

# 基于工业副产物的高含水率固化土力学特性试验研究

王腾, 周佳锦\*, 龚晓南, 俞建霖  
(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 我国东部沿海地区广泛分布高含水率、高压缩性、低强度的软黏土, 其工程特性较差。为提高土体强度, 以普通硅酸盐水泥为基础, 分别以矿粉、粉煤灰换掺部分水泥, 同时掺入碱性激发剂石膏粉对软黏土进行固化处理, 通过无侧限抗压强度试验对不同配比固化土的强度进行研究。试验结果表明, 固化土无侧限抗压强度随龄期的增加而增长, 3~7 d 强度增长较快, 7~28 d 增长速率放缓; 固化土强度随龄期的增长规律接近于规范中给出的经验值, 固化土变形模量为其强度的 45.9~114.7 倍; 养护时间达到 28 d 时, 掺入比为 10%水泥+10%矿粉+5%石膏的固化土强度最高, 达到 2 700.0 kPa, 15%水泥+5%粉煤灰+5%石膏的固化土强度最低, 为 743.9 kPa; 石膏粉对矿粉的激发作用明显强于粉煤灰, 其对土体强度的增长起主导作用, 但过量的矿粉不利于土体后期强度的增长。结合原材料价格和固化土强度, 5%水泥+15%矿粉+5%石膏最为经济合理, 为本次试验的最优配比。

**关键词:** 固化土; 无侧限抗压强度; 高含水率; 龄期; 配比

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0361-08

## Experimental study on mechanical properties of high water content stabilized soil based on industrial by-products

WANG Teng, ZHOU Jia-jin\*, GONG Xiao-nan, YU Jian-lin

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** Soft clay, characterized by high water content, high compressibility and low strength, is widely distributed in the eastern coastal areas of China, and its engineering properties are subpar. In order to improve the soil strength, based on ordinary Portland cement, mineral powder and fly ash were replaced with part of the cement, and the alkaline activator gypsum powder was added to stabilize the soft clay. The investigation involved unconfined compressive strength tests to evaluate the performance of the stabilized soil under different proportions. The test results show that the unconfined compressive strength of the stabilized soil increased with the curing time. Notably, the strength showed rapid improvement during the first 3-7 curing days, and the growth rate slowed down from 7-28 days, aligning with empirical observations. Furthermore, the deformation modulus of the stabilized soil was found to be 45.9-114.7 times its strength. At the 28-day curing mark, the mixture comprising 10% cement + 10% mineral powder + 5% gypsum exhibited the highest strength, reaching 2 700.0 kPa. Conversely, the combination of 15% cement + 5% fly ash + 5% gypsum resulted in the lowest strength, measuring 743.9 kPa. Interestingly, the mineral powder was found to hinder the later-stage growth of soil strength. Based on the assessment of raw material costs and stabilized soil strength, the optimal and most economical ratio was identified as 5% cement + 15% mineral powder + 5% gypsum, as supported by the test results. This ratio holds significant promise for practical applications in soft clay stabilization and is recommended for engineering design and planning purposes.

**Key words:** stabilized soil; unconfined compressive strength; high water content; curing time; ratio

收稿日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52108350)。

作者简介: 王腾 (1999—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事软土固化的研究工作。E-mail: wt740461347@163.com。

\*通信作者: 周佳锦 (1989—), 男, 浙江诸暨人, 博士, 主要从事桩基工程、地基处理方面的研究工作。E-mail: zjjmuforever@163.com。

## 0 引言

我国东部沿海地区分布有深厚软黏土层，其具有天然含水率高、压缩性强、渗透性小、抗剪强度低、承载力低等工程特性<sup>[1]</sup>，在软弱土地基上进行工程建设，需事先对地基进行固化处理。水泥搅拌桩<sup>[2-4]</sup>是软土地基处理的一种有效方式，其采用传统硅酸盐水泥作为主固化剂，然而水泥生产过程需要排放大量 CO<sub>2</sub>。根据国家统计局数据显示，2020 年全国累计水泥产量 23.77 亿吨，位居世界第一，水泥行业在全国所有工业行业中，碳排放总量约 13.75 亿吨，占全国碳排放总量的 13.5% 左右<sup>[5]</sup>。

随着生态文明建设的持续深入推进，工业副产物资源化利用已成为可持续发展战略的重要组成部分。目前，我国每年新增工业副产物堆存量超过 30 亿吨，累计堆存量高达 600 亿吨，废渣综合利用率仅为 55%<sup>[6]</sup>。采用石膏、粉煤灰、矿粉等工业副产物替代部分水泥，可有效减少 CO<sub>2</sub> 的排放，解决传统水泥基固化材料能源消耗量大、环境污染严重等问题，同时实现工业副产物资源化利用。

国内外学者已针对工业副产物应用于软土固化进行了一些研究<sup>[7-16]</sup>。在工业副产物的选择方面，如 HORPIBULSUK 等<sup>[7]</sup>采用电石渣与粉煤灰固化了泰国粉质黏土；黎家国等<sup>[8]</sup>利用混凝土再生粉、砖粉、脱硫石膏、矿渣复合制成胶凝材料对宁波市淤泥质黏土进行固化；方祥位等<sup>[9]</sup>以高钙灰和脱硫石膏为主要原料，辅以生石灰、水泥、熟石膏等次要成分，制备出 GT 型土壤固化剂。在固化土的力学特性方面，YADU 等<sup>[10]</sup>通过无侧限抗压强度试验发现 9% 的粒化高炉矿渣改性软土强度比未处理土壤高约 28%，但是过多的矿渣粉对强度的提高作用有限；王东星等<sup>[11]</sup>通过开展不固结不排水直接

剪切试验，研究了固化剂掺量、类型和养护龄期等因素对黄土剪切性能的影响。此外，研究者们还采用电镜扫描 (SEM)<sup>[11-13]</sup>、X 射线能谱 (XRD)<sup>[14-16]</sup> 等方法对固化土的微观固化机理进行分析，如吴俊等<sup>[15]</sup>利用 SEM 和 XRD 对矿渣-粉煤灰地质聚合物固化机理进行分析，发现其主要产物有无定型的水化硅酸钙、水化铝酸钙凝胶，这是固化黏土抗压强度提升的主要原因。

近年来，在我国东部沿海地区逐渐推广混凝土芯水泥土搅拌桩、静钻根植桩等由预制桩和水泥土组成的新型组合桩基<sup>[17-19]</sup>，其在实际工程中表现出较好的承载性能，但鲜有学者对水泥-工业副产物协同固化土在组合桩基中的应用进行研究。作者所在课题组拟研发出一种基于工业副产物的新型土壤固化剂，并在未来应用于静钻根植桩中。为保证实际工程中桩周灌注固化土的均匀性，将泥浆含水率定为 80%，从而使搅拌后的固化土试样为液态，通过室内试验对高含水率固化土的抗压性能进行研究，揭示固化土强度随龄期和各種工业副产物配比的变化规律，为后续预制桩固化土组合桩的实际工程应用提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究选用杭州软黏土作为试验用土，其物理力学性质详见表 1。从表中可以看出，试验土样的天然含水率达到 55.6%，高于液限值 49.5%，且天然孔隙比大于 1.5，可以判断出试验用土为淤泥质软黏土。水泥采用 P.O52.5 硅酸盐水泥，水泥性质如表 2 所示。工业副产物分别是矿粉、粉煤灰、石膏粉，主要化学组成如表 3 所示。主要试验材料见图 1。

表 1 试验土样参数

Table 1 Parameters of test soil sample

重度/(kN/m <sup>3</sup> )	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数 I <sub>p</sub>	液性指数 I <sub>L</sub>	孔隙比 e	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
16.5	55.6	49.5	27.9	21.6	1.29	1.557	12.9	6.2

注：黏聚力和内摩擦角由室内三轴试验获得。

表 2 P.O52.5 硅酸盐水泥性质

Table 2 P.O52.5 Portland cement properties

水泥标号	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		细度 (80 μm 筛余量) /%
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
P.O52.5	119	178	6.1	8.7	33.9	61.9	0.08

表 3 原材料化学组成  
Table 3 Chemical composition of raw materials

试验材料	化学组成及含量/%					
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	其他
石膏	1.17	37.35	0.58	0.32	50.52	10.06
矿粉	30.62	41.65	15.47	0.35	2.70	9.21
粉煤灰	48.64	6.76	30.93	4.97	—	8.70

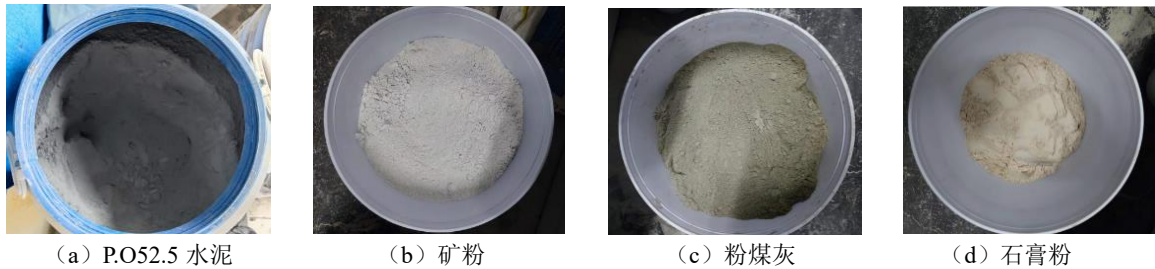


图 1 主要试验材料

Fig. 1 Main experimental materials

1.2 试验方案

根据实际工程中桩周注浆的需要, 设置固化土水灰比为 1.0, 水泥浆和泥浆体积比为 0.8 : 1, 以保证试样搅拌后为液态。将主固化剂(水泥+粉煤灰+矿粉)总掺入量控制为 20%, 碱性激发剂石膏掺入量为 5%。根据粉煤灰和矿粉替换水泥掺量的不同, 共设置 8 组不同的配比试验方案, 具体见表 4 所示。

表 4 固化土配比  
Table 4 Ratio of stabilized soil

组别	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%	矿粉掺量/%	石膏掺量/%
1	20	0	0	0
2	15	5	0	5
3	15	0	5	5
4	10	5	5	5
5	10	0	10	5
6	5	10	5	5
7	5	5	10	5
8	5	0	15	5

注: 各固化剂掺量 =  $m_{\text{固化剂}} / (m_{\text{水}} + m_{\text{土}})$ 。

试验时, 先将软黏土放在烘箱中烘干, 烘箱温度设置为 90 °C, 然后经研磨过 1 mm 筛。按照不同配比, 称量相应的过筛后土颗粒与水泥和工业副产物混合均匀, 然后加入需用水量并进行充分搅拌, 由于试样含水率较高, 搅拌完成后试样为液态。将搅拌均匀后的固化土试样倒入直径为 50 mm、高为 100 mm 的 PVC 试模中, 在室内静置一天后拆模, 拆模后将试样放入 (20±1) °C 水中进行水养护<sup>[20]</sup>。

每种配比制作 3 组平行试样, 取 3 组试样所测强度平均值作为该配比下固化土无侧限抗压强度, 以增加试验结果的准确性。分别养护 3 d、7 d 和 28 d 后进行无侧限抗压强度试验, 无侧限抗压强度试验在万能试验机上进行, 加载速率为 0.5 mm/min, 试验过程中固化土试样应力应变数据可由试验装置直接测得。

2 试验结果与分析

图 2 为 8 组试样在 3 d、7 d 和 28 d 这三种龄期下无侧限抗压强度的应力应变曲线关系, 由图可知: 固化土试样在加载过程中依次经历初始加载阶段、弹性上升阶段、塑性增长阶段、破坏阶段以及残余应力阶段<sup>[21]</sup>。以图 2 (a) 中 28 d 龄期应力应变曲线为例, 在约 0.5% 应变之前 (图中 OA 阶段) 为初始加载阶段, 此时应变迅速增加, 而应力缓慢增长; 0.5%~1.4% 应变范围 (图中 AB 阶段) 为弹性上升阶段, 该阶段应力增长速率加快, 应力应变曲线关系近似为线性; 随后进入塑性增长阶段 (图中 BC 阶段), 此时应变持续增加, 但应力变化较小; 当应变增加到 1.6% 时, 试样达到峰值强度 1 119.7 kPa; 随后试样进入破坏阶段 (图中 CD 阶段), 应力不断降低。对比不同龄期曲线可以发现, 随着龄期的增长, 应力降低速率变大, 脆性破坏特征愈发明显。应变达到 6% 以后 (图中的 D 点) 试样进入到残余应力阶段, 此时应变持续增加, 而应力基本不再发生变化, 残余值稳定在 75 kPa 左右。

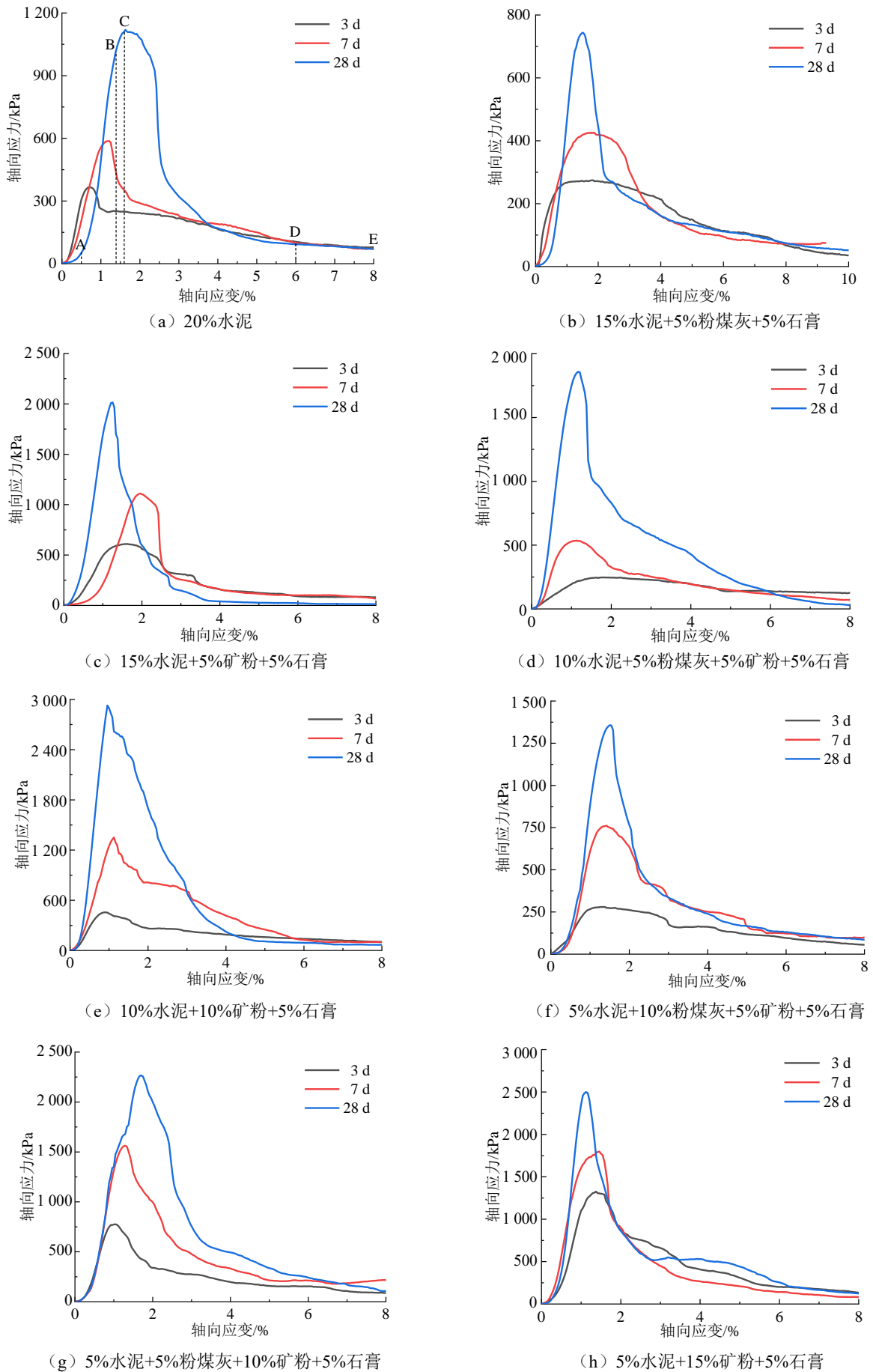


图2 不同配比固化土各龄期应力应变曲线图

Fig. 2 Stress-strain curves of stabilized soil with different ratios at different ages

将试验结果进行整理, 取应力应变曲线的峰值为固化土无侧限抗压强度, 记为  $q_u$ 。取  $E_{50}$  为变形模量, 其数值为固化土试样应力应变曲线中应力为 50% 抗压强度时的割线模量。各组试验在不同龄期下的试验结果见表 5。

表 5 固化土试样无侧限抗压强度试验结果

Table 5 Unconfined compressive strength test results of stabilized soil samples

组别	3 d		7 d		28 d	
	$q_u/kPa$	$E_{50}/MPa$	$q_u/kPa$	$E_{50}/MPa$	$q_u/kPa$	$E_{50}/MPa$
1	326.7	31.4	587.3	48.5	1 119.7	58.8
2	272.8	19.7	425.7	36.1	743.9	44.8
3	609.7	40.8	1 074.4	64.3	2 014.4	152.4
4	220.2	19.7	534.8	41.0	1 858.7	181.9
5	456.1	52.3	1 350.7	104.9	2 700.0	176.2
6	280.3	24.2	761.6	47.3	1 357.0	83.1
7	775.9	68.5	1 563.2	103.2	2 266.5	104.0
8	1 325.6	86.5	1 797.5	143.1	2 500.2	192.9

从表中可以看出, 同组配比的固化土试样无侧限抗压强度和变形模量均随龄期的增加而增长。表明随着龄期的增加, 固化土试样的强度和刚度均不断增大。

由表格结果计算得到本次试验中不同配比固化土试样龄期由 7 d 增加到 28 d 时无侧限抗压强度关系大致为:

$$q_{u28} = (1.39 \sim 2.00) q_{u7} \quad (1)$$

而《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012) [22] 中给出的不同龄期水泥土强度经验关系式为:

$$q_{u28} = (1.59 \sim 2.13) q_{u7} \quad (2)$$

可以看出规范中给出的水泥土强度随龄期增加的增长幅度规律接近于本次试验中得出的固化土试样的范围。

根据表中给出的固化土强度和变形模量数据可以得到:

$$E_{50} = (45.9 \sim 114.7) q_u \quad (3)$$

《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012) 中给出的水泥土搅拌桩桩身压缩模量与强度的经验关系公式为:

$$E_p = (100 \sim 120) q_u \quad (4)$$

本次试验得到的变形模量与无侧限抗压强度的比值略小于规范中给出的压缩模量与强度的比值, 而固化土压缩模量值大于其变形模量, 可以认

为本次试验固化土试样变形模量与强度的关系较为合理。不同配合比固化土强度与龄期的关系如图 3 所示。

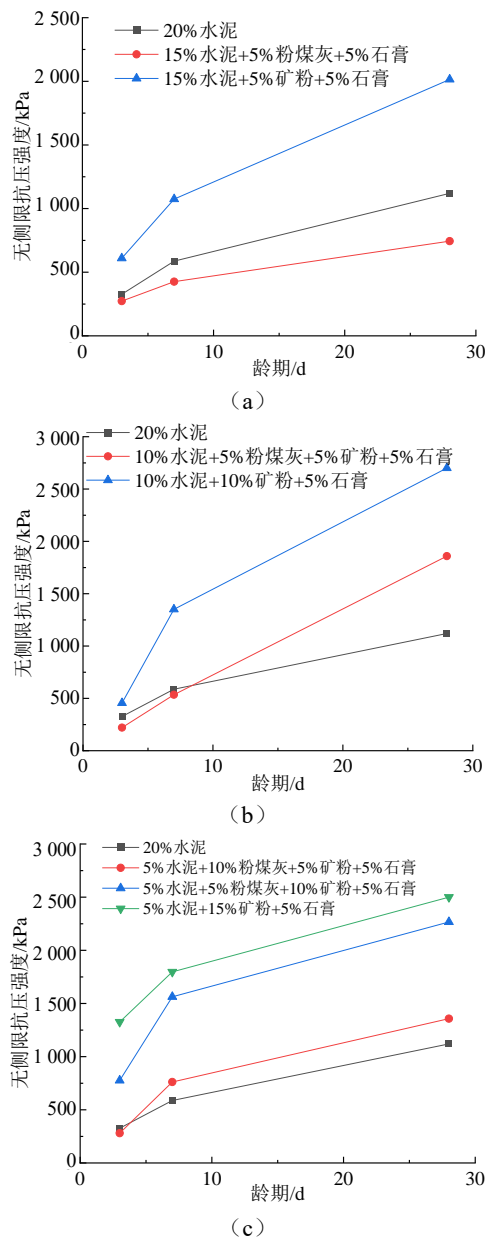


图 3 固化土强度与龄期关系图

Fig. 3 Relationship between strength and curing time of stabilized soil

由图3可以看出, 各组固化土无侧限抗压强度随龄期增加而不断增长, 其中 3~7 d 增长速率较快, 7~28 d 增长速率放缓。这是因为固化早期, 水泥发生水化反应生成水化硅酸钙 (C-S-H) 和水化铝酸钙 (C-A-H) 凝胶, 同时水化副产物氢氧化钙会与工业副产物中的活性成分  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  发生火山灰反应生成更多的 C-A-H 和 C-S-H 凝胶, 接着石膏中引入的  $SO_4^{2-}$  在有水环境下与 C-A-H 和氢氧化钙发生反应生成一种针棒状晶体钙矾石 (AFt) [23], AFt 是一

种膨胀性晶体,它可以与水化胶凝产物一起迅速填充土体孔隙,改善土体微观结构,从而快速提高固化土强度。随着龄期的继续增加,水化反应逐渐充分,水化产物生成速率减慢,与此同时,这些絮凝状的水化物逐渐形成空间网状结构,土体的整体性和胶结性更好,这是固化土后期强度增长的主要来源。

对比图3(a)、(b)、(c)还可以发现,相同水泥掺量条件下,矿粉掺入量越多,固化土试样强度越高;粉煤灰掺量越多,固化土强度越低。说明石膏对矿粉的激发效果明显强于粉煤灰,矿粉的掺入对固化土强度增长起主导作用。根据表3,矿粉中氧化钙含量达到41.65%,远高于粉煤灰中6.76%的含量,在碱性环境下,矿粉掺入量较多的试样可以水解产生更多生成C-A-H、C-S-H凝胶以及AFt等所需的 $Ca^{2+}$ ,从而提高固化土强度<sup>[24]</sup>。

结合表5中的试验结果,10%水泥+10%矿粉+5%石膏配比下28 d强度最高,为2 700.0 kPa,15%水泥+5%粉煤灰+5%石膏配比下28 d强度最低,为743.9 kPa(低于纯水泥对照组的强度1 119.7 kPa),而3 d、7 d强度最高的固化土配比是5%水泥+15%矿粉+5%石膏,强度增长后期逐渐被10%水泥+10%矿粉+5%石膏配比超过,说明随着龄期的增加,过量的矿粉反而不利于固化土后期强度的增长。原因是强度增长后期,未参与火山灰反应的矿粉细粒会占据一部分土体的空间,使得固化土内部形成的胶结团粒结构减少,同时水泥掺入量也相应减少,因此强度有所降低<sup>[25]</sup>。

### 3 经济性分析

根据原材料的市场价格,二级粉煤灰价格260元/t,矿粉价格320元/t,石膏价格280元/t,而P.O52.5硅酸盐水泥价格达到800元/t,远高于各种工业副产物,而掺入这些工业副产物取代部分水泥反而可以在一定程度上提高水泥土强度,所以采用工业副产物和水泥协同固化软土的方法具有可行性。结合表6不同配比方案的28 d无侧限抗压强度和材料成本与纯水泥对照组的对比,可以看出:配比8(5%水泥+15%矿粉+5%石膏)下水泥用量最小,同时强度达到2 500.2 kPa,计算出总成本为408元/t,与纯水泥对照组相比强度增长量为123.3%,却可以节约49.0%的成本。配比5(10%水泥+10%矿粉+5%石膏)虽然28 d强度更高一些,为2 700.0 kPa,但水泥用量却增加了一倍,计算出总成本为504元/t,强

度增量为141.1%,与配比8相比仅多出8.0%,而成本节约量仅为37.0%,与配比8相比多出23.5%,综合考虑起来不够经济。所以分析得出5%水泥+15%矿粉+5%石膏掺量在保证固化土强度较高的前提下可以节约更多的材料成本,更加经济合理。

表6 不同配比固化土经济性分析表

Table 6 Economic analysis of stabilized soil with different proportions

组别	28 d 强度/kPa	成本/(元/t)	强度增量/%	成本节约量/%
1	1 119.7	800	0	0
2	743.9	588	-33.5	26.5
3	2 014.4	600	79.9	25.0
4	1 858.7	492	66.0	38.5
5	2 700.0	504	141.1	37.0
6	1 357.0	384	21.2	52.0
7	2 266.5	396	102.4	50.5
8	2 500.2	408	123.3	49.0

## 4 结论

本文通过对一系列不同配比的固化土试样进行无侧限抗压强度试验,并对试验结果进行分析得到以下结论:

(1) 10%水泥+10%矿粉+5%石膏配比下固化土28 d强度最高,为2 700.0 kPa;15%水泥+5%粉煤灰+5%石膏配比下28 d强度最低,为743.9 kPa,并低于纯水泥对照组的强度。3 d、7 d强度最高的配比组合5%水泥+15%矿粉+5%石膏强度增长后期逐渐被10%水泥+10%矿粉+5%石膏配比超过,说明过量矿粉不利于固化土后期强度的增长。

(2) 本次试验得到的固化土强度随龄期的增长规律接近于规范中所给出的经验值,固化土变形模量为其无侧限抗压强度的45.9~114.7倍。

(3) 结合各种原材料的市场价格,分析得出采用工业副产物取代部分水泥固化软土具有可行性,其中5%水泥+15%矿粉+5%石膏的配比在保证固化土强度较高的前提下,可以节约大量水泥,取得不错的经济效果,是本次试验的最优配比。

### 参考文献

- [1] 徐日庆,李俊虎,蔡承晟,等.用固化剂GX08加固杭州海湖相软土的强度特性研究[J].岩土力学,2014,35(6):1528-1533,1554.  
XU Ri-qing, LI Jun-hu, CAI Cheng-sheng, et al. Study of

- strength characteristics of stabilized soil by using stabilizing agent GX08 treating marine and lacustrine soft soil in Hangzhou[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1528-1533, 1554.
- [2] 欧红亮, 龙海飏, 赵丽娟, 等. 水泥搅拌桩浆喷法和粉喷法在软基处理中的研究分析[J]. *公路*, 2022, 67(5): 119-122.  
OU Hong-liang, LONG Hai-biao, ZHAO Li-juan, et al. Research and analysis of cement mixing pile slurry spraying method and powder spraying method in soft foundation treatment[J]. *Highway*, 2022, 67(5): 119-122.
- [3] 郭克诚, 孙伟, 彭威, 等. 搅拌桩技术的改进及工程应用[J]. *地基处理*, 2021, 3(4): 299-306.  
GUO Ke-cheng, SUN Wei, PENG Wei, et al. Improvement and engineering application of mixing pile technology[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(4): 299-306.
- [4] 曾田胜, 许发明, 谭祥韶, 等. 双向水泥搅拌法在高填路堤泥炭质土地基中的应用[J]. *地基处理*, 2020, 2(2): 105-110.  
ZENG Tian-sheng, XU Fa-ming, TAN Xiang-shao, et al. Application of bi-directional cement mixing method in high-filled embankment in peaty soil foundation[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2020, 2(2): 105-110.
- [5] 刘昊. 水泥工业碳减排路径分析[J]. *水泥工程*, 2021(5): 1-3, 21.  
LIU Hao. Path analysis of carbon emission reduction in cement industry[J]. *Cement Engineering*, 2021(5): 1-3, 21.
- [6] 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[J]. *再生资源与循环经济*, 2021, 14(4): 1-3.  
Guiding opinions on the comprehensive utilization of bulk solid waste during the 14th Five-Year Plan[J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*, 2021, 14(4): 1-3.
- [7] HORPIBULSUK S, PHETCHUAY C, CHINKULKIJNIWAT A. Soil stabilization by calcium carbide residue and fly ash[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(2): 184-193.
- [8] 黎家国, 何旭东, 沈建生, 等. 废渣型固化剂对软土固化的研究与应用[J]. *低温建筑技术*, 2021, 43(8): 119-122.  
LI Jia-guo, HE Xu-dong, SHEN Jian-sheng, et al. Research and application of waste residue curing agent for soft soil solidification[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2021, 43(8): 119-122.
- [9] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1545-1548.  
FANG Xiang-wei, SUN Shu-guo, CHEN Zheng-han, et al. Study on engineering properties of improved soil by GT soil firming agent[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1545-1548.
- [10] YADU L, TRIPATHI R K. Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 51: 125-131.
- [11] 王东星, 高向云, 杜怡莹, 等. 活性MgO-粉煤灰固化黄土剪切特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(5): 822-829.  
WANG Dong-xing, GAO Xiang-yun, DU Yi-ying, et al. Experimental investigation on shear properties of reactive MgO-fly ash stabilized loess[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(5): 822-829.
- [12] 陆建阳. 宁波淤泥质土固化研究及微观定量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
LU Jian-yang. Solidification research and microscopic quantitative study of Ningbo muckey soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [13] 邓永锋, 吴子龙, 刘松玉, 等. 地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(3): 446-453.  
DENG Yong-feng, WU Zi-long, LIU Song-yu, et al. Influence of geopolymers on strength of cement-stabilized soils and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(3): 446-453.
- [14] 周恒宇, 王修山, 胡星星, 等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2089-2098.  
ZHOU Heng-yu, WANG Xiu-shan, HU Xing-xing, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2089-2098.
- [15] 吴俊, 征西遥, 杨爱武, 等. 矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 647-655.  
WU Jun, ZHENG Xi-yao, YANG Ai-wu, et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 647-655.
- [16] 范志宏, 曾俊杰, 熊建波, 等. 粉煤灰和矿粉低热硅酸盐水泥胶凝材料的水化特征[J]. *水运工程*, 2019(8): 63-



69.  
FAN Zhi-hong, ZENG Jun-jie, XIONG Jian-bo, et al. Hydration characteristics of low heat portland cement mixtures with fly ash or slag[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(8): 63-69.
- [17] 董平, 陈征宙, 秦然. 砼芯水泥土搅拌桩在软土地基中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(2): 204-207.  
DONG Ping, CHEN Zheng-zhou, QIN Ran. Use of concrete-cored DCM pile in soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(2): 204-207.
- [18] CONSOLI N C, LOPES L D S, FOPPA D, et al. Key parameters dictating strength of lime/cement-treated soils[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2009, 162(2): 111-118.
- [19] 周佳锦, 龚晓南, 王奎华, 等. 静钻根植竹节桩在软土地基中的应用及其承载力计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊 2): 4359-4366.  
ZHOU Jia-jin, GONG Xiao-nan, WANG Kui-hua, et al. Application of static drill rooted precast nodular pile in soft soil foundation and calculation for bearing capacity[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 4359-4366.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Mix Proportion Design of Cement Soil: JGJ/T 233—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [21] 陈蕾, 杜延军, 刘松玉, 等. 水泥固化铅污染土的基本应力-应变特性研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 715-721.
- CHEN Lei, DU Yan-jun, LIU Song-yu, et al. Experimental study of stress-strain properties of cement treated lead-contaminated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 715-721.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [23] 徐日庆, 文嘉毅, 王旭, 等. 台州淤泥质土固化特性研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2019, 46(11): 146-153.  
XU Ri-qing, WEN Jia-yi, WANG Xu, et al. Study on curing properties of Taizhou sludge soil[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2019, 46(11): 146-153.
- [24] 周世宗, 梁仕华, 戴君. 矿渣和粉煤灰固化南沙软土试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(4): 76-79, 125.  
ZHOU Shi-zong, LIANG Shi-hua, DAI Jun. Experimental research of Nansha soft soil reinforced by slag and fly ash[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(4): 76-79, 125.
- [25] 陈洁瑶, 王飞, 陈秀敏, 等. 掺矿粉的水泥土力学性能试验研究[J]. *森林工程*, 2019, 35(5): 113-118.  
CHEN Jie-yao, WANG Fei, CHEN Xiu-min, et al. Experimental study on mechanical properties of soil-cement mixed with slag powder[J]. *Forest Engineering*, 2019, 35(5): 113-118.