

報告 軸力影響下に交番ねじりを受けるCFT部材の力学挙動に関する載荷実験

王 涛^{*1}・清宮 理^{*2}・何 海明^{*3}

要旨：本研究では軸圧縮力下の交番ねじり載荷実験で CFT 部材の耐力，変形及び破壊状況の基本的な力学特性を調べた。充填コンクリートとして普通コンクリートと高強度コンクリートを用いた。軸力が大きい場合，鋼管に座屈現象が顕著に現れ，かつコンクリートのひび割れ方向も 45 度より鉛直になった。CFT の耐荷力を単純累加で計算し，実験結果と比較したところ高軸力下の高強度コンクリート CFT では，十分な累加強度が発揮できなかった。

キーワード：コンクリート充填鋼管，ねじり載荷試験，高強度コンクリート，累加強度

1. はじめに

コンクリート充填鋼管合成部材(CFT)は鋼管の中にコンクリートを充填することで，力学的に優れた性能を発揮することから，建物の柱、複合橋梁の主桁と橋脚、送電塔などさまざまな構造物で使われている。CFT 部材はじん性が大きく、耐荷力も高く、かつ施工も容易である。鋼とコンクリートを合成することによって，両者の短所を補い，経済的にも優れた構造部材を製作できる。しかしながら，地震時などに想定される軸力と交番ねじりモーメントを受ける CFT 部材の力学挙動については，まだ十分に把握されていない。CFT 部材で組合荷重を受けるときの研究は少なく，軸力と曲げが作用する場合の断面耐荷力(M-N 相関曲線)は「鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン」¹⁾にまとめられているが，ねじれに関する知見は十分でない。

そこで，本研究では，一定の軸圧縮力でねじりモーメントを受ける CFT 部材の基本的な力学特性を把握することを目的として，交番ねじり載荷実験を実施した。同時に，軸力とねじりモーメントを受ける CFT 部材の最大耐荷力を累加強度式により計算して実験結果との比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1 に試験体一覧。図-2 に試験体形状を示す。実験は柱部材を想定し，自由端に軸圧縮力とねじり荷重を作用させる。試験体は総数 6 体で，いずれの試験体も形状寸法は同一である。図-2 に示すように柱の高さは 700mm，両端の加力ブロックの断面は 200×200mm の正方形，下のブロックの高さは 200mm，上のブロックは 350mm である。コンクリートの配合を表-2 に示す。充填コンクリートの 2 種類で、高強度コンクリートの設計基準強度は 90N/mm²、普通強度コンクリートは 30N/mm²とする。

表 - 1 試験体一覧

試験体 No.	鋼管		コンクリート 基準強度 (N/mm ²)	軸力 (kN)
	外径 D(mm)	板厚 t(mm)		
CFT30-1	139.8	4.5	30	0
CFT30-2				400
CFT30-3				800
CFT90-1			90	0
CFT90-2				620
CFT90-3				1240

*1 早稲田大学 理工研究学術院 社会環境工学科 (正会員)

*2 早稲田大学 理工研究学術院 社会環境工学科教授 工博(正会員)

*3 早稲田大学 理工研究学術院 社会環境工学科 (正会員)

表 - 2 コンクリートの配合

種類	呼び強度 (N/mm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	混和剤 (%)
普通強度	30	20	60	46.0	260	0.5
高強度	90	20	27	47.6	630	1.6

柱の鋼管は STK400 一般構造用炭素鋼鋼管とする。鋼材とコンクリート強度の結果を表-3,表-4 に示す。

表 - 3 鋼管の材料試験結果

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
鋼管	399.6	482.4	211.8

表 - 4 コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
普通強度	40.05	3.30	24.6
高強度	99.64	3.67	38.1

2.2 荷重方法

図-1 に荷重状況の概略を示す。CFT 柱の下端を反力床に固定し、自由端である柱の上端に油圧ジャッキで一定の軸圧縮力を作用させる。交番ねじり荷重は試験体の上のブロックに取り付けた H 鋼の荷重治具を介して、油圧ジャッキにより加力し、両端に大きさを等しく加える。ねじりモーメントは鋼管に直接に作用し、コンクリートへの荷重は鋼管とコンクリートの付着で伝わる。両ジャッキの引込み量をほぼ等しくしながら、静的に荷重を繰返し作用させる。ここで、ねじり率は単位長さあたりの回転角の変化量である。除荷は(1)式で求まるねじり率が 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 および 0.5(rad/m) に達した時に行う。荷重最大値に達した後、荷重が急激に下がった時に、荷重と計測を終了する。なお、各試験体にはおける荷重軸力は試験体の計算軸方向耐力の 1/3 と 2/3 に設定する。

2.3 計測方法

図-3 に変位計と鋼管表面に取付けた 3 軸ひず

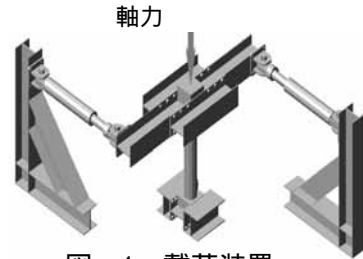


図 - 1 荷重装置

ゲージの位置を示す。充填コンクリートのひずみを測定するため、モルタル塊のモールド²⁾にひずみゲージを取り付け、鋼管内の中央位置に設置する。ねじり率の計測は、木製円環を鋼管に取り付けワイヤーロープを引出して 4 個の変位計 (V1-V4) に連結して行う。円環の設置位置はブロック端から 100mm の距離の 2 箇所とする。ねじり率は(1)式で求める。

$$= \{(V1-V2)/2 - (V3-V4)/2\} / R/L \text{ (rad/m)} \quad (1)$$

ここで R:円環の半径 125mm ,L:円環間の距離 0.5m、V1 等:変位計での変位(mm)である。また、荷重は油圧ジャッキに取り付けた圧力センサーによって計測する。よって計測する。

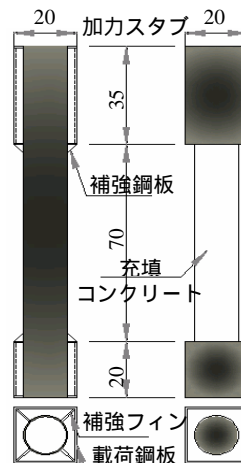


図 - 2 試験体形

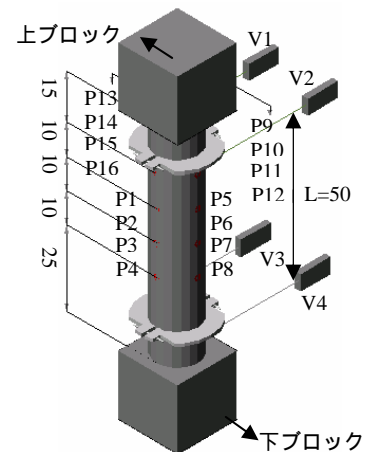


図 - 3 計測位置

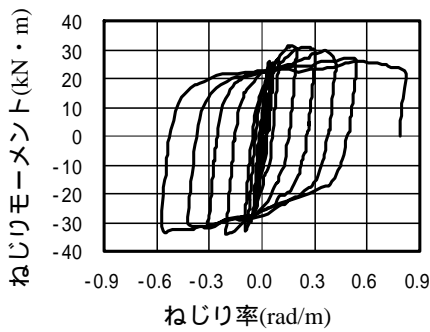


図 - 4 CFT30-1

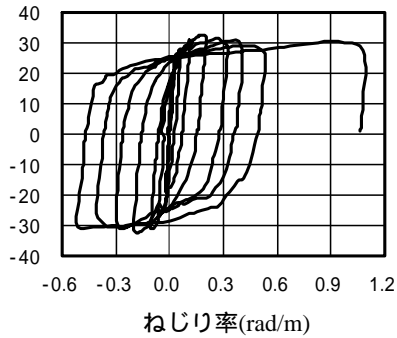


図 - 5 CFT30-2

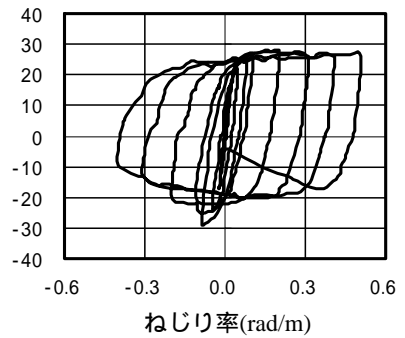


図 - 6 CFT30-3

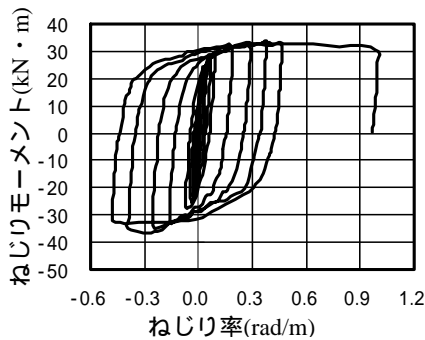


図 - 7 CFT90-1

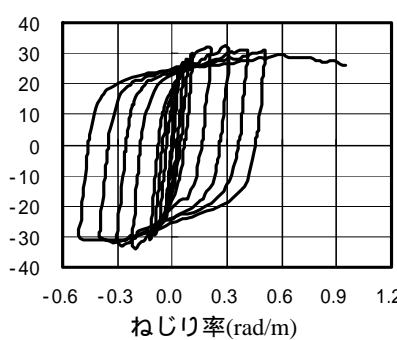


図 - 8 CFT90-2

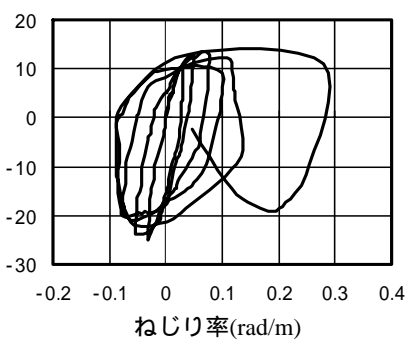


図 - 9 CFT90-3

3. 実験結果及び考察

ここでは、ねじりモーメント - ねじり率の関係、鋼管の局部座屈発生位置、充填コンクリートの破壊状況について述べる。

3.1 ねじりモーメントとねじり率の関係

図 - 4 ~ 9 に各試験体のねじりモーメントとねじり率の関係を示す。ねじりモーメントが最大ねじりモーメントのほぼ 60%以内で、ねじりモーメントとねじり率曲線は、直線性を保っていた。ねじりモーメント T と最大ねじりモーメント T_{max} の比 $T/T_{max}=0.65$ 付近からねじり剛性は低下した。図-10 と図-11 に CFT30 と CFT90 のねじりモーメントとねじり率の履歴曲線の包絡線を示す。CFT30 シリーズと CFT90 シリーズの各試験体とも、最大ねじりモーメントに達したあと、ねじりモーメントは低下を始めたが、軸力が高いと負のねじり率で急激にねじりモーメントの値が低下した。これは、CFT 部材のコンクリートが三軸応力状態で圧縮 - 引張の繰返しを受けるとき、鋼管により拘束されているが、載荷荷重の増加に従い鋼管とコンクリートが分離したことが原因であると考える。

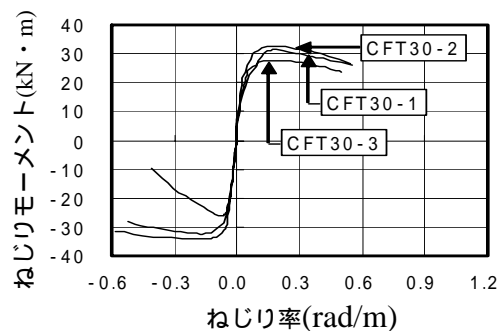


図 - 10 CFT30-包絡線

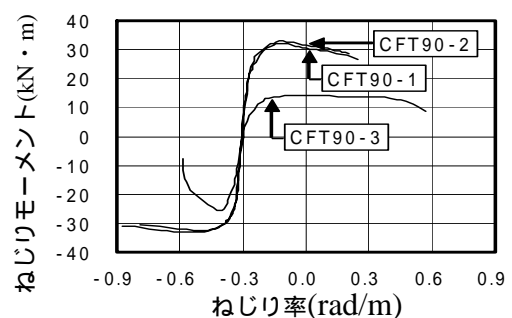


図 - 11 CFT90-包絡線

図-10と図-11にCFT30-1 ,CFT30-2 ,CFT90-1 , CFT90-2 の試験体は 鋼管に局部座屈が発生し、コンクリート表面のひずみゲージの測定値が大きくなり、一定の軸荷重のもとに、ねじり剛性が徐々に低下した。CFT30-3 と CFT90-3 の試験

表 - 4 力学特性結果

試験体 No.	充填コンクリート破壊			降伏荷重・変位		最大荷重・変位		軸力 N (kN)
	サイクル目	T (kN・m)	(rad/m)	T (kN・m)	(+:正; -:負) (rad/m)	T (kN・m)	(+:正; -:負) (rad/m)	
CFT30-1	6	30.9	0.052	20.8 -21.8	0.018 -0.028	31.0 -33.8	0.172 -0.203	0
CFT30-2	6	31.8	0.149	20.6 -20.9	0.020 -0.019	32.2 -32.7	0.202 -0.182	400
CFT30-3	6	20.0	-0.074	17.5 -17.1	0.022 -0.022	28.2 -29.0	0.204 -0.080	800
CFT90-1	6	29.4	0.198	24.7 -23.0	0.032 -0.048	32.1 -34.0	0.199 -0.200	0
CFT90-2	5	-26.6	-0.039	24.9 -25.3	0.038 -0.037	33.2 -36.6	0.381 -0.277	620
CFT90-3	4	-19.3	-0.049	8.6 -9.7	0.019 -0.019	13.4 -25.1	0.062 -0.032	1240

体では非常に大きい軸圧縮力を受けているので、充填コンクリートがねじり率の小さい段階で破壊し、ねじり剛性が著しく低下した。

表-4 に力学特性の結果一覧を示す。ここで、充填コンクリート破壊は充填コンクリートのひずみゲージの値が大きく伸びた時点を、降伏荷重は鋼管が降伏応力に達した時の荷重を示している。

3.2 座屈・ひび割れおよび破壊状況

実験終了後鋼管をガスバーナーで撤去し、コンクリートのひび割れ状況を観察した。鋼管での座屈発生位置と変形の状況を図-12 と図-13 に示す。軸力がゼロの CFT30-1 と CFT90-1 の試験体では、ひび割れは柱の中心の上と下部分に約 45° の角度を保ちながら伸展し、交差した。ただ柱中心に近いところでやや鉛直方向になっていた。CFT30-2 と CFT90-2 の試験体では鋼管中心部辺りには CFT30-1 と CFT90-1 より、凹んでいる範囲は拡大した。内部の充填コンクリートの剥離、圧壊した部分は広がっていた。CFT30-3 と CFT90-3 の試験体では、CFT30-3 は鋼管が皺のような変形状態となった。CFT90-3 は鋼管中

央部に、大きな膨らみが出た。

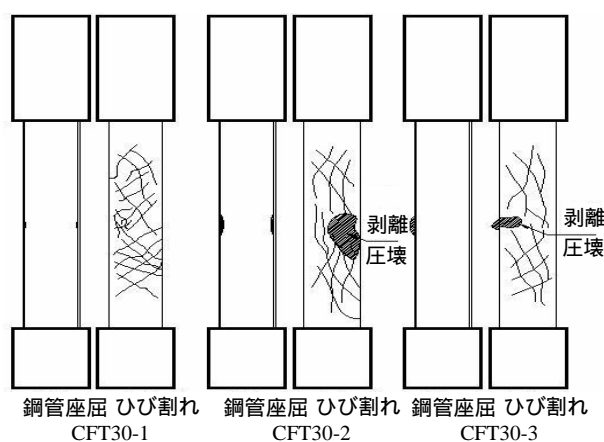


図 - 12 CFT30-変形状況

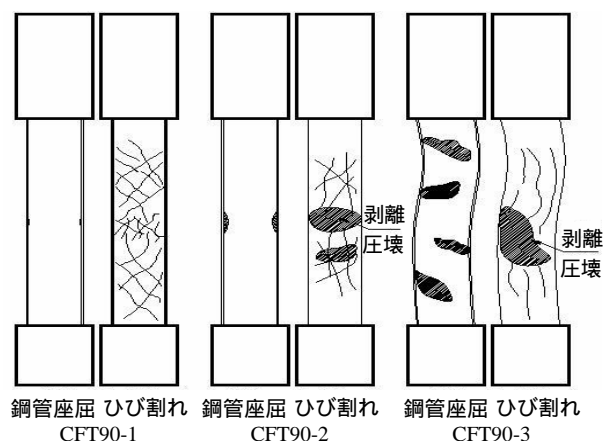


図 - 13 CFT90-変形状況

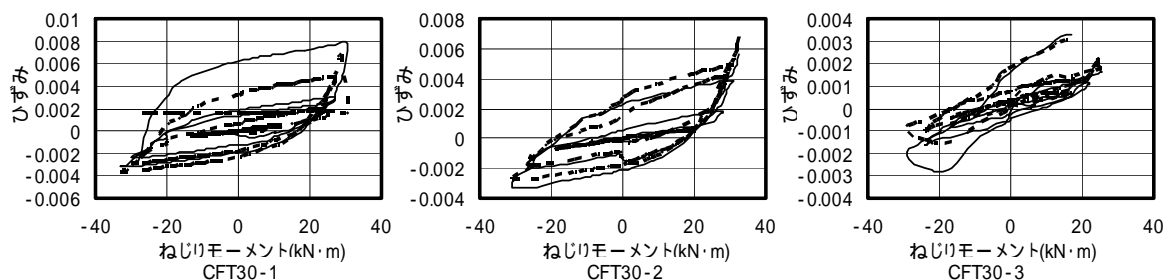


図 - 14 CFT30 ねじりモーメント-ひずみ関係

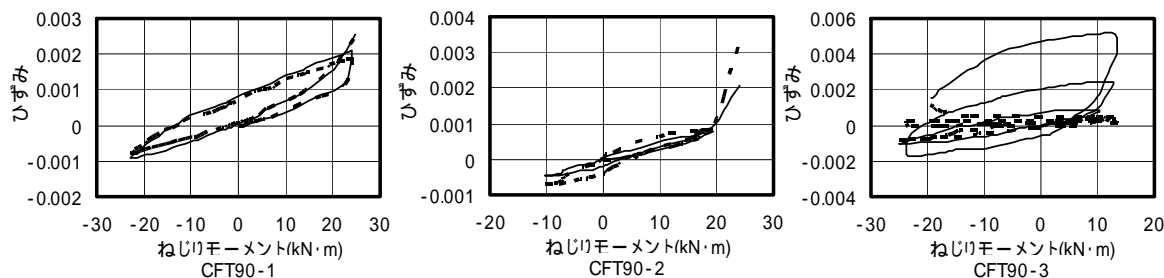


図 - 15 CFT90 ねじりモーメント-ひずみ関係

3.3 ねじりモーメント-軸力の相関特性

図 14～15 には試験体中央部での鋼管とコンクリートのひずみ履歴を示す。ひずみゲージの角度は水平と 45° になっていた。実線は鋼管中央部の表面ひずみゲージ、点線はコンクリートの表面ひずみゲージでの値を示す。大方の試験体では、鋼管とコンクリートのひずみは最大ねじりモーメントに到着するまでほぼ同一であった。このことより、ねじり CFT 部材の耐力性状として充填コンクリートが圧壊するまで鋼管と一緒に耐力を分担していたと考えられる。高強度コンクリートの試験体では CFT90-1 及び CFT90-2 については、耐力性状が CFT30-1 及び CFT30-2 と同様であった。しかしながら、CFT90-3 では鋼管とコンクリートのひずみは荷重が小さい段階から合わなかった。このことより CFT90-3 は初期の段階からコンクリートと鋼管が分離し主に鋼管だけで負担していたと考えられる。目視の観察によると、鋼管は局部座屈時点で CFT 部材が最終状況を迎えた。充填コンクリートのひずみゲージの測定によると第 5、6 サイクル目の頂点でコンクリートのひずみゲージが計測不能となり、コンクリートが破壊したことを窺わせた。軸力を受ける CFT 部材の最大ねじりモー

メント耐力を推定方法はこれまで提案が少ない。ここでは、ねじりモーメント - 軸力の相関特性曲線を、過去の CFT 部材の³⁾研究結果を参考に求めた。軸力とねじりモーメントとが同時に作用する場合には、軸力を鋼管とコンクリートと同じ軸方向変形のもとで分担すると仮定する。材料の構成則として鋼管の降伏は Mises の降伏則に従い、コンクリートの降伏則は、圧縮の主応力では一軸圧縮強度、引張の主応力で割裂強度と設定する。CFT 部材の最大軸力は鋼管とコンクリートの軸力の累加とする。鋼管とコンクリートは比較的ねじり載荷荷重が小さい段階から剥離が生じ完全合成とはならないことが過去の研究²⁾からわかっており、また今回もひずみゲージでの値、打音法による検査から早期での剥離を確認しており、累加強度方法で耐力を評価できると考えた。

(1) 鋼管の分担：鋼管の降伏条件で鋼管の圧縮力とねじりモーメントの相関関係計算式は次式で求められる。

$$(N_s/A_s)^2 + 3 \cdot (T_s/K_s)^2 = \frac{\sigma_y^2}{E} \quad (2)$$

ここに、 N_s :鋼管が分担する軸力、 A_s :鋼管断面積
 T_s :鋼管が分担するねじりモーメント、 K_s :鋼管のねじり係数である。

(2) コンクリートの分担：コンクリートの引張破壊の場合に軸圧縮力とねじりモーメントの相関関係⁴⁾は以下のように計算できる。

$$\sigma_c = f_t + f_c \cdot \tau_c \quad (3)$$

$$(T_c/K_c)^2 = f_t + f_c \cdot (N_c/A_c)^2 \quad (4)$$

圧縮破壊の場合の相関関係は以下のように計算できる。

$$\sigma_c = f_c - f_c \cdot \tau_c \quad (5)$$

$$(T_c/K_c)^2 = f_c - f_c \cdot (N_c/A_c)^2 \quad (6)$$

ここに、 f_c :コンクリートの圧縮強度、 f_t :コンクリートの引張強度、 A_c :コンクリート断面積、 K_c :コンクリートのねじり係数、 τ_c :コンクリートの垂直応力度、 σ_c :コンクリートのせん断応力度

(3) 累加強度：従って CFT 部材の軸力とねじりモーメントの最大耐荷力は鋼とコンクリートの個々の耐荷力を単純に累加して次式で計算した。

$$N_{CFT} = N_S + N_C \quad (7)$$

$$T_{CFT} = T_S + T_C \quad (8)$$

実験結果と計算値との比較を図 - 16 に示す。高強度コンクリートを充填した軸力の高いケースを除いて、実験結果は単純累加の結果と大方一致した。

4. まとめ

本研究は、一定軸力と交番ねじりを受ける CFT 柱の基本的な力学的特性を把握する目的で行い、軸力とねじりモーメントの相関曲線を累加強度で計算した。載荷実験結果と累加強度による計算結果の比較から以下の主要な結論を得た。

4.1 結論

- (1) CFT 試験体の終局状態は、鋼管に局部座屈が生じ、充填コンクリートは交差のひび割れが生じ、終局状態でコンクリートが圧壊していた。
- (2) 鋼管とコンクリートのひずみはねじり率が小さい時は、両者がほぼ同じであったが、高強度コンクリートで軸力が大きいケースでは、計算値と実験値が一致しなかった。

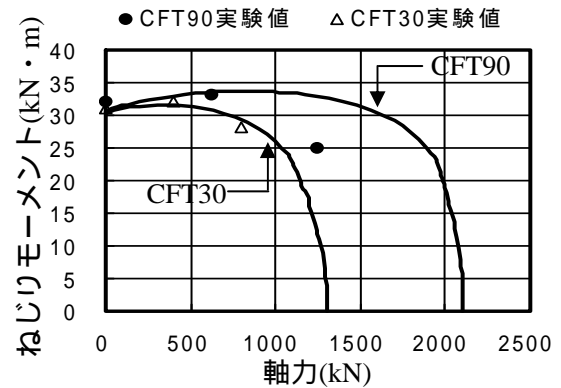


図 - 16 CFT 柱 T - N 相関曲線

これは、ねじり率が小さい段階でコンクリートが破壊してねじりモーメントと軸力をその後主に鋼管だけで負担したことが理由だと考える。載荷実験において、終局状態で鋼管に大きな座屈変形を観察した。

- (3) 今回、高強度コンクリートを充填した軸力の高いケースを除いて、累加強度で試験体の耐荷力をほぼ算定できた。

4.2 今後の課題

今回の結論は試験体数も少なく、一般的な結論に至らない懸念もある。今後はさらに追加実験を行い、また有限要素法による解析も併せて詳細な検討を加えていきたい。

参考文献

- 1) 鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン, 土木学会構造工学委員会, 平成元年
- 2) Jehyun BECK, Osamu KIYOMIYA: Fundamental Pure Torsional Properties of Concrete Filled Circular Steel Tube, 土木学会論文集, V 部門, pp.285-296, Aug.2003
- 3) 中井博ほか: 曲げとねじりを受けるコンクリート充填円形断面鋼管の実験的研究, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.85-97, 1999.1
- 4) 吉川 弘道編: 鉄筋コンクリートの解析と設計 限界状態設計法の考え方と適用, 丸善株式会社, 平成 7 年 6 月