



· 工程地质灾害 ·

水泥改良黄土崩解试验研究

赵雪, 谷天峰, 范楠楠

(西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要 黄土具有多孔亚稳结构和水敏性,遇水时易发生崩解。黄土的崩解性是促进黄土高原地区水土流失、崩塌、滑坡等地质灾害发生的主要因素之一。作为一种造价低、应用方便的材料,水泥改良黄土(cement improved loess, CIL)在黄土地基、边坡工程中应用广泛,但其抗崩解性研究较少。为此,该文通过原状及不同掺量下的CIL室内崩解试验和扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)试验,分析改良前后黄土的崩解行为,探究水泥对黄土崩解性的改良效果及作用机制。结果表明,掺入水泥可大幅提升黄土的抗崩解能力,低掺量下CIL仍具有完整的崩解过程,但水泥能填充粒间孔隙,阻碍水分运移,同时水泥水化物及其与黄土颗粒的作用能增强粒间胶结,从而延缓了黄土崩解进程。随着水泥掺量的增加,抗崩解效果愈明显,累积崩解百分量几乎为0。土样不发生崩解的最小水泥掺量为3%。研究结果对黄土的抗侵蚀性研究和防灾工程设计具有重要意义。

关键词 黄土;水泥;崩解性;改良土;SEM

中图分类号: TU444 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxzbz.2024-01-003

Experimental study on disintegration of loess improved by cement

ZHAO Xue, GU Tianfeng, FAN Nannan

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract Loess has porous metastable structure and water sensitivity, and is prone to collapse when it encounters water. The disintegration of loess is one of the main factors that promote soil erosion, collapse, landslide and other geological disasters in the Loess Plateau. As a low cost and convenient material, cement improved loess (CIL) is widely used in loess foundation and slope engineering, but there are few researches on its anti-disintegration. The disintegration behavior of loess before and after the improvement was analyzed through the laboratory disintegration test and scanning electron microscope (SEM) test under the condition of CIL and different content, and the improvement effect and mechanism of cement on loess disintegration were explored. The results show that cement can greatly improve the anti-disintegration ability of loess. At low content, CIL still has a complete disintegration process, but cement can fill the intergranular pores and hinder water transport. Meanwhile, cement hydration and its interaction with loess particles can enhance intergranular cementation, thus delaying the disintegration process of loess. With the increase of cement content, the anti-disintegration effect is more obvious, and the cumulative disintegration component is almost 0. The minimum

收稿日期:2023-10-30

基金项目:国家自然科学基金专项项目(42041006)。

第一作者:赵雪,女,从事地质灾害防治等研究,1426442594@qq.com。

通信作者:谷天峰,男,教授,从事黄土地质灾害等研究,gutf@nwu.edu.cn。

cement content of soil sample without disintegration is 3% . The results are of great significance to the study of erosion resistance of loess and the design of disaster prevention engineering.

Keywords loess; cement; the property of disintegration; improved soil; SEM

黄土是广泛分布于干旱半干旱地区的黏性粉土,其典型特点是由风积形成的具有高孔隙度和大孔隙的亚稳结构^[1]。与自然分散不同,黄土在遇水情况下易发生崩解^[2]。黄土的崩解性是黄土高原水土流失的主要原因,也是黄土地貌演化的主要驱动力。近年来,由于极易发生的极端降雨情况加之土体自身的崩解性,黄土地区侵蚀愈发严重^[3]。

为了提高黄土的抗崩解性,许多学者关注黄土性能改良方面的问题,通过改良剂稳定黄土以获得优异的工程性能是一项世界性的综合技术^[4-6]。许多学者致力于寻求新型高分子材料来提高黄土的性能^[7-9]。然而,大多数高分子改良材料存在黏度大、造价高、技术不成熟的缺陷,因此较难应用于工程实践。目前在工程实践中大多采用水泥进行黄土改良,因其能够在少掺量条件下达到较好的加固效果,被认为是造价最低、稳定效果最好、性价比最高的改良剂之一^[10]。在当前研究中主要关注水泥改良黄土(cement improved loess,CIL)的强度特性,并取得了优异效果^[11-13],但对于 CIL 水稳性研究较少。在已开展的黄土及 CIL 水稳性研究中,Wang 等^[14]采用自行研制的崩解仪研究了不同含水量、矿化度和组分对崩解的影响;谷天峰等^[15]采用控制变量法对黄土崩解影响因素(土样尺寸、初始含水率、水温、酸碱度、盐度)进行崩解测试;蒋应军等^[16]对不同掺量 CIL 进行崩解试验,结果表明随着水泥掺量和压实度的增加,改良黄土的水稳系数有所提高;王任杰^[17]对不同水泥掺量和养护龄期的 CIL 进行崩解试验,认为水泥掺入能够有效改善黄土的崩解性,28 d 龄期下较低水泥掺量的改良黄土在浸水

7 d 时难以产生崩解现象。这些研究阐述了黄土崩解的影响因素以及水泥改良对黄土的抗崩解作用,但在 CIL 的崩解过程和定量研究方面存在一定不足。针对 CIL 的历时崩解阶段和抗崩解机制方面及需进一步深入探讨。

考虑到降雨诱发黄土侵蚀对黄土高原经济发展以及人民生活带来的巨大影响,本文采用自行研制的崩解仪进行室内崩解试验。基于崩解试验和扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)结果,通过对比原状、不同水泥掺量下黄土的崩解特性,分析崩解试验过程,探究 CIL 小抗崩解性的作用机制,选择改良黄土崩解性的最小掺量,以期实现崩解过程的细化和崩解性质的量化,并为防灾减灾工程提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

本研究采用的试验样品取自陕西省延安市。年平均降雨量为 560 mm,且具有短时强降雨特征,因此该地区土壤侵蚀严重,导致大面积的土地不连续和土质工程构筑物的破坏。在研究区取深度为 3.0~3.5 m 的浅层无根黄土样品,用保鲜膜和防震气泡膜密封完整,并小心运输到实验室。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),烘干法测定黄土的初始含水率(质量),环刀法测定黄土的密度,采用液塑限联合测定仪测定黄土的液塑限,确定黄土的基本物理力学参数(见表 1)。根据现行国家标准《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)的规定,选择 P. 042. 5 级普通硅酸盐水泥作为改良剂。

表 1 土样基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical property index of soil sample

初始含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度	孔隙比	界限含水率(质量)		
				液限/%	塑限/%	塑性指数
10. 11	1. 32	2. 70	1. 05	28. 1	17. 2	10. 9

1.2 土样制备

采用削样仪制备原状样品(直径 61. 8 mm、高 40 mm 的圆柱样品),根据《土工试验方法标准》

(GB/T 50123—2019)和《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011),在初始含水率下制备不同水泥掺量的黄土样品,具体流程包括以下几个

步骤。首先,对原状土样进行干燥、粉碎、筛分处理。其次,在干燥的土样中分别掺入 0%、1%、2%、3%、4%、6%、8% (质量) 的水泥充分拌合。12 h 后,配置最优含水率下的 CIL,密封混合 24 h 以上。最后,将闷料置于压样器中,压实度为 96%,获得尺寸为 61.8 mm × 40 mm 的圆柱体试样,将试样用保鲜膜包裹严实,放入 20 ℃ 保湿缸中养护 7 d。

1.3 试验方案

自浮筒式土壤崩解仪器提出以来^[18],为了更准确地进行定量研究,许多学者对崩解试验装置进行了不同程度的改进。目前,黄土崩解的定量研究方法主要有浮筒法和质量法。使用浮筒法,置换液的体积随着浮筒的上升而减小,因此在试验过程中难以获得准确的水位刻度值。使用质量法,将样品置于水中的过程会扰乱水平衡,影响读数精度,难以获得初始值。根据 Wang 等^[14]提出的一种新的崩解试验方法,即采用传感器代替浮筒连续、高精度地获取土壤样品质量的变化,同时观察试样的动态崩解过程,揭示试样的瞬时崩解速率,本研究试验装置(见图 1)包括崩解容器、吊篮、拉力传感器、固定框架、水槽、数据采集系统。试验开始时,利用水槽内水泵的压力向崩解容器内注水,同时保证了较短的注水时间,减少注水过程土样的损失。试验过程中土样的崩解现象由摄像机拍摄记录,数据采集端以 0.5 s 为间隔实时记录试验数据。当传感器示数保持稳定时,认为崩解完成。为了进一步探究 CIL 的崩解行为及演化机制,王任杰^[17]对最优含水率下直径 61.8 mm,高 40 mm 的原状黄土及掺量(质量,下同)为 0%、1%、2%、3%、4%、6%、8% 的 CIL 进行崩解测试,为保证试验数据的准确性,每组土样进行 3 次平行试验。

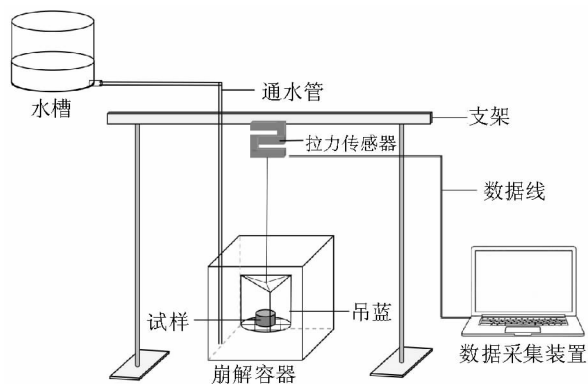


图 1 崩解装置示意图

Fig. 1 Diagram of disintegrating device

2 结果与讨论

2.1 CIL 崩解行为

原状土和改良土的崩解行为如图 2 所示,改良前后黄土样品随时间的崩解现象变化差异明显。原状土被水浸没后,可见大量气泡冒出,土颗粒随之脱离母体,呈云雾状、零散块状掉落,散入水中,直至崩解结束时,土颗粒吸水后重力大于浮力,缓缓沉淀至容器底部,容器内水再次恢复清澈。水泥掺量为 0%、1%、2% 的改良黄土崩解现象与原状土类似,均经历了完整的崩解阶段,但支架上剩余的最终质量有所递增。水泥掺量大于等于 3% 时,土样始终保持完整状态,因此崩解过程不完整。

试验过程中,通过传感器监测获得黄土的实时崩解试验结果(见图 3)。其中,黄土的典型崩解过程大致分为注水阶段(AC)、吸湿增重阶段(CD)、快速崩解阶段(DE)和稳定阶段(EF)4 个阶段,如图 3(a)所示。在第 1 阶段,所有样品的试验规律基本一致。除了原状样品会出现少量碎屑以外,其他土样的形态无明显变化。B 点时水接触土样,受毛细力影响,测量质量可能略有增加。B 点至 C 点,水从接触土样、浸没土样到一定高度停止注水,在此阶段储层浮力增加,使得测量质量呈线性下降。在第 2 阶段,土样不断吸水增重,且吸水量大于崩解量,所有试样的测量质量均有所增加。原状土样历时最短且吸水量最大,测得试样质量的增加率最大,而 CIL 历时长,吸水缓慢。在第 3 阶段,能够发生崩解的试样崩解量超过吸水量,崩解速率不断增加,测量质量呈非线性下降。但水泥掺量大于等于 3% 的试样未发生崩解,土样形态仍无明显变化。在第 4 阶段,由于崩解作用而悬浮于水中的土颗粒受到的重力大于浮力,缓缓落入容器底部,使得水恢复澄清。未发生崩解的试样无此阶段。所述原状黄土、不同水泥掺量下 CIL 崩解过程如图 3(b)所示。

综上所述,原状黄土最易发生崩解,最终崩解百分量(质量分数)达到 100%,其余最终崩解百分量分别为 98.6%、92.2%、88.4%。CIL 改变了黄土的崩解进程,使得水泥掺量大于等于 3% 时 CIL 不存在快速崩解阶段,说明水泥的掺入能够固化黄土,使其不发生崩解。

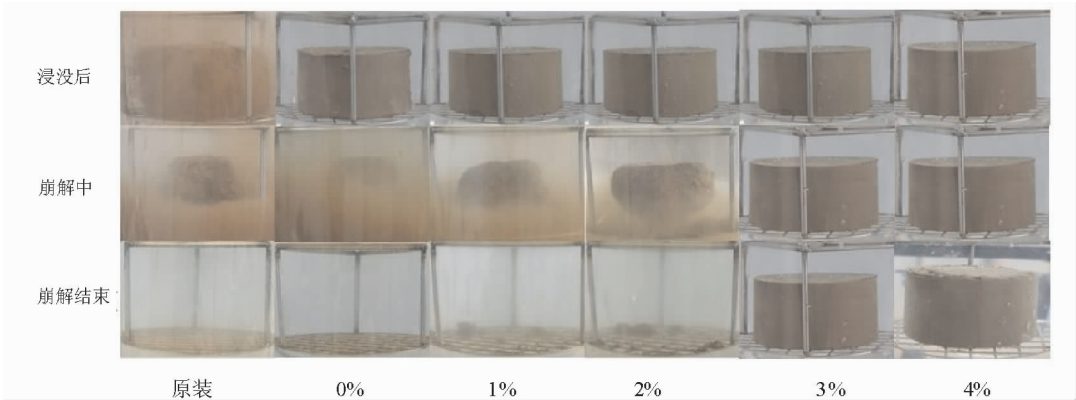


图 2 黄土崩解行为图示
Fig. 2 Diagram of loess disintegration

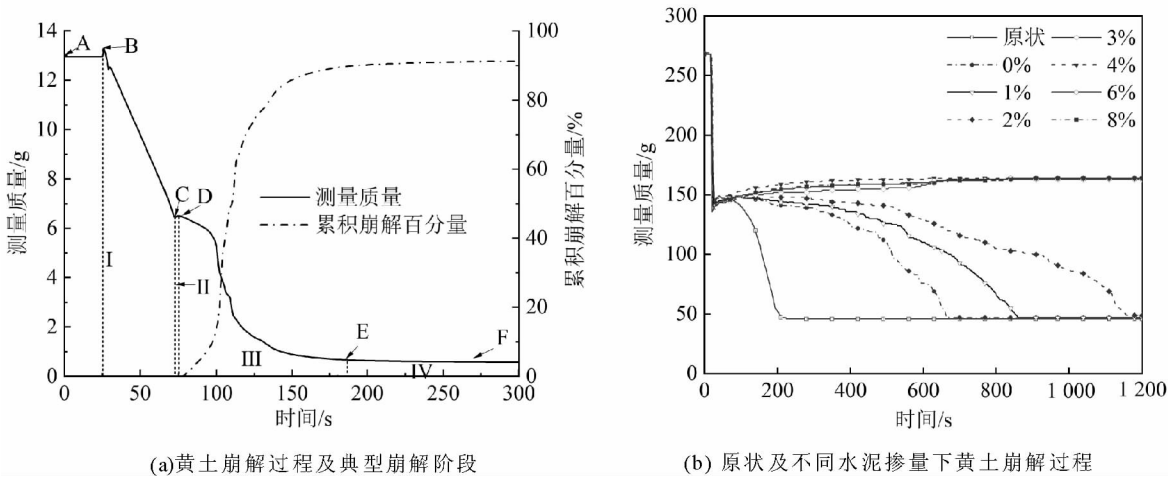


图 3 黄土崩解过程
Fig. 3 The process of loess disintegration

2.2 黄土崩解性指标

根据文献[14]提出的数据分析方法,有效降低了土样初始条件差异带来的误差。由于在大多数试验中 D 点前只发生了少量的崩解,因此本次假设注水阶段和吸湿增重阶段的崩解忽略不计,在崩解开始时试样达到饱和状态。因此从快速崩解阶段开始时刻[见图 4(a) 中 D 点]开始计算试样的崩解量。累积崩解百分量 (D_r) 的计算公式如下

$$D_r = \frac{m_D - m_{d1}}{m_D} \times 100\% \tag{1}$$

瞬时崩解速率 D_v 定义为连续 2 s 内的质量损失与 D 点的初始质量之比^[19],公式如下

$$D_v = \frac{m_{d1} - m_{d2}}{m_D} \times 100\% \tag{2}$$

式中: m_{d1} 为快速崩解阶段某一时刻的传感器测量质量; m_{d2} 为 2 s 后的测量质量; m_D 为吸湿增重阶段结束时刻的测量质量。

根据所有土样的崩解行为,能够发生崩解的原状黄土,0%、1%、2% 掺量下的水泥改良黄土(下文简称为崩解组)与掺量大于等于 3% 的 CIL(抗崩解组)的崩解过程和崩解现象有明显区别,同样两种类型黄土的崩解性指标也具有很大差异。例如,图 4 描述了崩解组的黄土崩解性指标,可见达到按时崩解和最大崩解百分量的时间随水泥掺量的增加而减小,最终累积崩解百分量均达到 80% 以上,时间在 200 ~ 1 200 s。而抗崩解组的累积崩解百分量和瞬时崩解速率几乎为 0,无法记录 CIL 的崩解发展过程,说明 1%、2% 水泥掺量对黄土的改良效果不明显,试样能够发生崩解,但对比图 4(a) 中图像可以看出,2% 掺量 CIL 的崩解残积物相对于零掺时有所增加,说明掺入水泥对黄土的崩解有抑制作用,但低掺量不能完全改良黄土性质。此外,未改良黄土达到瞬时崩解速率阈值大于含掺 CIL 达到瞬时崩解率阈值,且 $P1 > P2 > P3 > P4$, $T1 < T2 < T3 < T4$ [见图 4(b)]。

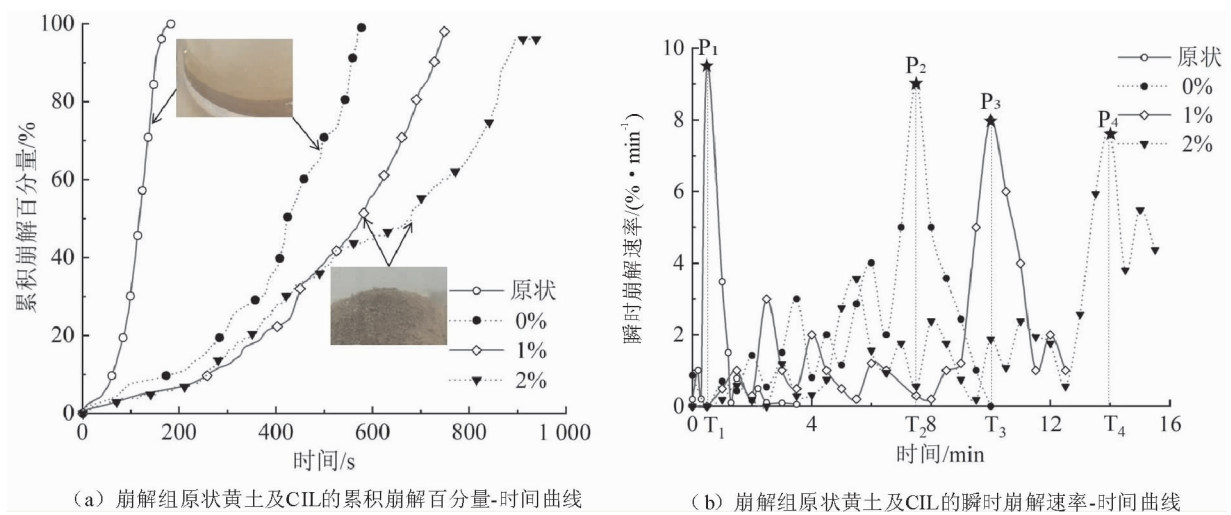


图 4 崩解组崩解性指标

Fig. 4 Disintegration index of disintegration group

崩解组与抗崩解组的崩解过程的区别主要体现在吸湿增重阶段和快速崩解阶段。对于崩解组,吸湿增重阶段历时较短,但吸水量较大,在快速崩解阶段,原状黄土对应的崩解速率明显更快,说明此阶段原状土样快速瓦解,大致历时 1 min。此外,相较于原状黄土,零掺时黄土的按时崩解百分量和崩解速率更小的原因可能是初始沉积时不均匀颗粒的随机排列,黄土结构存在非均质性,而重新排列使原来的亚稳结构转变为更均匀的结构,水稳性提高。瞬时崩解速率起伏变化较为缓慢,在崩解过程中后期显著增大。同时,加掺后黄土的按时崩解百分量明显较小,此阶段历时更长,整个崩解过程比较平缓。对于抗崩解组,由图 5 可见注水完成后测量质量曲线略有上升,说明浸水后水泥改良土一直处于吸湿增重阶段,崩解程度近似为 0。但伴随着水泥掺量的不断增加,吸水量略有增加,质量分数分别为 13.9%、14.7%、17.1% 和 22.1%,产生原因可能是水泥具有较好的亲水性,掺量增多吸引水泥与水发生水化反应。总体而言,3% 及以上的掺量均对本研究土样的崩解有明显抑制作用,经水泥改良后黄土的水稳性显著提高。

为了分析和量化水泥改良对黄土水稳性的影响,选出最小水泥掺量,对 0%、1%、2%、3%、4%、6%、8% 掺量下固定时间内 CIL 的累积崩解百分量阈值进行拟合。随着水泥掺量的不断增加,CIL 崩解速率近似线性递减(见图 6)。当水泥掺量为 2.85% 时,能够满足掺量最小,改良效果最好的情况,说明 3% 是研究区土样的最小改

良掺量。

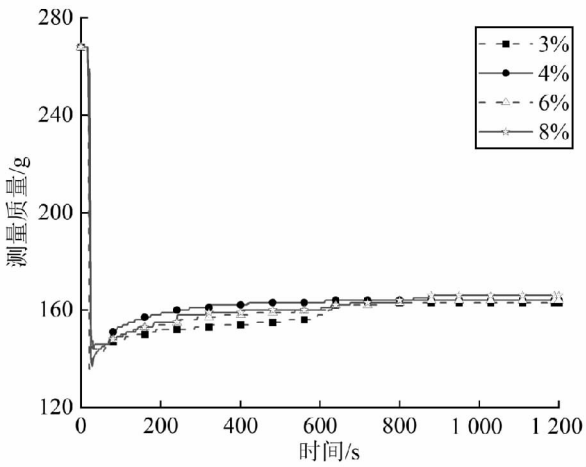


图 5 CIL 的崩解过程曲线

Fig. 5 Disintegration process curve of CIL

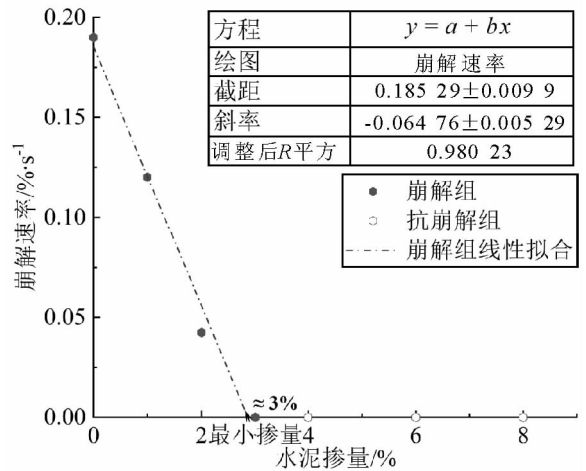


图 6 不同水泥掺量下 CIL 与崩解速率关系

Fig. 6 Relationship between CIL and disintegration rate under different cement content

2.3 CIL 抗崩解机制

黄土是一种多孔不连续介质,自然状态下受一定数量的胶结制约而保持亚稳结构^[20-21],因此遇水易发生崩解。水泥的固化作用可有效改善黄土的崩解性,素土和 CIL 的宏观崩解差异主要源于土体内部孔隙结构、颗粒形态和粒间胶结等微观结构表征。图 7 为水泥改良前后黄土试样的 SEM 图像,图 7(a)为零掺量黄土放大 500 倍图像,可见颗粒以多孔结构和架空体系为主,结构松散,孔隙连通性好。放大 2 000 倍后,土壤颗粒轮廓清晰可见,粒间联结多以点对点接触和点对面接触为主〔见图 7(b)〕。图 7(c)是 500 倍下的 CIL 图像,可见孔隙度降低,土颗粒呈现大颗粒浑圆状,水泥的掺入使粒间孔隙被填充,阻碍了水分的运移。图 7(d)中原有颗粒周围出现了许多微小晶体物质,这些与水泥的抗崩解性有重要联系。

黄土的崩解作用可描述为土样浸入水中时,水分迅速进入土壤孔隙,孔隙气体来不及全部排出,引起颗粒周围膨胀力逐渐增大。其次,土样内矿物成分与水反应产生膨胀力,加速黄土崩解。另外,水中的土颗粒受到浮重力,这些组成了黄土的崩解力。粒间胶结等结构吸力 f_s 和水分引起的湿吸力 f_w 组成了黄土的抗崩解力,当崩解合力

大于抗崩解合力时,黄土就会发生崩解。而水泥的抗崩解性主要展现在水泥的水解和水化反应以及黄土颗粒与水泥水化物作用上。

1)水泥的水解和水化反应。硅酸盐水泥通常由 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 及 SO_3 等组成,在加固土的过程中,这些氧化物通过水解和水化反应形成不同的水泥矿物^[17],这些水泥化合物通过相互黏合形成包裹土颗粒的网状结构,提高了土颗粒间的胶结力。此外,部分孔隙被水化和水解产物所填充,减小了孔隙气体引起的膨胀力,从而提升了土颗粒的水稳性。

2)黄土颗粒与水泥水化物作用。主要包括团粒作用、离子交换、硬凝反应、碳酸化作用等^[22]。由于土颗粒结构疏松,在掺入水泥这种碱性物质的情况下,离子交换使原来松散土颗粒凝聚呈团粒,使土颗粒联结更加紧密。随着反应程度的加剧,水化物在孔隙水和空气作用下凝固成水泥土,不易被水侵蚀。同时,加固过程中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中 CO_2 发生碳化反应生产不溶于水的 CaCO_3 。因此,水泥改良主要通过改变黄土结构^[23-24],使土颗粒联结更紧密,形成特殊的水泥改良土结构。

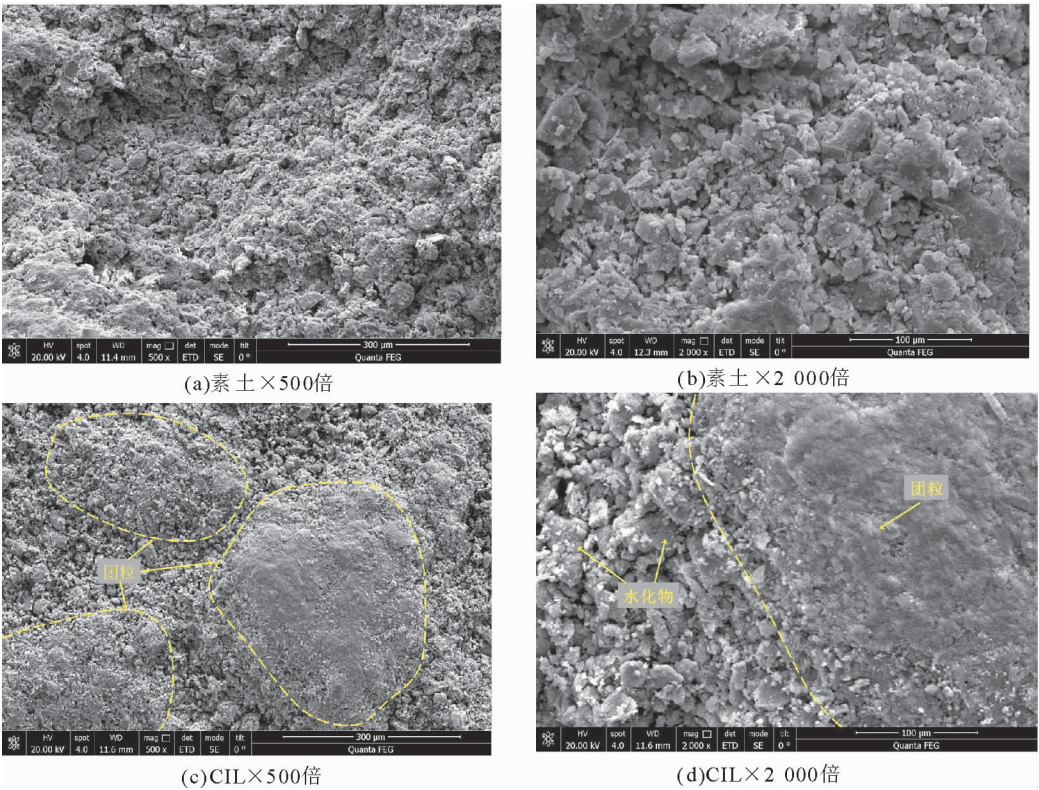


图 7 水泥改良前后黄土 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of loess before and after cement improvement

3 结论

为了进一步探究 CIL 的性质和机制,采用改进崩解试验装置对原状和不同水泥掺量下的改性黄土进行室内崩解试验,得出以下结论。

1)从 CIL 的崩解现象可知,0%、1%、2% 的 CIL 与原状黄土均具有完整的崩解过程(注水阶段、吸湿增重阶段、快速崩解阶段、稳定阶段),但 CIL 减缓了黄土的吸水进程,崩解历时更长。3% 及以上掺量的 CIL 崩解试验不存在快速崩解阶段和稳定阶段,说明水泥固化黄土的结构使其不发生崩解。

2)1%、2% 掺量下的 CIL 不能完全改良黄土性质,累积崩解百分量可达 80% 以上,但对黄土崩解有抑制作用。随着水泥掺量的增加,抗崩解效果越明显,瞬时崩解率阈值逐渐降低同时历时变长。抗崩解组累积崩解百分量几乎为 0,抗崩解的最小改良掺量为 3%。

3)CIL 主要通过物理和化学作用提高黄土的崩解性,水泥的掺入使粒间孔隙被填充,阻碍了水分的运移;此外,水泥的水解和水化反应以及黄土颗粒与水泥水化物作用产物增加了粒间胶结并填充了土体内部部分孔隙,从而提升了土颗粒的水稳性。

参考文献

- [1] LI P, XIE W L, PAK R Y S, et al. Microstructural evolution of loess soils from the loess plateau of China [J]. CATENA, 2019, 173: 276-288.
- [2] PENG J B, SUN P, IGWE O, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on loess plateau, northwestern China[J]. Engineering Geology, 2018, 236: 79-88.
- [3] 黄玉华,武文英,冯卫,等. 陕北延安“7.3 暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征[J]. 西北地质, 2014, 47(3):140-146.
HUANG Y H, WU W Y, FENG W, et al. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by heavy rain on July 3 in Yan'an, Shaanxi[J]. North-western Geology, 2014, 47(3): 140-146.
- [4] SECO A, RAMÍREZ F, MIQUELEIZ L, et al. Stabilization of expansive soils for use in construction[J]. Applied Clay Science, 2011, 51(3): 348-352.
- [5] DI SANTE M, FRATALOCCHI E, MAZZIERI F, et al. Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour[J]. Applied Clay Science, 2014, 99: 100-109.
- [6] MODARRES A, NOSOUDY Y M. Clay stabilization using coal waste and lime: Technical and environmental impacts[J]. Applied Clay Science, 2015, 116-117: 281-288.
- [7] 贾卓龙,晏长根,李博,等. 瓜尔豆胶固化纤维黄土的抗侵蚀特性及生态护坡试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1881-1889.
JIA Z L, YAN C G, LI B, et al. Experimental study on erosion resistance and ecological slope protection of guar gum-treated fiber-reinforcement loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10): 1881-1889.
- [8] MU J Q, ZHUANG J Q, KONG J X, et al. Study on improving loess properties with permeable polymer materials[J]. Polymers, 2022, 14(14): 2862.
- [9] ZHAO Y, ZHUANG J, WANG Y, et al. Improvement of loess characteristics using sodium alginate[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1879-1891.
- [10] HOU Y F, LI P L, WANG J D. Review of chemical stabilizing agents for improving the physical and mechanical properties of loess[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(12): 9201-9215.
- [11] NIU Y Q, HOU L Z, QIN Z P, et al. Mechanical properties and constitutive model of the cement-improved loess under freeze-thaw conditions[J]. Materials, 2022, 15(19): 7042.
- [12] JIANG Y J, LI Q C, YI Y, et al. Cement-modified loess base for intercity railways: Mechanical strength and influencing factors based on the vertical vibration compaction method[J]. Materials, 2020, 13(16): 3643.
- [13] 葛菲,巨玉文,蒋宗耀,等. 水泥硅微粉改良黄土的抗剪强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6565-6569.
GE F, JU Y W, JIANG Z Y, et al. Experimental research on shear strength of improved loess with cement and silicon micropowder[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6565-6569.
- [14] WANG J D, GU T F, ZHANG M S, et al. Experimental study of loess disintegration characteristics[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(6): 1317-1329.
- [15] 谷天峰,袁亮,胡炜,等. 黑方台黄土崩解性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 62-70.

GU T F, YUAN L, HU W, et al. Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44 (4): 62-70.

[16] 蒋应军,王翰越,乔怀玉,等. 水、干湿及冻融循环作用下水泥改良黄土路基稳定性[J]. 科学技术与工程,2020,20(35):14592-14599.

JIANG Y J, WANG H Y, QIAO H Y, et al. Stability of cement-modified loess subgrade under water, wet-dry and freezing-thawing cycles [J]. Science Technology and Engineering,2020,20(35):14592-14599.

[17] 王任杰. 水泥改良黄土的工程特性研究[D]. 兰州: 兰州大学,2021.

[18] SUN Y L, TANG L S, XIE J B. Relationship between disintegration characteristics and intergranular suction in red soil [J]. Sustainability, 2022, 14 (21): 14234.

[19] ZHANG W W, FAN N N, LI Y R, et al. Water-induced disintegration behaviour of Malan loess [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47 (8): 1891-1901.

[20] HAERI S M, KHOSRAVI A, GARAKANI A A, et al. Effect of soil structure and disturbance on hydromechanical behavior of collapsible loessial soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 17 (1): 04016021.

[21] ZHANG F Y, WANG G H, PENG J B. Initiation and mobility of recurring loess flowslides on the Heifangtai irrigated terrace in China: Insights from hydrogeological conditions and liquefaction criteria [J]. Engineering Geology, 2022, 302: 106619.

[22] WANG J D, PENG S J, XIE W L. Study on the cement-improved loess under the vibratory load by dynamic tests [J]. Advanced Materials Research, 2013, 838/839/840/841:1302-1308.

[23] JIANG Y J, YUAN K J, LI Q L, et al. Comparison of mechanical properties of cement-stabilized loess produced using different compaction methods [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 4835704.

[24] ZHANG W Y, GUO A B, LIN C. Effects of cyclic freeze and thaw on engineering properties of compacted loess and lime-stabilized loess [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9): 04019205.

(编辑 邵煜)