

灌注式半柔性路面在陕西省干线公路应用研究

张 杰¹, 胡善海², 姚宏达³

¹陕西省公路局, 陕西 西安

²山东昆崙路桥工程有限公司, 山东 烟台

³山东瑞泰建设有限公司, 山东 滨州

收稿日期: 2024年6月1日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月29日

摘 要

通过对灌注式半柔性路面材料、设备、结构及施工工艺研究, 根据大孔隙沥青混合料材料特性, 提出采用均衡设计方法进行配合比设计, 解决了大孔隙沥青混合料连通孔隙率及稳定度调控难题; 采用自主研发的灌浆材料进行半柔性路面材料性能评价, 通过高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性分析, 水料比对半柔性路面材料路用性能影响显著, 结合实验路服役性能评价结果, 推荐水料比不超过0.35; 通过半柔性路面实验路服役性能观测, 半柔性路面具备优良的抗车辙性能。通过对陕西省国省干线半柔性路面材料、结构设计及施工工艺研究, 总结出适应陕西省国省干线渠化重载交通半柔性路面材料、结构及施工工艺关键技术, 为陕西省同类项目实施提供有益借鉴。灌注式半柔性路面结构不仅节约了沥青等不可再生资源用量而且减少全寿命周期的养护费用, 有效降低了重复建设对环境的破坏作用, 半柔性路面是一种较理想的环保耐久型路面结构。

关键词

灌注式半柔性路面, 大孔隙沥青混合料, 灌浆料, 服役效果

Research on the Application of Injecting Semi Flexible Pavement on Trunk Highways in Shaanxi Province

Jie Zhang¹, Shanhai Hu², Hongda Yao³

¹Shaanxi Provincial Highway Bureau, Xi'an Shaanxi

²Handong Kunyu Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Yantai Shandong

³Shandong Ruitai Construction Co., Ltd., Binzhou Shandong

Received: Jun. 1st, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 29th, 2024

文章引用: 张杰, 胡善海, 姚宏达. 灌注式半柔性路面在陕西省干线公路应用研究[J]. 土木工程, 2024, 13(6): 1071-1080. DOI: 10.12677/hjce.2024.136116

Abstract

By studying the materials, equipment, structure, and construction technology of cast-in-place semi flexible pavement, and based on the characteristics of macroporous asphalt mixtures, a balanced design method is proposed for mix proportion design, which solves the problem of controlling the connectivity porosity and stability of macroporous asphalt mixtures; the performance evaluation of semi flexible pavement materials was conducted using self-developed grouting materials. Through analysis of high temperature stability, low temperature crack resistance, and water stability, it was found that the water material ratio has a significant impact on the road performance of semi flexible pavement materials. Based on the results of experimental road service performance evaluation, it is recommended that the water material ratio should not exceed 0.35; through the observation of the service performance of semi flexible pavement experiments, it was found that the semi flexible pavement has excellent anti rutting performance. By studying the materials, structural design, and construction technology of semi flexible pavement for the national and provincial trunk lines in Shaanxi Province, key technologies suitable for the channelized heavy load transportation of the national and provincial trunk lines in Shaanxi Province have been summarized, providing useful reference for the implementation of similar projects in Shaanxi Province. The injection type semi flexible pavement structure not only saves the use of non renewable resources such as asphalt, but also reduces the maintenance cost throughout the entire life cycle, effectively reducing the environmental damage caused by repeated construction. Semi flexible pavement is an ideal environmentally friendly and durable pavement structure.

Keywords

Pouring Semi Flexible Pavement, Large Pore Asphalt Mixture, Grouting Material, Service Effect

Copyright © 2024 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

灌注式半柔性路面是指在完全级配大孔隙沥青沥青混合料中(连通孔隙率通常为 20%~30%), 灌入具有超高流态和超早强的水泥基胶浆而形成的兼具沥青路面和水泥混凝土路面优点的新型复合路面结构, 该路面能够很好的解决沥青路面的车辙问题, 具有良好的高温稳定性和路用服役性能, 符合路面多元化、功能化的发展需求[1] [2]。

依托陕西省渭南市 2023 年普通干线公路大中修及预防性养护工程, 选取重载车辆多、行车速度慢, 容易发生较严重车辙路段, 采用灌注式半柔性路面材料进行养护维修, 通过路面结构优化设计与配套施工工艺一体化研究, 提出了适用于陕西省普通国省干线重载渠化交通新型路面结构组合及施工关键技术; 通过对灌浆材料与灌浆设备一体化研究, 提出了适用于半柔性路面材料灌注胶浆关键技术。灌注式半柔性路面试验路的成功实施形成了适用陕西省灌注式半柔性路面施工关键技术, 通过近 1 年的通车试运营路面结构服役性能良好, 半柔性路面结构应用于重载渠化交通表现出了非常出色的服役能力, 彻底根治了路面车辙病害, 大大降低了重复建设对环境的破坏作用, 降低全寿命周期成本, 是一种经济环保耐久

型路面结构。此次灌注式半柔性路面结构应用研究积累了一定的理论基础，为该结构在陕西省推广应用积累了一定工程应用经验，为后续大规模推广应用提供借鉴。

2. 半柔性路面结构设计

试验路段原路面结构形式为 3 cm AC-13 沥青混凝土 + 4 cm AC-16 沥青混凝土 + 20 cm 二灰碎石 + 30 cm 二灰土，沥青面层厚度 7 cm，路面结构总厚度 57 cm，2007 年建成通车。常规养护方案为铣刨旧路行车道 7 cm 面层，重铺 7 cm ATB-25 厂拌热再生沥青稳定碎石下面层，加铺 4 cm AC-13 改性沥青混凝土上面层。常规养护方案加厚了沥青面层厚度，相对于原路面结构具备更强的承载能力及耐久性能，实际应用效果表明常规养护方案对于渠化重载交通红路灯路口位置路面结构服役 2 年即出现较严重车辙泛油等早期病害。

优化后的半柔性路面结构为铣刨旧路行车道 7 cm 面层，重铺 4 cm AC-13 改性沥青混凝土下面层 + 粘层 + 7 cm 灌注式半柔性路面上面层。设计过程中考虑到原路面基层服役多年出现的疲劳裂缝及半柔性路面材料本身抗裂性能，将富油密级配沥青混合料 AC-13 作为应力吸收层，用于解决材料本身抗裂性不足及结构性开裂问题，优化后的半柔性路面结构为一种复合型即抗裂又抗车辙路面结构，此种新型路面结构首次在陕西省国省干线养护项目中使用。

3. 大孔隙沥青混合料设计

3.1. 原材料选择

为了保证浆料有效灌注设计的沥青混合料需要具备较大的连通孔隙率，矿料级配主要采用粗集料形成级配骨架较少的细集料与沥青胶浆填充，粗集料宜采用质地坚硬的单级配集料[3]，考虑到渭南市周边料源特性以石灰岩为主，粗集料采用渭南市当地碎石场产 10~20 mm 石灰岩与 5~10 mm 石灰岩，细集料选用 0~3 mm 石灰岩机制砂。填料选用石灰岩研磨过 200 目筛网生产的矿粉。矿料试验结果见表 1~3 所示。

Table 1. Main technical indicators of coarse aggregate
表 1. 粗集料主要技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果	
			10~20 mm	5~10 mm
表观密度	g/cm ³	≥2.6	2.734	2.738
吸水率	%	≤2.0	0.43	0.52
压碎值	%	≤25	15.4	-
与沥青粘附性	级	≥4	5	-

Table 2. Main technical indicators of fine aggregate
表 2. 细集料主要技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果
表观密度	g/cm ³	≥2.6	2.708
吸水率	%	≤2.0	0.83
砂当量	%	≥60	68

Table 3. Main technical indicators of mineral powder
表 3. 矿粉主要技术指标

物理技术指标		单位	技术要求	检验结果
视密度		g/cm ³	≥2.5	2.625
粒径范围	<0.6 mm	%	100	100
	<0.15 mm	%	90~100	93.1
	<0.075 mm	%	75~100	89.8

参考排水式沥青混合料 OGFC 材料特性，大孔隙沥青混合料采用较多的粗集料组成矿料骨架结构，细集料用量较少导致混合料整体沥青用量偏少，为了提高沥青混合料整体强度需要采用黏度较大的改性沥青作为胶结材料[4]。试验路采用适用于陕西省气候特性的 SBS I-D 改性沥青，该沥青检测结果见表 4 所示。

Table 4. Main technical indicators of SBS modified asphalt
表 4. SBS 改性沥青主要技术指标

检测项目		技术要求	试验结果
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1mm		60~80	70
延度(5 cm/min, 5℃, cm)		≥20	38
软化点(℃)		≥55	65
密度(25℃, g/cm ³)		实测记录	1.021
旋转薄膜	质量损失(%)	≤±1.0	-0.22
老化试验	针入度比(25℃, %)	≥60	74
(163℃, 85 min)	延度(5℃, cm)	≥20	29

3.2. 矿料级配设计

参考排水式沥青混合料 OGFC 设计思路，灌注式大孔隙沥青混合料连通孔隙率较 OGFC 还要大才能满足浆料灌注要求[5]，只有采用单粒径级配集料能够满足设计要求，项目参考中国工程建设标准化协会《道路灌注式半柔性路面技术规程》推荐的级配范围及同类项目实施情况进行矿料级配设计，选用 0~3 mm、5~10 mm、10~20 mm 与矿粉三档原材料调试 3 组矿料级配，按照同类项目采用的沥青用量 3.5%进行马歇尔击实试验，根据孔隙率试验结果确定最佳级配曲线。原材料比例组成见表 5，混合料合成级配见表 6，基体沥青混合料级配曲线见图 1 所示。

Table 5. Composition of raw material proportions (%)
表 5. 原材料比例组成(%)

级配类型	10~20 mm 玄武岩	5~10 mm 玄武岩	0~3 mm 机制砂	矿粉
粗级配	80	11	6	3
中级配	76	11	10	3
细级配	72	11	14	3

Table 6. Composite gradation of mixtures
表 6. 混合料合成级配

级配类型 筛孔/mm	粗级配	中级配	细级配	设计级配范围
26.5	100.0	100.0	100.0	100
19	91.9	92.2	92.6	90~100
16	70.5	71.9	73.3	60~90
13.2	51.5	53.9	56.2	30~60
9.5	23.4	27.2	31.0	15~40
4.75	9.3	13.2	17.1	7~24
2.36	8.1	11.4	14.7	5~20
1.18	6.5	8.7	10.9	5~18
0.6	5.2	6.5	7.9	4~15
0.3	4.2	4.8	5.5	3~12
0.15	3.6	3.9	4.2	3~8
0.075	3.3	3.5	3.7	1~6

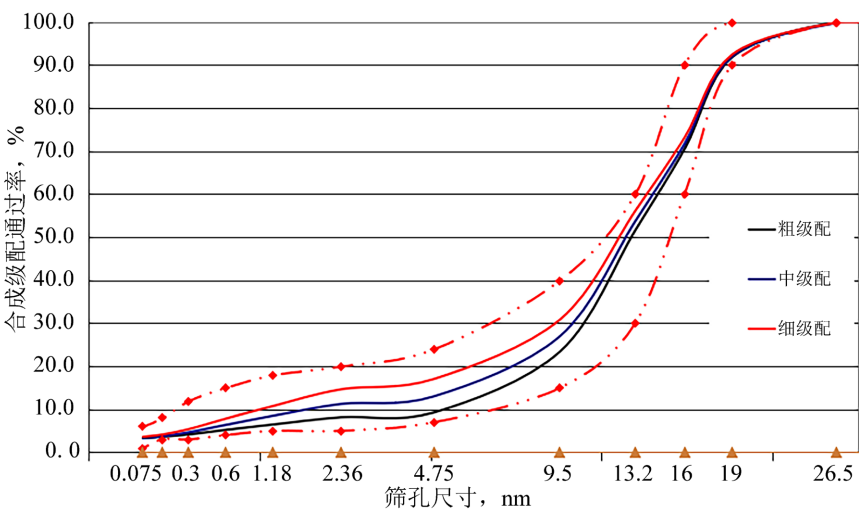


Figure 1. Composite gradation curve
图 1. 合成级配曲线

三条合成级配曲线明显呈现断级配特征，10~20 mm 粗集料用量占到 80 左右，5~10 mm 粗集料占比较少，细集料与填料组成沥青胶浆填充于骨架间隙，形成良好的骨架嵌挤结构，具有这种级配曲线的沥青混合料具有更好的嵌挤能力与连通孔隙率，保证大孔隙沥青混合料灌注足量水泥胶浆。

3.3. 沥青用量设计

大孔隙沥青混合料最佳沥青用量确定方法不同于常规沥青混合料设计方法，参考排水式沥青混合料 OGFC 确定方法，本文采用均衡沥青用量设计方法确定最佳沥青用量，总体设计原则为：沥青用量太多导致混合料析漏偏大，大孔隙沥青混合料摊铺碾压过程中形成沥青胶浆堵塞连通孔隙，采用析漏试验控

制混合料最高沥青用量；沥青用量不足导致飞散试验偏小，大孔隙沥青混合料粘结强度不足服役过程中容易松散脱落，采用飞散试验控制混合料最低沥青用量，综合对比分析析漏与飞散结果，结合经济性分析最终确定最佳沥青用量。

试件成型方法按照双面击实 50 次成型马歇尔试件，通过计算法确定试件连通孔隙率，依据均衡设计法最终确定三组级配各自最佳沥青用量。最佳沥青用量试验结果见表 7。

Table 7. Optimal asphalt content
表 7. 最佳沥青含量

级配类型	渗漏实验结果/%	飞散试验结果/%	稳定度/KN	孔隙率/%	最佳沥青含量/%
粗级配	0.37	15.9	2.28	30.6	3.3
中级配	0.36	13.3	3.25	25.8	3.6
细级配	0.34	12.4	3.59	21.3	3.8
规范设计	≤0.4	≤20	≥3	20%~30%	实测

从表 7 试验结果分析可知，级配越粗试件连通孔隙率越大，马歇尔稳定度与最佳沥青用量越小，过大或过小的连通孔隙率都不利于水泥胶浆的有效灌注，综合考虑大孔隙沥青混合料良好的灌注效果与骨架稳定性，最终确定采用中级配骨架结构设计结果。

4. 灌浆料性能评价

依托自主研发的特种水泥基灌浆材料进行评价分析，灌浆材料首先具备超高流动性及小时强度，能够满足灌注完成 3 小时开放交通要求，参考中国工程建设标准化协会《道路灌注式半柔性路面技术规程》推荐的灌浆料技术指标结合同类项目实施情况进行性能评价，灌浆料试验结果见表 8。

Table 8. Grouting material test results
表 8. 灌浆料试验结果

试验项目	单位	技术要求	检测结果
流动度	s	10~20	13.0
水料比	-	0.30~0.35	0.33
抗折强度(3 h)	MPa	≥2.0	2.8
抗压强度(3 h)	MPa	≥10.0	12.8
抗折强度(7 d)	MPa	≥4.0	5.4
抗压强度(7 d)	MPa	≥20.0	23.3
干缩率(3 d)	%	≤2.0	0.2

从表 8 试验结果可知，自主研发的灌浆料流动性完全满足灌注需求，流动性非常好。3 小时强度能够满足快速开放交通需求，后期强度增长速度很快有力保证半柔性路面结构强度，3 天干缩率远小于规程技术要求，有小提升半柔性路面结构抗开裂性能。

5. 半柔性路面材料性能评价

水料比是影响灌浆材料强度的关键因素，而灌浆材料的强度又影响着半柔性路面材料的路用性能，因此水料比对半柔性路面材料的路用性能有着重要影响[6]，本文研究了灌浆材料水料比对半柔性路面材

料路用性能的影响规律，基于马歇尔稳定度试验、车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂试验等对不同水料比条件下的半柔性路面材料路用性能进行综合评价。

5.1. 高温稳定性

基于马歇尔试验和车辙试验，分析水料比对半柔性路面材料高温性能的影响规律，试验结果见表 9、图 2、图 3 所示。

Table 9. High temperature performance test results
表 9. 高温性能试验结果

水料比	马歇尔稳定度(kN)	动稳定度(次/mm)
0.30	31.61	12,359
0.35	29.31	11,896
0.40	25.59	10,237

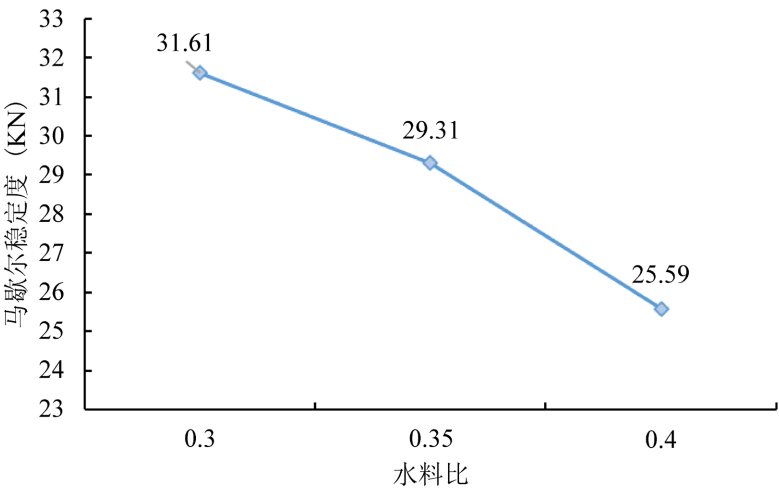


Figure 2. Analysis chart of Marshall stability test results
图 2. 马歇尔稳定度试验结果分析图

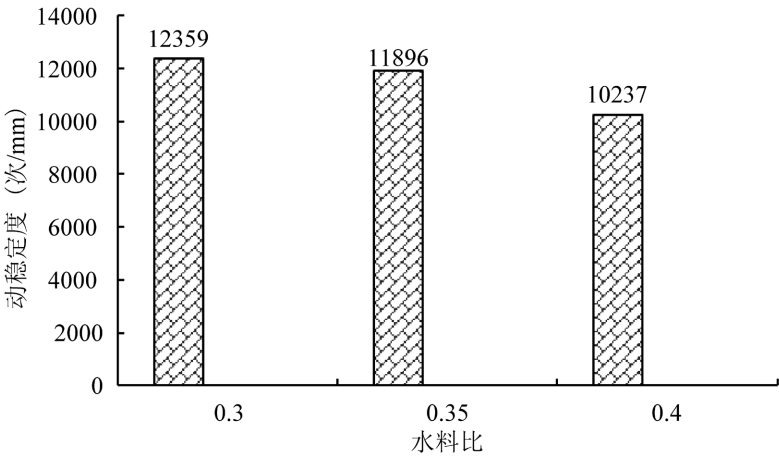


Figure 3. Analysis chart of dynamic stability test results
图 3. 动稳定度试验结果分析图

由上述实验可知，随着水料比的增大，半柔性路面材料的马歇尔稳定性和动稳定度逐渐减小，当灌浆材料水料比由 0.30 增加到 0.35，刚柔复合路面材料的马歇尔稳定性和动稳定度分别减小了 7.3%和 3.7%，而当灌浆材料水料比由 0.35 增加到 0.40，刚柔复合路面材料的马歇尔稳定性和动稳定度则分别减小了 12.7%和 13.9%。表明当水料比超过 0.35，混合料强度对水料比的变化更加敏感，因此，为了保障半柔性路面材料的高温稳定性，需要严格控制灌浆材料的水料比参数。

5.2. 低温性能

基于低温小梁弯曲试验，分析水料比对半柔性路面低温性能的影响，试验结果见表 10、图 4 所示。

Table 10. Low temperature bending test results

表 10. 低温弯曲试验结果

水料比	抗弯拉强度(MPa)	最大弯拉应变($\mu\epsilon$)
0.30	7.56	2016.8
0.35	7.21	1975.3
0.40	6.32	1813.1

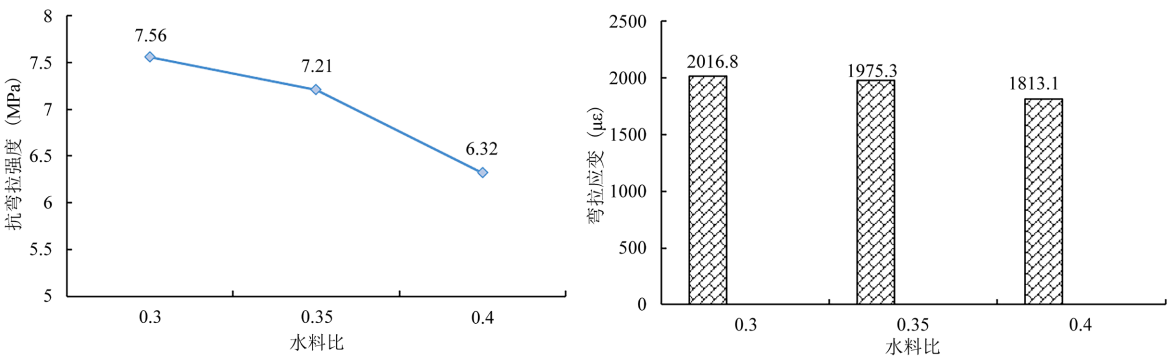


Figure 4. Analysis chart of low-temperature bending test results

图 4. 低温弯曲试验结果分析图

由上述试验可知，随着水料比的增大，半柔性路面材料的低温性能逐渐降低，当灌浆材料水料比由 0.3 增加到 0.35，半柔性路面材料的抗弯拉强度和弯拉应变分别减小了 4.6%和 2.1%，而当灌浆材料水料比由 0.35 增加到 0.4，半柔性路面材料的马歇尔稳定性和动稳定度则分别减小了 12.3%和 8.2%，表明水料比超过一定的范围，混合料低温性能会急剧下降，影响刚柔路面材料的路用性能。

5.3. 水稳定性

本文分别对半柔性路面材料进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验，试验结果见表 11、图 5 所示。

Table 11. Water stability test results

表 11. 水稳定性试验结果

水料比	浸水马歇尔试验			冻融劈裂试验		
	MS ₂ (kN)	MS (kN)	MS ₀ (%)	RT ₂ (MPa)	RT ₁ (MPa)	TSR (%)
0.30	28.9	28.2	102.5	1.74	1.7	102.4
0.35	28	27.6	101.4	1.69	1.66	101.8
0.40	25.3	25.1	100.8	1.53	1.51	101.3

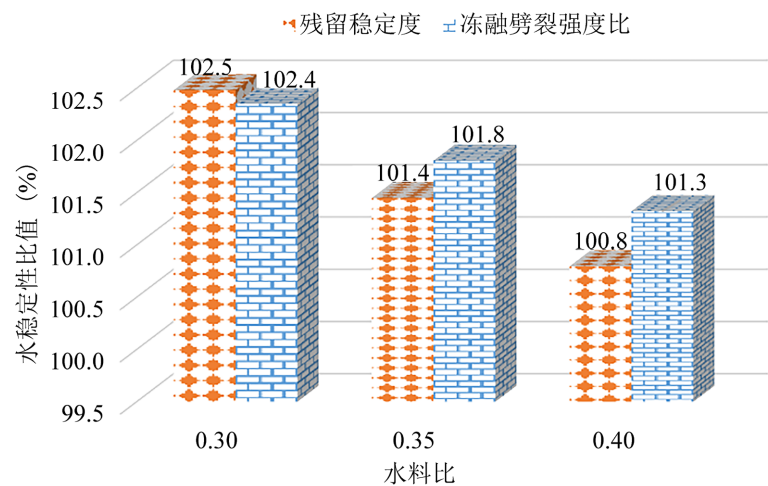


Figure 5. Analysis chart of water stability test results
图 5. 水稳定性试验结果分析图

由上述试验可知，随着水料比的增大，半柔性路面马歇尔稳定性和劈裂强度值逐渐降低，混合料的残留稳定性和冻融劈裂强度逐渐减小，表明水料比越大对半柔性路面材料的水稳定性越不利，由图 5 可知，当水料比由 0.3 增加到 0.35，半柔性路面材料的马歇尔稳定性和劈裂强度变化平缓，但当水料比由 0.35 增加到 0.40，半柔性路面材料的马歇尔稳定性和劈裂强度出现急剧减小，当水料比达到一定的程度，半柔性路面材料对灌浆材料的水料比较为敏感，导致半柔性路面材料的水稳定性急剧减小。

6. 实验路评价

6.1. 施工工艺流程

灌注式半柔性路面施工工艺分为两个过程，大孔隙沥青混合料施工及灌浆材料灌注施工。其施工主要包括以下步骤：大空隙基体沥青混合料的生产、运输、摊铺、压实，大孔隙沥青混合料封边，灌浆料的制备，灌浆料的灌注，灌注后半柔性路面的表面处理及养护。

6.2. 实验路性能评价

试验路段于 2023 年 10 月份施工完成，2023 年 4 月份通车试运营半年之后进行跟踪检测评定，实验路外观色泽均匀美观路表轮迹带未发现车辙迹象，路面不渗水，构造深度指标满足《沥青路面施工技术规范》(F40-2004)要求，试验路服役能力达到了非常理想的效果。现场检测结果见表 12 所示。

Table 12. On site inspection test results
表 12. 现场检测试验结果

项目	试验结果	技术要求	备注
渗水系数	0	≤120 ml/min	不渗水
构造深度	0.63	≥0.5 mm	铺砂法
厚度	72 mm	70 mm	取芯检测
平整度	0	5 mm	3 m 直尺

7. 结论

(1) 通过对半柔性路面材料特性研究，优化半柔性路面结构方案，通过实验路服役性能观测能够适应

国省干线公路渠化重载交通需求, 优化后的新型路面结构形式 7 cm 半柔性路面 + 4 cm AC-13 沥青混凝土 + 20 cm 二灰碎石 + 30 cm 二灰土, 铣刨原路面面层基层结构不破坏, 此路面结构为一种复合型即抗裂又抗车辙路面结构, 为陕西省国省干线半柔性路面结构设计提供有益参考。

(2) 自主研发的灌浆材料具备优良的适用性, 通过对半柔性路面材料高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性评价, 水料比对半柔性路面材料路用性能影响显著, 结合实验路服役性能评价结果, 推荐水料比不超过 0.35。

(3) 通过对半柔性路面材料、设备、路面结构及施工工艺研究, 总结出适应陕西省国省干线渠化重载交通半柔性路面材料、结构及施工工艺关键技术, 为陕西省同类项目实施提供有益借鉴。

参考文献

- [1] 牟长江, 程凯, 刘瑞, 等. 半柔性路面用水泥基灌浆材料的矿物掺合料协同优化研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(3): 1102-1112.
- [2] 魏璐. 半柔性抗车辙路面技术应用研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- [3] 张洪刚, 蒋逸雯, 陈杰, 等. 外加剂对半柔性路面用早强型水泥基灌浆料工作性能的调控[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(4): 1308-1317+1335.
- [4] 马培建, 蒋青春, 徐陆军, 等. 灌注式半柔性复合路面研究现状综述[J]. 路基工程, 2018(3): 11-15.
- [5] 张云珂. 沥青油石比及养生时间对半柔性路面材料性能的影响[J]. 山西交通科技, 2022(1): 6-8+29.
- [6] 姚新宇, 刘宇, 朱云升, 等. 应用于沥青路面维修的半柔性功能组合层结构合理性分析[J]. 公路工程, 2022, 47(2): 133-137.