

# 半柔性混凝土路面水泥浆料的研发与性能评价

易军艳<sup>1</sup>,毛青洋<sup>1</sup>,王东升<sup>1</sup>,于健<sup>2</sup>,南雪峰<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090;2. 辽宁新发展公路科技养护有限公司,辽宁 沈阳 130012)

**摘要** 目的 研发半柔性混凝土路面水泥浆的配合比并对其性能进行评价. 方法 鉴于影响水泥浆性能的因素众多,因此采用均匀设计法作为试验方法,进行不同配合比的水泥浆的性能测试试验,并且和目前商用的水泥浆的流动度和抗压抗折强度进行对比试验. 采用统计软件对水泥浆的流动度和抗压抗折强度试验结果进行回归分析. 结果 商用的水泥浆流动度在36.0 s,不符合目标值的要求,而研发的水泥浆料具有更好的流动性,满足施工使用的要求. 提出了最佳水灰质量比0.41,相较于商用的0.34的水灰质量比,0.41的水灰质量比能够减少水泥用量,从而降低半柔性混凝土路面的造价成本. 结论 研发的水泥浆与商用的半柔性混凝土路面材料性能对比具有更高的流动性和比较合适的抗折强度和抗压强度.

**关键词** 水泥浆;半柔性;流动度;水灰质量比;灌浆料;非线性拟合

中图分类号 TU528;U414

文献标志码 A

## Development and Performance Evaluation of Cement Slurry for Semi-flexible Pavement

YI Junyan<sup>1</sup>, MAO Qingyang<sup>1</sup>, WANG Dongsheng<sup>1</sup>, YU Jian<sup>2</sup>, NAN Xuefeng<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 2. Liaoning New Development Highway Science and Technology Maintenance Co. Ltd., Shenyang, China, 130012)

**Abstract:** The proportion of cement slurry for semi-flexible concrete pavement is researched and the corresponding performance evaluation is carried out. In view of the many factors affecting the performance of cement slurry, the uniform design method is used as the test method, and the performance test of cement slurry with different mixing ratios is carried out, moreover, the fluidity and compressive flexural strength of the currently commercial cement slurry are compared. The statistical analysis was used to analyze the fluidity and compressive flexural strength test results of cement slurry. The commercial cement slurry has a fluidity of 36.0s, which does not meet the target value.

收稿日期:2018-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(JJ0190598);吉林省交通运输科技项目(2018ZDGC-6);吉林省交通运输科技计划项目(2017ZDGC-2-1)

作者简介:易军艳(1983—),男,副教授,博士,主要从事路面材料性能方面研究.

The cement slurry developed has better fluidity and basically meets the requirements of construction use. The optimum water-cement mass ratio of 0.41 is proposed. Compared with the commercial water-cement mass ratio of 0.34, the water-cement mass ratio of 0.41 can reduce the amount of cement, thus reducing the cost of semi-flexible concrete pavement. By comparing with the properties of commercial semi-flexible concrete pavement materials, it can be concluded that the cement slurry developed has higher fluidity and more suitable flexural strength and compressive strength.

**Key words:** cement slurry; semi-flexible; fluidity; water-cement mass ratio; grouting materials; non-linear fitting

半柔性混凝土路面 (Semi-Flexible Pavement, SFP) 是指在空隙率为 20% ~ 30% 大孔隙的基体沥青混合料上灌入以水泥为主要成分的特殊浆体而形成的路面<sup>[1-2]</sup>. 此路面结合了沥青路面和水泥路面的优点, 具有优良的高温稳定性、耐疲劳性及水稳定性<sup>[3-4]</sup>, 目前主要应用于市政道路交叉路口、重载路段, 未来在重交通路面上有着广泛的应用前景<sup>[5-6]</sup>. 水泥浆体与基体沥青混合料作为半柔性混凝土路面的组成部分, 其沥青混合料骨架、灰浆、集料类型对于半柔性混凝土的路用性能起着决定性的作用<sup>[7-9]</sup>, 并且水泥浆体的配合比设计对半柔性混凝土的实际应用非常关键. 李春江等<sup>[10-14]</sup>研究了水泥浆和水泥砂浆这两种典型注浆材料的组成及水化过程, 比较流动性、强度和干燥收缩性能, 发现水泥浆更加适合作为灌浆料. 通过加入不同类型的添加剂, 对高性能水泥浆的组成设计和性能验证进行对比分析, 由此得到水泥净浆, 并且在灌入基体沥青后, 表现出了良好的工作性能<sup>[15-18]</sup>. 水泥浆的性能主要取决于其配合比设计及添加剂掺量. 因此笔者通过设计水泥浆的配合比, 并且用流动度、抗压强度和抗折强度作为评价指标, 以此来得出水泥浆料的最佳配合比.

1 试 验

1.1 水泥浆原材料及配合比设计

水泥: 亚泰天鹅牌 PO42.5 号普通硅酸盐水泥, 28 d 抗压强度 47.5 MPa. 外加剂: 聚羧

酸减水剂、UEA 膨胀剂、磷酸三丁酯类消泡剂、S105 矿渣粉、甲酸钙 98% 型早强剂、松香树脂类引气剂.

在水泥浆的配合比设计过程中, 主要考虑了水灰质量比、减水剂掺量、矿渣粉掺量 3 个影响因素. 通过《均匀设计与均匀设计表》, 采用 3 因素 6 水平的均匀设计试验方案, 其中胶凝材料水泥和矿渣粉质量为单位 1, 其余材料按质量比确定 (见表 1).

表 1 水泥浆影响因素水平表

Table 1 Table of influence factors of cement slurry

水灰质量比	减水剂掺量/%	矿渣粉掺量/%
0.35	1.5	10
0.35	2.0	13
0.45	2.5	16
0.45	3.0	19
0.55	3.5	22
0.55	4.0	25

笔者采用了吴国雄<sup>[19]</sup>的研究结果, 其水泥浆性能目标值如表 2 所示.

表 2 水泥浆性能目标值

Table 2 Target value of cement slurry performance

流动度/s	7d 抗折强度/MPa	7d 抗压强度/MPa
10 ~ 14	>4.0	10 ~ 30

水灰质量比选取了 0.35、0.45、0.55 这 3 个因素水平, 减水剂掺量选择了从 1.5% ~ 4.0% 共 6 个因素水平, 矿渣粉掺量选取了从 10% ~ 25% 共 6 个因素水平. 因此通过水泥浆影响因素水平表设计了 6 组不同配合比的水泥浆料, 其各材料的质量比如表 3 所示.

表 3 半柔性混凝土路面水泥浆配合比

Table 3 Mix ratio of cement slurry for semi-flexible pavement

组别	质量比				减水剂/%	膨胀剂/%	早强剂/%	消泡剂/%	引气剂/%
	胶凝材料	水泥	矿渣粉	水					
第 1 组	1	0.84	0.16	0.35	2.0	6.0	1.0	0.4	0.02
第 2 组	1	0.75	0.25	0.35	3.0	6.0	1.0	0.4	0.02
第 3 组	1	0.87	0.13	0.45	4.0	6.0	1.0	0.4	0.02
第 4 组	1	0.78	0.22	0.45	1.5	6.0	1.0	0.4	0.02
第 5 组	1	0.90	0.10	0.55	2.5	6.0	1.0	0.4	0.02
第 6 组	1	0.81	0.19	0.55	3.5	6.0	1.0	0.4	0.02

1.2 试验方案

(1) 浆料制备

根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005), 将表 3 的各组水泥浆配比材料加入拌合锅内搅拌, 得到水泥浆。

(2) 流动度测试

按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(T0508—2005) 水泥浆体流动度测定方法, 测试 1 725 mL 水泥浆的流动度, 试验仪器如图 1 所示。首先用水润湿漏斗内壁, 将拌合均匀的水泥浆液倒入漏斗中, 打开阀门将浆液漏出后关闭阀门, 1 725 mL 浆液漏出的时间即为流动度, 精确至 0.1 s。

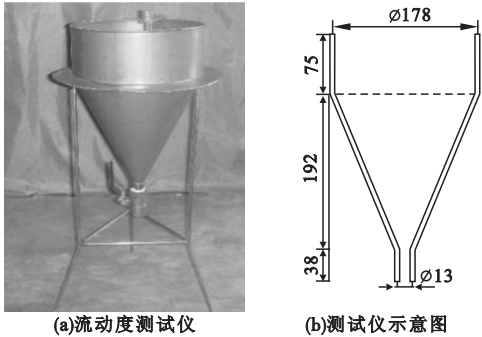


图 1 流动度测试仪及示意图

Fig. 1 Fluidity tester and schematic diagram

(3) 试件养护及强度测试

将浆液倒入 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试模中, 将试模放入温度 (20 ± 3) °C、相对湿度大于 90% 的养护箱中进行养护; (24 ± 3) h 后取出脱模, 然后将试件置于温度 (20 ± 1) °C 的水池中养护, 养护到一定龄期后取出

试件, 测定其抗折强度、抗压强度。

2 试验结果及分析

2.1 抗折强度与影响因素之间的关联

通过试验可得不同配合比的抗折强度 (见图 2), 其中对照组为目前商用的半柔性混凝土路面水泥浆料。可以明显看出第 1 组、第 2 组及第 4 组的水泥浆料的抗折强度优于目前商用的水泥浆料。

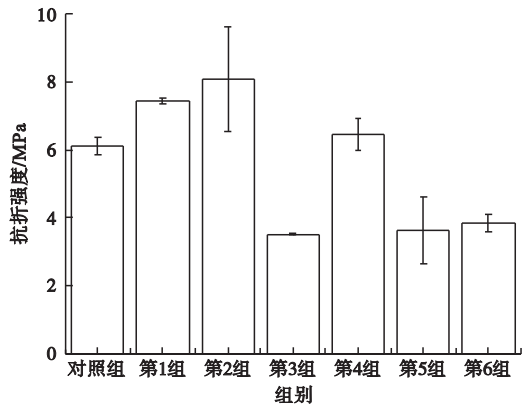


图 2 不同配合比下水泥浆的 7d 抗折强度

Fig. 2 7d Flexural strength of cement slurry with different mixture ratio

混凝土的抗折强度表达式为

$$f_t = -1.009\,7 + 0.359\,5\,f_{fe} + 1.568\,\frac{C}{W}. \quad (1)$$

式中:  $f_t$  为混凝土的弯拉强度;  $f_{fe}$  为水泥的实测弯拉强度;  $C/W$  为灰水质量比。

设减水剂掺量为  $X_1$ , 矿粉掺量为  $X_2$ , 考虑到水灰质量比是影响强度的主要因素, 因此假定抗折强度与各影响因素存在线性关

系,假定的拟合式为

$$f_{7,fe} = a + b \frac{C}{W} + cX_1 + dX_2. \tag{2}$$

式中: $f_{7,fe}$ 为水泥浆的7d抗折强度; $a, b, c, d$ 为影响系数.

对多因素的拟合分析可以得到其关系为

$$f_{7,fe} = 1.258 + 2.748 \frac{C}{W} - 0.674X_1 + 0.133X_2. \tag{3}$$

根据拟合式(3)得到的拟合值与测试值并进行相关性分析,不同配合比下水泥浆的抗折强度的试验与回归值如图3所示, $R^2 = 0.983$ ,说明该拟合式可信度较高.

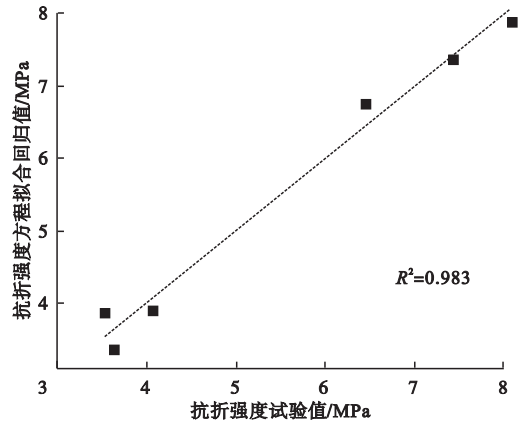


图3 不同配合比下水泥浆的7d抗折强度的试验值与回归值

Fig.3 Test and regression values for the 7d flexural strength of the cement slurry with different mixture ratio

2.2 抗折强度与龄期之间的关联

不同配合比下水泥浆各龄期的抗折强度如图4所示.由图4可知,目前商用的水泥浆强度随着时间的推移不断增加,并且其90 d之后的强度高于设计配合比浆料的强度,但实际运营中并不要求如此高的抗折强度,因此第4组配合比的水泥浆是满足使用要求的.除此以外,可以明显看出第1组及第2组配合比设计的水灰质量比过小,导致水泥试件干缩严重,使得其后期强度极速下降;而第5组和第6组试件则因为水灰质量比过大,

强度较低.

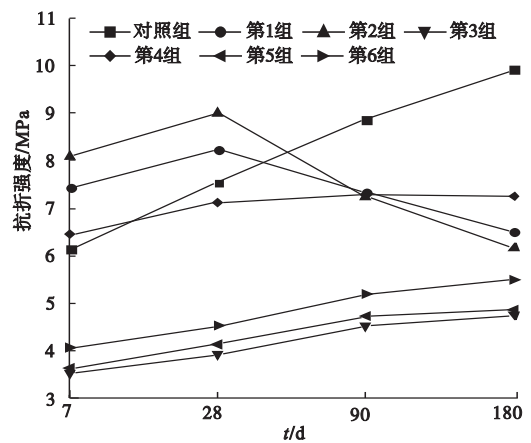


图4 不同配合比下水泥浆各龄期的抗折强度  
Fig.4 Flexural strength of cement slurry under different mixing ratios at various ages

2.3 抗压强度与影响因素之间的关联

通过试验可得不同配合比的抗压强度(见图5),可以明显看出第1组及第4组水泥浆料的抗压强度优于目前商用水泥浆料.

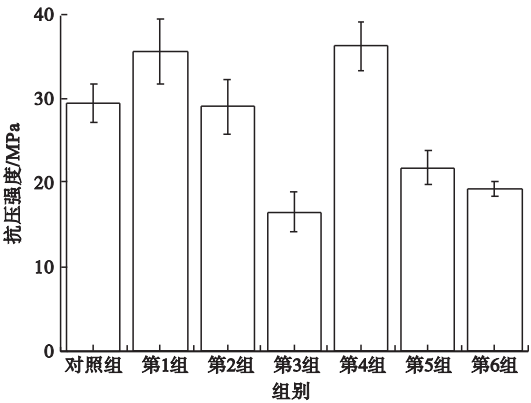


图5 不同配合比下水泥浆的7d抗压强度  
Fig.5 7d Compressive strength of cement slurry with different mixture ratio

混凝土的抗压强度表达式为

$$f_{cu} = a_a f_{ce} \left( \frac{C}{W} - a_b \right). \tag{4}$$

式中: $f_{cu}$ 为混凝土28d龄期抗压强度; $f_{ce}$ 为水泥28d抗压强度实测值; $a_a, a_b$ 为经验系数.

考虑到水灰质量比是影响强度的主要因素,因此假定抗压强度与各影响因素存在线性关系,假定的拟合式为

$$f_{7,cu} = a + b \frac{C}{W} + cX_1 + dX_2. \tag{5}$$

式中: $f_{7,\text{cu}}$ 为水泥浆的7d抗压强度; $a,b,c,d$ 为影响系数.

对多因素的拟合分析可以得到其关系为

$$f_{7,\text{cu}} = 25.997 + 6.372 \frac{C}{W} - 6.934X_1 + 0.273X_2. \tag{6}$$

根据拟合式(6)得到的拟合值与测试值进行相关性分析(见图6), $R^2=0.966$ ,说明该拟合公式可信度较高.

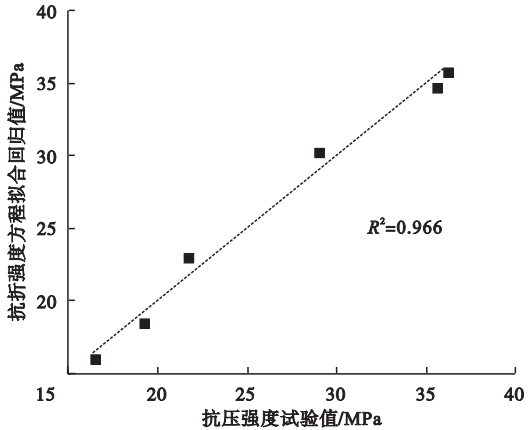


图6 不同配合比下水泥浆的抗压强度的试验与回归值

Fig. 6 Test values and regression values for the compressive strength of the cement slurry with different mixture ratio

2.4 抗压强度与龄期之间的关联

不同配合比下水泥浆各龄期的抗压强度如图7所示.

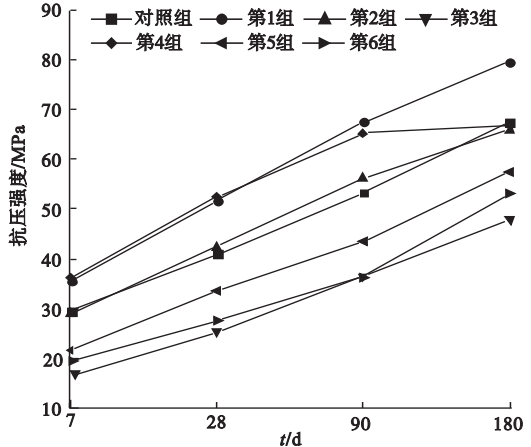


图7 不同配合比下水泥浆各龄期的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of cementslurry under different mixing ratios at various ages

由图7可知,各配合比设计的水泥浆料的抗压强度都随着时间的推移而增加,并且第1组和第4组配合比设计的水泥浆料的抗压强度明显优于目前商用的浆料的抗压强度,而且其余各组浆料的抗压强度都能满足使用要求,说明干缩对水泥浆的抗压强度影响不是很大,水泥浆的抗压强度主要取决于水灰质量比的大小.

2.5 流动度与各因素之间的关联

通过试验可得不同配合比的流动度(见图8),可以明显看出第2组到第6组水泥浆料的流动度优于目前商用的水泥浆料.

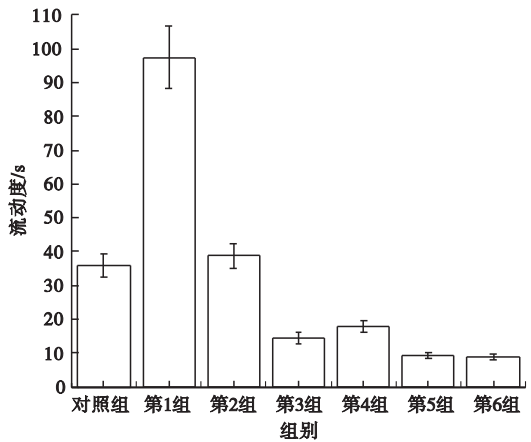


图8 不同配合比下水泥浆的流动度

Fig. 8 Fluidity of cement slurry with different mixture ratio

水泥混凝土的流动性主要跟水灰质量比和减水剂的掺量有关,并且具有比较明显的幂函数关系<sup>[19-21]</sup>.由此,可以大致认为减水剂对水灰质量比的影响是线性的,矿渣粉对水泥浆的流动性没有贡献,并且流动度与水灰质量比存在幂函数的关系式,从而推出的拟合式为

$$T = a \times \left( \frac{1}{W/C + kX_1} \right)^b + c. \tag{7}$$

式中: $T$ 为水泥浆的流动度; $k$ 为聚羧酸减水剂的平均减水率; $a,b,c$ 为影响系数.

从式(7)中可以看出,当为纯水时 $T=c$ ,根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)纯水的流动度为8 s,



可得  $c = 8 \text{ s}$ .

进行非线性多元函数回归分析,采用迭代法求  $a, b, k$  的值,并且取  $a, b, k$  的初值都为 1,迭代结果如图 9 所示,经过 38 次迭代后,  $a, b, k$  的值基本稳定不变.

根据拟合式及相应的系数可以得到关系式为

$$T=0.011 \times \left( \frac{1}{W/C+0.017X_1} \right)^{9.166} + 8. \quad (8)$$

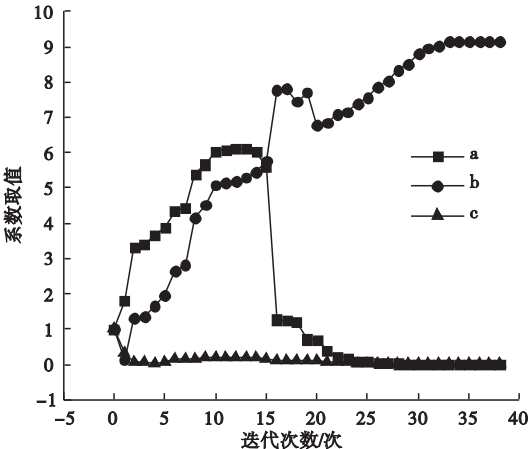


图9 水泥浆流动度拟合式系数取值迭代图

Fig. 9 Iterative diagram of quasi - fit coefficient of cement slurry fluidity

根据拟合公式得到的拟合值与测试值进行相关性分析(见图 10),相关系数较高,说明该拟合式可信度较高.并且当流动度小于 30s 时,实测值与拟合值非常接近.

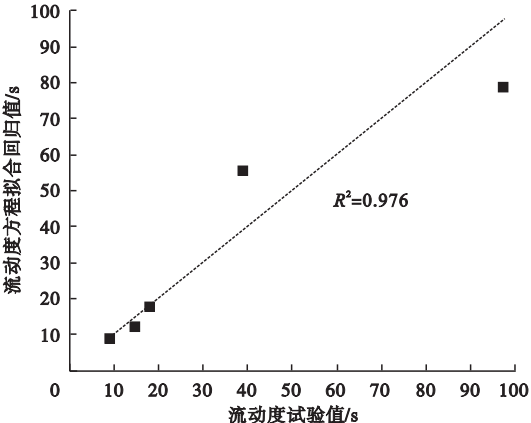


图 10 不同配合比下水泥浆流动度的试验值与回归值

Fig. 10 Test values and regression values for fluidity of the cement slurry with different mixture ratio

2.6 水灰质量比及其他材料掺量的最佳配比

试验中当水灰质量比超过 0.45 时,水泥浆料泌水现象严重,因此水灰质量比不宜大于 0.45,并且对流动度、抗折强度、抗压强度的线性回归模型进行分析,发现当水灰质量比为 0.41,减水剂掺量为 0.30%,矿粉掺量占胶凝材料的 20% 时,则水泥浆体的流动度为 21.3 s,7 d 抗折强度为 6.08 MPa,7 d 抗压强度为 26.20 MPa,表现了良好的水泥浆料试验性能,其结果如表 4 所示.

表 4 研发的与商用的水泥浆的性能比较

Table 4 The performance comparison of the developed and commercial cement slurry

水泥浆种类	水灰质量比	流动度/s	7d 抗折强度/MPa	7d 抗压强度/MPa
商用水泥浆	0.34	36.0	6.13	29.46
研发水泥浆	0.41	21.3	6.08	26.20

3 结 论

(1)商用的水泥浆流动度为 36.0s,不符合目标值的要求,而研发的水泥浆料流动度为 21.3s,具有更好的流动性,满足施工使用的要求.

(2)提出了最佳水灰质量比 0.41,相较于商用的 0.34 的水灰质量比,0.41 的水灰质量比能够减少水泥用量,从而降低半柔性混凝土路面的造价成本.

(3)通过与商用的半柔性混凝土路面材料性能对比,可以得出研发的水泥浆具有更高的流动性和比较合适的抗折强度和抗压强度.

参考文献

[ 1 ] YANG Bohan, WENG Xingzhong. The influence on the durability of semi-flexible airport pavement materials to cyclic wheel load test [ J ]. Construction and building materials, 2015, 98: 171 - 175.

[ 2 ] YANG Yan, HUANG Shaolong, DING Qingjun, et al. The property research on interfacial modified semi-flexible pavement material [ J ]. Applied mechanics and

- materials, 2011, 1366(71): 71-78.
- [3] 凌天清, 董强, 董营营, 等. 橡胶沥青在灌入式半柔性路面中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(6): 24-27.  
(LING Tianqing, DONG Qiang, DONG Yingying, et al. The application of rubber asphalt in semi-flexible pavement[J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2009, 29(6): 24-27.)
  - [4] 凌天清, 郑晓卫, 凌濛, 等. 保水降温半柔性路面材料性能研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 7-11.  
(LING Tianqing, ZHENG Xiaowei, LING Meng, et al. Study on the properties of the semi-flexible pavement materials. [J]. China journal of highway and transport, 2010, 23(2): 7-11.)
  - [5] LING Tianqing, ZHAO Zhijie, XIONG Chuhua, et al. The application of semi-flexible pavement on heavy traffic roads[J]. International journal of pavement research and technology, 2009, 2(5): 211-217.
  - [6] ROBERT L, ROBERT K, LEIF G, et al. Influence of pavement materials on field performance: evaluation of rutting on flexible, semi-rigid and rigid test sections after 7 years of service[J]. Road materials and pavement design, 2009, 10(4): 689-713.
  - [7] SETYAWAN A. Assessing the compressive strength properties of semi-flexible pavements[J]. Procedia engineering, 2013, 54: 863-874.
  - [8] YANG Guoliang, WU Kuanghuai, WANG Weiming, et al. Parent asphalt mixture design of semi-flexible pavement based on method of main mineral aggregate void filling[J]. Advanced materials research, 2012, 1615(446): 71-78.
  - [9] MÁRCIA L, MARISA D, LUIZ A, et al. Development of a semi-flexible heavy duty pavement surfacing incorporating recycled and waste aggregates - preliminary study[J]. Construction and building materials, 2016, 102: 155-161.
  - [10] PEI Jianzhong, CAI Jun, ZOU Daoguang, et al. Design and performance validation of high-performance cement slurry as a grouting material for semi-flexible pavement[J]. Construction and building materials, 2016, 126: 206-217.
  - [11] ZHANG Jiupeng, CAI Jun, PEI Jianzhong, et al. Formulation and performance comparison of grouting materials for semi-flexible pavement[J]. Construction and building materials, 2016, 115: 582-592.
  - [12] CAI Jun, PEI Jianzhong, LUO Qinghui, et al. Comprehensive service properties evaluation of composite grouting materials with high-performance cement slurry for semi-flexible pavement[J]. Construction and building materials, 2017, 153: 544-556.
  - [13] 李春江, 杨庆生. 水泥水化过程的细观力学模型与性能演化[J]. 复合材料学报, 2006(1): 117-123.  
(LI Chunjiang, YANG Qingsheng. The micro-mechanical model and performance evolution of cement hydration process[J]. Journal of composite materials, 2006(1): 117-123.)
  - [14] HUANG Chong, HONG Jinxiang, LIN Juntao, et al. Utilization of waste rubber powder in semi-flexible pavement[J]. Key engineering materials, 2014, 3019(599): 361-367.
  - [15] WANG Yajun, GUO Changying, TIAN Yanfeng, et al. Design of mix proportion of cement mortar with high-performance composite semi-flexible pavement[J]. Advanced materials research, 2013, 2216(641): 342-345.
  - [16] DING Qingjun, SUN Zheng, FAN Shen, et al. The performance analysis of semi-flexible pavement by the volume parameter of matrix asphalt mixture[J]. Advanced materials research, 2011, 1068(168): 351-356.
  - [17] HUANG Chong, LIU Jiaping, HONG Jinxiang, et al. Improvement on the crack resistance property of semi-flexible pavement by cement-emulsified asphalt mortar[J]. Key engineering materials, 2012, 1730(509): 26-32.
  - [18] DING Qingjun, ZHAO Mingyu, SHEN Fan, et al. Mechanical behavior and failure mechanism of recycled semi-flexible pavement material[J]. Journal of Wuhan university of technology-mater. sci. ed. 2015, 30(5): 981-988.
  - [19] 吴国雄, 梅迎军, 李力. 半柔性复合路面设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
(WU Guoxiong, MEI Yingjun, LI Li. Semi-flexible composite pavement design and construction[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.)
  - [20] 施惠生. 混凝土外加剂技术大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.  
(SHI Huisheng. Technology of concrete admixtures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.)
  - [21] 张艳荣. 水泥-化学外加剂-水分散体系早期微结构与流变性[D]. 北京: 清华大学, 2014.  
(ZHANG Yanrong. Early microstructure and rheological properties of cement-chemical admixture-water dispersion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)