

# 水-温-力环境效应对水泥土力学特性的影响

陈昌富<sup>\*1,2</sup>, 朱世民<sup>1,2</sup>, 毛凤山<sup>1,2</sup>, 温永凯<sup>1,2</sup>

(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)

**摘 要:** 水泥土的养护环境直接关系到其力学特性。为了探究水、温度和应力等环境效应对水泥土力学特性的影响, 针对水泥固化的淤泥质黏土, 开展了三类养护环境作用(不同养护湿度和温度耦合作用、不同“水”养护环境作用以及不同竖向养护应力作用)下的水泥土无侧限抗压强度试验(UCT), 获得了不同养护环境下的水泥土试样的应力-应变曲线以及无侧限抗压强度(UCS)。根据试验结果并结合已有的研究成果, 深入探讨了水-温-力环境效应对水泥土力学特性的影响。研究表明: ①随着养护温度的提高, 水泥土的强度增大, 但其破坏模式由延性破坏转为脆性破坏; ②水泥土在开放空气环境养护的强度最大, 其次是密封空气环境养护, 最小是蒸馏水饱水环境养护, 且水泥土的似水灰比越大, “水”养护环境对其强度影响也越明显; ③对于水泥土立方体试样, 在无侧限状态下施加恒定的竖向养护应力, 其无侧限抗压强度随养护应力的增大呈先增大后减小的趋势。

**关键词:** 水泥土; 养护湿度; 养护温度; 养护应力; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0042-06

**作者简介:** 陈昌富(1963 - ), 男, 湖南祁东人, 博士, 教授, 主要从事地基处理、边坡工程及支挡结构等研究, Email: cfchen@163.com。

## Mechanical properties of cemented clay under environmental effect of water-temperature-stress

CHEN Chang-fu<sup>\*1,2</sup>, ZHU Shi-min<sup>1,2</sup>, MAO Feng-shan<sup>1,2</sup>, WEN Yong-kai<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** The curing environment has a great influence on the mechanical properties of cemented clay. For studying the mechanical properties of cemented clay under curing environmental effect of water-temperature-stress, unconfined compression test (UCT) were carried out on cemented mucky clay samples cured in three different environments, including the coupling effect of curing humidity and curing temperature, different hydraulic curing state and different curing stress. Stress-strain curves and unconfined compression strength (UCS) of those cemented clay samples cured in different environment were obtained by the UCT. The influence of the environmental effect of water-temperature-stress on mechanical properties of cemented clay was discussed based on the test results and the existed research achievements. The results demonstrated that the UCS of cemented clay increased with the increase of curing temperature, but the failure mode changed from ductile failure to brittle failure. Cemented clay cured in air had the largest UCS, the following was cured in sealing state, the least was cured in distilled water. The effect of curing environment on UCS tends to be greater to those cemented clay samples with larger quasi water-cement ratio. The UCS of cemented clay sample tends in the form of square increases first and then decreases with the increase of curing stress at unconfined state.

**Key words:** cemented clay; curing humidity; curing temperature; curing stress; unconfined compression strength

## 0 引 言

水泥土是指以水泥类胶结材料作为固化剂, 采用深层搅拌法、注浆法或者高压喷射注浆法,

将水泥浆与土体拌和而形成的固结体<sup>[1-2]</sup>。近几十年, 由水泥土组成的水泥土桩、水泥土墙、水泥

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41572298)

收稿日期: 2019-07-03

\*通讯作者

土复合管桩等工程技术,因其具备便于就地取材、施工便捷、经济耐久等优点,已被广泛应用到软弱地基加固、基坑支护、防渗止水帷幕等工程领域<sup>[1-2]</sup>。

水泥土的力学特性直接影响到其工程承载性能<sup>[1-3]</sup>。而土体特性(如类别、级配和含水率等)、固化剂特性(类别、标号和掺量等)以及养护龄期等是影响水泥土力学特性的重要因素,目前国内诸多学者针对上述因素对水泥土力学特性的影响开展了大量的试验及理论研究。Consoli等<sup>[4]</sup>基于水泥土劈裂抗拉和无侧限抗压试验结果,建立了水泥土抗拉和抗压强度预测模型;徐超等<sup>[5]</sup>研究了水泥类型及掺量对水泥土力学特性的影响;储诚富等<sup>[6]</sup>建立了考虑含水率、似水灰比和龄期三因素的水泥土抗压强度预测模型;Kang等<sup>[7]</sup>基于弯曲元测试系统,研究了养护龄期和水泥掺量等对水泥土抗压强度和剪切模量的影响;Chew等<sup>[8]</sup>利用XRD、电镜扫描等测试技术,从水泥土微观结构上研究了水泥掺入比和养护龄期对其抗压强度和渗透性的影响。有关水泥土力学特性的文献综述可参见文献[1]和[9]。

实际工程中,水泥土是在水-温-力复杂环境效应作用下凝结而成。对于环境效应“水”,因地层透水性以及地下水位的深度不同,水泥土凝结过程中的环境湿度将不同。对于环境效应“温”,由于地区、季节及地层深度的不同,水泥土凝结时的环境温度将不同,此外,水泥土在凝结过程中因水泥水化反应放出热量,也将导致水泥土的实际环境温度升高<sup>[10]</sup>。对于环境效应“力”,由于地层中水泥土的凝结时间长,因此它在凝结时除受到地层压力作用外,还可能受到上部静力荷载、交通荷载等作用。而目前,水泥土在水-温-力耦合的环境效应(养护环境)下的力学特性及其变化规律尚不明确,需开展进一步的研究。

本文针对水泥固化的淤泥质黏土,开展三类养护环境作用(不同养护湿度和温度耦合作用、不同“水”养护环境作用以及不同竖向养护应力作用)下的水泥土无侧限抗压强度试验(unconfined compression test, UCT试验),对由试验获得的各类养护环境作用下的水泥土的应力-应变曲线及无侧限抗压强度(UCS)进行分析,并结合现有的研究成果,探讨水-温-力环境效应对水泥土力学特性的影响。

## 1 水-温环境效应作用下水泥土的力学特性

### 1.1 试验用料

试验所用土料为湘江河漫滩的淤泥质黏土,测得其物理力学性质如下:液限 $w_L=46.8\%$ 、塑限 $w_p=22.2\%$ 、塑性指数 $I_p=24.6$ 、比重 $d_s=2.69$ 、不均匀系数 $C_u=5.0$ 、曲率系数 $C_c=0.648$ 、不排水抗剪强度 $c_u=20.4$  kPa,级配曲线如图1。

试验所用水泥为南方水泥有限公司所产的P.O 42.5级普通硅酸盐水泥。

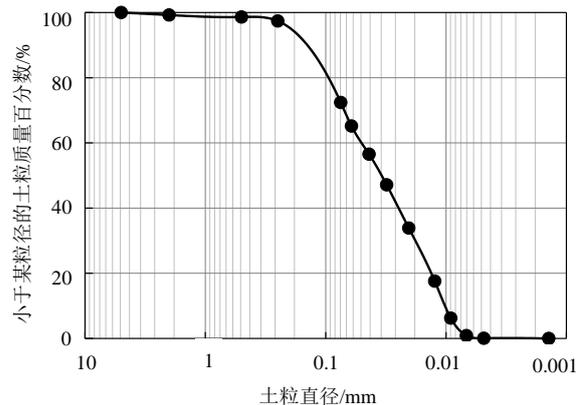


图1 级配曲线

Figure 1 Particle size distribution curve

控制水泥土试样养护湿度的材料为颗粒状硅胶干燥剂,颗粒直径2~4 mm,吸水率可达其质量的30%。

### 1.2 水-温耦合环境效应对水泥土力学特性的影响

利用硅胶干燥剂控制试样的养护湿度来模拟环境效应“水”;利用恒温箱控制试样的养护温度来模拟环境效应“温”。试样的制备过程如下:

(1)按照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233-2011)<sup>[11]</sup>制作三组(3个/组)圆柱形的水泥土试样,三组试样的配合比均为:水泥掺入比 $\alpha_w$ (即水泥与被加固湿土的质量之比)为20%、含水率 $w$ (即被加固湿土中的水与干土的质量之比)为0.60,试样直径 $d=39.1$  mm、高度 $h=80$  mm。

(2)将制作好的试样在恒温箱中以4°C的温度密封养护24 h,以保证其成型;待试样拆模后,在其外周布置干燥剂,并控制养护温度,使试样在不同湿度及温度下继续密封养护10 d,三组脱模试样在水-温耦合环境效应下的具体养护方案如表1。

表1 水-温耦合环境效应的水泥土试样养护方案

Table 1 Curing program for cemented clay samples coupling in humidity and temperature

组别	1组	2组	3组
养护温度	4°C	4°C	25°C
养护湿度	无干燥剂	80 g 干燥剂/样	80 g 干燥剂/样

试样养护完成后,利用万能试验机对其进行无侧限抗压强度测试(UCT),测得三组水泥土试样的应力-应变曲线如图2,对应的无侧限抗压强度如图3。

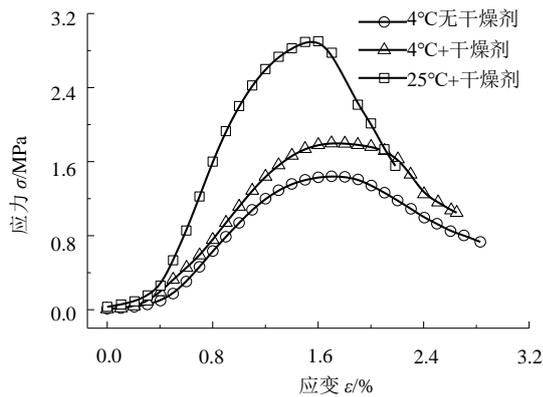


图2 不同水-温养护环境下水泥土应力-应变曲线

Figure 2 Stress-strain curves of cemented clay samples curing in different humidity and temperature

由图2可知,养护环境温度为4°C的干燥或湿润环境下,水泥土的破坏模式均为延性破坏;而养护环境温度为25°C的干燥环境下,水泥土的破坏模式接近于脆性破坏。这表明,随着养护环境温度的提高及养护湿度的下降,水泥土的破坏模式将由延性破坏渐转为脆性破坏。

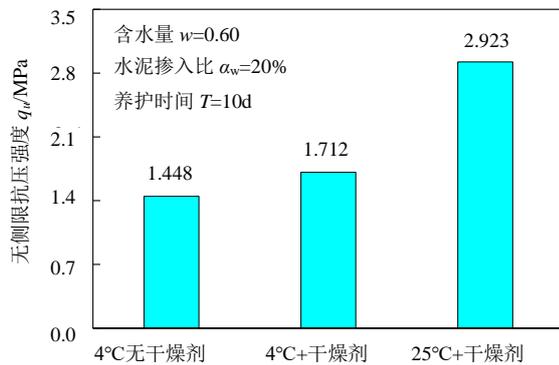


图3 不同水-温养护环境下水泥土无侧限抗压强度

Figure 3 UCS of cemented clay samples curing in different humidity and temperature

由图3可知,干燥养护环境下,养护环境温度由4°C提高到25°C,水泥土的无侧限抗压强度 $q_u$ 将提高70%;而在4°C养护环境温度下,水泥土的无侧限抗压强度 $q_u$ 在干燥养护环境比湿润

养护环境高18%。由此可知:水泥土的抗压强度随养护环境温度的提高而增加;而且相比于湿润养护环境,干燥养护环境下水泥土的抗压强度要更大。

此外,胡昕等<sup>[12]</sup>研究发现:随着养护温度的增加,中养护龄期(3~35 d)水泥土的颗粒面积比例增长快速,水泥水化反应的速度加快,水泥土的抗压强度显著提高,而高龄期或低龄期下,水泥土抗压强度增长缓慢。章荣军等<sup>[10]</sup>研究结果却表明,对于水泥固化的疏浚海泥,养护温度为23~48°C时,其初期(3 d)及终期(365 d)无侧限抗压强度均随养护温度的提高而明显增加。这与Clare等<sup>[13]</sup>研究结果相似。

为探究养护温度对水泥土强度影响的机理,Noble等<sup>[14]</sup>还开展了水泥土的XRD试验,其结果表明,养护温度由25°C提高至79°C后,水泥土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度显著降低,这说明随着养护温度的提高,水泥土中水泥与水的水化反应速率明显提高,与黏土颗粒中的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等开展火山灰反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也增多,由此在机理揭示了养护温度提高对水泥土强度提高的原因。

### 1.3 “水”养护环境对水泥土力学特性的影响

实际情况中,因地层排水状况及地下水位的不同,水泥土可能处在饱水、湿润或干燥的地层环境中完成凝结。为进一步研究“水”养护环境对水泥土力学特性的影响。按1.2节水泥土试样的制备方法,制备两种不同配合比的水泥土立方体试样,试样尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,试样配合比分别为:(1)水泥掺入比 $\alpha_w=15\%$ 、含水率 $w=0.60$ ,似水灰比(即试样中的水与水泥的质量之比) $\alpha=2.5$ ;(2)水泥掺入比 $\alpha_w=20\%$ 、含水率 $w=0.65$ ,似水灰比 $\alpha=2.0$ 。每种配合比均设置三种不同“水”养护环境,即:蒸馏水饱水环境、开放空气环境及密封空气环境。试样制备完成后,在25°C温度下养护28 d,通过UCT测试,测得其无侧限抗压强度如图4。

由图4可知,对于似水灰比 $\alpha$ 分别为2.5和2.0的上述两组水泥土试样,相对于饱水养护环境,开放空气环境养护的水泥土无侧限抗压强度分别大50.8%和26.9%,而密封空气环境养护的无侧限抗压强度则分别大14.2%和4.1%。由此可知,两种配合比下,都是开放空气环境养护的水泥土抗压强度最大,其次是密封空气环境养护的,最小是蒸馏水饱水环境养护的。

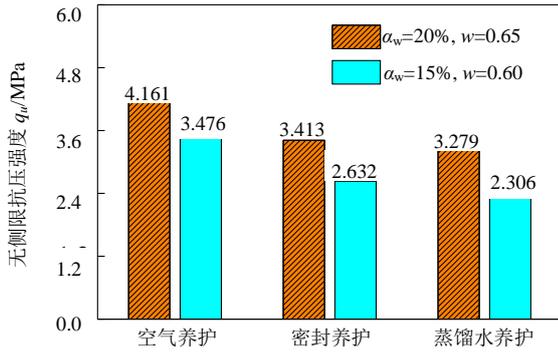


图4 不同“水”养护环境下水泥土无侧限抗压强度

Figure 4 UCS of cemented clay samples curing in different humidity

宫必宁等<sup>[15]</sup>也曾测试过水和空气环境中养护的含水率为0.35、水泥掺入比为15%的水泥土无侧限抗压强度,得到空气环境养护下水泥土抗压强度最大。

此外,水泥土的配合比不同,“水”养护环境对其抗压强度的影响程度也不同。本文试验结果即表明,水泥土的似水灰比越大,“水”养护环境对其抗压强度的影响也越明显。

## 2 不同养护应力作用下水泥土的力学特性

按照1.2节制样方法制作六组(3个/组)水泥掺入比 $\alpha_w=15\%$ 、含水率 $w=0.75$ 的水泥土立方体试样,试样尺寸为 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$ ,如图5所示。试样制作完成后密封养护7d,以保证试样成型并具有一定的强度。取其中一组试样进行UCT测试,测得其密封养护7d时的无侧限抗压强度 $q_{u,7d}$ 为0.592 MPa。



图5 脱模后的水泥土立方体试样

Figure 5 Cemented clay samples after demolding

利用单联杠杆固结仪对剩余5组已密封养护7d的水泥土立方体试样在无侧限状态下分别施加0 kPa、90 kPa、180 kPa、270 kPa和360 kPa

的恒定竖向养护应力 $p$ ,对应的养护应力比 $R_a$ (即竖向养护应力 $p$ 与密封养护7d时的无侧限抗压强度 $q_{u,7d}$ 之比)分别为0、0.15、0.30、0.45和0.60。需说明的是,施加养护应力前,在试样一侧标记养护应力 $p$ 的作用方向,并在其外侧套一层透明的密封袋,以保证试样仍处于密封状态;此外,试样顶部放置钢垫板,以此确保养护应力能够均匀作用于试样的顶面,如图6。

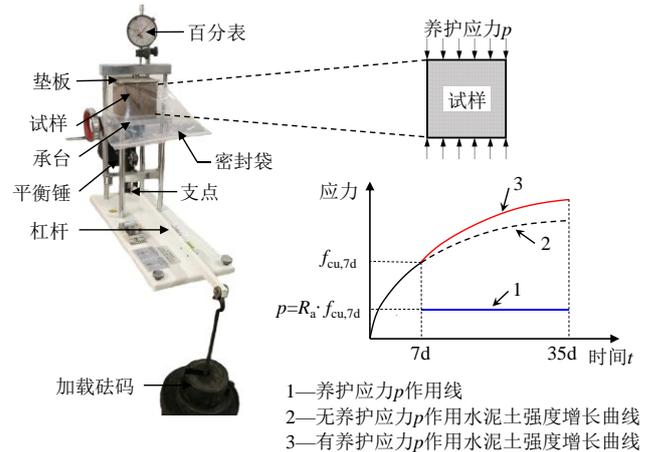


图6 水泥土试样应力养护装置及方法

Figure 6 Stress curing device and method of cemented clay samples

水泥土试样在应力养护28d后,卸除养护应力 $p$ ,并对其开展UCT测试,测取5组不同养护应力作用下的水泥无侧限抗压强度 $q_u$ 如图6所示。

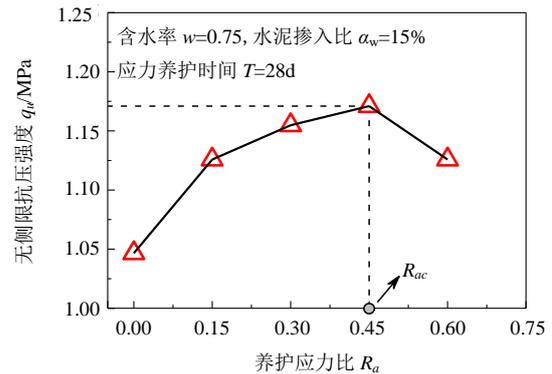


图7 不同养护应力下水泥土无侧限抗压强度

Figure 7 UCS of cemented clay samples curing in different stress

由图7可知,对于水泥土立方体试样,在无侧限状态下施加恒定的竖向养护应力,存在一个临界养护应力比 $R_{ac}$ (本文试验测得 $R_{ac}=0.45$ ),当养护应力比 $R_a$ 小于 $R_{ac}$ 时,水泥土无侧限抗压强度 $q_u$ 随养护应力 $p$ 增大而增大;而当养护应力

比  $R_a$  大于  $R_{ac}$  时, 水泥土无侧限抗压强度  $q_u$  开始降低。

章荣军等<sup>[16]</sup>和 Yilmaz 等<sup>[17]</sup>开展了养护应力对高含水率水泥土力学特性影响的试验研究, 其结果表明, 水泥土在完全侧限的状态下, 无论是一次施加恒定的竖向养护应力<sup>[16]</sup>或分级施加竖向养护应力<sup>[17]</sup>, 水泥土的抗压强度均随养护应力的增大而增大。然而, 对于混凝土棱柱体试件(尺寸为: 40 mm×40 mm×160 mm), 在无侧限状态下持续施加养护压应力, 并保证作用于混凝土试件上的养护压应力与混凝土试件的预估抗压强度保持恒定, 试件的劈裂抗拉试验及无侧限抗压试验等结果表明: 存在一个临界养护压力值, 养护压力低于该值时, 混凝土的力学特性将提高, 而超过该值时混凝土的力学特性将降低<sup>[18]</sup>。

实际工程中, 水泥土在凝结过程中除受地层应力外, 还会受到上部静力荷载、交通循环荷载等作用, 这些应力组合后, 可形成有拉剪、压剪等状态。水泥土在养护过程中承受的各类应力对其后期力学特性都有何影响, 目前仍不明确, 需要开展进一步的研究。

### 3 结 论

(1) 随着养护温度的提高, 水泥土的抗压强度增大, 其破坏形式也渐由延性破坏转为脆性破坏, 此外, 而相比于湿润的养护环境, 干燥的养护环境则更有利于水泥土强度的提高。

(2) “水”养护环境对水泥土力学特性的影响显著, 具体表现为: 水泥土在开放空气环境养护下的抗压强度最大, 其次是密封空气环境养护, 最小是蒸馏水饱水环境养护, 且水泥土的似水灰比越大, “水”养护环境对其强度影响也越明显。

(3) 对于水泥土立方体试样, 在无侧限状态下施加恒定的竖向养护应力, 其无侧限抗压强度随养护应力的增大呈先增大后减小的趋势。

(4) 实际工程中, 水泥土的养护环境更为复杂, 是水、温度和应力等耦合作用, 下一步将研发水-温-力耦合环境下的水泥土试样室内养护装置, 以研究各养护环境因素耦合作用下的水泥土力学特性。

### 参考文献

[1] 龚晓南. 地基处理手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

- [2] 陈昌富. 地基处理(第二版)[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016.
- [3] Changfu Chen, Genbao Zhang, Jorge Gabriel Zornberg, et al. Interface behavior of tensioned bars embedded in cement-clay mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 840-853.
- [4] Consoli N C, Rosa D A, Cruz R C. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty clay[J]. Engineering Geology, 2011, 122: 328-333.
- [5] 徐超, 郭宏峰, 杨晓明, 等. 普硅水泥和矿渣水泥加固滨海软土效果对比分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2737-2740.
- [6] 储诚富, 洪振舜, 刘松玉, 等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 645-649.
- [7] Kang G, Tsuchida T, Kim Y. Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 71-84.
- [8] Chew S H, Kamruzzaman A H M, Lee F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(7): 696-706.
- [9] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [10] Zhang R J, Lu Y T, Tan T S, et al. Long-term effect of curing temperature on the strength behavior of cement-stabilized clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(8): 04014045
- [11] JGJ/T 233-2011. 水泥土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 胡昕, 洪宝宁, 闵紫超. 从微结构分析温度对水泥土强度形成的影响[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(5): 628-634+640.
- [13] Clare K E, Pollard A E. The effect of curing temperature on the compressive strength of clay-cement mixtures[J]. Géotechnique, 1954, 4(3): 97-106.
- [14] Noble D F, Plaster R W. Final report: reaction in portland cement-clay mixtures[J]. Rep. No. VHRC, 1980: 70-R13.

- [15] 宫必宁, 李淞泉. 软土地基水泥深层搅拌加固土物理力学特性研究[J]. 河海大学学报, 2000, 28(2): 101-105.
- [16] Rongjun Zhang, Junjie Zheng, Xiaoya Bian. Experimental investigation on effect of curing stress on the strength of cement-stabilized clay at high water content[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12: 921-936.
- [17] 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.
- [18] 王军, 柏云, 李忠梅, 等. 养护期间持续增加压应力作用的混凝土力学特性[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(22): 6621-6624.

## 简 讯

### 第二届全国可回收锚杆技术研讨会暨锚杆回收技术与产业联盟（筹）成立大会成功召开

2019年5月19日第二届全国可回收锚杆技术研讨会暨锚杆回收技术与产业联盟（筹）成立大会在杭州中豪国际酒店顺利召开。

大会由浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心、锚杆回收技术与产业联盟（筹）共同主办，中国岩石力学与工程学会技术咨询工作委员会、福建省土木工程建筑行业协会、广东省工程勘察设计行业协会基坑边坡与地基处理专业委员会、杭州市土木建筑学会、深圳市土木建筑学会岩土工程专业委员会、山东省城市地下工程支护及风险监控工程技术研究中心、华东交通大学、山东大学、郑州大学、中国岩土网等28家企业高校联合协办。中国工程院院士龚晓南、浙江大学副校长王立忠、天津大学郑刚教授、全国工程勘察设计大师王卫东、全国工程勘察设计大师丘建金、杭州市建委副总工余子华、杭州市土木建筑学会副秘书长陈雪仙等300余位来自全国各地高校企业单位的专家学者及工程技术人员出席了本次大会。5月20日，全国锚杆回收技术与产业联盟（筹）

专家委员会管理条例规程讨论修订的理事会议召开。会议指出，随着行业环境的深刻变化，行业的客户端正由分散向集中过渡，与此相对应，行业的主机制造企业的集中度也在进一步加强，这种态势对行业的有序竞争是有利的；各企业应基于自身的特点，深耕细分市场，紧贴市场进行差异化经营；进一步正确认识本行业的特征，在经营理念及经营实践中回归行业特征，以工法带动设备及其技术的开发应用，真正满足施工客户端“高效、可靠、实用、低成本”的需求。

本次会议是继2018年9月在甘肃兰州召开的第一届全国可回收锚杆技术研讨会之后的又一次盛会，会议期间成立全国锚杆回收技术与产业联盟，本次盛会受到了全国各大专院校、科研院所、可回收锚具制造厂商、设计单位、施工单位、检测单位和各地政府主管部门的专家学者及工程技术人员鼎力支持，并现场围绕可回收锚杆的新工艺、新产品、新理论和新经验进行了交流与分享，从而更好地为工程建设服务。