

文章编号: 1001-1455(2007)03-0217-06

新型混凝土桥面铺装材料的冲击力学性能*

刘逸平¹, 黄小清¹, 汤立群¹, 罗立峰²

(1. 华南理工大学交通学院, 广东 广州 510640;

2. 广东省公路管理局, 广东 广州 510075)

摘要: 利用大尺寸 Hopkinson 压杆对新型混凝土桥面铺装材料——钢纤维增强聚合物改性混凝土 (steel fiber reinforced and polymer modified concrete, SFRPMC) 进行了冲击实验, 并且在相同基准配合比下, 与普通混凝土、钢纤维混凝土的冲击性能进行了对比。观察了不同打击速度下三种材料的破坏形态, 得到了在不同应变率下的应力应变关系, 比较了三种材料的应变率敏感性, 最后从机理上分析了掺加钢纤维和聚合物对混凝土材料冲击力学性能的影响。结果表明, 钢纤维增强聚合物改性混凝土材料具有良好的冲击韧性, 是一种理想的混凝土桥面铺装材料。

关键词: 固体力学; 冲击力学性能; Hopkinson 压杆; 钢纤维增强聚合物改性混凝土

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引 言

混凝土桥面铺装通常没有结构性的目的, 主要用于满足行车安全舒适的要求和提高桥面的使用寿命, 桥面铺装与桥梁形成一个整体, 共同承受载荷和抵抗变形。目前混凝土桥面多采用刚性铺装, 铺装材料主要有普通水泥混凝土、聚合物水泥混凝土、纤维混凝土等。普通水泥混凝土的抗压强度较高, 但抗拉、抗弯、抗冲击及韧性较差; 聚合物水泥混凝土具有较好的粘结性、耐久性、耐磨性, 抗弯性能和抗压性能较差; 钢纤维混凝土具有优良的抗拉、抗弯、抗压性能, 抗冲击、抗疲劳、韧性和耐久性等也有较大提高^[1], 但对阻止混凝土初裂的贡献不大。大量实验表明^[2], 钢纤维混凝土的破坏特征是大量的钢纤维在断裂面被拔出, 而不是被拉断, 因此钢纤维与混凝土基体的粘结强度是影响钢纤维混凝土增强效果的主要因素之一。要进一步改善这种材料的抗裂、阻裂性能, 提高其断裂韧性, 可以通过改变钢纤维的形状^[3-4], 提高水泥标号^[5]等方法改善钢纤维和混凝土基体的界面性能, 增加两者之间的粘结强度, 提高钢纤维在混凝土基体中的抗滑移和抗拔能力。罗立峰等^[6]在进行大量室内实验和现场实验的基础上提出了一种适用于水泥混凝土桥面铺装的新型材料——钢纤维增强聚合物改性混凝土, 实验表明, 与钢纤维混凝土 (SFRC) 相比, SFRPMC 的抗压强度与 SFRC 相差不大, 而抗折、劈裂强度和干缩、韧性及粘结等性能得到了显著的改善。

桥面铺装在其服役期间通常承受随机或周期性的冲击荷载的作用。因此, 研究桥面铺装材料的动力学性能有重要的意义。已有对钢纤维混凝土进行的动态实验及其本构关系的研究^[7-11]证明了钢纤维混凝土比普通混凝土具有更优良的动力学性能。由于 SFRPMC 是一种新型材料, 其冲击性能并不清楚, 本文中拟针对该材料在冲击条件下的力学响应进行实验研究。

2 实验方案

2.1 实验系统及实验方案

实验是在中国科学技术大学材料力学行为和设计中国科学院重点实验室的大尺寸 Hopkinson 压

* 收稿日期: 2006-02-08; 修回日期: 2006-02-14

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (05006591)

作者简介: 刘逸平 (1974—), 男, 博士, 讲师。

杆实验系统上进行的(见图 1)。该系统在试件与入射杆之间加设了万向头,以使试件受力均匀,减小接触不良导致的误差;在入射杆的受打击端加设波形整形器,将入射波由矩形波改造成三角波,以消除高频振荡,拉长上升沿,改善加载波的质量^[12]。对于三种不同的混凝土桥桥面铺装材料进行了 3 组不同应变率的实验,每组试件数目为 5 个。为更好了解 SFRPMC,对 SFRPMC 还加多了 1 组应变率实验。

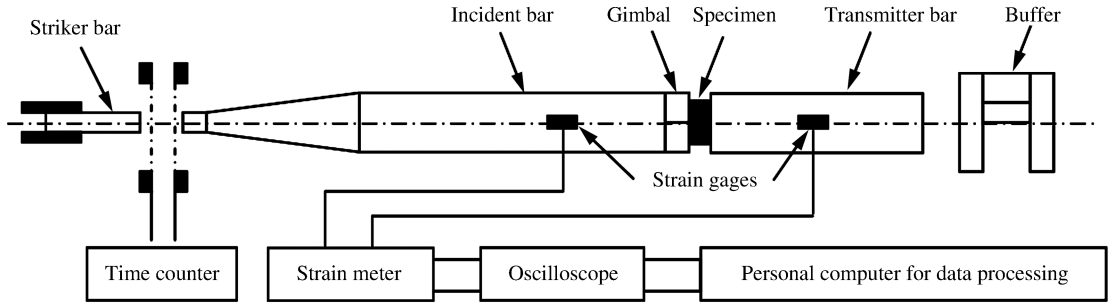


图 1 直锥变截面 SHPB 实验装置图

Fig. 1 Schematic of right cone SHPB setup

2.2 试件

三种不同材料的试件尺寸都为 $\varnothing 70.4 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,两端面不平行度小于 0.02 mm 。三种材料的基准配合比 $m_{\text{水泥}} : m_{\text{碎石}} : m_{\text{砂}} : m_{\text{水}} = 1 : 2.23 : 1.82 : 0.4$,钢纤维混凝土中钢纤维掺量体积比为 1% ,钢纤维增强聚合物改性混凝土中钢纤维掺量为 1% ,聚灰比为 5% 。三种材料的试件编号:普通混凝土(PC),钢纤维混凝土(SFRC),钢纤维增强聚合物改性混凝土(SFRPMC)。

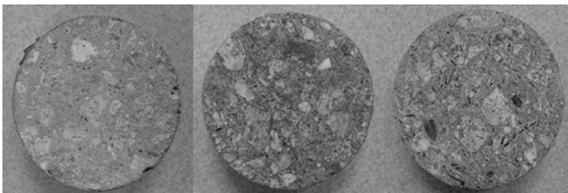
试件制作采用的原材料为广州石井水泥厂生产的 425 普通硅酸盐水泥;砂为河砂,中砂;碎石采用人工轧制花岗岩碎石;拌和水为自来水;钢纤维为扭曲型钢纤维,长度为 32 mm ,等效直径为 0.64 mm ,长径比为 50 ;聚合物采用水泥改性专用丁苯乳胶乳液。

3 实验结果及分析

3.1 试件破坏情况

在实验中选用了三种不同的冲击速度: $10.9, 20.8$ 和 27.4 m/s 。对三种材料试件在各种冲击速度下的破坏现象进行观察发现:当冲击速度为 10.9 m/s 时,冲击完成后 PC、SFRC、SFRPMC 三种试件都表现完好,如图 2(a)。当冲击速度增加到 20.8 m/s 时,PC 试件完全粉碎,SFRC 和 SFRPMC 试件虽然都出现了明显的破坏,试件边缘有粉碎性开裂,但仍能保留基本形状,而且 SFRPMC 试件保留部分比 SFRC 较大,碎裂程度比 SFRC 小,且 SFRPMC 试件的残余部分中的裂纹比 SFRC 试件中的小且少,如图 2(b)。冲击速度为 27.4 m/s 时,所有 PC 和 SFRC 试件都完全粉碎,而 5 个 SFRPMC 试件中有 3 个完全粉碎,有 2 个试件的中央部分保留下来了,剩余部分约占试件总体积的 $1/3$ 。为了观测 SFRPMC 材料的临界破碎情况,选取冲击速度为 17.3 m/s 进行了一组试件的实验,在此冲击速度下,SFRPMC 试件几乎没有损坏,只有个别试件在边缘处出现明显的宏观裂缝,如图 2(c)。从实验结果可以看出在高速冲击条件下,SFRPMC 材料有很好的冲击韧性。

(a) 10.9 m/s

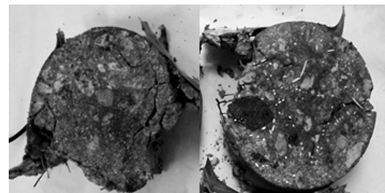


PC

SFRC

SFRPMC

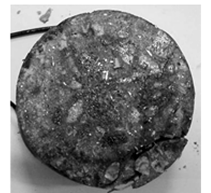
(b) 20.8 m/s



SFRC

SFRPMC

(c) 17.3 m/s



SFRPMC

图 2 不同冲击速度冲击完成后试件的破坏现象

Fig. 2 Damage phenomena of specimens after impact under different impact velocities

3.2 应变率特性

对于混凝土材料,已有研究^[8,13-15]表明,混凝土材料具有较明显的应变率效应,本次实验结果也证实了这一点。三种混凝土材料都具有敏感的应变率效应,但从实验的情况来看,在相同的冲击速度下三种材料表现出来的应变率并不相同,三种材料的应变率随冲击速度的变化情况如图 3 所示。从图 3 中可以看出,为了获得相近的平均应变率 50 s^{-1} ,三种材料中,PC 需采用在 27.4 m/s 的冲击速度(得到的平均应变率为 56 s^{-1}),SFRC 需要 20.8 m/s 的冲击速度(得到的平均应变率为 54 s^{-1}),而 SFRPMC 只需要 17.3 m/s 的冲击速度(得到的平均应变率为 50 s^{-1})。

由图 3 来看,PC 和 SFRC 的应变率随冲击速度的提高几乎呈线性增大,而 SFRPMC 的应变率先出现一个比较快的增长,但冲击速度进一步提高时,应变率的增长趋于平缓。而且在相同的冲击速度条件下,SFRC 的应变率比 PC 高,呈现出比 PC 强的变形能力。相对而言 SFRPMC 的平均应变率比 SFRC 和 PC 的都高,说明了聚合物的加入能进一步提高钢纤维混凝土的变形能力。

3.3 应力应变关系

图 4 为 SFRPMC 试件在冲击速度为 27.3 m/s 时的实验记录波形,由于在撞击杆和入射杆之间添加了 $\varnothing 12 \text{ mm}$ 的铜片,入射波为三角形,而且由于试件端面离入射杆和输出杆上贴的应变片距离不同(分别为 0.91 和 0.46 m),因此透射波比反射波先行到达。

三种材料的应力应变关系如图 5 所示,各材料的应力峰值随应变率的变化则如图 6 所示。从图 5、图 6 可以知道,在低应变率情况下,三种材料应力应变曲线的斜率比较接近,而三种材料的峰值应力中 SFRC 的最大,SFRPMC 的次之,PC 的最低。随着应变率的提高,PC 和 SFRC 应力应变曲线的斜率相差不大,但都明显高于 SFRPMC 的,而峰值应力则仍是 SFRC 的最大,PC 的高过 SFRPMC 的。随着应变率增加,三种材料的峰值应力都有显著的提高,但在相同的冲击速度下,SFRPMC 的峰值应力较 PC 和 SFRC 的低,应变率进一步提高,PC 的应力应变曲线的斜率明显变成最大,SFRC 的其次,SFRPMC 的最小,峰值应力的高低次序没有改变。

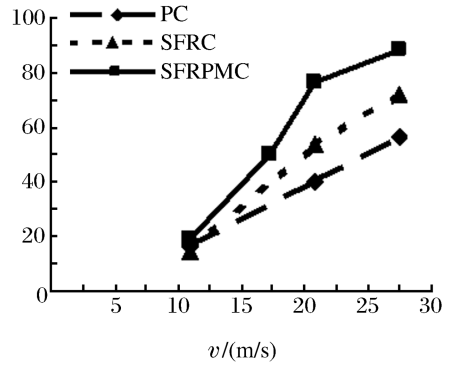


图 3 冲击速度和应变率的关系

Fig. 3 Relation between impact velocity and strain rate

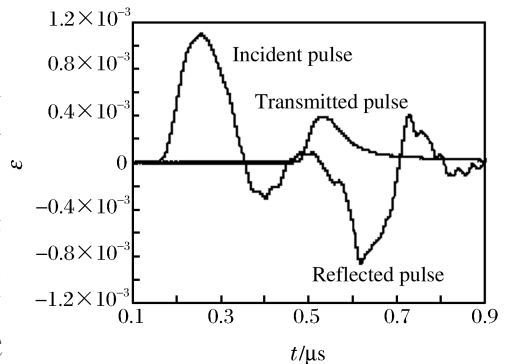


图 4 实验记录波形

Fig. 4 Recorded wave profiles

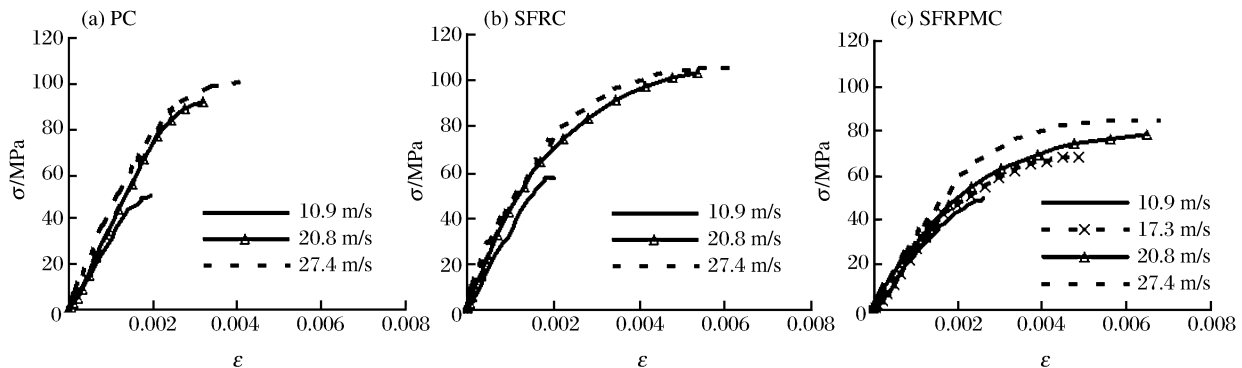


图 5 三种材料在不同冲击速度下的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain relations of three materials under different impact velocities

从图 5 可以看出,当冲击速度较低时(10.9 m/s),三种材料的峰值应力相差并不明显,但是相对而言 SFRPMC 在应力峰值点的应变较大,说明其变形能力较强,有较好的能量吸收特性。随着冲击速度的增大,SFRPMC 在应力峰值点的应变较 SFRC、PC 的分别高出 16.7%和 74%,能量吸收能力与 SFRC 差不多(以 20.8 m/s 的冲击情况为例,SFRPMC、SFRC 和 PC 三者的单位体积吸收的能量分别是 17.9、18.8 和 11.9 kJ/m³),但考虑到在应力峰值后 SFRC 的试件基本破碎,而 SFRPMC 试件大部分完好,即在过了应力峰值点后 SFRPMC 试件依然有一定的能量吸收特性,因此相对而言,三种材料中 SFRPMC 的能量吸收特性最好。

综合所述,SFRPMC 材料的缓冲性能比其他两者好,具有更好的变形性能和能量吸收性能。

3.4 机理分析

作为桥面铺装材料,不需要很高的抗冲击强度,但需要有很好的冲击韧性,以保障在冲击条件下能有效地降低冲击荷载,减少材料的破坏。从上面的实验结果可以看出,钢纤维增强聚合物改性混凝土(SFRPMC)具有良好的冲击韧性。另外,残余试件的破碎和裂纹的分布情况都反映了 SFRPMC 的优越性。

混凝土材料由于其抗拉强度低,而且在凝结过程中收缩导致大量的微裂纹和微孔洞存在于混凝土体中,其阻裂性能很差,在冲击载荷作用下,微裂纹的扩展遇到的阻碍较小,扩展速度较快,微裂纹易相互连接形成宏观贯穿裂缝,而且新的微裂纹在混凝土体内也较易生成、扩展,形成新的裂纹系,呈现出明显的脆性材料的特征。SFRC 和 SFRPMC 由于乱向钢纤维的掺入,在微裂纹之间形成了一种桥联作用,抑制了裂纹的发生和发展,材料在宏观上表现出一定的塑性特征。图 7(a)是基体中未掺入乳胶时的情况,钢纤维表面显得光滑整洁;纤维与水泥砂浆结合不密实。图 7(b)是基体中掺入乳胶时的情况,钢纤维表面显得很粗糙,表面粘附有基体,界面处钢纤维与基体形成一体。由于掺入了聚合物,改善了钢纤维和混凝土基体之间的粘结性能,提高了韧性,使得钢纤维不易被拉出,从而有效地阻止了裂纹的产生和扩展。同时,聚合物本身具有粘性和柔性,形成的薄膜结构使得材料的延性更大,能量吸收性能更好。在相同的冲击速度条件下,达到相同的应变,SFRPMC 材料试件内的应力最小。而钢纤维的加入又有助于弥补因聚合物加入而导致的冲击强度的降低,确保其基本的冲击强度。

(a) Without polymer



(b) With polymer

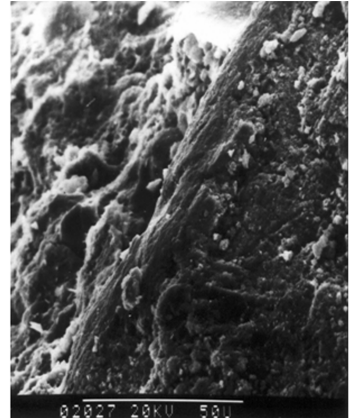


图 7 钢纤维表面 SEM 照片

Fig. 7 The SEM photograph of the steel fiber

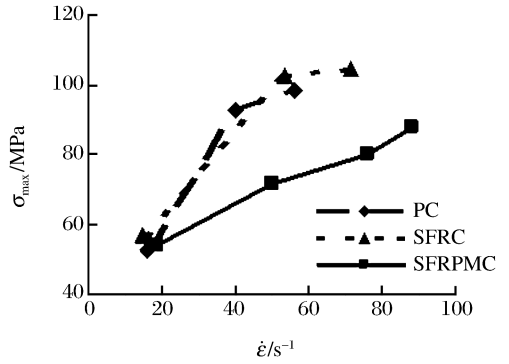


图 6 峰值应力与应变率的关系

Fig. 6 Relation between the maximum stress and strain rate

4 结 论

通过大截面 SHPB 系统对三种不同的混凝土桥面铺装材料的冲击实验,得到如下初步结论:

(1)在冲击速度不断提高的过程中,PC 材料试件首先发生粉碎性破坏,SFRC 和 SFRPMC 则需要更高的冲击速度才能发生破碎性破坏,而且从冲击完成后保留部分的情况来看,SFRPMC 具有更好的形状保持能力。

(2)三种混凝土桥面铺装材料都具有应变率敏感性,SFRPMC 由于掺加了聚合物,改善了材料的抗冲击性能,在相同的应变率情况下,SFRPMC 试件的峰值应力比 PC 和 SFRC 的低得多,应变率强化特征不如 PC 和 SFRC 的显著。

(3)在相同的冲击速度下,SFRPMC 的应变率较 PC 和 SFRC 的高,峰值应力比 PC 和 SFRC 的明显低,但达到峰值应力的应变比其他两者大,表现出良好的变形性能。三种材料达到相同应变时,SFRPMC 材料的应力最小。

(4)由于掺入了聚合物,改善了 SFRPMC 中钢纤维和混凝土基体之间的粘结性能,有效抑制了裂纹的发生和发展,提高了材料的延性。相对 SFRC 和 PC,SFRPMC 具有更好的减震性能、冲击韧性和能量吸收性能,是一种理想的混凝土桥面铺装材料。

参考文献:

- [1] 赵国藩,彭少民,黄承逵,等. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [2] 罗立峰. 钢纤维增强聚合物混凝土桥面铺装层修筑技术的研究[D]. 广州:华南理工大学,2002.
- [3] Naaman A E, Sujivorakul C. Pull-out mechanisms of twisted steel fibers embedded in concrete[C]// Proceeding of the International Conference on Engineering Developments in Shotcrete. Hobart, Tasmania Australia, 2001:197-203.
- [4] 王志,胡晓波,鲍光玉,等. 异形钢纤维混凝土性能试验研究[J]. 混凝土,2003(11):25-27.
WANG Zhi, HU Xiao-bo, BAO Guang-yu, et al. Experimental study on properties of deformed steel fiber reinforced concrete[J]. Concrete, 2003(11):25-27.
- [5] 龙靖华. 钢纤维与基体界面粘结强度的研究[J]. 合肥工业大学学报,1999,22 增刊:31-34.
LONG Jing-hua. The stick-strength between the steel-fiber and the base-body interface[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1999,22 suppl: 31-34.
- [6] 罗立峰,钟鸣,黄成造. 钢纤维增强聚合物改性混凝土桥面铺装技术[M]. 广州:华南理工大学出版社,2004.
- [7] Dong X L, Chen J Y, Gao P Z, et al. Experimental study on common and steel fiber reinforced concrete under dynamic tensile stress[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004,13(3):254-259.
- [8] 黄旭升,陈江瑛,王礼立. 钢纤维砼的动态本构关系[J]. 四川工业学院学报,2003,22(3):80-82.
HUANG Xu-sheng, CHEN Jiang-ying, WANG Li-li. Dynamic constitution of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Sichun University of Science and Technology, 2003,22(3):80-82.
- [9] 黄旭升,陈江瑛,王礼立. 钢纤维砼的动态损伤演化[J]. 安徽理工大学学报,2003,23(2):17-20.
HUANG Xu-sheng, CHEN Jiang-ying, WANG Li-li. Study on dynamic damage evolution of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 2003,23(2):17-20.
- [10] Lou X, Sun W, Chan Y N. Characteristics of high-performance steel fiber-reinforced concrete subject to high velocity impact[J]. Cement and Concrete Research, 2000,30:907-914.
- [11] Marar K, Eren O, Celik T. Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete[J]. Materials Letters, 2001,47:297-304.
- [12] 孟益平,胡时胜. 混凝土材料冲击压缩试验中的一些问题[J]. 实验力学,2003,18(1):108-112.
MENG Yi-ping, HU Shi-sheng. Some problems in the test of concrete under impact compressive loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003,18(1):108-112.
- [13] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学,2001,18(5):115-118.

- HU Shi-sheng, WANG Dao-rong, LIU Jian-fei. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(5):115-118.
- [14] 胡时胜,王道荣. 冲击荷载下混凝土材料的动态本构关系[J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(3):242-246.
HU Shi-sheng, WANG Dao-rong. Investigation of a detonatively deformable warhead[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(3):242-246.
- [15] 王道荣,胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响[J]. *实验力学*, 2002, 17(1):23-27.
WANG Dao-rong, HU Shi-sheng. Influence of aggregate on the compression properties of concrete under impact [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(1):23-27.

Experimental study on impact behaviors of a new kind of pavement material for concrete bridge deck

LIU Yi-ping^{1*}, HUANG Xiao-qing¹, TANG Li-qun¹, LUO Li-feng²

- (1. *College of Traffic and Communications, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China;*
2. *Guangdong Province Highway Administration Bureau, Guangzhou 510075, Guangdong, China*)

Abstract: Impact tests of a new kind of pavement material for concrete bridge deck, steel fiber reinforced and polymer modified concrete (SFRPMC), were carried out by using a large cross-section SHPB system. The impact behaviors of the new material were compared with those of plain concrete and steel fiber reinforced concrete under the same basic mixture ratio. After tests, the destructive behaviors of the three materials were observed and their stress and strain relations at different strain rates were measured. The sensitivities of strain rate of three materials were compared. The mechanism of influences of steel fiber and polymer additions on the dynamic mechanical behavior of concrete was analyzed. Results show that SFRPMC has good impact properties, and it is one of the ideal pavement materials.

Key words: solid mechanics; dynamic mechanical behavior; Hopkinson pressure bar; steel fiber reinforced and polymer modified concrete

* Corresponding author: LIU Yi-ping
E-mail address: tcypliu@scut.edu.cn
Telephone: 86-20-87111030