

## [73] 異形H形鋼を膨張コンクリートで被覆したSCばりの力学的特性

正会員 ○石 渡 正 夫 (川崎製鉄エンジニアリング事業部)

正会員 佐 藤 政 勝 (川崎製鉄構造技術研究所)

正会員 辻 幸 和 (群馬大学工学部)

## 1. 緒 言

鉄骨のコンクリートとの付着強度が異形鉄筋のそれに比べて劣ることなどの理由から、現行のSRC設計指針では原則として、鉄骨のコンクリートとの付着を期待しない累加強度方式が採用されているが、この方式では、鉄骨とRC部にそれぞれ独立の変形を許容しているため、常用荷重下における部材の実応力が把握できない。また、鉄骨が偏心配置された構造物に対して不経済な設計となることなどから、鉄骨を鉄筋と等価に置き換えたRC方式に基づく計算法が再検討されている<sup>1)</sup>。このような実情を踏まえて、横ふし異形鉄筋と同じ様な突起形状を上下フランジの外面に設けた圧延H形鋼(以下、異形H形鋼と記す。図1.a参照)を新規に開発し、このH形鋼をコンクリートで被覆したSCおよびSRCばりの静的曲げ載荷試験から、従来のH形鋼を被覆したSCおよび、SRCばりに比べてコンクリートの最大ひび割れ幅は小さくなること、またその突起によってコンクリートとの一体性が終局時まで保持され、最大耐力が8%程大きくなることなど異形H形鋼を用いたはりにおける力学的有利性が明かにされた<sup>2)3)</sup>。さらにコンクリートの最大ひび割れ幅をより小さくし、かつ現場施工の省力化を図るため、異形H形鋼の下フランジを膨張コンクリートで包囲したプレハブSC部材の実用化について鋭意研究を行っている。

本報告では、その手懸かりとして道路工事用などの覆工板として市販されている格子縞異形H形鋼(走行面におけるタイヤとのすべり抵抗を大きくするため、上下フランジの外面に角小状の格子縞突起(図1.b参照)を設けた圧延H形鋼)を膨張コンクリートで被覆したSCばりの曲げ実験を5体実施し、膨張材の使用によってコンクリートに導入されたケミカルプレストレスがSCばりの応力分布、最大ひび割れ幅や終局耐力に及ぼす影響を明らかにし、SCばりに対する適切な膨張材量を検討した。さらに新規に開発した異形H形鋼を膨張コンクリートで被覆したSCばりの曲げ実験によって、膨張材の添加による効果を確認した。

## 2. 実験の概要

格子縞異形H形鋼を用いた実験用供試体の種類と形状寸法、膨張材量、セメント量および水セメント比を図2に示す。膨張コンクリートでは、セメント量Cに膨張材量Eを加えた結合材量T( $403 \text{ Kg/m}^3$ )を一定にし、Eが0、35、45、50、60  $\text{Kg/m}^3$ と変化させた。Eが45  $\text{Kg/m}^3$ の膨張コンクリートで異形H形鋼の下フランジを被覆した供試体の種類および形状寸法を図3に示す。供試体MAEでは上部普通コンクリートを打設したが、供試体MBEについては、床版コンクリート打設前の力学的性状を把握するために普通コンクリートを打設しない状態で実験を行った。使用したH形鋼の引張試験結果を表1に、材令28日におけるコンクリートの圧縮試験結果を表2に示す。圧縮側に用いた普通コンクリートを

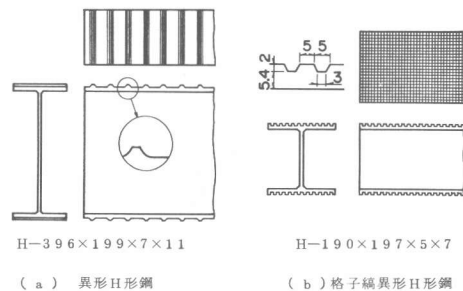


図1 異形H形鋼の種類およびその形状寸法

表1 異形H形鋼の機械的性質

| 種 類       | 規 格  | 降 伏 点<br>( $\text{Kg f/mm}^2$ ) | 引 張 強 さ<br>( $\text{Kg f/mm}^2$ ) | 伸 び(%) |
|-----------|------|---------------------------------|-----------------------------------|--------|
| 異 形 H 形 鋼 | SS41 | 31.7                            | 48.3                              | 26.7   |
| 格子縞H形鋼    | "    | 32.0                            | 48.8                              | 24.0   |

室内養生した円柱供試体の圧縮試験結果から、許容圧縮応力度  $80 \text{ Kg/cm}^2$  における割線弾性係数は、 $2.1 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$  であり、実測値との対比に用いる応力計算では、弾性係数比  $n$  に 10 を採用した。なお、供試体のコンクリート打設は足利工業大学実験室で実施した。

載荷は、図 2・3 および写真 1 に示すように中央対称 2 点集中荷重方式とし、支間中央の下フランジの実応力が  $14 \text{ Kg/cm}^2$  になった荷重段階で 1 度除荷し、その後はコンクリートが圧縮破壊するか、あるいは荷重と径間中央のたわみ曲線にピークが見られるまで荷重を漸次単調増加させた。各荷重段階で、H 形鋼およびコンクリートのひずみを電気抵抗ひずみゲージで、支間中央などのたわみを電気式変位計で、下フランジ面におけるコンクリートのひび割れ幅をコンタクトゲージで、さらに  $\pi$  形クリップゲージを用いてはり端における相対滑りを測定した。

### 3. 数値計算

圧延 H 形鋼のように上下フランジの断面積が等しく、かつ、フランジが上下対称に配置された矩形 SC ばりの中立軸  $X$  は、コンクリートの引張応力を無視した場合、次の釣合式から求めることができる。

$$\frac{B}{2n} X^2 + A_f (X - d_f) + \frac{t_w}{2} (X - d_s)^2 =$$

$$A_f (H - X - d_f) + \frac{t_w}{2} (H - X - d_s)^2$$

上式を整理すると

$$B \cdot X^2 + 2n \cdot A_s \cdot X - n \cdot H \cdot A_s = 0$$

$$\therefore X = \frac{nA_s}{B} (-1 + \sqrt{1 + \frac{B \cdot H}{nA_s}})$$

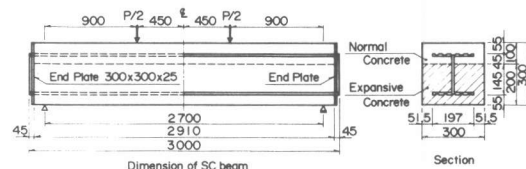
ここで、 $A_s = 2A_f + A_w$

$X$  は中立軸からコンクリートの上縁端までの距離、 $B$  と  $H$  ははりの幅と高さ、 $A_s$  は H 形鋼の断面積である断面 2 次モーメントは次式で求めることができる。

$$I_x = \frac{BX^3}{3} + n \left\{ A_f (r_{fu}^2 + r_{fl}^2) + \frac{t_w}{3} (r_{su}^3 + r_{sl}^3) \right\}$$

なお、 $d_f$ 、 $d_s$ 、 $r_{fu}$ 、 $r_{fl}$ 、 $r_{su}$ 、 $r_{sl}$  の記号について文献 2)、3) を参照にすること。

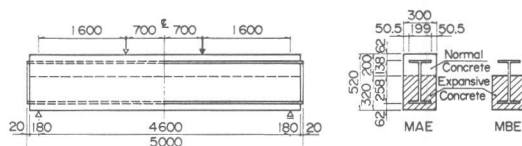
各供試体について、コンクリートの圧縮縦維応力  $\sigma_c$ 、H 形鋼の下フランジ中央面における引張応力  $\sigma_{tf}$  について、 $n$  を 10 および 15 とした計算結果を表 3 に示す。



| Specimen | Span | Expansive Concrete |                     |               | Normal Concrete |         |
|----------|------|--------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------|
| Symbol   | Span | Cement C (kg/m³)   | Admixture E (kg/m³) | T=C+E (kg/m³) | W/T (%)         | W/C (%) |
| SA       | 2.7m | 403                | 0                   | 403           | 40              | 316     |
| SB       |      | 368                | 35                  |               |                 |         |
| SC       |      | 353                | 50                  |               |                 |         |
| SD       |      | 343                | 60                  |               |                 |         |
| SE       |      | 358                | 45                  |               |                 |         |

\* Expansive admixture : DENKA CSA #20

図 2 格子筋異形 H 形鋼を用いた供試体の種類と形状



| Specimen | Span | Expansive Concrete |                     |               | Normal Concrete |         |
|----------|------|--------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------|
| Symbol   | Span | Cement C (kg/m³)   | Admixture E (kg/m³) | T=C+E (kg/m³) | W/T (%)         | W/C (%) |
| MAE      | 4.6m | 358                | 45*                 | 403           | 40.0            | 316     |
| MBE      |      | 358                | 45*                 | 403           | 40.0            | 49.5    |

図 3 異形 H 形鋼を用いた供試体の種類と形状

表 2 コンクリートの圧縮試験結果

| Symbol | Expansive admixture (kg/m³) | $\sigma_{ck}$ (kgf/cm²) |                   |            | $E_c$ ( $\times 10^4$ kgf/cm²) |
|--------|-----------------------------|-------------------------|-------------------|------------|--------------------------------|
|        |                             | 20°C water curing       | 20°C moist curing | Air curing |                                |
| A      | 0                           | 639                     | 632               | 630        | 3.6                            |
| B      | 35                          | 590                     | 570               | 631        | 3.6                            |
| C      | 50                          | 367                     | 540               | 616        | 3.5                            |
| D      | 60                          | 99                      | 342               | 573        | 3.5                            |
| E      | 45                          | 343                     | 365               | 357        | 2.4                            |
| F      | 0                           | 259                     | 238               | 185        | 2.1                            |

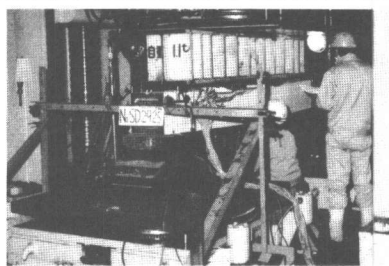


写真 1 SC ばり供試体 SD の曲げ載荷実験状況

表 3 荷重  $P_f = 1.0$  トンに対する断面の計算応力

| 供試体記号   | n  | X (cm) | $I \times 10^4$ (cm⁴) | $\sigma_c$ (Kg/cm²) | $\sigma_{tf}$ (Kg/cm²) |
|---------|----|--------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| SA ~ SE | 10 | 10.5   | $4.41 \times 10^4$    | 10.7                | 140                    |
|         | 15 | 11.4   | $5.96 \times 10^4$    | 8.6                 | 144                    |
| MAE     | 10 | 18.6   | $2.95 \times 10^5$    | 5.0                 | 72.1                   |
|         | 15 | 20.2   | $2.70 \times 10^5$    | 4.0                 | 74.1                   |

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 断面のひずみ分布に及ぼす膨張材量の影響

単位膨張材が  $60 \text{ kg/m}^3$  と最も多い供試体 SD の径間中央における荷重と実測ひずみの関係を、無添加の供試体のそれと対比させて示したものが図4である。それぞれの断面に対応したひずみを比較すると中立軸に近い上フランジを除いて、供試体 SD の値は SA のそれより小さく、膨張材添加によるケミカルプレストレスの効果が認められる。格子縞異形 H 形鋼を用いた供試体全てについて、下フランジ引張端縁およびコンクリートの圧縮縁のひずみをそれぞれ図5および図6に示し、コンクリートの引張応力を見、RC方式 ( $n=1.0$ ) で求めた下フランジの計算応力が  $1.4 \text{ kg/cm}^2$  および  $1.8 \text{ kg/cm}^2$  となる荷重 (格子縞異形 H 形鋼を用いた供試体ではそれぞれ  $1.0.0$ 、 $1.2.9$  トンとなり、異形 H 形鋼を用いた供試体ではそれぞれ  $1.3.5$ 、 $1.7.2$  トンとなる) における下フランジの実応力と単位膨張材の関係を図7に示す。

下フランジが弾性域の範囲では、添加量は  $35 \text{ kg/m}^3$  で、実応力は小さくなる傾向があり、添加量が  $45 \text{ kg/m}^3$  程度からケミカルプレストレスによる効果が顕著に表われ、単位膨張材  $50$  および  $60 \text{ kg/m}^3$  を用いたはりの下フランジ実応力は無添加のそれに比べてそれぞれ  $0.76$ 、 $0.55$  倍と小さくなることなどから、SC ばりに用いる単位膨張材量としては  $45 \sim 50 \text{ kg/m}^3$  が最適な値と判断できる。なお、 $45 \text{ kg/m}^3$  の膨張材を添加した異形 H 形鋼を用いた下フランジ実応力は格子縞異形 H 形鋼を用いたはりのそれとほぼ等しい値である。

##### 4.2 最大ひび割れ幅およびその平均間隔に及ぼす膨張材量の影響

図8に、RC方式で求めた下フランジの計算応力  $\sigma_{tf}$  と最大ひび割れ幅  $W_{cmax}$  の関係を示す。ここで  $W_{cmax}$  の値は単純曲げ区間での片側面における最も大きい2個の平均値を求め、さらにそれらの値を平均したものである。 $P_{ds}$  ( $1.0.0$  トン) と  $1.2.6$  トンにおける  $W_{cmax}$  を図9に示し、 $P_{ds}$  までに純曲げ区間に発生したひび割れ平均間隔  $S_{cr}$  を表4に示す。図8.9から  $W_{cmax}$  については単位膨張材が  $30 \text{ kg/m}^3$  以上でケミカルプレストレスの効果が明らかに観察されるが、上述の下フランジ実応力のように、その添加量に比例して小さくならないで添加量が  $50 \text{ kg/m}^3$  を越えると、 $W_{cmax}$  が増加する現象が見られる。普通コ

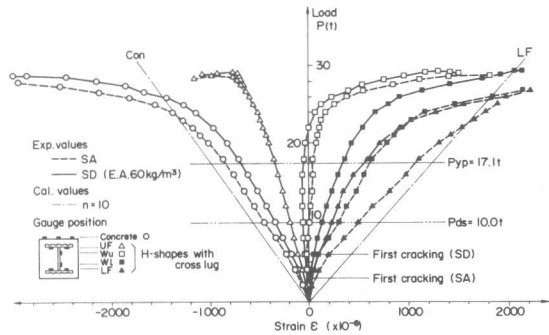


図4 供試体 SA および SD の P-ε 曲線

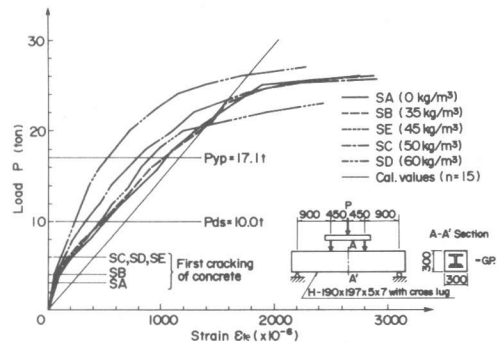


図5 径間中央の下フランジにおける P-ε<sub>fc</sub> 曲線

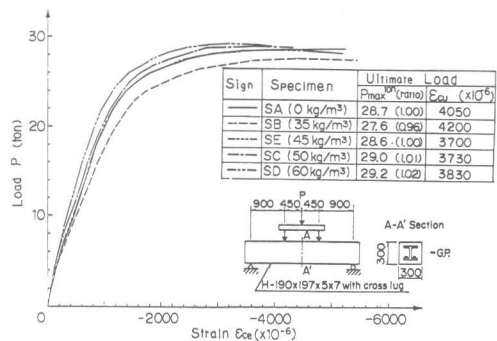


図6 径間中央の圧縮縁における P-ε<sub>cc</sub> 曲線

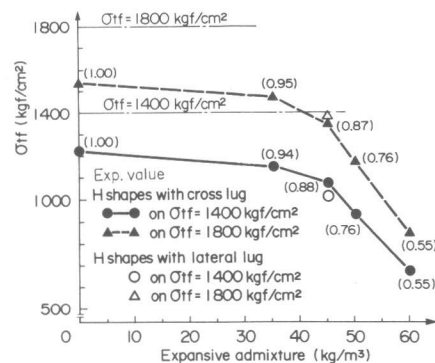


図7 下フランジの応力に及ぼす単位膨張材量の影響

ンクリートを用いたはりでは、一般的に一定区間におけるひび割れが多く発生するため相対的に $S_{cr}$ が狭くなり、 $W_{cmax}$ も小さくなるが、表4に示すように、膨張コンクリートを用いた供試体の $S_{cr}$ は、無添加の供試体のそれに比べて等しいか、あるいは大きくなる傾向があり、特に単位膨張材 $60 \text{ kg/m}^3$ の $S_{cr}$ は無添加のその約2倍である。

単位膨張材は $30 \text{ kg/m}^3$ 程度までは $W_{cmax}$ に対する効果が小さく、添加量 $40 \sim 45 \text{ kg/m}^3$ でその効果が最も良く表われ、 $W_{cmax}$ は無添加のほりに比べて $25 \sim 30\%$ 小さくなるが、それ以上に膨張材を添加しても、 $S_{cr}$ が大きくなるためか効目が少なく、無添加のそのの $75\%$ 程度に停留する傾向がある。

#### 4. 3 終局時における耐荷力および圧縮限界ひずみ

図4に示すように、まず下フランジ部が塑性域に達し、ウェブの塑性域が徐々に拡大すると同時に $\epsilon_{cu}$ が著しく増大し、純曲げ区間のコンクリートが曲げ圧縮極限ひずみ $\epsilon_{cu}$ に達して破壊に至った。 $P_f - \delta_c$ 曲線から求めたはりの最大耐荷力 $P_{max}$ および $\epsilon_{cu}$ を示した図6から、異形H形鋼を用いたSCばり<sup>2)</sup>と同じように、格子竊突起によってコンクリートの曲げ圧縮破壊が阻止され、 $\epsilon_{cu}$ は従来のH形鋼を用いたより大きくなり本実験でも $3.7 \sim 4.2 \times 10^{-4}$ が確認された。次に膨張材を添加した供試体の $P_{max}$ は無添加供試体のそのの $96 \sim 102\%$ で、供試体の製作精度や載荷実験のバラツキを考慮すれば、膨張材添加量は最大耐荷力に影響を与えないと考えられる。

#### 5. 結 言

格子竊異形H形鋼を膨張コンクリートで充填したSCばりの曲げ載荷実験によって、膨張材添加によるケミカルプレストレスが断面応力性状や最大ひび割れ幅に及ぼす力学的特性が明らかにされた。

単位膨張材が $45 \text{ kg/m}^3$ 程度からケミカルプレストレスによる効果は顕著になること、さらに膨張材を添加することによって下フランジ応力はより小さくなるが最大ひび割れ幅には効目が少ないこと、また膨張材を $60 \text{ kg/m}^3$ 用いた円柱供試体(標準養生)の圧縮強度が著しく低下することなどを総合的に判断して、適切な単位膨張材量は $45 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ と考えられる。次に、膨張材 $45 \text{ kg/m}^3$ の膨張コンクリートで異形H形鋼を充填したSCばりの曲げ破壊実験によって、格子竊異形H形鋼を用いたSCばりと同様なケミカルプレストレスによる効果が確認され、新規に開発した異形H形鋼を用いたプレハブSCばりの実用化について明るい見通しがついた。

#### 文 献

- 1) 金光ほか：大型SRC設計要領、同解説(案)、本四技報、 $\text{A}13$ (1980)
- 2) 佐藤ほか：異形H形鋼を用いたSCばりの終局耐力および疲労特性、第27回構造工学シンポジウム(1981)
- 3) 佐藤ほか：条溝付H形鋼を用いたSC部材の構造特性とその応用、川崎製鉄技報 $\text{A}12$ 、 $\text{A}4$ (1980)

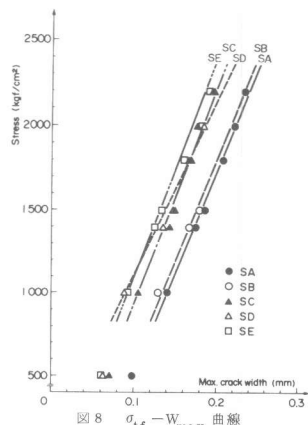


図8  $\sigma_{tf} - W_{max}$  曲線

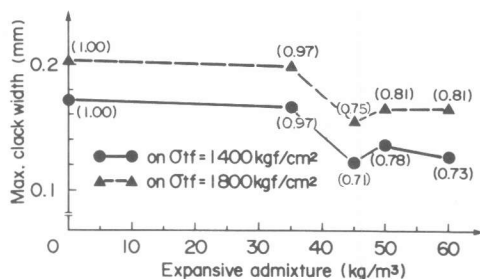


図9  $W_{max}$  に及ぼす単位膨張材量の効果

表4  $P = 1.0.0$  におけるひび割れの平均間隔

| Symbol of Specimen | Expansive admixture (kg/m³) | Side | Number of crack | Measured length L (cm) | Average crack interval $S_{cr}$ (cm) | Average | Ratio |
|--------------------|-----------------------------|------|-----------------|------------------------|--------------------------------------|---------|-------|
| SA                 | 0                           | A    | 6               | 80                     | 16.0                                 | 16.0    | 1.00  |
|                    |                             | B    | 6               | 80                     | 16.0                                 |         |       |
| SB                 | 30                          | A    | 8               | 85                     | 12.1                                 | 12.7    | 0.79  |
|                    |                             | B    | 7               | 80                     | 13.3                                 |         |       |
| SE                 | 45                          | A    | 5               | 70                     | 17.5                                 | 17.3    | 1.08  |
|                    |                             | B    | 6               | 85                     | 17.0                                 |         |       |
| SC                 | 50                          | A    | 6               | 85                     | 17.0                                 | 15.1    | 0.98  |
|                    |                             | B    | 7               | 85                     | 14.2                                 |         |       |
| SD                 | 60                          | A    | 4               | 100                    | 33.3                                 | 33.3    | 2.08  |
|                    |                             | B    | 4               | 100                    | 33.3                                 |         |       |