

微硅粉应用于砂性地层注浆工程的可行性分析

李慎刚, 赵 文, 杜嘉鸿

(东北大学, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要:在渗透注浆工程中, 尤其在中、细砂地层中, 提高浆液的可注性并保证一些特殊工程的耐久性非常重要。微硅粉作为注浆材料, 其颗粒极细, 可注性好, 无毒性, 浆液结石体强度高, 工程耐久性好。通过对一些工程的成功应用进行分析, 微硅粉可以作为一种很好的渗透注浆工程注浆材料, 尤其在高水位, 含中、细砂层地质条件下, 微硅粉注浆材料具有广阔的工程应用前景。

关键词:微硅粉; 渗透注浆; 砂性地层; 可注性

中图分类号: TU472; TU528.043 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)02-0021-03

Feasibility Analysis of the Silica Fume Applied to Grouting Engineering in Sandy Strata/LI Shen-gang, ZHAO Wen, DU Jia-hong (Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: It is very important to improve the groutability and the durability of grouting material applied to grouting engineering, especially in medium and fine sand formation. Silica fume is a grouting material with fine grain, good groutability, no-toxicity, high concretion strength and good durability. By the analysis on successive applications, silica fume is introduced in the use of grouting engineering, especially in medium and fine sand formation.

Key words: silica fume; permeation grouting; sandy formation; groutability

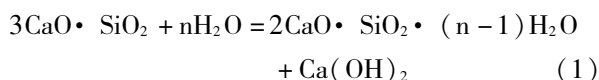
渗透注浆, 是在不足以破坏地层构造的压力 (即不产生水力劈裂) 下, 把浆液注入到粒状土的孔隙中, 从而取代、排出其中的空气和水。渗透注浆浆液一般均匀的扩散到砂、土层颗粒的间隙中, 胶结后, 以达到增强砂土体强度和防渗能力的目的^[1]。随着我国城市的发展, 深基坑工程及城市地下铁道工程逐年增多, 而且大部分城市的地下工程处于细砂、中砂、粗砂、砾砂等地质条件下, 围岩松散软弱, 自稳能力差, 在开挖时, 容易坍塌。所以, 一般在开挖前要进行注浆加固。目前, 砂性地层注浆多采用水泥-水玻璃浆液 (有水) 或者水泥浆 (无水), 但只有地层为粗砂以上的颗粒时, 水泥浆可以注入, 在地层为中砂以上颗粒时, 水泥浆和水泥-水玻璃浆液可以注入。颗粒小于中砂, 则水泥浆液甚至水泥-水玻璃浆液都很难注入。

微硅粉是冶炼厂在冶炼硅铁合金或半导体硅时, 从烟尘中收集到的粉尘, 其颗粒极细, 比表面积大, 在浆液中掺入微硅粉, 可以使浆液具有较好的可注性^[2]、渗透性和耐久性^[3~5], 并可以有效的提高注浆工程的抗渗性和强度值^[6]。所以, 微硅粉是一种很好的注浆材料。

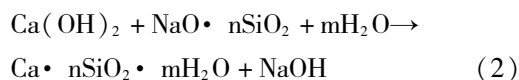
1 水泥-水玻璃注浆材料的优缺点

城市隧道工程中, 在砂性、富水地层条件下, 水泥-水玻璃浆液 (CS) 是使用得比较多的注浆材料。向水泥中加入水玻璃有 2 个作用: 一是作为速凝剂, 掺量较少; 二是作为主材料使用, 掺量较多, 可根据注浆的目的和要求而定。作为无机灌浆材料, 水泥具有结石体强度高、不污染环境的优点, 但是它的最大缺点就是胶凝时间短, 渗透性差; 加入水玻璃后使其胶凝时间可调, 提高可灌性, 但结果却使结石体的强度和耐久性大大降低。至今, 水泥-水玻璃浆液已经成功应用于东京、北京、广州、上海等城市地铁注浆加固工程中^[7]。

水泥的凝结和硬化主要是由于水泥水化析出凝胶性的胶体物质, 其化学反应方程式为:



当在水泥浆中加入水玻璃, 二者的主要化学反应为:



对于水泥-水玻璃浆液, 决定其浆液结石体抗压强度的主要因素是水泥浆的浓度, 即水灰比。在

收稿日期: 2008-09-13

作者简介: 李慎刚 (1978-), 男 (汉族), 辽宁葫芦岛人, 东北大学博士研究生, 工程力学专业, 从事注浆工程、地铁及地下工程方面的研究工作, 辽宁省沈阳市东北大学 138 号, lsglili@163.com。

其他条件一定时,水泥浆越浓,其抗压强度越高。一般情况下,浆液结石体抗压强度可达 5 ~ 10 MPa。粘度低,可灌性好,造价低,这是水玻璃浆材的优点,但是其凝结体强度低,固砂体耐久性还有待进一步考证^[8]。城市地铁所处环境复杂,地上建筑物林立,地下管线密集,因施工所诱发的不均匀沉降将给周边环境带来不可估计的安全隐患。目前,应用水泥-水玻璃注浆材料在短期内可以保证施工的安全进行,但是因其耐久性还不能确定,所以,从长远的角度来看,应用 CS 浆液的地铁注浆工程的耐久性还有待进一步验证。

2 微硅粉注浆材料的性质

2.1 化学成分

微硅粉颗粒极细(以唐山钢铁公司铁合金厂的产品为例)^[2],粒径范围一般在 0.2 ~ 2.0 μm ,平均粒径 0.6 μm ,比表面积大,活性大,主要成分为 SiO_2 ,密度为 2.2 g/cm^3 。其化学成分为: SiO_2 92.16%, Al_2O_3 0.44%, Fe_2O_3 0.27%, CaO 0.94%, MgO 1.37%。烧失量为 1.63%。颗粒级配如表 1 所示。

表 1 硅粉的颗粒级配表

粒径/ μm	含量/%	粒径/ μm	含量/%
0.2 ~ 0.4	18.1	1.2 ~ 1.4	5.7
0.4 ~ 0.6	29.9	1.4 ~ 1.6	3.5
0.5 ~ 0.8	13.7	1.6 ~ 1.8	5.7
0.8 ~ 1.0	9.0	1.8 ~ 2.0	5.7
1.0 ~ 1.2	6.7		

2.2 基本性能

冉德发等^[9]、张作楣等^[10]人参照试验标准,进行室内试验,测得试验结果如下:在水泥中掺入微硅粉进行室内试验所得其 1、3、28 天抗压强度值分别为 45.3、53.7、66.6 MPa;试验测得其 1、3、28 天抗折强度值分别为 5.1、8.2、8.3 MPa;进行抗渗性能试验测得其结果为渗透系数低于 0.129×10^{-8} ,抗渗级别 > S12;在水灰比为 0.3 的条件下进行测试,流动度 > 300 mm;该注浆材料初凝时间可在 20 ~ 105 min 之间调节,终凝时间在 5 h 内;该注浆材料无毒、无污染、无腐蚀性。

惠荣炎、黄国兴^[4]等选用唐山硅粉进行混凝土性能试验。试验结果表明,硅粉能明显改善新拌混凝土的流变性,不离析,几乎不泌水;能够提高混凝土抗压强度 33% ~ 58%;硅粉混凝土的抗拉强度和极限拉伸变形比不掺硅粉的混凝土提高 12% ~

14%;硅粉混凝土提高了抗渗性、抗冻性和抗化学腐蚀性。

微硅粉作为注浆材料,其缺点是浆液的粘度比较大,并随微硅粉的掺量增多而增大,但可以加入塑化剂,可有效降低微硅粉浆材的粘度。

3 应用硅粉注浆的工程实例

3.1 治理基础不均匀沉降的应用^[10]

三山岛金矿粉矿仓在投入使用 3 个月后,其矿仓柱基础出现不均匀沉降,并诱发墙体出现较大裂缝。经勘探证实,原勘探资料将人工堆石体误认为是中等风化花岗岩地基,设计承载力过高,不能满足上部结构对地基承载力的要求,因而基础发生不均匀沉降。为满足生产的需要,采用以水泥灌浆为主、局部地段加入化学灌浆和树根桩的综合治理方案,对堆石体地基进行加固,其中,在毛石垫层和堆石体中灌注高强度微硅粉水泥砂浆。浆液的配方为:浆液水灰比 0.5,硅粉掺量(占水泥质量)8.6%, UNF-5 掺量(占水泥质量)2%,浆液结石 28 天龄期的抗压强度约为 55 ~ 60 MPa。加固处理后进行效果检测,所有加固样品的抗压强度都远大于设计要求,约为设计承载力的 20 ~ 90 倍。

3.2 摆喷注浆提高基础承载力应用^[11]

大同矿务局扇风机房,有 2 台扇风机,每台风机质量为 20 t。机房地层为:毛石混凝土、粉土、粉质粘土、粉砂,基岩为粉砂岩,表土层约 8 ~ 10 m,由于风井排水渗入扇风机房基础中,导致粘性土基础含水量达饱和状态,地基承载力降低,基础发生沉降,累积达 19 mm。为确保不再继续下沉,要求对其进行基础加固。经过研究比较,决定采用微硅粉水泥浆高压摆喷注浆加固技术处理。微硅粉水泥浆液材料配比(质量比)为:水:水泥:膨胀剂:微硅粉:减水剂:水玻璃 = 100: 100: 10: 5: 0.2: 2。

注浆结束后检测发现基础沉降得到控制,满足了设计要求。

4 微硅粉注浆材料应用于沈阳砂性地层注浆工程的可行性

4.1 沈阳城市地质条件

沈阳地铁工程沿线地层表层为第四系全新统人工堆积层和沉积层,一般为粘性土、粉土、中砂、粗砂、砾砂和圆砾土;下覆第三系砂砾岩,局部地段部分地层缺失。工程地质分布见表 2。

地下水水位随季节影响而有所变化,变化幅度

表 2 沈阳地铁一号线工程地质概况

地质构造	土质	层厚/m	简要描述
第四系全新统 人工堆积层	杂填土	0.6~3.2	主要为建筑垃圾、粘性土、碎石等,分布连续
	粉质粘土	0~3.4	有粉土夹层,局部夹薄层中粗砂
第四系全新统 浑河高漫滩冲 积层及浑河新 扇冲洪积层	淤泥质粘土	0~1.0	呈透镜体状分布,局部分布
	细砂	0~2.0	含少量粘性土,分布不连续
	中、粗砂	2.5~7.2	局部夹薄层圆砾粉质粘土,分布连续
	砾砂	2.5~7.2	局部夹薄层细砂及圆砾
第四系上更新 统浑河老扇冲 洪积层	圆砾	1.8~21.9	局部夹薄层砾砂和粗砂
	粉质粘土	0.8~16.5	局部夹薄层砂性土
	细砂	0~1.9	分布不连续
	中、粗砂	0~10.7	分布较连续,局部夹薄层圆砾
第三系	砾砂	18.4	局部夹中粗砂及圆砾
	砂砾岩		岩心呈土夹砂砾及碎块状

在 1.0~2.0 m,稳定水位埋深 4.3~12.0 m 之间,大部分埋深 8.0 m 左右,主要含水层为中粗砂、砾砂、圆砾层。渗透系数在 34.0~81.4 m/d 之间。沈阳地铁工程埋深在 -8~-14 m 之间,中、粗、细砂为主。

4.2 应用微硅粉浆材注浆的可行性

4.2.1 可注性分析

岩土介质的可注性是指岩土介质能否让某种浆液渗入其空隙或者裂隙的可能性。可注性既取决于岩土介质的渗透性,又与浆液的粒度、流变性以及渗径结构有关。对于砂土等粒状介质,可注性用可注比 N 来表示,经常采用的公式为:

$$N_1 = D_{15}/G_{85} \tag{3}$$

$$N_2 = D_{10}/G_{95} \tag{4}$$

式中: D_{15} 、 D_{10} ——地层土颗粒在粒度分析曲线上占 15%、10% 的对应直径; G_{85} 、 G_{95} ——注浆材料在粒度分级曲线上占 85%、95% 的对应直径。

当 $N_1 > 15$ 、 $N_2 > 8$ 时,浆液的可注性较好。

按照 Suat Akbulut、Ahmet Saglamer 等人的可注比 N_3 计算公式^[12]:

$$N_3 = \frac{D_{10}}{G_{90}} + k_1 \frac{W/C}{F_c} + k_2 \frac{P}{D_r} > 28 \tag{5}$$

式中: D_{10} ——地层中土颗粒在粒度分级曲线上占 10% 所对应的直径; G_{90} ——注浆材料在粒度分级曲线上占 90% 所对应的直径; W/C ——水灰比; F_c ——直径小于 0.6 mm 的颗粒的含量; P ——注浆压力; D_r ——砂土的相对密度; k_1 、 k_2 ——常数。

当 $N_3 > 28$ 时,浆液的可注性比较好,注浆可以进行。

以受注介质为细砂计算, N_1 、 N_2 、 N_3 分别远远大于 15、8 和 28。

4.2.2 经济性分析

对于注浆工程所需要的微硅粉要求比较低,价格比较便宜。经过市场价格对比,目前,32.5 水泥的价格是微硅粉价格的 1.26 倍,而 42.5 水泥的价格是微硅粉价格的 1.46 倍。相对于注浆工程来说,尤其如沈阳地铁的注浆工程,水泥的消耗量是巨大的,应用微硅粉注浆材料,具有巨大的经济意义。

5 结论

微硅粉颗粒极细,可注性好,无毒性,浆液结石体强度高,工程耐久性好。微硅粉注浆材料在一些工程实际的应用表明,注浆效果良好。经过可注性分析,微硅粉对于砂性地层具有良好的可注性,而且,与水泥相比,注浆用微硅粉成本较低。

在砂性地层注浆工程中,微硅粉具有比较好的应用前景和经济意义。

参考文献:

[1] 协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京:科学出版社, 2001:53-54.

[2] 杜嘉鸿,陈兰云,王云,等. 微硅粉(纳米硅)水泥注浆技术在地质灾害防治中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005, (1):35-38.

[3] 程晓,张发祥. 土建注浆施工与效果检测[M]. 上海:同济大学出版社,1998:117-119.

[4] 惠荣炎,黄国兴. 硅粉混凝土性能的试验研究[J]. 水利水电技术,1998,(7):42-47.

[5] Ekrem Kalkan, Suat Akbulut. The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners[J]. Engineering Geology, 2004, (73): 145-156.

[6] S. Akbulut, A. Saglamer. Modification of hydraulic conductivity in granular soils using waste materials[J]. Waste Management, 2004,(24):491-499.

[7] 郑秀华. 水泥-水玻璃浆材在灌浆工程中的应用[J]. 水文地质工程地质,2000,(2):59-61.

[8] 孙永明,华萍. 水玻璃化学灌浆材料的发展现状与展望[J]. 吉林水利,2005,(9):13-22.

[9] 冉德发,郑继天,李炳平,等. 地质灾害防治用高强无公害灌浆新材料的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,(1):41-42.

[10] 张作楣,等. 微硅粉水泥浆材在基础托换工程中的应用[A]. 岩土加固实用技术[C]. 北京:地震出版社,1994. 208-211.

[11] 杜嘉鸿,张学文. 单向摆喷注浆加固地基技术[J]. 探矿工程, 1994,(1):5-9.

[12] Suat Akbulut, Ahmet Saglamer. Estimating the groutability of granular soils: a new approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2002,(17):371-380.