

文章编号:1007-9629(2022)06-0643-07

等离子体改性碳纳米管混凝土在 桥墩节点处的智能监测

李振东, 孙 敏*

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要:设计了 3 组连接方式的装配式桥墩,在连接节点处采用等离子体改性碳纳米管(P-CNT)混凝土,研究了低周往复荷载作用下,桥墩连接节点处 P-CNT 混凝土受力时电阻的变化情况,以验证 P-CNT 混凝土应用于桥墩节点进行智能监测的可能性.结果表明:3 组连接方式下,P-CNT 混凝土均表现出良好的力学性能和压敏性能;当连接节点处混凝土出现裂缝或分离脱落时,其电阻值出现突增现象,且电阻突增变化率随着节点处混凝土破坏程度的升高而增加.说明 P-CNT 混凝土智能材料可以有效监测节点处的受力状态.

关键词:智能混凝土;等离子体改性碳纳米管;装配式桥墩;连接节点;压敏性能;健康监测

中图分类号:TU528.59

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.06.014

Intelligent Monitoring of Plasma-Modified Carbon Nanotube Concrete at Bridge Pier Nodes

LI Zhendong, SUN Min*

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Three groups of fabricated bridge piers with different connection methods were established, and plasma-modified carbon nanotube (P-CNT) concrete was used at the connection nodes. Under the action of low cycle reciprocating load, the resistance value changes of P-CNT concrete at the connection nodes of three groups of assembled bridge piers under stress were studied, and the possibility of applying P-CNT concrete to intelligent monitoring at bridge pier nodes was verified. The results show that the P-CNT concrete shows good mechanical properties and pressure-sensitive properties under the three connection methods. When the concrete at the connection node is cracked or separated, its resistance value increases suddenly. The incremental change rate increases with the degree of concrete failure at the node. It shows that the application of P-CNT concrete smart material to the connection nodes of prefabricated piers can effectively monitor the stress state at the nodes.

Key words: smart concrete; plasma-modified carbon nanotube (P-CNT); fabricated bridge pier; connecting node; pressure-sensitive performance; health monitoring

因具有建造速度快、对周围环境影响小、成本费用低等优点,装配式桥梁得到广泛推广及应用,其最为重要的部分在于桥墩连接节点^[1].装配式桥梁在服役过程中,长期受到各种外界因素的影响,

难免会引起结构破损、结构性能退化等问题,特别是在地震作用下,节点处受力情况更加复杂.若能及时监测节点处的受力变化,提前做出预警,则可避免人员伤亡,减少损失.碳纳米管(CNT)混凝土

收稿日期:2021-04-13; 修订日期:2021-05-17

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20171220);江苏省研究生科研创新计划(KYCX_2767)

第一作者:李振东(1997—),男,江苏苏州人,苏州科技大学硕士生.E-mail:lizhendong1221@163.com

通讯作者:孙 敏(1970—),女,江苏苏州人,苏州科技大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:sunmin@mail.usts.edu.cn

是在混凝土中掺入CNT制备而成的一种新型智能混凝土材料^[2],具备良好的力学性能^[3-4];另外,CNT优异的导电性能^[5]和压敏性能^[6-7]也为结构监测提供了可能.Ding等^[8]在水泥中分别加入CNT和纳米炭黑(NCB)制备智能传感器,发现环载荷作用下,水泥的压阻均具有较高的稳定性和可重复性.Suchorzewski等^[9]发现添加少量多壁碳纳米管(MWCNT)可以提高混凝土在循环压缩条件下的应力检测能力,使微裂纹监测成为可能.Jiang等^[10]提出了基于应力波能量衰减的裂缝损伤程度评估方法,该方法可用于监测混凝土层合界面裂纹的发生和演化,并能够预测层合界面裂纹的扩展程度.上述研究均证明CNT能够应用于混凝土材料中并实现对应力、裂纹的监测,但尚未解决CNT在水泥基材料中分散性差的问题.

对CNT表面进行等离子体改性处理,得到等离子体改性碳纳米管(P-CNT)^[11],此方法解决了CNT表面惰性和团聚问题,使其能充分融入混凝土材料

中.研究^[12]还发现,P-CNT混凝土的压敏性能远高于普通混凝土,使得P-CNT亦可应用于结构的健康监测.

综上,本文将P-CNT混凝土应用于装配式桥墩连接节点处,研究桥墩节点处P-CNT混凝土在地震作用下载荷与电阻之间的对应关系,以实现对接结构受力状态的智能监测.

1 试件设计及制作

1.1 试件设计

根据实际工程案例,在承插式连接方式的基础上,另外设计2种新型连接方式,共3组试件,分别为A组承插式连接试件、B组套筒连接试件和C组钢板连接试件.本试验以加载条件为准,桥墩模型缩尺比例为1:10,去掉墩帽,调整墩身尺寸.桥墩装配时,需要在墩台内预留槽孔,为确保其连接性能^[13],设计槽孔深度为200 mm.3组试件的尺寸设计如图1所示.

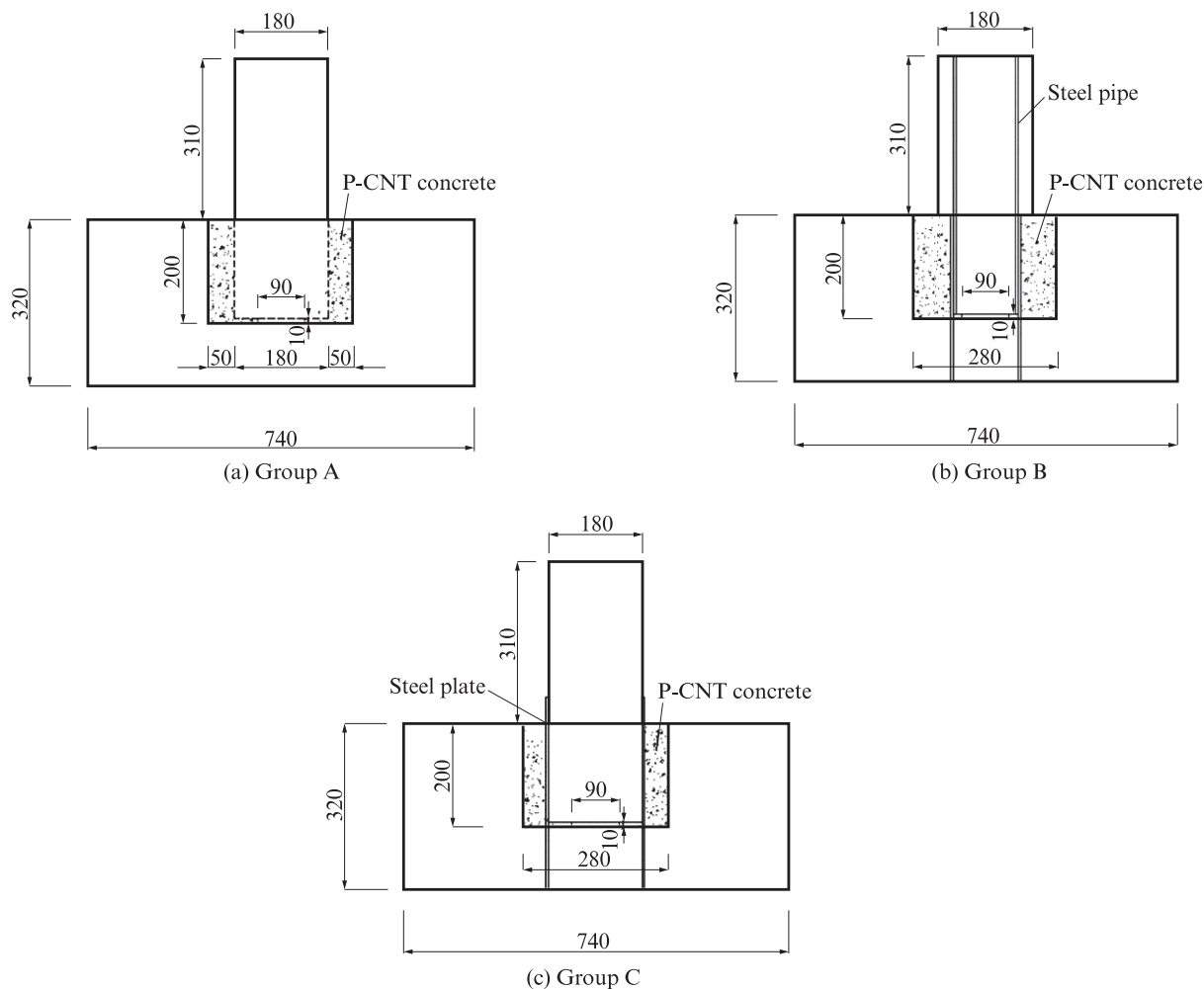


图1 各组试件尺寸示意图

Fig. 1 Size schematic diagram of each group of specimen (size: mm)

试件墩身配筋率遵循与实际工程墩身配筋率一致的设计原则.由于实际工程采用56根 $\phi 32$ 的HRB400级钢筋,配筋率为1.39%,试件选配4根 $\phi 12$ 的HRB400钢筋作为纵筋,纵筋和箍筋需要保证弯曲破坏优先发生在墩底位置.经计算,A组和C组试件的箍筋采用 $\phi 8@58$ 钢筋,B组试件的箍筋采用 $\phi 8@54$ 钢筋,钢筋级别均为HRB400.桥墩墩台配筋按照规范设计要求,需要保证试件在加载过程中,墩台不发生剪切破坏或者不先于墩身破坏.

表1 C50自密实混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of C50 self-compacting concrete

kg/m ³							
Cement	Fly ash	Silica fume	Sand	Stone	Water reducing agent	Water	P-CNT
424.9	121.4	60.7	782.4	868.6	3.0	151.8	1.8

制作墩身和墩台的同时,另外浇筑3个尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的自密实混凝土立方体试件,养护28 d后进行抗压强度试验,其立方体抗压强度值取3个试件的平均值,为51.76 MPa.

B组套筒连接试件由2种口径的钢管拼接而成,拼接前将钢管预先埋入墩台和墩身中.其中与墩身相连的钢管外径为14 mm,壁厚为2 mm,长为500 mm;与墩台相连的钢管内径为14 mm,壁厚为2 mm,长为320 mm.C组钢板连接试件由4块钢板焊接而成,预先安装在墩台内,安装时,直接将墩身插入墩台即可.3组试件的墩身和墩台养护完成后进行拼装,并用P-CNT混凝土作为连接材料灌入槽孔内.

P-CNT混凝土制作方法^[12]为:首先,通过转鼓式低温等离子体处理仪,将CNT进行等离子体处理,整个过程持续2 min,即可得到P-CNT;然后,在C50自密实混凝土中掺入0.3%(质量分数)的P-CNT得到P-CNT混凝土.CNT材料参数如表2所示.

图2为P-CNT和CNT在水溶液中的初始分散性.由图2可见:CNT在水中的分散性较差,经过振荡后依然悬浮于水面,无法溶于水;经等离子体处理后的P-CNT在水中的分散性优越,经过振荡后可

1.2 试件制作

3组试件的预制墩身和墩台均采用C50自密实混凝土进行浇筑,配合比如表1所示.水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰采用上海宝钢生产协力公司产I级粉煤灰;硅灰采用河南铂润新材料有限公司产高活性微硅粉;砂采用天然河砂;石子采用直径为5~20 mm的瓜子片;减水剂采用陕西秦奋建材有限公司产Q8081PCA型减水剂.

表2 CNT材料参数
Table 2 Parameter of CNT materials

Diameter/nm	Length/ μ m	Carbon content(by mass)/%
50~90	5~10	≥ 96

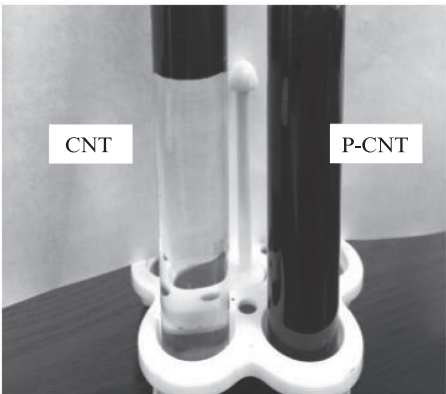


图2 P-CNT和CNT初始分散性对比
Fig. 2 Initial dispersion comparison of P-CNT and NT

以迅速溶于水中.

3组试件的制作及拼装均在苏州科技大学江苏省重点结构工程大厅内完成.各组预制试件照片如图3所示.拼装时,首先,对连接部位表面进行凿毛处理;其次,通

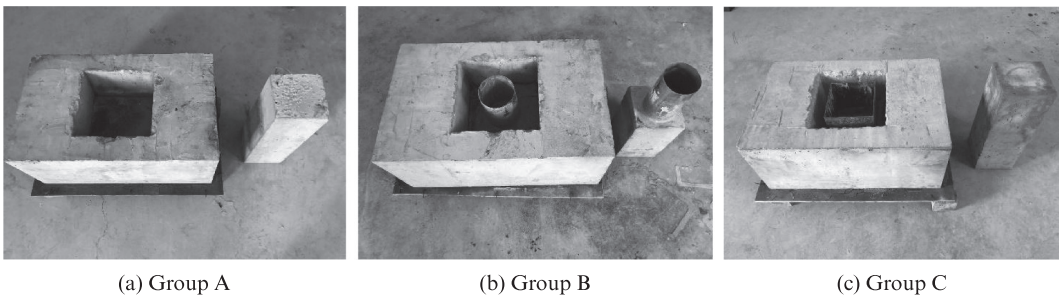


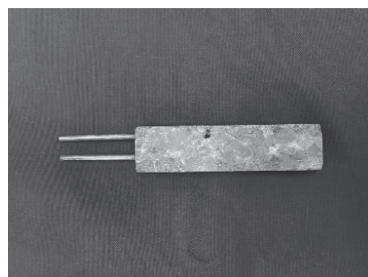
图3 各组预制试件照片
Fig. 3 Photos of each group of prefabricated specimen

过槽孔内预留垫块,将墩身调平对中放入墩台;最后,将P-CNT混凝土浇筑于槽孔内,同时布置好电极块。

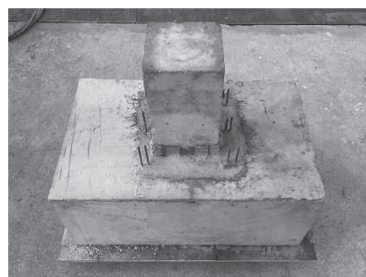
2 试验方案

影响P-CNT混凝土电阻值的因素包括电阻测试方法和电极选取方法^[14]。常见的混凝土电阻测试方法

有二电极法和四电极法。相较于四电极法,二电极法的电极制作及测试过程更加简便,因此本研究采用二电极法来进行测试。由于试件连接节点处空间较小,测试用电极采用埋入式铜棒电极。为确保铜棒电极在浇筑过程中能够更好的固定,先制作铜棒电极块(见图4(a)),再将其整体埋入连接节点内(见图4(b))。



(a) Copper rod electrode block



(b) Specimen

图4 电极块和试件照片

Fig. 4 Photos of copper rod electrode block and specimen

图5为连接节点处记号标注。为方便观察试验现象及测点布置,以加载方向为准,在图5标记对应位置布置铜棒电极并在混凝土表面粘贴应变片。加载测试前,先将铜棒电极连接到34401A数字万用表上,通电45 min消除极化现象^[15],待试件电阻稳定后对试件进行加载和数据采集。

本次试验采用平行四连杆加载装置,先将试件固定在加载架上,再安装电阻测试仪器。试件加载装置和测试方法示意图见图6。

在低周往复作用下,进行装配式桥墩连接节点处P-CNT混凝土压敏性能测试时,竖向荷载(N)采用的轴压比^[16]为0.25,其计算表达式为:

$$N = \eta_k \cdot A \cdot f_c \quad (1)$$

式中: η_k 为轴压比; A 为墩身的横截面面积; f_c 为混凝土的轴心抗压强度,由经验公式 $f_c = 0.76 f_{cu}$, $f_{cu} = 51.76$ MPa 可得, $f_c = 39.34$ MPa。

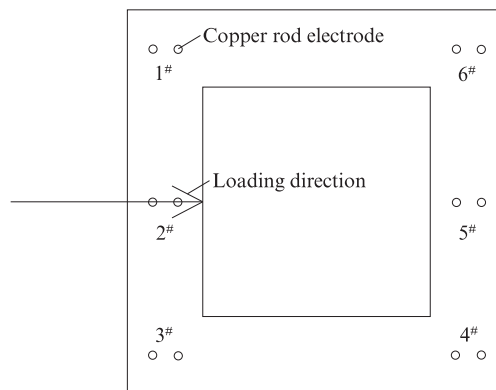
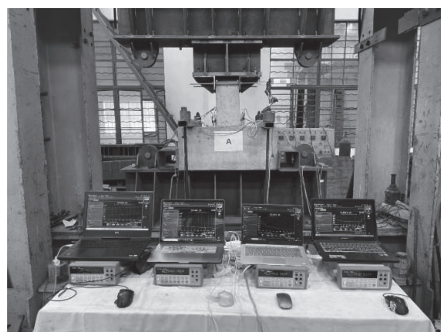


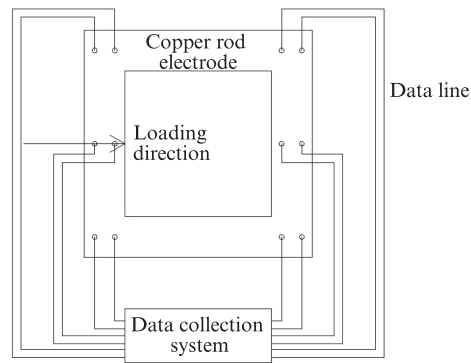
图5 连接节点处记号标注

Fig. 5 Marking at connected nodes

根据式(1)计算得到,施加给试件的竖向荷载 $N = 51.76$ kN。墩顶水平荷载采用位移加载方式,分3级逐步加载;第1级为2、4、6 mm,80 s完成1次循环,每个循环进行4次;第2级为8、10、15 mm,160 s完成1



(a) Loading device



(b) Testing method

图6 试件加载装置和测试方法示意图

Fig. 6 Diagram of loading device and testing method

次循环,每个循环进行4次;第3级为20、25、30 mm,240 s完成1次循环,每个循环进行2次;此后每次增加5 mm,直至试件破坏。

3 试验结果与数据分析

3.1 节点处P-CNT混凝土的压力-电阻变化规律

选取各组连接节点处1[#]、2[#]位置且未出现裂缝处,测量连接节点处破坏时的电阻值,其变化曲线见图7(实线为电阻值与时间关系,虚线为荷载与时间关系)。由图7可以看出:由于受铜棒电极间距、电极块埋入位置等影响,各测试位置受力情况有所不同,导致各测

试位置测得的电阻值及电阻变化有差异,但各测试位置的电阻总体上随轴向压力呈现波浪形变化,电阻值随着荷载的增加而下降,随着荷载的减小而上升;A组试件1[#]位置电阻曲线呈上升趋势,可能是由于该位置内部出现了微裂缝^[17],而其余各处的电阻曲线总体呈现下降趋势,这是由于随着峰值位移不断变大,电极块受到的轴向压力不断变大所致^[18];3组试件中C组试件的电阻变化幅度约4.000 k Ω ,A、B组试件的电阻变化幅度分别约2.250、1.250 k Ω ,说明在承载能力范围内,3组试件连接节点处的P-CNT混凝土电阻变化幅度随着轴向压力的增大而增大,均表现处良好的压敏性能。

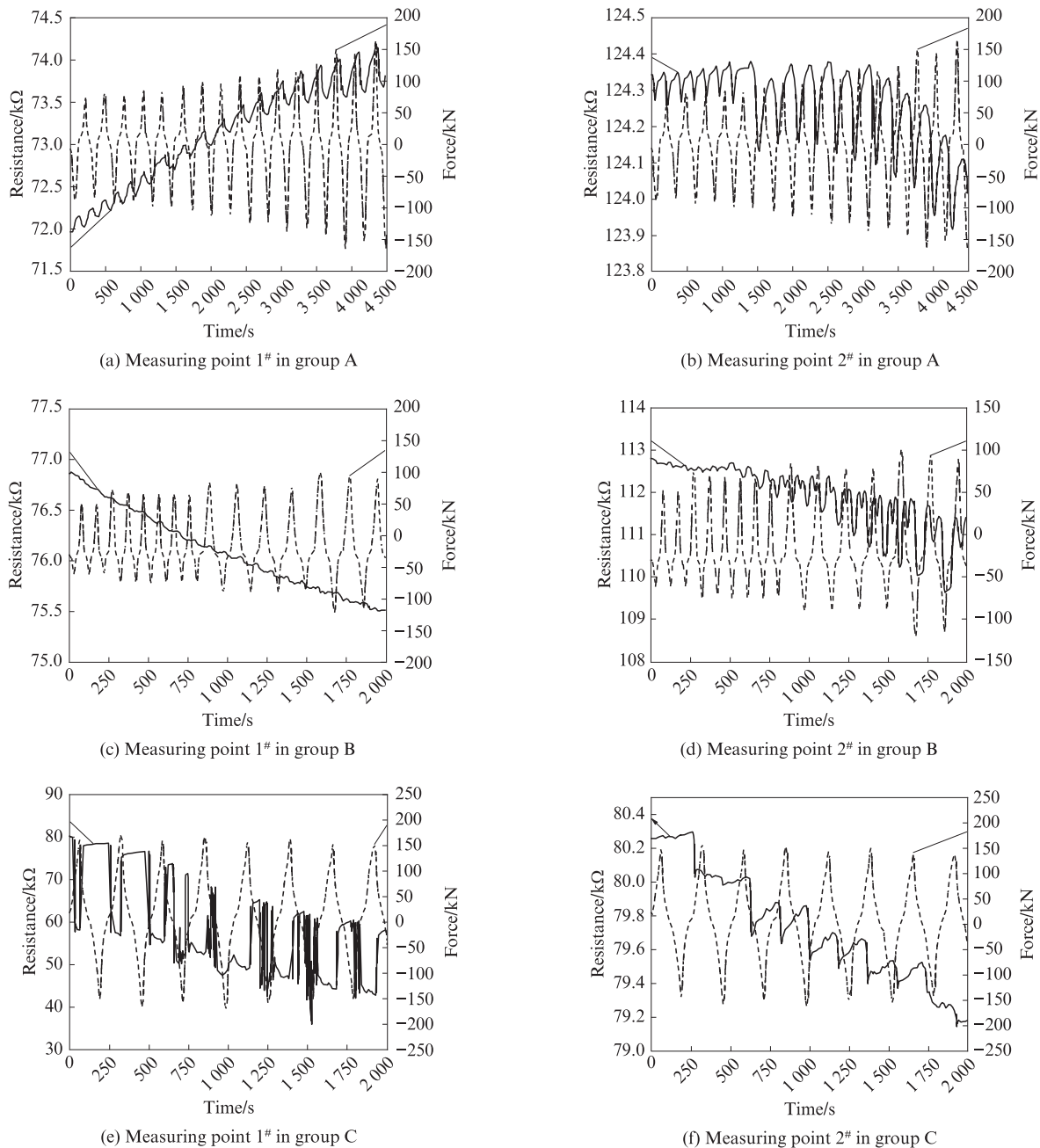
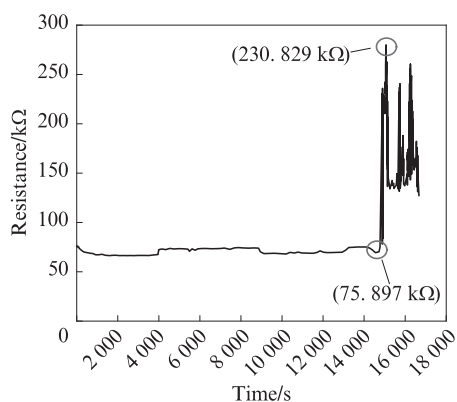


图7 各组节点处监测数据
Fig. 7 Monitoring data at nodes of each group

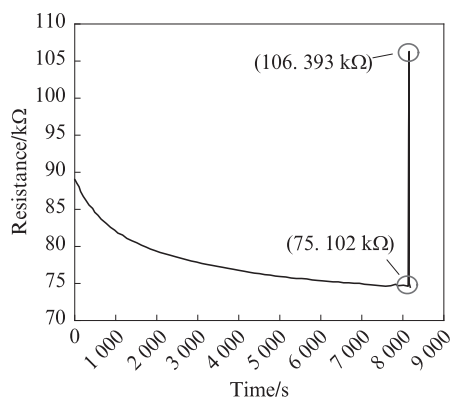
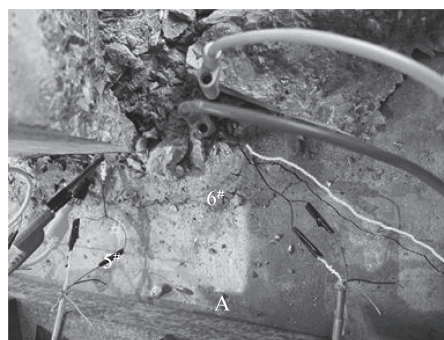
3.2 P-CNT混凝土对结构破坏的监测

图8为各组试件部分测点出现裂缝时的电阻变化曲线.由图8可见:加载后期,各组试件测试位置电极块处均出现裂缝或混凝土分离,所对应的电阻值均有突增现象——A组试件6[#]位置裂缝出现时,电阻值从75.897 k Ω 增加到230.829 k Ω ,增加了204%;B组试件1[#]位置裂缝出现时,电阻值从

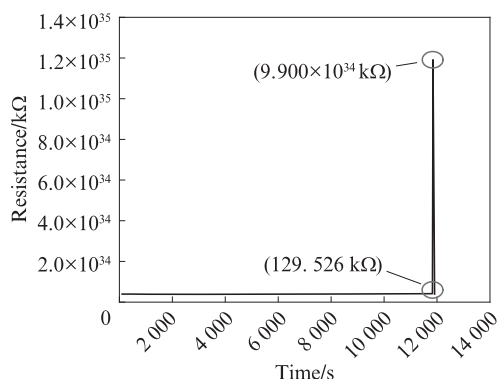
75.102 k Ω 增加到106.393 k Ω ,增加了41.7%;C组试件2[#]位置裂缝出现时,电阻值从129.526 k Ω 突增到 9.900×10^{34} k Ω ,说明该位置的混凝土已经分离,铜棒电极周围混凝土已经开裂(图8(c)).3组试件承载能力由大到小依次为C组>A组>B组,出现裂缝或破坏时对应的电阻值变化率由大到小依次为C组>A组>B组.



(a) Measuring point 6[#] in group A



(b) Measuring point 1[#] in group B



(c) Measuring point 2[#] in group C



图8 节点破坏时各组电阻变化及实例照片

Fig. 8 Resistance change and example photo of each group specimen during node failure

4 结论

(1)在低周往复作用下,3组试件连接节点处

P-CNT混凝土的电阻值均随着荷载的增加而下降,随着荷载的减小而上升,电阻值与荷载一一对应,表现出较稳定的压敏性能,能够反映节点处的受力变

化情况。

(2)当节点处出现裂缝或者混凝土分离现象时,P-CNT混凝土电阻值呈现突增状态,且电阻突增变化率随着荷载的增大而增大,能够及时起到预警和监控作用。

参考文献:

- [1] 于玲,陈朋,刘杰,等.基于Copula函数的预应力钢筋节点连接的装配式双柱混凝土桥墩主要失效模式分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(5):885-891.
YU Ling, CHEN Peng, LIU Jie, et al. Analysis of main failure modes of assembled double-column concrete piers connected by prestressed steel bars based on copula function[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2019, 35(5): 885-891.(in Chinese)
- [2] MAKUL N. Advanced smart concrete: A review of current progress, benefits and challenge [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274:122899-122899.
- [3] HAN B G, SUN S W, DING S Q, et al. Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites [J]. Composites Part A, 2015, 70:69-81.
- [4] 王钧,白雪石,赵金友,等.碳纳米管增强RPC弯曲疲劳性能[J].建筑材料学报,2020,23(6):1345-1349,1373.
WANG Jun, BAI Xueshi, ZHAO Jinyou, et al. Carbon nanotubes enhance RPC bending fatigue performance[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1345-1349,1373.(in Chinese)
- [5] 秦煜,阮鹏臻,唐元鑫,等.碳纳米管水泥基复合材料导电特性影响因素研究进展[J].硅酸盐学报,2021,49(2):411-419.
QIN Yu, RUAN Pengzhen, TANG Yuanxin, et al. Research progress of influencing factors on the electrical conductivity of carbon nanotube cement-based composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2):411-419.(in Chinese)
- [6] IRSHIDAT M R, AL-NUAIMI N, SALIM S, et al. Carbon nanotubes dosage optimization for strength enhancement of cementitious composites[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 44: 366-370.
- [7] KIM H K, PARK I S, LEE H K. Improved piezoresistive sensitivity and stability of CNT/cement mortar composites with low water-binder ratio[J]. Composite Structures, 2014, 116: 713-719.
- [8] DING S Q, RUAN Y F, YU X, et al. Self-monitoring of smart concrete column incorporating CNT/NCB composite fillers modified cementitious sensors [J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:127-137.
- [9] SUCHORZEWSKI J, PRIETO M, MUELLER U. An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262:120871.
- [10] JIANG S F, WANG J, TONG S Y, et al. Damage monitoring of concrete laminated interface using piezoelectric-based smart aggregate[J]. Engineering Structures, 2021, 228:111489.
- [11] 宋国林,张泽,沈成柱,等.低温等离子体改性碳纳米管对再生沥青性能的影响[J].材料导报,2020,34(2):2052-2057.
SONG Guolin, ZHANG Ze, SHEN Chengzhu, et al. The effect of low-temperature plasma modification of carbon nanotubes on the performance of recycled asphalt[J]. Materials Reports, 2020, 34(2):2052-2057.(in Chinese)
- [12] 刘洋洋.改性碳纳米管的掺入对混凝土性能影响[D].苏州:苏州科技大学,2018.
LIU Yangyang. The influence of the incorporation of modified carbon nanotubes on the properties of concrete [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018.(in Chinese)
- [13] 徐艳,曾增,葛继平,等.承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1706-1711.
XU Yan, ZENG Zeng, GE Jiping, et al. Minimum reasonable insertion depth of socket prefabricated bridge piers [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(12):1706-1711.(in Chinese)
- [14] 赵昕,黄存旺,傅佳丽,等.石墨烯水泥基复合材料的电学性能[J].建筑材料学报,2022,25(1):8-15.
ZHAO Xin, HUANG Cunwang, FU Jiali, et al. Electrical properties of graphene cement-based composites[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):8-15.(in Chinese)
- [15] 姚斌.环境因素对纳米碳纤维混凝土压敏特性的影响[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
YAO Bin. The influence of environmental factors on the compressive characteristics of nano-carbon fiber concrete [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013.(in Chinese)
- [16] 赵建锋,孙伟帅,李刚.不同轴压比钢筋混凝土圆柱桥墩地震易损性分析[J].世界地震工程,2018,34(4):31-37.
ZHAO Jianfeng, SUN Weishuai, LI Gang. Seismic vulnerability analysis of reinforced concrete cylindrical piers with different axial compression ratios [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(4):31-37.(in Chinese)
- [17] 王琴,王健,刘伯伟,等.多壁碳纳米管水泥基复合材料的压敏性能研究[J].硅酸盐通报,2016,35(9):2733-2740.
WANG Qin, WANG Jian, LIU Bowei, et al. Study on pressure-sensitive properties of multi-walled carbon nanotube cement-based composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(9):2733-2740.(in Chinese)
- [18] 秦煜,唐元鑫,阮鹏臻,等.碳纳米管水泥基复合材料压阻效应的多尺度研究进展[J].化工进展,2021,40(8):4278-4289.
QIN Yu, TANG Yuanxin, RUAN Pengzhen, et al. Multi-scale research progress on the piezoresistive effect of carbon nanotube cement-based composites [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(8):4278-4289.(in Chinese)