

X 線による応力測定について

正員 畠山 惇 史*

1. ま え が き

構造物の安定性を判断する方法としては、その構造物が架設された状態での各部材の応力を正確に把握することが必要である。一般に応力の測定方法は、測定しようとする部分の弾性ひずみを求め、Hooke の法則により算出するのであるが、直接伸びを測定する方法では測定の初めと終りの間のひずみの変化量が求まるに過ぎず、橋梁の自重による応力、架設応力などの測定方法は、構造物の一部分を切り取って応力を解放して求めなければならず、また溶接による残留ひずみのごとく実際にはほとんど算出することが困難な場合、および加工ひずみなどの測定は不可能であった。しかし最近の測定技術の進歩によりこれらの応力を非破壊的に測定する方法も種々考え出されている。本稿では X 線を用いて応力を測定する方法について述べるものである。

金属材料のような多結晶体は、それぞれの結晶粒の中で原子が固有の配列をしており、各結晶粒が弾性変形をなすときには、それぞれの結晶方向に従って変形するので、原子相互間の位置が変化する。この格子面間隔の変位を X 線回折法により、測定すれば、弾性応力が算出されるのである。

この方法による利点は実際に使用する材料および既製の構造物についても何ら破壊することなく測定できることであり、また表面のきわめて小部分に存在する応力を測定することになるので応力の分布が詳しく求まることである。

以下、X 線による応力測定法を土木構造物に適用する方法、精度および実際に利用した結果などについて報告するものである。

2. 測定の方法および装置

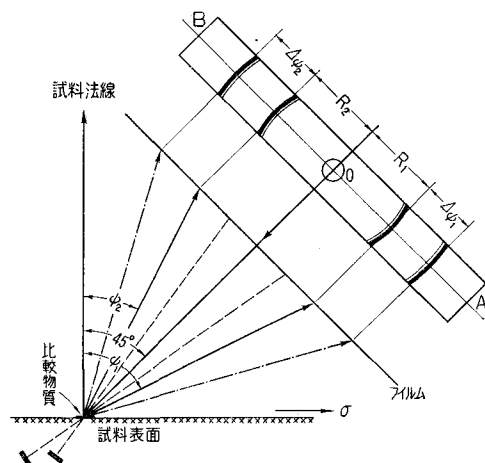
当所において使用している装置は、ドイツザイフェルト社製、エレスコープで、本装置の測定原理および測定法について簡単に述べる。

結晶内の原子はある一定の法則に従って規則正しい配列をしていて、これに特性 X 線を照射した場合、X 線は結晶格子により回折されるが、その間にはいわゆる Bragg の

関係式

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (n=1, 2, \dots) \quad (1)$$

が成り立つ。ここに λ は回折にあずかる X 線の波長、 d はその格子面間隔、 θ は λ 射 X 線と格子面とのなす角、 n は次数である。いま結晶粒の大きさが充分小さくて X 線により照射される数が充分多く、しかもその方位が全く無秩序に分布しているものとするとき回折 X 線は円錐状となる。本装置はこの回折 X 線をフィルムに撮影し応力を求めるもので、第 1 図に示すように λ 射 X 線は試料表面に対し 45° 傾いた方向から照射する。特に照射角度を 45° とするのは角度誤差の応力値におよぼす影響が少ないからである。すると λ 射 X 線と回折 X 線との二等分線方向をそれぞれ法線とする格子面からの回折が得られ、AOB 方向に回折線と中心との間の距離 R_1 , R_2 を測定することによ



図—1 斜め撮影法

り、試料面法線に対してそれぞれ $\phi_1 = 45^\circ + \gamma$, $\phi_2 = 45^\circ - \gamma$ ($\gamma = 90^\circ - \theta$) だけ傾いた方向の面間隔 d_{ϕ_1} , d_{ϕ_2} が得られる。いま試料に残留応力が存在しないとすると、フィルム上には真円の回折線が得られ、残留応力の存在するときには回折線は変形し、楕円となる。応力を求める式は弾性学より次のごとくなる。

* 北海道開発局 土木試験所構造研究室

Tabelle 1. Zusammenstellung der für praktische röntgenographische Spannungsermittlungen nach dem $\sin^2 \varphi$ Verfahren erforderlichen Daten für einige Werkstoffe

Werkstoff	Geeignete Strahleng		Werkstoff			Eichsubstanz			Filmverfahren				Goniometerverfahren				
	Wellenlänge in k-X	Anode	E-Modul in kg mm ²	Querkontraktionszahl	Gitterkonstante in kX	Interferenz <i>hkl</i>	Bragg-Winkel	Stoff	Gitterkonstante in kX	Interferenz <i>hkl</i>	Bragg-Winkel	$c \cdot 10^3$ in mm ⁻¹	Δ_0 in mm	C_1 in kg mm ³	C_2 in kg mm ³	K_1 in kg mm ² min	K_2 in kg mm ² min
Al	1,5374	Cu			511/333	511/333	81°14'30"	Ag	4,0783	511/333	78°21'	1,206	6,68	25,55	6,48	0,949	0,241
	1,7853	Co			420	420	81° 2'15"	Ag	4,0783	420	78°11'45"	1,248	6,48	26,43	6,71	0,972	0,247
	1,7853	Co	7,200	0,34	4,0414	420	81° 2'15"	Au	4,0700	420	78°46'15"	1,181	5,43	25,01	6,35	0,972	0,247
Cu	2,2850	Cr			222	222	78° 20'	Ag	4,0783	222	76° 2'20"	1,846	4,64	39,09	9,92	1,273	0,323
	1,5374	Cu	12,500	0,34	3,6077	420	72°20'20"	Ag	4,0783	511/333	78°21'	1,825	10,34	-67,10	-17,03	0,341	0,864
	1,7853	Co			400	400	81°49'30"	Au	4,0700	420	78°46'15"	1,100	7,15	40,43	10,26	1,546	0,392
Xi	1,5374	Cu	20,540	0,31	3,5168	420	77°49'45"	Ge	5,6461	515/711	76°28'40"	1,282	2,84	121,15	28,67	4,158	0,984
	1,7853	Co			313	313	72°19'10"	Au	4,0700	420	78°46'15"	2,165	9,75	-143,43	-33,94	6,144	1,454
x-Fe	1,7853	Co			310	310	80°37'30"	Au	4,0783	420	78°46'15"	1,224	4,48	91,83	20,09	3,602	0,788
	1,7853	Co	21,000	0,28	2,8610	310	80°37'30"	Ag	4,0783	420	78°11'45"	1,294	5,58	97,02	21,22	3,602	0,788
	1,7853	Co			310	310	80°37'30"	Cr	2,8786	310	78°41'50"	1,232	4,61	92,43	20,22	3,602	0,788
	2,2850	Cr			211	211	78° 0'50"	Cr	2,8786	211	76°27'40"	1,814	3,25	136,03	29,76	4,634	1,014

$$\sigma = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{d_{\phi_2} - d_{\phi_1}}{d_{\phi_1}} \cdot \operatorname{cosec} 2\theta \quad (2)$$

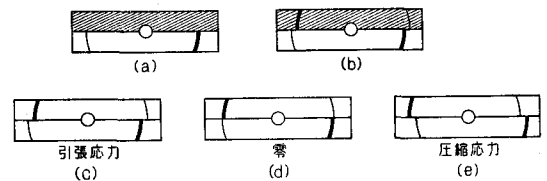
(2) 式において $E=2,100 \text{ kg/mm}^2$, $\nu=0,28$, 特性 X 線が Co K α の場合には $\lambda=1,78529 \text{ \AA}$, $\theta=80^\circ 38' 30''$, フィルムと試料表面までの距離 $D=50 \text{ mm}$, Bragg の関係式, 格子面間隔と回折線とのずれ等を考慮すれば, (2) 式は次のようになる。(第 1 表参照)

$$\sigma = 75,6(\Delta_{\phi_2} - \Delta_{\phi_1}) \text{ kg/mm}^2 \quad (3)$$

この方法では $\Delta_{\phi_2} - \Delta_{\phi_1}$ を測定するために, X 線の照射束を軸としてフィルムを回転できるようにし, まずフィルムの半分を第 2 図 (a) のようにおいて撮影を行ない, 次にフィルムを 180° 回転して露出済みの方をおいてもう一度第 2 図 (b) のように露出する。すると上下の円のくいちがいの量が $\Delta_{\phi_2} - \Delta_{\phi_1}$ となるのである。したがって回折線の移動量が一目瞭然であり, 比較物質も使用しないので済む。(3) 式において

$$\begin{aligned} \Delta_{\phi_2} - \Delta_{\phi_1} > 0 & \quad \text{ならば応力は引張} \\ \Delta_{\phi_2} - \Delta_{\phi_1} = 0 & \quad \text{" 零} \\ \Delta_{\phi_2} - \Delta_{\phi_1} < 0 & \quad \text{" 圧縮} \end{aligned}$$

となり, Δ_{ϕ_1} の回折線は, Δ_{ϕ_2} に比べ, X 線の試料中を通過する距離が異なるために薄く, かつ細くなる。



図—2 二 回 露 出 法

3. 実 験

X 線により測定した応力の値が, 他の機械的測定法により得られた応力値と比較して, いかなる関係にあるかを調べることを目的として, 先ず均一曲げ試験を行なった。次いで第 2 の実験として熱による残留応力, すなわち実際に溶接による残留応力を測定することが可能であるか否かを判定するために, 試験片に局部加熱を行ない, 冷却した後残留応力を X 線により測定した。これらの実験の終了後いよいよ既設橋梁の既応力を測定するために現場実験を行なったものである。

3-1. 均 一 曲 げ 試 験

I 試験片 試験片は板厚 3 mm の圧延鋼板より切り出し, 表面をエメリーペーパーで軽く磨いてから 600°C 近くの温度で焼なましを行ない, その後 20% の硝酸液で軽くエッチングしたものを使用した。試験片の形状および寸

法は第3図に示す。

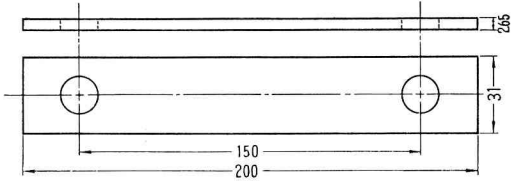


図-3 試験片寸法 (mm)

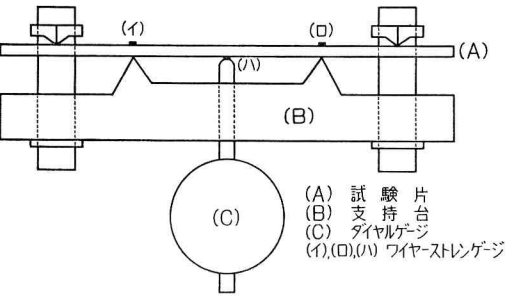


図-4 荷重装置

II 応力の負荷方法 この実験に用いた応力の負荷装置は、第4図に示すように試験片両端部を締め付けることにより試験片に均一な曲げを生じるようにしたものであり、支点上に貼付した標点距離3 mmのワイヤーストレンゲージによりボルトの締め付け力を調整する。試験片の中央下面に貼付したワイヤーストレンゲージで最大ひずみを測定し、同時にダイヤルゲージで最大たわみを直接 1/1000 mm まで読みとり、弾性理論により応力値を求め、X線により測定した応力値と比較検討するものである。



写真-1 均一曲げ試験

3-2 局部加熱による残留応力の測定

熱による残留応力を測定するために、第6図に示す形状の厚さ 22 mm の構造用鋼で試験片を製作し、中央部分に直径 10 mm の孔をあけ、その孔の周辺をガスバーナーで赤熱した後零下 20℃ 程度まで自然冷却し、表面を軽くエ

ッチングしてエレスコープにより残留応力を測定した。

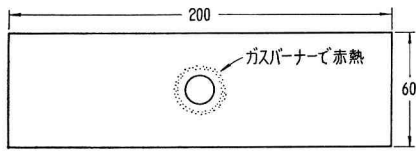


図-6 試験片

3-3. 橋梁の既慮力の測定

室内実験に関しては一応の成果を得たが、果して現場でも使用し得るかどうか疑問であったので既設橋梁の既応力を測定してみた。測定中はできるだけ重車両の交通を止めたかったので、比較的交通量の少ない岩見沢大橋につき実験を行なった。本橋は道々当別沢線の新篠津村と北村を結ぶ石狩川に架設された二等橋であり、主経間は三経間連続トラス、側経間は長さ 34.20 m の単純合成桁である。測定点は合成桁では下流側外桁の支間中央下縁であり、トラス部では第8図に示した A, B, C 点である。

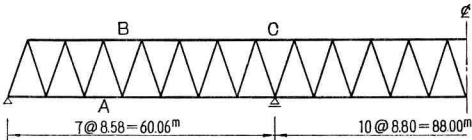


図-8 トラス部材の測定位置



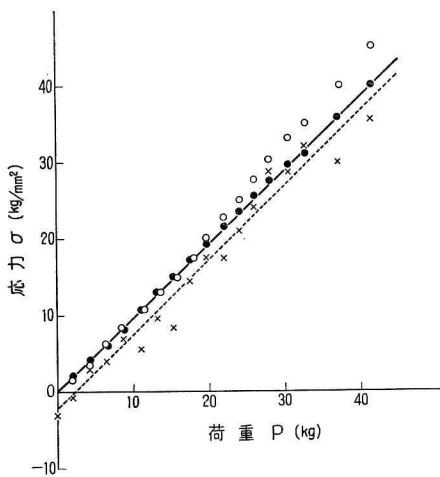
写真-2 岩見沢大橋応力測定

4. 結果および考察

第5図は均一曲げ試験により得られた結果であり、応力値を図示したものである。応力は正の符号は引張であり、負の符号は圧縮である。縦軸は測定した応力値であり、横軸は荷重強度である。図中○印がダイヤルゲージによる測定値、●印はワイヤーストレンゲージによる測定値であり×印はエレスコープによる測定値、実線は計算値である。ワイヤーストレンゲージによる結果はほとんど計算値に一

致しているが、ダイヤルゲージの結果では荷重が 20 kg に達するまでは計算値によく一致した傾向であるが、大きな荷重になるに従って計算値とのひらきが大きくなっている。またエレスコープにより得られた結果は、かなりのばらつきはあるが、その勾配はほとんど計算によるものと同じであり、初期応力は約 2 kg/mm² の圧縮力であった。

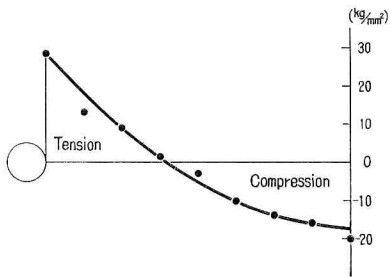
この結果をみると、既応力を非破壊的に測定する方法が余りない今日その使用法さえ適切であれば X 線による応力測定は相当の成果を上げ得るものと思う。



図—5 荷重と応力の関係

第 7 図は局部加熱による残留応力の分布を測定した結果である。測定は孔の縁より短軸までを 8 等分し、試験片の片面だけにつき測定したものである。

この結果孔の縁では 29 kg/mm² の引張残留応力となり、短軸縁では 20 kg/mm² の圧縮残留応力が存在した。●印は測定値であり、実線は最確値と思われる値である。孔の周辺より試験片の縁に行くに従って急勾配で引張残留応力は減少し、約 3/8 の位置では残留応力が零となり、次第に勾配は緩くなり、圧縮応力となる。



図—7 残留応力分布図

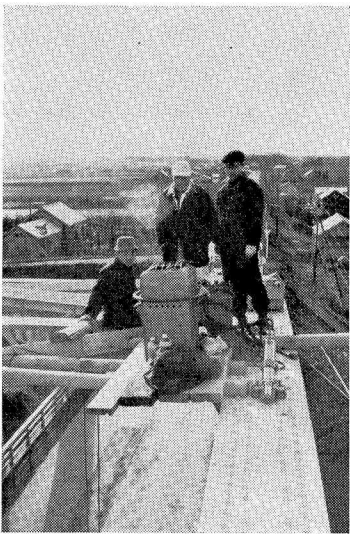
第 2 表は合成桁およびトラス部材の実測応力値と設計計算値を示す。但し測定点 D とは合成桁下縁の値である。

これらの実測値は既応力であり、橋梁の死荷重応力の他に鋼材の加工応力も含まれている。計算値は死荷重のみによる応力値である。

表—2 部材応力度 (kg/mm²)

測点	実 測 値	計 算 値
A	9.1	8.0
B	-3.8	-4.7
C	9.8	9.2
D	8.3	7.4

実際の構造物において問題となるのは許容応力を越えるような大きな応力の存在であって、今回の実験程度の小さな応力では何ら問題はないし、また現場でも充分使用し得る確信を得た。



写真—3 岡 山 極 実 験

5. む す び

以上 X 線による応力測定法および二、三の実験結果をとりまとめ報告したが、精度および他の測定法との関係、現場での利用価値なども予想以上の成果であった。しかしまだ完全には解決されていない材料表面の問題、内部の諸問題などまだまだ研究しなければならない問題が種々残されているが、X 線による応力測定法の本質をわきまえて測定を行えば工学上の利用分野も広く大いに活用し得るものと思う。