



高分子固化剂对水泥土强度的影响研究

朱祎坤¹, 俞峰¹, 陈鑫¹, 江正兵²

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江吉通地空建筑科技有限公司, 杭州 310009)

摘要: 为研究高分子固化剂对水泥土强度的影响, 对不同高分子固化剂掺量和土质条件下的水泥土进行室内无侧限抗压强度试验, 从宏观上分析高分子固化剂对水泥土强度的影响规律; 结合 X 射线衍射测试和扫描电镜测试, 从微观结构上揭示高分子固化剂作用机理, 分析高分子固化剂掺量和土质对水泥土强度的影响。宏观分析结果表明: 在粉质黏土中, 高分子水泥土的抗压强度高于普通水泥土, 在粉土中两者强度相近, 且两种土质中高分子固化剂掺量变化对水泥土强度影响较小; 高分子水泥土在粉质黏土中的韧性表现优于普通水泥土; 高分子水泥土在粉质黏土中的破坏应变大于普通水泥土; 高分子水泥土在两种土质中的强度不随高分子固化剂掺量的增加而增加。微观测试结果表明: 高分子水泥土在粉土中生成较多低硬度矿物成分; 高分子水泥土内存在的高分子固化膜, 对土颗粒进行包裹、填充与连接, 增强了土颗粒之间的黏结。该结果可为地基处理材料相关研究提供一定的参考。

关键词: 高分子固化剂; 水泥土; 无侧限抗压强度; X 射线衍射; 扫描电镜

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2023) 01-0131-09

引文格式: 朱祎坤, 俞峰, 陈鑫, 等. 高分子固化剂对水泥土强度的影响研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2023, 49(1): 131-139.

Reference Format: ZHU Yikun, YU Feng, CHEN Xin, et al. Studies on the effect of the polymeric consolidator on the strength of cement soils[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(1): 131-139.

Studies on the effect of the polymeric consolidator on the strength of cement soils

ZHU Yikun¹, YU Feng¹, CHEN Xin¹, JIANG Zhengbing²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Jitong Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310009, China)

Abstract: In order to study the effect of the polymeric consolidator on the strength of cement soils, we carried out unconfined compressive strength tests of cement soils with different polymeric consolidator contents and soil properties in the laboratory, and explored the influence law of the polymer consolidator on the strength of cement soils macroscopically. Combined with X-ray diffraction test and scanning electron microscope test, the mechanism of the polymeric consolidator's effect on the strength of cement soils was revealed from microstructure. The tests show that the compressive strength of polymer cement soils is higher than that of ordinary cement soils in silty clay while similar with that of ordinary cement soils in silty soils, and the dosages of the polymeric consolidator in the two kinds of soils have insignificant effects on the strength of cement soils. The toughness of polymer cement soils is superior to that of ordinary cement soils while the failure strain of polymer cement soil is higher than that of ordinary cement soils in silty clay. The strength of polymer cement soil does not increase with the increase of the polymeric consolidator. The microscopic test results show that the polymer cement soils produce a large amount of low-hardness mineral components in the silty soils; the polymer cured film in the polymer cement soils

收稿日期: 2022-05-07 网络出版日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178365)

作者简介: 朱祎坤(1995—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要从事基坑工程方面的研究。

通信作者: 俞峰, E-mail: pokfulam@zstu.edu.cn

forms a stable structure through wrapping, filling and connecting soil particles, enhancing the bond strength between soil particles. The results can provide some reference for the research related to foundation treatment materials.

Key words: polymeric consolidator; cement soils; unconfined compression strength; X-ray diffraction test; scanning electron microscope

0 引言

水泥固化软土(简称“水泥土”)通过水泥的物理化学作用胶结土颗粒,广泛用于工程建设^[1]。但因水泥土在使用过程中存在强度较低、抗渗性较差、污染环境等缺点,限制了其在工程上的应用。因此,以水泥基为主要胶凝材料的高效环保型固化材料受到众多研究者的关注^[2]。林彤等^[3]通过在粉煤灰中掺入水泥或生石灰进行对比研究,发现粉煤灰与生石灰复合固化土早期强度提升较为明显。方祥位等^[4]对石灰固化土和自研材料固化土进行室内土工试验,发现自研材料固化土的工程特性优于石灰固化土。陈峰等^[5]发现,在水泥土中掺入粉煤灰能一定程度上改善固化土性能。陈鑫等^[6]通过新型 GS 土体固化材料(脱硫石膏土体固化剂)和水泥的对比研究,发现新型 GS 固化土体的长期强度较高,具有工程应用前景。但是,无机胶凝材料因颗粒细小容易产生粉尘等有害物质,易对环境产生污染。

高分子土壤固化剂作为化学合成的工业产品,在土壤中会产生一系列化学聚合反应,生成有机大分子链胶结分散的土壤颗粒;有机分子链附着在土颗粒表面,形成固化隔离膜,降低土壤吸附水对颗粒间孔隙的渗透作用;高分子固化剂具有运输简单、无粉尘危害等优势,得到了国内外研究人员的关注^[7]。黄河等^[8]基于自主研发的高分子土壤稳定剂在不同试验条件下进行固化土强度变化的试验研究,结果表明固化土的无侧限抗压强度得到明显增强。Kolay 等^[9]采用丙烯酸聚合物固化污泥土与普通土壤,发现在不同环境下随着聚合物的掺入得到的抗压强度不同,露天环境下 2 种土壤抗压强度都较高。Rezaeimalek 等^[10]研究了活性聚合物(MDI)对砂土的稳定效果,发现聚合物水比固定时固化土的强度随着聚合物含量的增加呈近似线性增加。谌文武等^[11]采用改性聚乙烯固化麻刀加筋遗址土,发现改性聚乙烯溶液可加强土颗粒之间、土颗粒与麻刀之间的黏结强度。陈志昊等^[12]利用高分子固化剂和聚丙烯纤维对砂土进行复合加固,结果表明高分子固化剂和聚丙烯纤维的复合加固能够显著提高砂土

的抗拉强度。徐菲等^[13]通过无侧限抗压强度试验,发现脂肪族离子固化剂掺入水泥土后,能够降低黏土矿物结合水的能力,加速土体内水化反应产物的生成,并优化土体孔隙结构。王颖等^[14]研究了砂土渗透性在不同高分子固化剂浓度下的变化规律,发现砂土渗透性与高分子固化剂浓度有关,随着高分子固化剂浓度提高,砂土渗透系数快速降低。综上所述,合理使用高分子固化剂能有效提高软土的固化效果,但当前对高分子固化剂的应用性研究以污泥土和砂土为主,且对土颗粒大小和含水率有较高的要求;同时,在试验过程中需要添加多种无机胶凝材料和纤维材料进行辅助处理,不能满足简化施工工艺的要求,降低了经济效益。因此,需要一种既满足经济效益,又能简化施工流程,且固化效果更为可靠的地基处理材料。

本文以杭州地区 2 种地基软土为处理对象,先使用普通硅酸盐水泥作为初步固化处理方式,再通过添加不同掺量的高分子固化剂对这 2 种水泥土进一步固化,以室内无侧限抗压强度试验作为水泥土的宏观强度技术指标,分析高分子固化剂掺量对水泥土强度的影响,并探究 2 种土质条件下高分子水泥土强度的变化规律;结合 X 射线衍射(XRD)测试和扫描电镜(SEM)测试,探究高分子水泥土的固化微观现象和固化机理,为进一步研究地基处理材料提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文试验采用的土样分别为杭州市钱塘区某地的粉质黏土与实验室留存的粉土,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行土质颗粒级配测定,通过计算分析得到试验土质的颗粒级配曲线如图 1 所示。同时,两种土质经自然风干后过 2 mm 筛备用,其基本物理指标如表 1 所示。

表 1 试验用土基本物理指标

土质	最佳含水率/%	液限/%	塑限/%	重度/(kN·m ⁻³)	不均匀系数 C _u	曲率系数 C _c
粉土	18.1	28.41	16.69	15.8	1.92	0.96
粉质黏土	18.5	30.11	14.37	17.2	1.74	0.87

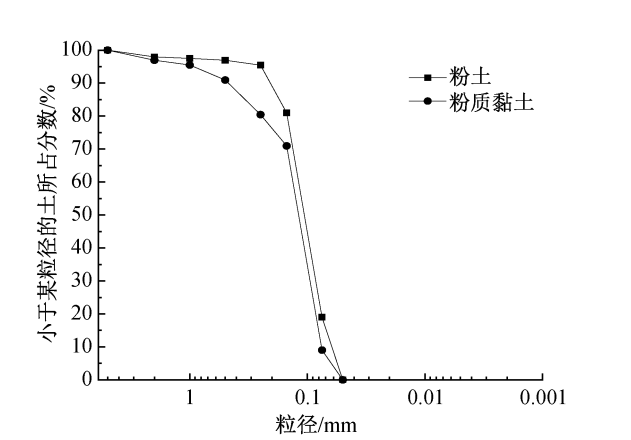


图 1 土质颗粒级配曲线

试验采用的高分子固化剂来源于国内某公司研

发的环保型固化剂,属于离子交换与高分子复合型材料,主要成分为醋酸乙烯酯-乙烯的共聚物、磷酸二氢铝、铝酸钠等,为棕褐色油状液体,pH 值呈中性,不含水分且不易挥发,密度为 0.925 g/cm³;试验选取普通硅酸盐水泥作为基准固化材料,其技术性能指标如表 2 所示。

1.2 试验方法

为研究水泥土在掺入不同掺量的高分子固化剂时对试样抗压强度的影响,根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)选取水泥和高分子固化剂,水泥掺量均为 15%,高分子固化剂溶液质量占水泥质量分别为 0、5%、10%、20%和 30%,养护龄期 *T* 为 7、14 d 和 28 d。

表 2 水泥技术性能指标							
水泥型号	密度/(g·cm ⁻³)	细度/%	安定性/mm	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	7 d	28 d
P·O 42.5	3.12	6.85	4.2	215	265	20.3	45.6

试样制备过程如下:a)根据试验要求称取试样所需粉质黏土和粉土,以及相应的水泥和高分子固化剂,按照水胶质量比 1.2 量取拌合水;b)将称取好的土样、固化剂和拌合水倒入水泥搅拌机内搅拌至均匀,装入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 标准立方体试模,经振动台振实成型,养护 24 h 后拆模;c)将试块置于室内自然养护至设计龄期,进行无侧限抗压强度试验。无侧限抗压强度试验装置采用 WAW-300B 万能试验机,依据 JGJ/T 233—2011 的无侧限抗压强度试验规范,设置加载速度为 0.08 kN/s。试验共设置 12 组,为减少试验误差,每组试样每个龄期至少制备 3 个平行试样,并取平均值进行分析。保存每组试样 28 d 龄期微观测试样品。X 射线衍射测试采用 X 射线粉末衍射仪,扫描速度 3(°)/min,扫描范围 10°至 85°。电镜扫描测试采用扫描电子显微镜,形貌扫描最小标尺 2 μm。试样分组如表 3 所示。

2 结果与分析

2.1 应力-应变曲线

按本文试验方法,开展不同高分子固化剂掺量和土质条件下的水泥土抗压强度试验研究,得到 28 d 龄期粉质黏土和粉土的应力-应变曲线如图 2(a)和图 2(b)所示,其中:*q_u* 表示无侧限抗压强度值;*ε* 表示应变。固化土试块抗压力学性能理论上表现为:应力随着应变的增加缓慢增长,第 1 阶段为加载初始阶段(也称“线性阶段”),此时应力-应变曲线可近似为直

线;第 2 阶段曲线进入屈服阶段,即应变缓慢增长应力逐渐增大并达到曲线最高点;第 3 阶段为应力-应变曲线的破坏阶段,材料完全失去工作性能^[15-16]。

表 3 试样分组						
土质	序号	试样名称	高分子固化剂质量占比/%	水泥掺量/%	水胶比	龄期 <i>T</i> /d
粉质黏土	1	C1	0	15	1.2	7、14、28
	3	C2	5			
	4	C3	10			
	5	C4	20			
	6	C5	30			
	7	S1	0			
粉土	9	S2	5	15	1.2	7、14、28
	10	S3	10			
	11	S4	20			
	12	S5	30			

从图 2 可以看出:高分子水泥土在加载初始阶段立即出现应变迅速增长、应力同步快速增加的现象,可视为线弹性变化;强度屈服阶段应变持续增加但应力变化较小,破坏阶段应变持续增加,应力到达峰值,之后进入下降趋势,因此判断试样发生劈裂破坏。比较图 2(a)所示各曲线可发现,在粉质黏土中高分子水泥土强度相比普通水泥土有所提高,表明高分子固化剂对水泥固化粉质黏土的强度存在一定的影响,但高分子水泥土在应力应变表现中也比普通水泥土提早进入破坏阶段。从图 2(b)可以看出,高分子固化剂在水泥固化粉土的表现与普通水泥土相似,说明该高分子固化剂对水泥固化粉土等黏土

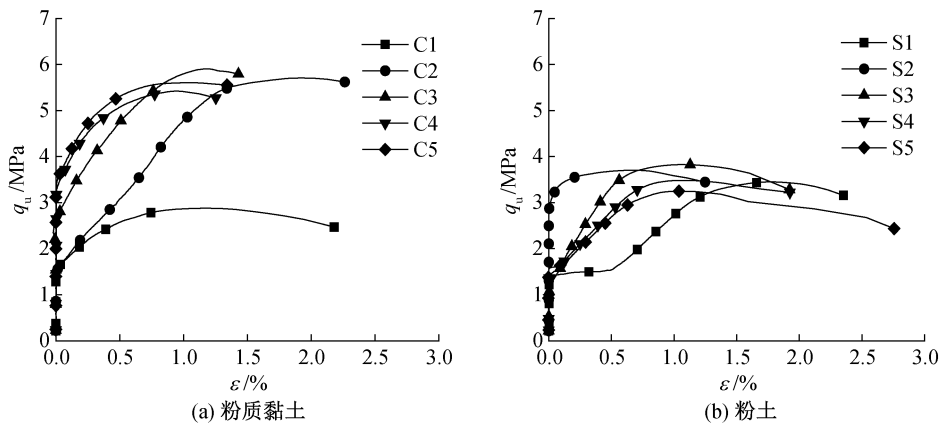


图 2 28 d 龄期粉质黏土和粉土的应力—应变曲线

颗粒含量较少的土质的强度提升效果并不明显。

2.1.1 破坏应变

破坏应变 ϵ_f 是应力-应变曲线上与破坏强度对应的应变,也是量化材料脆性或韧性的重要指标^[17]。破坏应变大说明材料的韧性表现较好,抵抗形变的能力较强;相反则说明材料具有较强的脆性,易发生破坏。水泥土在 7、14 d 和 28 d 龄期内破坏应变 ϵ_f 与无侧限抗压强度 q_u 的关系如图 3 所示。

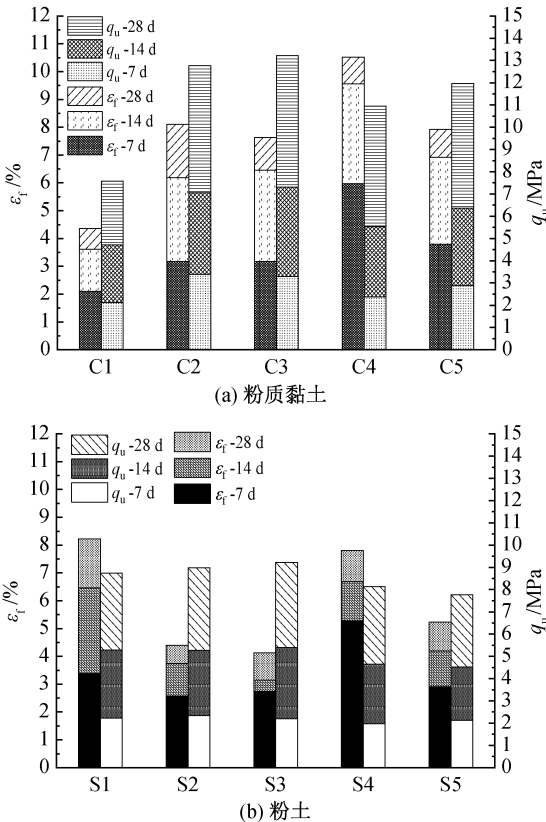


图 3 水泥土抗压强度与破坏应变的关系曲线

从图 3 中可以看出:2 种土质经高分子水泥复合固化后的韧性表现存在差异。从图 3(a)中可以看出,在粉质黏土中普通水泥土 C1 与参加高分子固化剂的水泥土试块相比韧性表现较差,对变形的

抵抗能力较弱;试块 C2、C3、C4 和 C5 随着龄期的增加,抗压强度也随之提高,其破坏应变随之减小,这种现象与汤怡新等^[18]发现的破坏应变与强度变化趋势较为相似。从图 3(b)中可以看出,随着龄期的增长高分子水泥固化粉土的韧性表现与普通水泥固化粉土相比逐渐变差;除 S4 在龄期为 7 d 时破坏应变大于普通水泥土之外,其余高分子水泥土在 3 个龄期的韧性表现均差于普通水泥,表明高分子固化剂对水泥固化粉土的韧性表现存在弱化影响。

2.1.2 韧性指数

本文采用韧性指数 TI (Toughness index) 对试样进行分析。该指数是反映材料脆性或韧性的指标之一;材料韧性指数越高,代表材料的韧性越好。 TI 可用定积分方程计算,用归一化后的应力—应变关系曲线从初始状态到曲线峰值后某个特定区域的面积^[19]表示:

$$TI = \int_0^{\epsilon'_r} f(\epsilon') d\epsilon' \tag{1}$$

其中: ϵ' 为归一化应变,即 ϵ/ϵ_f , ϵ_f 为破坏应变; $f(\epsilon')$ 为归一化应力,即 σ/q_u ; ϵ'_r 为 ϵ' 在 $\sigma/q_u=r$ ($r<1$) 的值,本文取 $\epsilon'_r=1.1$ 。28 d 龄期应力-应变曲线归一化结果如图 4(a)—(b) 所示。利用式 (1) 对归一化应力-应变曲线进行投影区域面积计算,得到韧性指数 TI ,结果如表 4 所示。

表 4 28 d 龄期试样韧性指数 TI

试样编号	韧性指数 TI	试样编号	韧性指数 TI
C1	0.962 0	S1	0.786 6
C2	0.807 7	S2	1.047 5
C3	0.884 4	S3	0.862 0
C4	0.980 5	S4	0.855 0
C5	0.992 9	S5	0.864 8

在图 4 中,粉土各试样的差异性现象最为明显。结合表 4 可以看出,在粉质黏土与粉土之间存在相

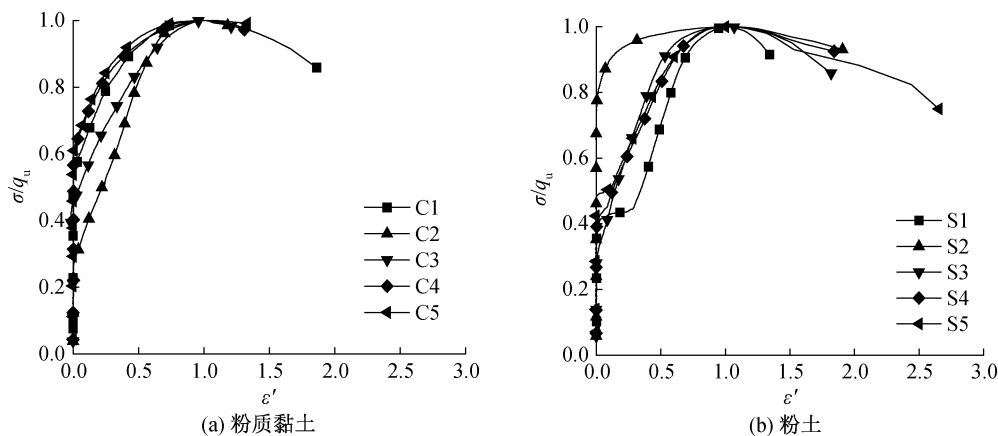


图 4 28 d 粉质黏土和粉土的应力应变归一化曲线

反的韧性表现:在 15% 水泥掺量下,粉质黏土的韧性指数随着高分子固化剂掺量的增加呈上升趋势;在粉土中,韧性指数随高分子固化剂掺量的增加呈现平稳的状态。同时也发现,S2 的韧性指数则远远高于普通水泥土,这可能是因为在进行无侧限抗压强度试验时 S2 试块出现了应力增长过快的现象,导致计算韧性指数时出现较大的误差。差异性现象进一步表明,高分子固化剂对土壤的韧性表现有明显

的影响,但土质差异导致韧性表现存在不同变化情况。这种情况可能是因为粉土含有的黏土颗粒较少,高分子固化剂不能有效发挥连接土壤颗粒的作用导致其韧性不如黏粒含量较高的粉质黏土^[20]。

2.2 土质在无侧限抗压强度试验中的影响

土质的差异是影响水泥土固化效果的主要原因之一^[21]。试验选取粉质黏土和粉土进行无侧限抗压强度对比试验,得到的试验结果如图 5 所示。

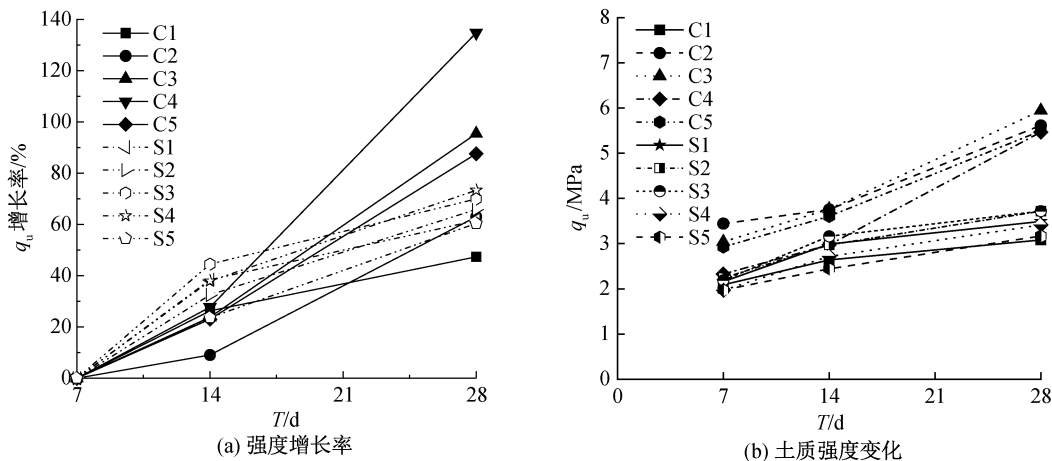


图 5 水泥土强度变化曲线

由图 5(a)可知,高分子固化剂在粉质黏土和粉土中有不同的强度表现。在粉质黏土中 10%、20% 和 30% 掺量的高分子固化剂 28 d 强度的增长幅度均超过 80%, 超过水泥土强度增长率;粉土中掺入高分子固化剂的水泥土 14 d 强度增长率稳定在 20%~40% 范围以内,与普通水泥土 38.4% 的强度增长率相比存在离散现象,但 28 d 高分子水泥固化粉土强度增长率均超过 60%。这表明高分子固化剂在试样后期强度增长中起着一定的提升作用。结合图 5(b)可知,4 种不同掺量的高分子固化剂在粉质黏土中的强度表现要好于粉土,同时在 14 d 时强度出现分化现象。这可能是因为:在粉质黏土中存

在的黏土颗粒要大于粉土且能有效地与高分子长链进行连接,减少土中的吸附水;同时,高分子固化剂特有的憎水性,能有效地改变土粒表面亲水性质,形成保护层填充固化土内部的孔隙;高分子固化剂与土壤混合后,利用阳离子交换作用与黏粒形成紧密的连接结构,辅助水化反应产物 C—S—H 的胶结作用,使固化土强度得到提高。有机分子链固化结构示意图如图 6 所示^[22]。

2.3 高分子固化剂掺量在水泥土强度试验中的影响

本文在水泥土中添加不同掺量的高分子固化剂,研究高分子固化剂掺量对水泥土强度的影响。高分子固化剂掺入水泥土后的强度变化曲线如图 7 所示。

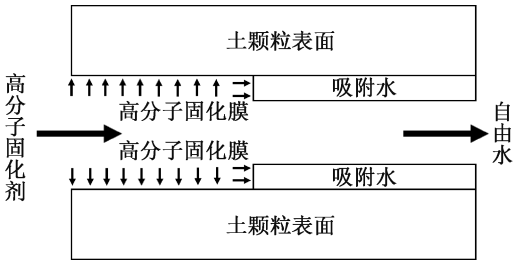


图 6 有机分子链固化结构示意图

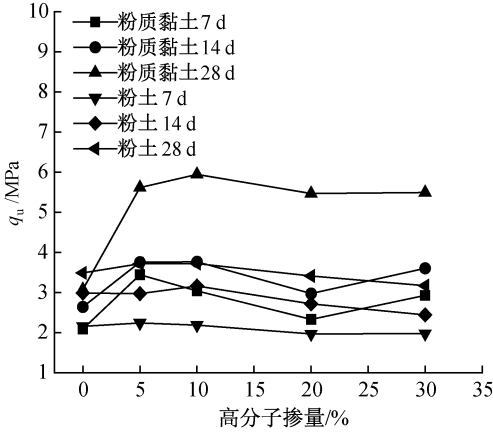


图 7 不同掺量下的强度变化曲线

图 7 显示了高分子固化剂不同掺量的强度表现。在粉质黏土中,高分子固化剂的掺加有效提高水泥土强度,但在相同龄期条件下掺量的增加对水泥土强度并没有明显影响。粉土中的表现则更加平稳,即 4 种高分子掺量得到的固化强度相近。特别的是,除粉质黏土 28 d 的强度表现在 4 种高分子掺量中较高外,其余掺量在不同龄期条件下的强度都是逐步提高的过程且强度较为接近。

3 微观固化机理分析

3.1 X 射线衍射测试

土的物理力学性质与土中所含胶结物及胶结程度有关,为揭示 2 种土质在相对较长的固化时间内可能发生的微观结构变化,在 28 d 龄期时进行 X 射线衍射测试和电镜扫描测试。通过 Jade 专业软件检测试样反应产生的主要产物,并在对应的衍射峰上进行元素标记,XRD 测试测得结果如图 8(a)和图 8(b)所示。

测试结果表明,2 种土质在固化前的主要成分均为石英、钠长石、方解石和白云石。经水泥固化后新生成的产物主要是集中在 10° 和 30° 衍射峰附近的水化硅酸钙(C—S—H)和钙矾石(AFi)。在不同土质条件下高分子固化剂固化产物较为不同,水泥固化粉土中掺入高分子固化剂除生成赤铁矿外还产

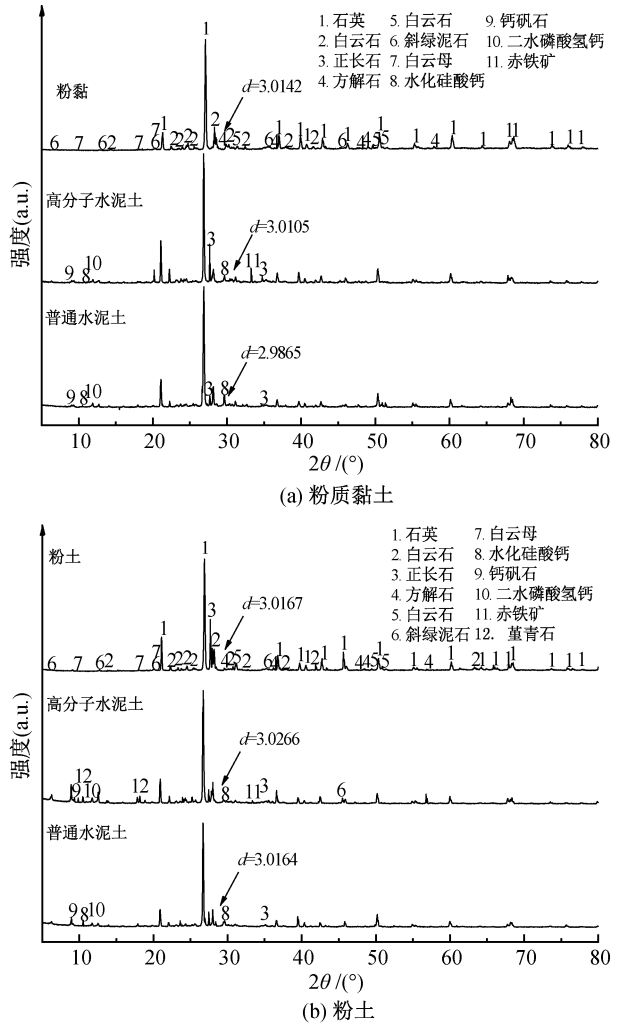


图 8 固化土 XRD 测试结果

生少量重晶石($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$)^[23]。同时对比原状粉土可发现, 30° 附近的衍射峰强度随着高分子固化剂的掺入明显降低且产生宽化现象。而在水泥固化粉质黏土中,高分子固化剂增强了石英的衍射峰强度有效促进固化土形成完整的空间结构。这种差异化表现,与上文得到的宏观力学性能研究结果相近。本文以粉质黏土和粉土中的方解石作为晶面间距的指标,晶面间距通过布拉格方程计算相邻的两个平行晶面之间的距离得到,晶面间距越大则微观结构越紧密^[24]。在 28 d 养护龄期下,高分子水泥土和普通水泥土之间的晶面间距 d 没有显著差异,这表明高分子固化剂掺入水泥土对晶体结构没有产生较大的改变。

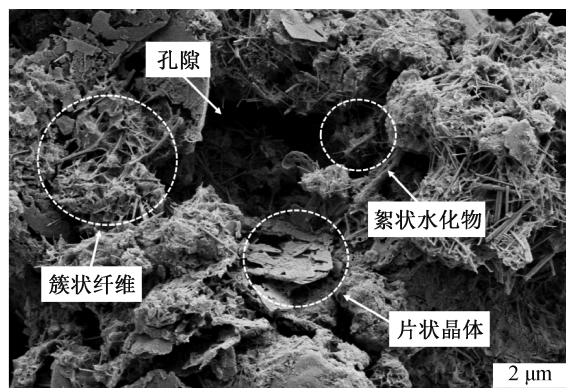
3.2 扫描电镜测试

水泥土及高分子水泥土扫描电镜图像如图 9 (a)—(d)所示。水泥土的基本微观结构大致相似:土中较大的颗粒构成水泥土的基本骨架,大颗粒之间以小颗粒进行填充,在颗粒之间存在水泥水化产

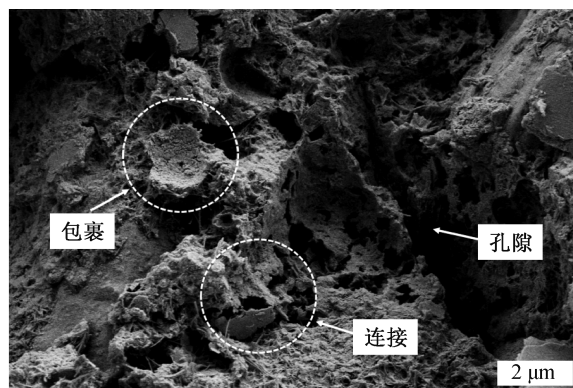
物的结晶体作为联结桥梁^[25]。图 9(a)和图 9(c)基本符合上述规律,即:颗粒之间由簇状纤维水化物和片状水化物填充在孔隙中;在 10000 倍电镜倍数下,水泥固化粉质黏土结构整体性较水泥固化粉土要高,水化产物数量较多,孔隙较小。水泥固化粉土因为粉土颗粒较为细小,其簇状水化产物处于生长阶段,导致颗粒与颗粒间的联结较为稀疏,结构不够完整,反映到宏观层面为抗压强度较弱。

高分子固化剂固化软土的机理可分为包裹、填充和连接三部分。当高分子固化剂与水结合时形成的高分子固化膜包裹土颗粒并填充颗粒间孔隙,用颗粒表面的高分子固化膜连接土颗粒形成致密结构

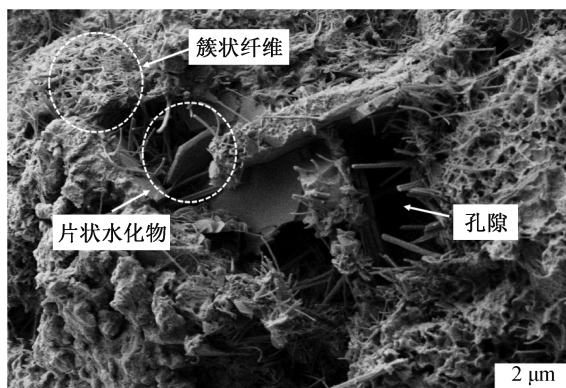
以达到提高强度的目的^[12]。图 9(b)和图 9(d)表明:高分子水泥土是将软土颗粒作为固化土的主要骨架体系,水泥水化产物作为连接颗粒的主要方式;高分子水泥土明显存在固化膜包裹土颗粒的现象,固化膜形状大小不一、排列不规则,固化土内部存在众多小孔隙;附着在土颗粒表面的固化膜通过物理化学连接的方式,连接细小颗粒,形成为较大的土团以填充孔隙,该种土团在整个高分子水泥土中较为常见;但从实际的抗压强度可知,该结构强度需要在一定的土质条件下才能发挥作用:在粉土结构中,高分子固化膜并没有完全包裹土颗粒和水化产物,其结构致密性与粉质黏土相比较为稀疏。



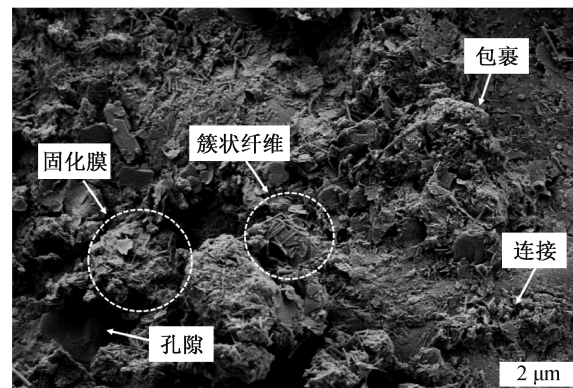
(a) 水泥固化粉质黏土



(b) 高分子水泥固化粉质黏土



(c) 水泥固化粉土



(d) 高分子水泥固化粉土

图 9 固化土扫描电镜图像

4 结 论

为研究水泥土强度与高分子固化剂掺量之间的相关性,本文对以粉质黏土和粉土为固化对象的高分子水泥土进行了室内无侧限抗压强度试验,从宏观角度分析高分子固化剂对水泥土强度的影响规律;并结合 X 射线衍射测试和电镜扫描测试,从微观角度揭示高分子固化剂作用机理,初步分析了高分子固化剂掺量对水泥土强度的影响机理。具体结

论如下:

a) 高分子固化剂在水泥土中存在一定的影响。在不同掺量、不同土质条件下的高分子水泥土的应力—应变曲线表现不同;高分子水泥土在加载初始阶段塑性变化较快,相比普通水泥土提早进入破坏阶段,高分子水泥土整体破坏表现为劈裂破坏。

b) 不同掺量和不同土质条件下的高分子水泥土的破坏应变有较大差异:破坏应变与普通水泥土相比主要集中在 1%~4%。在粉质黏土中,高分子水泥土随着龄期的增加,强度随之增加,破坏应变逐

渐减小,在相同龄期内其韧性表现均好于普通水泥土;在粉土中,高分子水泥土与普通水泥土相比其韧性表现差异不大。因此,在水泥固化粉质黏土中加入高分子固化剂,能有效提高材料的韧性;但材料的韧性表现不随高分子固化剂含量的提高而增强。

c)高分子水泥土强度的增长根据土质的不同有着较大的差异。高分子水泥土在固化粉质黏土中,其早期强度的增长与普通水泥土相似,同时高分子水泥固化粉质黏土随着龄期的增加其强度增长较快,到28 d时强度增长率均大于普通水泥土;而在粉土中的早期强度增长与普通水泥土相比差异较大,在后期强度表现中与普通水泥土较为接近。高分子水泥土强度与掺量并无关联,随着掺量的提高,高分子水泥土的强度并没有呈现上升趋势。

d)X射线衍射测试表明,2种土质经过高分子固化后的产物有所不同:在粉质黏土中以水化硅酸钙、钙矾石和赤铁矿为主,将粉质黏土中的低硬度矿物转化为高硬度矿物,对软土内部的成分进行重构,以增强晶体的空间结构;高分子水泥固化粉土中除水化硅酸钙和钙矾石外还产生了斜绿泥石等变质矿物,对固化土强度无有益影响。电镜扫描测试也表明,在高分子水泥土中产生的高分子固化膜将细小土颗粒包裹,通过连接作用形成较大土团,以填充土颗粒间的孔隙,形成一个较为稳定的致密结构。同时,高分子固化膜填充颗粒间孔隙的完整程度取决于土质,土颗粒中黏土颗粒含量较高则高分子固化剂发挥的作用较明显。

综上所述,相较于无机类固化材料,高分子固化剂更适用于韧性需求高的地基处理工程。同时,高分子水泥土掺量变化对水泥土强度的影响较小但受到土质的影响较大,在工程实践中以较低高分子固化剂掺量的方式可达到预期目标,控制工程成本。

本文仅分析了高分子固化剂对普通水泥土强度的影响,未来可进一步研究高分子水泥土耐久性能,完善高分子固化剂在地基处理中的应用研究。高分子固化剂由于生产工艺复杂,对生产条件要求苛刻,未来需进一步降低生产成本。

参考文献:

- [1] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J]. 岩土力学, 2010, 31(12):3741-3745.
- [2] 力乙鹏,李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S2):1273-1277.
- [3] 林彤,刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6):1049-1052.
- [4] 方祥位,孙树国,陈正汉,等. GT型土壤固化剂改良土的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9):1545-1548.
- [5] 陈峰,赖锦华. 粉煤灰水泥土变形特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1):96-101.
- [6] 陈鑫,俞峰,洪哲明,等. 新型GS固化土与水泥土的力学特性对比研究[J/OL]. 工程地质学报. (2020-09-09) [2022-05-07]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13544/j.cnki.jeg.2020-172>.
- [7] 李沛,杨武,邓永锋,等. 土壤固化剂发展现状和趋势[J]. 路基工程, 2014(3):1-8.
- [8] 黄河,施斌,刘瑾,等. STW型生态土壤稳定剂改性土强度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(1):87-90.
- [9] Kolay P K, Dhakal B, Kumar S, et al. Effect of liquid acrylic polymer on geotechnical properties of fine-grained soils[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2016, 2(4): 1-9.
- [10] Rezaeimalek S, Huang J, Bin-Shafique S. Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 210-220.
- [11] 湛文武,许贺,李永杰,等. 改性聚乙烯醇固化麻刀加筋遗址土的力学特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(5):667-672.
- [12] 陈志昊,刘瑾,钱卫,等. 高分子固化剂/纤维改良砂土的抗拉强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2):350-359.
- [13] 徐菲,蔡跃波,钱文勋,等. 脂肪族离子固化剂改性水泥土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1679-1687.
- [14] 王颖,刘瑾,王琼亚,等. 高分子固化剂改良砂土的渗透特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2):243-250.
- [15] 陈蕾,杜延军,刘松玉,等. 水泥固化铅污染土的基本应力-应变特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):715-721.
- [16] 陈鑫. GS固化土工程性质及微观结构特征研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2021:23.
- [17] 范晓秋,洪宝宁,胡昕,等. 水泥砂浆固化土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4):605-610.
- [18] 汤怡新,刘汉龙,朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5):549-554.
- [19] Harianto T. Study on Innovative Multi-layer Design of Landfill Cover Barrier Layer [D]. Kyoto: Saga University, 2008: 41-42.

[20] 李昊, 程冬兵, 王家乐, 等. 土壤固化剂研究进展及在水土流失防治中的应用[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 11-15.

[21] 郑旭, 刘松玉, 蔡光华, 等. 活性 MgO 碳化固化土的干湿循环特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2):297-304.

[22] 张丽萍,张兴昌,孙强. SSA 土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):45-49.

[23] Zhou H Y, Wang X S, Wu Y P, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of marine soft soil stabilized by different calcium content precursors based geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2021, 305: 124722.

[24] Chen X, Yu F, Hong Z M, et al. Comparative investigation on the curing behavior of GS-stabilized and cemented soils at macromechanical and microstructural scales[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2022, 50(6): 20200631.

[25] 芮凯军, 李俊才, 杨宇, 等. 不同土质水泥土性质的室内试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(2):173-178.

(责任编辑:康 锋)