

# 同三国道主干线粤境开阳高速公路路面 下面层 SUPERPAVE 配合比设计

傅宏伟, 柳和气

(广东省高速公路公司, 510100, 广州)

[摘要] 结合同三国道主干线粤境开阳高速公路 K170+000~K205+400 的下面层 Superpave 配合比设计, 介绍 Superpave 的应用情况.

[关键词] 开阳高速公路, Superpave, 配合比设计

[中图分类号] U412, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292(2003)03-0066-07

## 1 Superpave 技术简介及其应用情况

Superpave 技术是美国公路战略研究计划(SHRP)的重要研究成果, 1993 年完成后, 美国联邦公路局(FHWA), 美国各州公路与运输官员协会(AASHTO)和美国运输研究委员会(TRB)进行了大量的工作以推广 Superpave 技术, 到 2001 年美国 82% 的热拌沥青混合料采用 Superpave 混合料设计和施工.

Superpave 由沥青胶结料规范, 混合料设计与分析系统和计算机系统三个部分组成. 其特点是开发了一套全新的实验设备和方法, 并建立了沥青胶结料和混合料规范的新体系, 从根本上改变了现行试验方法和规范纯经验性质. 其沥青胶结料和混合料规范的试验方法和指标是同沥青路面性能直接联系起来, 通过控制高温车辙、低温开裂及疲劳开裂等来达到全面改进路面性能的目的. 目前, Superpave 被认为是当今世界上最先进的沥青路面技术.

目前我国的 Superpave 技术的引进和应用方兴未艾. 自重庆公路科学研究所 1995 年 6 月编译出版 SHRP 沥青研究项目的专题情报资料以及江苏省交通科学院于 1995 年引进 Superpave 全套仪器和设备以来, 我国其它地方的兄弟单位, 也纷纷购买采用 Superpave 体系的设备和仪器. 江苏省广靖、锡澄高速公路, 新沭河大桥桥面铺装, 山东京福高速公路济南段, 湖北京珠高速公路湖北段试验路均采用 Superpave 技术.

## 2 开阳项目概况

开阳高速公路是全国高等级公路网国道主干线同江至三亚高速公路的一段, 是广东高速公路网的重要组成部分, 是广东西翼的交通大动脉. 开阳高速公路起自鹤山市址山镇, 接已建成的佛开高速公路, 沿 325 国道北侧西行. 沿途经开平市、恩平市、阳东县和阳江市江城区等五市(区)二十二镇, 止于阳江林场, 接拟建的阳茂高速公路, 路线全长约 126 km.

本区位于北回归线以南, 属南亚热带季风海洋性气候. 夏热多雨, 冬暖而霜期短. 年平均气温 22~23℃, 7 月平均温度 28.1~28.5℃, 最高温度 39.2~39.6℃, 1 月平均温度 13.4~13.5℃, 极端最低气温 -0.7~1.0℃. 年平均降雨量 1814~2200 mm, 雨季集中在 5~9 月.

交能及主要技术指标: 自然区划: IV<sub>7</sub> 区; 设计年限: 沥青路面 15 年; 标准轴载: B22~100; 沥青路面设计年限内一个车道的累计当量标准轴次  $1.5 \times 10^7$  次; 沥青混凝土路面设计弯沉值: 0.22 mm.

收稿日期: 2003-06-28

作者简介: 傅宏伟, 1970-, 广东省高速公路公司工程师, 主要从事公路、桥梁施工建设管理和研究.

全线按四车道高速公路设计. 计算行车速度 120 km/h, 路基宽度 28 m, 行车道宽度  $2 \times 7.5$  m, 设计荷载: 汽车—超 20 级, 挂车—120.

3 开阳高速公路路面下面层 Superpave 设计与应用

依据美国 2002 版 Superpave 沥青混合料标准设计方法 (AASHTO PP28). 并依据我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ032—94) 的要求进行马歇尔试验, 以此提供开阳高速公路 K170+ 000—K205+ 400 段下面层沥青混合料目标配合比的马歇尔试验技术数据.

3.1 沥青

根据开阳高速公路沥青招标情况 K170+ 000—K205+ 400 段沥青采用台湾中华牌 AH-70 重交道路石油沥青.

表 1 AH-70 重交道路石油沥青试验报告

试验项目	测试值	技术规范	试验规程
针入度 (25℃, 100 g, 5 s) / 0.1 mm	69	60~ 80	T0604~ 2000
延度 (15℃, 5 cm/min) / cm	> 100	< 100	T0605~ 1993
软化点 $T_{RH\&B}$ /℃	46.0	46~ 56	T0606~ 2000
60℃ 粘度 / Pa·s	187	< 200	ASTM D4402
135℃ 粘度 / Pa·s	0.363	> 3	ASTM D4402
密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	1.045	实测	T0603~ 1993
闪点 /℃	255	< 230	T0611~ 1993
溶解度 / %	99.53	< 99.0	T0607~ 1993
含蜡量 / %	2.3	> 2	T0615~ 2000
TFOT 后残留物			
质量损失 / %	0.09	> 0.8	T0609~ 1993
针入度比 25℃ / %	60.9	< 60	T0604~ 2000
延度 (15℃, 5 cm/min) / cm	100	< 100	T0605~ 1993

3.2 集料

依据美国 Superpave 沥青混合料设计标准 (AASHTO MP2) 设计要求, 对集料送样进行了共性试验和部分资源特性试验和各种集料的密度试验, 试验结果汇总表见表 2 和表 3.

表 2 集料共性试验及部分资源特性结果汇总表

试验项目	试验值	Superpave 规范要求
粗集料棱角性 / %	100	≥ 100
细集料棱角 / %	46	> 40
扁平颗粒 / %	11.5	< 10*
粘土含量 (砂当量) / %	68.0	> 50
坚固性 / %	13.2	< 35~ 45
安定性 / %	2.0	< 12~ 20

表 3 集料密度试验结果表

矿料	视密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	毛体积密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 / %
1# 料	2.789	2.766	0.31
2# 料	2.803	2.775	0.37
3# 料	2.800	2.753	0.61
4# 料	2.769	2.689	1.70
黄砂	2.641	—	—
矿粉	2.693	—	—

注: \* 美国集料标准中粗集料扁平颗粒定义是粗集料最小厚度方向和最大长度方向的尺寸之比为 ≤ 1, 我国现行规范中粗集料扁平颗粒定义是粗集料最小厚度方向和最大长度方向的尺寸之比为 ≥ 1.

3.3 混合料拌和温度与击实温度确定

混合料拌和温度与击实温度确定方法根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ052—2000) 中沥青布氏旋转粘度试验 (T0625—2000), 测定来样沥青不同温度下的表观粘度, 并以此绘制采样沥青的粘温曲线. 在粘温曲线上取  $0.17 \pm 0.02$  Pa·s 时的温度作为拌和温度范围, 以  $0.28 \pm 0.02$  Pa·s 时的温度作为压实成型温度范围, 粘度数据见表 4 粘温曲线见图 1.

表 4 泰普克沥青表观粘度数据

试验温度 /℃	60	135	175
试样表观粘度 / (Pa·s)	187	0.363	0.07

通过插值确定拌和温度以及击实温度范围见表 5.

由此确定泰普克沥青拌和温度范围为: 160~ 165 ℃,

击实温度范围为 144~ 151 ℃.

3.4 设计集料结构的选择

3.4.1 集料结构的选择

依据 Superpave 设计的一般方法, 在选择集料结构时, 首先经过调试, 选出粗、中、细 3 个级配, 根据集料的性质( 密度和吸水率) 计算出这 3 个级配的初始油量. 然后用初始油量成型试件, 并根据试验结果, 计算出这 3 个级配的沥青混合料在空隙率为 4% 时所需的沥青用量及相应的沥青混合料其他性质, 粒料间隙率(VMA)、饱和度(VFA)、矿粉与有效沥青之比(DP)、初始旋转次数的压实度( % G<sub>mmat in</sub>). 表 6 为各种集料的筛分试验结果, 表 7 为 3 个调试级配的料堆配合比, 表 8 为 3 个试验级配各筛孔尺寸粒料通过率明细表, 表 9 为估算沥青用量汇总表.

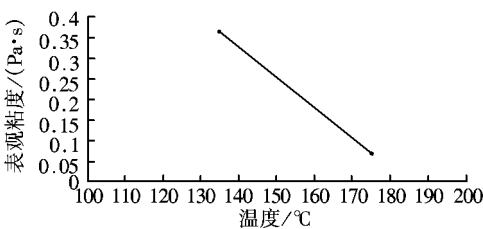


图 1 泰普克沥青粘温曲线

表 5 泰普克沥青粘温关系表

试样表观粘度/(Pa·s)	0.19	0.15	0.30	0.26
试验温度/℃	165	160	144	151

表 6 各种集料料堆的筛分结果

集料	筛孔													
	通过筛孔(方孔筛/mm)百分率/%													
	孔径	31.5	26.5	19	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1#	100	91.5	8.6	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2#	100	100	94.0	60.2	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3#	100	100	100	100	100	99.7	7.3	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4#	100	100	100	100	100	100	95.5	51.4	37.6	25.4	16.7	12.0	9.2	
黄砂	100	100	100	100	100	99.7	98.7	88.9	69.2	33.0	6.8	0.5	0.2	
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98.3	80.0	

表 8 试验混合物级配明细表

筛孔尺寸	通过率/%		
	级配 1	级配 2	级配 3
31.5	100.0	100.0	100.0
26.5	99.0	99.2	99.5
19	86.8	89.1	92.7
13.2	72.2	78.2	82.1
9.5	48.2	60.1	64.1
4.75	29.4	39.3	42.3
2.36	18.1	25.5	28.2
1.18	14.2	19.9	22.3
0.6	10.1	13.1	14.7
0.3	7.1	8.2	9.3
0.15	5.8	6.3	7.3
0.075	4.6	5.0	5.8

表 7 试验级配料堆配合比组成

矿料	级配 1	级配 2	级配 3
1#	12	10	6
2#	40	30	30
3#	19	21	22
4#	22	26	26
黄砂	4	10	12
矿粉	3	3	4

表 9 估算沥青用量汇总表

试验级配	G <sub>sb</sub> /(g/cm <sup>3</sup> )	G <sub>sa</sub> /(g/cm <sup>3</sup> )	G <sub>se</sub> /(g/cm <sup>3</sup> )	V <sub>ba</sub>	V <sub>be</sub>	W <sub>s</sub>	P <sub>bf</sub> %
1	2.754	2.782	2.776	0.007 0	0.082	2.337	3.8
2	2.743	2.771	2.765	0.006 9	0.082	2.329	3.8
3	2.739	2.767	2.761	0.006 9	0.082	2.326	3.8

表中: G<sub>sb</sub>为级配集料毛体积密度; G<sub>sa</sub>为级配集料表观密度; G<sub>se</sub>为级配集料有效密度; V<sub>ba</sub>为集料吸收的沥青胶结料体积; V<sub>be</sub>为有效沥青胶结料的体积; W<sub>s</sub>为每( cm<sup>3</sup>) 混合料中集料体积; P<sub>bf</sub>为估算沥青用量.

三种试验组配的级配曲线的级配图如图 2 所示:

3.4.2 三种试验级配的评价

根据各个级配的估算沥青用量, 用 3.8 的沥青用量成型试件, 沥青混和料的拌和温度和压实温度依据送样沥青的粘温曲线确定(表 4), 采用 Pine 旋转压实仪成型试件, 设定旋转压实仪的单位压力为 0.6 MPa. 根据交通量数据, 开阳高速公路的交通量属重交通(3~ 30 百万次), 选择旋转压实成型试验机三个压实次数分别为:  $N_{\text{最初}} = 8$  次,  $N_{\text{设计}} = 100$  次,  $N_{\text{最大}} = 160$  次. 根据 Superpave 的最新设计标准, 在进行估算油量成型试件时, 将旋转压实次数设定在  $N_{\text{设计}}$ , 本次试验为  $N_{\text{设计}} = 100$  次, 估算沥青用量下各初始级配旋转压实试验结果汇总如表 10 所示.

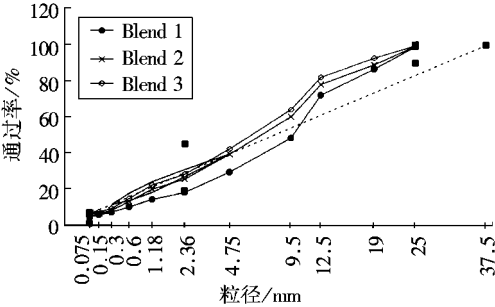


图 2 B03 标下面层配合比设计初级配曲线

表 10 三种试验级配旋转压实试验结果汇总表

混合物	ACI / %	% $G_{mm}$ @ $N = 8$	% $G_{mm}$ @ $N = 100$	$V_a$ / %	VMA / %
1	3.8	83.8	93.1	6.9	15.1
2	3.8	86.6	95.2	4.8	13.4
3	3.8	86.3	95.0	5.0	13.5

假定在  $N_{\text{des}}$  (100 次) 下的空隙率为 4% (96%  $G_{mm}$ ), 用公式估算以上三种混合料达到 4% 空隙率时相应的沥青胶结料含量以及相应体积指标, 估算公式如下所示:

$$P_{b, \text{估算}} = P_{bi} - (0.4 \times (4 - V_a)) \tag{1}$$

其中:  $P_{b, \text{估算}}$  为估算的胶结料百分率;  $P_{bi}$  为初始(试验)胶结料百分率;  $V_a$  为在  $N_{\text{des}}$  的空隙率.

$$\text{VMA}_{\text{估算}} = \text{VMA}_{\text{初始}} + C \times (4 - V_a) \tag{2}$$

$$\text{VFA}_{\text{估算}} = 100 \times \left[ \frac{\text{VFA}_{\text{估算}} - 4}{\text{VMA}_{\text{估算}}} \right] \tag{3}$$

$$G_{mm, \text{估算}} @ N_{\text{ini}} = G_{mm, \text{试验}} @ N_{\text{ini}} - (4.0 - V_a) \tag{4}$$

表 11 为三种级配估算沥青用量试验结果评价表.

表 11 三种级配估算沥青用量试验结果评价表

级配	试件空隙率 / %	估算油量 / %	估算 vv / %	VMA / %	VFA / %	D. P.	% $G_{mm}$ @ $N = 8$
1	6.9	5.0	4.0	14.6	73.6	1.24	83.8
2	4.8	4.1	4.0	13.4	70.2	1.31	86.6
3	5.0	4.2	4.0	13.3	70.3	1.48	86.3
Superpave 标准			4.0	≤ 12.0	65~ 75	0.6~ 1.2*	89.0

注: \* 表示当级配通过禁区下方, 粉胶比可增加至 0.8~ 1.6.

依据表 11 的评价指标, 可以得出 3 个级配均满足 Superpave 设计要求, 但考虑到级配 1 空隙率以及矿料间隙率偏大, 根据经验, 路面压实较难, 级配 3 和级配 2 体积指标相近, 但级配曲线过禁区且粉胶比偏大, 综合以上因素本次集料结构采用级配 2 为设计级配.

3.4.3 选择设计级配的沥青用量

设计级配确定后, 就要确定设计沥青用量  $P_b$ , 所谓设计沥青用量就是指沥青用量在设计旋转压实条件下得到空隙率为 4% 的沥青用量. 根据 Superpave 设计方法, 一般选择 4 种沥青用量, 它们分别为  $P_b$ 、 $P_b \pm 0.5\%$ 、 $P_b + 1\%$ . 由表 10 取  $P_b$  为 4.1%, 因此, 4 个沥青用量分别为: 3.6%、4.1%、4.6%、5.1%. 在进行确定选择级配沥青用量的试验时, 压实次数应设定在  $N_{\text{设计}}$ , 本次  $N_{\text{设计}} = 100$  次. 在 4 种沥青用量下, 采用级配 2 拌制混合料, 旋转压实后混合料体积性质如表 12 所示, 沥青用量和体积指标关系图形如图 3 所示:

表 12 5 种沥青用量沥青混合料体积性质

沥青用量	在设计压实次数时			DP	% G <sub>mm</sub> @ N= 8	% G <sub>mm</sub> @ N= 100
	VA/ %	VMA/ %	VFA/ %			
3. 6	5. 4	13. 7	60. 5	1. 49	85. 9	94. 6
4. 1	3. 9	13. 1	70. 3	1. 29	87. 1	96. 1
4. 6	3. 1	13. 4	76. 8	1. 14	85. 7	95. 4
5. 1	2. 9	14. 7	80. 3	1. 02	85. 4	94. 9

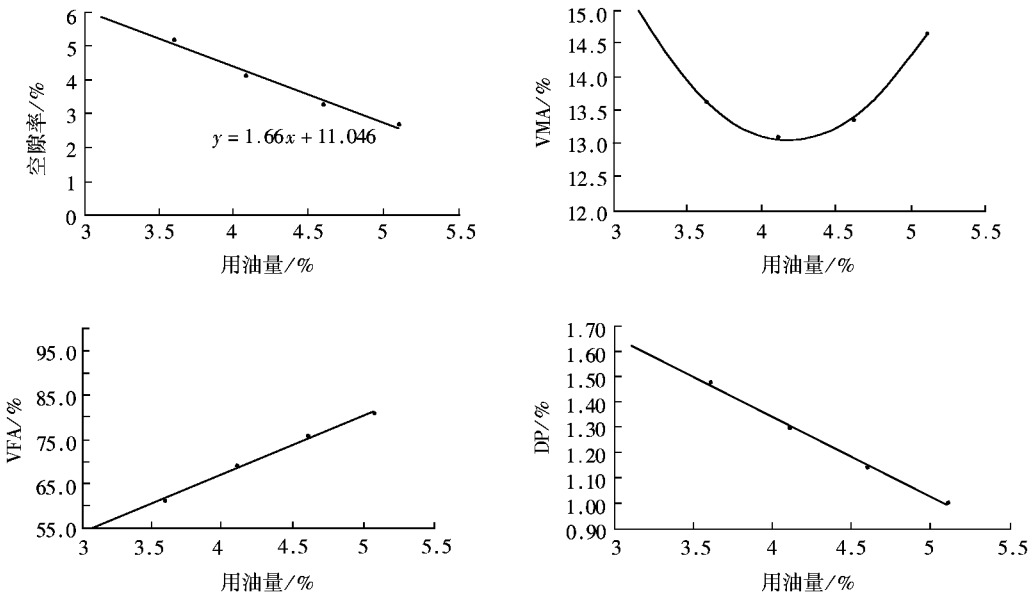


图 3 沥青用量和体积指标关系图线

根据图 3 中沥青用量和空隙率的关系曲线, 通过图表插值法得到设计沥青用量为 4. 2%, 并得到该沥青用量下的体积指标如表 13 所示:

表 13 设计沥青用量沥青混合料体积性质

用油量	V <sub>a</sub> / %	VMA/ %	VFA/ %	DP	% G <sub>mm</sub> @ N= 8	% G <sub>mm</sub> @ N= 100
4. 2(计算)	4. 0	13. 2	70. 9	1. 30	87. 2	96. 0
Superpave 标准	4. 0	> 12	65~ 75	0. 6~ 1. 20*	89	96. 0

注: \* 表示当级配通过禁区下方, 粉胶比可增加到 0. 8~ 1. 6.

3. 4. 4 最大压实次数验证

根据第 3 节中得到的设计沥青用量 4. 2%, 采用该沥青用量成型试件, 验证 4. 2% 的沥青用量在压实次数设定在 N 最大时, 本次 N 最大= 160 次, 对应的体积性质指标, 试验结果汇总如表 14 所示.

表 14 最大压实次数下沥青混合料体积性质

沥青用量	在设计压实次数时			DP	% G <sub>mm</sub> @ N= 8	% G <sub>mm</sub> @ N= 200
	VA/ %	VMA/ %	VFA/ %			
4. 2	3. 8	13. 8	72. 4	1. 28	87. 2	97. 9
Superpave 标准	4	≤ 12. 0	65~ 75	0. 6~ 1. 20*	89	98

注: \* 表示当级配通过禁区下方, 粉胶比可增加到 0. 8~ 1. 6.

3. 4. 5 设计结果

通过以上试验和分析, 级配 2 为设计级配, 配合比为 1<sup>#</sup>: 2<sup>#</sup>: 3<sup>#</sup>: 4<sup>#</sup>: 黄砂: 矿粉= 10. 0: 30. 0: 21. 0: 26. 0: 10. 0: 3. 0. (见表 15).

表 15 配合比各组分含量

材料	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	黄砂	矿粉	沥青用量
用量/ %	10.0	30.0	21.0	26.0	10.0	3.0	4.2

对应的混合料特性如表 16 所示.

3.5 马歇尔试验结果汇总表

依据 Superpave 设计方法得到的 Superpave 沥青混合料, 采用马歇尔试验方法成型试件, 得到对应的马歇尔指标, 试验结果汇总如表 17 所示.

表 16 混合料体积性质表

混合料特性	设计结果	Superpave 标准
$V_a$ / %	4	4.0
VMA/ %	13.1	$\geq 12$
VFA/ %	70.9	65~ 75
DP	1.30	0.6~ 1.2*
% $G_{mm}$ (最初)	87.2	89
% $G_{mm}$ (最大)	97.9	98

表 17 Super25 马歇尔试验技术指标表

试验项	试验结果	我国规范要求
击实次数/ 次	75	75
稳定度/ kN	10.1	$> 7.5$
流值(0.1 mm)	24.9	20~ 40
空隙率/ %	5.6	3~ 6
沥青饱和度/ %	64.7	70~ 85
残留稳定度/ %	101.7	$\geq 75$

注: \* 表示当级配通过禁区下方, 粉胶比可增加到 0.8~ 1.6.

3.6 高温稳定性试验检验

为了检验 B03 标下面层沥青混合料的高温稳定性, 按照规范对设计混合料进行了车辙试验, 试验结果汇总如表 18 所示.

表 18 车辙试验结果汇总表

混合料类型	沥青用量/ %	动稳定度(次/ mm)				
		1	2	3	平均	要求
Super25	4.2	1 800	1 632	1 969	1 800	$\geq 800$

3.7 水稳定性试验检验

为了检验下面层沥青混合料的水稳定性, 对设计混合料、对混合料掺加不同剂量的生石灰以及对掺加抗剥落剂混合料分别进行了浸水马歇尔试验, 试验结果汇总如表 19 所示.

表 19 浸水马歇尔稳定度试验结果

混合料	马歇尔稳定度/ kN	浸水马歇尔稳定度/ kN	残留稳定度 $SO$ / %	要求/ %
不加外加剂	11.28	11.48	101.7	$\geq 75$
加 1% 石灰	10.89	10.88	99.9	$\geq 75$
加 2% 石灰	11.42	10.69	93.6	$\geq 75$
加抗剥落剂	9.71	10.29	105.9	$\geq 75$

从以上数据分析可知, 从水稳定性检验结果来看, 4 种情况下的混合料水稳定性均能满足规范要求, 掺加生石灰混合料抗水损害性能略有下降, 并有随生石灰掺加剂量的增加残留稳定度有减小的趋势.

3.8 目标配合比设计结论

由矿料、黄砂、矿粉、沥青等原材料, 按照美国 Super25 设计标准进行配合比设计, 得到的最佳沥青用量为 4.2%(油石比为 4.4%), 通过马歇尔验证, 其空隙率、VMA、稳定度、流值均能满足我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ032—94) 的规定, VFA(饱和度) 比我国规范的规定值略下, 更适用于重交通道路, 因此建议施工控制中沥青饱和度指标应适当降低. 通过车辙试验得到其动稳定度满足我国规范要求, 由浸水马歇尔试验可知, 该沥青混合料抗水害性能良好.

[参考文献]

[1] 江苏省交通科研院.《高性能沥青路面 Superpave 技术实用手册》[S]. 2002.

- [ 2 ] (JTJ032—94) 公路沥青路面施工技术规范[S].  
[ 3 ] (JTJ052—93) 公路沥青及沥青混合料试验规程[S].

## Design for Compounding Paving Materials of Lower Layer of Raiyang Expressway by Adopting SUPERPAVE

Fu Hongwei, Liu Heqi

( Expressway Company of Guangdong Province, 510100, Guangzhou, PRC)

**Abstract:** Combining the design for compounding the paving materials of the lower layer of Raiyang expressway, the paper introduces the application of SUPERPAVE technology.

**Key words:** Raiyang expressway, Superpave, design for compounding paving materials

[ 责任编辑: 刘健]