


KFF雙層彎曲應變規特性介紹

三聯科技股份有限公司 / 吳上卿 

一、前言

近年來對於儲油槽等板型結構物強度設計及安全強度上的應力量測越來越受到注意。但是，量測板和梁柱等構造物的彎曲變形，是無法使用一般標準型的應變規來做為量測使用的。而Felix Zandman發表的使用彎曲應變片量測方式則解決了這個問題。

此種彎曲應變規是在塑膠基材的上下兩面各裝有感應金屬柵的應變片，可以用來測量高壓容器等內部產生的應力，將其黏貼在容器外部表面上，可測量到內部的應力變化情況，但此構造尚未能夠解決量測時的漂移及潛變問題，所以無法進行高精密度的量測。

此次發表的彎曲應變規採用350Ω電阻值和特殊設計的金屬感應柵樣式，確保漂移及潛變效應較小及效能提高，例如：以25mm厚度的鋼板精確度誤差可達3%內。在此，以該應變規之使用方法與實驗結果做介紹。

二、概要

彎曲應變規為金屬箔型應變規的一種，也可稱作雙層式應變規或撓性應變規。新系列的彎曲應變規是用於較薄板材及金屬材料彈性係數較小的被測物，在不考慮黏著膠水對應變規之效果影響下，不論應變規的厚度為1mm(KFF-30-350-C11-11)和2mm(KFF-30-350-C12-11)系列都具有高量測精度。另外，在支援被測物的線膨脹係數上，有適用於鐵材($11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、

不銹鋼材($16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)及鋁材用($23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)可以選擇，而且在 $-20 \sim +70^{\circ}\text{C}$ 的溫度範圍內也有自我溫度補償之效果。

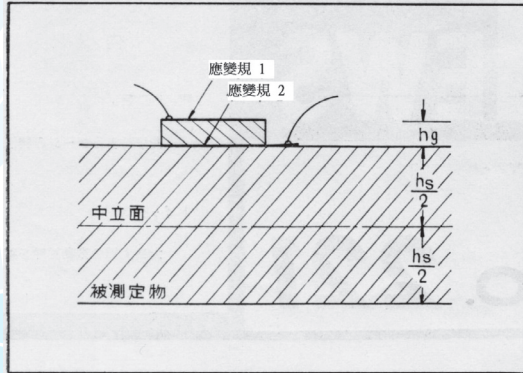
此外，彎曲應變規是以塑膠為基底材料，常溫硬化型膠水會比加熱硬化型膠水較為適用，CC-33A、EP-34B、EP-180都為適合的黏著劑。表1為應變規之相關規格。

▼表1 KFF應變規規格

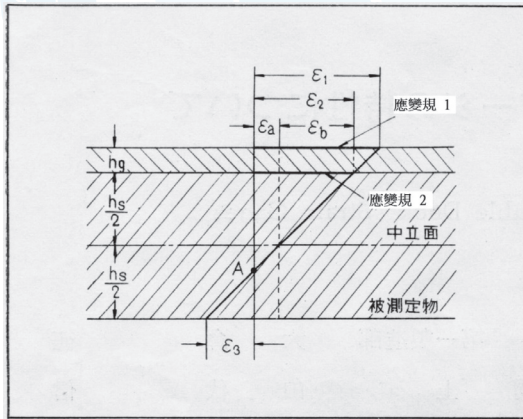
型號	阻值 (Ω)	Gage factor	感應區尺寸 (mm)		外型尺寸 (mm)		厚度 (mm)	每包片數
			長	寬	長	寬		
KFF-30-350-C11-(11、16、23)	350	2.1	30	7	33	7	1	5
KFF-30-350-C12-(11、16、23)	350	2.1	30	7	33	7	2	5

三、原理

如圖1所示，彎曲應變規貼在被測物的金屬板上，上下兩面皆有感測片。根據義般薄板結構物的曲度，板材內部的應力分布在彈性變形範圍內時，會如圖2所示呈現線性狀態，所以當受到張力變化而產生的應變 ϵ_a 和藉由彎曲應變規測量的應變 ϵ_b 兩者互相作用並無抵觸的情況下，對照表面量測的應變 ϵ_2 可以得出內面 ϵ_3 的應變值。



▲ 圖1 構造圖



▲ 圖2 應力分布圖

此時，假設彎曲應變規1(外面)中所受到的張力應變 ε_1 為本體外部所受到的張力應變 ε_a 的 k_a 倍，彎曲率為本體外部 ε_b 的 k_b 倍，可得應變規1的應變 ε_1 計算公式如公式(1)所示：

$$\varepsilon_1 = k_a \varepsilon_a + k_b \left(\frac{\frac{h_s}{2} + h_g}{\frac{h_s}{2}} \right) \varepsilon_b \quad (1)$$

h_s ：被測物體的厚度

h_g ：應變規基底材的厚度

應變規2的應變 ε_2 表示為公式(2)

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (2)$$

由公式(1)、(2)可得出張力 ε_a 與彎曲力 ε_b ，如下列公式表示。

$$\varepsilon_a = \varepsilon_2 - \varepsilon_b \quad (3)$$

$$\varepsilon_b = \frac{h_s(\varepsilon_1 - k_a \varepsilon_2)}{k_b(h_s + 2h_g) - k_a h_s} \quad (4)$$

假設gage1與gage2的gage factor相同，則張力為公式(5)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (5)$$

彎曲力為公式(6)

$$\varepsilon_b = \frac{h_s(\varepsilon_1 - k_a \varepsilon_2)}{k_b(h_s + 2h_g) - k_a h_s} \quad (6)$$

以(1)、(2)公式來看，張力也就是說 $\varepsilon_b=0$ 的情況下，純張力的係數 k_a 如公式(7)。

$$k_a = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_a} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1} = 1 \quad (7)$$

又彎曲力也就是說 $\varepsilon_a=0$ 的情況下，純彎曲力的係數 k_b 如(8)

$$\begin{aligned} k_b &= \frac{h_s}{h_s + 2h_g} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_b} = \frac{h_s}{h_s + 2h_g} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \\ &= \frac{h_s}{h_s + 2h_g} \cdot \frac{h_s + 2h_g}{h_s} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2} = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

因此，gage1和gage2的gage factor相等的話，可以簡化公式(4)為(9)

$$\varepsilon_b = \frac{h_s}{2h_g} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (9)$$

在gage1和gage2的gage factor不同的情況下，事先在試驗片上貼彎曲應變片，求得張力和彎曲力負荷係數 k_a 、 k_b 的值。但是，因為本gage率上下面相等，所以適用公式(3)及(9)。

從以上貼在板材表面的彎曲應變片，求得張力應變 ε_a 和彎曲力應變 ε_b ，再加上張力和彎曲力向量合成的應力，求得相同彎曲的中立面位置（A點），就可以得出板材背面(內部的)應變 ε_3 為公式(10)。

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_a - \varepsilon_b \quad (10)$$

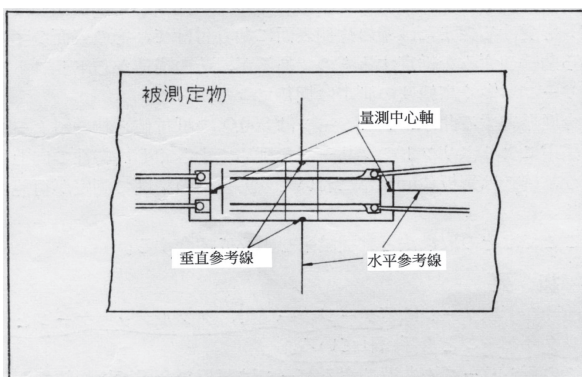
四、使用方法

1. 選擇應變規

使用此應變規的時候需要注意被測物的厚度，如果被測物的厚度太薄容易受到膠水黏接應變規時補強效果的影響，被測物太厚的話精度會變差，厚度2~15mm的被測物建議使用型號為KFF-30-350-C11，厚度4~30mm的被測物建議使用型號為KFF-30-350-C12作為量測的話，可以提高測量的準確度。

2. 黏貼方法

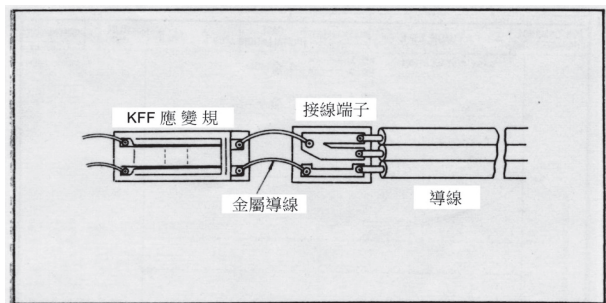
依照各的使用方法黏貼，但是為了不使黏貼膠水硬化不完全造成測定誤差變大，將應變規黏貼在正確的位置上，依膠水的標準固化時間延長加壓時間1.5~2倍，可以得到較好的效果。關於黏貼之表面，避免黏貼在曲率半徑1公尺以下的曲面上容易造成發生基底破損、應變規斷線、剝離、特性不良等等的問題，所以盡可能黏貼在要平坦的表面上。黏貼的時候，彎曲應變規的基底應變規面黏貼在被測物的上方，對準被測物的中心線上，上面的應變規與軸線和基準線仔細對齊。(參照圖3)



▲ 圖3 黏貼方法

3. 接線法

應變規導線和端子連接時，將導線稍微放鬆後使用焊接方式連接，端子與儀器的連接線則建議使用三線式連接法，此方式對導線的溫度影響會較小(如圖4)另外，上方與下面的應變規連接導線長度皆必須相同。



▲ 圖4 接線方法

對於應變規電阻值來說，導線的電阻值是無法忽略的，無論是使用高電阻值的導線或是較長的導線，都必須要注意會發生gage factor下降的情況，gage factor的補正公式如(11)下：

$$K_s' = \frac{K_s}{1 + \frac{r_l}{R_g}} \quad (11)$$

K_s' ：需要補正的gage factor

K_s ：應變規出廠標示的gage factor

r_l ：導線電阻值(三線式)

R_g ：應變規出廠標示電阻值

4. Coating保護方法

該應變規經過分層處理後兼具保護及防潮效果，但是在濕度較高的時候或場所使用時，為了不讓塑膠基底形變受到限制建議使用較軟性的Coating保護膠。適合的保護膠如：石蠟類C-4、矽膠樹脂類KE-4898W。



5. 測量法

施加負載在已貼上彎曲應變片的測定物上，再使用讀取準確度在 1×10^{-6} 應變的靜態或動態應變顯示器或擷取器，便可以測得負載前和負載後應變規的輸出變化量。要注意若使用讀取準確度較差的感測器可能會造成較大的誤差。

假設上側面的初始應變為 ϵ_1 ，下側面的初始應變為 ϵ_2 ，可由下列公式(12)得出張力(壓縮)應變 ϵ_a 、純曲度應變 ϵ_b 與背面應變 ϵ_3 。

$$\epsilon_a = \epsilon_2 - \epsilon_b \quad (12)$$

$$\epsilon_b = \frac{h_s}{2h_g} (\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_a - \epsilon_b$$

其中：

h_s ：被測物的厚度

h_g ：應變規出廠標示的厚度

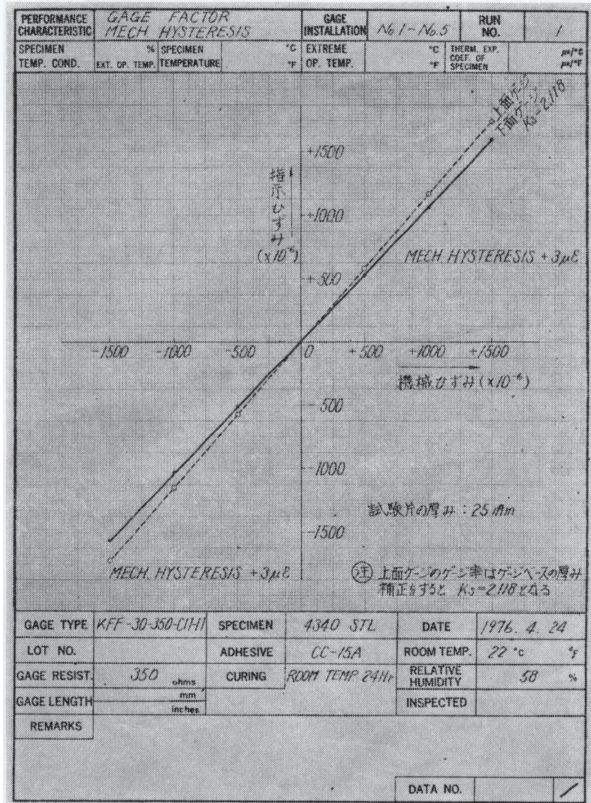
五、實驗方法與結果

1. 應變規gage factor與機械的遲滯特性(hysteresis)在室溫下的彎曲測試

本實驗在NAS-942(Fatigue Characteristics of Strain Gages)規範的兩端支撐架上給予一定的彎曲量，實驗gage數共計5片，首先測量在 1000×10^{-6} 應變的gage factor與三分鐘內的潛變量(creep)，然後再以 500×10^{-6} 應變分三階段進行負載 $0 \sim \pm 1500 \times 10^{-6}$ 應變。表2為應變規gage factor、三分鐘內的潛變量及機械的遲滯特性最大值，實測範例的應變輸出 $\pm 1500 \times 10^{-6}$ 應變如圖5所示。

▼表2 gage factor與遲滯特性測試

型號		Gage factor (1000×10^{-6} 下量測)			遲滯特性 ($\pm 1500 \times 10^{-6}$ 下量測)	三分鐘內的 潛變量 (1000×10^{-6} 下 量測)
		平均	應變規 厚度	誤差 (%)		
KFF-30-350- C11-11	拉伸	2.118	1.072	0.83	3	0
	壓縮	2.117	1.072	0.86	3	1
KFF-30-350- C12-11	拉伸	2.125	1.971	0.59	4	0
	壓縮	2.123	1.972	0.67	3	1

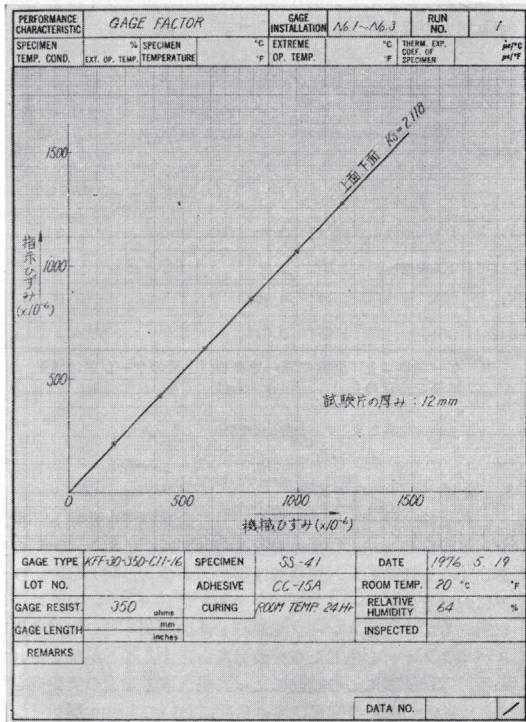


▲ 圖5 應變規彎曲輸出特性

2. 室溫下的應變規拉伸之gage factor係數與線性

在SS-41碳鋼的平板試驗片上貼上三片測試應變規，使用拉伸試驗機進行拉伸應變測試。以每 200×10^{-6} 為一階段做應變加載到 1200×10^{-6} ，測得 1000×10^{-6} 應變下的gage factor

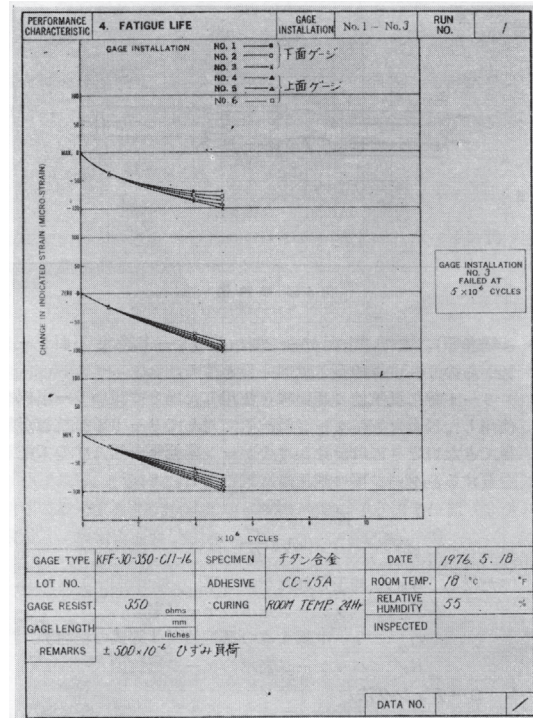
係數。圖6為實測範例的 $0 \sim 1200 \times 10^{-6}$ 應變的輸出線性。



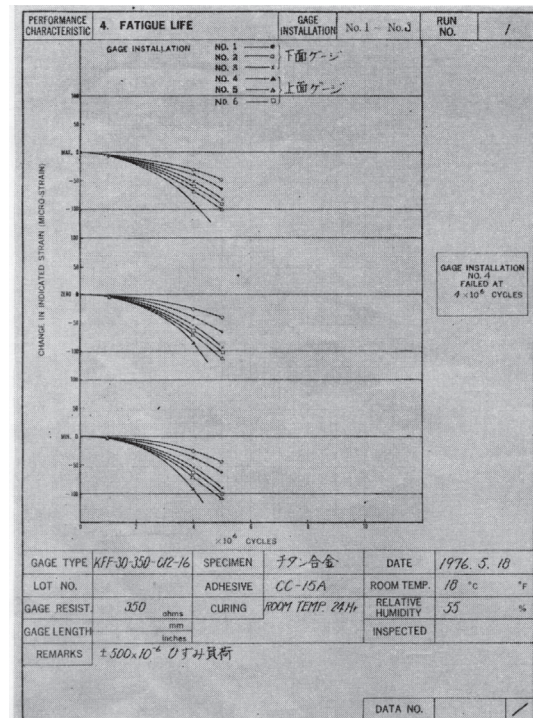
▲ 圖6 應變規拉伸測試輸出特性

3. 在室溫下的疲勞壽命

本實驗使用符合N-942規格的疲勞壽命實驗機，在黏貼著測試應變規的懸臂樑表面上，以每秒三十次的頻率輪流加載 $\pm 500 \times 10^{-6}$ 應變。疲勞壽命測量的進行方式為對應變規測試片之中心點施以 $\pm 1500 \times 10^{-6}$ 的應變，當輸出應變值超過 $\pm 100 \times 10^{-6}$ 時，由oscilloscope(示波器)觀察試片的應力波形，其峰值即為其疲勞壽命值。根據本實驗的實例測試後得到圖7、圖8的結果。在厚度輪流加載 $\pm 500 \times 10^{-6}$ 應變，應變規壽命為 5×10^6 次，在厚度2mm試片上的應變規壽命則為 4×10^6 次，依據應變規基材塑膠的疲勞現象會出現輸出應變降低的情況。



▲ 圖7 KFF-30-350-C11-16應變規疲勞特性



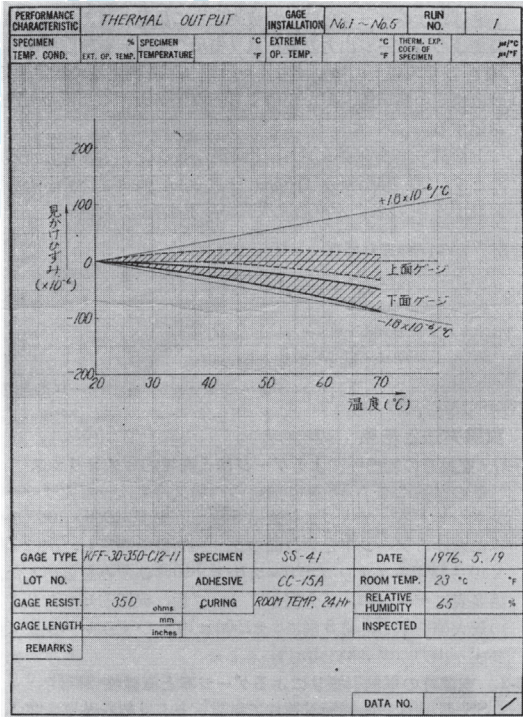
▲ 圖8 KFF-30-350-C12-16應變規疲勞特性



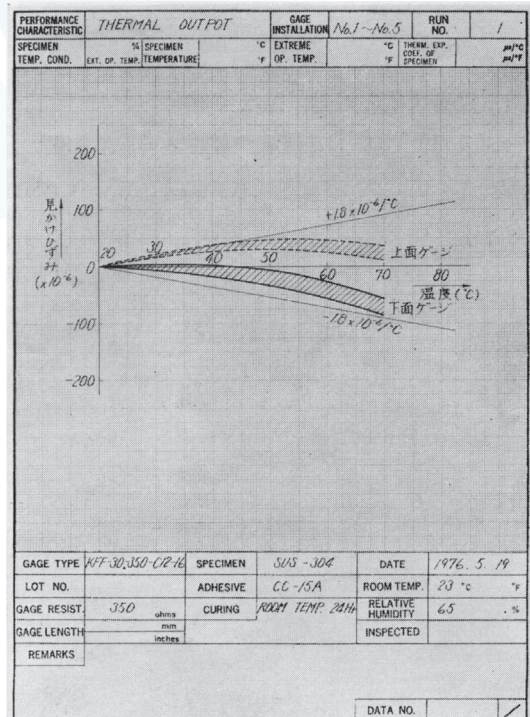
4. 溫度效應輸出和遲滯現象

此實驗將貼有試應變規之測試片放置在液態流動的石蠟實驗槽內，可以測得應變規在+20~+70°C溫度下的變化。在2mm厚的SS-41碳鋼上黏貼應變規係數為11及SUS-304不銹鋼

上黏貼應變規係數為16各5片做為實驗樣本進行測試。加熱循環的應變規輸出特性如圖9、圖10所示。斜線區域中包含所有實驗樣本的特性。



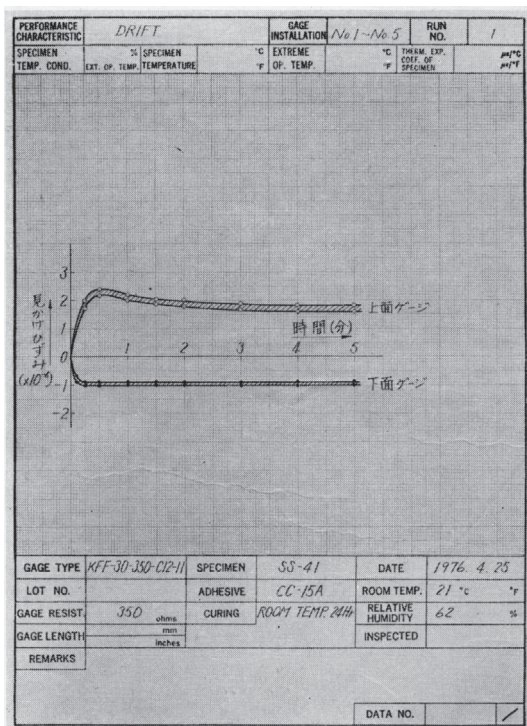
▲ 圖9 KFF-30-350-C12-11應變規溫度效應



▲ 圖10 KFF-30-350-C12-16應變規溫度效應

5. 漂移(Drift)

KFF應變規因使用導熱性較差的塑膠基底，使得上層的應變規經由供應電流自行發熱而可能導致零點飄移的狀況，連接測試片，測試應變規在無任何的外力之應變作用狀態下，於橋式電路供應2V激勵電壓，五分鐘後內測得零點漂移。測試結果如圖11所示。斜線區域中包含所有實驗樣本的特性。



▲ 圖11 應變規漂移現象

6. 側向靈敏度係數

本實驗使用符合NAS-942規格的側向靈敏度係數試驗裝置，能測出測試的應變規樣本在標準使用方向上，加載 $+1000 \times 10^{-6}$ 應變時，測試應變規的應變輸出。表3為厚度為1 mm與2 mm的應變規各五片測試後的平均值。

▼表3 側向靈敏度係數

型號		側向靈敏度係數(%) (1000×10^{-6} 下量測)
KFF-30-350-C11-16	上面應變規	0.50
	底部應變規	0.35
KFF-30-350-C12-16	上面應變規	0.40
	底部應變規	0.25

六、後記

對於無法直接在背面(內部)貼上應變規的板材結構物，量測板構造物背面(內部)的應力，使用彎曲應變片可測得比推測更接近實際測量的應力結果。特別是在對於漂移及潛變特性上作改善的KFF應變規，已經證明適用於測試一些無法在背面(內部)直接貼上應變規的高壓容器或儲槽壁面等因內部壓力造成的變型，及無法在背面直接貼上應變規的箱型結構之橋樑、桁架等的應力測試。最後，如有任何批評請多多指教。

☒ 參考文獻

KYOWA 共和技報 No. 221