

# 鉄筋コンクリート充填鋼管のせん断，曲げ特性

毛利栄一郎\*，塩井 幸武\*\*，長谷川 明\*\*\*

## Performance of Reinforced Concrete Filled Tube for Shear force and Bending Moment

Eiichiro MOHRI, Yukitake SHIOI and Akira HASEGAWA

### Abstract

In a large-scale earthquake in recent years, many reinforced concrete (RC) structures were seriously damaged.

It is necessary to improve structures to prevent such damage.

This paper reports the results of the compression shearing tests of Concrete Filled Tube (CFT) and Reinforced Concrete Filled Tube (RCFT) on the physical characteristics (strength, ductility, composition, etc.).

**Keywords:** Reinforced concrete filled tube (RCFT), Shearing test, Bending test

### 1. はじめに

三陸はるか沖地震（1994年12月）、兵庫県南部地震（1995年1月）による土木構造物の被害は、予想を遥かに超えるものだった。地震後、多くの鉄筋コンクリート（RC）橋脚では曲げせん断破壊による倒壊、または、大きな残留変形が見られ、多大な人命、財産を失った。人命救助や復旧作業にも多大な費用と時間を費やした。このような破壊を生じないような、力学特性、経済性に優れた土木構造物部材の開発が急務である。そこで過去に実施されたRCの配筋に関する研究に引き続いて、変形性能の高い構造物として、鉄筋コンクリート充填鋼管（RCFT）、コンクリート充填鋼管（CFT）について研究することにした。本試験は、RC、RCFT、CFTの試験体でせん断試験と曲げ試験を行うものであ

る。せん断試験については圧縮試験時に見られるせん断破壊（図-1）で評価を行ったため圧縮せん断試験と呼ぶ。本文はそれらの試験から得られた強度特性、変形性能、破壊状況などについて報告するものである。

### 2. 鉄筋コンクリート充填鋼管構造の概要

鋼材とコンクリートという異種材料を組み合わせて利用することの利点は、それぞれの材料が単独では発揮できない優れた性能を作り出すことにある。鋼材は引張領域での強度と変形性能に優れているが、圧縮領域では強度が座屈に支配される欠点がある。これに対して、コンクリート材料は圧縮強度が高いが、引張に弱い欠点がある。しかし、両者を合わせることで、充填コンクリートが三軸応力状態となり、耐荷力が増大する。また、充填コンクリートが鋼管の座屈を抑制することができる。これにより、圧縮、引張、曲げモーメントにも優れた構造物が作りだせる。

鋼材とコンクリートを組み合わせて優れた性能を発揮させるためには、両者を合成して一体

平成13年11月19日受理

\* 大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程・1年

\*\* 構造工学研究所・教授

\*\*\* 環境建設工学科・教授

化させる必要がある。そのために図-1に示す試験体と、鋼管内側のコンクリートとの合成効果を高めるため鋼管内側にリブを付けた試験体も準備した(表-1)。

### 3. 圧縮せん断試験

#### 3.1 圧縮せん断試験概要

図-2に示す短柱試験体で圧縮せん断試験を行った。試験体は表-1に示すとおり、径厚比で分けた29種類とした。使用材料は鋼管にSSK400、主鉄筋(φ6mm)にSR235、帯鉄筋(φ3mm)に鋼線(SWRM6TM)である。リブ付

鋼管のリブの形状は高さ4mmの台形状で、鋼管の円周方向に36mmピッチで取り付けられている。

充填コンクリートの配合を表-2、表-3に示す。コンクリート強度は高強度コンクリート50.0 N/mm<sup>2</sup>、低強度コンクリート19.2 N/mm<sup>2</sup>とした。なお、混和剤には高性能AE減水剤と増粘剤を使用した。

試験は図-3に示す要領で、荷重制御方式で載

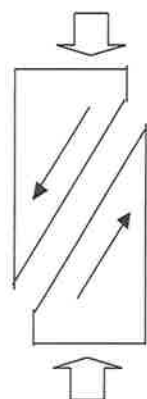


図-1 せん断破壊

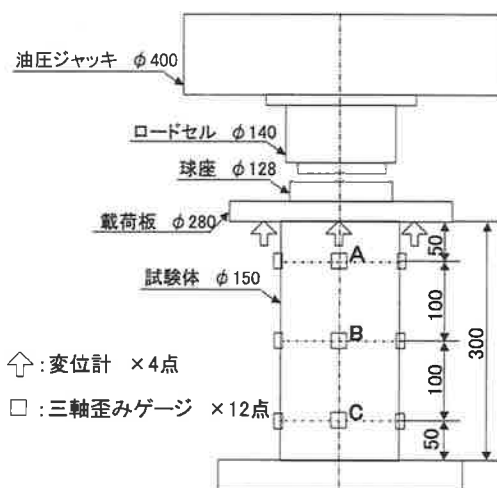


図-3 圧縮せん断試験の状況 (mm)

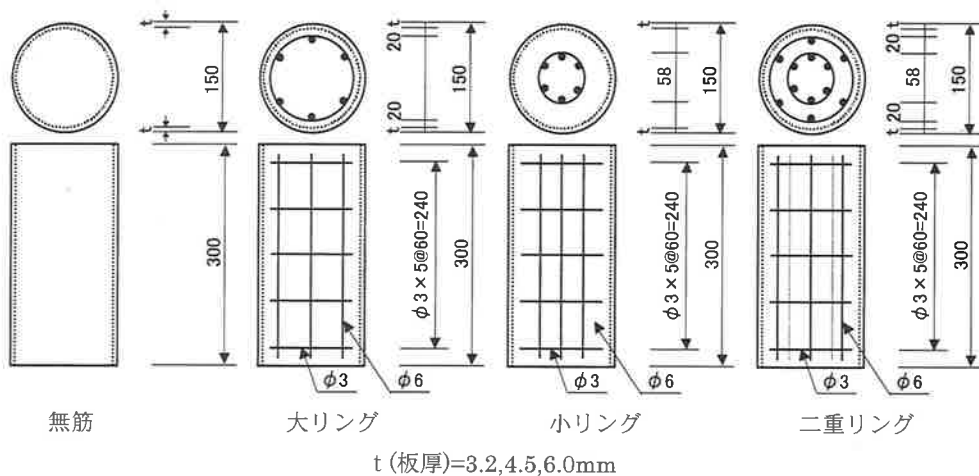


図-2 圧縮せん断試験体 (mm)

鉄筋コンクリート充填鋼管のせん断，曲げ特性

表-1 圧縮せん断試験の最大荷重，靱性率，合成効率

試験体名	鋼管厚さ (mm)	充填状況	最大荷重 (kN)	靱性率 $\delta_r/\delta_y$	靱性率 $\delta_{95}/\delta_y$	初期降伏時の 合成効果	最大荷重時の 合成効果
N32CH-C	3.2	中 空	492.49	2.7	3.3	—	—
N32HM-C	3.2	高強度コンクリート	1,517.02	1.4	1.6	1.47	1.17
N32LM-C	3.2	低強度コンクリート	975.41	1.7	9.1	1.24	1.16
N32LB-C	3.2	大 リ ン グ	1,052.61	4.6	11.0	1.05	1.15
N32LS-C	3.2	小 リ ン グ	1,041.63	4.3	8.1	1.30	1.08
N32LW-C	3.2	二 重 リ ン グ	1,139.33	4.5	10.1	1.31	1.14
N45CH-C	4.5	中 空	821.00	2.7	3.5	—	—
N45HM-C	4.5	高強度コンクリート	1,965.92	1.5	2.2	1.46	1.23
N45LM-C	4.5	低強度コンクリート	1,374.09	7.5	14.4	1.35	1.17
N45LB-C	4.5	大 リ ン グ	1,374.09	5.6	12.0	1.07	1.12
N45LS-C	4.5	小 リ ン グ	1,369.28	5.2	9.1	1.13	1.07
N45LW-C	4.5	二 重 リ ン グ	1,441.58	5.0	9.4	1.14	1.10
N60CH-C	6.0	中 空	959.12	4.5	5.5	—	—
N60HM-C	6.0	高強度コンクリート	1,829.47	1.8	2.8	1.37	1.07
N60LM-C	6.0	低強度コンクリート	1,375.46	6.9	8.8	1.23	1.08
N60LB-C	6.0	大 リ ン グ	1,509.47	9.4	13.1	1.06	1.12
N60LS-C	6.0	小 リ ン グ	1,472.68	7.6	10.6	1.06	1.06
N60LW-C	6.0	二 重 リ ン グ	1,565.48	7.1	11.3	1.06	1.10
R60CH-C	リブ付 6.0	中 空	1,079.89	8.0	9.7	—	—
R60HM-C	リブ付 6.0	高強度コンクリート	2,149.57	1.4	3.6	1.65	1.18
R60LM-C	リブ付 6.0	低強度コンクリート	1,576.78	8.5	8.9	1.37	1.12
R60LB-C	リブ付 6.0	大 リ ン グ	1,642.00	10.5	18.4	1.16	1.11
R60LS-C	リブ付 6.0	小 リ ン グ	1,669.47	5.1	8.4	1.34	1.10
R60LW-C	リブ付 6.0	二 重 リ ン グ	1,813.67	8.2	13.7	1.35	1.17
CHM	鋼管無し	高強度コンクリート	878.62	—	—	—	—
CLM	鋼管無し	低強度コンクリート	377.69	—	—	—	—
CLB	鋼管無し	大 リ ン グ	463.42	—	—	—	—
CLS	鋼管無し	小 リ ン グ	513.23	—	—	—	—
CLW	鋼管無し	二 重 リ ン グ	549.92	—	—	—	—

表-2 高強度コンクリートの配合 (1 m<sup>3</sup>)

水セメント比 (%)	空気量 (%)	水 (kg)	セメント (kg)	細骨材 1 (kg)	細骨材 2 (kg)	粗骨材 (kg)	混和剤 (kg)
44	11	185	425	598	255	837	4.675

表-3 低強度コンクリートの配合 (1 m<sup>3</sup>)

水セメント比 (%)	空気量 (%)	水 (kg)	セメント (kg)	細骨材 1 (kg)	細骨材 2 (kg)	粗骨材 (kg)	混和剤 (kg)
64	4.3	190	297	736	316	726	3.267

荷し、載荷速度 6 kN/sec、載荷ピッチ 200 kN とし、歪みが塑性域に入った後は 3 回繰り返し載荷とした。各荷重の上限と無荷重時には 30 秒間の荷重保持時間を設けた。測定項目は試験体の軸方向の変位、鋼管表面の歪み 12 点、充填コンクリートの歪み 3 点である。載荷の終了は試験体の耐荷力が最大の 80% を下回るか、変位が 40 mm 以上になったときとした。

### 3.2 圧縮せん断試験の結果

#### (1) 最大荷重

図-4~9 に充填したコンクリートの種類ごとに圧縮せん断試験の荷重-変位曲線を示す。最大耐荷力は鋼管の板厚が厚くなるにつれて高くなっている。配筋ごとに比較すると、二重リングを配したものがどの項目でも最も高い。また、RC 試験体では試験体の中心を鉄筋で補強した小リングが大リングよりも高いせん断耐力を保持したのに対し、RCFT では大リングとあまり差はみられなかった。鋼管の中にコンクリートを充填することで中空鋼管は、最大荷重後に変位が増大しても、高い耐荷力を保っているのがわかる。

#### (2) 靱性率

圧縮せん断試験の靱性率は表-1 に示す。靱性率は式-(1)、(2) より求めた。

$$\mu_r = \delta_r / \delta_y \quad (1)$$

$$\mu_{95} = \delta_{95} / \delta_y \quad (2)$$

ここで、

$\mu$ : 靱性率

$\delta_y$ : 初期降伏時時の変位

$\delta_r$ : 最大荷重時の変位

$\delta_{95}$ : 最大荷重 95% 時の変位

(1) 式は最大荷重時の靱性率、(2) 式は最大荷重 95% 時の靱性率を表す。 $\mu_r$  では、鋼管厚 6.0 mm が高く、次いで 4.5 mm、3.2 mm となった。配筋別では、大リングが高い靱性を示した。高強度 CFT の靱性が、低強度 CFT よりも低くなった。その理由として、充填コンクリートの荷重分担分が、鋼管よりも高いためにコンクリートの破壊が先行したことが原因と推測される。

次に、 $\delta_{95}$  では、ばらつきはあるが、鋼管厚 4.5 mm のものが高く、配筋では大リングが高い靱性を示した。 $\mu_r$  と  $\delta_{95}$  を比較すると、鋼管厚 4.5 mm の靱性率が大きく増大しているのがわかる。

このことから、径厚比 ( $D/t$ ) が終局限界状態での靱性の向上に強く関係すると考えられる。また、リブの効果については 6.0 mm の普通鋼管と比較すると、リブ付鋼管は  $\mu_r$ 、 $\mu_{95}$  ともの高い靱性を示している。

#### (3) 合成効果

合成効果は CFT、RCFT の最大荷重値を RC またはコンクリートの単純累加強度で除したも

鉄筋コンクリート充填鋼管のせん断，曲げ特性

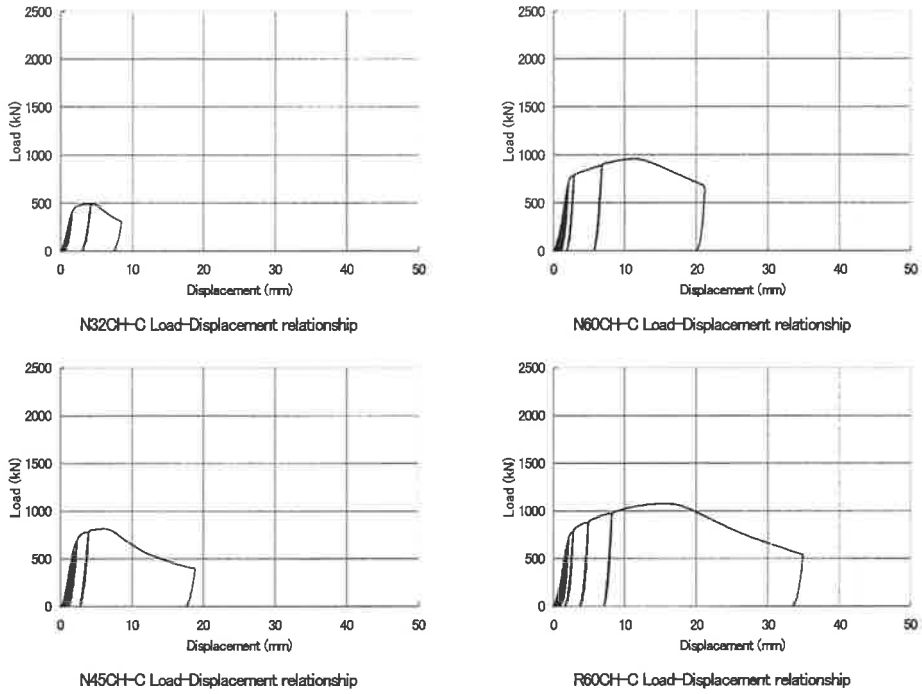


図-4 中空鋼管

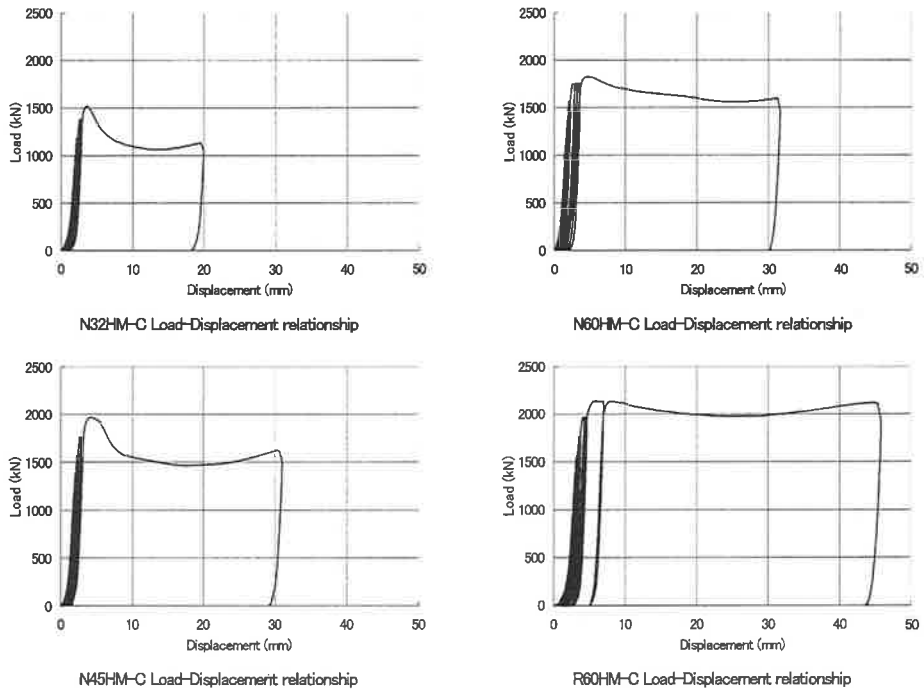


図-5 高強度コンクリート充填鋼管

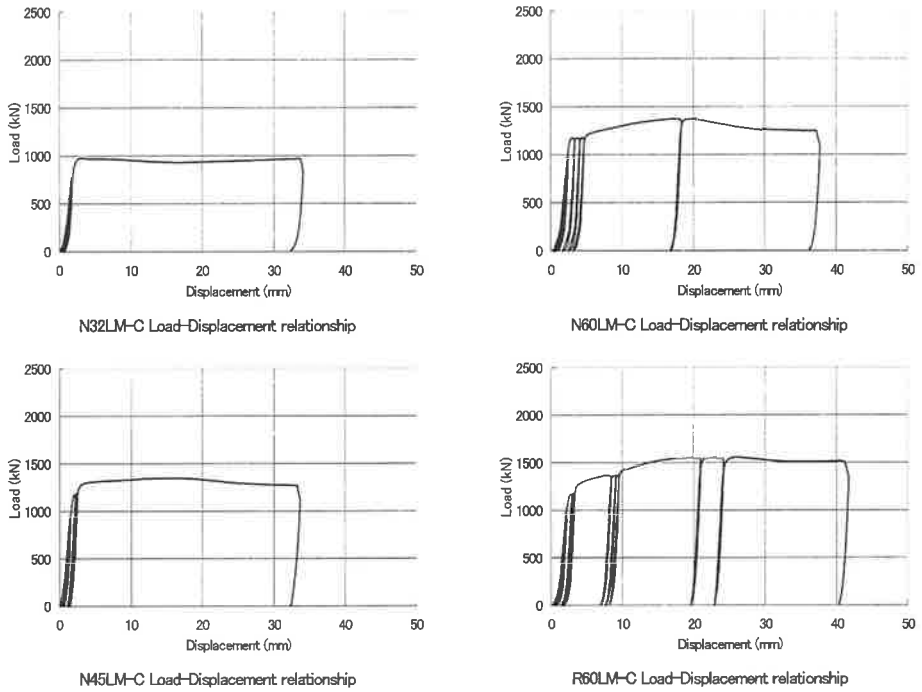


図-6 低強度コンクリート充填鋼管

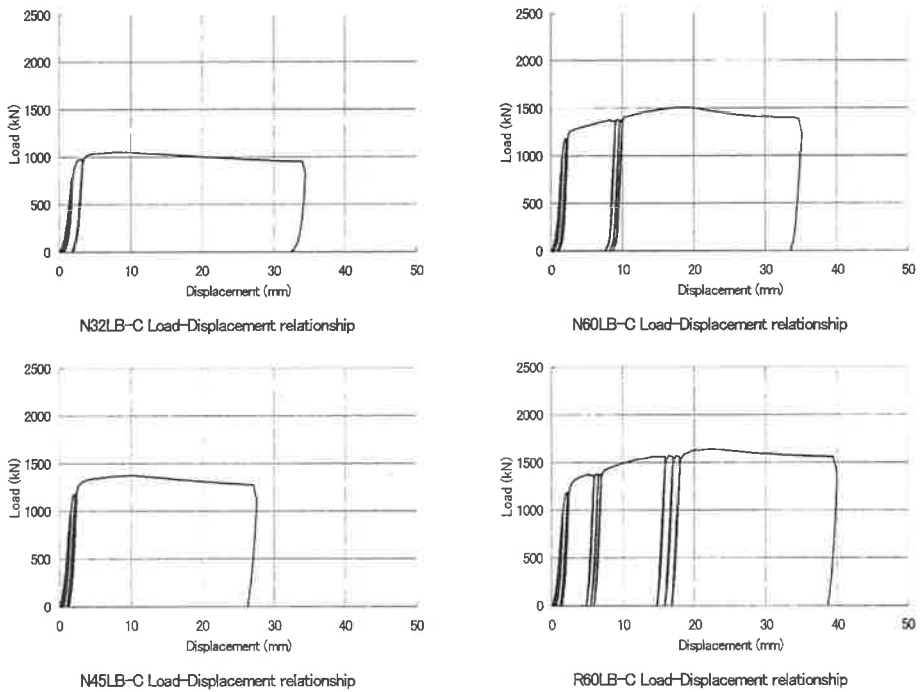


図-7 鉄筋コンクリート充填鋼管 (大リング)

鉄筋コンクリート充填鋼管のせん断，曲げ特性

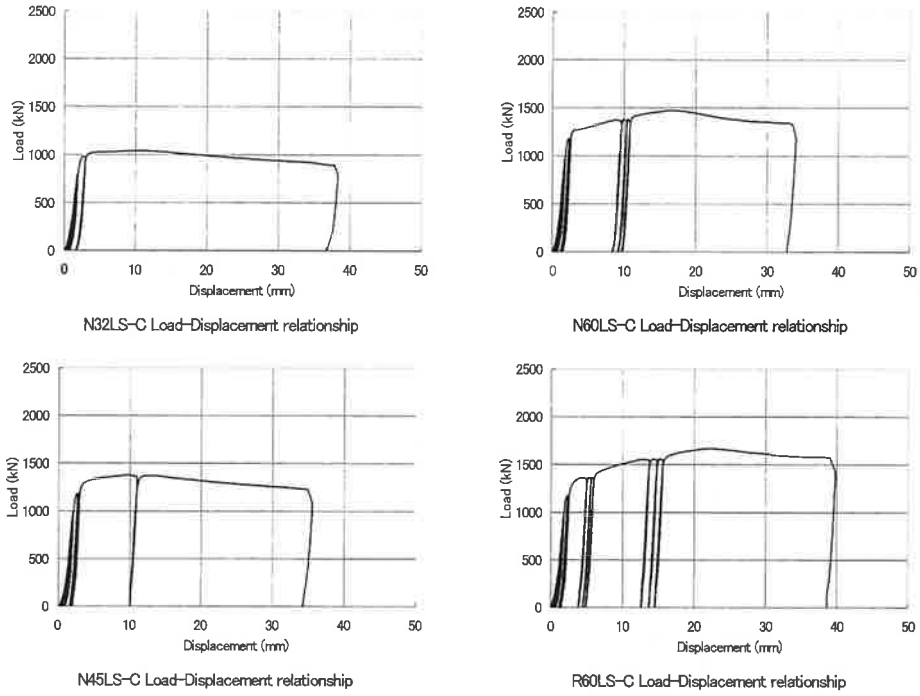


図-8 鉄筋コンクリート充填鋼管（小リング）

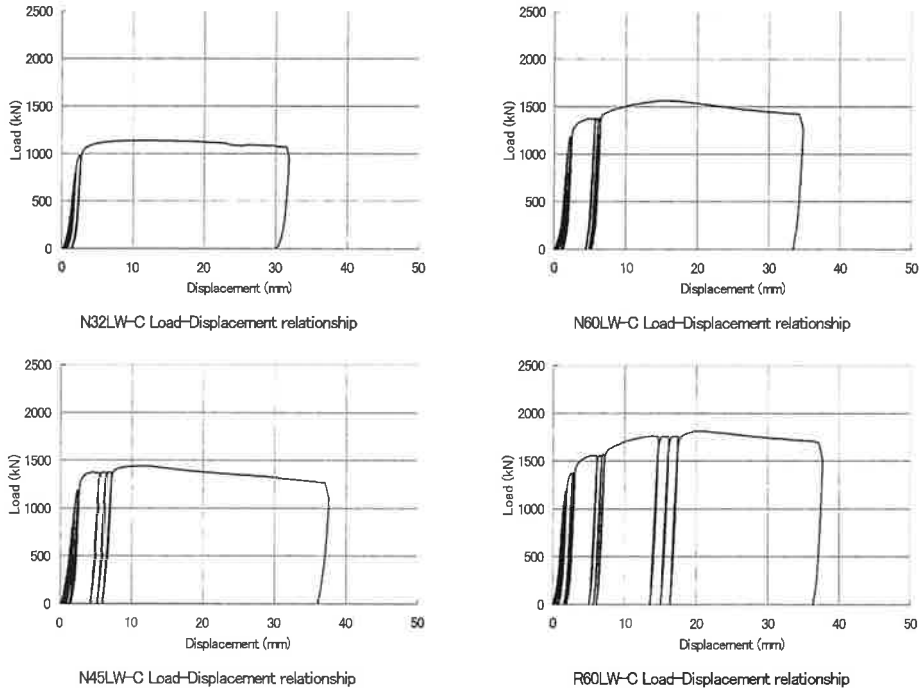


図-9 鉄筋コンクリート充填鋼管（二重リング）

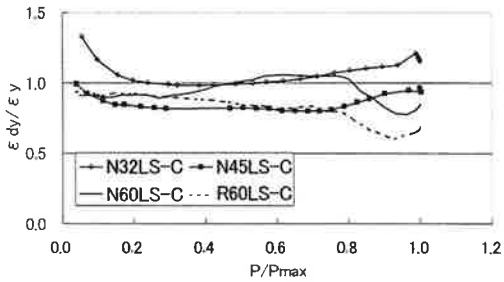


図-10 鋼管と充填コンクリートの一体化

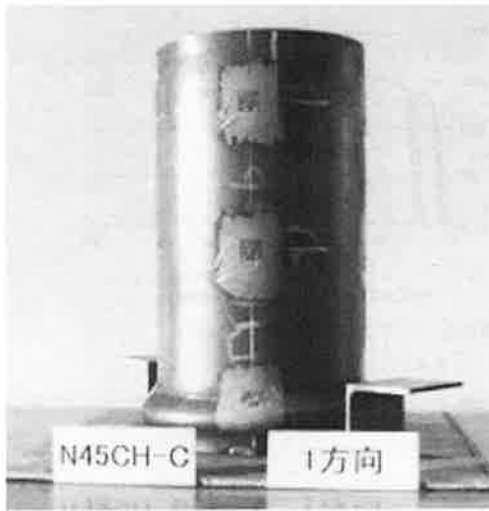


図-11 中空鋼管の破壊状況

のとした。初期降伏時の合成効果  $\alpha_y$  では、リブ付のものが最も高く、次いで 3.2 mm, 4.5 mm, 6.0 mm となった。鋼管厚が薄い試験体ほど合成効果が低い理由として、鋼管自体の引張強度が低いために RC またはコンクリートを充填することにより座屈発生を抑制できることによると考えられる。次に最大荷重時の合成効果  $\alpha_r$  は、 $\alpha_y$  と比較して全ての項目で低下している。その理由を図-10 に示す。縦軸はモールドゲージの歪みを鋼管の歪みで除した値、横軸は最大荷重を 1 とした正規化荷重である。初期は鋼管とコンクリートは弾性体として共同作用しているのに対し、最大荷重に近づくにつれ乱れ、歪みが 1.0 付近でばらついている。すなわち最大

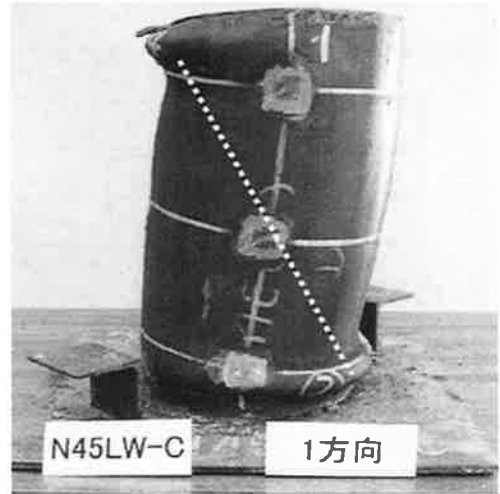


図-12 RCFT の破壊状況

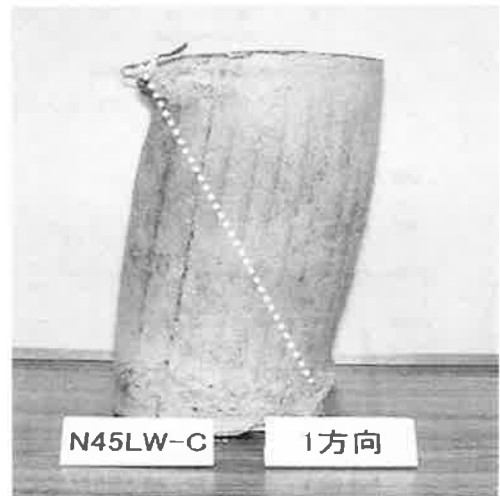


図-13 充填コンクリートの破壊状況

荷重時には鋼管と充填コンクリートが一体化とはならず、個別に挙動していると推定される。リブ付鋼管も同様な挙動となっている。

#### (4) 破壊状況

破壊状況を図-11~13 に示す。図-11 の中空鋼管は試験体下部で提灯座屈をしている。それに対して図-12 の RCFT では、充填コンクリートのせん断破壊に伴って上下端部を結ぶ斜め方向



で局部座屈が見られる。また、全体的に中間部でふくらんでいる。図-13は充填コンクリートを取り出したものである。この写真をみるように、充填コンクリートはせん断面を想定をさせる変形をしているが、ひびは見られない。RC、無筋コンクリート試験体では、完全にせん断破壊していたのに対しCFT, RCFTでは元の形をとどめている。巻立て鋼管により三軸応力状

態となり、充填コンクリートの破壊を抑制したためと考えられる。

#### 4. 曲げ試験

##### 4.1 曲げ試験概要

表-4に示す24種類の曲げ試験体について、図-14の要領で、純曲げ試験を行った。試験体寸法は図-15に示す。

表-4 曲げ試験体の最大曲げモーメント、靱性率、モーメントの比較

試験体名	鋼管厚さ (mm)	充填状況	最大曲げモーメント (KN・m)	靱性率 $\delta_r/\delta_y$	鋼管との最大曲げ モーメントの比較
N32CH-B	3.2	中 空	36.9	2.5	—
N32HM-B	3.2	高強度コンクリート	87.3	8.4	2.37
N32LM-B	3.2	低強度コンクリート	80.7	11.7	2.19
N32LB-B	3.2	大 リ ン グ	82.3	6.4	2.23
N32LS-B	3.2	小 リ ン グ	80.6	9.2	2.18
N32LW-B	3.2	二 重 リ ン グ	89.9	8.2	2.44
N45CH-B	4.5	中 空	63.2	2.0	—
N45HM-B	4.5	高強度コンクリート	120.5	4.3	1.91
N45LM-B	4.5	低強度コンクリート	110.6	5.8	1.75
N45LB-B	4.5	大 リ ン グ	110.9	4.7	1.75
N45LS-B	4.5	小 リ ン グ	116.7	7.6	1.85
N45LW-B	4.5	二 重 リ ン グ	118.8	8.1	1.88
N60CH-B	6.0	中 空	92.2	4.1	—
N60HM-B	6.0	高強度コンクリート	152.6	8.6	1.66
N60LM-B	6.0	低強度コンクリート	140.1	5.3	1.52
N60LB-B	6.0	大 リ ン グ	144.4	5.3	1.57
N60LS-B	6.0	小 リ ン グ	143.3	6.4	1.55
N60LW-B	6.0	二 重 リ ン グ	148.6	10.3	1.61
R60CH-B	リップ付 6.0	中 空	80.1	5.5	—
R60HM-B	リップ付 6.0	高強度コンクリート	131.0	6.8	1.64
R60LM-B	リップ付 6.0	低強度コンクリート	122.9	7.5	1.53
R60LB-B	リップ付 6.0	大 リ ン グ	129.2	5.9	1.61
R60LS-B	リップ付 6.0	小 リ ン グ	127.4	7.7	1.59
R60LW-B	リップ付 6.0	二 重 リ ン グ	131.7	9.8	1.64

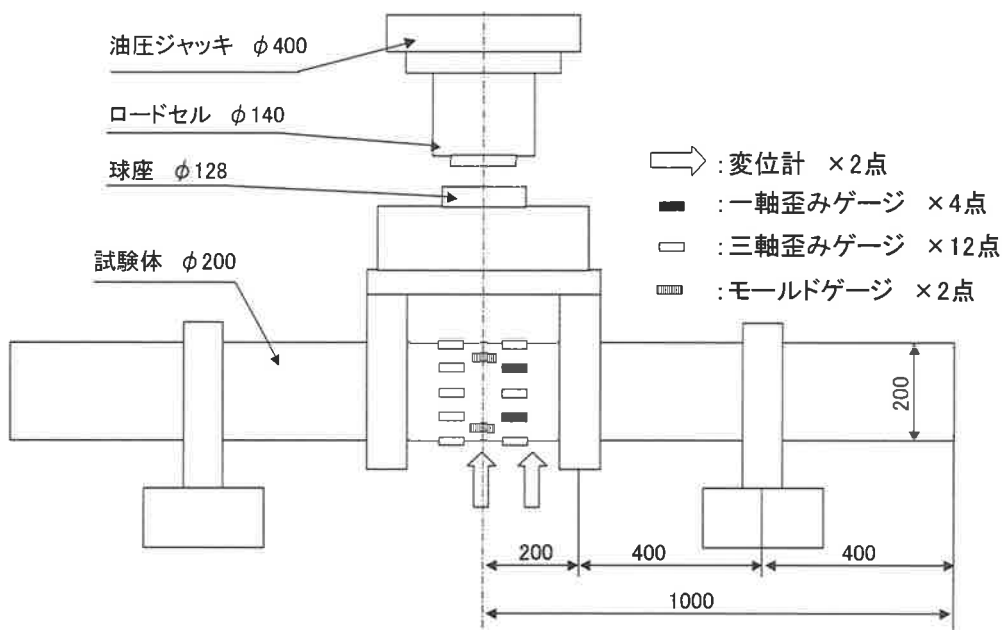


図-14 曲げ試験体の試験状況 (mm)

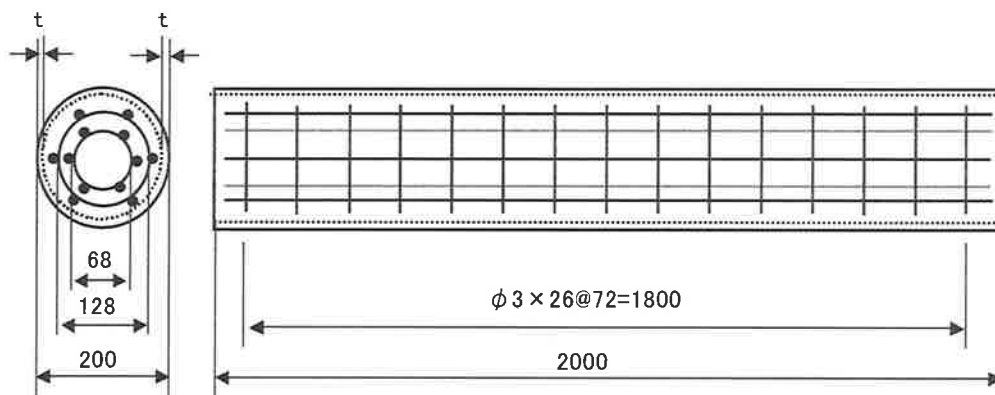


図-15 曲げ試験体の寸法 (mm)

使用材料は径 200 mm の鋼管以外、圧縮せん断試験と同じものである。載荷方法は荷重制御方式で、載荷速度 6 kN/sec、載荷ピッチを 100 kN とし、鋼管の歪みが塑性域に入ると 3 回繰り返し載荷とした。各荷重の上限と無荷重時に 30 秒間の荷重保持時間を設けた。

測定項目は、曲げ試験体中央の変位、円周方向、軸方向の歪み、充填コンクリートの圧縮側、

引張側の歪みである。載荷の終了は試験体の耐力力が最大の 80% を下回るか、変位が 50 mm 以上になったときとした。

#### 4.2 曲げ試験の結果

##### (1) 最大曲げモーメント

図-16～21 に充填状況ごとの曲げ試験のモーメント-変位曲線を示す。最大曲げモーメントは

鉄筋コンクリート充填鋼管のせん断，曲げ特性

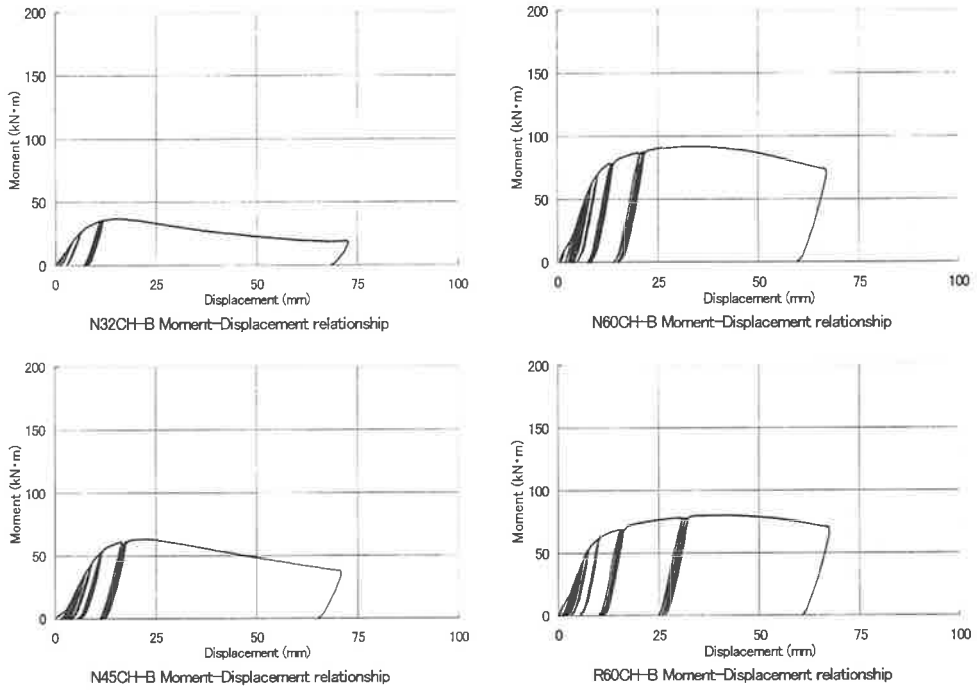


図-16 中空鋼管

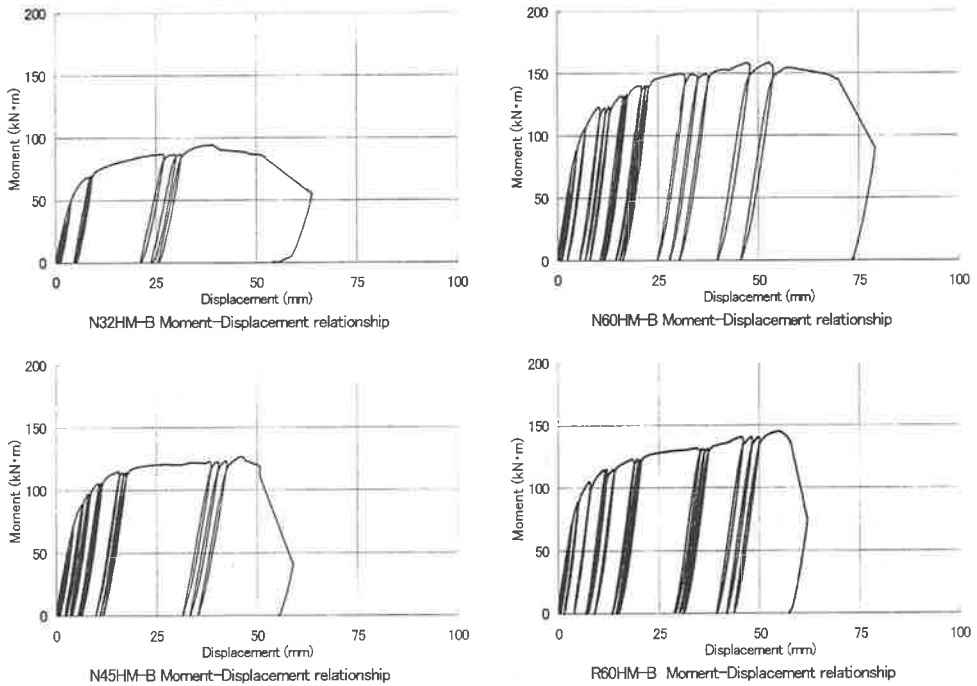


図-17 高強度コンクリート充填鋼管

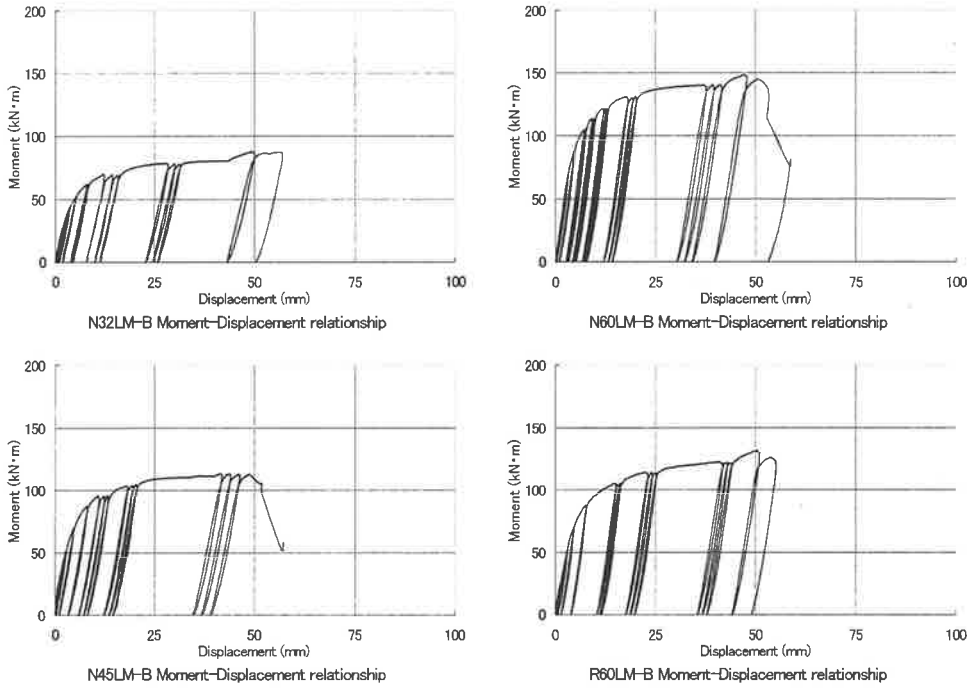


図-18 低強度コンクリート充填鋼管

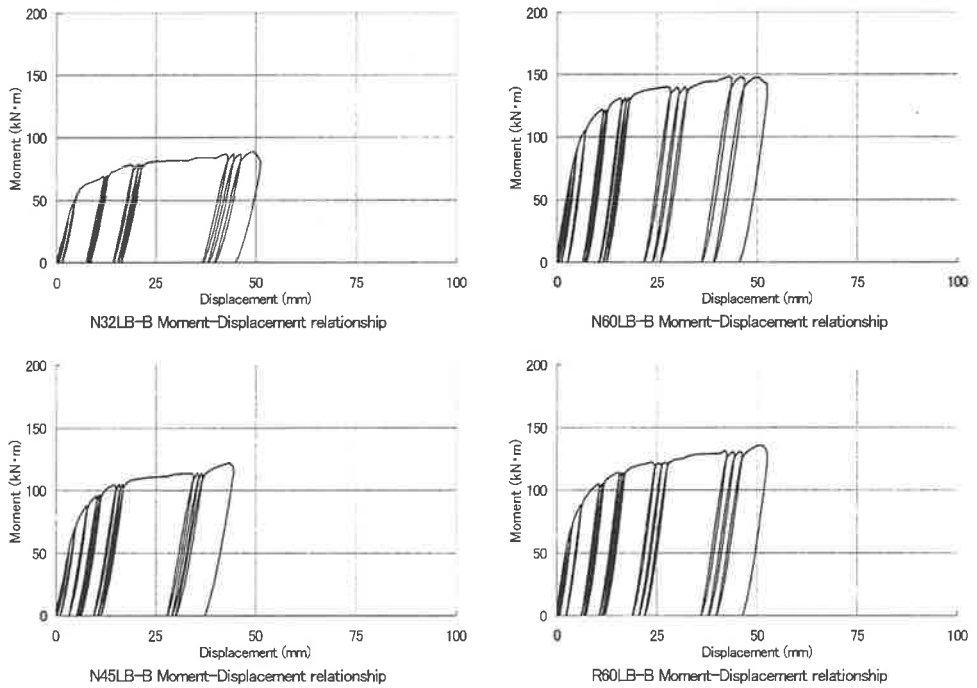


図-19 鉄筋コンクリート充填鋼管 (大リング)

鉄筋コンクリート充填鋼管のせん断，曲げ特性

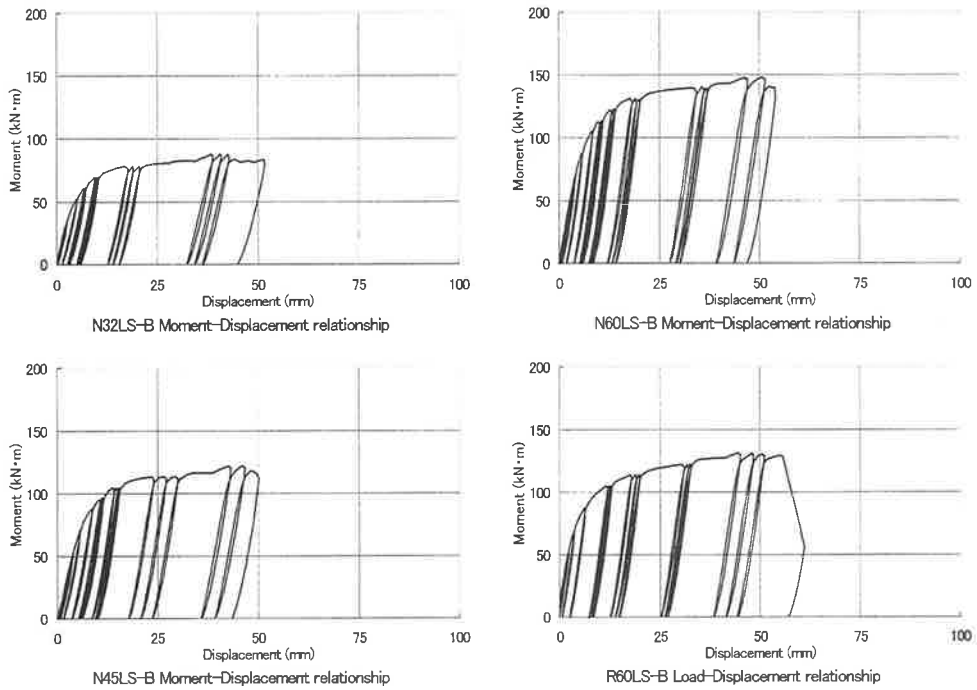


図-20 鉄筋コンクリート充填鋼管 (小リング)

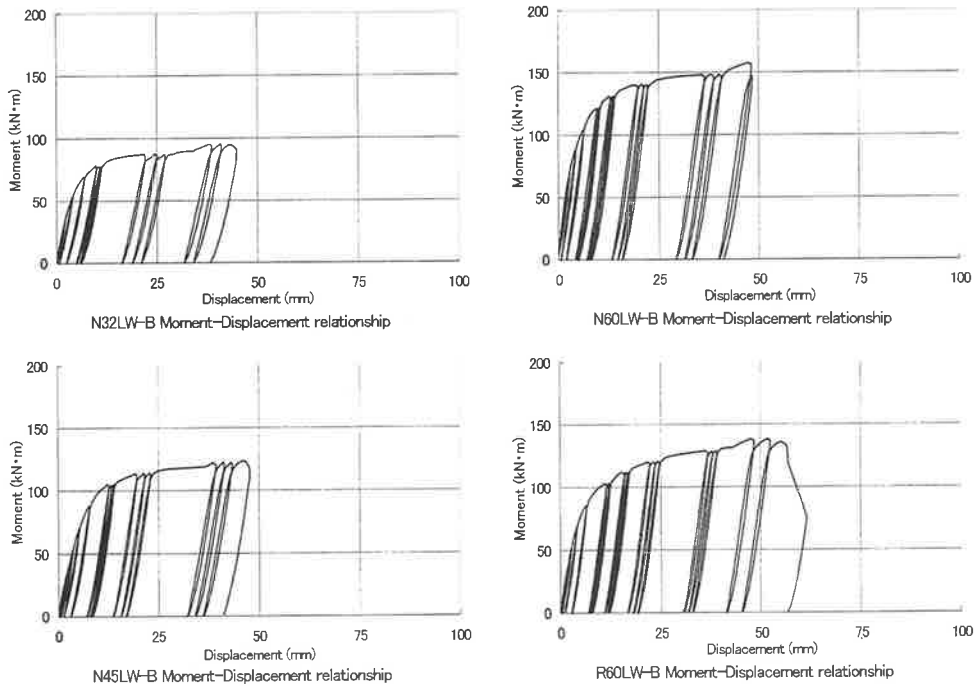


図-21 鉄筋コンクリート充填鋼管 (二重リング)

表-4に示す。最大曲げモーメントは全ての鋼管の径厚比で、コンクリートを充填することにより飛躍的に増大した。鋼管が厚いほど最大曲げモーメントは大きくなるが、中空鋼管との比は小さくなる。これは、径厚比の大きな鋼管ではコンクリートの充填により鋼管の圧縮側で座屈を抑制する効果が径厚比ほど増大しないためと考えられる。

次に充填コンクリート別に比較すると、多少ばらつきはあるものの二重リングが最も高く、大リング、小リングの順となった。リブ付鋼管については、普通鋼管より最大曲げモーメントが低くなった。理由として、リブの端部が梁の引張側のひび割れを荷重の早い段階で促進し強度低下の原因となったためと考えられる。

(2) 靱性率

曲げ試験の靱性率は試験装置の問題で最大荷重までしか測定できなかったため、最大荷重95%時の靱性は求められなかった。なお、靱性率は圧縮せん断試験の(1)式で求めた。鋼管厚ごとで比較すると、平均的に3.2mmが高くなった。これは、薄い鋼管では引張側の鋼材伸張しながら耐力を保っているのに対し、厚い鋼管では先に、充填コンクリートが圧縮破壊してしまうために低い靱性率になったものと推定される。充填コンクリートごとの比較では、二重リングが最も高く、次いで小リングとなった。理由として、図-24の歪み分布図に示すように中立軸のある部分を鉄筋で補強した小リングの歪み分布がバランスしているためと考えられる。コンクリート強度ごとでは、低強度CFTの靱性が高い。これは圧縮せん断試験と同様に、高強度CFTでは、充填コンクリートの弾性係数が高いため小さな鉛直変位で最大値を迎える事によると考えられる。リブ付鋼管では差はさほど見られなかった。なお、RCFTはどの項目でも高い靱性を示し、最大荷重以上の載荷でも効果が発揮されると考えられる。

(3) 歪み分布

図-22~24は梁中央断面における鋼管表面水

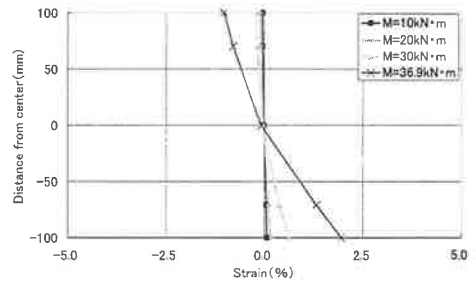


図-22 N45CH-Bの歪み分布図

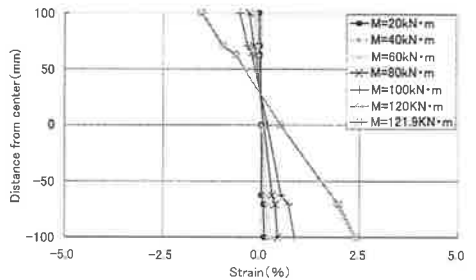


図-23 N45LB-Bの歪み分布図

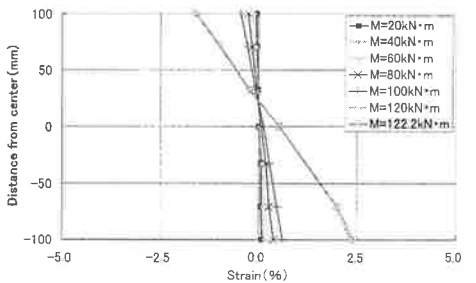


図-24 N45LS-Bの歪み分布図

平方方向の歪み分布である。中空鋼管では最大歪みが1.5%程度であった(図-21)が、CFT, RCFTでは2.5%まで対応している(図-22, 23)。これは、充填コンクリートが鋼管の座屈を抑制しているためである。中空鋼管では中立軸が梁中心にあるのに対し、CFT, RCFTでは中立軸が上昇している。これは、コンクリートの圧縮強度が高いためである。

(4) 破壊状況

曲げ試験体の破壊状況を図-23~26に示す。



図-25 N60LM-Bの充填コンクリートの破壊



図-26 R60HM-Bの充填コンクリートの破壊



図-27 N60LW-Bの充填コンクリートの破壊



図-28 R60LW-Bの充填コンクリートの破壊

図-23, 図-24 は CFT で, 荷重点付近で充填コンクリートが破断しているのがわかる。特に図-24 はリブの部分で破断している。また, 圧縮側では, 普通鋼管の比べ, 圧壊の範囲が大きく強度低下の原因になったと考えられる。図-25, 図-26 は RCFT で, 引張側のひびは見られるが, 破断はしていない。図-26 のリブ付鋼管もひびは多く見られるが, 図-24 で見られたような圧壊はなかった。このことから RCFT の靱性が高くなったと考えられる。一連は認められないが, 塑性領域でひび割れ防止, 形状保持などに効果を発揮している。

## 5. まとめ

本研究では RC, 中空鋼管の試験体とともに, 径厚比, 配筋, 充填コンクリート強度, リブ付鋼管の各項目にわたり CFT, RCFT 試験体の圧縮せん断試験, 曲げ試験を行い, 次の結論が得られた。

### 圧縮せん断試験

- (1) 鋼管にコンクリート, RC を充填することにより高い対荷力, 靱性が得られる。配筋では二重リングが有効である。
- (2) 靱性は高強度 CFT が低く, 大リングを配した RCFT が高い値を示した。また, リブを付けることにより高い靱性が得られた。厚い鋼管が必ずしも高い靱性を示さなかったことから径厚比の影響は明確ではない。
- (3) リブ付鋼管の初期降伏時の合成効果が最も高くなった。最大荷重時ではコンクリートと鋼管が一体化しなくなったためどの試験体でも合成効果が下がった。

### 曲げ試験

- (1) CFT, RCFT は高い曲げ強度が得られる。配筋では, 二重リングが有効であった。鋼管を厚くすると最大曲げモーメントは大きくなるが, 中空鋼管との比較では径厚比ほどの効果が見られず, 鋼管を厚くすることは経済的な面から有利とは限らない。

- (2) 鋼管厚 3.2 mm の CFT, RCFT が高い靱性を示した。二重リング, 小リングの靱性がわずかながら高くなったことから, 梁中心を補強すると有効である。
- (3) リブを付けることにより引張側のひび割れの進行を早め, 最大曲げモーメントは小さくなったが, 靱性率の差はなかった。
- (4) RC を充填することによる内部でコンクリートが破断しないため, ひび割れ防止, 形状保持に鉄筋は有効といえる。ただし, 弾性歪みの領域では鉄筋の効果は見られない。

## 参考文献

- 1) 土木学会, 構造工学論文集, vol. 44A, 1998.3.
- 2) 石橋忠良, 鈴木素彦, 米田利博: 新示方書によるコンクリート構造物の設計例シリーズ, 第1巻, コンクリート強度の設計。
- 3) 石原重孝, 今井義明, 古川毅: 新示方書によるコンクリート構造物の設計例シリーズ, 第3巻, 橋梁下部・基礎構造物の設計
- 4) 土木学会, 鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1) 基礎編: 理論編, 2000.3.
- 5) 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.
- 6) 土木学会, 鋼構造物設計指針, 合成構造, 2000.10.

(2001年11月19日受付)