

鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造の研究開発



菊田 繁美*1

千葉 脩*1 渡辺 秀仁*2
羽鳥 敏明*1 石川 勝美*2
山内 茂一*1 岩下 静司*2
三輪 明広*3 荒井 豊人*2
濱野 輝久*2 桑 素彦*2

概 要

超高層建築物に適用できる架構形式として、鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱と鉄骨コンクリート梁により構成される鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造の研究開発を行った。鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造は、鋼管コンクリート構造（CFT構造）に対して耐火性と経済性を高め、鉄筋コンクリート構造に比べて大きな空間を構成し、鉄骨構造に比べて居住性や経済性に優れている。本報告は鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱部材および新しく考案したリブ付きダイヤフラムを用いた柱梁部分架構の力学性能を把握するために行った実験結果を取りまとめたものであり、以下の結果が得られた。

- ①鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱は、エネルギー吸収能力に富む履歴ループを示し、曲げ耐力は断面分割法および一般化累加強度で適切に評価できることが判明した。
- ②充填コンクリートの拘束効果により、リブ付きダイヤフラムの剛性および強度が増大した。
- ③柱梁部分架構は優れた変形能力を有し、曲げ耐力は断面分割法により適切に評価できることが判明した。

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE WITH BUILT-IN REINFORCING BARS

Shigemasa KIKUTA*1 Hidehito WATANABE*2
Osamu CHIBA*1 Katsumi ISHIKAWA*2
Toshiaki HATORI*1 Shizushi IWASITA*2
Shigekazu YAMAUCHI*1 Toyohito ARAI*2
Akihiro MIWA*3 Motohiko KUWA*2
Teruhisa HAMANO*2

The structural system composed by concrete filled steel tube column with built-in reinforcing bars and the steel concrete beam was researched and developed as construction type which was able to be applied to the super-high rise building. This structural system improves the fireproof and the economy to the concrete filled tube structure (CFT structure), composes a big space compared with reinforced concrete structure, and is excellent in the habitability and the economy compared with steel structure. This report was the experimental result to grasp the mechanical performance of the concrete filled steel tube columns with built-in reinforcing bars and the beam column sub-assembly with diaphragms in which the rib newly designed was arranged. The following results were obtained.

It was confirmed that the load-deflection characteristic of the concrete filled steel tube columns with built-in reinforcing bars showed the stabilized hysteresis loops as efficient energy absorption and the flexural strength of these columns could be estimated appropriately by stress block method and superposed strength method.

The rigidity and strength of the diaphragm with the rib have increased by the confined effect of the concrete.

It was confirmed that the beam column sub-assembly possesses efficient ductility and the ultimate flexural strength of this sub-assembly could be estimated appropriately by stress block method.

*1 技術研究所 *2 構造設計部 *3 生産技術開発部

*1 Technical Research Institute *2 Structural Engineering Dept. *3 Architectural Technology Dept.

鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造の研究開発

菊田 繁美*1 渡辺 秀仁*2
 千葉 脩*1 石川 勝美*2
 羽鳥 敏明*1 岩下 静司*2
 山内 茂一*1 荒井 豊人*2
 三輪 明広*3 桑 素彦*2
 濱野 輝久*2

1. はじめに

鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造は図-1.1に示すように鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱と鉄骨コンクリート梁により構成されており、超高層建築物に適用できる架構形式である。鋼管コンクリート構造（CFT構造）に対して耐火性と経済性を高めた構造であり、鉄筋コンクリート構造に比べて大きな空間を構成でき、鉄骨構造に比べて居住性や経済性に優れている。本報告は鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱部材および新しく考案したリブ付きダイヤフラムを用いた柱梁部分架構の力学性能を把握するために行った一連の実験についての報告である。

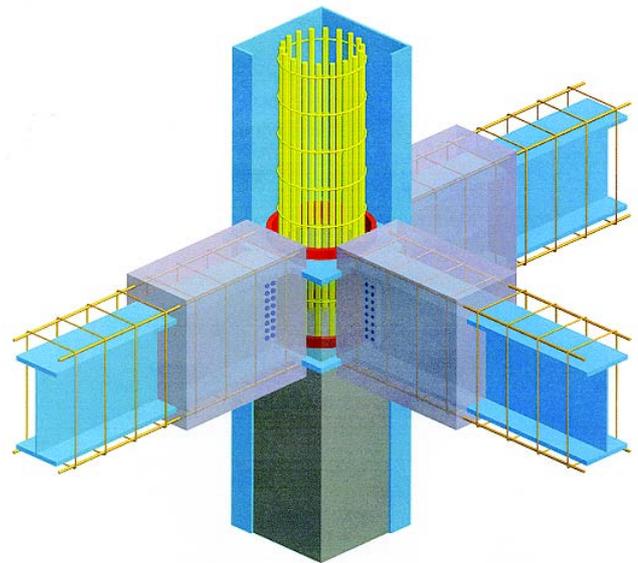


図-1.1 鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱と鉄骨コンクリート梁架構

2. 実験概要

実験は図-2.1に示すように鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱部材、リブ付きダイヤフラム要素実験および柱梁部分架構実験の3シリーズで構成されている。鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱部材の実験は、曲げせん断性能を把握し耐力評価法を検討するためのものである。リブ付きダイヤフラム要素実験は、コンクリートが充填された柱梁接合部におけるリブ付きダイヤフラムの耐力を検討するためのものである。柱梁部分架構実験は、鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱と鉄骨コンクリート梁をリブ付きダイヤフラムで接合した標準的な架構の耐震性能を把握するためのものである。

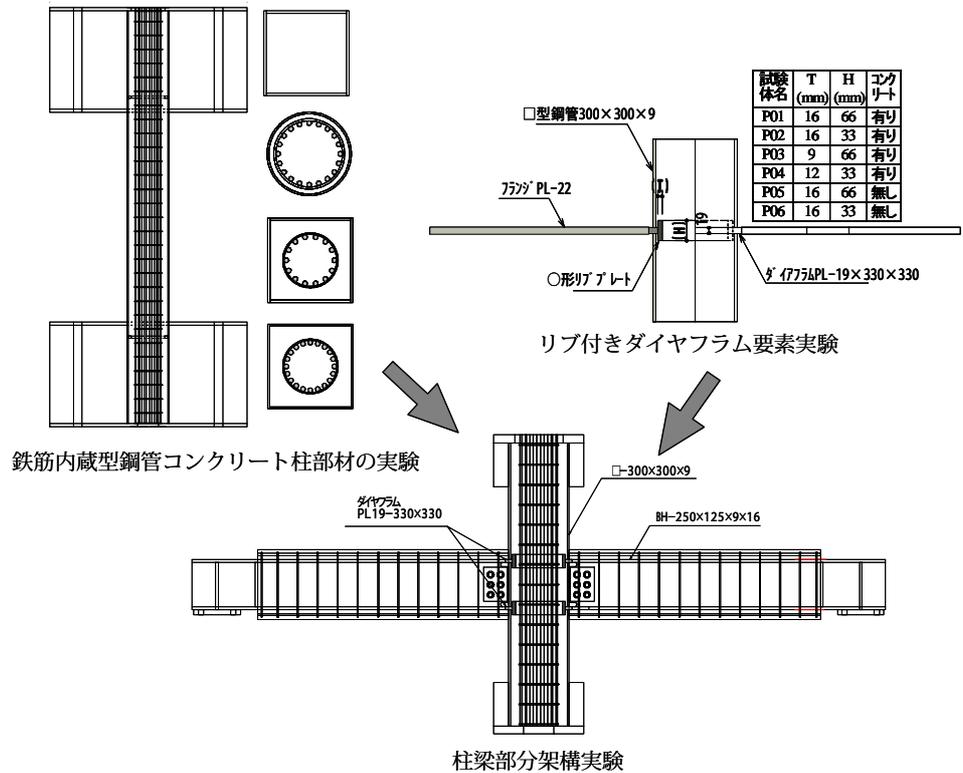


図-2.1 実験概要

*1 技術研究所 *2 構造設計部 *3 生産技術開発部

3. 鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱実験

3.1 試験体

試験体の形状を図-3.1に示す。試験体は超高層建築物の下層階柱を対象とした5体である。縮尺は約1/2.5、せん断スパン比は2.5である。CFT04とSCFT02～04は矩形断面柱であり、SCFT01は円形断面柱である。

CFT04は鋼管コンクリート柱であり、SCFT01～04は円形配筋の主筋を内蔵した鋼管コンクリート柱である。

SCFT03,04は鋼管を薄くし、CFT04と鋼材断面積がほぼ同じになるように鉄筋を配筋した。SCFT02はさらに鋼管を薄くし、最大限の鉄筋を配筋したものであり、SCFT01と鋼材断面積がほぼ同じである。

材料試験結果を表-3.1に示す。コンクリートは強度が約60N/mm²の高強度コンクリートとした。

3.2 加力方法

加力装置及び加力スケジュールを図-

表-3.1 材料試験結果

コンクリート	割線剛性 ×10 ⁴ N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
CFT04	3.27	60.6	3.61
SCFT01	3.34	58.1	4.67
SCFT02	3.39	59.7	3.81
SCFT03	3.54	63.6	4.10
SCFT04	3.61	61.9	3.57

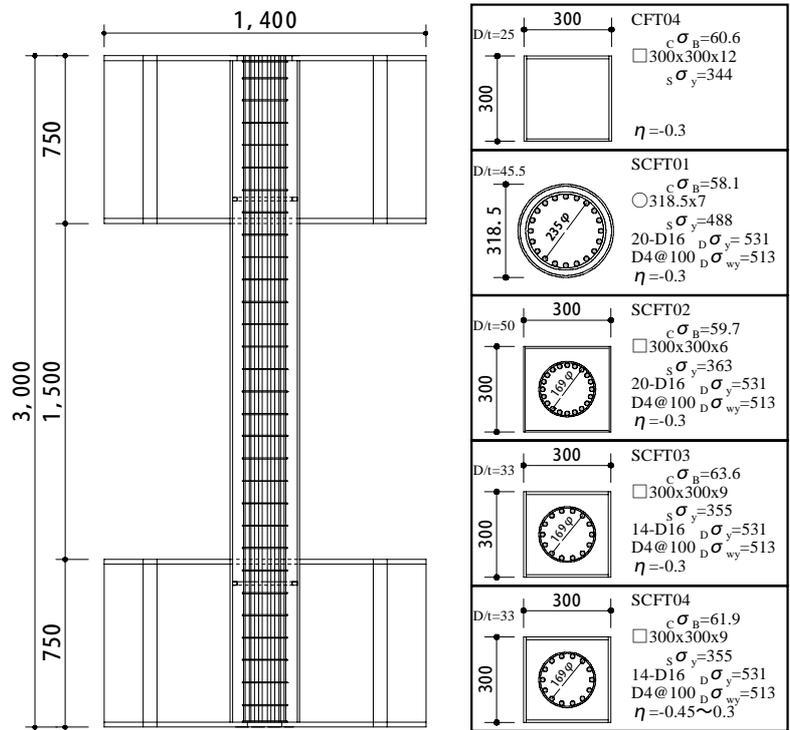
鋼材	ヤング係数 ×10 ⁵ N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
PL12	2.06	344	544
PL9	2.04	355	521
PL6	2.02	363	526
PL7*	1.92	488	558
D16	1.92	531	698
D4*	2.01	513	538

* : 0.2%オフセット値



図-3.2 加力装置

3.2、3.3に示す。試験体中央部を反曲点とする逆対称繰返し加力を行った。CFT04とSCFT01～03は中柱を対象として一定圧縮軸力を作用させ、SCFT04は外柱を対象として図-3.4に示すように水平力の1次関数とした変動軸力を作用させた。



$c \sigma_B$: コンクリートの圧縮強度(単位 N/mm²)

$s \sigma_y, D \sigma_y, D \sigma_{wy}$: 鋼管, 主筋, せん断補強筋の降伏強度(単位 N/mm²)

η : 軸力比 = $N / (A_c \cdot c \sigma_B + A_s \cdot s \sigma_y + A_D \cdot D \sigma_y)$

図-3.1 試験体形状

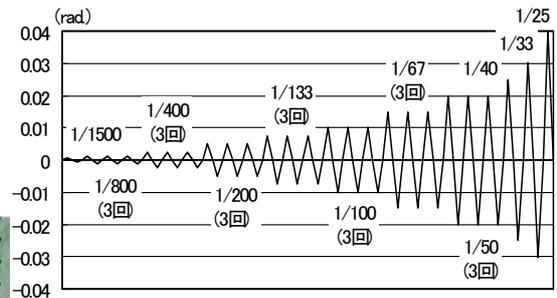


図-3.3 加力スケジュール

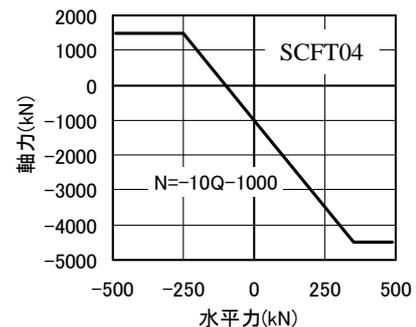


図-3.4 変動軸力

表-3.2 実験値と計算値の比較

		CFT04	SCFT01	SCFT02	SCFT03	SCFT04
鋼管圧縮降伏 モーメント sMy(kN・m)	正加力	474 (499)	288 (249)	388 (342)	378 (421)	240 (328)
	負加力	-482 (499)	-304 (249)	-388 (342)	-437 (421)	---
鉄筋圧縮降伏 モーメント DMy(kN・m)	正加力	---	458 (355)	528 (540)	620 (639)	539 (576)
	負加力	---	442 (355)	-539 (540)	-697 (639)	---
最大モーメント Mu(kN・m)	正加力	881 (720)	798 (656)	622 (580)	763 (680)	676 (646)
	負加力	-910 (720)	-798 (656)	-623 (580)	-769 (680)	-607 (560)

()内は、新都市ハウジング協会指針によるコンクリートのコンファインド効果を用いた断面分割法による計算値

3.3 実験結果

各試験体の荷重-変形関係を図-3.5に示す。図中にはコンクリートのコンファインド効果をコンクリート充填鋼管構造設計施工指針1(建築学会指針)とCFT構造技術指針・同解説2(新都市指針)をそれぞれ用いた一般化累加強度を併記した。軸力比を0.3としたCFT04、SCFT01~03は変形角1/200rad. 近傍で鋼管が圧縮降伏し、1/133rad. 近傍で鉄筋が圧縮降伏した。圧縮軸力比を最大で0.45とした変動軸力のSCFT04は鋼管および主筋が1/400rad. と1/150rad. で圧縮降伏した。矩形断面柱試験体は1/50rad. 近傍で最大耐力を呈したが、円形断面柱試験体は1/25rad. に至っても耐力が上昇し続けた。いずれの試験体ともエネルギー吸収能力に富む紡錘形の履歴ループを示した。最大耐力を一般化累加強度で評価する場合、コンクリートのコンファインド効果として建築学会指針式に比べて、新都市指針式を用いた方が実験結果を適切に評価できた。

諸強度について、実験結果と平面保持を仮定した断面分割法による計算結果の比較を表-3.2に示す。断面分割法はコンクリートのコンファインド効果に新都市指針式を用い、鋼材には歪硬化を考慮した。断面分割法による最大モーメントは図-4.5に示した一般化累加強度(新都市指針)にほぼ一致した。鋼管および鉄筋の降伏モーメントについては円形断面のSCFT01の実験値が計算値を20~30%程度上回ったが、矩形断面試験体では実験値と計算値はほぼ一致した。最大モーメントについて実験値と断面分割法の計算値を比較すると、CFT04とSCFT01は実験値が20~25%程度上回っており、SCFT02~04では実験値が5~15%程度上回った。

以上より、鋼管および鉄筋の降伏モーメントは断面分割法により推定でき、最大モーメントは断面分割法および一般化累加強度で適切に評価できるものと考えられる。

4. リブ付きダイヤフラム要素実験

4.1 試験体

リブ付きダイヤフラム要素試験体を図-4.1に示す。試験体は梁フランジと柱梁接合部のリブ付きダイヤフラム部分を対象とした縮尺約1/2.5の模型である。試験体はP01~P06の6体であり、リブ幅、リブ厚、充填コンクリート

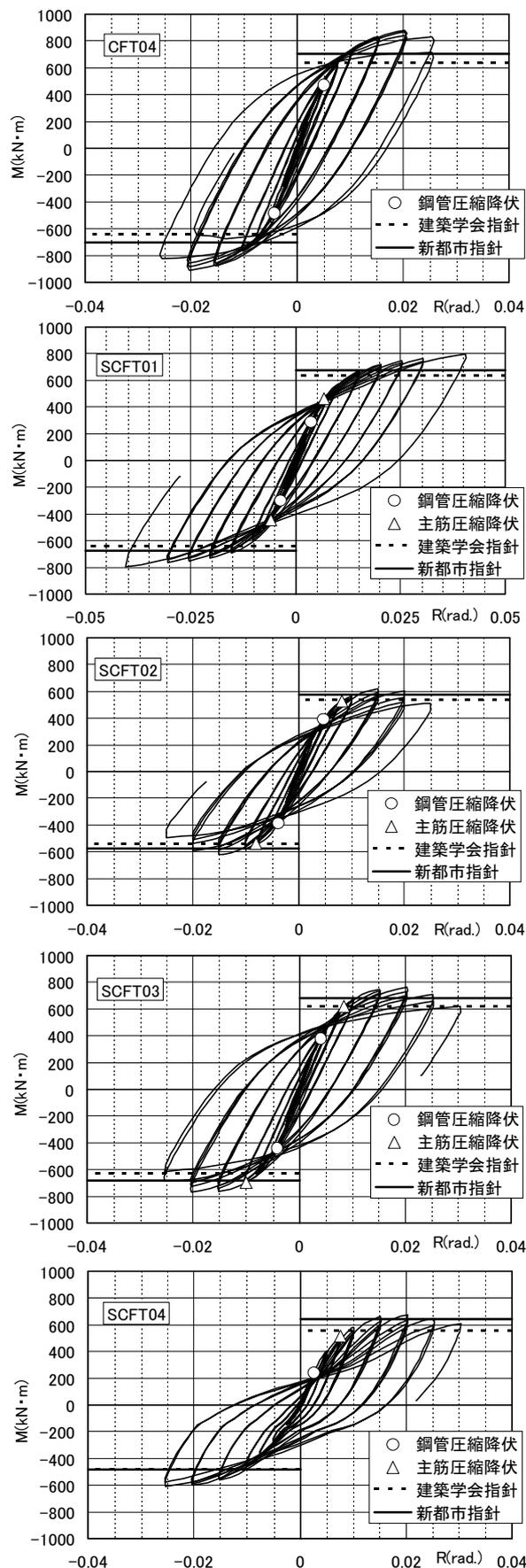


図-3.5 荷重-変形関係

の有無をパラメータとした。P01試験体を前述した部分架構試験体と同一寸法の基準試験体とし、基準試験体に対してP02はリブ幅を50%、P03はリブ厚を56%、P04はリブ幅とリブ厚を50%と75%に減少させた。P05とP06試験体はP01とP02から充填コンクリートを無くしたものである。

材料試験結果を表 - 4.1 に示す。充填コンクリートは58.9N/mm²の高強度コンクリートである。

4.2 加力方法

加力装置を図 - 4.2 に示す。片側フランジを反力床に固定し、他方フランジを引張る単調載荷である。

4.3 実験結果

各試験体の荷重-変形関係を図 - 4.3 に示す。変形はフランジ間の間隔800mmにおける伸び変形である。コンクリートを充填したP01~P04は、リブの内側が引張降伏した後、フランジが引張降伏した。充填コンクリートの無いP05とP06はリブの内側が引張降伏したが、フランジは引張降伏しなかった。P01とP05、P02とP06を比較すると充填コンク

表 - 4.1 材料試験結果

鋼材	ヤング係数 ×10 ⁵ N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
PL9	2.09	425	572
PL12	2.06	352	534
PL16	2.09	394	562
PL19	2.06	400	540
PL22	2.09	379	550

コンクリート	割線剛性 ×10 ⁴ N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
	3.54	58.9	4.3

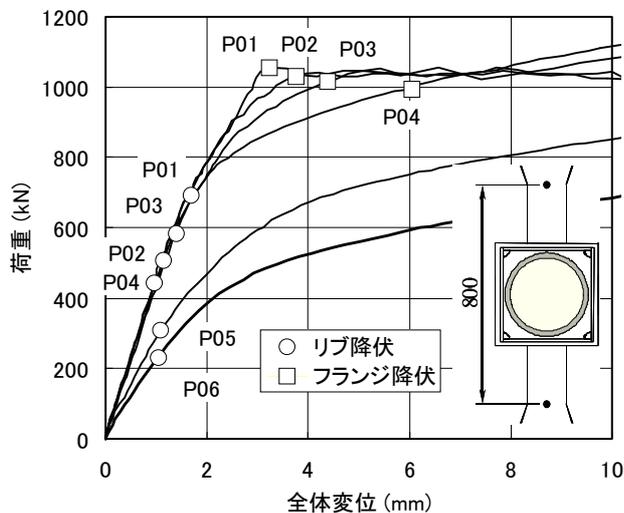


図 - 4.3 荷重-変形関係

リートがリブ付きダイヤフラムの初期剛性と耐力を大きく増大させることが判明した。

リブ内面の歪度分布について後述する部分架構試験体SCFTJ01と同寸法のP01試験体の比較を図 - 4.4 に示す。SCFTJ01のフランジ引張荷重は、フランジの歪を用いて計算したものである。両者ともほぼ同じ歪度分布を示しており、45°方向において引張歪が増大し、引張降伏した。

従って、両側フランジを引張る加力方法により、実架構のダイヤフラムの性状を把握できている。

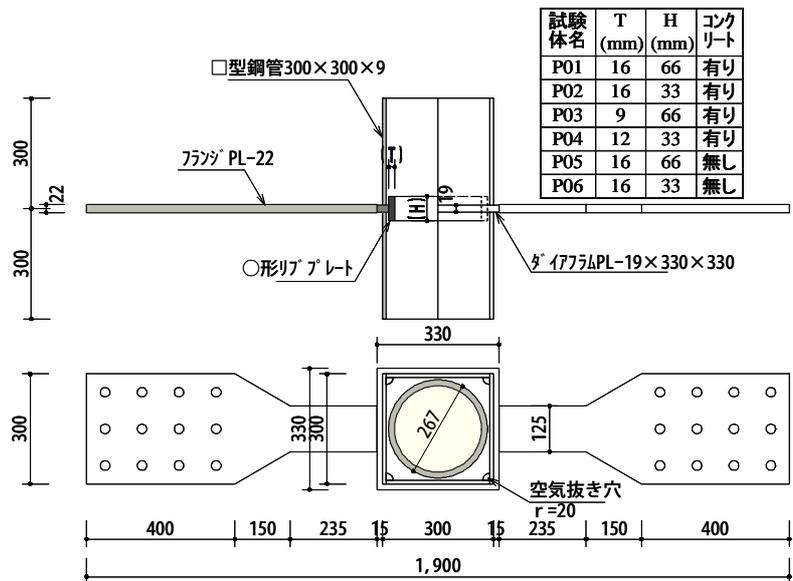


図 - 4.1 リブ付きダイヤフラム要素試験体



図 - 4.2 加力装置

各試験体のリブ内面の歪度分布を図-4.5に示す。充填コンクリートの有るP01～4と充填コンクリートの無いP05、P06を比較すると、充填コンクリートの有る試験体は全て45°方向において引張歪が増大し、充填コンクリートの無い試験体は加力と直交する90°方向において引張歪が増大した。充填コンクリートがリブの変形を拘束するために応力集中部位が変化したものと考えられる。

以上から、リブ付きダイヤフラムは充填コンクリートの拘束効果により剛性および強度が増大するため、充填コンクリートの無い場合に比べて鋼材量を大幅に低減できることが判明した。

5. 柱梁部分架構実験

5.1 試験体

柱梁部分架構試験体の形状を図-5.1に示す。試験体は縮尺約1/2.5の模型である。柱は円形に配筋された鉄筋を内蔵する角形鋼管コンクリート造である。梁は鉄筋コンクリートにH型鉄骨を内蔵したものであるが、主筋を柱に定着しない鉄骨コンクリート造である。柱梁接合部のダイヤフラムにはコンクリート断面積に対して55%を占める内径235mmの開口を設けて柱主筋を配筋した。ダイヤフラム内側に厚さ16mmで高さ66mmの円筒形鋼板を用いてリブ状に補強した。加力の支点間距離は柱が1200mm、梁が2400mmである。

材料試験結果を表-5.1に示す。柱には64.1N/mm²の高強度コンクリート、梁には26.7N/mm²のコンクリートを用いた。

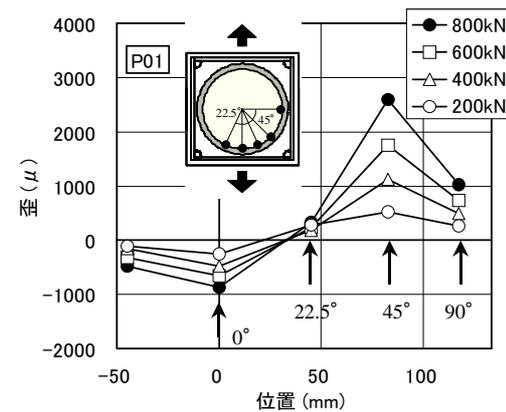
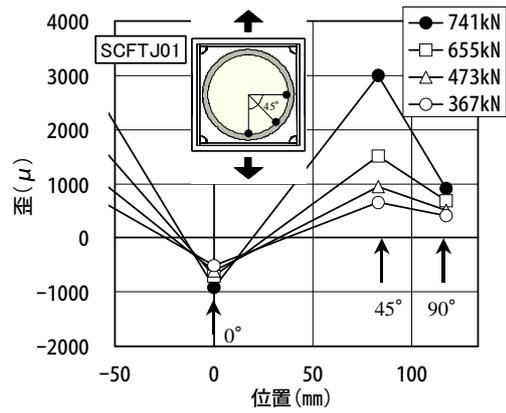


図-4.4 リブの歪度分布
(部分架構と要素試験体の比較)

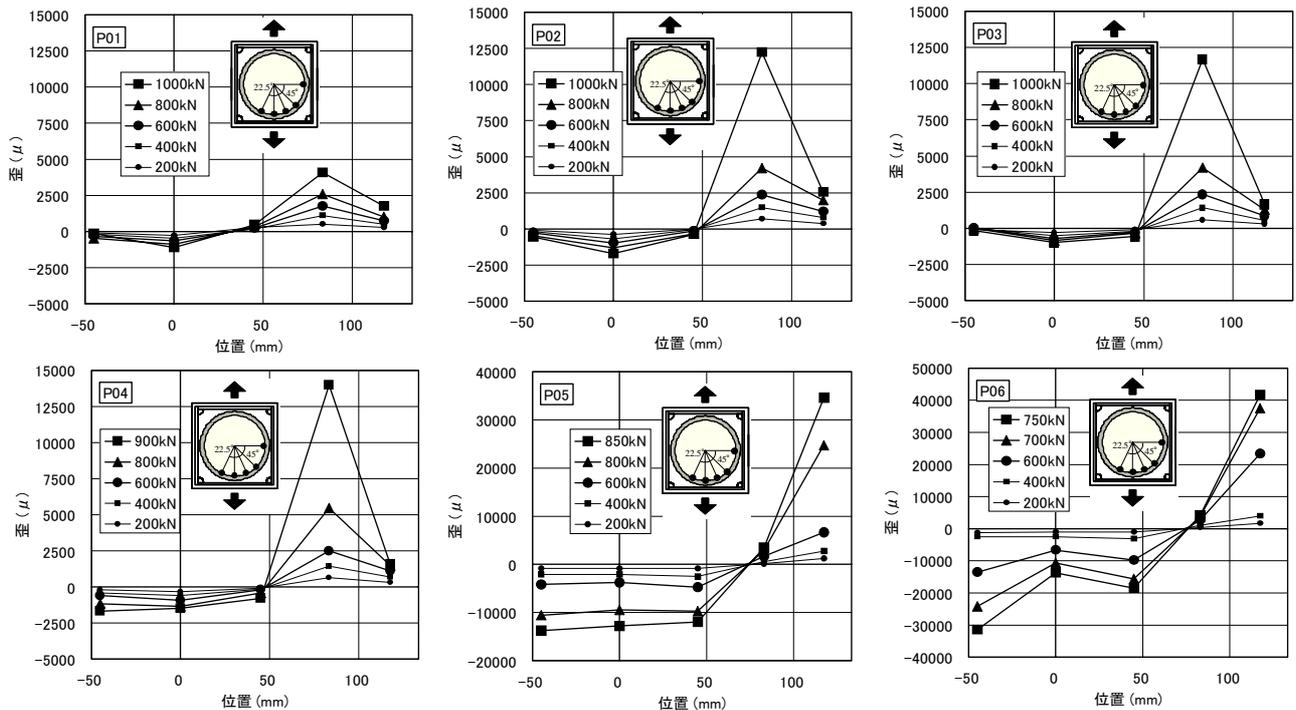


図-4.5 リブの歪度分布

5.2 加力方法

加力装置及び加力スケジュールを図-5.2、5.3に示す。柱梁部分架構は柱脚をピン支持、梁の支点をピンローラー支持とし、柱頭に正負繰り返し漸増荷重を作用させた。軸力としては柱の軸耐力の0.3倍を作用させた。

5.3 実験結果

実験で得られた荷重-変形関係と定常履歴ループの等価粘性減衰定数を図-5.4および図-5.5に示す。変形角1/400rad.で梁に数本の曲げひび割れが発生したが、その後の進展はほとんどみられず、梁端部コンクリートと柱面の目開きのみが拡大した。1/150rad.で梁下フランジが引張降伏した後、1/100rad.で梁上フランジの引張降伏と梁上端コンクリートの圧壊が発生した。その後、紡錘形の履歴ループ形状となり、等価粘性減衰定数が大きくなった。変形角1/33rad.で柱梁接合部の鋼管が引張降伏して最大耐力を呈し、その時点での等価粘性減衰定数は0.28であった。実験終了時まで梁下端コンクリートには明瞭な圧壊が発生しなかった。図-5.4に併記した平面保持仮定の断面分割法による梁の曲げ耐力計算値に比べて、実験の最大耐力は約1.1倍となっており、1/25rad.に至っても計算値と同等以上の耐力を保持していた。最終的には変形角1/25rad.の繰り返し3回目に梁フランジが破断した。

柱梁接合部のダイヤフラム補強リブ内面の水平方向の

歪分布を図-5.6に示す。加力方向に対して0°と90°位置に比べて45°位置の歪が大きく、変形の増大とともに歪が集中した。この現象は、コンクリートの拘束効果で90°位置の歪が抑制されたため45°位置に歪が集中したものであり、補強リブが柱梁接合部の強度と剛性の増大に有効に寄与したものと考えられる。

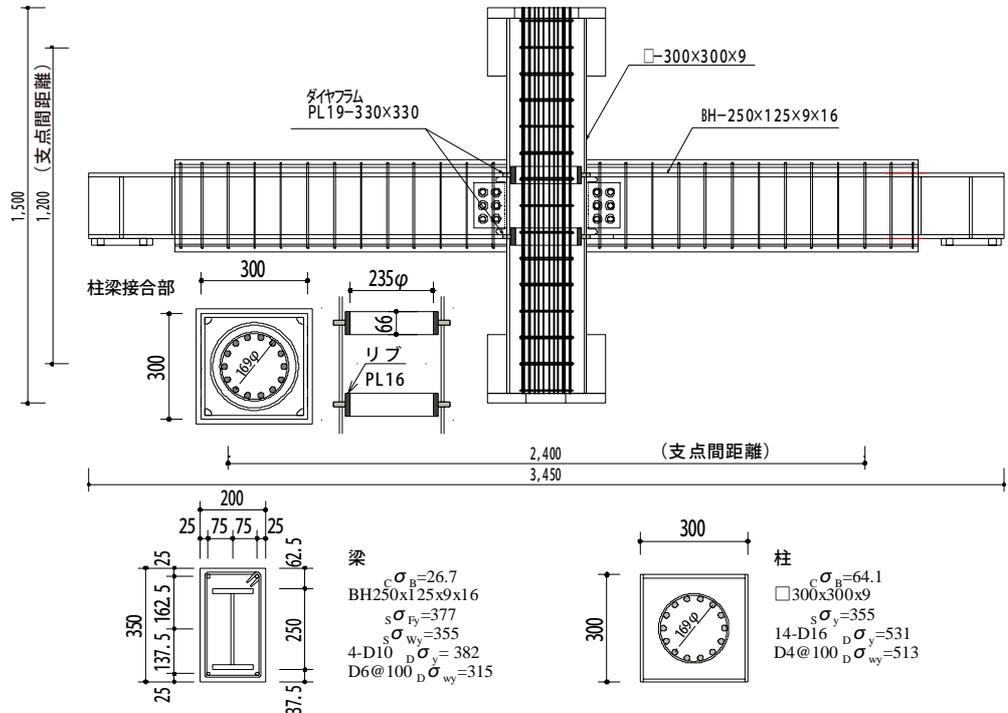


図 - 5.1 柱梁部分架構試験体形状

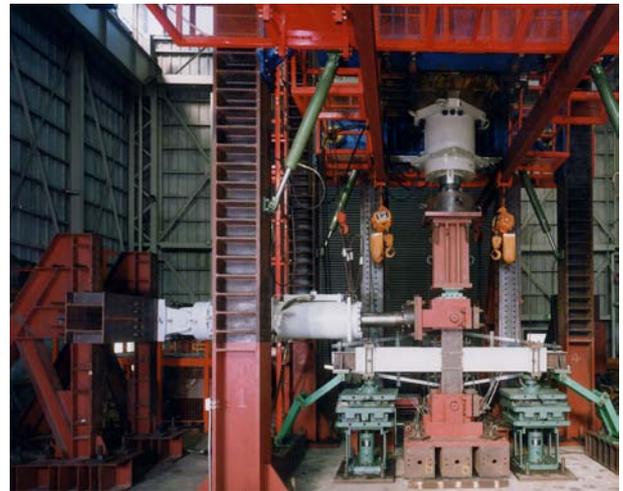


図 - 5.2 加力装置

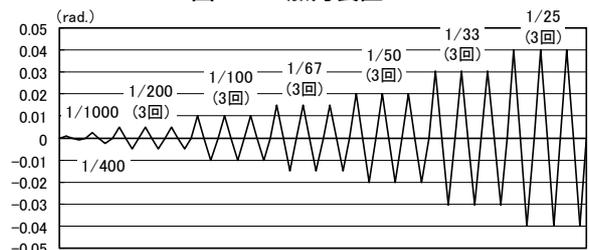


図 - 5.3 加力スケジュール

表 - 5.1 材料試験結果

コンクリート	割線剛性 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$	圧縮強度 N/mm^2	割裂強度 N/mm^2
柱	3.49	64.1	4.56
梁	2.64	26.7	2.33

鋼材	ヤング係数 $\times 10^5 \text{N/mm}^2$	降伏強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2
PL19	2.09	390	542
PL16	2.09	377	545
PL9	2.04	355	521
D16	1.92	531	698
D10	1.81	382	542
D6*	1.71	315	456
D4*	2.01	513	538

* : 0.2%オフセット値

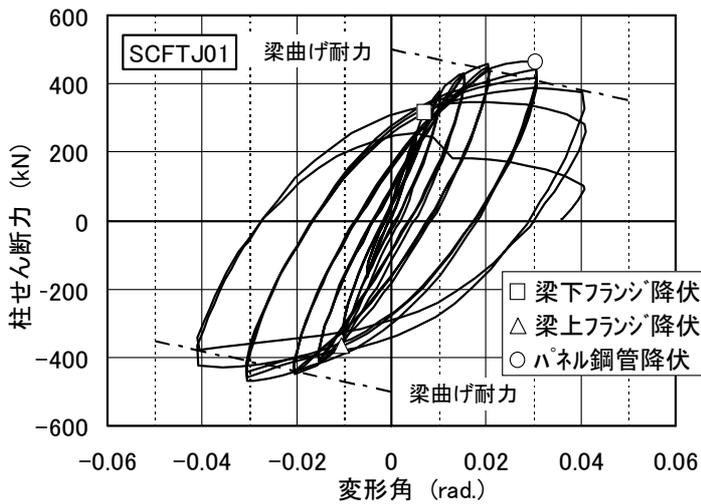


図 - 5.4 荷重-変形関係

柱梁接合部変形の全体変形に対する割合を図-5.7に示す。柱梁接合部変形は、変形角 $1/400\text{rad.}$ から $1/25\text{rad.}$ に至るまで全体変形の約20%と一定値を示しており、接合部への変形の集中はみられなかった。

6. まとめ

鉄筋内蔵型鋼管コンクリート構造の実験を行い、以下の結論を得た。

- ①鉄筋内蔵型鋼管コンクリート柱は、エネルギー吸収能力に富む紡錘形の履歴ループを示した。
- ②鋼管および鉄筋の降伏モーメントは断面分割法により推定でき、最大モーメントは断面分割法および一般化累加強度で適切に評価できた。
- ③リブ付きダイヤフラムは、充填コンクリートの拘束効果により剛性および強度が増大した。
- ④柱梁部分架構試験体は梁の曲げ降伏によりメカニズムを形成し、 $1/25\text{rad.}$ の変形角に至るまで耐力低下の少ない靱性に富む履歴性状を示した。
- ⑤梁の曲げ耐力は、断面分割法により適切に評価できた。

【参考文献】

- 1)日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，1997.10.
- 2)新都市ハウジング協会：CFT 構造技術指針・同解説，2000.8.

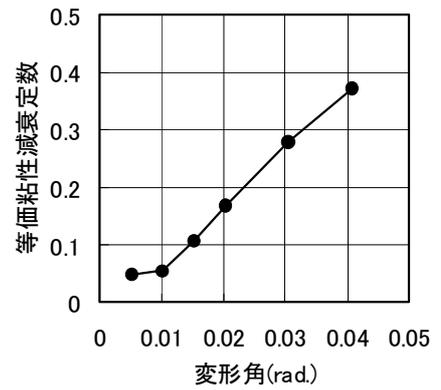


図 - 5.5 等価粘性減衰定数

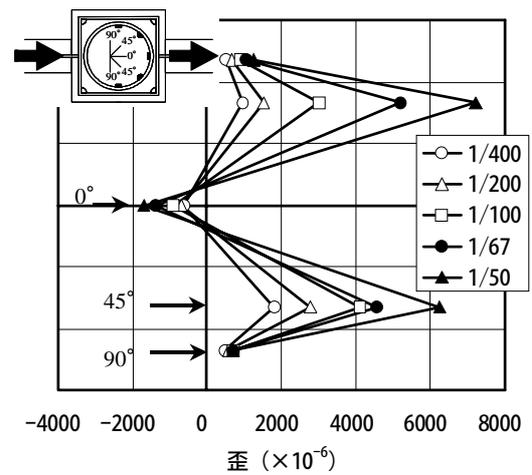


図 - 5.6 補強リブの歪分布

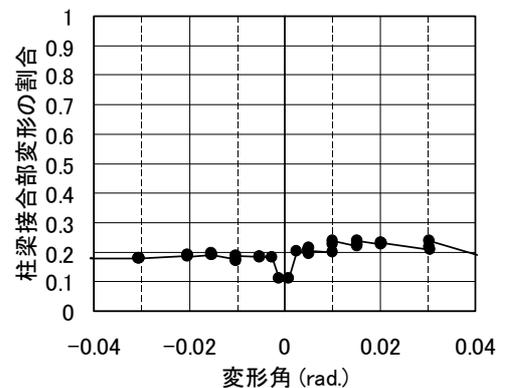


図 - 5.7 柱梁接合部変形の割合