

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.06.009

# 羧甲基纤维素钠改良土强度影响因素研究

李 熙<sup>1</sup>, 江世雄<sup>1</sup>, 陈 垚<sup>1</sup>, 翁孙贤<sup>1</sup>, 王重卿<sup>1</sup>, 陈志波<sup>2,3</sup>,  
郭学文<sup>2,3</sup>, 戴梦兰<sup>2,3</sup>

- (1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;  
2. 福州大学 紫金地质与矿业学院 岩土与地质工程系, 福建 福州 350116;  
3. 智能环境岩土工程福建省闽台科技合作基地, 福建 福州 350116)

**摘 要:** 边坡防护工程中常使用无机胶凝材料(水泥、石灰等)作为黏合剂、固化剂以改善土体的力学性能,但无机材料的过度使用对自然生态环境带来巨大负担。羧甲基纤维素钠(CMC)是一种环境友好型生物高分子聚合物,同样具有改善土体结构、提高力学强度的性能。通过向粉质黏土中掺入 CMC,研究了 CMC 对黏性土的改良效果及规律。结果表明:在粉质黏土中加入 CMC 能有效提高其抗剪强度。对比了湿法和干粉两种处理方式,干法拌和直接掺入 CMC 后的改良土强度能获得更高的提升。研究了 CMC 掺入量、含水量、养护时间等对 CMC 改良土的影响;当 CMC 掺入量为 2%、控制含水率为 15% 时,对土体强度的提高幅度最大。

**关键词:** 改良土;羧甲基纤维素钠(CMC);直剪试验;抗剪强度

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)06—0055—06

## Strength Influencing Factors of Sodium Carboxymethyl Cellulose Modified Soil

LI Xi<sup>1</sup>, JIANG Shixiong<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>1</sup>, WENG Sunxian<sup>1</sup>, WANG Chongqing<sup>1</sup>, CHEN Zhibo<sup>2,3</sup>,  
GUO Xuewen<sup>2,3</sup>, DAI Menglan<sup>2,3</sup>

- (1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou, Fujian 350007, China;  
2. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;  
3. Fujian-Taiwan Science and Technology Cooperation Base of Fujian Province on Intelligent Geo-environmental Engineering, Fuzhou, Fujian 350116, China)

**Abstract:** Inorganic cementing materials (cement, lime, etc.) are often used as binder and curing agent in slope protection projects to improve the mechanical properties of soil, but the excessive use of inorganic materials brings great burden to the natural ecological environment. Sodium Carboxymethyl Cellulose (CMC) is an environment-friendly biopolymer with the same properties of improving soil structure and mechanical strength. In this study, the improvement effect and law of CMC on Silty clay were tested by adding CMC into the soil. The results show that adding CMC to the soil can effectively improve its shear strength. Compared with the two treatment methods of aqueous solution and dry powder mixing method, the strength of the modified soil after directly adding CMC dry powder can be improved. The effects of mixing amount of CMC, water content and curing time on the CMC modified soil were analyzed. When the content of CMC was 2% and the moisture content was controlled at 15%, the improvement of soil strength was the largest.

**Keywords:** improved soil; sodium carboxymethyl cellulose; direct shear test; shear strength

收稿日期:2022-07-17

修稿日期:2022-09-06

基金项目:国家电网公司总部科技项目“输变电工程余土处置与水土保持植被修复技术研究”(52130421000L)

作者简介:李 熙(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事电网建设水土保持与地质灾害防控研究。E-mail:lixifz@163.com

通讯作者:江世雄(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事电网环境保护和水土保持管理工作。E-mail:jiang01411@163.com

南方地区雨水丰沛,土体边坡受雨水侵蚀,容易发生水土流失,甚至引起坡体失稳,威胁人民群众生命财产安全。在边坡防护工程中常常采用无机胶凝材料作为黏合剂对土体进行改良,如水泥、石灰、粉煤灰等以提高土体力学性能<sup>[1-3]</sup>,但是仅从安全、经济的角度考虑来提高边坡稳定性,而忽视了其对生态环境的影响。

近年来,新型绿色建筑材料一直是工程界研究的热点,其中高分子聚合物在土体改良中的应用更是引起广泛关注<sup>[4]</sup>。高分子聚合物可使分散的土颗粒形成人工团粒并使天然团粒的稳定性提高,进而使土体的结构及其理化性质得到改善。其中,羧甲基纤维素钠(Sodium Carboxymethyl Cellulose,简称 CMC)是一种具有羧甲基结构的纤维素醚,是天然纤维素与氯乙酸经化学改性得到的一种高分子聚合物。CMC 来源丰富,容易被土壤中微生物所降解,且天然无害,因此,被不断应用于土壤改良。

众多学者对 CMC 作为土壤改良剂进行了研究。吴军虎等<sup>[5]</sup>发现在土壤中掺入 CMC 能有效增强水稳性团聚体含量,显著降低渗透性,增强土体的持水能力。裴向军等<sup>[6]</sup>研究经改性 CMC 加固后的砂土,其抗崩解性得到极大提高,且加固后的边坡径流产沙量也大幅降低。马奇等<sup>[7]</sup>在生土材料中加入 CMC,研究结果表明:CMC 能有效提高生土的无侧限抗压强度和劈裂抗拉强度。杨晴雯等<sup>[8-9]</sup>采用

CMC 加固黄土和粉砂土,能有效地提高土壤团粒结构、抗剪强度和冻融耐久性。杨钊等<sup>[10]</sup>研究发现利用 CMC 改性植被混凝土可以使基材延性增加,且能显著提高基材的黏聚力。Owji 等<sup>[11]</sup>在土样表面喷施 0.3% 浓度的 CMC 即有效地降低了风砂侵蚀造成的土壤流失量。

综上所述,羧甲基纤维素钠作为添加剂能有效地改良土体团粒结构,降低渗透性并且增强了力学强度。但目前的许多研究仅针对 CMC 改良土体的效果,而对 CMC 改良土体强度的影响因素及规律等没有进一步深入分析。如 CMC 的不同使用方法,CMC 易溶于水形成透明胶状液体,水溶液形式和干粉直接拌合的形式对改良效果是否存在影响等尚未厘清。本文拟在进行一系列 CMC 改良土室内直剪试验基础上,分析明确 CMC 配合方法、掺入量和含水率等因素对 CMC 改良土强度的影响规律,为工程应用提供借鉴。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

(1) 土料。试验所用土样来自于漳州长泰某特高压变电站边坡工程,属于凝灰岩残积土,定名为粉质黏土,其基本物理性质见表 1。将现场取回的土样,风干、碾碎并过 2 mm 标准筛,取小于 2 mm 颗粒用于试验。

表 1 试验用土样的物理参数指标

比重 $G_s$	颗粒组成/%			最大干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	最优含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	有机质含量 $w_p / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	pH 值
	砂粒	粉粒	黏粒							
2.61	57	30	13	1.64	22.1	37.5	24.5	13	23.63	4.17

(2) 羧甲基纤维素钠。羧甲基纤维素钠,其分子式为  $\text{C}_8\text{H}_{11}\text{O}_7\text{Na}$ 。试验所用 CMC 采购于郑州市郑氏中原纤维素有限公司,为白色粉末状天然纤维素,具有吸湿性、无毒性,溶于水后呈透明胶状液体。

### 1.2 试样制备及试验方法

综合前人研究,发现 CMC 的使用方法大致有两类,一类以干粉的形式直接掺入土壤中<sup>[7,12-15]</sup>,另一类以配制水溶液浓度的形式在土中喷洒搅拌<sup>[6,8-9]</sup>。因此,本研究中分别采用湿法拌合与干粉直接拌合两种处理方式对改良土的制备。干法拌合是将 CMC 直接以干粉的形式按照设计掺量(0.5%、1.0%、2.0%、4.0%、8.0%)与风干土样混合均匀后,用喷雾器喷洒至预计的加水量,再搅拌均匀后密封静置 24 h 备用。设置掺量为 0% 的未处理

土样进行对照。同时考虑到不同含水率对改良效果的影响,分别进行了 3 个含水率(15%、20%、25%)的处理试验。

土体的破坏实质上是抗剪力丧失的过程,土体抗剪强度反应的是土体抵抗剪切破坏的能力。根据直剪试验的结果,评价 CMC 对土体强度的改良效果并确定其最佳掺入比。直剪试验中 CMC 的掺入比和具体试验处理方案见表 2。同时,为了保证试验的准确性,每组试样制作 3 个。

表 2 试验方案

试验编号	配合方法	CMC 掺入比/%	含水率/%
A 组	湿法拌合	0.0,0.1,0.2,0.4	20
B 组	干法拌合	0.0,0.5,1.0,2.0,4.0,8.0	20
C 组	干法拌合	2.0,4.0,8.0	15,20,25

试样制备参照《土工试验方法标准》<sup>[16]</sup> (GB/T 50123—2019),将备用改良土放入模具中,采用静力压样法使试样达到设计干密度  $1.50 \text{ g/cm}^3$  (按天然土样最大压实度的 90% 设计),试样直径  $61.80 \text{ mm}$ 、高度  $20 \text{ mm}$ 。

考虑到 CMC 和土颗粒间的物理化学反应可能需要充分的时间才能稳定下来,因此,在确定 CMC 的最佳掺量后,研究养护龄期对最佳掺量下 CMC 改良土的强度变化规律。将制备好的试样密封后存放在室温下 ( $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ),养护 1 d、3 d、7 d 后进行直剪试验。

直剪试验采用 TKA-DDS-4F 全自动四联直剪仪进行,施加 4 级荷载  $100 \text{ kPa}$ 、 $200 \text{ kPa}$ 、 $300 \text{ kPa}$ 、 $400 \text{ kPa}$ ,采用快剪试验,应变速率为  $0.8 \text{ mm/min}$ 。

## 2 试样制备方法对改良效果的影响

本研究中采用了湿法拌合与干法拌合两种改良土样处理方式。A 组中采用湿法拌合,配制 0.1%、0.2%、0.4% 3 个 CMC 掺入比试样,所加水溶液经换算其中 CMC 浓度为 0.5%、1.0%、2.0%。为便于理解,下文中湿法拌合的 CMC 掺入比均以水溶液浓度进行表述。在前期的测试中配制了不同 CMC 浓度水溶液对土样进行处理,发现溶液 CMC 浓度过高会胶化而无法与土壤混合均匀,因此仅配制三个浓度 (0.5%、1.0%、2.0%),如图 1 所示。B 组中采用干法拌合配制了 0.5%、1.0%、2.0%、4.0%、8.0% 共 5 个梯度掺入到土壤中混合均匀,如图 2 所示。

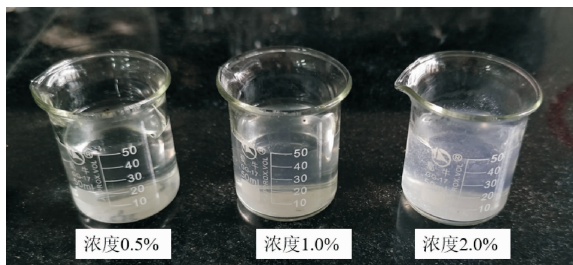


图 1 不同浓度的 CMC 水溶液

以  $200 \text{ kPa}$  法向应力下改良土的应力应变关系为例进行分析(其他法向应力下的应力应变关系曲线类同)。从图 3 可知,掺入 CMC 后土体的应力应变曲线仍然属于应变硬化型。相较于未处理土样,湿法拌合与干法拌合处理后的改良土其抗剪强度均显著提高。低掺量下 (0.5%、1.0%、2.0%) 采用干法拌合与湿法拌合对土体的改良效果较为接近,而高掺量下 (4.0%、8.0%) 采用干法拌合对土体抗剪

强度的提升幅度相对较大。从图 4 中的抗剪强度变化曲线也可以得出相同结论。

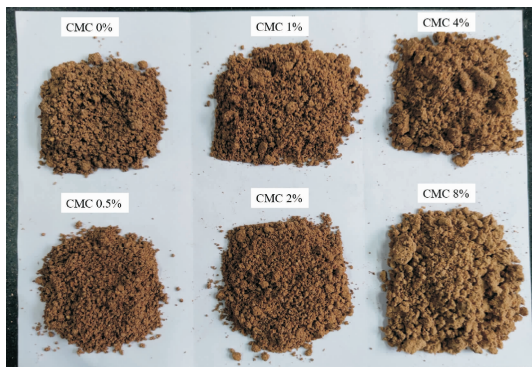


图 2 不同掺入量的改良土样

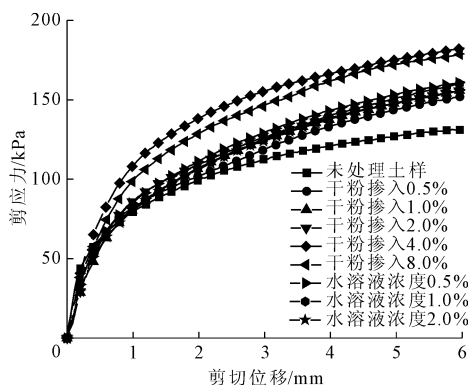


图 3  $200 \text{ kPa}$  法向应力下改良土的应力应变曲线

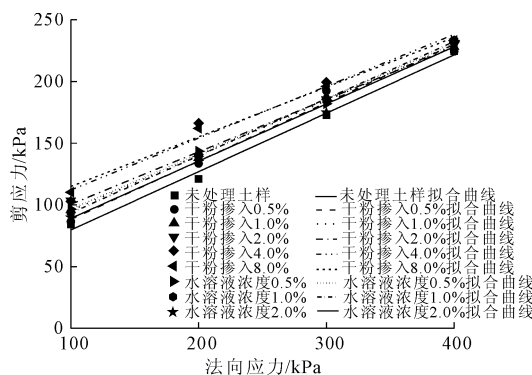


图 4 改良土的抗剪强度变化曲线

图 5 的试验结果表明,随着水溶液浓度的增加,改良土的黏聚力呈先增大后减小的趋势,在 0.5% 浓度时黏聚力最大;相对来说,内摩擦角无明显的变化。结合图 4,对比干法拌合、湿法拌合两种制样方法的处理效果,0.5% 浓度的 CMC 水溶液处理后的改良土样,其黏聚力为  $51.85 \text{ kPa}$ ,内摩擦角为  $24.10^\circ$ ;掺入 1.0% CMC 干粉拌合处理的改良土样,其黏聚力为  $50.85 \text{ kPa}$ ,内摩擦角为  $24.04^\circ$ 。两种处理方式的改良效果相当,0.5% 浓度的水溶液实际

CMC 使用量为 1.20 g, 而干法拌合掺入 1.0% 的 CMC 实际用量为 12 g, 使用量相差 10 倍。虽然相较于干法拌合, 湿法拌合的使用方法较为经济, 但存在局限性, 随着浓度过高改良效果反而不佳, 而掺入 8.0% CMC 干粉拌合处理的改良土样, 其黏聚力可提高到 2.31 倍。

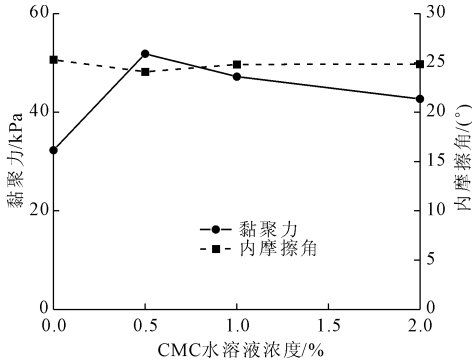


图 5 不同水溶液浓度的改良土抗剪强度参数

根据上述试验成果, 后续试验中的 CMC 改良土以干法拌合制备方法进行处理。

将 CMC 直接以干粉的形式按照设计掺量 (0.5%、1.0%、2.0%、4.0%、8.0%) 与风干土样拌合均匀后, 用喷雾器喷洒至预计的加水量时, 再搅拌均匀后密封静置 24 h 备用, 设置掺量为 0.0% 的未处理土样进行对照。

### 3 CMC 改良土强度影响因素分析

#### 3.1 掺入量对抗剪强度的影响

改良试样在不同 CMC 掺入量下的直剪试验结果如图 6、图 7 所示。

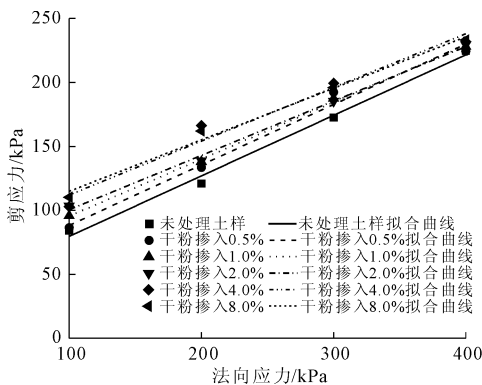


图 6 不同 CMC 掺量下的剪切强度变化曲线

图 6 试验结果表明, 在较低法向应力下 (100 kPa、200 kPa), CMC 对土体的增强效果较为明显, 峰值抗剪强度最高提升约 0.56 倍, 在较高法向应力 (300 kPa、400 kPa) 下, 峰值抗剪强度变化趋势不是

很显著。相较于未处理土样, 改良土样的强度有一定的提高。

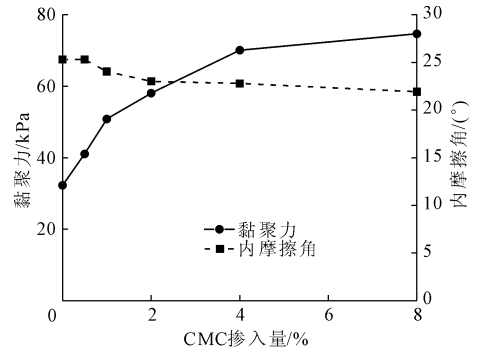


图 7 抗剪强度参数随 CMC 掺入量的变化曲线

从图 7 可知, 未经过处理的天然土样其黏聚力为 32.30 kPa, 改良土样的黏聚力随着 CMC 掺入量的增加而不断提高, 黏聚力最大可提高到 2.31 倍。8.0% 改良土样较 4.0% 改良土样黏聚力的增幅仅为 3.55 kPa, 可见掺入量对黏聚力的影响效果有限, 随着掺入比例的提高, 黏聚力的增长速度有所减缓。改良土样的内摩擦角随着 CMC 掺入量的增加有小幅度降低, 可能是由于掺入量的增加使得颗粒间团聚胶结不断形成大团聚体, 改变了土体的颗粒级配, 从而体积膨胀减少了颗粒间的相互接触导致内摩擦角降低。

#### 3.2 含水率对改良效果的影响

C 组中针对 2.0%、4.0%、8.0% 三种掺入量分别配制成 15%、20%、25% 三种含水率的改良试样, 直剪试验结果如图 8、图 9 和图 10 所示。

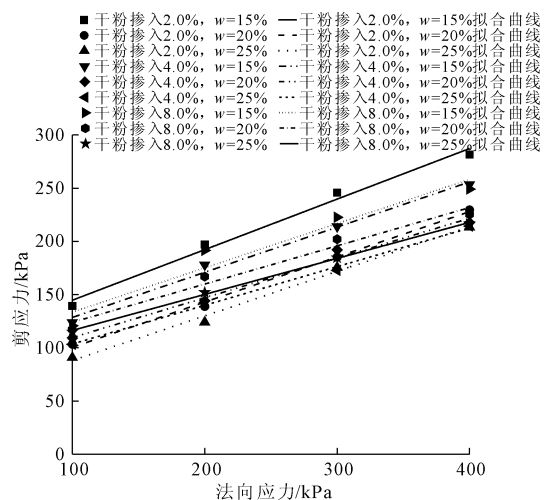


图 8 不同含水率下改良土的抗剪强度变化曲线

图 8 的抗剪强度变化曲线反映出, 在相同的含水率下, 随着 CMC 掺入量的增加, 改良土的强度有

一定的提高;随着含水率的增加,改良土的抗剪强度有所下降,且低掺量下改良土抗剪强度的降低幅度相对较大;含水率为20%、25%时,随着掺量的增加,其抗剪强度也随之增加,但在15%的含水率下趋势发生改变,低掺量的改良土抗剪强度反而较高。

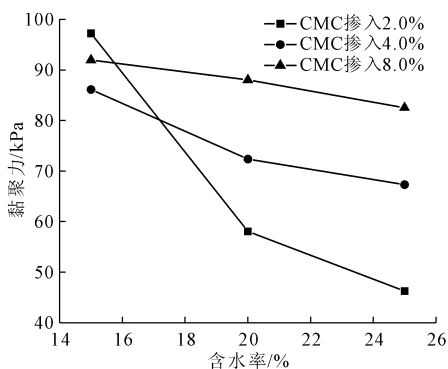


图9 含水率对改良土黏聚力的影响

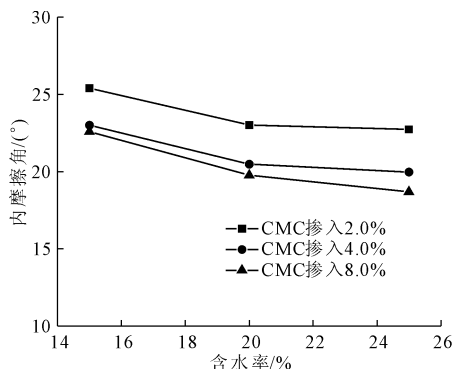


图10 含水率对改良土内摩擦角的影响

从图9、图10可知,在相同的CMC掺入量下,随着含水率的增加,其黏聚力和内摩擦角都随之降低,且对黏聚力的影响远大于内摩擦角。整体抗剪强度受含水率的影响较大,2.0%掺量下的变化最为显著,含水率为15%时的黏聚力是含水率为25%时的2.10倍,内摩擦角降低了约10%。在高含水率下(20%、25%),随着CMC掺入量的增加其黏聚力均能明显地得到提高,而内摩擦角的变化趋势趋于平缓;在低含水率下(15%),随着CMC掺入量的增加,黏聚力和内摩擦角均出现下降的趋势。这是因为,CMC加固土体的方式主要是通过与水结合形成凝胶覆盖在颗粒表面形成包裹结构,并将颗粒黏结起来,从而增强了土体的力学性能<sup>[6,11]</sup>,CMC与土体中水分的结合,一定程度可以影响到改良效果。随着掺入量的增加,一方面可能是掺入比例过多造成部分CMC干粉未能在土中分散均匀,抱团后与水结合胶化并吸附周围的细小土颗粒形成的大团聚体

(如图2所示),内部的CMC未能与水分的接触,使得掺入的干粉未能完全反应;另一方面可能是CMC具有很强的保水性,其吸水倍率达到几十倍、几百倍,相对于强大的吸水潜力,土体中的水分远远不足,这就导致当CMC掺入比例过大时,其改良效果出现了一定的降低<sup>[13]</sup>。

通过以上分析,可以认为,当CMC掺入量为2.0%、含水率为15%时,对土体强度的提高幅度最大,是最优的改良土处理方案。

### 3.3 养护时间对改良效果的影响

依据上文确定的最佳掺量2.0%及控制含水率15%配制改良土样,将制备好的试样密封后存放在室温下( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ),养护1 d、3 d、7 d后进行直剪试验。

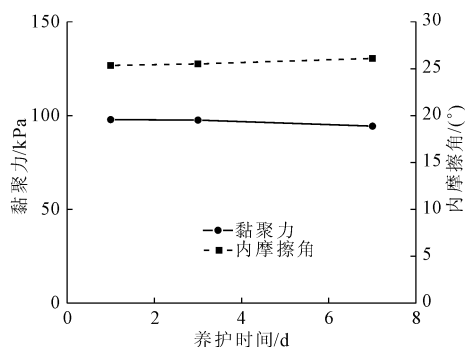


图11 CMC掺入量为2%的改良土抗剪强度参数随养护时间的变化曲线

CMC固化土的作用机理是通过CMC颗粒溶于水后快速转化成凝胶使分散的土颗粒间产生一定的粘结力,由小颗粒组合成大团聚体在一定外界压力下可体现为黏聚力的提高,这一过程中并未生成新的物质。从图11可知,随着养护时间的推移,改良土的黏聚力有一定减小,养护1 d后黏聚力为97.85 kPa,养护7 d后黏聚力为94.40 kPa;内摩擦角则有一定提高,养护1 d后内摩擦角为25.35°,养护7 d后内摩擦角为26.1°。这是因为CMC虽然可以结合土壤中的水分阻碍其蒸发,但是随着CMC被微生物降解水分又会重新释放到土壤中<sup>[5]</sup>。土中含水率的轻微变化引起黏聚力出现少许下降。而由于CMC降解后,土颗粒间重新排列增加了咬合使得内摩擦稍微提高。整体上来看,养护时间对改良土的影响很小,整体抗剪强度并无显著的变化。

## 4 结论

(1) 在土体中加入羧甲基纤维素钠(CMC)能

有效提高其抗剪强度。不同制备方法对 CMC 改良土有很大的影响,湿法拌合处理的改良土样,CMC 实际用量更少,强度提升有限;干法拌合处理的改良土样,强度能获得更高的提升。

(2) 随着 CMC 掺入量的增加,改良土抗剪强度得到一定的提高,在低法向应力下强度提升更为显著,黏聚力最大可提高到 2.31 倍,而内摩擦角出现小幅降低。

(3) 含水率是影响 CMC 改良效果的重要因素。在相同的含水率下随着 CMC 掺入量的增加,改良土的强度有一定的提高;随着含水率的增加,改良土的抗剪强度有所下降,可能是由于 CMC 用量过大时土中水分不足以使其完全反应。当 CMC 掺入量为 2.0%、设计含水率为 15% 时,对土体强度的提高幅度最大,是最优的改良土处理方案。此外,CMC 与土中水分的结合速度很快,养护时间的长短基本无影响。

#### 参考文献:

- [1] 曹智国,章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3446-3454.
- [2] 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.
- [3] 阮 波,彭学先,邓林飞. 水泥土抗剪强度参数试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(4):662-668.
- [4] 陈义群,董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境,2008,17(3):1282-1289.
- [5] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(2):117-123.
- [6] 裴向军,杨晴雯,许 强,等. 改性钠羧甲基纤维素胶

结固化土质边坡机制与抗冲蚀特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(11):2316-2327.

- [7] 马 奇,马宏旺,杨 朔,等. 羧甲基纤维素钠改性生土力学性能研究[J]. 新型建筑材料,2016,43(12):60-62,83.
- [8] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固粉砂土水稳性及稳定机理分析[J]. 长江科学院院报,2019,36(12):107-112,120.
- [9] 杨晴雯,裴向军,黄润秋. 改性钠羧甲基纤维素加固土冻融性能及损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S1):3102-3113.
- [10] 杨 钊,王晓梅,周云艳. 改性植被混凝土基材力学与植生试验研究[J]. 安全与环境工程,2022,29(1):225-233.
- [11] Owji R, Habibagahi G, Nikooee E, et al. Wind erosion control using carboxymethyl cellulose: From sand bombardment performance to microfabric analysis[J]. Aeolian Research, 2021,50:1-13.
- [12] 哈丽代姆·居麦,宁松瑞,王全九,等. 施加 PAM 与 CMC 对土壤水分入渗与蒸发特征的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(1):121-127,134.
- [13] 喜银巧,赵 英,李生字. 三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报,2018,55(6):1401-1410.
- [14] 杨世琦,邢 磊,刘宏元,等. 羧甲基纤维素钠对黄土高原新造耕地土壤改良效果[J]. 中国农业大学学报,2021,26(4):185-191.
- [15] 单鱼洋,马晨光,王全九,等. 羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响[J]. 土壤学报,2021:1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210511.1334.002.html>.
- [16] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

(上接第 54 页)

- [9] 郑颖人,邱陈瑜. 普氏压力拱理论的局限性[J]. 现代隧道技术,2016,53(2):1-8.
- [10] Abdollahi M S, Najafi M, Bafghi A Y, et al. A 3D numerical model to determine suitable reinforcement strategies for passing TBM through a fault zone, a case study: Safaroud water transmission tunnel, Iran[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,88:186-199.
- [11] 党亚山. 复杂断裂带引水隧洞围岩稳定分析及处理措施[J]. 西北水电,2022(1):64-68.
- [12] 邓通海,邓 辉,张 咪,等. 引水隧洞穿越大型断裂

带围岩力学响应[J]. 水电能源科学,2017,35(3):108-112.

- [13] 王 达,石文广,王志云,等. 穿越不良地质段的长距离深埋输水隧洞纵向变形数值分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43:95-101.
- [14] 王淑娟. 跨断层深海隧道衬砌变形规律及加固措施研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):67-75.
- [15] 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范:GB 50086—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015:55-65.