

隧道内水泥混凝土路面微铣刨后摩擦系数衰减规律研究

弥海晨¹, 王琪², 薛辉², 冯乐²

(1. 西安公路研究院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省交通建设集团公司西商分公司, 陕西 西安 710025)

摘要:基于实体工程检测数据,统计分析了隧道内水泥混凝土路面微铣刨后的摩擦系数衰减情况。结果表明:不同车道类型、行车方向、平曲线半径对应的摩擦系数衰减差异不显著;不同纵坡对应的摩擦系数衰减差异显著;摩擦系数初始值与24个月后的衰减大致呈正相关,但线性相关系数较小;采用摩擦系数衰减值的平均值95%单侧置信区间上限+使用期的要求值,确定的隧道内水泥混凝土路面微铣刨后摩擦系数初始值应不小于69 BPN。

关键词:微铣刨;摩擦系数;隧道;水泥混凝土路面

为提升隧道内水泥混凝土路面抗滑性能,笔者于2016年7、8月对西商高速公路工程中3座长、特长隧道水泥混凝土路面进行了微铣刨。经初步试验,认为相比于常规铣刨和精铣刨,微铣刨作为全新的隧道内水泥混凝土路面抗滑性能提升技术,隧道内水泥混凝土路面强度影响小,对交通影响小,可以为后续“白+黑”罩面提供粗糙下承面,提高层间抗剪力,可以较好地改善隧道内水泥混凝土路面的行驶质量。

微铣刨是介于普通铣刨(174把刀具)和精铣刨(674把刀具)之间的一种铣刨工艺,将精铣刨机刀具间隔拆除一组,保留337把刀具,主要施工工艺参数:铣刨深度控制在5~8 mm,铣刨机正常工作速度4~5 m/min,铣刨机刀具每8 000~10 000 m²整体更换一次。微铣刨后隧道内水泥混凝土路面抗滑性能衰减规律对于隧道内抗滑技术的合理选择至关重要。该文利用西商高速公路工程两年定期定点跟踪检测的近3 000个数据的统计分析,主要对隧道内水泥混凝土路面微铣刨后的路面抗滑性能的重要指标之一——摩擦系数衰减规律进行研究。

微铣刨后,西商高速公路观测期两年内单向平均断面交通量约为7 500辆/日,总体增长率约3%,总体交通量有变化,但是变化不大,根据交通荷载等级换算为极重等级。考虑到实体工程中运营单位更多的是关注抗滑性能随时间的衰减,因此该文将影响因素进行了简化,用通行时间代替交通量作为考察因素。

1 微铣刨后隧道内水泥混凝土路面摩擦系数衰减影响因素研究

1.1 车道类型对微铣刨后路面摩擦系数衰减的影响

第1车道和第2车道主要行驶的车辆为小车,第3车道主要行驶的车辆为货车。车道类型对摩擦系数衰减的影响总体方差分析结果如表1所示。

由表1可见:4个时间段内车道类型对摩擦系数衰减的影响总体方差分析结果中, P 值均大于显著性水平0.05,因此不同车道的摩擦系数衰减没有显著差异,即4个时间段内车道类型对摩擦系数衰减没有显著影响。这与一般认为货车对路面摩擦系数影响较大的认识不一致。分析原因可能为:第3车道的车辆相对较少;货车经常会在其他两个车道上行驶。

1.2 行车方向对微铣刨后路面摩擦系数衰减的影响

上行为商洛到西安方向,下行为西安到商洛方向,根据统计结果,上、下行交通量相差不大。行车方向对摩擦系数衰减的影响总体方差分析结果见表2。

由表2可见:4个时间段内行车方向对摩擦系数衰减的影响总体方差分析结果中, P 值均大于显著性水平0.05,因此不同行车方向的摩擦系数衰减没有显著差异,即4个时间段内行车方向对摩擦系数衰减没有显著影响。

1.3 平曲线半径对微铣刨后路面摩擦系数衰减的影响

不同平曲线半径(1 500、4 000 m和直线段)对摩

表 1 车道类型对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果

时间段/月	方差来源	离差平方和	自由度(df)	均方离差	F 值	显著性(P 值)
0~8	组间	59.06	2	29.53	0.534	0.588
	组内	3 813.45	69	55.27	—	—
	总数	3 872.51	71	—	—	—
10~18	组间	1.07	2	0.53	0.052	0.950
	组内	402.81	39	10.33	—	—
	总数	403.88	41	—	—	—
18~24	组间	21.63	2	10.82	0.427	0.655
	组内	987.58	39	25.32	—	—
	总数	1 009.21	41	—	—	—
0~24	组间	33.32	2	16.66	0.274	0.763
	组内	1 277.40	21	60.83	—	—
	总数	1 310.72	23	—	—	—

表 2 行车方向对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果

时间段/月	方差来源	离差平方和	自由度(df)	均方离差	F 值	显著性(P 值)
0~8	组间	93.66	1	93.658	1.735	0.192
	组内	3 778.85	70	53.984	—	—
	总数	3 872.51	71	—	—	—
10~18	组间	7.59	1	7.593	0.766	0.387
	组内	396.29	40	9.907	—	—
	总数	403.88	41	—	—	—
18~24	组间	10.35	1	10.349	0.414	0.523
	组内	998.87	40	24.972	—	—
	总数	1 009.21	41	—	—	—
0~24	组间	154.48	1	154.475	2.939	0.101
	组内	1 156.25	22	52.557	—	—
	总数	1 310.72	23	—	—	—

擦系数衰减值的影响总体方差分析结果见表 3。

由表 3 可见:4 个时间段不同平曲线半径对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果中,P 值大于显著性水平 0.05,因此不同平曲线半径的摩擦系数衰减值没有显著差异,即 4 个时间段内平曲线半径对摩擦系数衰减值没有显著影响。

1.4 纵坡对微铣刨后路面摩擦系数衰减的影响

1.4.1 总体方差分析

不同纵坡(— 1.68%、— 1.63%、1.68% 和 2.39%)对摩擦系数衰减值的影响总体方差分析结果

见表 4。

(1) 10~18 个月不同纵坡对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果 P 值大于显著性水平 0.05。分析其原因,主要是该阶段摩擦系数衰减相对较小;其他 3 个时间段不同纵坡对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果 P 值小于显著性水平 0.05。

(2) 总体上看,不同纵坡的摩擦系数衰减值有显著差异。

1.4.2 多重比较方差分析

纵坡对摩擦系数衰减值的影响多重比较方差分析

表 3 不同平曲线半径对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果

时间段/月	方差来源	离差平方和	自由度(df)	均方离差	F 值	显著性(P 值)
0~8	组间	57.52	2	28.76	3.119	0.055
	组内	387.30	42	9.221	—	—
	总数	444.82	44	—	—	—
10~18	组间	7.46	1	7.459	0.773	0.395
	组内	125.51	13	9.655	—	—
	总数	132.97	14	—	—	—
18~24	组间	7.02	1	7.017	0.916	0.356
	组内	99.56	13	7.659	—	—
	总数	106.58	14	—	—	—
0~24	组间	61.57	1	61.57	2.333	0.151
	组内	343.03	13	26.387	—	—
	总数	404.60	14	—	—	—

表 4 不同纵坡对摩擦系数衰减值的影响方差分析结果

时间段/月	方差来源	离差平方和	自由度(df)	均方离差	F 值	显著性(P 值)
0~8	组间	103.69	3	34.56	4.15	0.012
	组内	341.12	41	8.32	—	—
	总数	444.82	44	—	—	—
10~18	组间	36.26	3	12.09	1.38	0.302
	组内	96.71	11	8.79	—	—
	总数	132.97	14	—	—	—
18~24	组间	80.75	3	26.92	11.46	0.001
	组内	25.83	11	2.35	—	—
	总数	106.58	14	—	—	—
0~24	组间	247.88	3	82.63	5.80	0.013
	组内	156.72	11	14.25	—	—
	总数	404.60	14	—	—	—

结果见表 5。

由表 5 可见：
(1) 4 个时间段内纵坡对摩擦系数衰减值的影响多重比较方差分析结果 P 值部分小于显著性水平 0.05,部分大于显著性水平 0.05。因此不同纵坡的路面摩擦系数衰减部分有显著差异。

(2) 以 0~24 个月为例,两个下坡路段,坡度相差不大,摩擦系数差异显著;两个上坡路段,坡度相差不大,摩擦系数差异不显著;-1.63%下坡路段和两个上坡路段,摩擦系数差异显著;-1.68%下坡路段和两个上坡路段,摩擦系数差异不显著。说明从现有数据看,

纵坡与路面摩擦系数衰减规律性不强;剔除-1.68%下坡路段数据后,表现出纵坡越小,摩擦系数衰减越大,即下坡段摩擦系数比上坡段摩擦系数衰减快。

(3) 4 个时间段内,不同纵坡摩擦系数衰减值的平均值差最大达到 10.85 BPN。

(4) 4 个时间段内,在 95%的置信度下,-1.63%和 2.39%纵坡的摩擦系数衰减平均值差的置信区间范围分别为:6.73、10.66、5.51、13.57 BPN。即在现有检测精度下,4 个时间段内下坡和上坡段路面的摩擦系数衰减平均值差最大可能达到大约 6.73、10.66、5.51、13.57 BPN。

表 5 纵坡对摩擦系数衰减值的影响多重比较方差分析结果

时间段/ 月	纵坡 1/ %	纵坡 2/ %	均值差/ %	显著性 (<i>P</i> 值)	95%置信区间/BPN		
					下限	上限	范围
0~8		-1.63	-4.610	0.002	-7.42	-1.79	5.63
	-1.68	1.68	-2.341	0.025	-4.38	-0.30	4.07
		2.39	-2.491	0.081	-5.31	0.32	5.63
	-1.63	1.68	2.261	0.103	-0.48	5.01	5.49
		2.39	2.111	0.212	-1.25	5.47	6.73
	1.68	2.39	-0.151	0.911	-2.90	2.59	5.49
10~18		-1.63	0.310	0.9	-5.02	5.64	10.66
	-1.68	1.68	-3.300	0.144	-7.91	1.31	9.23
		2.39	-1.220	0.625	-6.55	4.11	10.66
	-1.63	1.68	-3.610	0.113	-8.22	1.00	9.23
		2.39	-1.530	0.541	-6.86	3.80	10.66
	1.68	2.39	2.080	0.342	-2.53	6.70	9.23
18~24		-1.63	-4.530	0.004	-7.28	-1.78	5.51
	-1.68	1.68	1.320	0.247	-1.06	3.71	4.77
		2.39	1.700	0.201	-1.05	4.45	5.51
	-1.63	1.68	5.850	0	3.47	8.24	4.77
		2.39	6.230	0	3.48	8.98	5.51
	1.68	2.39	0.370	0.736	-2.01	2.76	4.77
0~24		-1.63	-10.580	0.006	-17.36	-3.79	13.57
	-1.68	1.68	-1.180	0.666	-7.06	4.69	11.75
		2.39	0.270	0.931	-6.51	7.06	13.57
	-1.63	1.68	9.390	0.005	3.52	15.27	11.75
		2.39	10.850	0.005	4.07	17.63	13.57
	1.68	2.39	1.460	0.596	-4.42	7.33	11.75

2 微铣刨后隧道内水泥混凝土路面摩擦系数随时间的衰减

2.1 微铣刨后 24 个月内摩擦系数随时间的衰减

计算微铣刨后每 2 个月摩擦系数的平均值,考察微铣刨后 24 个月内摩擦系数随时间的变化,统计分析结果见表 6 和图 1、2。

- 由表 6 和图 1、2 可见:
- (1) 微铣刨 2~4 个月后,路面摩擦系数平均值趋于稳定。考察每个观测点的摩擦系数随时间的变化,除个别点外,大部分变化规律相似。
- (2) 不同检测期样本的单点摩擦系数数值区域较

大,其差值为 15~22 BPN。单个观测点摩擦系数数值区域较大的情况下,其衰减表现出大致相似的规律,说明该规律具有较高的可靠性。

2.2 微铣刨后摩擦系数初始值对摩擦系数衰减的影响

微铣刨后摩擦系数初始值与 24 个月后的摩擦系数、摩擦系数衰减值关系散点图见图 3、4。

由图 3、4 可以看出:

微铣刨后摩擦系数初始值与 24 个月后的摩擦系数数值大致呈正相关,即微铣刨后摩擦系数初始值越大,24 个月后的摩擦系数值也越大,但线性相关系数较小,可以认为不相关。即可以认为初始值与衰减值没有明显关系。

表 6 微铣刨后 24 个月内摩擦系数值随时间的变化

时间/月	摩擦系数/BPN							观测数/ 个
	平均	中位数	标准差	方差	区域	最小值	最大值	
0	68.52	69.20	5.27	27.73	19.33	57.47	76.80	15
2	64.75	64.67	6.27	39.37	19.93	54.33	74.27	15
4	62.83	63.93	5.65	31.96	19.27	51.13	70.40	15
6	63.70	64.73	5.28	27.84	18.73	53.33	72.07	15
8	63.16	65.00	4.89	23.89	18.93	51.53	70.47	15
10	61.43	62.40	6.13	37.55	20.40	48.80	69.20	15
12	60.64	61.40	6.35	40.35	22.00	46.00	68.00	15
14	60.51	61.87	6.24	38.89	21.27	47.40	68.67	15
16	58.94	61.00	6.27	39.34	22.67	45.33	68.00	15
18	56.46	58.33	4.66	21.68	15.67	48.00	63.67	15
20	55.67	58.00	6.38	40.77	21.73	42.67	64.40	15
22	51.47	53.00	6.82	46.47	21.00	38.33	59.33	15
24	47.24	50.00	6.79	46.17	20.33	34.67	55.00	15

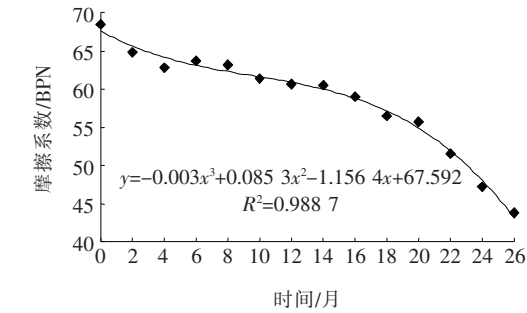


图 1 微铣刨后 24 个月内摩擦系数平均值随时间的变化

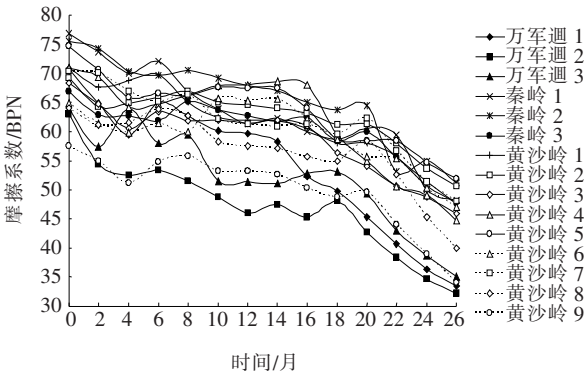


图 2 微铣刨后 24 个月内各观测点摩擦系数值随时间的变化

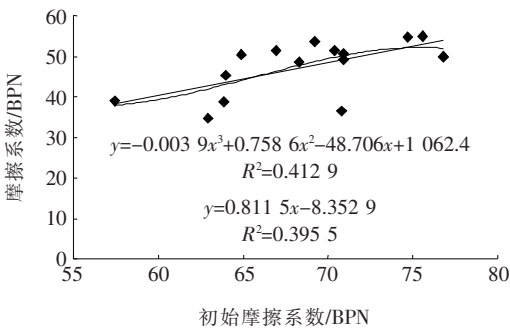


图 3 微铣刨后摩擦系数初始值与 24 个月后的摩擦系数关系

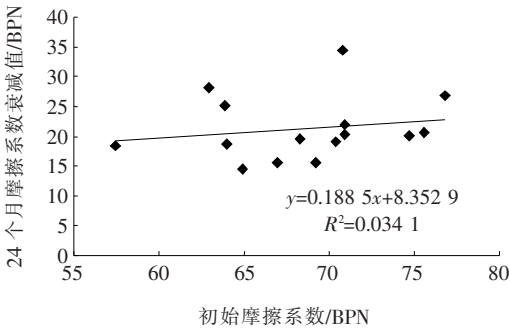


图 4 微铣刨后摩擦系数初始值与 24 个月后的摩擦系数衰减关系

3 微铣刨后隧道内水泥混凝土路面摩擦系数初始值的确定

JTJ 073.1—2001《公路水泥混凝土路面养护技术

规范》中高速公路水泥混凝土路面养护质量标准规定：抗滑值摩擦系数应大于 45 BPN；该文实体工程中隧道内水泥混凝土路面微铣刨后抗滑性能预期应维持 2 年。因此该文研究中以使用期 24 个月后的摩擦系数达到 45 BPN 作为摩擦系数初始值确定标准。

微铣刨后 24 个月后摩擦系数衰减值与初始值没有明显的相关性。经分析，微铣刨后各个月摩擦系

数衰减值与初始值也没有明显的相关性。即可认为衰减值具有随机性,初始摩擦系数值大或者小两种特殊情况下,衰减值有可能接近,从而造成初始值小的情况下,摩擦系数不能满足要求。该文采用“衰减值平均值+使用一段时间后的要求值”作为摩擦系数初始值要求。考虑到摩擦系数衰减值平均值为一个随机样本,采用“衰减值平均值 95%单侧置信区间上限+使用一段时间后的要求值”作为摩擦系数初始值要求,即每次检测

衰减值平均值大于该文样本的衰减值平均值的概率仅为 5%,是小概率事件,因此该要求具有一定的合理性。

微铣刨后每半年的摩擦系数衰减值统计结果见表 7。按使用 24 个月后的要求值为 45 BPN 计算摩擦系数初始值亦列于表中。由表 7 可见:

(1) 基于使用期(24 个月)后摩擦系数平均值和衰减值平均值确定的微铣刨后摩擦系数初始值要求基本一致。

表 7 微铣刨后每半年的摩擦系数衰减值统计结果

时间/ 月	摩擦系数/BPN						置信度(95%)		计算初始 值/BPN	观测数/ 个
	平均	中位数	标准差	方差	区域	最小值	最大值	单侧上限/BPN		
24	21.27	20.00	5.38	28.89	19.87	14.60	34.47	23.72	68.72	15
18	12.06	11.53	4.01	16.11	14.74	6.26	21.00	13.88	58.88	15
12	7.88	7.27	4.70	22.06	17.34	-0.40	16.93	10.01	55.01	15
6	4.82	5.13	2.42	5.88	9.40	0.20	9.60	5.92	50.92	15

(2) 根据对观测点的数据统计结果,该实体工程微铣刨后路面摩擦系数平均值为 68.52 BPN,微铣刨后路面可以安全使用 24 个月左右。

(3) 基于使用期(使用 24 个月)摩擦系数衰减值平均值的微铣刨后摩擦系数初始值的确定,微铣刨后路面摩擦系数初始值应大于 68.72 BPN,取整后为大于 69 BPN。

4 微铣刨隧道内水泥混凝土路面摩擦系数衰减总体评价

在实体工程中,分别采用常规铣刨、精铣刨和微铣刨 3 种铣刨工艺对同一隧道内水泥混凝土路面的抗滑性能进行提升,经过两年多的定点对比观测,摩擦系数整体衰减情况见表 8。由表 8 可见:

表 8 不同铣刨工艺铣刨后检测结果

铣刨工艺	铣刨刀具 数量/把	摩擦系数平均值/BPN		
		铣刨前	铣刨后 0 个月	铣刨后 24 个月
常规铣刨	174	28.2	70.1	47.5
微铣刨	337	27.5	69.2	48.0
精铣刨	674	31.0	68.9	47.0

(1) 3 种铣刨工艺对隧道内水泥混凝土路面的摩擦系数提升效果明显。

(2) 微铣刨工艺和其他两种铣刨工艺相比,仅从摩擦系数一个指标来看,提升效果基本相当。但是在

研究中发现,微铣刨后对路面构造深度改善的持久性和行车的舒适性,显著优于其他两种工艺。

5 结论

该文通过对隧道水泥混凝土路面微铣刨后摩擦系数的长期定点定期跟踪检测,研究了水泥混凝土路面微铣刨后摩擦系数衰减情况,提出了微铣刨后路面摩擦系数初始值要求。得出以下结论:

(1) 方差分析结果表明:车道类型、行车方向、平曲线半径 3 个因素对摩擦系数衰减值没有显著影响;不同纵坡的微铣刨后路面摩擦系数衰减值有显著差异:纵坡越小,摩擦系数衰减越大。

(2) 微铣刨 2~4 个月后,路面摩擦系数平均值趋于稳定,18 个月后,路面摩擦系数平均值衰减明显。

(3) 微铣刨后初始值与 24 个月后的摩擦系数值大致呈正相关,但线性相关系数较小。

(4) 基于使用期(使用 24 个月)摩擦系数衰减值平均值,确定了微铣刨后路面摩擦系数初始值应不小于 69 BPN。

参考文献:

[1] 傅广文,许新权.隧道水泥路面抗滑性能改善措施及应用效果[J].广东公路交通,2015(6):9-13.
[2] 关士锋.精铣刨在隧道水泥混凝土路面养护中的应用[J].交通世界(建养·机械),2015(28):34-35.
[3] JTJ 073.1-2001 公路水泥混凝土路面养护技术规范[S].