

# 論文 プレストレスト鋼管コンクリートの耐荷力試験

小林將志\*1・石橋忠良\*2・菅野貴浩\*3・三幣高吉\*4

要旨：PC鋼を線配置したコンクリート充填鋼管を梁として設計するにあたり、鋼管のフープ方向ひずみ特性を定量的に評価し、コンクリートのコンファインド効果による強度増加のメカニズムを明らかにすることを目的として実験及び解析を行った。その結果、コンクリートの引張側をを無視した断面においては鋼管が座屈するまでは平面保持則が成立すること及び、圧縮断面において拘束されているコンクリートが、CEB-FIP MODEL CODE 1990の提案しているコンファインドコンクリートの設計ダイアグラム( $\sigma - \epsilon$ )であるとして解析した結果、曲げ耐力を精度良く算出できることが確認されたのでここに報告する。

キーワード：コンファインドコンクリート、プレストレス、曲げ耐荷力試験

## 1. はじめに

円形鋼管中に充填したコンクリートに対してプレストレスを与えた場合、コンクリートは鋼管のコンファインド効果により靱性が増し、破壊に至るまでに十分な変形性能を有することが確認されている[1]。しかしながら、このような利点を十分評価して耐荷力及び変形性能を算定する設計手法が確立されていないのが現状である。

そこで本研究は、コンクリートの応力状態に寄与する鋼管厚及びプレストレス量をパラメータとした6体の試験体に対し曲げ耐荷力試験を行い、その結果より力学性状を把握することを目的とした。

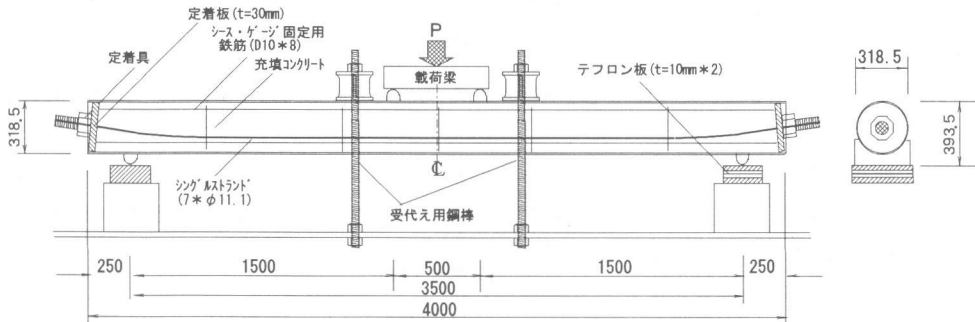


図-1 試験体概要

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体概要

代表的な試験体寸法を図-1に、試験体の一覧を表-1に示す。試験体のパラメータは鋼

\*1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所課員、工修(正会員)

\*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部担当部長、工博(正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部課員、工修(正会員)

\*4 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所課員

管の径厚比(D/t)とプレストレス量である。鋼管の材質及び径は全てSTK400、318.5mmで

表-1 曲げ試験体一覧

試験体 No.	鋼管厚 (mm)	径厚比 D/t	プレスト量 (kN)
1	6.0	53.1	321
2	6.0	53.1	639
3	7.9	40.3	311
4	7.9	40.3	632
5	10.3	30.9	311
6	10.3	30.9	638

表-2 材料の試験結果

試験体 No.	コンクリート	鋼管		
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>sy</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>su</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
1	39.9	320	470	36
2	42.2	320	470	36
3	41.2	313	461	42
4	43.8	313	461	42
5	42.8	325	477	40
6	46.1	325	477	40

PC鋼線は、f<sub>py</sub>=1666N/mm<sup>2</sup>、f<sub>pu</sub>=1873N/mm<sup>2</sup>、伸び=4.8%

ある。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの強度は表-2の結果を得た。今回の試験体は密閉されており、さらに梁軸方向に長いため、コンクリートの材料分離が生ずることなく十分な充填性を確保できるように増粘剤を用いた。また、炭酸カルシウムを配合の中に加え、強度を39.2N/mm<sup>2</sup>程度に抑えた。PC鋼材にはSEEE工法F型F100(7S11.1)のシングルストランドを用いて緊張終了後にグラウトを行った。

## 2. 2 荷重方法及び測定方法

### 試験体及び、周辺設備

の状況は、図-1に示した通りである。荷重梁に対する加力はアクチュエータにて行い、その下面と荷重梁の間に鋼棒を設置してピン構造とした。

荷重方法は静的荷重であり、鋼管下縁の降伏耐力

付近で除荷し再度荷重した。また、本試験体は靱性が高いため、荷重力を鋼棒にて受け代えることにより荷重を進めた。

測定は、荷重、鋼管のひずみ、コンクリートの断面内のひずみ、任意点の鉛直変位量について行った。ひずみの計測点は、図-2に示すとおりである。鋼管のひずみは、合計9箇所にてSTEEL 2軸歪ゲージを貼付して測定した。コンクリート断面内のひずみはコンクリート埋込み歪ゲージを4段12箇所、シース周りの1段6箇所(両側)についてはシース固定用の鉄筋上面に1軸歪ゲージを貼付する事により計測した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 破壊過程

各試験体における荷重と梁のスパン中央におけるたわみ量の関係を図-3に示す。全

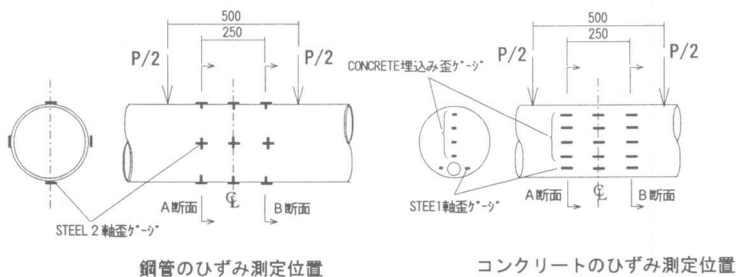


図-2 測定点位置図

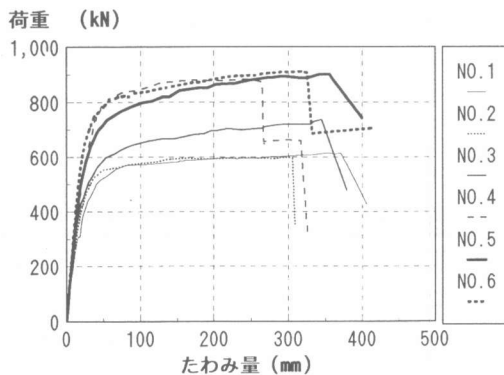


図-3 荷重-変位曲線

試験体とも荷重点付近において鋼管の座屈変形を生じるがこれによる耐力低下は確認されず、P C鋼材の破断により耐力が急激に低下した。その後も荷重を続けると、P C鋼材の分担力を差し引いた耐力を維持したまま変形が進み、変形の計測限界に至ったために試験を終了した。

試験体は、鋼管厚さが厚いことによる影響として、P C鋼材破断後の耐力低下の割合は小さいものの、変形状の差異は確認されなかった。また、プレストレス量については、耐力及び破壊性状の差異は確認されなかった。No. 4についてはP C鋼材破断後も他の試験体に比べ大きく変形させたため、荷重点下の下縁において鋼管の梁軸直角方向に割裂が生じた。

### 3. 2 ひずみ特性

ひずみ特性を明らかにするため、

図-4に示すように荷重段階を①～⑤まで仮定し、各荷重レベルのひずみを検討することとした。ここで、①は、鋼管下縁のひずみが降伏に達した時点の荷重レベル(このときのたわみ量を $\delta$ とする)であり、これを基本に②を $2\delta$ 、③を $3\delta$ と仮定した。⑤、④は、それぞれP C鋼材破断時のたわみ量( $\delta_{max}$ )とその $1/2$ の変位量の時である。この図を参考として軸方向ひずみ及びフープ方向ひずみに対して考察を加える。

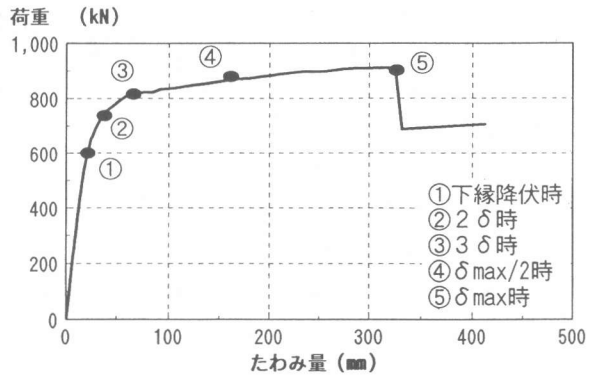


図-4 荷重レベル

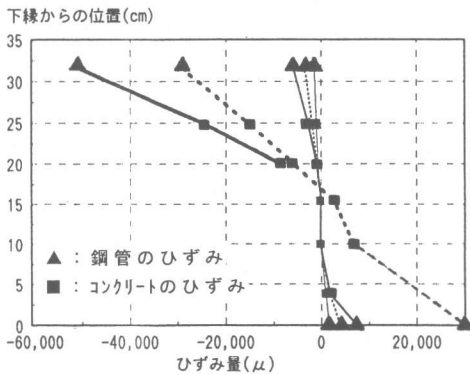


図-5 鋼管とコンクリートの軸ひずみ

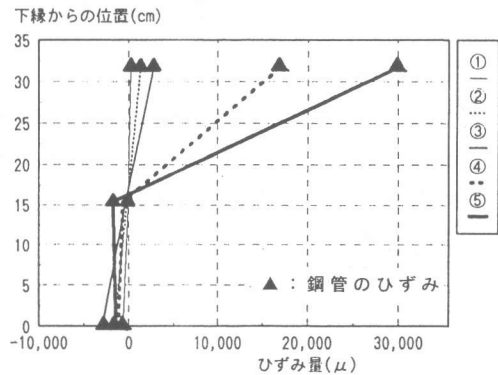


図-6 鋼管のフープ方向ひずみ

各試験体におけるひずみ特性は、同様な傾向を示したので、試験体No. 3-A断面の各荷重レベルにおけるひずみ性状を図-5、6示す。図-5は、断面の鉛直方向の位置(下縁から計測点までの距離)における鋼管上下縁及び充填コンクリートの軸方向ひずみを表す。図より、荷重レベル①～④においては、コンクリートに引張が生じる高さのひずみに、大きな増加は見られない。また、他の断面においてはひずみが急激な増加を示すなど、この領域のコンクリートのひずみが不連続な挙動を示すことが確認されたが、上下縁の鋼管のひずみとコンクリートの圧縮ひずみの増加は、直線的に分布しており、鋼管上縁に座屈が生じるまではコンクリ

ートの引張ひずみを除くひずみに平面保持則が成り立ち、鋼管とコンクリートが一体として機能していることが確認された。荷重レベル⑤においては、鋼管上縁ひずみが座屈したり、下縁のひずみが急激に増加するなどひずみの直線性が失われ、ひずみの平面保持は喪失される。

図-6は、鉛直位置の上中下縁における鋼管外縁のフープ方向ひずみを示す。鋼管のフープ方向ひずみ( $\epsilon_{st}$ )は、鋼管の上下縁及び断面中央高さの外縁において計測されたものであり、上縁では引張ひずみが生じ、下縁では圧縮ひずみが生じている。

全試験体におけるA、B断面の圧縮縁(上縁)における鋼管の軸方向ひずみ( $\epsilon_1$ )とフープ方向ひずみの関係を示したのが図-7である。この結果、 $\epsilon_1$ と $\epsilon_{st}$ が比例関係にあることが明らかとなった。

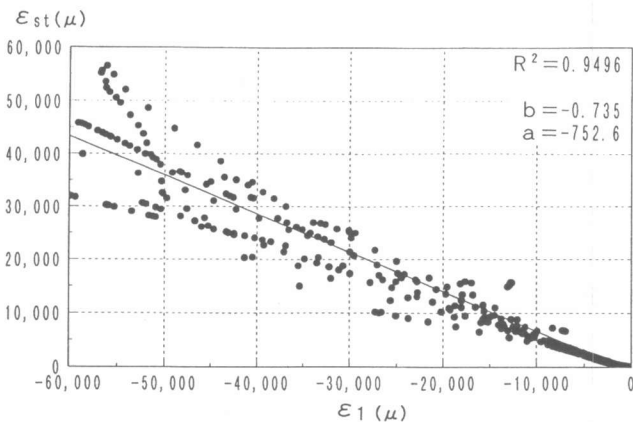


図-7 軸ひずみとフープ方向ひずみの関係

$$\epsilon_{st} = -0.735 \epsilon_1 - 7.53 \times 10^{-4} \quad (1)$$

式(1)は、実験結果より鋼管上縁におけるひずみの関係を定式化したものであり、この(1)式を用いることにより、梁が変形する際に発生する拘束力の増分を算出することとする。

### 3.3 コンクリートの構成則

鋼管により拘束されたコンクリートの構成則を導き出すために以下の仮定を行った。

- ① 曲げ部材であるがコンクリートの構成則において拘束効果を考慮する。
- ② 降伏ひずみ( $\epsilon_{cc}$ )までのコンクリートの応力-ひずみ関係は式(2)の放物線の式に従うものとする。

$$\sigma'_{c,cf} = k_c \cdot f'_{ck,cf} \cdot \epsilon'_c / \epsilon'_{cc,cf} \cdot (2 - \epsilon'_c / \epsilon'_{cc,cf}) \quad (2)$$

- ③ コンクリートは、鋼管に拘束されるため軟化域を有しないものとする

④ 拘束力を算定する鋼の軸方向ひずみとフープ方向ひずみの関係は式(1)に従うものとする  
ここで、文献[2]より、フープ方向応力 $\sigma_{st}$ は、鋼のポアソン比( $\mu_s$ )、弾性係数( $E_s$ )から式(3)のように求められる。

$$\sigma_{st} = E_s \cdot (\epsilon_{st} + \mu_s \cdot \epsilon_1) / (1 - \mu_s^2) \quad (3)$$

さらに、鋼管の内径( $D_i$ )、肉厚( $t$ )より、コンクリートに発生する側圧( $\sigma'_2$ )は、式(4)で表される。

$$\sigma'_2 = 2 t \cdot \sigma_{st} / D_i \quad (4)$$

式(4)を用いて、拘束コンクリートの軸方向圧縮強度  $f'_{ck,cf}$  をCEB-FIP MODEL CODE 1990 式(以下、CEB式) [3] とCai Shao-Huaiの理論式(以下、Cai式) [2] により算出する。

$$f'_{ck,cf} = f'_{ck} (1.125 + 2.5 \sigma'_2 / f'_{ck}) \quad (\text{CEB式})$$

$$f'_{ck,cf} = f'_{ck} (1.0 + 1.5 (\sigma'_2 / f'_{ck})^{1/2} + 2.0 \sigma'_2 / f'_{ck}) \quad (\text{Cai式})$$

また、降伏ひずみ  $\epsilon'_{cc,cf}$ 、終局ひずみ  $\epsilon'_{cu,cf}$  は、以下のCEB式を用いる。

$$\epsilon'_{cc,cf} = 2.0 \times 10^{-3} (f'_{ck,cf} / f'_{ck})^2 \quad (5)$$

$$\epsilon'_{cu,cf} = 3.5 \times 10^{-3} + 0.2 \sigma'_2 / f'_{ck} \quad (6)$$

上記の式より、拘束コンクリートの構成則が導き出される。

### 3. 4 M-φ 曲線

抵抗モーメントの算定にあたっては、鋼管が座屈するまではひずみの平面保持則が成り立

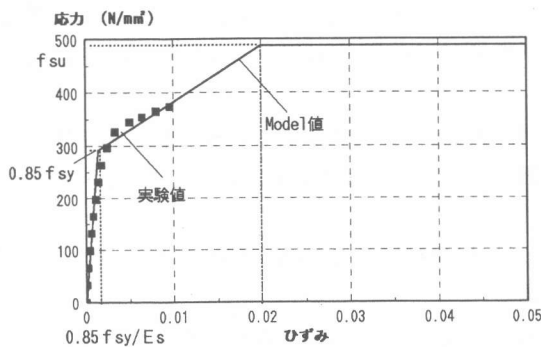


図-8 鋼管の応力ひずみモデル

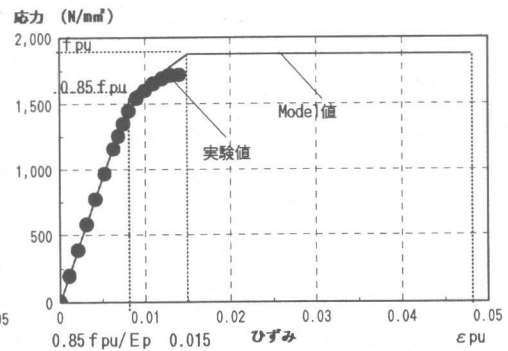


図-9 PC鋼線の応力ひずみモデル

つこと、引張り側コンクリートの耐力を無視すること及び、内力の釣合条件が成り立つものとして算出した。鋼管及びPC鋼線の応力-ひずみ関係は、試験体を用いた鋼材の試験片をJISに規定されている性能試験の結果を考慮して図-8、9のようにモデル化した。図-10は、試験体No. 1、5の実験結果と、コンクリートの構成則において圧縮強度をCEB式を用いた場合、Cai式を用いた場合、土木学会式に準じた場合(標準式)の3パターンを比較したものである。実験値と解析値を比較すると、試験体No. 1は、CEB式を用いるこ

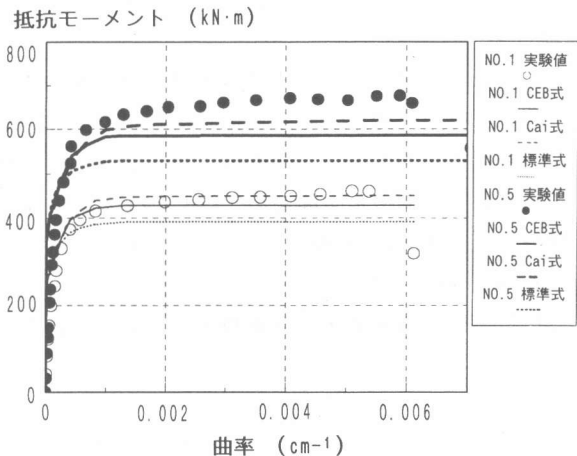


図-10 M-φ 曲線(構成則比較)

とにより解析できることがわかり、No. 5ではCai式よりもさらに高い抵抗モーメントを有することが確認された。拘束効果を考慮しない標準式により解析された値は、No. 1、5ともに1割以上実験値を下回る結果を示した。

図-11は、全試験体の実験結果とCEB式を用いて算出された計算結果をM- $\phi$ 曲線により比較したものである。これより、CEB式を拘束コンクリートの構成則に適用した場合、径厚比が50程度の試験体(NO. 1、2)においては、実験値と計算値の整合性が良いことが確認された。

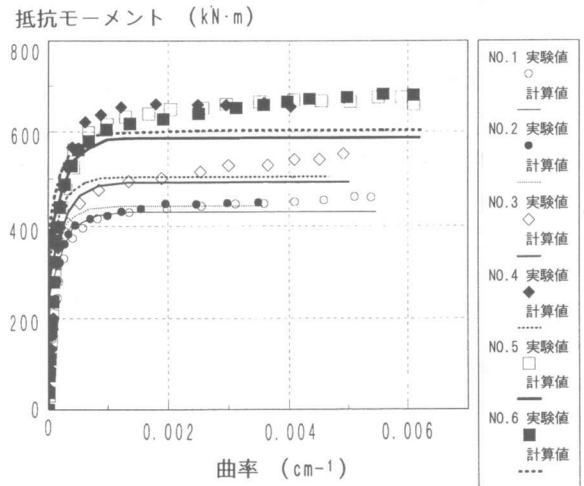


図-11 M- $\phi$ 曲線

#### 4. まとめ

- (1) 鋼管内面にはリブ等を設置しなかったが、鋼とコンクリートは合成材として抵抗し、鋼管が座屈するまではコンクリートの引張側を無視した断面において平面保持が成り立つことが分った。
- (2) 圧縮縁(上縁)における鋼管のひずみ特性は、軸方向とフープ方向で任意の値により比例則が成り立ち、これを拘束力に反映させ、抵抗モーメントを算定することにより、解析の精度が確保されることを確認した。
- (3) 圧縮側コンクリートのコンクリートの構成則は、CEB-FIP MODEL CODE 1990式を用いることにより最大耐力を算定できることを確認した。
- (4) 管厚の厚い鋼管内のコンクリートの構成則は、Cai式よりも大きな耐力を有しており、この構成則をモデル化できるような算定式を検討する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 前川幸次・梶川康男・吉田博：PC鋼管で補強されたコンクリート充填鋼管はりの曲げ耐荷力に関する研究、構造工学論文集、Vol. 39A、1993. 3
- [2] 北田俊行・吉田康樹・中井博：コンクリートを充填した鋼管短柱の弾塑性挙動に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol. 34A、1988. 3
- [3] CEB-FIP MODEL CODE 1990 First Draft Chapter 3.7, Comite Euro-International du Beton, 1988.
- [4] 田辺忠顕・檜貝勇・梅原秀哲・二羽淳一郎著：コンクリート構造、朝倉書店、1992