

# 从微结构角度分析温度对水泥土强度形成的影响<sup>1</sup>

胡昕<sup>1</sup>, 洪宝宁<sup>1</sup>, 闵紫超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098)

<sup>2</sup>江苏新筑预应力工程有限公司, 江苏南京 (210003)

E-mail: [moyuan@126.com](mailto:moyuan@126.com)

**摘要:** 为研究温度变化对水泥土强度形成的影响, 将两种水泥土样分别在 25±2℃、10±2℃、0±2℃ 的温度下进行养护, 随后测试各龄期试样的无侧限抗压强度, 并拍摄不同龄期各试样的微结构图片, 提取并分析微结构特征参数。研究表明: 龄期(1~4 天内)较短时, 水泥土无侧限抗压强度对温度变化不敏感, 在 7~40 天内, 提高养护温度, 水泥土无侧限抗压强度显著增大; 随着龄期的增长, 水泥土微结构量化参数均发生了显著变化, 且具有一定的规律性; 养护温度高于 10℃ 时, 水泥土内部的水泥易于水化; 粉土土粒之间缺少结构性联结和相对较低的孔隙比造成了水泥粉土强度相对较低。

**关键词:** 水泥土; 微结构; 温度变化; 强度形成

**中图分类号:** TU411.92

## 1. 引言

水泥土材料来源广泛、价格低廉, 物理力学性能远优于原状土, 目前广泛应用于河道护坡、水池护壁、基坑支护及路基的改良和加固建筑工程的复合地基等各类工程中, 取得了良好的技术经济效益。水泥土是依靠机械力搅拌或射流冲切, 把软土与水泥浆(或粉)混拌在一起形成的。水泥加入软土后, 软土和水泥之间发生复杂的物理化学作用, 水泥土所表现出来的各种物理力学特性, 都是其内在成分和微结构改变所致, 故微结构对土的性质的变化起着决定性的作用。

水泥土强度形成的影响因素众多, 主要分为以下几类: ①拟加固原状软土的土质和特性; ②水泥等固化料的成分、种类和掺含量; ③养护环境条件和龄期; ④拟加固原状土的含水量、渗透性和施工工艺方式及水泥浆液的水灰比<sup>[1]</sup>。目前, 针对水泥掺入比、养护龄期、水泥自身特性、原状土含水量及渗透性等影响因素的研究, 国内外学者已开展了大量工作, 并取得了许多有价值的结论。有关温度变化对水泥土加固效果影响的研究, 仅赵峥嵘等<sup>[2]</sup>通过室内水泥土在不同温度条件下的单轴抗压强度试验, 从宏观上研究了温度、龄期与水泥土单轴抗压强度三者之间的关系。而考虑微结构演化的水泥土强度形成研究一般均在固定影响因素的条件下进行, 主要从以下三个角度出发: ①运用扫描电镜(SEM)、电子探针、透射电镜等手段对水泥土的微结构进行直接关系, 并结合宏观力学参数的变化对水泥土的固化机理进行分析, 如李俊才<sup>[3]</sup>、王清<sup>[4]</sup>、王文军<sup>[5]</sup>等, 这类方法往往制样技术复杂, 费用昂贵, 且不能连续观测水泥土强度形成过程中微结构的变化; ②运用压汞法、电阻率法间接测试水泥土微结构的变化, 如顾明芬等<sup>[6][7]</sup>, 这类方法往往结构要素物理意义不明确, 无法真实反映水泥土强度形成过程中微结构的演化规律; ③运用连续介质力学的方法, 建立水泥土结构模型, 如黄新等<sup>[8][9]</sup>, 这类方法对水泥土结构要素进行了过多简化, 往往不能模拟水泥土强度形成过程及其受温度、水等因素的影响。

由于上述研究不能从微结构演化角度分析温度及土性对水泥土强度形成的影响, 本文运用自主开发的微结构光学测试系统对不同养护温度下的两类水泥土的强度形成过程中微结

<sup>1</sup>本课题得到国家自然科学基金项目(No. 50279008)和江苏省交通科学研究计划项目(No. 04Y017)的资助。

构的变化进行了全程跟踪观测，拍摄了相应的图片，提取了对应的微结构量化参数，根据微结构量化参数的变化分析了水泥土的强度形成机理，并探讨了温度及土性变化对水泥土强度形成的影响。

表 1 素土的基本物理力学参数

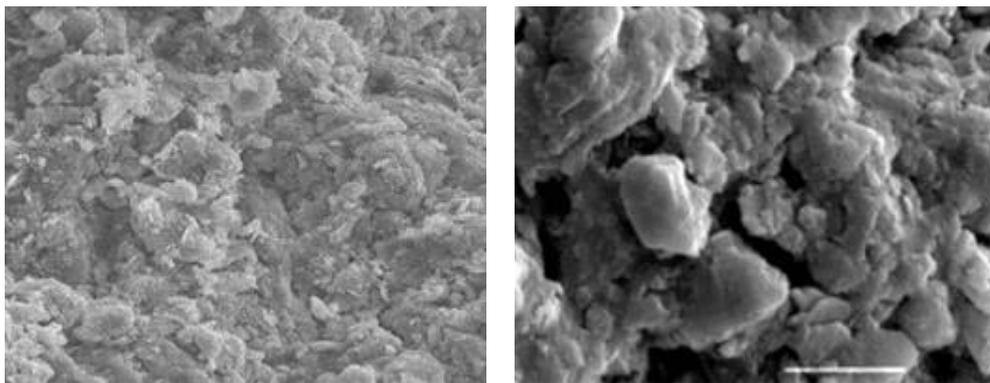
Tab.1 Basic physical mechanics parameters of plain soils

类别	天然含水率	干 密 度	密 度	液限	塑限	渗透 系数	压缩模量
	%	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	%	cm/s	MPa <sup>-1</sup>
粉土	27.8	1.52	1.94	22.2	16.7	5.6×10 <sup>-5</sup>	14.8
粘土	36.7	1.31	1.81	47.2	28.3	1.1×10 <sup>-7</sup>	2.55

表 2 水泥的主要技术指标测试值

Tab.2 Main technical criteria test data of cement

需水量 (%)	凝结时间(h)		安 定 性	胶砂强度抗折/抗压 (MPa)		
	初凝	终凝		3d	7d	28d
25.2	2	3.5	合格	4.17/22.4	5.32/29.9	6.42/38.76



(a) 粘土

(b) 粉土

图 1 未加固素土的微结构图  
Fig.2 Photomicrograph of unreinforced soils

## 2. 材料和方法

### 2.1 材料基本性质

本研究素土(粘土和粉土)取自连盐高速公路盐城段某取土坑,在进行水泥土试验之前,为了解素土的基本物理力学性质,对其进行了一系列的常规试验:含水率试验、密度试验、液塑限试验、渗透试验、颗粒级配试验和压缩试验。两种素土的基本物理力学性质见表 1。加固前的 SEM 显微结构图像如图 2 所示,可见未经加固的素土结构单元体的排列定向性十分差,结构单元体均匀分布于土中,排列紧密程度较差。水泥为双猴牌水泥:32.5P·O,其主要技术指标见表 2。

### 2.2 试验方法

试验在制样时,先将试验土料过2mm筛,然后加水调整至天然含水量,并拌合均匀,放



### 3.2 从微结构演化角度分析水泥石强度形成

上节从宏观上分析了温度及土性对水泥石强度形成的影响。考虑到水泥石力学性能的提高是通过其内部微结构变化实现的，即其内部水泥不断水化，生成的胶结物不断向颗粒及颗粒集聚体之间的孔隙延伸，使水泥石骨架更加稳定。本节将借助于微结构试验获得的微结构量化参数，从微结构量化参数的变化分析探讨温度及土性对水泥石强度形成的影响。

表3 微结构定量分析成果表  
Tab.3 Outcome table of microstructural quantitative analysis

龄期	颗粒面积比例	孔隙面积比例	颗粒定向度	颗粒分布分维	孔隙定向度	孔隙分布分维	欧拉数	颗粒圆度
天	%	%	—	—	—	—	—	—
1	69.6	30.4	1.44	0.92	1.63	0.41	0.39	0.35
7	74.6	25.4	1.47	0.79	1.61	0.50	0.47	0.50
14	81.2	18.8	1.67	0.55	1.64	0.65	0.60	0.73
26	88.1	11.9	1.64	0.37	1.51	0.82	0.73	0.89
40	91.1	8.9	1.74	0.30	1.62	0.87	0.82	0.93

#### 3.2.1 颗粒面积比例演化特性分析

图5给出了不同温度水泥石颗粒面积比例随龄期的变化曲线。从图中可以看出：

随着龄期的增大，水泥石的颗粒面积比例逐步增大，内部的孔隙、微裂缝等缺陷逐步减小，水泥石密实度增大。这主要与以下两个过程有关：①随着时间的推移，水泥不断水化，其生成物逐步向颗粒集聚体间的孔隙延伸，形成颗粒集聚体间的胶结物，导致土体内部的孔隙、微裂缝等缺陷减小，骨架稳定性增强，水泥石强度形成；②胶结性水化物或膨胀性水化物填充土颗粒间的孔隙，以及水泥水化从周边不断吸收水分，导致土体失水收缩，水泥石密实度增大。在龄期小于3天时，颗粒面积比例缓慢增大，且各养护温度下的水泥石颗粒面积比例相差不大，说明该阶段水泥石内部水泥的水化速度缓慢，且温度对其影响不大；当龄期在3~35天之间时，水泥石颗粒面积比例增大速度加快，但0℃养护的水泥石颗粒面积比例增大速度仍相对较小，说明该阶段水泥水化速度加快，且温度较低时水化速度缓慢；当龄期超过35天后，除0℃养护的水泥石外，其余水泥石颗粒面积比例均增大速度均减小，说明水泥水化速度趋缓，同时水泥石强度逐步趋于定值。

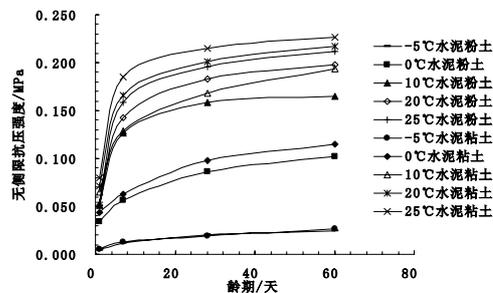


图3 一定温度下龄期与无侧限抗压强度的变化曲线  
Fig.3 Relation curve between age and uniaxial compressive strength under certain temperature

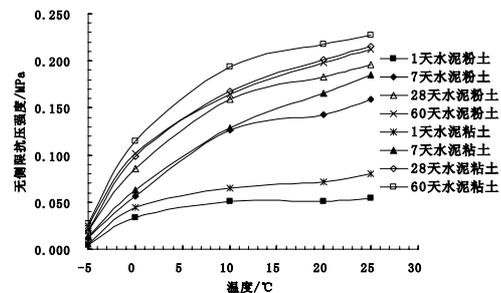


图4 一定龄期下温度与无侧限抗压强度的变化曲线  
Fig.4 Relation curve between temperature and uniaxial compressive strength under certain age

### 3.2.2 颗粒分布分维演化特性分析

颗粒分布分维反映了水泥土颗粒在平面的分布情况。一般来说，颗粒分布分维越大，说明土中颗粒分布分散，颗粒的凌乱化程度越大，颗粒集团化程度越低，土体密度越大。图 6 给出了不同温度水泥土颗粒分布分维随龄期的变化曲线。从图中可以看出：

随着龄期的增加，水泥土的颗粒分布分维总体趋于减小，表明水泥土颗粒集团化程度提高，孔隙连通率减小，使得部分孔隙孤立，水泥土的受力性能得到不断改善，这一发展趋势与水泥土颗粒面积比例的演化规律一致。龄期在 0~5 天时，颗粒分布分维缓慢减小，各养护温度下的水泥土的颗粒分布分维相差不大，在 1.80~1.95 之间变化；当龄期在 5~30 天之间时，颗粒分布分维的增大速度最快，当龄期达到 30 天后，颗粒分布分维变化趋缓，说明水泥水化主要发生在 10~30 天之间。相同养护条件下的水泥粉土的颗粒分布分维均大于水泥粘土的颗粒分布分维，说明水泥粘土的颗粒分布相对紧凑，且颗粒之间的粘性联结相对较多，黏聚力较大。养护温度超过 10℃ 后，水泥土分布分维相差不大，且变化趋势基本一致，而养护温度低于 10℃ 时，水泥土分布分维相对较小，且减小速度缓慢，说明养护温度高于 10℃ 时，水泥土内部的水泥易于水化。

### 3.2.3 欧拉数演化特性分析

欧拉数反映了土体内部颗粒之间的联结的好坏，较高的欧拉数意味着土体结构骨架稳定性较好，在外界压力的作用之下不易产生变形破坏。图 7 给出了不同温度水泥土欧拉数随龄期的变化曲线，从图中可以看出：

随着龄期的增加，水泥土的欧拉数总体趋于增大，说明水泥水化生成物增加了土体内部颗粒之间的联结，从而使得水泥土骨架稳定性增强，强度提高。各养护温度下水泥土的欧拉数均大于水泥粉土的欧拉数，同时水泥粘土欧拉数在 40 天内的增长幅度均高于水泥粉土的增长幅度，说明水泥粘土内部的水泥更易水化。养护温度对水泥土欧拉数的变化有显著影响。温度 0℃ 时，水泥土的欧拉数增大速度明显小于其他温度条件下的水泥土的欧拉数增大速度，但当温度超过 20℃ 以后，水泥土的欧拉数增大速度再次减缓，说明存在一个最佳养护温度—在该温度下养护，水泥土内部的水泥更易于水化。

### 3.2.4 颗粒圆度演化特性分析

颗粒圆度反映了土体颗粒接近于圆的程度，其值越大，颗粒形状越接近圆形。由于水泥土内部的水泥在水化的过程中，生成物沿着颗粒及颗粒集聚体的外缘生长，使颗粒的等效直径不断变大，导致水泥土颗粒圆度增大。因此水泥土颗粒圆度随龄期增长的变化情况反映了内部水泥的水化情况。图 8 给出了不同温度水泥土颗粒圆度随龄期的变化曲线，从图可以看出：

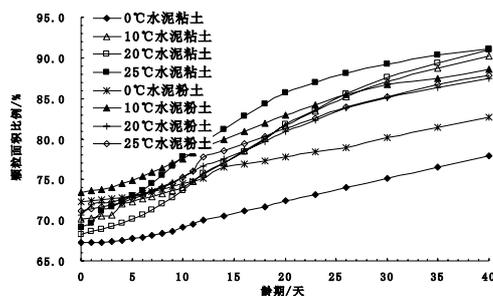


图 5 不同温度颗粒面积比例随龄期变化曲线  
Fig.5 Relation between share of particle area and ages under different curing temperatures

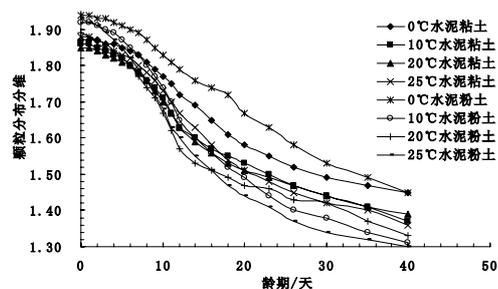


图 6 不同温度颗粒分布分维随龄期变化曲线  
Fig.6 Relation between particles' distributing fractal dimension and ages under different curing temperatures

随着龄期的增加,水泥的水化,颗粒集聚体的圆度呈上升趋势,说明颗粒长短轴差值趋于减小,颗粒形状趋向于饱满,而这种颗粒集聚体所构成的水泥石骨架抵抗外加荷载的能力增强。水泥粉土颗粒的初始圆度大于水泥粘土的初始圆度,同时随着龄期的增加,水泥石圆度的增长幅度明显小于水泥粘土的圆度增长幅度,再次验证了同等养护条件下同龄期水泥粘土内部的水泥水化更为剧烈。

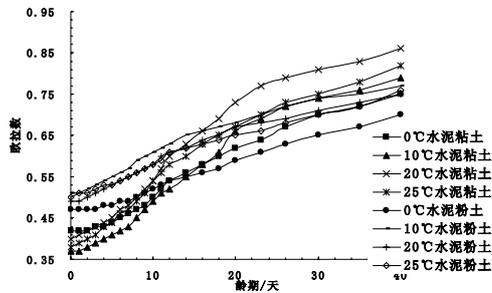


图7 不同温度欧拉数随龄期变化曲线  
Fig.7 Relation between Euler number and ages under different curing temperatures

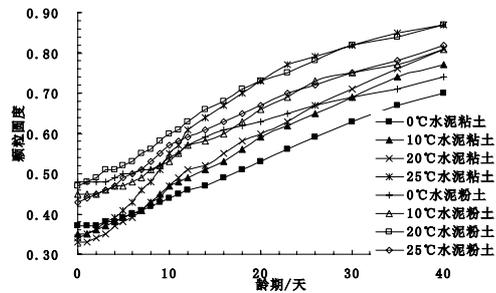


图8 不同温度颗粒圆度随龄期变化曲线  
Fig.7 Relation between particles' circularity and ages under different curing temperatures

### 3.2.5 孔隙定向度演化特性分析

孔隙定向度反映了土体孔隙排列的有序化程度。定向度越小,孔隙排列的有序性越好,越大,孔隙排列的有序性越差。图9给出了不同温度水泥石孔隙定向度随龄期的变化曲线,从图可以看出:

各组水泥石的初始定向度均大于0.55,孔隙排列初始状态较为混乱,随着龄期的增加,孔隙定向度并无明显变化规律,总体呈上下抖动状,说明水泥水化的其生成物延伸方向的任意性导致水泥石孔隙长轴不断变换,孔隙定向性不断调整,但总体上并无明显规律性。

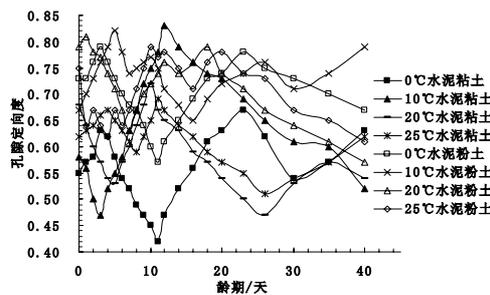


图9 不同温度孔隙定向度随龄期变化曲线  
Fig.9 Relation between pores' directional entropy and ages under different curing temperatures

## 4. 结语

通过对不同养护温度下两类水泥石内部微结构随龄期变化进行观测分析对进行观测,从水泥石微结构变化角度分析了温度及土性对水泥石强度形成的影响,主要得到了以下几点结论:

①各养护温度下水泥石的无侧限抗压强度均随龄期的延长而增加,强度形成有明显的阶段性:0~3天增大速度较小,且对养护温度变化不敏感;3~10天增大速度最大,10~60天增速减缓,然后强度趋于定值。

②随着龄期的增长,水泥石微结构量化参数均发生了显著变化,且具有一定的规律性。同时水泥石内部水泥的水化与微结构量化参数的变化有显著的相关性,即水泥石微结构量化参数的变化反映了水泥水化的程度。

③0~3 天内各养护温度下水泥石的微结构量化参数无显著变化,说明该阶段养护温度对水泥石无显著影响,土颗粒的隔离作用延缓了水泥的水化。龄期超过 3 天后,养护温度对微结构量化参数的变化有较为显著的影响。

④养护温度超过 10℃后,水泥石微结构量化参数变化相差不大,且变化趋势基本一致,而养护温度低于 10℃时,水泥石微结构量化参数则与前者有显著差别,且变化速度缓慢,说明养护温度高于 10℃时,水泥石内部的水泥易于水化。

⑤粉土土粒之间缺少结构性联结和相对较低的孔隙比造成了水泥粉土强度相对较低。

### 参考文献

- [1] Sergeyev Y M, Grabowska-Olszewska B, Osipov V I, et al. The classification of microstructures of clay soils[J]. Journal of Microscopy, 1980, 120(12): 237- 260.
- [2] 李俊才,赵泽三,高国瑞.水泥石的微结构特征及分析[J]. 成都理工学院学报,2000,27(4):388-393.(LI Jun-cai, ZHAO Ze-san, GAO Guo-rui. Analysis and microstructure characters of cement-soil[J]. Chinese Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(4):388-393.(in China)).
- [3] Dudoignon P, Pantet A, Carrara L, et al. Macro-micro measurement of particle arrangement in sheared kaolinitic matrices[J]. Geotechnique, 2001, ( 6): 493- 499.
- [4] 王清,陈慧娥,蔡可易.水泥石微观结构特征的定量评价[J].岩土力学,2003, 24(S1):12-16.(WANG Qing, CHEN Hui-e, CAI Ke-yi. Quantitative evaluation of microstructure features of soil contained some cement[J].Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2003,24(S1):12-16.(in China)).
- [5] 顾明芬.水泥石强度及其微观结构的试验性研究[J].山西建筑, 2004, 30(19):59-60.(GU Ming-fen. Testing research of unconfined compressive strength and microcosmic structure in cement soil[J]. Chinese Journal of Shanxi Architecture, 2004, 30(19): 59-60.(in China)).
- [6] 顾明芬,刘松玉,洪振舜,等.水泥石结构特性的量化研究[J].岩土力学,2005,26(11):1862-1865,1868.(GU Ming-fen, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun, et al. Quantifying research on structural characteristics of cemented soils[J].Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2005,26(11):1862-1865,1868.(in China)).
- [7] 王文军,朱向荣,方鹏飞.纳米硅粉水泥石固化机理研究[J].浙江大学学报(工学版),2005,39(1):148-153.(WANG Wen-jun, ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei. Analysis on reinforcement mechanism of nanometer silica fume reinforced cemented clay. Chinese Journal of Zhejiang University( Engineering Science),2005,39(1):148-153.(in China)).
- [8] 宁建国,黄新.固化土结构形成及强度形成机理试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2006,32(1):97-102.(NING Jian-guo, HUANG Xing. Experiment on structural formation and mechanism of strength increasing of stabilized soil[J]. Chinese Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(1):97-102. (in China)).
- [9] 黄新,宁建国,郭 晔,等.水泥含量对固化土结构形成的影响研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(4):436-441.( HUANG Xing, NING Jian-guo, GUO Ye, et al. Effect of cement content on the structural formation of stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(4):436-441.(in China)).

## Analysis on Effects of Temperature Fluctuation on Strength Formation of cement-stabilized soils in Micro-structural Terms

Hu Xin<sup>1</sup>, Hong Baoning<sup>1</sup>, Min Zichao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai university, Nanjing, China (210098)

<sup>2</sup>The Xinzhu Pre-stress Engineering Corporation of Jiangsu Province, Nanjing, China (210003)

### Abstract

In order to study effects of temperature fluctuation on gaining in strength, two distinct samples of cement-stabilized soils are conserved under  $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $10\pm 2^{\circ}\text{C}$ ,  $0\pm 2^{\circ}\text{C}$ , whereafter their uniaxial compressive strength are mensurated, their photomicrographs of different ages are shot and characteristic parameters of microstructures are pick-uped and analyzed. The study's findings indicate: when the stadium (within 1~4 day) is shorter, the uniaxial compressive strength of cement-stabilized soils doesn't vary markedly accompanying with temperature variety, while 7~40 day, advancing protected temperatures influences on their strength exaltation; accompanying with stadia increasing characteristic parameters of microstructures are all varying markedly and have certain regulation; when the curing temperature is over  $10^{\circ}\text{C}$ , the cement internal in cement-stabilized soils is easy to hydrate; because silt have no structural coupling between grains and have lower hole ratio, the cement-stabilized silt's strength is oppositely lower.

**Keywords:** cement-stabilized soils; microstructure; temperature fluctuation; gaining in strength

**作者简介:** 胡昕(1979-), 男, 新疆阿勒泰人, 博士研究生, 主要从事岩土体微结构理论和试验研究工作。