

# 混凝土路面接缝填缝料振动特性分析

周玉民, 谈至明, 李立寒

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 采用1/4车-地基梁耦合动力学模型, 分析了车辆速度和悬挂系上部质量、路面板厚度、接缝宽度、接缝剪切刚度、地基模量、地基阻尼系数和地基弱化指数等因素对接缝填缝料剪切应变、剪切应变率和其基频的影响规律。研究发现, 以上各因素变化时, 若地基阻尼系数较小, 接缝填缝料剪切应变、剪切应变率随车辆位置变化呈现出波动衰减; 若地基阻尼系数较大, 则波动性消失。通常, 剪切应变幅值在0.003~0.050之间变化, 剪切应变率幅值在5~25 s<sup>-1</sup>范围内, 而其基频在5~100 Hz之间。合理增加接缝宽度、提高接缝剪切刚度以及地基阻尼可有效降低填缝料剪切应变(率)幅值, 从而减少接缝填缝料的失黏脱落破坏。研究结果可用于混凝土路面接缝填缝料力学性能评价和选材。

**关键词:** 道路工程; 混凝土路面; 接缝填缝料; 剪切应变; 剪切应变率; 基频

**中图分类号:** U416.216

**文献标识码:** A

## Vibrating Characteristics of Joint Sealant on Concrete Pavements

ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LI Lihan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Based on one-quarter vehicle-foundation beam interaction model, an analysis was made of the influences of factors, such as vehicle moving speed, mass above suspension system, pavement thickness, joint width, joint shearing stiffness, foundation modulus, foundation damping as well as foundation weakening index etc, on the dynamic shearing strains, strain rates and corresponding base frequencies. The study indicates when the foundation damping coefficient  $C_f$  is small, the dynamic shearing strains and strain rates versus position  $x$  change in a fluctuate manner; whereas  $C_f$  is large enough, the fluctuation disappears. In general, the amplitudes of the dynamic shearing strains and strain rates are 0.003~0.05 and 5~25(1/s) respectively, and corresponding base frequencies are 5~100 Hz, however, to reasonably open

the joint width and increase the joint shearing stiffness as well as the foundation damping will be effective to lower the amplitudes of the dynamic shearing strains and strain rates, thus to reduce the risk of joint sealants damage. The resultant can be used for evaluation and selection of joint sealants for concrete pavements.

**Key words:** road engineering; concrete pavement; joint sealant; dynamic shearing strain; dynamic shearing strain rate; base frequency

当前, 混凝土路面接缝填缝料的失黏、脱落破坏是普遍和严重的。由此, 雨水经接缝处入渗并积滞于基层顶面, 在重载车辆重复作用下, 易于引起基层冲刷唧泥, 进而导致路面板断裂、破碎<sup>[1]</sup>。究其原因, 在于混凝土路面设计使用时, 对接缝填缝料(通称为接缝填缝料)的重要性认识不足, 对其性能要求把握不够。迄今, 国内外开发了多种接缝嵌缝材料(如硅酮类、聚氨酯类、橡胶沥青类或改性沥青类等)。而路面设计规范对接缝填缝料的力学性能要求为: 填缝料应与混凝土接缝槽壁黏结力强, 回弹性好, 适应混凝土板收缩, 不溶于水, 不渗水, 高温时不流淌, 低温时不脆裂、耐老化, 有一定抵抗砂石嵌入的能力, 便于施工操作的材料<sup>[2]</sup>。显然, 规范对填缝料剪切性能缺乏明确规定。文献[3]采用静力模型对接缝填缝料的应力进行了系统分析。文献[4]进一步讨论了剪切频率对接缝填缝料性能的影响, 但剪切应变幅值仍是基于静力模型结果, 混凝土路面接缝填缝料动力性状(车辆驶经接缝时的高速剪切)未能很好反映。

鉴于此, 采用文献[5]建立的车-路耦合动力学模型, 系统分析车辆速度和悬挂系上部质量、接缝宽度、接缝剪切刚度、地基模量、地基阻尼和地基弱化指数(局部脱空)等因素对接缝填缝料剪切应变、剪切应变率的影响规律, 显得十分必要。

## 1 车-地基梁耦合模型及求解

研究表明,接缝两侧动态特性可用地基梁模型来较好地模拟<sup>[5-7]</sup>. 车-地基梁模型的耦合动力学方程、边界条件、初值条件、求解方法、积分时间步见文献<sup>[5]</sup>. 1/4 车-地基梁耦合动力学模型见图 1.

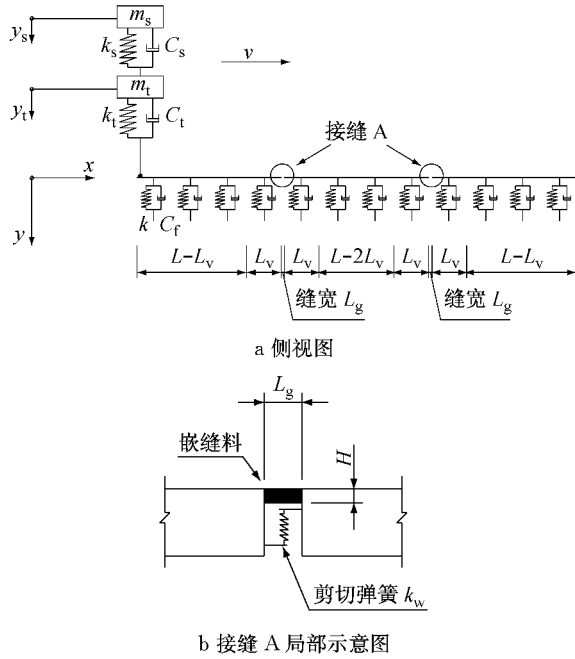


图 1 车-地基梁耦合动力学模型

Fig.1 Vehicle-foundation beam coupling dynamics model

图 1 中,  $m_s, m_t$  分别为车辆悬挂系上部及轮胎的质量;  $C_s, C_t$  分别为车辆悬挂系及轮胎的阻尼系数;  $k_s, k_t$  分别为车辆悬挂系及轮胎的弹簧刚度;  $h$  为混凝土梁的厚度;  $v$  为车辆匀速行驶的速度;  $L$  为单块混凝土梁的梁长;  $L_v$  为接缝附近梁下脱空区(地基弱化)的长度;  $L_g$  为接缝缝宽;  $H$  为接缝填缝料高度;  $k_w$  为接缝剪切刚度;  $C_f$  为混凝土梁的阻尼系数;  $k$  为地基反应模量。

## 2 接缝填缝料剪切应变及剪切应变率

车辆以一定速度驶经接缝,车辆和路面板产生随位置(时间)变化的耦合振动,接缝填缝料剪切应变必然是动态变化的. 考虑到填缝料自身模量及质量较小,分析时忽略其对车-地基梁的影响,接缝填缝料剪切应变和剪切应变率的近似计算式为

$$\gamma = \frac{\Delta W}{L_g} = \frac{W_1 - W_r}{L_g}, \quad \gamma' = \frac{d\gamma}{dt} \quad (1)$$

式中:  $W_1, W_r$  分别为车辆以一定速度驶经接缝时两

侧的动态弯沉值。

影响接缝填缝料动态剪切性状的因素主要包括车辆、路面结构和路基参数. 车辆参数包括悬挂系上部质量、轮胎质量、悬挂系刚度和阻尼,轮胎刚度和阻尼等. 路面结构涉及路面厚度,接缝宽度,接缝剪切刚度等. 路基参数包括地基反应模量、地基阻尼系数、脱空区长度和地基弱化指数等。

对于车辆而言,不同类型车辆(货车、轻型车)的悬挂系、轮胎的参数是不同的. 理论分析表明,接缝填缝料的剪切应变和剪切应变率主要受车辆悬挂系上部质量、路面结构参数和地基参数影响;同时车辆速度亦是影响因素. 对于接缝填缝料剪切频率,则完全由路面结构和地基参数控制. 基于此,重点考虑货车车辆速度、悬挂系上部质量、路面结构和路基各个参数的影响。

## 3 参数敏感性分析

依据我国常见货车和混凝土路面结构确定计算参数. 货车参数为:  $m_s = 2.5 \sim 7.5 \text{ t}$ ,  $m_t = 440 \text{ kg}$ ,  $k_s = 1 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $k_t = 5 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $C_s = 12 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $C_t = 1.5 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ . 混凝土梁参数为:  $L = 5 \text{ m}$ ,  $B = 1 \text{ m}$ ,  $h = 0.18 \sim 0.30 \text{ m}$ ,  $L_v = 0.5 \text{ m}$ ,  $k = 50 \sim 200 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_f = 5 \sim 5000 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 地基弱化指数  $\lambda_k = \lambda_c = 0 \sim 1$ , 接缝宽度  $L_g = 5 \sim 20 \text{ mm}$ , 接缝剪切刚度  $k_w = 10 \sim 10000 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3}$ , 混凝土密度  $\rho = 2.5 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ , 起点坐标  $x_0 = 0$ . 根据车辆、路面结构和地基参数变化,组合成不同计算工况,见表 1.

### 3.1 车辆速度及悬挂系上部质量影响

车辆速度及悬挂系上部质量变化时,第一个接缝的填缝料剪切应变  $\gamma$ 、剪切应变率  $\gamma'$  随位置  $x$  变化的曲线见图 2 和图 3.

从图 2 和图 3 可见,对于工况 1,车辆速度  $v$  提高,接缝填缝料剪切应变(率)的波动幅度变化不大,但振动衰减步调减慢;悬挂系上部质量增大,接缝填缝料剪切应变(率)的波动幅度成比例增长,但振动衰减步调几乎不变。

表 2 列出了接缝填缝料振动特性参数(接缝剪切应变幅值  $\gamma_{\max}$ 、剪切应变率幅值  $\gamma'_{\max}$  及基频  $f_1$ )。

从表 2 可以看到,对于工况 1,随着车辆速度  $v$  的增大,接缝填缝料剪切应变幅值  $\gamma_{\max}$  呈现逐步下降的趋势,其剪切应变率幅值  $\gamma'_{\max}$  则在某一数值附近波动变化. 接缝填缝料剪切应变率的基频为 85.6 Hz.

表 1 接缝振动特性分析计算工况

Tab.1 Cases for analysis of joint vibrating characteristics

工况	车辆参数			路面参数				地基参数		
	$m_s/t$	$k_s/(MN \cdot m^{-3})$	$k_t/(MN \cdot m^{-3})$	$h/m$	$L_g/mm$	$k_w/(MN \cdot m^{-3})$	$F_t/mm$	$k/(MN \cdot m^{-3})$	$C_t/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$	$\lambda$
1	*	1	5	0.24	10	100	0	100	50	1
2	2.5	1	5	*	10	100	0	100	50	1
3	2.5	1	5	0.24	*	100	0	100	50	1
4	2.5	1	5	0.24	10	*	0	100	50	1
5	2.5	1	5	0.24	10	100	*	100	50	1
6	2.5	1	5	0.24	10	100	0	*	50	1
7	2.5	1	5	0.24	10	100	0	100	*	1
8	2.5	1	5	0.24	10	100	0	100	50	—

注: 标有“\*”栏表示该参数取值变化。

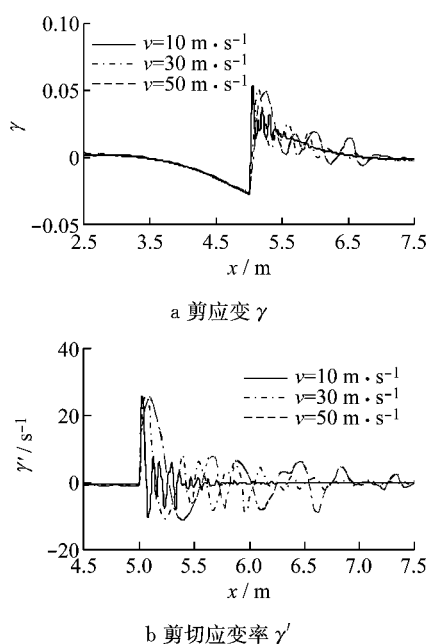


图 2 工况 1 剪切应变(率)  $\gamma, \gamma'-x$  变化曲线 ( $m_s = 2.5 t$ )

Fig.2 Diagrams of  $\gamma, \gamma'-x$  curves for Case 1 ( $m_s = 2.5 t$ )

表 2 不同悬挂上部质量填缝料振动特性参数(工况 1)

Tab.2 Joint sealant vibrating parameters under different  $m_s$  (Case 1)

$v/(m \cdot s^{-1})$	$m_s/t$	$\gamma_{max}$	$\gamma'_{max}/s^{-1}$	$f_1/Hz$
10	2.5	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	
10	5.0	0.097 8	46.78	85.6
30		0.095 3	47.50	
50		0.089 9	46.55	
10	7.5	0.142 5	68.16	85.6
30		0.138 8	69.16	
50		0.130 9	67.70	

### 3.2 路面结构参数影响

路面结构参数包括路面厚度  $h$ , 接缝宽度  $L_g$  和接缝剪切刚度  $k_w$  等。计算分析表明, 上述路面结构

参数变化时, 第一个接缝的填缝料剪切应变  $\gamma$ 、剪切应变率  $\gamma'$  随位置  $x$  变化的曲线与图 2 和图 3 是类似的, 而无需一一绘出。接缝填缝料剪切应变(率)幅值和基频随  $h, L_g$  和  $k_w$  变化的振动特性参数列于表 3、表 4 和表 5 中。

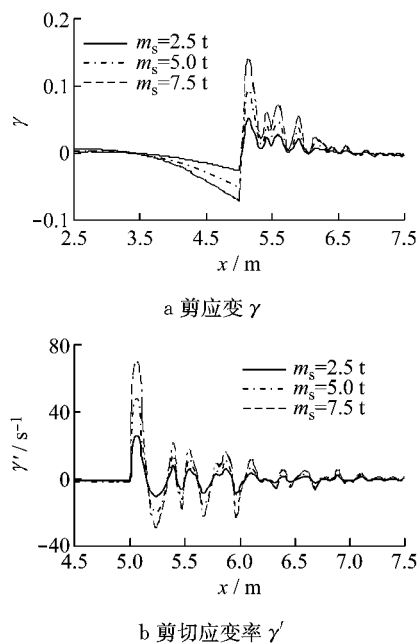


图 3 工况 1 剪切应变(率)  $\gamma, \gamma'-x$  变化曲线 ( $v = 30 m \cdot s^{-1}$ )

Fig.3 Diagrams of  $\gamma, \gamma'-x$  curves for Case 1 ( $v = 30 m \cdot s^{-1}$ )

从表 3—5 易见, 路面板厚度增加, 接缝填缝料剪切应变(率)幅值降低, 而剪切应变率基频先下降后趋于稳定值, 显然, 路面板厚度增加, 接缝填缝料剪切破坏可能性有所下降。接缝宽度增大, 接缝填缝料剪切应变(率)幅值明显下降, 而剪切应变率基频略微降低, 所以, 较大的接缝宽度对接缝填缝料抗剪切破坏是有利的。随着接缝剪切刚度的增大, 接缝填缝料剪切应变(率)幅值大幅下降, 而剪切应变率基

频明显增大,因此,增大接缝剪切刚度可有效降低接缝填缝料的剪切破坏可能性。

表3 不同路面厚度填缝料振动特性参数(工况2)

Tab.3 Joint sealant vibrating parameters under different  $h$  (Case 2)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$h/\text{m}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma'_{\max}/\text{s}^{-1}$	$f_1/\text{Hz}$
10	0.18	0.067 5	36.50	95.6
30		0.064 1	36.30	
50		0.059 5	35.31	
10	0.24	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	
10	0.30	0.045 0	19.60	85.0
30		0.042 8	19.31	
50		0.040 8	19.80	

表4 不同接缝宽度填缝料振动特性参数(工况3)

Tab.4 Joint sealant vibrating parameters under different  $L_g$  (Case 3)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$L_g/\text{mm}$	$\gamma_{\max}$	$\gamma'_{\max}/\text{s}^{-1}$	$f_1/\text{Hz}$
10	5	0.109 1	52.93	86.2
30		0.102 9	50.85	
50		0.097 7	50.50	
10	10	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	
10	20	0.025 7	11.90	85.3
30		0.025 7	12.81	
50		0.024 4	12.60	

表5 不同接缝剪切刚度填缝料振动特性参数(工况4)

Tab.5 Joint sealant vibrating parameters under different  $k_w$  (Case 4)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_w/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_{\max}$	$\gamma'_{\max}/\text{s}^{-1}$	$f_1/\text{Hz}$
10	10	0.096 4	32.90	71.1
30		0.091 0	32.52	
50		0.085 4	32.25	
10	100	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	
10	1 000	0.008 8	11.60	193.9
30		0.009 4	13.95	
50		0.009 3	13.80	

### 3.3 地基参数影响

地基参数包含地基模量  $k$ , 地基阻尼系数  $C_f$  和地基弱化指数  $\lambda$  等。同样, 地基参数变化时, 接缝填缝料剪切应变(率)幅值和基频随  $k$ ,  $C_f$  和  $\lambda$  变化的振动特性参数列于表6、表7和表8中。

从表6—8可以看到, 随着地基反应模量的提高, 接缝填缝料剪切应变幅值下降, 剪切应变率幅值整体呈现降低的趋势, 但略有波动, 而其基频有所增长。基于此, 可以认为地基反应模量对接缝填缝料剪

切破坏的影响不大。地基阻尼系数增大, 接缝填缝料剪切应变(率)幅值及其基频均随之减小, 当地基阻尼系数较小时, 比如  $C_f < 50 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 以上三者变化幅度不大; 当地基阻尼系数较大时, 比如  $C_f > 5 000 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ , 接缝填缝料剪切应变(率)幅值及其基频下降明显。随着地基弱化指数增大, 接缝填缝料剪切应变幅值下降, 剪切应变率幅值呈轻微波动减小的趋势, 而其基频有所上升。

表6 不同地基反应模量填缝料振动特性参数(工况5)

Tab.6 Joint sealant vibrating parameters under different  $k$  (Case 5)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$k/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_{\max}$	$\gamma'_{\max}/\text{s}^{-1}$	$f_1/\text{Hz}$
10	50	0.063 8	27.40	79.6
30		0.060 8	26.63	
50		0.057 5	26.65	
10	100	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	
10	200	0.041 5	23.60	104.6
30		0.040 4	23.86	
50		0.038 4	23.53	

表7 不同地基阻尼系数填缝料振动特性参数(工况6)

Tab.7 Joint sealant vibrating parameters under different  $C_f$  (Case 6)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_f/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	$\gamma_{\max}$	$\gamma'_{\max}/\text{s}^{-1}$	$f_1/\text{Hz}$
10	50	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	
10	500	0.027 1	17.70	71.1
30		0.024 0	17.53	
50		0.021 3	16.83	
10	5 000	0.012 7	5.60	6.0
30		0.004 2	6.00	
50		0.003 4	5.60	

表8 不同地基弱化指数填缝料振动特性参数(工况7)

Tab.8 Joint sealant vibrating parameters under different  $\lambda$  (Case 7)

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda$	$\gamma_{\max}$	$\gamma'_{\max}/\text{s}^{-1}$	$f_1/\text{Hz}$
10	0	0.086 8	30.86	73.8
30		0.081 9	30.11	
50		0.075 4	29.80	
10	0.5	0.066 3	28.08	81.3
30		0.062 4	27.33	
50		0.059 4	27.45	
10	1.0	0.053 5	25.58	85.6
30		0.051 6	25.69	
50		0.048 9	25.25	

## 4 接缝填缝料剪切试验幅值和基频

迄今为止, 世界各国开发了多种接缝填缝料(硅

酮类、聚氨酯类、橡胶沥青类或改性沥青类等),也提供了一些力学性能参数,如模量、最大拉伸应变等<sup>[6-7]</sup>,但都是基于静态测试的结果.实际路面接缝填缝料是以动态剪切破坏为主的.当前,无论是接缝填缝料测试方法,或是其力学性能指标,均难以反映实际路面接缝填缝料的动态剪切性能.

从以上参数敏感性分析可知,接缝填缝料剪切应变和剪切应变率的变化范围较大,剪切应变幅值  $\gamma_{\max}=0.003\ 4\sim 0.142\ 5$ ,而剪切应变率幅值  $\dot{\gamma}_{\max}=5.60\sim 69.16\ \text{s}^{-1}$ .对于实际路面板接缝填缝料,由于地基反应模量较高,上述理论分析上限相应降低很多,因此,在实验室进行接缝填缝料剪切试验时,接缝填缝料剪切应变、剪切应变率幅值应涵盖  $\gamma_{\max}=0.003\sim 0.050$ ,  $\dot{\gamma}_{\max}=5\sim 25\ \text{s}^{-1}$ ,以便测试得到的接缝填缝料性能参数与实际路面结构的相近.

接缝填缝料剪切应变率基频  $f_1$  变化范围较大,为  $6.0\sim 193.9\ \text{Hz}$ ,若考虑到实际路面接缝传荷较差的情况,则基频  $f_1$  的变化范围落在  $5\sim 100\ \text{Hz}$  之间.因此,接缝填缝料剪切试验频率可控制在  $5\sim 100\ \text{Hz}$  之间,保证试验测得的接缝填缝料性能参数符合路面实际情况.

## 5 结论

(1) 接缝填缝料剪切应变、剪切应变率受车辆速度、悬挂系上部质量、路面板厚度、接缝宽度、接缝剪切刚度、地基模量、地基阻尼系数和地基弱化指数等各种因素影响,以上各因素变化时,若地基阻尼系数较小(如  $C_t<50\ \text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ),接缝填缝料剪切应变、剪切应变率随车辆位置  $x$  变化呈现出波动衰减;若地基阻尼系数较大(如  $C_t>5\ 000\ \text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ),则波动性消失.

(2) 对接缝填缝料剪切应变、剪切应变率幅值和基频的分析表明,接缝剪切应变幅值可能在  $0.003\ 4\sim 0.142\ 5$  之间变化,剪切应变率幅值在  $5.60\sim 69.16\ \text{s}^{-1}$  范围内,而基频在  $6.0\sim 193.9\ \text{Hz}$  之间.对于实际路面接缝填缝料,建议接缝填缝料剪切试验的剪切应变、剪切应变率幅值和基频范围分别为  $0.003\sim 0.050$ ,  $5\sim 25\ \text{s}^{-1}$ ,  $5\sim 100\ \text{Hz}$ .

(3) 接缝宽度、接缝剪切刚度和地基阻尼系数对接缝剪切应变、剪切应变率的影响最大,合适的接缝宽度( $8\sim 10\ \text{mm}$ ),较高的接缝剪切刚度和较大的地基阻尼系数可大大减小路面接缝剪切应变(率)幅值,从而有效降低接缝填缝料剪切破坏的可能性.

总之,对于有接缝的水泥混凝土路面,合适的接缝宽度,较大的接缝剪切刚度,路面板下设置高阻尼系数的隔层可有效降低接缝填缝料剪切破坏的可能性,减少雨水通过接缝入渗基层而诱发路面板唧泥、断板和破碎病害.

## 参考文献:

- [1] 谈至明,刘伯莹,唐伯明.等.水泥混凝土路面断板分析与防治技术研究总报告[R].上海:同济大学交通运输工程学院,2005.  
TAN Zhiming, LIU Boying, TANG Boming, et al. General Report (2005): Research on fracture mechanism and cracking prevention & treatment of cement concrete pavements [R]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2005.
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2002.  
Ministry of Transport of PR China. JTG D40—2002 Specification of cement concrete pavement design for highway [S]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [3] 刘焱,王建国,翟荣辉,等.水泥混凝土路面接缝填缝料的应力分析[J].公路,2005(4):95.  
LIU Yan, WANG Jianguo, ZHAI Ronghui, et al. Analysis of stress in joint sealant on concrete pavements [J]. Highway, 2005(4):95.
- [4] 谈至明,孙明伟,李立寒.水泥混凝土路面接缝填缝料的性能[J].交通运输工程学报,2006(9):27.  
TAN Zhiming, SUN Mingwei, LI Lihan. Performance of the joint sealant on concrete pavements [J]. Journal of Transport and Transportation Engineering, 2006(9):27.
- [5] 周玉民,谈至明,刘伯莹.1/4车一路耦合动力学模型研究[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(3):408.  
ZHOU Yumin, TAN Zhiming, LIU Boying. Quarter vehicle—road coupling dynamics models [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(3):408.
- [6] Portland Cement Association. Thickness design for concrete highway and street pavements[S]. Skokie: PCA, 1984.
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide for design of pavement structures[S]. Washington D C: AASHTO, 1993.