

DOI: 10.11779/CJGE201604022

从水分转化研究早强型材料固化淤泥的早强机理

甘雅雄¹, 朱伟^{1,2}, 吕一彦¹, 杨琴¹

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对淤泥固化工程为了减少堆场占地而需要早强性能的问题, 研究在污水厂污泥固化/稳定化处理中使用的早强材料—硫铝酸盐水泥对清淤淤泥是否具有早强的性质, 并从水分转化的角度探讨早强发生的机理。以太湖清淤淤泥为对象, 使用硅酸盐水泥为对照, 实测分析了固化淤泥的强度、变形、水分转化量。结果表明: 硫铝酸盐水泥具有良好的早强性能, 早强的机理在于更多地反应形成了结晶态的钙矾石。这种以矿物水形态被定量测定的生成物对早强发挥了关键的作用。

关键词: 淤泥; 固化; 早强; 固化材料; 水分转化

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0755-06

作者简介: 甘雅雄(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事疏浚泥资源化处理方面的研究。E-mail: gyx1990love@126.com。

Early-strength mechanism of cementitious additives from perspective of water conversion

GAN Ya-xiong¹, ZHU Wei^{1,2}, LÜ Yi-yan¹, YANG Qin¹

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The problem that large area is occupied by dredged materials and the strength of solidified soil is developed slowly has become urgent in geotechnical engineering. The performance of solidified dredge treated by sulphoaluminate cement which is used in sludge solidification/stabilization (S/S) practice, and the early-strength mechanism based on water transfer are studied. For the dredged materials from Taihu Lake treated by the sulphoaluminate cement and the ordinary portland cement, the unconfined compressive strength (q_u) and the failure strain of the solidified soil and the amount of water transfer are measured. The test results show that the sulphoaluminate cement has a good performance of early strength in solidification. The early-strength mechanism is the formation of more crystalline ettringite, that can be quantified by mineral water, which plays a key role in the hydrating reaction.

Key words: dredged material; solidification; early strength; solidified material; water conversion

0 引言

近些年, 中国水利系统广泛开展河流、湖泊的清淤治理工程^[1], 而交通系统也大量开展航道整治及围填海工程^[2], 清淤、吹淤所产生的淤泥数量巨大, 后续的处理利用工作越来越重要。除吹填工程常用的真空预压等促进固结沉降的地基处理技术以外, 在城市湖泊、城市河流清淤工程中, 由于储放淤泥的堆场土地难以保证, 将淤泥处理后作为土材料进行使用的方法更多地得到使用。而能够将淤泥转化为土材料的主要途径就是淤泥固化^[1,3]的方法。太湖清淤产生的大量淤泥都是在周转堆场暂时存放, 经过固化处理后作为土材料转为回填土等进行利用。在工程使用中, 为了尽快地使堆场周转使用就需要固化淤泥能在短期内由高含水率的淤泥变为能够回填碾压的土材料, 也就

是需要一定的早强性能。

很多学者都研究了固化淤泥强度随龄期的变化规律^[4-5], 这些固化材料主要是以水泥基的材料为主, 强度达到最终强度 80%左右所需的时间都在 28 d 以上。为了降低固化材料的造价, 一些使用废弃石膏粉、粉煤灰、硅粉等复合型的固化材料^[6]也得到开发和使用, 在降低成本方面发挥了很好的作用, 但淤泥的快速早强材料的开发尚未见诸报到。在污水厂污泥的固化/稳定化研究领域, 孙晓辉等^[7-8]提出了使用硫铝酸盐水

基金项目: “十二五”国家重大科技专项项目 (2013ZX07113001); 水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2012ZX07103-005); 江苏省水利厅科技项目 (2014); 江苏省科技基础设施建设计划项目 (BM2013013)

收稿日期: 2014-12-11

泥能够快速提高固化/稳定化处理污泥的早期强度,也从反应生成物中水分渗透的难易程度上推测了早强的机理。但是否是硫铝酸盐水泥水化生成物表面出现反应裂隙,有利于水分进入内部而进一步反应的问题并没有得到试验的实证。为了证明这一点,必须知道硫铝酸盐水泥是否比硅酸盐水泥能够更快地由较多的水分参与初期的反应,也就是水分的转化速度问题。朱伟等^[9]、张春雷^[10]提出了可以从水分转化的角度明确固化淤泥中反应生成物数量的方法,借鉴这一方法可以研究水分参与反应的早期速度,从而了解早强的机理。

为了了解在污水厂污泥固化/稳定化处理中发挥良好早强性能的硫铝酸盐水泥是否在淤泥固化中具有同样的早强性能,并揭示早强发生的机理是否在于水分的快速渗入。本论文以太湖清淤淤泥为对象,使用普通硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥进行固化处理,对其强度、破坏变形,尤其是反应过程中的水分变化进行了试验研究,意图明确早强效果并对其机理进行确实的解释。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所采用的淤泥取自太湖梅梁湾白旄淤泥堆场,淤泥的物理性质指标如表 1 所示。淤泥中的黏粒(粒径<5μm)含量为 44.8%,根据淤泥的液限和塑性指数,可以确定该淤泥的分类为高液限黏土(CH)。试验用的固化材料为南京“天宝山牌”32.5[#]复合硅酸盐水泥(OPC)和早强型固化材料为硫铝酸盐水泥(SAC)。两种材料的主要成分组成及含量如下表 2 所示。

1.2 试验方法

试样制备:水泥添加量是按照每立方米淤泥中加入水泥的质量进行计算,本文采用的添加量为 50, 100, 150, 200 kg/m³。在淤泥中按配比添加固化材料后,搅拌均匀,分 3 层装入制样模具(直径为 3.91 cm,高度为 8.0 cm),制成无侧限抗压强度试样;同时装入直径 6.0 cm、高度为 3.5 cm 的环刀中制成水分离心测定试样。试样置于恒温恒湿箱(温度为 20±2℃,湿度>90%)中,养护 1 d 后脱模,脱模后养护至特定龄期进行无侧限抗压强度试验和离心水分试验。

表 1 淤泥物理性质

Table 1 Physical properties of dredged materials						
含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	比重	黏粒 含量 ^① /%	液限 /%	塑限 /%	有机质 含量 ^② /%
122.4	1.39	2.65	44.8	55.77	28.45	4.60

注:①粒径<5 μm; ②灼烧法。

表 2 固化材料成分组成及含量

Table 2 Components and content of solidified materials					
组成	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO /%	SO ₃ /%
硫铝酸盐水泥	3~10	28~40	1~3	36~43	8~15
硅酸盐水泥	21~25	4~8	2~4	64~67	—

土力学试验:鉴于固化淤泥属于低应变破坏的强度卓越型土材料,力学性质主要依据无侧限抗压强度来进行评价。试验按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)进行,对不同试样组别,每组测定 3 个平行试样结果取其平均值。

水分离心试验^[10]:为了区分固化淤泥中的自由水、结合水、矿物水的数量和变化量,使用日立 CR21G III 水分离心机进行了实测。试样用离心机环刀直接切取后放入离心机旋杯中,离心机转速分别为 3000, 5000, 7000, 9000 r/min,每级转速下运行 3 h,并记录每级转速下运行后试样高度变化量 Δ*h_i*和试样质量的变化量 Δ*m_i*。由此可获得固化淤泥的在不同离心势下的水分量,绘制脱水水分特征曲线(pF - θ),从而计算各种性质水分的多少。

水分类型的分类按照土水结合势能(pF)的大小划分,分为孔隙水(pF<7.0)和矿物水(pF>7.0),其中孔隙水包括自由水(0<pF<3.8)和结合水(3.8<pF<7.0)。试样在 105℃的条件下烘干 8 小时以上孔隙水全部排出,此时对应的土水结合势能 pF=7.0;自由水量可通过离心试验获得的 pF - θ 曲线中 pF=3.8 时所对应的含水率计算而得。淤泥在固化的过程中,由于原泥中的自由水与固化材料发生反应,从而将自由水转化为结合水和矿物水。因此,淤泥固化前后,自由水变化量 Δ*m_{f_w}*等于结合水增量 Δ*m_{b_w}*与矿物水增量 Δ*m_{h_w}*之和,即 Δ*m_{f_w}*=Δ*m_{b_w}*+Δ*m_{h_w}*。本文中所有通过水分测定试验获得的试验数据均换算为单位淤泥中的水分量来表示。

X 射线衍射试验:为了测定不同龄期下两种材料的水化产物类型及含量的差异,在南京大学现代分析中心采用的瑞士 Thermo 公司 X-TRA 型 X 射线衍射仪,对固化土样矿物成分进行了测定。制备尺寸为 2 cm×2 cm×2 cm 的固化土试样,放入恒温恒湿箱(温度为 20±2℃,湿度>90%)中,养护至特定龄期后切取试样中心部分,放入无水乙醇终止水化,研磨成粉体,过 0.075 mm 的筛,进行 X 衍射试验。

2 结 果

2.1 材料掺量与强度关系

将各龄期固化材料的添加量与无侧限抗压强度的关系制成图 1。可以看出,无论是硅酸盐水泥还使硫

铝酸盐水泥, 添加量和 q_u 之间都体现出接近线性的规律。这一关系与文献[3]相同可以用公式 $q_u = k(\alpha - \alpha_0)$ 来表示。这里的 k 为固化系数, 表示相同的材料掺量对固化淤泥强度增量的影响, α_0 为固化材料最低添加量。从数据来看, 两种固化材料的最小添加量 α_0 都在 50 kg/m^3 左右, 没有体现出明显的差异。

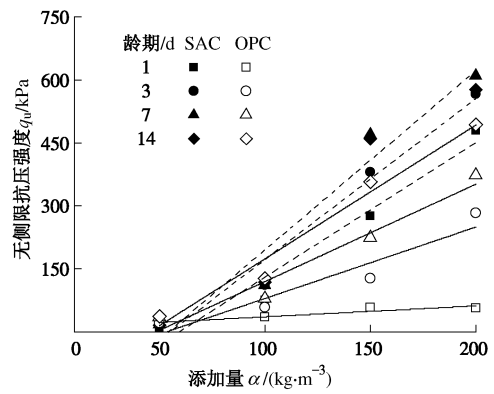


图 1 固化淤泥强度随材料添加量的变化
Fig. 1 Relationship between compressive strength and solidified-material content of solidified dredged materials

但在 14 d 龄期范围内固化系数 k 的差异比较大, 硫铝酸盐水泥明显地表现出更好的固化效率。两种材料所对应的固化系数随龄期的变规律如图 2 所示。从固化系数随龄期的变化可以看出, 硫铝酸盐水泥在 6 d 龄期之前一般都是硅酸盐水泥的 2 倍以上, 在 1 d 时可以达到 4~5 倍。随著龄期的增加, 两种固化材料的固化系数出现逐渐接近的结果。从这一数据来看, 两种固化材料强度与添加量的规律一致, 但硫铝酸盐水泥明显地表现出早强的特征。

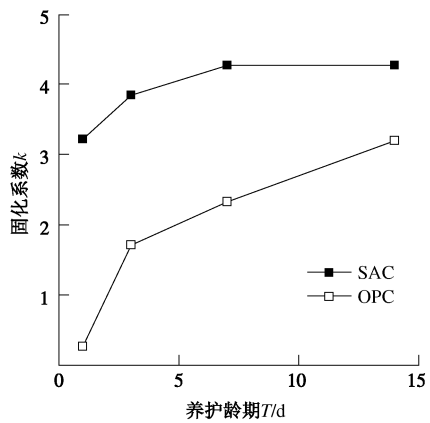


图 2 固化系数随龄期变化
Fig. 2 Variation of solidified coefficient with age

2.2 强度、龄期与破坏变形

根据现场经验, 施工时流塑性淤泥无法进行回填碾压施工, 一般要在无侧限抗压强度达到 50 kPa 以后方能达到回填碾压状态。而实验室模具制样得到的固

化淤泥强度在现场施工时会出现一个折减系数, 一般会在 0.7 左右, 也可以理解为室内试验无侧限抗压强度达到 80 kPa 左右, 就可以满足碾压的要求。固化淤泥越快达到碾压要求, 施工的周期就越短, 堆场的周转就越有利。为了了解在养护多长时间后固化淤泥可以达到这一强度, 将添量 100 kg/m^3 和 150 kg/m^3 的试验得到的强度与龄期的关系制成图 3。从强度增长的趋势而言, 硅酸盐水泥在前 14 d 基本上体现出随时间线性增长的趋势, 而硫铝酸盐水泥则出现最初几天增长快, 随后变缓的状态。在相同添加量的前提下前 14 d 之间硫铝酸盐水泥的强度大于硅酸盐水泥, 表现出早强的特性。在添加量为 100 kg/m^3 的情况下, 硫铝酸盐水泥在 1 d 就能达到可碾压强度, 而硅酸盐水泥则要在 7 d 后才能达到。由此可以认为, 硫铝酸盐水泥的早强性在工程上也是具有价值的。

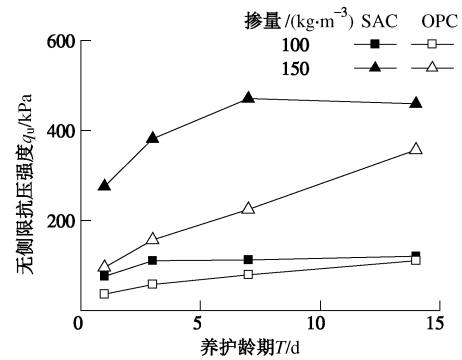


图 3 无侧限抗压强度随龄期变化规律
Fig. 3 Variation of undefined compressive strength with age

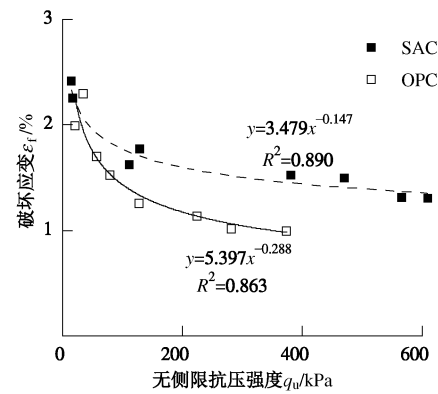


图 4 固化淤泥破坏应变与抗压强度的关系
Fig. 4 Relationship between failure strain and compressive strength of solidified dredged materials

化淤泥的破坏应变 ϵ_f 是衡量固化淤泥的变形特性的主要指标之一, 破坏应变过大的话则必须考虑破坏之前的变形问题。将所有试样的破坏应变和无侧限抗压强度绘制在一起, 形成图 4。可以看出, 两种固化材料都符合文献[3]所提出的 $\epsilon_f = a_1 \cdot (q_u)^{b_1}$ (其中

a_1 , b_1 均为试验参数) 的拟合规律, 且破坏变形都在 2.5% 以内。总体上硫铝酸盐水泥的破坏变形要比硅酸盐水泥大一些, 强度越高, 这种差异越大。这在某种意义上反映了水化反应生成物对土体骨架加固作用上的差异。而在达到满足碾压的强度范围内, 虽然仍然表现出硫铝酸盐水泥试样破坏变形较大的结果, 但总体上两者的差异不是太大。

2.3 水分的转化量与龄期的关系

为了研究两种固化材料在水化反应上出现的差异, 通过原泥、固化淤泥之间各种形态水分量的变化来进行分析。图 5, 6 分别对添加量为 100 kg/m^3 和 150 kg/m^3 固化淤泥中结合水增量 Δm_{bw} 和矿物水增量 Δm_{hw} 随著龄期的变化进行了整理。

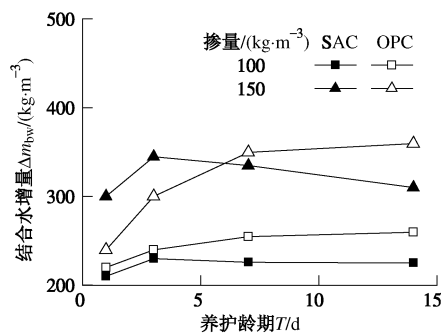


图 5 结合水增量随龄期变化规律

Fig. 5 Variation of bond water with age

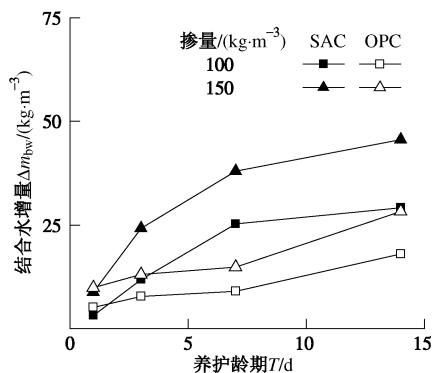


图 6 矿物水增量随龄期变化规律

Fig. 6 Variation of mineral water with age

1 m^3 的原泥中本来有 617.12 kg 自由水, 150 kg 结合水, 加入固化材料后, 自由水会向结合水转化, 也会转化为矿物水。加入硅酸盐水泥的试样在前 14 d 中, 结合水一直处于增加趋势, 但会随著龄期而逐渐减缓, 而加入硫铝酸盐水泥的试样则表现出先增加后减少的趋势, 转折点出现在第 3 天。在前 3 天两种试样结合水的增加量差异不大, 但 3 d 以后添加硅酸盐水泥的试样结合水数量逐渐超出, 到 14 d 时接近硫铝酸盐水泥的 1 倍。

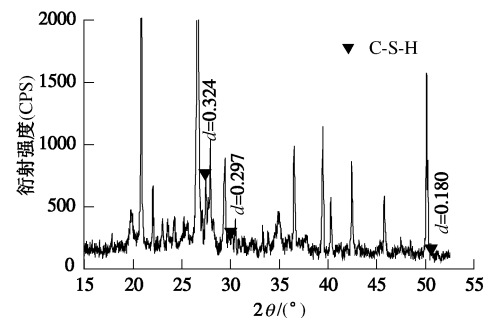
矿物水的增加量要比结合水少, 只有 1/10 左右。

加入硅酸盐水泥的试样在前 14 d 中, 矿物水一直处于缓慢增加趋势, 而加入硫铝酸盐水泥的试样则在 1~7 d 内快速增长, 此后逐渐变缓。从第 3 天开始硫铝酸盐水泥所转化的矿物水就高达到硅酸盐水泥的 2 倍左右, 一周后这一差距逐渐减少。

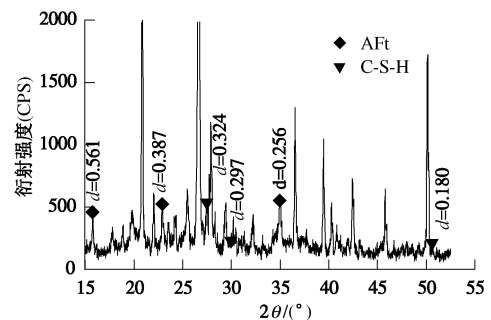
2.4 固化土物相组成分析

分别对两种材料固化土 (添加量为 150 kg/m^3 , 养护龄期为 1 d) 进行 X 射线衍射试验, 结果见图 7。钙矾石的特征峰 d 值^[11]取为 0.561, 0.387 和 0.256, C-S-H 凝胶的特征峰 d 值^[12]取为 0.324, 0.297 和 0.180。

从图 7 中可以看出, 在养护 1 d 后普通硅酸盐水泥固化土中只有 C-S-H 凝胶衍射峰出现, 而并没有钙矾石 (Aft) 的衍射峰, 而硫铝酸盐水泥固化土中 C-S-H 凝胶和钙矾石 (Aft) 的衍射峰均出现了。说明在普通硅酸盐水泥固化土养护 1 d 后并不存在钙矾石 (Aft), 而硫铝酸盐水泥固化土中存在。



(a) 普通硅酸盐水泥 (1 d)



(b) 硫铝酸盐水泥 (1 d)

图 7 固化淤泥 XRD 图谱 ($\alpha=150 \text{ kg/m}^3$)

Fig. 7 XRD images of solidified dredged materials ($\alpha=150 \text{ kg/m}^3$)

3 讨论

(1) 硫铝酸盐水泥的早强效果: 从无侧限抗压强度的结果来看, 硫铝酸盐水泥具有较为明显的早强效果, 工程使用中为了降低造价, 一般都采用较低的添加量, 如果以 50 kg/m^3 的添加量进行使用的话, 3 d 左右就能够达到可碾压的程度, 如果以 100 kg/m^3 的添加量进行使用则 1 d 就能达到可碾压的程度, 从这一角度是非常适合对早期强度有要求的工程使用。另

一方面,从Huang等^[13]对固化淤泥后期碾压对其力学性质影响的试验明确了后续的碾压施工会造成前期已经固化形成的结构性的破坏,并且随着碾压前养护龄期的增加,压实固化土强度恢复率会有所降低。而硫铝酸盐水泥在1 d龄期,固化土的强度达到28 d强度的80%以上,说明固化土的稳定的骨架结构已经基本形成了,使得硫铝酸盐水泥固化土在重塑后,结构强度损失较大,因此应该考虑尽早地进行碾压施工。

(2) 早强的机理: Sun等^[8]在使用硫铝酸盐水泥对含有50%左右有机物的污水厂污泥固化/稳定化处理时,取得了良好的早强效果。Sun等对这一早强机理的解释如图8所示。也就是说硅酸盐水泥前期的反应产物形成了一层外壳,影响了水分与水泥颗粒的接触,而硫铝酸盐水泥的水化产物是一些针状产物,期间的空隙允许水分进入并进一步地与水泥颗粒接触并反应,因此上体现出反应快的特点。

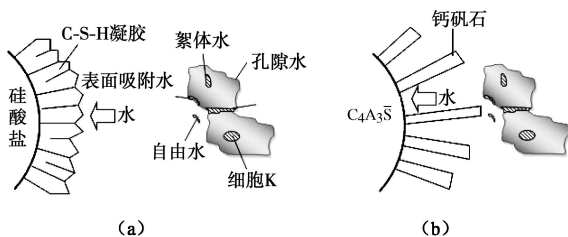


图8 水化反应时硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥的差异^[8]

Fig. 8 Difference of hydrating interface between (a) dredged and OPC grain; (b) dredged and SAC grain

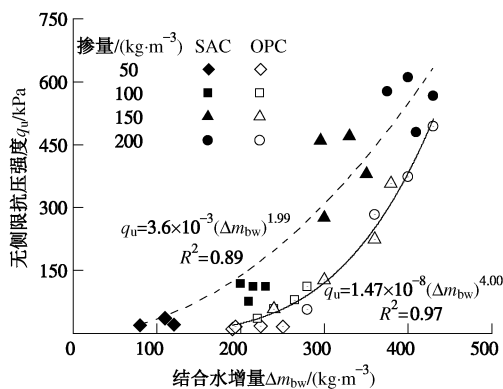


图9 结合水变化量与抗压强度的关系

Fig. 9 Relationship between undefined compressive strength and variation of bound water

从本次试验得到的结合水和矿物水的增量来看(图5, 6),第3天结合水的增量之间并不存在非常明显的差距,而矿物水则出现将近一倍的差异。结合水主要反映水化产物为C-S-H凝胶态物质的多少,而矿物水可以表征反应形成的结晶物钙矾石的多少。可以认为两者在反应形成C-S-H凝胶态物质的速度上差

异不大,但由C-S-H进一步转化为结晶物钙矾石的过程中出现差异。这可能也是两者宏观力学性质出现差异的主要原因。

(3) 反应生成物和强度的关系: 图9将结合水增量与无侧限抗压强度之间的关系进行了分析,可以看出在同样的结合水增量的条件下,即水化产物C-S-H凝胶的量大致相同,硫铝酸盐水泥所对应的强度增量要大一些,也从侧面反映硫铝酸盐水泥水化产物的C-S-H凝胶态物质具有更强的结合势,对淤泥颗粒之间产生的胶结作用好于硅酸盐水泥。

图10将矿物水增量与强度的关系进行了分析,发现虽然两种固化材料与强度的关系在增量很小时有些离散,但总体上矿物水的增量与强度的增量基本上呈线性关系,而且两种材料基本上落在一条直线上,说明两种材料形成的结晶物钙矾石的性质应该比较接近,对于淤泥的强度的影响也没有本质差异。

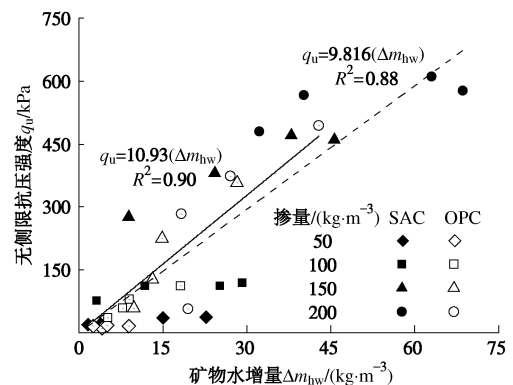
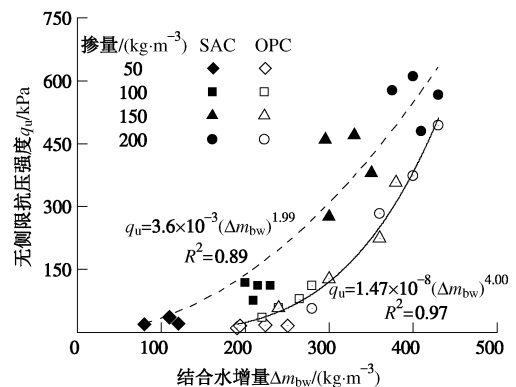


图10 矿物水变化量与抗压强度的关系

Fig. 10 Relationship between undefined compressive strength and variation of mineral water

4 结 论

(1) 硫铝酸盐水泥具有良好的早强性能,在50~100 kg/m³的掺加量的情况下,一般在1~3 d之内固化淤泥能达到可碾压的状态,与硅酸盐水泥的7~14 d

相比, 具有明显的早强优势。

(2) 采用硫铝酸盐水泥的固化淤泥在 1~3 d 内强度增加迅速, 14 d 以后强度增减开始减少, 其破坏应变稍大于硅酸盐水泥, 但力学性质非常接近。

(3) 硫铝酸盐水泥的早强性能主要来源于早期较多地形成了结晶物钙矾石, 从 XRD 分析中可知硫铝酸盐水泥中钙矾石出现的较普通硅酸盐水泥早, 并且在早期的硫铝酸盐水泥矿物水的增长速率也要明显的高于普通硅酸盐水泥。

(4) 两种固化材料的矿物水与强度的关系比较接近, 说明其结晶物基本相同。但结合水对强度的贡献方面出现差异, 硫铝酸盐水泥形成的凝胶态 C-S-H 表现出更高一些的结合势。

参考文献:

- [1] 朱 伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, **25**(4): 39 - 41. (ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, LIU Han-long, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science and Technology, 2002, **25**(4): 39 - 41. (in Chinese))
- [2] 张和庆, 谢 健, 朱 伟, 等. 疏浚物倾倒现状与转化为再生资源的研究——中国海洋倾废面临的困难和对策[J]. 海洋通报, 2004, **23**(6): 54 - 60. (ZHANG He-qing, XIE Jian, ZHU Wei, et al. Present situation of dredged materials dumping and the study of transforming dredged mud into regenerative resources——difficulties of refuses dumping in China seas and countermeasures to deal with these problems[J]. Marine Science Bulletin, 2004, **23**(6): 54 - 60. (in Chinese))
- [3] 汤怡新, 刘汉龙, 朱 伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 549 - 554. (TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 549 - 554. (in Chinese))
- [4] 张铁军, 洪振舜, 邓东升, 等. 水泥固化粉质土的无侧限抗压强度预测[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2008, **38**(5): 839 - 843. (ZHANG Tie-jun, HONG Zhen-shun, DENG Dong-sheng, et al. Predication method of unconfined compression strength for cemented silty soils[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, **38**(5): 839 - 843. (in Chinese))
- [5] 曹玉鹏, 卞 夏, 邓永锋. 高含水率疏浚淤泥新型复合固化材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011(增刊 1): 321 - 326. (CAO Yu-peng, BIAN Xia, DENG Yong-feng. Solidification of dredged sludge with high water content by new composite additive[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 321 - 326. (in Chinese))
- [6] 朱 伟, 张春雷, 范昭平, 等. 复合型淤泥固化材料[P]. CN03113373.8. 2003-10-15. (ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, FAN Zhao-ping, et al. A new complsite materials for dredged solidification[P]. CN03113373.8. 2003-10-15. (in Chinese))
- [7] 孙晓辉. 固化污泥早期强度发展机理及早强固化材料研究[D]. 南京: 河海大学, 2012. (SUN Xiao-hui. Study on mechanism of early-strength of solidified sludge and binders with high early-strength for sludge treatment[D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))
- [8] SUN X H, ZHU W, QIAN X D, et al. Exploring cementitious additives for pretreatment of high-early- strength sewage sludge from the perspective of the rapid generation of nonevaporable water[J]. Journal of Materials in Civil Engineering. 2013, **26**(5): 878 - 885.
- [9] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C. Soil - water transfer mechanism for solidified dredged materials[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2007, **133**(5): 588 - 598.
- [10] 张春雷. 基于水分转化模型的淤泥固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (ZHANG Chun-lei. Study of dredged sediments solidification mechanism based on water tranfer model[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [11] 黄 新, 许 晟, 宁建国. 含铝固化剂固化软土的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(1): 156 - 161. (HUANG Xin, XU Sheng, NING Jian-guo. Experimental research on stabilized soft soils by alumina bearing modifier[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 156 - 161. (in Chinese))
- [12] 彭小芹, 杨 巧, 黄 滔, 等. 水化硅酸钙超细粉体微观结构分析[J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2008, **24**(5): 823 - 827. (PENG Xiao-qin, YANG Qiao, HUANG Tao, et al. Analysis on the microstructure of hydrated calcium silicate superfine powder[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2008, **24**(5): 823 - 827. (in Chinese))
- [13] HUANG Y H, ZHU W, QIAN X D, et al. Change of mechanical behavior between solidified and remolded solidified dredged materials[J]. Engineering Geology. 2011, **119**(3): 112 - 119.