

論文

[2160] 付着のない鋼管内での三軸圧縮コンクリートの力学的特性について

大平 雅司*1, 藤田 哲雄*2, 松井 敏二*3, 蝦名 貴之*4

1. はじめに

鋼管内に打込まれたコンクリートと鋼管との付着をなくし、コンクリートだけに軸方向圧縮力を载荷させた時、鋼管は、コンクリートのポアソン比の分の変形だけを拘束し、コンクリートは、三軸圧縮状態となる[1]。円形鋼管コンクリートでは、このような三軸圧縮の研究は、すでに行われている[2][3]。また、角形鋼管コンクリートを用いた角柱の報告もなされている。

本研究では、角形鋼管コンクリートの軸方向圧縮のみでなく、曲げを受ける場合についても検討した。即ち、下記(1)および(2)の力学的特性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
軸力の増加に伴うコンクリートと鋼管の歪みの推移の実測。
- (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を、図-1に示す。使用した材料および材料の特性値は、表-1に示すとおりである。

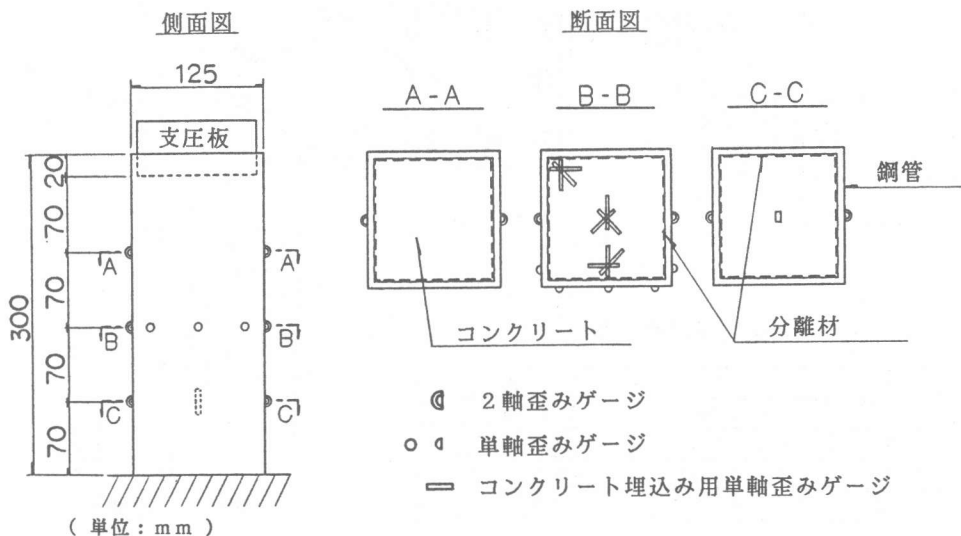


図-1 軸方向圧縮試験用供試体

- *1 ドービー建設工業(株)北海道本店設計部設計課課長 (正会員)
- *2 ドービー建設工業(株)北海道本店設計部設計課課員
- *3 ドービー建設工業(株)北海道本店設計部設計課課員
- *4 ドービー建設工業(株)北海道本店設計部設計課課員

表－１ 供試体の材料および材料の特性値

鋼管種別	長さ (mm)	肉厚 (mm)	コンクリートの 強度(Kgf/cm ²)	コンクリートの 弾性係数(Kgf/cm ²)	鋼管の弾性係数 (Kgf/cm ²)
角形鋼管	300	4.38	425	2.76×10^5	2.06×10^6

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、二硫化モリブデンを鋼管内面に塗布した。また、鋼管の降伏点応力度は、 4100 Kgf/cm^2 であった。

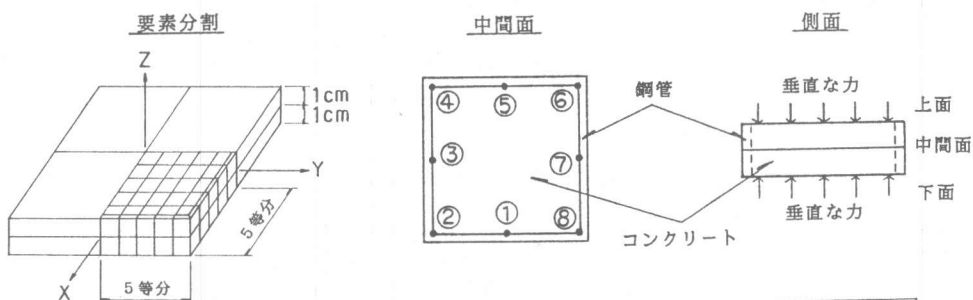
荷重の載荷は、支圧板を介して軸方向にコンクリートだけに載荷させた。荷重は、5tf ずつ増加させて、鋼管が破壊するまで載荷を行った。

コンクリートの歪みの測定には、コンクリート埋込み用単軸歪みゲージを用いた。配置位置と数は、軸方向歪みを測定するためには、コンクリートの $1/4$ の高さ位置に 1 個、軸直角方向歪みを測定するためには、コンクリートの $1/2$ の高さ位置に 9 個それぞれ配置した。鋼管の歪みの測定には、単軸と二軸の歪みゲージを鋼管外面に貼り付けて、軸方向および軸直角方向の測定を行った。ゲージの配置位置と数は、図－１に示す。

2. 2 理論値

図－２に示した中間面の①～⑧節点を鋼管とコンクリートが共有し、コンクリートの上面と下面だけに、大きさが等しく互いに向き合って、面に垂直な力を作用させる様にモデル化を行った。解析は、図－２の要素分割に示す様に、モデルの $1/4$ に着目し、三次元ソリッド要素（８節点要素）に分割して、F.E.Mによる解析を行った。

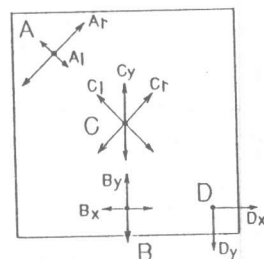
尚、コンクリートの軸直角方向断面内A、BおよびC点の位置は、図－３に示す。また、これら三点の主歪みの最大値と最小値を載荷荷重30tf の場合で算出し、表－２に示す。



図－２ モデル化図

表－２ 主歪みの値

位置	主 歪 み (引 張)	
	最大値	最小値
A	147×10^{-6}	57×10^{-6}
B	144×10^{-6}	129×10^{-6}
C	138×10^{-6}	138×10^{-6}



図－３ 断面図

2. 3 実験結果

コンクリートの軸直角方向断面内におけるA、B、CおよびD点(図－３に示す)の歪みを、載荷荷重30tf の場合について、実験値とF.E.Mによる三次元解析値とで比較した。それぞれの歪みを、表－３に示す。また、実験で得られた鋼管の軸直角方向における歪みと、コンクリートの軸圧縮応力度との関係を、図－４に示す。

表-3 軸直角方向のコンクリートの歪み

記号	実験値 (引張)	理論値 (引張)
A r	182×10^{-6}	147×10^{-6}
A l	92×10^{-6}	57×10^{-6}
B x	192×10^{-6}	129×10^{-6}
B y	339×10^{-6}	144×10^{-6}
C y	158×10^{-6}	135×10^{-6}
C r	265×10^{-6}	138×10^{-6}
C l	176×10^{-6}	138×10^{-6}
D x	97×10^{-6}	102×10^{-6}
D y	177×10^{-6}	102×10^{-6}

コンクリートの圧縮強度は、 425 Kg/cm^2 であるが、図-4に示す様に軸圧縮応力度が 650 Kg/cm^2 付近まで上昇し、鋼管による拘束の効果が明確に現れている。

一般に、コンクリートの拘束に角形鋼管を用いると、円形鋼管を用いた場合よりも水平断面内で横拘束力が一様に加わらない。本実験では、表-3に示す様に必ずしも実験値と理論値は一致しないが、図-4のコンクリートの軸圧縮応力度が 500 Kg/cm^2 付近の高応力度では、辺と隅角部で、拘束効果が一様でないことが特徴として現れている。また、鋼管の降伏は、コンクリートの膨張に対して、最初は、曲げによって抵抗する各辺の中央部に生じ、続いて、隅角部に力が集中し、最終的には、それらの位置に塑性ヒンジが形成されたことがわかる。

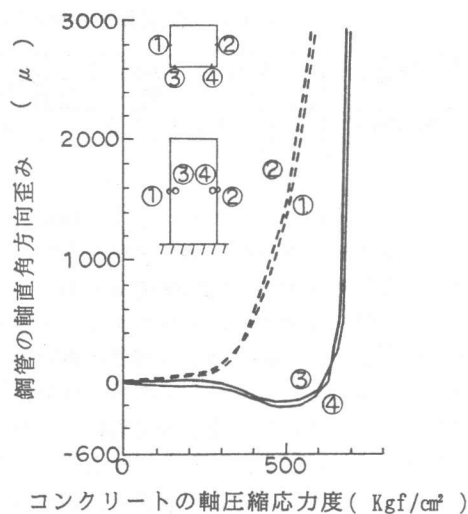


図-4 鋼管の軸直角方向歪み

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-5に示す。

供試体に使用した材料および材料の特性値は、表-4に示す。

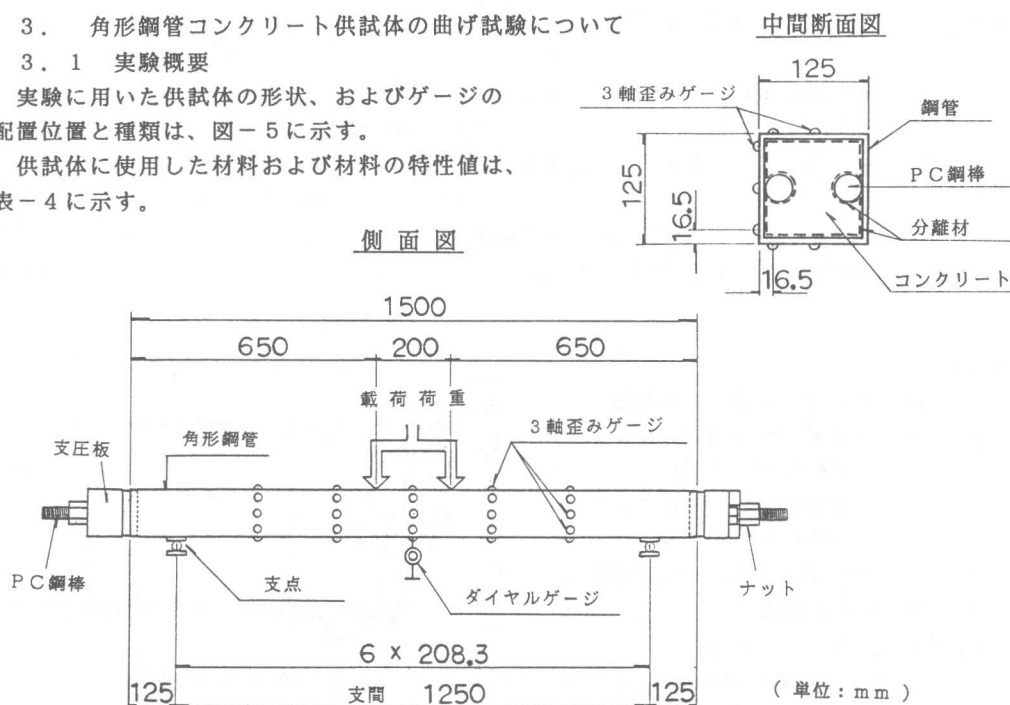


図-5 曲げ試験用供試体

表-4 供試体の材料および材料の特性値

鋼管種別	長さ (mm)	肉厚 (mm)	コンクリートの 強度 (Kgf/cm ²)	コンクリートの 弾性係数 (Kgf/cm ²)	鋼管の弾性係数 (Kgf/cm ²)
角形鋼管	1500	4.38	690	3.50×10^5	2.06×10^6

その他、支圧板、ナット、 $\phi 32$ mmのPC鋼棒および分離材を用いた。分離材は、鋼管内面だけでなくPC鋼棒の表面にも塗布して、コンクリートとの付着を防いだ。また、鋼管の降伏点応力度は、 3500 Kgf/cm^2 であった。

一方、図-4で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歪みの関係図を利用して、鋼管が最初に降伏（鋼管の各辺の中央部）する時の歪み $\varepsilon = 1700 \mu$ の $1/2$ の歪みになる様に、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 $P_0 = 57 \text{ tf}$ 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、 5 tf とした。たわみの測定は、ダイヤルゲージを用い、鋼管の歪みの測定は、鋼管の外面に三軸の歪みゲージを貼り付けて行った。測定点は、図-5に示す様に、いずれも支間の $1/6$ 等分点とした。

3.2 理論値

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。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-歪み曲線は、一般に、非線形の仮定がなされ、断面方向の歪みに対しては、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。この様な拘束コンクリートは、強度と歪みの増加が見込まれる。そのためコンファインドコンクリートの応力-歪み曲線に関して、種々の提案があるが[4]～[8]、ここでは、CEB-FIP MODEL CODE 1990の式(1)～式(4)を適用することにより、応力-歪み曲線は、図-6の様に仮定した。

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

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

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

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

但し、

$f_{ck,cf}$ = 拘束コンクリートの強度

f_{ck} = シリンダー強度 (表-4に示す
690 Kgf/cm²を使用)

$\varepsilon_{cc,cf}$ = 拘束コンクリートの最大圧縮
応力度に対する歪み

$\varepsilon_{cu,cf}$ = 拘束コンクリートの終局歪み

σ_2 = 拘束による側圧

$\sigma_2 / f_{ck} = 0.5 \alpha \omega_{wd}$

α = スターラップ等による拘束効果

ω_{wd} = 拘束鉄筋の体積比

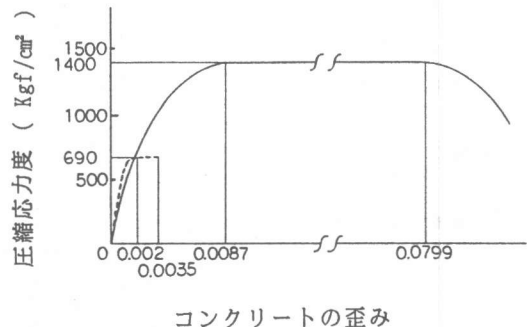


図-6 コンクリートの応力-歪み曲線

これによると、コンクリートの圧縮強度は、最初 690 Kg/cm^2 であったが、コンクリートだけに導入されたプレストレスと鋼管による拘束効果で、圧縮強度が 1400 Kg/cm^2 に上昇した。また、コンクリートの最大圧縮応力度に対する歪みは、 0.002 から 0.0087 に、さらに、コンクリートの終局歪みは、 0.0035 から 0.0799 と増加が著しい。以上の様にコンクリートの強度、最大強度時の歪み、最大強度以後の応力下降曲線の勾配等を評価した場合、変形能力の上昇効果が期待できる。

また、曲げ耐力の検討を行うに当たっては、以下の(1)から(8)の計算手順を繰り返すことにより、コンクリートと鋼管がそれぞれ分担する荷重とたわみの関係を求める。この方法は、鋼管とコンクリート（アンボンドPC）を重ね梁とみなすが、近似的にA点とB点（図-7に示す）のみで、たわみを一致させる方法である。尚、載荷荷重は、 $W_{c1} + W_{s1}$ であり、 W_2 は、B点のたわみを一致させるための一種の不静定力である。結果は、図-8に示す。

(1) プレストレス力 ($P_0 + \Delta P_0$) を仮定。

但し、 ΔP_0 は、曲げ荷重によるPC鋼材応力度の増分。

(2) コンクリートに W_{c1} 、 W_2 を仮定して載荷。図-7に示す。

(3) 支間の10等分点およびA点、B点位置の曲げモーメントを式(5)により算出。

$$M = W_{c1} * L_1 + W_2 * L_2 \quad (5)$$

(4) (3)の曲げモーメントになる様に各断面の歪みを計算し、曲率からたわみを算出。

(5) PC鋼材図心位置でのコンクリートの歪み量の合計と、最初に仮定したプレストレス力によるコンクリートの全歪み量とが等しくなる様に、(1)から(5)までを繰り返す。

(6) 鋼管に W_{s1} 、 $-W_2$ を仮定して載荷。図-7に示す。

(7) 鋼管とコンクリートの、A点でのたわみが一致する様に、 W_{s1} の値を変える。

(8) B点でのたわみが一致する様に、 W_2 の値を変えて(1)に戻る。

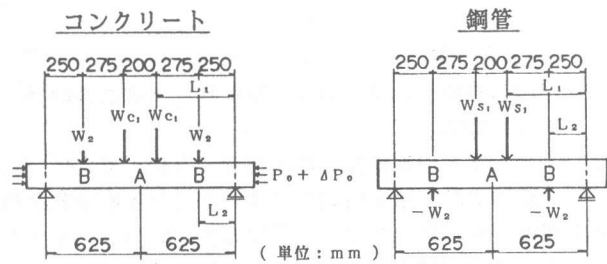


図-7 作用荷重

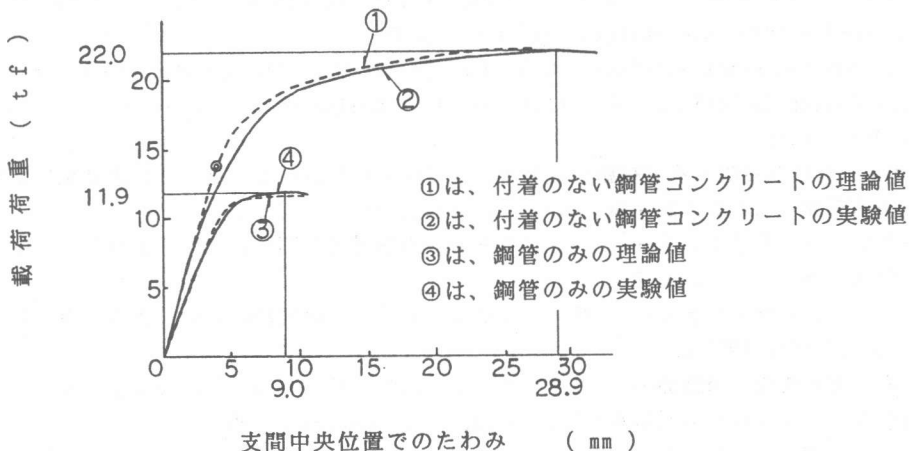


図-8 荷重とたわみの関係

3. 3 実験結果

支間中央位置での荷重とたわみの実測値を図-8に示す。この図によれば、理論値は、実験値に近い値を示していることがわかる。

拘束コンクリートの断面内に引張が生じるような、曲げを受ける部材については、拘束効果を考慮する必要がないという提案がなされている[7]。ところで、図-8の◎印位置に着目すると、この位置は、コンクリート下縁に軸方向の引張が生じ始めた点である。本実験の場合では、コンクリート断面内に引張が生じた状態でも、拘束によるコンクリート強度と歪みの増加を考慮した、二次放物線と直線とからなる応力-歪み曲線を適用することが出来た。

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

角形鋼管を用いてもコンクリートに対して十分な拘束があるが、水平断面内では、コンクリートに横拘束が一様に加わらない。

軸圧縮応力度の増加と共に、各辺と隅角部では、鋼管による拘束効果が変動する。

各辺の中央部と隅角部で最終的には、鋼管に塑性ヒンジが形成される。

4. 2 角形鋼管コンクリート供試体の曲げ試験について

CEB-FIPのコンファインドコンクリートの応力-歪み曲線を用いることによって、荷重とたわみの関係図では、理論値と実験値が、ほぼ良い一致を示した。即ち、この応力-歪み曲線は、軸方向圧縮の場合に対応したものであるが、曲げにも適用することが出来た。

尚、本研究では、不静定力を二点にしか載荷させていないが、さらに厳密な理論解を求める必要がある。また、プレストレス力、コンクリート強度、鋼管の強度等を変化させた場合の検討も必要であろう。

5. 参考文献

- (1) 田中伸幸ほか：スーパーコンクリート構造の開発、セメントコンクリート、No.475、pp.6-12、1986
- (2) 下戸 寛・佐藤孝典・田中伸幸・斉藤 豊：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造の中心圧縮実験、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、No.124、pp.493-496、1986.6
- (3) 伊藤 徹ほか：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1373-1376、1988.10
- (4) CEB：CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin D'Information No. 189, No. 190a, No. 190b, Comité Euro-International du Béton, 1988.
- (5) CEB：Concrete Under Multiaxial States of Stress Constitutive Equations for Practical Design Bulletin D'Information No. 156, Comité Euro-International du Béton, 149pp., 1983.
- (6) 堺 孝司・角田与史雄・能町純雄：鉄筋コンクリート柱における帯鉄筋の拘束効果に関する実験的研究、土木学会論文集 第354号、Vol.2、pp.63-72、1985.2
- (7) 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
- (8) 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
- (9) 肖 岩・富井政英・崎野健治：コンファインドコンクリートの3軸圧縮挙動に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.2、No.1、pp.1-14、1991.1
- (10) Akroyd, T.N.W.: "Concrete under triaxial stress", Mag. of Conc. Res., V. 13, No. 39, Nov. 1961