

DOI: 10.11779/CJGE2017S1015

# 水泥替代矿粉对水工沥青混凝土长期性能影响研究

李 玫, 赵 娜, 左永振, 何晓民, 谭 凡

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 传统的水工沥青混凝土原材料主要包括沥青、骨料和矿粉, 矿粉的制作和加工很麻烦, 而水泥的加工制作均较简单, 为可购买建筑材料。基于此, 提出用水泥代替矿粉, 通过室内三轴流变试验, 研究两种不同填料沥青混凝土的长期变形特性。试验表明, 以水泥为填料的沥青混凝土的轴向应变略小于以矿粉为填料的沥青混凝土的轴向应变, 以水泥为填料的沥青混凝土的蠕变指标也略小于以矿粉为填料的沥青混凝土的蠕变指标, 但二者差异较小。因此, 单从沥青混凝土的长期变形特性方面看, 用水泥代替矿粉的沥青混凝土可获得更优的长期变形性能, 并可简化工艺, 降低工程造价。

**关键词:** 水工沥青混凝土; 长期变形特性; 水泥; 矿粉

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S1 - 0074 - 05

作者简介: 李 玫 (1962 - ), 女, 高级工程师, 主要从事岩土力学研究。E-mail: 670196780@qq.com。

## Influence of cement instead of mineral powder on long-term deformation characteristics of asphalt concrete

LI Mei, ZHAO Na, ZUO Yong-zhen, HE Xiao-min, TAN Fan

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** As one of composition materials (asphalt, aggregate, mineral powder) for hydraulic asphalt concrete, the mineral powder has a messy process of manufacture. Comparatively, the cement is easily processed and available for purchase. The mineral powder is replaced by the cement for the above reasons. The long-term deformation characteristics of asphalt concrete comprised with the mineral powder or cement are studied by using the laboratory triaxial rheological tests. The results show that the axial strains and creep indexes of asphalt concrete specimens comprised with the cement are slightly smaller than those comprised with the mineral powder, and the difference between them is much small. Consequently, the replacement of mineral powder by cement can improve the long-term deformation characteristics of asphalt concrete, simplify the manufacture processes, and reduce the engineering cost.

**Key words:** hydraulic asphalt concrete; long-term deformation characteristic; cement; mineral powder

## 0 引 言

沥青混凝土作为水利水电工程的防渗体, 具有极佳的防渗性能、无可比拟的适应变形能力和裂缝产生后的自愈能力, 同时具备结构简单、工程量小、施工迅速等特点, 近年来逐步发展成为土石坝工程的防渗主体。

沥青混凝土是由沥青、粗骨料、细骨料、填料等构成的一种多级空间网状结构的分散体系<sup>[1]</sup>。其中填料是指沥青混凝土中起填充作用的粒径小于 0.075 mm 的矿物粉末, 是沥青混凝土重要的组成部分, 它与沥青组成均匀的沥青胶结料, 可以提高黏滞性, 从而提高沥青混凝土的强度, 同时根据胶浆理论, 足够的沥青胶结料可以很好的填充粗骨料及细骨料的孔

隙, 从而提高沥青混凝土的防渗性能。

填料通常是采用石灰岩或白云岩等碳酸类岩石经球磨机碾磨加工得到的矿粉, 制作和加工很麻烦, 产量低, 耗能高, 不符合节能环保的要求; 同时由于中国地域辽阔, 石料分布差异较大, 在工程建设项目中全部采用碳酸类矿粉非常困难, 外购矿粉将较大的增加工程造价, 因此选择一种能够替代矿粉的材料成为必然。相关研究表明<sup>[2-3]</sup>, 采用比表面积大、不规则程度高、碱性组分含量高的活性矿粉, 可改善沥青与矿粉之间的相互作用。而水泥中 CaO 的含量一般高达

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51309024, 51379021); 长江科学院创新团队项目 (CKSF2015051/YT)

收稿日期: 2016 - 11 - 28

60%，是一种活性较高的碱性材料，成为替代碳酸类矿粉的首选。用水泥替代矿粉在国际上是比较普遍的方法，但是现行规范中对此显的较谨慎。《水工沥青混凝土施工规范 SL514—2013》<sup>[4]</sup>和《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范 DL/T5411—2009》<sup>[5]</sup>中均要求，矿粉应采用石灰岩、白云岩等碳酸岩石加工的石粉，普通硅酸盐水泥、滑石粉、粉煤灰等粉状矿物材料也可替代矿粉，但需经试验研究论证。

中国学者在水泥替代矿粉对沥青混凝土的高温稳定性、低温稳定性、耐久性、动稳定度等方面进行了深入研究<sup>[6-12]</sup>，而水工沥青混凝土作为大坝的防渗体，存在长期稳定性的需求，却没有对此进行过研究，因此本文针对水泥替代矿粉对水工沥青混凝土的长期稳定性展开研究。

## 1 原材料性能

本次试验使用的沥青为克拉玛依 70 号石油沥青；骨料是灰岩经破碎筛分获得，其中粒径 2.36~19 mm 范围内为粗骨料，粒径 2.36 mm 以下的为细骨料；矿粉是灰岩经球磨机碾磨而成；水泥采用 42.5 普通硅酸盐水泥。

各种原材料的性能见表 1~4。可见，原材料的性能均满足规范中的技术要求。

表 1 沥青性能指标

Table 1 Performance indexes of asphalt

项目	克拉玛依 70 号沥青	DL/T5411—2009 技术要求
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	63	60~80
延度(15℃, 5 cm/min)/cm	>151	≥150
软化点(环球法)/℃	49.5	48~55
溶解度/%	99.7	≥99.0
密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.04	实测

表 2 细骨料性能指标

Table 2 Performance indexes of fine aggregate

项目	细骨料	DL/T5411—2009 技术要求
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.65	≥2.55
吸水率/%	1.4	≤2
水稳定等级	10 级	≥6 级
耐久性/%	1.1	≤15
有机质及泥土含量/%	0.1	≤2

表 3 粗骨料性能指标

Table 3 Performance indexes of coarse aggregate

项目	粗骨料	DL/T5411—2009 技术要求
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.71	≥2.6
黏附性	5 级	≥4 级
针片状含量/%	1.9	≤25
吸水率/%	0.4	≤2
压碎值/%	18	≤30
含泥量/%	0.1	≤0.5
耐久性/%	2.8	≤12

表 4 填料(矿粉和水泥)性能指标

Table 4 Performance indexes of filler (mineral powder and cement)

项目	矿粉	水泥	DL/T5411—2009 技术要求
表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.69	3.02	≥2.5
含水率/%	0.1	0	≤0.5
亲水系数	0.74	—	≤1.0
细度	<0.60 mm	100	100
	<0.15 mm	100	>90
	<0.075 mm	99.3	>85

## 2 沥青混凝土的基本性能

沥青混凝土经配合比设计，推荐配合比的主要参数：级配指数取 0.40，沥青含量取 6.3%，填料用量取 12%。分别以水泥和矿粉为填料制作沥青混凝土试件，测试沥青混凝土的基本性能，见表 5。

由表 5 知，以水泥为填料得到的沥青混凝土马歇尔稳定度高于以矿粉为填料得到的沥青混凝土马歇尔稳定度，但流值低于以矿粉为填料得到的沥青混凝土，文献[1, 6]的试验得出与本文相同的结论。

表 5 沥青混凝土的基本性能

Table 5 Basic properties of asphalt concrete

指标	填料为矿粉	填料为水泥
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.40	2.43
孔隙率/%	1.04	1.10
马歇尔稳定度/kN	7.25	7.40
马歇尔流值/0.1 mm	103.7	80.5

## 3 长期特性试验方法

对沥青混凝土试件采用应力式三轴仪进行蠕变试验研究。试件尺寸为 Φ101 mm×H200 mm，围压分别为 100, 400, 700, 1000 kPa，按四级应力水平(S=0.2, 0.4, 0.6, 0.8)分别对试件进行施加轴向压力，当变形达到稳定标准后施加下一级应力水平的荷载，测记每级应力水平下的试件变形，每级应力水平的稳定时间 7~10 d。依据试验的稳定时间获得沥青混凝土的蠕变量变化趋势，与工程运行时间将要发生的最终蠕变量是不同的<sup>[13]</sup>。

温度对沥青混凝土的性能有较大影响，同时温度对蠕变试验的影响较明显，因此在沥青混凝土蠕变试验过程中要严格控制试验温度。对应力式三轴仪加配温控系统，在三轴压力室内增加螺旋紫铜管，采用冷冻液在铜管内循环，当压力室温度高于设定温度时，温控仪控制电磁阀打开，冷冻液通过循环管道进入压

力室内部的螺旋铜管中,通过冷热循环,使压力室温度达到设定温度,温控仪控制电磁阀关闭,从而达到控制压力室温度的目的。本次试验依托项目地多年平均气温为 13.1℃,最高月平均气温 18.2℃,最低月平均气温 6.0℃,本次试验温度采用多年平均值 13.1℃。

图 1 是应力式三轴仪的温控系统,左图制冷(热)源,右图是温度监控系统。



图 1 应力式三轴仪的温控系统

Fig. 1 Temperature control system of stress triaxial instrument

### 4 成果分析

沥青混凝土长期变形试验加载的代表性曲线如图 2 所示,其轴向应变成果见表 6,可见以水泥为填料的沥青混凝土轴向蠕变应变量小于以矿粉为填料的轴向蠕变应变量。

表 6 沥青混凝土轴向应变成果表

Table 6 Axial strains of asphalt concrete

围压 /kPa	填料	轴向应变/%			
		S=0.2	S=0.4	S=0.6	S=0.8
100	矿粉	0.87	2.05	3.73	5.67
	水泥	0.57	1.45	2.92	4.56
400	矿粉	1.13	2.79	5.68	9.65
	水泥	0.77	2.12	4.14	7.54
700	矿粉	1.53	3.75	7.08	13.36
	水泥	1.02	2.82	5.65	9.92
1000	矿粉	1.87	4.68	9.12	17.63
	水泥	1.29	3.49	6.52	12.55

将蠕变量与时间关系绘制在双对数坐标系下,两者呈现较好的线性关系(图 3)。采用长江科学院提出的九参数蠕变模型<sup>[13-15]</sup>整理沥青混凝土蠕变成果,简述如下。

按照滞后变形理论,总应变可以分为瞬时产生的弹塑性应变  $\Delta\varepsilon_{ep}$  和滞后产生的黏滞应变(即蠕变)  $\Delta\varepsilon_L(t)$  两部分,即

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{ep} + \Delta\varepsilon_L(t) \quad (1)$$

采用式(2)的幂函数来表达蠕变量与时间的关系:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_f(1-t^{-\lambda}) \quad (2)$$

由式(1)、(2)联立得剩余蠕变量:

$$(\varepsilon_f + \varepsilon_{ep}) - \varepsilon = \varepsilon_f \cdot t^{-\lambda} = \varepsilon_f - \varepsilon_L \quad (3)$$

剩余蠕变量与时间在双对数坐标下呈现良好的线性关系(图 4),根据不同时间  $t$  的应变  $\varepsilon$  可拟合  $\varepsilon_f$ ,  $\lambda$ , 且  $\varepsilon_f$ ,  $\lambda$  都是应力状态的函数,见式(4)和式(5)。不同应力水平的  $\varepsilon_f$  与围压有很好的线性关系(图 5),  $\lambda$  与围压符合幂函数关系:

$$\varepsilon_f = \frac{c \cdot s_L}{1 - d \cdot s_L} \sigma_3 \quad (4)$$

$$\lambda = \eta \cdot \sigma_3^{-m} \quad (5)$$

沥青混凝土蠕变试验中体积蠕变量每级应力水平下的体积蠕变不超过 0.2%,相对轴向蠕变而言非常小。对于蠕变呈体缩的材料,侧向应变与体积应变的变化呈相反的规律,体积应变越小,侧向应变就越大,其相应的参数对工程是偏保守的。因此,沥青混凝土的蠕变体积应变可视为 0。

本次沥青混凝土蠕变试验的模型参数见表 7。

表 7 沥青混凝土模型参数

Table 7 Model parameters of asphalt concrete

填料	c	d	$\eta$	m
矿粉	4.67	0.89	0.082	0.0014
水泥	3.32	0.91	0.090	0.0025

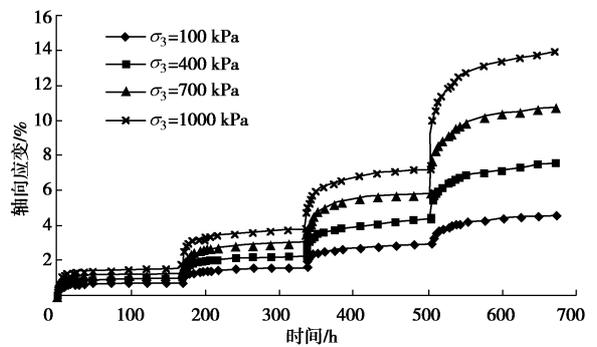


图 2 沥青混凝土蠕变试验代表性成果

Fig.2 Representative results of creep tests on asphalt concrete

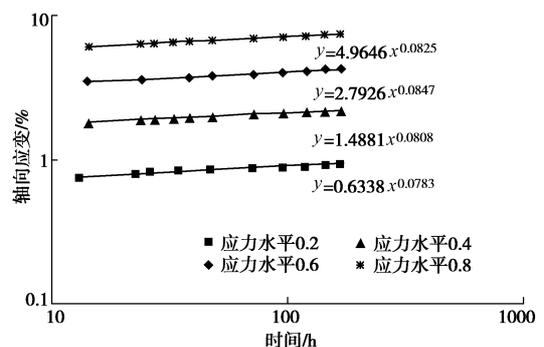


图 3 轴向应变与时间曲线

Fig. 3 Axial strain-time curves

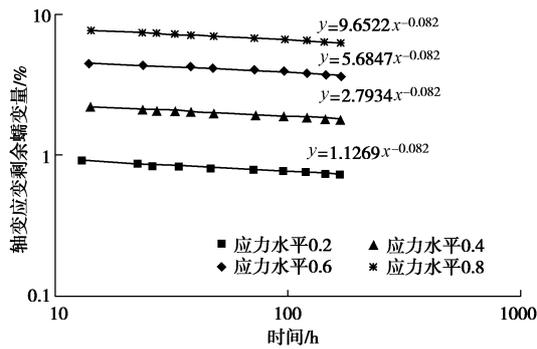


图 4 轴向应变剩余量与时间曲线

Fig. 4 Axial strain residual-time curves

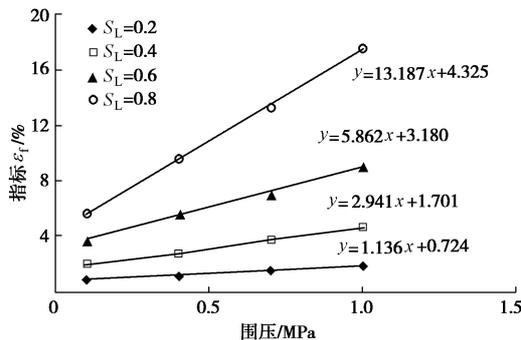


图 5 轴向蠕变与围压曲线

Fig. 5 Axial creep strain-confining pressure curves

在上述模型中,蠕变性指标  $\varepsilon_f$  反映轴向蠕变量的大小。为了分析填料对蠕变量的影响,将得到的蠕变参数  $c$ ,  $d$  带入式 (4),其中设定围压  $\sigma_3$  为 100 kPa,得到的  $\varepsilon_f$  与应力水平的关系曲线见图 6。可见,两种填料的蠕变量是非常接近的,以水泥为填料的沥青混凝土蠕变量量值上还优于以矿粉为填料的蠕变量。

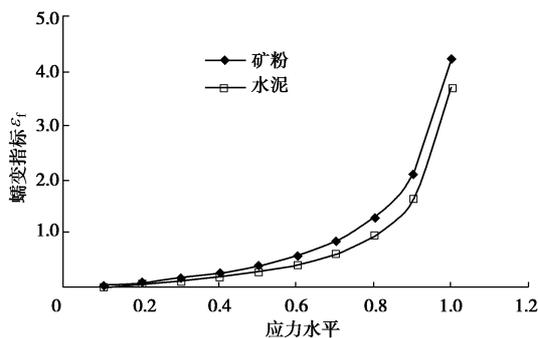


图 6 轴向蠕变对比曲线

Fig. 6 Contrast curves of axial creep strain

填料的化学成分、几何性质对沥青胶浆的性能影响很大。水泥相对矿粉而言,不规则程度更高,比表面积更大,表面空隙更多,使得与沥青发生反应的面积增加,能使沥青质更多的进入裂缝和空隙中,从而使沥青胶浆的稠度增加;同时水泥是一种活性更高的

碱性材料<sup>[10]</sup>,水泥中的 CaO 含量远高于矿粉,因而当水泥和沥青胶溶在一起形成沥青胶浆时,沥青中的酸性成分与水泥中的 CaO 等碱性成分发生化学反应,在沥青与水泥界面区形成较强的化学黏结力,从而提高沥青混凝土的力学性能。

## 5 结 论

(1) 水泥替代矿粉能提高沥青混凝土的马歇尔稳定度,降低沥青混凝土的流值。

(2) 填料为水泥和矿粉的沥青混凝土的蠕变量非常接近,填料为水泥的沥青混凝土轴向蠕变应变量更小,长期变形性能更优。

(3) 从沥青混凝土的长期变形特性方面看,可以用水泥代替矿粉作为沥青混凝土的填料。

## 参考文献:

- [1] 贺传卿, 杨桂权, 王显旭. 不同填料对水工碾压式沥青混凝土性能的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2014, 37(6): 496 - 499. (HE Chuan-qing, YANG Gui-quan, WANG Xian-xu. Effects of different fillers on the performances of hydraulic rolled asphalt concrete[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2014, 37(6): 496 - 499. (in Chinese))
- [2] Л. В. 盖金茨维. 道路沥青混凝土稳定性的研究[M]. 赵世五, 李明堃, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. (ГЕЭНЦЕВ Л. В. Study on stability of road asphalt concrete[M]. ZHAO Shi-wu, LI Ming-kun, trans. Beijing: China Building Industry Press, 1981. (in Chinese))
- [3] 赵登良. 沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998. (ZHAO Deng-liang. Liqing lumian[M]. Beijing: China Communications Press, 1998. (in Chinese))
- [4] SL514—2013 水工沥青混凝土施工规范[S]. 2013. (SL514—2013 Specifications for construction of hydraulic asphalt concrete[S]. 2013. (in Chinese))
- [5] DL/T5411—2009 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 2009. (DL/T5411—2009 Design specification of asphalt concrete facings and cores for embankment dams[S]. 2009. (in Chinese))
- [6] 张争奇, 王登科, 李 平, 等. 水泥与消石灰对沥青胶浆性能的影响[J]. 公路交通科技, 2008, 25(9): 24 - 28. (ZHANG Zheng-qi, WANG Deng-ke, LI Ping, et al. The effect of portland cement and fly ash on the performance of asphalt mortar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(9): 24 - 28. (in Chinese))

- [7] 施建. 水泥、消石灰对沥青性能影响研究[J]. 建材世界, 2010, **31**(6): 24 - 26. (SHI Jian. Effects of cement and hydrate lime on asphalt performances[J]. Building Materials, 2010, **31**(6): 24 - 26. (in Chinese))
- [8] 田见效, 李万军, 常小马, 等. 水泥替代矿粉对沥青混凝土性能影响研究[J]. 东北公路, 2003, **26**(4): 13 - 15. (TIAN Jian-xiao, LI Wang-jun, CHANG Xiao-ma, et al. Study the use of cement in asphalt concrete mixture[J]. Northeastern Highway, 2003, **26**(4): 13 - 15. (in Chinese))
- [9] 王发洲, 丁庆军, 胡曙光, 等. 水泥替代矿粉对沥青混凝土性能的影响[J]. 河南建材, 2000(3): 3 - 5. (WANG Fa-zhou, DING Qing-jun, HU Shu-guang, et al. Effect of cement instead of mineral powder on the performance of asphalt concrete[J]. Henan Building Materials, 2000(3): 3 - 5. (in Chinese))
- [10] 王卫, 顾丽华. 水泥替代矿粉对沥青混凝土路用性能影响分析[J]. 山西建筑, 2013, **39**(25): 107 - 108. (WANG Wei, GU Li-hua. The influence analysis on cement instead of slag to the road performance of asphalt concrete[J]. Shanxi Architectuer, 2013, **39**(25): 107 - 108. (in Chinese))
- [11] 魏安清. 水泥填料对沥青混凝土路用性能的影响研究[J]. 山西交通科技, 2006(6): 9 - 10. (WEI An-qing. The study on cement filling influencing on pavement performance of asphalt concret[J]. Shanxi Science & Technology of Communications, 2006(6): 9 - 10. (in Chinese))
- [12] 郑晓光, 吕伟民. 采用水泥增强沥青的抗剥落性能[J]. 公路, 2003(5): 119 - 121. (ZHENG Xiao-guang, LU Wei-min. Improving anti-stripping performance of asphalt with cement[J]. Highway. 2003(5): 119 - 121. (in Chinese))
- [13] 程展林, 丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 473 - 476. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun. Creep test for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 473 - 476. (in Chinese))
- [14] 左永振, 程展林, 丁红顺, 等. 堆石料蠕变试验方法研究[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(12): 63 - 65. (ZUO Yong-zhen, CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, et al. Method research for rockfill creep test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(12): 63 - 65. (in Chinese))
- [15] 汪明元, 何晓民, 程展林. 粗粒料流变研究的现状与展望[J]. 岩土力学, 2003, **24**(增刊): 451 - 454. (WANG Ming-yuan, HE Xiao-min, CHENG Zhan-lin. Current situation and prospect of studies on rheology property of coarse stuff[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(S0): 451 - 454. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)