

利用工业废渣固化软土的试验研究

牛晨亮¹ 黄新^{1*} 李战国^{1,2} 赵永生^{1,3}

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院土木工程系, 北京 100083;

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124;

3. 中国交通建设股份有限公司一局七公司, 北京 100011)

摘要 根据软土固化所需水化物组成的特殊性以及固化土结构形成过程的特点, 有针对性地选择煤矸石、电石渣和磷石膏制备成以工业废渣为主要成分的软土固化剂。试验表明: 采用合理的组成设计, 充分利用不同工业废渣在提供碱性物质和膨胀性物质、调整胶结性水化物与膨胀性水化物生成速率协调性等方面的技术优势, 利用工业废渣制备的固化剂与普通水泥相比可使固化土强度提高数倍。

关键词 工业废渣 软土 固化剂 优化设计 实例

中图分类号 TU528.042 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2009)10-1871-04

Experimental research on utilization of industrial wastes to stabilize soft soil

Niu Chenliang¹ Huang Xin¹ Li Zhanguo^{1,2} Zhao Yongsheng^{1,3}

(1. Department of Civil Engineering, Traffic Science and Engineering Institute, Beihang University, Beijing 100083, China;

2. Key Lab of Urban Securing and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. The Seventh Co., the First Group, China Communications Construction Company Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract According to the particularity of the hydrates system needed to stabilize soft soil and the characteristic of structure formation process of the stabilized soil, soil stabilizers were prepared mainly with industrial wastes such as calcined coal gangue, carbide slag and phosphogypsum. The results indicate that based on rational component design in which the technical advantages of different industrial wastes, such as supplying alkaline hydrates and expansible hydrates, adjusting the concordance of growing process between cementitious hydrates and expansible hydrates, were fully utilized, the stabilizers prepared with industrial wastes can enhance the strength of stabilized soil by several times than cement.

Key words industrial wastes; soft soil; stabilizer; optimizing design; example

随着土地匮乏, 建在软土地基上的建筑物日益增多, 软土地基加固已成为建设中首要解决的问题。将固化剂与软土拌和使软土硬化的软土固化技术(如深层搅拌法、高压旋喷法和水泥拌合土法等)是应用最为广泛的软土地基加固技术。目前主要使用水泥作为软土固化剂^[1], 其性能远不能满足工程需要。

一些工业废渣有可能用于软土固化^[2~9], 且在一些场合可以取得比单纯用水泥更好的技术效果。如能用工业废渣制备出高效软土固化剂, 将具有重要的技术、经济和环境意义。

现有的关于利用工业废渣开发固化剂的报道, 基本上是采用根据经验进行反复试配的方法, 所得固化剂加固效果和适用土质范围并不理想。欲利用工业废渣制备高效软土固化剂需要正确的理论

指导。

本文针对固化土结构形成所需要的水化物体系、水化物形成过程与环境的特点, 根据对工业废渣在配制软土固化剂方面具有的技术优势的分析, 设计制备了以煤矸石、电石渣和磷石膏等工业废渣为主要成分的软土固化剂。

1 固化剂优化设计的基础理论

1.1 软土固化所需要的水化物体系

文献[10, 11]根据理论分析和试验研究提出了

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50278007)

收稿日期: 2008-10-22; **修订日期**: 2008-12-19

作者简介: 牛晨亮(1982~), 男, 硕士研究生, 研究领域为: 工业废弃物的再利用。E-mail: loyal-heart@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hx2000@buaa.edu.cn

固化土的结构形成模型(见图 1):对于粘性土,固化土结构是通过胶结性水化物包裹胶结土团粒(如图 1(a)所示、胶结性水化物或膨胀性水化物填充土团粒间孔隙(如图 1(b)所示)、膨胀性水化物挤压填充土团粒内孔隙而形成(如图 1(c)所示)。

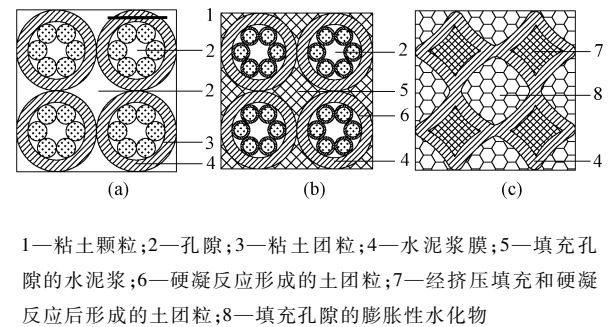


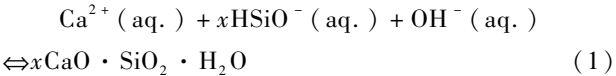
图 1 粘性土固化土结构形成模型

Fig.1 Stabilized soil structure formation model

只产生胶结性水化物的固化剂,如水泥,由于不能填充土团粒内的孔隙而难以获得满意的固化土强度。因此,固化剂的水化物中必须含有膨胀性水化物,该水化物形成过程的体积膨胀将挤压、填充土团粒内孔隙,而使固化土强度大幅度提高。

1.2 土中化学性质因素对固化土强度的影响与对策

水泥水化主要产生水化硅酸钙 CSH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。其中水化硅酸钙 CSH 是固化土强度的主要贡献者,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对强度没有直接的贡献。水化硅酸钙 CSH 按下列热力学平衡式生成,这表明固化土孔隙液中 Ca^{2+} 和 OH^- 离子浓度决定了胶结性水化物 CSH 的生成量。



由于土中可溶盐、离子交换、物理吸附、硬凝反应等作用,土样将大量吸收 Ca^{2+} 和 OH^- 离子,消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。若固化土孔隙液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不饱和,土样对 Ca^{2+} 和 OH^- 离子的进一步吸收,必然消耗原本用以生成 CSH 所必需的 Ca^{2+} 和 OH^- 离子,使固化土中水化物生成量减少,最终影响固化土抗压强度的增长。

研究表明^[12],虽然土样中影响化学性质的因素多种多样,但不同因素对固化土水硬化产生的影响,最终表现在固化土孔隙液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的影响,表现在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度对水化物生成量的影响。因此可以采取提高固化土 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的相应措施消除土样各种化学性质影响因素的不良影响。

1.3 膨胀性水化物与胶结性水化物生成过程的协调性

固化剂的水化物应该含有胶结性水化物和膨胀性水化物。研究表明^[13],膨胀性水化物可以填充固化土中的孔隙,从而产生增强作用,也可以破坏 CSH 已经产生的固化土结构。膨胀性水化物在固化土中是否产生增强效果,主要取决于膨胀性水化物生成过程与 CSH 生成过程的协调性。若膨胀性水化物在 CSH 凝胶还未大量生成前生成,其膨胀填孔的作用远大于破坏已有结构的作用,有利于固化土强度的提高。

因此,加快膨胀性水化物生成速度或降低胶结性水化物 CSH 的生成速度将改善两者的协调性,充分发挥膨胀和胶结各自对固化土强度的贡献。

1.4 工业废渣在制备固化剂方面的技术优势

水泥的水化物约为 70% 水化硅酸钙 CSH 和 20% $\text{Ca}(\text{OH})_2$,其提供的水化物不能保持固化土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和的水化环境,不能提供足够的膨胀性水化物,此外水泥产生的 CSH 胶结性水化物生成速度较快,与膨胀性水化物的生成速度不协调。而这些缺陷可以选择适当的工业废渣加以弥补^[14]。一些工业废渣可以为固化土提供足够的碱度;一些工业废渣可以水化生成膨胀性水化物,用以填充固化土中孔隙;一些工业废渣可以生成胶结性水化物 CSH,但 CSH 的生成速度大大降低,从而有利于协调胶结性水化物与膨胀性水化物生成过程。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

采用北京强力水泥厂出产的奥达牌 P. O. 32.5 普通硅酸盐水泥;中国建材科学研究院提供的经 800℃ 人工煅烧的徐州地区煤矸石,成分除表 1 所示外还含 0.382% MnO;贵州宏福实业开发有限公司提供的磷石膏,成分除表 1 所示外还含 1.05% P_2O_5 ;天津的电石渣,成分除表 1 所示外还含 24.36% C;自来水。

表 1 试验用原材料化学组成

Table 1 Chemical components of ingredients (%)

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
煤矸石	57.95	19.02	5.32	3.16	0.82	0.9
磷石膏	3.62	0.08	0.05	31.57	0.17	42.48
电石渣	4.61	3.14	0.32	66.14	0.38	—

2.2 试验方法及步骤

2.2.1 试样的制备

制备试样用 SJ-160 型静浆搅拌机。按表 2 配比称量水泥、煤矸石、磷石膏、电石渣和水,放入搅拌锅内,低速搅拌 30 s 后加入土样,低速搅拌 1 min 后再高速搅拌 2 min。

将搅拌好的试样分 3 层装入 50 mm × 50 mm × 50 mm 试模中,在 ZT-1 × 1 型振实台上各振动 1 min。

试件成型 1 d 后拆模,送入养护箱内养护,养护温度为 (25 ± 2) °C,湿度为 (95 ± 2) %。

2.2.2 固化土无侧限抗压强度的测定

使用北京工具厂生产的型号为 LQ-100S 的路面材料强度试验机,以及量程分别为 7.5 kN 和 30 kN 的测力环测定固化土无侧限抗压强度 q_u ,加载速度为该仪器的机动速度 1 mm/min。

3 试验设计

本试验用煅烧煤矸石替代部分水泥作为胶结性材料,以调整胶结性水化物的生成速率;用磷石膏作为膨胀组分,磷石膏可与水泥水化物中的水化铝酸钙反应生成固体体积增加约 113% ~ 122% 的膨胀性水化物钙矾石 (3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O);采用电石渣提供足够的碱度。试验土样的物化性质如下:土样名称为 WT, $\rho_s = 1.73 \text{ g/cm}^3$, $w = 40.11\%$, $n = 51.22\%$, $W_L = 41.30\%$, $I_L = 0.92$, pH = 4.95, 离子交换容量为 46 mg 当量 (100 g), 活性硅铝总量 32.85%, 主要粘土矿物成分为伊利石和蒙脱石。其中活性硅铝总量是土样活性硅铝质量占硅铝总量的百分含量,土样硅铝总量为土质量的 71.73%。

按照文献 [14] 提供的土样物理性质指标和化学性质指标与固化土结构形成所需要的水化物数量之间的指导关系,根据土样的性质指标、工业废渣的化学组成与生成水化物的化学反应关系式,计算确定固化剂各个组分的掺量。

3.1 用于包裹胶结土团粒的胶结组分用量

用于包裹胶结土团粒的胶结组分用量计算如下:

$$\begin{aligned}aw_1 &= 0.3174(W_L + 2.44I_L + 0.5967)/100 \\&= 0.3174(41.3 + 2.44 \times 0.92 + 0.5967)/100 \\&= 14.01\%\end{aligned}$$

其中: aw_1 —包裹土团粒所需胶结组分与湿土样质量百分比, W_L —土样的液限, I_L —土样液性指数。

3.2 膨胀性水化物的量

膨胀性水化物的量计算如下:

$$\begin{aligned}D_w &= [\rho_G(0.174n - 2.20)]/100 \\&= [1.73(0.174 \times 51.21 - 2.20)]/100 \\&= 11.6\%\end{aligned}$$

其中: ρ_G —钙矾石的密度, n —土样的孔隙率, D_w —膨胀性水化物与湿土样质量百分比。

根据硫酸钙与铝酸盐生成膨胀性物质钙矾石 (3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O) 的化学反应方程式,可计算所需石膏量与湿土样质量的百分比为 4.8%。

试验中采用的磷石膏其 CaSO₄ · 2H₂O 含量为 95%, 因此需要磷石膏百分掺量为 5.05%

3.3 使土样 Ca(OH)₂ 饱和所需 Ca(OH)₂ 用量

计算公式如下:

$$\begin{aligned}D'_w &= (0.021 + 0.0015X_1 - 0.124X_2 + 0.102X_3)/\rho_s \\&= (0.021 + 0.0015 \times 46 - 0.124 \times 0.495 + \\&\quad 0.102 \times 0.3285)/1.23 \\&= (0.021 + 0.069 - 0.06138 + 0.033507)/1.23 \\&= 5.1\%\end{aligned}$$

式中: ρ_s 、 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为土样密度、土样离子交换容量、pH 值、活性硅铝百分含量。

由表 1 知:电石渣含 CaO 66.14%, 因此需电石渣 5.8%。

通过试验确定煅烧煤矸石:电石渣为 100 g:96 g。固化剂配比见表 2, 其中各组分掺量为相对所加固软土质量的百分比。

表 2 固化剂配比及固化土强度					
Table 2 Stabilizer component & stabilized soil strength					
序 号	水泥 (%)	煤矸石 + 电石渣 (%)	电石渣 (%)	磷石膏 (%)	抗压强度 q_u (MPa)
1	25	0	0		0.8
2	19	0	6		0.71
3	14	0	6		2.1
4	6	8(4.1 + 3.9)	6		3
5	0	14(7.1 + 6.9)	6	5	2

4 试验结果与分析

固化土 28 d 无侧限抗压强度 q_u 见表 1。

从表 1 可看出,利用煤矸石、电石渣和磷石膏进行科学组合所配制的软土固化剂,可以大幅度提高固化土的抗压强度。单纯采用 25% 水泥固化的 1[#] 试样,28 d 抗压强度为 0.8 MPa,而采用适量工业废渣替代水泥的 4[#] 试样,抗压强度达到了 3.0 MPa,是 1[#] 试样的 3.75 倍,水泥用量仅为 1[#] 试样的 24%。

完全用工业废渣的5[#]试样,强度也达到了2.0 MPa,是1[#]试样强度的2.5倍。充分体现了利用工业废渣配制软土固化剂的显著的技术优势和巨大的经济效益和社会效益。

对比1[#]与2[#]试样的强度可见:用6%的电石渣置换水泥,固化土强度变化不大。这证实当固化土液相 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不饱和时,部分本来用于生成水化硅酸钙的 Ca^{2+} 和 OH^- 离子被土消耗,水泥不能够产生足量的水化硅酸钙。

对比2[#]试样和3[#]试样可见:用5%的磷石膏代替了5%的水泥,而其强度却增长了1.96倍。这是由于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 反应生成钙矾石膨胀填充固化土中孔隙,弥补了水化硅酸钙不能填充土团粒内孔隙的不足。

对比3[#]、4[#]试样:4[#]配比用煤矸石代替了8%的水泥,由于煤矸石的前期水化速度慢,煤矸石的加入使固化土中早期胶凝性水化物CSH总量的增长速度缓慢下来,因此早期产生的膨胀性水化物钙矾石其膨胀作用主要用于填充孔隙,而对CSH胶结形成的结构的破坏作用降低,改善了膨胀性水化物与胶结性水化物的协调性,而CSH后期的充分生长,包裹胶结已被膨胀挤密的土团粒,胶结效率大大提高,从而进一步提高了固化土强度。相对3[#]试样,4[#]试样固化土的强度增长了43%。

综上所述,在充分掌握水化物体系和水硬化过程、充分认识工业废渣在配制软土固化剂方面所具有的技术优势的基础上,经过科学地设计组配,利用工业废渣制备的固化剂不仅可减轻环境污染、节省资源,而且能大幅度提高固化土的抗压强度。为高附加值地利用工业废渣,发展循环经济,建设节约型和环境友好型社会开辟了一条新的途径。

5 结 论

(1)固化土最佳结构的形成需要有胶结性水化产物胶结土团粒、膨胀性水化产物挤压填充土团粒内和土团粒间的孔隙,以及足够的碱性环境保证水化硅酸钙等水化产物的正常生成和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中活性硅铝间硬凝反应的进行。而水泥提供的水化物往往不能保持固化土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和的水化环境,不能提供足够的膨胀性水化物;此外水泥产生的CSH胶凝性水化物生成速度较快,与膨胀性水化物的生成速度不协调。而工业废渣具有提供足够碱性物质和膨胀性物质、调整CSH胶结性水化物与膨胀

性水化物生成速率的协调性等方面的技术优势。

(2)试验表明:采用本文的设计理念和方法,在水泥用量仅占固化剂总量的24%,以煤矸石、电石渣和磷石膏等为主要成分制备的固化剂,其固化土强度比水泥的固化土强度提高了2.75倍;完全采用工业废渣制备的固化剂,其固化土强度比水泥的固化土强度提高了1.5倍。

参 考 文 献

- [1] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册(第2版). 北京:中国建筑工业出版社,2000. 167~171
- [2] Kamon M., Nontananandh S., Katsumi. Effective utilization of stainless steel slag for soil stabilization. Proc. 24th. Japan Nat. Cong. On Soil Mech. and Foundation Engineering 2nd June. Japan,1989.1947~1948
- [3] Nurhayat D., Arzu O., Ayse T. Application of phosphogypsum in soil stabilization. Building and Environment, 2007,42:3393~3398
- [4] Ayse Pekrioglu, Ata G. Doven, Mehmet T. Tumay. Fly ash utilization in grouting applications. Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, Indian, 2003. 1169~1179
- [5] Kamon M., Nontananandh S. Combining industrial wastes with lime for soil stabilization. J. Geot. Eng., 1990, 1(1):1~17
- [6] Kolas S., V. Kassalouri R., Karahalios A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. Cement & Concrete Composites, 2005, 27:301~313
- [7] Li C., Deng F. L. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash cement. Journal of Hazardous Materials,2008, 162:1~7
- [8] Modmoltin C., Onitsuka K., Negami T., et al. Stabilization of surplus ariake clay with cement and slag. Swets & Zeitlinger, 2002,29(8): 609~614
- [9] 黄新,胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究. 岩土工程学报,1998,20(5):72~76
- [10] Huang Xin, Li Zhanguo, Zhao Yongsheng, et al. Principle of soil stabilizer preparation by utilizing of industrial waste. Proceedings of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. India, 2007. 773~776
- [11] 宁建国. 固化土硬化机理和结构形成模型研究及固化剂设计[博士学位论文]. 北京航空航天大学,2007. 19~69,78~148
- [12] 宁建国,黄新,许晟. 土样pH值对固化土抗压强度增长的影响研究. 岩土工程学报,2007,29(1):98~102
- [13] 黄新,许晟,宁建国. 含铝固化剂固化软土的试验研究. 岩石力学与工程学报,2007,26(1):156~161
- [14] 赵永生. 利用工业废渣配制软土固化剂的原理与方法[硕士学位论文]. 北京航空航天大学,2007. 18~27,56,62~63