

湿塑性水泥土的研究

沈卫国 周明凯 赵青林 武汉理工大学材料学院(430070)
刘志民 广西青狮潭水库灌区管理处桂林支源水管所(541002)

摘 要 湿塑性水泥土是水泥—水—粘土系统的一种活性反应产物 ,其强度的形成依赖于水泥水化物 粘土之间的结构连接而形成。外加剂能改善这种结构的连接 ,从而改善水泥土的强度。

关键词 水泥—水—粘土系统 外加剂 矿物掺合料 机理

水泥用于稳定土是 1915 年美国 Florida 州一位大胆的公路承包人无意中的发明 ,从此水泥土的应用得到迅猛发展。50 ~ 60 年代 Herzog 和 Mitchell 对水泥土的水硬化机理^[1]进行了大量研究。Mitchell 教授还对水泥土进行了分类工作 ,将水泥稳定土分为“干硬性水泥土和湿塑性水泥土”^[2],这种分类主要以水泥土的含水状态和稠度状态为依据所作的分类。湿塑性水泥土主要用于软土地基的加固。深层搅拌法加固软土地基 ,在我国已有 20 余年的历史。1977 年 10 月 ~ 1978 年交通部水泥规化院研制成功国内第一台 SJB - I 型双搅拌轴、中心管输浆、陆上型的深层搅拌机之后 ,湿塑性水泥土作为这种地基的主要承重材料得到了广泛的关注和研究。冶金部建筑研究总院^[3]作了大量工作。1985 年铁四院开发的粉喷技术通过了铁道部鉴定 ,该院对水泥加固土及软土地基的粉体加固材料进行大量的研究^[4]。本文从水泥土中水泥水化的介质环境及水泥土强度形成等方面出发 ,研究提高湿塑性水泥土强度的几种途径。

1 水泥在水泥—水—粘土系统中的水化特点

土是由原生岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积等过程后的产物 ,是不同颗粒的集合体 ,土中的不同粒组具有不同的特征 ,土料的矿物组成和颗粒组成也有一定的关系。表 1 是不同粒组土料的特征^[5]。

表 1 土料中不同粒组的特征

粒径 (mm)	粒 组	特 征					矿物组成	和稳定剂 的反应活性
		连 接	透 水	塑 性	压 缩 系数	干 缩 膨胀		
>2	砂石组	无	极强	无	极小	无	原生矿物	无
2~0.075	砂粒组	无或毛细水连接	强	无	很小	无	原生矿物	无
0.075~0.005	粉粒组	毛细水连接	弱	无	大	小	原生+次生矿物	弱
<0.005	粘粒组	粒间和层间水连接	极弱	有	很大	大	次生矿物	强

水泥土中对水化介质环境影响最大的是 < 0.005 mm 的粘粒组 ,因此 ,我们可以把湿塑性水泥土看成是一种水泥—水—粘土系统。粘土矿物组成粒径小 ,其厚度尺寸在胶粒尺寸的范围 ,其中较细的粘土矿物在胶体尺寸的范围 ,属胶体和准胶体。粘土颗粒表现出巨大的比表面能 ,其表面形成扩散水化—离子层^[5]。在水泥—水—粘土系统中 ,水泥的水化的介质环境受到在土料粘粒的影响变得非常复杂。粘土

万方数据

矿物对 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子有一定的吸收、吸附作用 ,使水泥水化时 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子浓度低或不足^[1]。水泥形成低钙硅比的 C-S-H 的胶凝性不足。黄新对水泥土液相的研究^[6]也证明了这一点。因为 Ca²⁺ 和粘土发生一种离子交换反应 ,使天然的 ζ- 电位较高的钠粘土和钾粘土变为 ζ- 电位较低的钙粘土 ,使粘土间的连接力增强 ,这是粘土矿物对 Ca²⁺ 的一种吸附作用。同时粘土矿物表面能大 ,其中的部分 SiO₂ 和 Al₂O₃ 有较强的反应活性 ,会吸收一定量的 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子而形成水化硅酸钙和水化铝酸钙 ,这种水化产物相对于水泥的水化产物而言 ,称为“二次水化物”。二次产物的形成消耗了 Ca(OH)₂ ,使液相中的 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子浓度进一步降低。因此 ,可以认为粘土—水系统是一种具有相当反应活性的系统 ,使水泥水化的介质环境中 Ca²⁺ 和 OH⁻ 离子相对不足。

另一方面 ,湿塑性水泥土有一定的塑性和稠度 ,因此含水量相对较高。由于含水量高 ,其孔隙率相对较高 ,粘土比重在 2.7g/cm³ 左右 ,水泥比重在 3.1g/cm³ 左右 ,当含水量在 35% 左右时 ,水泥土的孔隙率就达到 100%。水泥土是一种多孔体系 ,水泥土的强度不是由粘土和水泥水化物的强度所决定 ,而是由水泥土中水泥石强度骨架及土料之间的结构连接决定的。强化水泥石强度骨架和改善粘土的结构连接有同等重要的作用。

在水泥中加入外加剂 ,可起到调整水泥—水—粘土系统液相组成 ,增加水泥石骨架的强度。有些外加剂能改变水泥水化物组成 ,有吸水膨胀的作用 ,能减少系统内的孔隙率 ,改善水泥土的结构连接的作用。加入活性矿物掺合料能改善二次水化产物的胶凝性 ,也有利于水泥石强度的提高。

2 用于水泥土的外加剂

2.1 水泥土外加剂与水泥土强度

湿塑性水泥土中加入不同类型的外加剂 ,是目前提高水泥土性能的主要方法。在水泥土中加入外加剂 ,可起到调整水泥土液相环境 ,改善水泥土稠度状态的作用 ,对水泥土强度和和易性有一定的影响。图 1 是几种常用外加剂对水泥土强度的影响。

普硅水泥土和矿渣水泥固化土的强度基本相同。 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 对普硅水泥土和矿渣水泥土的强度有明显提高,碱对矿渣和普硅水泥土的强度都有一定的提高作用。三乙醇胺对这两种水泥土的强度提高作用较小,这两种水泥土中加入减水剂SF和FDN的强度有所降低。由于高铝水泥的主要矿物为CA,因此水化硬化较快,其水泥土7d强度达到0.487MPa,高出普硅和矿渣水泥固化土的一倍以上。高铝水泥土中加入 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和三乙醇胺对强度略有增加,碱对强度稍有降低,加入减水剂SF和FDN后强度降低明显,而加入 CaCl_2 后强度大幅降低。 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的加入能使3种水泥土中产生AFI相,AFI相的生成伴随着一定的体积膨胀,有利于固化土体的致密化以及土颗粒之间结构连接的改善。因此,强度有所提高,三乙醇胺不同程度地加快了水泥的水化,对水泥土的强度有一定的提高作用。 CaCl_2 加入到矿渣水泥土和普硅水泥土中可形成“三盐”型氯铝酸钙,也有膨胀挤密的作用。碱的加入改善了普硅水泥土和矿渣水泥土的液相环境,使PH值增加,加快了水泥的水化。减水剂SF和FDN加入到水泥土中,会被土料中的比表面能大的粘粒($\leq 0.002\text{ mm}$)所吸附,使土料分散,而不易形成结构连接,因而降低了强度。 CaCl_2 的加入对高铝水泥的水化有害^[7],碱会使高硅水泥过快凝结,都使高铝水泥土的强度降低。

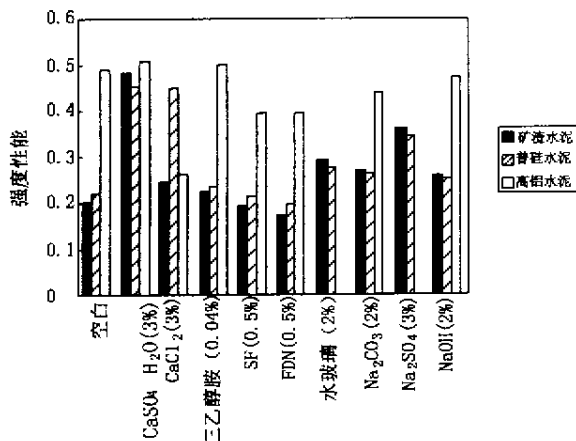


图1 外加剂对水泥土强度性能的影响

2.2 水泥土外加剂的合理掺量

2.2.1 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合理掺量

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 能调节水泥土的液相环境,提高液相中 Ca^{2+} 离子的浓度,而且可以和水泥中的铝酸盐及和土料中的活性 Al_2O_3 及水泥土中CaO反应生成吸水膨胀性的AFI相。一方面增加了水泥土系统中的固相含量;另一方面,AFI在水泥土中的形成是在一种低碱度液相的环境中的析晶,其晶体呈长针棒状^{[8][9]}。因为这种长针棒状的晶体在土粒和水化产物之间的穿插,改善了水泥土内部结构单元间的结构连接力。本文对 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 在湿塑性水泥土中的合理掺量进行了研究。图2是将含水量为45%的一种含砂低液限粘土中加入20%含不同掺量 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的水泥后的7d强度。

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 对每种水泥土的强度都有一定的提高作用,但随 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 掺量的提高,水泥土的强度会出现一个最大值。在本试验中,矿渣水泥土和普硅水泥土中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合理掺量在7.5%左右,而高铝水泥土中的合理掺量在15%。

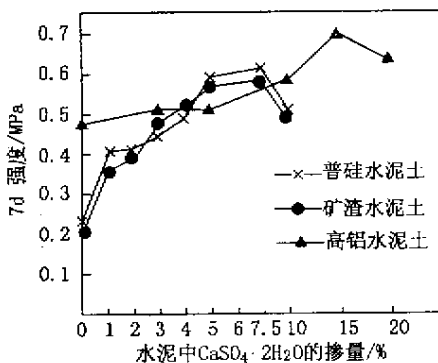


图2 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 掺量与水泥土强度的关系

本文用不同含水量的中液限粘土,加入12%含不同掺量 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的矿渣水泥后,7d强度见图3。

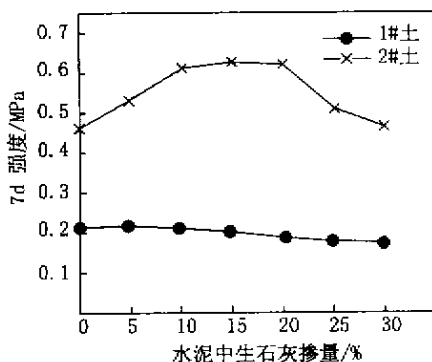


图3 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 合理掺量与土料含水量的关系

随着含水量的提高, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 合理掺量随之提高。笔者还有试验表明: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合理掺量与掺加方式有关。 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 与水泥以粉体的方式加入土料中时, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 合理掺量比以浆体的方式加入时要低。

2.2.2 生石灰的合理掺量

取45%含水量的含砂低液限粘土和20%掺有不同掺量的生石灰的矿渣水泥,60%含水量的中液限粘土加入12%含不同掺量的生石灰的矿渣水泥制备的水泥土,其7d强度与生石灰掺量的关系见图4。

加入生石灰后1号水泥土的强度提高较小,2号水泥土的强度提高明显,1号土中生石灰的最佳掺量在5%左右,而2号水泥土在15%左右。对比1号、2号水泥土不难发现:2号土料中粘粒($< 0.002\text{ mm}$ 粒组)的含量较高为40.5,而1号水泥土中粘粒只有15.5。 CaO 加入到水泥土中能调整水泥土中水泥水化的介质环境,增加介质PH值,有利于水泥水化;另一方面,能促使粘土 ζ -电位降低^[9],使粘粒团粒化,增加土料之间的结构连接,但 CaO 的进一步取代了水

泥,使水泥土中水泥水化胶凝产物减少,不利于早期强度的增加,使强度明显下降。当粘粒含量高时,要求有较多的生石灰,而粘粒少时,所需的生石灰较少。

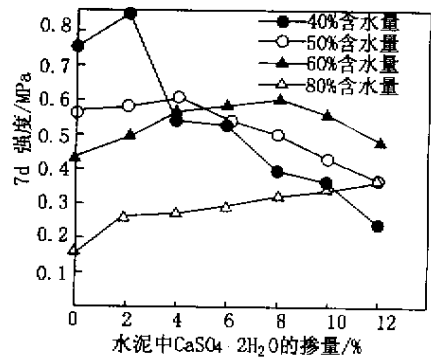


图 4 水泥 7 d 强度与生石灰掺量的关系

3 矿物掺合料的作用

矿物掺合料如矿渣、沸石、粉煤灰的加入都对水泥土的强度有一定程度的改善。在含水率为 80% 的 2 号土中加入掺有不同掺合料的水泥,试验结果见表 2。

表 2 矿物掺合料对水泥土强度的影响

试验号	固化剂组成 水泥:掺合料:石膏	掺合料种类	固化剂掺量 (%)	7 d 强度 (MPa)
1	100	无	12	0.177
2	90:10	无	12	0.331
3	70:20:10	矿渣	12	0.371
4	70:20:10	沸石	12	0.352
5	70:20:10	湿排粉煤灰	12	0.318
6	70:20:10	增钙粉煤灰	12	0.321
7	90:10:10	湿排粉煤灰	13.2	0.340

尽管水泥被掺合料取代了 20%,但水泥土强度并未因此而明显降低。矿渣、沸石取代后反而提高了水泥土强度,粉煤灰取代水泥后强度略有降低。笔者认为,这是由于活性掺合料和土料中的活性成份都能和水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成胶凝性的水化产物,但 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和活性掺合料反应产生的胶凝产物,更能发挥其胶结作用。因为土料中的活性矿物比表面积大,其表面有一层有双电层的水膜,阻碍土料的相互连接,当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和其反应后,水化物之间也不能有效搭接,不利于水泥土强度的形成,而活性矿物掺合料的比表面积相对较小,水膜的排斥作用小,其水化物之间的搭接较好,对强度的形成更有利。因此,在水泥土中掺入一定量的活性矿物掺合料,是有利于强度形成的。

4 结论

(1) 湿塑性水泥土是水泥—水—粘土的一种活性反应系统,水泥在这种系统内水化时, Ca^{2+} 和 OH^- 离子相对不足。湿塑性水泥土系统中孔隙率大,其强度形成依赖于水泥水化物粘土之间的结构连接而形成。

(2) 外加剂能改善水泥土的水化介质环境和结构连接,因此能改善水泥土的强度和稠度状态。 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的合理掺量与水泥品种、土料含水状态、土料种类及掺加方式有关, 万方数据

生石灰的合理掺量和土料中的粘粒含量有关。

(3) 活性矿物掺合料有利于水泥土的强度形成。

参考文献

1 A. Herzog, J. K. Mitchell. Reaction accompanying the Stabilization of clay with cement. 42nd Annual Meeting of the Highway Research Board Washington D. C. 1963

2 [美] J. K. Mitchell, 刘锡华译. 水泥土的特性. 水利科技, 1981 2

3 冶金部建筑研究总院. 科学技术成果报告. 深层搅拌法加固粘土技术. 1981

4 白日升. 几种地基加固材料与应用. 铁路地基与路基. 1989 3: 1~13

5 李生林, 薄遵昭, 等编译. 土中结合水译文集. 北京: 地质出版社, 1982

6 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探. 岩土工程学报, 1994 16(1)

7 沈威, 黄文熙, 闵荣荣. 水泥工艺学. 武汉: 武汉大学出版社, 1991

8 薛君开, 陈雯法, 等. 论水泥的硫铝酸盐膨胀—论液相 CaO 低于饱和度时的硫铝酸盐膨胀特点. 硅酸盐学报, 1979 7(1)

9 周有凯, 沈卫国, 冯修吉. HS 软土固化剂性能的研究. 武汉工业大学学报, 1996 18(4)

(收稿日期 2000-8-10)