

[2095] 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

正会員 ○佐藤 孝典 (清水建設技術研究所)  
 正会員 下戸 芳寛 (清水建設原子力本部)  
 渡辺 泰志 (清水建設設計本部)

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)を提案してきた。<sup>1) 2) 3)</sup>これは、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。とくに、UTC構造の独特な条件として、鋼管と充填コンクリートが材軸方向に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、本論文においては、「材軸方向にアンボンド状態であっても、側圧によって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構造の柱との接合形式には、図-1~図-3のような場合がある。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。

ところで、現行の鋼管コンクリート構造規準<sup>4)</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のように、接合部で梁から柱のRC構造部分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構造部分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。

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>5)</sup>の「継手」の項

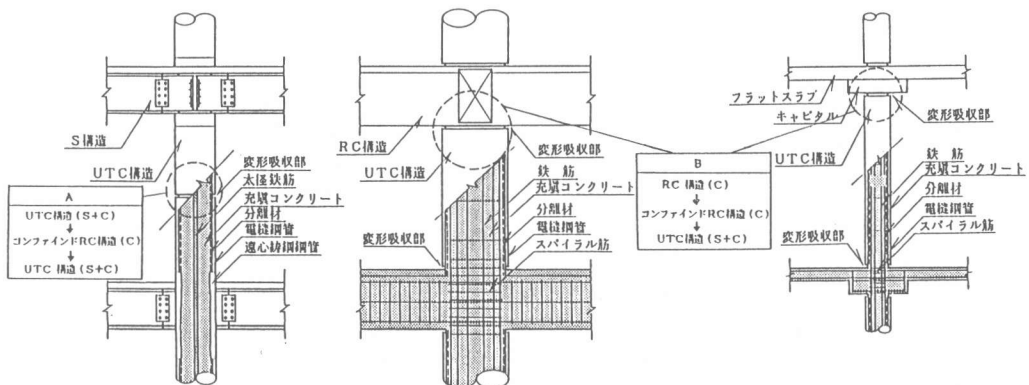


図-1 S構造梁との接合タイプ 図-2 RC構造梁との接合タイプ 図-3 RC構造スラブとの接合タイプ



### 3.2 実験結果及び考察

図-9に、一定軸力下における荷重-部材角関係を示す。軸力と曲げ変形に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。

図-10に、各試験体の歪ゲージによる鉄筋コンクリートと鋼管の曲率分布、鋼管の負担するモーメント( $M_s$ )分布を示す。荷重は、ひび割れ発生荷重以前の3レベルで、図-9中にそれぞれ示す。鋼管の負担モーメント( $M_s$ )は、歪値より次の式によって求めた。

$$M_s = \sum_i s \sigma_{zi} \cdot s A_i \cdot e_i$$

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

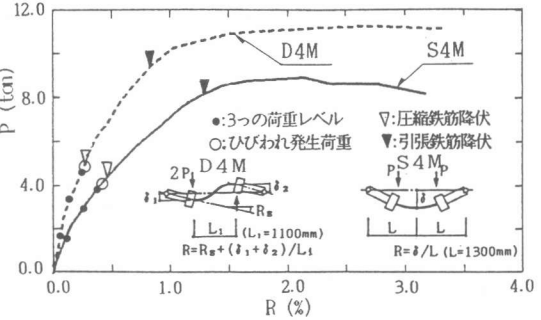
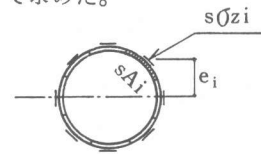


図-9 荷重-部材角関係

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。また、本論文には示していないが、軸力導入時には鋼管に軸方向応力がほとんど生じず、曲げ加力時においても摩擦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。

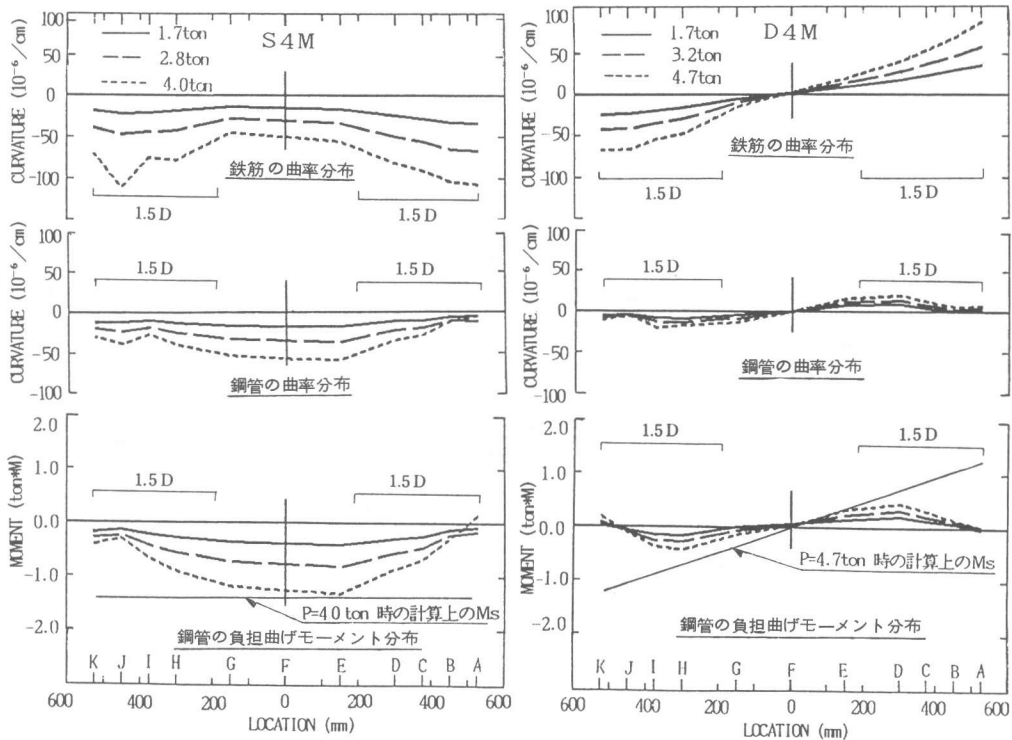


図-10 曲率および曲げモーメント分布

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。U T C 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-11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。

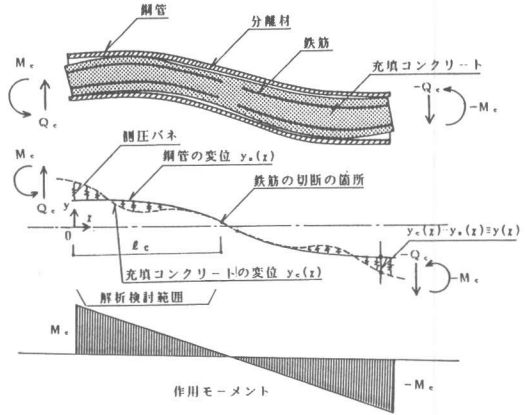


図-11 解析モデル(逆対称加力の場合)

1. 両者は、x 方向には互いに独立であるが、y 方向には側圧バネで接続されている。
2. 側圧バネ定数は、材軸方向に一定である。
3. 充填コンクリート及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及びせん断剛性は 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。

$$\text{充填コンクリート} : E_c I_c \ddot{y}_c = M_c(x) - \int_0^x (x-\phi) k (y_c - y_s) d\phi \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{鋼管} : E_s I_s \ddot{y}_s = \int_0^x (x-\phi) k (y_c - y_s) d\phi \quad \dots\dots\dots(2)$$

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  
 $k$  : 側圧バネ定数

(1), (2)式をそれぞれ 2 回微分して差をとると、次のようになる。

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

ここで、 $y_c - y_s = y$ 、 $\left(\frac{1}{E_c I_c} + \frac{1}{E_s I_s}\right) k = K$  とおけば、次のようになる。

$$y^{(4)} = -K y \quad (\text{これは「Changの式」である。}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$\sqrt[4]{\frac{K}{4}} = \eta$  とおけば、(4)式の一般解は、次のようになる。

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

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

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

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

$$\ddot{y}(\ell_c) = -\frac{M(\ell_c)}{E_s I_s} = \beta_s \quad \dots\dots\dots(8)$$

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

(6), (7), (8), (9)式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。

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

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

ここに, 鉄筋切断位置として,  $x = \ell c$  を代入した a, b, c, d を用いて, 各分布が以下のよう求められる。

• 相対変形量  
 $y(x) = e^{-\eta x} (a \cdot \cos \eta x + b \cdot \sin \eta x) + e^{\eta x} (c \cdot \cos \eta x + d \cdot \sin \eta x) \dots\dots(11)$

• 側圧力分布  
 $\rho(x) = k \cdot \{ e^{-\eta x} (a \cdot \cos \eta x + b \cdot \sin \eta x) + e^{\eta x} (c \cdot \cos \eta x + d \cdot \sin \eta x) \} \dots\dots(12)$

• 鋼管の曲げモーメント分布  
 $M_s(x) = \frac{k(a+b-c+d)}{2\eta} x + \frac{k}{2\eta^2} \{ e^{-\eta x} (b \cdot \cos \eta x - a \cdot \sin \eta x) + e^{\eta x} (-d \cdot \cos \eta x + c \cdot \sin \eta x) - \frac{k \cdot (b-d)}{2\eta^2} \} \dots\dots(13)$

• 鋼管のせん断力分布  
 $Q_s(x) = \frac{k}{2\eta} [ e^{-\eta x} \{ -(a+b) \cdot \cos \eta x + (a-b) \cdot \sin \eta x \} + e^{\eta x} \{ (c-b) \cdot \cos \eta x + (c+d) \cdot \sin \eta x \} + (a+b-c+d) ] \dots\dots(14)$

### 4.3 パラメータスタディ

前述した(11)~(14)式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。

#### CASE 1 …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-12に示す。 $M_s$  は, その剛性比に応じて変化し, 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三者を比較すると,  $X/D = 1.5$  より内側の区間では, ほぼ一致している。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

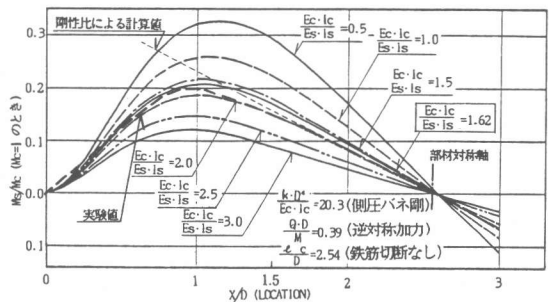


図-12 曲げ剛性比が変化したときの鋼管の曲げモーメント

面保持が成立することを示している。

CASE 2…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。 $Q/D/M = 0.0$  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-13、図-14、図-15に示す。 $\rho$ 分布はいずれの場合もほとんど同じである。また、 $M_s$  はいずれの場合も  $X/D = 1.5$  より内側では、ほぼ剛性比率分を負担している。これは、CASE1で述べたのと同様である。 $Q_s$  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。

CASE 3…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  $M_s$  分布を図-16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. まとめ

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る UTC 構造のせん断伝達機構について検討した。接合端から充填コンクリートのみでせん断力や曲げモーメントが作用しても、端部のある区間 ( $0 \sim 1.5D$ ) で「側圧による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、 $1.5D$  より内側の区間では、従来の構造形式 (RC 構造, SRC 構造) と同様に、曲げおよびせん断力に関して平面保持が成立する。以上のことを、実験的、解析的に検討した。

謝辞 本研究の実施に当たり、懇切なご教示をいただいた東京大学教授青山博之博士、大阪大学教授鈴木計夫博士に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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 (北海道), 1986.8
- 3) 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, Sep.1986
- 4) 日本建築学会: 「鋼管コンクリート構造計算規準・同解説」, 1980
- 5) 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

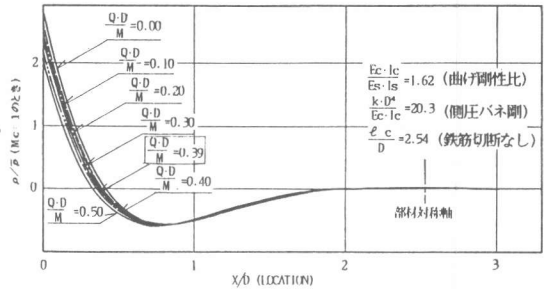


図-13 シアースパン比が変化したときの鋼管への側圧分布図

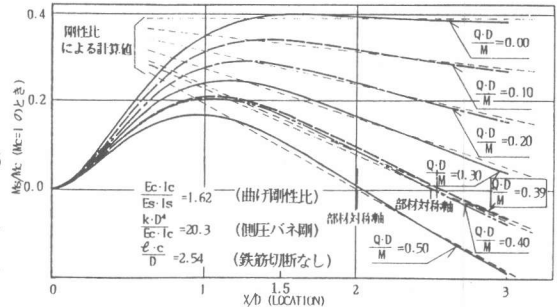


図-14 シアースパン比が変化したときの鋼管の曲げモーメント分布図

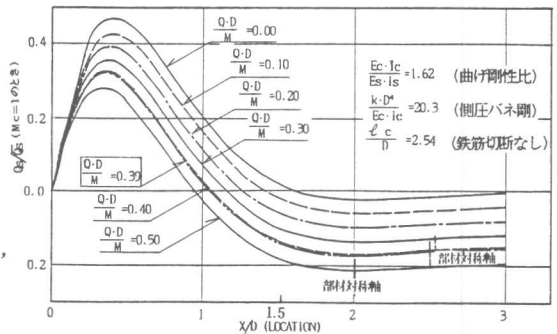


図-15 シアースパン比が変化したときの鋼管のせん断力分布図

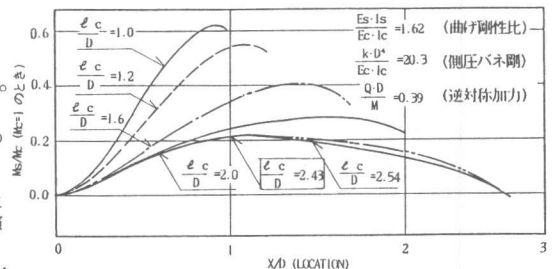


図-16 鉄筋切断位置が変化したときの鋼管の曲げモーメント分布図