大形構造物用 X 線応力測定装置*

蒲 地 一 義** 川 辺 泰 嗣*** 清 水 良 一****
関 口 晴 男***** 安 居 喜 代 三*****

A New X-Ray Diffraction Stress Analyzer for Large Structures

by

Kazuyoshi KAMACHI

(Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube)

Yasushi KAWABE, Ryoichi SHIMIDZU, Haruo SEKIGUCHI and Kiyozo YASUI

(Shimadzu Seisakusho, Ltd., Kyoto)

The strength of large structures such as vessels, slips or bridges depends mostly not only on the residual stress caused by welding but also on constrained stress, and therefore a non destructive stress measurement on a real object is demanded. Based on the experience that one of the authors previously made X-ray stress measurement of ship construction, authors newly developed a compact type of X-ray diffraction stress analyzer which adopts a modified side inclination method and enables the stress measurement at the corner of structures. This analyzer has also such features as an incident X-ray oscillation mechanism for the stress measurement of coarse grained materials, a direct charge system for making counting circuits small and $5 \times 5 \text{ mm}^2$ large focal spot X-ray tube which is useful in side inclination method.

The relation between the measured stress σ_x' and the true stress σ_x is theoretically calculated as follow.

$$\sigma_x' = 0.96 \sigma_x + 0.006 \sigma_y - 0.08 \sin 2\phi (\sigma_1 - \sigma_2)$$

The error of σ_x' is negligibly small, and is found to be comparable to that of the data by using a conventional type of apparatus, based on the experimental results on S15C and S40C heat-treated specimens under uniaxial stress. Goniometer setting error under $\pm 2 \text{ mm}$ also does not increase the error in X-ray stress measurement.

(Received June 18, 1976)

1 緒 言

X線応力測定法は非破壊的残留応力測定法である特長のゆえに、現場での実物試料の測定に広く応用されているが、対象試料はほとんど中小形試料に限定されている。一方、压力容器、船殻、橋梁など大形溶接構造物は溶接残留応力だけでなく抱束応力が応力腐食、水素ぜい性あるいは低温ぜい性などに与える影響は大きく、実物試料の応力測定が要求される。筆者らは船用構造物について従来の装置やカメラ法で測定を試み、測定の可能性を見いだしたが、測定を容易にし精度を向上するには装置の改良が必要で今回、大形構造物とくにその隅肉部のX線応力測定を可能にするために側傾法による応力測定法に工夫を加え、軽量・小形化さ

れたゴニオメータ機構を開発した。本装置は粗大結晶試料の測定を容易にする入射角揺動機構をはじめ、検出器および計数回路の小形化のためダイレクトチャージ方式を採用する他、側傾法に最も適した $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の大焦点X線管球を用いている。

2 装 置

2・1 ゴニオメータの機構

Fig. 1 にゴニオメータの機構を示す。本装置の特徴は従来の側傾法ゴニオメータと異り、X線入射角回転機構部を軽量小形化するために、試料表面のX線照射位置を通りかつ角度 η のこう配でX線入射角回転軸 (Ψ_0 axis) を設けている点である。従来の方法では試料面法線に対して入射X線は図のように角度 η 傾斜させるが、 Ψ_0 軸は試料上に設けており、この場合 Ψ_0 軸が試料面に接するため、このような機構は大形試料には採用できない。一方、試料面上に設けた仮想回転軸を

* 原稿受理 昭和51年6月18日

** 正 会 員 山口大学工学部 宇部市常盤台

*** 正 会 員 (株)島津製作所 京都市中京区西ノ京桑原町

**** (株)島津製作所 京都市中京区西ノ京桑原町

Fig. 1. Mechanism of the goniometer.

有する駆動方法では、特別なガイド機構を必要とし、この場合ゴニオメータ自体が大形化するという問題がある。本装置ではまた、 ψ_0 axis の回りにゴニオメータを速度 $3^\circ/\text{sec}$ 、角度幅 $\pm 2.5^\circ$ で揺動できる。試料に対しては、ゴニオメータをマグネットで固定する方法を標準的に採用しているが、ステンレス鋼、非鉄試料および形状複雑な試料に対しては、マグネットの代りにそれぞれに応じた支持台を取りつけることも可能である。

2・2 X線応力測定原理

Fig. 2 にX線応力測定原理を示す。図において、測定しようとする応力を σ_x とすると、X線入射角を σ_y 軸の回りで回転すれば、X線で測定されるひずみ方向すなわち回折面法線は $\sigma_x\sigma_3$ 面内で回転される。しかし本装置のように、X線入射角回転軸 (ψ_0 軸) が σ_y 軸と角度 η のこう配をもつ場合、回折面法線はQ点を中心に回転し、実線で示される軌跡を通るため、応力を測定する方向が ψ_0 とともに変化すると同時に回折面法線と σ_3 軸との間の角 (α) も ψ_0 のみの関数とはならない。これらによる測定誤差は、図の一点鎖線で示される軌跡を通る、側傾法で η 補正しない場合よりは $\psi_0=0\sim 45^\circ$ の範囲では明らかに小さいが、以下に検討結果を示す。

主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 、主ひずみを $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 、縦弾性係数を E 、ポアソン比を ν とするとX線応力測定では $\sigma_3=0$ とみなせるので弾性理論式から

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 E &= \sigma_1 - \nu \sigma_2 \\ \varepsilon_2 E &= \sigma_2 - \nu \sigma_3 \\ \varepsilon_3 E &= -\nu(\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} (1) \quad \left. \begin{aligned} \varepsilon_x E &= \sigma_x - \nu \sigma_y \\ \varepsilon_y E &= \sigma_y - \nu \sigma_x \\ \varepsilon_z E &= -\nu(\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \right\} (2)$$

X線で測定されるひずみを $\varepsilon\phi, \Psi$ とすれば

Fig. 2. Principle of X-ray stress measurement.

$\varepsilon\phi, \Psi = \varepsilon_1 \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \Psi + \varepsilon_2 \sin^2 \phi \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 \cos^2 \Psi$ であり、(1), (2)式から

$$\varepsilon\phi, \Psi = \frac{1+\nu}{E} \sigma_x \sin^2 \Psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3)$$

したがって

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\nu} \frac{\partial \varepsilon\phi, \Psi}{\partial \sin^2 \Psi} \quad (4)$$

本装置において入射角 Ψ_0 において X 線で測定されるひずみを $\varepsilon\alpha\beta\gamma$ とし, 測定される応力を σ_x' とすると, $\varepsilon\alpha\beta\gamma$ の方向余弦は Ψ_0, η の関係で表される.

$$\left. \begin{aligned} \cos^2\alpha &= 1 - 4 \cos^2\eta \cdot \sin^2\left(\frac{\Psi_0}{2}\right) \\ &\quad + 4 \cos^4\eta \cdot \sin^4\left(\frac{\Psi_0}{2}\right) \\ \cos^2\beta &= \sin^2 2\eta \cdot \sin^4\left(\frac{\Psi_0}{2}\right) \\ \cos^2\gamma &= 4 \cos^2\eta \cdot \sin^2\left(\frac{\Psi_0}{2}\right) \\ &\quad - 2 \cos^2\eta \cdot (1 + \cos^2\eta) \cdot \sin^4\left(\frac{\Psi_0}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

また $\varepsilon\alpha\beta\gamma$ は σ_x' と σ_x との間の角を δ とおけば

$$\begin{aligned} \varepsilon\alpha\beta\gamma &= \varepsilon_1 \sin^2\alpha \cos^2(\phi + \delta) \\ &\quad + \varepsilon_2 \sin^2\alpha \sin^2(\phi + \delta) + \varepsilon_3 \cos^2\alpha \end{aligned}$$

ただし δ は

$$\sin\alpha \cos\delta = \cos\gamma, \text{ or } \sin\alpha \sin\delta = \cos\beta$$

(1), (2) 式を代入すれば

$$\begin{aligned} \varepsilon\alpha\beta\gamma \cdot E &= \sigma_x (\cos^2\gamma - \nu \cos^2\beta - \nu \cos^2\alpha) + \sigma_y (\cos^2\beta \\ &\quad - \nu \cos^2\gamma - \nu \cos^2\alpha) - \cos\gamma \cdot \cos\beta \cdot \sin 2\phi \\ &\quad (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot (1 + \nu) \end{aligned}$$

すなわち $\varepsilon\alpha\beta\gamma$ は σ_x, σ_y および $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の関数となる. 一方, σ_x' は (4) 式と同様

$$\sigma_x' = \frac{E}{1 + \nu} \frac{\partial \varepsilon\alpha\beta\gamma}{\partial \sin^2\Psi_0} \quad (6)$$

であり, (6) 式を得るには (5) 式において $\sin^2(\Psi_0/2)$, $\sin^4(\Psi_0/2)$ をそれぞれ $\sin^2\Psi_0$ で近似する必要がある. しかるに $\Psi_0 = 0 \sim 45^\circ$ であるので, 直線近似することが可能であり, $\sin^2\Psi_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ とすると, それぞれ

$$\sin^2(\Psi_0/2) = 0.291 \sin^2\Psi_0, \quad \sin^4(\Psi_0/2) = 0.041 \sin^2\Psi_0 \quad (7)$$

今 $\text{CrK}\alpha$ 線で $\alpha\text{Fe}(211)$ を測定する場合, $\eta = 12^\circ$ であり, $\nu = 0.28$ としてこれらの数値を代入すると

$$\sigma_x' = 0.96 \sigma_x + 0.006 \sigma_y - 0.08 \sin 2\phi (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (8)$$

(8) 式から測定値 σ_x' は真値 σ_x に比して常に 4% 小さく測定されるが, 実際の測定にあたっては無視できる. また σ_y による影響は完全に無視してよい. 一方 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ が σ_y に与える影響については, 側傾法で η 補正しない場合について吉岡が示す.

$$\sigma_x' = 0.96 \sigma_x - 0.26 (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{ただし } \phi = 45^\circ)$$

に比して, 係数は 1/3 以下である. 誤差が最大となる単純せん断について, $\sigma_1 = -\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ としたとき, $\sigma_x = 0 \text{ kg/mm}^2$ に対し η 補正なしでは $\sigma_x = -15.6 \text{ kg/mm}^2$ に比し, 本装置では $\sigma_x' = -4.6 \text{ kg/mm}^2$ である.

一方, δ は $\Psi_0 = 0 \sim 45^\circ$ では最大 3.4° であり, X 線応力測定方向が変位する点については実用上問題は

Fig. 3. Outview of the apparatus.

ない.

2・3 装置

Fig. 3 に装置の外観図を示す. X 線管球は従来使用されていた焦点径 $2 \times 4 \text{ mm}^2$ によると側傾法による応力測定では十分な X 線照射面積と X 線強度が得難いため, 本装置では焦点径 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ で Cr ターゲットにおける管容量 $50 \text{ kVP}, 35 \text{ mA}$ のものを採用している. 分光部の光学系としては, 平行ビーム法を採用し, スリットの開き角は 0.8° である. また検出器としては小形のパンケーキ形 Ar 封入プロポーショナルカウンタを用いるとともに計数方式としてもプリアンプを必要としないダイレクトチャージ方式を採用しているので, 検出器・計数回路ともに従来のものに比して軽量・小形化されている.

X 線発生制御部・計数記録部は架台車に搭載され, 運搬に際してはゴニオメータも架台車のケースに格納される. X 線発生制御部は X 線管容量が大きいにもか

Fig. 4. Goniometer set to the corner of the sample.

かわらず、軽量化のため容量は 30 kV 10 mA とし、充分な X 線強度が得られるよう全波整流平滑方式を採用している。ゴニオメータは試料にセットした後、遠隔でレコーダと連動して、検出器を自動スタートでき、その走査角範囲は最大 $2\theta = 140 \sim 170^\circ$ である。

とくに本装置のゴニオメータは大形構造物の隅内部の応力測定が可能であり、Fig. 4 に示すように隅内溶接線と直角方向の応力を $\sin^2\psi_0 = 0.2 \sim 0.5$ まで連続的に X 線入射角をかえて測定できる。

3 X 線応力測定精度

3.1 実験方法

機械的に測定される応力値と本装置および従来の側傾法 X 線応力測定値における測定値を比較するために以下の実験を行った。供試材は厚さ 3 mm・平行部 30 mm の板状試験片で日本材料学会製曲げ負荷装置を用い、試験片に貼ったひずみゲージにより段階的に負荷を加え、同時に X 線で応力測定を行った。試料は S15C 材を 900℃ 1 時間加熱、油焼入れ後 500℃ で 1 時間焼もどして X 線回折半価幅が 1.9° のものと S40C 材を 850℃ で 30 分加熱、油焼入れして X 線回折半価幅が 6.8° のものの 2 種類である。また従来の側傾法 X 線応力測定装置としては島津 X 線応力測定装置 SMX-50 形を使用した。

また、試料面にゴニオメータをマグネットで固定する場合のゴニオメータのセッティング誤差が測定誤差に与える影響を検討するために、日本材料学会製 Cr 標準粉末を用い試料を 0.5 あるいは 1 mm の間隔で動かし、X 線応力測定を行った。

3.2 実験結果および考察

Table I に本装置の X 線測定条件を、Fig. 5 に $\psi_0 =$

0° における S15C 材および S40C 材の X 線回折パターンを示す。X 線は $\text{CrK}\alpha$ 線を用い $\alpha\text{Fe}(211)$ 面を測定している。Fig. 6 に本装置 (SMX-LS) および SMX-50 形による測定結果を示す。ひずみゲージで測定される機械的応力と X 線応力とは両装置ともよく一致している。理論的に単軸引張状態で計算される測定誤差は (8) 式より 4% 減であり、Fig. 6 においても完全に誤差範囲内である。とくに S40C のように半価幅が広く、回折 X 線ピーク強度が小さくなる場合は、測定誤差も増大するが $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ の実測された最大誤差は 20 kg/mm^2 の応力について 10% である。

Fig. 7 はゴニオメータにセッティング誤差を生じさ

Table I. Experimental condition of X-ray stress measurement.

Characteristic X-ray	CrK α
Diffraction plane	$\alpha\text{-Fe}(211)$
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Irradiation area (Focal spot size)	$5 \times 5 \text{ mm}^2$
Filter	V
Detector	Ar PC
Divergent angle of soller slits	0.8 deg
Incident angle of X-ray	$\sin^2\psi_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$
Scanning speed of detector	2 deg/min
Time constant	8 sec
Chart speed	20 (or 40) mm/min
Incident X-ray oscillation speed	3 deg/sec
Incident X-ray oscillation width	$\pm 2.5 \text{ deg}$
Determination of peak position of X-ray profile	Half value breadth method
Stress constant K	$-32.44 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{deg}$

Fig. 5. X-ray diffraction profiles at $\psi_0 = 0^\circ$.

Fig. 6. Relation of stress measured by strain gage and by X-ray.

Fig. 7. Stress deviation caused by goniometer setting error.

せたときの測定誤差を示す。応力値へ換算する場合、試料がCr粉末ではあるが、 α -Fe(211)を測定するときと同じ応力係数を用いている。図で本装置とSMX-

50形では共に ± 2 mm以内のセッティング誤差は測定誤差には影響しないことが明らかである。またVD-2で示されるデータは島津X線回折装置VD-2形に測傾法用試料台を取り付け、スリット系は集中ビーム法を用いたものであり、これと比較してもセッティング誤差により生ずる測定誤差が本装置では小さいことがわかる。

4 ま と め

(1) 側傾法によるX線応力測定原理に工夫を加え、大形構造物とくにその隅内部の応力測定を可能とするコンパクトなゴニオメータを有するX線応力測定装置を開発した。本装置は粗大結晶試料測定のためのX線入射角揺動機構をはじめ、検出器、計数回路の小形化のためダイレクトチャージ方式を採用する他、側傾法に最も適した 5×5 mm²の大焦点X線管球を用いている。

(2) 本装置による測定値 σ'_x は真値 σ_x に対し理論的に次式で計算される。

$$\sigma'_x = 0.96 \sigma_x + 0.006 \sigma_y - 0.08 \sin 2\phi (\sigma_1 - \sigma_2)$$

単軸引張状態では、真値の4%減で測定されるが測定誤差範囲内である。また誤差が最大となる単純せん断状態で主応力差の8%が誤差として測定されるが、 η 補正しない場合の1/3以下である。半価幅がそれぞれ 1.9° , 6.8° のS10C, S40C熱処理試験片に曲げ負荷を与え、単軸引張応力状態で本装置と従来の側傾法X線応力測定装置とで比較測定したが、差はなく、ひずみゲージによる応力値ともよく一致する。

(3) ゴニオメータのセッティング誤差は測定誤差を生ずるが ± 2 mm以内では影響を与えない。

(昭和51年5月21日 日本材料学会第25期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 蒲地一義, 材料, **25**, 6 (1976).
- 2) 吉岡靖夫, 材料, **25**, 1 (1976).
- 3) 材料強度部門委員会応力測定分科会, “X線応力測定法標準”(1973) JSMS