

## 基于钻芯取样的厂拌热再生沥青路面性能试验研究\*

卜胤<sup>1,2</sup>, 祝谭雍<sup>2,3</sup>, 王斯倩<sup>1,2</sup>

(1.江西省天驰高速科技发展有限公司, 江西 南昌 330031; 2.江西省高速公路养护工程技术研究中心, 江西 南昌 330025; 3.江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025)

**摘要:**为跟踪检验福银(福州—银川)高速公路温沙段厂拌热再生沥青路面的路用性能,对厂拌热再生沥青路面及同期施工的普通热拌路面钻取芯样,对比分析再生沥青路面的材料组成和体积参数,结合局部三轴试验、低温劈裂试验、冻融劈裂强度试验、间接拉伸疲劳试验及半圆弯曲试验评价沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗疲劳和抗裂性能。结果表明,厂拌热再生沥青混合料的高温稳定性显著优于传统新拌沥青混合料,但低温抗裂性和水稳定性比新拌沥青混合料有所下降;30%RAP 掺量的厂拌热再生沥青混合料可获得比普通热拌沥青混合料更好的抗疲劳性能;沥青含量较大的厂拌热再生沥青混合料在常温条件下的抗断裂能力更强。

**关键词:**公路;厂拌热再生沥青;路用性能;钻取芯样

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2020)02-0072-06

厂拌热再生技术是江西省“十三五高速公路养护工作规划”中重点推广的关键养护技术。2016 年江西省首次在高速公路路面养护中应用厂拌热再生技术,试验段位于福银(福州—银川)高速公路温沙段上行 K471+110—K472+636 处,再生路面结构为中面层。2017 年,对该段下行 K483+919—K486+790 中面层进行厂拌热再生处治。目前,对厂拌热再生沥青混合料性能的分析大都依托室内成型的试件,缺少对厂拌热再生实体养护工程的跟踪检测和系统评价。该文对福银高速公路温沙段已通车的厂拌热再生路段钻取芯样,通过试验对厂拌热再生沥青混合料的路用性能进行分析。由于部分试验指标没有规范值供参考,对通车时间相同的由同一施工单位铺筑的普通热拌沥青混合料路用性能进行对比研究。

## 1 试件材料组成与体积参数

现场厂拌热再生结构层为 AC-20 中面层,采用与普通热拌沥青混合料相同的石灰岩新集料和 70# SBS 改性沥青,RA-25 再生剂含量为旧沥青质量的 3%,RAP 掺配比例为 30%。为减少施工质量和行车荷载对沥青混合料造成不均匀性影响,在 2 km 路段内的行车道上均匀钻取芯样(见图 1),对芯样进行切割保留中面层,采用表干法实测得到各

芯样的空隙率(见表 1),通过抽提筛分得到沥青混合料的级配和油石比(见表 2)。从表 1、表 2 来看,厂拌热再生沥青混合料与普通热拌沥青混合料空隙率相差较小,厂拌热再生沥青混合料与普通热拌沥青混合料的级配较接近,厂拌热再生沥青混合料的油石比较普通热拌沥青混合料大。



图 1 福银高速公路温沙段现场钻取的芯样

表 1 AC-20 沥青混合料的空隙率

| 芯样<br>编号 | 各种沥青混合料的空隙率/%   |                |                 |                |
|----------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
|          | 2016 年<br>厂拌热再生 | 2016 年<br>普通热拌 | 2017 年<br>厂拌热再生 | 2017 年<br>普通热拌 |
| 1        | 5.2             | 4.3            | 3.0             | 4.6            |
| 2        | 3.9             | 4.6            | 2.9             | 5.1            |
| 3        | 3.7             | 2.5            | 5.1             | 4.1            |
| 4        | 4.3             | 2.8            | 4.5             | 5.3            |
| 5        | 4.1             | 3.3            | 3.4             | 3.8            |

\* 基金项目: 江西省重点研发计划项目(20181BBG78002)

续表 1

| 芯样<br>编号 | 各种沥青混合料的空隙率/% |        |        |        |
|----------|---------------|--------|--------|--------|
|          | 2016 年        | 2016 年 | 2017 年 | 2017 年 |
|          | 厂拌热再生         | 普通热拌   | 厂拌热再生  | 普通热拌   |
| 6        | 3.7           | 4.4    | 3.3    | 4.4    |
| 7        | 3.7           | 4.5    | 4.2    | 4.1    |
| 8        | 3.9           | 4.8    | 6.2    | 4.9    |
| 9        | 3.5           | 4.9    | 5.5    | 5.2    |
| 10       | 3.9           | 3.1    | 4.9    | 4.7    |
| 11       | 4.3           | 3.9    | 4.3    | 4.5    |
| 12       | 3.8           | 3.5    | 4.7    | 3.6    |
| 13       | 5.3           | 4.1    | 4.1    | 5.0    |
| 14       | 3.7           | 3.7    | 4.0    | 4.4    |
| 15       | 4.4           | 4.1    | 4.6    | 4.9    |
| 平均值      | 4.1           | 3.9    | 4.3    | 4.6    |
| 变异系数     | 13.0          | 19.0   | 21.0   | 11.0   |

表 2 AC-20 沥青混合料的级配和油石比

| 筛孔尺<br>寸/mm | 各种混合料的通过率/% |          |           |          |
|-------------|-------------|----------|-----------|----------|
|             | 2016 年      | 2016 年   | 2017 年    | 2017 年   |
|             | 厂拌热<br>再生   | 普通<br>热拌 | 厂拌热<br>再生 | 普通<br>热拌 |
| 26.500      | 100.0       | 100.0    | 100.0     | 100.0    |
| 19.000      | 98.0        | 99.0     | 93.0      | 95.0     |
| 16.000      | 90.1        | 90.2     | 86.0      | 87.0     |
| 13.200      | 78.9        | 78.1     | 74.2      | 77.4     |
| 9.500       | 56.0        | 61.2     | 58.1      | 57.3     |
| 4.750       | 34.1        | 39.8     | 35.3      | 34.2     |
| 2.360       | 25.5        | 30.7     | 25.3      | 24.1     |
| 1.180       | 18.9        | 21.7     | 19.1      | 17.6     |
| 0.600       | 14.0        | 15.0     | 14.1      | 13.2     |
| 0.300       | 8.8         | 9.1      | 9.8       | 9.3      |
| 0.150       | 7.2         | 7.4      | 8.3       | 8.2      |
| 0.075       | 5.7         | 5.7      | 6.8       | 6.1      |
| 油石比/%       | 4.49        | 4.13     | 4.43      | 4.22     |

2 试验方法

沥青混合料路用性能主要包括高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和抗疲劳性能。评价高温稳定性的常用方法主要有车辙试验、马歇尔试验、三轴试验和环道试验等,由于现场钻取芯样尺寸限制,常用试验方法不适用,选用由东南大学黄晓明教授提出

的局部三轴试验进行高温稳定性评价。评价抗疲劳性能的常用试验方法主要有三点弯曲试验、四点小梁弯曲试验、间接拉伸疲劳试验和加速加载试验等,其中间接拉伸疲劳试验可很好地模拟沥青混合料的疲劳破坏过程,且易获取试验所需试件。低温抗裂性和水稳定性分别采用低温劈裂试验、冻融劈裂强度试验进行评价。此外,由于再生料中旧沥青性能难以完全恢复,厂拌热再生沥青混合料具有硬脆性,有必要对其断裂性能进行评价。SCB 半圆弯曲试验既能较好地模拟实际路面结构的受力状态,且在支点处摩擦力小,更适合评价混合料的抗拉强度。因此,采用 SCB 半圆弯曲试验评价沥青混合料的断裂性能。为减少施工质量对试验的影响,相同试验采用相近的压实度。

(1) 局部三轴试验。利用 UTM-130 kN 万能材料试验机对厂拌热再生和普通热拌沥青混合料芯样进行局部三轴试验,压头直径为 75 mm,试件尺寸为  $\phi 150\text{ mm}\times H75\text{ mm}$ (见图 2)。为避免偏心受力,两端横截面平行,高度允许误差为  $\pm 0.5\text{ mm}$ 。试验开始前施加 5 kPa 应力稳压 5 min,稳压完成后施加轴向应力 100 kPa,采用 0.1 s 加载、0.9 s 间歇的半正弦波荷载,分别在试验温度 40 和 50  $^{\circ}\text{C}$  下进行试验。为达到规定的试验温度,试件放在烘箱中至少加热 4 h,移入 UTM 环境箱中继续保温 1 h 后进行试验。

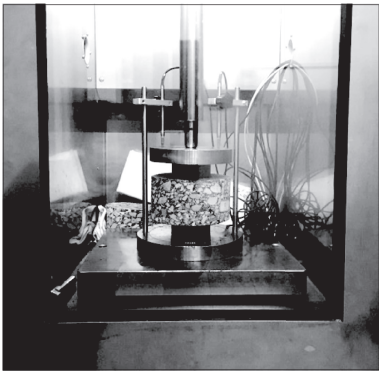


图 2 局部三轴试验

(2) 低温劈裂试验和冻融劈裂强度试验。按照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,分别对厂拌热再生和普通热拌沥青混合料进行低温劈裂试验、冻融劈裂强度试验。低温劈裂试验的试件尺寸为  $\phi 100\text{ mm}\times H40\text{ mm}$ ,加载速率为 1 mm/min,试验温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试件在低温环境箱中保温至少 6 h。冻融劈裂试验的试件尺寸符合马

歇尔试件要求,加载速率为 50 mm/min。

(3) 间接拉伸疲劳试验。采用 UTM-130 kN 动态伺服液压万能材料试验机进行间接拉伸疲劳试验(见图 3)。采用应力控制方式进行加载,加载频率为 10 Hz,加载波形为半正弦波。为加快试验速度,相邻波形之间无间歇时间。采用 0.4、0.6、0.8 3 个应力水平,试验温度为 15 ℃。试验前进行沥青混合料劈裂强度试验,得到最大破坏荷载,确定不同应力水平下荷载加载值。

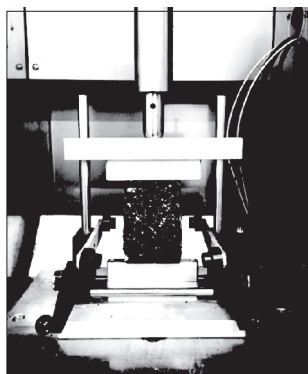


图 3 间接拉伸疲劳试验

(4) SCB 半圆弯曲试验。通过 SCB 半圆弯曲试验得到沥青混合料的断裂韧度  $J_C$ ,评价沥青混合料的抗裂性能。SCB 半圆弯曲试验利用 2 个底部支撑滚轴作为试件支点,减少试件与支点之间的摩擦,同时防止试验过程中支点对试件产生水平力,上部居中位置采用一个圆柱加载条对试件施加垂直荷载(见图 4)。将  $\phi 150 \text{ mm} \times H 80 \text{ mm}$  芯样和室内成型试件切割成 4 个直径为 150 mm、厚度为 40 mm 的半圆试件,采用超薄金刚石切割片在半圆试件的中部位置分别切割 10、20、30 mm 3 种不同切口深度的缝。试验采用万能材料试验机进行,选择国内外大部分研究者采用和推荐的试验参数,便于对数据结果进行分析和评价。底部两支点间距为  $0.8D$ ,即 120 mm,试验温度为 25 ℃,在水浴中恒温至少 1 h,加载速率为 0.5 mm/min。试验过程中采集荷载与位移,得到荷载一位移曲线,断裂能为开始加载至试件断裂时峰值荷载曲线下的面积。按下式计算沥青混合料的断裂韧度  $J_C$ :

$$J_C = -\left(\frac{1}{b}\right) \frac{dU}{da} \quad (1)$$

式中: $b$  为试件厚度(mm); $U$  为断裂能(kJ); $a$  为切口深度(mm)。

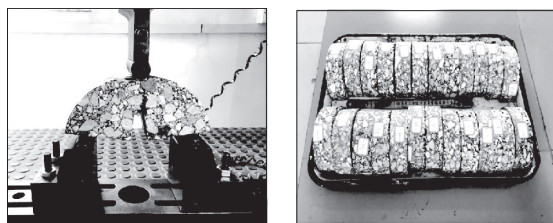


图 4 SCB 半圆弯曲试验

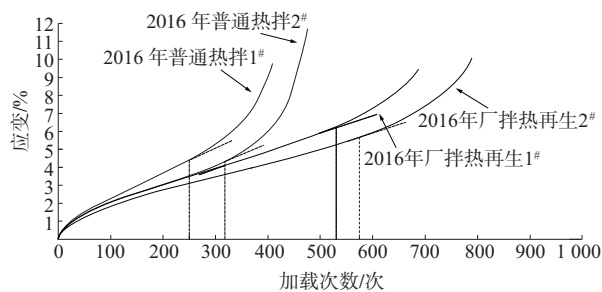
### 3 试验结果与分析

#### 3.1 高温稳定性

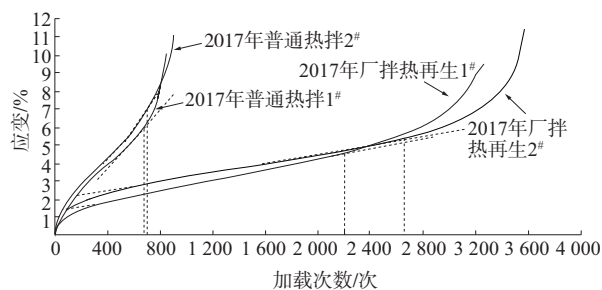
厂拌热再生与普通热拌沥青混合料局部三轴试验结果见表 3 和图 5。

表 3 AC-20 沥青混合料局部三轴试验结果

| 沥青混合料种类     | 试验温度 /℃ | 流动次数/次 |       | 稳定期斜率/% |      | 空隙率/% |
|-------------|---------|--------|-------|---------|------|-------|
|             |         | 试验值    | 平均值   | 试验值     | 平均值  |       |
| 2016 年厂拌热再生 | 50      | 575    | 553   | 0.78    | 0.87 | 4.3   |
|             |         | 530    |       | 0.95    |      | 4.1   |
| 2016 年普通热拌  | 50      | 250    | 285   | 1.40    | 1.23 | 4.1   |
|             |         | 320    |       | 1.05    |      | 3.9   |
| 2017 年厂拌热再生 | 40      | 2 200  | 2 865 | 0.16    | 0.15 | 4.3   |
|             |         | 2 660  |       | 0.14    |      | 4.5   |
| 2017 年普通热拌  | 40      | 680    | 690   | 0.68    | 0.74 | 4.7   |
|             |         | 700    |       | 0.79    |      | 4.5   |



(a) 试验温度 50 ℃



(b) 试验温度 40 ℃

图 5 AC-20 沥青混合料局部三轴试验永久变形曲线



由表 3 可知:2016 年施工的厂拌热再生沥青混合料的流动次数比 2016 年普通热拌沥青混合料大 94%,稳定期斜率比普通热拌沥青混合料小 41%;2017 年施工的厂拌热再生混合料的流动次数比 2017 年普通热拌沥青混合料大 3 倍,稳定期斜率只有普通热拌沥青混合料的 20%,高温性能差异更显著。厂拌热再生沥青混合料的高温稳定性比普通热拌沥青混合料的好,具有优异的抗高温永久变形能力。主要原因是旧沥青经过长期老化变硬,软化点和粘度增加,热再生混合料高温抗变形能力得到提高。

由图 5 可知:沥青混合料的高温变形大致分为迁移期、稳定期、破坏期 3 个阶段,表明局部三轴试验可很好地模拟沥青混合料的高温变形过程;普通热拌沥青混合料的永久变形速度比厂拌热再生沥青混合料更快,发生破坏时间更早。

3.2 低温抗裂性能

厂拌热再生与普通热拌沥青混合料低温劈裂试验结果见图 6。

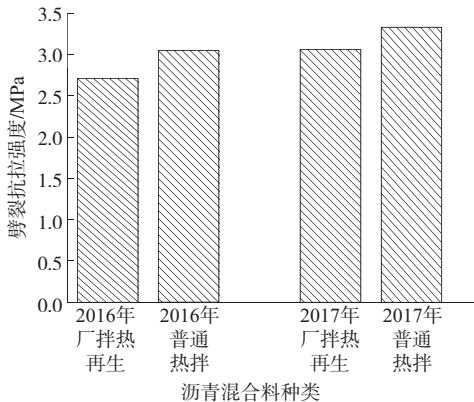


图 6 AC-20 沥青混合料低温劈裂试验结果

由图 6 可知:2016 年施工的 AC-20 厂拌热再生沥青混合料的劈裂抗拉强度比 2016 年普通热拌沥青混合料小 13%,2017 施工的 AC-20 厂拌热再生沥青混合料的劈裂抗拉强度比 2017 年普通热拌沥青混合料小 9%,表明厂拌热再生沥青混合料的低温抗裂性能比普通热拌沥青混合料差。这是由于旧沥青在长期使用过程中变脆,劲度增加,热再生沥青混合料在低温条件下产生的应变更小,更易发生开裂破坏。但 2016、2017 年施工的厂拌热再生沥青混合料的劈裂抗拉强度不低,分别能达到 2.71 和 3.06 MPa。

3.3 水稳定性

厂拌热再生与普通热拌沥青混合料冻融劈裂强度试验结果见表 4。

表 4 AC-20 沥青混合料冻融劈裂强度试验结果

| 沥青混合料种类     | 冻融前劈裂抗拉强度/MPa |      | 冻融后劈裂抗拉强度/MPa |      | 冻融劈裂抗拉强度比/% |
|-------------|---------------|------|---------------|------|-------------|
|             | 试验值           | 平均值  | 试验值           | 平均值  |             |
| 2016 年厂拌热再生 | 1.35          | 1.44 | 1.03          | 1.11 | 77          |
| 2016 年普通热拌  | 1.02          | 1.05 | 0.99          | 0.99 | 94          |
| 2017 年厂拌热再生 | 1.17          | 1.21 | 1.05          | 1.07 | 89          |
| 2017 年普通热拌  | 0.96          | 0.96 | 0.91          | 0.88 | 91          |

由表 4 可知:1) 2016 年施工的 AC-20 厂拌热再生沥青混合料的冻融劈裂抗拉强度比比 2016 年普通热拌沥青混合料小 22%,2017 施工的厂拌热再生沥青混合料的冻融劈裂抗拉强度比比 2017 年普通热拌沥青混合料小 2%,表明厂拌热再生沥青混合料的水稳定性比普通热拌沥青混合料差。沥青混合料的水稳定性主要与沥青的粘附性有关,由于旧沥青的老化和旧料加热温度不高,沥青与新集料之间的粘附性变差,经过水的软化作用更易产生剥落,降低了热再生沥青混合料的水稳定性。2) 冻融前后厂拌热再生沥青混合料的劈裂抗拉强度均比普通热拌沥青混合料的高,表明在短期水作用下,厂拌热再生沥青混合料比普通热拌沥青混合料具有更好的抗水损害能力,但长期水稳定性有所下降。

3.4 抗疲劳性能

分别将 AC-20 厂拌热再生和普通热拌沥青混合料的疲劳寿命与应力比进行单对数回归拟合,疲劳寿命方程见式(2),拟合结果见图 7。

$$\log N = k - n\sigma \tag{2}$$

式中: $N$  为疲劳寿命; $\sigma$  为应力水平;截距  $k$  表示相同应力水平下疲劳寿命的大小,斜率  $n$  表示应力水平对疲劳寿命的影响程度, $k$ 、 $n$  能反映沥青混合料的抗疲劳性能,其值越大,抗疲劳性能越好。

由图 7 可知:厂拌热再生沥青混合料的  $k$  值比普通热拌沥青混合料大, $n$  值比普通热拌沥青混合料小,表明相同应力水平下厂拌热再生沥青混合料的疲劳寿命更长,疲劳寿命随应力水平变化的敏感性更小。其原因,一是老化沥青的存在使厂拌热再生沥青混合料具有更大的抗拉强度;二是厂拌热再生沥青混合料的沥青含量比普通热拌沥青混合料

大,厂拌热再生沥青混合料具有一定的塑性抗变形破坏能力;三是沥青混合料的抗疲劳性能与试验方法有一定关系,间接拉伸疲劳试验方法和应力控制加载方式可能倾向于较大抗拉强度的沥青混合料具有更好的抗疲劳性能。

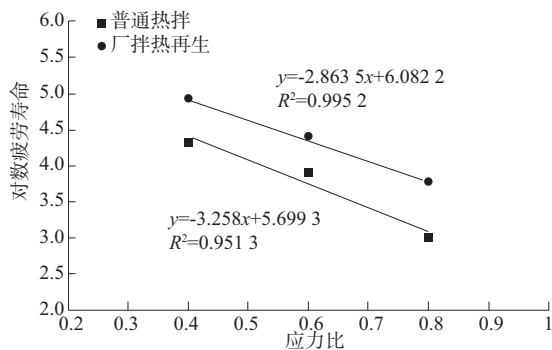


图7 AC-20 沥青混合料疲劳方程曲线

### 3.5 抗断裂性能

厂拌热再生与普通热拌沥青混合料 SCB 半圆弯曲试验结果见图8。

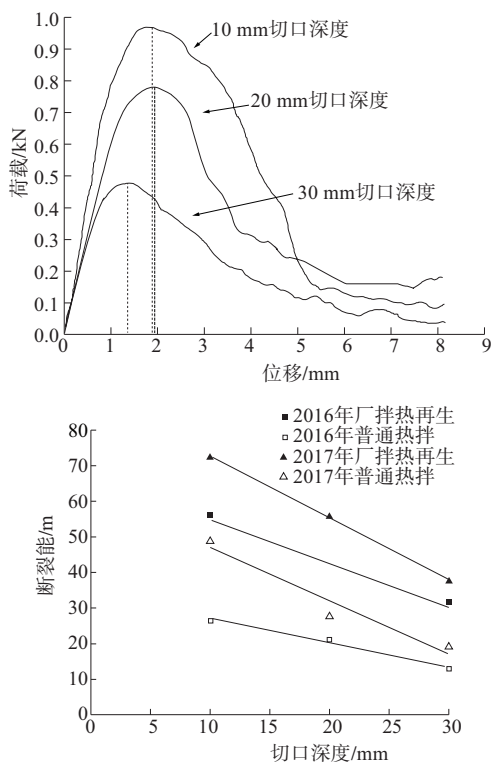


图8 AC-20 沥青混合料随切口深度变化的断裂能

由图8可知:1) 初期随着试件慢慢变形,荷载接近线性增大;达到峰值后,裂缝开始迅速扩展,由于沥青粘结力和集料内摩擦力的存在,应力表现为非线性缓慢下降。2) 不同切口深度的试件开裂时吸收的能量有明显差别,切口浅的试件吸收的能量

大于切口深的试件吸收的能量。断裂能与试件切口深度具有较高的相关性,根据断裂能与试件切口深度的拟合方程得到沥青混合料的断裂韧度见图9。

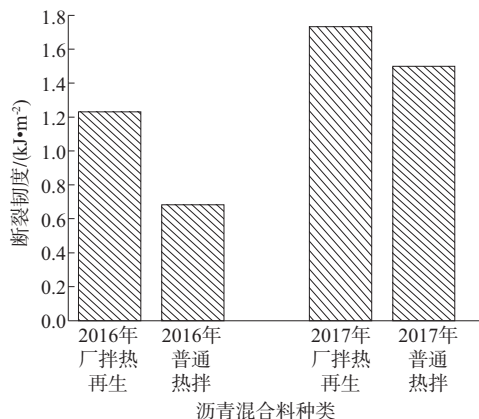


图9 AC-20 沥青混合料的断裂韧度

由图9可知:厂拌热再生沥青混合料的断裂能比普通热拌沥青混合料大,2016、2017年施工的厂拌热再生沥青混合料的断裂韧度分别比普通热拌沥青混合料大81%、15%。根据相关研究成果,断裂韧度大于0.65 kJ/m²时,沥青混合料具有良好的抗断裂能力。厂拌热再生沥青混合料的抗断裂能力强,是因为RAP中旧沥青的存在,再生沥青混合料沥青粘度更大,增加了沥青混合料的抗拉强度;施工时掺加新沥青的厂拌热再生沥青混合料的总沥青含量比普通热拌沥青混合料高,厂拌热再生沥青混合料具有良好的塑性。

## 4 结论

基于现场钻芯取样对厂拌热再生沥青路面性能进行试验研究,结论如下:1) 普通热拌沥青混合料的永久变形速度比厂拌热再生沥青混合料更快,发生破坏时间更早。由于旧沥青经过长期老化变硬,软化点和粘度增加,厂拌热再生沥青混合料的高温稳定性显著优于传统新拌沥青混合料。2) 厂拌热再生沥青混合料的低温抗裂性能比普通热拌沥青混合料差,这是由于旧沥青在长期使用过程中变脆,劲度增加,厂拌热再生沥青混合料在低温条件下产生的应变更小,更易发生开裂破坏。3) 厂拌热再生沥青混合料的水稳定性比普通热拌沥青混合料差,但仍具有较好的抗水损害能力。4) 30% RAP 掺量的厂拌热再生沥青混合料的疲劳寿命更长,疲劳寿命随应力水平变化的敏感性更强。原因在于老化沥青的存在和足够数量新沥青的添加使厂拌热再生沥青

混合料既具有更大的抗拉强度,又具有一定的塑性抗变形破坏能力。另外,间接拉伸疲劳试验方法和应力控制加载方式可能倾向于较大抗拉强度的沥青混合料具有更好的抗疲劳性能。5) 沥青混合料的断裂能与试件的切口深度具有较高的相关性。30% RAP 掺量的厂拌热再生沥青混合料的断裂能和断裂韧度比普通热拌沥青混合料大,具有更强的抗断裂能力。这是因为再生沥青混合料的沥青粘度更大,沥青含量更高,具有更大的抗拉强度和良好的塑性。

#### 参考文献:

- [1] 蔡全辉.废旧沥青混合料厂拌热再生应用问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [2] Rebholz F E, Nassar W, Buttlar W G. Detection of recycled asphalt pavement (RAP) in bituminous mixtures [R]. ITRC-FR-02-2, 2004.
- [3] Deng Zong-cai, She Xiang-jun, Liu Huan. Road performance of recycled concrete aggregate applied to asphalt pavement [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(11).
- [4] 薛彦卿, 黄晓明. 厂拌热再生沥青混合料力学性能试验

研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4).

- [5] 方杨, 黄建跃, 林志远, 等. 改性沥青制备厂拌热再生混合料的试验研究[J]. 公路, 2015(7).
- [6] Nejad F M, Abandansari H F. Evaluating the effects of using recycled asphalt pavements on fatigue properties of warm mix asphalt [J]. Periodica Polytechnica-Civil Engineering, 2017, 61(3).
- [7] Visintine B, Khosla N P, Tayebali A. Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance [J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(2).
- [8] Shihui Shen. Long-term field performance of warm mix asphalt technologies [R]. NCHRP Research Report 843, 2017.
- [9] 沈洪涛, 赵树青, 王晓平. 一种评价沥青混合料疲劳性能的简单试验方法[J]. 公路工程, 2016, 41(3).
- [10] Xiang Shu, Baoshan Huang, Dragon V. Evaluation of cracking resistance of recycled asphalt mixture using semi-circular bending test [A]. GeoShanghai International Conference 2010 [C]. 2010.

收稿日期: 2019-07-04

\*\*\*\*\*  
(上接第 71 页)

专业协同性达到 95%, 相比传统设计模式有大幅度提升, 解决了传统设计模式中各专业间协同性差的缺陷; 模型参数化得到显著提升, 项目可视化程度达到 98%。

另外, 利用 BIM 技术的动态关联特性, 减少了设计返工, 显著提高了设计效率及精度, 节省了设计时间和成本。

## 5 结语

(1) 通过 Civil 3D 软件对公路平面、纵断面、横断面等进行动态数据联结, 可实现公路工程协同设计和参数化设计, 解决传统设计模式中协同性差的缺陷, 避免大量返工及重复工作, 节约工程设计时间和成本。

(2) BIM 应用软件自带的道路标准装配与各项目横断面形式存在出入, 设计中可对自带标准装配参数进行自定义或利用部件编辑器自定义标准横断面样式, 以便后续相似断面项目使用, 提升 BIM 设计效率。

(3) 利用 Infravworks 搭建 BIM 协同设计平台,

直观地将 Civil 3D 创建的三维模型展示在实景谷歌地图中, 设计人员协同设计, 可及时发现并解决设计冲突, 准确、完善地表达设计意图, 给项目参建方带来项目完工后视觉上的先前体验。

(4) 与传统公路设计模式相比, 基于 BIM 技术的公路设计可显著提高各专业间的协同性及成果可视化程度, 设计更快速、合理、高效。

#### 参考文献:

- [1] Department of Transport and Main Roads (Queensland Government). Building information modeling (BIM) for transport and main roads [S]. 2017.
- [2] 孙建斌, 李永鑫, 王新单. BIM 技术在公路设计中的应用 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36(11).
- [3] 王丽园, 陈楚江, 余飞. 基于 BIM 的公路勘察设计与实践 [J]. 中外公路, 2016, 36(3).
- [4] 杨年顺. 基于 BIM 的公路勘察设计与实践探讨 [J]. 北方建筑, 2018(3).
- [5] 赵文忠. BIM 技术在曲港高速公路中的应用 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2017(7).
- [6] JTG D20-2017, 公路路线设计规范 [S].

收稿日期: 2019-06-28