



Experimental Study on Influencing Factors of Mixing Solidification Strength of Marine Soft Soil

Zhang Qijun^{1,2}, Wang Zhiqiang³, Xiao Huijin⁴, Feng Jialiang¹, Qiao Fengyang¹, Bai Xiaoyu^{2,*}

¹Qingdao Yegao Construction Engineering Co., Ltd., Qingdao, China

²School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China

³Shandong Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan, China

⁴Qingdao Ping An Engineering Management Consulting Co., Ltd., Qingdao, China

Email address:

1172385689@qq.com (Zhang Qijun), qdygjsh@163.com (Wang zhiqiang), 285844910@qq.com (Xiao Huijin), fengjialiang21@163.com (Feng Jialiang), 1210042637@qq.com (Qiao fengyang), baixiaoyu538@163.com (Bai Xiaoyu)

*Corresponding author

To cite this article:

Zhang Qijun, Wang Zhiqiang, Xiao Huijin, Feng Jialiang et al. (2024). Experimental Study on Influencing Factors of Mixing Solidification Strength of Marine Soft Soil. *Science Discovery*, 12(3), 47-53. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20241203.12>

Received: 5 May 2024; Accepted: 4 June 2024; Published: 13 June 2024

Abstract: It is a common problem that the soft soil solidified strength by mixing is low. In order to search for the sensitive factors that affect the solidified strength, a certain marine soft soil is taken as an object, four influencing factors, such as solidified material and its dosage, mixing uniformity, water-cement ratio and curing environment, were selected for experimental study, the results show that: (1) the effect of the curing material and its content on the curing strength is obvious: the curing agent of HR soft clay is 183-212% of the cement curing strength, and the curing strength of the same kind of curing material with 20% is 25-44% higher than that of 15%. 2 mixing uniformity has a significant effect on the curing strength: the curing strength of slurry and soft soil after mixing for 1 minute is very different, and the average strength is only 10% of the full mixing strength. The average strength of the three-minute-agitation was 49-50% of the full-agitation strength, while the average strength of the six-minute-agitation strength was 92-93% of the full-agitation strength. 3 the effect of water-cement ratio on the curing strength is obvious: the curing strength decreases by 24-47% when the water-cement ratio is 1.0 vs 0.6, and by 75-80% when the water-cement ratio is 3.0 vs 0.6. 4 curing environment has obvious influence on curing strength: compared with standard curing condition, curing strength of low temperature curing condition is reduced by 52-57%. This study has important guiding significance for soft soil foundation treatment and solidified soil based on soft soil.

Keywords: Soft Soil Curing, Curing Strength, HR Curing Agent, Mixing Uniformity, Curing Conditions

海相软土搅拌固化强度影响因素的试验研究

张启军^{1,2}, 王志强³, 肖辉瑾⁴, 冯家亮¹, 乔凤阳¹, 白晓宇^{2,*}

¹青岛业高建设工程有限公司, 青岛, 中国

²青岛理工大学, 土木工程学院, 青岛, 中国

³山东省路桥集团有限公司, 济南, 中国

⁴青岛平安工程管理咨询有限公司, 青岛, 中国

邮箱

1172385689@qq.com (张启军), 553421905@qq.com (王志强), 285844910@qq.com (肖辉瑾), fengjialiang21@163.com (冯家亮), 1210042637@qq.com (乔凤阳), baixiaoyu538@163.com (白晓宇)

摘要: 软土搅拌固化强度低是一个普遍存在的问题, 为探寻影响固化强度的敏感因素, 以某一海相软土为对象, 选取了固化材料及掺量、搅拌均匀性、水灰比、养护环境四个影响因素进行了试验研究, 试验结果表明: ①固化材料及掺量对固化强度影响明显: HR软土固化剂为水泥固化强度的183-212%; 同种固化材料掺量20%比15%的固化强度提高

25-44%。②搅拌均匀性对固化强度影响显著：浆液与软土搅拌时间1分钟的固化强度，差异性非常大，平均强度仅占充分搅拌强度的10%；搅拌时间3分钟的固化强度，有差异性，平均强度占充分搅拌强度的49-50%；搅拌时间6分钟的固化强度差别较小，平均强度占充分搅拌强度的92-93%。③浆液水灰比对固化强度影响明显：水灰比1.0与0.6相比，固化强度降低24-47%；水灰比3.0与0.6相比，固化强度降低75-80%。④养护环境对固化强度影响明显：低温养护条件与标准养护条件相比，固化强度降低了52-57%。此项研究对于软土地基处理、以软土为基材的固化土具有重要的指导意义。

关键词：软土固化，固化强度，HR固化剂，搅拌均匀性，养护条件

1. 引言

地基处理中，搅拌桩由于其速度快且经济的优点，受到设计和建设方的青睐，是常用的处理方法[1]，通常使用的固化材料是水泥。对于粉土、砂性土，水泥与其搅拌后的固化效果较好。但对于软土，采用常规工艺的水泥搅拌桩的强度很差，有些水泥土甚至取不出芯、几乎没有强度。设计人员为了提高水泥土的强度，将水泥设计用量一再加大，使用了大量的水泥，但效果仍不理想[1-3]，高碳低效，亟需解决。

有研究发现，滨海软土中有机质含量高，且富含侵蚀性离子，在水泥浆液的体系中，有机质和氯离子、硫酸根离子等侵蚀性离子延缓了水泥的水化过程。其次，由于有机质的分解作用，使得水泥水化产物解体。因此，有机质使软土具有较大的水溶性、塑性、高膨胀性与低渗透性，对水泥软土加固体效果产生了不利的影响[4-6]。根据相关资料，无机类土壤固化剂依靠自身水解，产生N-A-S-H根、C-S-H凝胶、Aft晶体、CH晶体等水化物。水化物与土颗粒发生化学反应，生成片状、纤维状或针状结构，或形成膨胀性物质填充颗粒间孔隙，同时将土中大量的自由水转化为结晶水，最终形成稳定的连接增加软土加固体强度[7]，固化效果比传统的水泥要好。为进一步研究水泥搅拌固化软土强度低的影响因素，同时对市面上应用于软土地质的土壤固化剂[8]材料性能进行验证，进行试验研究。

本试验拟定了影响海相软土搅拌固化强度的几个主要因素：固化材料及掺量、搅拌均匀性、水灰比、养护条件等。

2. 工程试验

本试验土样取自青岛市上合胶州示范区的软土场区，为第四系全新统海相沼泽化层，埋深3-5m，土层为淤泥质粉质黏土，土体主要物理力学参数如表1所示。固化材料采用青岛即墨中联P.O42.5水泥、青岛慧睿科技公司HR软土固化剂两种材料。其中HR软土固化剂是一种无机胶凝材料，主要成分包括CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃以及外加剂（含量见表2）。

主要试验设备包括：立式搅拌机，标养箱，试验模具（70.7mm³），压力试验机等。

试验方法：①两种固化材料：P.O42.5水泥，HR软土固化剂；②两种掺量：15%，20%；③四种搅拌时间：1分钟，3分钟，6分钟，20分钟；④四种水灰比：0.6，1.0，3.0；⑤两种养护条件：标准养护（温度20℃，湿度95%），低温养护（温度10℃，湿度50%）；⑥四个养护龄期：3天，7天，14天，28天。

通过以上试验组合进行对比试验，根据设定的影响因素制定试验参数表3-6。

表1 土体物理力学参数。

指标	平均值
含水率（%）	35.10
密度（g/cm ³ ）	1.82
孔隙比	1.09
液限（%）	32.10
塑限（%）	15.90
黏聚力（kPa）	9.30
内摩擦角（°）	2.80

表2 HR软土固化剂成分表。

成分名称	氧化钙	二氧化硅	三氧化二铝	氧化镁	三氧化二铁	其它无机物	外加剂
含量	45-60%	20-35%	5-15%	4-10%	1-5%	2-10%	1-5%

表3 不同固化材料及掺量对比试验参数表。

试验样本	配合比		拌和及养护条件				
	P.O42.5水泥（kg）	HR软土固化剂（kg）	软土（kg）	自来水（kg）	水灰比	拌和时间（min）	养护条件
P15标	2.25		15	1.35	0.6	20	温度20℃，湿度95%
P20标	3		15	1.8	0.6	20	温度20℃，湿度95%
H15标		2.25	15	1.35	0.6	20	温度20℃，湿度95%
H20标		3	15	1.8	0.6	20	温度20℃，湿度95%

表4 不同搅拌时间对比试验参数表。

试验样本	配合比		拌和及养护条件				
	P.O42.5水泥 (kg)	HR软土固化剂 (kg)	软土 (kg)	自来水 (kg)	水灰比	拌和时间 (min)	养护条件
P20标-1	3.0	3.0	15	1.8	0.6	1	温度20℃, 湿度95%
P20标-3	3.0		15	1.8	0.6	3	温度20℃, 湿度95%
P20标-6	3.0		15	1.8	0.6	6	温度20℃, 湿度95%
P20标-20	3.0		15	1.8	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
H20标-1			15	1.8	0.6	1	温度20℃, 湿度95%
H20标-3			15	1.8	0.6	3	温度20℃, 湿度95%
H20标-6			15	1.8	0.6	6	温度20℃, 湿度95%
H20标-20			15	1.8	0.6	20	温度20℃, 湿度95%

表5 不同水灰比对比试验参数表。

试验样本	配合比		拌和时间及养护条件				
	P.O42.5水泥 (kg)	HR固化剂 (kg)	土料 (kg)	水 (kg)	水灰比	拌和时间 (min)	养护条件
P20标-0.6	3.00	3.00	15.00	1.80	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
P20标-1.0	3.00		15.00	3.00	1.0	20	温度20℃, 湿度95%
P20标-3.0	3.00		15.00	9	3.0	20	温度20℃, 湿度95%
H20标-0.6			15.00	1.80	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
H20标-1.0			15.00	3.00	1.0	20	温度20℃, 湿度95%
H20标-3.0			15.00	9	3.0	20	温度20℃, 湿度95%

表6 不同养护条件的试验参数表。

试验样本	配合比		拌和时间及养护条件				
	P.O42.5水泥 (kg)	HR固化剂 (kg)	软土 (kg)	自来水 (kg)	水灰比	拌和时间 (min)	养护条件
P15标	2.25	2.25	15.0	1.4	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
P15低	2.25		15.0	1.4	0.6	20	温度10℃, 湿度50%
P20标	3.00		15.0	1.8	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
P20低	3.00		15.0	1.8	0.6	20	温度10℃, 湿度50%
H15标			15.0	1.4	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
H15低			15.0	1.4	0.6	20	温度10℃, 湿度50%
H20标			15.0	1.8	0.6	20	温度20℃, 湿度95%
H20低			15.0	1.8	0.6	20	温度10℃, 湿度50%

3. 试验数据分析

3.1. 不同固化材料及掺量固化强度对比分析

当固化材料掺量为软土的15%、标准养护条件时，掺HR固化剂的固化强度与掺水泥的固化强度相比，3天强度提高了265%，7天强度提高了219%，14天强度提高了112%，28天强度提高了112%。

当固化材料掺量为软土的20%、标准养护条件时，掺HR固化剂的固化强度与掺水泥的固化强度相比，3天强度提高了241%，7天强度提高了131%，14天强度提高80%，28天强度提高了83%。

通过图1可以看出，HR固化剂的对软土的固化性能与水泥的固化性能相比，28天强度提高了83-112%；HR固化剂的早期固化效果尤为明显，3天强度可提高2.5倍

左右。说明在同掺量、同搅拌条件、同养护条件下，HR固化剂与水泥对软土的固化效果相比，固化强度有非常显著的提升。

当固化材料为水泥，充分搅拌标准养护条件下，掺量20%与掺量15%的固化强度相比，3天强度提高了63%，7天强度提高了80%，14天强度提高了58%，28天强度提高了44%。

当固化材料为HR软土固化剂，充分搅拌标准养护条件下，掺量20%与掺量15%的固化强度相比，3天强度提高了52%，7天强度提高了30%，14天强度提高了35%，28天强度提高了25%。

通过图1可以看出，在15%-20%之间固化材料掺量的增加，软土固化强度的增加是显著的，掺加水泥的28天强度提高了44%，与相关研究一致[9-11]，掺加HR软土固化剂的28天强度的提高了25%。

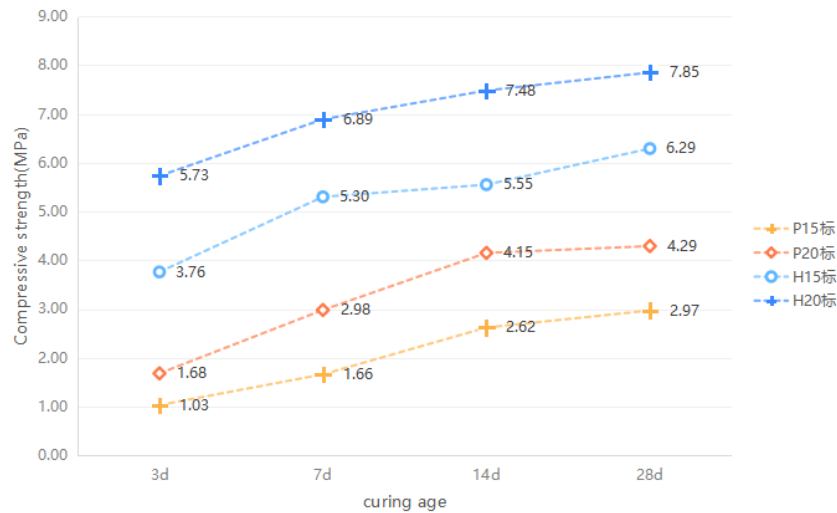


图1 两种固化材料及掺量的固化强度折线图。

3.2. 不同搅拌时间的对比

当固化材料为水泥掺量20%，标准养护条件下，搅拌时间1分钟制作的试块，3天和7天龄期的3个试块中各有2块没有强度，28天的3个试块中有1个试块没有强度，差异性非常大，总体强度很差。搅拌时间3分钟制作的试块，3天龄期的3个试块均有强度，最小值为平均值的38%，7天龄期的3个试块均有强度，最小值为平均值的64%，28天的3个试块均有强度，最小值为平均值的56%，差异性变小，总体强度一般。搅拌时间6分钟制作的试块，3天、7天、28天龄期的各3个试块强度均差别较小，总体强度较高。搅拌时间20分钟制作的试块，3天、7天、28天龄期的各3个试块强度均差别很小，总体强度高。

掺加水泥20%搅拌1分钟与20分钟的平均强度比，3天龄期为6%，7天龄期为7%，28天龄期为10%；搅拌3分钟与20分钟的平均强度比，3天龄期为53%，7天龄期为50%；搅拌6分钟与20分钟的平均强度比，3天龄期为83%，7天龄期为80%，28天龄期为92%。

当固化材料为HR软土固化剂掺量20%，标准养护条件下，搅拌时间1分钟制作的试块，3天、7天、28天龄期

的3个试块中各有1块没有强度，差异性非常大，总体强度差。搅拌时间3分钟制作的试块，3天龄期的3个试块均有强度，最小值为平均值的45%，7天龄期的3个试块均有强度，最小值为平均值的56%，28天的3个试块均有强度，最小值为平均值的73%，差异性较大，总体强度较好。搅拌时间6分钟制作的试块，3天、7天、28天龄期的各3个试块强度均差别较小，总体强度高。搅拌时间20分钟制作的试块，3天、7天、28天龄期的各3个试块强度均差别很小，总体强度很高。

掺加HR软土固化剂20%搅拌1分钟与20分钟的平均强度之比，3天龄期为9%，7天龄期为8%，28天龄期为10%；搅拌3分钟与20分钟的平均强度之比，3天龄期为35%，7天龄期为47%，28天龄期为49%；搅拌6分钟与20分钟的平均强度之比，3天龄期为72%，7天龄期为94%，28天龄期为93%。

由此可以看出，搅拌时间对固化强度的影响非常之大，搅拌1分钟的强度差异性非常大，有些试块强度非常低甚至为零；搅拌3分钟的差异性也较大，平均强度较高；搅拌6分钟的差异不大，平均强度高；搅拌20分钟的强度差别很小，平均强度很高。

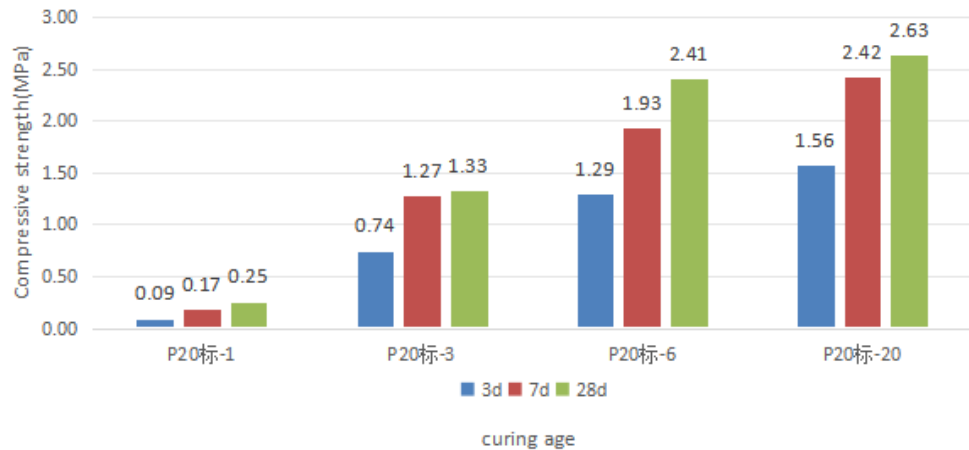


图2 水泥四种搅拌时间固化强度柱状图。

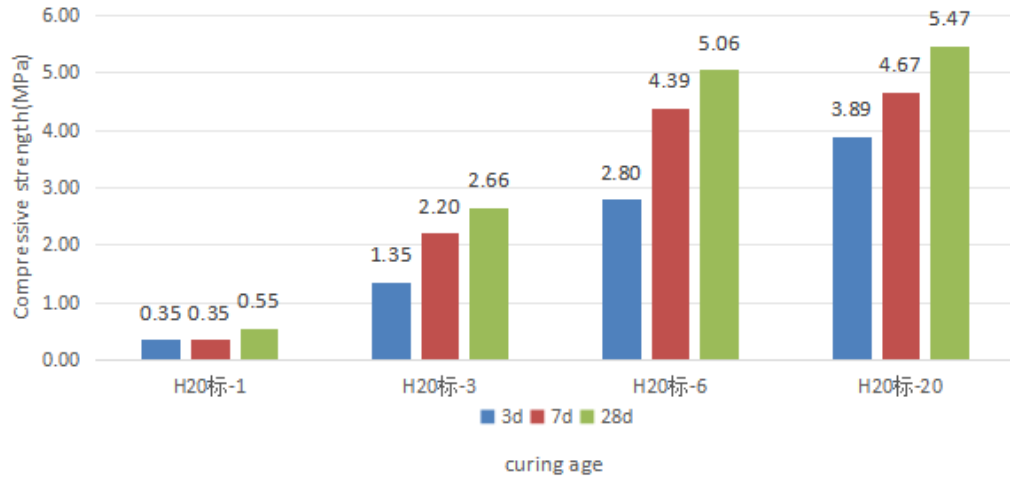


图3 HR固化剂四种搅拌时间固化强度柱状图。

3.3. 不同水灰比的对比

当固化材料为水泥掺量20%，充分搅拌标准养护条件下，水灰比1.0与0.6的固化强度相比，7天的强度比为57%，14天的强度比为56%，28天的强度比为76%；水灰比3.0与0.6的固化强度相比，7天的强度比为0，14天的强度比为16%，28天的强度比为20%。

当固化材料为HR固化剂掺量20%，充分搅拌标准养护条件下，水灰比1.0与0.6的固化强度相比，7天的强度比为29%，14天的强度比为33%，28天的强度比为53%；水灰比3.0与0.6的固化强度相比，7天的强度比为0，14天的强度比为16%，28天的强度比为20%。

由此可以看出，水灰比对固化强度的影响非常大，28天龄期固化强度，水灰比1.0较0.6降低24-47%，水灰比3.0较0.6降低75-80%。

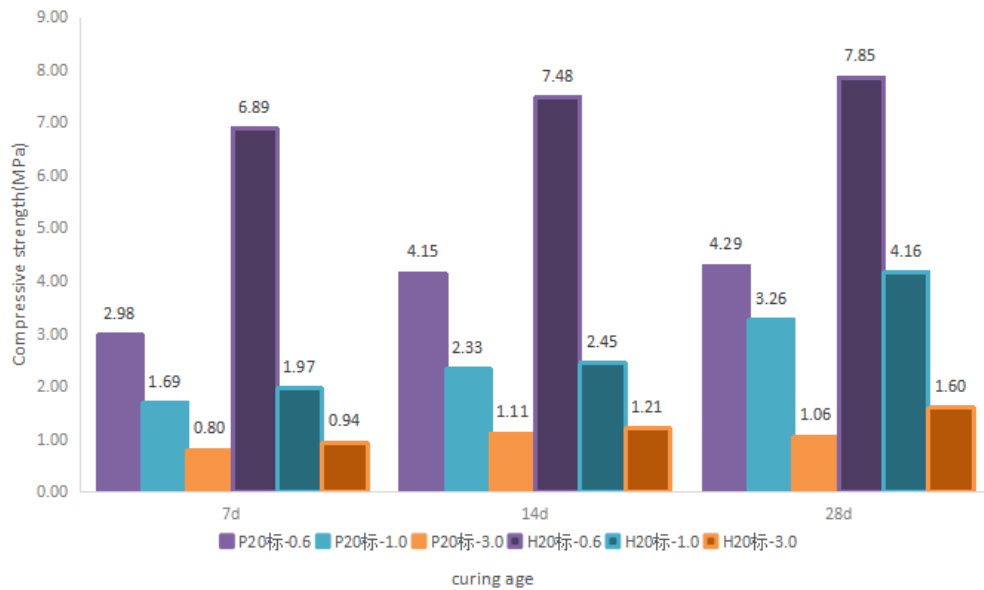


图4 三种水灰比的固化强度柱状图。

3.4. 不同养护条件的对比

固化材料为水泥掺量15%，低温（温度10℃，湿度50%，下同）养护条件与标准养护条件的固化强度相比，3天强度降低了49%，7天强度降低了42%，14天强度降低了50%，28天强度降低了53%。

固化材料为水泥掺量20%，低温养护条件与标准养护条件的固化强度相比，3天强度降低了49%，7天强度降低了55%，14天强度降低了52%，28天强度降低了51%。

固化材料为HR固化剂掺量15%，低温养护条件与标准养护条件的固化强度相比，3天强度降低了69%，7天

强度降低了62%，14天强度降低了56%，28天强度降低了59%。

固化材料为HR固化剂掺量20%时，低温养护条件与标准养护条件的固化强度相比，3天强度降低了60%，7天强度降低了58%，14天强度降低了54%，28天强度降低了55%。

由此可以看出，水泥对软土两种掺量、低温养护条件比标准养护条件的28天固化强度平均降低了52%，HR固化剂对软土两种掺量、低温养护条件比标准养护条件的28天固化强度平均降低了57%，均影响较大。

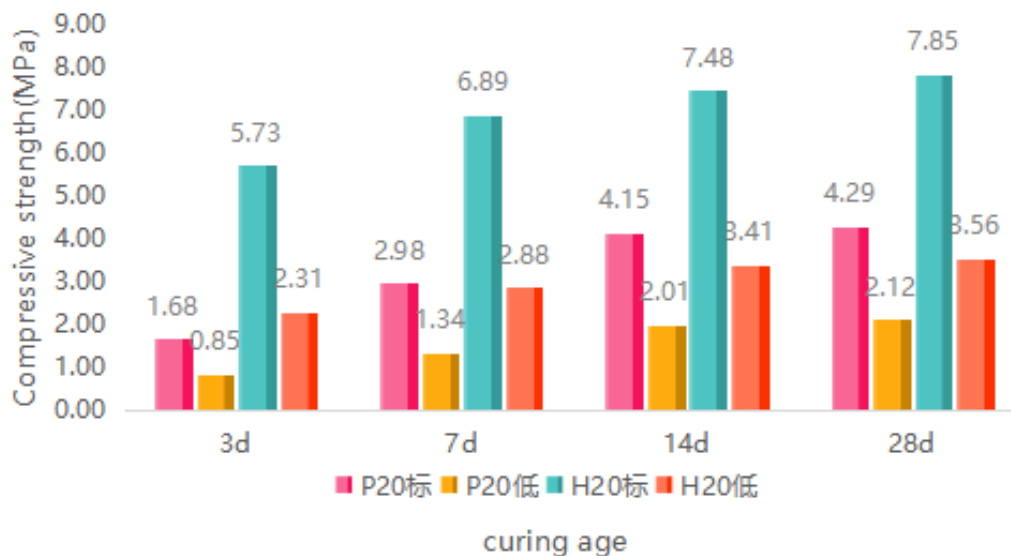


图5 两种养护条件的固化强度柱状图。

4. 结论与思考

通过一些列试验, 对影响软土搅拌固化强度的四种影响因素进行了对比和分析, 得出以下结论:

(1) 固化材料及掺量对固化强度的影响明显: 同掺量HR固化剂比P.O42.5水泥的固化强度(28天, 下同)提高了83-112%。同种固化材料, 掺量20%比掺量15%的固化强度提高了25-44%。

根据该结论, 满足同等设计强度条件下, 使用HR软土固化剂代替P.O42.5水泥固化软土, 可大幅度降低固化材料的用量, 可节省用量25-60%, 性价比高, 低碳环保。

(2) 搅拌均匀性对固化强度的影响显著: 两种固化材料, 两种掺量, 搅拌时间1分钟的固化强度差异性非常大, 有些强度为0, 平均强度仅占充分拌合强度的10%。搅拌时间3分钟的固化强度有较大差异性, 平均强度占充分搅拌强度的49-50%。搅拌时间6分钟的固化强度差别较小, 平均强度占充分搅拌强度的92-93%。

根据该结论, 采用搅拌桩进行地基处理时, 搅拌的均匀性是最为关键的因素, 受装备性能、工艺、操作规范性等影响大, 对软土来说, 常规的单轴搅拌工艺及搅拌时间难以获得理想的强度, 需要开发和推广新工艺, 采用高性能、自动化装备, 从源头上解决搅拌均匀性的问题, 使搅拌桩经济快速的优势在软土地区能够得以施展。

(3) 浆液水灰比对固化强度的影响明显: 浆液水灰比1.0与0.6相比, 固化强度降低24-47%; 浆液水灰比3.0与0.6相比, 固化强度降低75-80%。

根据该结论, 一方面, 施工现场要严格控制好水灰比, 保证施工质量; 另一方面, 想要提高固化强度, 降低水灰比是一种途径。

(4) 养护环境对固化强度的影响明显: 低温养护条件(10℃、50%)比标准养护条件(20℃, 95%)的软土固化强度降低了52-57%。

根据该结论, 不同区域的地下温度和湿度条件是差别很大的, 各地区应针对本地的地下温度和水文条件,

做相应的模拟同条件养护试验, 为搅拌固化土的设计和施工提供依据, 确保实施后能达到设计要求。

本系列试验为软土地基处理、以软土为基材的固化土设计与施工提供了重要的数据和规律。但本系列试验局限于室内, 施工现场受诸多因素影响, 包括土质的不均匀性、配比控制的精确程度、搅拌机械装置设计及转速提速等相关参数的差异, 以及人为因素等, 对软土搅拌固化强度均有影响。后续将在现场进行相关原位试验, 为设计和施工提供更加准确的数据支撑。

基金项目

国家自然科学基金项目(51809146); 山东省泰山学者项目(tsqn202306234); 山东省重点研发计划项目(2018GSF117008)。

参考文献

- [1] 倪洁, 陈永辉, 毛斌. 深厚软土区过渡段软基处理方式现场试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 13-18.
- [2] 安枫垒, 颜超. 水泥+粉煤灰改良膨胀土路基动态力学特性试验研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(5): 25-30.
- [3] 朱世哲, 陈秀亮, 徐日庆. 素混凝土桩和搅拌桩处理城市道路路基的原位试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 7-13.
- [4] 林泓民, 商志阳, 彭劼. 聚丙烯酰胺改善流态固化处理效果的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 67-73.
- [5] 闫楠, 杨俊杰, 刘强, 等. 海水环境下水泥土强度衰减过程室内试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 115-124.
- [6] 闫楠, 杨俊杰, 刘强, 等. 原土环境下水泥土强度衰减过程室内试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(8): 85-92.

- [7] 季节, 梁桦, 韩秉烨, 等. 中国道路工程中土壤固化技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 47-66.
- [8] 张启军, 闫楠, 王永洪, 等. HR软土固化剂的研制与工程应用 [J/OL]. 工程勘察, 1-5.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2025.TU.20240116.1151.002.html>
- [9] HUANG Jianxin, KOGBARA R B, HARIHARAN N, et al. A state-of-the art review of polymers used in soil stabilization [J]. Construction and Building Materials, 2021, 305: 124685.
- [10] 刘世皎, 樊恒辉, 史祥, 等. BCS土壤固化剂固化土的耐久性研究 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42(12): 214-220.
- [11] 乔小雨, 商恩梁, 王彤, 等. 海相淤泥质固化土强度劣化规律试验研究 [J]. 工程勘察, 2024, 52(2): 8-13, 25.
- [12] 李佩珂. 含铅砷冶金废渣的不同矿物材料固化处理工艺研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [13] 赵志峰, 陈文杰. 不同养护测试条件对微生物加固土体强度的影响 [J]. 林业工程学报, 2023, 8(6): 170-175.
- [14] 段晓敏. 不同配比和养护条件下的水泥土的抗压强度研究 [J]. 中国水运, 2023, 23(7): 131-133.
- [15] 苏悦, 闫楠, 白晓宇, 等. 预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用 [J/OL]. 材料导报, 1-11 [2024-05-05].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.tb.20240116.1510.030.html>