doi:10.11988/ckyyb.20170904 2019,36(4):98-103

# 水泥-粉煤灰-脱硫石膏固化铅污染土强度特性及预测方法

崔进杨[1],王 强[1],宫保聚[2],姚韦靖[1]
(1.安徽理工大学 土木建筑学院,安徽 淮南 232001; 2.中铁十一局集团第一工程有限公司,湖北 襄阳 441104)

**摘 要**:为了研究复合水泥材料固化铅污染土的强度特性,采用水泥、粉煤灰与脱硫石膏混合形成的固化剂(CFG)对铅污染土进行固化处理,基于正交试验的方法进行无侧限抗压强度测试,研究铅离子浓度与CFG掺量对土体强度特性的影响规律。结果表明:固化土的抗压强度随CFG掺量增加而增大,随铅离子浓度增加而降低;养护7 d前铅离子浓度和固化剂掺量对土体抗压强度的影响,前者大于后者,而7 d后后者大于前者;在3,7 d时2种因素对于土体的强度的影响均较小,在14 d时该影响大幅提升,到28 d时影响特别显著。结合试验成果,提出了基于养护龄期和CFG掺量的强度预测公式,研究成果可供从事铅污染土修复工作的科研人员参考。

**关键词**:复合水泥材料;正交试验;无侧限抗压强度;铅污染土;粉煤灰;脱硫石膏;强度预测
**中图分类号**:TV41 **文献标志码**:A
**文章编号**:1001-5485(2019)04-0098-06

# Lead-contaminated Soil Solidified by Cement-Flyash-Gypsum-desulphurized: Mechanical Strength Characteristics and Prediction Method

CUI Jin-yang[1], WANG Qiang[1], GONG Bao-ju[2], YAO Wei-jing[1]
(1.School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2.The First Engineering Company of China Railway 11 Bureau Group, Xiangyang 441104, China)

**Abstract**: Orthogonal unconfined compression test was conducted on lead-contaminated soil solidified by curing agent CFG (cement mixed with flyash and desulphurized gypsum) to investigate the strength characteristics of treated lead-contaminated soils varying with lead ion concentration and CFG dosage. Results reveal that the unconfined compressive strength of stabilized soils increases with the growth of CFG dosage, while reduces with the climbing of lead ion concentration. In the first seven days of curing, the effect of lead ion concentration is greater than that of curing agent dosage; after seven days, the influence of the dosage of curing agent is greater than that of lead ion concentration. At 3 d and 7 d of curing, the influences of both factors on soil strength are small, while at 14 d the influence greatly increases, and at 28 d, the effect is especially significant. Furthermore, the formula of strength prediction based on curing age and CFG dosage is proposed as a reference for the treatment of lead-contaminated soil.

**Key words**: composite cement material; orthogonal test; unconfined compressive strength; lead-contaminated soil; flyash; desulphurized gypsum; strength prediction

## 1 研究背景

土的重金属污染具有极强的毒性、复杂性、持久性、隐蔽性和不可逆性,目前重金属污染土的修复已成为一个迫待解决的问题与国内外学者研究的热点。国外学者在污染土修复方面做了许多研究:如Geelhoed等[1]和Meegoda[2]将水泥、硅土、石灰与矿

**收稿日期**:2017-08-09;**修回日期**:2017-09-12
**基金项目**:安徽省高校自然科学基金项目(KJ2016A831)
**作者简介**:崔进杨(1992-),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要从事岩土工程的研究工作。E-mail: cuijinyang0824@163.com
**通信作者**:王 强(1978-),男,安徽淮南人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事岩土工程及环境岩土工程研究工作。E-mail: wangqiang0711@163.com

渣固化剂用于镉、铅、铬等污染土壤的固化修复;Lee 等[3]发现锌离子和铅离子会使水泥基材料的强度降低;Yin 等[4]试验得出高浓度的重金属离子以及有机质含量对固化剂的水化反应和试样初期强度没有明显阻碍。国内学者也进行了相关研究:杜延军等[5]、席永慧等[6]、查甫生等[7]对水泥、石灰固化稳定锌、铅、镉等重金属污染土的力学特性进行研究;魏明俐等[8]在冻融循环条件下对含磷材料(KMP)固化稳定锌、铅污染土的强度与溶出特性进行试验研究;张亭亭等[9-10]采用磷酸镁水泥对铅污染土进行固化处理,分析各因素对试样力学特性与微观机制的影响规律;刘玲等[11]采用熟石灰与高炉矿渣对镉、铬污染土进行固化处理,研究其工程可行性;林傲然等[12]采用 6 种固化剂固化处理铅污染土,研究不同固化剂对铅污染土的固化效果。

水泥能有效固化稳定铅污染土,被激活的粉煤灰可与水泥进行二次水化反应形成水化硅酸钙和水化铝酸钙胶体来固化铅污染土;脱硫石膏可作为水泥、粉煤灰的碱性激发剂,增强水泥、粉煤灰的固化效果。展开对水泥、粉煤灰与脱硫石膏固化稳定铅污染土强度特性的研究是很有必要的。

本文以水泥、粉煤灰与脱硫石膏三者混合形成的一种新固化剂(CFG)固化稳定后的铅污染土为研究对象,采用正交试验法进行无侧限抗压强度试验,分析固化污染土的强度特性与各因素的影响,并对土体强度进行了基于龄期、CFG 掺量的强度预测,研究水泥、粉煤灰与脱硫石膏三者混合修复铅污染土的可行性。

## 2　试验材料与设计

### 2.1　试验材料

试验土样取自淮南某施工现场表层土,主要物理力学参数见表 1,其塑性指数为7.9%。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)定义该土样为粉土。将土样风干、碾碎、过 2 mm 筛,制成试验土粉。由 XRD 衍射图谱分析得出土样化学成分以 $SiO_2$ 为主,$Al_2O_3$ 与 $Fe_2O_3$ 次之。

**表 1　试验土物理力学特性**

**Table 1　Physical and mechanical properties of test soil**

| 土样 | 重度/(kN·m$^{-3}$) | 孔隙比 | 含水率/% | 内摩擦角/(°) | 液限/% | 塑限/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 粉土 | 26.6 | 0.623 | 22.42 | 10.2 | 34.4 | 26.5 |

试验水泥为淮南八公山产P.O.42.5普通硅酸盐水泥;试验用水为当地自来水;试验所用铅污染土为实验室配置而成,$Pb^{2+}$ 由硝酸铅 $Pb(NO_3)_2$ 提供,由于其在水中有很高的溶解度,硝酸铅的纯度为 99.9%;试验所用脱硫石膏和粉煤灰都取自淮南平圩发电厂,其化学成分(质量百分含量)见表 2。

**表 2　脱硫石膏与粉煤灰化学成分**

**Table 2　Chemical compositions of desulfurized gypsum and flyash**　%

| 名称 | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 粉煤灰 | 51.70 | 32.10 | 7.75 | 5.02 | 0.84 | 0.66 |
| 脱硫石膏 | 1.94 | 0.90 | 0.23 | 31.31 | 0.29 | 43.49 |

### 2.2　配合比设计

试验所用固化剂为水泥、粉煤灰与脱硫石膏按比例混合形成的一种新型复合胶凝材料(CFG),水泥、粉煤灰与脱硫石膏质量之比为 5∶3∶2。

采取正交试验设计[13],设计 2 个变量。一是 $Pb^{2+}$ 浓度,下文简写为因素 A,试验变量 $Pb^{2+}$ 浓度设计为0.1%,0.5%,1.5%,简写为Pb0.1,Pb0.5,Pb1.5;二是 CFG 掺量,下文简写为因素 B,试验变量 CFG 掺量设计为 10%,15%,20%,简写为 CFG10,CFG15,CFG20。

试验配合比设计参照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011),试验方案见表 3。

**表 3　试样设计方案**

**Table 3　Plan of sample design**

| 试样编号 | 因素 A/% | 因素 B/% | 各材料含量 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 硝酸铅/g | 水泥/kg | 粉煤灰/kg | 脱硫石膏/kg | 水/kg |
| 1 | 0.1 | 10 | 14.387 | 0.551 | 0.331 | 0.220 | 2.569 |
| 2 | 0.1 | 15 | 14.387 | 0.826 | 0.496 | 0.331 | 2.844 |
| 3 | 0.1 | 20 | 14.387 | 1.102 | 0.661 | 0.441 | 3.120 |
| 4 | 0.5 | 10 | 71.933 | 0.551 | 0.331 | 0.220 | 2.569 |
| 5 | 0.5 | 15 | 71.933 | 0.826 | 0.496 | 0.331 | 2.844 |
| 6 | 0.5 | 20 | 71.933 | 1.102 | 0.661 | 0.441 | 3.120 |
| 7 | 1.5 | 10 | 215.798 | 0.551 | 0.331 | 0.220 | 2.569 |
| 8 | 1.5 | 15 | 215.798 | 0.826 | 0.496 | 0.331 | 2.844 |
| 9 | 1.5 | 20 | 215.798 | 1.102 | 0.661 | 0.441 | 3.120 |

### 2.3　试样制备及养护

根据表 3 设计方案,共设计 9 组正交试验,试样的养护龄期分别为 3,7,14,28 d,共 4 个龄期。

按设计好的配合比把风干碾碎的土、水泥、粉煤灰、脱硫石膏、水与硝酸铅进行称重与拌制,拌制均匀后分 3 层装入直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱形模具,将完成的试样密封放置在养护室养护(养护温度为(20±3)℃,相对湿度 95%),养护 24~48 h 后脱模,将脱模后的试样放入养护箱中养护至设计龄期。

### 2.4　试验设计

将制作好的 9 组试样在养护 3,7,14,28 d 时分别进行无侧限抗压强度试验。试验采用 WDW-500 微机控制电子万能试验机。试验依照《土工试验方法标

准》(GB/T 50123—1999)执行。试验误差控制:试验中每一组有 6 个试样,强度取该组试件的无侧限抗压强度平均值,精确至0.001 MPa,如果 6 个试样所测强度的最大或最小值与该组无侧限抗压强度平均值之差超过 20%,则取中间 4 个试件强度的平均值作为该组试件无侧限抗压强度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 试验结果

无侧限抗压强度试验结果见表 4。

**表 4 无侧限抗压强度结果**

**Table 4 Results of unconfined compressive strength**

| 试样编号 | 因素 A/% | 因素 B/% | 不同龄期时试样的无侧限抗压强度/MPa | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 3 d | 7 d | 14 d | 28 d |
| 1 | 0.1 | 10 | 0.470 | 0.876 | 1.329 | 2.038 |
| 2 | 0.1 | 15 | 1.076 | 1.585 | 2.048 | 3.059 |
| 3 | 0.1 | 20 | 1.518 | 2.161 | 2.759 | 3.935 |
| 4 | 0.5 | 10 | 0.237 | 0.595 | 0.828 | 1.423 |
| 5 | 0.5 | 15 | 0.512 | 0.941 | 1.376 | 2.240 |
| 6 | 0.5 | 20 | 0.912 | 1.513 | 2.268 | 3.700 |
| 7 | 1.5 | 10 | 0.080 | 0.167 | 0.323 | 0.429 |
| 8 | 1.5 | 15 | 0.156 | 0.405 | 0.735 | 1.331 |
| 9 | 1.5 | 20 | 0.318 | 0.847 | 1.357 | 2.407 |

### 3.2 结果分析

采用正交试验方法设计无侧限抗压强度试验,研究分析龄期、铅离子浓度、CFG 掺量对试样无侧限抗压强度的影响。

#### 3.2.1 直观分析

由表 4 可得无侧限抗压强度与龄期的关系,如图 1 所示。由图 1 可知:

(1)试样强度随着养护龄期的增加而提高,前期强度提高较快,后期强度提升较缓慢,这是由于水泥、粉煤灰、脱硫石膏等材料在养护前期会发生较激烈的水化反应,试样强度会有较大的提升,养护中后期材料水化反应趋于平缓。

(2)试样强度随着铅离子浓度增加而降低,可见铅离子会阻碍水化反应,影响土体强度的提高。

(3)试样强度随 CFG 掺量的增加而提高。

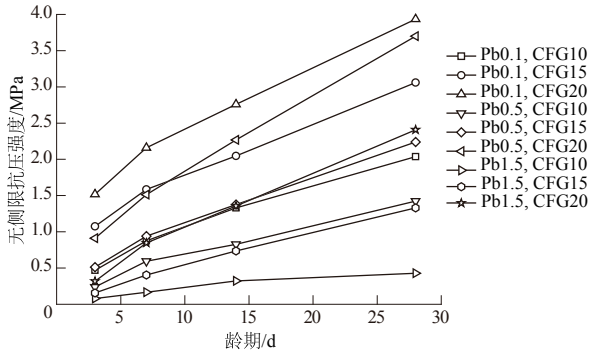



**图 1 无侧限抗压强度与龄期的关系**

**Fig.1 Relationship between unconfined compressive strength and age**

#### 3.2.2 极差分析

根据表 4 试验结果进行极差分析,得到试样不同龄期抗压强度在不同因素影响下的极差 $R$ 值,见表 5,表中 $k_1$,$k_2$,$k_3$为极差分析中的统计量。对表 5 分析可知:

(1)$Pb^{2+}$浓度与 CFG 掺量的极差 $R$ 随龄期增加而增加,说明其对土体强度的影响一直在提高。

(2)在龄期为 3 d 和 7 d 时 $Pb^{2+}$浓度影响比 CFG 掺量影响作用大,$Pb^{2+}$浓度为主要影响因素,但在 14 d 和 28 d 时 CFG 掺量对土体强度的影响比 $Pb^{2+}$浓度大,CFG 掺量为主要因素。

试验前期,$Pb^{2+}$浓度对土体强度的影响较 CFG 掺量大,是由于前期 $Pb^{2+}$使 CFG 固化污染土的水化反应受阻,对土体强度的提高影响很大,但随着养护时间的增加 CFG 掺量成主要影响因素。产生这种现象的原因为:①土体强度主要控制因素是土的基本物质组成、颗粒间的胶结作用与土体的微结构特征;②试验土样是粉土,黏粒含量较低,土颗粒与 $Pb^{2+}$之间的物理化学反应程度不高,$Pb^{2+}$对土体强度的作用相较于 CFG 掺量的影响十分有限[14]。

#### 3.2.3 方差分析

对试验结果进行方差分析,得到试样抗压强度在不同龄期和不同因素影响下 $F$ 值,判断其显著性,见表 6。

由表 6 分析可知,$Pb^{2+}$浓度与 CFG 掺量对土体强度的影响的显著性随龄期增加而上升,3 d 和 7 d

**表 5 极差分析结果**

**Table 5 Result of range analysis**

| 统计量 | 3 d 抗压强度 | | 7 d 抗压强度 | | 14 d 抗压强度 | | 28 d 抗压强度 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 因素 A | 因素 B | 因素 A | 因素 B | 因素 A | 因素 B | 因素 A | 因素 B |
| $k_1$ | 1.021 | 0.262 | 1.541 | 0.546 | 2.045 | 0.827 | 3.011 | 1.297 |
| $k_2$ | 0.554 | 0.581 | 1.016 | 0.977 | 1.491 | 1.386 | 2.454 | 2.210 |
| $k_3$ | 0.185 | 0.916 | 0.473 | 1.507 | 0.805 | 2.128 | 1.389 | 3.347 |
| $R$ | 0.836 | 0.654 | 1.068 | 0.961 | 1.240 | 1.301 | 1.622 | 2.050 |
| 影响顺序 | A>B | | A>B | | B>A | | B>A | |

表 6　方差分析结果

Table 6　Result of variance analysis

| 龄期/d | 方差来源 | 平方和 $S_i$ | 自由度 | 均方 $\bar{S}_i$ | $F$ | 显著性 | 影响顺序 | 临界值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 因素 A | 1.055 | 2 | 0.528 | 12.279 | * | A>B | |
| | 因素 B | 0.641 | 2 | 0.321 | 7.465 | * | | |
| 7 | 因素 A | 1.710 | 2 | 0.855 | 14.492 | * | A>B | $F_{0.1}(2,4)=4.32$ |
| | 因素 B | 1.390 | 2 | 0.695 | 11.780 | * | | $F_{0.05}(2,4)=6.94$ |
| 14 | 因素 A | 2.317 | 2 | 1.159 | 73.354 | * * | B>A | $F_{0.01}(2,4)=18.00$ |
| | 因素 B | 2.557 | 2 | 1.279 | 80.949 | * * | | |
| 28 | 因素 A | 4.075 | 2 | 2.038 | 88.609 | * * | B>A | |
| | 因素 B | 6.333 | 2 | 3.167 | 137.696 | * * | | |

注：* 表示显著，* * 表示特别显著

为显著，到 14 d 和 28 d 为特别显著，早期显著性不高是由于早期土体强度的提高很大程度上会受龄期的影响；从显著性等级来看，$Pb^{2+}$ 浓度与 CFG 掺量对土体强度的影响都很大，尤其是养护后期影响特别显著，这与上文的极差分析结果具有一致性。

试验前期（3 d 和 7 d），$Pb^{2+}$ 浓度对土体强度影响的显著性比 CFG 掺量大，但随着龄期的增加（14 d和 28 d），CFG 掺量对土体强度影响的显著性比 $Pb^{2+}$ 浓度大，与上文的极差分析结果具有一致性，原因也一样。

CFG 掺量对土体强度影响的显著性随龄期变化，$F$ 值分别为 7.465，11.78，80.949，137.696。可看出，CFG 掺量的显著性在前期不是很高，但中后期（14 d 和 28 d）土体强度受 CFG 掺量影响的显著性快速提高。

由上面分析可知，方差分析与极差分析结果具有一致性。

## 4　强度预测

### 4.1　基于龄期的强度预测

在其他条件相同时，水泥土无侧限抗压强度与龄期大致呈线性关系[15]，用某一养护龄期 $t_0$（3，7，14，28 d）时 9 组试验的已知试样强度 $q_{u,t_0}$ 来预测未知养护龄期 $t$ 时 9 组试验试样的强度 $q_{u,t}$，其预测公式为

$$q_{u,t}=A_t q_{u,t_0} \quad 。 \tag{1}$$

式中：$q_{u,t}$ 为待预测的 $t$ 龄期时土的无侧限抗压强度；$q_{u,t_0}$ 为已知的 $t_0$ 龄期土的无侧限抗压强度；$A_t$ 为预测系数，$A_3$，$A_7$，$A_{14}$，$A_{28}$ 分别表示龄期为 3，7，14，28 d 的预测系数。

本文进行类似分析，拟合结果见表 7。

由表 7 可以看出，对于不同的龄期 $t_0$，$A_t$ 与时间 $t$ 相关，现对某一龄期 $t_0$ 下不同龄期 $t$ 的预测系数进行分析，如图 2。

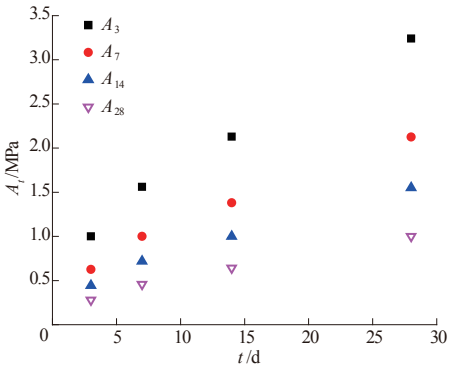



图 2　预测系数 $A_t$ 与龄期 $t$ 的关系

Fig.2　Relation between prediction coefficient $A_t$ and age $t$

根据图 2，$A_t$ 随龄期 $t$ 的变化规律可以用幂函数拟合，即

$$A_t=at^b \quad 。 \tag{2}$$

式中 $a$，$b$ 为拟合参数。

由图 2 的散点图拟合得到表 8。

表 8　采用幂函数拟合的 $A_t$ 的拟合参数

Table 8　Fitting parameters of $a$, $b$ to $A_t$ by power function

| 龄期 $t_0$/d | $a$ | $b$ | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 3 | 0.540 | 0.534 | 0.995 |
| 7 | 0.332 | 0.555 | 0.995 |
| 14 | 0.233 | 0.566 | 0.995 |
| 28 | 0.146 | 0.576 | 0.996 |

表 7　按式（1）所得的 $A_t$ 拟合结果

Table 7　Fitted values of $A_t$ by equation（1）

| 龄期/d | $A_3$ | $A_7$ | $A_{14}$ | $A_{28}$ | 不同 $t_0$ 下的拟合系数 $R^2$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 3 d | 7 d | 14 d | 28 d |
| 3 | 1.000 | 0.625 | 0.444 | 0.280 | 1.000 | 0.973 | 0.937 | 0.895 |
| 7 | 1.560 | 1.000 | 0.719 | 0.458 | 0.973 | 1.000 | 0.991 | 0.971 |
| 14 | 2.130 | 1.380 | 1.000 | 0.641 | 0.937 | 0.991 | 1.000 | 0.994 |
| 28 | 3.240 | 2.126 | 1.550 | 1.000 | 0.895 | 0.971 | 0.994 | 1.000 |

由表 8 可以看出，$b$ 值的变化很小，取平均值为 0.558；$a$ 变化很大且主要与龄期 $t_0$ 有关，参数 $a$ 与 $t_0$ 的关系用幂函数拟合，得到 $a = 1.008t_0^{-0.567}$，$R^2 = 0.998$。此时式(2)中参数 $a$，$b$ 都已得到，将 $a$，$b$ 值直接代入式(2)，可得 $A_t$ 为

$$A_t = 1.008t_0^{-0.567}t^{0.558} \quad 。 \tag{3}$$

把式(3)代入式(1)得到 CFG 固化铅污染土的强度预测公式为

$$q_{u,t} = 1.008t_0^{-0.567}t^{0.558}q_{u,t_0} \quad 。 \tag{4}$$

式(4)适用于 CFG 固化剂掺量为 10%，15%，20%且 $Pb^{2+}$ 浓度为0.1%，0.5%，1.5%的土体强度预测，适用龄期为 3~28 d。

实际工程中更倾向使用龄期为 7 d 和 28 d 的强度来预测其他任意龄期强度，根据 7 d 强度和 28 d 强度预测龄期为 $t$ 的强度公式分别为：

$$q_{u,t} = 0.334t^{0.558}q_{u,7} \quad ； \tag{5}$$

$$q_{u,t} = 0.152t^{0.558}q_{u,28} \quad 。 \tag{6}$$

式中 $q_{u,7}$，$q_{u,28}$ 分别为 7，28 d 养护龄期时试样的无侧限抗压强度。

### 4.2 基于 CFG 掺量的强度预测

已有研究表明，在其他条件相同的前提下，2 个不同水泥掺入比水泥土的无侧限抗压强度比值与水泥掺入比呈幂函数关系[15]。本文进行类似分析，考虑铅离子浓度 $W_{Pb}$、CFG 掺量、养护龄期变化的情况。CFG 掺入比与强度比的关系如图 3 所示。图 3 中，横坐标 $a_w/a_{15}$ 表示 CFG 掺量(10%，15%，20%)与某一确定 CFG 掺量(15%)的比值，纵坐标 $q_{u,a_w}/q_{u,a_{15}}$ 表示对应的无侧限抗压强度比。

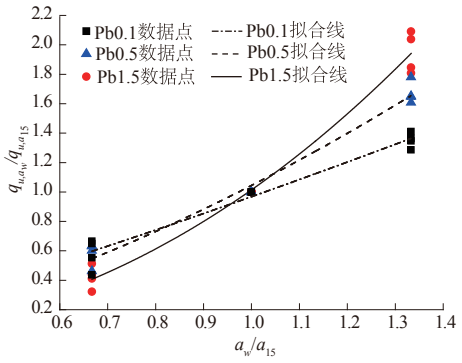



**图 3 CFG 掺量比与水泥土的无侧限抗压强度比的关系**

**Fig.3 Relationship between CFG mixing ratio and cement strength ratio**

由图 3 可知，在不同铅离子浓度 $W_{Pb}$ 下，$a_w/a_{15}$ 与 $q_{u,a_w}/q_{u,a_{15}}$ 关系可用幂函数拟合，即

$$\frac{q_{u,a_w}}{q_{u,a_k}} = c\left(\frac{a_w}{a_k}\right)^d \quad 。 \tag{7}$$

式中：$a_w/a_k$ 为 CFG 掺量 $a_w$ 与某一特定 CFG 掺量 $a_k$ 的比值；$q_{u,a_w}/q_{u,a_k}$ 为 CFG 掺量 $a_w$ 下的无侧限抗压强度与某一特定 CFG 掺量 $a_k$ 下的无侧限抗压强度的比值；$c$ 与 $d$ 为拟合参数。

CFG 掺量为 10% 和 20% 情况下，存在类似规律。使用式(7)进行拟合，结果见表 9。

**表 9 不同 $Pb^{2+}$ 浓度下 CFG 掺量比与强度比拟合公式的参数**

**Table 9 Parameters of fitting formula of CFG dosage ratio and strength ratio in the presence of different lead ion concentrations**

| $Pb^{2+}$浓度/% | $a_k$/% | $c$ | $d$ | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 10 | 1.044 | 1.232 | 0.712 |
| 0.5 | 10 | 0.940 | 1.628 | 0.827 |
| 1.5 | 10 | 0.981 | 2.263 | 0.912 |
| 0.1 | 15 | 0.969 | 1.193 | 0.958 |
| 0.5 | 15 | 1.045 | 1.600 | 0.977 |
| 1.5 | 15 | 1.014 | 2.258 | 0.982 |
| 0.1 | 20 | 1.009 | 1.186 | 0.950 |
| 0.5 | 20 | 0.990 | 1.891 | 0.976 |
| 1.5 | 20 | 0.998 | 2.252 | 0.993 |

由表 9 可知，拟合参数 $c$ 近似为一个常数，基本不会随 $Pb^{2+}$ 浓度与 CFG 掺量而变化，近似取 $c$ 为 1。

由表 9 还可以看出，当 $Pb^{2+}$ 浓度 $W_{Pb}$ 相同且 CFG 掺量不同时，$d$ 变化较小；当 CFG 掺量相同且 $Pb^{2+}$ 浓度 $W_{Pb}$ 不同时，$d$ 会发生较大变化。这说明 $W_{Pb}$ 对试样的强度确有影响，且 $d$ 可反映出这种影响。分析 $d$ 与 $W_{Pb}$ 的变化趋势，不同 CFG 掺量下，$d$ 与 $W_{Pb}$ 存在指数关系。可求得 $W_{Pb}$ 与 $d$ 的关系为

$$d = 1.899\ln(W_{Pb} + 1.841) \quad 。 \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)得

$$\frac{q_{u,a_w}}{q_{u,a_k}} = \left(\frac{a_w}{a_k}\right)^{1.899\ln(W_{Pb}+1.841)} \quad 。 \tag{9}$$

式(9)适用于 28 d 龄期内任意龄期的水泥-粉煤灰-脱硫石膏固化铅污染土的强度预测。

在实际工程中铅离子浓度一般不会>1%、固化剂掺量不高，鉴于此，取 $a_k = 10\%$，得到强度预测公式为

$$\frac{q_{u,a_w}}{q_{u,a_k}} = \left(\frac{a_w}{10\%}\right)^{1.899\ln(W_{Pb}+1.841)} \quad 。 \tag{10}$$

## 5 结 论

本试验采用水泥、粉煤灰、脱硫石膏混合形成的固化剂(CFG)对铅污染土进行固化处理，基于正交试验分析方法与无侧限抗压强度试验，研究养护龄期、铅离子浓度、CFG 掺量对土体强度特性的影响规律，得到以下主要结论：

(1)土体强度随着养护龄期的增加而提高,前期强度提高较快,后期强度提升较缓慢。

(2)$Pb^{2+}$浓度与 CFG 掺量对土体强度的影响在前期(3 d 和 7 d)为显著,在中后期(14 d 和 28 d)为特别显著。前期(3 d 和 7 d)$Pb^{2+}$浓度对土体强度影响的显著性比 CFG 掺量大,但随着龄期的增加(14 d和 28 d),CFG 掺量对土体强度影响的显著性比 $Pb^{2+}$浓度大。

(3)给出 2 种土体强度预测公式,一是基于龄期的强度预测,公式为 $q_{u,t} = 1.008t_0^{-0.567}t^{0.558}q_{u,t_0}$,适用于 CFG 掺量为 10%,15%,20%与 $Pb^{2+}$浓度为0.1%,0.5%,1.5%的土体强度预测,适用龄期为 3~28 d;一是基于 CFG 掺量的强度预测,公式为 $\frac{q_{u,a_w}}{q_{u,a_k}} = \left(\frac{a_w}{a_k}\right)^{1.899\ln(W_{Pb}+1.841)}$,适用于 28 d 龄期内任意相同龄期固化铅污染土的强度预测。

**参考文献:**


[1] GEELHOED J S, MEEUSSEN J C L, LUMSDON D G, *et al*. Modelling of Chromium Behaviour and Transport at Sites Contaminated with Chromite Ore Processing Residue: Implications for Remediation Methods[J]. Environmental Geochemistry & Health, 2001, 23(3):261-265.

[2] MEEGODA J N. Waste Immobilization Technologies[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic & Radioactive Waste Management, 2009, 3(3):124-131.

[3] LEE D, WAITE T D, SWARBRICK G, *et al*. Comparison of Solidification/Stabilization Effects of Calcite Between Australian and South Korean Cements[J]. Cement & Concrete Research, 2005, 35(11):2143-2157.

[4] YIN C Y,SHAABAN M G,MAHMUD H B.Chemical Stabilization of Scrap Metal Yard Contaminated Soil Using Ordinary Portland Cement: Strength and Leachability Aspects [J]. Building & Environment, 2007, 42(2):794-802.

[5] 杜延军, 金　飞, 刘松玉,等. 重金属工业污染场地固化/稳定处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(1):116-124.

[6] 席永慧, 熊　浩. 锌污染土固化处理实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(11):1608-1612.

[7] 查甫生, 刘晶晶, 许　龙,等. 水泥固化重金属污染土干湿循环特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7):1246-1252.

[8] 魏明俐, 伍浩良, 杜延军,等. 冻融循环下含磷材料固化锌铅污染土的强度及溶出特性研究[J]. 岩土力学, 2015,36(增 1):215-219.

[9] 张亭亭, 李江山, 王　平,等. 磷酸镁水泥固化铅污染土的力学特性试验研究及微观机制[J].岩土力学, 2016,37(增 2):279-286.

[10] 张亭亭,李江山,王　平,等. 磷酸镁水泥固化铅污染土的应力-应变特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增 1):215-225.

[11] 刘　玲, 刘海卿, 李喜林,等. 熟石灰-矿渣联合修复重金属污染土强度及淋滤特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(7):2065-2070.

[12] 林傲然,滕　楠,崔文博,等. 固化重金属 Pb 污染土无侧限抗压强度增长规律的研究[J]. 路基工程, 2016,(4):133-137.

[13] 王贤昆, 庞建勇, 王　强. 复合水泥土无侧限抗压强度正交试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12):72-75.

[14] 查甫生,许　龙,崔可锐.水泥固化重金属污染土的强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):652-656.

[15] 陈　蕾, 刘松玉, 杜延军,等. 水泥固化含铅污染土无侧限抗压强度预测方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3):609-613.


(编辑:占学军)

# 武汉大学曹志先教授应邀来长江科学院进行学术交流

2019 年 3 月 11 日,应长江科学院邀请,武汉大学曹志先教授来长江科学院进行学术交流,并作了题为《浅水泥沙形态动力学数值研究与应用》的学术报告。报告会由长江科学院副总工程师杨文俊教授级高级工程师主持,水力学研究所所长黄国兵以及水力学研究所、河流研究所、水土保持研究所和空间信息技术应用研究所的技术骨干和院研究生近 30 人参加此次学术报告。

曹志先教授主要介绍了团队在浅水泥沙形态动力学数学模型、冲积河流多重时间尺度理论、山洪泥石流、滑坡灾害(滑坡涌浪、堵塞河流、堰塞湖溃决)、坝堤溃决洪水、水库泥沙、航道演变等方面的系统性创新成果。参会人员围绕报告内容和如何潜心科学研究开展了广泛热烈的交流讨论,会后参会人员表示曹志先教授的报告让人受益匪浅。

曹志先教授系武汉大学二级教授、中国力学学会环境力学专业委员会副主任委员、ESI/SCI 期刊 *International Journal of Sediment Research* 副主编。曾任英国 Heriot-Watt 大学河流动力学教授。长期潜心从事水沙动力学基础理论、浅水泥沙形态动力学数学模型理论与技术及其在暴雨山洪与泥石流、滑坡涌浪与堰塞湖溃决洪水、坝堤溃决洪水、冰湖溃决洪水、城市洪水、江河水沙调控与水库淤积、航道演变等方面的应用研究。主持完成欧盟第六框架计划项目课题、国家重点基础研究与发展(973) 计划课题、国家自然科学基金委主任基金和面上项目及横向项目等数十项。

**(摘自:长江水利科技网)**