

[文章编号] 1003-4684(2023)05-0110-05

# 冻融循环作用下 EPS 轻质土力学特性试验研究

顾浩宇, 梅利芳

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘 要]** 为研究轻质混凝土在冻融循环作用下的物理和力学特性的变化规律, 对不同 EPS 颗粒和水泥掺量下的轻质土试样进行冻融循环试验, 在经历 0、1、3、6、9 次冻融循环时, 对试样的体积、质量以及无侧限抗压强度进行测量。试验结果表明: 随着水泥和 EPS 颗粒掺量的增加, 轻质土的冻胀率和质量损失率会逐渐下降。通过无侧限抗压强度试验, 得到了不同冻融循环次数下的轻质土应力应变曲线, 结果表明轻质土的抗压强度会随着冻融循环次数的增加而降低, 但当 EPS 颗粒掺量和水泥掺量提高后, 轻质土抗压强度的损失速率明显降低。当 EPS 颗粒掺量达到 2.5% 时对改善强度损失改善效果不明显, 可以认为 2% EPS 掺量为轻质土的“临界掺量”。基于数据建立了抗压强度和冻融次数之间的定量关系, 两种函数均能反映在冻融循环后其抗压强度的劣化规律, 为轻质土在严寒地区的应用提供了参考。

**[关键词]** 轻质土; 冻融循环; 质量损失; 冻胀率

**[中图分类号]** TU411.6 **[文献标识码]** A

在我国, 冻土面积约为 215 万  $\text{km}^2$ , 约占我国领土面积的 22.3%<sup>[1]</sup>, 冻土问题一直被古今中外工程地质学者关注, 其造成的工程问题屡见不鲜。使用常规材料铺设的路基, 在经历数次冻融循环后便会逐渐丧失承载力, 为此寻求经济有效的抗冻填筑材料尤为迫切。EPS 轻质土是以原料土为主要材料, 将水泥、EPS 颗粒、纤维等材料按照一定的比例制作而成的人工混合土, 由于混入 EPS 颗粒, 使得该材料具有轻质耐久的特点, 水泥作为固化剂, 其强度也较为理想。由于其轻质高强且强度具有可调节的特点, 可以根据工程需要, 通过改变原材料的配比制得不同密度、强度和流动性的混合土<sup>[2]</sup>。为探究冻融作用对路基土的性能影响, 程卓<sup>[3]</sup>等在路基土中添加粉煤灰等土工材料, 结果表明经过多次冻融后, 随着粉煤灰添加, 混合土的内摩擦角以及粘聚力等呈现出先升高后下降的趋势。许雷<sup>[4]</sup>等通过开展不同含水率下对膨胀土进行冻融循环试验, 结果表明在经历冻融循环后, 土体中水分的相态变化会引起水分体积变化, 同时土颗粒也会发生膨胀变形。李卓<sup>[5]</sup>等针对极端气候条件下对南京附近的黏土进行了一系列试验, 结果表明冻融作用可解析为对土体的结构损伤作用, 试样的含水率越高, 环境温度越低, 水结冰的条件越充足, 土体中的孔隙水在结冰

的过程中产生的冻胀力就越大, 冻融循环产生的温度应力也越大。张向东<sup>[6]</sup>等通过对 EPS 颗粒轻质土的抗冻性研究, 得出了 EPS 的添加使得混合土的冻胀率降低, 并通过对比得出了 EPS 添加量在 0.1%~0.3% 时, 可以取得较为理想的抗冻胀效果。冯志密<sup>[7]</sup>等通过对负温条件下的 EPS 轻质土开展了无侧限抗压强度试验, 结果表明: 不同掺量的 EPS 轻质土在不同温度环境下其应力应变关系具有非线性、多阶段性以及软化特性。

近年来随着相关技术日趋成熟, EPS 轻质土作为填充材料得到了大量应用, 但是现有研究对轻质土在冻融条件下的特性研究鲜有报导。笔者通过对冻融作用下的 EPS 轻质土试样开展了相关试验, 对其物理及相关力学性能进行分析, 以为工程设计与施工提供一定的参考。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

本文所采用的原料土取自武汉江夏区某工地基坑内, 取土处距离地面 5 m 左右。固化剂为 42.5 级普通硅酸盐水泥, EPS 颗粒为厂家生产, 粒径约为 1~2 mm, 堆积密度为  $(0.02\sim0.04)\text{ g/cm}^3$ , 纯颗粒密度为  $0.024\text{ g/cm}^3$ , 原料土基本物理性质指标

[收稿日期] 2022-03-03

[第一作者] 顾浩宇(1996-), 男, 江苏南通人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为土工合成材料。

[通信作者] 梅利芳(1975-), 女, 湖北黄冈人, 工学博士, 湖北工业大学副教授, 研究方向为道路、复合土、轻质土等。

见表 1。

表 1 试样土基本物理性质指标

天然含水率/%	27.9
最优含水率/%	16.3
天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.99
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.803
液限 W <sub>L</sub> /%	31.0
塑限 W <sub>p</sub> /%	17.1

1.2 试样制备与养护

在试样制作之前,对原料土进行烘干,随后粉碎过筛备用。各材料掺量均以干土质量为基准,水泥用量为干土质量的 6%, 10%, 14%;EPS 颗粒含量为干土质量的 1%、1.5%、2%、2.5%, 含水率为 30%。

制作试样时,首先将干土和水泥置于搅拌机内搅拌 5 min,搅拌均匀后加水继续搅拌 10 min,然后将 EPS 颗粒添入,搅拌 5 分钟后得到均匀密实的 EPS 颗粒轻质混合土,将轻质土分 3 层填入制样器(直径为 39.1 mm,高度为 80.0 mm)中,每一层击实 25 次。随后将试样放入养护箱中养护,养护温度(20±2)℃,相对湿度大于 95%,养护周期 28 d。制作完毕的试样见图 1。



图 1 轻质土试样

1.3 试验方案

试样养护完毕后,进行冻融循环试验。为防止冻融循环时造成水分流失,每个试样均用保鲜膜包裹后放入低温箱(图 3),冻结温度为-20℃,冻结 12 h 后再将试样置于养护箱中融化 12 h,此为 1 次冻融循环,共进行 9 次冻融循环。



图 2 无侧限压力仪



图 3 低温箱

在每经过 1、3、6、9 次冻融循环后对试样的体积和质量进行测量记录,冻融前试样的体积和质量记作  $v_0$  和  $m_0$ ,冻融循环后试样的体积和质量记作  $v_1$  和  $m_1$ ,则试样的冻胀率和质量损失率分别为

$$(v_1 - v_0)/v_0 \text{ 和 } (m_1 - m_0)/m_0$$

对经历 0、1、3、6、9 次冻融循环后的试样进行无侧限抗压强度测试,所用仪器为校内实验室内提供的全自动无侧限压力仪(图 2),下压速率 1 mm/min,各试样测试时间控制在 5~10 min。

2 试验结果分析

2.1 冻胀率

图 4 为 EPS 掺量 1%,水泥掺量不同时,冻胀率与冻融循环次数关系图。轻质土的冻胀率随着冻融次数的增加呈现出一种先增后减的趋势。在第 3 次冻融后,轻质土冻胀率达到最大值,随后逐渐下降。当轻质土中的水泥含量越高时,其冻胀率越低,这说明水泥的掺量直接影响轻质土的抗冻胀能力。一方面轻质土在经历冻融后其体积发生膨胀的本质是土体内孔隙水冻结后体积扩大,这些冰分布在土体内部的各个通道及孔隙内,冻结后体积扩大从而使土体发生膨胀;而水泥经过水化后形成的水化产物跟土颗粒紧紧吸附在 EPS 颗粒表面,组成了一个颗粒小团体,这些颗粒小团体通过水泥的胶结作用,紧密的联结在一起。当土体内部水分冻结体积扩大时,这些小颗粒团体之间所构成的关系网便会牢牢锁住欲膨胀的冰,限制其体积向外膨胀。水泥含量越多,土体内部形成的胶结网状结构<sup>[8]</sup>也会越多,胶结作用越明显,有效限制了内部孔隙水冻结后的体积膨胀。

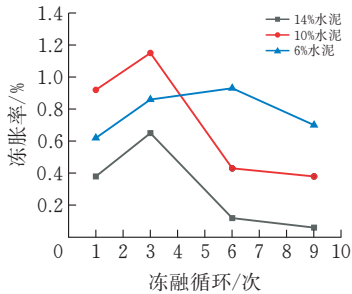


图 4 不同水泥掺量下的轻质土冻胀率与冻融循环次数关系

图 5 为水泥掺量 6%,EPS 颗粒掺量不同时,冻胀率与冻融循环次数的关系图。值得注意的是,当 EPS 含量从 1% 增至 2.5% 时,其冻胀率峰值由 0.97% 降至 0.294%,EPS 掺量越大,试样的冻胀率越小。随着冻融循环次数的增加,4 种 EPS 含量的轻质土其冻胀率均呈现出先增大然后减小的趋势。与分析冻胀率与水泥含量关系不同的是,前者均是在经历三次冻融循环后冻胀率均开始下降,而后者则是两种情况,在 EPS 含量较少的 1% 和 1.5% 的情况下,轻质土试样均是经三次冻融后其冻胀率便逐步下降;而 EPS 含量较多的 2% 和 2.5% 轻质土试

样,经历 6 次冻融后才开始下降,造成这一现象的原因是 EPS 颗粒的添加只置换了同体积的网状胶结结构,使得这种网状结构占比减小,弱化了试样结构的整体性以及强度<sup>[8]</sup>,所以在 EPS 颗粒含量较高的情况下,试样经历冻融时,并没有足够的水化胶结结构来有效限制其体积的膨胀,只能由 EPS 颗粒利用其自身具有的可压缩性以及颗粒内部的孔隙来共同容纳由于冻胀产生的体积增量,所以试样会经历 6 次左右冻融才会达到其冻胀率峰值,而 EPS 颗粒含量较少时试样在水化胶结产物以及 EPS 颗粒的共同作用下完全能够容纳水冻结的体积增量,所以在第三次冻融后冻胀率便会开始下降。

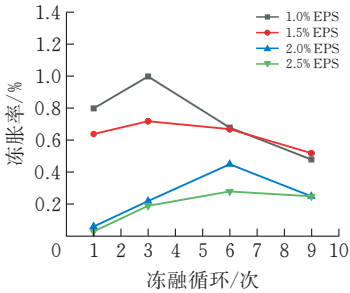
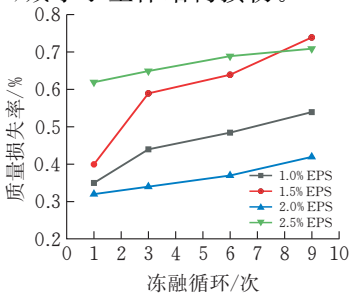


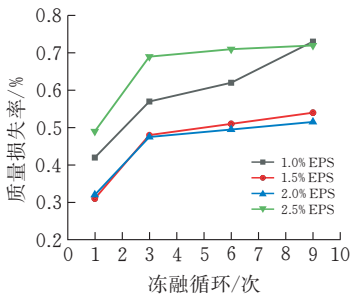
图 5 不同 EPS 颗粒掺量下的轻质土冻胀率与冻融循环次数关系

2.2 质量损失率

轻质土质量的损失反映了其经冻融后的损伤程度<sup>[10]</sup>,图 6 为水泥掺量为 14%和 10%时,EPS 添加量不同的试样质量损失率与冻融次数关系图。从图中我们可以看出,从 1 次冻融到 3 次冻融后,试样的质量损失率陡然上升,从第三次至第九次冻融循环时,试样的质量损失率仍在增加,但上升速率逐渐趋于平缓。造成这种现象的原因是由于在冻融初期,轻质土试样内部各孔隙相对独立,内部水份自由度较低,不能自由迁移,水凝结成冰时体积扩张所产生的膨胀力加速了土体的损伤,造成土体表面颗粒加速脱落;到了冻融循环的中后期,由于水结冰造成的体积扩张逐渐贯通土体内部各个孔道,使得内部孔道相互联通,融化后孔隙水可以自由迁移,分布更均匀,减少了冻融循环时产生冻胀力,降低土体内部结构重新分布,减小了土体结构损伤。



(a) 水泥含量 14%



(b) 水泥含量 10%

图 6 质量损失率与冻融循环次数关系

结合图 6,可以发现当 EPS 含量为 2%时,两种水泥含量不同的试样质量损失率均为最小值,此时轻质土能够发挥较好的抗冻效果。

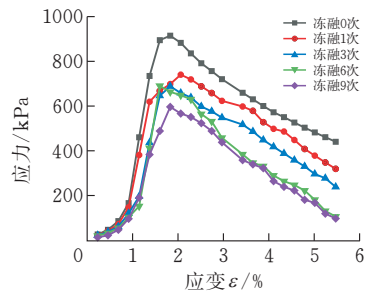
2.3 EPS 颗粒和水泥对强度影响机制分析

根据试验过程中所发现不同配比的试样在经历冻融循环后均表现出类似特征,由于水泥在试样中充当固化剂作用,为了更直观体现 EPS 颗粒对抗冻融循环效果,弱化水泥对试样的固化作用,笔者选取水泥含量为 6%、EPS 含量 1%的试样在经历不同冻融循环次数下的应力应变曲线图。试样在为经历冻融循环之前,峰值应力可达到 930 kPa,一次冻融循环后,试样强度迅速降低至 700 kPa,强度降低约 22%,随着冻融循环次数的增加,试样强度下降趋势逐渐变缓,第三次冻融循环后和第一次相比,峰值应力只下降了 3.4%,9 次冻融后的试样强度下降了 31.7%。图 7b 为 EPS 掺量为 2%的试样经历不同冻融循环次数后的应力应变曲线图,在 EPS 掺量增加一倍后,一次冻融后的试样强度与冻融的试样强度相比,峰值强度降低幅度明显减小,EPS 添加量为 2%时,未经冻融的试样峰值强度为 618 kPa,第一次冻融后试样强度为 566 kPa,降低约 8.4%。经历 9 次冻融循环后,试样强度下降了 28%。

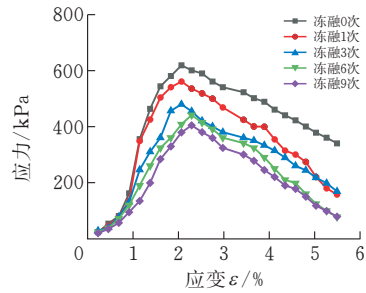
在经历第一次冻融循环后,试样的峰值强度大幅下降,在之后的冻融循环中,其峰值应力降低趋势趋于平缓,这是由于在添加了 EPS 颗粒后,EPS 颗粒与原土体中的土颗粒进行置换,增大了孔隙率,同时 EPS 颗粒内部也分布着大量闭合及开放的孔隙,当土体中的水凝结成冰时,使得土体内部体积膨胀,同时试样中的水泥持续水化也消耗了一部分孔隙水,试样继续冻融时,土体内部水凝结成冰所扩展的空间也越来越有限,同时 EPS 与土颗粒进行置换所增大的土体内部的空隙消纳了部分膨胀的体积,故随着冻融次数增加,其强度损失速率会逐渐平缓。

在轻质土中,水泥起骨架作用,承担了大部分的荷载<sup>[10]</sup>。为研究水泥对轻质土冻融后对其强度的影响,选取水泥含量分别为 14%、10%,6%,EPS 含





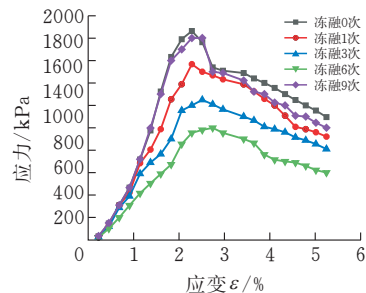
(a) 水泥 6%、EPS1%



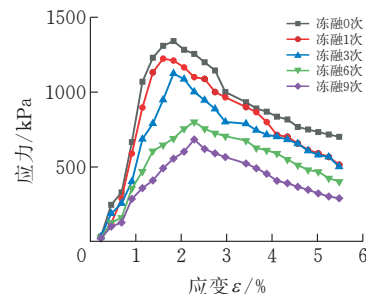
(b) 水泥 6%、EPS2%

图 7 不同冻融循环次数下的轻质土应力应变曲线

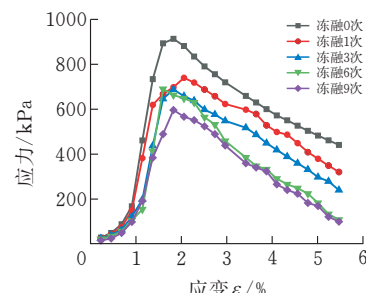
量均为 1% 的试样,组成 3 组平行试样进行对比。图 8a 为水泥含量 14%、EPS 含量 1% 的试样应力应变图,由于水泥含量较高,经第一次冻融后试样的峰值应力从 1864 kPa 下降到 1808 kPa,下降了 56 kPa,峰值应力均集中在 2% 附近。在经历过 3 次冻融循环后,到第 6 次冻融后试样强度下降较大,由 1733 kPa 降至 1431 kPa,下降了 17.4%,第 6 次冻融循环之后,应力应变曲线下降趋势具有一致性;图 8b 为水泥含量 10%EPS 含量为 1% 的试样在不同冻融循环次数下的应力应变曲线图。在水泥含量减少时,冻融 1 次后的试样的峰值应力与未冻融试样的峰值应力相比,下降幅度较大,由原来的 1342 kPa 下降至 1248 kPa,下降了 7%,水泥的减少使得土体内部的胶结网状结构减少,强度较高的骨架结构也减少,使得轻质土限制土体内部体积膨胀的能力下降,承载力也大幅下降。水泥含量越多,这种硬凝的效果就越好,在经历多次冻融循环下,其强度损耗比低于水泥含量较低的轻质土试样。



(a) 水泥 14%、EPS1%



(b) 水泥 10%、EPS1%



(c) 水泥 6%、EPS1%

图 8 不同冻融循环次数下的轻质土应力应变曲线

2.4 冻融循环次数对抗压强度影响分析

图 9 为 EPS 掺量为 6% 时,不同水泥掺量下的轻质土试样其抗压强度随冻融次数的变化关系图。

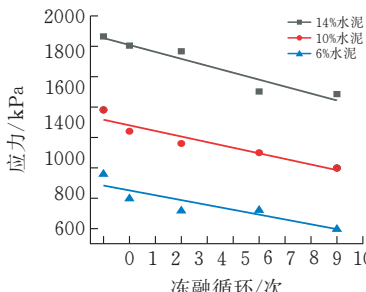


图 9 抗压强度与冻融循环次数关系

从图 9 中可以看出水泥添加量为 14% 的轻质土试样,其初始强度虽高,但其抗压强度下降速率很高,经 9 次冻融后的试样的抗压强度只有未冻融试样的 75%;水泥含量为 6% 的轻质土试样,初始强度只有水泥含量为 14% 的试样的一半,但下降速率却较为平缓,经 9 次冻融后,其最终抗压强度约为初始强度的 65.3%。基于试验基础,对图 9 的数据点进行拟合建立无侧限抗压强度与冻融次数的关系模型,冻融循环次数  $c$  为自变量,无侧限抗压强度为因变量,拟合相关指数  $R^2 = 0.93$ ,拟合效果较好。无侧限抗压强度与冻融次数的关系式如下:

$$q = kc + m$$

式中:  $q$  为无侧限抗压强度;  $k$  和  $m$  均为拟合参数,与冻融次数以及水泥掺量有关。

随着冻融次数的增加,轻质土的无侧限抗压强度也会降低,水泥添加量的不同影响的是截距以及斜率,水泥添加量较低,初始强度低,试样经冻融后

强度下降速率较为缓慢;当水泥添加量较高时,初始强度就会较高,但强度下降的速率较快,所以当水泥添加量处于 10%时,可认为此时试样配比接近最优,试样的初始强度以及强度下降速率均可以达到较为理想的数值。表 2 为 EPS 掺量一定、水泥掺量变化时试样强度随着冻融次数变化的各拟合参数。

表 2 轻质土强度与水泥掺量的拟合参数

水泥含量/%	<i>k</i>	<i>m</i>
14	−56.73	1862.59
10	−43.81	1297.68
6	−29.43	849.04

图 10 为水泥掺量为 6%时,不同 EPS 掺量的轻质土试样的抗压强度与冻融次数关系图。

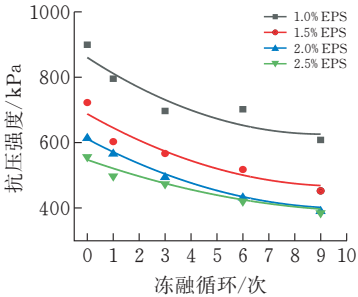


图 10 抗压强度与冻融循环次数关系

在试验的基础上,将图中散点进行拟合建立无侧限抗压强度与冻融次数的关系模型图,冻融次数为自变量,无侧限抗压强度为因变量,拟合相关指数  $R^2=0.90$ ,无侧限抗压强度与冻融循环次数关系为:

$$q = ac^2 + bc + t$$

式中: $q$  为无侧限抗压强度; $a$ 、 $b$ 、 $t$  均为拟合参数,与 EPS 含量有关; $c$  为冻融循环次数。

当 EPS 掺量越高时,轻质土试样在经历冻融循环后,其无侧限抗压强度下降速率越小,但当 EPS 添加量增多时,试样的初始无侧限抗压强度会降低,从图中可知,当 EPS 含量为 2%和 2.5%时,试样强度下降趋势类似,所以我们认为 EPS 添加量控制在 2%以内可以得到较好的抗冻效果,添加量超过 2%的意义不大。表 3 为水泥添加量一定,不同 EPS 掺量的轻质土试样的无侧限抗压强度随着冻融次数而变化的拟合参数。

表 3 轻质土强度与 EPS 掺量的拟合参数

EPS 含量/%	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
1	3.57	−61.36	879.74
1.5	2.58	−51.26	692.46
2	3.29	−52.58	613.13
2.5	1.15	−27.88	547.93

3 结论

1)水泥和 EPS 颗粒能够显著降低轻质土的冻

胀率,水泥掺量越高,其冻胀率越低。随着冻融次数的增加,轻质土冻胀率会呈现出先增后减的趋势。

2)质量损失率反映了轻质土冻融后的损伤程度,EPS 颗粒的添加能有效减少轻质土的质量损失,试验结果表明在 EPS 颗粒添加量在 2%时,可有效降低其质量损失,添加量超过 2%后其效果不明显。

3)EPS 颗粒本身具有的孔隙结构可容纳轻质土内部孔隙水冻结后造成的体积膨胀,随着掺量的增加,轻质土抵抗冻胀变形的能力越强,由此也降低了冻融循环后的强度损失;水泥在轻质土承担着骨架作用,承受大部分荷载,水泥掺量越高,轻质土内部结构联结越紧密,抗冻胀能力越强,轻质土经冻融循环后的强度损失也越少。

4)建立无侧限抗压强度与冻融循环次数的定量关系,基于两种函数的相关系数  $R^2$  为 0.93 和 0.9,均能反映轻质土在经历冻融循环后其无侧限抗压强度的劣化规律。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 董长松,张晓旭,张弛,等.多年冻土区隧道衬砌混凝土冻融循环试验研究[J].公路,2015,60(11):244-247.

[2] 苑立森.聚丙烯纤维 EPS 轻质混合土力学特性研究[D].武汉:湖北工业大学,2014.

[3] 程卓,崔高航,高原昊,等.季冻区粉煤灰加固路基土力学性能试验研究[J].硅酸盐通报,2021,40(11):3854-3864.

[4] 许雷,刘斯宏,鲁洋,等.冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J].岩土力学,2016,37(S2):167-174.

[5] 李卓,刘斯宏,王柳江,等.极端气候条件下南京附近黏土冻融强度试验[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(01):40-44.

[6] 张向东,任昆,李军.EPS 颗粒改良土作为寒区路基填料的抗冻性能研究[J].冰川冻土,2017,39(06):1273-1280.

[7] 冯志密,李兆宇,苏安双,等.负温条件下 EPS 轻质土强度特性试验研究[J].水利科学与寒区工程,2021,4(03):10-14.

[8] 姬凤玲.淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土力学特性研究[D].南京:河海大学,2005.

[9] 张广泰,耿天娇,鲁海波,等.冻融循环下沙漠砂纤维混凝土损伤模型研究[J].硅酸盐通报,2021,40(07):2225-2231.

[10] 朱定华,董磊平,何峰,等.聚苯乙烯纤维轻质混合土的抗压强度特性[J].南京工业大学学报(自然科学版),2010,32(02):53-57.