

MS-7 型超粗微表处组成设计与路用性能研究

古洋, 朱瑞峰, 吴旭阳

(中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 400013)

摘要: 为研究 MS-7 型超粗微表处的组成设计与路用性能, 通过直剪试验分析最大密度级配曲线 n 值对内摩擦角的影响, 基于施工和易性确定 MS-7 型微表处的级配范围; 通过湿轮磨耗试验和负荷车轮黏砂试验确定 MS-7 型微表处的油石比; 通过正交试验分析不同因素对 MS-7 型微表处开放时间的影响; 通过轮辙变形试验对比分析 MS-7 型微表处和多层微表处的抗车辙性能。结果表明, 随着不同类型微表处级配中最大粒径的增大及 MS-7 型微表处最大密度曲线中 n 值的增大, 微表处集料的抗剪强度及内摩擦角增大; 满足施工和易性要求的 MS-7 型微表处级配对应的最大密度曲线 n 值为 0.3~0.6; MS-7 型微表处的油石比为 5.0%~7.0%; 温度是影响 MS-7 型微表处开放时间的最主要因素, 水泥掺量为 3%、速凝剂掺量为 0.9% 时 MS-7 型微表处可在 3 h 内开放交通; MS-7 型微表处的抗车辙性能显著优于多层微表处。

关键词: 公路; MS-7 型超粗微表处; 级配设计; 开放时间; 抗车辙性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0072-04

在行车荷载及自然环境等因素综合作用下, 沥青路面产生车辙病害。部分车辙在达到破坏临界深度 12.5 mm 时会持续发展^[1-2], 到处理修复时深度已达到 25~30 mm。微表处修复车辙是目前常用的技术方案^[3-6], 但 MS-3、MS-4 型(最大粒径 13.2 mm)^[7] 和 MS-6 型(最大粒径 20.0 mm)微表处^[8] 用于修补深度 25~30 mm 车辙时需要多层摊铺。根据 JTG F40—2004《路沥青路面施工技术规范》, 微表处分层摊铺时, 第一层摊铺后至少应开放交通 24 h 后方可进行第二层摊铺^[9]。多层微表处修复车辙一方面会使封闭交通时间延长, 另一方面多层微表处交界面处强度较低, 内部粗集料较少, 没有形成骨架结构, 易产生新的车辙。采用单层微表处修复车辙, 修复后即可开放交通, 还可避免二次车辙的产生。因此, 亟待开发更大粒径微表处, 用单层微表处修复深度 25~30 mm 的车辙病害。本文研究最大粒径 31.2 mm 的 MS-7 型超粗微表处组成设计, 对比超粗微表处与多层微表处的抗车辙性能, 为超粗微表处设计及 25~30 mm 车辙修复提供参考。

1 基于最大密度级配曲线理论的 MS-7 型超粗微表处级配范围

目前混合料级配设计理论主要有最大密度级配曲线理论和粒子干涉理论。考虑到采用粒子干涉理

论设计的间断级配内摩阻力大, 稀浆混合料不易拌和、摊铺^[10], 采用最大密度级配曲线理论初步设计 MS-7 型超粗微表处级配, 计算公式见式(1)。由于式(1)为无穷级数, 没有最小粒径限制, 会造成矿粉含量过高, 对于传统热拌沥青混合料, 易造成高温稳定性不足。但对于稀浆混合料, 矿粉含量偏高是有利的, 甚至是必须的。

$$P = 100(d/D)^n \quad (1)$$

式中: P 为不同等级集料的通过率(%); d 为分级集料的粒径(mm); D 为集料的最大粒径(mm); n 为试验指数。

将按照最大密度理论计算的级配与目前普遍采用的 MS-3 型级配进行比较, 结果见表 1。由表 1

表 1 MS-3 型级配和按最大理论密度计算的级对比

分级序 列号	粒径 d_i /mm	MS-3 型级配/%		按最大密度公式 计算的级配/%	
		级配范围	中值	$n=0.3\sim0.7$	$n=0.45$
1	9.500	100	100.0	100.0	100.0
2	4.750	70~90	80.0	61.6~81.2	73.2
3	2.360	45~70	57.5	37.7~65.9	53.4
4	1.180	28~50	39.0	23.2~53.5	39.1
5	0.600	19~34	26.5	14.5~43.7	28.9
6	0.330	12~25	18.5	9.5~36.5	22.1
7	0.150	7~18	12.5	5.5~28.8	15.5
8	0.075	5~15	10.0	3.4~23.4	11.3

可知:MS-3 型级配中值中 2.36 mm 及以上粒径的通过率分布在最大密度线($n=0.45$)以上,1.18 mm 及以下粒径的通过率与最大密度线基本一致,即 MS-3 型级配与最大密度线大致吻合,集料略偏细,有利于减小集料内摩阻力,改善和易性。 $n=0.3\sim 0.7$ 时按最大密度公式计算的级配范围与 MS-3 型级配范围有较大部分重合。因此,初步确定 MS-7 型超粗微表处级配设计中 n 值为 $0.3\sim 0.7$ 。

2 基于和易性的 MS-7 型超粗微表处级配范围

2.1 级配类型及最大密度曲线 n 值对内摩擦角的影响

集料的内摩阻力对稀浆混合料的拌和性及和易性影响较大。由于集料本身并无黏聚力,不同规格集料混合后内摩阻力大小主要取决于内摩擦角,采用直剪仪测试不同级配类型微表处的内摩擦角。不同级配类型微表处的抗剪强度及内摩擦角见图 1,其中 ES-1、MS-2 和 MS-3 型级配均为《微表处和稀浆封层技术指南》^[11] 推荐的级配范围中值,MS-7 型超粗微表处级配为最大密度曲线 n 取 0.45

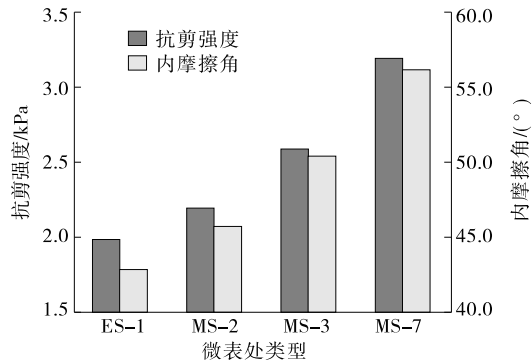


图 1 不同级配类型微表处的抗剪强度及内摩擦角测试结果

时的级配。最大密度曲线不同 n 值时 MS-7 型超粗微表处的抗剪强度及内摩擦角见图 2。

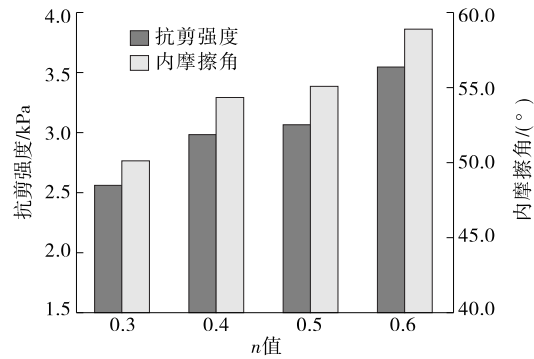


图 2 最大密度曲线不同 n 值时 MS-7 型超粗微表处的抗剪强度及内摩擦角测试结果

由图 1 可知:不同级配类型微表处的抗剪强度及内摩擦角随着最大粒径的增加而增大,级配类型由 ES-1 型变化为 MS-7 型时,抗剪强度及内摩擦角分别增大 60%、30%。MS-7 型超粗微表处的内摩阻力相对常规微表处明显增加,导致施工和易性降低,施工较困难。

由图 2 可知:随着最大密度曲线 n 值的增大,MS-7 型超粗微表处的抗剪强度和内摩擦角整体呈增大趋势。 n 值从 0.3 增大到 0.6 时,抗剪强度和内摩擦角分别增大 38%、17%;但 n 值从 0.4 增大到 0.5 时,抗剪强度和内摩擦角变化不明显。为获得较好的施工和易性,MS-7 型超粗微表处级配中最大密度曲线 n 值不宜过大。

2.2 基于和易性的级配范围优化

由于 MS-7 型超粗微表处的内摩阻力较大,且最大密度曲线中不同 n 值会影响内摩阻力,进而影响施工性能,进行不同 n 值及不同用水量下施工和易性测试,试验中固定油石比为 7%,施工和易性以砂浆稠度仪测定的稠度值表征。试验结果见表 2。

表 2 最大密度曲线不同 n 值时 MS-7 型超粗微表处的施工和易性测试结果

用水量/%	不同 n 值时的稠度/cm								
	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
12	<2	2~3	>4	—	—	—	—	—	—
10	<2	<2	2~3	2~3	>4	—	—	—	—
9	<2	<2	2~3	2~3	2~3	>4	—	—	—
8	—	—	<2	<2	2~3	2~3	>4	>4	—
7	—	—	—	<2	2~3	2~3	>3	>3	—
6	—	—	—	—	<2	2~3	2~3	>3	>4
5	—	—	—	—	—	<2	2~3	2~3	>3
4	—	—	—	—	—	—	<2	<2	2~3

由表2可知:相同用水量下,不同 n 值时MS-7型超粗微表处的施工和易性差别较大。整体趋势为 n 值增大,内摩阻力增加,和易性降低。结合工程经验,稠度为2~3 cm时施工和易性最佳。同时MS-7型超粗微表处施工厚度大,水分不易挥发,成型较慢,用水量不宜超过10%。综上,满足施工和易性要求的最大密度曲线 n 值为0.3~0.6。

根据最大密度曲线级配理论及施工和易性要求,确定MS-7型超粗微表处的级配范围为最大密度曲线 n 为0.3~0.6对应的级配范围(见表3)。

表3 MS-7型超粗微表处的级配范围

筛孔尺寸/mm	级配范围/%	级配中值/%	筛孔尺寸/mm	级配范围/%	级配中值/%
31.500	100.0	100.0	2.360	21.0~46.0	33.5
26.500	95.0~100.0	97.5	1.180	14.0~37.0	25.5
19.000	74.0~86.0	80.0	0.600	9.0~30.5	19.7
16.000	66.6~81.6	74.1	0.300	6.0~25.0	15.5
13.200	59.0~77.0	68.0	0.150	4.0~20.0	12.0
9.500	49.0~70.0	59.5	0.075	3.0~16.0	9.5
4.750	32.0~57.6	44.4			

3 MS-7型超粗微表处的油石比

参考《微表处和稀浆封层技术指南》,取表3中级配中值,通过湿轮磨耗试验和负荷车轮黏砂试验确定MS-7型超粗微表处的油石比范围。根据试验结果(见表4)及试验段状况,满足规范要求的MS-7型超粗微表处的油石比为5.0%~7.0%。

表4 不同油石比下MS-7型超粗微表处的湿轮磨耗试验和负荷车轮黏砂试验结果

油石比/%	湿轮磨耗质量损失/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	负荷车轮黏砂量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
4.0	1 065.2	—
5.0	462.4	—
6.0	394.5	281.3
7.0	—	426.8
8.0	—	641.7
规范要求	≤ 540.0	≤ 450.0

4 MS-7型超粗微表处的开放时间

MS-7型超粗微表处的最大粒径为31.5 mm,

摊铺厚度达3 cm,水分耗散慢。为加快MS-7型微表处的成型,尽快开放交通,在微表处混合料中掺入少量水泥和速凝剂。此外,微表处成型速度与外界温度有关。为分析不同因素对MS-7型微表处成型速度的影响,以水泥掺量、速凝剂掺量和温度为试验因素,每个因素选择3个水平,以 $L_9(3^4)$ 正交表分析不同因素及水平组合下MS-7型超粗微表处的开放时间。水泥采用P.O42.5,集料采用玄武岩,乳化沥青采用中裂快凝型SBR改性乳化沥青,速凝剂采用自制复配型试剂。正交试验表及试验结果见表5,试验结果的极差和方差分析见表6。

表5 不同因素及水平组合下MS-7型超粗微表处的开放时间

试验序号	水泥掺量/%	速凝剂掺量/%	温度/ ℃	开放时间/h
1	2	0.3	15	7.3
2	2	0.6	20	4.7
3	2	0.9	25	2.2
4	3	0.3	20	4.5
5	3	0.6	25	2.8
6	3	0.9	15	5.0
7	4	0.3	25	4.2
8	4	0.6	15	6.5
9	4	0.9	20	4.0

表6 不同因素及水平组合下MS-7型超粗微表处开放交通时间的极差和方差分析

分析指标	水泥掺量	速凝剂掺量	温度	随机误差
X_{j1}/h	14.2	16.0	18.8	14.100
X_{j2}/h	12.3	14.0	13.2	13.900
X_{j3}/h	14.7	11.2	9.2	13.200
K_j/h	2.4	4.8	9.6	0.900
S_j	1.069	3.876	15.502	0.149
M_j	0.534	1.938	7.751	0.074
F_j	7.180	26.030	104.120	—
临界值	$F_{0.05}(2,2)=19.0$			

注: X_{ji} 表示第 j 因素在第 i 水平时的试验指标和; K_j 表示第 j 因素的极差; S_j 表示第 j 因素的偏差平方和; M_j 表示第 j 因素的方差; F_j 表示第 j 因素的 F 统计量。

由表6可知:3种因素对开放时间的影响程度从大到小依次为温度、速凝剂掺量和水泥掺量,

温度的影响最明显,水泥掺量的影响不显著。水泥掺量为 3%、速凝剂掺量为 0.9% 时 MS-7 型超粗微表处的开放交通时间最小,故确定水泥掺量为 3%、速凝剂掺量为 0.9%。宜在气温较高时进行 MS-7 型超粗微表处施工。在较高温度条件下,水泥掺量为 3%、速凝剂掺量为 0.9% 时,开放交通时间可控制在 3 h 以内。

5 MS-7 型超粗微表处的路用性能

通过轮辙变形试验分析 3 层 MS-3 型微表处、MS-3 型+MS-5 型微表处、MS-5 型+MS-3 型微表处、单层 30 mm 厚 MS-7 型微表处的抗车辙性能。其中:MS-3 型级配为《微表处与稀浆封层技术指南》中级配范围中值,沥青用量为 7%,单层摊铺厚度为 10 mm;MS-5 型级配为 $n=0.45$ 最大密度线级配,最大粒径为 20 mm,沥青用量为 7%,单层摊铺厚度为 20 mm;单层 30 mm 厚 MS-7 型微表处级配为 $n=0.45$ 最大密度线级配,沥青用量为 7%。3 层 MS-3 型微表处、MS-3 型+MS-5 型微表处、MS-5 型+MS-3 型微表处的总摊铺厚度均为 30 mm。每种微表处类型进行 5 组平行试验,试验结果见图 3。

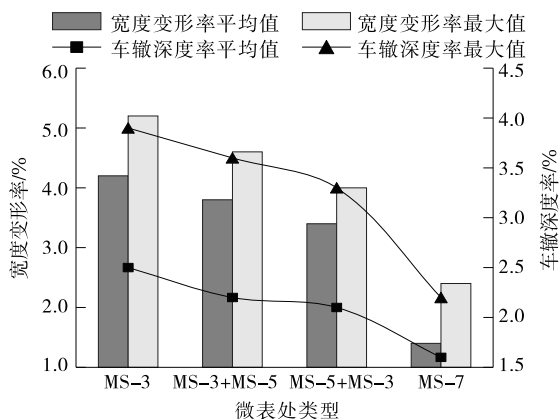


图 3 不同微表处组合及 MS-7 型微表处的轮辙试验结果

由图 3 可知:MS-7 型微表处的车辙深度率最大值为 2.2%,平均值为 1.6%;宽度变形率最大值为 2.4%,平均值为 1.4%。其他微表处组合的车辙深度率最大值均大于 3%,平均值均大于 2%;宽度变形率最大值均大于 4%,平均值均大于 3%,且 3 层 MS-3 型组合的轮辙变形大于其他两种双层组合。表明 MS-7 型微表处的抗车辙性能远优于多层微表处,双层微表处的抗车辙性能优于 3 层微表处。这主要是由于单层微表处受力时“顶天立地”的最

大粒径碎石直接将荷载传递给地面,最大粒径碎石不发生位移和改变,因而厚度变化较小,抗车辙性能较强;双层或多层微表处受力时,最大粒径碎石沿接触面滑动,微表处厚度变薄,经车辆反复碾压产生车辙。

6 结论

(1) 不同级配类型微表处的抗剪强度及内摩擦角随着级配最大粒径的增大而增大,级配由 ES-1 型变化为 MS-7 型时,抗剪强度及内摩擦角分别增大 60%、30%。

(2) 随着最大密度曲线 n 值的增大,MS-7 型超粗微表处的抗剪强度和内摩擦角整体呈增大趋势, n 值从 0.3 增大到 0.6 时,抗剪强度和内摩擦角分别增大 38%、17%。

(3) MS-7 型超粗微表处的级配范围为最大密度曲线 n 为 0.3~0.6 对应的级配范围,油石比为 5.0%~7.0%。

(4) 不同因素对 MS-7 型微表处开放交通时间的影响程度从大到小依次为温度、速凝剂掺量和水泥掺量,在较高温度条件下,水泥掺量为 3%、速凝剂掺量为 0.9% 时可在 3 h 内开放交通。

(5) MS-7 型微表处的抗车辙性能远优于多层微表处,双层微表处的抗车辙性能优于 3 层微表处。

参考文献:

- [1] 李宏,牛玺荣,陈明星.CLSM 在重载交通路面弱基层(路基)中的成功应用[J].中外公路,2009,29(1):178-182.
- [2] 朱云升,郭忠印,王景.高温重载条件下沥青混合料的蠕变试验研究[J].建筑材料学报,2008,11(5):545-549.
- [3] 杨修志.微表处在京沪高速公路沥青路面车辙修复中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(12):67-70.
- [4] 张存公,周毅,王曰可,等.微表处车辙填充施工问题探讨[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(3):64-66.
- [5] 孔令绅,李雪萍,冯志强.超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):9-15.
- [6] 曹海利,付丽红.基于养护经济效益的微表处预养护时机分析[J].公路与汽运,2022(3):153-155+161.
- [7] 黄新颜.MS-4 新型微表处试验与施工研究[D].长沙:湖南大学,2009.

(下转第 80 页)

3.2 路基面波测试分析

图 17、图 18 为该路基面波波速分布。由图 17、图 18 可知:1) 18 t 压路机碾压断面 2 m 深度处的波速为 170 m/s 左右,左侧波速为 150 m/s 左右,右侧波速为 200 m/s 左右,左侧断面密实性比右侧断面略差,但整个断面的波速分布较均匀,无较大缺陷区域。2) 26 t 压路机碾压断面 2 m 深度处的波速为 200 m/s 左右,波速分布均匀,无任何缺陷区域,路基碾压质量较高。

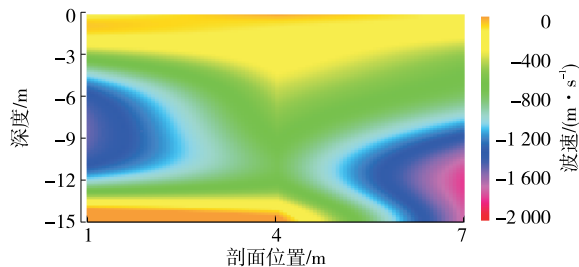


图 17 18 t 压路机碾压断面面波波速分布

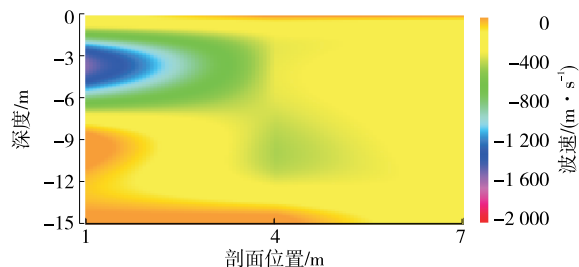


图 18 26 t 压路机碾压断面面波波速分布

根据现场施工情况,两种碾压方案的碾压质量均满足工程要求。但采用 18 t 压路机碾压的路段,部分区域含水率略高,碾压质量不易控制,这可能是导致碾压 4 遍后沉降不稳定及面波波速略低的原因。

4 结论

本文根据土石混合路基填料的特点,引入沉降

差控制与瑞雷面波测试,开展高填方土石混合路基压实质量控制技术研究,得出如下结论:

(1) 随着压路机碾压遍数的增加,相邻两遍碾压沉降差快速下降,碾压次数超过 5 遍时,部分测点沉降差出现上升情况,同时沉降差曲线斜率变缓,沉降值慢慢趋于稳定。

(2) 18 t 压路机在碾压填石路基 4 遍后效能大幅度降低,但采用 32 t 压路机进行补压后能保证路基压实质量。26 t 压路机碾压 5 遍后即可达到路基压实度要求。

(3) 两种碾压方案下,土石混合路基波速分布均匀,无缺陷区域,密实性较好,两种方案均满足工程要求。

参考文献:

- [1] 张莎莎,杨晓华,杜耀辉,等.泥质软岩土石弃渣路基填筑工艺及质量检测方法[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):8-13.
- [2] 陶庆东,何兆益,贾颖.土石混合体路基填料分形特性与压实破碎特征试验研究[J].中外公路,2020,40(2):243-248.
- [3] 蔺彪.静力贯入法检测土石混合料路基压实度研究[J].公路工程,2019,44(5):201-206.
- [4] 孙静,孙琳.土工离心模型试验研究土石混合填料的沉降变形特性[J].中外公路,2019,39(2):14-18.
- [5] 李盛,田文迪,刘玉龙,等.公路填石路基压实工艺优化方法及效果评价[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2360-2371.
- [6] 黄虎刚.动力锥贯入仪用于路基压实质量检测的适用性分析[J].公路与汽运,2022(4):68-71.
- [7] 陈宇亮,徐远明,王新武.基于动弹性模量的土石混填路基压实质量控制技术[J].交通科学与工程,2011,27(1):20-22+29.

收稿日期:2022-04-07

(上接第 75 页)

- [8] 王海有,朱东辉,傅清亮,等.MS-6 型微表处集料级配范围及最佳沥青用量范围[J].石油沥青,2010,24(2):41-44.
- [9] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

- [10] 王立久,刘慧.矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J].公路,2008,53(1):170-175.
- [11] 交通部公路科学研究院.微表处和稀浆封层技术指南[M].北京:人民交通出版社,2006.

收稿日期:2022-06-14