

文章编号:1671-6833(2017)05-0050-05

钢纤维混凝土路面接缝传荷性能衰减规律的试验研究

王建宁<sup>1,2</sup>, 窦远明<sup>1,2</sup>, 孙吉书<sup>1,2</sup>, 魏 明<sup>3</sup>, 翟玉玺<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;  
3. 南通大学 交通学院, 江苏 南通 226019)

**摘 要:**为研究不同因素对钢纤维混凝土(SFRC)路面接缝传荷性能衰减规律的影响,进行了20个不同传力杆长度、直径、混凝土板厚度及钢纤维掺量的路面板试件疲劳试验.简单介绍了试验的方案设计,包括原料选择、因素水平选取、试件制作和加载方案确定等.结果表明:掺加钢纤维能够有效提高路面板接缝的传荷性能,降低传荷系数衰减速率;不同因素下的SFRC试件接缝传荷系数衰减曲线特征相似,分为快速衰减和平稳下降两个阶段,当钢纤维体积掺量 $\leq 0.6\%$ 时曲线表现为三阶段衰退;传力杆直径、长度及钢纤维掺量的增加均能提高接缝传荷性能,但提高幅度十分有限,其中钢纤维掺量影响最大;接缝传荷系数衰退速率随钢纤维掺量的增加而减小,与传力杆直径、长度及混凝土板厚度因素无关;试验条件下,荷载作用100万次后的SFRC试件传荷系数仍保持在90%以上,具有优良的传荷能力.试验结果为SFRC路面结构设计提供了参考.

**关键词:**道路工程;钢纤维混凝土路面;接缝;传荷能力;衰减曲线

**中图分类号:** U416.2;U418      **文献标志码:** A      doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.004

0 引言

钢纤维混凝土(SFRC)是在混凝土中均匀掺加钢纤维得到的增强型复合材料,具有抗拉、抗折强度高、断裂韧性好、抗疲劳性能好等优点,目前主要应用于要求较高的公路路面、桥面铺装、机场跑道及铁路轨枕等部位.与普通混凝土路面相比,SFRC可以减薄路面铺装厚度,实现无纵缝整幅施工,提高路面性能,扩大横缝间距,节约施工成本,延长路面使用寿命<sup>[1-2]</sup>.

SFRC材料虽表现出较素混凝土更优异的路面性能,但接缝始终是路面结构中的最薄弱部位,其传荷能力的高低直接影响路面结构设计和使用寿命<sup>[3]</sup>.我国新修订的规范<sup>[4-5]</sup>明确指出:在极重、特重和重交通荷载的普通混凝土面层横缝中必须布设传力杆,而对于SFRC路面并未做强制性规定.目前,国内外早期服役的SFRC路面大多没有设置传力杆,也没有考虑接缝传荷能力的衰减,关于路面接缝传荷能力的研究成果大多集中在素混凝土材

料<sup>[6-11]</sup>.然而,随着交通运输业的迅速发展,车辆轴载剧增,重载车辆比例升高,特重及重载条件下,SFRC路面接缝也出现了不同程度的道路病害<sup>[12-13]</sup>.

近年来,有关SFRC路面接缝传力特性及机理方面的研究取得了一些成果.文献[14]通过计算接缝承载能力讨论了路面结构中纵向假缝取消拉杆的可能性,指出在特重及重载交通条件下SFRC路面横缝中设置传力杆的必要性,并对传力杆的布置形式进行了探讨;文献[15]建立了层布式钢纤维混凝土的有限元模型,研究了路面板长度、厚度和混凝土弹模在行车荷载、温度作用下的变化规律;文献[16]通过有限元分析,总结了不同横缝间距、板厚和不同交通等级对荷载应力、温度应力的影响;文献[17]基于SFRC路面板的工作性能,提出了一种新的复合式SFRC路面形式,并对此进行了双轮轴载试验研究和成本分析.但是,大部分文献并未涉及传力杆、板厚、钢纤维掺量等因素对SFRC试件横缝传荷性能衰减规律的影响.为了弥补这方

面研究的不足,笔者通过对 10 块普通砼路面板和 10 块 SFRC 路面板进行室内疲劳试验,以传力杆直径、长度、混凝土板厚和钢纤维掺量为因素,以弯沉值来评定接缝传荷能力,分析了两种材料在不同因素条件下的接缝传荷能力,探讨了各因素对 SFRC 路面接缝传荷性能衰减趋势的影响规律及特征.

# 1 试验方案

## 1.1 试件设计

钢纤维种类繁多,按不同方法可分数十种.路用拌合钢纤维对平整度、纤维分布均匀性及安全性要求较高,不宜采用钢丝切断形、长波浪形、大弯钩形及两端直角形等易抱团纤维.本次试验中的 SFRC 试件选用 600 MPa 级哑铃形钢纤维,该纤维不仅能够提高与混凝土材料间的粘结锚固作用,还可以保证纤维露出后不扎伤车胎,钢纤维性能参数如表 1 所示.

表 1 钢纤维参数				
Tab.1 Parameters of steel fiber				
项目	抗拉强度/ MPa	长度/ mm	直径/ mm	外观
参数	≥650	30 ~ 35	0.6 ~ 0.9	光滑、无油污杂质

钢纤维长度应与混凝土最大粒径相匹配,混凝土最大粒径宜为钢纤维长度的 1/2 ~ 2/3,保证钢纤维在骨料中的锚固长度.同时,为保证混凝土的增强补韧作用,避免体积掺量过高造成钢纤维成团,将钢纤维体积掺量控制在 0.6% ~ 1.2% 范围内,选取 0.6%、0.8%、1.0%、1.2% 4 个水平.早期路面设计规范<sup>[18]</sup>规定在特重或重交通下 SFRC 面层厚度设计值不得小于 160 mm,而现行路面设计规范<sup>[5]</sup>建议 SFRC 面层厚度取普通砼路面的 0.65 ~ 0.75 倍,并将最小值提高至 180 mm,这说明早期设计的 SFRC 路面厚度偏小.本次试验将 SFRC 试件厚度统一设置为 200 mm,是普通砼试件厚度的 0.67 ~ 0.83 倍.

本次试验设计了 10 块普通砼试件(1<sup>#</sup> ~ 10<sup>#</sup>)和 10 块 SFRC 路面板试件(11<sup>#</sup> ~ 20<sup>#</sup>),分别考虑传力杆长度、传力杆直径、混凝土板厚度和钢纤维掺量 4 种因素.所有试件平面尺寸均为  $l \times b = 1\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ ,传力杆采用 HPB300 钢筋,用支架法固定.试件编号及参数设定见表 2,试验试件如图 1 所示.

表 2 试件参数				
Tab.2 Parameters of specimens				
编号	混凝土板 厚度/mm	传力杆参数		钢纤维体积 掺量/%
		直径/mm	直径/mm	
1	260	25	25	—
2	260	28	28	—
3	260	30	30	—
4	260	32	32	—
5	260	30	30	—
6	260	30	30	—
7	260	30	30	—
8	240	30	30	—
9	280	30	30	—
10	300	30	30	—
11	200	25	25	0.8
12	200	28	28	0.8
13	200	30	30	0.8
14	200	32	32	0.8
15	200	30	30	0.8
16	200	30	30	0.8
17	200	30	30	0.8
18	200	30	30	0.6
19	200	30	30	1.0
20	200	30	30	1.2

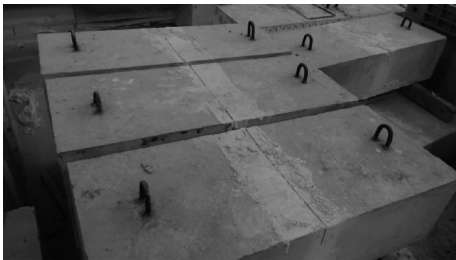


图 1 试验试件

Fig.1 Specimens of test

## 1.2 加载方案

图 2 为试验装置.如图 2 所示,采用层状弹性体系模拟路面结构,以一定厚度的橡胶支座模拟路面基层、垫层及土基层.采用 MTS 电液伺服疲劳加载装置对试件进行单侧加载,在接缝两侧上方布置激光位移计,以试件弯沉值来评定接缝处的传荷能力.

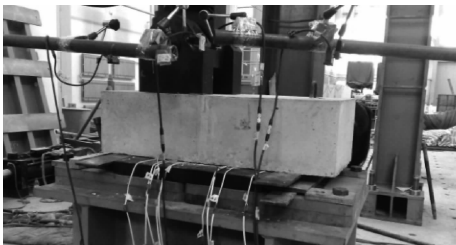


图 2 试验支座及加载装置

Fig.2 Loading system of test

试验开始后,以位移方式控制作动头缓慢降低至与试件接触并对试件施加 2 kN 的初始压力

(确保每次试验开始前初始压力相等,避免试验机加载产生的误差),加载开始后以 0.05 kN/s 的速率控制动头加载至 10 kN,之后控制疲劳试验机以 4 Hz 的频率按指定荷载幅值进行加载,当荷载循环次数分别达到 1 万、2 万、5 万、10 万、20 万、50 万、100 万时进行静载,100 万次时的静载完毕后试验结束.

2 试验结果分析

2.1 传力杆直径

普通砼试件 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>及 SFRC 试件 11<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>传力杆长度一致、直径不同,杆长均为 450 mm,直径范围 25~32 mm,图 3 为不同杆径试件的接缝传荷系数随加载次数变化的衰减曲线,图中实线为 SFRC 试件,虚线为普通砼试件.

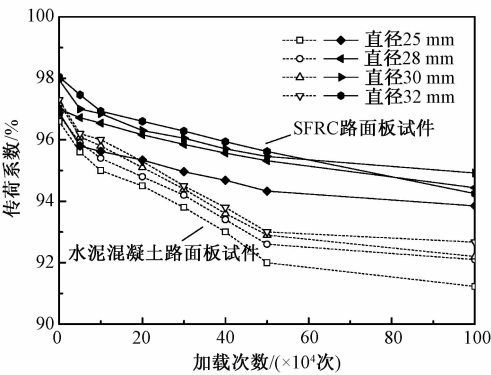


图 3 不同传力杆直径试件的传荷系数衰减曲线  
Fig.3 Attenuation curves of load transfer coefficient with different diameters of dowel bar specimens

由图 3 可知,同等直径 SFRC 试件的传荷性能明显优于普通砼试件,在混凝土中掺加钢纤维能够有效的提高基体整体性和接缝处传荷能力.两种试件传荷系数均随传力杆直径的增大而增大,但传荷能力衰减速率与直径无关.普通砼试件杆径每增大 2 mm,加载各阶段平均传荷系数约增大 0.21%~0.52%.直径 32 mm 的试件比直径 25 mm 的试件传荷系数大 0.63%~1.58%,SFRC 试件涨幅较小.加载各阶段平均传荷系数增长率为 0.14%~0.57%/(2 mm),直径 32 mm 的试件比直径 25 mm 的试件传荷系数大 0.43%~1.39%,说明在普通砼试件中增加杆径效果更好.这是由于杆径增大提高了普通砼试件的刚度和抗剪强度,而 SFRC 试件本身就具有很高的整体性.

试件传荷系数早期衰退明显,后期衰退缓慢,普通砼试件的传荷能力在最初加载的 7 万次中显著下降,当荷载循环次数超过 7 万次后,各试件传

荷系数降低速率开始变缓且曲线基本呈线性衰退.当疲劳加载次数超过 50 万次时,不同杆径试件的传荷能力下降速率进一步变小,加载 50 万次时的传荷系数较 7 万次时降低了 0.42%~0.97%.加载 100 万次时的传荷系数计算值较 50 万次时仅降低了 0.35%~0.84%,在此过程中杆径为 25 mm 的试件降低最大.说明普通砼试件在受荷早期杆件与混凝土的应力集中及包裹作用消退较快,二者间形成的孔隙使粘结力下降的同时也降低了接缝处的传荷能力,所以此时曲线斜率较大而试验后期曲线较为平缓.该衰退曲线可分为 3 个阶段:快速衰减阶段、平稳下降阶段、保持阶段.

对于 SFRC 试件,在整个加载过程中传荷能力下降均比较缓慢,初期加载的 10 万次有 1%左右的降幅,加载 10 万次后衰减速率基本保持不变.增大杆径可以有限提高试件传荷性能,在加载 50 万次时传荷系数的最大增幅仅为 1.36%,加载 100 万次时的最大增幅为 2.51%.

2.2 传力杆长度

普通砼试件 3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>~7<sup>#</sup>及 SFRC 试件 13<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>~17<sup>#</sup>传力杆直径均为 30 mm,杆长范围 350~500 mm,图 4 为不同杆长试件接缝传荷系数随加载次数变化的衰减曲线,图中实线为 SFRC 试件,虚线为普通砼试件.

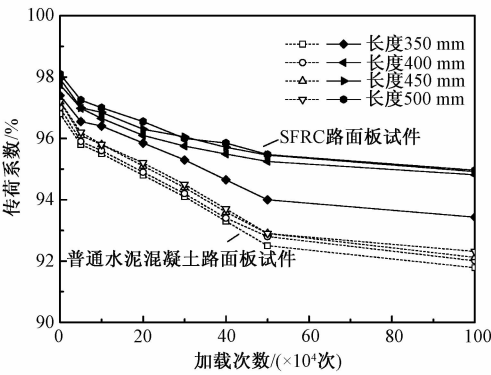


图 4 不同传力杆长度试件的传荷系数衰减曲线  
Fig.4 Attenuation curves of load transfer coefficient with different lengths of dowel bar specimens

由图 4 可知,同等杆长 SFRC 试件的传荷性能优于普通砼试件,两种试件传荷系数均随传力杆长度的增大而增大,但增幅十分有限,曲线衰减速率不受杆长因素影响.普通砼试件杆长每增大 50 mm,平均传荷系数约增大 0.16%~0.29%,杆长 500 mm 的试件比杆长 350 mm 的试件传荷系数约大 0.31%~0.58%.SFRC 试件涨幅较大,杆

长每增大 50 mm 平均传荷系数增幅 0.21% ~ 0.54%,说明在 SFRC 试件中增加杆长效果更好。

在疲劳加载初期,两种试件传荷系数衰退明显,当荷载循环次数超过 3 万次后,各试件传荷系数降低速率开始变缓,且 SFRC 试件曲线基本呈线性衰退.普通砼试件在 50 万次后衰减速率进一步减缓,整个曲线可分为快速衰减阶段和平稳下降阶段.单纯提高传力杆的长度对提高接缝传荷能力有限,尤其是对于普通砼路面结构。

2.3 混凝土路面板厚度

普通砼试件 3<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> ~ 10<sup>#</sup> 及 SFRC 试件 13<sup>#</sup> 传力杆直径均为 30 mm,杆长均为 450 mm,普通砼板厚 240 ~ 300 mm,SFRC 试件板厚 200 mm,图 5 为上述编号试件的接缝传荷系数衰减曲线。

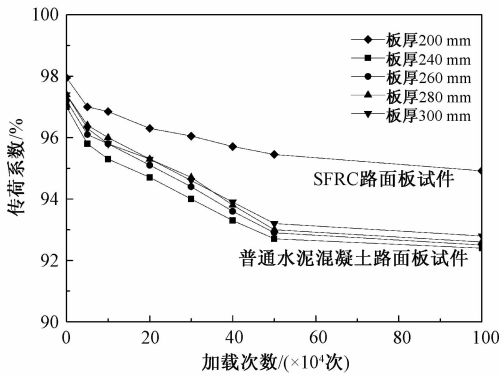


图 5 不同混凝土板厚试件的传荷系数衰减曲线  
Fig. 5 Attenuation curves of load transfer coefficient with different thickness of concrete slab specimens

由图 5 可知,板厚 200 mm 的 SFRC 试件传荷性能仍优于普通砼试件,普通砼衰减速率较 SFRC 试件更大,掺加钢纤维要比增加板厚效果明显,两者差异随循环次数的增加而逐步增大.普通砼试件不同板厚试件的传荷能力差别微小,板厚 300 mm 与 240 mm 各阶段的最大差值 0.54% ~ 2.18%,而 SFRC 试件的传荷系数在加载 50 万次后仍比普通试件高 2.42% ~ 2.97%.因此,混凝土板厚对接缝传荷能力影响有限,SFRC 能有效减小路面板的铺筑厚度。

2.4 SFRC 试件钢纤维掺量

SFRC 试件 13<sup>#</sup>、18<sup>#</sup> ~ 20<sup>#</sup> 传力杆直径均为 30 mm,杆长均为 450 mm,钢纤维体积掺量 0.6% ~ 1.2%,图 6 为各试件接缝传荷系数随加载次数变化的曲线。

由图 6 可知,钢纤维掺量对试件传荷性能的影响十分明显,增加钢纤维掺量能够有效提高接缝处的传荷能力.各试件初始传递值为 97.4% ~

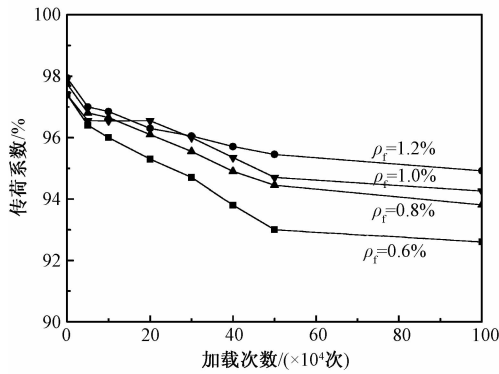


图 6 不同钢纤维掺量 SFRC 试件的传荷系数衰减曲线  
Fig. 6 Attenuation curves of load transfer coefficient with different steel fibers of SFRC specimens

97.95%,加载 50 万次后保持在 93.02% ~ 95.46%,衰减幅度 2.49% ~ 4.38%,加载 100 万次后传荷系数仍保持在 92% 以上.试件钢纤维体积掺量每增加 0.2%,传荷系数增幅为 0.56% ~ 2.64%,掺量由 0.6% 提高到 0.8% 时效果最为明显,加载 50 万次时增幅 2.64%。

在疲劳荷载最初循环的 5 万次中,SFRC 试件的传荷系数降幅约为 0.88% ~ 1.04%,在循环加载的 5 ~ 50 万次之间,曲线降低速率变缓且呈线性衰退;当疲劳加载次数超过 50 万次后,曲线降幅进一步减缓,整个加载过程中以钢纤维体积掺量 0.6% 的试件曲线降幅最大.当钢纤维体积掺量较小时 ( $\leq 0.6\%$ ),材料性能接近于普通混凝土,钢纤维的增强作用减弱,传荷系数的降低趋势接近于三阶段曲线;当钢纤维体积掺量较大时,传荷系数曲线则表现为 SFRC 材料的两阶段衰退模式。

3 结论

(1)普通水泥混凝土路面板接缝传荷能力衰退曲线可分为快速衰退、平稳下降和保持 3 个阶段;SFRC 试件在整个加载过程中传荷能力下降较为缓慢,可分为快速衰退和平稳下降 2 个阶段。

(2)接缝传荷系数的衰减速率随着钢纤维掺量的增加而减小,与传力杆直径、长度及混凝土板厚度等因素无关。

(3)传力杆直径、长度及钢纤维掺量的增加,均能提高 SFRC 试件接缝的传荷性能,但提高幅度十分有限,其中以钢纤维掺量影响最大。

(4)不同 SFRC 试件接缝传荷系数衰减曲线特征相似,分为快速衰减阶段和平稳下降 2 个阶段,但当钢纤维体积掺量  $\leq 0.6\%$  时,曲线表现为三阶段衰退,传力杆直径及长度对曲线衰退形式无影响。

(5)配有传力杆的 SFRC 路面板能有效提高接

缝传荷能力,降低其衰减速率;在加载 100 万次后,其传荷系数仍保持在 90% 以上,传荷性能优异.

参考文献:

[1] 刘优平,黎剑华,雷雨,等.隧道钢纤维混凝土路面施工技术[J]. 施工技术, 2007, 36(7):44-45.

[2] 徐智.钢纤维混凝土在道路工程中的应用研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33(4):179-183.

[3] 周正峰.水泥混凝土路面接缝传荷能力的研究现状和发展趋势[J]. 公路, 2011, 56(7):49-53.

[4] 交通运输部公路局研究院.JTG/T F30—2014 公路水泥混凝土路面施工技术细则[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.

[5] 交通运输部公路局研究院.JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.

[6] 袁玉卿,刘凤利,王选仓.旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2):28-32.

[7] 李晶晶,张擎.水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6):119-122.

[8] 谭忆秋,李洛克,曹鹏,等.除冰盐环境下水泥混凝土路面传力杆的锈蚀机理与传荷失效过程分析[J]. 工程力学, 2013, 30(12):199-205.

[9] 罗勇,袁捷.三维有限元法对水泥混凝土道面接缝

传荷作用的模拟方法研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(3):32-38.

[10] MANCIO M, CARLOS C, ZHANG J Y, et al. Evaluation of corrosion resistance of steel dowels used for concrete pavements[J]. Journal of materials in civil engineering, 2008, 20(10):650-658.

[11] 周正峰,凌建明,袁捷.机场水泥混凝土道面接缝传荷能力分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2):112-118.

[12] 赵尚传,傅智,罗翥,等.超重轴载作用下混凝土路面应力分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007, 3(1):43-45.

[13] 郝建国.钢纤维混凝土在高速公路隧道路面结构中的应用[J]. 公路, 2006, 51(6):158-162.

[14] 赵尚传,傅智.钢纤维水泥混凝土路面接缝传荷能力分析[J]. 公路, 2002, 47(11):1-5.

[15] 范小春,余煜,潘文杰,等.层布式钢纤维混凝土复合路面设计研究[J]. 混凝土, 2015, 37(8):146-152.

[16] 王雪亮,李海波,卢哲安.层布式钢纤维混凝土路面的有限元分析[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(4):87-90.

[17] 贺东青,王一鸣,刘博.复合式钢纤维混凝土路面研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2):240-243.

[18] 中交公路规划设计院有限公司.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.

Test Study on Attenuation Law of Joint Load Transfer Efficiency of Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement

WANG Jianning<sup>1,2</sup>, DOU Yuanming<sup>1,2</sup>, SUN Jishu<sup>1,2</sup>, WEI Ming<sup>3</sup>, ZHAI Yuxi<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China; 3. School of Transportation, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** In order to study the impact of various parameters on attenuation law of joint load transfer efficiency of steel fiber reinforced concrete (SFRC) pavement, 20 pavement specimens with different dowel bar diameter, length, thickness of concrete slab and content of steel fibers were tested in fatigue experiments. The paper briefly introduced the test arrangement including the raw materials of specimens, the parameters and production of specimens, as well as the loading system. It was shown that the steel fiber added in concrete pavement could effectively improve the load transfer efficiency and reduce the attenuation rate of load transfer coefficient. The attenuation curves of joint load transfer coefficient of SFRC specimens under different factors had similar characteristics, which could be divided into two stages: rapid attenuation and steady decline. However, the curve showed three-stage decay when the content of steel fiber was less than or equal to 0.6%. Although the increase of dowel bar diameter, length and content steel fiber could improve the joint loading performance, the increase range was extremely limited, and the impact of steel fiber content was the largest. The decline rate of load transfer coefficient, which had no relations with dowel bar diameter, length and concrete slab thickness, decreased with the increase of steel fiber content. After the load was applied 100 million times in the experiment conditions, the load transfer coefficient of SFRC specimens was remained above 90%, which showed a good load transfer capacity. The test results could provide a reference for SFRC structural design.

**Key words:** road engineering; steel fiber reinforced concrete pavement; joint; load transfer efficiency; attenuation curves