

发泡剂性能对公路软基用泡沫混凝土的影响

陈艳琼¹, 李敏², 林奕³

(1. 福建船政交通职业学院 土木工程学院, 福建 福州 350007;

2. 霞浦县新陆交通投资有限公司, 福建 霞浦 355100;

3. 福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004;)

摘要: 泡沫混凝土具有轻质、高流动性、易施工等特性, 可作为桥头软基段路堤的换填材料。为评价发泡剂性能对泡沫混凝土的影响, 通过室内试验, 对比不同稀释倍数下的发泡剂物理指标和泡沫混凝土的强度, 得出发泡剂的最佳稀释倍率。采用最佳稀释倍率的泡沫混凝土进行工程实例应用, 得出其实测沉降量。利用 Ansys 有限元软件, 模拟该泡沫混凝土对软基换填后的效果, 并结合公路桥头软基填筑现场监测结果, 证实该种泡沫混凝土能够达到减小路基沉降量要求, 为软土地基处理提供方案。

关键词: 软基处理; 发泡剂性能; 泡沫混凝土; 沉降变形; 有限元分析

中图分类号: TU528; U416

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0288-05

Influence of foaming agent properties on foamed concrete for soft foundation of highway

CHEN Yanqiong¹, LI Min², LIN Yi³

(1. School of Civil Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China;

2. Xiapu Xinlu Transportation Investment Co., Ltd., Xiapu 355100, China;

3. Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: Foamed concrete has the characteristics of light weight, high fluidity, easy construction and so on. It can be used as the replacement material for embankment at the bridgehead soft foundation section. In order to evaluate the influence of foaming agent properties on foamed concrete, laboratory tests were conducted to compare the physical indexes of foaming agent and the strength of foamed concrete under different dilution ratios, and then obtain the optimal dilution ratio of foaming agent. The foam concrete with the best dilution ratio was applied in the engineering practice to obtain the measured settlement amount. Finally, Ansys finite element software was used to simulate the effect of the foamed concrete on soft foundation replacement. Combined with the in-situ monitoring results of soft foundation filling at highway bridge head, it was confirmed that the foamed concrete could meet the requirements of reducing the subgrade settlement and provide a scheme for soft soil foundation treatment.

Keywords: soft foundation treatment; foaming agent performance; foam concrete; settlement deformation; finite element analysis

福建沿海地区存在较多软土地基, 且具有软土层厚、含水量高、压缩性大、强度低、灵敏度高等不良工程性质。这些不良性质通常会引起路基不均匀沉降, 造成路面开裂、路堤失稳、桥头跳车等

问题。由于泡沫混凝土具有轻质性、强度可调节性、高流动性、易施工性、固化后的自立性等特点^[1], 国内许多学者已针对泡沫混凝土在软土地基中的应用开展研究。郝飞^[2]提出采用换填泡

沫混凝土对软基进行换填,能有效减少路基自重和沉降问题。彭子茂等^[3]研究泡沫混凝土的不同置换形式对地基压力和路基沉降变化产生的规律,发现路用泡沫混凝土对减小基底压力具有较好作用,泡沫混凝土置换厚度越大,沉降量系数减小越明显。蒋万希^[4]分析轻质泡沫混凝土块体的刚度贡献对路堤沉降分布的定量影响规律,提出了考虑刚度修正的软土地基上轻质泡沫混凝土路堤沉降计算实用方法。梅岭等^[5]采用泡沫凝土对高陡地形的路堤进行换填,研究结果表明其对防止地基表面和路面不均匀沉降有显著效果。本研究对不同稀释倍率下的发泡剂物理指标及泡沫混凝土的强度进行分析比较,提出公路用新型泡沫混凝土发泡剂质量指标要求;通过监测实际工程中相关技术参数,并结合有限元软件 Ansys 进行数值模拟分析,证实其可靠性。

1 发泡剂及泡沫混凝土的性能

泡沫混凝土生产的关键在于发泡剂的研制。发泡剂是使对象物质能够成孔的一类物质,它的原理是阴离子表面活性剂水溶液通过机械作用力引入空气,有效降低液体的表面张力,从而在液膜表面双电子层外排列包围空气,形成气泡,再由多个气泡组成泡沫。发泡剂的稀释倍数对发泡剂的性能有很大影响。

1.1 发泡剂稀释后的泡沫稳定性分析

取 1 g 新型发泡剂,加 40 mL 水,放置于 550 mL 的瓶中,强力震荡 100 次,静置观察泡沫稳定性。根据上述试验过程,进行初始状态、6、12、24 h 的泡沫稳定性观察。初生的泡沫细腻、均匀,直径在 1 mm 左右;放置 6 h 后仍然比较稳定,泡沫量基本不变,直径增大至 2~4 mm;放置 12 h,泡沫直径继续增加,其中上部分塌陷,泡沫体积为初生时的 2/3 左右;放置 24 h,泡沫直径达到 4~8 mm,大部分泡沫塌陷。综上可知,随着放置时间的延长,泡沫直径逐渐增大,稳定性降低。

1.2 不同稀释倍率下的泡沫物理指标分析

稀释倍数是影响发泡剂性能的重要参数,需要先将发泡剂原液与水结合,按照合适的稀释倍数稀释,通过水泥发泡机或者机械搅拌,制作出较为丰富的泡沫,不同稀释倍数下发泡剂发泡后产生的泡沫数量、性质不同。因此,研究稀释倍数对发泡剂性能的影响至关重要。

本试验采用浙江省湖州瑞翔交通工程新型材料有限公司生产的 RX-80 型发泡剂,稀释倍率分别为 20、40、50、60、70、80 倍,并得到不同稀释倍率下的发泡剂泡沫物理指标,如表 1 所示。

表 1 不同稀释倍率下的泡沫物理指标
Tab.1 Physical indexes of foam at different dilution rates

稀释 倍率/倍	泡沫重量/ g · L ⁻¹	堆积高度/ mm	沉降/ mm	泌水 量/mL
20	10	240	2	21
40	12	235	2	35
50	14	230	3	47
60	16	225	3	71
70	19	220	3	89
80	22	215	3	108

由表 1 可见,泡沫的堆积高度均大于 200 mm,沉降小于 3 mm,说明该发泡剂所形成的泡沫具有良好的力学强度和稳定性。随着泡沫稀释倍率的增加,泌水量有明显的增大,说明液膜层中含水量增加,在泡沫混凝土初凝及凝固阶段可能起到重要的影响作用,最终影响泡沫混凝土的力学性能。

1.3 不同稀释倍率下泡沫混凝土性能分析

采用 PO.42.5 普通硅酸盐水泥(浙江尖峰水泥厂生产),按水胶比为 1:0.6 制成水泥浆液,加入不同稀释倍率下的 RX-80 型发泡剂,采用 HTF-60 型泡沫混凝土拌和机,设定功率 7.5 kW,运行转速为 1 440 r/min 进行打浆。取样测定湿容重、流动度、含气量如表 2 所示。同时取样浇制试块测定 7 d 强度、28 d 强度、吸水率、吸水量如图 1、2、3 所示。

表 2 不同稀释倍率下的泡沫混凝土性能
Tab.2 Properties of foamed concrete at different dilution rates

稀释倍率/倍	湿容重/kg · m ⁻³	流动度/cm	含气量/%
50	582	17.5	71
60	593	18.0	68
70	581	18.5	60
80	610	20.5	55

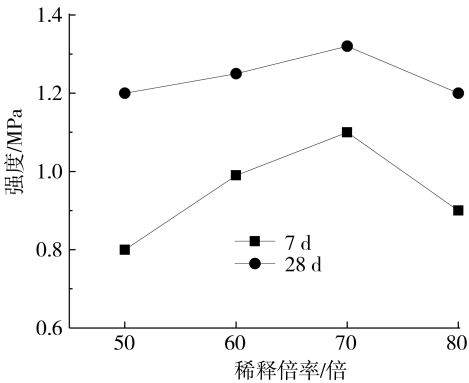


图 1 不同稀释倍率下的泡沫混凝土强度

Fig.1 Strength of foamed concrete at different dilution rates

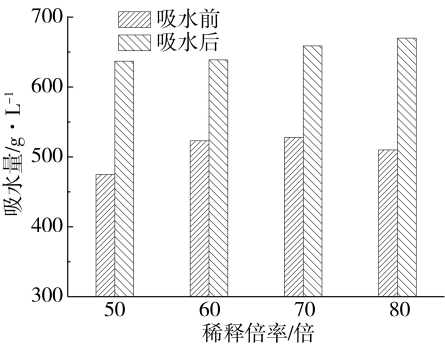


图 2 泡沫混凝土吸水前后质量

Fig.2 Quality of foamed concrete before and after water absorption

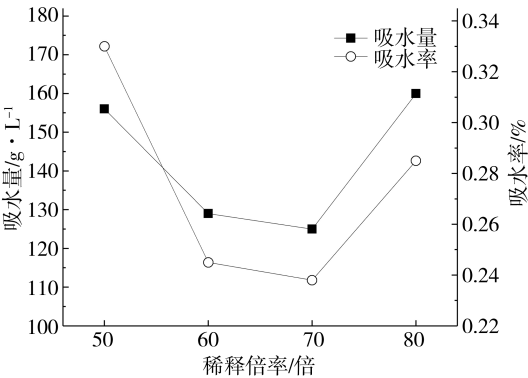


图 3 泡沫混凝土吸水率和吸水量

Fig.3 Water absorption rate and capacity of foamed concrete

试验结果分析:

(1)由表 2 可知泡沫混凝土流动度随着稀释倍率的增加而增大,湿容重随着稀释倍率的增加而增重,含气量随着稀释倍率的增加而降低。

(2)从图 1 可知不同稀释倍率下制成的混凝土试块的强度指标,7 d 强度均达到 0.8 MPa 以

上,28 d 强度均达到 1.2 MPa 以上。当稀释倍率为 70 倍时,强度最高。这是因为气泡的加入将液膜中的水引入混凝土试块中,改变水胶比含量,当稀释比例为 70 倍时,混凝土试块中具有合适的水胶比含量;且其随着试块放置时间的增加,发泡剂液膜中的水逐渐释放,对混凝土初凝和凝固阶段起到保湿和增强力学性能的作用。但稀释比例过高会导致液膜泌水量增加,影响水胶比含量,因此稀释倍率为 80 倍时,泡沫混凝土强度反而下降。

(3)从图 2、图 3 可知不同稀释倍率下制成的混凝土试块的吸水量及吸水率,稀释倍率为 70 倍时达到最佳吸水量,这与泡沫混凝土强度试验结果相一致。

1.4 公路用新型泡沫混凝土发泡剂质量指标要求

通过研究不同稀释倍率新型发泡剂的泡沫物理性能和应用性能,对公路用泡沫混凝土发泡剂提出指标要求如表 3 所示。

表 3 公路用泡沫混凝土发泡剂质量要求

Tab.3 Quality requirements of foaming agent for highway foamed concrete

性能指标	质量要求	备注
外观	无色透明液体	
密度	0.93~0.98 g/cm ³	
高低温性能	适用范围 5~50 ℃	
凝固温度	小于 5 ℃	
泡径范围	0.1~2.0 mm	
泡沫稳定性	完全消泡时间大于 48 h	
泌水率	小于 100 mL	60~70 倍率
发泡体积倍率	发泡高度大于 200 mm	
常温存放	无异物析出	
保质期	24 个月	

2 泡沫混凝土在桥头软基中的应用效果

2.1 工程概况

福建霞浦某公路沙塘溪中桥桥头段位于海积滩涂路段和局部山间阶地地段,深厚软土分布范围广,其中浅部分布 18.2 m 厚的淤泥,中部为 2.6 m 厚的淤泥质黏土,下部为中砂层,厚度 2.2 m,具有天然含水率高,孔隙比大,强度低,固

结时间短等特点。桥头段采用泡沫混凝土换填处理软土路基以达到解决常见的桥头跳车问题。

2.2 泡沫混凝土配合比设计

根据上述室内试验结果,采用最佳稀释倍率下的发泡剂,配制强度等级为 CF0.6 的泡沫混凝土,结合气泡混合轻质土填筑工程技术规程(CJJ/T 177-2012),试配强度应大于设计强度的 1.05 倍,计算泡沫混凝土配置强度 0.63 MPa,水胶比 W/B 为 0.6,取立每方泡沫混凝土水泥用量 315 kg,每立方泡沫混凝土的用水量为 189 kg,每立方泡沫混凝土的气泡群体积量为 708 L。泡沫混凝土性能及强度如表 4 所示。

表 4 泡沫混凝土性能与强度

Tab.4 Performance and strength of foamed concrete

强度等级	水胶比	配合比			28 d 强度 /MPa
		$m_{\text{水泥}}/\text{kg}$	$m_{\text{水}}/\text{kg}$	$V_{\text{气泡群}}/\text{L}$	
0.6	0.6	315	189	708	1.30

2.3 泡沫混凝土应用效果

分别通过泡沫混凝土路基沉降估算法得到无刚度沉降和现场沉降监测得到的实测沉降进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 不同泡沫砼填高下的路堤沉降量

Tab.5 Settlement of embankment with different foamed concrete filling height

泡沫砼填高/m	无刚度沉降量/mm	实测沉降量/mm
1.3	53	50
2.2	116	93
3.1	182	143

3.换填泡沫混凝土后路基沉降变形数值分析

3.1 模型简化假设及参数选取

为简化换填泡沫混凝土后的路基沉降模型,在维持各材料的主要特征情况下,做出如下假设:(1)泡沫混凝土符合胡克定律;(2)土层为理想弹性材料;(3)土层和泡沫混凝土为均质、各向同性^[6]。在土层的数值模拟分析中,采用 DP 材料

能较准确的反应实际,本研究采用 D-P 模型对换填泡沫混凝土后路基的沉降进行模拟,各层参数如表 6 所示。

表 6 各结构层参数表

Tab.6 Parameter table of each structure layer

材料名称	压缩模量/MPa	泊松比	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
路面层	20.0	0.35	19.6	35.0	38.00
淤泥质黏土	3.0	0.30	19.2	18.6	8.15
淤泥	2.1	0.30	16.4	9.5	1.65
中砂层	35.0	0.25	18.8	1.0	35.00
填土	25.0	0.25	18.5	-	40.00
泡沫混凝土	184.0	0.20	8.0	-	-

3.2 模型建立

在沙塘溪中桥桥头段处选取 K53+790 断面建立模型,地基尺寸宽度为 80 m,高度 30 m,路堤宽度 30 m,路面顶宽度 12.5 m,边坡坡率为 1:1.5,路堤换填泡沫混凝土深度为 5 m,采用分层填筑方法进行施工。

为更接近实际现场泡沫混凝土分级加载的工序,分别模拟泡沫混凝土填筑高度为 1.3、2.2、3.1 m 时路堤沉降情况,采用有限元软件的 plane42 二维结构单元对桥头换填段落中的横断面进行模拟,plane42 单元具有塑性、蠕变、辐射膨胀、大变形以及大应变的能力,计算结果精确且更适应复杂边界情况。排水固结在计算过程暂不考虑,模型的地基边界在 X、Y 和 Z 方向均(设置)约束,地基两侧均采用水平和纵向约束,其网格划分如图 4 所示。

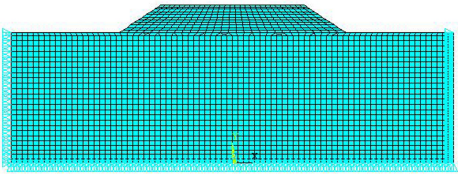


图 4 模型网格划分图

Fig.4 Grid division of the model

3.3 数值模拟结果和分析

通过 Ansys 的生死单元模拟桥头换填泡沫轻质土实际施工时的堆载预压,在预压结束后,采用反开槽施工工艺进行泡沫混凝土的换填施工,并

通过时间分析步模拟现场实际施工时的加载时间。基于分层填筑的数值模拟,得出填筑泡沫混凝土高度为 1.3、2.2、3.1 m 时路堤竖向沉降位移云图如图 5~图 7 所示。

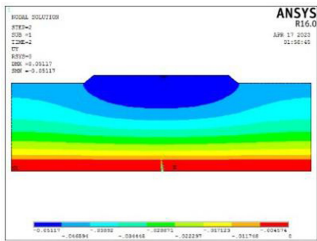


图 5 填筑 1.3 m 泡沫砼时路堤沉降图
Fig.5 Settlement map of embankment when foam concrete was filled in 1.3 m

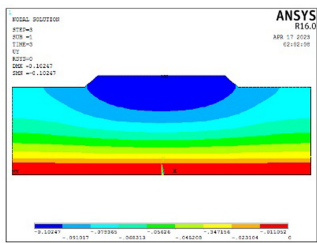


图 6 填筑 2.2 m 泡沫砼时路堤沉降图
Fig.6 Settlement map of embankment when foam concrete was filled in 2.2 m

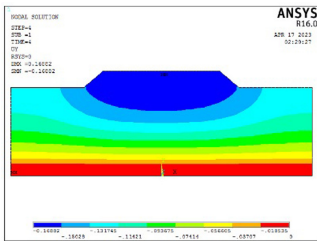


图 7 填筑 3.1 m 泡沫砼时路堤沉降图
Fig.7 Settlement map of embankment when foam concrete was filled in 3.1 m

通过数值模拟结果可知,随着泡沫混凝土填筑高度的增加,路堤沉降量逐渐增大。最大沉降发

生在路堤中心线处,当填筑轻质混凝土高度为 1.3 m 时,路堤竖向沉降为 51.2 mm,比实测沉降量多 2.4%;当填筑轻质混凝土高度为 2.2 m 时,路堤竖向沉降为 102.5 mm,比实测沉降量多了 10.2%;当填筑轻质混凝土高度为 3.1 m 时,路堤竖向沉降为 168.8 mm,比实测沉降量多 18%。

数值模拟结果与现场沉降监测数值基本对应,且介于无刚度沉降量与实测沉降之间。表明采用数值模拟对换填泡沫混凝土分层填筑具有较高的准确性,换填能够平缓过渡桥头与软基过渡段间的沉降差,映证了可采用有限元软件模拟确定泡沫混凝土的换填深度,进而达到指导福建省软土地区沉降处置方案确定的目的。

4 结论

- 1)发泡剂的性能受稀释倍数影响,随着泡沫稀释倍率的增加,泌水量明显提高,液膜层中含水量增加,这在泡沫混凝土初凝及凝固阶段起到重要的影响作用,最终影响泡沫混凝土的力学性能。
- 2)水胶比含量是混凝土制品的关键参数。当稀释比例为 70 倍时,泡沫混凝土中具有合适的水胶比含量,但稀释比例过高会导致液膜泌水量增加,因重力作用提前释放的水影响水胶比含量,泡沫混凝土强度反而下降。
- 3)泡沫混凝土生产的关键技术在于发泡剂,公路工程采用稀释倍率大于 60 倍、发泡倍率大于 30 倍、0~5℃不凝结、泡沫稳定性大于 48 h、保质期大于 24 个月的发泡剂,以提高工程应用效果。
- 4)采用数值模拟对换填泡沫混凝土分层填筑具有较高的准确性,数值模拟沉降介于无刚度沉降量与实测沉降之间,可采用有限元软件模拟确定泡沫混凝土的换填深度,进而达到指导福建省软土地区沉降处置方案确定的目的。

参考文献:

[1] 刘利萍. 泡沫混凝土换填工艺在软基路基处理的应用探究[J]. 工程机械与维修,2023(2):208-210.
[2] 郝飞. 基于软土地区不良地质条件的泡沫混凝土换填及施工控制[J]. 中国公路,2023(3):118-120.
[3] 彭子茂,宁英杰,叶林杰,等. 泡沫混凝土置换路堤对基底压力及沉降的影响[J]. 新型建筑材料,2020,47(9):163-167.
[4] 蒋万希. 考虑刚度修正的深厚软土层上泡沫混凝土路堤沉降变形特性[J]. 土木工程与管理学报,2019,36(2):120-126.
[5] 梅岭,翟宇,王新泉,等. 高陡地形泡沫混凝土轻质路堤承载特性分析[J]. 中外公路,2022,42(1):12-18.
[6] 蔡海良,单志雄. 路用泡沫混凝土不同置换形式下路基变形研究[J]. 湖南交通科技,2022,48(1):19-23.

(责任编辑:方素华)