

# 論文 ずれ止めを有するコンクリート充填二重鋼管部材の曲げ特性

清水 優<sup>\*1</sup>・石川 敏之<sup>\*2</sup>・服部 篤史<sup>\*3</sup>・河野 広隆<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート充填鋼管部材を軽量化した構造として、径の異なる 2 つの鋼管を同心円状に設置し、両鋼管の間にコンクリートを充填したコンクリート充填二重鋼管（以下、CFDT とする）部材の研究が進められている。これまでに CFDT 部材について基礎的な力学特性の研究が報告されているが、鋼管-コンクリート界面のずれ止めの必要性について言及した研究は少ない。本研究ではずれ止めを設置した CFDT 部材の曲げ特性を把握するため、4 点曲げ載荷実験を行った。その結果、CFDT 部材にずれ止めを設置することによって、外側と内側の鋼管およびコンクリートが一体化され、曲げ耐力が向上することがわかった。

**キーワード:** コンクリート充填, 鋼管, CFDT, ずれ止め, 合成部材, 耐力

## 1. はじめに

高架橋の橋脚は、地震時に橋脚基部に大きな曲げモーメントが作用することから、耐力および靱性の高い構造が必要とされている。一方で、建設コストを抑えるためには、基礎工の規模を縮小できるように、より軽量の橋脚であることが望ましい。

コンクリート充填鋼管（以下、CFT とする）部材は鋼管の内部にコンクリートを充填した構造で、同耐力の RC 橋脚に比べて靱性が高く、施工が容易なため、都市内高架橋・鉄道橋の橋脚などに用いられている<sup>1), 2)</sup>。さらに CFT 部材を軽量化するため、径の異なる 2 つの鋼管を同心円状に設置し、両鋼管の間にコンクリートを充填することで中空断面としたコンクリート充填二重鋼管（以下、CFDT とする）部材の研究が進められている。これまでに CFDT 部材の基礎力学特性および耐震性の把握に向けた研究が報告されている<sup>3)-5)</sup>。

一方、鋼管とコンクリートのずれに関して、CFT 部材ではダイヤフラムを鋼管に設置することで、コンクリートが鋼管から抜け出すのを防止するよう複合構造標準示方書<sup>6)</sup>で記されている。CFT 部材より複雑な断面形状である CFDT 部材でも、2 つの鋼管とコンクリートが一体となって挙動するためには CFT 部材と同様に鋼管-コンクリート界面にずれ止めを設置する必要があると考えられる。しかし、これまでに CFDT 部材の鋼管-コンクリート界面のずれ止めの配置方針（内・外鋼管、あるいは軸方向の場所など）、その配置による充填コンクリートのひび割れ性状、内・外鋼管とコンクリートのずれ、最大曲げモーメントやその算定方法などについて検討した研究は少ない。

本研究では、鋼管-コンクリート界面に機械的ずれ止めを設置した CFDT 部材の 4 点曲げ載荷実験を行い、ず

れ止めの有無および設置箇所の違いが曲げ耐力性状に与える影響を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本研究では、図-1 に示すような鋼管-コンクリート界面に機械的ずれ止めを設置した CFDT 供試体を用いた。鋼管の軸方向に連続して設置させるずれ止めを想定し、供試体の寸法の関係から、十分な付着力がある異形鉄筋を鋼管に溶接し、ずれ止めとした。表-1 に供試体の一覧および断面図を示す。ずれ止めの配置はそれぞれの供試体で異なり、O は外側の鋼管（以下、外鋼管とする）にずれ止めを溶接したもの、I は内側の鋼管（以下、内鋼管とする）にずれ止めを溶接したもので、OI は両鋼管にずれ止めを溶接したもので、N は鋼管-コンクリート界面にずれ止めを設置していない供試体である。さらに O、I、OI の供試体に対して、ずれ止めが耐力性に寄与しないようにせん断スパンのみにずれ止めを設置した供試体

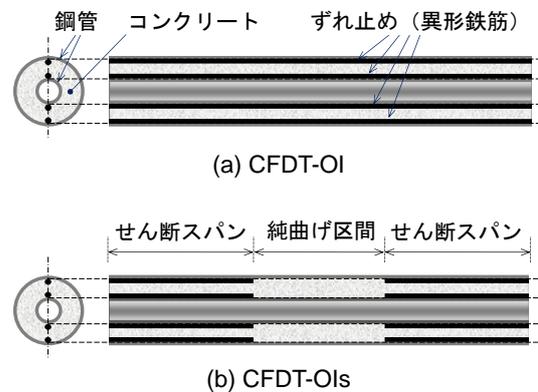


図-1 ずれ止めの設置例

\*1 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (学生会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科助教 工博 (非会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科准教授 工博 (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

(表-1 中, 供試体ラベル “s”) を用意した。

## 2.2 供試体の制作

供試体は, まず外鋼管の内側および内鋼管の外側にずれ止めとなる鉄筋を溶接した。外鋼管の内側に溶接する際, スパン中央に近い部分は溶接が困難なため, 鋼管の端から 200mm の範囲のみ 50mm 間隔で合計 5 点スポット溶接し, 全ての鋼管で同じ溶接方法とした。鋼管とコンクリートが接する面には摩擦を無くするために油を塗布した。ずれ止めを設置した後, 内鋼管と外鋼管を同心円状に設置し, 両鋼管の間にコンクリートを打設した後, 2 日間は柱状に立てた状態でコンクリート露出面を湿布養生し, その後 28 日以上室内に静置した。

## 2.3 材料

使用した鋼管は外, 内鋼管ともに STK400 材である。外鋼管の寸法は, 径  $D_o$  が 190.7mm, 厚  $t_o$  が 5.3mm であり, 12C 号試験片の材料試験の結果, 0.2% オフセット耐力  $\sigma_{0.2}$  は 391MPa, ヤング率  $E_o$  が 220GPa であった。内鋼管は径  $D_i$  が 42.7mm, 厚  $t_i$  が 2.3mm であり, 12A 号試験片の材料試験の結果, 0.2% オフセット耐力  $\sigma_{0.2}$  は 399MPa, ヤング率  $E_i$  が 208GPa であった。ここで, 0.2% オフセット耐力  $\sigma_{0.2}$  を用いた理由は, 応力-ひずみ関係において, 明確な降伏棚が表れなかったためである。また, ヤング係数は応力-ひずみ関係において, ひずみが  $50\mu$  の点から 0.2% オフセット耐力の 1/3 に相当する点までの割線の傾きとした。ずれ止めを模擬した鉄筋は SD295A の D10 を用いた。後の計算に用いる降伏強度  $f_y$  およびヤング率  $E_s$  は JIS G 3112 で規格化されている値として, 295MPa および 200GPa を用いた。コンクリートは充填性を考慮し, 流動性を高めるために高性能 AE 減水剤を使用した。材料試験は 1 体目の供試体の載荷前に行い, 圧縮強度  $f_c$  およびヤング率  $E_c$  はそれぞれ 35.5MPa および 31.4GPa であった。

## 2.4 載荷試験

図-2 に示すように 4 点曲げ載荷試験を行った。支点および載荷点の治具は鋼管に沿った形状に加工している。載荷は 100kN ごとの漸増繰返しとし, 荷重の増加がなくなった時点で載荷を終了した。スパン中央および載荷位置下部では変位計によって鉛直変位を測定し, 供試体両端部では鋼管とコンクリートの相対変位をクリップゲージによって測定した。また, 内・外鋼管のスパン中央上縁, 下縁および側面に 2 軸ひずみゲージを貼付した。

## 3. 実験結果

### 3.1 ひび割れ性状

試験終了後に CFDT-N, O, I, Is, OI, OIs の外鋼管をガス切断し, コンクリートのひび割れ性状を確認した。

図-3 に CFDT-N, O, I の純曲げ区間のひび割れ性状を

表-1 供試体一覧

供試体名	断面図	$M_{max}$ [kN·m]	$M_u$ [kN·m]	$M_{max}/M_u$
CFDT-N		91.8	89.5	1.03
CFDT-O		101.8	93.4	1.09
CFDT-Os		98.6	89.5	1.10
CFDT-I		97.9	90.9	1.08
CFDT-Is		93.5	89.5	1.04
CFDT-OI		108.2	94.7	1.14
CFDT-OIs		100.2	89.5	1.12

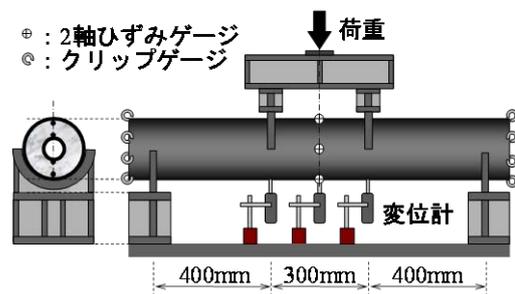
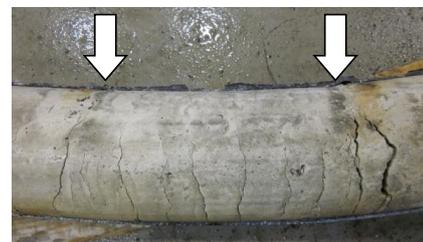
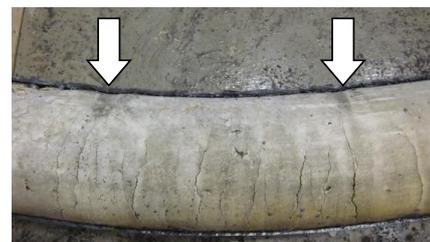


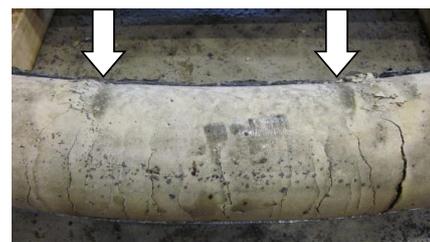
図-2 4 点曲げ載荷試験図



(a) CFDT-N



(b) CFDT-O



(c) CFDT-I

図-3 コンクリートのひび割れ性状

示す。図中の矢印で示しているのは載荷点である。図-3より、CFDT-N および CFDT-I では載荷位置の引張縁付近で開口幅の大きなひび割れが発生していることがわかる。一方で、CFDT-O では極端に大きなひび割れは見られない。図-4 に各供試体の純曲げ区間のひび割れ本数および最大ひび割れ幅を示す。外鋼管にずれ止めを設置した CFDT-O は CFDT-N に比べて純曲げ区間のひび割れ本数が多く、最大ひび割れ幅も小さいことから、ひび割れの分散性が高いといえる。一方、内鋼管にずれ止めを設置した CFDT-I ではひび割れ本数、最大ひび割れ幅ともに CFDT-N と同程度であった。また、CFDT-OI と CFDT-OIs を比較すると、最大ひび割れ幅は両者でほぼ同じであった。一方でひび割れ本数は CFDT-OI の方が2倍以上多く、CFDT-OIs のひび割れ本数は CFDT-N の1.5倍程度であった。したがって、純曲げ区間のみならず、ずれ止めを設置した場合には、最大ひび割れ幅の抑制効果が高いことがわかる。

### 3.2 鋼管とコンクリートのずれ

基本的なずれの進展挙動として、CFDT-N の鋼管とコンクリートのずれを図-5 に示す。この図で縦軸は純曲げ区間の曲げモーメントであり、横軸は供試体端でクリップゲージより得られた外鋼管あるいは内鋼管とコンクリートの相対変位である。ここで、供試体の両端で測定した相対変位のうち、ずれが大きかった側の値を用いている。また、コンクリートが鋼管の端から抜け出す方向を正のずれとしている。図-5 より、曲げモーメントが約 70 kN・m までは、外鋼管とコンクリートのずれはほぼ線形に増加しているが、内鋼管とコンクリートのずれはほとんど発生しないことがわかる。また、外鋼管下縁とコンクリートのずれは外鋼管上縁とコンクリートのずれに比べて大きく、曲げモーメントが 70 kN・m 以上になると内鋼管とコンクリートにも大きなずれが生じている。鋼管とコンクリートのずれが大きかった引張側での、曲げモーメントと、鋼管とコンクリートのずれの関係を図-6 に示す。図-6 (a) は外鋼管下縁における鋼管とコンクリートのずれを示しており、CFDT-N と CFDT-I の外鋼管下縁とコンクリートのずれは CFDT-O と CFDT-OI よりも大きいことがわかる。これは、CFDT-N と CFDT-I は外鋼管にずれ止めがないため、コンクリートに生じる曲げひび割れがずれとして蓄積されるためと考えられる。また、CFDT-N と CFDT-I の供試体は幅の大きなひび割れが発生したため、ある曲げモーメントからずれが大きくなり進展している。一方で、内鋼管下縁とコンクリートのずれを示している図-6(b)より、内鋼管とコンクリートのずれは全ての供試体で、ある曲げモーメントまでほぼ0であり、その後急激にずれが進展している。これはコンクリートの下縁に発生したひび割れが中立軸方向に進展し、

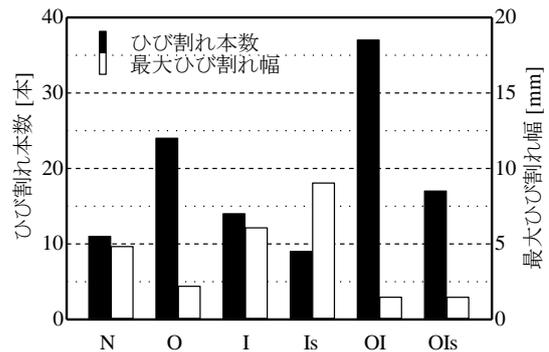


図-4 純曲げ区間のひび割れ本数と最大ひび割れ幅

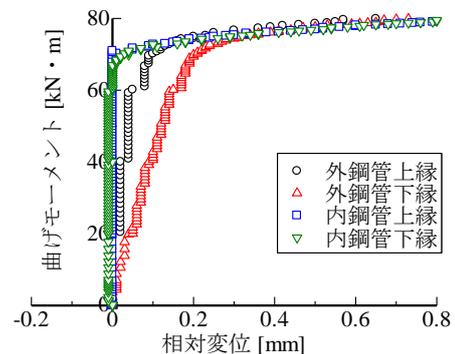
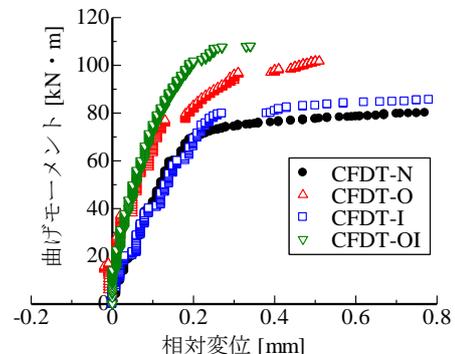
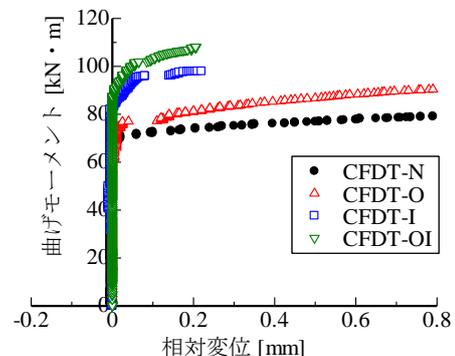


図-5 CFDT-N の鋼管とコンクリートのずれ



(a) 外鋼管下縁とコンクリート



(b) 内鋼管下縁とコンクリート

図-6 引張側における鋼管とコンクリートのずれ

内鋼管の位置まで到達した際にずれが急激に発達しているためと考えられる。このとき、内鋼管にずれ止めが設置されている CFDT-I と CFDT-OI の供試体では急激なずれの発達が抑制されていることが確認できる。

### 3.3 最大曲げモーメント

表-1 中に、実験より得られた最大曲げモーメント  $M_{\max}$  の一覧を示す。ずれ止めを設置した供試体ではずれが小さかったために、ずれ止めを設置していない CFDT-N よりも最大曲げモーメントが 2~18% 向上した。せん断スパンのみにずれ止めを設置した CFDT-Os, Is および OIs では、図-4 で示したように純曲げ区間のひび割れの分散性は期待できなかったが、同区間のコンクリートが三軸方向に拘束されるため、最大曲げモーメントが向上している。

また、外鋼管にずれ止めを設置した CFDT-O および Os と内鋼管にずれ止めを設置した CFDT-I および Is を比較すると、CFDT-O および Os の方が最大曲げモーメントの向上効果が大きいことがわかる。ただし、外鋼管の全長にわたってずれ止めを設置した CFDT-O では、ずれ止めを模擬した鉄筋が断面の最外部に近い位置に配置されるため、鉄筋の引張抵抗が部材強度に大きく影響していると考えられる。

また、実験より得られた最大曲げモーメントを評価するため、次に示す式(1)を用いて各供試体の終局曲げモーメント  $M_u$  を算定した。式(1)の導出には、図-7 に示すように、外および内鋼管は圧縮側と引張側ともに 0.2% オフセット耐力  $\sigma_{0.2}$  とし、コンクリートの圧縮側は等価応力ブロックを仮定し、引張側の強度は無視した<sup>4)</sup>。

$$M_u = \frac{k_1 f_c'}{12} (D_o^3 \cos^3 \alpha_o - D_i^3 \cos^3 \alpha_i) + (\sigma_{0.2} D_o^2 t_o \cos \alpha_o - \sigma_{i0.2} D_i^2 t_i \cos \alpha_i) - \sum \sigma_s A_s y \quad (1)$$

ここに、 $k_1$  はコンクリート等価応力ブロックの低減係数 (=0.85)、 $\sigma_s$  はずれ止めを模擬した各鉄筋の正あるいは負の降伏応力  $f_{sy}$ 、 $A_s$  は鉄筋の公称断面積、 $y$  は中立軸からそれぞれの鉄筋の図心までの距離(下向きを正とする)、 $a$  はせん断スパン長、 $\alpha_o$  および  $\alpha_i$  は図-7 に示す断面において圧縮合力と引張合力がつりあうときの角度であり、次式で示す軸力  $N_u$  に 0 を代入して得られる。

$$N_u = \frac{k_1 f_c'}{8} \{ D_o^2 (\pi - 2\alpha_o - \sin 2\alpha_o) - D_i^2 (\pi - 2\alpha_i - \sin 2\alpha_i) \} - (2\sigma_{0.2} R_o t_o \alpha_o + 2\sigma_{i0.2} R_i t_i \alpha_i) + \sum \sigma_s A_s \quad (2)$$

ただし、 $\sin \alpha_i = (D_o / D_i) \sin \alpha_o$  である。

式(1)で算定した終局曲げモーメント  $M_u$  の一覧を表-1 中に示す。ここで、ずれ止めが鋼管全長にわたって設置されている CFDT-O, I および OI では鉄筋の曲げ強度

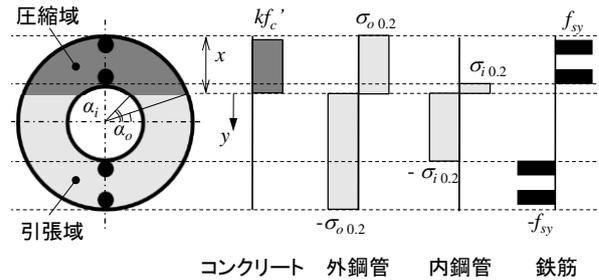


図-7 終局状態の断面仮定

が含まれているため終局曲げモーメントが CFDT-Os, Is および OIs よりも若干高い。すべての供試体で実験より得られた最大曲げモーメントは算定した終局曲げモーメントより若干高かったが、CFDT-N の終局曲げモーメントに対する最大曲げモーメント  $M_{\max} / M_u$  は 1.03 であり、式(1)によって良好に終局強度を算定できることがわかる。また、CFDT-O と CFDT-Os, CFDT-I と CFDT-Is, CFDT-OI と CFDT-OIs の  $M_{\max} / M_u$  はそれぞれほぼ同じである。このことから、鋼管全長にずれ止めを設置した供試体では、せん断スパンのみにずれ止めを設置した供試体よりも、純曲げ区間の鉄筋の曲げ強度分だけ、最大曲げモーメントの実験値が大きくなっていると考えられる。CFDT-O と CFDT-I を比較すると、CFDT-O の方が  $M_{\max} / M_u$  が高い。これは、ひび割れの分散性、コンクリートが三軸方向に拘束されるなど、ずれ抑制によって最大曲げモーメントを向上させる効果が、CFDT-I よりも CFDT-O の方が大きいためと考えられる。

### 3.4 曲げモーメント-曲率関係

図-8 に、スパン中央における曲げモーメントと純曲げ区間の変位計より算出した曲率の関係を示す。この図にはスパン中央の外鋼管引張縁および圧縮縁が降伏応力 (0.2% オフセット耐力  $\sigma_{0.2}$ ) に達した時の曲げモーメントも示している。ここで、鋼管の降伏は次式で示す Von-mises の降伏条件を用いて判断した。

$$\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\theta - \sigma_\theta^2 \geq \sigma_{0.2}^2 \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_z$ 、 $\sigma_\theta$  はそれぞれ外鋼管の軸方向および周方向応力であり、スパン中央の圧縮縁および引張縁に貼付した 2 軸ひずみゲージより算出した。

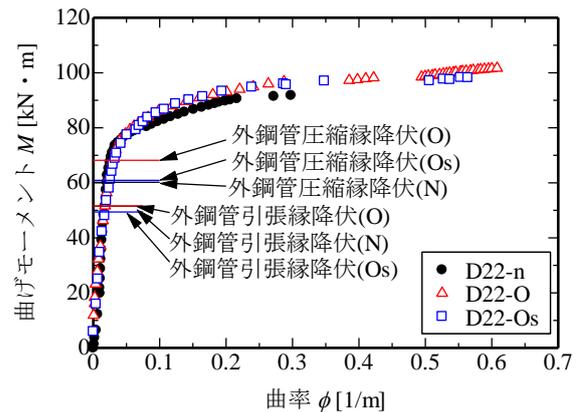
図-8(a)より、CFDT-N, O および Os の外鋼管引張縁が降伏するまでの曲げ剛性はほぼ一致しており、また外鋼管引張縁が降伏する時の曲げモーメントもほぼ同じである。したがって、ずれ止めを設置することによって最大曲げモーメントが向上する要因は、外鋼管引張側の降伏以降に現れると考えられる。外鋼管圧縮縁降伏時と比較すると、CFDT-O および Os は CFDT-N よりも曲げモーメントが大きくなっていることがわかる。このことから、外鋼管にずれ止めを設置することによって、外鋼管引張

縁降伏以降の曲げ剛性の低下が抑制されると考えられる。一方、図-8(b)より内鋼管のみにずれ止めを設置したCFDT-IおよびIsでは外鋼管圧縮縁の降伏曲げモーメントの向上は見られない。

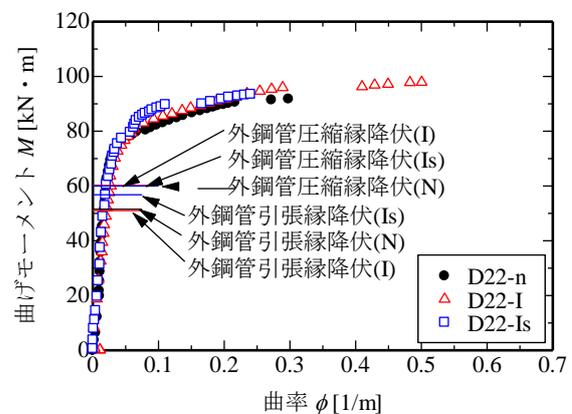
ずれ挙動との関連性を調べるため図-6(a), (b)を参照すると、CFDT-Nの外鋼管引張縁および圧縮縁が降伏する曲げモーメントである50~60kN・m付近の曲げモーメント-ずれ関係には大きな変化は見られない。しかし、外鋼管および内鋼管とコンクリートのずれが急激に大きくなる70kN・m付近になると、曲率の進展も大きくなっている。外鋼管にずれ止めを設置したCFDT-Oでは、内鋼管とコンクリートのずれが急激に増加する曲げモーメントと曲率の進展が大きくなる曲げモーメントはおおよそ一致している。また、内鋼管にずれ止めを設置したCFDT-Iでは、外鋼管とコンクリートのずれが急激に増加する曲げモーメントと曲率の進展が大きくなる曲げモーメントがほぼ一致している。

### 3.5 ひずみ分布

図-9に外鋼管引張縁降伏時のスパン中央断面の軸方向ひずみの分布を示す。横軸は引張縁のひずみの理論値で無次元化した軸方向ひずみであり、縦軸は鋼管の中心からの距離である。ここで、ひずみ分布の理論値は平面保持を仮定し、外鋼管の引張縁が降伏、内・外鋼管は全断面有効、コンクリートの圧縮側は線形弾性、引張側の強度は無視して算出した。また、CFDT-O、Iはスパン中央断面にずれ止めが設置されているため、CFDT-N、Os、Isの理論値と異なるが、その違いが小さかったため同一の理論値で比較している。図-9(a)よりCFDT-Nの供試体では外鋼管のひずみの分布と内鋼管のひずみの分布にずれがあるため、外鋼管と内鋼管が一体となって挙動していないと考えられる。また、外鋼管の上縁および下縁のひずみの絶対値は理論値よりも大きく、内・外鋼管とコンクリートの応力の分担が理論値と異なっていることがわかる。図-9(b)より、CFDT-Oでは内鋼管にずれ止めが設置されていないにも関わらず、外鋼管と内鋼管のひずみの分布はほぼ一致しており、外鋼管圧縮縁のひずみは理論値とほぼ一致している。このことから、少なくとも外鋼管引張縁が降伏するまでは、外鋼管にずれ止めを設置することによって内・外鋼管およびコンクリートの合成断面を一体化させることができる。また、CFDT-Osでは、CFDT-Nと同様に外鋼管と内鋼管のひずみ分布がずれていることから、せん断スパンのみにずれ止めを設置した場合には、内・外鋼管とコンクリートを一体化できないことがわかる。したがって、鋼管とコンクリートのずれ止めとしてダイヤフラムのような軸方向に連続していないずれ止めを用いた場合には、コンクリートの抜け出しは防止できるが、内・外鋼管とコンクリートが合



(a) CFDT-N, OおよびOs



(b) CFDT-N, IおよびIs

図-8 曲げモーメント-曲率関係

成挙動を示さない可能性がある。また、図-9(c)より、CFDT-I、Isのひずみ分布はCFDT-Nと同様の傾向を示しており、内鋼管のみにずれ止めを設置しても外鋼管が一体となっていないことが明らかである。

## 4. まとめ

以下に得られた結果を記す。

- (1) CFDT部材の外鋼管の全長にずれ止めを設置した場合、純曲げ区間の内部コンクリートに生じる曲げひび割れの分散性が高くなり、最大ひび割れ幅は小さくなった。また、外鋼管のせん断スパンのみにずれ止めを設置した場合には、最大ひび割れ幅が小さくなるが、ひび割れの分散性はずれ止めを設置しない場合と同程度であった。
- (2) CFDT部材の鋼管とコンクリートのずれは、コンクリートが鋼管から抜け出す方向に増加した。外鋼管とコンクリートのずれは作用曲げモーメントに対して線形に増加し、内鋼管とコンクリートのずれは大きなひび割れが発生した際に急速に増加した。

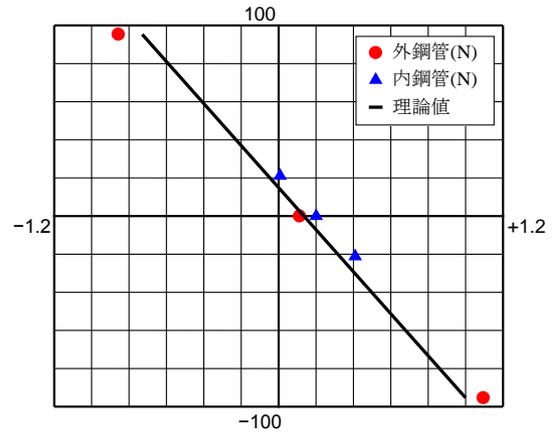
- (3) 鋼管-コンクリート界面間にずれ止めを設置することによって最大曲げモーメントが 2~18%向上した。せん断スパンのみにずれ止めを設置しても、純曲げ区間のコンクリートが三軸方向に拘束されるため、部材の最大曲げモーメントが向上した。また、最大曲げモーメントの向上効果は、せん断スパンのみの設置でも内鋼管よりも外鋼管にずれ止めを設置したほうが大きかった。
- (4) 外鋼管の鋼管-コンクリート界面にずれ止めを設置しても、外鋼管引張縁が降伏するまでの曲げ剛性はずれ止めを設置しない場合とほぼ一致しており、また外鋼管引張縁が降伏する時の曲げモーメントもほぼ同じであった。しかし、外鋼管引張縁の降伏時以降の曲げ剛性の低下が抑制され、外鋼管圧縮縁の降伏時の曲げモーメントが向上した。
- (5) CFDT 部材の鋼管-コンクリート界面にずれ止めを設置しない場合、内鋼管のみにずれ止めを設置する場合およびせん断スパンのみにずれ止めを設置する場合には、内・外鋼管とコンクリートは一体となって挙動しないため、ひずみ分布は平面を保持しなかった。しかし、外鋼管にずれ止めを設置することによって、外鋼管引張縁が降伏する時までは内・外鋼管とコンクリートは一体となって挙動した。

### 謝辞

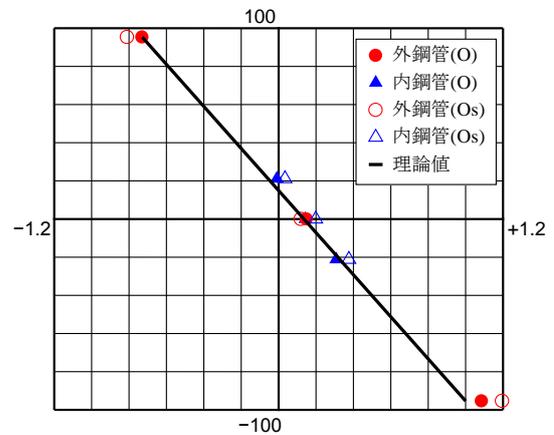
載荷実験の実施にあたり、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻の巽郁仁氏および社会基盤工学専攻技術職員の有馬博人氏にご尽力いただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

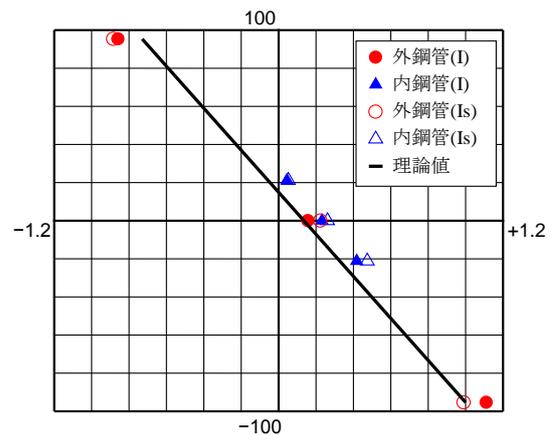
- 1) 中井博, 吉川紀: コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.344, 1984.4
- 2) 大槻茂雄, 川瀬千佳, 高橋裕行, 前沢二郎: 日本初の CFT 構造を用いた鉄道高架橋の設計・施工, コンクリート工学, Vol.36, No.6, 1998.6
- 3) Zhao, X. L. and Han, L. H.: Double Skin Composite Construction, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.8, No.3, pp.93-102, 2006
- 4) 上中宏二郎, 鬼頭宏明: 二重鋼管・コンクリート合成部材の中心圧縮および曲げ特性に関する研究, 第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.(9)-1-8, 2009
- 5) 杉浦邦征, 林堂靖史, 橋本国太郎, 大島義信, 河野広隆: コンクリート充填中空式 2 重鋼管構造橋脚の耐震性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A,



(a) CFDT-N



(b) CFDT-O, Os



(c) CFDT-I, Is

図-9 スパン中央軸方向ひずみの分布

pp.670-679, 2009.3

- 6) 土木学会: 2009 年制定 複合構造標準示方書, 2009.12