

I-195

磁気ひずみを用いた橋梁部材の残留応力測定

トビー工業（株） 正員 青木尚夫

トビー工業（株） 正員 酒井吉永

○トビー工業（株） 正員 田村勝巳

1 はじめに

今日、橋歴30年程度の鋼橋では老朽化の進んでいるものも少なくなく、このため維持・補修のニーズも新たに増えつつあるようである。これまで、供用下の補修・補強工法として疲労を受けやすい溶接部に圧縮残留応力を付与する「液体窒素工法」を開発し、その処理条件や補強効果について実験的に検証してきたが、処理部の残留応力分布を供用下で把握することは、その補強効果を裏付ける意味で重要な技術課題であった。そこで、鋼材の磁気ひずみを利用した非破壊でかつ現場的な応力測定手法を導入し、その基本特性および測定精度に影響を及ぼす因子について実験計画法によって検討するとともに、処理後の橋梁部材の残留応力測定を試みたので報告する。

2 試験方法

2-1 磁気ひずみによる応力測定の原理

磁気ひずみによる応力測定は、既に実用化され各方面において利用されている測定手法であるが、測定原理は次の考え方に基づく。鋼材は応力が作用すると透磁率が変化し磁気的な異方性が生じるが、この応力 σ と磁気的な異方性との関係は励磁用の電流を与えコイルによって電位差 v を測定することにより得られ（1）式で表せられる。

$$v = k (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (1)$$

θ : コイルと主応力 σ_1 のなす角度

ここで k は、鋼材がもつ特性値であるので校正試験が必要である。本試験での測定対象鋼材（SS41、SM50A）の校正試験結果を図1に示すが、主応力差と電位差との間には（1）式が良く成立している。そこで、残留応力測定はこのグラフの傾き k を用いることとした。また、測定値は主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ で与えられるので、せん断応力差積分法によって応力分離を行った。このせん断応力差積分法について簡単に述べる。図2に示す正方形板において、 x 方向の力のつり合いを考えると（2）式で与えられる。

$$\sigma_c = \sigma_a + \tau_d - \tau_b \quad (2)$$

また、弾性解析によるとせん断応力 τ_{xy} は

$$\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 \cdot \sin 2\theta \quad (3)$$

θ : σ_1 と x 軸のなす角度

ここでは $\theta = 45^\circ$

で得られる。したがって、測定値である辺 b および辺 d の主応力差を、（3）式に代入することによりせん断応力 τ_b 、 τ_d が得られる。ここで、辺 a の σ_a が既知であれば（2）式より σ_c が求まる。この測定を x 軸に平行な線上で逐次行うことにより、目的とする箇所の応力値を知り得る。

2-2 ビード・オン・プレートの残留応力測定

橋梁部材への適用にさきだち、測定条件を直交表 L_9 にわりつけた磁気ひずみによるビード・オン・プレートの残留応力を測定し、 X 線による測定値 σ_x を基準値とした誤差量 y の分散分析を行

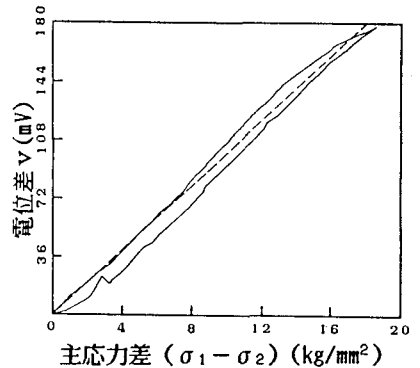


図1 主応力差-電位差線図

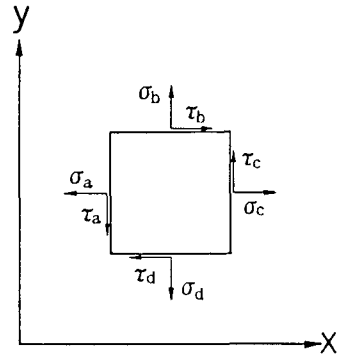


図2 平面応力での応力のつりあい

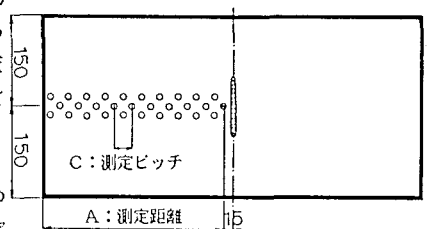


図3 ビード・オン・プレート

い精度の期待できる測定条件を推定することとした（図3に試験片を示す）。誤差量 y は望小特性として次式で与えた。

$$y = |\sigma_x - \sigma_M| / \sigma_x \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

σ_M ：磁気ひずみによる応力値

ここで、測定精度に影響を及ぼす因子は積分距離（測定距離）表面状態、積分間隔（測定ピッチ）、測定深さを取り上げ、表1にある各3水準について検討した。

2-3 橋梁部材の残留応力測定

橋梁部材のモデルとしてI桁を製作し、最近、疲労損傷事例が報告¹⁾されている垂直補剛材下端を測定対象とした。測定は、製作時および「液体窒素工法」適用後の2回行い、圧縮残留応力の付与を確認するものである。なお、測定条件は上記の分散分析結果を反映させた。

3 試験結果および考察

表2に実験結果を示す。ここで誤差量 y はさらに同じ水準間で加減算を可能とするため(5)式を用いてSN比 η (db)に変換した。

$$\eta = -10 \cdot \log(y) + 30 \quad (5)$$

但し、30は計算のための仮平均

各実験結果を比較すると、X線に対して最も良好な精度を与えたのは、No5のA2・B2・C3・D1の条件であり誤差量 y は10%弱であった。また、表3の補助表より最適条件は、4因子の水準別のSN比の和がそれぞれ最大となるA2・B2・C2・D1であると推定された。この条件で確認実験を行ったが、測定値は17(kg/mm²)と良好な精度が得られた。4因子が測定精度におよぼす影響度を、分散分析によって求めた結果を表4に示す。影響度が大きいのはB（表面状態）とD（測定深さ）であることが示されているが、これは、せん断応力差積分法における積分の初期条件すなわちプレート自由端の応力値の誤差と、コイルと鋼材間のギャップとが測定精度に影響をおよぼすためと思われる。次に、橋梁部材の残留応力測定結果を図4に示す。ここで測定条件は、補助表から得られたA2・B2・C2・D1である。測定値は、補剛材まわし溶接部近傍の鉛直方向の残留応力分布であるが、製作時に存在する引張残留応力は、ガス加熱・窒素冷却の2操作²⁾からなる「液体窒素工法」を施すことにより疲労に対し有利な圧縮残留応力に変換される。

4. まとめ

橋梁部材の溶接残留応力が、「液体窒素工法」により圧縮残留応力に変換されることが、磁気ひずみによって検証された。今後、せん断応力差積分法の初期条件について検討する所存である。

＊）特許申請中

－参考文献－

- 1) 谷口紀久・阿部允・阿部英彦：「鋼鉄道橋の疲労変状－垂直補剛材－」構造工学論文集、Vol.32A、1986.6

表1 測定条件

因子	水準
A: 測定距離	A1=180mm A2=300mm A3=420mm
B: 表面状態	B1=ショット B2=ショット B3=▽▽
C: 測定ピッチ	C1=10mm C2=20mm C3=30mm
D: 測定深度	D1=0.1mm D2=0.3mm D3=1.0mm

但し、B2・B3は焼鈍する。

表2 実験結果

No	ABCD	σ_n (kg/mm ²)	σ_x (kg/mm ²)	y (%)	η (db)
1	1111	8.0	18.9	57.5	-5.2
2	1222	21.5	12.4	73.4	-7.3
3	1333	15.0	8.5	76.4	-7.8
4	2123	6.5	21.8	70.2	-6.9
5	2231	17.0	18.7	9.1	10.8
6	2312	31.0	15.6	98.7	-9.9
7	3132	7.5	22.1	66.1	-6.4
8	3213	10.0	17.4	42.5	-2.6
9	3321	4.0	12.0	66.7	-4.5

表3 補助表 (db)

No	A	B	C	D
1	-20.3	-18.5	-17.7	-0.9
2	-6.0	0.9	-3.4	-23.6
3	-15.5	-24.2	-20.7	-17.3

表4 分散分析表

因子	変動	寄与率(%)
A	35.1	11.7
B	115.5	38.6
C	57.1	19.1
D	91.6	30.6
	299.3	100.0

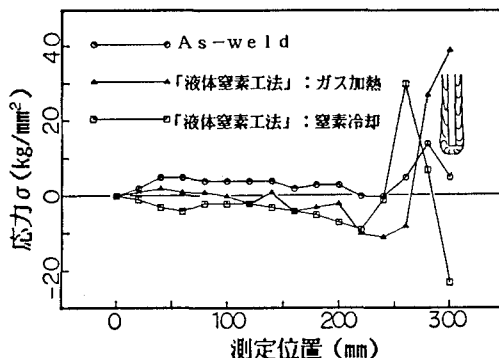


図4 補剛材下端部の残留応力分布