

V-31

PC鋼管合成梁の曲げ性状に関する実験的研究

ドーピー建設工業(株) 正員 大平 雅司  
 ドーピー建設工業(株) 倉持 春夫  
 ドーピー建設工業(株) 河野 勝  
 (株) パーズ・アイ 兔沢 民也

1. はじめに

橋梁を施工する場合、現場の施工条件や工期および周辺環境への調和等に応じて種々の橋梁形式が採用されている。なかでも、市街地において、道路、鉄道および河川等を横過する場合や、既設構造物と周辺地盤高との取り合いによって、桁高制限や架設方法の厳しい制約を受けることがあり、それに対応できる構造および工法が求められる。ところで、コンクリート充填鋼管部材のコンクリートに軸方向の圧縮力を作用させると、鋼管の拘束効果により、高じん性、高耐力を有する部材<sup>1)</sup>が得られ、部材の断面を小さくすることができる。このことを利用して、著者らは、PC角形鋼管合成部材を橋梁上部工の曲げ部材として適用することを想定した。

本研究では、コンクリート充填角形鋼管合成部材に軸圧縮力を作用させた時の、鋼管の拘束効果による三軸圧縮コンクリートの応力-ひずみ関係について検討するとともに、充填コンクリートにプレストレスを与えた角形鋼管合成部材を曲げ部材として利用する場合の力学的特性について考察した。即ち、下記(1)および(2)についての基礎的な資料を得ることを目的とする。

- 1) 角形鋼管コンクリート供試体の軸方向圧縮試験について  
拘束されたコンクリートの強度とひずみ能力。
- 2) 角形鋼管コンクリート供試体の曲げ試験について  
プレストレスを導入した場合の曲げ耐力の検討。

2. 角形鋼管コンクリート供試体の軸方向圧縮試験について

2.1 実験の概要

実験に用いた供試体の形状、ゲージの配置位置と種類およびゲージの個数を図-1に示す。また、使用した材料および材料の特性値は、表-1に示す通りである。その他、支圧板および鋼管とコンクリートを付着させないための分離材として、二硫化モリブデン入りのグリースを鋼管内面と支圧板に塗布し、ポリエステルを被覆した直径32mmのアンボンドPC鋼棒を断面内に2本配置した。荷重の荷重は、支圧板を介して軸方向にコンクリートだけに荷重させた。荷重は、5tfずつ増加させて、荷重可能な状態(支圧板が鋼管内に完全に押し込まれた状態)まで荷重を行った。変位の測定には、ダイヤルゲージを用いた。

尚、軸方向圧縮試験では、PC鋼棒を配置したがプレストレスは導入していない。

表-1 材料の特性値

供試体 記号	長さ (mm)	鋼管肉厚 (mm)	コンクリートの 強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	コンクリートの弾 性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼管の弾性係 数(kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼管の降伏点応 力度(kgf/cm <sup>2</sup> )
AP3	300	5.75	401	$2.84 \times 10^5$	$1.99 \times 10^6$	3900

2.2 解析の概要

本供試体のような拘束コンクリートについての応力-ひずみ曲線に関しては、種々の提案があるが、ここ  
 Experimental Study on Flexural Behavior of Prestressed Concrete Filled in Steel Pipe  
 by Masaji OHIRA, Haruo KURAMOCCHI, Masaru KONO and Tamiya TOZAWA

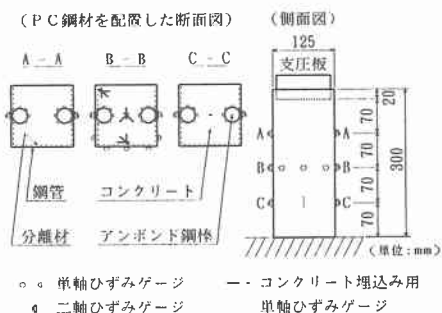


図-1 軸方向圧縮試験用供試体

では、CEB-FIP MODEL CODE 1990 の式(1)～(4)<sup>12)</sup>を適用し、角形鋼管の隅角部によって拘束されるコンクリートの有効面積を考慮することにより強度とひずみを求め、二次放物線と直線とから成る応力-ひずみ曲線(図-3の点線で示す)を仮定した。

$$f_{ck,cf} = f_{ck}(1.000 + 5.00\sigma_2/f_{ck}) \quad \text{for } \sigma_2 \leq 0.05f_{ck} \quad (1)$$

$$f_{ck,cf} = f_{ck}(1.125 + 2.50\sigma_2/f_{ck}) \quad \text{for } \sigma_2 > 0.05f_{ck} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc,cf} = 2.0 \cdot 10^{-3} (f_{ck,cf}/f_{ck})^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cu,cf} = 3.5 \cdot 10^{-3} + 0.2\sigma_2/f_{ck} \quad (4)$$

但し、 $f_{ck,cf}$ : 拘束コンクリートの圧縮強度

$f_{ck}$ : 角柱コンクリート供試体圧縮強度 (表-1に示す  $401 \text{ kgf/cm}^2$  を使用)

$\varepsilon_{cc,cf}$ : 拘束コンクリートの最大圧縮応力度に対するひずみ

$\varepsilon_{cu,cf}$ : 拘束コンクリートの終局ひずみ

$\sigma_2$ : 拘束による側圧、 $\sigma_2/f_{ck} = 0.5\alpha\omega_{wd}$

$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$ : スターラップ及びそれらと結合された縦方向筋等による拘束効果

$\alpha_n$ : 拘束されるコンクリートの断面方向の有効面積を表す低減係数  $\alpha_n = 1 - 8/(3n)$

$n$ : 縦方向筋の総数

$\alpha_s$ : 拘束されるコンクリートの縦方向の有効面積を表す低減係数  $\alpha_s = (1 - S/(2b_0))^2$

$S$ : スターラップ等の縦方向の間隔 ( $S = 0 \text{ mm}$ )

$b_0$ : スターラップ等の横方向幅 ( $b_0 = 125 \text{ mm}$ )

$\omega_{wd} = 4b_0 \cdot A_s \cdot f_{sy} / (b_0^2 \cdot S' \cdot f_{ck})$ : 拘束鉄筋(鋼管)の降伏引張耐力によるコンクリートの平均拘束応力比

$f_{sy}$ : 鉄筋(鋼管)の降伏点応力度

$S'$ : スターラップ等では、 $S$ と同じ(鋼管の場合は、縦方向の単位幅)

$A_s$ : スターラップ等の断面積(鋼管の場合は、縦方向の単位幅あたりの断面積)

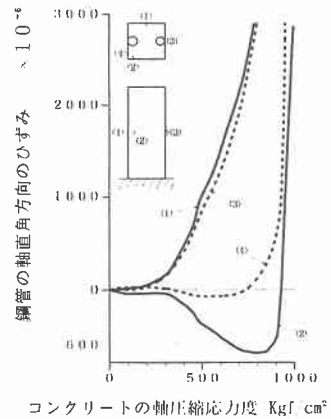


図-2 鋼管のひずみ

### 2.3 実験と解析の結果

鋼管の軸直角方向におけるひずみと、コンクリートの軸圧縮応力度との関係を、図-2に示す。水平断面内では、コンクリートの膨張に伴い、コンクリートに作用する横拘束が辺と隅角部において様でなくなり、鋼管の各辺の中央部が、最初、曲げによって降伏し、辺の部分の拘束効果が低下するが、終局状態までには至らない。続いて、鋼管の隅角部に側圧が集中し、引張力で隅角部が降伏する。このように、角形鋼管の隅角部に側圧が集中することによって、最終的に拘束効果が最大となることから、CEB-FIPの式を適用するにあたって、隅角部のみに縦方向筋の配置を仮定( $n=4$ )した。このように拘束されたコンクリートの有効面積を考慮して得られた値(図-3の点線①で示す)は、拘束しない時の圧縮強度  $401 \text{ kgf/cm}^2$  に対して  $2.06$  倍の強度となった。

また、実測値(図-3の実線で示す)より、必ずしも点線①で示した理論値と一致はしないが、曲線の形状から、Post Peak 性状も理論値と同様な傾向を示していると考えられる。

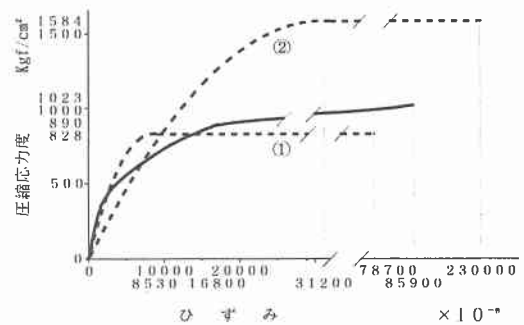


図-3 コンクリートの応力-ひずみ曲線

尚、図の点線②で示したグラフは、CEB-FIPの式を用いて、コンクリート全断面を拘束されたコンクリートの有効面積と見なして( $n = \infty$ )得られた値である。

### 3. 角形鋼管コンクリート供試体の曲げ試験について

#### 3.1 実験の概要

実験に用いた供試体の形状、およびゲージの配置位置と種類は、図-4に示し、使用した材料および材料の特性値は、表-2に示す。

その他、支圧板および鋼管とコンクリートを付着させないための分離材として、二硫化モリブデン入りのグリース

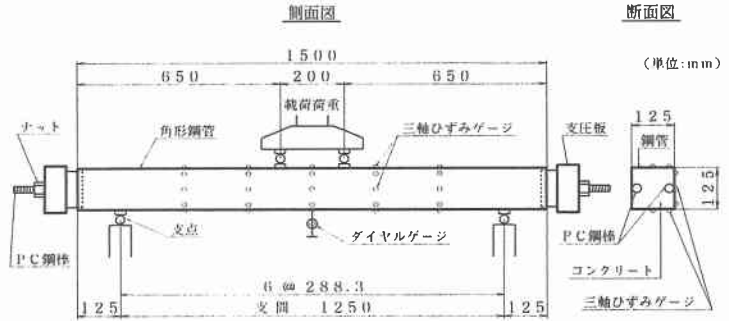


図-4 曲げ試験用供試体

表-2 材料の特性値

供試体 記号	長さ (mm)	鋼管肉厚 (mm)	コンクリートの 強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	コンクリートの弾 性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼管の弾性係 数(kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼管の降伏点応 力度(kgf/cm <sup>2</sup> )
BP3	1500	5.75	690	$3.50 \times 10^5$	$1.99 \times 10^{10}$	3900

を鋼管内面と支圧板に塗布し、ポリエステルを被覆した直径3.2mmのアンボンドP.C鋼棒を断面内に2本配置した。支圧板は、P.C鋼棒を緊張後にナットを用いて定着を行った。

ところで、P.C鋼棒による導入緊張力を求めるに当たって、図-2に示された、コンクリートの軸圧縮応力度と鋼管の軸直角方向ひずみの関係図を利用して、鋼管の辺の中央部が降伏する時のひずみの1/2のひずみになるように、コンクリートだけにプレストレスを与え、初期導入緊張力を $P_0 = 59 \text{ t f}$ に設定した。曲げ荷重は、支間中央部に二点集中荷重で載荷し、載荷荷重の増分は、 $0.2 \text{ t f}$ とした。たわみの測定は、ダイヤルゲージを用い、鋼管のひずみの測定は、鋼管の外面に三軸のひずみゲージを貼り付けて行った。測定点は、図-4に示すように、いずれも支間の1/6等分点とした。

#### 3.2 解析の概要

鋼管とコンクリート、コンクリートとP.C鋼棒は、それぞれ付着していない。したがって、部材断面の曲げ耐力を算定する際に、コンクリートの応力-ひずみ曲線は、一般に、非線形の仮定がなされ、断面方向のひずみに対しては、平面保持の仮定とは異なった変形の適合条件が用いられなければならない。

ところで、曲げ試験に用いたコンクリートは、プレストレスが導入され、さらに鋼管によって拘束されている。このようなコンクリートも軸方向圧縮試験に用いた供試体と同様に、強度とひずみの増加が見込まれる。そこで、図-5に示す様に、拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線を軸方向圧縮試験の場合と同様にCEB-FIPの式を利用して、二次放物線と直線とから成る応力-ひずみ曲線を仮定した。点線①は、図-3の場合と同様に $n = 4$ と仮定し、拘束効果を低減した値であり、点線②は、 $n = \infty$ とした時の値、③の一点鎖線は、コンクリートが拘束されていない場合の値である。

また、曲げ耐力の検討を行うに当たっては、P.C(アンボンドP.C)と鋼管を重ね梁とみなし、P.Cと鋼管の各検討断面位置での曲率を一致させることにより、P.Cと鋼管のそれぞれが分担する荷重と変位の関係を求める。

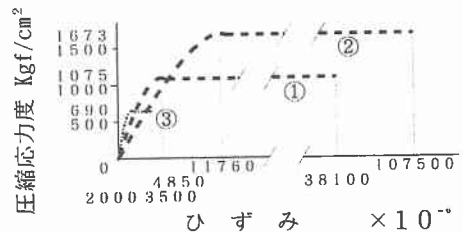


図-5 コンクリートの応力-ひずみ曲線 (曲げ試験用)

### 3.3 実験と解析の結果

図-6は、支間中央位置での荷重と変位の関係を示している。実線は、曲げ試験用供試体の実測値である。(1)の点線は、 $n=4$ と仮定した場合の値であり、(3)の一点鎖線は、(1)の場合について鋼管が分担する分である。(2)の点線は、 $n=\infty$ と仮定した場合の値である。

これによれば、実測値で最大と思われる曲げ荷重 $W=27.2\text{ tf}$ の時の終局曲げモーメントは、 $7.14\text{ tf}\cdot\text{m}$ である。計算値(1)による最大荷重時の鋼管とPCが分担する曲げモーメントはそれぞれ、 $4.19\text{ tf}\cdot\text{m}$ と $1.97\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、合計で $6.16\text{ tf}\cdot\text{m}$ となり、実測値に対して安全側の値を示している。また、鋼管単独での全塑性モーメントを求めると、 $4.79\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、コンクリートが拘束されていない場合のPC単独での終局曲げモーメントは、 $1.09\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、合計で $5.88\text{ tf}\cdot\text{m}$ となり(1)の値を下回っている。それに対して、(2)は、実測値に近いが、常に実測値を上回り、危険側の値を示している。

以上のことから、曲げ試験の場合も、軸方向圧縮試験の場合と同様にCEB-FIPの強度とひずみの増加式を適用するにあたり、角形鋼管の隅角部によって拘束されるコンクリートの有効断面積を考慮( $n=4$ )することによって、実測値に近い安全側の値が得られた。

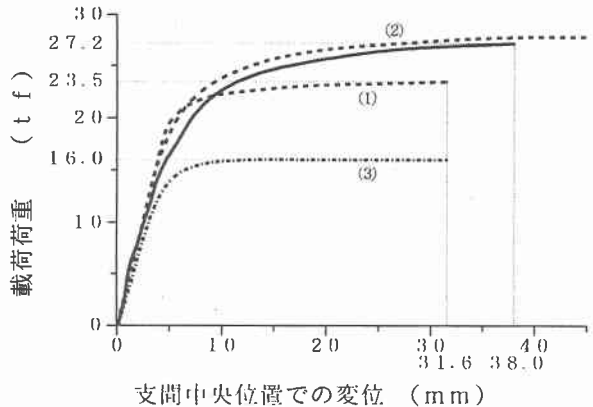


図-6 荷重-変位曲線

これによれば、実測値で最大と思われる曲げ荷重 $W=27.2\text{ tf}$ の時の終局曲げモーメントは、 $7.14\text{ tf}\cdot\text{m}$ である。計算値(1)による最大荷重時の鋼管とPCが分担する曲げモーメントはそれぞれ、 $4.19\text{ tf}\cdot\text{m}$ と $1.97\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、合計で $6.16\text{ tf}\cdot\text{m}$ となり、実測値に対して安全側の値を示している。また、鋼管単独での全塑性モーメントを求めると、 $4.79\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、コンクリートが拘束されていない場合のPC単独での終局曲げモーメントは、 $1.09\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、合計で $5.88\text{ tf}\cdot\text{m}$ となり(1)の値を下回っている。それに対して、(2)は、実測値に近いが、常に実測値を上回り、危険側の値を示している。

以上のことから、曲げ試験の場合も、軸方向圧縮試験の場合と同様にCEB-FIPの強度とひずみの増加式を適用するにあたり、角形鋼管の隅角部によって拘束されるコンクリートの有効断面積を考慮( $n=4$ )することによって、実測値に近い安全側の値が得られた。

## 4. まとめ

### 4.1 角形鋼管コンクリート供試体の軸方向圧縮試験について

(1) コンクリートの軸圧縮応力度の増加と共に、鋼管の辺と隅角部では、拘束効果が一様でなくなり、鋼管の各辺が、最初、曲げによって降伏し、続いて、隅角部に側圧が集中し、引張力で隅角部が降伏することにより、最終的な耐力が得られた。

(2) コンクリートの応力-ひずみ曲線は、CEB-FIPの強度とひずみの増加式に、角形鋼管の隅角部によって拘束されるコンクリートの有効断面積を考慮することによって、実測値に近い値を示した。

### 4.2 角形鋼管コンクリート供試体の曲げ試験について

(1) 本供試体の荷重と変位の関係では、計算値と実験値が必ずしも一致はしないが、CEB-FIPの式を適用するにあたり、角形鋼管の隅角部によって拘束されるコンクリートの有効断面積を考慮することによって、実測値に近い安全側の値が得られた。

## 6. 参考文献

- [1] 大平雅司・：アンボンド鋼棒を配置した付着のない鋼管内での拘束コンクリートの強度とひずみ、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、V-494, pp. 988-989, 1994. 6
- [2] CEB : CEB-FIP Model Code, 1990, pp. 101-107, 1993
- [3] コンクリート・ライブラリー、コンクリートの力学特性に関する調査研究報告、土木学会、No. 69, pp. 8-15, 1991. 7
- [4] コンクリート・ライブラリー、鉄筋コンクリート終局強度理論の参考、土木学会、No. 34, pp. 100-104、1972. 8