

建 筑 情 报 资 料

第 8033 号

1980 年 9 月

用电阻应变仪进行 长期观测的方法

四川省建筑科学研究所编印

用电阻应变仪进行 长期观测的方法

以往，在混凝土、钢筋混凝土结构中，为了解决应力应变和变形的长期测试，较多的采用钢弦应变计，差动式应变计等。这些仪口虽有其优越性，但制作困难，价格贵，外形尺寸一般较大，故使用范围受到一定限制。电阻应变测试技术具有许多优点，可以弥补上述仪表的不足，电阻应变，形小质轻，价廉，能遥测和自动测舅；既可贴在混凝土外面，也可设法布置在混凝土内，或贴于钢筋上，可单片使用，也可多片组合使用，拉、弯、压、剪，通过合理布片和接桥，几乎都能观测。尤其是测力，位移应力、应变、土压等传志口的出现，使用范围日趋广泛。近年来，胶材丝料质舅不断提高，制作工艺不断发展，质舅越来越好，仪口的精度、稳定性都有很大提高，这些都为电阻应变用作长期观测创造了良好的条件。利用电阻应变测试技术进行长期观测是电测技术工作者希望得到解决的一个问题。

以标准电阻为基准，利用电阻应变仪进行长期观测，这是近年来出现的一种电测方法。我们在《CJP 型片式混凝土应变计研制》课题中进行长期测试，对上述方法进行了探讨，作了必要的改进，效果较好。

一、电阻应变仪进行长期观测的主要方法和依据

利用电阻应变仪对贴有应变片的测点或传志口进行长期观测的方法，主要用标准电阻（常用应变仪附带的120欧姆标准电阻）将零读式应变仪（例如YJ—5型、YJB—A型，后者更方便。也可用其它型号零读式应变仪）的内半桥调为等臂，使其内半桥

输出为零，用经过调好的应变仪去另测贴有应变片的测点或传感
器，以测定所测各点各次的相对差值，借以求得长期改变值。

(一) 主要方法

1. 仪口调查：将事先选择检定好的120欧姆无感电阻（选
择检定方法后详述）三根引出导线，接A、B、C端注号码，将
其对应接入应变仪A、B、C接线柱上，成为外半桥。应变仪D、D'
D''用连接片连接妥当，成为一点。如图1。分别旋动电阻电容
平衡，使应变仪上检流计

指针为零。将标准电阻A、

C线头对调，形成C、B、A

对应接在应变仪的A、B、

C接线柱上。此时，转动

读数盘使指针为零，读出

ε_1 ，比如为 $-68 \mu\varepsilon$ ，然

后将读数盘放在 $\frac{\varepsilon_1}{2} =$

$\frac{-68}{2} = -34 \mu\varepsilon$ 上，重新

调查电阻电容使检流计指针指零。这时将标准电阻A、C线对调，

对应接在应变仪A、B、C接线柱上，应变仪读数应为 $+34 \mu\varepsilon$ ，

即线头ABC接时得到的 ε_{ABC} 与CBA接时得到的 ε_{CBA} 绝

对值相等，例如 $|-34 \mu\varepsilon| = |+34 \mu\varepsilon|$ 。这样，仪口就可视为

调妥。

2. 测读：将待测测点接到应变仪A、B接线柱上，补偿片接
到应变仪B、C上，便可读数。如系第一次测读，可作为当时条件
下的初读数。

第二次测读：即间隔较长时间，比如一天或数天，数月，再
次测读。仍按上述仪口调查的方法重新调查仪口。标准电阻可用
第一次用过的，也可用其它标准电阻，只要调查时满足下式即可。

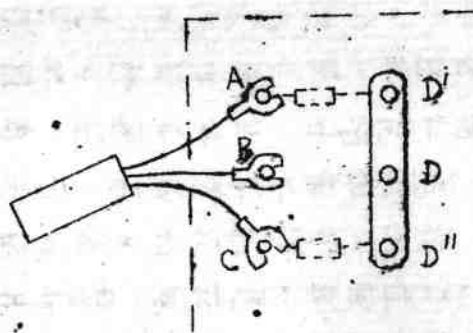


图1

$$|\varepsilon_{ABC}| = |\varepsilon_{CBA}|$$

然后将各测点和补偿点逐点对应接到应变仪上测读。以后各次均可按上述方法测读。

从测读过程可看出，利用电阻应变仪进行长期测试的方法比较简单。应当指出：测点所采用的补偿片（温度补偿以及有关的补偿）必须是可靠的或可修正的（如热膨胀、温度等的影响是可修正的），同时必须使各测点与补偿片的导线的截面积长度相等，在测试过程中不得更换导线，多根导线应排列整齐并架空，导线两端封闭，使其导线之间温度相对固定，接近绝湿以减少导线的电阻差和电容差。

(二) 测另依据：电阻应变测另线路，大多采用惠斯登电桥的原理构成，如图2所示。惠斯登电桥的平衡条件是：

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

此时电桥对角线上无电纹号输出。如果：

$$R_1 \cdot R_3 \neq R_2 \cdot R_4$$

对角线上将有电纹号输出。如

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，或 $R_1 = R_2$ ，

$R_3 = R_4$ 形成等臂电桥时对角线

上无电纹号输出。若 $R_1 \neq R_2$ ，

$R_3 \neq R_4$ ，但 $R_1 : R_2 = R_4 : R_3$

即两个半桥成等比例，此时的对角线上也无电纹号输出。

直流电桥的应变仪，其对角线上的输出纹号可用下式表达：

$$\Delta u = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

$$\text{或 } \Delta u = \frac{U}{4} \cdot K \cdot \varepsilon$$

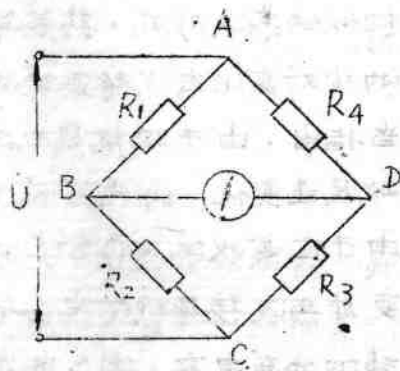


图2

$$\text{即 } \Delta R = K \cdot \varepsilon \cdot R$$

式中：

U 为供桥电压；

R 为应变片电阻；

ΔR 为应变片电阻的增量；

K 为应变片灵敏系数；

ε 为引起 ΔU 的应变量；

交流电桥为等臂或输出对称电桥时，

$$\Delta U = \frac{1}{4} \cdot \bar{E} \cdot \frac{\Delta Z}{Z} \quad \text{----- (2)}$$

式中： $\bar{E}$ 为交流供桥的有效电压；

Z 为桥臂阻抗；

ΔZ 为桥臂阻抗的增量；

由以上两式可以看出，交直流电压输出桥的输出电压有完全相似的表达形式，其差异仅在于用交流供桥的有效值 $\bar{E}$ ，阻抗 Z 的相对变化去代替直流供桥电压 U 和桥臂电阻 R 的相对变化。应当指出，由于阻抗是电阻分量和电抗分量的和，其中任一参数发生变化，即电阻或电容发生变化，都会引起电桥输出。但是，由于应变仪的工作频率一般不高，且内电桥未用无感电阻，而应变片与连接导线的电感极小，故交流电桥的电抗分量主要来自导线的分布电容，图3所示为其等效线路图。

则有：

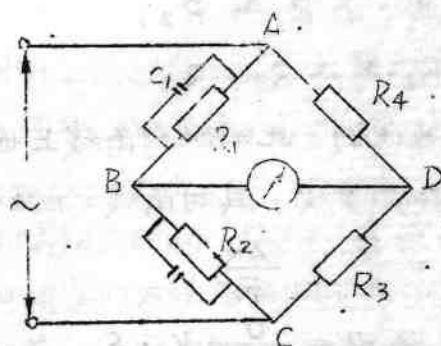


图3 阻容并联等效线路

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} \\ Z_2 &= \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} \end{aligned} \right\}$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_4 = R_4$$

同样用惠斯登电桥原理可得：

$$\frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1} \cdot R_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} \cdot R_3 \quad \text{----- (3)}$$

当内半桥为等臂，即 $R_3 = R_4$ ，解上式可得：

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_2 \\ C_1 &= C_2 \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (4)}$$

式中

C 为导线的分布电容。

由 (4) 式可知，要使阻容并联（交流）电桥实现平衡，必须满足相邻臂（内外半桥两相邻臂）的电阻和电容应分别相等。这也正是前节强调各测量导线的截面，长度相等，且中途不得更换和改变条件的主要原因。

下面着重讨论两等臂电桥（包括交直流，以下同）的测量。两等臂电桥中，仪内半桥的两臂一般由 120 欧姆标准无感电阻构成；外半桥的两臂为测点或一臂是测点，另一臂是补偿电阻片。如果每次测量前调定仪内的两臂相等，使内半桥输出为零，那末就可以大为减少仪内和标准电阻本身因各种因素变化而引起的测量误差。用这种方法去测量变化着的测点，测得数据主要是外

半桥由于各种原因而产生的应变量，也就是工作臂电阻与补偿臂电阻的相对改变量。当补偿片作温度等补偿，应是可靠或是可修正的，对测得的数值加以修正后就可获得测点的应变值。以上讨论表明每次测量时保证内桥两臂相等是进行长期观测的根据和必需条件。下面将证明用前述的操作方法可使内桥两臂相等。

(三) 内半桥调为等臂的证明

当采用标准电阻调零仪时，不论交直流电桥，此时，仪口内外半桥均为标准无感电阻，即在交流电桥时也可认为是无电抗分量存在。那么，下面就可用惠斯登电桥原理来进行推证。

假设标准电阻的两臂不相等，即 $R_{AB} \neq R_{BC}$ ，用前述测读方法，先将标准电阻接在应变仪的 A B C 接线柱上，调零电阻电容使仪口平衡，即指针为零，表示： $\varepsilon_{ABC} = 0$ ，反转 A C 接线，就可测出 $\varepsilon_{CBA} = \varepsilon$ ；然后以 $\varepsilon_{CBA} = \frac{\varepsilon}{2}$ ，重新调零仪口的电阻平衡（指针为零），以后内半桥两臂电阻就不再调动，分别设为 R_3 、 R_4 。此时电桥如图 4 所示。

图 4 中因为 $R_{AB} \neq R_{BC}$ ，调零后： R_1 实际等于 $R_{BC} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot K \cdot R_{BC}$ ， R_2 实际等于 $R_{AB} - \frac{\varepsilon}{2} \cdot K \cdot R_{AB}$

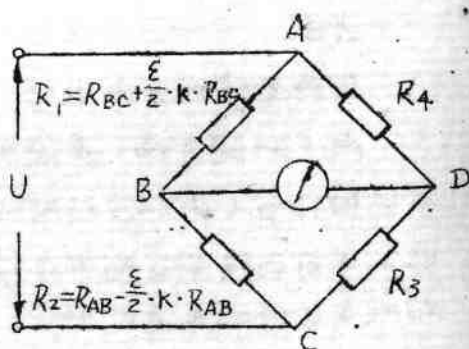
图 4 的平衡式为：

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

用实际的 R_1 、 R_2 代入上式即得： 图 4

$$\left[R_{BC} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot K \cdot R_{BC} \right] \cdot R_3 = \left[R_{AB} - \frac{\varepsilon}{2} \cdot K \cdot R_{AB} \right] \cdot R_4 \quad \text{----- (5)}$$

如果再将 A、C 翻转分别对应接回仪口 A、B、C 接线柱上。



此时, $\varepsilon_{ABC} = -\frac{\varepsilon}{2}$ 时, 指针为零, 即内半桥未再调动而获得了平衡, 则电桥为图 5 所示。

图 5 的平衡式为:

$$R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4$$

同样用实际的 $R_1 \cdot R_2$

代入上式则得:

$$\left[R_{AB} - \frac{\varepsilon}{2} \cdot K \cdot R_{AB} \right] \cdot R_3$$

$$= \left[R_{BC} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot K \cdot R_{BC} \right] \cdot R_4$$

----- (6)

上面已经指出, 从图 4 到图 5, 内半桥未再调动, 则 (5)、(6) 式的 R_3 、 R_4 各自未变, 这样将 (5)、(6) 两式相加并整理后
可得:

$$\begin{aligned} & R_3 \left[R_{BC} + R_{AB} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot K (R_{BC} - R_{AB}) \right] \\ &= R_4 \left[R_{AB} + R_{BC} + \frac{\varepsilon}{2} \cdot K (R_{BC} - R_{AB}) \right] \end{aligned} \quad \text{----- (7)}$$

$$\therefore R_3 = R_4 \quad \text{----- (8)}$$

由此可见, 用上述方法, 使用不同的标准电阻均可调查
 $|\varepsilon_{ABC}| = |\varepsilon_{CBA}|$, 即将应变仪的内半桥两臂 R_3 、 R_4 调
至相等。

二、标准电阻及仪口的稳定性问题

(一) 关于标准电阻

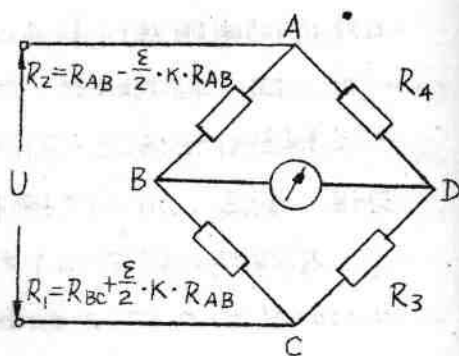


图 5

1. 标准电阻的电阻值并不相等

电阻应变测量中用的标准电阻，是质量比较稳定的，经过老化处理的电阻丝绕制成的两个120欧姆无感电阻。两电阻取自同一批，同一轴电阻丝，无论阻值，电阻温度系数，老化程度，加工过程都非常接近。因此，可视为标准电阻。但由于质量的不均匀性，制造，加工过程中各种误差因素，每批电阻不可能完全相等。根据我们所测36个标准电阻，同一标准电阻内两电阻之差为：0.00048 ~ 0.1272 欧姆，换算成应变为2 ~ 530 $\mu\epsilon$ （见表1）。可见，如果用某一个标准电阻为基准，只按 R_{ABC} 调零的方法，标准电阻将不允许更换，否则由于两电阻之差将引起较大的误差。

2. 标准电阻受温度影响

尽管所用的电阻丝电阻温度系数很小，仅 $\pm 0.002\% / ^\circ\text{C}$ ，又经过老化处理，毕竟两电阻还有差异，要随温度改变。根据我们对36个标准电阻试验结果，最大为 $0.683 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ ，最小为 $0.028 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ ，见下表。

表1

编 号	4#	8#	14#	15#	18#	12#	36#	22#	38#	19#
热输出 $\mu\epsilon / ^\circ\text{C}$	0.028	0.033	0.052	0.111	0.296	0.334	0.484	0.539	0.683	0.076
两电阻差 ($\mu\epsilon$)	+248	-46	+18	+114	+28	+76	+64	+2	+54	-530

对于长期测量，冬夏最高温差可达 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ ，可见标准电阻两臂不等，且以 R_{ABC} 方式调零，温度引起的误差也不容忽视。

3. 标准电阻老化：对4#标准电阻作试验，在一年中变化了 $+24 \mu\epsilon$ ，12#标准电阻变化了 $+50 \mu\epsilon$ 。

标准电阻还可能存在引线阻值改变。标准电阻的电阻值只是相对标准而言，实际上它也是要变化的，只是变化值较小。测

试中,如果仅以某一标准电阻,按ABC接到应变仪上调零,并以此为基准,就有可能存在较大测量误差。

(二) 关于仪口自身的稳定性

仪口内部的电阻值,电容的电容量,接触电阻,电子管等均在改变,应变仪指示值也会引起变化。尽管如此,只要我们对应变仪在使用前后,使用中按正常方法使用,保管、率定,保证应变仪达到说明书上规定的条件。例如,4小时飘移不大于 $5\mu\epsilon$ 。那么就可保证在规定的时间内测值基本准确。另一方面,如前所述,测读前已将仪口内半桥两臂调至相等,这样使测量误差更加小了。只要应变仪的精度满足规定技术要求,即使更换应变仪,也可测得基本相同的读数,这已为两年多来的多次试验所证实。

(三) 标准电阻,两组值差及其随时间变化值的测定

1. 标准电阻两电阻值之差的测定与计标

如前所述,标准电阻两组值不是完全相等的。当需要测量标准电阻内两电阻之差值时,可用经调好了的内半桥的应变仪测出标准电阻的读数,比如 $\epsilon_{ABC} = +34\mu\epsilon$,或 $\epsilon_{CBA} = -34\mu\epsilon$,即可按下式求得两电阻的差值 ΔR

$$\Delta R = 2K \cdot \epsilon_{ABC} \cdot R \quad \text{----- (9)}$$

$$\Delta R = 2 \times 2 (+34 \times 10^{-6}) 120 = 0.01632 \text{ 欧姆}$$

即 R_{AB} 较 R_{BC} 大0.01632欧姆,如 ϵ_{ABC} 为负值,则说明 R_{AB} 较 R_{BC} 小。

2. 标准电阻老化,受温度作用的阻值测试

测试方法基本同前,先将仪口内半桥两臂调平,测取初读数,其后根据时间或温度的改变,再次调在仪口内半桥两臂相等,测取改变后的读数,前后之差,按(9)式计标,即可得两电阻值的相对改变量。

3. 标准电阻的选择

用任意的标准电阻调在应变仪，都可使仪口内半桥两臂相等。如果两电阻值有明显的差别，温度作用时的变化也较大，则可从若干标准电阻中进行挑选，以两阻值越接近越好。与此同时，尚需作温度影响系数的测定，可将标准电阻接在应变仪上，放于油中升温、测定升温后的热输出，择其热输出小的使用。

三、应用实例

为了实际考核本方法的效果，在室内对埋有片式混凝土应变计的混凝土试件，采用电阻应变仪测试件的自然收缩值（包括自缩、干缩）的方法第一次进行了长期观测。虽然还有不足，有待改进之处，但从图6示出的测试结果看，测值呈明显的规律性，经过近一年的测试观察，其自然收缩平均约为万分之三，与我所过去用收缩仪测得的同类混凝土接近，也与一些文献记载的数据相近。

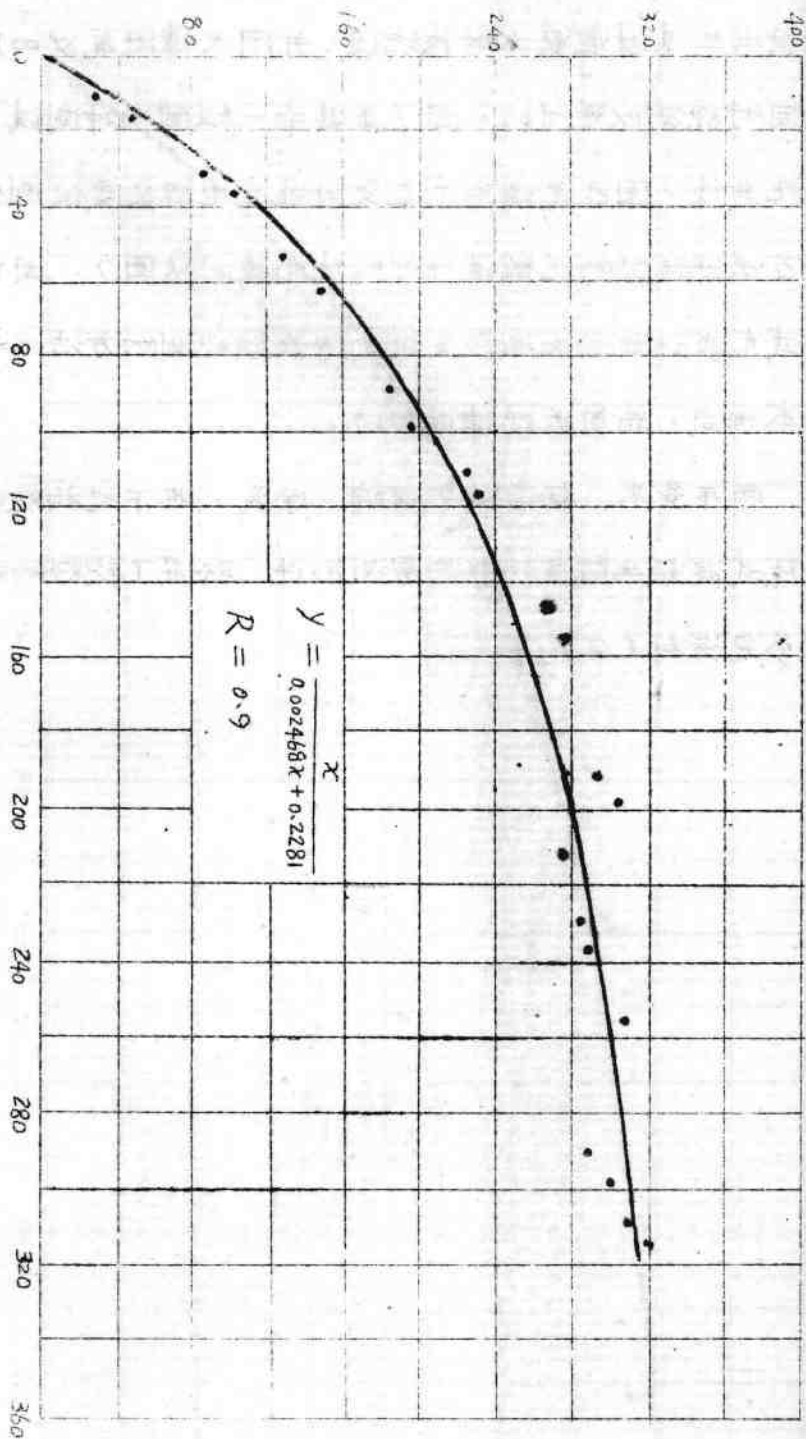
片式混凝土应变计，是由弹簧钢底板上纵横粘贴工作片，补偿片各2片，构成测舅半桥，外压注围护材料组成，外形尺寸： $长 \times 宽 \times 厚 = 114 \times 16.5 \times 8.5 \text{ mm}^3$ 。

混凝土试件尺寸： $500 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ ，设计标号为300号，最大粒径为25 mm，硅酸盐水泥。

图 6

片式应变计测得的混凝土收缩曲线

龄 期 (天)



其后，用片式混凝土应变计，测试了掺有不同类型减水剂的混凝土与基准混凝土的收缩值，并用天津建筑仪器厂生产的收缩仪同时观测以资对比。图7是其中一组用两种测试方法所测得的对比曲线，图8是用片式应变计配合电阻应变仪测得的数据按回归方法计算出的几组试件的曲线比较。从图7、图8不难看出：片式应变计配合电阻应变仪进行长期观测的方法，与收缩仪相比基本相同，而前者规律性更好。

两年多来，在混凝土收缩、徐变、地下结构观测中，以CJP型片式混凝土应变计作为观测元件，取得了较好的效果，详细情况参见资料(2)等。



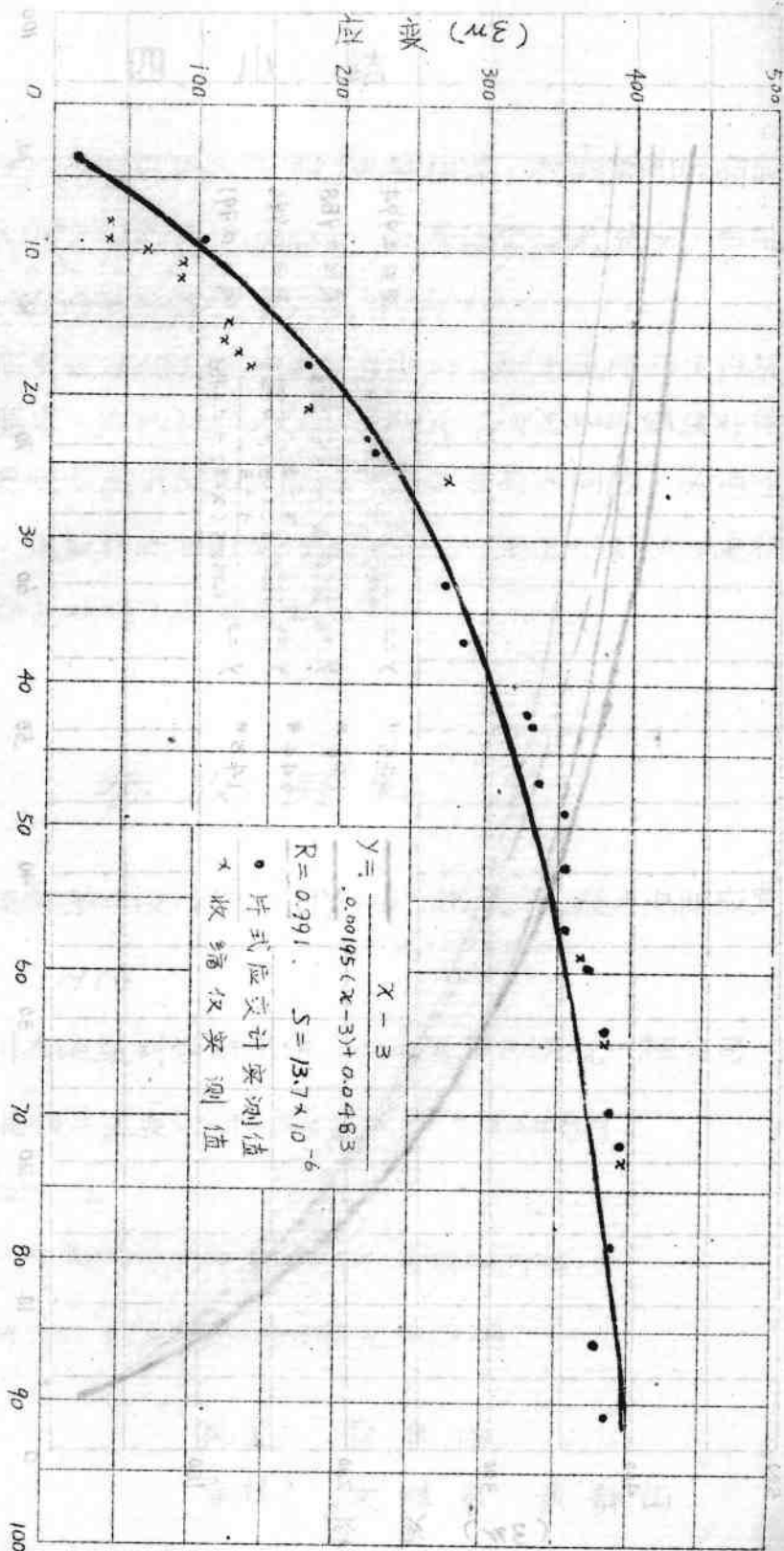


图 7 143# 混凝土用应变计测得的混凝土收缩曲线以及收缩仪测值的比较

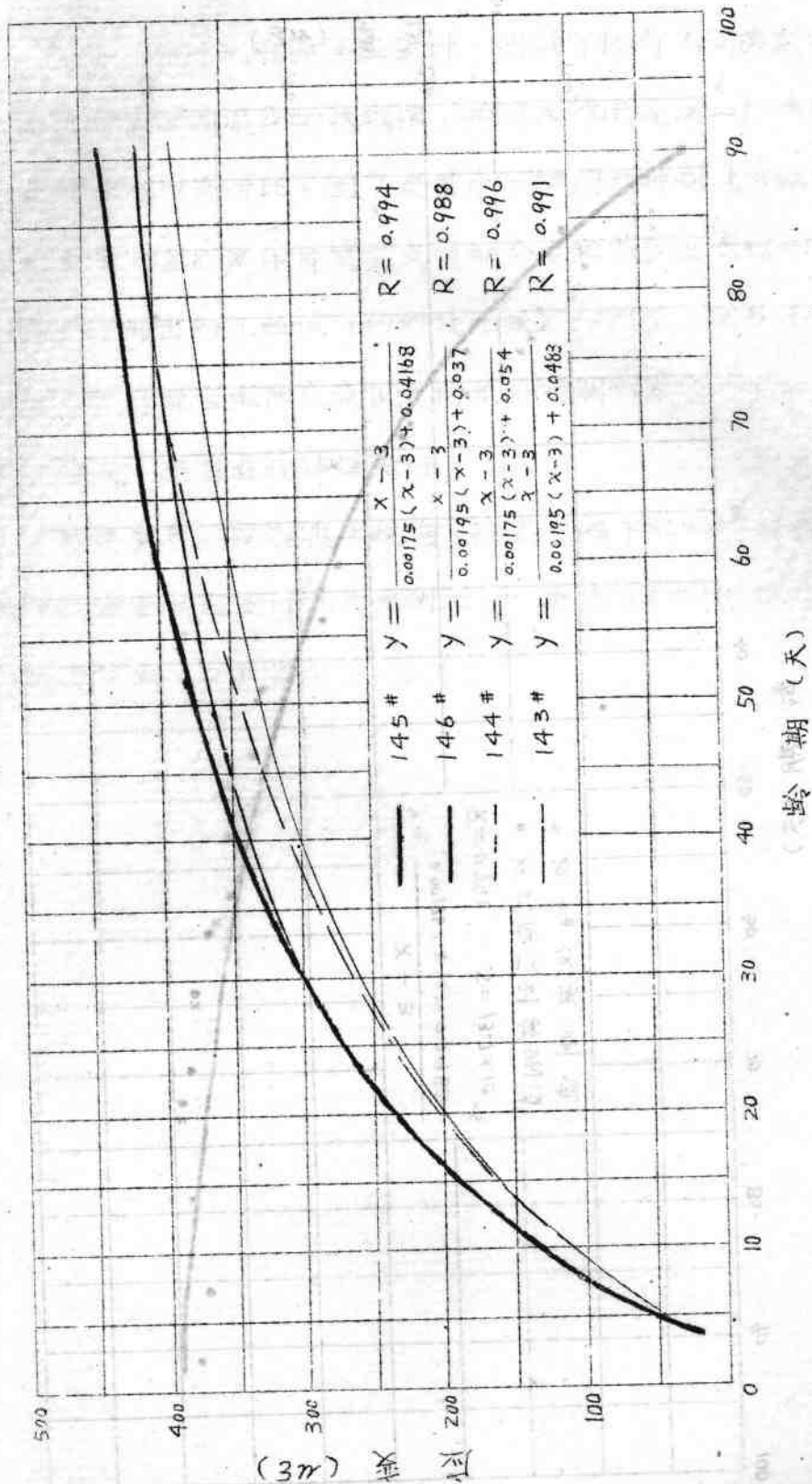


图 8 用CJP型应变计测得的几组混凝土收缩曲线的比较

四、小 结

用标准电阻，调查应变仪内半桥两臂相等，长期观测贴有应变片的测点或传感口，方法比较简便，测务误差显著减少，且能利用 YJB — 5 等电阻应变仪逐点测读。

采用电阻应变仪进行长期观测，对仪口、标准电阻稳定性提出了一些基本要求。应该指出的是，电阻片或传感口的温度补偿和外半桥两臂导线长度引起电阻差，电容差等有关问题，必须予以足够的重视，采取行之有效的措施，并加以妥善的解决。这样，在较大范围内作长期观测是可能的。

参 考 资 料

[1] 铁道部第三设计院：HY — 100 型混凝土电阻应变计技术报告 1976

[2] 四川省建筑科学研究所、四川省第四建筑工程公司：
CJP 型片式混凝土应变计研制报告 1980年8月

[3] 回归方法

中国科学院数学研究所数理统计组

[4] JM — II 型减水剂的研究与应用

执笔 蒋登银

审核 文继皋 黄静山

