

利用钢渣和磷石膏固化软土的试验研究

赵永生^{1,2}, 牛晨亮¹, 李战¹, 黄新¹

(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. 中国交通建设股份有限公司一局七公司, 北京 100011)

摘要: 根据软土固化所需要的水化物体系、膨胀性水化物与胶结性水化物生成过程协调性控制原理, 设计制备了以钢渣和磷石膏为主要成分的软土固化剂。试验表明: 充分利用工业废渣在软土固化方面的技术优势, 采用合理的组成设计, 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: 软土; 固化剂; 工业废渣; 优化设计; 实例

作者信息: 赵永生(1981—), 男, 吉林省人, 北京航空航天大学硕士, 现在中国交通建设股份有限公司一局七公司工作。

0 引言

随着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。软土固化技术(如深层搅拌法、高压旋喷法和水泥拌和土法等)是应用最为广泛的软土地基加固技术。该技术成功的关键之一是选用的固化剂对拟加固土必须有效且经济。目前工程中多用水泥作为软土固化剂, 远不能满足实际工程的需要^[1~3]。另一方面, 水泥生产成本较高; 在生产过程中, 要消耗大量资源与能源, 同时造成严重的环境污染。如果能够采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。

一些工业废渣有可能用于软土固化^[4~8], 研究表明: 以工业废渣为主要原材料的固化剂不仅可以降低固化剂的成本, 有利于环境保护, 在一些场合还可以取得比单纯用水泥更好的技术效果。以磷石膏为例, 我国每年将大约有 53 Mt 的磷石膏, 因尚未利用而成为污染环境的废渣^[9, 10]。在配制软土固化剂的试验中以磷石膏为原料, 在一定程度上可解决这些问题^[11]。

目前已有一些关于利用工业废渣研究开发固化剂的报道^[8, 12~15], 基本上是采用根据经验进行反复试配的方法, 加固效果和适用土质范围并不理想。因此, 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。

本文根据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要求的研究成果, 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研究, 设计制备了以钢渣、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

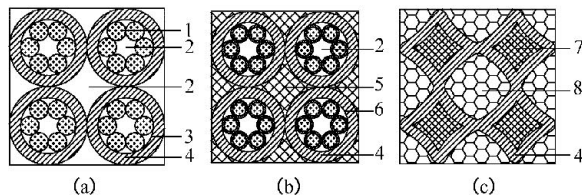


图 1 黏性土固化土结构形成模型

1—黏土颗粒; 2—孔隙; 3—黏土团粒; 4—水泥浆膜; 5—填充孔隙的水泥浆; 6—硬凝反应形成的土团粒; 7—经挤压填充和硬凝反应后形成的土团粒; 8—填充孔隙的膨胀性水化物

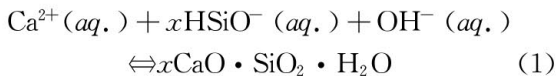
文献^[1, 16~17]根据理论分析和试验研究提出了固化土的结构形成模型, 如图 1 所示。该模型认为: 对于黏性土, 固化土结构是通过胶凝性水化物包裹胶结土团粒、胶凝性水化物或膨胀性水化物填充土团粒间孔隙、膨胀性水化物挤压填充土团粒内孔隙而形成。以只产生胶凝性水化物的水泥作为固化剂, 由于不能填充土团粒内的孔隙

而难以获得满意的固化土强度。因此,固化剂的水化物中还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 拟加固土中化学性质因素对固化土强度的影响与对策

由于土中可溶盐、离子交换、物理吸附、硬凝反应等作用,拟加固土参与或影响固化剂的水化反应,因此同样的固化剂加固物理性质相似的不同土样,其固化土相差很大。很多情况下,采用水泥作为固化剂得不到满意的强度^[16~18]。

水泥水化主要产生水化硅酸钙——CSH 和 Ca(OH)₂。其中 CSH 是固化土强度的主要贡献者,而 Ca(OH)₂ 对强度没有直接的贡献。CSH 按下列热力学平衡式生成,这表明固化土孔隙液中 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子浓度决定了胶凝性水化物 CSH 的生成量^[16~18]:



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 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子,消耗 Ca(OH)₂^[18]。如果固化土孔隙液中 Ca(OH)₂ 不饱和,土样对 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子的进一步吸收,必然要消耗原本用以生成 CSH 所必需的 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子,导致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^[16~18],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化硬化产生的影响,最终表现在对固化土孔隙液 Ca(OH)₂ 浓度的影响,表现在 Ca(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 Ca(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。但是,掺加同一种膨胀组分的固化剂固化某些土可提高固化土强度,而固化另一些土时却可能使固化土降低^[16~17, 19]。膨胀性水化物与胶结性物质的生成过程是否协调影响固化土强度^[16~17]。

文献^[16~17]指出,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。膨胀性水化物在 CSH 凝胶还未大量生成前生成,其膨胀填充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凝性水化物 CSH 的生成速度将改善两者的协调性。从而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% CSH 和 20% Ca(OH)₂。根据上面的研究,水泥提供的水化物不能保持固化土中 Ca(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。而这些缺陷可以选择适当的工业废渣加以弥补^[9~11, 16~17]。

首先,一些工业废渣可以为固化土提供足够的碱度;其次,一些工业废渣可以水化生成膨胀性水化物钙矾石,可以填充土团粒之间和内部的孔隙;此外,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的生成过程。

2 试验设计

本试验采用钢渣替代部分水泥作为胶凝性材料,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膨胀性水化物钙矾石;采用 Ca(OH)₂ 提供足够的碱度。试验土样的物理和化学性质见表 1。

表 1 土样物理力学性质指标

土样名称	WT
ρ(g/cm ³)	1.23
W(%)	40.11
n(%)	51.22
W _L (%)	41.30
I _L	0.92
pH 值	4.95
离子交换容量 毫克当量/100 g	46
活性硅铝总量(%)	32.85
主要黏土矿物成分	伊利石、蒙脱石

2.1 固化土各水化物需求量的计算

本试验按照文献[16]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,根据土样的物理性质指标和化学性质指标、根据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。

(1) 计算用于包裹胶结土团粒的水泥用量。

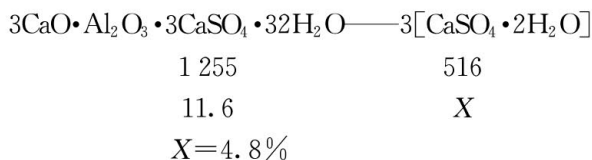
$$\begin{aligned} a_{w1} &= 0.3174(W_L + 2.44I_L + 0.5967) \\ &= 0.3174(41.3 + 2.44 \times 0.92 + 0.5967) \\ &= 14.01 \end{aligned}$$

式中, a_{w1} 为固化土中完全包裹土团粒所需水泥用量; W_L 为土样的液限; I_L 为土样的液性指数。

(2) 计算膨胀性水化物的量。

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

式中, D_w 为膨胀性水化物与湿土样质量百分比。



式中, X 为所需石膏与湿土样质量的百分比。

试验中采用的磷石膏其 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量为 95%, 因此需要磷石膏百分掺量为

$$\text{磷石膏百分掺量} = \frac{4.8\%}{0.95} = 5.05\%$$

(3) 计算土样 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和所需要的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 用量。

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

式中, ρ_s 为土样的密度; X_1 为土样离子交换容量

($\text{meq.}/100\text{g}$); X_2 为土样 pH 值; X_3 为土样活性硅铝百分含量。

2.2 确定各原料综合配比

根据上述计算,可分别确定 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 相对所加固软土质量的百分掺量为 5%, 磷石膏的掺量为 5%; 采用钢渣与水泥不同比例的组合以探讨胶结性水化物生成速率的影响。固化剂配比见表 2。

表 2 固化剂配比

序号	水泥(%)	钢渣(%)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%)	磷石膏(%)
1	25	0	0	0
2	20	0	5	0
3	15	0	5	5
4	6	9	5	5
5	3	12	5	5
6	0	15	5	5

3 试验材料和方法

3.1 试验材料

水泥是北京强力水泥厂出产的奥达牌 32.5 普通硅酸盐水泥; 钢渣是首钢磨细钢渣, 成分见表 3; 磷石膏是贵州宏福实业开发有限总公司提供的磷石膏, 成分见表 4; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是北京益利精细化学品有限公司分析纯 $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 水是北京自来水。

表 3 试验用钢渣成分表

名称	化 学 组 成 (%)						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	MnO
钢渣	14.6	23.9	6.3	35.2	—	0.9	—

表 4 磷石膏成分表

名称	化 学 组 成 (%)						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	P_2O_5
磷石膏	3.62	0.08	0.05	31.57	42.48	0.17	1.05

3.2 试验方法及步骤

(1) 试样的制备

制备试样用 SJ-160 型静浆搅拌机, 具体搅拌过程如下:

① 按照试验配比称量水泥、钢渣、磷石膏、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水, 放入搅拌锅内, 立即开动机器, 低速搅拌 30 s。

② 加入定量的土样, 低速搅拌 1 min 后停止; 高速再搅拌 2 min。

将搅拌好的试样分 3 层装入 $(50 \times 50 \times 50)\text{mm}^3$ 试模中,在 ZT-1 \times 1 型振实台上各振动 1 min。

试件成型 1 d 后拆模,将脱了模的试块送入养护箱内,进行养护,养护温度为 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,养护湿度为 $95\% \pm 2\%$ 。

(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,加载速度为该仪器的机动速度 1 mm/min。

4 试验结果与分析

配比见表 2;固化土的强度-龄期关系见图 2。

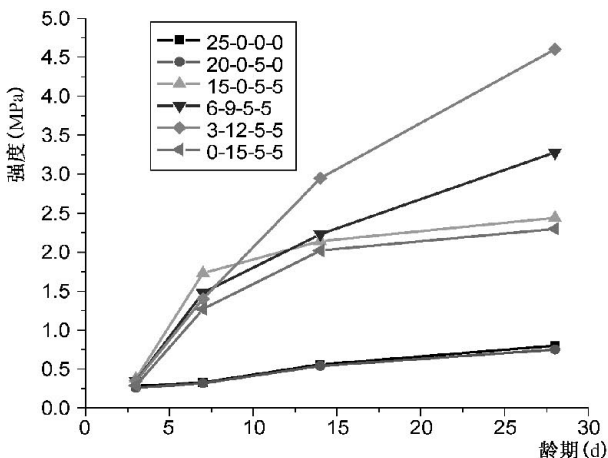


图 2 固化土强度-龄期曲线

25-0-0-0 表示水泥、钢渣、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、石膏的掺量分别为 25%、0、0、0,为 1# 试样;其他类似。

通过对图形的分析可知:

从图 2 可以很直观地看出:利用钢渣和磷石膏进行科学的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% 水泥的固化土,28 d 抗压强度为 0.8 MPa,5# 试样的 28 天抗压强度达到了 4.6 MPa,是单纯采用水泥加固的 1# 试样的 5.8 倍,而水泥用量仅为 1# 试样的 12%。完全不用水泥的 6# 试样,28 d 的抗压强度也达到了 2.3 MPa,是 1# 试样强度的 2.88 倍。上述试验结果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# 试样与 2# 试样的强度可见:用 5% 的

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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水化硅酸钙。

对比中 3# 试样和 2# 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 2.05 倍。这也证实了: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可以填充土团粒间和土团粒内的孔隙,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#、5# 试样的强度可见,由于钢渣的前期水化速度慢,钢渣的加入使胶凝性水化物 CSH 的前期生长速度缓慢下来,改善了膨胀性水化物与胶结性水化物的协调性,从而提高了固化土强度。如 5# 配比,用钢渣代替了 12% 的水泥使 CSH 早期生成量大大减少;因而,膨胀性水化物钙矾石产生的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;在此之后,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,从而使固化土的强度增长了 88%。

综上所述,充分发挥工业废渣在配置软土固化剂方面所具有的技术优势,不仅可减轻环境污染、节省资源,而且大幅度提高了固化土的抗压强度。使工业废渣得到高附加值地再利用,是发展循环经济、建设节约型社会和环境友好型社会的一项有利措施。

5 结语

(1) 固化土最佳结构的形成需要有胶结性水化物胶结土团粒、膨胀性水化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物的正常生成和硬凝反应的进行。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、提供膨胀性物质、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办法,在水泥用量仅占固化土总量的 12%,以钢渣、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 4.8 倍;完全不采用水泥,仅以钢渣、磷石膏、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 制备的固化剂,其固化土强度比水泥的固化土强度提高 1.88 倍。

参 考 文 献

- [1] 黄新,宁建国,许晟,等. 固化土结构的形成模型[J]. 工业建筑,2006,7(36):1~6.
- [2] 叶书麟,叶观宝. 地基处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:57~67.
- [3] 《地基处理手册》(第2版)编写委员会. 地基处理手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2000:167~171.
- [4] Kamon M, Nontananandh S, Katsumi. Effective utilization of stainless steel slag for soil stabilization [C]. Proc. 24th. Japan Nat. Cong. On Soil Mech. and Foundation Engineering 2nd June. Japan,1989:1947~1948.
- [5] Qijun Yu, Sawayama, Sugita K, et al. The reaction between rice husk ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution and the nature of its produce[J]. Journal of Cement and Concrete Research, 1999,29(1):37~43.
- [6] Ayse Pekrioglu, Doven Ata G, Tumay Mehmet T. Fly ash utilization in grouting applications[C]. Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, Indian,2003:1169~1179.
- [7] Kamon M, Nontananandh S. Combining industrial wastes with lime for soil stabilization[J]. J. Geot. Engg,1990,1(1):1~17.
- [8] Nataatonadja A. The behavior of stabilized fly ash for Queensland[C]. Eleventh Asian Regional Coherence on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1999:457~460.
- [9] 林乐. 我国磷复肥工业发展现状和展望[J]. 磷肥与复肥,2004,19(1):1~5.
- [10] 杨斌,李沪萍,罗康碧. 磷石膏综合利用的现状[J]. 化工科技,2005,13(2):61~65.
- [11] 黄新,胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报,1998,20(5):72~76.
- [12] Balasubramaniam A S, Lin D G A, Acharya S, et al. Behaviour of soft Bangkok clay treated with high alumina cement[C]. Proceeding of 11th Asian regional conference on soil mechanic and geotechnical engineering. Seoul, 1999:11~14.
- [13] Tremblay H, Leroueil S, Locat J. Stabilization of clayey soils from eastern Canada at high water contents[J]. Environmental Geotechnics, 1998,27(7):337~340.
- [14] Modmoltin C, Onitsuka K, Negami T, et al. Stabilization of surplus Ariake clay with cement and slag [J]. Swets & Zeitlinger, 2002,29(8):609~614.
- [15] Srivastava R K. Swelling and consolidation behaviour of industrial waste stabilized expansive soil [C]. Eleventh Asian Regional Coherence on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 1999:473~476.
- [16] 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,2007:18~27,56,62~63.
- [17] 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[D]. 北京:北京航空航天大学,2007:19~69,78~148.
- [18] 黄新,周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报,1994,16(1):62~68.