

## 水泥及其外加剂固化淤泥的试验研究

程福周<sup>1</sup>, 雷学文<sup>1</sup>, 孟庆山<sup>2</sup>, 李 享<sup>3</sup>, 王 帅<sup>1</sup> (1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室, 湖北 武汉 430071; 3. 成都航空职业技术学院 建筑工程系, 四川 成都 610100)

**[摘要]** 为了改善武汉东湖疏浚淤泥的物理力学性能, 在传统水泥固化处理方法的基础上, 掺入外加剂氢氧化钠(NaOH)和石膏, 对100多组淤泥固化土试样进行了室内无侧限抗压强度试验, 进行固化效果和固化机理的分析。结果表明: 在疏浚淤泥固化过程中水泥占主导地位, 对固化效果影响最为显著; NaOH促进了水泥的水化作用, 增强了淤泥固化土的无侧限抗压强度, 表现在固化淤泥早期强度的快速提高; 石膏有利于固化淤泥早期强度的形成, 其作用持续于整个淤泥固化过程。在水泥掺入比一定时, NaOH和石膏都存在最佳掺量, 超过了最佳掺量, 强度就会降低。3种固化剂的正交试验得出最佳配比为实际工程的应用提供依据。

**[关键词]** 疏浚淤泥; 固化土; 外加剂; 无侧限抗压强度; 固化机理

**[中图分类号]** TU472.5 **[文献标识码]** A

### Experimental Study on Cement and its Additional Agent to Cure Silt

Cheng Fuzhou<sup>1</sup>, Lei Xuwen<sup>1</sup>, Meng Qingshan<sup>2</sup>, Li Xiang<sup>3</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup> (1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Department of Construction Engineering, Chengdu Aviation Vocational and Technical College, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** In order to improve the physical and mechanical properties of dredged silt of East Lake in Wuhan, on the basis of traditional cement solidification processing method, with samples mixed with admixture sodium hydroxide(NaOH) and plaster, indoor unconfined compressive strength tests of more than 100 groups of samples are carried out, and the curing effect and curing mechanism are analyzed. Results show that the role of cement is the dominant additive during solidification of sludge; the NaOH promotes the cement hydration, enhancing the unconfined compressive strength of solidified silt soil, and the early strength of solidified silt has been increased rapidly; the gypsum is conducive to the early strength formation of solidified sludge, and its role is shown throughout the solidifying process continuously. When cement mixing ratio is constant, there is the best dosages of both NaOH and gypsum. If the contents exceed the best volumes, the strength of the solidified soil decreases. The optimum mixture ratios are derived by the orthogonal tests of the three kinds of curing agents, providing for the basis for practical engineering applications.

**Keywords:** dredging silt; stabilized soil; additional agent; unconfined compressive strength; curing mechanism

### 0 引言

我国每年都会针对水利、港口航道、环保、近海岸等工程开展大规模的疏浚清淤工作, 从而会产生大量的疏浚淤泥<sup>[1]</sup>。目前武汉市38个城中湖污积

严重, 到2020年, 共要清污约630万m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。淤泥的疏浚绝大多数采用机械开挖和水力吹填方法施工, 所形成的疏浚泥的工程特性很差, 主要表现为含水率高、孔隙比大、压缩性大、强度低、渗透性低及排水固结缓慢等特点。造成其工程特性差的根本原因在于疏浚泥的粘粒含量太高。粘粒大多呈薄片状, 其比表面积很大, 且表面往往带有负电荷, 会吸附带极性的水分子和水合阳离子, 以致在其表面形成一定厚度的吸附水层, 吸附水的粘滞性较大, 能动性较小, 比较难以脱出<sup>[3]</sup>, 是淤泥处理中的一个难点。

[收稿日期] 2014-01-26

[基金项目] 湖北省自然科学基金青年杰出人才项目(项目编号: 2011CDA105)

[作者简介] 程福周(1989-)男, 硕士研究生

[联系方式] 1459024673@qq.com

传统堆砌处理淤泥的方式不仅占用了土地并且容易对周围环境产生二次污染。同时在道路建设、填换地基等工程中常常进行大量的砂石开采,破坏了山体造成了环境污染<sup>[4]</sup>。对疏浚淤泥进行化学固化,将其转化为固化材料,代替传统材料用于堤防加固工程、道路工程、填海工程等,可以保护环境,符合建设资源节约型和环境友好型社会的要求。

另一方面,化工生产中产生许多磷石膏、硼石膏废料(主要成分是硫酸钙),例如我国满负荷生产 $P_2O_5$ 时年排放磷石膏约2000万t,利用率不足10%<sup>[5]</sup>,这些废料长期大量积压堆放,不仅占用场地、毁坏农田,而且也污染环境。基于以废治废的思想,提出将石膏作为水泥外加剂用于固化疏浚淤泥,赵多建等<sup>[6]</sup>在用水泥固化改良深圳盐田港地区的海相淤泥时掺入工业废料磷石膏,并测定固化土的无侧限抗压强度和破坏变形,证明在水泥中加入废石膏可以促进水泥的固化效果,提高水泥固化土的早期强度,破坏应变随龄期呈加速降低趋势。丁建文等<sup>[5]</sup>提出用水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥的方法,证明磷石膏对疏浚淤泥固化土的增强效果显著。蒲凡等<sup>[7]</sup>在海涂淤泥中掺入不同量NaOH改变淤泥孔隙溶液的pH值,显示NaOH使得水泥水化反应处在碱性环境中,可以取得比只用水泥固化更好的效果。

由于淤泥的形成条件和所处环境不同,其物理化学成分存在差异,本文以武汉东湖疏浚淤泥为原材料,在水泥作为主固化剂的基础上掺入石膏和NaOH作为外加剂,研究石膏和NaOH对淤泥固化土无侧限抗压强度的影响,并将这两种外加剂结合设置3种固化材料的正交试验,找出其最佳组合配比,为东湖淤泥的治理提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用的淤泥取自武汉东湖疏浚淤泥,在试验前将取来的淤泥土样自然风干,用橡胶榔头击碎。东湖底泥是一种以含水铝硅酸盐为主,由矿物岩石碎屑和有机腐化物等组成的混合物,矿物晶体中含有长石等多种熔剂型矿物和有机物质。底泥含水率为85.48%~89.72%,有机质含量为1.1%,相对密度为1.2,测得pH值为5.7,液限为65.34%,粉粒含量为42.96%,黏粒含量57.04%,颗粒较细,可塑

性高,经物理性能分析,其塑性指数( $I_p$ )为13~15,表现出高含水率、低承载力等特点。根据室内物化指标试验,底泥的主要化学成分如表1所示,试验用的水泥为32.5#普通硅酸盐水泥,NaOH为分析纯化学试剂,试验用的石膏主要化学成分如表2所示。

表1 淤泥的主要化学成分

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>
含量	64.67	12.72	5.24	3.15	1.96	0.91

表2 石膏主要化学成分

烧失量	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	结晶水
11.85	2.75	0.49	0.9	37.41	0.8	43.11	5.34

### 1.2 试验方法

无侧限抗压强度是淤泥改良效果的最直观反映,也是淤泥固化土最重要的土力学性能指标。为了研究NaOH、石膏这两种外加剂对水泥固化东湖淤泥的作用大小,及这3种固化剂共同固化淤泥的最佳组合配比,并揭示各固化剂的作用机理,在室内对固化土试样进行了无侧限抗压强度试验。

试验中水泥掺入比定义为水泥的质量与淤泥土总质量的比值,NaOH(石膏)掺量定义为NaOH(石膏)的质量与水泥质量的比值。

无侧限抗压强度试样的制备方法是在淤泥中按照设计比例加入固化剂和水后用机械搅拌机强制搅拌均匀后,分3层装入内径为39.1mm、高为80.0mm的钢制模具内,每层经小击实锤击实到特定高度后,用土工刀刮毛后再装入下一层,直到装满,试膜内壁先涂上一层凡士林,以便脱模。土样装入模具后用聚乙烯塑料袋包裹密封并置于(20±2)℃、湿度>90%的养护箱中养护24h后进行脱模,脱膜后用塑料袋包裹密封试样继续在养护箱中养护至3d、7d和28d龄期,进行无侧限抗压强度试验,淤泥初始含水率均定为80%。

本文所有试验均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)<sup>[8]</sup>进行,无侧限抗压强度试验仪器采用应变式三轴剪力仪,压缩速率为0.83mm/min。每个配比测定3个平行样,取其平均值作为该组试样的无侧限抗压强度,试样的测试值与平均值之差超过平均值的±20%时,则将该试样的测试值

剔除,按余下试样的测试值计算平均值。

## 2 试验结果分析

### 2.1 水泥加 NaOH 固化试验

以水泥作为主固化剂,水泥掺入比选取 8%、10%、12%,NaOH 作为外加剂,掺入量选取水泥质量的 1%、2%、3%、4%。

#### 1) NaOH 掺量对无侧限抗压强度的影响

图 1 为 3 种不同的水泥掺入比下,固化土 28d 无侧限抗压强度  $q_u$  随 NaOH 掺量的变化曲线。由图 1 可知,在 8% 水泥掺入比时,固化土强度随着 NaOH 掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,最佳 NaOH 掺量为 3%。在 NaOH 掺量为 4% 时对强度有削弱作用。在 10%、12% 两种水泥掺入比时,固化土强度随着 NaOH 掺量的增加大体增加,不过当 NaOH 掺量为 4% 时,曲线趋于水平,表明此时 NaOH 掺量的增加对强度的提升作用不大,NaOH 的最佳掺量为 4%。在 NaOH 最佳掺量时,8%、10%、12% 水泥掺入比下的固化土 28d 强度比未掺 NaOH 时分别提高了 113%、62%、28%,可见在用水泥固化淤泥的基础上添加 NaOH,可以有效提高固化土的强度,尤其是低水泥掺入比时的强度。

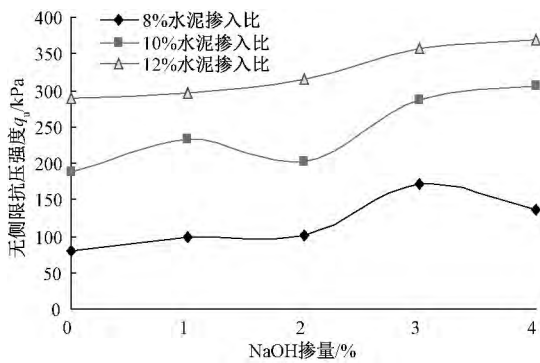


图 1 NaOH 掺量-无侧限抗压强度关系曲线

Fig. 1 Relationships between NaOH mixing amounts and unconfined compressive strengths

#### 2) 龄期对水泥氢氧化钠固化土无侧限抗压强度的影响

水泥掺入比为 10% 时,淤泥固化土的无侧限抗压强度  $q_u$  随龄期的变化关系见图 2。由图 2 可知,固化土的强度随着龄期的增长而增大,NaOH 提高了固化土的早期强度。当 NaOH 掺量较低为 1%、2% 时,NaOH 对固化土强度的促进作用较小,因为

$OH^-$  浓度较低,对水泥的水化作用促进较小。当 NaOH 掺量为 3%、4% 时, $OH^-$  浓度提升,促进了水泥的水化作用,加快了水化产物的生成,使固化土空隙减小,提升了固化土的强度。

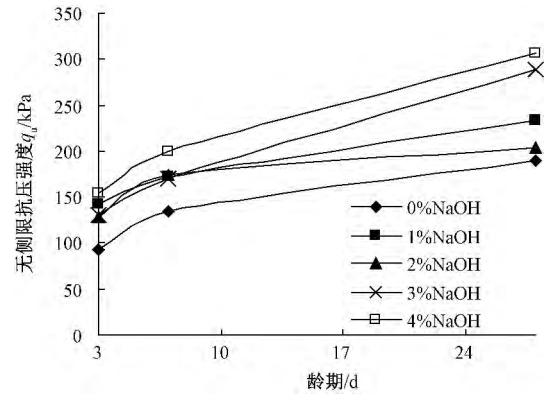


图 2 掺水泥为 10% 时固化土无侧限抗压强度-龄期关系

Fig. 2 Relationships between unconfined compressive strengths and ages when cement mixing ratio is 10%

### 2.2 水泥加石膏固化试验

以水泥作为主固化剂,水泥掺入比选取 8%、10%、12%,石膏作为外加剂,掺入量选取水泥质量的 10%、20%、30%、40%。

#### 1) 石膏掺量对固化土的无侧限抗压强度的影响

图 3 为 3 种不同的水泥掺入比时,固化土 28d 无侧限抗压强度随着石膏掺量的变化曲线。由图 3 可知,3 种水泥掺入比下的淤泥固化土无侧限抗压强度随着石膏掺量的增加先增加后减小。在一定的水泥掺入比时,存在一个石膏最佳掺量,8%、10% 的水泥掺入比时,最佳掺量都为 30%,而水泥掺入比为 12% 时,最佳掺量为 20%,最佳石膏掺量会随着水泥掺入比的增大而减小。在石膏的最佳掺量下,8%、10%、12% 水泥掺入比的固化土 28d 强度比不掺石膏时分别提高了 13.9 倍、7.0 倍和 5.3 倍,石膏的掺入极大地提高了固化土的强度。

#### 2) 龄期对水泥石膏固化土无侧限抗压强度的影响

水泥掺入比为 12% 时,石膏掺量对淤泥固化土在各个龄期无侧限抗压强度  $q_u$  的影响见图 4。由图 4 可知,固化土的强度随着龄期的增长而增大,但增加幅度不同。掺入石膏后,4 种掺量下的淤泥固化

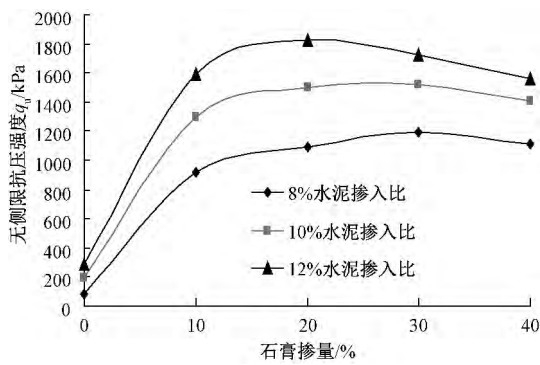


图3 石膏掺量-无侧限抗压强度关系

Fig.3 Relationships between plaster mixing amounts and unconfined compressive strengths

土强度的增长速度比不掺入石膏时快很多。加入石膏后,淤泥固化土的早期强度得到了提升,3d、7d强度比不掺石膏时分别提升了64%以上和146%以上,有利于加快施工进度,并且石膏作用于整个固化过程。

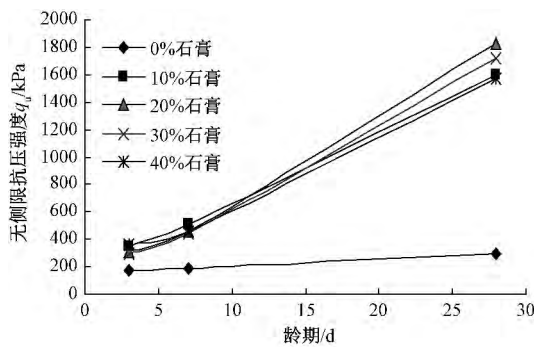


图4 掺水泥为12%时固化土无侧限抗压强度-龄期关系

Fig.4 Relationships between unconfined compressive strengths and ages when cement mixing ratio is 12%

### 2.3 3种固化材料的正交试验

综合单加水泥及加两种固化材料固化淤泥的试验结果来进行正交试验,研究3种复合型固化材料的配比,其正交分析因素值根据前述试验结果得到,水泥掺入比选择8%、10%与12%,石膏选择水泥量的20%、30%与40%,NaOH选择水泥量的2%、3%与4%。正交试验的因素及水平见表3,试验方案与结果见表4,极差分析见表5。

由表5的分析结果可得出其最佳组合配比为水泥选12%,石膏选20%,NaOH选4%。7d和28d固

化土强度分析结果显示,水泥的极差值都在3个因素极差中最大,说明无论7d还是28d龄期,水泥在加固中起主要作用,水泥的变化引起固化土无侧限抗压强度变化最为显著。对7d固化土强度,NaOH的极差大于石膏的极差表明NaOH的作用大于石膏;而28d固化土强度,石膏的极差大于NaOH的极差表明石膏的作用大于NaOH。NaOH有利于固化土早期强度的增长,石膏也有利于固化淤泥早期强度的形成,其作用持续于整个淤泥固化过程。在最佳组合配比下,固化土28d的强度为基准强度的6.6倍,按此比例配比的固化剂可作为处理淤泥的固化材料。

表3 正交试验的因素及水平

Table 3 Factors and levels of orthogonal test %

水平	A(水泥掺入比)	B(石膏掺量)	C(NaOH掺量)
1	8	20	2
2	10	30	3
3	12	40	4

表4 正交试验方案与结果

Table 4 Orthogonal test schemes and results

试验编号	因素			平均无侧限抗压强度/kPa 7d /28d
	1(A)	2(B)	3(C)	
1	1	1	1	254/1136
2	1	2	2	250/1155
3	1	3	3	267/1211
4	2	1	2	418/1528
5	2	2	3	432/1430
6	2	3	1	421/1430
7	3	1	3	639/1914
8	3	2	1	546/1730
9	3	3	2	487/1583

表5 正交试验极差分析(7d /28d)

Table 5 Range analysis of orthogonal test (7d/28d)

因素	$q_u$ /kPa				最优水平
	水平1 均值	水平2 均值	水平3 均值	极差 R	
A	257/1167	424/1463	557/1742	300/575	3
B	437/1526	409/1438	392/1408	45/118	1
C	407/1432	385/1422	446/1518	61/96	3

### 3 固化机理分析

水泥固化淤泥的强度主要来源于水泥水化产物的骨架作用和Ca(OH)<sub>2</sub>的物理化学作用。前者构成淤泥固化土强度的主要部分<sup>[7]</sup>,后者使微土粒形

成稳定的团粒结构,填充水化产物的骨架之间,增大了固化土强度。在后者的反应中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 参与了离子吸附交换和团粒化作用、火山灰效应、碳酸化作用而起着十分关键的作用。

固化材料中掺入一定比例的NaOH,使得水泥水化反应处在碱性环境中,增加淤泥孔隙液中 $\text{OH}^-$ 浓度,有利于促使孔隙水中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和,生成较多的晶体 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、针状棒状或纤维状水化硅酸钙<sup>[9]</sup>,填充了土体的孔隙,从而提高了水泥土的强度。但NaOH掺量不能过高,当pH值超过12.5时,会因为生成过量的新的化合物而使土体膨胀,反而削弱了固化土的强度<sup>[10]</sup>,这就是NaOH存在最佳掺量的原因。

添加石膏后,水泥水化产物中的水化铝酸钙还会与石膏反应生成钙矾石,固相体积可增大120%左右<sup>[5]</sup>。一方面钙矾石的膨胀作用可以填充部分孔隙,降低固化土的孔隙量,另一方面钙矾石的针状或柱状晶体在孔隙中相互交叉,与水化硅酸钙、水化铝酸钙一起形成空间结构。但当石膏添加过多时,钙矾石的膨胀作用会破坏已有凝胶体,导致固化土强度降低,所以石膏有最佳掺量。

## 4 结论

1) NaOH作水泥固化淤泥的外加剂,增大了碱性,促进了水泥的水化作用,增强了淤泥固化土的无侧限抗压强度,并且当水泥掺入比一定时,NaOH的掺量存在最佳值,未达到最佳掺量前固化土强度随NaOH掺量的增加而增加。

2) 石膏对增强东湖淤泥固化土的无侧限抗压强度作用明显,最高可以达到同等条件下没有加入

石膏时的13.9倍,固化土强度随石膏掺量的增加先增后减,石膏的掺量存在最佳值,石膏的掺入有利于水化物中钙矾石的产生,填充了骨架空隙,增大了固化土强度,但是石膏超过最佳掺量时会对强度有负作用。

3) 以水泥、NaOH、石膏3种固化材料设计正交试验时,水泥在固化中起最重要的作用,最佳组合配比为水泥选淤泥土总质量的12%,石膏与NaOH分别为水泥掺量的20%与4%,可为实际工程的应用提供依据。

## 参考文献

- [1] 陈萍,张振营,李小山,等.废弃淤泥作为再生资源的固化技术与工程应用研究[J].浙江水利科技,2006,148(6):1-3
- [2] 李享,雷学文,孟庆山,等.淤泥絮凝脱水的室内试验研究[J].人民长江,2013,44(13):67-70
- [3] 杨云芳,陈萍,施萍萍.化学固化对淤泥颗粒粒径及含水率影响的试验研究[J].浙江理工大学学报,2008,25(1):38-40,69
- [4] 罗海兵,周莉,肖兵.对城市道路中淤泥固化土处理软土地基的浅析[J].中国市政工程,2012,(4):11-13
- [5] 丁建文,张帅,洪振舜,等.水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2817-2822
- [6] 赵多建,郝猛.水泥-废石膏加固海相淤泥的土工性质研究[J].交通标准化,2010,(11):10-14
- [7] 蒲凡,詹树林,赖俊英.NaOH对固化海涂淤泥强度和变形特性的影响研究[J].新型建筑材料,2011,(5):9-12
- [8] GB/T 50123—1999,土工试验方法标准[S]
- [9] 杨爱武,杜东菊,赵瑞斌,等.水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J].岩土力学,2007,28(9):1823-1827
- [10] 杨爱武,闫澍旺,杜东菊,等.碱性环境对固化天津海积软土强度影响的试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2930-2933