

对用电阻应变片进行应变长期量测的研究

cf
21-26

李辉 钟树生 黄文 周中元

(重庆建筑大学建筑工程学院 400045)

TU198.6
TU196.7

摘要 详细阐述了用电阻应变片进行多楼层、多测点、远距离、复杂施工环境条件下钢筋应变长期观测试验的方法;分析了影响长期应变观测的主要因素;论证了消除这些因素应采取的技术措施。研究结论对高层建筑施工过程监测、对各种新结构体型在高层建筑中的实际使用性能的长期观测具有重要意义。

关键词 高层建筑, 施工, 应变, 测量, 环境条件, 电阻应变片

中图分类号 T317.2

多测点多楼层远距离电阻应变长期观测试验,长期以来,一直被认为是电阻应变片测量应变的禁区,少有何律。其主要原因在于这种试验受环境温度、湿度、应变片的蠕变、粘结剂的强度时效、应变片粘贴质量、导线电阻、电容等多种因素的影响,使测试结果误差大,可靠性低。如何采取技术措施,克服上述因素的不利影响,解决用电阻应变片进行多测点多楼层远距离电阻应变长期观测的技术难题,为工程建设的现场监测、结构分析和施工过程的模拟提供可靠数据,是值得研究的问题。

1 常用测量电桥与贴片方式

图 1a)、c)所示为常用于钢筋应变测量的电阻应变片粘贴方式和测量电桥连接方式。 R_1

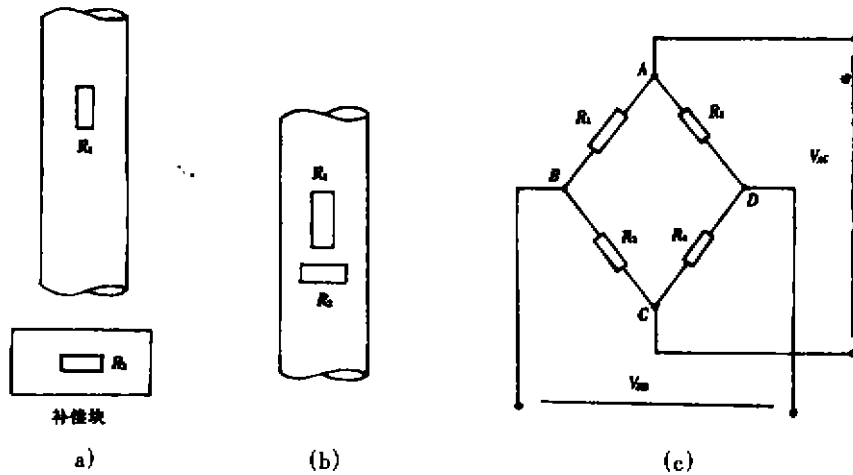


图1 常用测量桥路和贴片方式

收稿日期:1997-09-10

李辉,男,1963年,高工

感受钢筋变形和温度、湿度等环境条件改变的影响。 R_2 只感受温度、湿度等环境条件变化的影响。由钢筋变形和温度变化引起应变片电阻变化为 ΔR_{1e} 、 ΔR_{1t} ， R_1 和 R_2 的电阻增量可表示为：

$$\Delta R_1 = \Delta R_{1e} + \Delta R_{1t}$$

$$\Delta R_2 = \Delta R_{2t}$$

若工作片 R_1 和补偿片 R_2 处于同一环境条件，则 $\Delta R_{1t} = \Delta R_{2t}$ ，电桥输出电压 V_{BD} 与输入电压 V_{AC} 之间存在下列关系：

$$V_{BD} = \frac{\Delta R V_{AC}}{4 R_1} = \frac{V_{AC} (\Delta R_1 - \Delta R_2)}{4 R_1} = \frac{V_{AC} (\Delta R_{1e} + \Delta R_{1t} - \Delta R_{2t})}{4 R_1} = K \epsilon V_{AC} / 4$$

这样温度变化引起的电阻变化 ΔR_{1t} 、 ΔR_{2t} 被消除了，所测得的应变 ϵ 即为与试件轴线相一致的应变值。这种测量方法补偿块和工作片 R_1 处于不严格一致的环境中，特别是在多测点多楼层的电阻应变长期观测试验中，环境差异大，测试结果误差较大。

图 1b) 中， R_2 应变片与 R_1 应变片粘贴在同一试件上，但其方向与 R_1 成 90° ，故 R_2 反映试件受力后横向变形， R_1 、 R_2 的电阻增量分别为：

$$\Delta R_1 = \Delta R_{1e} + \Delta R_{1t} \quad (1)$$

$$\Delta R_2 = \Delta R_{2e} + \Delta R_{2t} = -K_2 \mu \epsilon_1 + \Delta R_{2t} \quad (2)$$

由于 R_1 、 R_2 属同规格同批样应变片， $K_1 = K_2 = K$ ， $R_1 = R_2 = R$ ， R_1 、 R_2 严格处于同一环境条件下，故 $\Delta R_{1t} = \Delta R_{2t}$ ，

$$V_{BD} = \frac{\Delta R V_{AC}}{4 R} = \frac{V_{AC} (\Delta R_1 - \Delta R_2)}{4 R} = \frac{K(1+\mu)}{4} \epsilon_p V_{AC} \quad (3)$$

式中， μ ——材料泊桑比；这种测量贴片方法使测量灵敏度提高到 $(1+\mu)$ 倍。

2 影响长期应变测量的因素与消除措施

利用图 1b)、c) 所示测量电桥及贴片方式进行电阻应变的长期观测时，还可有效消除温度、湿度、蠕变及导线电阻和桥臂电阻变化对测量结果带来的不利影响。

众所周知，图 1b)、c) 桥路输出电压与输入电压，桥路电阻之间存在下列关系：

$$V_{BD} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{AC} \quad (4)$$

当桥路平衡时，上式为零。

图 2 所示，考虑绝缘阻值 R_j ，导线电阻 r 的影响，则存在下列关系：

$$R_{AB} = \frac{(R_1 + \Delta R_1) R_{j1}}{R_1 + R_{j1} + \Delta R_1} + r \quad (5)$$

$$R_{BC} = \frac{(R_2 + \Delta R_2) R_{j2}}{R_2 + R_{j2} + \Delta R_2} + r \quad (6)$$

$$R_{CD} = R_3 + \Delta R_3 \quad (7)$$

$$R_{AD} = R_4 + \Delta R_4 \quad (8)$$

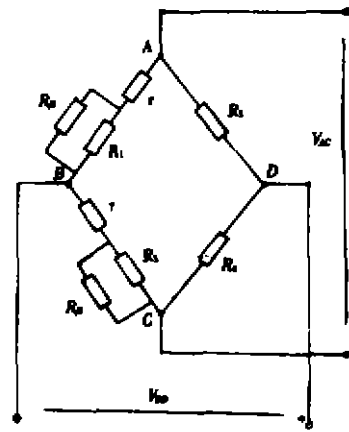


图 2

$$\Delta R_1 = \Delta R_{1i} + \Delta R_{1r} + \Delta R_{1t} \quad (9)$$

$$\Delta R_2 = \Delta R_{2i} + \Delta R_{2e} + \Delta R_{2r} \quad (10)$$

$$\Delta R_3 = \Delta R_{3i} \quad (11)$$

$$\Delta R_4 = \Delta R_{4i} \quad (12)$$

$$\Delta R_{2e} = -\mu \Delta R_{1t} \quad (13)$$

由于 R_3 、 R_4 是同型号外接电阻, 所处环境条件相同, 故有

$$\Delta R_{3i} = \Delta R_{4i} \quad (14)$$

又由于 R_1 、 R_2 是同批次, 同规格应变片和导线, 故有

$$\Delta R_{1i} = \Delta R_{2i} \quad (15)$$

$$\Delta R_{1r} = \Delta R_{2r} \quad (16)$$

(4)式的分子部分

$$\Delta R = R_{AB}R_{CD} - R_{BC} \cdot R_{AD} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} R_{AB} \cdot R_{CD} &= \left(\frac{(R_1 + \Delta R_1) R_{j1}}{R_1 + R_{j1} + \Delta R_1} + r \right) (R_3 + \Delta R_{3i}) \\ &= \frac{R_1 R_{j1} R_3}{R_1 + R_{j1} + \Delta R_1} + \frac{\Delta R_1 R_{j1} R_3}{R_1 + R_{j1} + \Delta R_1} + r \cdot R_3 \\ &\quad + \frac{R_1 R_{j1} \Delta R_{3i}}{R_1 + R_{j1} + \Delta R_1} + \frac{\Delta R_1 R_{j1} \Delta R_{3i}}{R_1 + R_{j1} + \Delta R_1} + r \Delta R_{3i} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} R_{BC} \cdot R_{AD} &= \left(\frac{(R_2 + \Delta R_2) R_{j2}}{R_2 + R_{j2} + \Delta R_2} + r \right) (R_4 + \Delta R_{4i}) \\ &= \frac{R_2 R_{j2} R_4}{R_2 + R_{j2} + \Delta R_2} + \frac{\Delta R_2 R_{j2} R_4}{R_2 + R_{j2} + \Delta R_2} + r \cdot R_4 \\ &\quad + \frac{R_2 R_{j2} \Delta R_{4i}}{R_2 + R_{j2} + \Delta R_2} + \frac{\Delta R_2 R_{j2} \Delta R_{4i}}{R_2 + R_{j2} + \Delta R_2} + r \Delta R_{4i} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta R = R_{AB}R_{CD} - R_{BC}R_{AD} &= R_1 R_3 \left(\frac{R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} - \frac{R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} \right) + R_3 \left(\frac{\Delta R_1 R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} - \frac{\Delta R_2 R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} \right) \\ &\quad + R_1 \Delta R_{3i} \left(\frac{R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} - \frac{R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} \right) + \Delta R_{4i} \left(\frac{\Delta R_1 R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} - \frac{\Delta R_2 R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

略去二阶微量项, 令 $R_{1j} = R_1/R_{j1}$, $R_{2j} = R_2/R_{j2}$ 则

$$\begin{aligned} \Delta R &= R_1 R_3 \left(\frac{1}{R_{1j} + 1} - \frac{1}{R_{2j} + 1} \right) + R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_{1j} + 1} - \frac{\Delta R_2}{R_{2j} + 1} \right) + R_1 \Delta R_{3i} \left(\frac{1}{R_{1j} + 1} - \frac{1}{R_{2j} + 1} \right) \\ &= \left(\frac{1}{R_{1j} + 1} - \frac{1}{R_{2j} + 1} \right) (R_1 R_3 + R_1 \Delta R_{3i}) + R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_{1j} + 1} - \frac{\Delta R_2}{R_{2j} + 1} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} (R_{AB} + R_{BC})(R_{CD} + R_{AD}) &= \left(\frac{R_1 R_{j1} + \Delta R_1 R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} + \frac{R_2 R_{j2} + \Delta R_2 R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} + 2r \right) \cdot (R_3 + \Delta R_{3i} + R_4 + \Delta R_{3i}) \\ &= 2 \left(\frac{R_1 R_3 R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} + \frac{\Delta R_1 R_{j1} R_3}{R_1 + R_{j1}} + \frac{R_2 R_3 R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} + \frac{\Delta R_2 R_{j2} R_3}{R_2 + R_{j2}} + 2r R_3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_1 R_{j1} \Delta R_{3i}}{R_1 + R_{j1}} + \frac{\Delta R_1 \Delta R_{3i} R_{j1}}{R_1 + R_{j1}} + \frac{R_2 R_{j2} \Delta R_{3i}}{R_2 + R_{j2}} + \frac{\Delta R_2 \Delta R_{3i} R_{j2}}{R_2 + R_{j2}} + 2r \Delta R_{3i} \right) \\ &= 2 \left[R_1 R_3 \left(\frac{1}{R_{1j} + 1} + \frac{1}{R_{2j} + 1} \right) + \left(\frac{1}{R_{1j} + 1} + \frac{1}{R_{2j} + 1} \right) R_1 \Delta R_{3i} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} + \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right) + 2r(R_3 + \Delta R_3) \Big] \\
 & = 2 \left[\left(\frac{1}{R_1 + 1} + \frac{1}{R_2 + 1} \right) (R_1 R_3 + R_1 \Delta R_3) \right. \\
 & \quad \left. + R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} + \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right) + 2r(R_3 + \Delta R_3) \right] \quad (22)
 \end{aligned}$$

利用式(4),并注意到 $\Delta R_3 \ll R_3$,则图 2 所示电桥电路实际输出电压 V_{BD}' 为:

$$\begin{aligned}
 V_{BD}' &= \frac{R_1 R_3 \left(\frac{1}{R_1 + 1} - \frac{1}{R_2 + 1} \right) + R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} - \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right)}{2 \left[R_1 R_3 \left(\frac{1}{R_1 + 1} + \frac{1}{R_2 + 1} \right) + R_3 \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} + \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right) + 2r R_3 \right]} V_{AC} \\
 &= \frac{R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} - \frac{1}{R_2 + 1} \right) + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} - \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right)}{2 R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} + \frac{1}{R_2 + 1} \right) + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} + \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right) + 2r} V_{AC} \quad (23)
 \end{aligned}$$

讨论:

(1) 当应变片 R_1 、和 R_2 粘贴工艺严格一致,绝缘电阻 $R_{11} = R_{21}$,则有下列近似的关系。

$$\begin{aligned}
 V_{BD}' &= \frac{\frac{1}{R_1 + 1} (\Delta R_1 - \Delta R_2)}{2 R_1 \left(\frac{2}{R_1 + 1} \right)} V_{AC} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{4 R_1} V_{AC} = \frac{\Delta R_{1\epsilon} - \Delta R_{2\epsilon}}{4 R_1} V_{AC} \\
 &= \frac{(1 + \mu)}{4} K \cdot \epsilon_1 V_{AC} = V_{BD} \quad (24)
 \end{aligned}$$

(2) 当 $R_{11} \neq R_{21}$,但 $R_{11} \gg R_1, R_{21} \gg R_2$ 时,则有

$$V_{BD}' = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{4 R_1} V_{AC} = \frac{1 + \mu}{4} K \cdot \epsilon_1 V_{AC} = V_{BD} \quad (25)$$

(3) 当 $R_{11} \neq R_{21}$ 且不满足 $R_{11} \gg R_1, R_{21} \gg R_2$ 时,则严格有

$$\begin{aligned}
 V_{BD}' &= \frac{R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} - \frac{1}{R_2 + 1} \right) + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} - \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right)}{2 R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} + \frac{1}{R_2 + 1} \right) + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} + \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1} \right) + 2r} V_{AC} \\
 &= \left[\frac{R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} - \frac{1}{R_2 + 1} \right)}{2 R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} + \frac{1}{R_2 + 1} \right)} + \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1 + 1} - \frac{\Delta R_2}{R_2 + 1}}{2 R_1 \left(\frac{1}{R_1 + 1} + \frac{1}{R_2 + 1} \right)} \right] V_{AC} \quad (26)
 \end{aligned}$$

作进一步整理

$$\begin{aligned}
 V_{BD}' &= \frac{R_2 \Delta R_1 - R_1 \Delta R_2 + R_1 (R_{21} - R_1) + \Delta R_1 - \Delta R_2}{2 R_1 (R_{11} + R_2 + 2)} V_{AC} \\
 &= \frac{(R_{21} - R_1) (R_1 + \Delta R_{1\epsilon} + \Delta R_{11})}{2 R_1 (R_{11} + R_2 + 2)} V_{AC} + \frac{(R_{21} + \mu R_1 + \mu + 1)}{2 (R_{11} + R_2 + 2)} \cdot \frac{\Delta R_{1\epsilon}}{R_1} V_{AC} \\
 &= \frac{(R_{21} - R_1)}{2 (R_{11} + R_2 + 2)} V_{AC} + \frac{R_{21} + \mu R_1 + \mu + 1}{R_{11} + R_2 + 2} \cdot \frac{1}{2} K \epsilon V_{AC} \quad (27)
 \end{aligned}$$

(27)式说明:①当应变片 R_1, R_2 的绝缘电阻值 R_{11}, R_{21} 较低,且不相等时,就不能消除

电阻应变片的温度和蠕变效应,但由于 $\Delta R_1, \Delta R_2$ 远小于 R_1 ,故其影响很小;②无论应变片 R_1, R_2 的绝缘电阻值 R_{j1}, R_{j2} 取何值,但若其绝缘电阻值相等,则利用本桥路联接方法仍能消除温度和蠕变效应的影响,测得满意结果。

3 误差分析

采用图 1b、c 的测量电桥及贴片方式进行电阻应变长期观测试验,导致测量结果误差的主要因素有:

3.1 材料的泊桑比

材料的泊桑比一般取 0.285 左右,不同材料的泊桑比存在细微差异,这种差异直接影响测量结果。可行的解决办法是对被测试钢筋(材)作材性试验,通过试验确定被测钢筋的泊桑比。

3.2 截断误差

由式(24)可见:当 $\Delta R \ll R$ 时,输出电压和应变成正比。如果这一假设不成立,而仍然用线性刻度仪器来测量,必然带来误差,这种误差即所谓非线性误差。对图 1b)、c)所示电桥电路和贴片方式有:

$$\begin{aligned} V_{BD}' &= \frac{V_{AC}}{4} K(\epsilon_1 + \mu \epsilon_1) \left[1 + \frac{K}{2} (\epsilon_1 + \mu \epsilon_1) \right]^{-1} = \frac{K V_{AC}}{4} \epsilon_1 (1 + \mu) \left[1 + \frac{1}{2} K \epsilon_1 (1 + \mu) \right]^{-1} \\ &= \frac{K(1 + \mu)}{4} \cdot \epsilon_1 \left\{ 1 - \frac{1}{2} K(1 + \mu) \epsilon_1 + \frac{1}{4} [K(1 + \mu) \epsilon_1]^2 + \dots \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\text{电桥相对误差 } e = \frac{V_{BD} - V_{BD}'}{V_{BD}} = \frac{1}{2} K(1 + \mu) \epsilon + \text{高阶微量} \quad (29)$$

由(29)式可见: $K(1 + \mu) \epsilon$ 越大,相对误差 e 也越大,一般略去高阶微量得

$$e = \frac{1}{2} K(1 + \mu) \epsilon \quad (30)$$

取应变片的灵敏系数 $K = 2$,则 $e = (1 + \mu) \epsilon_1$,若被测应变为 $10\,000 \mu\epsilon$ 时,其相对误差为 $(1 + \mu) \%$,要求相对误差小于 1% ,则被测应变值小于 $10\,000 / (1 + \mu) \mu\epsilon$ 。取泊桑比 $\mu = 0.3$,则被测应变小于 $7\,700 \mu\epsilon$ 。一般钢筋的屈服应变为 $2\,200 \mu\epsilon$,则其相对误差为 $e = 0.28 \%$ 。

3.3 绝缘电阻

由式(27)式(24),则相对误差为

$$\begin{aligned} e &= \frac{V_{BD} - V_{BD}'}{V_{BD}} = 1 - \frac{V_{BD}'}{V_{BD}} = 1 - \frac{\frac{(R_{2j} - R_{1j})}{2(R_{1j} + R_{2j} + 2)} V_{AC} + \frac{R_{2j} + \mu R_{1j} + \mu + 1}{R_{1j} + R_{2j} + 2} \cdot \frac{1}{2} K \epsilon_1 V_{AC}}{\frac{(1 + \mu)}{4} K \epsilon_1 V_{AC}} \\ &= 1 - \frac{2(R_{2j} - R_{1j})}{(R_{1j} + R_{2j} + 2)(1 + \mu) K \epsilon} - \frac{(R_{2j} + \mu R_{1j} + 1 + \mu) 2}{(R_{1j} + R_{2j} + 2)(1 + \mu)} \\ &= 1 - \frac{2}{(R_{1j} + R_{2j} + 2)(1 + \mu)} \left[\frac{(R_{2j} - R_{1j})}{K \epsilon} + (R_{2j} + \mu R_{1j} + 1 + \mu) \right] \end{aligned} \quad (31)$$

讨论极端情况:

1) 当 $R_{1j} = 0.001 \Omega$ 时, $R_{2j} = 1\,000 R_1 = 120\,000 \Omega$, $\mu = 0.3$

$R_{21} = 1\ 000\Omega$ 时, $R_{22} = 0.001 R_1 = 0.120\Omega$, $\mu = 0.3$

$$\text{则 } e = 1 - \frac{2}{1\ 002 \times 1.3} \left[\frac{1\ 000}{K \epsilon} + 1\ 001.3 \right] = -0.54 - \frac{1.54}{K \epsilon} \quad (32)$$

2) 当 $R_{11} = 1\ 000\Omega$ 时, $R_{12} = 0.001 R_1 = 0.12\Omega$, $\mu = 0.3$

$R_{21} = 0.001\Omega$ 时, $R_{22} = 1\ 000 R_1 = 120\ 000\Omega$, $\mu = 0.3$

$$\text{则 } e = 0.54 + \frac{1.54}{K \epsilon_1}$$

3) 当应变片 R_1 、 R_2 的绝缘电阻值很高, R_{11} 、 R_{21} 趋于零时, 则由绝缘电阻值引起的相对误差为:

$$e = 1 - \frac{2}{2(1+\mu)}(1+\mu) = 0 \quad (34)$$

4) 当测试初始值时, $R_{11} \rightarrow \infty$ 、 $R_{21} \rightarrow \infty$, 相对误差 $e \rightarrow 0$; 随时间推移, 环境条件改变, 使 R_{11} 降为 $0.1\ M\Omega = 10\ 000\Omega$, 而 R_{21} 仍为 ∞ , 此时相对误差 $e < 0.5\%$, 仍能满足测试要求。

4 结 论

1) 利用图 1b)、c) 所示粘贴方式和桥路联接方式进行电阻应变长期观测试验, 在应变片 R_1 、 R_2 绝缘阻值较高时, 可有效消除温度、湿度、蠕变、导线电阻和桥臂电阻变化对测试结果带来不利影响。

2) 利用图 1b)、c) 进行电阻应变长期观测试验, 当绝缘电阻值 $< 0.1\ M\Omega$ 时, 将影响测试结果。

3) 为了获得满意的测试结果, 应保证应变片 R_1 、 R_2 的粘贴工艺相同, 并使其具有尽可能一致的绝缘电阻值。

4) 本文并未涉及仪器漂移和应变片粘贴强度时效问题对测量结果的影响。可以考虑近年来电子技术突飞猛进的发展, 电阻应变仪器漂移已得到有效改善, 粘贴强度时效则可通过合理选择粘结剂和严格操作规程得到改善。

Research on the Long Term Strain Measurement with Resistance Strain Gages

Li Hui Zhong Shusheng Huang Wen Zhou Zhongyuan

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045)

Abstract A long term measuring method for steel strains in complex construction surroundings which involves multi-storey, multi-measuring points and long distance etc. is expounded in detail. The main factors affecting the long term strain measurement are analysed and corresponding technical measures are proposed. The conclusions given in the present paper is significant for the quality monitor in process of construction and service of highrise buildings of new structural systems.

Key Words highrise building, construction, strain, measurement, surroundings (编辑:王秀玲)