

# 刚性路面下路基状况评价方法研究

李振存

(长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 通过路基病害现场开挖试验, 结合水泥路面设计理论, 对路基状况评价指标进行研究, 提出了路基状况评价、等级划分和路基竣工回弹模量计算方法, 并通过工程实例进行了验证。结果表明, 路基回弹模量的降低更易导致上部路面结构损坏; 以回弹模量为标准指标对路基状况进行等级划分, 能客观反映路基的真实状况; 采用路基土含水率上限值计算的路基竣工回弹模量更精确, 可有效指导运营公路路基养护。

**关键词:** 公路; 路基状况评价; 刚性路面; 回弹模量; 疲劳寿命

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0069-05

水泥砼路面在中国高等级公路路面结构中应用广泛, 但其抗弯拉强度较低, 要求路基及基层具有较高的均匀支撑性能。大量研究及工程实践表明, 由于路基稳定性不足, 在行车荷载及水温变化影响下路面出现不均匀沉陷是导致水泥砼路面损坏的根源。强度高且均匀性好的路基对减少水泥砼路面结构性病害、提高路面使用性能、延长公路使用寿命具有重要作用, 加强路基状况评价, 做好路基预防性养护意义重大。但受“重路面, 轻路基”观念的影响, 现阶段仍然从路基病害或针对单一土质进行研究, 并未考虑路面结构对路基的要求, 造成路基状况评价体系不尽完善。该文以路基回弹模量衰减引起水泥砼路面疲劳寿命衰减为依据, 对水泥砼路面结构下路基状况评价方法及分级标准进行研究。

## 1 路基状况评价指标的选取

### 1.1 基于设计理论的路基状况评价指标选取

现行水泥砼路面设计以标准轴载作用于矩形板纵向边缘中部产生的最大荷载应力作为控制指标, 以行车荷载和温度梯度综合作用产生的疲劳断裂作为设计的极限状态。其中标准轴载  $P_a$  在临界荷位处产生的荷载疲劳应力  $\sigma_{pr}$  按下式计算:

$$\sigma_{pr} = K_r K_f K_c \sigma_{ps} \quad (1)$$

式中:  $K_r$ 、 $K_f$ 、 $K_c$  为系数;  $\sigma_{ps}$  为标准轴载  $P_a$  在四边自由板的临界荷位处产生的荷载应力 (MPa), 按式 (2) 计算。

$$\sigma_{ps} = 1.47 \times 10^{-3} r^{0.70} h_c^{-2} P_a^{0.94} \quad (2)$$

式中:  $r$  为砼板的相对刚度半径 (m),  $r = 1.21 \times (D_c/E_c)^{1/3}$ ;  $D_c$  为砼面层的界面弯曲刚度 (MN·m),

$D_c = E_c h_c^3 / [12(1 - \mu_c^2)]$ ;  $E_c$ 、 $h_c$ 、 $\mu_c$  分别为砼面层的弯拉弹性模量 (MPa)、厚度 (m) 及泊松比;  $E_i$  为基层顶面当量回弹模量 (MPa);  $P_s$  为设计轴载的单轴重 (kN)。

从上述分析可看出, 在其他指标不变的条件下, 回弹模量是影响标准荷载  $P_a$  在临界荷位处产生的荷载疲劳应力的唯一指标。因此, 选取路基回弹模量作为路基状况评价指标。

### 1.2 基于现场试验的路基状况评价指标选取

在环境、荷载等因素的共同作用下, 路基状况不断劣化, 最终导致路基路面病害。因此, 可将典型路基路面病害段路基性能变化最明显的指标作为路基状况评价指标。基于此, 选取 6 处路基病害较典型的路段进行现场试验, 结果见表 1。同时测试路基填料的界限含水率和典型病害段路基填料的稠度, 分析路基干湿状况, 结果见表 2。

表 1 公路典型路基病害段现场试验结果

| 里程桩号      | 路基病害 | 压实度/<br>% | 含水率/<br>% | 回弹模量/<br>MPa |
|-----------|------|-----------|-----------|--------------|
| K1100+270 | 纵向裂缝 | 89.3      | 16.8      | 68.9         |
| K1114+108 | 板角断裂 | 83.2      | 17.9      | 22.4         |
| K1116+135 | 破碎板  | 83.2      | 33.4      | 28.3         |
| K1116+535 | 破碎板  | 86.3      | 33.3      | 44.8         |
| K1125+390 | 板角断裂 | 86.0      | 35.4      | 46.4         |
| K1140+560 | 纵向裂缝 | 87.1      | 39.7      | 72.4         |

从表 1、表 2 可看出: 压实度降低、含水率升高、回弹模量降低是导致路基状况变差的主要原因, 路基状况评价指标可选取路基压实度、含水率及回弹模量。但大量研究表明, 路基回弹模量与压实度及

表2 典型病害段路基干湿状态

| 里程桩号      | 液限/% | 塑限/% | 稠度   | 干湿状况 |
|-----------|------|------|------|------|
| K1100+270 | 31.8 | 15.0 | 0.36 | 过湿   |
| K1114+108 | 35.8 | 17.9 | 0.54 | 过湿   |
| K1116+135 | 46.4 | 13.0 | 0.58 | 过湿   |
| K1116+535 | 46.3 | 13.0 | 0.60 | 过湿   |
| K1125+390 | 47.9 | 12.3 | 0.63 | 过湿   |
| K1140+560 | 68.4 | 28.7 | 1.09 | 中湿   |

含水率(稠度)具有良好的相关性,鉴于此,选用路基回弹模量作为路基状况评价指标。

## 2 路基回弹模量与水泥砼路面疲劳寿命关系的计算分析

### 2.1 计算参数选取

选定 28 cm 水泥砼面层+18 cm 6%水泥稳定碎石基层+18 cm 4%水泥稳定碎石底基层的典型水泥砼路面结构进行计算分析,计算参数见表 3。

表3 计算参数

| 结构层 | 厚度/cm | 模量/MPa | 泊松比  |
|-----|-------|--------|------|
| 面层  | 28    | 31 000 | 0.15 |
| 基层  | 18    | 2 000  | 0.20 |
| 底基层 | 18    | 1 800  | 0.20 |
| 土基  | —     | 10~160 | 0.35 |

### 2.2 计算结果分析

按照式(2)计算临界荷位处的应力,分析  $\sigma_{ps}$  随路基回弹模量的变化情况,结果见表 4。

表4 水泥砼路面临界荷位应力 MPa

| 路基回弹模量 $E$ | 荷载应力 $\sigma_{ps}$ | 路基回弹模量 $E$ | 荷载应力 $\sigma_{ps}$ |
|------------|--------------------|------------|--------------------|
| 10         | 1.18               | 90         | 0.96               |
| 20         | 1.11               | 100        | 0.95               |
| 30         | 1.07               | 110        | 0.94               |
| 40         | 1.04               | 120        | 0.93               |
| 50         | 1.02               | 130        | 0.93               |
| 60         | 1.00               | 140        | 0.92               |
| 70         | 0.98               | 150        | 0.92               |
| 80         | 0.97               | 160        | 0.91               |

在荷载的长期作用下路面出现的疲劳破坏是水泥砼路面的主要病害,而路基模量变化可直接影响路面结构的疲劳寿命。根据室内小梁疲劳试验结果可得到水泥砼路面的疲劳方程:

$$\sigma_f/\sigma_s = \alpha - \beta \log N_f \quad (3)$$

式中:  $\sigma_f$  为控制应力;  $\sigma_s$  为材料强度;  $\alpha$ 、 $\beta$  为试验回归系数,参考浙江省交通设计院的疲劳试验结果,分别取 0.94、0.077;  $N_f$  为重复加载次数。

根据式(3)计算水泥砼路面在标准荷载作用下的疲劳寿命,结果见表 5。

表5 水泥砼路面的疲劳寿命

| 路基回弹模量/MPa | 疲劳寿命/ $(\times 10^9)$ 次 | 路基回弹模量/MPa | 疲劳寿命/ $(\times 10^9)$ 次 |
|------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 10         | 1.36                    | 90         | 5.15                    |
| 20         | 2.14                    | 100        | 5.45                    |
| 30         | 2.74                    | 110        | 5.74                    |
| 40         | 3.26                    | 120        | 6.01                    |
| 50         | 3.71                    | 130        | 6.27                    |
| 60         | 4.11                    | 140        | 6.51                    |
| 70         | 4.48                    | 150        | 6.75                    |
| 80         | 4.83                    | 160        | 6.98                    |

根据表 4、表 5,不同路基回弹模量下水泥砼路面疲劳寿命与临界荷位应力的变化见图 1。

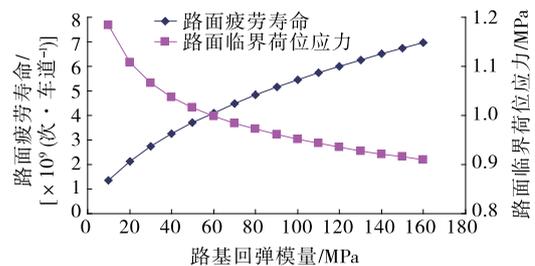


图1 水泥砼路面疲劳寿命及临界荷位应力与路基回弹模量的关系

从表 4、表 5、图 1 可看出:1) 随路基回弹模量的增大,水泥砼路面临界荷位应力逐渐减小,前期衰减速度较快,后期衰减速度较慢;疲劳寿命逐渐增加,前期增长速度较快,后期增长速度较慢。2) 路基回弹模量对路面疲劳寿命的影响比临界荷位应力更大,路基回弹模量由 10 MPa 增加为 160 MPa 时,临界荷位应力降低 30%,而疲劳寿命增加 4.12 倍。3) 路基回弹模量对路面结构疲劳寿命的影响很大,若要求路面结构能达到预期设计轴次,路基需具有良好的状况。

## 3 路基状况评价方法

在路基回弹模量对路面结构疲劳寿命影响分析的基础上,将路基回弹模量降低幅度作为路基状况评价标准。路基竣工时,路基土的压实度和含水率均处于最优状态,路基回弹模量达到最大。在运营

过程中,回弹模量逐渐衰减。因此,以竣工回弹模量为衰减起点,疲劳寿命衰减以路基竣工回弹模量所对应疲劳寿命为初始衰减过程。路面结构疲劳寿命衰减率  $N_e/N_{e_j}$  随路基回弹模量衰减率  $E/E_j$  的变化见图 2。

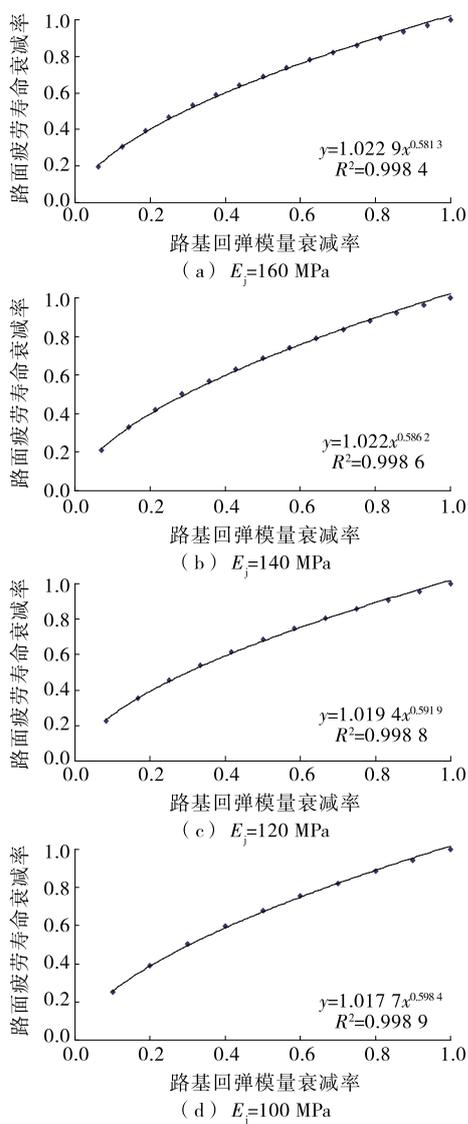


图 2 不同路基竣工回弹模量  $E_j$  时的疲劳寿命衰减率

由图 2 可知:路基回弹模量与路面疲劳寿命之间呈现良好的乘幂关系,与路基竣工后回弹模量关系不大。路基竣工回弹模量为 160、140、120、100 MPa 时,路面疲劳寿命衰减率与路基回弹模量衰减率的回归公式分别为:

$$Y=1.0229x^{0.5813} \quad (4)$$

$$Y=1.0224x^{0.5862} \quad (5)$$

$$Y=1.0194x^{0.5919} \quad (6)$$

$$Y=1.0177x^{0.5984} \quad (7)$$

根据式(4)~(7),得到如下统一回归公式:

$$Y=1.0205x^{0.5894} \quad (8)$$

对式(8)求导,得两者的衰变速率计算公式:

$$y=0.6015x^{-0.4106} \quad (9)$$

按式(9)计算水泥砼路面疲劳寿命衰减率,结果见表 6。

表 6 水泥砼路面疲劳寿命衰减率

| 回弹模量比/% | 疲劳寿命衰减率 | 回弹模量比/% | 疲劳寿命衰减率 |
|---------|---------|---------|---------|
| 10      | 1.55    | 60      | 0.74    |
| 20      | 1.16    | 70      | 0.70    |
| 30      | 0.99    | 80      | 0.66    |
| 40      | 0.88    | 90      | 0.63    |
| 50      | 0.80    | 100     | 0.60    |

由表 6 可知:随路基回弹模量比的逐渐增大,路面疲劳寿命的衰减率逐渐降低,最终趋于一个定值。回弹模量比小于 50% 时,路面疲劳寿命衰减较快;回弹模量比为 50%~80% 时,路面疲劳寿命衰减较慢;回弹模量比超过 80% 时,路面疲劳寿命衰减很慢。据此可将路基状况划分为优良、合格及不合格 3 个等级(见表 7)。

表 7 路基状况等级划分标准

| 路基回弹模量 $E$               | 路基状况等级 |
|--------------------------|--------|
| $E \geq 0.8E_j$          | 优良     |
| $0.8E_j > E \geq 0.5E_j$ | 合格     |
| $E < 0.5E_j$             | 不合格    |

由表 7 可知:路基实测回弹模量不小于竣工回弹模量的 80% 时,路基状况良好;路基实测回弹模量小于竣工回弹模量的 50% 时,路基处于不合格状态,即路基不能满足路面结构的需要。

#### 4 路基回弹模量确定方法

路基回弹模量对路面结构力学性能及疲劳寿命有很大影响,要科学、合理地评价路基状况,必须获得准确的路基回弹模量。

##### 4.1 基于室内试验的路基回弹模量确定方法

鉴于现场测试受外界因素影响较大,测试结果误差较大,通过室内试验确定路基回弹模量。

路基回弹模量与压实度及稠度有良好的相关性,《公路沥青路面设计规范》给出了具有代表性的中国各地区土类的土基回弹模量  $E_0$  与压实度  $K$  和稠度  $\omega_c$  的关系式(见表 8)。

表8 土基回弹模量与压实度及稠度的关系

| 土料来源   | 关系式                                      | $R^2$ |
|--------|--|-------|
| 广西红黏土  | $E_0 = 79.08K^{1.989} \omega_c^{1.748}$  | 0.77  |
| 黑龙江黏质土 | $E_0 = 48.84K^{3.218} \omega_c^{1.47}$   | 0.68  |
| 山西黄土   | $E_0 = 52K^{0.61} \omega_c^{1.629}$      | 0.53  |
| 陕西黄土   | $E_0 = 64K^{3.88} \omega_c^{2.23}$       | 0.96  |
| 江苏黏质土  | $E_0 = 28.07K^{1.917} \omega_c^{1.932}$  | 0.88  |
| 内蒙古黏质土 | $E_0 = 39K^{2.244} \omega_c^{1.905}$     | 0.61  |
| 河南黏质土  | $E_0 = 66.887K^{4.977} \omega_c^{0.195}$ | 0.97  |
| 河北砂性土  | $E_0 = 49.67K^{0.254} \omega_c^{0.986}$  | 0.65  |
| 陕西黏质土  | $E_0 = 74K^{1.17} \omega_c^{2.56}$       | 0.92  |

根据表8,经过修正,得到路基回弹模量:

$$E = \lambda ZAK^M \omega_c^N / B \quad (10)$$

式中: $\lambda$ 为试筒尺寸修正系数,采用直径为10 cm承载板时取0.59,采用直径为5 cm承载板时取0.78; $Z$ 为考虑保证率的折减系数,高速公路、一级公路取0.66,二、三级公路取0.59,四级公路取0.52; $A$ 、 $M$ 、 $N$ 为标定参数,由室内试验获取; $B$ 为综合影响系数,其取值见表9。

表9 综合影响系数

| 土基稠度值 $\omega_c$                          | 综合影响系数 |
|---|--------|
| $\omega_c \geq \omega_{c1}$               | 1.3    |
| $\omega_{c1} > \omega_c \geq \omega_{c2}$ | 1.6    |
| $\omega_c < \omega_{c2}$                  | 1.9    |

#### 4.2 基于击实曲线的路基竣工回弹模量确定方法

根据《公路路面基层施工技术规范》,路基顶面回弹弯沉值 $l_0$ 按下式计算:

$$l_0 = 930.8E_0^{-0.938} \quad (11)$$

根据式(11)得到路基顶面回弹模量计算公式:

$$E_0 = 10^{4.23 - 1.066l_0} \quad (12)$$

但按式(12)计算获得的路基回弹模量较小,与实际情况相差较大,造成路基状况评价结果不够准确。一般情况下,路基土干密度随含水率的增大先增加后降低(见图6)。实际施工中,要求路基不得低于规定压实度 $K$ ,路基土干密度不得小于 $K\rho_{dmax}$ ,路基含水率处于界限含水率之间。在压实度不变时,路基回弹模量与含水率有较大关系,其随含水率的减小而增大,路基土上限含水率 $\omega_{max}$ 对应的路基回弹模量即为满足路基要求的最小回弹模量。因此,可按式(10)计算路基竣工回弹模量。

## 5 实例分析

末宜(未阳—宜章)高速公路于2013年实施大修

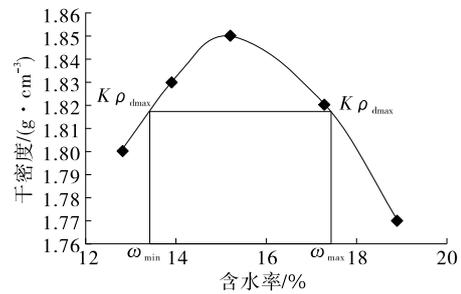


图3 路基土干密度随含水率的变化

改造,为确保大修改造质量,对路基强度不足路段进行加固处理。下面以其中某路段路基加固为对象进行分析。

### 5.1 路基填料特性

对该路段进行现场取样,并对土样特性进行试验分析,结果见表10。

表10 路基填料特性

| 项目                          | 试验结果 |
|-----------------------------|------|
| 最佳含水率/%                     | 15.2 |
| 上限含水率/%                     | 18.7 |
| 最大干密度/( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 1.85 |
| 液限/%                        | 36.8 |
| 塑限/%                        | 22.7 |

### 5.2 路基回弹模量计算公式确定

回弹模量试验使用50 mm承载板,分别测定试件的压实度和含水率,按下式计算路基回弹模量:

$$E = 93.1K^{0.615} \omega_c^{3.857} \quad (13)$$

### 5.3 路基竣工回弹模量计算

路基竣工时压实度取96%,含水率为上限含水率, $\lambda$ 为0.78, $Z$ 为0.66, $B$ 为1.3,计算得到路基竣工回弹模量 $E_j$ 为94.2 MPa。

### 5.4 路基回弹模量测试

采用无损检测方法对K1715+000—200段行车道进行路基回弹模量测试及评价,结果见表11。

由表11可知:该路段路基回弹模量较低,路基状况等级为合格和不合格两种,说明路基强度随着时间的变化在不断降低。根据现场路面病害调研结果,该路段路面破坏十分严重,与其路基模量普遍较低存在较大关系,也反映出上述评价方法较符合实际情况。

## 6 结论

(1) 路基压实度降低、含水率升高导致路基刚度降低是路基路面损坏的根源,可采用路基回弹模

表 11 路基回弹模量测试及评价结果

| 桩号        | 路基实测回弹模量/MPa | 路基状况等级 |
|-----------|--------------|--------|
| K1715+000 | 38.7         | 不合格    |
| K1715+020 | 40.6         | 不合格    |
| K1715+040 | 48.8         | 合格     |
| K1715+060 | 53.6         | 合格     |
| K1715+080 | 40.9         | 不合格    |
| K1715+100 | 37.7         | 不合格    |
| K1715+120 | 54.4         | 合格     |
| K1715+140 | 57.7         | 合格     |
| K1715+160 | 42.2         | 不合格    |
| K1715+180 | 39.9         | 不合格    |
| K1715+200 | 50.8         | 合格     |

量作为路基状况评价指标。

(2) 标准轴载作用下,随着路基回弹模量的增大,水泥砼路面临界荷位应力逐渐减小,疲劳寿命逐渐增加,路基回弹模量对路面疲劳寿命的影响比临界荷位应力大;随着路基回弹模量比的增大,路面疲劳寿命衰减速率逐渐降低,最终趋于一个定值。

(3) 可依据水泥砼路面疲劳寿命随路基回弹模量衰减的速度确定路基状况评价方法,并将路基状况划分为优良、合格及不合格 3 个等级。

(4) 基于压实度及含水率对路基回弹模量的影响,提出了路基回弹模量计算方法,并依据路基土击实曲线,提出了采用上限含水率为计算指标的路基竣工回弹模量计算方法。

(5) 对末宜高速公路大修改造工程 K1715+000—200 段水泥路面路基回弹模量进行测试,并对路基状况进行评价,评价结果与现场情况吻合较好,

证明了文中评价方法的科学性与合理性。

#### 参考文献:

- [1] 邓学钧.路基路面工程[M].第三版.北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 林小平,凌建明,周亮.土基回弹模量对刚性路面疲劳寿命的影响分析[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(2).
- [3] 郭鑫.已知位移场条件下不均匀支承水泥混凝土路面板内力分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 刘涛.地基不均匀支承水泥混凝土路面板的荷载应力分析[D].西安:长安大学,2009.
- [5] 唐学军,苏卫国.路基刚度对冲击压实旧混凝土路面力学行为的影响分析[J].土木工程学报,2006,39(4).
- [6] 王小艳.地基不均匀变形对水泥混凝土路面结构的影响研究[D].西安:长安大学,2011.
- [7] 张杨.不同支撑条件下水泥混凝土路面板的断裂破坏机理研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [8] 李振存.在役高速公路路基性能评价及快速检测技术[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [9] 邓荣彦.路基回弹模量衰减对路面结构性能的影响研究[J].公路与汽运,2015(4).
- [10] JTG D40—2011,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [11] 覃绮平.土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D].西安:长安大学,2005.
- [12] 王选仓,马玉兰,张磊.路基顶面回弹弯沉验收标准的修正[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(6).

收稿日期:2018-05-08

(上接第 53 页)

- [2] 林翔,张金喜,苗英豪,等.再生沥青混合料配合比设计影响因素试验研究[J].公路交通科技,2011,28(2).
- [3] 侯睿,黄晓明.新旧沥青再生调和规律研究[J].石油沥青,2006,20(4).
- [4] 侯月军,周志刚,高及阳.不同再生剂对旧沥青性能的改善[J].交通科学与工程,2009,25(3).
- [5] Lin P S, Chang C W, Wu T L. The applicability of estimated equations of recycling agents on the viscosity variety of aged asphalt binders[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723.
- [6] 甘新立,郑南翔,纪小平.老化 SBS 改性沥青再生性能预估分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2014,35(6).
- [7] JTG F41—2008,公路沥青路面再生技术规范[S].

- [8] 马登成,任化杰,马尉尚.沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J].公路交通科技,2014,31(8).
- [9] 陈卫东,贾增荣,张勇.高原寒冷地区就地热再生沥青混合料耐久性试验研究[J].公路交通科技,2017,34(2).
- [10] 董玉凯.RAP 热再生沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2017(3).
- [11] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [12] 夏永胜.厂拌热再生沥青混合料耐久性能试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2016.
- [13] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

收稿日期:2018-05-14