

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.03.003

# Ca(OH)<sub>2</sub> 改善弱酸性软土水泥土性能的试验与实践

苏文生

(福建省建筑设计研究院有限公司,福建 福州 350025)

**摘要:** 为了改善弱酸性软土水泥土工程性能,对比不同 Ca(OH)<sub>2</sub>外加剂掺量下的水泥土配方试验,分析其对水泥土密度、无侧限抗压强度、渗透性、压缩性提高的效果。掺入 Ca(OH)<sub>2</sub>后,其密度增大幅度基本位于 4.8%以内。水泥土试件的抗压强度随着 Ca(OH)<sub>2</sub>掺量的增加而增加,当掺量高于 10%时增幅相对较小。随着养护龄期的增加,水泥土强度逐渐提高,特别是早期强度提高较为明显。随着外加剂掺量的增加,各个不同龄期的水泥土渗透系数随之降低,水泥土压缩模量得到提高。综合提高效果和经济性因素,Ca(OH)<sub>2</sub>外加剂掺量不宜超过 10%。

**关键词:** 水泥土;Ca(OH)<sub>2</sub>;工程性质;软土处理

**中图分类号:** TU413

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2020)03-0218-05

## Experimental studies on improving the properties of weak-acid soft cement-soil with Ca(OH)<sub>2</sub>

SU Wensheng

(Fujian Provincial Institute of Architectural Design Co. Ltd., Fuzhou 350025, China)

**Abstract:** In order to improve the engineering performance of weak-acid soft cement-soil, tests of cement-soil formula with different Ca(OH)<sub>2</sub> admixture content were compared. The effects of the content on cement soil density, unconfined compressive strength, permeability and compressibility were analyzed. After the incorporation of Ca(OH)<sub>2</sub>, its density increase is basically within 4.8%. The compressive strength of the cement-soil test piece increases with the addition of the admixture Ca(OH)<sub>2</sub>. When the content is higher than 10%, the increase is relatively small; with the increase of the curing age, the strength of cement-soil is gradually increased, especially in the early stage; with the increase of the admixture content, the permeability coefficient of the cement-soil at different ages is reduced, and the compressive modulus of the cement-soil is improved. Taking into account effect improvement and economic factors, the content of Ca(OH)<sub>2</sub> admixture should not exceed 10%.

**Keywords:** cement-soil; Ca(OH)<sub>2</sub>; engineering properties; soft soil treatment

软土地基的特性表现为承载能力较弱、含水量高、承受荷载时变形较大,且对于素填土等常见的地基土来说处理难度较高。若地基处理效果不满足工程要求,在软土上修筑的建筑结构容易发生沉降量大、不均匀沉降等问题。通常采用水泥对软土进行加固,如高压旋喷桩或水泥搅拌桩等。

已有较多学者研究了水泥土的各种工程性质<sup>[1-3]</sup>,马冬梅<sup>[4]</sup>研究了添加适量的石膏、粉煤灰和添加剂 SN-II 对矿渣水泥土抗压强度的影响,骆以道等<sup>[5]</sup>研究了搅拌水泥土抗压强度的特性,均取得了较好的成果。

软土中往往含有一定量的有机物,当内部有

收稿日期: 2020-01-15

作者简介: 苏文生(1980—),男,福建龙海人,高级工程师,硕士,研究方向:岩土工程勘察设计。

机物分解后,土体会呈现出弱酸性,对钢筋及混凝土等建筑材料均有腐蚀作用。若弱酸性软土仅采用纯水泥进行加固,不利于水泥的水合和水化反应,水泥土的部分工程性能包括强度、密度、压缩性等可能达不到设计要求。为了提高加固效果,根据酸碱中和反应原理,本实验在水泥土室内试验中添加碱性外加剂,分析对水泥土性能的影响,碱性外加剂选取成本相对较低的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。

## 1 工程概况

某新建防洪堤位于中国东南沿海地区,堤坝中心线长度为 3817 m,主要用以预防本地沿海的风浪增水。堤坝顶部宽度为 6.0 m,堤坝高度位于 2.1~4.9 m 之间,迎水面坡度为 1:3,采用浆砌片石砌筑,背水面坡度为 1:5,采用撒播草籽的方式进行防护。堤坝采用附近山体开挖的花岗岩风化残积土进行回填,剔除直径大于 20 cm 的块石,采用分层填筑碾压的形式。根据工程地质勘察报告,该防洪堤在里程数 K1+230~K1+890 段内为低洼地区,地基内存在厚度为 3.1~10.7 m 不等的淤泥和淤泥质土,呈现灰黑色和黑色,经室内土工试验测试,其含水量位于 32.3%~62.4%,不排水抗剪强度较低,位于 8.7~14.5 kPa 之间,有机质含量位于 2.7%~4.9%,pH 值位于 6.4~6.8 之间,表现出弱酸性。

为了提高该软土地基的承载力,减小沉降量,增加堤坝的稳定性和缩短建设周期,该地基需进行地基处理。经业主、勘察、专家组、设计等单位研究论证,该地基采用水泥搅拌桩复合地基,桩径为 0.6 m、桩距为 1.8 m,采用梅花形进行布设,设计桩长进入软土下部土层 1.0 m,具体桩长以施工现场实际情况进行控制。根据附近区域以往的工程经验,若只采用纯水泥对其进行固化,有时加固效果欠佳,为此本工程拟尝试添加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对场地弱酸性软土进行中和反应。为了验证其可行性和改善效果,首先在室内进行配方试验,测试其工程性质改善状况,确定外加剂合适的掺量,并将其应用到实际工程中。

## 2 试验方法

### 2.1 试验材料

试验土样材料取自该堤坝 K1+230~K1+890 段典型软土,主要为淤泥。土样采集使用塑料密

封袋保水密封,运回实验室后放入恒温箱内保存,温度设置与地基温度保持一致,保证土样性质未发生较大变化。碱性外加剂选用工业级  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,水泥采用普通 325 硅酸盐水泥。经测试,该水泥主要化学成分  $\text{SiO}_2$  含量为 24.3%, $\text{CaO}$  为 60.4%, $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 3.1%。

### 2.2 试验方案

试验通过研究  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对弱酸性软土水泥土性能的影响,对比各掺量碱性外加剂水泥土的性能,从而得到相关结论。根据  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的掺量分为 5 组,第 1 组为对比组, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的掺量为水泥掺入量的 0%,第 2 至第 5 组  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的掺量分别为 3%、7%、10% 和 15%。试验中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  作为唯一变量,需要控制水泥掺量,每一组水泥掺量均为土样质量的 18%,保持水灰比为 1:2。试验共进行 4 项指标的研究,分别为密度、无侧限抗压强度、抗渗性和压缩性。无侧限抗压强度与密度的试件模具均为内径 45 mm、高 90 mm 的 PVC 管材,相应试件体积为  $143.14 \text{ cm}^3$ ;渗透性试验与压缩性试验采用标准试件,直径均为 61.8 mm、高为 40 mm 的圆柱体。为减少试验误差,每种条件的试样均制作 3 个,试验结果取 3 个试件测试结果的平均值。

### 2.3 试验准备

(1) 模具准备:做好标签,将模具按标签摆放好,并在模具内部涂抹满润滑剂;(2) 工具、仪器准备:试验所需的仪器、工具有砂浆搅拌机、研磨钵、汤勺、天平和称取容器等,将搅拌机、容器冲洗干净,确保无前次试验遗留材料,天平要求精确度达到 0.01 g。

### 2.4 试验过程

首先将原状土样称重,取约 1 500 g,放置于搅拌容器内;水泥取约 270 g,放在研磨钵或其他搅拌容器中;取碱性外加剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,根据制样掺量(分别为 0%、3%、7%、10%、15%)称取合适的质量,放入水泥粉所在的容器内,将水泥与外加剂混合均匀,使用汤勺搅拌 10~15 次;将水泥与外加剂混合物掺入搅拌容器的土样中,加入适量的自来水,快速放入砂浆搅拌机中搅拌,搅拌时间控制在 6~8 min,使得各种材料充分混合。将搅拌好的材料倒入模具中,每个模具分 3 次压实,并将两端刮平;每组试件做好后贴标签,放到恒温箱中进行养护,保持温度和湿度一定。养护 24 h 后取

出来拆模,放置于室内自然养护;每组试件分别养护 7、14、28 d;由于水泥土压实时体积会增大,可能会很难拆掉模具,此时需破坏模具(PVC 管)。待试件养护到相应龄期时,分别测试上述四项工程性质,各测试方法严格按照《土工试验方法标准》中的方法进行。

3 试验结果分析

3.1 密度

外加剂的掺入不宜对水泥土密度产生较大影响,否则在做地基处理时,水泥土桩重量的增大会提高下部未处理地基土体的附加应力,产生更大的沉降。根据试验结果,将碱性外加剂掺量与各组试件密度绘制成图 1(以 28 d 养护龄期的密度为例)。可见:(1)当  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量增加时,水泥土试件的密度略有增大,但增幅较小;(2)28 d 养护时间, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量为 3% 时,水泥土试件密度仅增加 1.5%,掺量为 10% 时密度增加到 4.8%;(3)掺量 0%~10% 时,水泥土密度与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量近似呈线性比例关系,掺量大于 10% 后,增长率降低,曲线变缓。可见掺加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对水泥土密度的增加作用较小,对水泥土桩产生的附加应力较低,即掺加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对加固效果的不利影响较小。因为水泥土掺入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与土样反应生成的化合物,其颗粒间隙比纯水泥土样反应生成化合物的要小,导致添加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的试件孔隙减小,质量差异不大的条件下水泥土的密度略有增加。

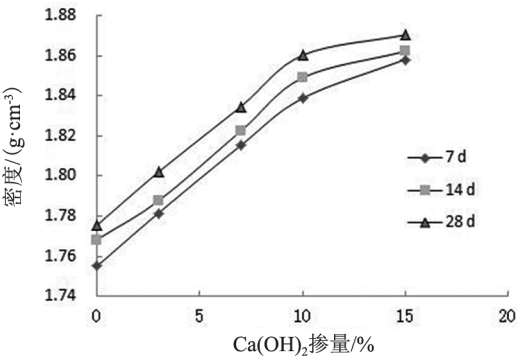


图 1  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量与水泥土密度的关系曲线  
Fig.1 Relation curve between content of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and the density of cement-soil

3.2 无侧限抗压强度

通过比较添加不同含量的碱性外加剂

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  对水泥土强度的提高作用,将各个不同龄期试件的无侧限抗压强度与外加剂掺量关系绘制成图 2。可以分析出:(1)添加外加剂的水泥土试件抗压强度有明显提高,提高幅度达到 21%~50%。(2)水泥土试件的抗压强度随着外加剂掺量的增加而增加,外加剂掺量在 5%~10% 时增速较明显,掺量小于 5% 时增幅不大,曲线较缓,外加剂掺量在 5%~10% 时曲线趋于指数变化,当掺量超过 10% 时,水泥土试件抗压强度增速趋缓。(3)掺量相同时,随着养护时间的增加,水泥土抗压强度随之增加,养护 7~14 d 内水泥土抗压强度增幅较大,而养护 14~28 d 内,水泥土抗压强度增幅相对较小,表现出碱性外加剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对弱酸性水泥土早期强度有较好的提高作用,对后期水泥土强度的提高幅度没有早期的高。当掺量超过 10% 时,水泥土试件抗压强度增幅较小,说明  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量并非掺加越多效果越好。究其原因,主要是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量过大时,在固化反应过程中,体积出现膨胀,试样孔隙增多,导致整体强度增幅不明显。且掺加过多的外加剂会增加软土处理的成本,不利于工程的经济性。综合提高效果和性价比,建议  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量不宜超过 10%。

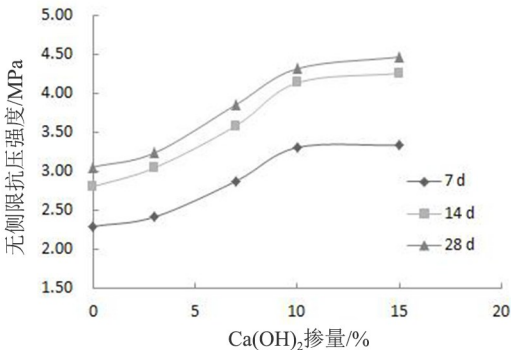


图 2 无侧限单轴抗压强度与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量关系曲线  
Fig.2 Relation curve between uniaxial unconfined compressive strength and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content

3.3 渗透系数

防洪堤地基渗透性一般要求较高,渗透系数越小,渗流量越小,对于防洪越有利。将试验测试得到的水泥土试件渗透系数与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量关系如图 3 所示。由图 3 可见,28 d 龄期时,随着掺量的增加,水泥土试件的渗透系数也随之降低,渗透系数从  $2.2 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$  降低到  $4.2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ , 10%~15% 掺量时曲线趋于平缓;可见  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺入后,能够较明显地降低水泥土渗透系数,这对



于防渗工程具有重要作用。在 28 d 渗透系数曲线中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量为 7% 时,渗透系数基于该曲线趋势稍高,但曲线趋势与 7 d 和 14 d 曲线大致相同,推测为试验误差导致。碱性外加剂提高弱酸性水泥土抗渗性能的原因主要是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与土体发生化学反应生成固结体,提高了水泥土的密度,填充颗粒之间的孔隙,阻碍了水分子的运动,使水泥土抗渗性能得到提高。

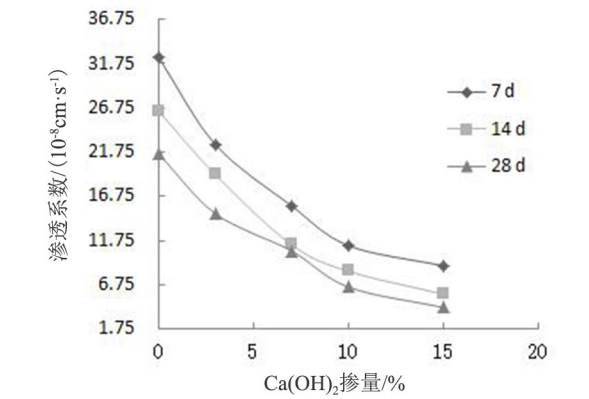


图 3 渗透系数与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量关系曲线  
Fig.3 Relation curve between permeability coefficient and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content

3.4 压缩模量

水泥土的压缩性关系到整个复合地基的沉降量,将水泥土试样压缩模量与外加剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量的关系曲线见图 4。由图 4 可见,随着外加剂掺量增加,各个不同龄期的水泥土压缩模量均有提高,并呈现出随着龄期的增加,压缩模量也随着增加。28 d 龄期时,随着掺量的增加,压缩模量由 43 MPa 提高到 50 MPa。水泥土压缩模量的增加程度与土体原有的压缩性、材料间化学反应程度、充填孔隙的大小等密切相关<sup>[6]</sup>。压缩模量增加的原因主要是碱性外加剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与土样反应生成的化合物,使得颗粒间隙减小,水泥土密度增加,进而导致水泥土压缩模量增加。

4 现场应用效果

本防洪堤软土地基加固中,基于上述室内试验结果,结合现场工程条件和经济性要求,水泥掺量控制在 18%、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量控制在 10% 左右。现场施工完毕后,进行水泥搅拌桩钻孔取芯和复合地基承载力检测试验,取芯孔数 36 孔。其中两处典型的芯样如图 4 所示(桩号分别为 125#和

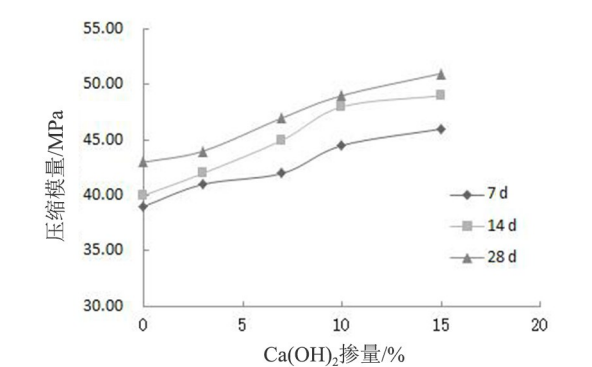


图 4 压缩模量与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量关系曲线  
Fig.4 Relation curve between compressive modulus and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content

342#)。可以看出,掺入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后,水泥土芯样以长柱状为主,部分呈短柱状、块状,芯样基本连续、完整、胶结程度较好,水泥搅拌基本均匀、断口基本吻合,芯样侧面局部见蜂窝麻面;桩身完整性较好,未见明显断桩现象,桩身完整性为 II 类。且在施工过程中,加入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后水泥浆流动性基本保持不变,搅拌性能不会降低,不会对施工造成不利影响。另外,对现场取出 4 个孔的芯样进行了部分工程性质的测试,平均重度 17.81 kN/m<sup>3</sup>,无侧限抗压强度 2.84 MPa,渗透系数  $2.32 \times 10^{-8}$  cm/s,压缩模量 43.2 MPa,基本与室内试验数据一致。现场应用结果表明,掺加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  并不会对水泥土桩重度有较大影响,同时还增加了水泥土桩的无侧限抗压强度,降低水泥土的渗透系数,提高了其压缩模量。

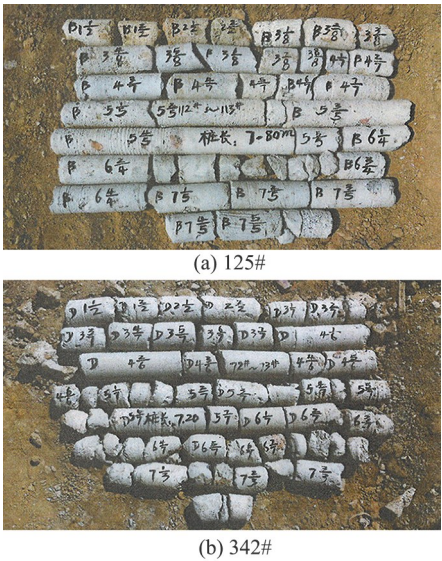


图 5 现场搅拌桩钻孔取芯图片  
Fig.5 Pictures of core-drilling the mixing piles

## 5 结论

鉴于酸性软土水泥土强度较低的问题,采用价格相对低廉的碱性外加剂  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对弱酸性软土水泥土进行了处理,通过室内配方试验,取  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量为唯一变量,每组制样  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量为该组水泥掺量的 0%、3%、7%、10% 和 15%,测试了水泥土固化后的若干工程性质,主要得到了以下结论:

1) 水泥土掺入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后其密度比淤泥本身的密度略微增大,但增大幅度基本小于 4.8%,不会对下卧未加固土层产生较大的不利影响;

2) 水泥土试件的抗压强度随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺

量的增加而增加,外加剂掺量在 5%~10% 时较明显,掺量小于 5% 和高于 10% 时增幅相对较小,且随着养护龄期的增加,水泥土强度逐渐提高,特别是早期强度提高幅度较为明显;

3) 随着外加剂掺量的增加,各个不同龄期的水泥土试件的渗透系数随之降低,最大降低了一个数量级,降低幅度超过 70%,水泥土压缩模量得到提高。

4)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺入后,弱酸性软土水泥土的各项性能均有不同程度的提升,综合提高效果和性价比,建议  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  掺量不宜超过 10%,适宜大面积推广应用。

## 参考文献:

- [1] 傅小姝,王江营,张贵金,等.不同 pH 值下水泥土力学与渗透特性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(8):1639-1646.
- [2] 李加进.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  改善弱酸性软土水泥土工程性质的试验研究[J].水利科技,2018(3):56-59,62.
- [3] 赵振亚,申向东,贾尚华.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对低掺量水泥土的强度影响[J].土木建筑与环境工程,2012,34(S1):170-173.
- [4] 马冬梅.水泥土搅拌法加固软土地基的室内试验研究[J].现代交通技术,2007,4(6):1-4.
- [5] 骆以道,丘建金,郭敏燕.搅拌水泥土抗压强度特性试验[J].土工基础,2010,24(4):91-94.
- [6] 杨枫,毕贤顺,罗才松.闽南地区水泥土工程特性实验[J].黑龙江科技学院学报,2012,22(5):506-509.

(责任编辑:方素华)

(上接第 217 页)

## 参考文献:

- [1] 冯海宁.顶管施工环境效应影响及对策[D].杭州:浙江大学,2003.
- [2] 彭立敏,王哲,叶艺超,等.矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设,2015,35(1):1-8.
- [3] 魏纲,徐日庆,黄斌.长距离顶管道道的失稳分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1427-1432.
- [4] 魏纲,吴华君,陈春来.顶管施工中土体损失引起的沉降预测[J].岩土力学,2007(2):359-363.
- [5] ADDENBROOKE T, POTTS D. Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects[J].The International Journal of Geomechanics, 2001, 1(2): 249-271.
- [6] SOTIANOS A, LOUKAS P, CHANTZKOS C. Pipe-jacking a sewer under Athens[J].Tunneling and Underground Space Technology, 2004(19): 193-203.
- [7] 魏纲,周洋,魏新江.盾构隧道施工引起的工后地面沉降研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2891-2896.
- [8] 庞臣军,鲍先凯.矩形顶管施工的数值模拟研究[J].施工技术,2013,42(S1):407-412.
- [9] 喻军,龚晓南.考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2605-2610.
- [10] 董俊.地铁过街通道矩形顶管施工变形监测分析[J].铁道工程学报,2016,33(8):106-110.
- [11] 邓长茂,彭基敏,沈国红.软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1002-1007.
- [12] 张振.超大矩形断面顶管隧洞开挖引起的地表沉降研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
- [13] 赖金星,王开运,侯丹丹,等.砂土地层顶管施工土体变形规律三维数值分析[J].西安科技大学学报,2015,35(4):450-457.
- [14] 银英姿,赵强,崔芳静,等.土压平衡矩形顶管施工引起的地表沉降探究[J].长江科学院院报,2019,36(1):95-101.

(责任编辑:陈 雯)