

# 鉄骨構造の柱梁接合部の光弾塑性実験 (第1報)

## ——角鋼管柱の接合部——

高橋 久雄  
武田 寿一  
西川 勝久

### 概 要

複雑な構造要素の弾塑性域にわたる力学的挙動を定量的・定性的に解析し、塑性設計に必要な流れ限度を精密に決定する実験手段の一つとして光弾性皮膜法がある。

この報告は、光弾性皮膜法を使って行なった一連の鉄骨柱梁接合部実験のうち、角鋼管柱である“Sコラム”の柱梁接合部における、引張荷重時の塑性領域の進展状況を追跡し、有限要素法による計算結果と比較検討したものである。

### 1. まえがき

鉄骨構造における柱と梁の接合方法は、多種多様に考えられ、設計されているが、問題は、梁の応力をいかにして確実に柱に伝達するかにある。この問題については、すでに、従来より多くの研究がなされているが筆者は、SコラムおよびH型鋼を柱材とした場合の梁フランジとスチフナーの応力伝達および塑性領域の進展状況を調査するため、光弾性皮膜法を使って一連の実験を行なった。

この報告は、Sコラム柱材とした場合の実験結果の一部である。

### 2. 試験体

#### 2.1. Sコラム試験体

Sコラムの試験体は、図-1に示すように、一辺が25cmの正方形柱（プレス成型の溝形鋼を溶接したもの）の中央部に梁フランジを溶接した、全長120cmの2体である。試験体の名称は、柱内のスチフナーの配置の違いにより、試験体-AおよびBとした。

使用した鋼材は、SM50Aで、その性質は表-1に示す通りである。

降伏応力度 $\sigma_y$	最大応力度 $\sigma_{max}$	弾性係数	ポアソン比
37.97kg/mm <sup>2</sup>	54.63kg/mm <sup>2</sup>	$2.08 \times 10^6$ kg/cm <sup>2</sup>	0.285

表-1 鋼材の性質

#### 2.2. 光弾性皮膜 (epoxy rubber)

試験体表面に貼付した皮膜材料は、エポキシ・ポリサルファイド系の共重合体で、通称エポキシラバー (epoxy rubber 100:10:8) と呼ばれるものを選び、公

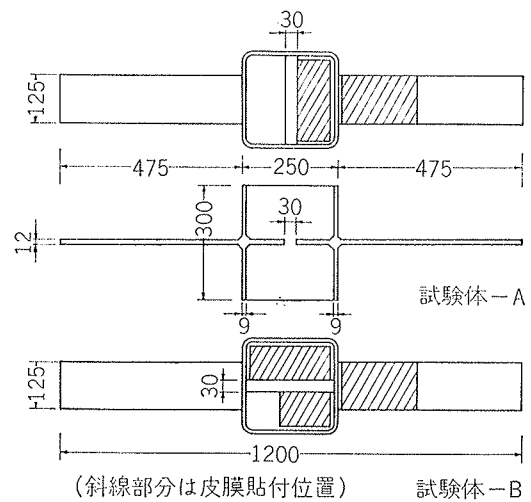


図-1 試験体

称厚さは、2mmとした。

製作したエポキシラバーは、高分子化反応を十分に進めるため、最高温度60°Cで焼鈍し (annealing) を行なったのち、所定の寸法に切削加工した。加工したエポキシラバーの厚さを測定した結果、平均2.10mmであった。

エポキシラバーは図-1の斜線部分に、皮膜と同材料の接着剤にて貼付した。接着剤には、反射剤としてアルミの粉末をアラルダイトDに対して重量比30%を混入した。

皮膜の特性検定用試験片を使って、単軸引張りにて得られた特性は、主ひずみ差感度  $\beta' = 123\text{mm}^{-1}$ 、主ひずみ感度  $\beta = 157\text{mm}^{-1}$  であった。

### 3. 実験および測定方法

反射型光弾塑性装置は、Photostress (Budd 社・

φ85mm) を使用した。等色線の撮影は、すべてカラーとし、プロニカ (f=200mm F:4) とマミヤ・1000 DTL (f=135mm F:2.8) のカメラにて行なった。装置の形式は、図-2 に示す通りである。

なお、写真撮影のため、試験機の周囲を暗幕にて覆い、外部からの光を遮断した。

引張試験は、200 t Amsler 型 万能試験機にて行ない、試験体の梁フランジの端部を加力した。

試験体の各部にストレーンゲージ (KP-3-A-11, KP-3-B3-11) を約60点貼付し、各荷重段階のひずみを測定した。

等色線の撮影およびひずみ量の測定は、荷重30 tまでは2 t毎に、30 t以上降伏荷重までは1 t毎に降伏以降はひずみを制御しながら適時行なった。

#### 4. 実験結果

##### 4.1. 耐力

試験体-Aの耐力は、降伏荷重51 t、最大耐力70.8 tであり、梁フランジにて破断した。鋼材試験の結果を適用して、梁フランジに応力集中がない場合の梁フランジの降伏荷重と最大耐力の計算値は、各々58.0 t、83.5 tとなり実験値は計算値に対し、それぞれ87.9%、84.8%であった。破断位置は、柱の外側より約2cm離れた梁フランジ部分である。

試験体-Bは、降伏荷重52 t、最大耐力74.9 tであり、計算値に対し、それぞれ89.8%、89.9%に相当する値を示した。破断位置は、柱の外側より約7cm離れた梁フランジ部分である。

図-3 に示す荷重-伸び曲線は、Amsler 試験機に付属している自動記録装置にて記録したもので、チャック位置での滑りなどが多少含まれているが、参考資料として掲げる。

##### 4.2. 光弾性測定結果

反射型光弾塑性装置にて撮影した各荷重時のスチフナーと梁フランジ表面の等色線を写真-1, 2 に示す。なお、等色線は主ひずみ差 ( $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ) の等高線を表わしており、皮膜の特性検定試験により、1次縞 (fringe order) は、 $\epsilon_1 - \epsilon_2 \doteq 2000 \times 10^{-6}$  であった。従って、鋼材が降伏を開始した部分は、1.1~1.2 次縞に相当する。

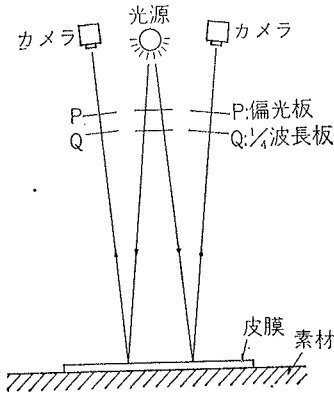


図-2 装置の形式

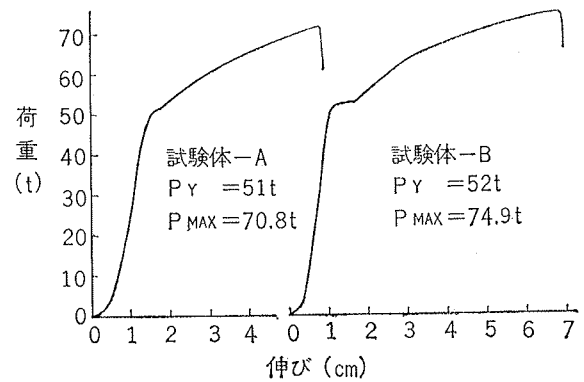


図-3 荷重-伸び関係

#### 5. 有限要素法による弾塑性解析

2種類の試験体について、F.E.M. により2次元平面応力場の問題として、弾塑性的挙動を漸増荷重法により、数値計算を試みた。

試験体は、対称性を考慮して全体の1/4にモデル化した。モデル化した試験体の形状は、ほぼ実際の試験体と近似しているが、梁フランジ部分のみ、実際の長さより幾分短かくした。柱部分の扱いは、試験体-AとBとでは力の流れが異なるため、個々に有効幅を想定した。

鋼材の応力度-ひずみ度関係は、材質試験の結果を適用し、bi-linearとした。なお、降伏条件として、Von Mises の降伏条件式を用い、要素内の相当応力度  $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$  が鋼材の降伏応力度  $\sigma_y$  より大きくなった要素を降伏したものと判定した。

#### 6. 実験結果と計算結果の考察

##### 6.1. 塑性領域の進展状況

各荷重段階における等色線写真より、縞次数が1次以上部分を塑性領域と仮定し、その進展図を図-4.5に示す。この塑性領域は、厳密な意味では正確なものではないが、大勢を把握するには有効である。実際には、 $\epsilon_1 - \epsilon_2 = 1/2 \beta' t \doteq 2000 \times 10^{-6}$  以上の領域を表示したものと解釈すれば正確である。

等色線図と塑性領域進展図を観察すれば直ちに知られるように、最初、局部的降伏がおこり、次に、降伏領域の貫通する過程が明瞭に捕獲できた。

図-6の試験体の主要点の番号を使って、光弾性法より判明した降伏領域の進展状況を説明する。

試験体一Aでは最初に、梁フランジの接合部両端①に荷重 24 t 前後で局部的降伏が生じ、ついで、スチフナーの隅角部④が降伏した。さらに、荷重 30 t でスチフナー⑤を中心とする部分に圧縮降伏が生じ、荷重の増大にもな

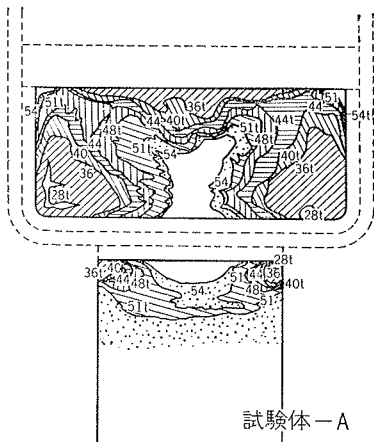


図-4 塑性領域進展図(光弾性)

って、塑性領域が拡がり、スチフナーの④と⑤を結ぶ方向に、荷重 45 t 前後で巨視的な滑り帯が生じて貫通し、これが逐次拡大するという過程をたどった。一方梁フランジは、柱との接合部より離れた部分で全幅を貫通する滑り帯が生じた。①と②を結ぶ方向に滑り帯が貫通するのは、

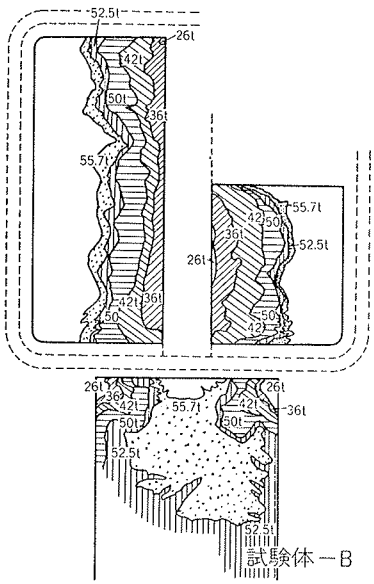


図-5 塑性領域進展図(光弾性)

荷重 50 t 前後であり、その後、試験体全体が 51 t で降伏した。なお、柱梁接合部の中央③および⑥を中心とする領域は、殆んど無応力に近い状態であった。

試験体一Bでは、最初に、荷重 26 t 前後で梁フランジの①とスチフナーの④と⑤を中心とする小さな領域で応力集中がおこり、局部的に降伏した。さらに荷重が増すに従って梁フランジでは、

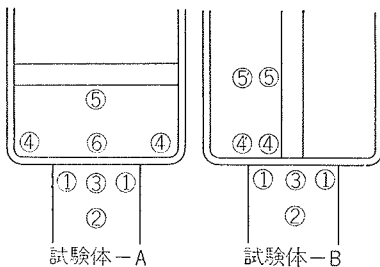


図-6 試験体の主要点

①から②に向かって 45° 方向に塑性領

域が拡がっていくが、スチフナーでは、ほぼ材軸方向と平行に塑性領域が拡がった(④→④', ⑤→⑤')。梁フランジで塑性領域が貫通した 52 t におけるスチフナーの塑性領域は、ほぼフランジ幅と同域であった。

二つの試験体の塑性領域進展状況の著しい差異は、試験体一Bの方が、試験体一Aにくらべて、柱の影響を強く受けていることにある。

次に、F. E. M. の計算結果より、降伏した各要素を荷重ごとにプロットし、塑性領域の分布を図-7, 8に示す。

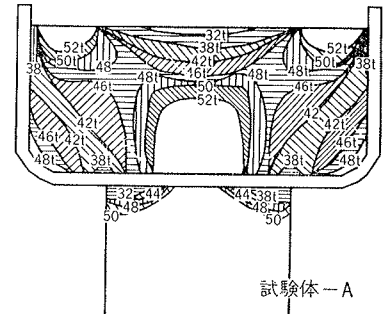


図-7 塑性領域進展図(F. E. M.)

F. E. M. による塑性領域進展図は光弾性法によるそれと比較して、ほぼ同様の傾向を示しているが、多少の差異もある。これは、計算に際して適用した柱の有効幅が、実状と若干の差があったためと、実際の試験体には、加工時および溶接時に生じた残留応力による影響が表われたためであろう。

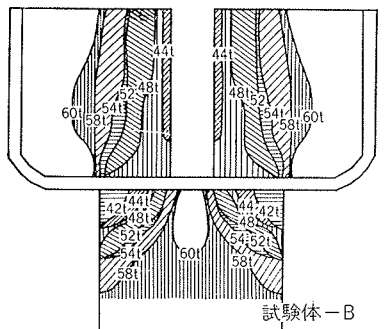


図-8 塑性領域進展図(F. E. M.)

## 6.2. 測定値と計算値の比較

応力集中が生じているスチフナーの主ひずみ差分布の例を図-9, 10に示す。この図は、光弾性法の等色線縞次数より求めた値 (coating), ロゼットゲージによる実測値 (gauge) および F. E. M. による計算値 (F. E. M.) の三者を比較したものである。

一般に、光弾性法による値は、応力集中の傾向をより顕著に示しており、しかも、低荷重からそれが認められた。

## 6.3. 梁フランジ接合部の応力集中

ストレインゲージにより実測された梁フランジの接合部の応力集中は、図-11に示すような傾向を示した。即ち、試験体一Aでは、梁フランジの応力は柱に影響されて流れるため、応力集中が梁フランジ端部に向

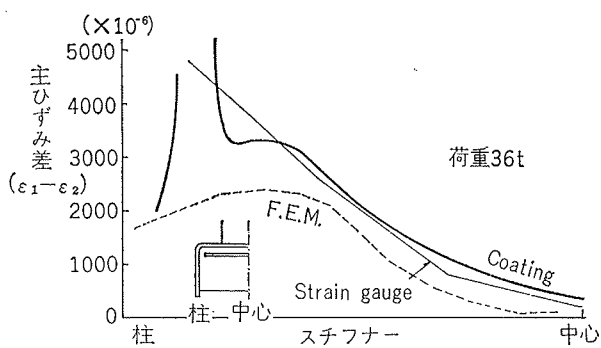


図-9 主ひずみ差の分布 (試験体-A)

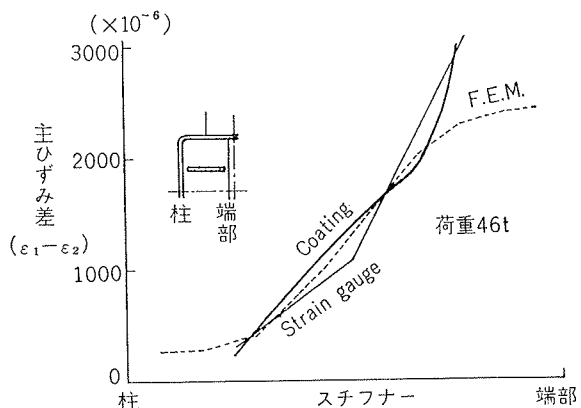


図-10 主ひずみ差の分布 (試験体-B)

て漸増している。一方、試験体-Bでは、梁フランジの応力が、直接スチフナーに流れ、しかも、梁フランジ中央部にはスチフナーがないため、高荷重時には、梁フランジ端部は最大のひずみを示さなかった。

## 7. まとめ

Sコラムの光弾性実験および F.E.M. による計算結果と比較検討した結果、次のことが明らかになった。

### (1) 塑性領域の進展について

試験体-A, Bとも、局所的な降伏は、試験体全体の降伏荷重の50%前後で、スチフナーおよび梁フランジに生じた。一般的な塑性領域の進展について述べると、

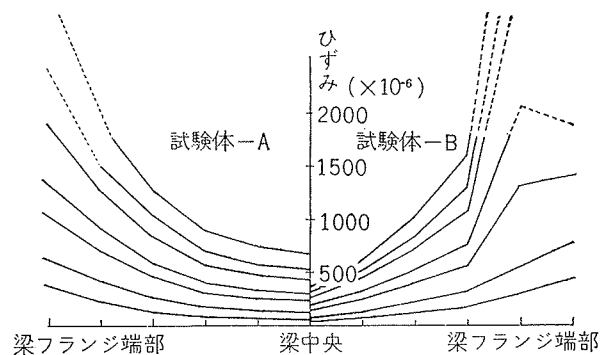


図-11 梁フランジの応力集中

試験体-Bのスチフナーの塑性領域は、荷重の増大とともに、ほぼ直線的に広がっており、問題となる点は少ないが、試験体-Aの柱隅角部とスチフナー中央端部の塑性領域は、荷重の増加とともに全体に広く分布したため、柱隅角部の局所的応力集中とスチフナー中央部の圧縮降伏が今後の課題として残った (図-4, 5 参照)。

### (2) 変形について

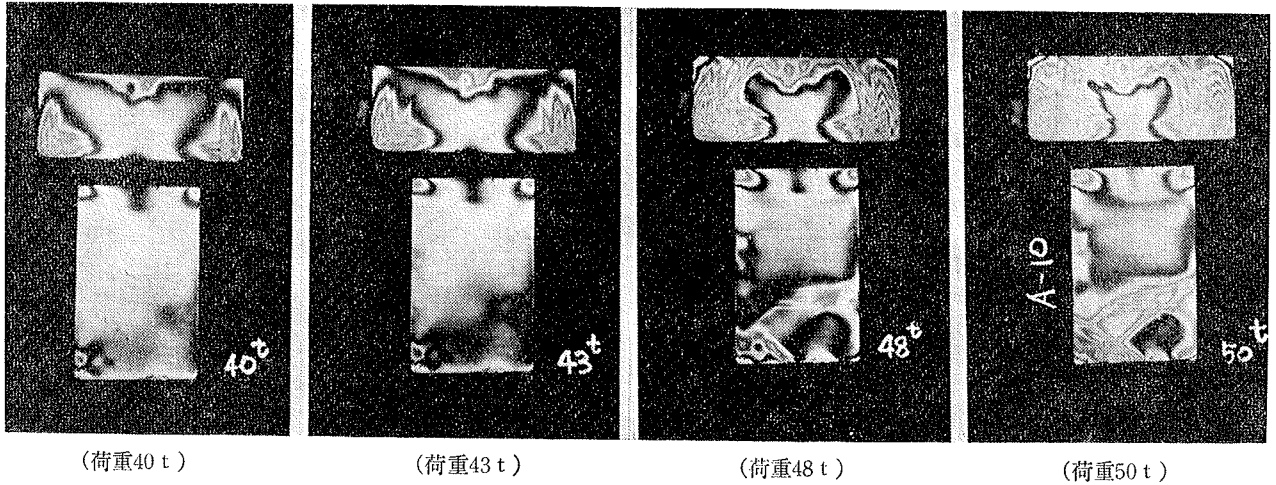
本文中には、ふれていないが、試験体-Aにおけるスチフナー中央部の圧縮変形は大きく、座屈するおそれがある。これを防ぐには、スチフナーを厚くするか、座屈止めに補強リブを付ける必要がある。

### (3) 光弾性法について

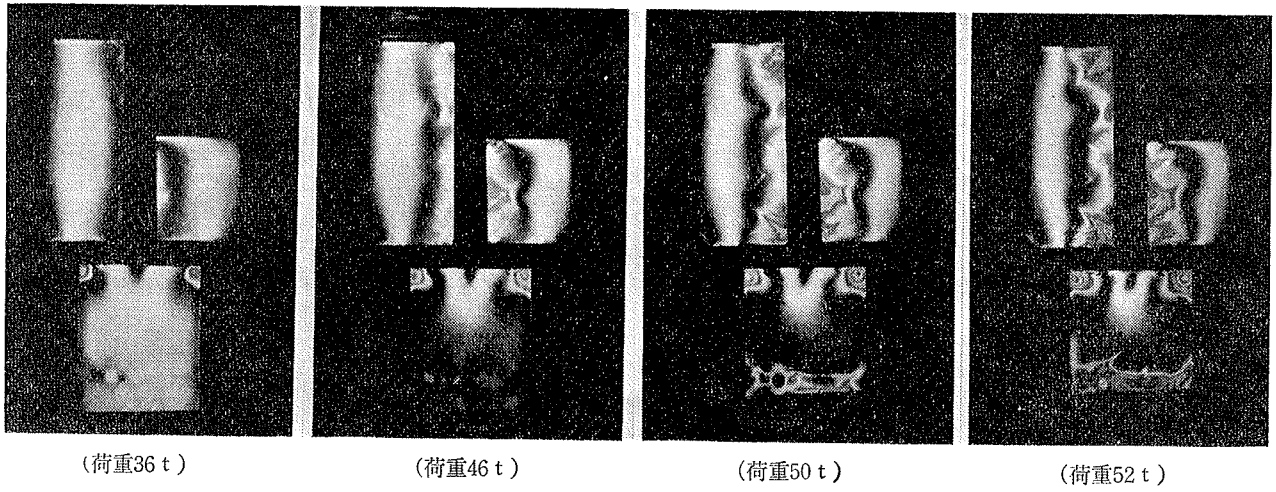
光弾性法は、他の測定方法よりも、局所的な降伏現象をすみやかにとらえることができ、しかも、試験体全体の応力・ひずみ分布を知ることができ、その有用性は高いことが証明された。

## 謝辞

本実験を行なうに当たって、多大の御便宜をたまわった㈱神戸製鋼と当社設計部の諸氏および演算に協力いただいた当所構造研究室井元職員に深く感謝の意を表する。



写真一1 試験体一Aの等色線



写真一2 試験体一Bの等色線