

## アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究 (その2)

—鋼管と充填コンクリート相互間のせん断伝達機構—

佐藤孝典  
(技術研究所)下戸芳寛  
(原子力本部)渡辺泰志  
(設計本部)

## § 1. はじめに

ここ数年来、鉄筋コンクリート構造（以下、RC構造と略す）による超高層住宅の開発が盛んである。筆者らは、この柱部材にRC構造の延長線上にあるものとして、アンボンド型充填鋼管コンクリート構造（以下、UTC構造と略す）を提案し、中心圧縮実験について述べた<sup>1)</sup>。これは、図-1に示すようにコンクリートの有効活用を考えて、フープ筋のピッチが0と見なせる円形鋼管を使用したことと、鋼管の有効活用を考えて両者の界面に約0.2mm厚の分離材を介在させて、アンボンド状態にしていることに特長がある。

このUTC構造の柱に接合される梁やスラブの構造形式は鉄骨構造（以下、S構造と略す）の場合もあれば、RC構造の場合もある。このような異種構造部材との接合部を設計する際、相互間の応力伝達機構を明確にしておく必要がある。特に、UTC構造の独特な条件として鋼管と充填コンクリートがアンボンド状態になっているので、材軸方向のずれに対して抵抗できなく、いわゆる付着によるせん断伝達はほとんど期待できない。

そこで、本報告においては「アンボンド状態であっても、側圧によって鋼管と充填コンクリートとの相互間のせん断伝達が、可能であること」を実験的、解析的に検討する。

## § 2. UTC構造との接合形式

UTC構造の柱と梁またはスラブとの接合形式には、図-2～図-4のような場合がある。いずれのタイプにおいても、鋼管に軸方向応力が生じないように変形吸収部がある。この変形吸収部とは約10～30mmの鋼管欠除断面で、充填コンクリートが露出している。UTC構造は曲げモーメントとせん断力に対しては、鋼管と充填コンクリートの両者がその剛性に応じて抵抗する。外力を受

けて、梁やスラブからUTC構造の柱へ曲げモーメントやせん断力が伝達されるためには、各図中に示した経路の途中にある「鋼管と充填コンクリートの相互間のせん断伝達」が必要となる。図-2に示すように、UTC構造に挟まれた部分を伝達部Aと称し、図-3、4に示すようにRC構造からUTC構造へ至る部分を伝達部Bと称する。

ところで、現行の鋼管コンクリート構造規準<sup>2)</sup>によると、付着による相互間のせん断伝達を見込まないので、柱頭から柱脚までのせん断力の負担割合は変化しないとされている。積極的に付着をなくしたUTC構造も、これと同様ということになる。つまり、伝達部B（図-3、4参照）のように接合部でRC構造の梁からUTC構造の柱のRC構造断面のみにせん断力が伝達されると、柱全体にわたってすべてRC構造断面のみで負担しなければならず、鋼管は寄与しないことになる。

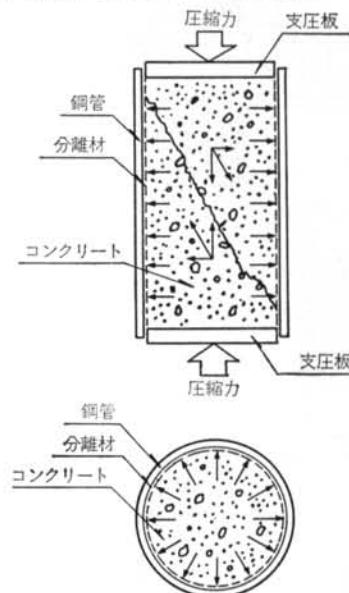


図-1 アンボンド型充填鋼管コンクリート構造 (UTC構造、通称: スーパーコンクリート構造)

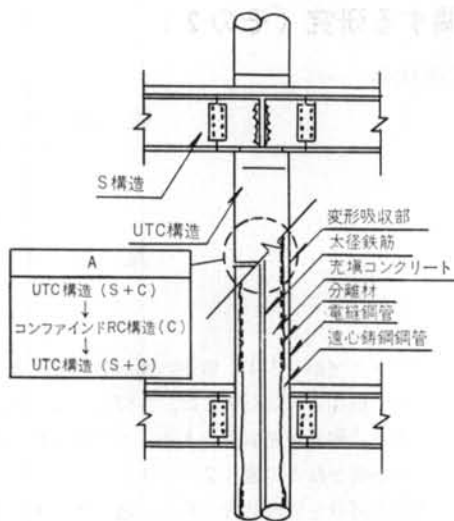


図-2 S構造梁との接合タイプ

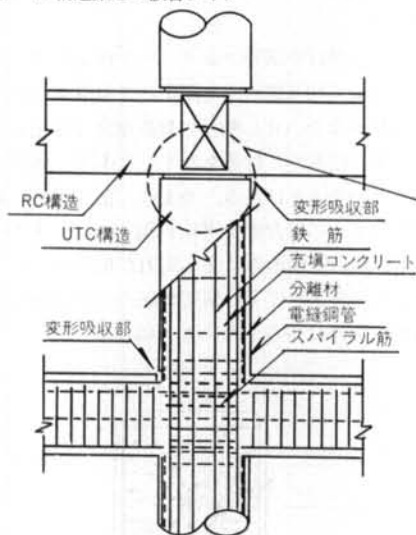


図-3 RC構造梁との接合タイプ

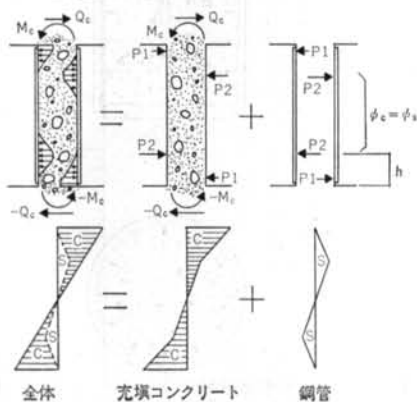


図-5 逆対称加力の場合の相互間のせん断伝達機構

そこで、伝達部Bの場合を例に、改訂された鉄骨鉄筋コンクリート構造規準<sup>3)</sup>の「柱脚」の項で記述されている「支圧とてこ」の機構と同様に、側圧による相互間のせん断伝達概念を図-5、6に示す。以下、これを検証するための実験について述べ、杭構造で用いるChangの式<sup>4)</sup>を応用した弾性解析を示す。

### § 3. UTC 構造の曲げせん断実験

#### 3.1 実験概要

伝達部Bにおけるせん断伝達機構を調べるために、図-7に示すような試験体を曲げせん断加力した。試験部位は、中央1,100mmの長さ区間で、左右端にそれぞれ10mmずつの変形吸収部があり、1,080mmのUTC構造部材で成り立っている。充填コンクリート部は鉄筋が通って

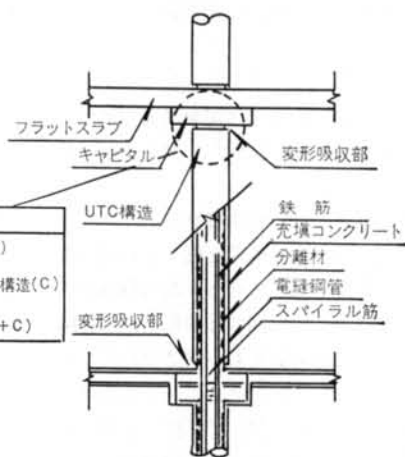


図-4 RC構造スラブとの接合タイプ

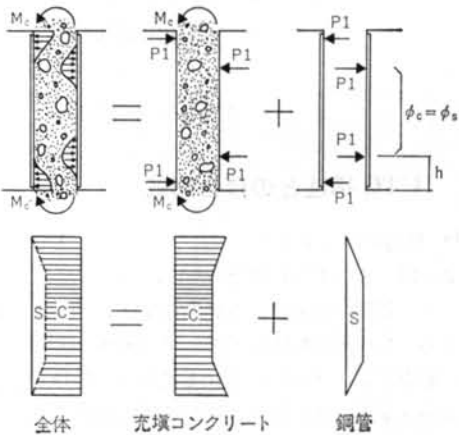


図-6 等曲げ加力の場合の相互間のせん断伝達機構

RC 構造となっているが、全長にわたっては連続しておらず、中央で50mmのクリアランスをもって切断されている。非試験部位は、破壊しないように鉄板で補強されたSRC構造になっており、試験部位と接する面はRC構造となっている。試験体は、逆対称加力（D4M）と等曲

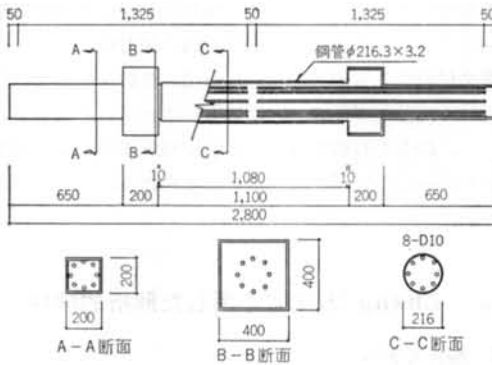


図-7 試験体

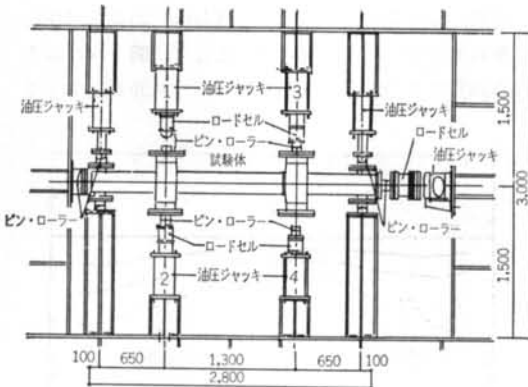


図-8 加力装置

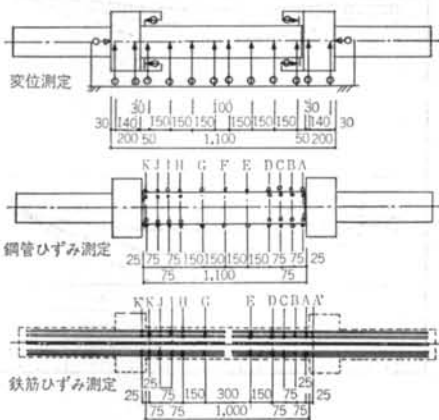


図-9 測定位置

げ加力（S4M）の各1体ずつである。ともに、軸力比0.43、単調加力である。そして、コンクリート強度はともに  $395\text{kg/cm}^2$  である。鋼管は内面に約0.2mm厚のアスファルトが塗布されており、 $\phi 216\text{mm} \times 1,080\text{mm}$ 、 $t=3.2\text{mm}$ 、降伏点は  $2,690\text{kg/cm}^2$  である。加力装置を図-8に示す。軸力用ジャッキ0で一定軸力  $94\text{t}$  ( $\sigma_c=0.43 \times (F_c + 3 \times t/r \times f_y) = 272\text{kg/cm}^2$ 、軸力比0.43) を保持した状態で、曲げ加力用ジャッキ1~4で曲げ加力した。荷重、変位およびひずみの測定は、図-9に示すようにそれぞれ以下に示す方法で行なった。

- (i)荷重：各ジャッキにセットしたロードセルによって測定
- (ii)変位：材軸方向に12カ所の鉛直変位、変形吸収部と加力ブロック外端の6カ所の水平変位を変位計によって測定
- (iii)鋼管ひずみ：材軸方向11断面で、円周上に8カ所または4カ所で、合計76枚の三軸ひずみゲージによって測定
- (iv)鉄筋ひずみ：材軸方向12断面で、各断面5カ所の鉄筋表面に合計60枚のひずみゲージによって測定

### 3.2 実験結果および考察

図-10に、一定軸力下における荷重一部材角関係を示す。軸力と曲げ変形ともなう付加曲げのために、D4MとS4Mの曲線は大きく異なっている。しかしながら、いずれの試験体も鋼管と充填コンクリートの界面が材軸方向にアンボンド状態であっても急激な剛性低下もなく、大変形になっても耐力が低下しない。ともに、変形吸収部の断面においてコンクリートのひび割れ発生と鉄筋の圧縮降伏がほぼ同時に起こり、その後鉄筋の引張降伏を迎え、終局状態に達する。

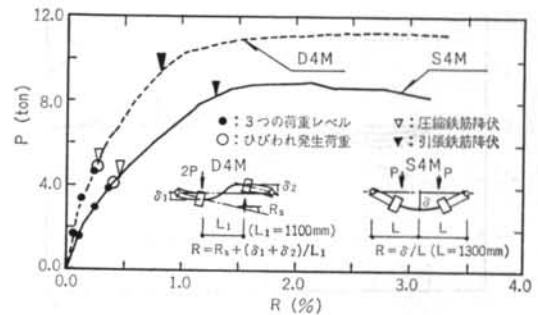


図-10 荷重一部材角関係

実験によるひずみ  $s\epsilon_z$ ,  $s\epsilon_\theta$  から鋼管の負担モーメント  $M_s$  は次のようにして求める。

$$M_s = \sum s\sigma_{zi} \cdot sA_i \cdot e_i$$

$$\text{ここで, } s\sigma_{zi} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \cdot (s\epsilon_{zi} + \nu_s \cdot s\epsilon_{\theta i})$$

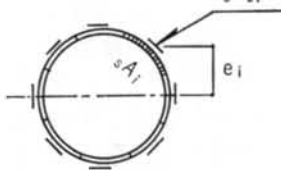


図-11に、各試験体のひずみゲージによる鉄筋コンクリートと鋼管の曲率分布、鋼管の負担モーメント ( $M_s$ ) 分布を示す。荷重段階は、ひび割れ発生荷重以前の3レベルで、図-10中にそれぞれ示す。

鉄筋コンクリートと鋼管の曲率分布を比較すると、いずれの試験体においても端部から約  $1.5D$  より内側ではほぼ一致している。鋼管の負担モーメント分布図中に、計算値として外力から算定される全体モーメントを弾性曲げ剛性比で配分したものを記入する。D4Mの左側以外は、約  $1.5D$  より内側ではほぼ一致している。

図-12, 13に各試験体の鋼管の主応力状態を示す。そ

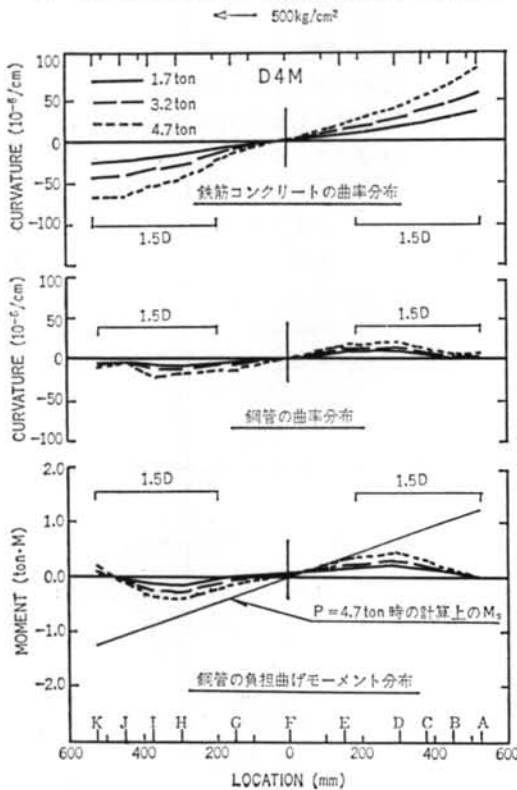


図-11 曲率および曲げモーメント分布

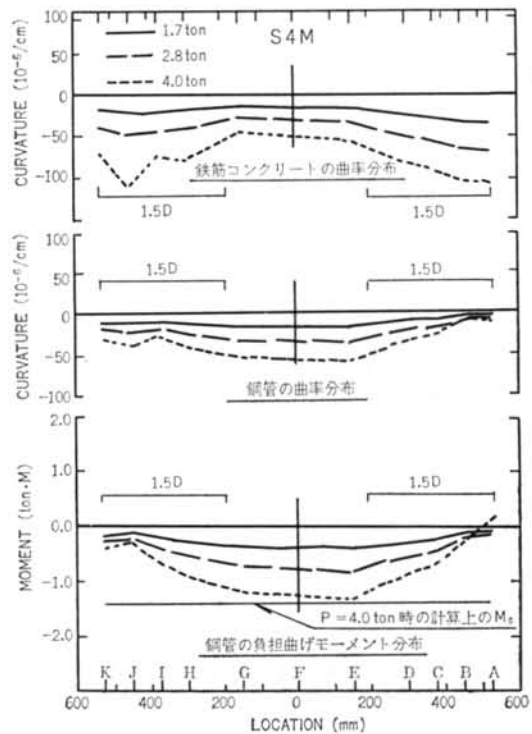
れぞれの試験体においては、図-5, 6に示したせん断伝達機構を裏付ける斜張力が生じている。そして、いずれの試験体においても鋼管端部の曲げ圧縮側では大きな円周方向応力  $s\sigma_\theta$  が生じており、鋼管の拘束効果が認められる。

本報告には示していないが、軸力導入時には鋼管に軸方向応力  $s\sigma_z$  がほとんど生じず、曲げ加力時においても摩擦や付着による相互のせん断伝達はなかったものと考えられる。したがって、材軸方向にアンボンド状態であっても、端部から約  $1.5D$  の区間で側圧によって相互間のせん断伝達が完了するものと考えられる。

## § 4. Chang の式を応用した解析的検討

### 4.1 解析モデル

杭構造に水平力が作用したときの弾性解析解に Chang の式というのがある<sup>9)</sup>。UTC 構造において充填コンクリートを杭、鋼管を地盤と見なすと Chang の式と同様にして解析解を導くことができる。ここで、図-14に示すような両者各々の軸芯の変形を考える。鉄筋が途中まで



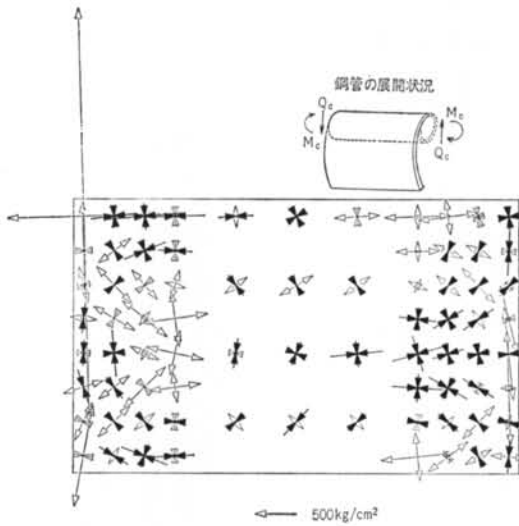


図-12 D4M の鋼管の主応力状態 ( $P=4.7 \text{ ton}$ 時)

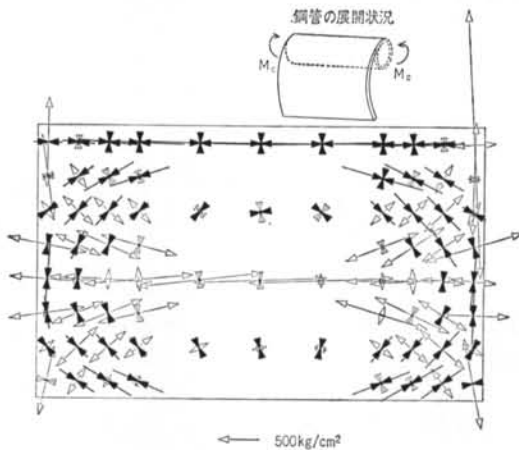


図-13 S4M の鋼管の主応力状態 ( $P=2.8 \text{ ton}$ 時)

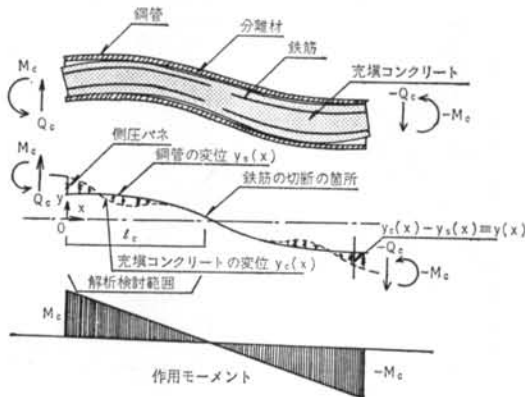


図-14 解析モデル (逆対称加力の場合)

しか配筋されないこともモデル化している。次のような仮定条件のもとに弾性解析する。

(1)両者は  $x$  方向には互いに独立ではあるが、 $y$  方向には側圧ばねで接続されている。

(2)側圧ばね定数は、材軸方向に一定である。

(3)充填コンクリートおよび鋼管の断面性能は、完全弾性で材軸方向に一定である。

(4)鉄筋の配筋されていない部位は、充填コンクリートの曲げおよびせん断剛性は 0 とする。

#### 4.2 解析解

材端で充填コンクリート断面のみに  $M_c$  が作用したとき、材軸方向  $X$  の位置におけるモーメントの釣り合いより、次の式が成立する。

充填コンクリート:

$$E_c I_c \ddot{Y}_c = M_c(x) - \int_0^X (X-x) k (Y_c - Y_s) dx \quad \dots(1)$$

$$\text{鋼管: } E_s I_s \ddot{Y}_s = \int_0^X (X-x) k (Y_c - Y_s) dx \quad \dots(2)$$

ここで、 $E_c I_c$ : 充填コンクリートの曲げ剛性

$E_s I_s$ : 鋼管の曲げ剛性

$k$ : 側圧ばね定数

$Y_c$ : 充填コンクリートの変位

$Y_s$ : 鋼管の変位

式(1)、式(2)をそれぞれ2度微分して差をとると、次のようになる。

$$(Y_c - Y_s)^{(4)} = - \left( \frac{1}{E_c I_c} + \frac{1}{E_s I_s} \right) k (Y_c - Y_s) \quad \dots(3)$$

ここで、 $Y_c - Y_s = Y$ 、 $\left( \frac{1}{E_c I_c} + \frac{1}{E_s I_s} \right) k = K$  と置けば、

次のようになる。

$$Y^{(4)} = -KY \quad (\text{これは、Chang の式である}) \quad \dots(4)$$

$\sqrt[4]{K} = \eta$  と置けば、式(4)の一般解は次のようになる。

$$Y = e^{-\eta X} (a \cdot \cos \eta X + b \cdot \sin \eta X) + e^{\eta X} (c \cdot \cos \eta X + d \cdot \sin \eta X) \quad \dots(5)$$

次に、鉄筋切断位置を端部からの距離  $l_c = \phi D$  ( $D$ : 鋼管の直径) とすると、その境界条件は次のようになる。

$$\dot{Y}(0) = \frac{M(0)}{E_c I_c} = \beta_c \quad \dots(6)$$

$$Y^{(3)}(0) = -\frac{Q(0)}{E_c I_c} = \alpha_c \quad \dots(7)$$

$$\dot{Y}(l_c) = -\frac{M(l_c)}{E_s I_s} = \beta_s \quad \dots(8)$$

$$Y^{(3)}(l_c) = \frac{Q(l_c)}{E_s I_s} = \alpha_s \quad \dots(9)$$

式(6)、(7)、(8)、(9)の境界条件に関する連立方程式を解いて、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ を求める。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} f_1(\eta X) & f_2(\eta X) & f_3(\eta X) & f_4(\eta X) \\ g_1(\eta X) & g_2(\eta X) & g_3(\eta X) & g_4(\eta X) \\ f_1(-\eta X) & f_2(-\eta X) & -f_3(-\eta X) & -f_4(-\eta X) \\ -g_1(-\eta X) & -g_2(-\eta X) & g_3(-\eta X) & g_4(-\eta X) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_c/2 \eta^2 \\ \beta_s/2 \eta^2 \\ \alpha_c/2 \eta^3 \\ \alpha_s/2 \eta^3 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(10)$$

ただし、 $f_1(\eta X) = -e^{2\eta X} + \cos 2\eta X - \sin 2\eta X$   
 $f_2(\eta X) = e^{\eta X} + (\cos \eta X + 3 \sin \eta X) - e^{-\eta X} (\cos \eta X + \sin \eta X)$   
 $f_3(\eta X) = 1 - e^{2\eta X} + \sin 2\eta X$   
 $f_4(\eta X) = e^{\eta X} (\cos \eta X - 2 \sin \eta X) - e^{-\eta X} \cos \eta X$   
 $g_1(\eta X) = e^{2\eta X} - 2 + \cos 2\eta X + \sin 2\eta X$   
 $g_2(\eta X) = -e^{\eta X} (\cos \eta X + \sin \eta X) + e^{-\eta X} (\cos \eta X - \sin \eta X)$   
 $g_3(\eta X) = 1 - \cos 2\eta X$   
 $g_4(\eta X) = e^{\eta X} \sin \eta X - e^{-\eta X} \sin \eta X$   
 $d = -(e^{2\eta X} + e^{-2\eta X}) + 4 - 2 \cos 2\eta X$

ここに、鉄筋切断位置として  $x=l_c$  を代入した  $a, b, c, d$  を用いて、各分布が以下のように求まる。

● 相対変形量

$$y(X) = e^{-\eta X} (a \cdot \cos \eta X + b \cdot \sin \eta X) + e^{\eta X} (c \cdot \cos \eta X + d \cdot \sin \eta X) \quad \dots\dots(11)$$

● 側圧力分布

$$\rho(X) = k \{ e^{-\eta X} (a \cdot \cos \eta X + b \cdot \sin \eta X) + e^{\eta X} (c \cdot \cos \eta X + d \cdot \sin \eta X) \} \quad \dots\dots(12)$$

● 鋼管の曲げモーメント分布

$$M_s(X) = \frac{k(a+b-c+d)}{2\eta} X + \frac{k}{2\eta^2} \{ e^{-\eta X} (b \cdot \cos \eta X - a \cdot \sin \eta X) + e^{\eta X} (-d \cdot \cos \eta X + c \cdot \sin \eta X) \} - \frac{k \cdot (b-d)}{2\eta^2} \quad \dots\dots(13)$$

● 鋼管のせん断力分布

$$Q_s(X) = \frac{k}{2\eta} [ e^{-\eta X} \{ -(a+b) \cdot \cos \eta X + (a-b) \cdot \sin \eta X \} + e^{\eta X} \{ (c-b) \cdot \cos \eta X + (c+d) \cdot \sin \eta X \} + (a+b-c+d) ] \quad \dots\dots(14)$$

4.3 パラメータスタディ

前述した式(11)~(14)による各分布を無次元化して検討する。 $\eta^4 D^4 = \frac{1}{4} \cdot \frac{kD^4}{E_c I_c} \cdot \left( \frac{E_c I_c}{E_s I_s} + 1 \right)$  の関係を参考に、以下に各パラメータを変化させた場合を考察する。

(1) Case 1: 側圧ばね定数が変化したとき

側圧ばねは、直径 210mm の充填コンクリートと約 0.2 mm 厚のアスファルト層の剛性によるものである。アスファルト層の剛性が不明なので、アスファルト層が完全剛体の場合から側圧ばね定数を変化させる。鋼管の負担曲げモーメント ( $M_s$ ) 分布を図-15に示す。側圧ばね定数が小さくなればなるほど  $M_s$  は小さくなり、またそれが最大となる位置も部材内側へ移行する。アスファルト層厚は、充填コンクリートの直径に比べて十分小さいこと、鋼管によって封じ込められて体積変化しにくいことのために、今後の検討に際してはアスファルト層は完全剛体として扱う。

(2) Case 2: 曲げ剛性比が変化したとき

鋼管の板厚やコンクリートのヤング係数の変化によっ

て、曲げ剛性比が変化する。鋼管の負担曲げモーメント ( $M_s$ ) 分布を図-16に示す。充填コンクリートの曲げ剛性が大きくなると、 $M_s$  は小さくなる。 $M_s$  はいずれの場合も  $X/D=1.1$  近傍で最大となる。実験で用いた試験体の  $E_c I_c / E_s I_s = 1.62$  の場合について、剛性比率で分配した計算値と実験値とこの解析値の3者を比較すると、 $X/D=1.5$  より内側の区間では、ほぼ一致している。

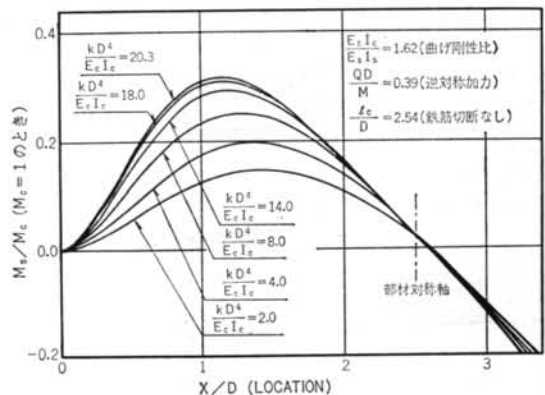


図-15 側圧ばねが変化したときの鋼管の曲げモーメント分布

これは、端部で充填コンクリート断面のみにモーメントが作用しても、 $X/D=0.0\sim 1.5$ の区間で鋼管と充填コンクリートの相互間のせん断伝達がほぼ完了して、 $X/D=1.5$ より内側では両者の曲げおよびせん断力に関して平面保持が成立することを示している。

### (3)Case 3: シアースパン比が変化したとき

構造物の階高や柱断面が変わると、シアースパン比が変わる。 $QD/M=0.0$ は等曲げ加力に相当し、他は逆対称加力に相当する。各分布を図一17, 18, 19に示す。側圧( $\rho$ )分布はいずれの場合もほとんど同じである。鋼管の負担曲げモーメント( $M_s$ )は、いずれの場合も $X/D=1.5$ より内側ではほぼ剛性比率分布を負担している。これは、Case 2で述べたのと同様である。鋼管のせん断力( $Q_s$ )は、 $X/D=1.5$ より内側ではほぼ一定値に収束する。これは、相互間のせん断伝達がほぼ完了したことを示している。

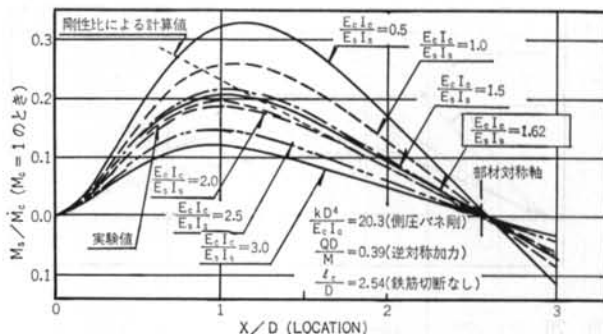
### (4)Case 4: 鉄筋切断位置が変化したとき

今回の実験では、 $l_c/D=2.43$ ( $l_c/D=2.54$ で全長配筋に相当)で切断したが、さらに短くなる場合もある。そのときの鋼管の負担曲げモーメント( $M_s$ )分布を図一20に示す。鉄筋切断位置が短くなると鉄筋存在部位での $M_s$ が大きくなるが、相互間のせん断伝達は可能である。これは仮定条件(4)に起因しており、実際には無筋コンクリートであっても軸力だけの曲げモーメントを負担できるので、これほど大きな $M_s$ にはならないと考えられる。

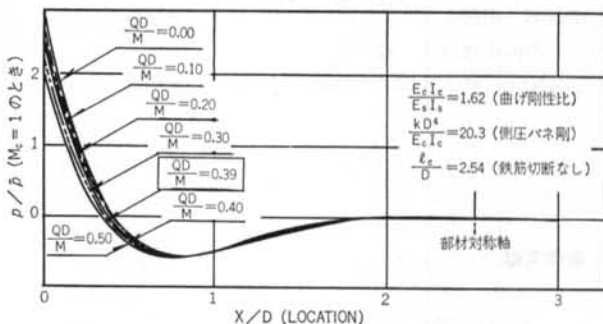
## § 5. 結論

すでに報告した“アンボンド型充填鋼管コンクリート構造に関する研究(その1)中心圧縮実験”に引き続いて、本報ではUTC構造の柱と梁またはスラブとの接合形式を3タイプ示し、設計上最も重要な課題となる「アンボンド状態における鋼管と充填コンクリート相互間のせん断伝達機構」について述べた。

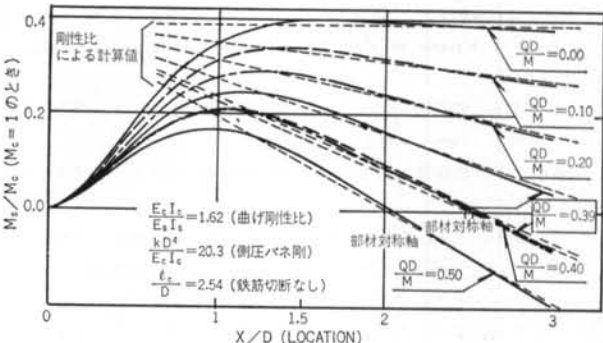
実験的には、試験体を一定軸力下において逆対称加力と等曲げ加力した。以下の三つの実験結果より、アンボンド状態であっても端部から約1.5Dの区間で側圧によって鋼管と充填コンクリート相互間のせん断伝達が完了することを確認した。



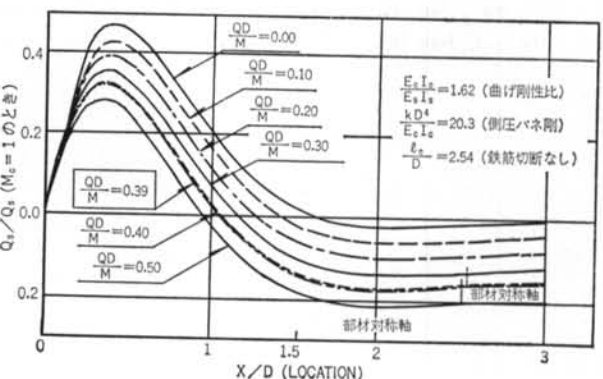
図一16 曲げ剛性比が変化したときの鋼管の曲げモーメント



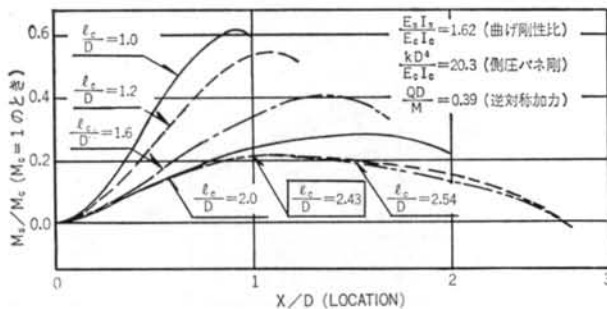
図一17 シアースパン比が変化したときの鋼管への側圧分布



図一18 シアースパン比が変化したときの鋼管の曲げモーメント分布



図一19 シアースパン比が変化したときの鋼管のせん断力分布



図一20 鉄筋切断位置が変化したときの鋼管の曲げモーメント分布

- (1) 端部から約  $1.5D$  より内側では、鋼管と充填コンクリートの曲率はほぼ一致する。
- (2) 端部から約  $1.5D$  より内側では、鋼管の負担モーメントは曲げ剛性比で配分したものとほぼ一致する。

(3) 鋼管の主応力状態より、せん断力による斜張力が認められる。

次に、解析的には杭構造でよく用いられる Chang の式を応用して、充填コンクリートを杭、鋼管を地盤と見なして弾性解析を行ない、ひび割れ発生以前の実験結果とよく一致した。その結果、側圧によるせん断伝達機構を確認した。

**謝辞** 本研究の実施に当たり、懇切なご教示を頂いた大阪大学教授 鈴木計夫博士、東京大学教授 青山博之博士、ならびに当プロジェクトメンバーに深甚なる謝意を表します。

#### <参考文献>

- 1) 佐藤, 下戸: “アンボンド型充填鋼管コンクリート 構造に関する 研究 (その1) —— 中心圧縮実験 ——” 清水建設研究報告 Vol. 45 (1987年4月) pp. 1~13
- 2) 日本建築学会: “鋼管コンクリート構造計算規準・同解説” (1980年)
- 3) 日本建築学会: “鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説” (1987年)
- 4) Y. L. Chang et al.: “Discussion on Lateral Pile-loading Tests, by L. B. Feagin” ASCE Transactions, Vol. 102 (1937)
- 5) 伊藤, 佐藤他: “アンボンド型充填鋼管コンクリート 構造に関する 研究 (その1) ~ (その4)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1986年8月)
- 6) 下戸, 佐藤他: “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 (1986年)
- 7) 田中, 手塚, 佐藤他: “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 (1986年9月)
- 8) 日経マグローヒル社: “新鋼管コンクリート (清水建設), ビッチ0の“たが”に秘けつ 柱の細い RC 超高層実現へ” 日経アーキテクチャ 第279号 (1986年12月)
- 9) 佐藤, 下戸, 渡辺: “アンボンド型充填鋼管コンクリート 構造のせん断伝達機構” 第9回コンクリート工学年次講演会論文集 (1987年)
- 10) Orito, Sato et. al.: “Study on the Unbonded Steel Tube Concrete Structure” Engineering Foundation Conferences, June 1987.