

就地热再生沥青混合料水稳定性评价方法分析

平景飞¹, 徐希忠², 李作钰², 符东绪², 陆佃龙¹, 杨万桥¹

¹山东高速交通建设集团股份有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: 846954711@qq.com

收稿日期: 2021年2月7日; 录用日期: 2021年3月2日; 发布日期: 2021年3月23日

摘要

文章首先分析了就地热再生沥青混合料的沥青-集料粘附性特点和施工常见问题, 通过水稳定性试验验证了就地热再生技术可以大幅提高水稳定性, 但是需要更严格的试验环境模拟其长期水稳定性能。其次, 比较分析了浸水马歇尔试验、真空饱水马歇尔试验、冻融劈裂试验和浸水劈裂试验三种常见的水稳定性评价方法应用于就地热再生沥青混合料的适用性, 试验结果表明: 浸水马歇尔试验不适用于评价就地热再生沥青混合料水稳定性, 而冻融劈裂试验和浸水劈裂试验机理与水损害直接相关、试验模拟条件较为严格、试验结果的区分度较好、与空隙率的相关度较好, 适于就地热再生沥青混合料水稳定性评价; 若改进冻融劈裂试验和浸水劈裂试验, 加入动水压力环境, 模拟实际路况中路面受到的温度、压力、水的耦合作用, 将使其评价效果更加准确。

关键词

就地热再生, 沥青混合料, 水稳定性, 评价方法, 动水压力

Analysis on Evaluation Method of Water Stability of in Reclaimed Asphalt Mixer

Jingfei Ping¹, Xizhong Xu², Zuoyu Li², Dongxu Fu², Dianlong Lu¹, Wanqiao Yang¹

¹Shandong Expressway Construction Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²Shandong Academy of Transportation Sciences, Jinan Shandong

Email: 846954711@qq.com

Received: Feb. 7th, 2021; accepted: Mar. 2nd, 2021; published: Mar. 23rd, 2021

Abstract

This paper first analyzes the characteristics of asphalt-aggregate adhesion and common problems in construction of local hot recycled asphalt mixture. Through water stability test, it is verified that local heat regeneration technology can greatly improve water stability. However, more strin-

gent test environment is needed to simulate its long-term water stability. Secondly, the applicability of three common water stability evaluation methods: immersion Marshall test, vacuum saturated Marshall test, freeze-thaw splitting test and immersion splitting test are compared and analyzed. The results show that the immersion Marshall test is not suitable for evaluating the water stability of geothermal recycled asphalt mixture, while the mechanism of freeze-thaw splitting test and immersion splitting test is directly related to water damage, the test simulation conditions are strict, the test results are well distinguished, and the correlation with porosity is good, and the water stability evaluation of hot recycled asphalt mixture is suitable; If the freeze-thaw splitting test and the immersion splitting test are improved, the dynamic water pressure environment is added to simulate the coupling effect of temperature, pressure and water on the road surface in the actual road condition, the evaluation effect will be better and more accurate.

Keywords

Local Heat Regeneration, Asphalt Mixture, Water Stability, Evaluation Method, Hydrodynamic Pressure

Copyright © 2021 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

随着我国高速公路里程的增加、交通量的急剧增大, 伴随而来的是沥青路面出现了各种早期病害, 迫切需要养护。就地热再生技术作为目前常用的路面养护方式之一, 能够充分利用了再生沥青混合料 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) 料, 既能节省工程造价, 又能减少施工过程中的碳排放。但是由于 RAP 料中沥青已经老化, 导致 RAP 料中沥青与集料的粘附性较低, 再生沥青混合料的水稳定性不足, 所以在设计过程中需要重点控制其水稳定性。目前再生沥青混合料的水稳定性评价方法依然沿用普通沥青混合料的传统方法(如马歇尔试验、冻融劈裂试验), 多数学者利用传统方法评价热再生沥青混合料水稳定性时, 验证了与 RAP 料水稳定性较差的结论, 但是部分学者得到了与事实相矛盾的结果, 有的研究结果表明随

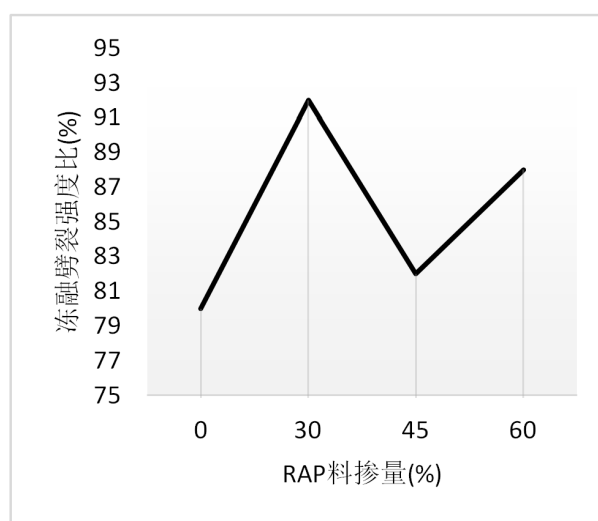


Figure 1. Water stability changes irregularly with

图 1. 水稳定性随 RAP 料掺量无规律变化

着 RAP 料的增加, 再生沥青混合料水稳定性无规律变化[1], 如图 1 所示, 而有的研究结果甚至发现水稳定性越来越好[2], 如图 2 所示。为探索现有试验方法评价再生沥青混合料水稳定性时出现不同结果的原因, 本文结合 A、B 两项实体工程, 针对就地热再生技术特点, 分析评价传统的水稳定性评价方法对于 RAP 料和再生沥青混合料的有效性, 优选合适的评价方法, 并提出改进建议。

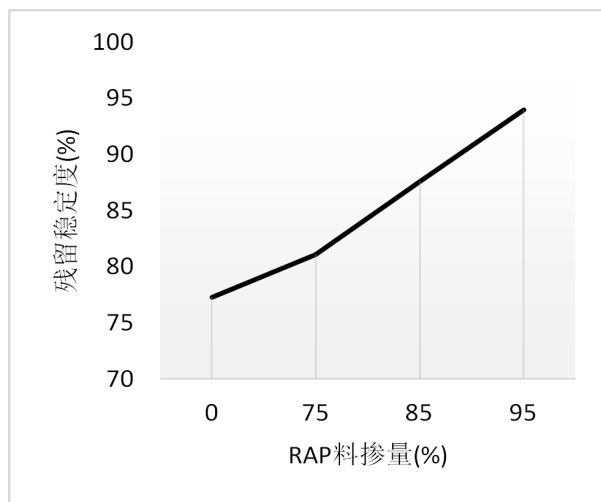


Figure 2. Water stability increases with the rap content increase of rap content

图 2. 水稳定性随 RAP 料掺量增大而增大

2. 试验设计

2.1. 试验材料

工程 A、B、C 的 RAP 料和再生混合料各档筛分结果如表 1 所示。工程 A 中的 RAP 料沥青含量 4.77%, 再生剂掺量为 3%; 工程 B 中的 RAP 料沥青含量为 3.8%, 再生剂掺量为 3%; C 工程中的 RAP 料沥青含量为。两项工程中新添加沥青为 SBS 改性沥青, 再生剂为鞍山双成科技 SZS 再生剂。两项工程中抽提后得到沥青三大指标及掺加再生剂后三大指标如表 2 所示。

Table 1. Screening results of rap material and recycled mixture

表 1. RAP 料和再生混合料各档筛分结果

工程	级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率(%)									
		0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
A	RAP 料	10.3	11.1	12.7	17.2	23.2	29.2	45.6	77.5	93.4	100.0
	再生混合料	9.6	10.5	12.1	16.7	22.8	29.1	45.7	77.6	93.2	100.0
B	RAP 料	6.8	8.4	11.5	15.6	21.7	28.5	39.0	70.2	89.3	100.0
	再生混合料	6.8	8.4	11.6	15.7	21.8	28.5	40.8	71.7	90.0	100.0

Table 2. Three indexes of used asphalt and recycled asphalt

表 2. 旧沥青及再生沥青三大指标

工程	项目	25℃针入度(0.1 mm)	软化点(R&B) (°C)	5℃延度(cm)
A	旧沥青	28.5	63.7	7.4
	再生沥青	38.6	58.2	15.3

Continued

B	旧沥青	22.5	66.5	0.2
	再生沥青	32	58	3.4

2.2. 水稳定性试验方案

本文分别对 RAP 料和再生沥青混合料进行浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、浸水劈裂试验。已有研究表明[3]-[9]，空隙率是影响沥青混合料水稳定性的主要因素之一。为分析就地热再生沥青混合料水稳定性与空隙率关系，在各项试验中，通过调整试件成型过程中的击实次数，得到不同范围空隙率的试件，每组空隙率进行 5 次平行试验。

1) 浸水马歇尔试验[10]

将马歇尔试件分成 2 组：第一组在 60℃ 恒温水槽中保温 30~40 min 后测其马歇尔稳定度 MS ；第二组在 60℃ 恒温水槽中保温 48 h 后测其马歇尔稳定度 MS_1 。由式 1 计算残留稳定度。

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \times 100\% \quad (1)$$

式中， MS_0 为试件的浸水残留稳定度，%； MS_1 为试件浸水 48 h 后稳定度，kN； MS 为试件稳定度，k。

2) 真空饱水马歇尔试验[10]

将成型好的马歇尔事件分成 2 组：第一组在 60℃ 恒温水槽中保温 30~40 分钟后测其马歇尔稳定度 MS ；第二组在 98.3~98.7 kPa 真空条件饱水 15 min 后恢复常压，再放入 60 摄氏度恒温水槽中保温 48 h，然后测其马歇尔稳定度 MS_2 。由式 2 计算残留稳定度。

$$MS'_0 = \frac{MS_2}{MS} \times 100\% \quad (2)$$

式中， MS'_0 为试件的浸水残留稳定度，%； MS_2 为试件真空饱水并浸水 48 h 后稳定度，kN； MS 为试件稳定度，kN。

3) 冻融劈裂试验[10]

将马歇尔试件分成 2 组：第一组在 25℃ 恒温水槽中浸水不少于 2 h 后测其最大破坏荷载 P_{T1} ；第二组在 98.3~98.7 kPa 真空条件下饱水 15 min 后恢复常压，将试件在水中放置 0.5 h，再在 -18℃ 冰箱中冷冻 16 h，然后放到 60℃ 恒温水槽中浸水 24 h，最后放入 25℃ 恒温水槽中不少于 2 h，取出试件后测其最大破坏荷载 R_{T2} 。由式 3 计算强度比。

$$TSR = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中，TSR 为冻融劈裂试验强度比，%； R_{T1} 为第一组试件的劈裂强度，MPa； R_{T1} 为第二组试件的劈裂强度，MPa。 R_{T1} 和 R_{T2} 由式 4 计算。

$$\begin{aligned} R_{T1} &= 0.006287 P_{T1} / h_1 \\ R_{T2} &= 0.006287 P_{T2} / h_2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中， P_{T1} 和 P_{T2} 分别为第一组和第二组试件的试验荷载，N； h_1 和 h_2 分别为第一组和第二组试件的高度，mm。

4) 浸水劈裂试验[10]

浸水劈裂试验并非现行规范规定的试验方案，而是在“八五”国家科技攻关期间进行过专项研究

的一种试验方法, 虽然没有录入现行规范, 但是仍然有许多学者利用该方法辅助评价沥青混合料水稳定性。

浸水劈裂试验采用与冻融劈裂试验相同的仪器测试其劈裂强度。将马歇尔试件分成 2 组: 第一组放入 4℃ 水中 6 h 后取出, 并置入 60℃ 水中 12 h 为一次冷热循环, 两次冷热循环后测其最大破坏荷载; 第二组用塑料袋包好, 在干燥条件下放入 60℃ 水中 3 h 后, 测试其最大破坏荷载; 两组比值即为浸水劈裂强度比。计算公式如式 5 所示。

$$ISR = \frac{R_{I2}}{R_{I1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, ISR 为冻融劈裂试验强度比, %; R_{I2} 为第一组试件的劈裂强度, MPa; R_{I1} 为第二组试件的劈裂强度, MPa。 R_{I1} 和 R_{I2} 由式 6 计算。

$$\begin{aligned} R_{I1} &= 0.006287P_{I1}/h_1 \\ R_{I2} &= 0.006287P_{I2}/h_2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, P_{I1} 和 P_{I2} 分别为第一组和第二组试件的试验荷载, N; h_1 和 h_2 分别为第一组和第二组试件的高度, mm。

3. 试验结果分析与讨论

3.1. 试验数据与主要结论

浸水马歇尔试验、真空饱水马歇尔试验、冻融劈裂试验、浸水劈裂试验结果如表 3 所示。

Table 3. Data sheet of water stability test

表 3. 水稳定性试验数据表

工程代号	混合料类型	空隙率(%)	浸水马歇尔试验 残留稳定度(%)	真空饱水马歇尔试验 残留稳定度(%)	冻融劈裂试验 劈裂强度比(%)	浸水劈裂试验 劈裂强度比(%)	
A	RAP	5~6	66.67	60.1	76.99	73.68	
		6~7	64.15	52.91	64.96	71.07	
	再生 混合料	4~5	98.4	96.43	98.06	99.07	
		5~6	92	86.04	92.45	95.54	
		6~7	83.14	80.86	85.44	89.62	
		7~8	82.39	77.88	77.89	78.64	
	B	RAP	5~6	64.15	61.95	63.78	66.67
			6~7	57.11	54.97	57.72	63.78
再生 混合料		4~5	99.24	96	94.92	95.04	
		5~6	90.13	83.41	87.18	89.83	
		6~7	84.45	76.11	79.63	78.90	
		7~8	79.99	71.07	72.12	74.04	

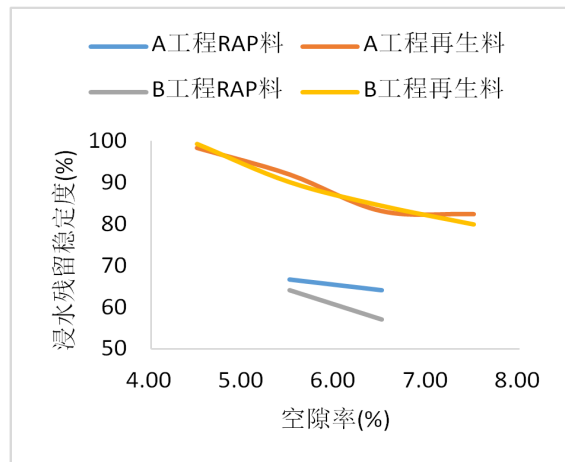


Figure 3. Schell test results of Engineering mixture a and B
图 3. A、B 工程混合料歇尔试验结果

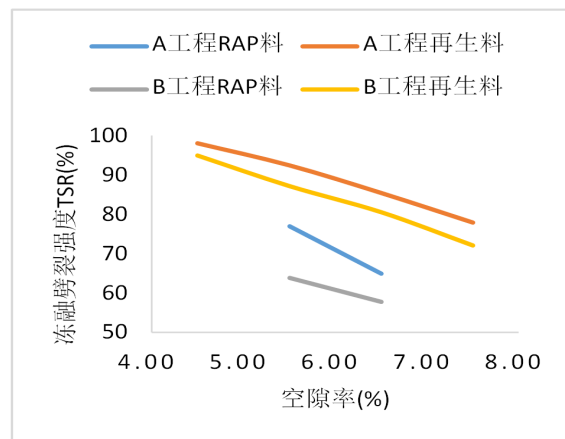


Figure 4. Freeze thaw splitting test results of Engineering mixture a and B
图 4. A、B 工程混合料冻融劈裂试验结果

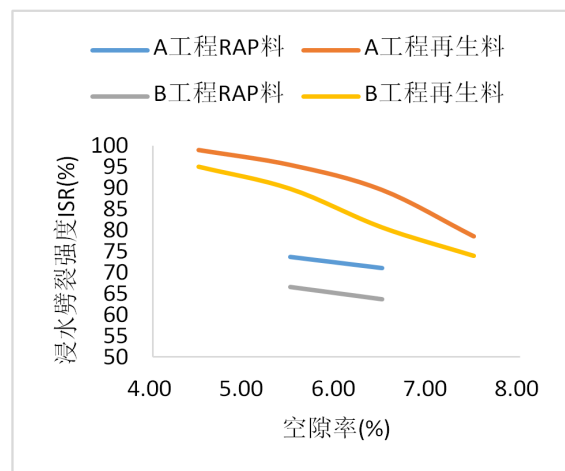


Figure 5. Test results of water immersion splitting of Engineering mixture a and B
图 5. A、B 工程混合料浸水劈裂试验结果

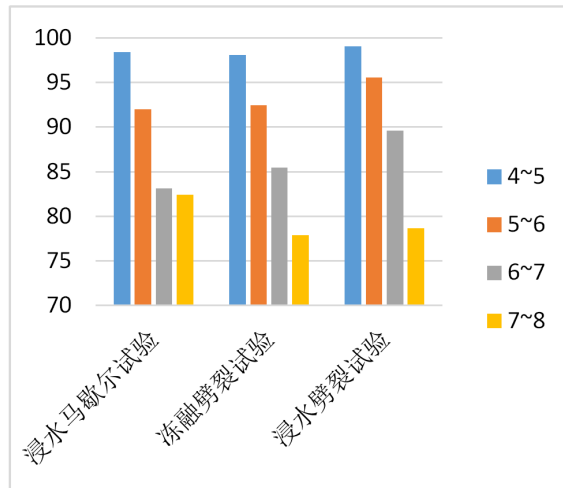


Figure 6. A comparison of evaluation methods for engineering mixture (%)

图 6. A 工程混合料评价方法对比(%)

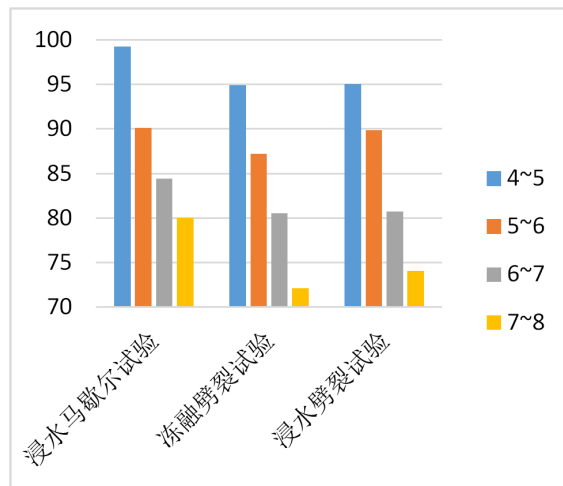


Figure 7. B comparison of evaluation methods for engineering mixture (%)

图 7. B 工程混合料评价方法对比(%)

从图 3~5 可以看出，不论采用何种方法进行试验，A、B 工程 RAP 料的水稳定性均较差，并且随着空隙率的增加而减少；但是再生混合料因加入了再生剂与新集料其水稳定性得到了很大的提升，表明就地热再生技术可以有效提高沥青混合料水稳定性能。种试验对于 A、B 两项工程的区分性有所不同。冻融劈裂试验和浸水劈裂试验中工程 A、B 的性能衰减曲线界限明显，真空饱水马歇尔试验只在高孔隙率范围内能较好区分两项工程，浸水马歇尔试验中两项工程的性能衰减曲线无法区分。另外，浸水马歇尔试验与真空饱水马歇尔试验中出现了残留稳定度大于 100%的情况，在其他学者研究中也出现过类似情形。综合认为冻融劈裂试验和浸水劈裂试验对于不同种类的再生沥青混合料区分性良好，真空饱水马歇尔试验一般，浸水马歇尔试验最差；浸水马歇尔试验与真空饱水马歇尔试验可能出现残留稳定度大于 100%的现象，难以评价水稳定性。

由图 6、图 7 可以看出，3 种试验中水稳定性随着空隙率的增大而降低的趋势明显，但是不同试验的合格空隙率范围有所不同。根据公路沥青路面施工技术规范要求，浸水马歇尔试验和真空饱水马歇尔试

验中, 须残留稳定度大于或等于 85%, 冻融劈裂试验和浸水劈裂试验则要求强度比大于或等于 80%。所以, 浸水马歇尔试验和真空饱水马歇尔试验中, 合格空隙率范围为 4%~6%; 冻融劈裂试验和浸水劈裂试验中, 合格空隙率范围为 4%~7%。综合看来, 4 种试验与空隙率的相关性均较好, 但在空隙率合格范围方面存在差异。

3.2. 试验结果分析

1) 再生剂对旧沥青作用机理分析

沥青老化过程中, 组分由相对小分子质量组分逐渐向相对大分子质量组分转化, 具体表现为芳香分减少、胶质和沥青质增加, 导致沥青的黏度增大、流动性和感温性降低, 进而使沥青的针入度和延度降低、软化点升高, 使沥青与集料的粘附性大幅降低。再生剂主要成分为重矿物质油, 能够增加溶剂组分含量, 尤其是增加芳香分的含量, 能够在沥青质颗粒周围形成良好的溶剂化层, 具有稀释调和作用, 使沥青回复粘弹性。

但是在 RAP 料中加入再生剂时, RAP 料中的沥青仍然是粘附在集料上的, 导致 RAP 料与新沥青混合料拌和过程中形成了新集料 - 新沥青 - 旧沥青 - 旧集料的粘附形式。旧沥青虽然得到再生, 但是其性能仍比不上新沥青, 所以旧沥青与旧集料粘附力相对较弱, 新沥青与旧沥青界面较为薄弱, 在外界荷载作用下可能首先发生破坏。短时期内, 沥青混合料的水稳定性得到了巨大提升, 可是长期来看, 薄弱界面仍是水损害的隐患。所以在水损害评价时, 需要严格的路面环境模拟其长期水稳定性能。

2) 试验机理分析

沥青与集料间的粘结力是影响沥青混合料水稳定性的主要因素之一。冻融劈裂试验和浸水劈裂试验中, 试件由于沥青与集料间粘附力不足以抵抗横向拉应力作用而破坏; 然而在浸水马歇尔试验和真空饱水马歇尔试验中, 试件由于径向压力超过内摩阻力而破坏, 而内摩阻力与水稳定性并无直接关系。因此, 从试验机理上看, 冻融劈裂试验和浸水劈裂试验可以更好模拟水损害过程。

3) 试验模拟条件分析

沥青 - 集料粘附理论认为, 沥青混合料的水损坏的根本原因是水透过集料表面的沥青膜侵入沥青 - 集料界面后取而代之, 而集料天然的亲水性决定了沥青混合料水损坏的多发性和必然性。同时, 水在车轮荷载作用下, 在沥青混合料空隙中做反复抽吸运动产生强大的动水压力, 加速了水对沥青 - 集料界面的侵蚀, 一旦粘附薄弱的位置发生剥落, 动水压力将进一步侵入沥青 - 集料界面, 使水损害越来越严重。因此评价试验需要模拟沥青 - 集料界面破坏过程, 也要模拟动水压力的作用。

浸水马歇尔试验中, 水进入沥青混合料之后始终处于静止状态, 然而水对沥青 - 集料间粘附性的破坏过程是长期性的, 短时间内水损害作用不明显。当水的表面张力作用较大时, 将阻碍水分进一步渗入混合料空隙, 导致试验结果偏高, 甚至大于 100%。

冻融劈裂试验模拟环境中, 为了在低温冷冻之前使水充分进入空隙中, 增加了真空饱水过程, 增加了水的接触面积; 冻融循环过程能使集料表面的沥青膜在反复温度胀缩的作用下逐渐乳化, 同时混合料中水的体积不断变化提供了一定的孔隙水压力。而在浸水劈裂试验的模拟环境中, 密度最大的 4℃水可以自由流动, 冷热循环过程温度有利于水分对沥青膜的侵害; 另外, 与冻融劈裂试验两组试件都浸水不同, 浸水劈裂试验测试了一组干燥的试件, 得到的强度损失全部来源于水损坏, 针对性更加明显。

综合看来浸水马歇尔试验和真空饱水马歇尔试验条件较为宽松, 冻融劈裂试验和浸水劈裂试验通过冻融循环和冷热循环使水不断膨胀收缩, 加速了水损害过程, 模拟了路面长期性能, 但是冻融劈裂试验和浸水劈裂试验提供的孔隙水压力较小, 无法模拟野外现场巨大的动水压力。因此, 在冻融劈裂试验和浸水劈裂试验中加入模拟动水压力过程, 将进一步提高两者的评价效果。

4) 就地热再生技术施工因素分析。

与普通热拌沥青技术相比,就地热再生技术的施工质量更难控制。①路面加热温度不足会导致RAP料结团或者集料被打碎,路面加热温度过高又会促使沥青二次老化。②RAP料结团或者新沥青混合料离析,均会导致路面空隙率不达标。③路面加热会导致原路面中水分加热蒸发,导致部分处于基层中的水分上升面层,加速水损害。这些常见的施工问题将加速水损坏的发生,因此在室内试验中,需要更严格的模拟环境。

4. 结语

1) 就地热再生技术可大幅度提高路面水稳定性,能够满足规范要求,但是其长期水稳定性仍然存在隐患,评价试验中需要更加严格的试验条件模拟其长期水稳定性。

2) 浸水马歇尔试验和真空饱水马歇尔试验测试的力学指标与水稳定性相关性不高,试验模拟环境比较宽松,另外浸水马歇尔试验结果的区分度不够明显,所以两者不适宜作为就地热再生沥青混合料水稳定性评价方法。

3) 冻融劈裂试验和浸水劈裂试验测试的指标能够反映混合料水稳定性能,试验结果的区分度和与空隙率的相关程度均较好,较好地模拟野外现场水损坏条件,所以两者适于作为就地热再生沥青混合料水稳定性评价方法。

动水压力对路面水损害影响巨大,在冻融劈裂试验和浸水劈裂试验中加入动水压力模拟过程,将进一步提高两种方法的评价效果。

参考文献

- [1] 方杨,李善强,刘宇.厂拌热再生沥青混合料水稳定性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(5):961-964.
- [2] 张清平.沥青路面现场热再生技术研究[D]:[博士学位论文].长沙:长沙理工大学,2011.
- [3] 沈金安,李福普,陈景.高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 沙庆林.高速公路沥青路面早期破坏及预防[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [5] 王乐,梁乃兴,刘柳.湿热地区沥青混合料水稳定性评价方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(4):580-583.
- [6] 杨瑞华,许志鸿,李宇峙.沥青混合料水稳定性评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1486-1491.
- [7] 沈金安,李福普.JTG F40-2004公路沥青路面施工技术规范.北京:人民交通出版社,2004.
- [8] 孙立军.沥青路面结构行为学[M].上海:同济大学出版社,2013.
- [9] 王晓燕.国内外天然沥青路用性能比较研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2006.
- [10] 李福普,严二虎,等.JTG E20-2011公路工程沥青及沥青混合料试验规程.北京:人民交通出版社,2011.