

# 半柔性复合混凝土动态模量主曲线研究

沈路

(内蒙古交通设计研究院有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要:** 为了研究半柔性复合混凝土的设计及材料组成, 首先针对大空隙沥青混合料 OG-FC 设计方法, 研究 2.36 mm 筛孔通过率与所形成的混合料空隙率的相关关系, 研究结果表明: OGFC 的空隙率与 2.36 mm 筛孔通过率大致呈线性相关关系, 可依据空隙率需求来预估 2.36 mm 筛孔通过率; 然后研究不同温度、不同荷载频率下半柔性材料的动态模量变化情况, 结果表明: 半柔性复合混凝土的动态模量值与普通沥青混合料动态模量值相当, 采用时温等效原理研究半柔性材料的黏弹性能, 移位因子研究结果表明: 半柔性材料符合线黏弹材料性能, 并且通过移位因子, 构建不同温度下半柔性复合混凝土模量主曲线, 为半柔性复合混凝土路面结构设计提供材料参数。

**关键词:** 半柔性复合混凝土; 空隙率; 动态模量; 主曲线

## 1 前言

中国现有路面结构大体可分为: 沥青路面和水泥混凝土路面。两种路面结构具有各自的优缺点, 沥青路面具有平整度高、行车舒适和抗滑性能好等优点, 但夏天易产生车辙、推移等病害, 冬天尤其是北方地区易发生低温开裂。水泥混凝土具有强度高、水稳定性强、抗车辙性能好等特点, 但其在行车舒适性等特点上要差于沥青混凝土路面。如何综合两种材料的优点, 发挥两者优势, 更好地服务路面结构组成, 半柔性复合混凝土由此产生。

半柔性复合混凝土最早出现在法国, 当时是为解决机场道面耐高温问题。后来日本开始大力发展此项技术, 日本道路协会制定了相应的技术标准。在中国, 最早由林绣贤将其应用到城市交叉口、停车场、高速公路或机场道面的面层, 并且试验路观察结果性能良好。后来张肖宁提出了半柔性复合混凝土中基体沥青混合料和水泥胶浆的设计方法及半柔性复合混凝土的铺装技术。另外, 长沙理工大学、长安大学、重庆交通大学都对半柔性复合混凝土开展了丰富的研究。由此, 半柔性复合混凝土逐渐开始应用到了机场道面、市政道路及普通公路中。

然而, 针对新版沥青路面结构设计规范中面层材料的设计参数, 半柔性复合混凝土属于哪一种材料不

得而知, 需要对半柔性材料性能做更深入的探究。因此, 该文在室内成型半柔性复合混凝土材料, 采用 UTM 对材料做动态加载试验, 以此明确半柔性材料性质, 为半柔性复合混凝土路面结构设计提供材料参数及性能指导。

## 2 原材料性质

参照规范要求, 对 SBS 改性沥青、粗集料、细集料、矿料及水泥进行测试, 结果见表 1~4。由表 1 可知: SBS 改性沥青为 1-C 类改性沥青, 其余各项指标均满足规范要求。

表 1 SBS 改性沥青技术指标

针入度/(0.1 mm)			5 ℃延度/cm	软化点/℃	PI
30 ℃	25 ℃	15 ℃			
99.7	72.3	28.5	52.5	85.2	1.37

表 2 粗集料相对密度

粒径/mm	表观相对密度	吸水率/%	毛体积相对密度
16~19	2.737	0.399	2.710
13.2~16	2.736	0.312	2.713
9.5~13.2	2.748	0.642	2.703
4.75~9.5	2.729	0.581	2.686
2.36~4.75	2.703	2.013	2.565

收稿日期: 2019-02-04

作者简介: 沈路, 男, 高级工程师, E-mail: shenlu123@126.com

表 3 细集料、矿粉表观密度

粒径/ mm	表观密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	粒径/ mm	表观密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )
1.18~2.36	2.732	0.15~0.3	2.723
0.6~1.18	2.723	0.075~0.15	2.681
0.3~0.6	2.723	矿粉	2.722

表 4 水泥技术指标

初凝时 间/min	终凝时 间/min	3 d 强度/MPa		7 d 强度/MPa	
		抗压	抗折	抗压	抗折
210	320	22.3	4.2	42.3	6.6

3 OGFC 级配组成设计

半柔性复合混凝土是在大空隙沥青混合料中灌注水泥净浆而成,所以不仅要保证沥青混合料具有足够

的强度形成整体,起到框架作用,还要保证沥青混合料具有足够多、足够大的空隙使得水泥净浆能够灌入其中,形成强度。这里,采用 OGFC 作为半柔性混合料的基体沥青混合料。有关研究表明:沥青混合料级配组成当中,2.36 mm 通过率影响沥青混合料的空隙率。为了给目标空隙率沥青混合料级配设计提供指导,首先探讨 2.36 mm 筛孔通过率与 OGFC 沥青混合料空隙率之间的关系。采用中国 OGFC 的设计方法对基体沥青混合料空隙率进行设计,选择了如表 5 所示的 3 组级配,2.36 mm 筛孔通过率分别为 10%、14%和 18%。沥青用量根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中膜厚方法进行计算。

参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 OGFC 制作方法成型标准马歇尔试件,试件正反面各击实 50 下,每种级配制作 6 个平行试件,脱模后采用体积法测量其空隙率,空隙率测试结果见图 1。

表 5 3 组 OGFC 设计级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											沥青用 量/%
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
级配 1	100	93.0	74.3	51.6	15.0	10.0	7.4	5.5	3.9	2.8	2.0	2.92
级配 2	100	95.0	77.3	57.4	19.0	14.0	9.6	7.0	5.1	3.4	2.5	3.52
级配 3	100	97.0	83.3	61.3	23.0	18.0	13.1	9.6	6.8	4.9	3.5	4.58

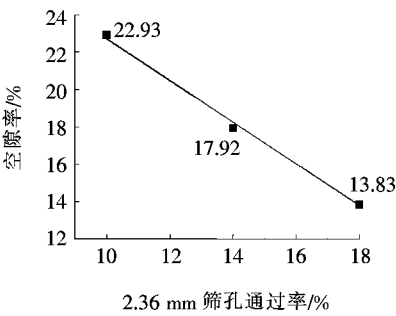


图 1 2.36 mm 筛孔通过率与空隙率之间的关系

由图 1 可知:随着 2.36 mm 筛孔通过率的增加,沥青混合料的空隙率不断减小,当通过率为 10%时,OGFC 的空隙率为 22.93%,10%为 OGFC 级配设计下限,说明 OGFC—16 的最大空隙约为 23%,2.36 mm 筛孔通过率与 OGFC 空隙率大致呈线性关系,采用线性关系,建立 2.36 mm 筛孔通过率与空隙率之间的相关关系,给目标空隙率沥青混合料级配设计提供定性的指导,线性公式如下:

$$V=-1.118p+33.869 \tag{1}$$

式中:V 为 OGFC—16 的空隙率;p 为 2.36 mm 筛孔通过率。

考虑到基体沥青混合料空隙率需求为 20%~25%及 OGFC 级配组成设计,确定 2.36 mm 筛孔通过率为 12%,级配组成见表 6。

根据规范,通过膜厚方法确定该级配组成下沥青用量为 3.98%。

4 半柔性复合混凝土成型

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的相关规定,单轴压缩动态模量的试件宜为直径(100±2.0) mm、高(150±2.5) mm 的沥青混合料圆柱体试件。首先在试验室成型旋转压实试件,参照吴国雄的方法灌注水泥净浆,但在灌注过程中,由于旋转压实试件过高,水泥净浆不能将空隙灌满,当然实际工程中半柔性复合混凝土为单层结构,灌

注不满的情况并不会出现,所以,对于做动态模量试验的试件采用平躺灌注法。在快到初凝时间时,在试件

表面喷洒缓凝剂,用刮刀除去试件表面多余的净浆。最后将试件放入标准养生室中养生 28 d。

表 6 基体沥青混合料级配

级配	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	19
下限	2.0	3.0	3.0	4.0	6.0	10.0	12.0	45.0	70.0	90.0	100
上限	6.0	8.0	12.0	15.0	18.0	22.0	30.0	70.0	90.0	100	100
设计级配	2.8	3.3	4.2	5.7	7.4	12.0	15.4	48.7	83.5	97.0	100

## 5 半柔性复合混凝土动态模量研究

目前中国公路沥青路面结构计算采用静态弹性层状体系理论。JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中,沥青混合料的材料参数采用回弹模量。众所周知,由于路面结构受到车辆荷载、气候、环境等因素的不断变化作用,它的实际工作受力状态、材料性质等都

与现行的静态体系存在较大的差距,因此在 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中,沥青混合料的材料参数选用 20 ℃、10 Hz 下的动态模量值。

此次测试采用 UTM 试验机开展动态模量试验,以分析半柔性复合混凝土的黏弹性能,同时也为半柔性复合混凝土路面结构设计提供设计参数。分别测试 -10、5、20、35、50 ℃ 下,0.1、0.5、1、5、10、25 Hz 下半柔性复合混凝土的动态模量值,测试结果如表 7 所示。

表 7 半柔性复合混凝土动态模量测试结果

温度/ ℃	不同频率(Hz)下的动态模量/MPa					
	0.1	0.5	1	5	10	25
-10	18 939	22 092	23 403	26 078	27 110	28 506
5	10 553	13 918	15 497	19 136	20 651	22 548
20	2 750	4 450	5 728	8 676	10 199	12 581
35	1 024	1 431	1 859	3 117	3 903	5 218
50	213	276	358	641	813	1 101

如表 7 所示,不同温度、不同频率下半柔性复合混凝土动态模量值,参照新版沥青路面结构设计规范,沥青混合料的设计参数取 20 ℃、10 Hz 动态模量值,半柔性复合混凝土的设计参数为 10 199 MPa,半柔性复合混凝土的设计参数在规范给定的基质、SBS 改性沥青混合料动态模量取值的范围内,说明半柔性复合混凝土满足沥青路面结构设计需要,而相关研究已表明:半柔性复合混凝土的路用性能要优于沥青混合料。

选用 Sigmoidal 函数模型拟合动态模量主曲线,函数形式如下:

$$\lg G^* = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{c + d \lg f}}} \quad (2)$$

式中: $a, b, c, d$  为模型参数; $G^*$  为材料的复数模量; $f$  为修正频率(Hz), $\lg f = \lg f_0 + \lg \alpha_T$ ;  $f_0$  为对应每种温度下的试验频率(Hz); $\alpha_T$  为移位因子。图 2 为 20 ℃

下的移位因子。

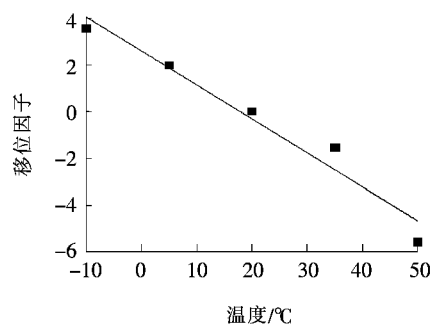


图 2 20 ℃ 下的移位因子

由图 2 可看出:在该条件下的移位因子线性关系良好,移位因子与温度的线性关系式如式(3),说明复合混凝土中虽然含有一定量的水泥净浆,但还是体现出沥青材料的黏弹性质。

$$\lg \alpha_T = -0.145T + 2.595 \quad (3)$$

如图 3 所示,基于时温等效原理,构建出复合混凝土 20 ℃下动态模量主曲线。从图 3 可以看出:① 同一频率下,动态模量值随着温度的增加而不断减小,而在同一温度下,动态模量值随着作用频率的增加而不断增加,并且增加的幅度随着温度的升高而不断增大;② 当频率大于10 000 Hz 时,动态模量趋于一定值,动态模量极值接近30 000 MPa。

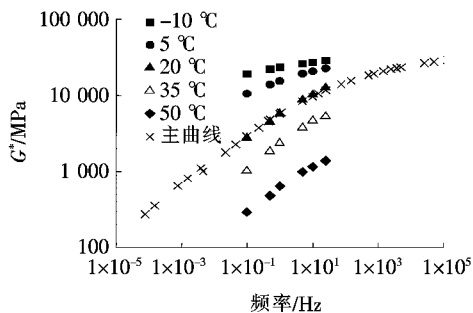


图 3 动态模量主曲线

依据时温等效原理,完成各个温度下半柔性复合混凝土 Sigmoidal 函数模型参数值求解,各个温度下的参数值如表 8 所示。

表 8 各个温度下 Sigmoidal 函数模型参数值

温度/ ℃	Sigmoidal 函数模型参数			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
-10	7.256	3.235	3.313	0.464
5	7.748	3.084	1.976	0.446
20	6.991	3.604	1.189	0.407
35	8.309	2.283	-0.166	0.457
50	7.211	3.370	-0.094	0.425

6 结论

(1) 2.36 mm 筛孔通过率是影响大空隙沥青混合料设计的关键因素,建立 2.36 mm 筛孔通过率与沥青混合料的空隙率的相关关系,为沥青混合料空隙率提供定性指导。

(2) 半柔性复合混凝土的动态模量值与沥青混合料动态模量值相当,可作为面层材料应用到沥青路面建设中。

(3) 半柔性复合混凝土虽然由沥青混合料及水泥净浆组成,但动态模量的试验结果显示,半柔性复合混

凝土材料性能符合线性黏弹性能,可采用线黏弹力学来研究半柔性复合混凝土材料性能。

(4) 依据黏弹性材料的时温等效原理,求得各个温度下半柔性复合混凝土动态模量 Sigmoidal 函数模型参数值,可为全温域半柔性复合混凝土路面结构力学分析、车辙预估及性能预估提供材料参数储备。

参考文献:

[1] 沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2001.

[2] 申爱琴.水泥与水泥混凝土[M].北京:人民交通出版社,2004.

[3] 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.

[4] 吕豹,译.法国新型路面标准结构手册[M].北京:人民交通出版社,1987.

[5] 建设省中国技术事务所.半たわみ性ユニボツツ舗装の開発[J].道路建设,1992(4).

[6] 王伟鹏.半柔性复合路面材料与结构研究[D].长沙理工大学硕士学位论文,2012.

[7] 程磊.半柔性路面用混合料性能及其设计方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2002.

[8] 郝攀.高性能半柔性路面的施工工艺与技术经济分析研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2008.

[9] 徐贵,李光元,许巍,等.适应大型飞机的机场半柔性道面的力学数值分析[J].公路工程,2015(4).

[10] 张桂铭,杨正涛,陈龙江,等.快凝型半柔性路面特重载二级公路中的运用[J].公路交通科技:应用技术版,2016(5).

[11] 徐慧宁,谭忆秋,李晓民,等.级配曲线走向与沥青混凝土空隙率关系的研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012(3).

[12] 邢明亮,陈拴发,陈华鑫,王秉纲.级配组成对排水性混合料空隙率影响研究[J].武汉理工大学学报,2009(17).

[13] 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.

[14] 郝培文,程磊,林立.半柔性路面混合料路用性能[J].长安大学学报(自然科学版),2003(2).

[15] 王伟明,高丹,吴旷怀.半柔性路面材料性能研究[J].公路工程,2014(1).

[16] Pelinen T K, Witczak M W. Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic(Complex) Modulus[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,2002(71):281-309.