

文章编号:1007-9629(2011)06-0850-05

干湿循环下复合固废填料配比对强度的影响

何忠意^{1,2}, 邓 安^{1,2}, 周亚东^{1,2}, 王海波³

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 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. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 通过对不同配比的 9 组复合固废轻质填料(简称轻质填料)试样在不同干湿循环次数下的单轴抗压强度试验,分析了干湿循环下各组分掺入比对轻质填料抗压强度的影响. 结果表明:轻质填料经历 8 次干湿循环后仍有较好的力学性能,达到或超过水泥土的强度要求. 随着水泥掺量的增加,轻质填料在早期干湿循环过程中强度提高,有助于后期抗干湿循环. 适量掺入粉煤灰,有利于提高轻质填料的强度及抗干湿循环能力. 聚苯乙烯颗粒超过 1%(质量分数),会衰减轻质填料的强度和降低其抗干湿破坏的能力. 提出了轻质填料的配比范围.

关键词: 复合轻质填料; 干湿循环; 抗压强度; 废铸砂; 聚苯乙烯颗粒; 粉煤灰

中图分类号: TU411

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.025

Effect of Mixture Proportions on Compressive Strength of Composite Geomaterial Subjected to Drying-Wetting Cycles

HE Zhong-yi^{1,2}, DENG An^{1,2}, ZHOU Ya-dong^{1,2}, WANG Hai-bo³

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. MOE Key Laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Nine series of samples of composite lightweight geomaterials were produced by mixing waste foundry sand, fly ash, expanded polystyrene (EPS) bead, water and Portland cement in proportions, which were exposed to designated drying-wetting (D-W) cycles. Uniaxial compression tests were carried out on the samples to investigate the effect of mix proportions onto the structural integrity of the geomaterial. Results indicate that the geomaterial offers promise as soil-cement mixtures after up to 8 D-W cycles. Along with increase of cement content, the compressive strength of the geomaterial gains in initial 2–3 D-W actions. To add fly ash properly enhances the strength gain and D-W resistance of the geomaterial. Although EPS addition prompts the light weight of the geomaterial, its addition, if above 1% (by mass), will lead to strength loss. Optimal mix proportions for the geomaterial are suggested.

Key words: composite lightweight geomaterial; drying-wetting cycle; compressive strength; waste foundry sand (WFS); expanded polystyrene (EPS) bead; fly ash

由于降雨、地下水位等环境因素的变化会使土工筑筑材料经受干湿循环的作用,在多次干湿循环交替作用下,材料的强度往往出现衰减,力学性状出

现疲态^[1]. 在这种情况下,研究基于聚苯乙烯颗粒的新型复合固废轻质填料在多次干湿循环作用下的强度变化规律及其影响机制对于填筑工程的水稳定性

收稿日期:2010-08-16; 修订日期:2010-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50708031);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B1020143)

第一作者:何忠意(1986—),男,湖南衡阳人,河海大学硕士. E-mail:hezongyihao@163.com

通信作者:邓 安(1975—),男,江西靖安人,河海大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:a_deng@hhu.edu.cn

具有较为重要的研究意义。

复合固废轻质填料(以下简称轻质填料)由废铸砂、粉煤灰、聚苯乙烯颗粒、水和少量水泥混合凝固而成,具有轻质、强度可控的特点,适用于路堤、桥台与挡墙回填^[2]。土工填筑材料在多次干湿循环作用下的水稳定性是近来研究^[1,3-6]的重要方向,而对该新型轻质填料在干湿交替作用下的水稳定性重要指标之一——强度特性的研究还鲜见报道。本文通过室内干湿循环试验,研究该轻质填料在干湿循环作用下抗压强度的变化规律,分析其强度变化的影响因素,为轻质填料的水稳定性提供理论依据与参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用废铸砂(WFS)取自上海柴油机股份有限公司南京秣陵铸造总厂,其天然含水率为 1.00%~3.00%(质量分数,本文所涉及的含水率、组成、掺量等均为质量分数),密度为 2.60 g/cm³,天然堆积密度为 1.19 g/cm³,轻型击实试验测得其最大干密度为 1.46 g/cm³,属于级配不良砂性土。粉煤灰取自南京聚力粉煤灰建材厂,二级,密度为 2.20 g/cm³,天然堆积密度为 0.95 g/cm³,轻型击实试验测得其最大干密度为 1.33 g/cm³,级配良好。水泥为钟山牌复合普通硅酸盐水泥,标号为 C32.5,相对密度为 3.0。用水用自来水。可发性聚苯乙烯颗粒(EPS)取自于南京友邦塑料制品厂,堆积密度为 0.014 g/cm³,颗粒密度为 0.025 g/cm³,直径范围为 2~4 mm。图

1 和表 1 分别为材料的级配曲线与主要化学组成。

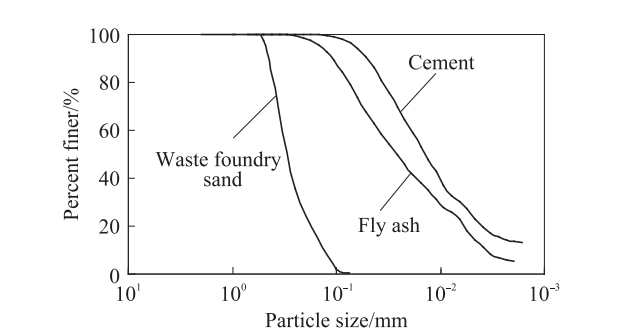


图 1 废铸砂、粉煤灰和水泥的级配曲线
Fig. 1 Gradation curves of waste foundry sand, fly ash and cement

Table 1 Composition (by mass) of fly ash and cement %							
Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	IL
Fly ash	2.50	52.42	34.08	0.49	1.66	4.91	3.99
Cement	52.77	22.04	13.56	4.00	3.22	2.34	0.55

1.2 试样配比和制备

试样配比见表 2,其中各组分掺量为基于 WFS 的质量分数。粉煤灰掺量为 15%~60%,水泥掺量为 3.85%~15.38%,EPS 颗粒掺量为 0.62%~1.54%,含水率控制在 25%。轻质填料密度为 1.04~1.54 g/cm³,相对天然填土(密度为 1.90 g/cm³)减少了 30%~50%,即平均每掺入 0.5%的 EPS 颗粒,密度减少 0.27 g/cm³,约 16%。

Table 2 Mix proportion, density and compressive strength of samples										
Sample	Mix ratio by WFS mass/%				Density/(g · cm ⁻³)	Compressive strength by drying-wetting cycles /MPa				
	Fly ash	Cement	EPS	Water		0 cycle	2 cycles	4 cycles	6 cycles	8 cycles
S1	30	3.85	1.08	25	1.30	0.93	0.99	0.86	0.79	0.77
S2	30	7.69	1.08	25	1.31	2.11	2.17	2.30	2.11	2.01
S3	30	11.54	1.08	25	1.33	3.00	3.12	3.36	3.17	2.98
S4	30	15.38	1.08	25	1.35	4.35	4.75	5.20	4.94	4.73
S5	15	11.54	1.08	25	1.26	2.38	2.47	2.60	2.42	2.30
S6	45	11.54	1.08	25	1.33	3.73	3.94	4.26	4.04	3.89
S7	60	11.54	1.08	25	1.33	3.20	3.39	3.51	3.31	3.15
S8	30	11.54	0.62	25	1.54	5.00	5.54	5.72	5.82	5.26
S9	30	11.54	1.54	25	1.04	2.25	2.47	2.33	2.25	2.15

按设计好的配比先称取 WFS、粉煤灰和水泥以及 EPS 颗粒材料,利用水泥胶砂搅拌机将材料混合搅拌均匀,采用对开模(φ50×100 mm)分层制样,连同制样器,放入相对湿度为 95%,(20±2)℃的养护室内养护,约 12 h 后脱模。为了保证试样的含水率,脱模后的试样立即用塑料袋密封好,水平放到玻璃

片上进行养护至试验龄期。

1.3 试验方法

同一配比制备 15 个试样,分为 5 组,每组 3 个试样,养护 28 d 后,将 5 组试样分别按 0,2,4,6,8 次进行干湿循环,然后测试其单轴抗压强度,加载速率为 1.5 mm/min,取平均值为该组试样强度结果。

干湿循环参考美国试验与材料学会 (ASTM) D559—2003《击密水泥土干湿循环试验规范》以及 GB 11975—1989《加气混凝土干湿循环试验方法》，定义试样抽气 2 h 后，饱和浸水 48 h 为浸水过程，定义试样在 35 ℃烘箱干燥 24 h 为烘干过程，1 个循环由浸水、烘干两个过程组成。养护结束后，以浸水为 1 个循环的开始。

2 试验结果与分析

2.1 干湿循环后单轴抗压试验中的破坏形态

图 2 是试样 S1 先养护 28 d，再经过 2, 4, 6,

8 次干湿循环作用后在单轴抗压试验中的破坏形态。由图 2 可见，随着干湿循环次数的增加，轻质填料破坏由塑性破坏逐渐向脆性破坏转变，多次循环后，试样抗压试验过程中会出现外表面脱落现象，这可能是由于经历若干次干湿循环作用后，试样外表面产生一些细小的微孔或裂隙，尤其是胶凝骨架结构和 EPS 颗粒的收缩，导致其接触界面产生微孔和裂隙，一些细微裂纹的张开度扩大、加深，同时一些短小的裂隙连通，发展形成长大裂隙，当试样受到压力时，裂隙在应力集中作用下，裂缝进一步发育，造成试样脆性破裂越来越明显。

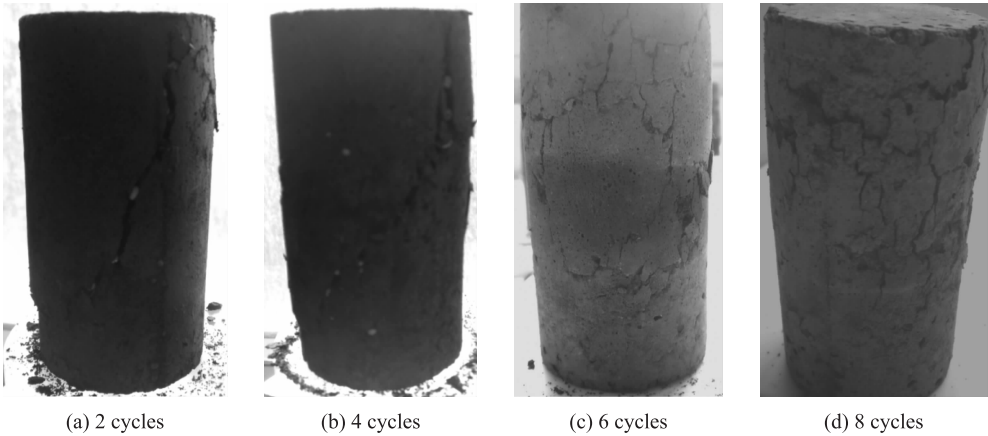


图 2 不同干湿循环次数后试样 S1 的单轴抗压破坏形态
Fig. 2 Failure patterns of sample S1 in uniaxial compression test following varied drying-wetting cycles

2.2 干湿循环对抗压强度的影响

表 2 列出了试样 S1~S9 先养护 28 d，再经过 0, 2, 4, 6, 8 次干湿循环作用后在单轴抗压试验中的抗压强度 (峰值)。由表 2 可见，轻质填料经历若干次干湿循环作用后，其抗压强度总体上在前 4~6 次干湿循环中稍有增加，后期到 8 次干湿循环时强度又回落到干湿循环前水平。这一规律与固化土试验结果一致^[5]，主要与水泥水化反应有关。

在干湿循环早期 (4~6 次)，轻质填料抗压强度的少量增加与胶凝材料在适温下进一步固化有关。由于脱湿过程中含水量的降低，废铸砂-粉煤灰-水泥形成的胶凝结构产生收缩，干密度增大，且适宜的烘干温度促进了试样的进一步养护，水泥和粉煤灰的水化反应得到促进^[5]，增强了颗粒之间的胶结能力，从而使得轻质填料在整体上表现出抗压强度增加。如果水泥掺量较低 (如试样 S1)，到养护龄期 28 d，水泥水化基本完成，即使后期的适温也不足以促进明显的水化反应，故而不能提高材料的抗压强度。

随着干湿循环次数的进一步增加 (8 次)，在轻

质填料结构上产生不均匀分布的吸湿应力使轻质填料整体结构产生吸力损伤，会使试样产生一些结构性裂隙和缺陷^[6]，尤其是在 EPS 颗粒与胶凝骨架结构的接触界面间。此时，脱湿过程的适温养护不再起主要作用，试样以裂隙发育为主。脱湿所致的含水率降低导致材料的胶凝骨架收缩，使试样发生结构性破坏 (比如细微裂纹扩大、加深，短小裂隙的连通和延长)，破坏了试样的完整性，引起其抗压强度下降^[3]。

2.3 水泥掺量对抗压强度的影响

由表 2 可见，对于试样 S1~S4，随着水泥掺量在 3.85%~15.38% 内变化，轻质填料的初始抗压强度相应地在 0.93~4.34 MPa 内变化，且材料抗压强度随水泥掺量的增加而基本呈线性增大。当水泥掺量达到 5% 左右时，材料强度可达到 1 MPa 以上，满足水泥土的抗压强度要求。在早期干湿循环过程中，相对初始抗压强度，材料的抗压强度呈现不同幅度的增长，随着水泥掺量的递增，试样 S1~S4 的强度增长率分别为 6.6%，9.1%，11.9%，19.7%。随着干湿循环的继续，试样抗压强度开始出现不同

程度的衰减.当水泥掺量为 3.85%时,试样 S1 经过 2 次干湿循环作用后,抗压强度开始衰减.当水泥掺量为 7.69%~15.38 时,试样 S2~S4 在 4 次干湿循环作用后,抗压强度出现衰减.经历干湿循环作用后各试样的最大强度衰减率分别为 21.8%,12.5%,11.1%和 16.5%.

由表 2 还可见,在 8 次干湿循环作用中,相对初始抗压强度,水泥掺量为 3.85%和 7.69%时,试样的抗压强度变小,水泥掺量为 11.54%和 15.38%时,试样总体抗压强度仍然增大.由此可见,一方面,在早期干湿循环过程中,增加水泥掺量,干湿循环过程中适宜的温度和充足的水分使得固化作用加强;另一方面,由于提高水泥的掺量,胶凝骨架结构本身的抗压强度显著提高,使得其抗吸湿、脱湿能力加强,后期干湿循环作用对材料的损伤相对变小.

2.4 粉煤灰掺量对抗压强度的影响

由表 2 可见,对于试样 S5,S3,S6,S7(粉煤灰掺量分别为 15%,30%,45%,60%),随着粉煤灰掺量的增加,其抗压强度先增大后减小,并在粉煤灰掺量为 45%时出现明显的转折点.这是因为粉煤灰掺量较低时,与水泥熟料水化生成 C-S-H 胶凝材料,使得轻质填料抗压强度增大.当粉煤灰掺量相对较大时,胶凝材料总量中的水泥熟料含量相对减少,熟料水化生成的 Ca(OH)₂ 量也相对较少,减少了掺和料水化反应生成 C-S-H 的比例,但还有部分粉煤灰颗粒没有参与反应,难以有足够的水化产物填充颗粒间的空隙^[7],导致轻质填料抗压强度逐步减小.

表 2 还可见,在早期干湿循环过程中,随着粉煤灰掺量的递增,试样 S5,S3,S6,S7 的强度增长率分别为 9.5%,11.9%,14.4%,9.6%.在经过 4 次循环后,试样抗压强度出现衰减,试样 S5,S3,S6,S7 的最大强度衰减率分别为 11.4%,11.1%,12.6%,10.2%.由此可见,适当掺加粉煤灰,对改善轻质填料的抗压强度以及抗干湿循环都具有很重要的作用.

2.5 EPS 颗粒掺量对抗压强度的影响

由表 2 可见,对于试样 S8,S3 和 S9 即 EPS 掺量分别为 0.62%,1.08%,1.54%,随着 EPS 掺量的增大,轻质填料的抗压强度递减.然而,结果表明,经过 8 次干湿循环的轻质填料抗压强度仍在 2 MPa 以上,满足水泥土的强度要求.同一配比试样,随着干湿循环次数的递增,其抗压强度仍符合先微增后回落的变化规律.比如,在早期干湿循环过程中,随着 EPS 掺量的递增,试样 S8,S3,S9 相应的强度增长率分别为 16.4%,11.9%,9.7%.试样分别经过

2,4,6 次循环后,都出现强度衰减现象.相对循环过程中最大抗压强度,后期干湿循环中,试样 S8,S3 和 S9 强度衰减率分别为 9.6%,11.1%和 13.0%,基本回落到初期强度水平.

抗压强度的衰减与 EPS 颗粒掺量成反向变化.在 8 次干湿循环后,相对初始抗压强度,EPS 掺量为 0.62%时,试样的抗压强度微弱增加,而 EPS 掺量为 1.08%和 1.54%时,试样的抗压强度微弱减小.可见,EPS 掺量超过 1%时,材料经历干湿循环后,抗压强度有微弱衰减,即 EPS 掺量较高,会减小轻质填料抗干湿循环能力.这主要是因为,在轻质填料中,EPS 颗粒的置换作用和空间效应一方面增加了胶凝骨架结构与 EPS 颗粒接触界面,另一方面减少了抗压强度较高的胶凝骨架,在干湿交替作用下,轻质填料两相介质更容易产生微孔、裂缝以及裂隙,导致结构在受力时产生应力集中,降低材料的强度^[8].

3 结论

(1)随着干湿循环次数的递增,轻质填料脆性破坏明显,抗压强度先少量增加后基本回落.干湿循环次数的转折点与材料配比有关.当水泥掺量达到 5%左右时,材料的抗压强度满足水泥土的抗压强度要求.

(2)在早期干湿循环过程中,随着水泥掺量增加,适宜的温度和水分有助于提高轻质填料的抗压强度.掺入适量粉煤灰可以提高轻质填料的抗压强度以及抗干湿循环能力.

(3)当水泥掺量在 5%~12%,粉煤灰掺量在 30%左右,EPS 颗粒掺量在 1%以内时,轻质填料在干湿循环作用下具有较好的水稳定性.

参考文献:

[1] 王建华,高玉琴.干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J].中国铁道科学,2006,27(5):23-27.
WANG Jian-hua,GAO Yu-qin. Study on the strength degradation mechanism of cement-soils resulting from dry-wet cycles [J]. China Railway Science,2006,27(5):23-27. (in Chinese)

[2] 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.
DENG An,YU Yong-tang. Influence of freeze-thaw cycles on compressive strength of WFS-FA-EPS beads lightweight fillers [J]. Journal of Building Materials,2009,12(4):448-452. (in Chinese)

[3] 周永祥,阎培渝.固化盐渍土经干湿循环后力学性能变化的机理[J].建筑材料学报,2006,9(6):8-15.
ZHOU Yong-xiang,YAN Pei-yu. Mechanism of alteration in