

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.02.001

纤维和磷石膏对淤泥强度及饱和渗透系数的影响规律

郑清松¹, 曾佑荣¹, 刘阳光², 刘红位²

(1. 近海公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心(福建省交通规划设计院有限公司), 福建 福州 350004;
2. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为了将产生的淤泥重复利用, 开展改良淤泥废土试验。以纤维和磷石膏为固化剂固化处理淤泥, 进行不同养护龄期下不同掺量的纤维、磷石膏-淤泥混合土的无侧限抗压试验和渗透试验, 探究不同纤维和磷石膏掺量下的力学性质以及饱和渗透系数变化规律。研究表明: 聚丙烯纤维对强度的增强效果显著, 且随着聚丙烯纤维掺量的增加, 纤维固化淤泥土的强度逐渐提高。固化淤泥土的无侧限抗压强度随着磷石膏掺量增加呈现先增大后减小的趋势, 磷石膏的最优掺量为 1.84% (干重量之比)。磷石膏-固化淤泥土混合样的无侧限抗压强度随养护时间的增加而增大, 14 d 之后趋于稳定。固化淤泥土的饱和渗透系数随着纤维和磷石膏掺量增加而提高。磷石膏-固化淤泥土饱和渗透系数随着养护龄期增加而提高, 养护 14 d 后其值趋于稳定。淤泥的饱和渗透系数均随着纤维和磷石膏掺量的增加而增加。

关键词: 淤泥; 纤维; 磷石膏; 无侧限抗压强度; 饱和渗透系数

中图分类号: TU992.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0001-06

Effects of Fiber and Phosphogypsum on Sludge Strength and Saturation Permeability Coefficient

ZHENG Qingsong¹, ZENG Yourong¹, LIU Yangguang², LIU Hongwei²

(1. Research and Development Center of Transport Industry of New Materials, Technologies Application for Highway Construction and Maintenance of Offshore Areas (Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd.), Fuzhou, Fujian 350004, China;

2. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: There is large sludge output in our country, which easily contributes to accumulation pollutions. Using fiber and phosphogypsum as curing agents to solidify the sludge, unconfined compressive tests and permeability tests of mixed soil of fiber, phosphogypsum and sludge were carried out under different curing ages to investigate the mechanical properties and changes rules of saturation permeability coefficient under different fiber and phosphogypsum contents. It was found that fiber has a significant effect on strength enhancement, and with the increase of fiber content, the strength of fiber solidified soil increased gradually. However, the unconfined compressive strength of the sludge increased firstly and then decreased with the increase of phosphogypsum content, and we found that the optimal content of phosphogypsum was 1.84% (dry weight ratio). The unconfined compressive strength of phosphogypsum sludge mixture increased with the increase of maintenance period, and tended to be stable after 14 days. The saturated permeability of sludge increased with the addition of fiber and phosphogypsum. In addition, the saturation permeability coefficient of phosphogypsum and sludge increased with the increase of maintenance period, and the value tended to be stable after 14 days of curing.

Keywords: sludge; fiber; phosphogypsum; unconfined compressive strength; saturated permeation coefficient

收稿日期: 2023-11-23

修稿日期: 2023-12-28

基金项目: 近海公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心(福建省交通规划设计院有限公司)开放基金课题(2021-KF-11)

作者简介: 郑清松(1981—), 男, 正高级工程师, 注册咨询师, 主要从事港口与航道工程咨询、设计与研究工作。E-mail: 337307558@qq.com

随着我国城市化发展,每年都有大量淤泥土从污水处理厂产出。据统计,截至 2019 年,我国污水处理厂所产淤泥量已超过 6 000 万 t(以含水率 80% 计算),预计 2025 年将达到 9 000 万 t^[1-2]。通过对淤泥土进行固化处理可以有效减少淤泥量,降低二次污染风险。淤泥土固化处理后,其力学性质会明显提高,重金属含量和有机质含量也会明显减少,可以实现再利用^[3]。目前,固化技术是解决城市污水处理厂淤泥处理难题的一个有效途径,该技术具有成本低、效率高、污染小,可实现淤泥资源化利用等优点^[4]。

水泥作为常规固化材料,研究文献较多。陈萌等^[5]用水泥和粉煤灰为主固化剂,发现加入适量的 NaOH 可以使固化淤泥土的有机质含量减少,且对固化淤泥土强度有一定增强作用。张明等^[6]发现以水泥为主,添加适量生石灰后不仅使淤泥土力学指标明显提升,而且重金属浸出含量和有机质含量明显减少。水泥混合物中加入聚丙烯纤维,可以改善水泥混合物的力学性能,降低脆性破坏可能,提高淤泥软土的无侧限抗拉强度^[7]。但是,由于水泥不可再生及前期强度不足等问题,大量学者开始研究其他新型固化剂。杨爱武等^[8]发现生石灰及固化剂可以提高城市淤泥的抗压强度。魏丽等^[9]通过对三种纤维加筋固化土进行抗压抗拉试验,确定了三种纤维的最优加筋率,并进一步确定了冻融条件下加筋土的力学性质变化。王东星等^[10]研究发现活性 MgO-粉煤灰固化淤泥土具有良好的抗冻融、抗干湿及水稳性。

固化土渗透性对其工程应用有较大影响,刘超群等^[11]依据强度折减法运用有限元软件分析了降雨对路基边坡稳定性的影响,结果表明:路基土渗透系数越大,路基变形位移越大,边坡稳定性降低。张芋等^[12]采用环境岩土柔性壁渗透试验发现随着时间的增加,淤泥固化土的渗透系数呈下降趋势,且存在较明显的波动。梁冰等^[13]通过研究垃圾焚烧底渣对水泥固化土工程特性的影响发现固化土渗透系数随底渣含量增加而增大。陈瑞敏等^[14]提出以水泥-矿渣-粉煤灰-石膏为材料的新型环保固化剂,协同纤维加筋作用改良淤泥固化土,发现纤维增大了其渗透系数。桂跃等^[15]在水泥固化淤泥土中加入磷石膏,发现磷石膏可以改善水泥固化土的渗透性,降低了渗透系数。因此,固化土的饱和渗透系数也是控制淤泥工程特性的关键因素。

上述研究可以发现单一物质固化淤泥效果并不

理想,在加入一些辅助剂之后不仅可以有效提高其力学性能,还可以降低有机质含量及重金属浸出浓度。综合考虑经济和绿色环保等多方因素,本文以聚丙烯纤维和磷石膏为固化剂,以无侧限抗压强度为指标,分别配置了纤维和磷石膏城市淤泥固化土,并对其力学性质及渗透性质进行试验研究。研究成果可以为城市污水处理厂处理淤泥二次利用提供技术支持和理论依据。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试验所用土样来自福州市洋里污水处理厂,淤泥采用的是污水处理厂处理压缩后的泥饼,颜色为黑色或灰黑色,泥饼含水率大约在 70%~80%。试验最终采用风干磨碎后的淤泥进行试验,淤泥物理性质指标如表 1,试验数据根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测定。试验所用纤维为聚丙烯纤维,纤维直径在 18 μm ~48 μm 之间,纤维长度为 12 mm,具体性质见表 2。固化剂磷石膏为磷酸生产的工业废料,成分含量及限值如表 3 所示。

表 1 试验淤泥土物理性质指标

比重	塑限 /%	液限 /%	塑性指数	最优含水率 /%	最大干密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
2.04	28.2	45.4	27.7	26.0	1.087

表 2 聚丙烯纤维物理力学性质

材料	直径 / μm	比重	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 /MPa	类型	长度 /mm	颜色	断裂延伸率 /%	弹性模量 /MPa
100% 聚丙烯	18~48	0.91	165~175	≥ 450	束状单丝	12	白色	≤ 30	≥ 5000

表 3 磷石膏组分及其限值

成分	含量 /%	限值 /%
半水石膏	67.40	≥ 60.00
二水石膏	1.90	≤ 4.00
水溶性氧化钠	0.02	≤ 0.05
氯离子	0.01	≤ 0.05
水溶性氧化镁	0.01	≤ 0.10
水溶性氟离子	0.02	≤ 0.20
水溶性五氧化二磷	0.08	≤ 0.30

1.2 试验方案

首先研究聚丙烯纤维掺量对淤泥土强度的影响,设置了四种掺量(纤维质量/干土质量),分别为 0.25%、0.50%、0.75%、1.50%。其次,研究了磷石

膏掺量对固化淤泥土强度的影响,磷石膏掺量为 0.92%、1.84%、2.76%。

在以上试验的基础上进一步探究养护龄期对固化淤泥土强度的影响。养护龄期设置为 0 d、4 d、7 d、14 d、28 d。具体试验方案及养护时间见表 4。无侧限抗压强度试验采用 YYW-2 型应变控制式无侧限压缩仪,竖向加载速率为 1 mm/min。每组 3 个平行试样,最终取平均值作为代表结果。

表 4 试验方案表

组号	聚丙烯纤维掺量/%	磷石膏掺量/%	养护时间/d
1	0.00	0.00	
J1	0.25	0.00	
J2	0.50	0.00	
J3	0.75	0.00	0、4、7、14、28
L1	0.00	0.92	
L2	0.00	1.84	
L3	0.00	2.76	

此外,开展 XRD 试验,研究磷石膏固化淤泥土的矿物生成情况。具体是将无侧限抗压试验破坏后的试样低温(50℃)烘干至恒重,破碎后取中间土样放入研钵中,磨碎成可以过 0.075 mm 筛粉末,取筛下粉末进行试验^[16]。

最后,测量纤维和磷石膏对淤泥土饱和和渗透系数的影响规律。采用 TST-55 渗透仪开展变水头试验,每组设置 3 个平行试验,取试样饱和渗透系数的平均值。其中,磷石膏组取养护至 0 d、14 d、28 d 的试样进行试验。

1.3 试验过程

1.3.1 试样制备

淤泥风干后,清除土中杂质,再将其磨碎,低温(50℃)烘干。均匀喷洒无气水至干土最优含水率,边喷水边搅拌至混合均匀,湿土密封静置 24 h,确保其水分均匀。纤维加入湿土前,需要先将其分成单丝,再与土样混合,人工搅拌至均匀。无侧限抗压试验试样模具采用圆柱形三瓣模,直径 39.1 mm,高 80 mm。采用立式油压千斤顶压实混合土样,土样分 4 次装入,每层压至 20 mm,压实度为 90%。层与层之间需要用小刀刮毛,以确保试样在接触面更密实。

渗透试验试样采用直径为 61.8 mm,高为 40 mm 的环刀样。首先,烘干淤泥,去除杂质,加入无气水至目标含水率。其次,湿土中加入一定量的纤维或磷石膏混合均匀,再将混合土样一次性压入模

具(压实度 90%)。最后,将制备好的试样放入真空饱和缸中饱和 12 h 以上,再开展渗透试验。

1.3.2 试样养护

无侧限试验的试样制备完成后,脱模,在室内养护(室温:(25±5)℃,相对湿度:(75±5)%)至所需龄期,然后进行无侧限抗压试验。渗透试验养护方式同无侧限抗压试样。

2 试验结果及分析

2.1 无侧限抗压试验

图 1 展示了无侧限抗压试验后淤泥土、添加纤维和添加磷石膏试样的破坏形态。其中,淤泥土试样呈现鼓胀开裂的形态,试样表面分布着众多纵向裂缝,这些裂缝的发育是导致试样破坏的重要因素;而添加纤维或者添加磷石膏试样破坏时会形成贯穿土样的倾斜破坏面,几乎无纵向裂缝发育。对于淤泥土而言,其抗拉强度较低,进行无侧限剪切试验时,没有足够的抗拉强度抵抗土体的径向膨胀,因此随着时间的发展,试样表层土体逐渐脱离试样中轴,导致土样呈现鼓状破坏;添加纤维和添加磷石膏的试样,由于纤维或者磷石膏可以与土颗粒发生“聚合作用”,显著增强了土样的黏聚力和土颗粒“聚合物”间的摩擦力,同时也增加了土样的抗拉强度,土样在剪切过程中纵向裂缝的发育变得缓慢,随着剪切过程的发展,直至形成贯穿的剪切破坏面时土样才会发生破坏。此外,在试验过程中发现磷石膏含量越高,试验破坏越突然,呈现明显的“脆性”破坏;而含纤维试验组在达到最大应力破坏后,由于纤维的“联结”作用,试验并没有突然破坏。对比不同含量的纤维试样破坏形态可知,纤维为 0.25% 的试验样本(图 1(b)),土体颗粒承受主要应力,破坏时仍有明显的剪切裂缝。但是,随着纤维含量的增加,裂缝宽度减小,纤维承受部分应力,裂缝边缘土体被压碎,试样残余强度变大。

2.1.1 纤维含量对淤泥土无侧限抗压强度的影响

不同聚丙烯纤维掺量下淤泥固化土强度与养护龄期的关系如图 2 所示,含水率与养护龄期关系如图 3 所示。聚丙烯纤维能够显著提高淤泥土无侧限抗压强度。固化土无侧限抗压强度随着龄期的增加而增大,增长速率随龄期增长而逐渐降低,14 d 之后基本稳定。该现象产生的主要原因是试验前期(0~14 d)土样含水率较高,随着龄期增加,水分蒸发,土颗粒间或者土颗粒与纤维间接触逐渐紧密,14 d 之后试样含水率基本趋于稳定,此时,试样强度也

趋于稳定。其中,养护初期(0 d)纤维组的强度是淤泥土强度的 3 倍~6 倍。这是由于纤维贯穿于土体颗粒间孔隙,形成了三维网状结构,联结了相邻土

体,当土体受力时,纤维提供的拉力阻碍试样内部裂隙的发育,从而提高了土体强度^[17]。

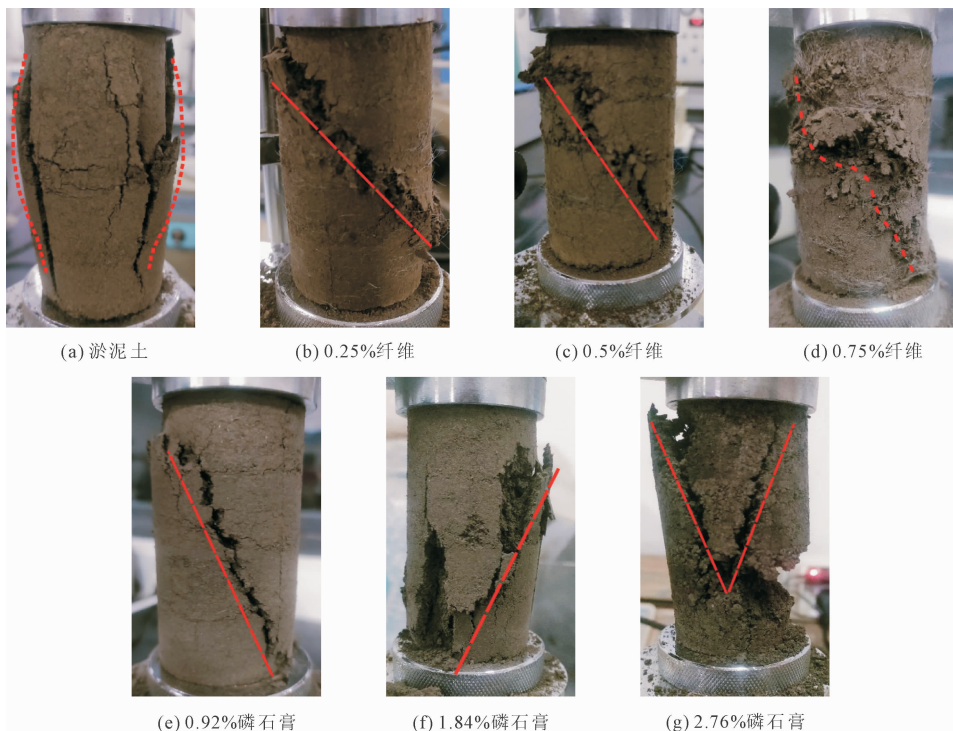


图 1 试样破坏形态

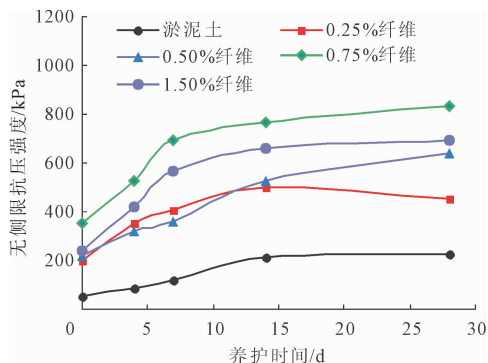


图 2 纤维组无侧限抗压强度与养护龄期的关系曲线

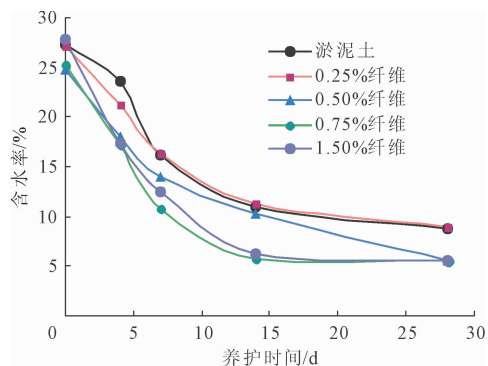


图 3 纤维组含水率与养护龄期的关系曲线

此外,试样的无侧限抗压强度随着纤维掺量的增加先增加后降低,当纤维掺量为 0.75% 时强度达到最大值。其中,养护时间 0~14 d 内,0.25% 和 0.50% 纤维掺量试样的无侧限抗压强度几乎一致。但是,养护后期 15 d~28 d 内,0.50% 纤维掺量试样无侧限抗压强度大于 0.25% 试样。养护至 28 d 时 0.75% 纤维量试验组的无侧限抗压强度分别是 1.50% 纤维掺量、0.50% 纤维掺量、0.25% 纤维掺量和淤泥土的 1.20、1.30、1.86 和 3.71 倍。随着纤维掺量的增加,纤维在土颗粒间分布的区域更加广泛,能够联结更多的土颗粒,从而使土颗粒-纤维的网状结构更大,土颗粒-纤维的网状结构之间的相对错动更加困难,因此土体强度更大。不过有研究发现^[18],土样无侧限抗压强度并不是一直随着纤维含量的增加而增加,而是存在一个有效掺量范围,大于这个掺量范围,土样无侧限强度并不会继续增长,正如图 2 所示。当纤维掺量继续增加到 1.50% 时,土样无侧限强度降低了 142 kPa,说明无侧限抗压强度并不是随纤维掺量的增加而一直增加。

2.1.2 磷石膏对淤泥无侧限抗压强度的影响

不同磷石膏掺量下淤泥固化土强度与养护龄期

的关系见图 4。淤泥土的无侧限抗压强度随着磷石膏含量的增加呈现出先增加后减小的趋势,磷石膏最优掺量为 1.84%。其中,养护 28 d 时,0.92%、1.84% 和 2.76% 磷石膏掺量的混合土样无侧向抗压强度分别是淤泥土的 1.09 倍、1.54 倍和 1.23 倍。养护过程中,各个试样的含水率随时间的变化如图 5 所示。含磷石膏的试样含水率比淤泥土的含水率下降更快,这是因为磷石膏和水发生反应消耗了部分水。其中,养护前期(0~14 d),磷石膏含量为 1.84% 的试样含水率下降最快。但是,养护后期(14 d~28 d),各组合含水率几乎维持稳定,磷石膏含量对淤泥固化土试样含水率的影响不明显。同样,各个试验组无侧限抗压强度,在 0~14 d 增加显著,养护 14 d 之后强度趋于稳定。这是因为磷石膏中主要含有半水石膏和二水石膏,半水石膏和水反应形成新的二水石膏晶体(如图 6 所示),二水石膏晶体生成并交错,即石膏的凝结硬化^[19],从而提高土体强度,故随时间增加混合样的强度也增加。此外,二水石膏水解 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 与土样内部或固化剂组分的含铝相反应生成钙矾石,随着磷石膏掺量的增加,钙矾石晶体逐渐生长形成更大的晶体,从而导致试样无侧限强度提高,然而磷石膏掺量较低时钙矾石晶体不稳定^[20],因此土样无侧限强度随着磷石膏含量的增加呈现出先增加后减小的趋势。

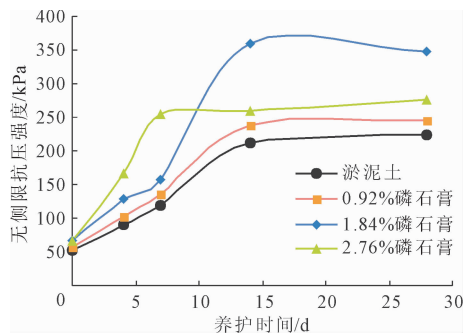


图 4 掺入磷石膏淤泥土无侧限抗压强度与养护龄期的关系曲线

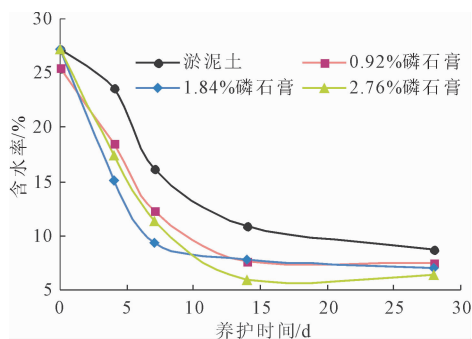


图 5 掺入磷石膏淤泥土含水率与养护龄期的关系曲线

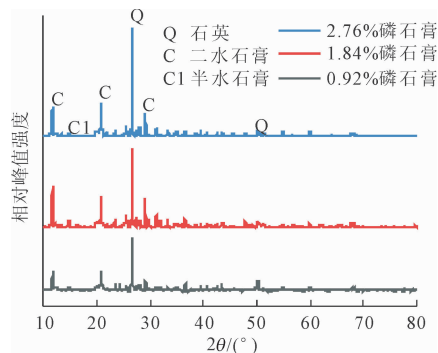


图 6 磷石膏固化淤泥 XRD 图谱(7 d)

对比两种改良剂对淤泥固化土强度的影响可知:试验初期,纤维就可以提高淤泥固化土强度,养护 28 d 后其强度稳定后仍然是淤泥土的 2 倍~4 倍;然而,磷石膏对淤泥土强度影响随着养护时间增加而逐渐增强,稳定后的淤泥固化土的最大强度只有淤泥土强度的 1.53 倍。综合强度、固化剂掺量及养护时间等多方面来考虑,纤维对淤泥土的固化效果更好,不仅可以提高早期强度,减少养护时间,还能获得更高的稳定强度。其中 0.75% 掺量的纤维固化淤泥土 7 d 无侧限抗压强度为 0.695 MPa > 0.5 MPa,满足二级及二级以下公路底基层强度标准^[21]。

2.2 纤维及磷石膏掺量对淤泥土饱和渗透系数的影响

纤维和磷石膏对淤泥土饱和渗透系数的影响规律如图 7,总体上两者都提高了淤泥土的渗透系数。其中,淤泥土的饱和渗透系数随着纤维含量的增加而增大,但都在同一数量级。其主要原因是聚丙烯纤维有导流效应^[22],水会顺着纤维与土体间的间隙渗流,从而增大了土体的渗透系数。另一原因是压实土样时,纤维易弯曲,当上部压力撤去时,纤维会有恢复趋势,导致土体膨胀,从而在土体-纤维间形成更多间隙,导致入渗更快^[23]。再次,纤维在搅拌过程中易出现团聚现象,这将导致纤维分布不均匀,这种不均匀将会使试样产生薄弱区,在团聚处纤维导流效应更加明显^[24]。图 7(b)是磷石膏掺量及试样养护时间对淤泥土饱和渗透系数的影响规律。养护时间为 0 d 条件下,淤泥土的饱和渗透系数随着磷石膏的掺量增加而提高。这是因为磷石膏本身的渗透系数在 10^{-5} cm/s ~ 10^{-2} cm/s,远大于淤泥土的饱和渗透系数^[25]。随着养护时间增加,磷石膏-淤泥土的饱和渗透系数增大,养护 14 d 后混合样的饱和渗透系数与养护 14 d 的渗透系数几乎一样。但

是,随着养护时间增加,淤泥土的饱和渗透系数随着磷石膏掺量增加而有所降低。掺入石膏的淤泥土在养护 14 d 后渗透系数增大是由于半水石膏吸水生成二水石膏的过程中会释放热量,并产生膨胀,硬化后孔隙率增加,从而导致渗透系数增大^[19]。

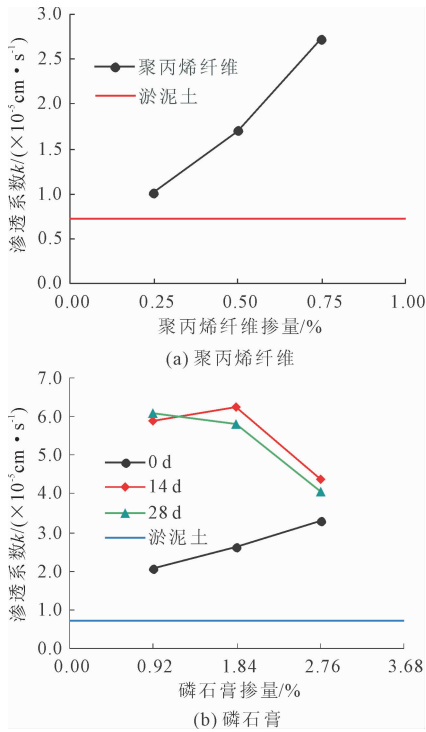


图 7 渗透系数变化规律图

3 结 论

(1) 纤维可以改善固化淤泥土的力学性质。随着纤维掺量的增加,纤维固化土的强度先增大后降低。纤维掺量为 0.75% 时固化效果较好,养护 28 d 后其无侧限抗压强度是淤泥土的 3.7 倍。

(2) 淤泥土的无侧限抗压强度随着磷石膏掺量的提高呈现先增加后减小规律。其中,磷石膏的最优掺量为 1.84%,其强度稳定后无侧限抗压强度是淤泥土的 1.5 倍。

(3) 总体上,固化前期(0~14 d)各个试样的强度随养护时间的增加而增大,14 d 之后基本趋于稳定。

(4) 淤泥土的饱和渗透系数均随着纤维和磷石膏掺量的增加而增加。其中,掺入磷石膏淤泥土的饱和渗透系数随养护时间的增加而增大,但是 14 d 之后其值基本趋于稳定。

参考文献:

[1] Yang Guang, Zhang Guangming, Wang Hongchen. Current state of sludge production, management, treatment

and disposal in China[J]. Water Research, 2015, 78: 60-73.

- [2] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34, 4.
- [3] Poon C S, Lio K W. The limitation of the toxicity characteristic leaching procedure for evaluating cement-based stabilised/solidified waste forms [J]. Waste Management, 1997, 17(1): 15-23.
- [4] 黄英豪, 朱伟, 董婵, 等. 固化淤泥结构性力学特性的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(S2): 130-136.
- [5] 陈萌, 杨国录, 余亮英. 粉煤灰和 NaOH 固化稳定化受污淤泥试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 123-127.
- [6] 张明, 蒋敏敏, 赵有明. 基于 GDS 固结仪的吹填淤泥非线性渗透性及参数测定[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 625-632.
- [7] 唐朝生, 施斌, 蔡奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 4(9): 1796-1800.
- [8] 杨爱武, 胡垚, 杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4439-4449.
- [9] 魏丽, 柴寿喜, 张琳, 等. 冻融作用下三类纤维加固土的抗压抗拉性能[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3241-3248, 3280.
- [10] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4675-4684.
- [11] 刘超群, 刘栋, 尚小亮. 降雨入渗作用下路基边坡的稳定性分析[J]. 路基工程, 2018(2): 91-95, 111.
- [12] 张芊, 陆海军, 李继祥, 等. 填埋场改性污泥防渗层渗透与变形特性[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8): 87-93.
- [13] 梁冰, 胡学涛, 陈亿军. 垃圾焚烧底渣协同固化市政污泥的工程特性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6705-6710.
- [14] 陈瑞敏, 简文彬, 张小芳, 等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1020-1030.
- [15] 桂跃, 余志华, 张庆, 等. 固化磷石膏-疏浚淤泥混合土的工程性质研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 147-153.
- [16] 屈俊童, 栾凯钰, 浦钧翔, 等. 水泥-磷石膏改良泥炭质土动力特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4427-4437.
- [17] Chao Lv, Shen Zhengtao, Cheng Qing, et al. Effects of biochar and polypropylene fibre on mechanical behaviour of cement-solidified sludge[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(4): 1667-1678.

- 电,2022(6):138-143.
- [2] 倪晋兵,张云飞. 抽水蓄能在新型电力系统中发展的思考[J]. 水电与抽水蓄能,2022,8(6):5-7.
- [3] 周建平,杜效鹄,周兴波. 新型电力系统中水电的作用及发展规划研究[J/OL]. 水力发电学报,2023:1-12 [2023-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2241.TV.20220530.1446.002.html>.
- [4] 王爱玲,邓正刚. 我国水电站地下厂房的发展[J]. 水力发电,2015,41(6):65-68.
- [5] 傅少君,张丙文,邱焕峰. 瀑布沟地下厂房施工期变形与稳定的跟踪预报[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(4):24-28,47.
- [6] 时 昀. 地下洞室节理围岩稳定性及支护优化的离散元分析[D]. 天津:天津大学,2012.
- [7] 王 涛,陈晓玲,于利宏. 地下洞室群围岩稳定的离散元计算[J]. 岩土力学,2005,26(12):1936-1940.
- [8] Shi A, Li C, Hong W, et al. Comparative analysis of deformation and failure mechanisms of underground powerhouses on the left and right banks of Baihetan hydropower station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022,14(3):731-745.
- [9] 雷 娜. 某水利工程地下厂房洞室开挖支护优化设计[J]. 甘肃水利水电技术,2018,54(1):61-65.
- [10] Bhasin R, Pabst T. Finite element and distinct element analysis of the stability of a large underground hydropower machine hall in the Himalayas[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015,19(3):725-732.
- [11] 陈胜宏,Egger P,熊文林. 加锚节理岩体流变模型及三维弹粘塑性有限元分析[J]. 水利学报,1998(9):42-48.
- [12] 徐明毅,陈胜宏,张勇传. 小湾拱坝坝基开挖及加固的三维弹粘塑性有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2004,37(1):1-5.
- [13] 郑华伟,任 莉. 基于三维弹粘塑性本构关系的节理单元在面板堆石坝中的应用[J]. 吉林水利,2008(9):34-38.
- [14] 秦 楠,陈胜宏. 喷锚支护节理岩体的弹性复合单元模型[J]. 岩土力学,2012,33(4):1253-1260.
- [15] 傅少君,邱焕峰,于英姬,等. 岩壁吊车梁有限元分析的关键技术问题研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(10):2124-2129.
- [16] Bodner S R. Review of a unified elastic-viscoplastic theory[J]. Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity, 1987:273-301.
- [17] 曾新发,彭振斌,何 杰,等. 地下洞室开挖围岩弹塑性动态稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(4):1293-1301.

(上接第6页)

- [18] Jiang H T, Cai Y, Liu J. Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(12):1315-1322
- [19] 薛小霜,姜荣斌,王 花. 土木工程材料[M]. 北京:机械工业出版社,2023.
- [20] 赵 之,杨秀娟,石庆红,等. 磷石膏/木质素固化铅污染土的无侧限抗压强度[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文),[2024-02-24]:1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221121.1004.002.html>.
- [21] 公路路面基层施工技术规范:JTJ034—2000[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [22] 贾卓龙,梁哲瑞,晏长根,等. 聚丙烯纤维加筋黄土抗渗性能试验研究[J/OL]. 工程地质学报,2023:1-11 [2023-12-14]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0098>.
- [23] 王元站,刘旭菲,张智凯. 草根加筋土渗透性和强度试验研究[J]. 防震减灾工程学报,2017,37(1):140-147.
- [24] 周程涛,陈 波,张 娟,等. 玄武岩纤维泡沫混凝土的细观结构及损伤特性[J/OL]. 复合材料学报,2023:1-11 [2023-11-30]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231109.001>.
- [25] 修宗甲. 磷石膏物理力学特性分析[J]. 磷肥与复肥,2023,38(1):41-42,45.