第63卷第4期
2023年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 63, No. 4
July 2023

文章编号：1000-8608(2023)04-0408-08

基于车辆超载预警系统的导电混凝土导电性能研究

冉武平*[1]，虞晨曦[2,3]，胡　政[2]，张祖盼[2]，杨李程[2]，艾贤臣[1]

（1.新疆大学 交通运输工程学院，新疆 乌鲁木齐　830017；
2.新疆大学 建筑工程学院，新疆 乌鲁木齐　830017；
3.湖南大学 土木工程学院，湖南 长沙　410082）

摘要：通过正交实验设计，进行了基于车辆超载预警系统的不同导电材料掺量比条件下导电混凝土导电性能探究.实验结果表明：1.2 MPa荷载以内，导电性能随着荷载的增大而增强，但增强趋势逐步衰减；通过压敏性分析，得出钢纤维体积分数0.15%、石墨体积分数1.00%、碳纤维体积分数0.35%、硅灰质量分数3.50%为导电材料的最佳掺量比；4种导电材料对导电混凝土压敏性和电阻的影响由强到弱分别为钢纤维、硅灰、石墨、碳纤维和硅灰、钢纤维、碳纤维、石墨；随着碾压次数的增多，试件的压敏性降低而压力敏感特性趋于稳定，第4次实验后压敏性下降3.5%，电流-荷载曲线均呈现先增大后减小的趋势.

关键词：导电混凝土；导电性能；车辆超载预警系统；压敏性

中图分类号：TU443　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.7511/dllgxb202304011

0　引　言

随着我国公路交通运输业的稳步发展，运输市场竞争越发激烈，为获得更多利益，部分货运车主选择车辆超载上路[1-2].超载车辆会造成公路桥梁损坏，引起交通安全事故的发生，增加社会成本[3-4].目前，多采用传统称重系统获取车载重量，然而该类方式存在静态称重检测效率低、动态称重易于混凝土内部形成结构缺陷等不足[5-6].近年来，有学者研究智能混凝土在道路工程结构健康检测领域中的应用[7]，已有一定的理论基础，因此基于导电混凝土搭建车辆超载预警系统以阻止超载车辆上路具有可行性.

关于导电混凝土的制备工艺及力学性能、导电能力的研究已有很多.贾兴文等[8]系统总结了内外因素对导电性能的影响，建议采用功能和尺度互补的导电材料制备复相导电混凝土.叶嘉诚等[9]研究干拌法、湿拌法和半干拌法3种拌和工艺对导电混凝土抗压、抗折强度和电阻率的影响.杨文平等[10]、王欣[11]充分考虑电极稳定性、耐久性和施工实际，推荐选取铜丝网作为电极材料，并采用侧面嵌入布置以连接外部电路.尹磊建[12]进行复相导电混凝土在极限荷载、循环荷载下的压敏实验时，认为加载方向与电极布置方向相垂直时压敏性显著，并在电阻测试方法实验中对极化效应与非线性伏安特性进行了深入分析.毛起炤等[13]提出隧道效应理论，解释掺入导电材料混凝土的导电机理.郑立霞[14]深入研究了机敏混凝土的纤维-基体界面导电路径、导电载流子，得出供交流电时其传感特性更稳定.张一帆[15]在机敏混凝土受压自感应研究中发现，当测试电压小于5 V时，试件在受压情况下的应力自感应性能随电压的减小而增强，循环加载条件下，电阻率的相对变化能较好地反映试件内部应力的变化.钱金蕊[16]对动载作用下碳纤维混凝土压敏性进行研究，实验结果表明随着循环次数和加载时间的增加，电阻率与应力出现明显对应关系且基本可逆.

车辆超载预警系统设计思路如下：通过导电

收稿日期：2022-05-10；　**修回日期：**2023-05-29.
基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022D01C396)；国家自然科学基金资助项目(51768070)；国家大学生创新实验资助项目(202010755066).
作者简介：冉武平*(1977—)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail：rwpxju@163.com；虞晨曦(1999—)，女，硕士生，E-mail：1519640868@qq.com.

混凝土车辆超载模拟实验，探究导电混凝土的导电性能，得到最优掺量比下的拟合函数；选用 LabVIEW 作为预警系统接收信号、储存数据的操作平台，将所得拟合函数编写程序；设计实验以验证理论关系的正确性；根据实际道路情况设置车载阈值，建立对应数据库. 该系统具有与路面结构同步施工、监测速度快、受环境因素干扰较小等特点，可有效识别超载车辆并降低在道路全寿命周期内成本.

综上所述，对于复相导电混凝土的力电特性已有较多研究，但利用导电混凝土搭建完整车辆超载预警系统的研究很少. 本文进行导电混凝土导电性能研究以得到导电材料的最优掺量比及拟合函数关系，为日后实际工程应用提供理论支撑.

1　导电混凝土加载模拟实验

1.1　导电混凝土正交实验设计

李红英[17]针对单相导电材料掺量对抗折强度影响展开研究，表明纤维与颗粒状导电材料同时掺入可有效发挥两者特性. 赵婧[18]研究发现碳纤维掺量对混凝土导电性能有显著影响，石墨会增加试件内形成导电回路的概率，使电阻率大大降低；硅灰可有效提高混凝土的力学性能. 田晓鹤[19]发现减少碳纤维掺量而加入钢纤维可改善导电混凝土的压敏性. 故综合考虑导电混凝土导电性和经济因素，本文选择导电材料为钢纤维、石墨、碳纤维、硅灰.

祝文允[20]采用伏安法进行压敏性实验，赵婧[18]采用直观与方差分析方法对因素效应处理分析，都得出当导电材料钢纤维体积分数为 0.1%、石墨体积分数为 1.6%、碳纤维体积分数为 0.3%、硅灰质量分数为 3%时，导电混凝土压敏性较强、稳定性良好且抗压强度高. 刘宇彬等[21]研究了石墨碳纤维混凝土，结果表明碳纤维体积分数为 0.6%、石墨体积分数为 2%时，满足接地材料力学性质且导电性能稳定. 本实验采用正交实验，选定钢纤维体积分数、石墨体积分数、碳纤维体积分数和硅灰质量分数作为 4 个因素，设计各因素 3 个水平，共 8 组实验，水平取值和正交实验设计分别见表 1 和表 2.

表 1　四因素三水平表

Tab. 1　Four-factor three-level table

水平	因素			
	钢纤维体积分数(A)/%	石墨体积分数(B)/%	碳纤维体积分数(C)/%	硅灰质量分数(D)/%
1	0.05	1.00	0.25	2.50
2	0.10	1.50	0.35	3.00
3	0.15	2.00	0.45	3.50

表 2　正交实验设计表

Tab. 2　Orthogonal experimental design table

试件	因素水平			
1#	A3	B3	C1	D2
2#	A2	B1	C3	D2
3#	A2	B3	C2	D1
4#	A2	B2	C1	D3
5#	A1	B3	C3	D3
6#	A1	B1	C1	D1
7#	A3	B1	C2	D3
8#	A1	B2	C2	D2

1.2　导电混凝土制备

按照四因素三水平表和正交实验设计表，选用 300 mm×300 mm×50 mm 的标准车辙板，每组实验称取水泥 2.11 kg、砂 2.57 kg、石5.21 kg、水 1.769 kg，拌和工艺采用人工干拌法，实验过程按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)[22]要求进行，在车辙板模具内侧均匀刷一薄层矿物油，内置电极布置如图 1 所示，向车辙板中缓慢倒入拌和物，注意铜网不要弯折，且

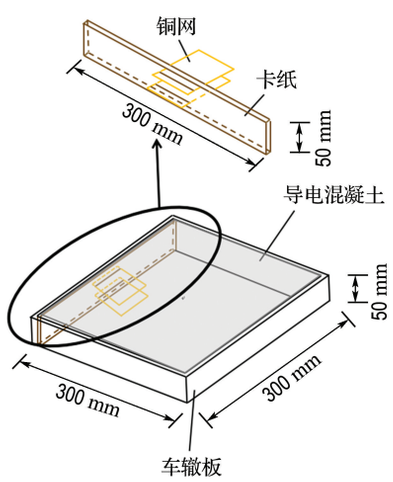

图 1　电极布置图

Fig. 1　Electrode layout diagram

与混凝土尽量充分接触，养护 28 d 后开始实验.

1.3 压电实验

导电混凝土具有应变电阻敏感性，当混凝土受压时，导电材料之间的距离减小，更多的导电材料参与到导电通路的构成中，导电网络进一步完善使得电阻降低. 为探究导电混凝土压电变化规律，设计以下实验. 采用电流表、电源、导线若干，电路连接方式如图 2 所示. 为模拟车辆荷载作用在混凝土上的压电效应，采用车辙仪的轮碾进行加载，如图 3 所示.

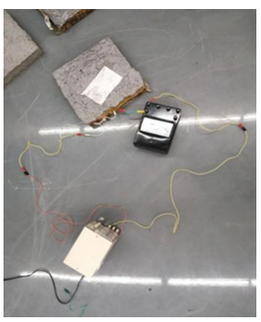

图 2 电路连接方式

Fig. 2 Circuit connection scheme

图 3 车辙仪

Fig. 3 Rutting instrument

加载的实验参数设置如下：为研究超载条件下不同荷载作用下导电混凝土的导电性能，设定轮碾荷载以 0.1 MPa 为一个荷载增量步，从 0.6 MPa 逐级递增至 1.1 MPa，控温范围为(20±0.5) ℃. 实验前，将试件较平整的表面朝上作为加载面，并在底部铺细沙以保持其在实验过程中的稳定性. 通过预实验，为同时满足电流的敏感性测试和量程，电流表量程挡位选取为 100 mA. 随着通电时间的增加，反电动势增势放缓，受外加电压影响降低，因此每次测试时通电至电流表读数稳定后开始实验，电流测试时间为 5 min，每 20 s 记录一次电流读数，共记录 15 组.

实验后，8 组试件均未被压碎，表面有碾压痕迹但无裂缝，试件加载实验完成后如图 4 所示.

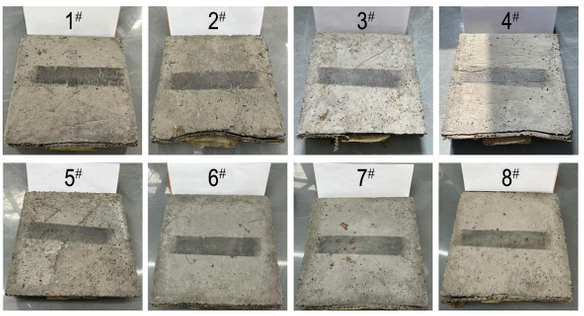

图 4 加载实验完成后的试件

Fig. 4 Specimens after the loading experiment

2 结果与分析

2.1 拟合函数

为了探究荷载与电流的相关性，计算每次测试的 15 组电流读数均值，做出荷载 p 与电流 I 的散点图，并用 Origin 实现多项式拟合回归，如图 5 所示. 将对应的拟合函数及均方差、相关系数 R^2 列于表 3，所得拟合度较好的函数将用于预警系统的搭建.

由图 5 可知，8 组试件不同加载条件下的电流总体与施加荷载正相关；但电流增量增加趋势随荷载增加逐渐减小；接触荷载越大，电流的变化越明显，试件的压敏性越优良[23]，1#、2#、5#、7# 压敏性较好. 由表 3 可得，除试件 8# 外，各试件的函数曲线均采用二次多项式拟合效果最好，8 组试件拟合函数的均方差关系为 6#<3#<2#<7#<4#<5#<8#<1#，R^2 关系为 2#>7#>5#>4#>1#>6#>8#>3#.

2.2 压敏性分析

在压敏特性研究中，常用电阻变化率-荷载的线性拟合对压敏性进行评价.

根据欧姆定律对混凝土试件的电阻 r 进行计算，表达式如下：

$$r=U/I \tag{1}$$

式中：U 为恒定外加电压，1 V；I 为每次测试的 15 组电流读数均值.

为深入探究各试件的压敏性，引入切线斜率 K 作为应力灵敏系数[24]，表达式如下：

$$K=|(\Delta r/r_0)/\Delta p| \tag{2}$$

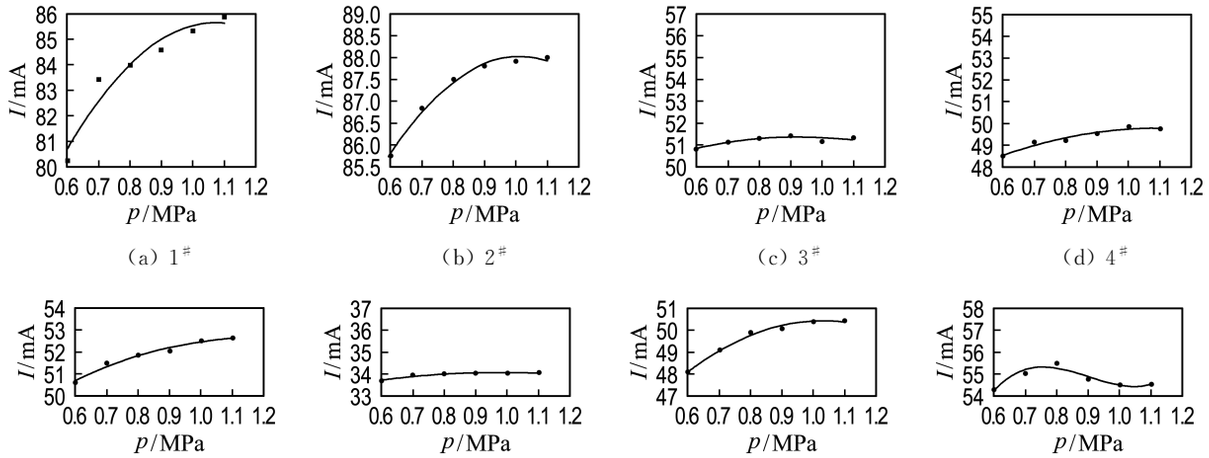

图 5　各试件拟合函数

Fig. 5　Fitted function of each specimen

表 3　拟合函数、均方差及相关系数 R^2

Tab. 3　Fitted function, mean squared error and correlation coefficient R^2

试件	拟合函数	均方差	R^2
1#	$I=-22.304p^2+47.756p+60.089$	0.404	0.899
2#	$I=-12.929p^2+26.199p+74.751$	0.012	0.984
3#	$I=-4.054p^2+7.571p+47.665$	0.011	0.681
4#	$I=-4.875p^2+10.779p+43.862$	0.018	0.928
5#	$I=-5.964p^2+13.974p+44.482$	0.022	0.961
6#	$I=-2.393p^2+4.682p+31.777$	0.002	0.872
7#	$I=-12.500p^2+25.833p+37.105$	0.015	0.983
8#	$I=73.426p^3-198.754p^2+174.703p+5.135$	0.041	0.782

式中：r_0 为 0.6 MPa 荷载下的初始电阻；Δr 为电阻与初始电阻差值；$\Delta r/r_0$ 为电阻变化率；Δp 为荷载与初始荷载差值.

用 Origin 线性拟合得到各函数的相关曲线，如图 6 所示，将对应的初始电阻 r_0、相关系数 R^2、应力灵敏系数 K 列于表 4.

从图 6 可以看出，试件受压前期数据的离散性较明显，随着荷载增加，数据逐渐偏向线性拟合函数. 由表 4 可知：8 组试件的应力灵敏系数由高至低的排列顺序为 1#、7#、5#、2#、4#、6#、3# 和 8#；1#、2#、4#、5#、7# 的 R^2 在 0.9 以上，表明其电阻变化率和荷载之间有较好的线性对应关系；各试件电阻存在较大差异，试件 1# ～8# 的电阻关系是 6#＞4#＞7#＞3#＞5#＞8#＞1#＞2#，与压敏性无直接关联，其中 6# 电阻明显高于其他试件，是因为其各导电材料的掺量最少，纤维彼此

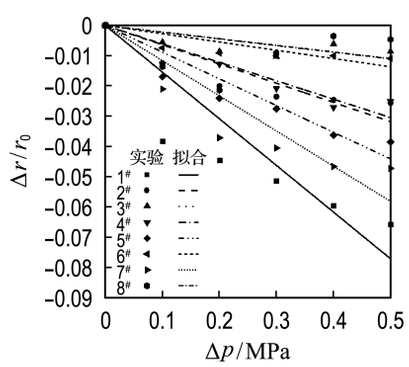

图 6　不同试件电阻变化率与荷载之间的关系

Fig. 6　The relationship between the change rate of resistance and the load of different specimens

的搭接少且对试件内部的连接不充分，电子发生跃迁的能力弱[25].

综合考虑前文，发现试件 7# 的压敏性和数据拟合效果均良好，故其对应的导电材料钢纤维体

表4 拟合函数的初始电阻 r_0、相关系数 R^2、应力灵敏系数 K

Tab.4 The initial resistance r_0, the correlation coefficient R^2 and the stress sensitivity coefficient K of the fitted function

试件	K/MPa^{-1}	R^2	r_0/Ω
1#	0.154	0.925 06	11.922
2#	0.064	0.923 79	11.455
3#	0.022	0.793 69	19.588
4#	0.061	0.950 33	20.261
5#	0.088	0.961 87	19.280
6#	0.027	0.877 09	29.448
7#	0.116	0.934 22	20.140
8#	0.022	0.218 71	18.252

积分数0.15%、石墨体积分数1.00%、碳纤维体积分数0.35%、硅灰质量分数3.50%可作为后续车辆超载预警系统导电混凝土的最佳掺量比.

2.3 压敏性、电阻极差分析

本实验除混凝土导电材料掺量比外,水灰比、砂率、湿度和温度等条件均相同,对钢纤维体积分数、石墨体积分数、碳纤维体积分数和硅灰质量分数这4种因素进行压敏性、电阻极差分析以进一步探究各因素的主次关系[26],结果见表5、表6.

R'为因素的极差,表达式如下:

$$R'=\max(k_1,k_2,k_3)-\min(k_1,k_2,k_3) \quad (3)$$

式中:k_m 为某因素第 m 水平对应的实验指标 K_m 的平均值.

由表5、6可知,4种因素对压敏性的影响关系是钢纤维>硅灰>石墨>碳纤维,对电阻的影响关系是硅灰>钢纤维>碳纤维>石墨.

表5 压敏性极差分析

Tab.5 Pressure sensitivity range analysis

因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	R'
A	0.137 4	0.146 4	0.270 3	0.045 8	0.048 8	0.135 2	0.089 4
B	0.207 0	0.082 8	0.264 3	0.069 0	0.041 4	0.088 1	0.046 7
C	0.242 3	0.160 2	0.151 7	0.080 8	0.053 4	0.075 9	0.027 4
D	0.049 3	0.239 6	0.265 2	0.024 6	0.079 9	0.088 4	0.063 8

表6 电阻极差分析

Tab.6 Resistance range analysis

因素	K_1	K_2	K_3	k_1	k_2	k_3	R'
A	66.980	51.304	32.062	22.327	17.101	16.031	6.296
B	61.043	38.513	50.790	20.348	19.257	16.930	3.418
C	61.631	57.980	30.735	20.544	19.327	15.368	5.176
D	49.036	41.629	59.681	24.518	13.876	19.894	10.642

2.4 多次碾压下压敏性探究

前文得出8组试件中7#的压敏性和数据拟合度综合性能最佳,为探究导电混凝土在长期荷载作用后的工作效果,即多次碾压下的压敏特性,对该试件进行4次连续碾压实验并绘制出0.1~1.4 MPa逐级加载下试件电流-荷载曲线,如图7所示.

由图7可得出结论:随着碾压次数的增加,多次碾压后由于疲劳性,试件基体内部的孔隙和微裂缝被压实,出现了少量的永久变形,使得试件的压敏性逐次降低,第4次碾压后压敏性下降3.5%;随着基体进一步的压实,基体缺陷(细微裂缝)得到一定程度的消除且不可逆,使得电流传导的通路得到完善,而随着通电时间的增加,极化效应影响减弱,使得压敏性表现更稳定[27];在0.1~1.2 MPa荷载下,4条曲线的电流均呈现增加趋势,但增加趋势逐渐衰减,荷载增加到1.2~

1.4 MPa时，电流反而减小.

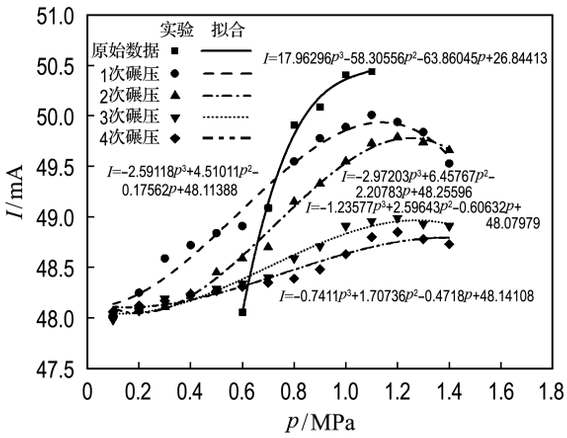

图 7　试件 7# 在 0.1～1.4 MPa 连续加载下电流-荷载拟合曲线

Fig. 7　Specimen 7# current-load fitting curve continuously loaded at 0.1-1.4 MPa

3　结　论

(1)导电混凝土的控制指标选取时，一要拟合效果优良，即拟合函数的均方差小、相关系数 R^2 大；二要压力敏感度好，即电阻变化率-荷载的线性拟合函数斜率大. 综合考虑两个指标，选定试件 7# 的掺量比(钢纤维、石墨、碳纤维体积分数分别为 0.15%、1.00%、0.35%，硅灰质量分数为 3.50%)为最佳掺量比，相应的拟合函数为 $I=-12.500p^2+25.833p+37.105$，该拟合函数是设计车辆预警系统时 LabVIEW 平台搭建的基础.

(2)通过极差分析可知，实验设计的 4 种因素对压敏性的影响强度是钢纤维＞硅灰＞石墨＞碳纤维，对电阻的影响强度是硅灰＞钢纤维＞碳纤维＞石墨.

(3)试件的压敏性随碾压次数的增多而逐次降低，但压敏稳定性增强，电流随荷载增加呈现先增大后减小的状态. 但实验中试件压敏性随碾压次数的增多而衰减，不利于预警系统长期运作，因此下一步研究重点是分析原因并提出解决措施；当荷载过大时，导电混凝土反而出现电流减小的特性，会导致系统达不到预警的作用，该问题需进一步探究.

参考文献：

[1] 张红卫，王文龙. 车辆超限、超载与公路运输安全性分析 [J]. 公路交通科技，2004，**21**(3)：132-136.
ZHANG Hongwei，WANG Wenlong. Safety analysis of over-size and over-load in road transport [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**，2004，**21**(3)：132-136. (in Chinese)

[2] 冯倩倩. 超载运输对路面结构的损伤研究 [J]. 交通世界，2018(10)：80-81.
FENG Qianqian. Study on the damage of overloaded transportation to pavement structures [J]. **Transpoworld**，2018(10)：80-81. (in Chinese)

[3] 刘晨阳. 货车超载运输对公路的危害及经济效益影响 [D]. 郑州：河南农业大学，2016.
LIU Chenyang. The harm of overload transportation of truck to the highway and the effect of the economic benefit [D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2016. (in Chinese)

[4] 于清新，刘君云. 超载车辆对砼梁桥病害的影响及对策分析 [J]. 公路与汽运，2021(6)：137-140，144.
YU Qingxin，LIU Junyun. Analysis of the impact of overloaded vehicles on the disease of concrete girder bridge and countermeasures [J]. **Highways and Automotive Applications**，2021(6)：137-140，144. (in Chinese)

[5] 郑小艳，张　娟，吴　姣. 高速公路称重系统应用现状及整车式静态称重系统分析 [J]. 衡器，2021，**50**(11)：40-43.
ZHENG Xiaoyan，ZHANG Juan，WU Jiao. Application status of expressway weighing system and analysis of vehicle static weighing system [J]. **Weighing Instrument**，2021，**50**(11)：40-43. (in Chinese)

[6] 付宏勋，张　宇，赵　强，等. 车载称重系统研究综述 [J]. 中国测试，2022，**48**(5)：14-21.
FU Hongxun，ZHANG Yu，ZHAO Qiang，*et al*. Review of on-board weighing system [J]. **China Measurement and Test**，2022，**48**(5)：14-21. (in Chinese)

[7] 刘数华，汤　婉. 导电混凝土及其在道路工程中的应用综述 [J]. 混凝土世界，2017(4)：54-59.
LIU Shuhua，TANG Wan. A review of conductive concrete and its application in road engineering [J]. **China Concrete**，2017(4)：54-59. (in Chinese)

[8] 贾兴文，张　新，马　冬，等. 导电混凝土的导电性能及影响因素研究进展 [J]. 材料导报：A，2017，**31**(11)：90-97.

JIA Xingwen, ZHANG Xin, MA Dong, *et al*. Conductive properties and influencing factors of electrically conductive concrete: A review [J]. **Materials Review: A**, 2017, **31**(11): 90-97. (in Chinese)

[9] 叶嘉诚，刘宇彬，齐曾清，等. 三相导电混凝土拌和工艺及配合比试验研究[J]. 新型建筑材料，2019，**46**(3)：13-17，35.
YE Jiacheng, LIU Yubin, QI Zengqing, *et al*. Experimental study on mixing process and mix proportion of three-phase electrically conductive concrete [J]. **New Building Materials**, 2019, **46**(3): 13-17, 35. (in Chinese)

[10] 杨文平，王云鹏，边雪伟，等. 导电沥青混凝土电极材料与布设形式研究综述[J]. 安徽建筑，2020，**27**(10)：100，143.
YANG Wenping, WANG Yunpeng, BIAN Xuewei, *et al*. A review of the research on electrode materials and layout forms of conductive asphalt concrete [J]. **Anhui Architecture**, 2020, **27**(10): 100, 143. (in Chinese)

[11] 王 欣. 导电环氧树脂混凝土研发及导电特性研究[D]. 南京：南京理工大学，2017.
WANG Xin. Research and development of conductive epoxy concrete and research on conductive properties [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[12] 尹磊建. 复相导电机敏混凝土压敏特性及其电学成像初步研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2019.
YIN Leijian. Study on the pressure sensitive properties of composite conductive smart concrete and preliminary study on its electrical imaging [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)

[13] 毛起炤，赵斌元，沈大荣，等. 极化效应对碳纤维增强水泥(CFRC)导电性的影响[J]. 材料研究学报，1997，**11**(2)：195-198.
MAO Qizhao, ZHAO Binyuan, SHEN Darong, *et al*. Influence of polarization on conductivity of carbon fiber reinforced cement [J]. **Chinese Journal of Materials Research**, 1997, **11**(2): 195-198. (in Chinese)

[14] 郑立霞. 机敏混凝土的导电性及传感特性研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2011.
ZHENG Lixia. Study on the conductivity and sensing characteristics of sensitive concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)

[15] 张一帆. 碳-钢纤维机敏混凝土应力及损伤自感应试验研究[D]. 太原：太原理工大学，2019.
ZHANG Yifan. Experimental study on stress and damage self-induction of carbon-steel fiber smart concrete [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019. (in Chinese)

[16] 钱金蕊. 静载及动载作用下碳纤维混凝土压敏性试验研究[D]. 沈阳：东北大学，2008.
QIAN Jinrui. Experimental study on the compression sensitivity of carbon fiber reinforced concrete under static and dynamic loading [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese)

[17] 李红英. 导电混凝土的配制及力学和导电性能研究[J]. 防护工程，2020，**42**(3)：26-31.
LI Hongying. Study on preparation of conductive concrete and its mechanical and conductive properties [J]. **Protective Engineering**, 2020, **42**(3): 26-31. (in Chinese)

[18] 赵 婧. 公路工程智能超载感应混凝土的制备研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2016.
ZHAO Jing. Preparation of intelligent overload inducing concrete used in highway construction [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)

[19] 田晓鹤. 混杂纤维增强混凝土压敏性试验研究[J]. 湖南交通科技，2017，**43**(2)：116-119.
TIAN Xiaohe. Experimental study on pressure sensitivity of mixed fiber reinforced concrete [J]. **Hunan Communication Science and Technology**, 2017, **43**(2): 116-119. (in Chinese)

[20] 祝文允. 车辆超载预警智能混凝土压敏性能研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2016.
ZHU Wenyun. The pressure-sensitive research of vehicle overload warning smart concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)

[21] 刘宇彬，陈霖华，徐志强，等. 石墨碳纤维导电混凝土制备及接地特性研究[J]. 混凝土与水泥制品，2018(8)：52-55.
LIU Yubin, CHEN Linhua, XU Zhiqiang, *et al*. Preparation and grounding characteristics of graphite carbon fiber conductive concrete [J]. **China Concrete and Cement Products**, 2018(8): 52-55. (in Chinese)

[22] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准：GB/T 50081—2002 [S]. 北京：中国建

筑工业出版社，2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standards for Test Methods of Mechanical Properties on Ordinary Concrete: GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese)

[23] 杨　叶. 智能聚合物混凝土的自感知特性及应用研究 [D]. 南京：南京理工大学，2018.
YANG Ye. Research on self-sensing characteristics and application of intelligent polymer concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[24] 刘卫森. 原材料组分对碱激发材料导电性能和压敏性能的影响研究 [D]. 广州：广州大学，2021.
LIU Weisen. Effect of raw material composition on conductivity and pressure sensitivity of alkali-activated materials [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese)

[25] 王林飞，杜红秀，刘晓仙. 混杂纤维对活性粉末混凝土压敏性的影响 [J]. 混凝土，2021(1)：66-69.
WANG Linfei, DU Hongxiu, LIU Xiaoxian. Effect of hybrid fiber on pressure sensitivity of reactive concrete [J]. **Concrete**, 2021 (1): 66-69. (in Chinese)

[26] 周天舒. 复掺功能填料水泥基材料机敏性研究 [D]. 镇江：江苏大学，2020.
ZHOU Tianshu. Research on smartness of cement-based materials mixed with functional fillers [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

[27] 肖　桐. 复相导电树脂混凝土的导电特性与工程应用研究 [D]. 南京：南京理工大学，2019.
XIAO Tong. Research on conductive characteristics and engineering applications of complex-phase conductive resin concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

Research on conductive properties of conductive concrete based on vehicle overload early warning system

RAN Wuping*[1], YU Chenxi[2,3], HU Zheng[2], ZHANG Zupan[2], YANG Licheng[2], AI Xianchen[1]

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Through orthogonal experimental design, the conductive properties of conductive concrete based on vehicle overload early warning system are explored under the condition of mixing ratio of different conductive materials. The experimental results show that within the load of 1.2 MPa, the conductive properties increase with the increase of load, but the increase trend gradually decays. Through pressure sensitivity analysis, it is obtained that the optimum mixing ratios are that the steel fiber volume fraction is 0.15%, the graphite volume fraction is 1.00%, the carbon fiber volume fraction is 0.35% and the silicon ash mass fraction is 3.50%. The influences of the four conductive materials on the pressure sensitivity and resistance of the conductive concrete from strong to weak are steel fiber, silicon ash, graphite, carbon fiber and silicon ash, steel fiber, carbon fiber, graphite, respectively. With the increase of the number of rolling times, the pressure sensitivity of the specimen is reduced and the pressure sensitivity characteristics tend to be stable, the pressure sensitivity of the fourth test decreases by 3.5%, and the current-load curve increases firstly then decreases.

Key words: conductive concrete; conductive properties; vehicle overload early warning system; pressure sensitivity