

文章编号:1671-6833(2016)06-0048-05

动水压力对钢桥面环氧沥青铺装裂缝扩展影响

钱振东¹, 张 勳¹, 许 静²

(1. 东南大学 智能运输系统研究中心, 江苏 南京 210096; 2. 国家知识产权局 专利局专利审查协作江苏中心, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 钢桥面环氧沥青混凝土铺装发生裂缝病害后, 水渗入裂缝, 病害不断扩展. 研究动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝的扩展作用, 采用 ABAQUS 建立带裂缝的钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型, 模拟不同温度、不同铺装裂缝长度、宽度、深度及数量等条件, 并通过数值分析铺装裂缝尖端的 J 积分值表征裂缝发展趋势. 研究结果表明, 动水压力越大, 铺装裂缝尖端的 J 积分值越大, 动水压力对裂缝扩展的作用越明显; 铺装层温度在 0~30℃ 时, 温度越高, 铺装裂缝尖端的 J 积分值越大, 动水压力对裂缝扩展的作用越明显; 动水压力对裂缝扩展的作用, 受铺装裂缝长度、宽度影响大, 受铺装裂缝深度、纵向裂缝数量影响小; 同一动水压力作用下, 网状裂缝更容易发生裂缝扩展.

关键词: 环氧沥青混凝土铺装; 动水压力; 裂缝尺寸; 裂缝尖端 J 积分; 裂缝扩展

中图分类号: U443.33 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.028

0 引言

环氧沥青混凝土是我国钢桥桥面常用的沥青混凝土铺装材料之一, 其中裂缝病害是钢桥面环氧沥青混凝土铺装的典型病害形式. 当环氧沥青混凝土铺装层开裂后, 雨水渗入裂缝, 在行车荷载的作用下在裂缝内形成动水压力, 不断冲刷铺装层, 引发裂缝扩展进而导致防水粘结层的损害与钢板的腐蚀. 现有研究主要是对普通沥青路面进行动水压力与孔隙水压力的理论推导、现场实测和数值模拟, 得到轮胎在水膜上驶过时产生的动水压力与孔隙水压力的大小. 李志刚等^[1]基于 Hankel 和 Laplace 积分变换, 得到动水压力的轴对称弹性解. 周长红等^[2]对饱和的沥青路面动水压力进行时间和空间分布的计算. 高俊启等^[3-4]通过实测发现, 动水压力随车速度的增大呈几何增长. 董泽蛟等^[5]通过建立饱和沥青路面孔隙水压力模型, 对水作用的力学机理进行研究. 而对钢桥面上孔隙率较小的环氧沥青混凝土铺装表面动水压力及其对沥青铺装裂缝扩展的研究尚处于起步阶段.

由于钢桥面铺装用环氧沥青混合料的孔隙率

在 1%~3%, 环氧沥青混凝土铺装层结构内部几乎不发生渗水, 但一旦开裂, 在行车荷载作用下, 水在环氧沥青混凝土铺装裂缝内形成动水压力, 容易发生裂缝扩展. 笔者采用数值模拟的方法建立带裂缝钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型, 通过 J 积分有效评价沥青混合料的抗裂性能^[6-7], 计算不同温度、铺装裂缝尺寸及数量等条件下铺装裂缝尖端的 J 积分, 研究动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝的扩展作用.

1 数值分析模型的建立

1.1 带裂缝钢桥面铺装体系模型

笔者采用 ABAQUS 建立钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型, 取局部正交异性板结构模型, 纵桥向取 3 跨(4 块横隔板), 横桥向取 7 个 U 型加劲肋, 如图 1 所示. 肋宽、高、厚、间距分别为 280、280、8、600 mm, 横隔板厚和间距分别为 14.3 mm, 铺装层厚 600 mm, 钢板厚 16 mm, 钢桥面铺装体系模型详细参数如表 1 所示. 根据实际工程的调研情况, 桥面铺装的主要裂缝为横向拉应力控制的纵向裂缝, 位于 U 型加劲肋边顶部铺装层上表面^[8]. 本模型选取钢桥面最常见的纵向

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178114)

作者简介: 钱振东(1969—), 女, 江苏南通人, 东南大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事桥面铺装技术研究及新型沥青路面材料和结构研究, E-mail: qianzd@seu.edu.cn.

裂缝,其横向位置在 U 型加劲肋边顶部铺装层上表面,对裂缝形状进行简化,如图 2(a)所示.采用三点法对钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型进行三维裂缝剖分,钢桥面铺装模型中裂缝尖端的网格划分如图 2(b)所示.

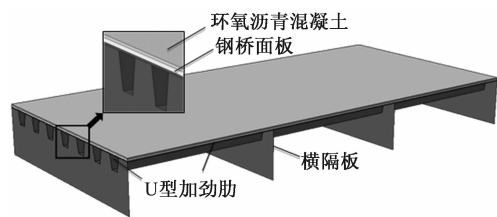


图 1 钢桥面环氧沥青混凝土铺装体系模型
Fig.1 Model of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement

表 1 钢桥面铺装模型参数

钢板参数			环氧沥青混凝土铺装层参数		
弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度/mm	模量/MPa	泊松比
2.1×10^5	0.3	7.8×10^3	30 + 30	1 000	0.25

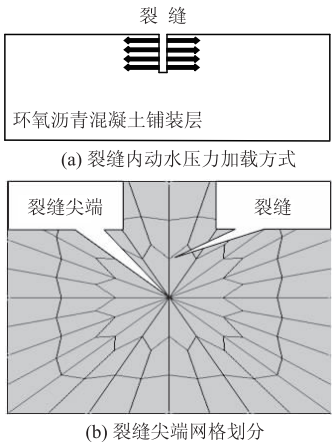


图 2 裂缝的设置
Fig.2 Crack setting

1.2 动水压力荷载作用方式

李宗利等^[9]研究结果表明,裂缝内水压力可作为外荷载施加到结构上.鲁连军等^[10]的研究表明,动水压力在裂缝边缘处以垂直于裂缝边缘的方向为主.对铺装裂缝内动水压力进行简化,动水压力在裂缝处的具体加载方式如图 2(a)所示.

陈昊^[11]对动水压力的实测与计算结果表明,当车辆行驶速度在 40 ~ 100 km/h 变化时,路面动水压力值从 0.087 MPa 到 0.402 MPa 不等.笔者动水压力取 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa 进行计算.

1.3 J 积分计算结果输出

J 积分是弹塑性断裂力学中常用的断裂参

数,用以度量裂纹顶端应力应变场强度,可作为带裂纹弹塑性构件断裂的启裂判据,J 积分值越接近带裂纹构件的临界 J 积分值 J_{IC} ,构件裂纹越容易发生扩展^[12].笔者拟根据不同条件下带裂缝钢桥面铺装体系模型中裂缝尖端 J 积分值的大小,评价动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响程度.

对模型裂缝进行剖分后,在 ABAQUS 软件 interaction 模块 special-crack-assign seam 中对裂缝的长度和宽度进行定义;在 step 模块中将 domain 设为 contour integral,并设置 number of contour 为 3,然后定义裂缝尖端 J 积分的输出;裂缝尖端输出的 J 积分有 3 个,在后处理 dat 文件中读取裂缝尖端的 J 积分并取其平均值^[13].

2 动水压力作用下钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝尖端应力场强度分析

2.1 不同温度条件下 J 积分的变化规律

实测资料显示,由于钢箱梁箱体不通风、散热速度慢,当环境温度为 34 ℃ 时,桥面铺装层及钢板表面温度可达到 65 ℃ 以上;0 ℃ 以下,钢桥面铺装层会出现结冰,不在本文研究范围之内.

陈先华^[14]在不同温度条件下进行了复合梁弯曲响应研究,钢桥面环氧沥青混凝土铺装层模量与温度的对应表如表 2 所示.当铺装层温度大于 35 ℃ 时,环氧沥青混凝土铺装层在复合体系中模量为 200 MPa.

表 2 温度与模量对应表

Tab.2 The relationship between temperature and modulus								
温度/℃	0	5	10	15	20	25	30	35
模量/MPa	4 200	4 050	3 800	3 200	3 000	1 000	600	200

本文研究的铺装层温度范围为 0 ~ 35 ℃,裂缝尺寸为长度 200 mm、深度 30 mm、宽度 2 mm.笔者计算钢桥面铺装裂缝在不同动水压力、温度条件下,裂缝尖端 J 积分的变化规律,分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响,结果如图 3 所示.

由图 3 可知,动水压力越高,铺装裂缝越易于扩展.动水压力为 0.1、0.2 MPa 时,裂缝尖端 J 积分值随温度的升高而增大,温度越高动水压力对裂缝扩展的作用越明显.动水压力为 0.3、0.4 MPa 且在 0 ~ 30 ℃ 时,裂缝尖端 J 积分随温度的升高而变大,温度越高动水压力对裂缝扩展的作

用越明显;温度超过 30 ℃ 时, J 积分达到峰值. 之后裂缝尖端 J 积分减小. 温度为 30 ℃ 时, 即钢桥面环氧沥青铺装层温度在 0 ~ 30 ℃, 动水压力作用导致裂缝尖端 J 积分随着温度升高而增大, 温度越高动水压力对裂缝扩展的作用越明显; 在冬季过后开春季节存在裂缝的铺装层需要做好养护, 抑制裂纹扩展, 铺装层温度超过 30 ℃ 时, 动水压力对裂缝扩展影响的可能性和程度相对复杂.

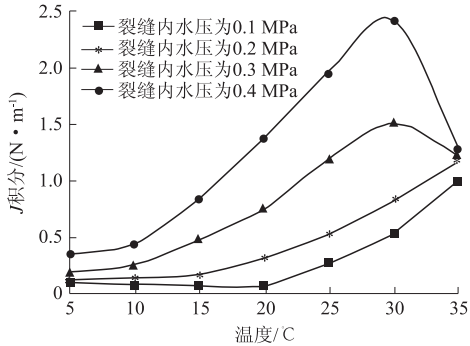


图 3 不同温度下裂缝尖端 J 积分变化曲线图

Fig.3 J integral of crack tip under different temperatures

2.2 不同裂缝尺寸下 J 积分的变化规律

2.2.1 裂缝深度不同时 J 积分的变化规律

钢桥面环氧沥青混凝土铺装层的厚度一般为 50 ~ 60 mm. 根据表 2 选取常温时环氧沥青混凝土铺装层模量为 1 000 MPa, 裂缝长度 200 mm, 裂缝宽度 2 mm, 裂缝深度分别为 10、20、30、40、50 mm, 计算在不同裂缝深度、动水压力作用下裂缝尖端 J 积分, 进而分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响, 结果如图 4 所示.

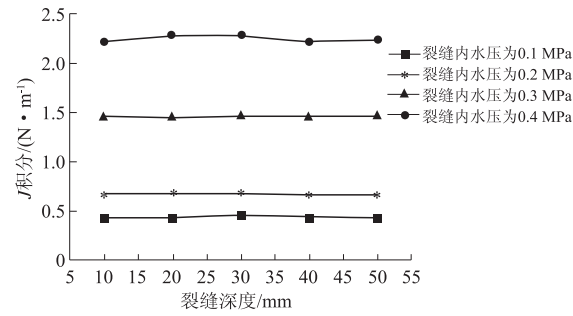


图 4 裂缝尖端 J 积分随裂缝深度变化曲线图

Fig.4 J integral of crack tip under different crack depths

由图 4 可以看出, 同一动水压力作用下, 钢桥面环氧沥青铺装裂缝深度的变化对裂缝尖端 J 积分影响幅度不大, 且裂缝尖端 J 积分都在裂缝深度为 30 mm 时达到最大, 动水压力对裂缝扩展的作用最明显, 故裂缝深度不作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的依据.

2.2.2 裂缝长度不同时 J 积分的变化规律

根据实际调研可知, 钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝的长度一般在 200 mm 以内^[13], 根据表 2 选取常温时环氧沥青混凝土铺装层模量为 1 000 MPa, 裂缝深度 20 mm, 裂缝宽度 2 mm, 裂缝长度分别为 30、50、100、150、200 mm, 计算在不同裂缝长度、动水压力作用下裂缝尖端 J 积分, 进而分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响, 结果如图 5 所示.

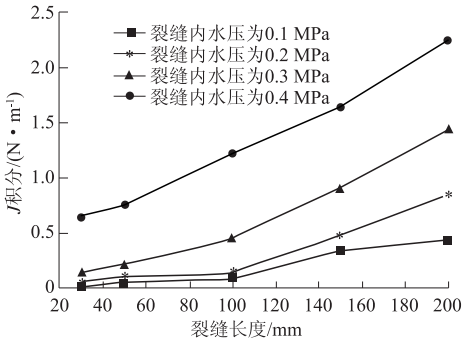


图 5 裂缝尖端 J 积分随裂缝长度变化曲线图

Fig.5 J integral of crack tip under different crack lengths

由图 5 可知, 同一动水压力作用下, 裂缝尖端 J 积分随裂缝长度的增加近似呈线性增长; 且不同动水压力下, J 积分随裂缝长度增大而增大的趋势基本一致, 裂缝长度越大动水压力对裂缝扩展的作用越明显. 裂缝长度可作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的指标.

2.2.3 裂缝宽度不同时 J 积分的变化规律

根据实际调研, 钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝宽度在 1 ~ 5 mm 左右^[15], 根据表 2 选取常温时环氧沥青混凝土铺装层模量为 1 000 MPa, 裂缝长度 200 mm, 深度 20 mm. 选取裂缝宽度分别为 1、2、3、4、5 mm, 计算在不同裂缝宽度、动水压力作用下裂缝尖端 J 积分, 进而分析动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响, 结果如图 6 所示.

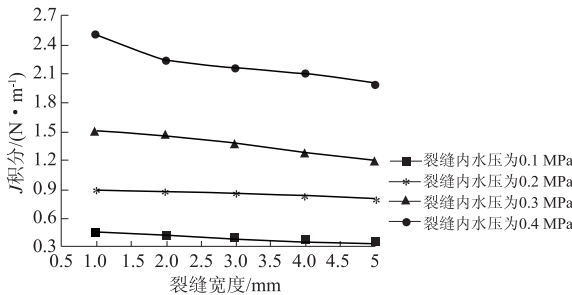


图 6 裂缝尖端 J 积分随裂缝宽度变化曲线图

Fig.6 J integral of crack tip under different crack widths

由图 6 可以看出,同一动水压力下裂缝尖端 J 积分随裂缝宽度的增大而变小,动水压力为 0.3、0.4 MPa 时,裂缝宽度从 1 mm 增大到 5 mm,裂缝尖端 J 积分分别减小了 25.1% 和 21.2%,此时裂缝宽度的变化对动水压力下裂缝扩展的影响较明显. 动水压力为 0.1、0.2 MPa 时, J 积分随裂缝宽度增加而减小的幅度在 5% 左右. 因此裂缝宽度应作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的依据.

分析随裂缝宽度的增大时 J 积分变化规律. 裂缝内动水压力为 0.1 MPa, 铺装裂缝宽度为 1 mm 情况下, 铺装层表面横向拉应力云图如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 铺装层表面最大横向拉应力 0.098 MPa, 位于裂缝长度方向的两端. 经计算, 裂缝宽度为 2、3、4、5 mm 时, 铺装层表面最大横向拉应力也都出现在裂缝的两端, 分别为 0.102、0.116、0.118、0.127 MPa.

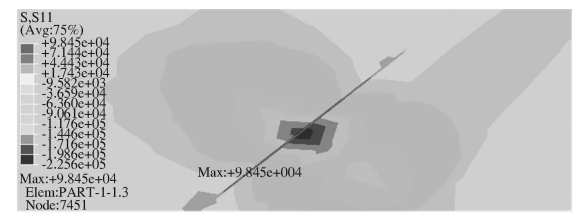


图 7 铺装层表面拉应力云图

Fig. 7 Cloud graph of pavement surface tensile stress

综上所述,铺装裂缝宽度增加时,铺装层表面最大横向拉应力均出现在裂缝的两端并逐渐增大,且裂缝尖端 J 积分值逐渐减小. 即铺装裂缝宽度增加时,动水压力易使裂缝向长度方向扩展,且动水压力作用下裂缝向深度方向扩展的趋势变小;铺装裂缝宽度越小,若裂缝内动水压力越大,动水压力越容易使铺装裂缝沿深度方向发生扩展,铺装裂缝越容易发展为穿透型裂缝.

2.3 多条裂缝情况下 J 积分的变化规律

钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝与裂缝之间会相互影响,根据表 2 选取常温时铺装层模量为 1 000 MPa,裂缝长度 200 mm,深度 30 mm,宽度 2 mm. 裂缝组合为:①两条相距为 70 mm 的平行纵向裂缝;②三条两两相距为 70 mm 的平行纵向裂缝;③两条相距为 70 mm 的平行纵向裂缝,并且在纵向拉应力集中位置处增加一条横向裂缝. 分别计算裂缝尖端 J 积分,并与单条裂缝计算结果相比较,分析不同裂缝宽度、动水压力下动水压力对钢桥面环氧沥青混凝土铺装裂缝扩展的影响,结果如表 3 所示.

表 3 不同种类裂缝组合时 J 积分值

Tab. 3 J integral under different kinds of crack combinations $N \cdot m^{-1}$

裂缝组合	动水压力/MPa			
	0.1	0.2	0.3	0.4
单条纵向裂缝	0.435	0.621	0.847	2.214
两条纵向裂缝	0.437	0.623	0.849	2.220
三条纵向裂缝	0.438	0.624	0.853	2.225
两条纵向,一条横向裂缝	0.455	0.628	0.854	2.235

由表 3 可以看出,纵向裂缝数量越多,裂缝尖端 J 积分越大,但变化幅度较小,这说明纵向裂缝的数量不大影响动水压力对裂缝扩展的作用;但当铺装层出现横向裂缝时, J 积分值比同等数量纵向裂缝情况下的 J 积分值大,这说明动水压力作用下网状裂缝更容易发生裂缝扩展.

3 结论

(1)钢桥面环氧沥青铺装层温度在 0 ~ 30 ℃ 范围内时,动水压力作用导致裂缝尖端 J 积分随着温度升高而增大,温度越高动水压力对裂缝扩展的作用越明显,在冬季过后开春季节存在裂缝的铺装层需要做好养护,抑制裂纹扩展;铺装层温度超过 30 ℃ 时,动水压力对裂缝扩展影响的可能性和程度相对复杂.

(2)钢桥面环氧沥青铺装层裂缝深度的变化对裂缝尖端 J 积分的影响幅度较小,裂缝深度为 30 mm 时,动水压力对裂缝扩展的作用最明显;裂缝长度越大,动水压力对裂缝扩展的作用越明显;裂缝宽度增加时,裂缝易向长度方向扩展;裂缝宽度越小,裂缝内动水压力越大,动水压力越容易使裂缝沿深度方向发生扩展,裂缝越容易发展为穿透型裂缝.

(3)裂缝长度和宽度可作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的指标,而裂缝深度不适合作为评价钢桥面环氧沥青混凝土铺装层养护时机的指标.

(4)纵向裂缝的数量变化时,动水压力对裂缝扩展的作用变化不明显;而动水压力作用下网状裂缝更容易发生裂缝扩展.

参考文献:

[1] 李志刚, 邓小勇. 动载作用下沥青路面内部孔隙水压力的轴对称弹性解[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 804 - 810.

[2] 周长红, 陈静云, 王哲人, 等. 沥青路面动水压力计算及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然

- 科学版), 2008, 39(5): 1100 - 1104.
- [3] 高俊启, 盛余祥, 张世铎, 等. 动水压力作用下沥青路面渗水量影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(2): 266 - 270.
- [4] 姜旺恒, 张肖宁, 李智. 基于动水压力模拟试验的沥青混合料水损坏力学机理[J]. 中国公路学报, 2011, 24(4): 21 - 25.
- [5] 董泽蛟, 谭忆秋, 曹丽萍, 等. 水-荷载耦合作用下沥青路面孔隙水压力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1614 - 1617.
- [6] 刘敬辉, 王端宜, 刘宇. 采用J积分对沥青混合料抗裂性能进行评价[J]. 固体力学学报, 2010, 31(1): 16 - 22.
- [7] 刘栋, 李立寒. 沥青混合料抗裂性能评价指标的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012(4): 503 - 507.
- [8] 钱振东, 罗剑, 敬森森. 沥青混凝土钢桥面铺装方案受力分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 61 - 64.
- [9] 李宗利, 任青文, 王亚红. 岩石与混凝土水力劈裂缝内水压分布计算[J]. 水力学报, 2005, 36(6): 656 - 671.
- [10] 鲁连军, 孙逢春, 安申法, 等. 水力裂缝内流场分布的有限元分析[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(1): 27 - 30.
- [11] 陈昊. 路面动水压力光纤传感测量与模拟分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学道路与铁道工程, 2009.
- [12] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.
- [13] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- [14] 陈先华. 基于复合梁的钢桥面铺装层疲劳特性研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2006.
- [15] 钱振东, 何长江. 钢桥铺面裂缝快速修复材料性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(2): 255 - 259.

The Influence of Hydrodynamic Pressure on the Propagation of Steel Bridge Deck Epoxy Asphalt Concrete Pavement Crack

QIAN Zhendong¹, ZHANG Meng¹, XU Jing²

(1. Research Center of Intelligent Transportation System, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Patent Examination Cooperation Jiangsu Center of the Patent Office Ispo, Suzhou 215000, China)

Abstract: After cracks appear on steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement, the water would seep into cracks which would lead to crack propagation. This paper studied the impact of hydrodynamic pressure on the propagation of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement crack. ABAQUS was utilized to build a model of steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement with crack. The J integral of pavement crack under different temperatures, different pavement crack widths, different pavement crack lengths, different pavement crack depths and different number of pavement cracks were calculated. The impact of hydrodynamic pressure on steel bridge deck epoxy asphalt concrete pavement crack propagation was discussed. The results indicated that when hydrodynamic pressure increased, the J integral of pavement crack tip increased, and the effect of hydrodynamic pressure on crack propagation was more obvious. When the temperature was within the range of 0°C to 30°C , the increase of temperature would lead to the increase of J integral of pavement crack tip and the effect of hydrodynamic pressure on crack propagation would be more obvious. The effect of hydrodynamic pressure on the crack propagation changed obviously under different crack lengths and widths, while the effect of hydrodynamic pressure on the crack propagation changed unobviously under different crack depths and different number of longitudinal crack. Pattern cracking was easy to propagate under the same hydrodynamic pressure.

Key words: epoxy asphalt concrete pavement; hydrodynamic pressure; size of crack; J integral of crack tip; crack propagation