

粉土塑性指数对水泥基粉土气泡混合轻质土性能影响研究

王 凯¹, 于锦涛², 孙玉海³, 杨 强⁴, 张宏博^{2*}

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东大学, 山东 济南

³山东省交通规划设计院有限公司, 山东 济南

⁴济南金衢公路勘察设计研究有限公司, 山东 济南

Email: *zhanghongbo@sdu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月15日; 录用日期: 2021年4月5日; 发布日期: 2021年4月12日

摘 要

为了明确黄泛区粉土用作水泥基泡沫轻质土外掺料的可行性,通过重塑配料的方式,调整轻质土湿密度、粉土掺量、粉土塑性指数等指标,研究了粉土塑性指数对泡沫轻质土物理力学性能的影响规律,包括无侧限抗压强度、弹性模量、流动度、干燥收缩值及吸水率。结果表明,随着粉土的塑性指数增大,气泡混合轻质土的基本力学性能减小,浆体的流动度降低,干燥收缩值增大,吸水率增大,但是可以满足路用性能要求。

关键词

泡沫轻质土, 黄泛区粉土, 塑性指数, 物理力学指标力

Study on the Effect of Silt Plasticity Index on the Properties of Silt-Based Foamed Concrete

Kai Wang¹, Jintao Yu², Yuhai Sun³, Qiang Yang⁴, Hongbo Zhang^{2*}

¹Shandong High-Speed Group Co. Ltd., Jinan Shandong

²Shandong University, Jinan Shandong

³Shandong Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd., Jinan Shandong

⁴Jinan Jinqi Highway Survey & Design Co. Ltd., Jinan Shandong

Email: *zhanghongbo@sdu.edu.cn

Received: Mar. 15th, 2021; accepted: Apr. 5th, 2021; published: Apr. 12th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 王凯, 于锦涛, 孙玉海, 杨强, 张宏博. 粉土塑性指数对水泥基粉土气泡混合轻质土性能影响研究[J]. 土木工程, 2021, 10(4): 249-256. DOI: 10.12677/hjce.2021.104028

Abstract

In order to define the possibility of silt in the Yellow River Flood Area to be used as admixture in foamed concrete, indexes including wet density, silt content and silt plasticity index were adjusted by remixing the components. The mechanical properties, including the unconfined compressive strength, elastic modulus, fluidity, drying shrinkage value and water absorption, were researched by considering the silt plasticity index. The results show that with the increase of plasticity index of silt, the basic mechanical properties of silt-based foamed concrete decreased, and the fluidity of slurry decreased, the drying shrinkage value increased, water absorption rate increased, but it can meet the road performance requirements.

Keywords

Foamed Concrete, Yellowland Silt, Plasticity Index, Physico-Mechanical Index

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

泡沫轻质土材料具有轻质性、高强度、自立性好、施工便捷等性能,因而成为一种良好的材料并广泛运用到工程建设中。近年来,轻质土材料逐渐应用于路基填筑中,以减轻地基附加压力,降低工后沉降[1][2]。然而,目前轻质土在我国仍然存在应用难度较大的问题,其主要原因在于:其一,随着环保政策的严格实施,水泥限产造成价格上涨严重,推高了轻质土的应用成本,工程建设单位难以承受[3][4];其二,水泥在生产、制备和使用的过程中会造成严重的粉尘污染和二氧化碳排放,不利于工程应用[5]。因此,许多学者提出采用固废材料代替部分水泥,以粉土替代部分水泥的粉土基泡沫轻质土则应运而生。本论文通过前期的测试发现,山东省平原区广泛分布的黄河冲淤积粉土,粒径以介于 0.075~0.002 mm 之间的粉粒为主,土质以低液限粉土、粉质粘土、粉砂土等为主,土性介于黏土和砂土之间[6],可以起到一定的颗粒骨架作用,适用于作为部分水泥的替代品。

由于山东省粉土分布范围广、土质种类多,用其代替水泥的可行性需要进一步研究。另外,使用不同类型的粉土作为掺合料,其各组分配合比对材料性能的影响有待研究确定[7][8]。因此,本文通过研究细粒土含量较高的粉土用作掺合料时对气泡混合轻质土的力学性能的影响,探求粉土塑性指数与泡沫轻质土性能的关系,为轻质土作为路用材料提供依据,推动粉土轻质土的工程应用。

2. 重塑土的制备

试验采用五种配土比例,分别对应五种塑性指数从低到高的土,液塑限及粒径级配如表 1~2 所示。

3. 配合比的计算

试验所用粉土设计了 3 个湿密度(600 kg/m³, 700 kg/m³, 800 kg/m³)、4 个粉土掺量(0%, 20%, 30%, 40%)、以及 5 种塑性指数(7.2, 9.3, 11.6, 13.1, 15.4)作为试验变量,共 60 个配比,如表 3~5 所示。

Table 1. Number of remolded soil and liquid plastic limit**表 1.** 重塑土编号及液塑限值

土样编号	配土比例(粉质粘土:粘质粉土)	液限 ω_L	塑限 ω_P	塑性指数 I_P
CST-A	1:0 (纯粉质粘土)	32.16	16.76	15.4
CST-B	3:1	29.4	16.3	13.1
CST-C	1:1	30.8	19.2	11.6
CST-D	1:3	29.1	19.8	9.3
CST-E	0:1 (纯粘质粉土)	23.93	16.76	7.2

Table 2. Grain gradation of remixing soil**表 2.** 重塑土颗粒级配表

土样编号	颗粒级配				
	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.005	0.005~0.002	<0.002
CST-A	5.6	6.6	20.2	20.1	47.5
CST-B	6.0	6.8	32.6	16.7	37.9
CST-C	6.4	7.0	45.0	13.4	28.2
CST-D	6.8	7.3	57.4	10.0	18.5
CST-E	7.2	7.5	69.8	6.6	8.9

Table 3. Mix condition of 600 kg/m³**表 3.** 湿密度为 600 kg/m³ 密度配合比

粉土塑性指数	粉土掺量(%)	用水量(kg/m ³)	水泥用量(kg/m ³)	粉土用量(kg/m ³)	粉质粘土用量(kg/m ³)	泡沫用量(kg/m ³)	实测密度(kg/m ³)
7.2	0	200.81	365.12	-	-	34.07	614
	20	201.18	292.74	73.22	-	32.86	616
	30	201.46	256.47	109.82	-	32.25	602
	40	201.88	220.06	146.63	-	31.43	608
9.3	0	200.81	365.12	-	-	34.07	614
	20	201.31	292.74	54.84	18.28	32.83	582
	30	201.53	256.43	82.36	27.45	32.23	588
	40	201.75	220.08	110.08	36.69	31.40	618
11.6	0	200.81	365.12	-	-	34.07	614
	20	201.31	292.72	36.58	36.58	32.82	622
	30	201.56	256.47	54.88	54.88	32.21	603
	40	201.75	220.08	73.35	73.35	31.47	607
13.1	0	200.81	365.12	-	-	34.07	614
	20	201.21	292.74	18.30	54.89	32.86	596
	30	201.43	256.43	27.48	82.43	32.24	609
	40	201.75	220.08	36.67	110.00	31.50	591
15.4	0	200.81	365.12	-	-	34.07	614
	20	201.18	292.8	-	73.2	32.82	606
	30	201.53	256.43	-	109.8	32.24	583
	40	201.83	220.01	-	146.61	31.55	592

Table 4. Mix condition of 700 kg/m³**表 4.** 湿密度为 700 kg/m³ 密度配合比

粉土塑性指数	粉土掺量(%)	用水量(kg/m ³)	水泥用量(kg/m ³)	粉土用量(kg/m ³)	粉质粘土用量(kg/m ³)	泡沫用量(kg/m ³)	实测密度(kg/m ³)
7.2	0	237.31	431.46	-	-	31.23	704
	20	237.9	346.04	86.51	-	29.56	726
	30	238.16	303.17	129.93	-	28.75	693
	40	238.48	260.16	173.44	-	27.93	708
9.3	0	237.31	431.46	-	-	31.23	704
	20	237.51	345.84	65.27	21.76	29.63	682
	30	238.13	303.43	97.58	32.53	28.33	704
	40	238.25	260.28	130.10	43.37	28.00	708
11.6	0	237.31	431.46	-	-	31.23	704
	20	237.51	345.84	43.51	43.51	29.62	680
	30	238.16	303.47	65.03	65.03	28.31	696
	40	238.25	260.28	86.75	86.75	27.97	707
13.1	0	237.31	431.46	-	-	31.23	704
	20	237.51	345.84	21.76	65.27	29.63	724
	30	238.13	303.43	32.53	97.58	28.33	721
	40	238.25	260.28	43.37	130.10	28.00	718
15.4	0	237.31	431.46	-	-	31.23	704
	20	237.88	346	-	86.5	29.62	688
	30	238.13	303.13	-	129.91	28.84	695
	40	238.43	260.11	-	173.41	28.05	705

Table 5. Mix condition of 800 kg/m³**表 5.** 湿密度为 800 kg/m³ 密度配合比

粉土塑性指数	粉土掺量(%)	用水量(kg/m ³)	水泥用量(kg/m ³)	粉土用量(kg/m ³)	粉质粘土用量(kg/m ³)	泡沫用量(kg/m ³)	实测密度(kg/m ³)
7.2	0	273.84	497.89	-	-	28.28	821
	20	274.43	399.15	99.79	-	26.67	812
	30	274.77	349.68	149.91	-	25.66	798
	40	275.09	300.07	200.02	-	24.84	804
9.3	0	273.84	497.89	-	-	28.28	821
	20	274.41	399.15	74.85	24.95	26.64	830
	30	274.74	349.63	112.49	37.50	25.65	828
	40	275.06	300.09	149.96	49.99	24.90	816
11.6	0	273.84	497.89	-	-	28.28	821
	20	274.42	399.18	49.89	49.89	26.63	784
	30	274.77	349.68	74.97	74.97	25.62	815
	40	275.56	300.09	99.74	99.74	24.88	813

Continued

	0	273.84	497.89	-	-	28.28	821
13.1	20	274.42	399.24	24.90	74.71	26.73	786
	30	274.74	349.73	37.47	112.42	25.64	789
	40	275.06	300.11	49.98	149.94	24.91	784
	0	273.84	497.89	-	-	28.28	821
15.4	20	274.49	399.20	-	99.63	26.7	809
	30	274.74	349.64	-	149.91	25.64	791
	40	275.04	300.18	-	199.91	24.96	826

4. 试验结果与分析

4.1. 无侧限抗压强度

由图 1 可以看出, 随土的塑性指数的增大, 泡沫轻质土的抗压强度基本呈减小的趋势, 但是减小的幅度较小且与粉土掺量有关, 粉土掺量越大, 抗压强度变化的幅度也在增大。以 600 kg/m^3 密度的轻质土为例, 当试验土的塑性指数从 7.2 增加到 15.4 时, 粉土掺量为 20%, 30% 和 40% 的工况, 其抗压强度分别减小了 0.112 MPa、0.158 MPa 和 0.254 MPa。

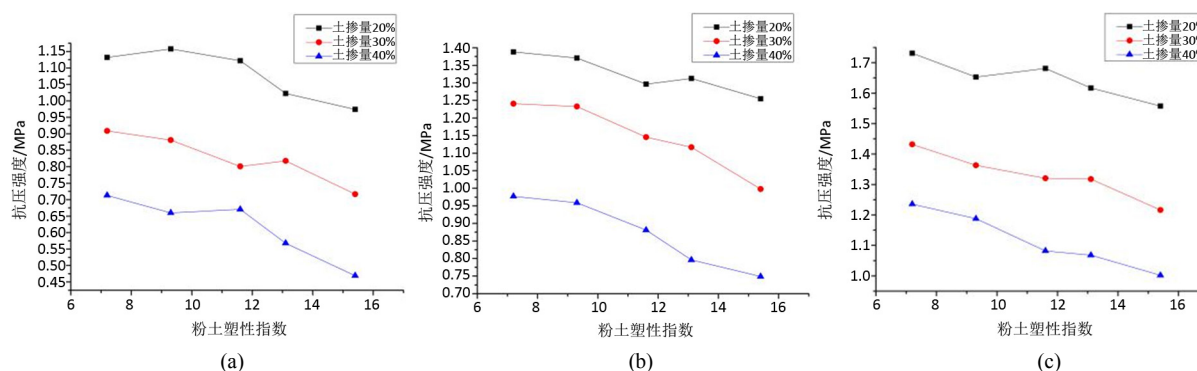


Figure 1. Compressive strength of foamed concrete with different densities. (a) 600 kg/m^3 ; (b) 700 kg/m^3 ; (c) 800 kg/m^3
图 1. 不同密度的泡沫轻质土抗压强度。(a) 600 kg/m^3 ; (b) 700 kg/m^3 ; (c) 800 kg/m^3

当泡沫轻质土的浆液湿密度为 700 kg/m^3 及以下, 且粉土掺量较高、粉土塑性指数较大时, 泡沫轻质土的抗压强度已经小于 0.8 MPa , 甚至低于 0.6 MPa , 难以满足强度要求。总体来说, 当轻质土的浆体湿密度为 600 kg/m^3 、且粉土掺量超过 20% 的情况下, 不要选用塑性指数 ≥ 11 的细粒土; 当轻质土的浆体湿密度为 700 kg/m^3 且粉土掺量超过 30% 时, 不推荐选用塑性指数 ≥ 13 的细粒土; 当轻质土的浆体湿密度 $\geq 800 \text{ kg/m}^3$ 时, 抗压强度普遍较高, 在粉土掺量 $\leq 40\%$ 的情况下, 可以任意选用粉土。

4.2. 静弹性模量

不同密度及粉土掺量下轻质土的静弹性模量与粉土塑性指数关系如图 2 所示。随着粉土塑性指数增大, 粉土基泡沫轻质土的静弹性模量减小; 粉土掺量越大, 静弹模随粉土塑性指数的减小幅度越大。此外, 由图 2 可知, 泡沫轻质土静弹性模量受粉土塑性指数的影响较小, 也就是说, 静弹性模量主要受湿密度和粉土掺量两个因素的影响。

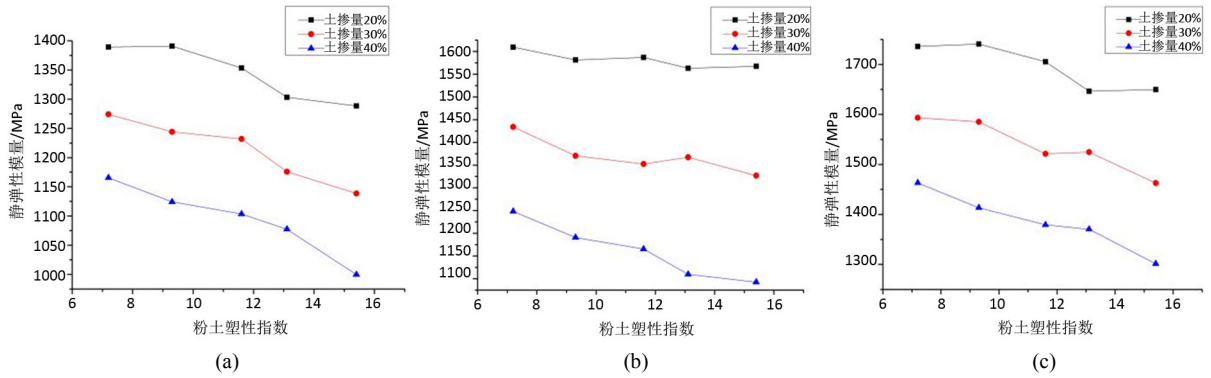


Figure 2. Elastic modulus of foamed concrete with different densities. (a) 600 kg/m³; (b) 700 kg/m³; (c) 800 kg/m³
图 2. 不同密度的泡沫轻质土静弹性模量。(a) 600 kg/m³; (b) 700 kg/m³; (c) 800 kg/m³

4.3. 流动性

图 3 为不同密度与粉土掺量下的粉土塑性指数对流动度的影响，由图可知，在粉土掺量相同的情况下，细集料粉土的塑性指数越高，则新拌浆体的流动度越小。主要是因为集料土中的粘性颗粒本身具有吸水性，在轻质土搅拌过程中会吸收一部分浆体中的水分，从而减小了浆液中的流动水的含量，使得流动度变低。但是粉土基泡沫轻质土浆体的流动度会随着粉土掺量增大而逐渐增大。这是因为当粉性土作为集料替代水泥之后，由于其本身无法与水泥发生化学反应，故粉土颗粒零星散布在混合料之间，降低了水泥的水化程度，从而增大了浆体的流动度。

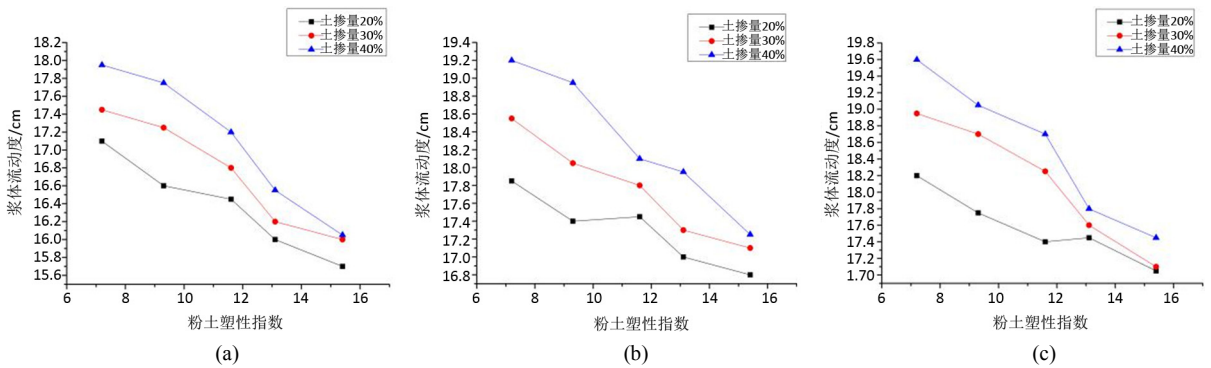


Figure 3. Fluidity of foamed concrete with different densities. (a) 600 kg/m³; (b) 700 kg/m³; (c) 800 kg/m³
图 3. 不同密度的泡沫轻质土流动度。(a) 600 kg/m³; (b) 700 kg/m³; (c) 800 kg/m³

4.4. 干燥收缩性能

图 4 是采用塑性指数分别为 7.2 和 15.4 的两种粉土作集料时测得的泡沫轻质土 28d 干燥收缩曲线，可以看出，泡沫轻质土的干燥收缩值随龄期逐渐增大，其增长速率随龄期先快后慢，呈现出逐渐减小的趋势，并于 20 天左右趋于稳定。由图 4 可知，粉土掺量越高，泡沫轻质土的干燥收缩值越小，干燥收缩值主要是由于水化物产生的，而粉土的掺入减小了水泥的用量，进而减小了其同龄期的干燥收缩值。

图 5 为不同粉土掺量下塑性指数 7.2 和 15.4 的两种粉土作集料的干缩曲线对比，可以看出，采用塑性指数 7.2 的粉土作细集料的轻质土，其干燥收缩值要小于塑性指数 7.2 的粉土浇筑成的混合轻质土。故粉土的塑性指数越高，气泡混合轻质土的干燥收缩性能越大。气泡混合轻质土的浇筑过程中，作为集料的粉土会吸收一部分水分，这些水分被储存在泡沫轻质土内部。随着气泡混合轻质土内部水化过程的进

行, 这部分被储存的水分逐渐逸出并参与水化, 导致泡沫轻质土试件的体积减小。土的塑性指数越高, 内部吸收的水分越多, 挥发的水分也越多, 干缩值也就越大。

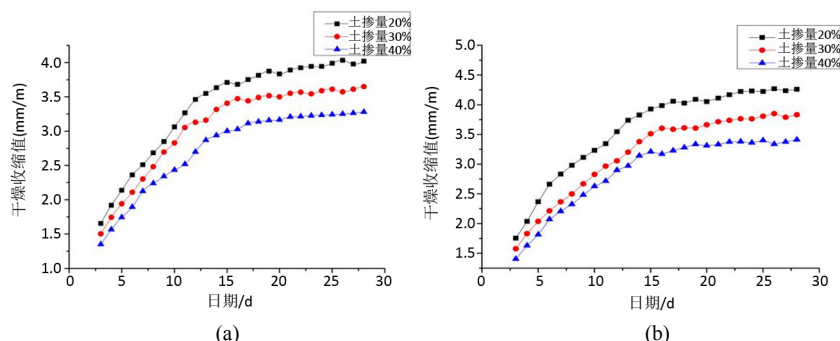


Figure 4. Dry shrinkage value of foamed concrete with different silt plasticity index. (a) 7.2; (b) 15.4

图 4. 不同粉土塑性指数的泡沫轻质土干燥收缩值。(a) 塑性指数 7.2; (b) 塑性指数 15.4

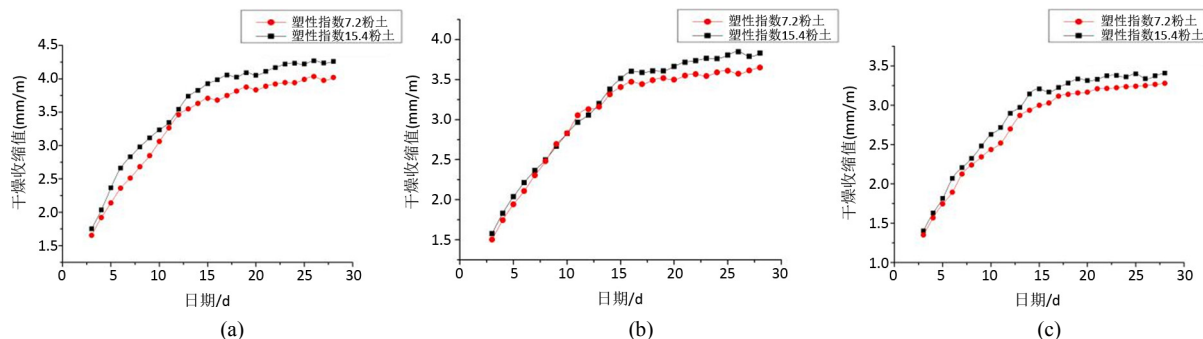


Figure 5. Dry shrinkage value of foamed concrete with different silt content. (a) 20%; (b) 30%; (c) 40%

图 5. 不同粉土掺量的泡沫轻质土干燥收缩值。(a) 粉土掺量 20%; (b) 粉土掺量 30%; (c) 粉土掺量 40%

4.5. 吸水率

图 6 为粉土基泡沫轻质土的吸水率随粉土塑性指数的变化曲线, 从图中可以看出, 粉土掺量相同时, 粉土的塑性指数越高, 泡沫轻质土试块的吸水率越高。主要原因有两点: 1) 土的平均粒径越大, 在泡沫轻质土内部结构中越能起到骨架支撑作用。当集料土中的黏粒含量较高时, 泡沫轻质土内部的结构密度变低, 内部孔隙增大导致吸水率提高。2) 另一方面是土的塑性指数越高, 在轻质土结构中的粉土的吸水量越大, 进一步提升了轻质土试块的吸水率。

5. 结论

本文主要研究了粉土的塑性指数对水泥基粉土气泡混合轻质土物理及力学性能的影响, 得出结论如下:

1) 随着粉土的塑性指数增大, 泡沫轻质土的主要力学性能(无侧限抗压强度、抗折强度、静弹性模量)随之减小, 影响幅度约为粉土每增加 1 点塑性指数, 轻质土的力学性能减小约 2%~6%。此外, 减小的幅度与粉土掺量有关, 粉土掺量越大, 减小幅度越大。

2) 在粉土掺量相同的情况下, 作为集料的粉性土塑性指数越大, 泡沫轻质土浆体的流动度越小, 减小幅度约为粉土每增加 1 点塑性指数, 轻质土的浆体流动度增长约 0.1~0.7 cm。

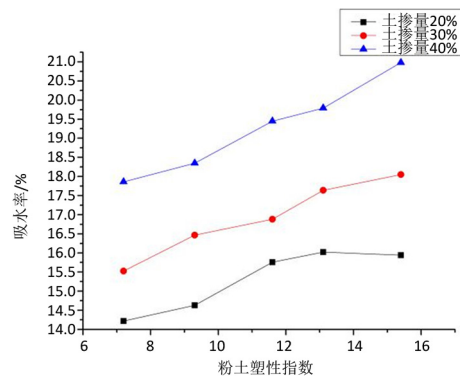


Figure 6. Water absorption of foamed concrete
图 6. 泡沫轻质土吸水率

3) 在粉土掺量相同的情况下，粉土的塑性指数越高，泡沫轻质土的干燥收缩性能越大，粉土每增加 1 点塑性指数，轻质土的干燥收缩值增大约 0.15%~0.3%。

4) 在粉土掺量相同的情况下，粉土的塑性指数越大，泡沫轻质土试块的吸水率越高，变化幅度约为粉土每增加 1 点塑性指数，轻质土的吸水率增长约 0.2~0.4 个百分点。

参考文献

- [1] 林晗平. 福建莆田软土区公路地基处理方案比选及优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [2] Tikalskya, P.J., Pospisil, J., *et al.* (2004) A Method for Assessment of the Freeze-Thaw Resistance of Preformed Foamcellular Concrete. *Cement and Concrete Research*, **34**, 889-896. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.005>
- [3] Kumar, R. and Bhattacharjee, B. (2003) Porosity, Pore Size Distribution and *in Situ* Strength of Concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**, 155-163. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00942-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0)
- [4] Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E.K. and Indu Siva Ranjani, G. (2009) A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 388-398. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- [5] Ayeldeena, M. and Kitazume, M. (2017) Using Fiber and Liquid Polymer to Improve the Behaviour of Cement-Stabilized Soft Clay. *Geotextiles and Geomembranes*, **45**, 592-602. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.05.005>
- [6] 张燕明, 刘怡林, 李小旋. 基于统计分析的粉土区域变化规律及其物理力学性质研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(5): 24-33.
- [7] 李晨. 水泥基粉土轻质填料的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [8] 万立尧. 水泥基粉土气泡混合轻质土力学特性及在路基中的应用层位研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.