

文章编号: 1000-3851(2010)03-0184-06

# 复相导电混凝土应用于损伤诊断的试验研究

丁一宁\*, 陈龙凤

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116023)

**摘要:** 为了研究含有纳米炭黑或碳纤维的导电混凝土梁受荷过程中电阻变化规律与混凝土损伤之间的关系, 通过比拟与试验数据回归分析方法, 先建立混凝土梁电阻变化率与梁几何中性轴处应变的曲线关系, 再结合损伤力学理论, 建立损伤度与电阻变化率的函数关系, 为导电混凝土材料或构件自身电阻诊断其内部损伤提供了新途径。研究表明: 开裂前, 混凝土梁的电阻变化率与梁几何中性轴处应变的关系用一次衰减指数函数方程拟合较好, 通过拟合曲线的斜率可以直接反映出导电混凝土用于检测损伤的灵敏度, 从而间接反映出混凝土损伤的程度。

**关键词:** 导电混凝土; 电阻; 损伤; 比拟, 损伤度

**中图分类号:**      **文献标志码:** A

## Experimental studies of diphasic electric conduction concrete applying in the diagnosis of the damnification

DING Yining\*, CHEN Longfeng

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between concrete damage and the electric resistance change of electric conductive concrete, concrete beams containing nano-meter carbon black or carbon fiber subjected to loading were investigated. The relationship between the resistance change rate of concrete beams and the strain of geometrical neutral axis was established using an analogy method and a experimental data regression. Based on the damaging mechanics theory and the relationship above, the expression between degree of damnification and the rate of resistance change was set up. This self-diagnosis of conductive concrete material provides a new way for the measurement of the internal damage. The results show that the relationship between the rate of resistance change of concrete beams and the strain of the geometrical neutral axis can be well fitted by the exponential decay first order curve before cracking. The sensitivity of the electric conduction concretes can be reflected directly by the slope of the fitted curve, and the degree of concrete damage can be also indirectly responded.

**Keywords:** electric conductive concrete; resistance; damnification; analogy; damage degree

传统混凝土在使用过程中由于受到环境载荷作用、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等不利因素的影响, 例如大坝、桥梁、特种结构等, 不可避免地产生损伤积累, 抗力衰减, 甚至导致突发事件。为了有效避免突发性事件, 延长结构的使用寿命, 必须及时了解构件内部损伤情况<sup>[1-2]</sup>。掺入纳米炭黑与碳纤维导电相的导电混凝土具有感知应变、损伤和温度的功能, 为无需埋入传感器件就能实时健康检测大坝、道路和桥梁等大型基础设施提供了便

利, 在重要设备的电磁屏蔽和机场冰雪融化等方面也具有有良好的应用前景<sup>[3-9]</sup>。碳纤维的掺入, 一定程度上改善了混凝土的导电能力、耐久性和抗冻融性能。纳米炭黑的加入提高了混凝土的导电性能, 其填充作用可提高混凝土的密实度。但由于碳纤维大长径比的缘故, 相对于颗粒填充型复合材料, 短切碳纤维在体系中的分散更加困难<sup>[10]</sup>, 所以纳米炭黑部分替代碳纤维加入混凝土中能克服碳纤维的分散或结团等问题, 又能降低碳纤维混凝土的成

收稿日期: 2009-05-22; 收修改稿日期: 2009-12-31

基金项目: 中奥国际合作项目(2007-2009 No. 14)

通讯作者: 丁一宁, 教授, 主要从事混凝土复合材料研究 E-mail: ynding@hotmail.com

本。复掺碳纤维和纳米炭黑的混凝土既能有效发挥碳纤维形成导电网络的优势, 又能利用纳米炭黑短程导电的特点, 为制备满足力学性能、导电性能以及功能要求的智能材料提供了条件, 使其在损伤健康检测实际工程中将有良好的应用前景。

## 1 原材料

试验所用的主要原材料有: P. O42. 5R 普通硅酸盐水泥、粉煤灰、优质河砂、粒径 5~10 mm 碎石、Sika 高效减水剂、分散剂、消泡剂以及纳米炭黑和碳纤维两种导电掺合料。两种导电掺合料的主要性能指标分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 纳米炭黑的主要技术指标

Table 1 Properties of nano-meter carbon black

Specific resistance/ ( $10^{-3} \Omega \cdot m$ )	Particle size/ $10^{-9} m$	Volume resistance/ ( $10^{-3} \Omega \cdot m$ )	Surface resistance / $\Omega$
2.0	17	2.3	30.6

表 2 碳纤维的主要技术指标

Table 2 Properties of carbon fiber

Density/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	Diameter/ $10^{-6} m$	Length/mm	Resistivity/ ( $10^{-3} \Omega \cdot m$ )
1.55~1.60	12~15	6	3~7

## 2 试样制备与加载方案

### 2.1 试样制备

混凝土基准配合质量比设计为 W(水):C(水泥):F(粉煤灰):S(砂子):G(石子)=0.64:1:0.43:2:2, 导电相掺比为导电相质量与胶凝材料质量比, 具体掺量和导电相符号见表 3。

纳米炭黑混凝土(CB)的制作采用同掺法, 碳纤维混凝土(CF)的制作采用先掺法<sup>[11-12]</sup>, 而复掺纳米炭黑和碳纤维混凝土(BF)的制作方法是: 纳米炭黑采用后掺法, 碳纤维采用先掺法。制备的混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。混凝土振动成型, 试样 1 天后拆模, 放入标准养护室养护, 3 天后对试件进行四电极制作, 电极示意图如图 1。电极制作完后继续在标准养护室养护至 42 天, 然后进行抗弯试验。

表 3 导电相掺量

Table 3 Electric conduction phase

	Serial number	Nano-meter carbon black/%	Carbon fiber/%
Plain concrete	NC	0	0
	CB01	0.1	0
	CB02	0.2	0
	CB03	0.3	0
Nano-meter carbon black concrete	CB04	0.4	0
	CF04	0	0.4
	CF08	0	0.8
	CF10	0	1.0
Carbon fiber concrete	CF13	0	1.3
	CF16	0	1.6
	BF14	0.1	0.4
	BF18	0.1	0.8
Carbon black-carbon fiber concrete	BF24	0.2	0.4
	BF28	0.2	0.8

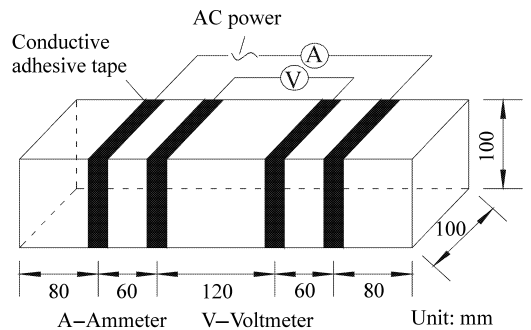


图 1 导电混凝土电阻测试示意图

Fig. 1 Sketch of measuring specimen resistance

### 2.2 加载方案

复相导电混凝土梁三点加载试验装置示意图见图 2, 图中应变片 1(4)括号中的 4 为背面应变片编号, 加载方式为分等级反复加载直至破坏, 每级荷载步幅为 3 kN, 加载速率为 0.2 mm/min±0.02 mm/min, 试验环境为干燥室内。主要加载设备和数据测量采集系统有: 交流稳压电源、IMC 智能采集系统、液压伺服万能材料试验机、定值电阻、自制交流(0~220 V)变直流(0~12 V)转换器。

## 3 电-力物理量比拟法建立力场-电场关系

用电学量比拟力学量的目的是用比较容易测量的电学量来得到构件的力学量(如弹性模量或刚度)

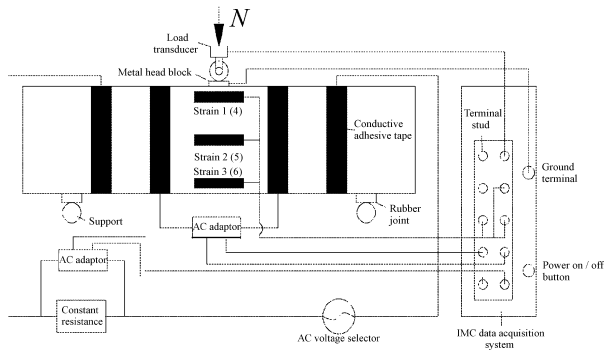


图2 加载装置示意图  
Fig.2 Testing set-up

和重要的曲线关系(如荷载-挠度曲线, 应力-应变曲线等); 而用力学量比拟电学量的缘由是它们之间的物理量之间有一定的相似性, 目前已有许多计算力场的理论和程序, 利用这些理论建立力场与电场之间的联系, 就可计算电场, 并为日后的理论研究和实际应用提供一条新的途径<sup>[13]</sup>。电学量比拟力学量的基本构想为: 通过材料或构件试验得到电流、电压、电阻等物理量, 用比拟法建立的力场与电场之间的联系得到其应力、应变等量, 本研究的目的是建立这两个场之间的关系。由于应力不能直接测量, 相应电场中的电流密度一样不能测量, 所以要用试验方法测定构件上的应力, 就必须选择一个可以测量物理现象的模型, 在力场中先测量应变, 再利用应力-应变本构关系计算出应力。在电场中先选择测量电压和电阻, 再利用欧姆定律计算出电流和电流密度, 若通过大量试验拟合出电阻与应变之间的关系曲线, 即可建立力场与电场之间的函数关系, 从而达到利用电场中容易得到的电压或电阻值计算得到力场中不易得到的物理量, 并将此法用于结构的损伤或破坏检测, 降低了力学方法中一些检测上的困难。表4给出一维电场与力场之间物理量的对照表。

此外, 电场和力场均可用拉普拉斯方程来表述为

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\text{电场: } \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

$$\text{力场: } \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = 0 \quad (3)$$

其中  $x, y, z$  为空间坐标,  $\varphi$  为势函数,  $\sigma$  为应力。从以上各式可以看出, 电场和力场的拉氏方程是一

表4 电-力物理量对照表

Table 4 Comparison between electrical and mechanical variables

Electric field variable	Force-field variable
Current: $I$	Load: $N$
Voltage: $V$	Deformation: $U$
Current density: $i = I/A = Ce$	Stress: $\sigma = N/A = E\epsilon$
Generated voltage: $e = V/L$	Strain: $\epsilon = U/L$
Ohm's law: $I = V/R$	Hooke's law: $N = U/\delta = EA\epsilon$
Resistivity: $\rho = RA/L$	Stiffness coefficient: $B = EA/L = 1/\delta$
Conductivity: $C = 1/\rho = L/RA$	Elastic modulus: $E = L/(A\delta)$
Kirchhoff's current law: $\sum I = 0$	Volumetric deformation rate: $\Delta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \text{constant}$
Sensitivity: $\lambda = \Delta R / (R\epsilon)$	Damage degree: $D = \Delta E / E$

致的, 但比拟的另一个前提是边界条件应该相同。本试验的边界条件符合要求, 如图3所示, 即加载是两等分三点加载, 而电压是两端加电压, 跨中接地。从而得知: 在线弹性、无宏观裂缝情况下, 力场和电场是可以互相比拟的。

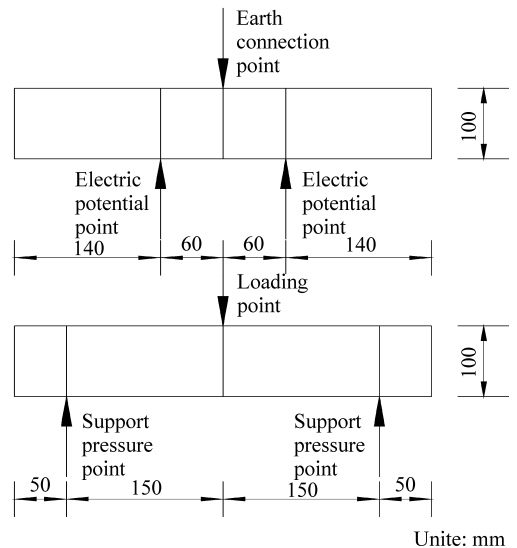


图3 电场与力场加载边界条件对比图

Fig.3 Comparison of loading boundary conditions between electric field and force field

#### 4 力场与电场关系的试验结果与分析

本试验采集了梁在受弯过程中受压区边缘的应变1(4)、几何中性轴处的应变2(5)、受拉区边缘的

应变 3(6) 以及混凝土电阻 (应变片粘贴位置见图 2), 通过这些数据散点图拟合了几何中性轴处的应变 (取应变 2 与应变 5 的平均值) 与所测混凝土梁段电阻变化率 (某加载时刻的电阻与未加载时的电阻差值除以未加载时的电阻) 之间的曲线关系, 发现与一次衰减指数函数  $Y = m \exp(-X/n) + p$  吻合较好, 并且计算得到相关系数  $R^2$ , 其中  $m$ 、 $n$ 、 $p$  是与导电相掺量、种类有关的常数,  $X$  的单位为  $\mu\epsilon$ , 详见表 5。于是电场与力场之间的关系建立可以用  $Y = m \exp(-X/n) + p$  来桥接, 对于混凝土梁在宏观裂缝形成之前的损伤评价问题, 本文中借助损伤力学理论来讨论。基于本章的试件试验是一维同向损伤问题, 因此选择了一维问题常用的简单损伤律<sup>[14]</sup>来建立其与荷载、应力、应变以及电阻变化率之间的关系, 即只考虑梁受拉区出现损伤。

在受拉区, 有效拉应力

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{1-D} = E\epsilon_t \quad (\sigma_t \geq 0, D \geq 0) \quad (4)$$

$D$  为损伤度,  $E$  为弹性模量,  $\epsilon_t$  与  $\sigma_t$  分别为受拉区边缘的拉应变与拉应力。

在受压区, 有效压应力

$$\tilde{\sigma}_c = \sigma_c = E\epsilon_c \quad (\sigma_c \leq 0, D = 0) \quad (5)$$

$\epsilon_c$  与  $\sigma_c$  分别为压区边缘的压应变与压应力。

当有效应力  $\tilde{\sigma} > 0$  时,  $D = \frac{\tilde{\sigma}}{k}$ ; 当  $\tilde{\sigma} \leq 0$  时, 取

$D = 0$ ,  $k$  为损伤模量。

由应变等价性假定

$$\begin{aligned} \sigma &= (1-D)\tilde{\sigma} \\ &= (1-D)E\epsilon = \left(1 - \frac{\tilde{\sigma}}{k}\right)E\epsilon = \left(1 - \frac{E\epsilon}{k}\right)E\epsilon \quad (6) \end{aligned}$$

$\epsilon$  与  $\sigma$  分别为材料的应变与应力。 $k = \infty$  时,  $D = 0$ , 得

$$\sigma = E\epsilon, \quad \frac{d\sigma}{d\epsilon} = E - \frac{E^2\epsilon}{2k} \quad (7)$$

假设  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = 0$  时, 内部应力达到材料极限应力值, 此时的  $D = D_{cr}$ ,  $D_{cr}$  对应的临界破坏应力为  $\sigma_{cr}$ 。

由  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = 0$  得到  $E\epsilon = k/2$ , 代入式(6)得

$\sigma_{cr} = k/4$ , 又  $D = \tilde{\sigma}/k$ , 则有

$$\sigma_{cr} = k/4 = (1 - D_{cr})D_{cr}k$$

解得  $D_{cr} = 1/2$

所以有  $\tilde{\sigma}_{cr} = D_{cr}k = k/2$  (8)

采用平截面假定, 由于拉伸区受损伤后承载力下降, 梁原中性轴将向受压区一边移动, 以  $y_0$  表示应力应变中性轴移动高度, 梁的截面尺寸为  $b \times 2h$ , 见图 4。梁受压、受拉区应力的合力  $N_c$ 、 $N_t$  分别为

$$\begin{aligned} D_c &= \frac{1}{2}b(h + y_0)\tilde{\sigma}_1 \\ N_t &= \sigma_t dA = (1-D)\tilde{\sigma}_1 b dy = \left(1 - \frac{\tilde{\sigma}_t}{k}\right)\tilde{\sigma}_1 b dy \quad (9) \end{aligned}$$

表 5 回归方程拟合参数

Table 5 Fitting constants of regressing equation

Serial number	Constant $m$	Constant $n$	Constant $p$	Correlation coefficient $R^2$
NC(CB 0% + CF 0%)	16.21	33.06	-10.33	0.50033
CB01(CB 0.1% + CF 0%)	32.31	47.48	-21.05	0.82466
CB02(CB 0.2% + CF 0%)	34.57	5.21	-39.11	0.76742
CB03(CB 0.3% + CF 0%)	56.89	85.79	-44.85	0.92748
CB04(CB 0.4% + CF 0%)	23.04	17.57	-25.56	0.90907
CF04(CB 0% + CF 0.4%)	27.87	13.00	-29.74	0.79566
CF08(CB 0% + CF 0.8%)	20.83	19.26	-21.25	0.83359
CF10(CB 0% + CF 1.0%)	25.55	12.39	-27.41	0.97752
CF13(CB 0% + CF 1.3%)	12.39	14.84	-11.00	0.94710
CF16(CB 0% + CF 1.6%)	42.96	15.75	-52.68	0.82598
BF14(CB 0.1% + CF 0.4%)	14.88	95.04	-12.56	0.95126
BF18(CB 0.1% + CF 0.8%)	106.63	83.70	-82.74	0.77459
BF24(CB 0.2% + CF 0.4%)	12.98	34.94	-15.24	0.90456
BF28(CB 0.2% + CF 0.8%)	13.45	68.90	-16.11	0.88130

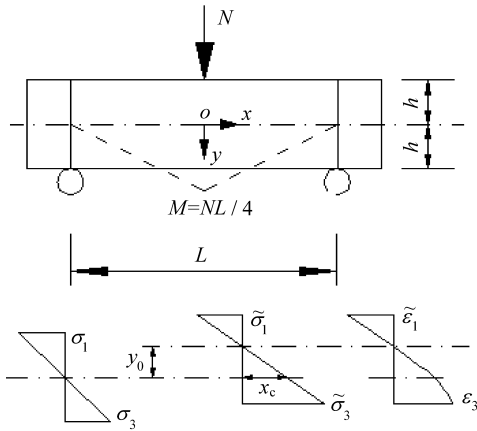


图4 矩形混凝土梁弯曲损伤

Fig.4 Flexural damage of rectangular concrete beam

$\tilde{\sigma}_1$ 、 $\sigma_3$  分别为梁顶和梁底的纤维有效应力，由几何关系

$$\tilde{\sigma}_1 = \frac{y_0 + y}{y_0 - h} \tilde{\sigma}_3, \quad \epsilon_3 = \left(1 + \frac{h}{y_0}\right) \epsilon_2 \quad (10)$$

$\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  分别为梁顶边缘应变、几何中性轴处应变、梁底边缘应变，由平衡条件

$$N_t + N_c = 0, \quad N_t y_t + N_c y_c = M \quad (11)$$

$N_c$ 、 $N_t$  的合力点位置分别用  $y_c$ 、 $y_t$  表示， $M$  为外作用力偶矩， $M = \frac{1}{4}NL$ ， $L$  为梁跨长，以上两个方程包括三个未知量  $\tilde{\sigma}_1$ 、 $\tilde{\sigma}_3$ 、 $y_0$ ，再引进平截面假定和应变等价性假定

$$\tilde{\sigma}_1 = \frac{h + y_0}{h - y_0} \tilde{\sigma}_3 \quad (12)$$

联立解得

$$\eta = \frac{3NL}{8bkh^2} \quad (13)$$

$$\tilde{\sigma}_1 = bh y_0 \frac{h + y_0}{(h - y_0)^2} k \quad (14)$$

$$\tilde{\sigma}_3 = \frac{-bh y_0}{(h - y_0)^2} k \quad (15)$$

考虑到梁的开裂(最后破坏)是从受拉区开始的，那么最终承载力丧失的取决于梁底缘有效拉应力  $\tilde{\sigma}_3$ ，当  $\tilde{\sigma}_3$  达到应力临界值  $\tilde{\sigma}_{cr}$ ，即  $\tilde{\sigma}_3 = \tilde{\sigma}_{cr} = k/2$  时，由

$$\text{等式(11)、(12)以及 } \tilde{\sigma}_3 = \tilde{\sigma}_{cr} = k/2 \text{ 可解得} \quad (16)$$

$$(y_0)_{cr} = -0.101h \quad (16)$$

$$N = N_{cr} = 0.944kbh^2/L \quad (17)$$

由式(10)、(15)、(17)以及式(4)联立得

$$\epsilon_2 = \frac{N_{cr} L y_0^2}{0.944 E h (h - y_0)^2 (h + y_0)} - 0.101h < y_0 \leq 0 \quad (18)$$

由式(15)和(5)联立得

$$D = \frac{-bh y_0}{(h - y_0)^2} \quad (19)$$

$$\tilde{\sigma}_1 = N_{cr} L y_0 \frac{h + y_0}{0.944h(h - y_0)^3} \quad (20)$$

$$\tilde{\sigma}_3 = \frac{-N_{cr} L y_0}{0.944h(h - y_0)^2} \quad (21)$$

$$\epsilon_3 = \frac{-N_{cr} L y_0}{0.944h(h - y_0)^2} \quad (22)$$

$$\epsilon_1 = \frac{N_{cr} L y_0 (h + y_0)}{0.944 E h (h - y_0)^3} \quad (23)$$

若假设梁未加载之前的电阻为  $R_0$ ，加载某时刻的电阻为  $R$ ，则式中(见表5)  $Y = m \exp(-X/n) + p$  的  $Y$  和  $X$  可以分别用  $100\Delta R/R_0 = \frac{100(R - R_0)}{R_0}$  和  $\epsilon_2$  替代，则可以得到

$$\epsilon_2 = |Y^{-1}(X)| = n \ln \left( \frac{100(R - R_0)}{m R_0} - \frac{p}{m} \right) \quad (24)$$

由此可以得知，如果知道混凝土材料的初始弹性模量、构件尺寸和开裂荷载，在构件未开裂前，通过测量导电混凝土任意时刻的电阻，根据式(18)~(24)就能计算出该梁最大弯矩截面任意一点任意时刻的应力、应变和损伤状况。

此外，由表5中的相关系数列可以看出， $Y = m \exp(-X/n) + p$  用于导电碳纤维混凝土CF10的拟合度最高，因此建议对于需要随时了解构件内部损伤的结构采用该种导电相种类和掺量的混凝土较为合适。

另一方面，从曲线方程  $Y = m \exp(-X/n) + p$  入手，由应变片的灵敏度定义知道，该导电混凝土材料的灵敏度  $\lambda$  为方程  $Y = m \exp(-X/n) + p$  的导数(即该曲线的切线斜率)绝对值乘以0.01，即

$$\lambda = |0.01 Y'| = \frac{m}{100n} \exp(-X/n) \quad (25)$$

由式(25)知，随着梁荷载和几何中性轴处的应变的增大，梁内部损伤程度加重，混凝土的灵敏度以一次衰减指数函数方式降低，该式能从宏观层面间接体现混凝土内部损伤程度情况。

## 5 算例

以CF13导电混凝土梁为例，梁的截面尺寸为  $b = 100 \text{ mm}$ ， $h = 50 \text{ mm}$ ， $L = 300 \text{ mm}$ ，弹性模量  $E = 3.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ ， $N_{cr} = 15.3 \text{ kN}$ ， $m = 12.39$ ， $n = 14.84$ ， $p = -27.41$ ，将这些参数代入式(18)~(25)得

$$\varepsilon_2 = \frac{3.242y_0^2}{(50-y_0)^2(50+y_0)}, -10.1 < y_0 \leq 0 \quad (26)$$

$$D = \frac{-5 \times 10^3 y_0}{(50-y_0)^3} \quad (27)$$

$$\tilde{\sigma}_1 = \frac{9.725 \times 10^4 y_0 (50+y_0)}{(50-y_0)^3} \quad (28)$$

$$\tilde{\sigma}_3 = -\frac{9.725 \times 10^4 y_0}{(50-y_0)^2} \quad (29)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{-3.242y_0}{(50-y_0)^2} \quad (30)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{3.242y_0(50+y_0)}{(50-y_0)^3} \quad (31)$$

$$\varepsilon_2 = 14.84 \ln\left(\frac{8.071R}{R_0} - 5.859\right) \quad (32)$$

$$\lambda = 8.349 \times 10^{-3} \exp(-0.0674\varepsilon_2) \quad (33)$$

当时间  $t=0$  (未加载) 时,  $R_0 = 863 \Omega$ ,  $\varepsilon_2 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $D=0$ ,  $\lambda=8.349 \times 10^{-3}$ , 加载造成梁损伤后, 某  $t$  时刻测得的电阻  $R$  值代入式(26)~(33)可得计算结果见表 6。

表 6 CF13 梁损伤描述量计算结果  
Table 6 Calculation results of damage degree for CF13 concrete beam

Variable	Calculation results				
$t/s$	558	1116	1674	2232	2790
$R/\Omega$	1344	1657	1934	2145	2376
$\varepsilon_2/10^{-6}$	28	34	37	39	41
$y_0/mm$	-1.02	-1.13	-1.18	-1.21	-1.24
$\varepsilon_1/10^{-3}$	-1.22	-1.34	-1.39	-1.42	-1.46
$\varepsilon_3/10^{-6}$	324	357	372	382	391
$\tilde{\sigma}_1/MPa$	-36.6	-40.1	-41.6	-42.7	-43.6
$\tilde{\sigma}_3/MPa$	38.1	41.9	43.6	44.8	45.9
$D/\%$	3.84	4.21	4.39	4.50	4.60
$\lambda/\%$	1.27	0.84	0.69	0.60	0.53

表 6 中给出了 CF13 梁损伤后部分时刻的应力、应变、损伤度以及灵敏度的计算结果, 结果表明: 随着梁荷载和几何中性轴处的应变的增大, 测量电阻的增大, 对应的梁损伤度和灵敏度分别增大和减小, 说明本文所建议的一次衰减指数函数  $Y = m \exp(-X/n) + p$  可较好地表述中性轴处的应变与电阻变化率之间的关系。

## 6 结论

(1) 开裂前, 混凝土梁的电阻变化率与梁几何中性轴处应变的关系可用一次衰减指数函数较好的拟合, 从建立了力场与电场之间的联系。

(2) 利用拟合函数与损伤力学理论建立了混凝土梁电阻与梁内部损伤以及最大弯矩截面内任意一点处的应力应变关系表达式。

(3) 随着混凝土梁损伤的加重或几何中性轴处应变的增加, 混凝土的灵敏度以指数一次衰减的方式降低, 从宏观层面间接反应出梁内部损伤程度。

## 参考文献:

- [1] 李惠, 欧进萍. 智能混凝土与结构[C]// 第 16 届全国结构工程学术会议特邀报告[R]. 山西太原: [不详], 2007: 58-76
- [2] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全性评定[C]// 走向 21 世纪的中国力学—中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集. 北京: 清华大学出版社, 1996: 179-189.
- [3] Wang S, Shui X, Fu X, Chung D D L. Early fatigue damage in carbon fiber composites observed by electrical resistance measurement [J]. Materials Science, 1998, 33: 3875-3884.
- [4] Wang Xiaojun, Chung D D L. Strain sensing using carbon fiber [J]. Journal of Material Research, 1999, 14(3): 790-802.
- [5] Shi Zengqiang, Chung D D L. Carbon fiber reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29: 435-439.
- [6] Fu Xuli, Chung D D L. Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(9): 1313-1318.
- [7] Fu Xuli, Chung D D L. Improving the strain-sensing ability of carbon fiber reinforced cement by ozone treatment of the fibers [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(2): 183-187.
- [8] Ragos Marian, Chung D D L. Damage in Carbon fiber reinforced concrete monitored by electrical resistance measurement [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(4): 51-59.
- [9] Sherif Y, Christopher Y T. Conductive concrete overlay for bridge deck deicing [J]. ACI Material Journal, 1999, 96(3): 382-390.
- [10] 徐任信, 王钧, 鲁学林, 卢艳华. 短切碳纤维导电复合材料渗流与 PTC 行为的唯象分析[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 96-100.  
Xu Renxin, Wang Jun, Lu Xuelin, Lu Yanhua. Phenomenal analysis of percolation and PTC behavior in conducting composite with short carbon fiber [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(4): 96-100.
- [11] 关新春, 韩宝国, 欧进萍. 碳纤维在水泥浆体中的分散性研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2002(2): 34-36
- [12] 刘子田. 碳纤维智能混凝土的制备及其性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [13] 吴献. 导电混凝土受荷全过程电导率、应力与应变关系研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005: 7-19.
- [14] 蔡四维, 蔡敏. 混凝土的损伤断裂[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 45-62.