力-应变曲线达到峰值时的应变越小, 试样的刚度与脆性越大; ② 养护龄期相同时, 不论养护围压高低, 水泥土的峰值应变相差不大。

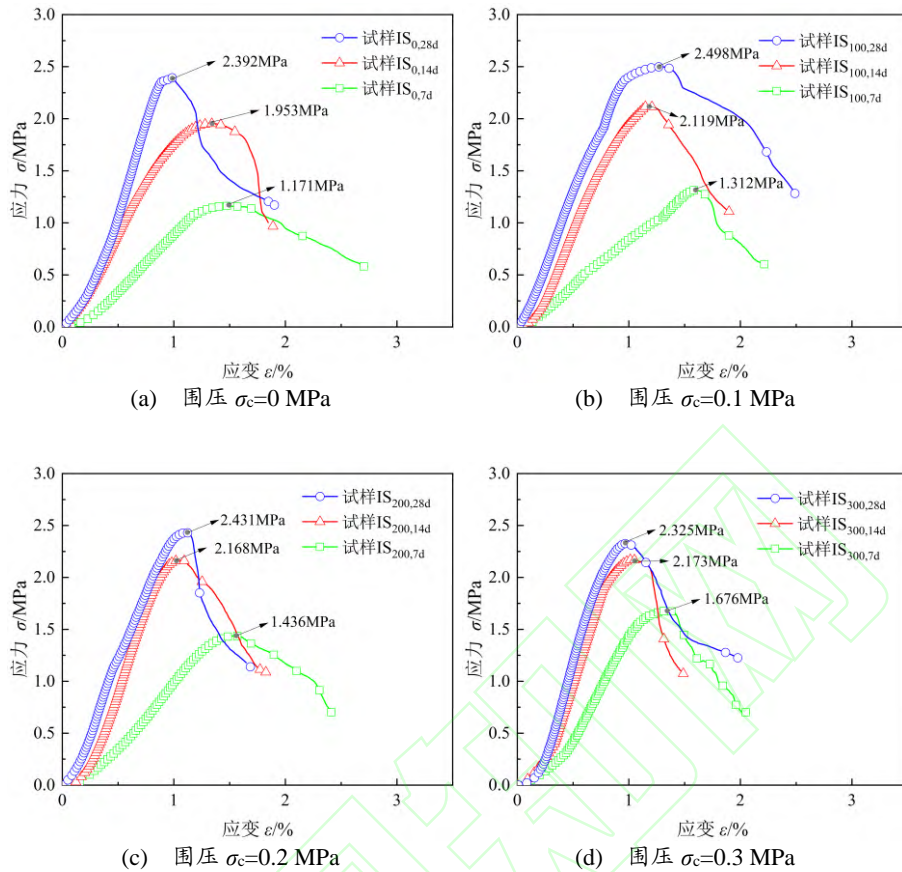


图 5 不同围压养护下不同龄期水泥土试样应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of cemented soil cured under different confining stresses with varying curing time

2.2 等压养护下水泥土无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 变化规律

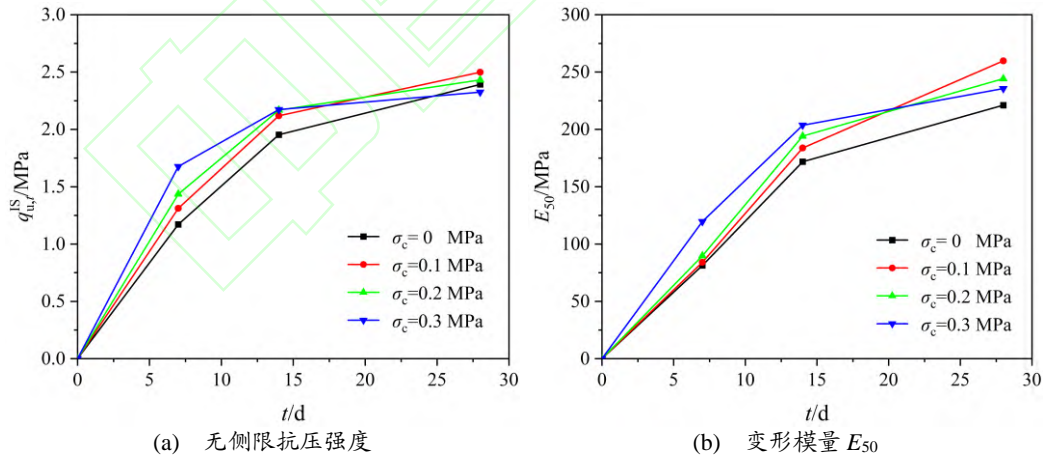


图 6 不同养护围压下不同龄期水泥土无侧限抗压强度与变形模量

Fig.6 UCS and E_{50} of cemented soil cured under different confining stresses with varying curing time

图 6 为等压养护下水泥土试样无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 随龄期变化曲线。由图 6 可知：

① 同一围压 σ_c 下，水泥土的无侧限抗压强度 $q_{u,t}^{IS}$ 和变形模量 E_{50} 均随龄期增长而增大。

② 水泥土试样在龄期为 7d 和 14d 时的无侧限抗压强度和变形模量 E_{50} 均随着围压的增加而增大，这与文献[9-14]中在完全侧限养护（侧限压缩养护）条件下的试验结果和 SUZUKI 等^[11]在短龄期（ $\leq 7d$ ）等压养护条件下的试验结果吻合。但本文试验结果表明，当养护龄期到达 28d 时，对于养护围压 σ_c 分别为

0.1MPa、0.2MPa 和 0.3MPa 的试样，其无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 随着围压 σ_c 的增长而减小，甚至 0.3MPa 围压养护下试样的无侧限抗压强度已经低于无围压养护下的强度，这种在高围压（较高的等压应力）养护下水泥土试样长龄期无侧限抗压强度低于无围压养护试样强度的现象，可称为水泥土“高围压养护长期强度降低效应”，它在以往的文献[9-14]中并未发现。

出现上述现象的原因主要有两个方面，一方面由于挤压固结效应^[8]，养护压力挤压黏土颗粒簇团骨架结构，使孔隙水逐渐排出，降低有效初始含水率，增大水泥土试样中颗粒反应的接触面积，水泥土的水化反应得以更快进行，从而使强度更快增长。根据 Chitarbiram 的水化物理论^[16]，水泥土的强度只与水化物的生成量有关，在水化反应不充分的养护前期，围压带来的水化反应速度增长更快，因此在养护龄期较小时试样强度增长更为明显。但随着水化反应不断完成，早期强度增长更快的试样会更早的进入“疲软期”，其强度增长会更早地变慢，亦即随着龄期的增长，挤压带来的强度增长会逐渐被弱化，Hsiao 和 Phan^[6]的试验结果也证实了这一点。另一方面，与完全侧限养护条件不同，部分侧限养护条件下，如果养护围压相对于水泥土本身即时强度过大，水泥土试样会产生侧向形变，破坏胶体结构的形成，在试样内部产生微裂纹，使其强度有所下降。

2.3 水泥土无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 的演化模型

目前，学界关于水泥土无侧限抗压强度随龄期的演化模型有了比较深入的研究。研究结果^[17-19]表明，采用双曲线函数模型建立水泥土无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 的演化模型，不仅符合实际情况，而且预测效果好。因此，本文选用如下形式的双曲线函数建模：

$$q_{u,t}^{IS} = \frac{t}{a+bt} \quad (1)$$

$$E_{50} = \frac{t}{c+dt} \quad (2)$$

其中， $q_{u,t}^{IS}$ 为等压养护下水泥土无侧限抗压强度（MPa）； E_{50} 为变形模量（MPa）； t 为养护龄期（d）； a 、 b 、 c 、 d 为模型参数。

采用双曲线模型对表 1 中不同围压的等压养护试验结果进行回归分析，结果如表 3 与图 7 所示，可以看出拟合效果良好。

表 3 等压养护下水泥土无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 回归演化模型

Table 3 Regression equation for UCS and E_{50} of cemented soil cured under isotropic stress

养护围压 σ_c /MPa	无侧限抗压强度 回归演化模型	模型参数		拟合 优度	变形模量 E_{50} 回归演化模型	模型参数		拟合 优度
		a	b			c	d	
0	$q_{u,t}^{IS} = t/(3.64 + 0.28t)$	3.64	0.28	0.992	$E_{50} = t/(0.056 + 0.0024t)$	0.056	0.0024	0.983
0.1	$q_{u,t}^{IS} = t/(3.03 + 0.29t)$	3.03	0.29	0.990	$E_{50} = t/(0.059 + 0.0017t)$	0.059	0.0017	0.989
0.2	$q_{u,t}^{IS} = t/(2.42 + 0.32t)$	2.42	0.32	0.990	$E_{50} = t/(0.050 + 0.0022t)$	0.050	0.0022	0.978
0.3	$q_{u,t}^{IS} = t/(1.49 + 0.37t)$	1.49	0.37	0.997	$E_{50} = t/(0.033 + 0.0029t)$	0.033	0.0029	0.988

基于最小二乘法对不同围压下获得的 a 、 b 、 c 、 d 四个参数（见表 3）分别进行二次拟合，得到其与围压 σ_c 的关系为：

$$a = -7\sigma_c + 3.70, R^2 = 0.98$$

$$b = 0.28 + \sigma_c^2, R^2 = 0.99$$

$$c = -0.5\sigma_c^2 + 0.072\sigma_c + 0.0562, R^2 = 0.99$$

$$d = 0.035\sigma_c^2 - 8.5 \times 10^{-3}\sigma_c + 2.35 \times 10^{-3}, R^2 = 0.93$$

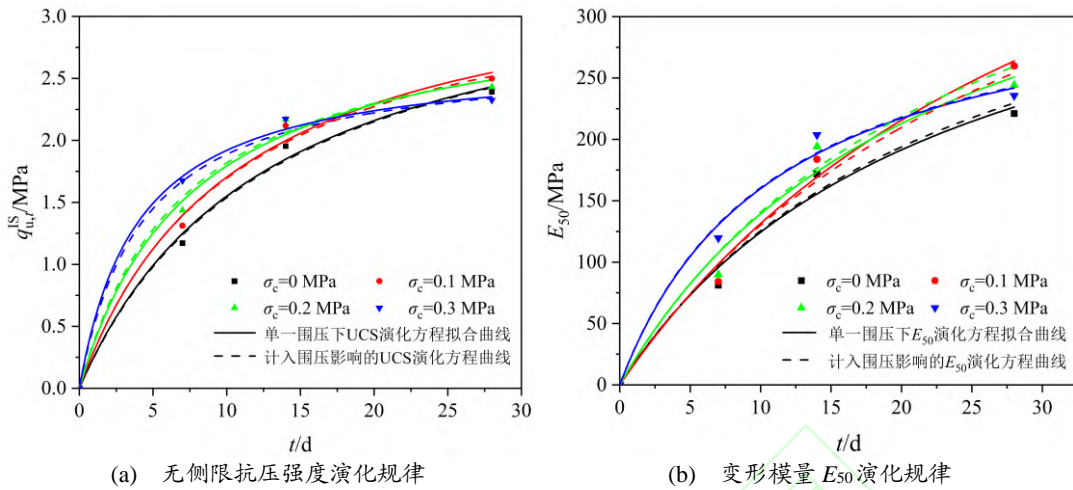


图7 不同养护围压下水泥土无侧限抗压强度与变形模量演化规律

Fig.7 The evolution of UCS and E_{50} for cemented soil cured under different confining stresses

将上述回归得到的 a 、 b 、 c 、 d 表达式分别带入式(1)和式(2)中，即可得到考虑养护围压影响的水泥土无侧限抗压强度 $q_{u,t}^{IS}$ 与变形模量 E_{50} 的演化方程：

$$q_{u,t}^{IS} = \frac{t}{0.28t + \sigma_c^2 t - 7\sigma_c + 3.7} \quad (3)$$

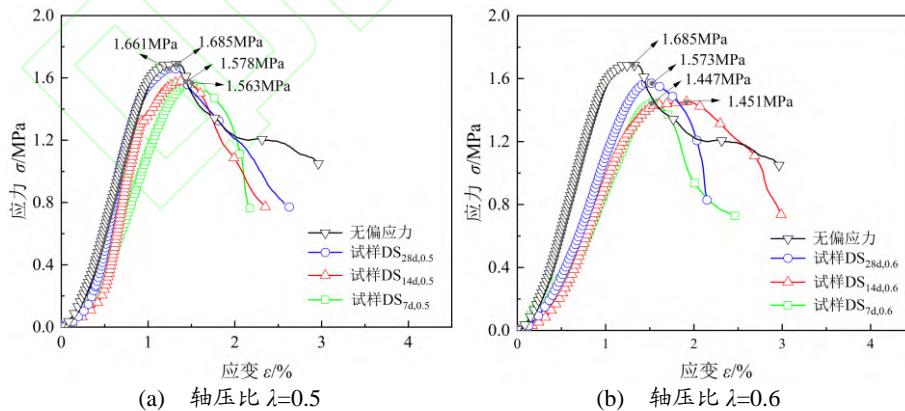
$$E_{50} = \frac{t}{0.035\sigma_c^2 t - 8.5 \times 10^{-3} \sigma_c t + 2.35 \times 10^{-3} t - 0.5\sigma_c^2 + 0.072\sigma_c + 0.0562} \quad (4)$$

3 偏压养护对水泥土力学性能的影响分析

3.1 应力-应变曲线分析

图 8 为不同偏压养护条件（径向压应力 $\sigma_{rc} = \sigma_{c0} = 0.1 \text{ MPa}$ ，轴向压应力 $\sigma_{zc} = \lambda \cdot q_{u,t \text{ load}} > \sigma_{c0}$ ）下水泥土试

样无侧限压缩试验的应力-应变曲线。由图 8 曲线可以看出，试样经受偏压养护后，其峰值无侧限抗压强度低于无偏压养护（即养护围压 $\sigma_{c0} = 0.1 \text{ MPa}$ 的等压养护）时的强度，而且随着轴压比 λ 增大，峰值强度不断减小，峰值点右移，达到峰值时的应变逐渐增大，试样的脆性逐渐变强。



(a) 轴压比 $\lambda = 0.5$

(b) 轴压比 $\lambda = 0.6$

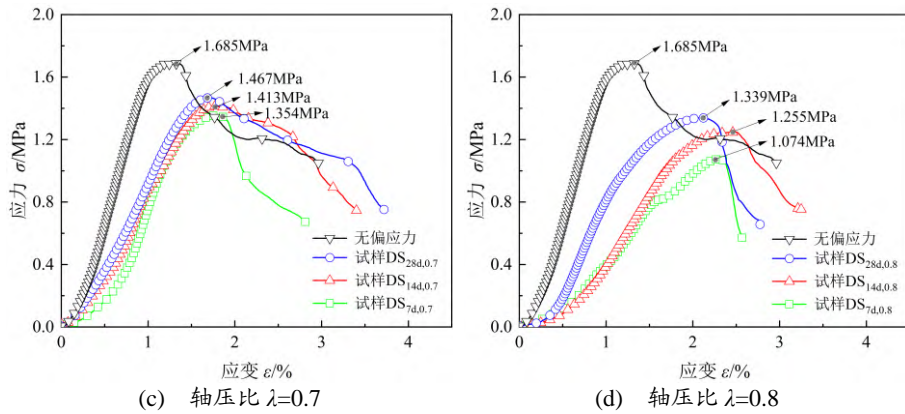


图8 不同养护应力比下养护 60d 时水泥土应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of cemented soil cured under different deviator stress ratios with 60-day curing time

3.2 偏压大小对强度的影响

水泥土试样在偏压养护条件 ($\sigma_{rc}=\sigma_{c0}=0.1\text{MPa}$, $\sigma_{zc} = \lambda \cdot q_{u,T_{load}} > \sigma_{c0}$) 下养护至龄期 60d 时, 其无侧限抗压强度和变形模量 E_{50} 随轴压比 λ 的变化规律如图 9 所示。由于水泥土试样在围压为 0.1MPa 的等压 (无偏应力) 条件下养护至 60d 时, 其无侧限抗压强度为 1.685MPa、变形模量 E_{50} 为 140.5MPa, 因此, 由表 2 和图 9 可知: 当试样经受轴压比 λ 分别为 0.5、0.6、0.7、0.8 的偏压应力养护后, 其 60d 龄期无侧限抗压强度分别平均下降了 5%、11.6%、16.2%、27.4%, 而变形模量 E_{50} 分别平均下降了 18.0%、38.4%、43.2%、56.5%。

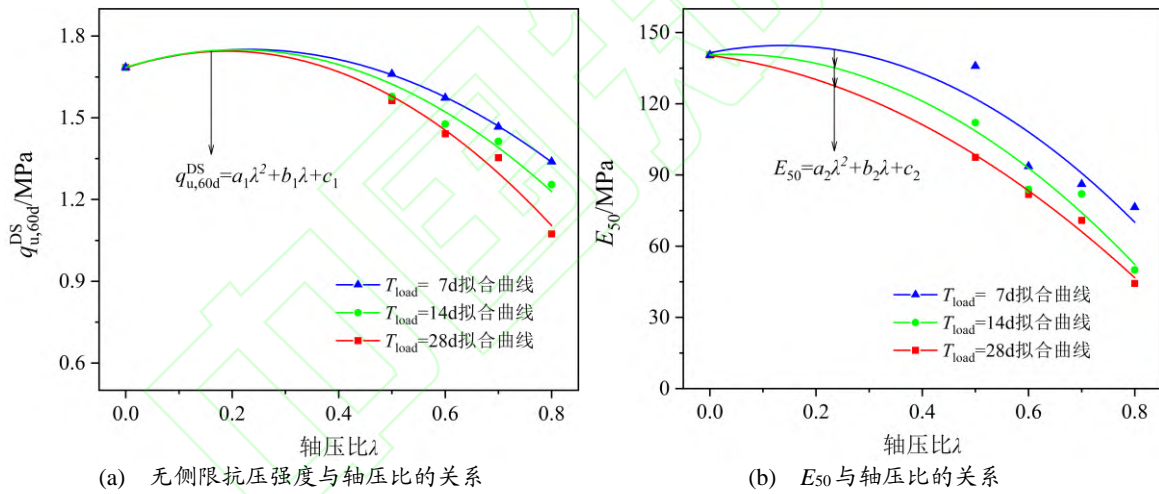


图9 不同加载龄期下无侧限抗压强度和变形模量 E_{50} 与轴压比的关系

Fig.9 Relationship of UCS and E_{50} over axial stress ratio with different curing time

通过对表 2 和图 9 所示试验结果进行回归分析发现, 无侧限抗压强度 $q_{u,60d}^{DS}$ 和变形模量 E_{50} 与轴压比 λ 存在良好的二次关系, 其回归方程见表 4, 相应的回归曲线如图 9 中曲线所示。

表4 不同加载龄期下水泥土试样无侧限抗压强度回归方程

Table 4 Regression equation for UCS of cemented soil with different curing time

加载时刻 T_{load}	无侧限抗压强度 $q_{u,60d}^{DS}$ 回归公式	拟合优度	变形模量 E_{50} 回归公式	拟合优度
7d	$q_{u,60d}^{DS} = -1.717\lambda^2 + 0.651\lambda + 1.685$	0.978	$E_{50} = -110\lambda^2 - 28\lambda + 140$	0.993
14d	$q_{u,60d}^{DS} = -1.487\lambda^2 + 0.620\lambda + 1.685$	0.951	$E_{50} = -154\lambda^2 + 12\lambda + 140$	0.966
28d	$q_{u,60d}^{DS} = -1.267\lambda^2 + 0.578\lambda + 1.685$	0.998	$E_{50} = -168\lambda^2 + 45\lambda + 140$	0.868

进一步分析图 9a 试验曲线发现: 对于无侧限抗压强度, 存在一个临界轴压比 λ_c , 当偏压养护应力较小 (即轴压比 $\lambda < \lambda_c$) 时水泥土试样强度上升, 当偏压养护应力较大 (即轴压比 $\lambda > \lambda_c$) 时水泥土试样强度

下降，即水泥土又存在“小偏压养护强度增加，大偏压养护强度降低的效应”。这种变化趋势与文献[15]的试验结果相一致。

3.3 加载时刻 T_{load} 对强度的影响

图 10 为偏压应力加载时刻 T_{load} 与 60d 龄期水泥土试样无侧限抗压强度 $q_{u,60d}^{DS}$ 的关系。在相同的轴压比 λ 下，龄期 60d 的无侧限抗压强度与变形模量 E_{50} 均随着加载时刻的增大而不断增大。可以发现，当轴压比相同时，施加荷载越晚，水泥土最终的强度越高，这说明随着水化反应的不进行，水泥土的内部结构更加稳定，承受长期荷载的能力也在变强。

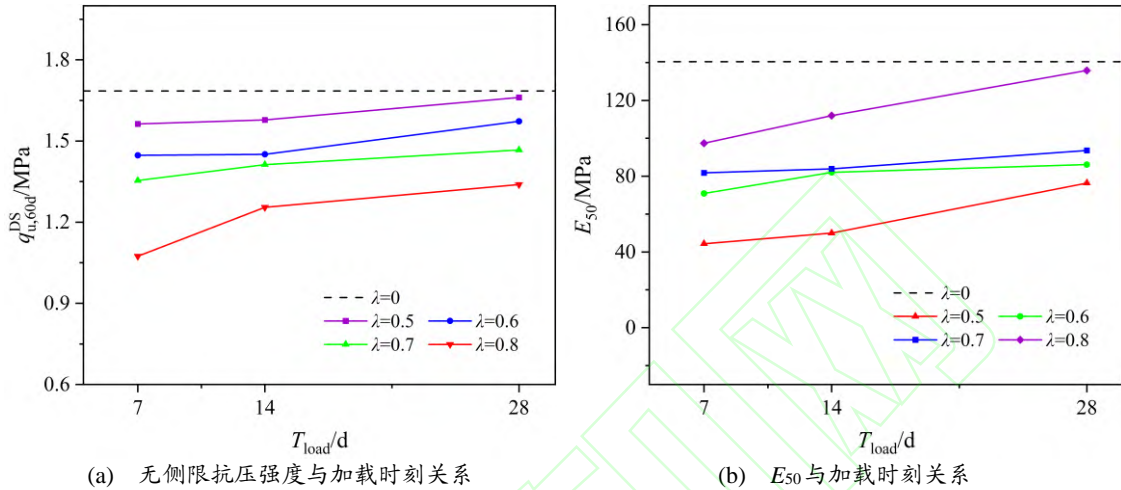


图 10 相同轴压比下无侧限抗压强度和变形模量 E_{50} 与加载时刻 T_{load} 的关系
 Fig.10 Relationship of UCS and E_{50} over curing time with different axial stress ratios

4 结论

1) 水泥土试样采用等压（养护围压 σ_c 分别为 0.1MPa、0.2MPa 和 0.3MPa）养护到 28d，其无侧限抗压强度 UCS 和变形模量 E_{50} 随围压 σ_c 的增长而减小，而且高围压（ $\sigma_c=0.3MPa$ ）养护试样的 UCS 已低于无围压养护试样的 UCS，存在“高围压养护长期强度降低效应”，但其内在机理目前尚不明确。

2) 水泥土试样采用较大轴压比 λ ($\lambda=0.5、0.6、0.7、0.8$) 的偏压养护时，其 60d 龄期的无侧限抗压强度 UCS 随轴压比 λ 的增加而降低，即水泥土又存在“大偏压养护强度降低效应”，其内在机理也有待进一步研究。

3) 基于试验结果，回归得到了水泥土在等压养护下无侧限抗压强度 UCS 和变形模量 E_{50} 的演化方程和在偏压养护下 UCS 和 E_{50} 与轴压比 λ 的经验关系式。研究成果可为工程设计与施工提供理论指导。

参考文献：

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
GONG Xiaonan. Handbook of foundation treatment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [2] 赵春彦, 黄启友, 郎锋, 等. 单因素和多因素作用下的水泥土强度评估模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2788-2795.
ZHAO Chunyan, HUANG Qiyu, LANG Feng, et al. Experimental study on strength evaluation model of cement soil under single factor and multi factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2788-2795.
- [3] 贺建清, 任虎程, 胡惠华, 等. 水泥改良软土次固结变形特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(03): 941-949.
HE Jianqing, REN Hucheng, HU Huihua, et al. Experimental study on secondary consolidation deformation characteristics of cement modified soft soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(03): 941-949.
- [4] ZHU Shimin, CHEN Changfu, CAI Huan, et al. Analytical modeling for the load-transfer behavior of stiffened deep cement mixing (SDCM) pile with rigid cap in layer soils[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 144: 104618.
- [5] JONGPRADIST P, YOUWAI S, MANORAT P, et al. Influence of curing stress on one-dimensional yielding of cement-admixed bangkok clay at high water content[J]. Soils and Foundations, 2011, 51(2): 351-357.
- [6] HSIAO D H, PHAN T A V. Experimental investigation into compressive strength of soft soil stabilization under curing stress conditions[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 10429-10446.

- [7] ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, BIAN Xiaoya. Experimental investigation on effect of curing stress on the strength of cement-stabilized clay at high water content[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(4): 921-936.
- [8] 郑少辉, 于同生, 章荣军, 等. 养护压力对水泥固化高含水率淤泥强度的影响[J]. *土木工程与管理学报*, 2018, 35(5): 115-121,133.
ZHENG Shaohui, YU Tongsheng, ZHANG Rongjun, et al. Experimental investigation on the effect of curing stress on the strength of cement stabilized mud at high water content[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2018, 35(5):115-121,133.
- [9] RABBI A T M Z, KUWANO J, DENG Jianliang, et al. Effect of curing stress and period on the mechanical properties of cement-mixed sand[J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(4): 651-661.
- [10] KUWANO J, BOON T W. Effects of curing time and stress on the shear strength and deformation characteristics of cement-mixed sand[C]/Ling HI, Callisto L, Leshchinsky D, et al. *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*. Dordrecht: Springer, 2007: 413-418.
- [11] SUZUKI M, FUJIMOTO T, TAGUCHI T. Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidation conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(4): 687-698.
- [12] YILMAZ E, BENZAAZOUA M, BELEM T, et al. Effect of curing under pressure on compressive strength development of cemented paste backfill[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(9/10): 772-785.
- [13] YILMAZ E, BELEM T, BENZAAZOUA M. Effects of curing and stress conditions on hydromechanical, geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill[J]. *Engineering Geology*, 2014, 168: 23-37.
- [14] YILMAZ E, BELEM T, BUSSIERE, BRUNO, et al. Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 75: 99-111.
- [15] 陈昌富, 朱世民, 毛凤山, 等. 水-温-力环境效应对水泥土力学特性的影响[J]. *地基处理*, 2019, 1(1): 42-47.
CHEN Changfu, ZHU Shimin, MAO Fengshan, et al. Mechanical properties of cemented clay under environmental effect of water-temperature-stress[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(1): 42-47.
- [16] CHITAMBIRA B, AL-TABBAA A, PERERA A S R, et al. The activation energy of stabilised/solidified contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141(2): 422-429.
- [17] 陈昌富, 陈兆君, 蔡焕. 基于邻域均匀抽样 Bootstrap 方法的水泥土无侧限抗压强度演化规律研究[J]. *地基处理*, 2021, 3(6): 464-474.
CHEN Changfu, CHEN Zhaojun, CAI Huan. Study on evolution law of unconfined compressive strength of cement-soil based on neighborhood uniform sampling Bootstrap method. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(6): 464-474.
- [18] 陈昌富, 陈兆君, 高松, 等. 基于 Bayesian Bootstrap 法水泥土力学性能指标演化规律区间回归分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(3): 227-234.
CHEN Changfu, CHEN Zhaojun, GAO Song, et al. Interval regression analysis of mechanical property index evolution law of cement-soil based on Bayesian Bootstrap method. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(3): 227-234.
- [19] 陈昌富, 韦思琦, 蔡焕. 温度变化对水泥土力学性能的影响[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(01): 190-199.
CHEN Changfu, WEI Siqu, CAI Huan. Effect of temperature change on mechanical properties of cement soil. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(01): 190-199.