

利用工业废渣制备软土地基固化剂原理探讨

黄新¹, 李战国¹, 赵永生^{1, 2}, 宁建国^{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. 中国交通建设股份有限公司一局七公司, 北京 100011;

3. 山东科技大学资源环境工程学院, 青岛 266510)

摘要:首先探讨了形成固化土最佳结构对固化剂水化物种类及数量的要求、拟加固土的化学性质因素对固化土中水化物生成的影响与对策, 以及不同水化物生成过程的协调性对固化土强度的影响与协调性的调控方法。在此基础上, 探讨了工业废渣在调整水化物种类和数量、调控不同水化物生成过程协调性等方面的技术优势, 根据可生成的水化物种类对工业废渣进行了分类, 并提供了利用工业废渣制备软土固化剂的实例。试验结果表明用电石渣、煤矸石、磷石膏等工业废渣替代 76% 的水泥得到的固化剂, 固化土强度比水泥固化土强度提高了 2.75 倍; 完全用工业废渣制备的固化剂, 固化土强度比水泥固化土强度提高了 1.5 倍。

关键词: 软土固化; 工业废渣; 固化剂设计; 原理; 实例

作者简介: 黄新(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理, E-mail: hx2000@buaa.edu.cn。

0 引言

软土固化技术, 如深层搅拌法、旋喷法等, 是应用最为广泛的地基加固技术之一。利用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, 水泥加固软黏土效率较低, 相对成本较高, 同时水泥生产的环境负荷很大。

另一方面, 工业生产排弃大量的废渣, 其中大多数没有得到合理的利用, 这些废渣的堆放占用土地、污染环境, 同时也是资源的浪费, 与可持续发展的战略不符。很多工业废渣可以用于制备软土固化剂^[1~10]。这些研究的主导思想主要是节约成本、有利于环境保护。而对废渣的技术优势认识不足、发掘不够; 对如何根据固化土不同于混凝土的材料特点利用工业废渣的技术优势设计固化剂这一课题没有系统的研究。

事实上, 利用工业废渣制备固化剂不仅可以降低造价、有利于环境保护, 而且可以取得单纯用水泥难以获得的技术优势。而这依赖于对固化土形成最佳结构的水化物组成和水化物形成过程与

环境的系统了解。本文首先讨论了固化土形成最佳结构需要的水化物种类与数量、固化土中水化物硬化环境的特点以及不同水化物生成过程的协调性问题, 在此基础上讨论了利用工业废渣设计软土固化剂的原理, 并给出设计实例。

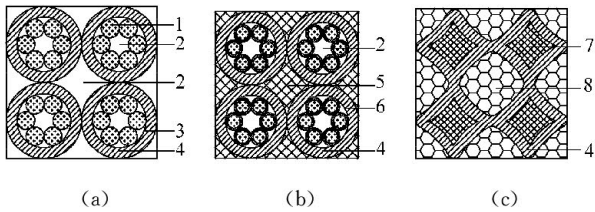
1 固化土结构形成过程与水化物组成的特点

固化土形成最佳的结构所需要的水化物组成、水化物形成的环境及影响因素、不同种类水化物生成过程的协调性等方面与混凝土不同, 而这决定了在固化土中利用工业废渣的特点。

1.1 固化土形成最佳结构需要的水化物

笔者曾提出固化土的结构形成模型^[11, 12], 如图 1 所示。当固化剂达到一定掺量时, 将在黏土颗粒凝聚而成的土团粒表面形成固化剂浆膜, 被固化剂浆膜完全包裹的土团粒相互接触, 胶结为一体, 使固化土形成一定的强度, 如图 1(a) 所示。如果采用只有胶结性水化物的固化剂, 如水泥, 随着水泥掺量的增加, 多余的水泥浆液将填充于土团粒间孔隙, 直至充满孔隙, 形成类似于图 1(b) 的

结构,使固化土强度进一步提高,但此时固化土中土团粒内还存在大量孔隙。如果采用含有膨胀性组分的固化剂,膨胀性水化物的膨胀挤压可以消除土团粒内的孔隙,如图 1(c)所示,显著提高固化土强度。此外,组成土团粒的黏土颗粒之间的微弱接触连接,在有足够 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的环境中经硬凝反应可形成胶结连接,进一步提高土团粒强度。只有当固化剂浆液充分包裹黏土团粒、同时又能够填满黏土团粒间与土团粒内的孔隙、通过硬凝反应提高土团粒的强度,才能得到密实坚硬的固化土结构。



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形成的土团粒; 8—填充孔隙的膨胀性水化物

图 1 黏性土固化土结构形成模型

综上所述,加固黏性土的固化剂应提供胶结性水化物、膨胀性水化物,并提供足够的碱度。而普通水泥的水化物主要是胶结性水化物,不能填充土团粒内的孔隙,因此使用水泥加固软黏土的效率很低。

1.2 土的化学性质因素对水化物生成的影响

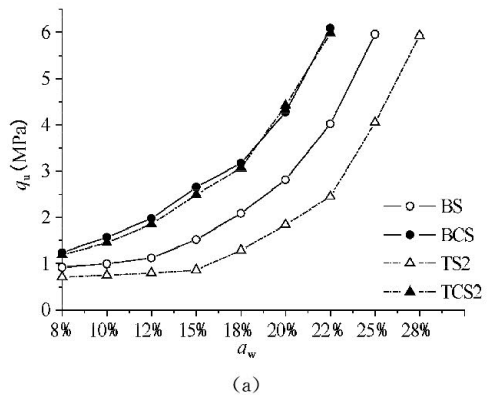
与混凝土不同,同样物理力学指标的不同土样采用同质同量水泥加固,其固化土强度可能相去甚远。

取自北京(BT)、天津(TT1、TT2)、武汉(WT)、南京(NT)的5种天然土样和纯高岭土样(GT),土样的性质如表1所示,其中BT与TT2、WT与TT1、NT与GT物理性质较为接近。在各土样中分别掺加不同比例的水泥(北京水泥厂产京都牌32.5普通硅酸盐水泥)。令土样BT、TT2、WT、TT1、NT及GT的固化土分别称为BS、TS2、WS、TS1、NS及GS,研究各固化土无侧限抗压强度 q_u 与水泥掺量 a_w 关系。图2(a)为其中一组固化土样BS和TS2的 q_u 与 a_w 关系图。由图2(a)可见:开始随着 a_w 的增加, q_u 增长缓慢;当 a_w 超过某一量时, q_u 增长速率急剧提高;物理性质相近的土样掺加等量水泥后 q_u 相差较大。

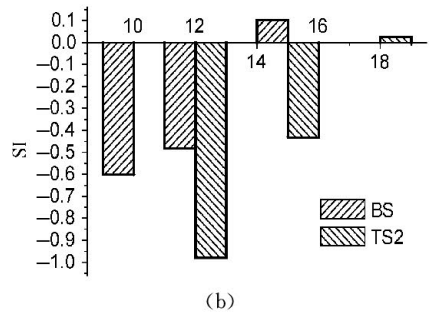
表 1 土样性质

土样名称	BT	TT2	WT	TT1	NT	GT
$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.25	1.27	1.23	1.21	1.16	1.19
$\omega(\%)$	30.00	28.60	40.11	38.90	60.20	61.00
e	0.81	0.78	1.05	1.08	1.15	1.12
$W_L(\%)$	27.38	27.07	41.30	43.20	65.69	60.68
I_L	1.23	1.18	0.92	0.95	0.84	0.91
pH值	6.7	5.05	4.95	4.85	5.86	7.23
离子交换容量毫克当量(100g)	6.6	4.0	46	22	78	3.3
活性铝总量	9.51	8.36	32.85	23.65	49.94	8.26

测定固化土试样30d龄期孔隙液中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 、 Si^{4+} 、 OH^- 等主要离子浓度,并计算在各离子作用下孔隙液中 Ca^{2+} 和 OH^- 的浓度积,以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的饱和指数SI表示,BS和TS2的 a_w 与SI的关系见图2(b)。比较图2中(a)和(b)可知,(b)中固化土 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和点对应的 a_w 与(a)中 q_u 增长速率的转折点对应的 a_w 基本一致。物理性质相近的土样掺加同量水泥,固化土孔隙液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度不同。



(a)



(b)

图 2 a_w 与 q_u 和 SI 的关系

在土样中掺加使土样中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和的量,再分别掺加不同比例的水泥,令相应的固化土为BCS、TCS2,其 q_u 与 a_w 的关系见图2(a)。由2(a)可知,经 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和处理后,物理性质相

近的土样参加同量水泥得到的固化土 BCS 与 TCS2 的 q_u 基本相同。

上述试验结果表明:虽然土样中化学性质的因素有多种,且不同土样的各不相同,导致不同土样的固化土中的离子种类和浓度差异很大,但土样中各种化学性影响因素对固化土强度的影响,最终表现在对孔隙液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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。因此可采取提高 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的相应措施消除土样各种化学性质因素的不良影响。此外,固化土中足够高的碱性环境,可以保证黏土矿物中活性 SiO_2 、 Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行硬凝反应,使土团粒内的黏土颗粒间形成一定的胶结。但是采用普通水泥,往往不能提供足够的碱度以保证固化土液相 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和。

1.3 水化物协调性问题

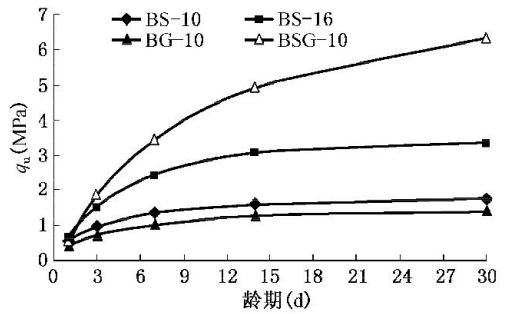
用水泥和磷石膏作为固化剂加固某些软土,水化反应生成钙矾石的膨胀作用能有效地提高固化土强度;而加固某些软土时,反而使强度降低^[2]。

选取土样 BT、TT1,采用普通硅酸盐水泥(PC)作为胶结性固化剂,石膏(G)和硫铝酸盐水泥(LC)构成两种不同膨胀型固化剂,用 X-射线衍射分析、差热分析和电子扫描电镜方法测定固化土中胶结性水化物与膨胀性水化物生成量,并测定固化土抗压强度。

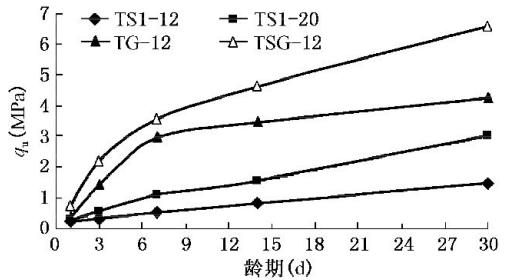
BT、TT1 在两种膨胀型固化剂作用下形成的固化土中,30 d 龄期强度最大的固化土及其固化剂配比如表 2 所示;图 3(a)、(b)分别为 BT、TT1 的固化土抗压强度随龄期的关系曲线。在 BT 固化土中,BG-1 各龄期强度始终低于 BS-10,而 BSG-10 的 3 d 强度后不仅高于 BS-10,也高于 BS-16。在 TT1 的固化土中,TG-12 强度大大高于 TS1-12 和 TS1-20 的强度。TSG-12 强度高于 TG-12。

表 2 固化剂配比及固化土强度

固化土	固化剂掺量(%)			q_u (MPa)
	PC	SC	PG	
BS-10	10	0	0	1.71
BS-16	16	0	0	2.21
BSG-10	10	3	2	6.18
BG-10	10	0	1	1.58
TS1-12	12	0	0	1.5
TS1-20	20	0	0	2.97
TSG-12	12	4	3	6.89
TG-12	12	0	3	4.35



(a) 北京土



(b) 天津土

图 3 固化土抗压强度与龄期的关系

BSG-10、BG-10 和 TSG-12、TG-12 在各龄期各水化物生成量分析结果见图 4。在 BT 的固化土中水泥水化形成的 CSH 早期形成速度较快,在 7 d 时 CSH 生成量已达到 28 d 的 60%左右;在 BG-10 中膨胀性水化物钙矾石 AFt 也基本上在 7 d 龄期间生成。而 BSG-10 中的 AFt 主要在 1 d 前生成。在 TT1 的固化土中 CSH 形成速度较慢,在 7 d 时 CSH 生成量仅是 28 d 龄期的 25%左右。TG-12 中 AFt 仍然主要在 7d 龄期前生成。而 TSG-12 中 AFt 则主要在 1 d 内形成。

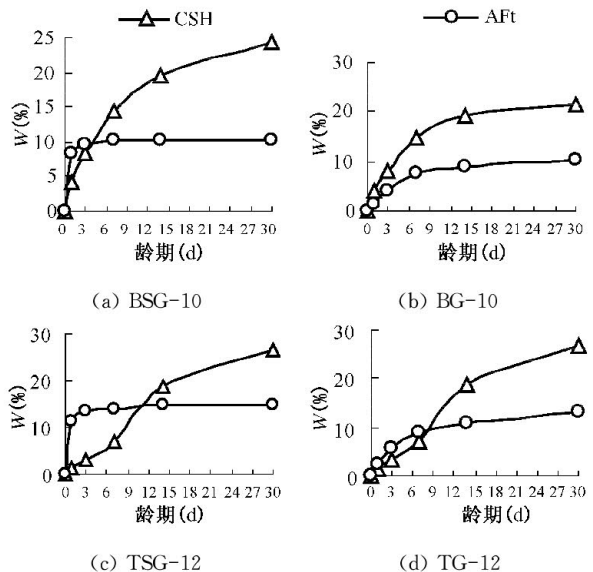


图 4 固化土中水化物形成关系图

AFt 形成过程中固相体积膨胀增大 120%。各膨胀型固化剂水化物的作用可大致分为两部分:CSH 的胶结过程和 AFt 的膨胀过程。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 胶结形成的固化土结构。从上述试验结果可知:AFt 的增强效果主要取决于 AFt 生成过程与 CSH 生成过程的协调性,AFt 生成时 CSH 胶结已形成的结构越微弱,AFt 膨胀的破坏作用就越小,AFt 膨胀填充孔隙的增强效果就越显著,如果填充孔隙使结构密实的增强作用强于膨胀对结构的破坏作用,则 AFt 对固化土就能产生增强作用,如 BSG-10 和 TG-12、TSG-12;反之,如果 AFt 生成时 CSH 胶结已形成较多的结构,AFt 膨胀的破坏作用占主导地位,导致固化土强度下降,如 BG-10。

由上可知,通过调整膨胀性组分和胶凝性组分的水硬化过程可以使两者协调发展,充分发挥两者对固化土结构形成的不同贡献,获得最高的固化土强度。

2 工业废渣的作用优势及分类

综上所述,高效固化剂应该提供胶结性的水化物包裹胶结土团粒、提供膨胀性水化物挤压填充土团粒间和土团粒内的孔隙,提供足够的碱性保证硬凝反应的进行。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。而这些缺陷可以选择适当的工业废渣加以弥补。例如可以补充高碱性的工业废渣,如电石渣;可以掺加适量的产生膨胀的工业废渣,如磷石膏等;可以用一些能够产生 CSH 胶结性水化物的工业废渣替代部分水泥,以减缓 CSH 胶结性水化物的生成速率,从而改善与膨胀性水化物生成速率的协调性。

根据上述对固化剂水化物的要求,可以将工业废渣分为能够产生胶结性水化物的组分、能够产生膨胀性水化物的组分和能够提供碱性的组分。

(1) 产生胶结型水化物的工业废渣:如一些具有潜在水硬性的工业废渣,包括炼铁的高炉矿渣、炼钢产生的钢渣、炼铜产生的铜渣、磷酸盐产生的

磷渣等;还有主要成分含活性 SiO_2 、 Al_2O_3 的火山灰类工业废渣,包括电厂产生的粉煤灰与炉底灰、污水经处理并浓缩,加石灰经 $700^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 煅烧后所得到的下水污泥煅烧灰、将稻壳充分燃烧所得的非晶态 SiO_2 含量高达 80%~95% 稻壳灰、用硫酸铝处理造纸厂废水产生的污泥,经 800°C 煅烧而得到的制纸煅烧灰、用矾土生产氧化铝时产生的赤泥渣、将煤矸石在 800°C 煅烧而得到的煅烧煤矸石等。这些废渣在碱性激发剂(如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$)作用下水化成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝性水化物。

(2) 膨胀性的水化物主要有水化硫铝酸钙 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$,也被称为钙矾石。钙矾石的形成可以通过以下几种方式:水泥中的铝酸三钙与硫酸钙反应生成、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 反应生成、活性 Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 反应生成。此外,很多硫酸盐也可以与其他物质反应生成硫酸钙进而生成硫铝酸钙。因此,一些石膏类废渣、含铝废渣及硫酸盐废渣可以利用作固化剂原料,生成膨胀性物质。如:电厂用石灰提取排烟中 SO_2 而得到的排烟脱硫石膏、用磷矿粉和硫酸反应制造磷酸产生的磷石膏、制造氢氟酸时所产生的氟石膏、生产硼酸产生的含硼石膏废渣、用钛铁矿生产钛白粉时产生的钛石膏等。用明矾石生产明矾过程排出的废渣矾泥,主要成分是 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$;制纸煅烧灰和赤泥渣中 Al_2O_3 含量较高。

(3) 试验表明 NaOH 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 Na_2CO_3 、 CaCl_2 、 MgCl_2 等均可提高固化土碱度。纺织印染厂漂洗过程中排斥的废碱液(含有 NaOH)、生产乙炔等产生的电石渣以及劣等石灰等。

3 配比实例

本试验采用电石渣提供必要的碱度,其用量应满足土样的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和吸收量,可以根据拟加固土样的 pH 值、离子交换容量、活性硅铝含量计算得出或根据试验得出;膨胀性组分由磷石膏与固化剂中其他组分和土中提供的含铝成分构成,其膨胀性水化产物是钙矾石,石膏的用量根据土样的孔隙率计算得到或试验得到^[13];胶结性组分由煤矸石和电石渣构成,煤矸石中的活性 SiO_2

和 Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙, 试验得出煤矸石与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量比例 100 : 96。试验过程中使用的土样性质指标见表 1 中的 WT。

试验采用北京强力水泥厂出产的奥达牌 32.5 普通硅酸盐水泥(PC); 徐州地区的煤矸石(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)。工业废渣的化学组成见表 3。

表 3 工业废渣的化学组成(%)

名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	MnO
CCG	57.95	19.02	5.32	3.16	0.82	0.9	0.328
CS	4.61	3.14	0.32	66.14	0.38	—	—
PG	3.62	0.08	0.05	31.57	0.17	42.48	—

固化剂组成配比见表 4(表中数字为土样湿重量的百分比)。各固化剂制备的固化土的 28 d 无侧限抗压强度见图 5。

表 4 固化剂配比(%)

固化土样	1	2	3	4	5	6
PC	25	19	14	6	5	0
CCG+CS	0	0	0	8	9	14
CS	0	6	6	6	6	6
PG	0	0	5	5	5	5

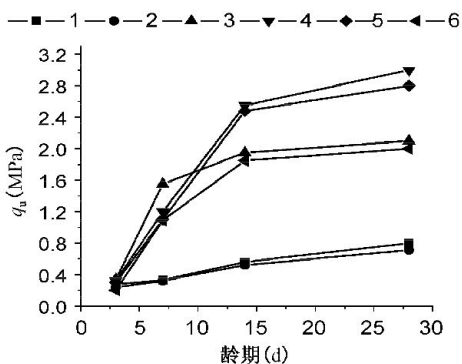


图 5 固化土强度

从图 5 可以看出, 利用煤矸石、电石渣和磷石膏等工业废渣配制软土固化剂, 可以大幅度地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 抗压强度仅为 0.8 MPa, 而采用适量煤矸石等工业废渣替代水泥的 4# 试样, 强度达到了 3.0 MPa, 是 1# 试样强度的 3.75 倍; 同时工业废渣利用率高达 76%。完全采用工业废渣作固化剂的 6# 试样, 28 d 的抗压强度也达到了 2 MPa, 是

1# 试样强度的 2.5 倍。需要提及的是: 本试验各试样的固化剂总量相同, 而工业废渣中的真正能够参与固化反应的有效成分含量大大降低, 例如电石渣中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量仅为 66%。这表明: 上述所谓完全用工业废渣制备的固化剂的固化土强度为用水泥固化的 2.5 倍的技术效果是在工业废渣固化剂有效掺量低于水泥掺量的前提下取得的。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经济效益和社会效益。

对比 1# 试样与 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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 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 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充效率低、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。因此, 用磷石膏代替水泥不仅可以降低水泥的用量, 而且其水化后生成膨胀性水化物钙矾石, 可以大幅提高固化土的强度, 这是水泥类固化剂无法做到的。

如前所述, 钙矾石膨胀作用可以填充孔隙, 从而提高固化土强度, 但同时也会破坏 CSH 胶结已经形成的固化土结构, 从而降低固化土强度。钙矾石生成时, CSH 的生成量越少, 则钙矾石膨胀的破坏作用就越小。对比 3#、4# 试样的强度可见: 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了 43%。因此, 用工业废渣煤矸石代替水泥, 可以充分协调胶结与膨胀的矛盾问题, 从而使固化土的强度达到最大。

综上所述, 充分发挥工业废渣在配制软土固化剂方面所具有的技术优势, 可大幅提高固化土的抗压强度; 同时节省资源, 变废为宝, 使工业废渣得以再利用, 达到了环保的目的, 这也是发展循环经济、建设节约型社会和环境友好型社会的一

项有利措施。

4 结 论

(1) 要获得最密实的固化土结构, 固化剂中应该包括用于包裹胶结土颗粒的胶凝性水化物、用于填充土团粒间孔隙的胶凝性水化物或膨胀性水化物和用于填充挤压土团粒内部孔隙的膨胀性水化物, 同时需要一定的碱度保证 CSH 反应的正常进行。

(2) 可以将工业废渣分为三类: 产生胶凝性水化物的工业废渣、产生膨胀性水化物的工业废渣、提高碱度的工业废渣。工业废渣在制备软土固化剂时有其独特的技术优势, 如可提高碱度、提供膨胀性水化物、可以调节胶凝性水化物与膨胀性水化物生成过程的协调性。

(3) 本研究表明: 用电石渣、煤矸石、石膏等工业废渣替代 76% 的水泥制备的固化剂, 固化土强度比水泥固化土强度提高了 2.75 倍; 完全用工业废渣制备的固化剂, 固化土强度比水泥固化土强度提高了 1.5 倍。

参 考 文 献

- [1] Chun B S, Kim J C. A study on the soil improvement properties of industrial wastes hardening agent[C]. Coastal Geotechnical Engineering in Practice. Balkema, Rotterdam: Nakase & Isuchida Publishing House, 2000:577~582.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] Nurhayat D, Arzu O, Ayse T. Application of phosphogypsum in soil stabilization[J]. Building and Environment, 2006.
- [5] Zalihe N. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials, 2004(18): 377~381.
- [6] Mousa F A, Munjed M A. Soil stabilization with burned olive waste[J]. Applied Clay Science, 1998 (13): 219~230.
- [7] Koliass 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.
- [8] Kamon M, Nontananandh S. Combining industrial wastes with lime for soil stabilization[J]. J. Geot. Engg, 1990, 1(1): 1~17.
- [9] Yokota K, Yatabe N, Bhandary N P. Improvement of strength characteristics of soil by FLG[J]. Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Nakase & Tsuchida(eds), 2000, 18(7): 777~780.
- [10] Hayashi Y, Suzuki A. Influence of the void ratio in soils treated with gypsum and cement[C]. International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice Vol. 1. Yokohama: Balkema and Rotterdam Press, 2000: 453~457.
- [11] 黄新, 宁建国, 郭晔, 等. 水泥含量对固化土结构形成的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 436~441.
- [12] 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.
- [13] Huang Xin, Ning Jianguo, Li Zhanguo, et al. Principle & method of optimization design for soft soil stabilizer[C]. 2th International Conference Problematic Soil. Selangor: CI-Premier Conference Organization, 2006: 179~186.