

文章编号: 1007-2993(2023)02-0220-06

利用土壤隔水聚凝剂处理盐渍土的试验研究

陈超¹ 郑卫华¹ 杨雄² 张琳¹ 李权裕¹

(1. 兰州倚能电力(集团)有限公司, 甘肃兰州 730071; 2. 西安卓力科技发展有限公司, 陕西西安 710018)

【摘要】 兰州新区变电站场坪普遍存在膨胀问题, 导致邻近的混凝土道路开裂, 影响变电站的正常运行。在详细分析当地土壤性质的基础上, 采用新型土壤隔水聚凝剂处理土体, 对比空白组, 测试处理后土体的吸水率、吸水膨胀率、无侧限抗压强度及软化系数。研究表明, 土壤隔水聚凝剂的掺加能够显著提高土体的气干无侧限抗压强度、浸水 24 h 的无侧限抗压强度和软化系数, 降低吸水率及吸水膨胀率, 从而提高了土体的耐水性, 应用于工程可有效降低水分的渗入, 降低该类工程中膨胀问题的发生率。

【关键词】 盐渍土; 膨胀; 隔水聚凝剂; 耐水性

【中图分类号】 TU 475; TU 41

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.02.015

Treatment of Saline Soil with Soil Water Isolating Coagulant

Chen Chao¹ Zheng Weihua¹ Yang Xiong² Zhang Lin¹ Li Quanyu¹

(1. Lanzhou Yineng Power (Group) Co., Ltd., Lanzhou 730071, Gansu, China;

2. Xi'an Zhuoli Technology Development Co., Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China)

【Abstract】 Expansion problems occurred in many electricity substation yard site in Lanzhou, which caused severe cracking of adjacent concrete road and affected the operation safety of the substation. A new soil water isolating coagulant (SWIC) was used to solve such problems. The water absorption, expansion in water, unconfined compressive strength, and softening coefficient of the specimen added different dosage of SWIC were tested after curing for 7 days. The results show that the addition of SWIC can significantly improve the unconfined compressive strength, whether air dried or immersed in water for 24 h. The softening coefficient which indicate the water resistance was improved, and the water absorption, water expansion were reduced. The infiltration of water and expansion problems can be effectively reduced as it was used in engineering.

【Key words】 saline soil; expansion; soil water isolating coagulant; water resistance

0 引言

受气候因素与地理条件的影响, 我国盐渍土分布广泛, 由南向北遍布于全国各个区域, 占比达 9.6%^[1-2]。内陆地区盐渍土主要分布在西北地区, 干旱—半干旱环境所形成的温差和蒸降比大, 造成硫酸盐含量相对较高, 极易发生盐胀灾害^[3]。甘肃省土体所含主要盐分为钠硫酸盐, 钠镁氯化物, 埋深 1 ~ 2.5 m^[4]。兰州新区正处于这一区域, 土质复杂, 土壤可溶性盐类含量较高。随着季节交替和温度变化, 土体经过冻融循环后, 在温差与水分的共同影响下, 土体中低温处的盐溶液随着水分迁移而到达饱和状态, 大量盐分结晶析出, 导致土体产生盐胀现象^[5]。随着气候变暖、雨线北移, 降水量的增大, 在兰州新区变

电站场坪工程中, 普遍出现了此类问题。场坪施工通常为灰土夯实, 在重要部位会使用泥结石铺筑, 这些处理方式均未能避免场坪产生盐胀现象。

为解决此类问题, 考虑通过加入土壤固化类外加剂来提高土体特性。使用这类方法处理土体, 提高土体性能始于 20 世纪初, 20 世纪 70 年代在欧美等发达国家已经有了较为广泛的应用^[6]。我国学者在国外研究成果的基础上, 对此开展了一系列研究^[7-9]。土壤固化剂依据其作用机理主要可以分为离子类、无机类、有机类、生物酶类以及有机无机复合类^[10], 不同种类的土壤固化剂作用效果不尽相同。土的种类繁多, 物理、化学性质千差万别, 因此在选用固化外加剂时需综合考虑工程要求和土质条件。我国学

作者简介: 陈超, 男, 1971 年生, 汉族, 陕西人, 硕士, 经济师, 主要从事地基处理方面的工程与研究。E-mail: superch2022@163.com

者对不同土质做了大量研究,但尚未利用土体固化类外加剂解决盐渍土盐胀问题。

使用 SDS 型隔水絮凝剂处理土体,将土壤隔水絮凝剂应用于盐渍土,通过测定土体压实后的密度、自由吸水率、压实后浸水膨胀率、强度及软化系数,分析处理盐渍土解决土体膨胀问题的使用效果,为其工程应用提供基础数据。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

土壤隔水絮凝剂:考虑场坪的膨胀主要与水分渗入有关,选用陕西某公司生产的 SDS 型隔水絮凝剂处理土体,该产品是传统离子类土壤固化剂的升级产品,由 A、B 两种组分构成,同时具有提高土体工程力学特性与耐水性的功能。使用时先将 A、B 组分按比例加入水中混匀,喷洒到土中至最优含水率,并搅拌均匀后再碾压夯实。

试验土样:取自兰州新区发生膨胀的两处变电站,编号为 S-1、S-2。

纤维:聚丙烯纤维,长度为 6 mm。

1.2 试验设计

利用 SDS 土壤隔水絮凝剂处理土体,为考察 SDS 中不同组分对土体性能的影响,达到最佳的使用效果,调整土壤隔水絮凝剂 A、B 组分比例与掺量,将原土以及加入土壤隔水絮凝剂的土按照最优含水率加水,在恒定压力下,制成 $\phi 50 \times 50$ mm 的圆柱体试件。在出现工程问题的不同区域取两种土样(S-1 与 S-2),分别掺加不同掺量 SDS 的 A、B 组分及纤维,设计 7 组配比(见表 1),共 14 组试样,分别为 S-1-B 空白组以及 S-1-I、S-1-II、S-1-III、S-1-IV、S-1-V、S-1-VI 组,S-2-B 空白组以及 S-2-I、S-2-II、S-2-III、S-2-IV、S-2-V、S-2-VI 组,其中为改善土体的抗裂性,S-1-V、S-1-VI、S-2-V、S-2-VI 分别添加 0.1%(质量掺量)的聚丙烯纤维。

表 1 土样中 SDS 不同组分掺量 %

组分	空白组	I	II	III	IV	V	VI
A	0	0.06	0.08	0.06	0.08	0.06	0.08
B	0	0.80	0.80	1.10	1.10	0.80	1.10
纤维	0	0	0	0	0	0.1	0.1

1.3 试验方法

将制成的圆柱体试件,在 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度 50% 条件下,养护至 7 d 龄期,此时试件的含水状态认为是气干状态。

吸水率^[11]:将试件置于恒温干燥箱中,在 60°C 条

件下烘干至恒重,称量其质量,浸没于 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 水中 24 h 后,取出试件,擦干表面水分,称量其质量,计算其吸水率。

无侧限抗压强度与软化系数:养护 7 d 后,测定气干状态试件的无侧限抗压强度;将养护 7 d 后的试样浸没于水中,24 h 后,擦干表面水分后测定其无侧限抗压强度,作为试件的浸水 24 h 无侧限抗压强度;浸水 24 h 无侧限抗压强度与气干无侧限抗压强度之比作为试件的 24 h 软化系数,用以表征土壤隔水絮凝剂处理后试件的耐水性。

浸水自由变形:将养护 7 d 的试样进行切削后,置于固结仪上,在不施加荷载的情况下,测定其 24 h 浸水自由变形情况,用膨胀率表示,如果收缩,则表示为负值。

2 试验结果与分析

2.1 土样分析

现场取样发现,场坪表面膨胀隆起的部分土质疏松,为使所取土样具有代表性,去除表层 10 cm 浮土后取土并烘干。

(1) 颗粒分析

利用 Bettersize2000 激光粒度分布仪对土样进行颗粒分析,结果见图 1。由图 1 可以看出,S-1 小于 $5 \mu\text{m}$ 的黏粒组颗粒占比为 17.9%,S-2 小于 $5 \mu\text{m}$ 颗粒占比为 16.6%。S-1 与 S-2 的不均匀系数 C_u 分别为 13.8、12.1, C_u 均大于 10;曲率系数 C_c 分别为 1.69、1.70,在 1~3 之间。表明土颗粒级配良好。

(2) 矿物成分分析

利用荷兰帕纳科 EMPYREAN 型 X 射线衍射仪对所取土样进行矿物成分分析,结果见图 2。可知 S-1 土样与 S-2 土样类似,颗粒的矿物成分除石英外,主要为多硅锂云母、白云石等。云母是钾、铝、镁、铁、锂等金属的铝硅酸盐,属层状结构,单斜晶系。层状结构的矿物构成了层状结构的伊利石,是本土样的主要特征。无弯曲薄片状颗粒伊利石,其形态与蒙脱石类似,但膨胀性较蒙脱石弱,甚至无膨胀性^[12]。

(3) 可溶性氯盐、硫酸盐含量分析

分别在表层(5 cm)与下层(地面下 20 cm 处)取 10 g 土样,加水至 50 mL,浸泡 24 h 后,过滤,测试滤液中阴离子浓度,单位为 mg/L。所测结果换算为每 kg 土中可溶性 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量,单位为 mg/kg(见表 2)。

盐渍土评价准则是易溶性盐浓度超过 0.3%^[13],由表 2 可见所取土样均为典型盐渍土。一般硫酸盐类盐渍土是指氯-硫酸盐渍土($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 为 1~0.3)硫酸盐渍土($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 0.3$)^[14-15],结合表 2 的测定数据可知,除 S-1-1 表层 Cl^- 含量偏多,其余均属于硫酸盐

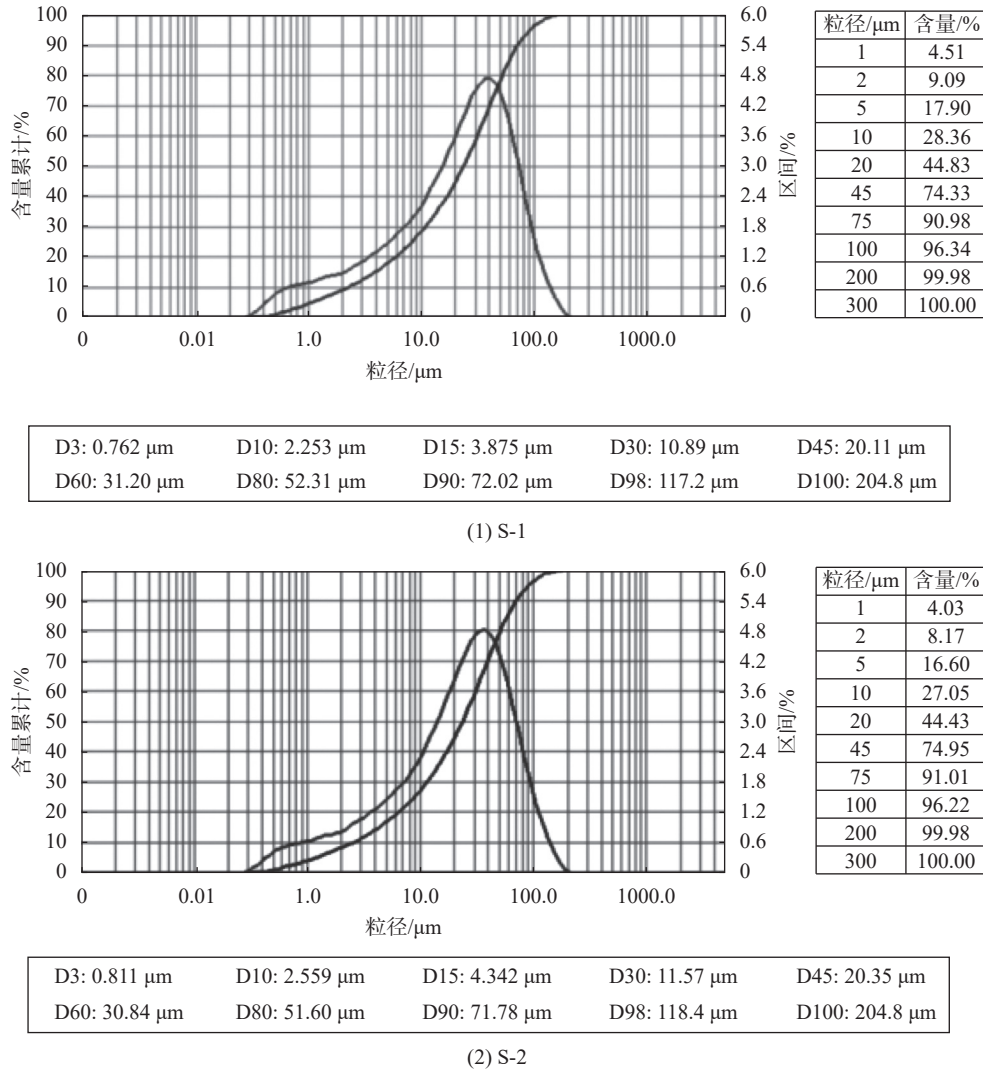


图1 土样的颗粒分析结果

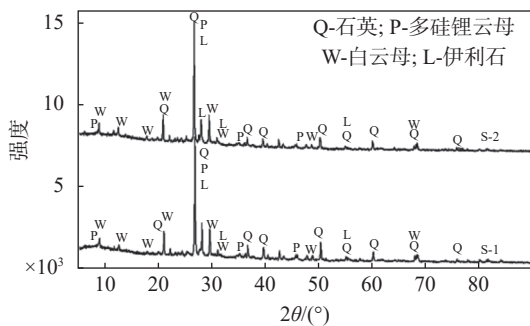


图2 土样的矿物成分分析结果(XRD)

渍土。硫酸盐类盐渍土最主要的特性是结晶时要结合一定数量的水分子,这类硫酸盐在干燥状态时并无吸水性,但遇水后会慢慢吸湿、溶解,最后呈溶液状;从溶液中再结晶沉淀时便要吸收相应的水分子成结晶水,体积增大而使土体产生膨胀,如硫酸钠 10 个结晶水的介入会使体积膨胀至原体积的 3.11 倍,回到干燥状态时结晶水释出,呈无水状态,即为松胀现

表2 可溶性 Cl⁻、SO₄²⁻含量

序号	Cl ⁻ /(mg·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg·kg ⁻¹)	Cl ⁻ /%	SO ₄ ²⁻ /%
S-1-1(表层)	13015	27340	1.30	2.73
S-1-2(下层)	912	4592	0.09	0.46
S-2-1(表层)	2989	27880	0.30	2.79
S-2-2(下层)	204	6150	0.02	0.62

象^[15]。硫酸盐渍土的膨胀量受季节影响,温度降低往往引起较深范围土层中硫酸盐吸水结晶“体积增大”,看似为土体聚冰冻结,实则为盐胀,盐胀多与水分参与密切相关。

由表2可见,S-1与S-2位置所取土样中,上层与下层土样可溶性氯离子和硫酸根离子含量具有明显差异,上层含量明显高于下层,为下层含量的4~6倍,表明可溶性盐分随着水分迁移到表层土体,在表层引起更为明显的盐胀现象。

2.2 气干无侧限抗压强度

将制备的圆柱体试件养护 7 d 后, 测试其无侧限抗压强度, 测试结果见图 3。由图 3 可以看出, 加入土壤隔水聚凝剂后, 相对于空白组(B), 7 d 无侧限抗压强度均有大幅度提高。

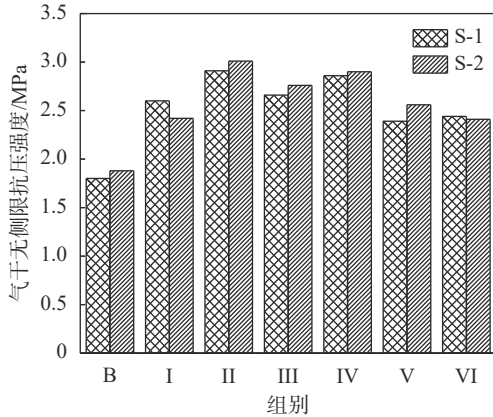


图 3 气干无侧限抗压强度

两个土样利用土壤隔水聚凝剂处理后, A 组分掺量较高的 II、IV 组的无侧限抗压强度高于掺量较低的 I、III 组, S-1、S-2 土样掺加后均呈现出相同的规律。但掺加纤维后, S-1-V 与 S-1-VI 相比、S-2-V 与 S-2-VI 相比, 随 A、B 组分增加, 无侧限抗压强度呈现出不同的变化规律, 由于两个土样原土成分与级配等参数差异性较小, 考虑其为试验误差, 这也说明, 纤维的掺加, 增加了试验误差的产生概率, 在工程中可能会影响土体的夯实。

对比 A 组分掺量相同、B 组分掺量不同的各组试样的无侧限抗压强度, 发现 S-1-III 高于 S-1-I, S-1-IV 高于 S-1-II, 但较为接近; S-2-III 高于 S-2-I, 而 S-2-IV 低于 S-1-II, 但数据也相差不大。表明 B 组分掺量增加, 对气干强度有一定的促进作用, 但作用效果不明显。

V、VI 组是在 I、IV 组的基础上掺加了纤维, 由图 3 可以看出纤维掺加后, 7 d 无侧限抗压强度均有了一定程度的降低, 表明纤维的掺加, 对气干强度无益。

2.3 试件浸水后的吸水率、强度与软化系数

将养护 7 d 的试样烘干至恒重, 浸水 24 h 后, 原土制备的试样已经崩解, 无法取出, 见图 4(a)。其余试件(隔水聚凝剂处理后的试件)取出并擦干表面水分, 称量其质量, 计算其吸水率, 结果见图 5。

由图 5 可见, 掺入不同掺量土壤隔水聚凝剂的土样, 在水中浸泡 24 h 的吸水率均在 15% 以内, 其中 A、B 组分掺量均较多的 S-1-IV 与 S-2-IV, 吸水率均降至 10% 以内。而对比不掺加的土样, 在测试过



(a) 水中浸泡 24 h



(b) 无侧限抗压强度试验

图 4 吸水率及强度测试试验

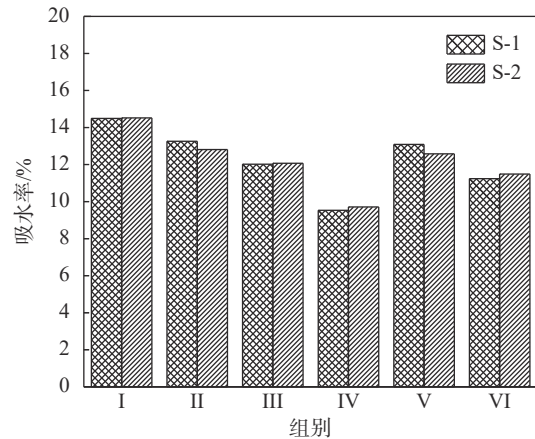


图 5 吸水率

程中均产生了崩解, 吸水率甚至无法测定。说明了土壤隔水聚凝剂对于土体在水中吸水导致承载力丧失的性质有很大程度的改善。

试件养护 7 d 后并在水中浸泡 24 h 后, 擦干表面水分, 测定其浸水后的无侧限抗压强度。图 4 为试验照片, 图 6 为浸水 24 h 无侧限抗压强度。据图 4, 未加土壤隔水聚凝剂的试件浸水 24 h 后均发生崩解, 而掺加了土壤隔水聚凝剂的试样均未崩解。

据图 6, 浸水 24 h 后, 使用土壤隔水聚凝剂处理后的土体仍具有较好的承载能力。对比发现, A 组分掺加量相同的 I、III 组, B 组分掺加量较高的 III 组浸水强度较高; A 组分掺加量相同的 II、IV 组, B 组分掺加量较高的 IV 组浸水强度较高, S-1、S-2 土样呈相同规律。表明 B 组分掺量的增加, 能够有效提高土

体的耐水性能。同时, A 组分和 B 组分掺量均较高的 IV 组浸水强度最高, 表明 A、B 组分掺量均较高时, 二者互相促进, 能够达到更好的耐水性。

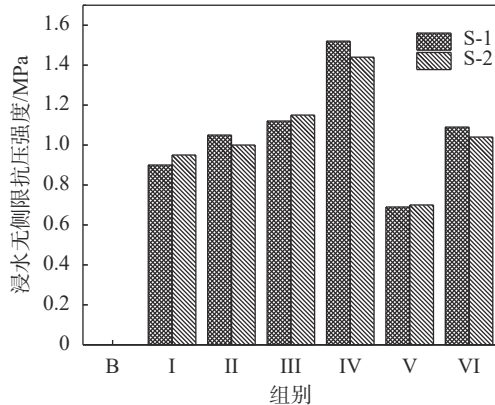


图 6 浸水 24 h 无侧限抗压强度

参加了纤维的 V、VI 组强度均低于相同土壤隔水聚凝剂掺量的土样, 表明纤维的参加不能提高土体的浸水无侧限抗压强度, 反而会使之有所降低。

为更好地表达土壤隔水聚凝剂处理后土体的耐水性, 计算其浸水 24 h 后无侧限抗压强度与气干无侧限抗压强度的比值作为 24 h 软化系数(见图 7)。

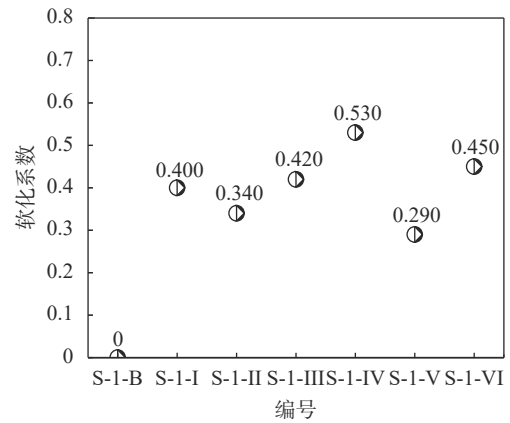
据图 7, A 组分掺量相同的 I 与 III 组、II 与 IV 组, 可以看出提高 B 组分的掺量, 软化系数均提高, A、B 组分掺量均较高的 IV 组耐水性最好, 软化系数达 0.50 以上。B 组分掺量相同的 I、II 组对比, 软化系数 II 组低于 I 组, 这可能是由于 A 组分掺量较高的 II 组, 气干强度较高; 但当 A、B 组分的掺量均提高后, IV 组的软化系数高于 III 组, 说明 A、B 掺量均提高到一定程度后, 二者的叠加效应明显, 能够达到更好的使用效果。

同样, 参加纤维的 S-1-V、S-1-VI、S-2-V、S-2-VI 组的软化系数均较 S-1-I、S-1-IV、S-2-I、S-2-IV 有所降低, 尤其是 A、B 组分掺量均较低的 S-1-V、S-2-V 组, 说明纤维的添加会降低处理后土体的耐水性。

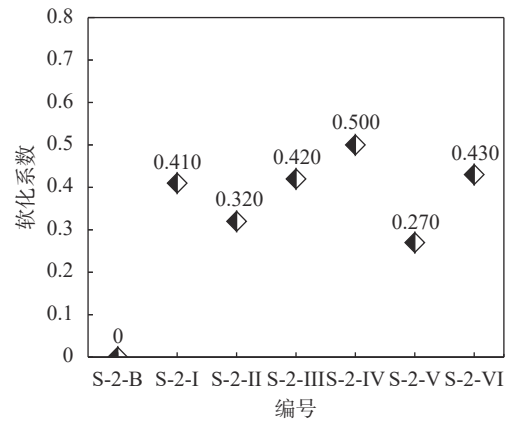
2.4 吸水膨胀率

对击实后的土样进行切削后, 置于固结仪上, 在不施加荷载的情况下, 测定其 24 h 浸水膨胀率, 测试设备见图 8, 测试结果见图 9。

据图 9, 空白样 S-1-B 的膨胀率为 5.49%, S-2-B 的膨胀率为 2.42%, 二者虽相差较大, 但都存在较大的吸水变形。使用隔水聚凝剂处理后, 土样的膨胀率明显降低。两种土样均为 IV 体积变形量最低。参加纤维的 S-1-V、S-2-V 组的吸水膨胀率均较 I 组有所降低, 说明此时纤维的参加对土体的吸水变形有一定



(a) S-1



(b) S-2

图 7 软化系数



图 8 吸水膨胀率测试

限制作用。而 S-1-VI、S-2-VI 较 S-1-IV、S-2-IV 的膨胀率提高, 说明纤维对体积变形的限制作用有限, 当使用土壤隔水聚凝剂达到较好的体积稳定性条件下, 参加纤维的作用无法体现, 为降低造价, 不建议参加。

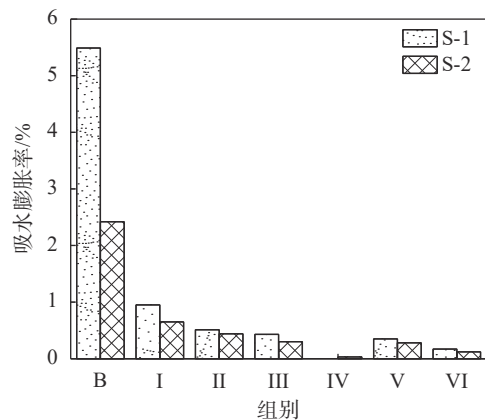


图 9 吸水膨胀率

2.5 各组分对土体主要性能的影响

为更好地获得 A、B 组分和纤维对土体主要性能的影响,分析在 I 的基础上增加 A 组分(Ⅱ)、增加 B 组分(Ⅲ)、增加 A 和 B 组分(Ⅳ)、增加纤维(Ⅴ)、增加纤维与 A 和 B 组分(Ⅵ)五种情况下,土体主要指标相对于 I 的变化情况,结果见表 3。

表 3 SDS 各组分掺量变化对土体主要性能的影响

掺量变化 (相对于 I)	气干强度 /MPa		浸水强度 /MPa		软化系数		吸水膨 胀率/%	
	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2
A↑(Ⅱ)	+0.31	+0.59	+0.15	+0.05	-0.06	-0.09	-0.44	-0.21
B↑(Ⅲ)	+0.06	+0.34	+0.22	+0.20	+0.02	+0.01	-0.52	-0.35
A↑, B↑(Ⅳ)	+0.26	+0.48	+0.62	+0.49	+0.13	+0.09	-0.95	-0.62
加纤维(Ⅴ)	-0.21	+0.14	-0.21	-0.25	-0.11	-0.14	-0.6	-0.37
A↑, B↑, 加 纤维(Ⅵ)	-0.16	-0.01	+0.19	+0.09	+0.05	+0.02	-0.78	-0.53

注:表中“+”代表增加,“-”代表降低。

由表 3 可以明显看出, A 组分增加, 土体的气干无侧限抗压强度增加明显, 浸水无侧限抗压强度变化较小; B 组分增加, 土体的气干强度增加不稳定, 两个土样有一定差异, 但浸水强度均明显增加; A、B 组分同时增加, 土体的气干强度、浸水强度、软化系数均有明显提高, 说明 A、B 组分的协同效应明显; 增加纤维, 除 S-2 气干强度外, 其他强度均降低; 当 A、B 组分和纤维同时添加时, 各参数提高不明显, 技术经济效果不好。增加各组分后, 土体的吸水膨胀率均有所降低, 浸水体积稳定性提高。

3 结论

(1)通过分析兰州新区出现膨胀问题的两处试验土样, 发现土样颗粒级配良好, 所含矿物成分不具明显膨胀性, 可溶性盐类含量较多。膨胀现象源于水分渗入土体, 溶解土壤中的可溶性盐类, 水分蒸发时, 可溶性盐类随水分蒸发迁移到土体表面, 并在表面结晶、膨胀, 造成土体表面疏松隆起。

(2)添加土壤隔水絮凝剂可有效提高土体的气干无侧限抗压强度、浸水 24 h 的无侧限抗压强度, 提高软化系数即耐水性, 同时降低吸水率以及吸水膨胀率, 从而降低水分溶解盐类并在土体中迁移造成的膨胀问题的发生率。

(3)土壤隔水絮凝剂中的 A 组分掺量增加, 可有效提高土体的气干无侧限抗压强度, B 组分掺量的增

加, 能够有效提高土体的耐水性能。A、B 组分掺量均较高时, 二者互相促进, 提高到一定程度后, 二者的叠加效应明显, 能够达到更好的使用效果。

(4)纤维的掺加不能提高土体气干以及浸水无侧限抗压强度, 反而会使之有所降低。在土壤隔水絮凝剂掺量较低时, 纤维的掺加具有一定的限制体积变形的作用, 但当土壤隔水絮凝剂掺加使土体可达较好的体积稳定性条件下, 为降低造价, 可不掺加纤维。

参 考 文 献

- [1] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- [2] 王策, 沐方元, 刘东浩, 等. 硫酸盐渍土盐胀结晶试验研究进展[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(11): 5.
- [3] 赵天宇. 内陆寒旱区硫酸盐渍土盐胀特性试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [4] 薛明, 姚洪林. 盐渍土地区公路养护与环境技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [5] 陈肖柏, 邱国庆, 王雅卿, 等. 重盐土在温度变化时的物理化学性质和力学性质[J]. 中国科学: 数学 物理学 天文学 技术科学, 1988, (4): 95-104.
- [6] HANSEN L R. The suitability of stabilized soil for building construction[M]. University of Illinois, 1941.
- [7] 梁文泉, 何真, 李亚杰, 等. 土壤固化剂的性能及固化机理的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, (6): 675-679.
- [8] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, (2): 141-146, 152.
- [9] 杨青, 罗小花, 邱欣, 等. 离子土壤固化剂固化土的微观结构特征及固化机理研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(11): 33-40.
- [10] 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, 1298.
- [11] GB/T 2542—2012 砌墙砖试验方法[S].
- [12] 张效年, 李庆达. 华南土壤的粘土矿物组成[J]. 土壤学报, 1958, (3): 24-38.
- [13] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [14] 林怡, 岳宝蓉. 硫酸盐类盐渍土的工程特性[J]. 西北水资源与水工程, 1994, (1): 52-56.
- [15] 王海春, 井浩. 硫酸盐渍土盐胀机理及抑制措施[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2006, (4): 80-85.

收稿日期: 2022-01-09