

論文 PC 鋼管合成部材の力学的特性に関する一考察

大平 雅司*¹・倉持 春夫*²・河野 勝*³・兎沢 民也*⁴

要旨 : 角形鋼管に充填されたコンクリートが三軸圧縮状態にある時、円形鋼管の場合とは異なり、コンクリートは、鋼管隅角部によって拘束される。このようなコンクリートの応力-ひずみ曲線は、CEB-FIP MODEL CODE 1990 の拘束コンクリートの強度と終局ひずみの増加式を適用し、拘束されるコンクリートの有効面積を考慮して求めることにより実測値と近似した。また、充填コンクリートにプレストレスを与えた鋼管合成部材の曲げ荷重とたわみの関係も、コンクリートの有効面積を考慮することにより、計算値は、実測値に近い値を示すことが確認できた。

キーワード : 角形鋼管, 拘束効果, 応力-ひずみ曲線, プレストレス, 曲げ部材

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[1] が得られ、部材の断面を小さくすることが可能となる。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 a) および b) についての基礎的な資料を得ることを目的とする。

a) 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。

b) 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. 軸方向圧縮試験について

2.1 実験の概要

実験では、鋼管の肉厚が異なる三種類の供試体 (AP1、AP2 および AP3 の記号で表す) を用いた。形状およびゲージの配置位置と種類を図-1 に示す。また、使用した材料および材

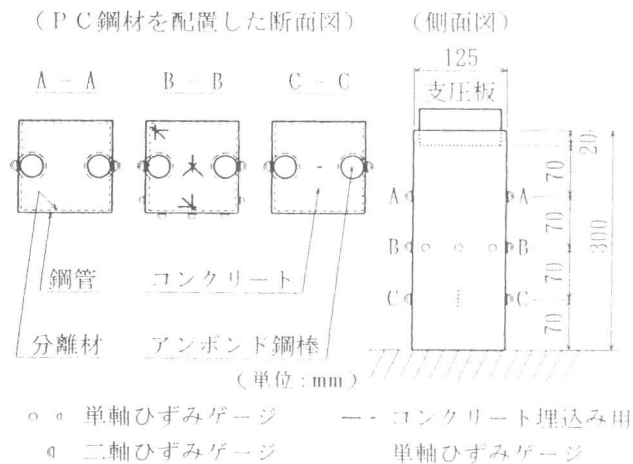


図-1 軸方向圧縮試験用供試体

*1 ドービー建設工業(株) 北海道本店 (正会員)

*3 ドービー建設工業(株) 本社技術部

*2 ドービー建設工業(株) 本社技術部 (正会員)

*4 (株) バーズ・アイ 本社企画部

料の特性値は、表-1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。荷重の載荷は、支圧板を介して軸方向にコンクリートだけに載荷させた。荷重は、49kNずつ増加させて、載荷可能な状態（支圧板が鋼管内に完全に押し込まれた状態）まで載荷を行った。変位の測定には、ダイヤルゲージを用いた。

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(MPa) | コンクリ ートの弾性係 数(GPa) | 鋼管の 弾性係 数(GPa) | 鋼管の降 伏点応力 度(MPa) |
|-----------|------------|------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
| AP1 | 300 | 3.09 | 39.3 | 27.9 | 201 | 265 |
| AP2 | 300 | 4.38 | 39.3 | 27.9 | 202 | 402 |
| AP3 | 300 | 5.75 | 39.3 | 27.9 | 195 | 382 |

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。

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[2]、[3]、[4]があるが、ここでは、CEB-FIP MODEL CODE 1990の式(1)~(4)を適用し、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。

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

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

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

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

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39.3MPaを使用）

$\epsilon_{cc,cf}$ ：拘束コンクリートの最大圧縮応力度に対するひずみ、 σ_2 ：拘束による側圧

$\epsilon_{cu,cf}$ ：拘束コンクリートの終局ひずみ、 $\sigma_2/f_{ck} = 0.5\alpha\omega_{wd}$

$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$ ：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

α_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 ：スターラップで拘束されている縦方向筋の総数

α_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（ $S = 0$ mm）

b_0 ：スターラップ等の横方向幅（ $b_0 = 125$ 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）

尚、上式中の α_n は、スターラップで拘束される場合についての係数であるが、角形鋼管合成部材に適用するにあたり、 n のとり方については、以下で検討を行う。

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、図-3および図-4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一様でなくなり、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、角形鋼管によって有効に拘束が働く部分が隅角部であり、隅角部の数が4であることから、CEB-FIPの式を適用するにあたって、拘束度に関する係数 n を4とした。よって、拘束されたコンクリートの有効面積を考慮すること

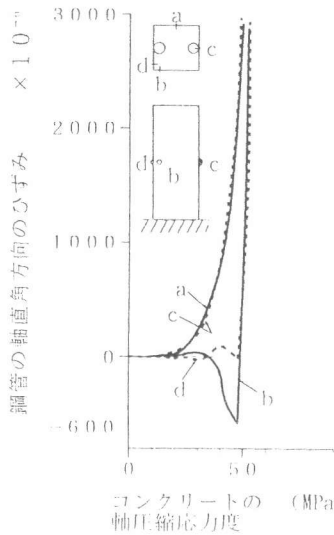


図-2 鋼管のひずみ (AP1)

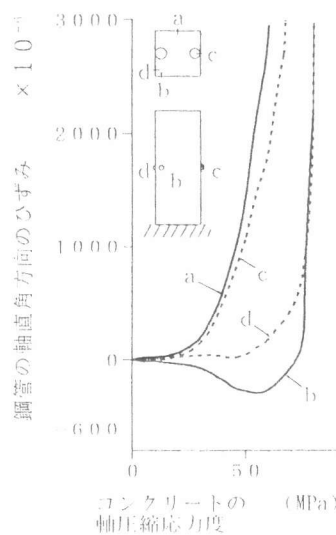


図-3 鋼管のひずみ (AP2)

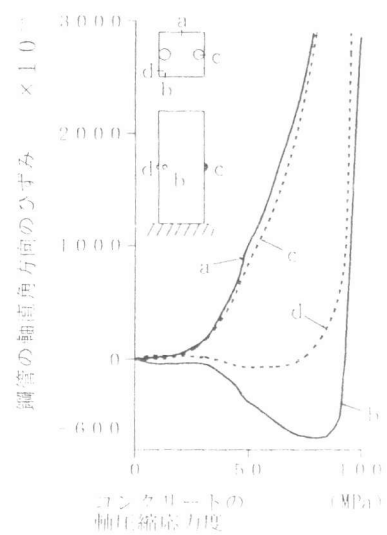


図-4 鋼管のひずみ (AP3)

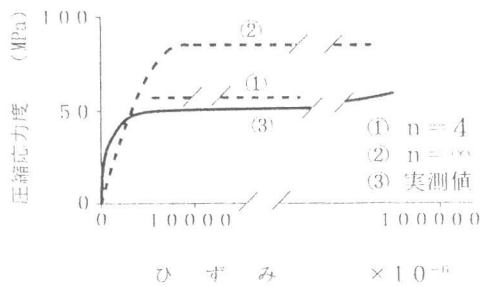


図-5 コンクリートの応力-ひずみ曲線 (AP1)

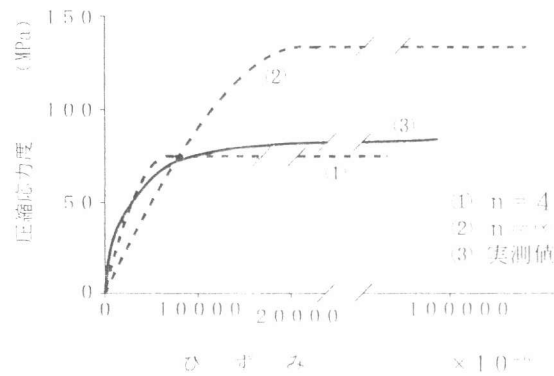


図-6 コンクリートの応力-ひずみ曲線 (AP2)

によって得られたコンクリートの応力-ひずみ曲線の値 (図-5、図-6および図-7の点線①で示す) は、拘束しない時の圧縮強度 39.3 MPa に対して AP1 で 1.45 倍、AP2 で 1.86 倍および AP3 で 2.06 倍の強度となった。また、実測値 (図-5、図-6および図-7の実線で示す) は、支圧板が鋼管内に完全に押し込まれた状態で終了させた値であるが、測定した範囲内では、点線①で示した計算値に近い値を示していると考えられる。

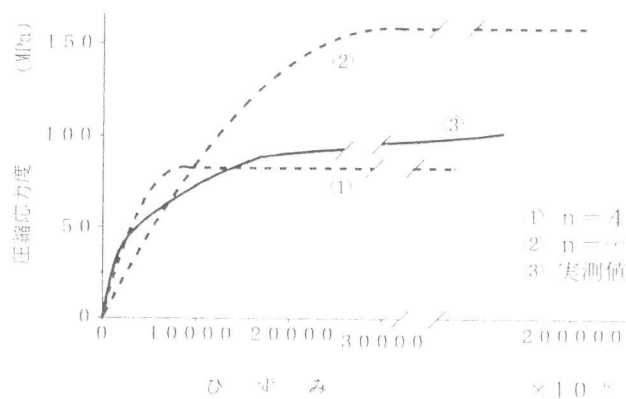


図-7 コンクリートの応力-ひずみ曲線 (AP3)

尚、縦軸の圧縮応力度は、荷重をコンクリートの断面積で除した値を示した。ひずみは、約 15000×10^{-6} までを供試体端部の影響が及ばない中央部の埋込みゲージにより測定し、それを超えるひずみは、ダイヤルゲージによって測定した。その他、点線②で示したグラフは、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. 曲げ試験について

3.1 実験の概要

実験では、鋼管の肉厚が異なる三種類の供試体 (BP1、BP2 および BP3 の記号で表す) を用いた。形状およびゲージの配置位置と種類を図-8 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 32 mm のアンボンド PC 鋼棒を断面内に 2 本配置した。支圧板は、PC 鋼棒を緊張

後にナットを用いて定着を行った。ところで、PC 鋼棒による導入緊張力を求めるにあたって、BP2 の場合は、図-3 に示した鋼管のひずみの図を利用して、鋼管の辺の中央部が最初に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 $P_0 = 608 \text{ kN}$ に設定した。

また、BP1 と BP3 については、BP2 のコンクリートに与えられる緊張応力度と同じ値になるように、緊張力をそれぞれ 634 kN と 579 kN 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、 2 kN 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

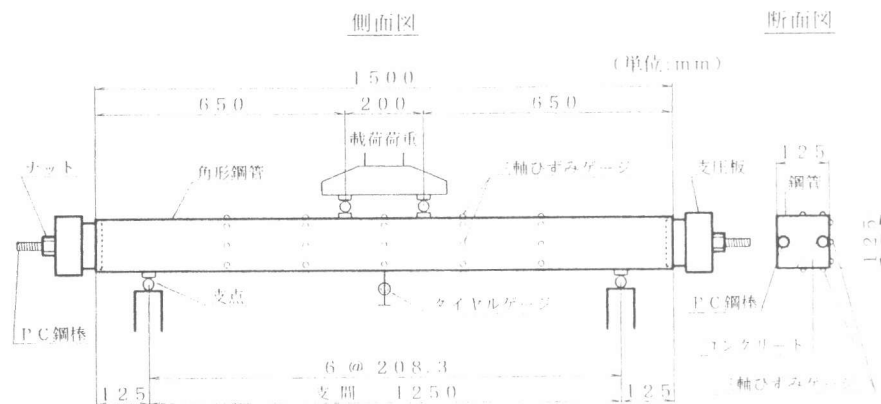


図-8 曲げ試験用供試体

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(MPa) | コンクリ ートの弾性係 数(GPa) | 鋼管の 弾性係 数(GPa) | 鋼管の降 伏点応力 度(MPa) |
|-----------|------------|------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|
| BP1 | 1500 | 3.09 | 67.7 | 34.3 | 201 | 265 |
| BP2 | 1500 | 4.38 | 67.7 | 34.3 | 202 | 402 |
| BP3 | 1500 | 5.75 | 67.7 | 34.3 | 195 | 382 |

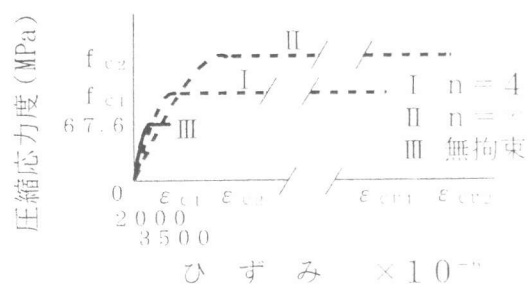


図-9 コンクリートの応力-ひずみ曲線

表-3 拘束コンクリートの圧縮応力度とひずみ

| 供試体 記号 | ① $n = 4$ の場合 | | | ② $n = \infty$ の場合 | | |
|-----------|-------------------|---|--|--------------------|---|--|
| | f_{c1} (MPa) | ϵ_{c1} ($\times 10^{-6}$) | ϵ_{cv1} ($\times 10^{-6}$) | f_{c2} (MPa) | ϵ_{c2} ($\times 10^{-6}$) | ϵ_{cv2} ($\times 10^{-6}$) |
| BP1 | 87.0 | 3310 | 16400 | 109.0 | 5180 | 42300 |
| BP2 | 96.1 | 4030 | 27100 | 136.3 | 8120 | 74700 |
| BP3 | 105.4 | 4850 | 38100 | 164.1 | 11760 | 107500 |

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-8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PC鋼棒は、それぞれ付着していない。従って、部材断面の曲げ耐力を算定する際に、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

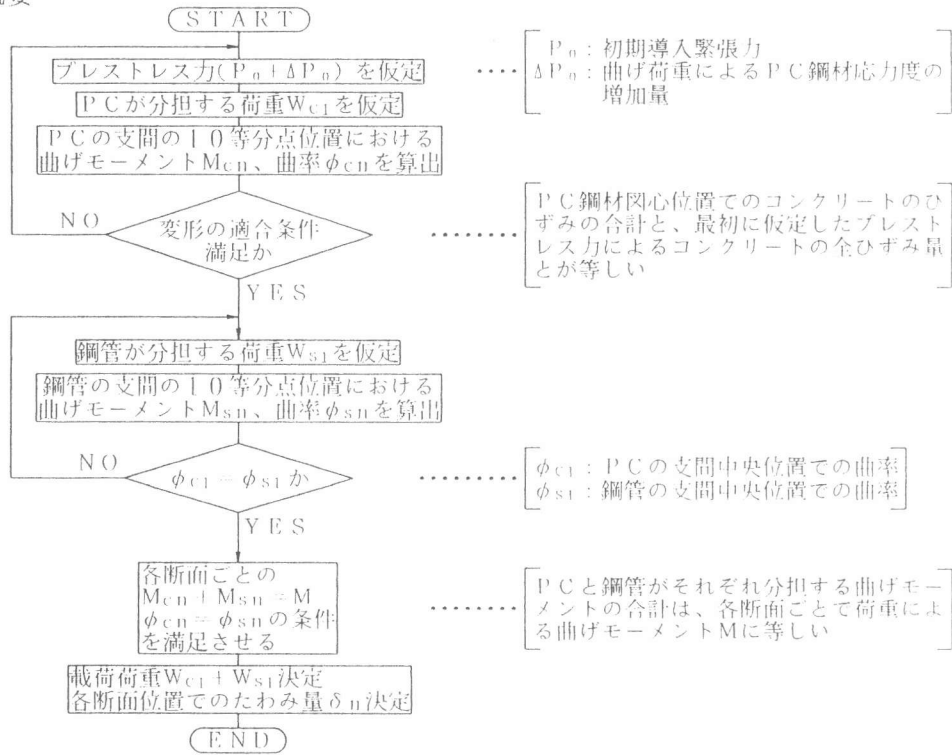


図-10 フローチャート

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-9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の式を用いて、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。各記号の値は、表-3に示す。

尚、CEB-FIPの式では、これを曲げに適用する場合は、中立軸を完全拘束面とみなすことにしている。これによれば、係数 α_n と中立軸位置とが従属関係にあるため、収束計算が必要であり、この場合 n が約5.4に収束する。この方法は、実用上計算が繁雑であるので、ここでは、軸方向圧縮試験の場合と同様に $n=4$ とした。

図-9の点線Iについては、 $n=4$ と仮定し、拘束効果を低減した値、点線IIは、 $n=\infty$ とした時の値、IIIの実線は、コンクリートが拘束されていない場合の値であり、土木学会コンクリート標準示方書を適用した。

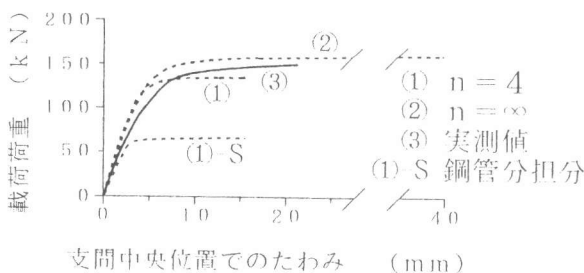


図-11 荷重-たわみ曲線 (BP1)

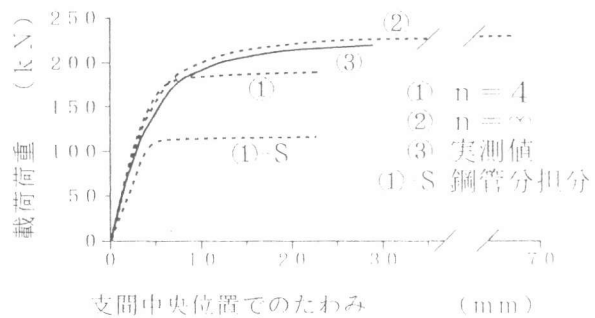


図-12 荷重-たわみ曲線 (BP2)

また、曲げ耐力の検討を行うに当たっては、PC（アンボンドPC）と鋼管を重ね梁とみなし、図-10のフローチャートに従い、PC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。

3.3 実験と解析の結果

図-11、図-12および図-13に支間中央位置での荷重とたわみの関係を示す。③の実線は、実測値を示し、①の点線は、 $n=4$ と仮定した場合の値、①-Sの点線は、①の場合について鋼管が分担する分である。また、

②の点線は、 $n=\infty$ と仮定した場合の値である。ここで実測値は、鋼管の支間中央位置での上縁が座屈したときの値を最終値とし、計算値は、コンクリート断面の上縁が終局ひずみに達した

ときを最終値とした。表-4には、実測値および各計算値での曲げモーメントの最大値を示す。これらの図および表の値を比較すると、 $n=4$ の場合は、常に実測値を下回り、かつPC単独+鋼管単独の値を上回っていることから、曲げ試験の場合も、軸方向圧縮試験の場合と同様に $n=4$ とすることによって、実測値に近い値が得られた。

4. まとめ

4.1 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の強度と終局ひずみの増加式において、 $n=4$ とすることにより角形鋼管による拘束コンクリートに適用できた。

4.2 曲げ試験について

本供試体の荷重とたわみの関係では、CEB-FIPの式を適用するにあたり、軸方向圧縮試験の場合と同様に $n=4$ とすることによって、実測値に近い値が得られた。

5. 参考文献

- [1] (社) 土木学会 : 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、1989.3
- [2] CEB : CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin D'Information No.189, No.190a, No.190b. Comite Euro-International du Beton, 1988.
- [3] CEB : Concrete Under Multiaxial States of Stress Constitutive Equations for Practical Design Bulletin D'Information No.156, Comite Euro International du Beton, 149pp., 1983.
- [4] CEB : CEB-FIP Model Code 1990, pp.101-107, 1993

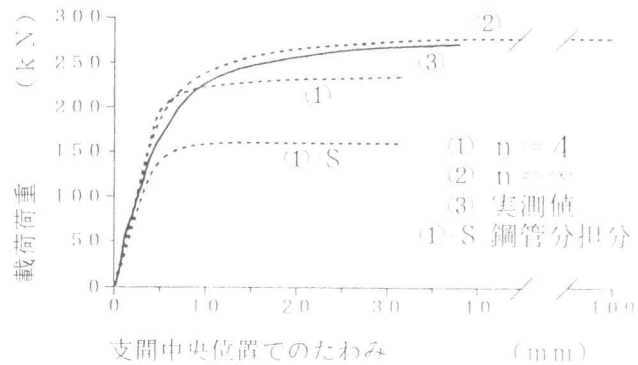


図-13 荷重-たわみ曲線 (BP3)

表-4 終局曲げモーメント (単位:kN・m)

| 供試体 記号 | $n=\infty$ の場合 | 実測値 | $n=4$ の場合 | PC単独 (無拘束) +鋼管単独 (全塑性) |
|-----------|-------------------|------|--------------|---------------------------|
| BP1 | 42.0 | 38.6 | 36.8 | 32.5 |
| BP2 | 59.6 | 56.7 | 48.6 | 44.3 |
| BP3 | 71.1 | 70.1 | 60.6 | 57.6 |