

改良分散性土体的物理力学特性试验研究

Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Improved Dispersive Soil

魏衍杰¹, 魏平²

1. 巨野县水务事业发展中心, 山东 巨野 274900;
2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 分散性土广泛分布于我国东北、西北地区, 其具有抗水蚀能力弱、抗剪强度低、抗渗性能差等特点。为了解决分散性土工程性能差的问题, 本次研究提出采用木质素磺酸钙改良分散性土并测定其物理力学性质, 探究了不同木钙掺量以及养护龄期下改性土力学性能变化。主要结论如下: (1) 随着木钙掺入量的增加, 土体的液限、塑限以及最优含水率均出现下降, 土样的破坏模式逐渐过渡至塑性破坏; 土体抗压强度先增大后减小, 压缩系数先减小后增大。(2) 随着土样养护龄期的延长, 改性土的无侧限抗压强度也逐渐增大, 压缩系数不断减小。(3) 随着木钙掺量的增加, 土样颗粒表面胶结物质逐渐增多, 改性土颗粒镶嵌接触, 接触面积逐渐增大, 同时胶结物包裹颗粒形成大的团聚体, 土体结构稳定性较好。

关键词: 分散性土; 木质素磺酸钙; 物理力学性质; 养护龄期; 塑性破坏

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0048-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.008

WEI Yanjie, WEI Ping

- (1. Water Development Center of Juye, Juye 274900, China;
2. Shuifa Planning & Design Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: Dispersive soil is widely distributed in the northeast and northwest regions of China. It has the characteristics of weak water erosion resistance, low shear strength and poor impermeability. In order to solve the problem of poor engineering performance of dispersive soil, this study proposes to use calcium lignosulfonate to improve dispersive soil and determine its physical and mechanical properties, and explores the changes of mechanical properties of modified soil under different calcium lignosulfonate content and curing age. The main conclusions are as follows: (1) With the increase of the content of wood calcium, the liquid limit, plastic limit and optimal water content of the soil decreased, and the failure mode of the soil sample gradually transitioned to plastic failure. The compressive strength of the soil increases first and then decreases, and the compression coefficient decreases first and then increases. (2) With the extension of the curing age of the soil sample, the unconfined compressive strength of the modified soil also increases gradually, and the compression coefficient decreases continuously. (3) With the increase of the content of wood calcium, the cementing material on the surface of the soil sample particles gradually increases, the modified soil particles are inlaid and contacted, and the contact area gradually increases. At the same

作者简介: 魏衍杰 (1969—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计及建设管理。

通信作者: 魏平 (1987—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计工作。

收稿日期: 2023-08-23

time, the cement encapsulates the particles to form large aggregates, and the soil structure is stable.

Keywords: dispersive soil; calcium lignosulfonate; physical and mechanical properties; curing age; plastic failure

0 引言

分散性土广泛分布于全球各地，如澳大利亚、孟加拉国、巴西、以色列以及越南等国家。近些年来，我国东北（黑龙江、吉林以及辽宁）以及西北部地区（甘肃、陕西）也发现了大量的分散性土体^[1-2]。分散性土具有抗水蚀能力弱、抗剪强度低、抗渗性能差等特点，在雨水作用下，容易被水流夹带，造成土体内部空洞，进而形成管涌、路基失稳而影响结构物的稳定，危害性极大。为改善分散性土体的力学特性，目前常采用石灰和水泥作为改良剂，但使用传统的改良剂会消耗大量自然资源、污染环境、增大土体脆性。因此研究新型材料改良下分散性土的力学性能迫在眉睫。

近些年来，国内外研究学者针对改良分散性土体开展了大量的研究。目前学者主要通过物理、化学改良措施以及综合治理措施对分散土进行处理。Turkoz 等^[3]通过利用沸石与水泥改良土体的膨胀性以及分散性，结果表明：沸石与水泥的掺合可有效提高土体的强度，经过改良后土体强度提高了 26.7%。Vakili 等^[4]利用木质素磺酸盐改良分散性土体后对其进行电渗处理，结果表明：经过处理后分散土的分散性大幅降低，降至非分散性指标，同时发现联合处理的效果明显优于单一处理。Moravej 等^[5]通过采用微生物诱导碳酸钙沉淀技术改性分散土，结果表明：改性分散土抗水蚀能力有所提高。汪恩良等^[6]基于扫描电镜和核磁共振技术，探究了不同木质素掺量下改良分散土的细观结构变化，结果表明：随着木质素掺入量的增加，土体孔隙率呈现“V”形变化，木质素的掺入可有效提高土体抗侵蚀能力。魏世杰等^[7]利用黄原胶对黏性土进行加固，结果表明：在黏土中添加黄原胶后，黏土的无侧限抗压强度大幅提高，当黄原胶掺量为 1.5% 时，黏土无侧限抗压强度最高。倪晓逸等^[8]采用原位热力加固技术对分散土进行了处理并分析了热力加固分散土的加

固机理，结果表明：加热时间、压实度以及温度是影响加固后分散土基本物理力学特性的重要因素。刘杰等^[9]基于宏细观研究手段（针孔试验、碎块试验、SEM 技术以及 X 射线技术）提出了土体分散性的综合判别法，利用标准吸湿含水率以及 PH 值测试定量计算土体分散性。

上述学者的研究主要集中于采用木质素、黄原胶、微生物诱导碳酸钙沉淀技术对分散土进行处理，较少研究不同掺量以及养护时间等因素对改性分散土基本物理力学性质的影响，因此本文基于前人研究的基础上，提出采用天然高分子化合物木钙改良分散土，并对改良后的土体开展物理力学试验，研究不同木钙掺量、养护周期条件下改性土的基本物理力学性质，探究木质素磺酸钙微观作用机理，该研究可为分散土地区工程施工提供相应参考。

1 试验方案设计

1.1 试验材料

1.1.1 试验土样

本次研究所用分散土取自陕西省咸阳市杨陵区某工程项目现场，土样呈现黄棕色，土样以粉粒为主，土质均匀，级配良好，如下图 1 所示。现场取回土样后，在土样中加入碳酸钠使其分散化，等待自然风干后碾碎，过 2 mm 筛。基本物理性质与化学性质分别如下表 1、2 所示。



图 1 原状土
Fig. 1 Undisturbed soil

材料科学

根据相关规范要求，采用常规方法鉴定土体的分散性，同时利用经验公式计算得出土样的 F 值，试验结果表明：试验土体的 D 值为 $61.9\% > 50\%$ ， P_s 为 $87.5\% > 60\%$ ， P_{ESP} 为 $21.6\% > 15\%$ ，土样的 F 值为 $4.89 > 4.50$ ，因此综合判定，土样为化学分散性土。

表 1 分散土的基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of dispersed soil

土样 颗粒 相对 密度 G_s	颗粒组成/%			液限 w_l	塑限 w_p	塑性 指数 I_p	最优 含水 率/%	最大 干密 度 $\rho_{cm^{-3}}$
	黏粒 <0.005 mm	粉粒 $0.005 \sim$ 0.075 mm	砂粒 >0.075 mm					
2.69	32.9	64.0	3.1	29.8	17.5	12.3	16.9	1.75

表 2 分散土的基本化学性质
Table 2 Basic chemical properties of dispersed soil

pH 值	易溶盐含量 $/(g/kg)$	中溶盐含量 $/(g/kg)$	难溶盐含量 $/(g/kg)$	有机质含量 $/(g/kg)$
9.61	2.11	1.83	60.72	5.71

1.1.2 木质素磺酸钙

木质素磺酸钙是一种复杂的高分子聚合物，颜色为黄褐色，易溶于水，稳定性较佳，下图 2 为木质素磺酸钙化学成分，表 3 为木钙的主要成分。

表 3 木钙的主要成分
Table 3 The main components of calcium lignin

材料	外观	pH 值	含硫量 /%	含碳量 /%	水不溶物 /%	水分 /%	木质素 含量/%
木质素 磺酸钙	黄褐 色	7.00	4.95	40.00	<1.50	4.89	>95.00



图 2 木质素磺酸钙
Fig. 2 Calcium lignosulfonate

1.1.3 试样制备

根据前人的相关研究，本文将木钙掺量定义为木钙与干土质量之比。将所称得的木钙与干土混合并充分搅拌，随后喷洒去离子水，密封试样后将其浸润 24 h。浸润完毕后，进行养护（温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，湿度 $>95\%$ ），试样如下图 3 所示。



图 3 试样照片
Fig. 3 Sample photo

1.2 试验方案

本次试验主要通过研究不同改性剂掺量（0%、1%、2%、3%、4%）、养护时间下改性土的物理力学性质。通过界限含水率试验、无侧限抗压强度试验以及压缩试验测定改良分散土的物理力学性质，下表 4 为具体试验设计。

表 4 具体试验设计
Table 4 Specific experimental design

试验	养护时间/d	木钙掺量
界限含水率试验	/	0、1%、2%、3%、4%
无侧限抗压强度试验	1、3、7、14、28	0、1%、2%、3%、4%
压缩试验	1、3、7、14	0、1%、2%、3%、4%

2 试验结果分析

2.1 界限含水率试验结果分析

界限含水率在一定程度上可以反映土体颗粒大小以及矿物成分。塑性指数可用来衡量土体的可塑状态，下图 4 为不同木钙掺量下改性土界限含水率的变化曲线。

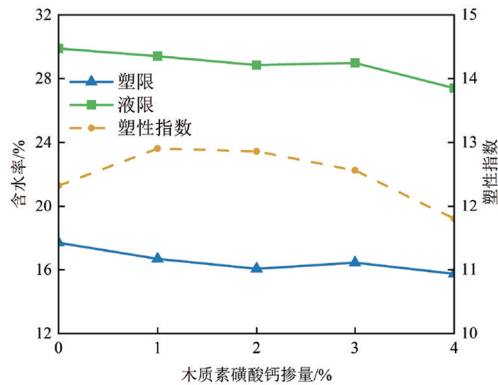


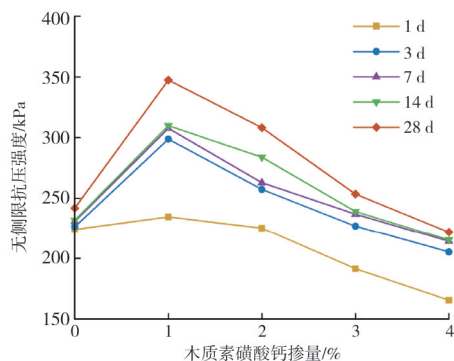
图4 不同木钙掺量下改性土界限含水率的变化曲线
Fig. 4 The change curve of the boundary water content of the modified soil under different wood calcium content

由上图可知,随着木钙掺入量的增加,改性土的液限与塑限发生下降,但幅度较小,而塑性指数呈现先增大后减小的“凸”形变化趋势。当木钙掺量为0时,素土的塑性指数为12.2,当木钙掺入量为4%时,改性土的塑性指数为11.7,下降了4.1%,而当木钙掺量为1%时,改性土的塑性指数最大,其值为12.9。土体液限、塑限以及塑性指数的数值与土体pH值、矿物成分以及颗粒粒径等因素密切相关。当掺入量增多时,土体的pH降低(素土pH=9.61,木质素磺酸钙pH=7.00),进而使得电层厚度减小,结合水膜变薄,最终导致土体液限、塑限以及塑性指数均发生降低。

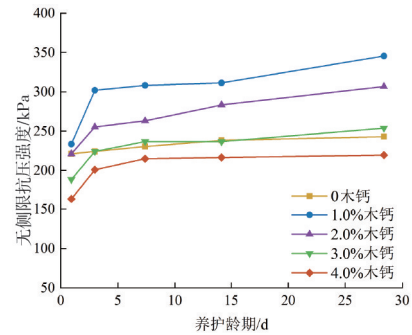
2.2 无侧限抗压强度试验结果分析

2.2.1 强度分析

下图5a、5b分别为改性土的无侧限抗压强度随着木钙掺量、养护时间的变化曲线图(最大干密度=1.75 g/cm⁻³)。



(a) 木钙掺量



(b) 养护时间

图5 无侧限抗压强度变化曲线
Fig. 5 Change curve of unconfined compressive strength

由上图5a可知,随着木钙掺入量的增加,改性土的无侧限抗压强度出现先增大后减小的变化趋势。以养护龄期28d为例,当木钙掺量为0时,素土的无侧限抗压强度为241.83 kPa,当木钙掺量为4%时,改性土的无侧限抗压强度出现最低值,其值为221.90 kPa,当木钙掺量为1%时,改性土的无侧限抗压强度达到峰值,其值为347.45 kPa,两者相差了105.62 kPa,出现该现象是由于在较低掺入量时,木钙充分发挥胶结作用,填充孔隙,进而使得土体的抗压强度大幅上升。而随着木钙掺入量的不断增加,木钙起到胶结作用的同时又充分聚集,木钙取代了原有的土颗粒,其次又因为木钙自身强度较低,取代土颗粒的部分会形成软弱面,在荷载作用下,试样更易沿着软弱面出现破坏,因此在高掺量条件下改性土的抗压强度大幅降低。

由上图5b可知,随着养护时间的增加,改性土的无侧限抗压强度也逐渐增大。以木钙掺入量1%为例,当土样养护时间为1d时,其无侧限抗压强度为233.55 kPa,当土样养护时间为3d时,土样抗压强度出现飞跃式增大,增幅高达29.4%,而随着养护时间的继续增加,土样的抗压强度缓慢增加。该现象说明养护时间的长短对土体抗压强度影响明显。当木钙掺入土体中时,在较短时间内两者充分接触,反应迅速,进而土样强度出现飞跃式增大,同时随着养护时间持续增加,两者之间矿物反应更为彻底,但反应速率明显小于前期,因此土样的无侧限抗压强度增长较缓。

材料科学

2.2.2 应力-应变曲线分析

下图 6 为不同木钙掺量下改性土的应力-应变曲线。

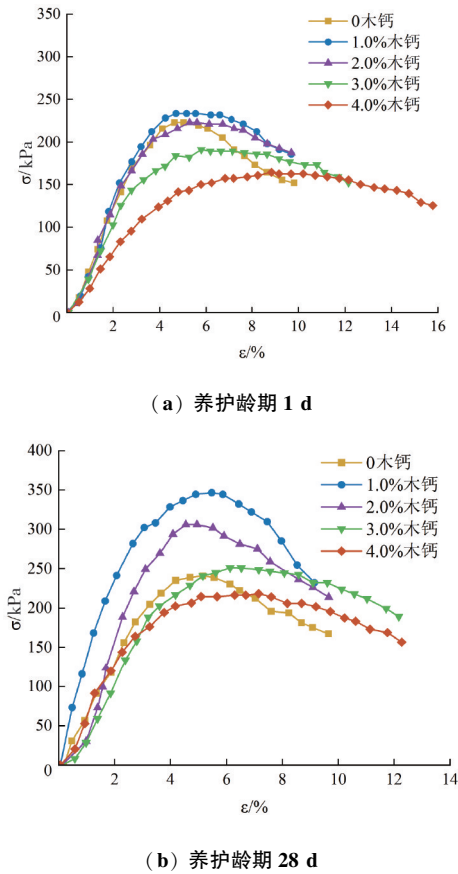


图 6 不同木钙掺量下改性土的应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of modified soil with different wood calcium content

由上图可知改性土的应力-应变曲线可分为 3 个阶段：①初始加载阶段，该阶段应力-应变曲线大体上呈线性上升，应力上升幅度大；②非线性上升阶，该阶段应力-应变曲线呈弧线上升，应力将达到峰值；③破坏阶段，该阶段应力-应变曲线急剧下降，土样发生破坏。在低掺量条件下（木钙掺量 1%、2%），土样呈现脆性破坏特征，在高掺量条件下（木钙掺量 3%、4%），土样呈现塑性破坏特征。出现该现象是由于低掺量条件下，木钙充分发挥胶结作用，填充孔隙，进而增大土体峰值应力，与无侧限抗压强度同理，高掺量条件下，木钙会形成软弱面的同时胶结力也有所增大，因此土体峰值应力降低，韧性增强，土样呈塑性破坏特征。

对比图 6a、6b 可知，随着养护时间的延长，土样峰值应力增大，土样脆性破坏特征明显，以木钙掺入量 1% 为例，当土样养护时间从 1 d 到 28 d 时，土样峰值应力增加了 111.02，增幅高达 49.9%。

2.2.3 破坏应变分析

下图 7 为改性土的破坏应变，其中图 7a、7b 分别为应变与木钙掺量之间的关系，应变与养护时间之间的关系。

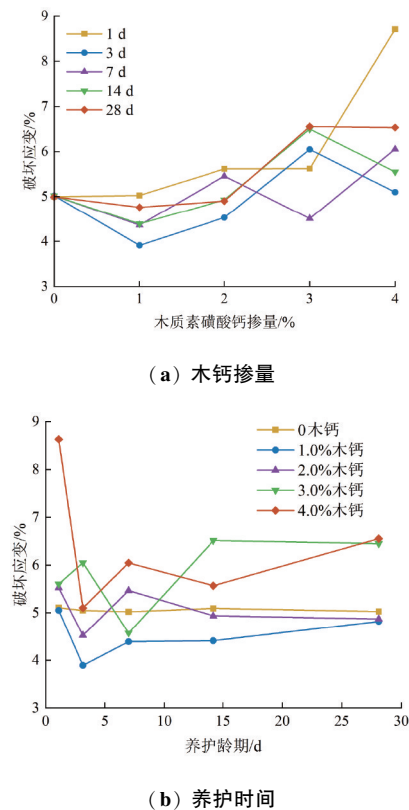


图 7 改性土的破坏应变变化
Fig. 7 Change of failure strain of modified soil

由图 7a 可知，随着木钙掺入量的增加，改性土的应变变化规律不明显，但整体上呈现先减小后增大的变化趋势。以养护时间 28 d 为例，随着木钙掺入量的增加，土样的破坏应变分别为 4.99%、4.75%、4.90%、6.55%、6.53%，由此可知木钙掺入可提高土体的粘度，进而使得改性土塑性增加^[10]。

由图 7b 可知，随着养护时间的延长，破坏应变变化较大，无明显规律，但值得注意的是当木钙掺入量为 4.0 时，改性土破坏应变随着养护时

间的延长剧烈波动，当养护时间从 1 d 到 3 d 时，改性土的破坏应变降低了 42.5%。

2.3 压缩试验结果分析

下图 8 为改性土压缩模量系数变化曲线，其中图 8a 为压缩系数与木钙掺量之间的关系，图 8b 为压缩系数与养护时间的关系曲线。

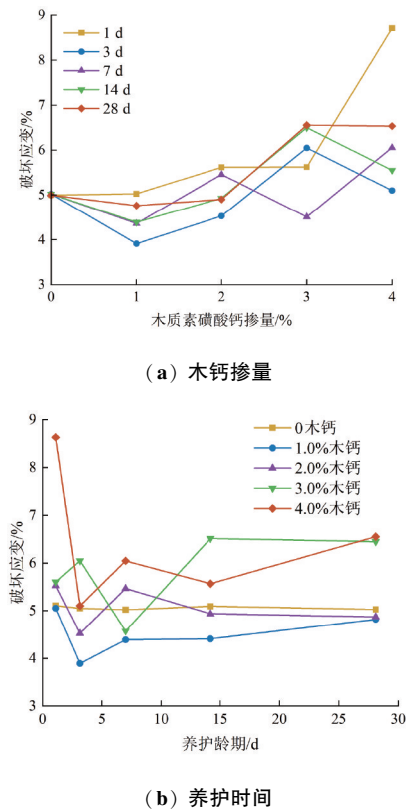


图 8 改性土的压缩系数变化

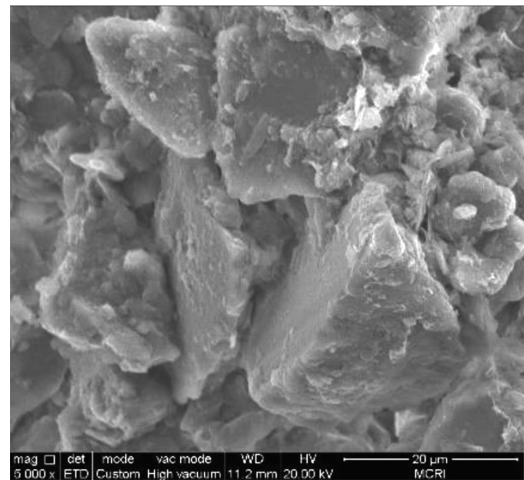
Fig. 8 Change of compression coefficient of modified soil

由图 8a 可知，随着木钙掺入量的增加，土样的压缩系数呈现先减小后增大“V”形变化，其中压缩系数的最小值出现在木钙掺量为 1% 时，出现该现象的原因与木钙自身的胶结能力有关，木钙填充孔隙并起到胶结作用，因此其抗压能力增强，压缩系数减小，而随着木钙掺量的不断增大，木钙取代部分土颗粒，使其抗压能力降低，压缩系数增大。

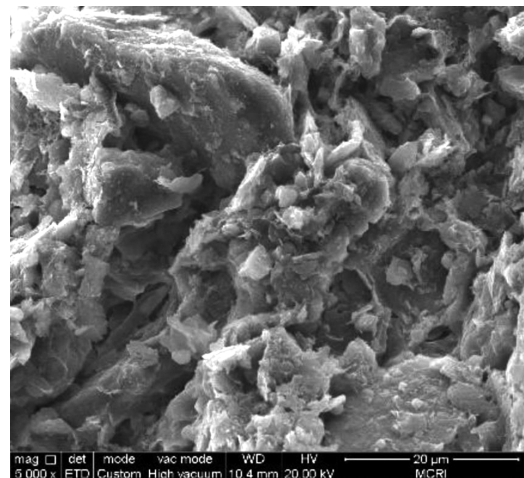
由图 8b 可知，随着养护时间的延长，改性土的压缩系数不断减小，而素土的压缩系数无明显变化，由此可知养护时间对改性土压缩系数影响明显，因此在实际施工过程中应当注意改性土的养护时间。

3 木质素磺酸钙微观作用机理分析

为进一步探究木质素磺酸钙对分散土的改性机理，对 28 d 龄期的土样进行了微观电镜试验。下图 9 为 5000 倍镜下 SEM 扫描结果，由图 9 可知，当木钙掺量为 0 时，土样颗粒表面光滑，具有边界，颗粒呈块状。随着木钙掺量的增加，土样颗粒表面胶结物质逐渐增多，改性土颗粒镶嵌接触，接触面积逐渐增大，同时胶结物包裹颗粒形成大的团聚体，土体结构稳定性较好。

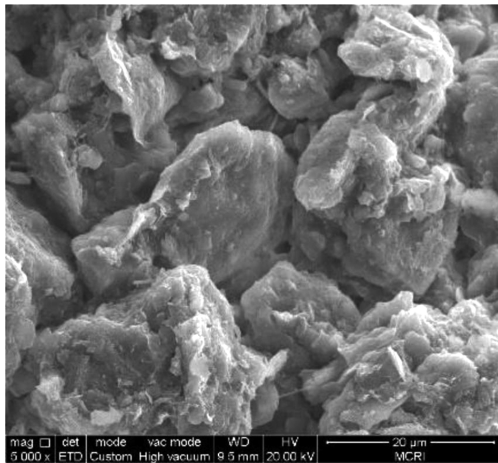


(a) 0 木钙掺量

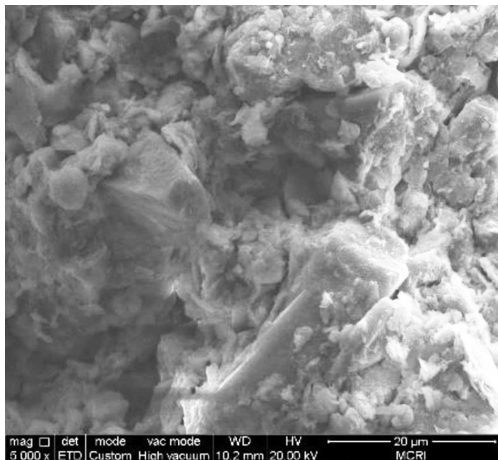


(b) 1% 木钙掺量

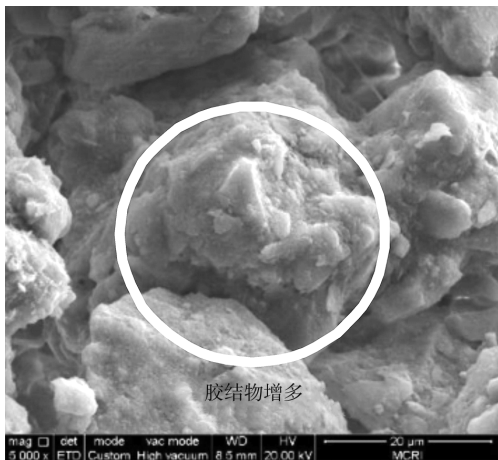
材料科学



(c) 2%木钙掺量



(d) 3%木钙掺量



(e) 4%木钙掺量

图9 5000倍镜下改性土微观结构

Fig. 9 5000 times the microscopic structure of modified soil under the microscope

改性土基本物理力学试验分析结果与微观电镜试验结果相吻合,因此说明试验分析较为合理。

4 结论

为解决分散性土工程性能差的问题,本文提出采用木质素磺酸钙对分散土进行改良并测定改性土的基本物理力学特性,分析了不同木钙掺量以及养护龄期对改性土物理力学性质的影响,最后采用SEM电镜扫描探究了木质素磺酸钙微观作用机理。

本文得到如下主要结论:

(1) 随着木钙掺入量的增加,改性土的液限与塑限减小,塑性指数呈现先增大后减小的“凸”形变化趋势。当木钙掺入量增多时,土体的pH降低,电层厚度减小,结合水膜变薄,最终导致土体液限、塑限以及塑性指数均发生降低。

(2) 随着木钙掺入量的增加,改性土的抗压强度呈现先增大后减小的变化趋势,压缩系数呈现先减小后增大的“V”形变化;随着养护时间的增加,改性土的无侧限抗压强度也逐渐增大,压缩系数不断减小。

(3) 无侧限抗压强度下应力-应变曲线分为①初始加载阶段、②非线性上升阶段、③破坏阶段。

(4) 通过SEM电镜观察发现,随着木钙掺量的增加,土样颗粒表面胶结物质逐渐增多,改性土颗粒镶嵌接触,接触面积逐渐增大,同时胶结物包裹颗粒形成大的团聚体,土体结构稳定性较好。

参 考 文 献

- [1] 卢永,李剑波,庄宝利,等.木质素磺酸盐+聚丙烯纤维路基分散性土性能复合改良研究[J].公路工程,2022,47(3):118-124.
- [2] 郑文杰,蒋鑫,吕玉蒙,等.陕西泾阳某黄土滑坡土的分散性试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(3):317-324.
- [3] TURKOZ M,SAVAS H,ACAZ A, et al.2014.The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. Applied Clay Science, 101: 1-9.

(下转第63页)

- [49] 李斌斌, 顾晓薇, 陈林, 等. 全铁矿废石骨料在混凝土叠合板中的应用研究 [J]. 混凝土世界, 2021 (5): 80-83.
- [50] 王敏, 谷向民, 孙健, 等. 石灰石矿山废石在混凝土中的合理利用 [J]. 水泥, 2019 (9): 31-34.
- [51] 何燕佑, 李华星. 金堆城矿山废石综合利用可行性探析 [J]. 中国铝业, 2020, 44 (6): 10-13.
- [52] 中国砂石协会, 北京建筑工程学院, 建筑材料工业技术监督研究中心. 建设用砂 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会.
- [53] 中国砂石协会, 北京建筑工程学院, 建筑材料工业技术监督研究中心. 建设用卵石、碎石 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会.
- [54] 中国建筑材料科学研究总院, 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 中国建筑材料工业地质勘查中心, 等. 建筑材料放射性核素限量 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局; 中国国家标准化管理委员会.
- [55] 王浩, 郑永杰, 王琳, 等. 粗骨料针片状颗粒含量对混凝土性能的影响研究 [J]. 中国建材, 2020 (4): 115-118.
- [56] 潘琨. 针、片状粗骨料对混凝土性能的影响 [J]. 四川建材, 2007 (3): 5-6.
- [57] 刘娟红, 靳冬民, 朱继常. 骨料品质对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2012 (9): 46-50.
- [58] 蔡基伟. 石粉对机制砂混凝土性能的影响及机理研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [59] 谢开仲, 王红伟, 肖杰, 等. 石粉含量对机制砂混凝土力学性能影响试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36 (5): 31-38.

(上接第 54 页)

- [4] VAKILI A H, BIN SELAMAT M R, AZIZ H B A, et al. 2017. Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC. Geoderma, 285: 270-279.
- [5] MORAVEJ S, HABIBAGHI G, NIKOOEE E, et al. 2018. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation. Geoderma, 315: 130-137.
- [6] 汪恩良, 李宇昂, 任志凤, 等. 基于扫描电镜和核磁共振技术的分散性土改良微观结构性变化研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (6): 1123-1132.
- [7] 魏世杰, 杨宇, 王梓, 等. 黄原胶改良黏土无侧限抗压强度及其加固机理研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2021, 38 (2): 66-71.
- [8] 倪晓逸, 张路, 樊恒辉, 等. 原位热力加固分散土的影响因素及其作用机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (6): 1240-1249.
- [9] 刘杰, 崔瑜瑜, 卢正, 等. 分散土分散性影响因素及其判别方法初探 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (S1): 237-244.
- [10] 胡翔宇. 木质素基土壤稳化剂的机理研究和原子模拟 [D]. 东南大学, 2018.