

文章编号: 1007-2993(2013)01-0029-04

# WFS-FA-EPS 填料冻胀特性试验研究

于永堂<sup>1</sup> 邓安<sup>2,3</sup> 于清华<sup>1</sup>

(1. 机械工业勘察设计院, 陕西西安 710043; 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 210098;  
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098)

**【摘要】** 对废铸砂(WFS)、粉煤灰(FA)、聚苯乙烯(EPS)发泡颗粒、水泥及水按一定质量比例混合制成的复合填料进行了冻胀试验,探讨了冻胀率与水泥含量、EPS颗粒含量以及含水率的关系。试验结果表明:单因素变化时,WFS-FA-EPS填料的冻胀率随水泥或EPS颗粒掺入比的增大近似呈线性降低,随含水率的增大近似呈线性增大;常温下导热系数随EPS颗粒掺入比的增大近似呈一阶指数降低;WFS-FA-EPS填料具有密度小、隔热性好、抗冻胀变形能力强的特点,适于作为寒区高冻胀路基的换填材料使用。

**【关键词】** 废铸砂;粉煤灰;聚苯乙烯颗粒;轻质填料;隔热材料;冻胀变形

**【中图分类号】** TU 411

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2013.01.008

## Experimental Study on Frost Heaving Behavior of WFS-FA-EPS Fills

Yu Yongtang<sup>1</sup> Deng An<sup>2,3</sup> Yu Qinghua<sup>1</sup>

(1. China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;  
3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**【Abstract】** A cement treated fills was formed by blending waste foundry sand (WFS), fly ash (FA), expandable polystyrene (EPS) beads, Portland cement and water in proportions. The effects of mixing ratios on the frost heaving deformation of the fills have been studied. The results show that increase of EPS beads content or cement content can reduce the frost heaving deformation of the WFS-FA-EPS fills. The single factor is changed in the experiment, the frost heaving ratio decrease close to linearity with the increase of the cement content ratio or the EPS beads content ratio, the frost heaving ratio increase close to linearity with the increase of the water content. The thermal conductivity of the fills close to first-order exponential decay with the increase of the EPS beads content ratio under normal temperature; The formed WFS-FA-EPS fills with the characteristics of low density, low thermal conductivity and resistance to frost heaving deformation, which can be used as frost-resistant materials in the roadbed engineering of cold regions.

**【Key words】** waste foundry sand; fly ash; EPS beads; lightweight fill; heat insulator; frost heaving deformation

## 0 引言

季节性冻土地区由于路基的高冻胀变形而引发的路面开裂破坏是寒区道路工程的主要病害之一。目前,针对冻胀敏感性土体的处置方法很多,其中聚苯乙烯(EPS)泡沫块体由于导热系数低、密度小,在国内外已经广泛用于寒区道路工程的近地表隔热以及抗冻填筑工程,起到了非常好的效果<sup>[1-3]</sup>。但是由于EPS泡沫块体形状预制、施工不便以及成本偏高等因素,其工程应用受到一定的制约,有必要寻找一种经济、实用的低冻胀、低热传导性的土工填筑材料。利用的EPS泡沫材料低冻胀、低导热性的优

点,将废铸砂、粉煤灰、EPS发泡颗粒与少量水泥和水搅拌而制成WFS-FA-EPS填料,并利用该填料置换冻胀敏感性土体,是一种减小路基冻胀变形和兼具隔热处理功能的新方法<sup>[4-6]</sup>。该填料不仅克服了EPS泡沫块体的缺点,具备一定程度的流动性能,不受填筑体空间形式的制约,还能为废铸砂、粉煤灰这两种量大面广的工业废弃物的再生利用寻找一种新的途径。

国内很多学者已对以淤泥质土、粘土等为原料土形成的EPS颗粒轻质混合土在常温状态下重度、变形强度、动力特性、渗透特性及本构模型等进行了

基金项目:国家自然科学基金项目(50708031)

作者简介:于永堂,1983年生,男,满族,辽宁鞍山人,硕士研究生,工程师。主要研究方向:湿陷性黄土地基处理技术、土工测试技术。E-mail: yuyongtang@126.com

研究<sup>[7-11]</sup>。但针对 EPS 颗粒轻质填料在冻结条件的下变形特性的研究成果较少。本文将通过室内冻胀试验研究 WFS-FA-EPS 填料应用于寒区工程的冻胀变形特性,为该填料在寒区工程中的应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料基本性质

试验材料包括废铸砂、粉煤灰、EPS 发泡颗粒、水泥和水。废铸砂取自某铸造厂发动机铸模多次循

环使用后的无机黏土废铸砂,粉煤灰为湿法排放的低钙粉煤灰,两种材料的基本物理性质指标见表 1,废铸砂、粉煤灰与一般粘土、砂土相比,相对密度略小,有利于降低填料的密度。颗粒分析试验结果见图 1,废铸砂的粒径分布范围狭窄,颗粒大小均匀,直径均小于 2 mm,且超过 90% 的颗粒在 0.5~0.1 mm 范围内,不均匀系数  $C_u = 1.64$ ,曲率系数  $C_c = 1.06$ ,属于级配不良的砂性土;粉煤灰的不均匀系数  $C_u = 10.5$ ,曲率系数  $C_c = 2.88$ ,级配良好。

表 1 废铸砂与粉煤灰基本物理性质指标

| 试验材料 | 天然含水率<br>$w_b / \%$ | 堆积密度<br>$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 相对密度<br>$G_s$ | 最小干密度<br>$\rho_{dmin} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 最大干密度<br>$\rho_{dmax} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 最小孔隙比<br>$e_{min}$ | 最大孔隙比<br>$e_{max}$ |
|------|---------------------|--|---------------|--|--|--------------------|--------------------|
| 废铸砂  | 1~5                 | 1.248  | 2.5           | 1.259  | 1.577  | 0.585              | 0.986              |
| 粉煤灰  | 22.3                | 0.598  | 2.2           | 0.605  | 0.867  | 1.537              | 2.636              |

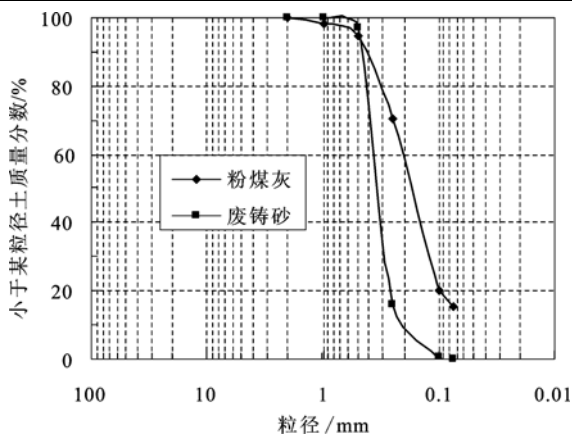


图 1 废铸砂与粉煤灰颗分曲线

EPS 发泡颗粒为球形,是聚苯乙烯树脂经热力发泡形成,含大量封闭和开放微孔,直径范围为 2~4 mm,堆积密度为  $0.014 \text{ g/cm}^3$ 。水泥为标号 32.5 级普通硅酸盐水泥,水为自来水。

### 1.2 试验方法

#### 1) 试样制备

首先按配比称取各材料质量,将废铸砂、粉煤灰、水泥(可选)混合,在拌和容器中搅拌,待拌匀后加水拌和,使之形成均匀的浆体,再加入 EPS 颗粒搅拌,待 EPS 颗粒均匀分布于浆体中后停止搅拌待用。无水泥试样拌合均匀后,需要用保鲜膜密封,闷料 10 h,使填料中水分分布均匀。将拌合好的混合物通过分层振捣,填入内径 $\times$ 高=60 mm $\times$ 80 mm 的钢化有机玻璃制样器中,保证密实。上下封口,放置于养护室内养护,养护温度为  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,12 h 后脱模,用塑料袋密封养护 28 d,无水泥试样装好样后直接进行试验。

#### 2) 冻结试验

试验参照《土工试验方法标准》<sup>[12]</sup>和《人工冻土

物理力学性能试验第二部分:土壤冻胀试验方法》<sup>[13]</sup>进行。采取单向自由冻结,轴向无约束,限制侧向变形,冷端底板冻结温度为  $-10^\circ\text{C}$ ,冻结环境温度保持在  $1 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。试验装置包括试样盒、环境恒温箱、制冷系统、补水系统、温度采集系统、位移采集系统五部分(见图 2)。冻胀试样直径 $\times$ 高=60 mm $\times$ 80 mm。冻胀试样筒采用钢化有机玻璃筒制成,壁厚 1 cm。采用自制的铜-康铜热电偶测定温度变化,自试样底端开始,轴向每隔 1 cm 处设置 1 个热电偶(共 7 个),实时监测试验过程,监测断面处温度变化。冻胀变形量的监测采用数显式位移传感器,精度 0.01 mm。

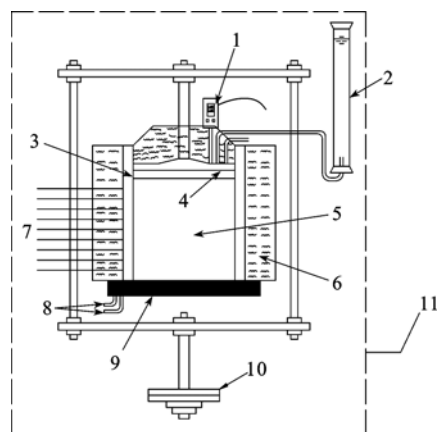


图 2 试验装置原理图

## 2 试验结果与分析

### 2.1 配比及密度

本次试验的配比均采用质量控制方式,以废铸砂(WFS)的质量为基准,掺加一定百分比的水泥

(C)、粉煤灰(F)和聚苯乙烯(E)颗粒,固体成分掺入质量比 $w(\%) = (\text{组成材料质量}/\text{废铸砂质量}) \times 100\%$ ,其中含水率为水与所有固相组分的比值。本次试验中WFS-FA-EPS填料的配比、密度( $\rho$ )以及冻胀率( $\eta$ )试验结果见表2。当EPS颗粒的掺入质量比在0.62%~1.85%间变动时,其密度可以控制在0.88~1.23 g/cm<sup>3</sup>之间,WFS-FA-EPS填料的密度明显低于常规土的天然密度。

表2 填料的质量配比、密度和冻胀率

| 编号  | $w/\%$ |       |    |      |    | $\rho$<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | $\eta$<br>/% |
|-----|--------|-------|----|------|----|----------------------------------|--------------|
|     | WFS    | C     | F  | E    | w  |                                  |              |
| T1  | 100    | 0     | 30 | 0    | 25 | 1.616                            | 2.48         |
| T2  | 100    | 0     | 30 | 1.08 | 25 | 1.141                            | 0.39         |
| T3  | 100    | 3.85  | 30 | 0    | 30 | 1.621                            | 1.98         |
| T4  | 100    | 3.85  | 30 | 0.62 | 30 | 1.213                            | 0.91         |
| T5  | 100    | 3.85  | 30 | 1.08 | 30 | 1.043                            | 0.32         |
| T6  | 100    | 6.15  | 30 | 0    | 30 | 1.638                            | 1.28         |
| T7  | 100    | 6.15  | 30 | 0.62 | 30 | 1.229                            | 0.66         |
| T8  | 100    | 6.15  | 30 | 1.08 | 30 | 1.134                            | 0.21         |
| T9  | 100    | 6.15  | 30 | 1.08 | 20 | 1.011                            | 0.12         |
| T10 | 100    | 6.15  | 30 | 1.08 | 25 | 1.019                            | 0.14         |
| T11 | 100    | 6.15  | 30 | 1.08 | 35 | 1.146                            | 0.25         |
| T12 | 100    | 7.69  | 30 | 0    | 30 | 1.653                            | 0.98         |
| T13 | 100    | 7.69  | 30 | 0.62 | 30 | 1.231                            | 0.57         |
| T14 | 100    | 7.69  | 30 | 1.08 | 30 | 1.141                            | 0.12         |
| T15 | 100    | 7.69  | 30 | 1.54 | 30 | 0.927                            | 0.01         |
| T16 | 100    | 7.69  | 30 | 1.85 | 30 | 0.883                            | -0.07        |
| T17 | 100    | 11.54 | 30 | 1.08 | 30 | 1.158                            | 0.08         |

## 2.2 水泥含量对冻胀率的影响

当 $w(F)=30\%$ 、 $w(W)=30\%$ 、 $w(E)$ 为0%和1.08%两种情况下,水泥掺入质量比与冻胀率的关系见图3。

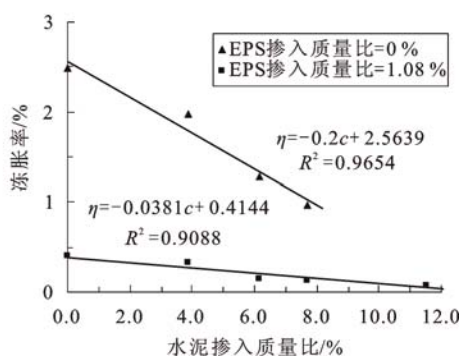


图3 水泥掺入质量比与冻胀率关系曲线

由图3可知,冻胀率随着水泥含量的增加近似呈线性降低。当 $w(E)=1.08\%$ 相同时,不含水泥的试样的冻胀率是水泥掺入量最高的试样( $w(C)=11.54\%$ )的5倍,水泥的掺入对冻胀的抑制作用非

常明显。此外,含EPS颗粒的配比冻胀率降低的幅度明显低于不含EPS颗粒的配比。水泥的掺入增大了填料的之间粘结力。粘结力的增大将导致冰晶体在形成和生长发育过程中需要克服的填料颗粒间力变大,起到抑制冰晶分凝生长的作用<sup>[14]</sup>,从而减小填料的冻胀变形量。

## 2.3 EPS颗粒含量对冻胀率的影响

当其它条件相同时,EPS掺入质量比与冻胀率的关系曲线见图4。

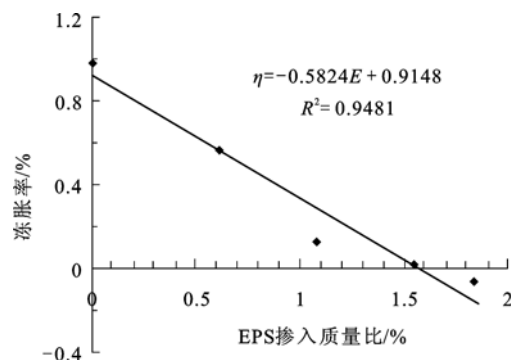


图4 EPS掺入质量比与冻胀率关系曲线

由图4可知,当 $w(C)=7.69\%$ 、 $w(F)=30\%$ 、 $w(E)$ 在0%~1.85%之间变化时,冻胀率的变化范围在0.98%~-0.07%之间(负值为试样低温收缩),当 $w(E)=1.54\%$ 时,冻胀率接近于0%。冻胀率随EPS颗粒含量的增加而逐渐降低,采用线性函数分段拟合,具有较好的相关性( $R^2=0.9481$ )。EPS泡沫颗粒的原料相对密度一般为1.05~1.06,工程上常用标称密度 $\rho=18\sim45\text{ kg/m}^3$ 的EPS泡沫,空气体积约占EPS泡沫总体积的96%~98%。因此,填料中掺入EPS发泡颗粒,实质上是增大了填料孔隙率。当填料中水分冻结时,EPS颗粒掺入后增加的孔隙将容纳部分填料中原位水分和迁移水分冻结形成的冻胀增量,在一定程度上促使冻胀变形降低。

## 2.4 水分含量对冻胀率的影响

当 $w(C)=6.15\%$ 、 $w(E)=1.08\%$ 、 $w(F)=30\%$ 时,含水率与冻胀率的关系见图5。由图5可知,冻胀率随含水率的增加近似呈线性增长。当含水率在20%~35%之间变化时,冻胀率从0.12%增至0.25%,含水率每增加1%,冻胀率约增加0.01%。水分是冻胀的源头,对冻胀特性的影响明显,含水率高则可冻结的自由水含量增大,形成的冻胀力及冻胀变形大。由于试验为封闭系统,填料中的水分为水泥水化反应消耗剩余的水分,在满足施工便利和水泥水化所需水分的情况下,在寒区应用时,应适当降低填料含水率,设置排水设施。

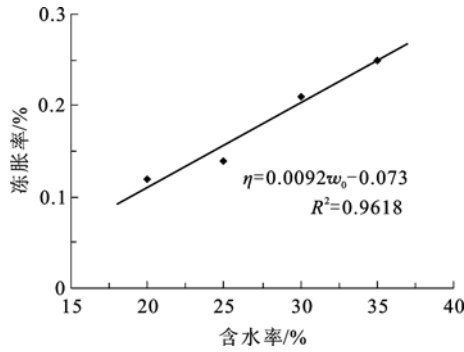


图5 含水率与冻胀率关系曲线

### 2.5 EPS 颗粒含量对导热系数的影响

冻结前,在常温下采用 ISOMET 热特性分析仪对试样进行了导热系数的测试。EPS 掺入质量比与导热系数关系曲线见图 6。导热系数随 EPS 颗粒含量的增加近似呈指数形式衰减。当 EPS 颗粒含量增加后,相当于增大了填料的孔隙率,降低了干密度,引起填料导热系数也随之越低。对 WFS-FA-EPS 填料导热系数的研究表明,冻结状态下,WFS-FA-EPS 填料的导热系数要明显低于大部分常用路面、路基材料或天然土的导热系数<sup>[5]</sup>。WFS-FA-EPS 填料的低导热系数的优点,将利于其降低路基冻深。

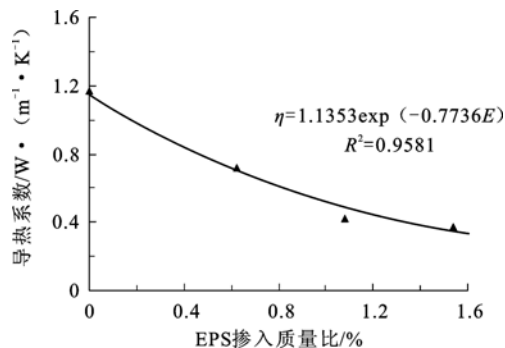


图6 EPS 掺入质量比与导热系数关系曲线

## 3 结论

1) WFS-FA-EPS 填料密度小、导热系数小、抗冻胀变形能力强,适用作寒区高冻胀路基的换填材料使用。

2) 水泥的掺加增大了填料颗粒间的粘结力,提高了填料对冻胀力的抵抗能力,降低了冻胀变形,且冻胀率随水泥掺入质量比的增大近似呈线性降低。

3) EPS 颗粒的掺加,提高了填料的孔隙率,降低了填料密度,增大的孔隙容纳了部分冻胀变形,冻胀

率随 EPS 颗粒掺入质量比的增大近似呈线性降低。

4) 含水率是影响填料冻胀变形的主要因素,冻胀率随含水率的增加近似呈线性增大。

### 参考文献

- [1] YU YONG TANG, DENG AN. Mechanism and prevention of highway distress in seasonal frost areas [C]//Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation: Springer & China Science, 2008:797-802.
- [2] HORVATH J S. Special issue on geofoam: Overview and summary. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15(1-3):77-120.
- [3] 孙立民. 保温材料在青藏铁路路基工程中的应用[J]. 冰川冻土, 2003, 25(z1):54-58.
- [4] 于永堂. 废铸砂-粉煤灰-聚苯乙烯颗粒冻融特性试验研究[D]. 南京:河海大学, 2009.
- [5] 邓安, 于永堂, 王海波. WFS-FA-EPS 填料导热系数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1297-1302.
- [6] 邓安, 于永堂. 冻融循环对轻质填料抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4):448-452.
- [7] 刘汉龙, 董金梅, 周云东, 等. 聚苯乙烯轻质混合土物理力学特性的影响因素[J]. 岩土力学, 2005, 26(3):446-449.
- [8] 黎冰, 高玉峰. 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1042-1047.
- [9] 刘汉龙, 朱云华, 董金梅. 不同固结压力下聚苯乙烯轻质混合土的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11):2333-2336.
- [10] 朱伟, 姬凤玲, 李明东, 等. 轻质土密度、强度与材料组成的关系研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1411-1414.
- [11] 刘汉龙, 董金梅, 周云冬, 等. 聚苯乙烯轻质混合土应力-应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 579-583.
- [12] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [13] 中华人民共和国煤炭工业部. MT/T 593.2-1996 人工冻土物理力学性能试验第 2 部分:土壤冻胀试验方法[S]. 北京:煤炭工业出版社, 1996.
- [14] Wang J, Xu X Z, et al. Influences of temperature and pressure on ice formation and cryogenic structure of freezing soils[J]. Journal of Cryosphere, 1996(2)87-92.

收稿日期:2012-05-29