# 工业废渣制备软土地基固化剂设计方法探讨

李战国 赵永生

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191) (中国交通建设股份有限公司一局七公司，北京 100011)

黄 新

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191)

**摘 要**：探讨了拟加固土的化学性质因素对固化剂水化物生成的影响和对策、形成最佳固化土结构需要的水化物体系特点、不同种类水化物生成过程的协调性及调控方法.在此基础上，根据工业废渣在制备软土固化剂中的技术优势，提出了利用工业废渣制备软土地基固化剂的设计思想与方法，并给出设计实例.试验结果表明利用工业废渣制备固化剂时采用本设计方法，固化土 28 d 无侧限抗压强度比水泥固化土提高了 1.5～2.75 倍.

**关 键 词**：工业废渣；软土固化；固化剂；设计方法

**中图分类号**：TU 528.042

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)04-0497-04

## Design method of soil stabilizer produced with industrial waste

Li Zhanguo

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhao Yongsheng

(The Seventh Co, the First Group, China Communications Construction Company Ltd, Beijing 10001, China)

Huang Xin

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: Such problems were discussed as the influence of chemical factors in soil on hydrates growing in stabilized soil and the countermeasure to eliminate the influence, the system character of hydrates to form optimal stabilized soil structure, the concordance of growing process between cementitious hydrates and expansible hydrates and control method to the concordance. On this basis, according to the technical advantages of industrial wastes in prepare stabilizer the design thought and method for the soft soil stabilizer prepared with industrial wastes was proposed and an example was presented. Experimental results show that according to this design method, the 28d unconfined compressive strength of stabilized soil stabilized by the stabilizer prepared with industrial wastes is 1.5～2.75 times higher than that of stabilized soil by cement.

**Key words**: industrial wastes; soft soil stabilization; stabilizers; design method

软土固化技术是应用最为广泛的地基加固技术之一.该技术能否取得良好的技术经济效益主要取决于固化剂是否经济有效.目前使用的固化剂主要是水泥，且用于软土固化的水泥量约为 $3\times10^8$ t/a，但水泥加固软粘土效率低，相对成本高，同时水泥生产的环境负荷较大.另一方面，工业生产排弃大量的废弃物.如能利用工业废渣制备软土固化剂，则可资源化利用工业废渣 2×

**收稿日期**：2008-04-23

**作者简介**：李战国(1980－)，男，河南焦作人，博士生，tianshizhiguang@ce.buaa.edu.cn.

$10^8$ t/a,虽然有很多关于利用工业废渣制备软土固化剂、并取得比水泥好的固化效果的报道[1-4],但这些固化剂基本上是以较为盲目的试配方式制备的,未能充分利用工业废渣本身的技术优势,因此性能不高,适用范围窄,难以推广应用.

本文基于固化土结构形成过程及所需的水化物组成特点和工业废渣在制备软土固化剂时的技术优势,提出利用工业废渣设计软土固化剂的指导思想和方法,并给出设计实例.

## 1 结构形成过程与水化物组成特点

### 1.1 土的化学性质因素对水化物生成的影响

软土中多种化学因素如土样的PH值、离子交换、物理吸附、硬凝反应等作用影响固化剂的水化硬化过程.水泥加入软土后,水化生成$Ca(OH)_2$和水化硅酸钙CSH凝胶等水化物.前者对固化土强度影响不大;而后者是强度的主要贡献者,其生成遵循下列热力学平衡式:

$$Ca^{2+}+xHSiO^-+OH^-<=>xCaOSiO_2H_2O$$

上式表明孔隙液中$Ca^{2+}$和$OH^-$浓度决定了CSH凝胶的生成量.

土样不同,各种化学性质因素也不同,若水泥产生的$Ca(OH)_2$不能满足土样化学性质因素对$Ca^{2+}$和$OH^-$的吸收,将导致孔隙液中$Ca(OH)_2$不饱和,必然要消耗用于生成CSH所必需的$Ca^{2+}$和$OH^-$,导致CSH生成量减少,最终影响固化土抗压强度的增长[5].因此水泥作为固化剂时,必须采取措施如提供一定的碱性组分以保证固化土孔隙液中$Ca(OH)_2$饱和,消除不同化学性质因素对水化物生成和强度的影响.

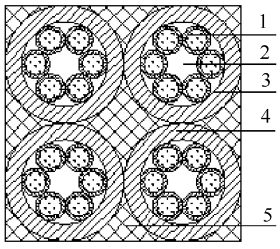
### 1.2 形成最佳结构需要的水化物种类与数量

文献[6]提出了固化土结构形成模型,见图1.在软土中,粘土颗粒常以内含孔隙的土团粒存在.将水泥与软土拌和后,由于水泥的水化产物主要是胶结性水化物,将包裹胶结土团粒,并填充土团粒之间的孔隙,形成类似于图1a所示的结构,使固化土强度提高.但此时土团粒内部还存在大量孔隙.如果固化剂含有膨胀性组分,膨胀性水化物膨胀挤压土团粒,减少土团粒内部孔隙,如图1b所示,可显著提高固化土强度.

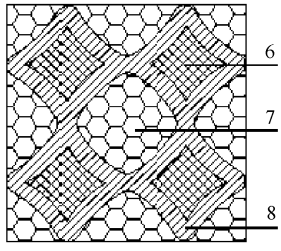
而只提供胶结性水化物的水泥不能满足形成最佳固化土结构对固化剂的需求,必须在固化剂中掺加膨胀性组分.

### 1.3 不同水化物生成过程的协调性

固化土中膨胀性水化物主要是指水化硫铝酸钙(AFt).研究表明[7],AFt膨胀作用具有双重性,既可填充孔隙使固化土结构密实,又可破坏CSH胶结土团粒形成的固化土结构.AFt生成时CSH胶结土团粒形成的结构越微弱,AFt膨胀的破坏作用就越小,AFt膨胀的增强效果就越显著;若AFt生成时,生成的CSH量越多,形成的胶结结构越密实,AFt膨胀的破坏作用就越大,便会破坏已形成的胶结结构,反而使强度下降.




1—粘土颗粒;2—孔隙;3—粘土团粒;
4—水泥浆膜;5—填充孔隙的水泥浆.
a 胶结性水化物包裹胶结土团粒并填充土团粒间孔隙




6—经挤压填充和硬凝反应形成的土团粒;
7—填充孔隙的膨胀性水化物;8—水泥浆膜.
b 膨胀性水化物挤压填充土团粒内部孔隙

图1 粘性土固化土结构形成模型

通过调整CSH和/或AFt的生成速率,使两者生成速率协调,可以充分发挥两者的优势.水泥中CSH生成速率较快,导致固化土中胶结性水化物和膨胀性水化物生成过程不协调.

## 2 工业废渣的技术优势及利用工业废渣设计固化剂的思想

由前述可知,高效固化剂应该提供胶结性水化物、膨胀性水化物以及一定的碱度,且CSH和AFt生成过程应有良好的协调性.而目前常用的固化剂——水泥存在不能提供膨胀性水化物、没有足够的碱度,以及协调性不好等缺陷.

一些工业废渣具有独特的技术优势,可以弥补水泥作为固化剂时存在的缺陷:一些工业废渣如矿渣、钢渣、粉煤灰、煅烧煤矸石等,不仅能够产生胶凝性水化物,胶结土团粒,同时能够减缓固化剂中CSH生成速率,改善水化物生成过程的协调性;一些含铝、硫工业废渣如磷石膏、脱硫石膏、

赤泥渣等可产生膨胀性水化物,填充固化土中孔隙,使结构密实;一些工业废渣如废碱液、电石渣、劣等石灰等能够提高碱度,保证孔隙液中 $Ca(OH)_2$ 饱和.

利用工业废渣制备固化剂时,充分发挥工业废渣独特的技术优势,如可提供胶结性组分、提供膨胀性组分、提供碱性组分、可减缓胶结速度等,不仅可节约水泥,并可取得比水泥更好的技术效益.

## 3　利用工业废渣设计固化剂的方法

固化土形成最佳结构,需要胶结性水化物包裹胶结土团粒、膨胀性水化物填充土团粒间及土团粒内部孔隙及一定的碱度以保证孔隙液中 $Ca(OH)_2$ 饱和,因此利用工业废渣制备固化剂时各组分的量可由如下确定:根据完全包裹土团粒所需要的胶结组分的量确定胶结性工业废渣的用量;根据填充土中孔隙所需要的膨胀性水化物的量确定膨胀性工业废渣的用量;根据使固化土孔隙液中 $Ca(OH)_2$ 饱和所需要的碱用量来确定碱性工业废渣的用量.

不同场地的软土,其物理性质指标、化学性质指标差别很大,因此加固不同场地的软土时需要不同的固化剂组成.为能针对具体的土质条件方便地个性化设计固化剂,根据初步试验结果[7],建立了土的性质指标与固化剂各组成材料数量的关系式:

胶结性组分用量 $a_w$ 与土样液限 $W_L$ 和液性指数 $I_L$ 的关系为

$$a_w = 0.3174(W_L + 2.44I_L + 0.5967)\% \quad (1)$$

膨胀性水化物 $D_W$ 与土样孔隙率 $n$ 的关系如下式:

$$D_W = [\rho_G(0.174n - 2.20)]\% \quad (2)$$

式中,$\rho_G$ 为膨胀性水化物的密度(AFt 的密度为 1.73 g/mL).利用式(2)和所形成的膨胀性水化物的具体组成,根据生成膨胀性水化物的化学反应式计算得到膨胀性组分的用量.

$Ca(OH)_2$ 掺量 $D'_W$ 与土样离子交换容量 $X_1$、PH 值 $X_2$、活性硅铝含量 $X_3$ 的关系为

$$D'_W = (3.112 + 0.0101X_1 - 0.2214X_2 + 0.112X_3) \quad (3)$$

最终固化剂由上述 3 部分组成.

## 4　配比实例

本试验采用电石渣提供必要的碱度,用量根据公式(3)计算所需 $Ca(OH)_2$ 量和电石渣中 CaO 含量折算;膨胀性组分由磷石膏与固化剂中和土中的含铝成分构成;胶结性组分为水泥、电石渣激发的煅烧煤矸石,由文献[8]得出所用煅烧煤矸石与电石石渣的最佳质量比例 100:96.

试验中所用土样 WT 的性质见表 1.采用奥达牌 32.5 普通硅酸盐水泥(PC);徐州地区的煅烧煤矸石(CCG);贵州宏福实业开发有限总公司提供的磷石膏(PG);天津的电石渣(CS).各工业废渣的化学组成见表 2.

**表 1　试验中所用土样的物理性质指标**

| 指标 | 密度/(g·cm$^{-3}$) | 含水量/% | 孔隙率/% | $W_L$/% | $I_L$/% | pH 值 | 离子交换容量/(meq·(100g)$^{-1}$) | 活性硅铝含量/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 1.21 | 38.90 | 51.92 | 43.20 | 0.95 | 4.85 | 22 | 23.65 |

**表 2　工业废渣的化学组成**　%

| 名称 | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CCG | 57.95 | 19.02 | 5.32 | 3.16 | 0.82 | 0.9 | |
| CS | 4.61 | 3.14 | 0.32 | 66.14 | 0.38 | | 24.36 |
| PG | 3.62 | 0.08 | 0.05 | 31.57 | 0.17 | 42.48 | |

固化剂中各组分掺量的计算过程如下:

1) 胶凝性组分的用量按式(1)计算:

$a_w = 0.3174(W_L + 2.44I_L + 0.5967) = 0.3174 \times (43.20 + 2.44 \times 0.95 + 0.5967) = 14.64$

2) 膨胀性组分的用量按式(2)计算:

$D_W = [\rho_G(0.174n - 2.20)] = 1.73 \times (0.174 \times 51.92 - 2.20) = 11.8$

上式得到的是填充孔隙所需的膨胀性水化物 AFt 的量,由 AFt 的组成 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ 可知,每生成 1mol 的 AFt 需要 3 mol 的石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$),故石膏量可按下式计算得到:

$$3CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$$

分子量:516　　1 255

石膏的量 $= 11.8 \times 516 \div 1255 = 4.85$,试验中磷石膏中有效石膏的含量为 95%,故需要磷石膏的量为 $4.85 \div 95\% = 5.10$.

3) 碱性组分的掺量按式(3)计算:

$D'_W = 3.112 + 0.0101X_1 - 0.2214X_2 + 0.112X_3 = 3.112 + 0.0101 \times 22 - 0.2214 \times 4.85 + 0.112 \times 23.65 = 4.9$

上式计算得到的 $Ca(OH)_2$ 的量,折合成 CaO 含量为 66.14%(表 2)的电石渣量为

$$4.9 \div (66.14\% \times 74 \div 56) = 5.6\%$$

试验过程采用6%的电石渣.

固化剂组成配比及固化土的28 d无侧限抗压强度结果见表3(表中配比为土样湿重量的百分比).

由表3可知,根据本研究提出的利用工业废渣配制软土固化剂设计方法,可充分发挥各类工业废渣不同的技术优势.对比1#与2#试样的强度可见:用6%的电石渣替换水泥,固化土强度变化不大,这证明固化土中$Ca(OH)_2$不饱和,土样消耗了用于生成CSH的$Ca^{2+}$和$OH^-$,从而导致了CSH胶结性物质的减少和固化土强度的降低.对比表中2#试样和3#试样可见:用5%的磷石膏代替5%的水泥,而其强度增长了1.96倍,这主要是因为:磷石膏与固化剂水化物中的含铝组分和土中的活性$Al_2O_3$反应生成钙矾石,钙矾石膨胀可以填充土团粒间和土团粒内的孔隙,弥补了水化硅酸钙填孔效率低、不能填充土团粒内孔隙的不足,从而大幅提高了固化土强度.对比3#与4#试样的强度可见:4#配比用煤矸石代替了8%的水泥,固化土强度提高了43%,这是由于煤矸石的前期水化速度慢,煤矸石的加入使得胶凝性水化物CSH的前期生长速度缓慢下来,使膨胀性水化物钙矾石在前期充分生成,在此之后,充分发挥了水泥的胶凝性,充分包裹土团粒,从而使固化土的强度增长.完全采用工业废渣作为固化剂的5#试样,强度也达到了2 MPa,是1#试样强度的2.5倍.

**表3 固化剂组成配比及强度**

| 序号 | PC/% | CCG+CS/% | CS/% | PG/% | $q_u$/MPa |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0.80 |
| 2 | 19 | 0 | 6 | 0 | 0.71 |
| 3 | 14 | 0 | 6 | 5 | 2.10 |
| 4 | 6 | 8 | 6 | 5 | 3.00 |
| 5 | 0 | 14 | 6 | 5 | 2.00 |

上述试验结果体现出不同工业废渣的增强作用.

## 5 结 论

1) 固化剂应提供胶凝性水化物、膨胀性水化物和足够的碱度,且不同水化物生成过程间有良好的协调性.

2) 制备固化剂时,工业废渣具有独特的技术优势,如可提供膨胀性水化物填充土中孔隙、提供一定的碱度以保证固化土孔隙液中$Ca(OH)_2$饱和、减缓胶结性水化物的生成速度从而使水化物的生成过程协调.

3) 建立了根据土的性质指标设计固化剂的计算方法:固化剂由胶结性组分、膨胀性组分和碱性组分构成.胶结性组分可根据土样的$W_L$和$I_L$确定;膨胀性组分可根据土样孔隙率确定;碱性组分可根据土样离子交换容量、PH值、活性硅铝含量确定.

4) 用76%～100%的煅烧煤矸石、磷石膏、电石渣等制备的固化剂的固化土强度比水泥固化土强度提高了1.5～2.75倍.

## 参考文献(References)


[1] Sreekrishnavilasam A, Rahardja S, Kmetz R, et al. Soil treatment using fresh and landfilled cement kiln dust[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21:318－327

[2] Nalbantoglu Z. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials, 2004,18:377－381

[3] Kolias S, Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement[J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27:301－313

[4] 宁建国,黄新. 利用工业废渣配制水泥系软土固化剂探讨[J]. 工业建筑,2005,35:432－438
Ning Jianguo, Huang Xin. Exploration of preparing cement－based stabilizing agent for soft soil by industrial cinders [J]. Industrial Construction, 2005,35:432－438 (in Chinese)

[5] 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,2007,26(1):156－161
Huang Xin, Xu Sheng, Ning Jianguo. 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)

[6] 黄新,宁建国,许晟,等. 固化土结构的形成模型[J]. 工业建筑,2006,36(7):1－6
Huang Xin, Ning Jianguo, Xu Sheng, et al. Structure formation model of stabilized soil[J]. Industrial Construction, 2006,36(7):1－6(in Chinese)

[7] Huang Xin, Li Zhanguo, Zhao Yongsheng, et al. Principle of soil stabilizr preparation by utilizing of industrial wastes [C]// Som N. Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Vol I. New Delhi: Allied Publishers Private Limited Printing Division, 2007: 773－776

[8] 赵永生. 利用工业废渣配制软土固化剂的原理与方法[D]. 北京:北京航空航天大学土木工程系,2007
Zhao Yongsheng. The theory and method of preparing stabilizer for soft soil with industrial waste[D]. Beijing: Civil Engineering Department, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)


(责任编辑:张 嵘)