

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210810003

废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式*

闭东民¹, 孔纲强^{1,2}, 陈庚², 刘文化³, 秦红玉⁴, 许晓亮¹

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 4. Flinders University College of Science & Engineering, S. A. 5042 Australia)

摘要: 新冠疫情防控消耗大量一次性口罩, 口罩废弃物处置量大、环境环保要求高; 高含水率淤泥水泥固化土并作路基填料是解决路基优质填料来源难、价格高等问题的重要途径之一。提出利用废弃口罩加筋高含水率淤泥固化土并作路基填料的解决思路, 以水泥为固化剂、以废弃口罩为加筋材料, 实测不同废弃口罩掺量、尺寸及龄期条件下废弃口罩加筋水泥固化土的无侧限抗压强度值, 探讨废弃口罩掺量、尺寸及龄期等因素对水泥固化土的加筋效果, 以及废弃口罩加筋对水泥固化土破坏模式的影响规律。研究表明, 废弃口罩适用于加筋高含水率淤泥水泥固化土, 本文试验条件下废弃口罩的最佳掺量约为0.5%, 无侧限抗压强度值提高约87.5%。废弃口罩加筋水泥固化土的无侧限抗压强度应力—应变曲线呈软化型, 且废弃口罩的加筋作用提高了试样的抗变形能力; 废弃口罩加筋水泥固化土呈现一定的塑性破坏特征。

关键词: 新冠疫情; 淤泥; 口罩; 水泥固化土; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0993-06

Strength Characteristics and Failure Mode of Solidified Soil Reinforced by Waste Masks

BI Dongmin¹, KONG Gangqiang^{1,2}, CHEN Geng², LIU Wenhua³, QIN Hongyu⁴, XU Xiaoliang¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 4. Flinders University College of Science & Engineering, S. A. 5042 Australia)

Abstract: COVID-19 prevention and control consumed a large number of disposable masks, which had a large amount of waste disposal and high environmental protection requirements. It is one of the important methods to solve the problems of difficult source and high price of high-quality subgrade fillers. This paper proposes the solution of used waste masks to reinforce sludge solidified soil with high moisture contents, which will be used as subgrade fillers, with cement as curing agents and waste masks as reinforcing materials, the unconfined compressive resistance of waste mask reinforced ce-

* 收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-11-28

基金项目: 水利部技术示范项目(SF-201735)、浙江省交通运输科技项目(2017030)资助

作者简介: 闭东民(1998—), 男, 硕士研究生。主要从事废弃土资源化利用方面的研究。E-mail: 837432321@qq.com

通讯作者: 孔纲强(1982—), 男, 教授、博导, 博士。主要从事能源岩土工程方面的研究。E-mail: gqkong1@163.com

ment solidified soil under different waste mask contents, mask sizes and ages is measured, additionally, the influences of the mask sizes and ages on the reinforcement effect of cement solidified soil are discussed, and this study also analyze the influence of reinforcement of waste mask on the failure modes of cement solidified soil. The results show that, under the experimental conditions, the optimum content of waste mask is about 0.5%, and the unconfined compressive strength is increased by about 87.5%. The stress-strain curve of unconfined compressive strength of cement-solidified soil reinforced with waste masks shows a softening pattern, and the reinforcement of waste mask improves the deformation resistance of the sample. The cement-solidified soil reinforced with waste masks presents a certain plastic failure characteristic.

Keywords: COVID-19 epidemic; silt; mask; cement solidified soil; unconfined compressive strength

引言

路基工程施工需要大量优质填料。传统路基填料来源主要通过开山采石等手段,但是会严重破坏生态环境,河道疏浚高含水率淤泥处置不仅占用土地资源,而且费用高昂且安全隐患大。因此,通过施工机具将水泥等固化剂与高含水率淤泥充分搅拌混合均匀,并经一定龄期的养护后,形成具有一定强度的水泥固化土作为路基填料成为广大工程技术人员关注的重点问题之一^[1]。相关学者针对水泥固化土的强度特性及固化效果展开了系列研究,并取得了一些有益结果^[2-3]。通过在水泥固化土中分别掺入玻璃纤维、土工合成纤维、玄武岩纤维、聚丙烯纤维或石棉纤维等加筋材料,以提高其抗压强度、抗裂性能,并分别探讨了加筋水泥固化土的抗压强度、抗剪强度、竖向或侧向变形等特性^[4-9]。研究表明,水泥固化土中掺入纤维也可以有效提高水泥固化土的抗压强度和延性^[10],掺入一定掺量的纤维后会改变水泥固化土的脆性破坏特性^[11],有效延缓水泥固化土在破坏时裂缝的发展,加筋水泥固化土的黏聚力和内摩擦角也会有一定程度的增加^[12]。

新冠疫情的爆发和快速传播,给全球人民的健康安全造成严重威胁,各类防疫物资成为了人们生活的必需品、且消耗量极大,同时也产生了大量的废弃垃圾。以一次性口罩的消耗量为例,据世界卫生组织统计,全球日均消耗的口罩数量高达10亿只;我国2020年日均消耗口罩高达3亿只,全年消耗产生的废弃口罩高达16.2万吨。相当大一部分口罩使用完后会被随意丢弃,进入河流、海洋等水系统中分解为塑料垃圾,微塑料会随着水循环进入

人类和生物体内,危害人类和各种生物的健康安全^[13];部分会被焚烧发电,也会产生一定的有害气体污染空气和损害人们的生存环境,不利于可持续绿色发展理念^[14]。相关学者提出将切碎的废弃口罩加入再生混凝土骨料中作为路面基层或底基层的填料;研究结果表明,掺入一定比例的切碎废弃口罩,可以有效提高混合填料的抗压强度、刚度、塑性和柔韧性^[15]。

因此,结合淤泥资源化利用,本文提出利用废弃口罩加筋高含水率淤泥固化土并作路基填料的解决思路,以高含水率淤泥水泥固化土作为路基填料的研究对象,以水泥作为固化剂、普通外科废弃口罩作为加筋材料,研究废弃口罩掺量、口罩尺寸、以及龄期等因素对加筋水泥固化土无侧限抗压强度的力学特性影响规律,初步探讨废弃口罩作为水泥固化土加筋材料的可行性。

1 试验方案与工况设计

1.1 试验思路流程

口罩切碎后,按照设计比例、与水泥固化剂一起掺入高含水率淤泥中,形成加筋水泥固化土,并作为路基填料应用;相关研究流程如图1所示。

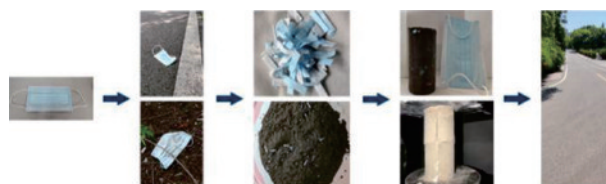


图1 口罩加筋路基土流程

Fig.1 Flow chart of mask reinforced subgrade soil

1.2 试验设计和方法

1.2.1 试验材料

试验用土取自湖北宜昌伍家岗长江大桥位置，

为长江底淤泥，由击实试验得到淤泥土的最优含水率为 21.3% 及最大干密度为 1.59 g/cm³。淤泥物理力学性质见表 1。将疏浚淤泥晾晒、烘干、碾碎、清除杂物、并过 2 mm 的标准土工筛后密封备用。

表 1 淤泥物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of silt

指标	含水率/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	土粒比重	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	压缩系数/MPa ⁻¹	压缩模量/MPa
数值	52	1.81	2.73	1.28	1.146	37.9	22.0	15.9	1.89	0.71	3.3

1.2.2 试样制备

由于防疫要求，试验所使用的口罩为未使用过的普通型一次性医用外科口罩，口罩物理参数见表 2。将口罩分别切成 A(2 cm×0.5 cm)、B(4 cm×1 cm)、C(6 cm×1.5 cm) 三种类型。试验所用水泥为普通硅酸盐水泥，强度等级为 PO42.5。往准备好的土中分别掺入 0.0%、0.5%、1.0%、1.5% 和 3.0% 干土重的口罩，掺入 30% 干土重的水泥固化剂，充分混合，手动搅拌约 10 min，直至搅拌均匀(图 2)。按击实试验得到的固化土最优含水率 18.3% 加入自来水，按照上述搅拌方法，再次充分搅拌均匀。然后压入 φ39.1 mm、H80 mm 的三开模具内，分三层击实成型，放入恒温恒湿养护箱中养护 1 d 后脱模，放入恒温恒湿养护箱中(温度(20±2 °C)，湿度 95%)进行养护，养护龄期分别为 7 d、14 d 和 28 d，共 7 组试样，每组分三个养护龄期，每组试验均设三个平行样，试验方案详见表 3。

表 2 废弃口罩性能参数

Table 2 Performance parameters of waste masks

参数	比重	熔点/°C	吸水率/%	抗拉强度/MPa	断裂抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
数值	0.93	168	9.5	4.52	4.18	20.6



图 2 土体中分散的口罩

Fig.2 Masks scattered in the soil

表 3 试验方案与工况设计

Table 3 Test scheme and working condition design

口罩 掺量	口罩尺寸		
	A	B	C
0.0% (7 d, 14 d, 28 d)	—	—	—
0.5% (7 d, 14 d, 28 d)	—	—	—
1.0% (7 d, 14 d, 28 d)	(7 d, 14 d, 28 d)	(7 d, 14 d, 28 d)	(7 d, 14 d, 28 d)
1.5% (7 d, 14 d, 28 d)	—	—	—
3.0% (7 d, 14 d, 28 d)	—	—	—

1.2.3 试验方案

无侧限抗压强度试验所采用的仪器为微机控制式电子万能试验机，应变控制加载速率为 1 mm/min，试样制成后放入标准养护箱中养护。养护到相应的龄期后，将试样取出，在常温下进行无侧限抗压强度试验，无侧限抗压强度的相对标准偏差，应在 10% 以内，超过该范围的试样作废，并重新制样再测试。

2 试验结果与分析

2.1 不同口罩掺量对无侧限抗压强度的影响

当掺入的口罩尺寸为 A(2 cm×0.5 cm) 型时，不同口罩掺量水泥固化土的无侧限抗压强度如图 3 所示。可见，固化土无侧限抗压强度随着龄期的增长而增大；与未加筋水泥固化土相比，0.5% 口罩掺入量时试样无侧限抗压强度提高了约一倍；在口罩掺量为 1.0% 时，试样无侧限抗压强度提高了约 50%~70%，其中养护 7 d 和 28 d 后的提高值分别为 50% 和 70%；1.5% 口罩掺入量时试样无侧限抗压强度提高了约 37%；3.0% 废弃口罩掺入量时试样无侧限抗压强度的提高值显著降低，表明当口罩掺量过大时，反而导致固化土的无

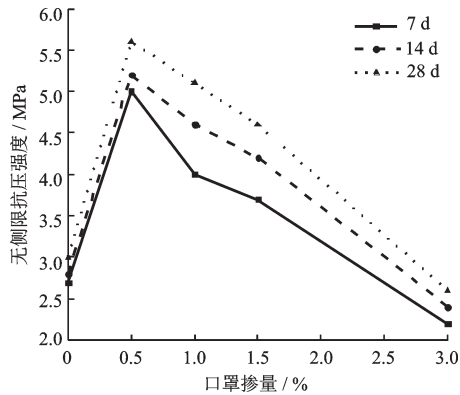


图3 无侧限抗压强度与口罩掺量的关系

Fig.3 Unconfined compressive strength versus mask content

侧限抗压强度提高显著降低;随着口罩掺量的增加,固化土的无侧限抗压强度曲线呈现先上升后下降的趋势。在口罩掺量为0.5%时,固化土的无侧限抗压强度相对最大,即口罩的最佳掺量为0.5%^[9];在0.5%口罩掺量时,固化土抗压强度上升最大,对此的解释是因为添加口罩后起到了加筋作用,随机分布的口罩在试样中呈自由态分布,在土粒的相互摩擦作用和水泥水化反应水化物的胶结作用下,试样紧密贴合,可以承受外部荷载对试样产生的应力,避免了试样中的应力过于集中。掺入的口罩还可以对土的位移和结构变形起到束缚作用,使试样的整体性和稳定性均有提高。口罩与水泥固化土之间的相互作用,形成了一个更紧密的整体,因此固化土无侧限抗压强度有了大幅度提高。在口罩掺量为1%时,试样抗压强度也有了较大提高,但是由于掺入的口罩掺量是口罩掺量为0.5%时的两倍,试样中口罩数量相对较多,会导致口罩分布不均,部分口罩不与土体接触,较多的口罩会缠绕成团,土体中会存在薄弱面,导致试样刚度减小,因此试样的抗压强度比掺入0.5%掺量时的试样有一定幅度的下降^[9]。口罩掺量为1.5%时抗压强度也有较明显提高,但相比于口罩掺量为0.5%时的抗压强度有较大幅度下降,是因为随着口罩掺量的增加,口罩在试样中的分布面积更大,甚至超过了水泥固化土之间的面积,同时部分口罩重叠在一起,试样整体性变差,水泥固化土与口罩的作用力无法充分发挥,加筋作用效果变差,因此导致抗压强度降低。而当口罩掺量达到3.0%时,抗压强度低于未掺口罩水泥固化土,是因为口罩加筋量过大,直接交织弯曲重叠在一起的口罩更多,试样中接触面大部分口

罩与口罩接触,口罩间的摩擦作用力小,同时口罩分布面积过大阻碍了水泥固化土之间的紧密贴合,形成了更多软弱接触面,导致试样无法形成一个完整体,刚度大幅下降,抗变形能力较差,因此抗压强度大幅度降低。

以对照组试样的无侧限抗压强度为基准,口罩加筋水泥固化土或再生混凝土^[15]的无侧限抗压强度值提高率与口罩掺量关系如图4所示。由图4可知,当口罩掺量为0.5%时,口罩对水泥固化土的加筋效果达到最优,试样抗压强度提高了约87.5%;当口罩掺量为1.0%时,口罩对再生混凝土的加筋效果达到最优,试样抗压强度提高了约16.8%;当口罩掺量达到3%时,无论是水泥固化土还是再生混凝土试样,无侧限抗压强度均降低,二者均无法发挥有效的加筋效果作用;与未加筋水泥固化土或再生混凝土试样相比,口罩加筋试样分别降低了18.8%和3.8%。综上可知,口罩可以有效加筋水泥固化土、且效果优于加筋再生混凝土,换言之,口罩用于加筋水泥固化土相对更适用。

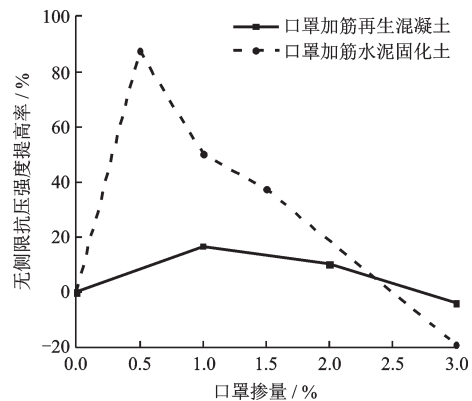


图4 无侧限抗压强度提高率与口罩掺量关系

Fig.4 Increase rate of unconfined compressive strength versus the content of mask

2.2 口罩尺寸对无侧限抗压强度的影响

当口罩掺量为1.0%时,掺入不同尺寸口罩水泥固化土的无侧限抗压强度如图5所示。由图5可知,当掺入B(4 cm×1 cm)型长方形口罩时,无侧限抗压强度提高幅度相对最大,原因是口罩在试样中分布相对更均匀,口罩与水泥固化土的接触面积与水泥固化土之间的接触面积都比较均匀,口罩与水泥固化土接触面良好,能够充分发挥加筋作用,试样整体性更好,因此抗压强度提升幅度最大。掺入A(2 cm×0.5 cm)型长方形口罩时,由于在相同口

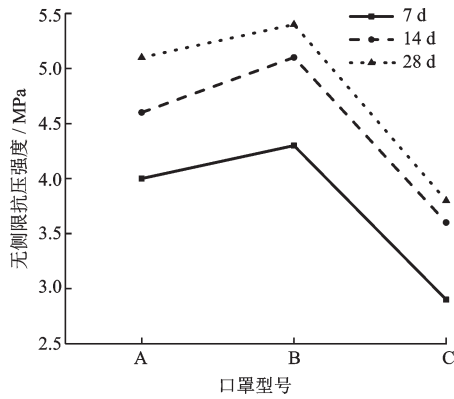


图5 无侧限抗压强度与口罩尺寸关系曲线

Fig.5 Unconfined compressive strength versus mask size

罩掺量下,面积小、数量更多,口罩在试样中所占面积大,甚至会发生重叠现象,导致阻碍水泥固化土彼此之间的接触整合,整体性相对较差,而口罩与口罩之间的摩擦力小于水泥固化土之间的作用力,更小于口罩与水泥固化土的摩擦力,因此抗压强度相比较未掺口罩的固化土有提高,但相比较于掺入B(4 cm×1 cm)型长方形口罩时,无侧限抗压强度也有一定幅度下降。当掺入C(6 cm×1.5 cm)型长方形口罩时,在相同掺量下,虽然数量较小,但是由于其面积过大,整个试样的接触面大部分是由水泥固化土与口罩形成,相当于两块水泥固化土中间夹了一块口罩,降低了水泥固化土之间的作用力,使试样无法形成一个稳定的整体,因此抗压强度有较大幅度下降并低于未掺口罩的试样,相比较于掺入B(4 cm×1 cm)型长方形口罩时,无侧限抗压强度也有较大幅度下降。

2.3 应力-应变曲线

往水泥固化土中掺入尺寸为A(2 cm×0.5 cm)型的口罩后,制成不同掺量的试样,养护28 d后进行无侧限抗压强度试验,得到的5组不同口罩掺量的应力-应变曲线如图6所示。由图6可知,5组不同口罩掺量的应力-应变都呈现软化型曲线:在加载初期,5组曲线都呈线性增长,应力增长速度较快。到了加载中期,增长曲线较之前平缓,应力随应变的增长缓慢提升。口罩掺量为0.5%时的试样达到应力峰值的速度最快,应力峰值即试样的无侧限抗压强度,但是在该掺量下,在应力达到峰值后,随应变继续增加时的应力下降速度也非常快,抗压强度提高最大,但破坏应变相较于未掺口罩的水泥固化土无明显提升。其他口罩掺量的试样达到峰

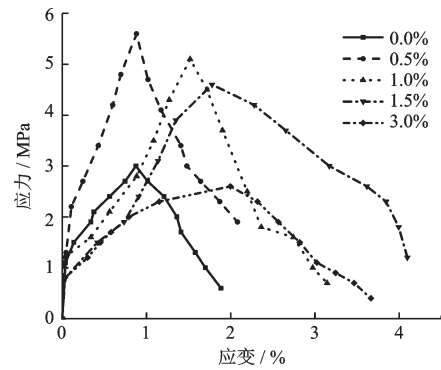


图6 口罩加筋水泥固化土的应力-应变关系曲线

Fig.6 Stress-strain curves of cement solidified soil reinforced by masks

值后,应力随应变的增加下降比较缓慢。在加载后期,未掺口罩的试样,应力下降也很快。因此掺加一定数量的口罩可以提高水泥固化土的破坏应变和抗变形能力,提高抗压强度。

2.4 口罩加筋固化土的破坏形态分析

不同口罩掺量试样的破坏形态如图7所示,不同口罩掺量的试样呈现不同的破坏模式和破坏面。未掺入口罩的固化土在受压破坏时出现有明显倾角的剪切破坏面,倾角约为60°,剪切破坏面从试样顶部一直延伸到底部,试样沿着剪切面破坏,试样水平向无鼓胀变形。掺量1%、尺寸为C型口罩的试样,由于口罩掺量少而尺寸大,口罩与水泥土仅形成了一个较大的薄弱接触面,随着竖向压力增加,试样沿着剪切薄弱面破坏,试样的抗压强度较小;同时,在试样发生剪切破坏时也存在明显的脆性破坏特征。掺量在0.5%~3.0%、尺寸为A型口罩的试样,口罩碎片随机离散分布在固

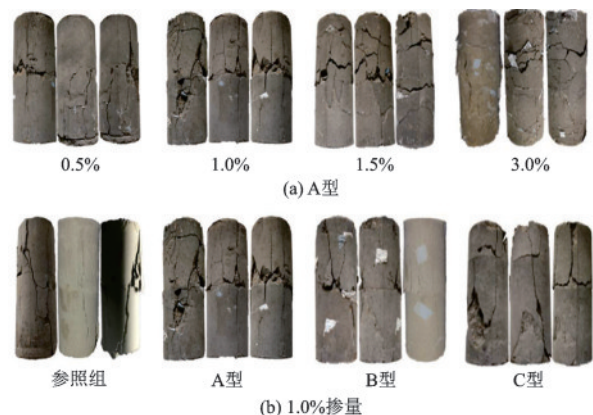


图7 口罩加筋水泥固化土试样的破坏形态

Fig.7 Failure mode of cement solidified soil reinforced by masks

化土内部,在试样承受竖向压力时,口罩发挥了加筋作用,承担了试样中的部分拉应力,使得试样可以承受更大的竖向荷载,有效减轻土体承受的作用力,对土体承受的作用力起到传递和离散的作用,并且可以有效限制土体的变形和位移,保持试样的整体性;在试样达到所能承受最大竖向荷载破坏时,在不同口罩掺量试样的表面仅出现分布不均的裂纹,没有出现明显的剪切破坏面,但是在试样径向出现鼓胀,中间体积明显大于两头,呈现塑性破坏特征,试样在竖向荷载压力下被压密,破坏形态表现为“裂而不断”,与刘建龙等^[9]一致。掺量为1.0%、尺寸为B型口罩的试样,虽口罩掺量不大,但口罩尺寸面积较C型小,在竖向荷载作用下,虽出现了比较明显的剪切破坏面,但也出现了比较密布的裂纹,破裂面不完全是跟随着剪切破坏面剪切破坏而破坏,因为由于口罩在试样中分布面积较广,口罩的加筋作用提供了足够拉应力,分散了破坏力,因此出现了分布不均的裂纹,口罩加筋作用对试样的变形和破坏形式起到了一定改变,因此表现出了与上述几种试样不同的破坏形式。

3 结 论

提出利用废弃口罩加筋高含水率淤泥水泥固化土的思路,并探讨了口罩掺量、尺寸及龄期等因素对水泥固化土的加筋效果。得到以下结论:

(1)废弃口罩适用于加筋高含水率淤泥水泥固化土,且加筋效果优于再生混凝土材料。废弃口罩对水泥固化土或再生混凝土试样的最佳掺量分别为0.5%和1.0%,无侧限抗压强度值分别提高87.5%和16.8%。

(2)B(4 cm×1 cm)型长条形口罩对水泥固化土的加筋效果相对最佳,口罩尺寸过大、长宽比较小情况的加筋效果相对较差。

(3)口罩加筋水泥固化土的无侧限抗压强度应力-应变曲线呈软化型,且废弃口罩的加筋作用提高了试样的抗变形能力。水泥固化土呈现脆性破坏特征,破坏时会出现比较明显的破坏剪切面;口罩加筋水泥固化土呈现一定的塑性破坏特征,破坏时会出现密布的裂纹。

参考文献:

- [1] 刘青云,李华安,孙信誉,等. 钢渣型复合基材在浅层软土固化中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 811-817, 827.
Liu Q Y, Li H A, Sun X Y, et al. Application of steel slag composite in in-situ solidification of shallow soft soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 811-817, 827. (in Chinese)
- [2] 曲涛,范晓秋. 水泥砂浆固化土抗压强度特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 173-178.
Qu T, Fan X Q. Experimental study of compressive strength properties of soils stabilized by cement mortar [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(2): 173-178. (in Chinese)
- [3] Vakili A H, Selamat M R B, Salimi M, et al. Evaluation of pozzolanic portland cement as geotechnical stabilizer of a dispersive clay [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 15(4): 504-511.
- [4] Chegenizadeh A, Nikraz H. Effect of fibre content on compressive strength of reinforced soil [J]. Geotechnical Engineering, 2011, 7(9): 489-495.
- [5] 张艳美,张旭东,张鸿儒. 土工合成纤维土补强机理试验研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1323-1326.
Zhang Y M, Zhang X D, Zhang H R. Test research of geotechnique textile soil reinforcement mechanism and engineering application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1323-1326. (in Chinese)
- [6] Kumar S, Dutta R K. Unconfined compressive strength of bentonite-lime-phosphogypsum mixture reinforced with sisal fibers [J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2014, 8(3): 2014-2389.
- [7] Pradhan P K, Kapr K, Naik A. Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(1): 63-74.
- [8] 高磊,胡国辉,陈永辉,等. 玄武岩纤维加筋黏土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增1): 198-203.
Gao L, Hu G H, Chen Y H, et al. Triaxial tests clay reinforced by basalt fiber [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup 1): 198-203. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)

(下转第1009页)