

(11) 鉄筋コンクリート充填鋼管 (RCFT) の圧縮せん断特性

塩井 幸武¹・長谷川 明²・工藤 浩³・鈴木 拓也⁴

¹フェロー 日本鋼構造協会 (〒160-0004 東京都新宿区四谷3丁目2-1)
E-mail:y.shioi@jssc.or.jp

²正会員 八戸工業大学教授 土木建築工学科 (〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開88)
E-mail:hasegawa@hi-tech.ac.jp

³正会員 榊長大国際事業部 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730)
E-mail:kudou-h@chodai.co.jp

⁴正会員 ㈱コサカ技研 (〒039-1103 青森県八戸市大字長苗代字碓田56)
E-mail:suzuki0229@kosakagiken.co.jp:

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の急激なせん断破壊を防ぐには断面中央に縦鉄筋を配置するのが最適であることを立証したが、耐荷力は最大値以降には連続的に低下するので構造物の形状を保持し難い。最大耐荷力以降も形状を保持するためにRCを鋼板で巻き立てる鉄筋コンクリート充填鋼管 (RCFT) を考えた。その力学的特性を調べるためにせん断試験に代わる圧縮試験と曲げ試験をコンクリート充填鋼管 (CFT) との比較を含めて実施した。

三陸はるか沖地震、兵庫県南部地震等では軸方向の衝撃荷重によると想定される構造物のせん断破壊が多く見られた。このような荷重に対してRCFTは極めて優れた性状を発揮することが試験結果から判明した。本論文では円形鋼管、角形鋼管のRCFTの鉛直荷重に対する異なる抵抗性状も含めて報告する。

Key Words : reinforced concrete filled tube(RCFT), concrete filled tube(CFT), reinforced concrete(RC), shear resistance, seismic design

1. 鉄筋コンクリートのせん断補強とその限界

1994年12月28日の三陸はるか沖地震 (M=7.5)、1995年1月17日の兵庫県南部地震 (M=7.2) では数多くの建物や橋脚のRC柱のせん断破壊が見られた。三陸はるか沖地震では写真-1・1に見るとおり、鉛直方向

衝撃力によると推定される多くの構造物のせん断破壊や石碑等の飛翔現象が見られた。兵庫県南部地震では数多くの構造物のせん断破壊 (写真-1・2) があったことは衆知のとおりである。建物でもビルの地上階や途中階のフロアが崩壊した事例 (写真-1・3) もかなり見られた。



写真-1・1 三陸はるか沖地震によるパチンコ店のRC中壁のX型のせん断亀裂

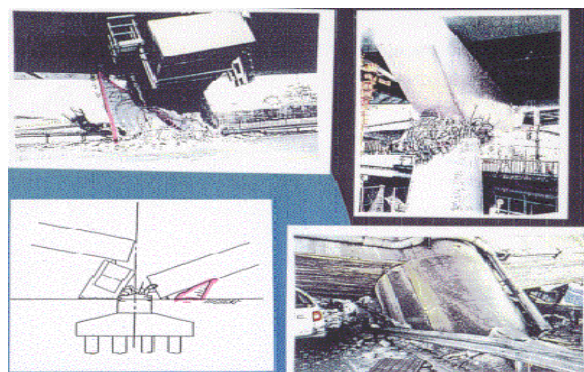
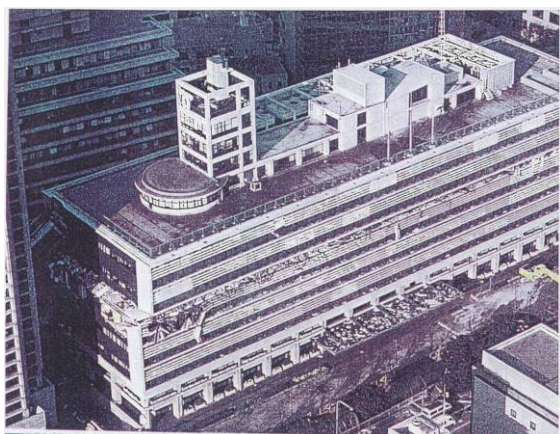


写真-1・2 阪神高速道路神戸線の高架橋のせん断破壊をした橋脚の事例



写真－１・３ 兵庫県南部地震における神戸市役所のRC庁舎６階の崩壊

このような破壊は瞬時に発生していると推定されるので、構造物の内部や上部にいる人々の生命や財産を守ることができない。少なくとも構造物の骨格形状が保持されていれば内部の人は負傷することがあっても生命は守ることが出来よう。すなわち、せん断破壊による崩壊を防ぐことができればよいのである。

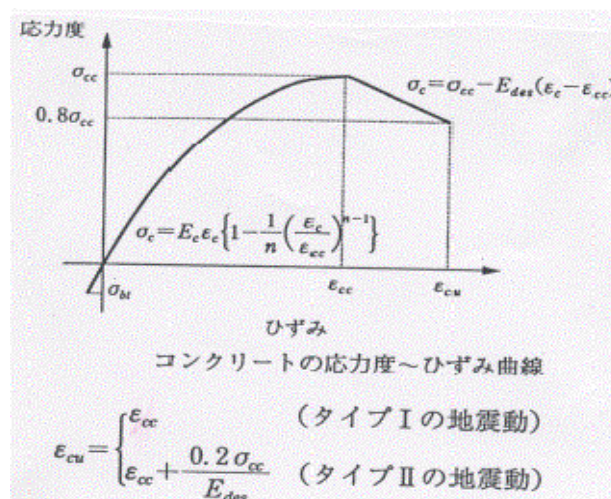
圧縮力を受けるRCの場合は図－１・１のような挙動を取り、終局歪（ ϵ_{cu} ）を超えると瞬間的な破壊となる。RCにおける、このような破壊を防ぐためにはせん断補強が必要となる。

RC部材に荷重が作用した場合、せん断応力が最も大きくなるのが断面中央である。図－１・２は鉛直力作用時の円柱断面に発生するせん断応力の分布の模式図である。曲げモーメントが作用する場合でも断面中央の中立軸でせん断力が最大となり、端部ではゼロとなる。

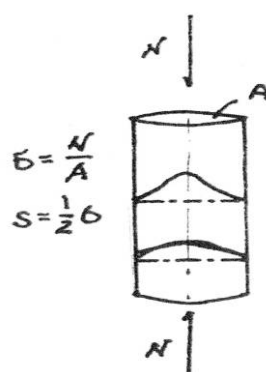
このせん断応力が最大となる断面中心部を補強しないと瞬間的な崩壊を防ぐことができない。現行の設計基準の多くは帯鉄筋をせん断補強筋として評価しているが、断面端部付近ではせん断応力は零に近く、帯鉄筋の効果は主に断面変形を拘束するものである。大きな断面では外側の帯鉄筋の効果は薄弱なものになる。

そのために断面中央部のせん断応力に備えて縦鉄筋を配置することとした。その効果を調べるためにせん断試験に代わるものとして圧縮試験を実施し、圧縮せん断試験と呼ぶこととした。

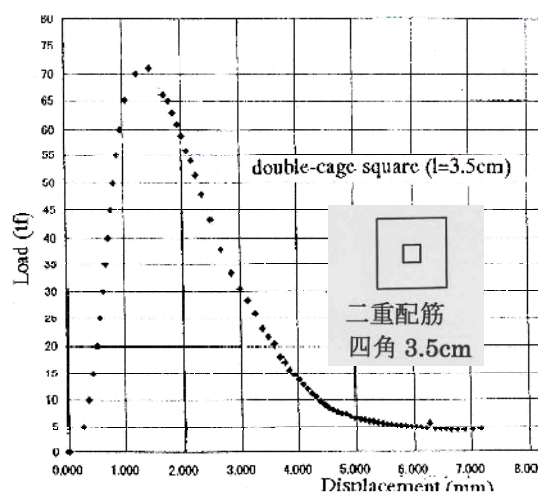
中心軸に配置したせん断補強筋の効果は抜群で、図－１・３に示す正方形柱供試体の耐荷力は最大耐荷力の後、圧縮変形と共に連続して低下するが、急激に耐荷力を失うことはない。この挙動は円柱供試体でも、長方形供試体でも同様である。



図－１・１ コンクリートの応力度－ひずみ曲線



図－１・２ 円柱断面のせん断応力分布



図－１・３ せん断補強されたRCの荷重変位曲線



写真－１・４ 円柱供試体のせん断補

すなわち、不測の大きな荷重が作用してもそのエネルギーを変形で吸収する（エネルギー一定則）ために、その変形量に耐えられる靱性を備えていなければならない。写真－１・４は円形柱供試体中心軸に配置したせん断補強筋で、圧縮試験後にかぶりコンクリートが弾き飛ばされたので容易に削り出されたものである。断面中央の小径籠鉄筋は耐力力が最小限に低下し、コンクリートのせん断面で曲がっていても形状は保れている。通常の帯鉄筋のように端部に配置した鉄筋の供試体の内部コンクリートはせん断で破砕されて容易に取り除くことができた。二重に配筋された中心部は帯鉄筋と共に多少の変形はあるが、破壊後も残った。

このように配筋しておけば構造物が鉛直方向の大きな衝撃荷重を受けても、RC部材は急激なせん断破壊を免れ、形状を保持することが期待できよう。通常のRC構造物で見られたような内部の人間が即死するような事態は避けられよう。

しかし、柱の最大耐力力が向上する訳でなく、耐力力は変形と共に連続的に低下するだけなのでRC構造物の内部や上部の人々を完全に守り切れる訳ではない。どのように大きな地震が来襲しても構造物や内部の人々を守る方法として周面を鋼板で巻き立ててRCの靱性を守ることを考えた。

2. 鉄筋コンクリート充填鋼管（RCFT）

2.1 RCFTの概念

図－２・１は圧縮せん断試験のためのRCFTの供試体（円形柱）の概念を示す。左からコンクリート、普通鋼管、リブ付き鋼管、CFT、大径補強筋のRCFT、小径補強筋のRCFT、二重補強筋のRCFTである。大径補強筋は通常の帯鉄筋を想定し、小径補強筋は断面中心部を囲い、二重補強筋は両者を組み合わせたものである。

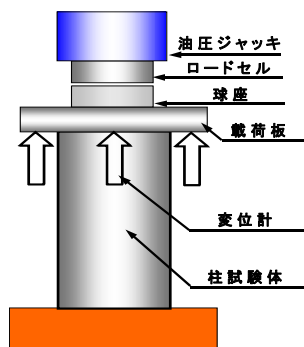
正方形柱のRCFT供試体の概念も同様である。



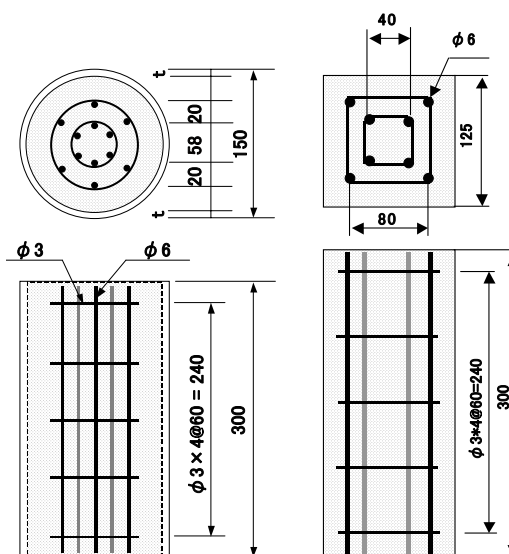
図－２・１ RCFTの供試体の概念

2.2 圧縮せん断試験と供試体

図－２・２に載荷試験装置を示す。載荷速度を5.88 k N/sec、荷重増加分を1.96 k N刻みとし、塑性領域では変位20mm以上まで載荷を繰り返した。円形柱および正方形柱の供試体の内、二重補強筋の供試体を代表して図－２・３に、各供試体の諸元を表－２・１に示す。普通鋼管（N）はSTK400とし、リブ付き鋼管（R）も同品質とした。シリーズで主体となる低強度コンクリート（L）は19.6 k N/mm²を、高強度コンクリート（H）は50 k N/mm²を目指した。



図－２・２ 圧縮せん断試験の載荷装置概要



図－２・３ 円形柱と正方形柱の二重補強筋供試体の寸法と配筋

正方形柱の断面積は円形柱と同じ面積とし、配筋は円形柱に準じた（図―２・３）。供試体のシリーズも円形柱と同じく鋼殻の厚さも32mm、45mm、60mmで、リブ付き鋼板の供試体は作成しなかった。低強度、高強度コンクリートの配合は同じであるが、正方形柱のシリーズでは高強度コンクリート（H）を主体とした。

曲げ試験における、それぞれの供試体も長さが異なるが、断面寸法と配筋は圧縮せん断試験のものと同一である。曲げ試験の結果は別の論文で発表を予定している。

2. 3 円形柱、正方形柱の圧縮せん断試験結果

圧縮せん断試験における円形柱供試体の最大耐荷力の値を表―２・２と図―２・４に、その中の代表的な供試体の荷重・変位曲線を図―２・５に示す。正方形柱供試体の最大耐荷力の値を表―２・３に示す。

RCに比べてRCFTにすることによって耐荷力は大幅に増加し、鋼管の肉厚に応じて向上していることが分かる。しかし、CFTとRCFTの間では大きな差は見られず、RCFTの大径補強筋（B）と小径補強筋（S）との間でも差は見られない。但し、二重補強筋（W）の間では明らかな差が見られた。

表―２・１ 円形柱供試体の諸元一覧

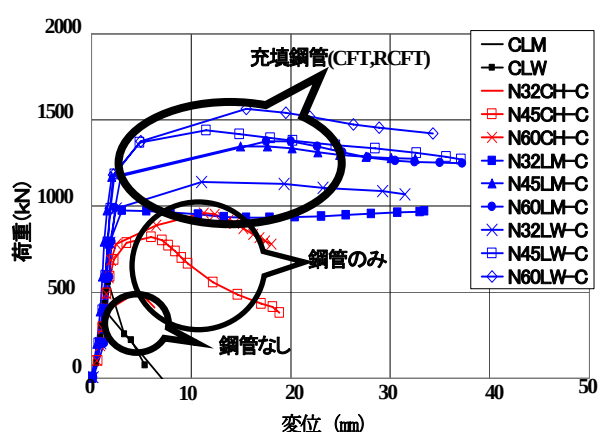
試験体名	鋼管厚 (mm)	リブの有無	特徴	寸法(mm)
				高さ×直径×板厚
N32CH-C	3.2mm	無し	鋼管	300×150×3.2
N32HM-C			高強度コンクリート充填鋼管	300×150×3.2
N32LM-C			低強度コンクリート充填鋼管	300×150×3.2
N32LB-C			大帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×3.2
N32LS-C			小帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×3.2
N32LW-C			二重帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×3.2
N45CH-C	4.5mm	無し	鋼管	300×150×4.5
N45HM-C			高強度コンクリート充填鋼管	300×150×4.5
N45LM-C			低強度コンクリート充填鋼管	300×150×4.5
N45LB-C			大帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×4.5
N45LS-C			小帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×4.5
N45LW-C			二重帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×4.5
N60CH-C	6.0mm	無し	鋼管	300×150×6.0
N60HM-C			高強度コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
N60LM-C			低強度コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
N60LB-C			大帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
N60LS-C			小帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
N60LW-C			二重帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
R60CH-C	6.0mm	有り	鋼管	300×150×6.0
R60HM-C			高強度コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
R60LM-C			低強度コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
R60LB-C			大帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
R60LS-C			小帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
R60LW-C			二重帯鉄筋コンクリート充填鋼管	300×150×6.0
CHM-C1.2.3	RC試験体		高強度無筋コンクリート	300×150
CLM-C1.2.3			低強度無筋コンクリート	300×150
CLB-C1.2.3			大帯鉄筋コンクリート	300×150
CLS-C1.2.3			小帯鉄筋コンクリート	300×150
CLW-C1.2.3			二重帯鉄筋コンクリート	300×150

表－２・２ 円形柱供試体の最大耐荷力

試験体名	最大耐荷力 (kN)
N32CH-C	492
N32HM-C	1515
N32LM-C	1052
N32LB-C	1052
N32LS-C	1041
N32LW-C	1138
N45CH-C	820
N45HM-C	1964
N45LM-C	1346
N45LB-C	1373
N45LS-C	1368
N45LW-C	1440
N60CH-C	958
N60HM-C	1828
N60LM-C	1374
N60LB-C	1508
N60LS-C	1471
N60LW-C	1564
R60CH-C	1079
R60HM-C	2147
R60LM-C	1569
R60LB-C	1640
R60LS-C	1668
R60LW-C	1812
CHM-C1	877
CLM-C1	376
CLB-C1	462
CLS-C1	512
CLW-C1	548

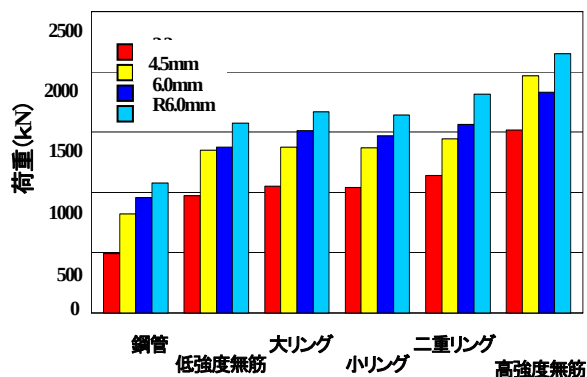
表－２・３ 正方形柱供試体の最大耐荷力

試験体名	最大耐荷力 (kN)
32CH-SC	421.67
32LM-SC	865.05
32HM-SC	1115.79
32HB-SC	1028.44
32HS-SC	984.49
32HW-SC	1176.61
45CH-SC	788.02
45LM-SC	1064.53
45HM-SC	1312.97
45HB-SC	1301.20
45HS-SC	1329.45
45HW-SC	1373.01
60CH-SC	1083.42
60LM-SC	1444.03
60HM-SC	1512.70
60HB-SC	1561.75
60HS-SC	1563.71
60HW-SC	1599.42
CLM-SC	449.35
CHM-SC	598.65
CHB-SC	606.98
CHS-SC	632.54
CHW-SC	585.62

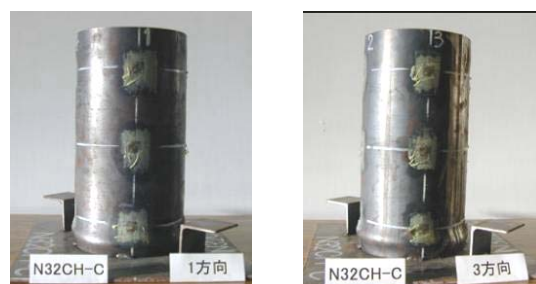


図－２・５ 代表的供試体の荷重・変位曲線

円形柱と正方形柱の耐荷力の間では正方形柱が高強度コンクリートを使用しているにも拘らず、耐荷力は円形柱の方が同等もしくは大きくなっている。円周の張力が内部のコンクリートを有効に拘束していること



図－２・４ 円形柱供試体の最大耐荷力



写真－２・１ 円形柱鋼管の提灯座屈

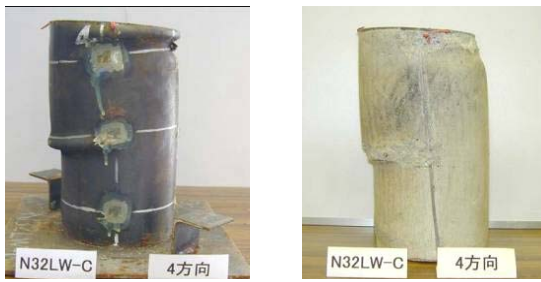
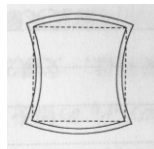


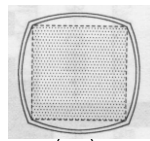
写真-2・2 二重補強筋供試体 (3.2mm) の破壊状態と内部コンクリートの状態



(b)



(a)



(c)



(d)



(e)

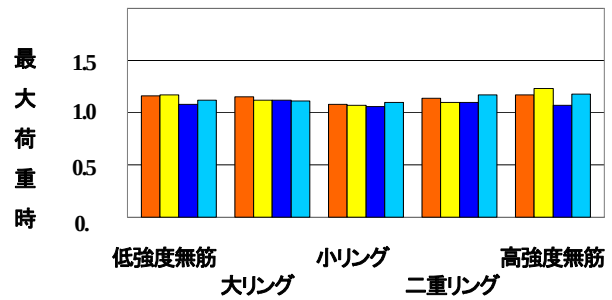
写真-2・3 正方形柱の鋼管 (3.2mm) の座屈形状と二重補強筋供試体の破壊状態と内部コンクリート

によると考えられる。円形柱のリブ付き鋼管 (肉厚6.0mm) は普通鋼管 (肉厚6.0mm) より大きな耐荷力を示した。リブの存在で多次の座屈モードになると考えられる。RCFTでも150~250kNの差が生じている。

円形柱の鋼管の提灯座屈を写真-2・1に、二重補強筋供試体の破壊状態を写真-2・2に示す。正方形柱の鋼管の座屈、二重補強筋供試体の破壊状態を写真-2・3に示す。

円形柱の鋼管は圧縮力を受けると提灯座屈で限界状態を迎え、次第に耐荷力が低下していく。鋼管内に充填されたコンクリート (CFT) や鉄筋コンクリート (RCFT) は最大耐荷力に達すると潜在的なコンクリートのせん断破壊面に沿って写真-2・2に見るように鋼管の上下に座屈の形状が生じる。鋼管を開くとCFTの場合はコンクリートにせん断面が生じるが、RCFTの場合はせん断面は顕在化しない。

■ 3.2mm ■ 6.0mm
■ 4.5mm ■ R6.0mm



$$\text{合成効果} = \frac{1}{\left(\frac{1}{1.1} + \frac{1}{1.1} \right)}$$

図-2・6 各供試体の鋼材とコンクリート間の合成率

正方形柱の鋼管は圧縮力を受けると写真-2・3の (a)、(b) に見るようにバチ形状の座屈を生じる。中にコンクリートを充填すると最大耐荷力に到達時点で鋼管は外に膨らんで数次の提灯座屈が発生する (写真-2・3, (c), (d), (e))。CFTでは座屈断面で微細なコンクリートの破砕断面が生じるが、RCFTでは明確な破砕面は見られない。

一連の試験結果からRCFT供試体はCFT供試体と間では耐荷力に大きな差はなく、共に大きな変形性能を有することが判明したが、最大耐荷力後のコンクリートの破壊性状には明確な差が見られた。構造物に適用し、部材に過大な荷重が作用して変形で吸収する場合 (エネルギー一定則) に、この相違は被災後の部材の再利用の可否の判断に大きく影響する。

2. 4 鋼材とコンクリートの合成効果と靱性率

RCFTやCFTの場合、RCに比べて耐荷力は大幅に増大し、鋼管の肉厚に応じて微増する傾向にあるものの、鋼材量に支配されている訳ではない。むしろ、コンクリート強度の影響の方が大きい。また、耐荷力に対するRCFTの鉄筋の影響も些少である。

鋼材とコンクリートを混用する利点を調べるために合成効果を計算した。計算はRCFT等の最大荷重を鋼管とRCの最大荷重の和で除している。円形柱供試体のRCFT、CFTの結果を図-2・6に示す。いずれの合成効果も約20%程度である。ここで、リブ付き鋼管のRCFT、CFTの耐荷力は普通鋼管の1.08~1.17となっているので鋼材とコンクリートの付着がよいと考えていたが、合成効果は普通鋼管と変わらない結果となっている。すなわち、鋼材とコンクリートの間ではせん断力の伝達には限界値があり、円形柱の

RCFT、CFTは軸力に対して重ね梁に近い挙動をとることが判明した。

RCFT、CFTの大きな特徴は大きな耐荷力と変形性能にある。図-2・5に見るとおり、両者は最大耐荷力に達した後も、RCのように急激に耐荷力を減じることもなく漸減していく。設計上、RCや鋼材の塑性設計では弾性限界からは変形のみが進行することになっている。RCFT、CFTの場合は最大耐荷力を基準に塑性設計を行うことができる。すなわち、最大耐荷力の95%ないし90%を限界とする設計法が可能になる。

その観点からRCFTの靱性率を下記の通り、定義する。

$$\mu = \frac{\sigma_{95}}{\sigma_y}$$

μ : 靱性率

σ_y : 初期降伏時の変位

σ_{95} : 最大荷重の95%時の変位

この場合は最大荷重時の95%の変位を弾性限界（初期降伏時）の変位で除するものである。各供試体について最大荷重時、最大荷重の95%時の靱性率を算出した結果を図-2・6に示す。

RCFT、CFTは初期降伏点から最大荷重時まで非線形の挙動を示し、比較的大きく変形する。円形柱供試体の靱性率を算出した結果を図-2・6に示す。値は供試体によって2%から11%までバラついており、その原因となっているのは鋼材とコンクリートの性状である。すなわち、コンクリートの強度の大きい

表-2・4 正方形柱供試体の合成効果

供試体名	累加荷重 $\alpha + \beta$ (kN)	荷重(kN)	合成率
32LM-SC	871.02	865.05	0.99
32HM-SC	1020.32	1115.79	1.09
32HB-SC	1028.65	1028.44	1.00
32HS-SC	1054.21	984.49	0.93
32HW-SC	1007.29	1176.61	1.17
45LM-SC	1237.37	1064.53	0.86
45HM-SC	1386.66	1312.97	0.95
45HB-SC	1395.00	1301.20	0.93
45HS-SC	1420.55	1329.45	0.94
45HW-SC	1373.64	1373.01	1.00
60LM-SC	1532.77	1444.03	0.94
60HM-SC	1682.06	1512.70	0.90
60HB-SC	1690.39	1561.75	0.92
60HS-SC	1715.95	1563.71	0.91
60HW-SC	1669.04	1599.42	0.96

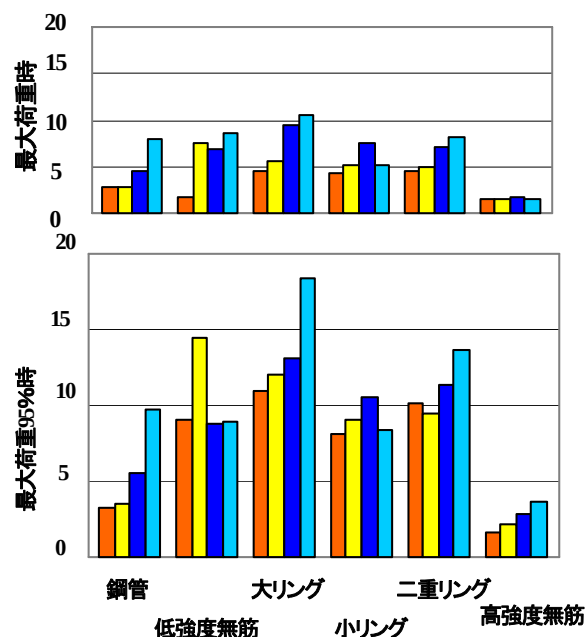


図-2・6 各供試体の靱性率
(最大荷重時、95%時)

供試体では靱性率が小さく、鋼材の断面が増加すると靱性率は大きくなる。

この傾向は最大荷重の95%時の靱性率でより顕著になる。最大荷重から漸減し、5%減の時点でバラツキがあるものの、低強度コンクリートの供試体で約8%以上の靱性率を期待できることが判った。

正方形柱供試体の合成率、靱性率を表-2・4、表-2・5に示す。正方形柱の鋼材とコンクリートの合成効果はおしなべて円形柱より低く、0.9~1.0で

表-2・5 正方形柱供試体の靱性率

供試体番号	靱性率 σ_r / σ_y	靱性率 σ_{95} / σ_y
32CH-SC	1.84	2.05
32LM-SC	2.61	3.24
32HM-SC	1.48	1.63
32HB-SC	1.70	2.01
32HS-SC	1.49	1.93
32HW-SC	1.43	1.70
45CH-SC	1.60	1.93
45LM-SC	1.46	2.69
45HM-SC	1.34	1.67
45HB-SC	1.63	2.08
45HS-SC	1.47	1.93
45HW-SC	1.25	1.93
60CH-SC	2.60	2.99
60LM-SC	1.92	3.37
60HM-SC	1.45	2.26
60HB-SC	1.41	2.75
60HS-SC	1.27	2.45
60HW-SC	1.67	2.59

軸力に対しては重ね梁として機能することになる。

正方形柱供試体の靱性率は最大荷重時 (σ_r)、最大荷重の95%時 (σ_{95}) では円形柱に比べて極端に小さくなっている。これは正方形柱の変形性能が劣るということではない。図-2・7に板厚3.2mmの正方形柱供試体の圧縮せん断試験の荷重・変位曲線を示す。最大荷重から塑性領域の耐力力(約900kN)までの落差の所為で、最大荷重の85%ないし90%時の靱性率は円形柱供試体のものと変わらない。板厚が大きくなると図-2・7の塑性領域の耐力力の低下は少なくなる。

R C F Tは変形性能に優れているのでエネルギー一定則に従って耐震設計を行う場合には最も有利な構造部材である。すなわち、L2地震のように供用期間にあるか、ないか分からない過大な地震力が作用してもそのエネルギーを塑性変形で吸収し、その後も弾性挙動に対しては重ね梁として機能することになる。動を失わないためである。

最後に、R C F Tの鋼材とコンクリートの荷重分担について歪みゲージとモールドゲージで測定した結果を図-2・8に示す。横軸に最大荷重に対する各荷重段階をとり、縦軸にコンクリートの歪み (ε_{dy}) と鋼管の中央の表面の歪み (ε_y) の比をとったものである。ほぼ等しく分担しているが、鋼材の断面が増えると鋼材の分担が多くなっている。一般的に初期段階では鋼管の応力がコンクリートに伝わり、荷重が大きくなると薄肉の鋼管全長に歪みが行渡り、最終段階では鋼管の変形でコンクリートの分担が増加して破壊が進行する傾向にある。

3. まとめ

R C F Tの圧縮せん断特性について圧縮せん断試験の結果より、次の知見を得ることができた。

- (1) 大地震時のRC構造物の崩壊を防ぐのに断面中央部のせん断補強が有効であるが、耐力力の限界を

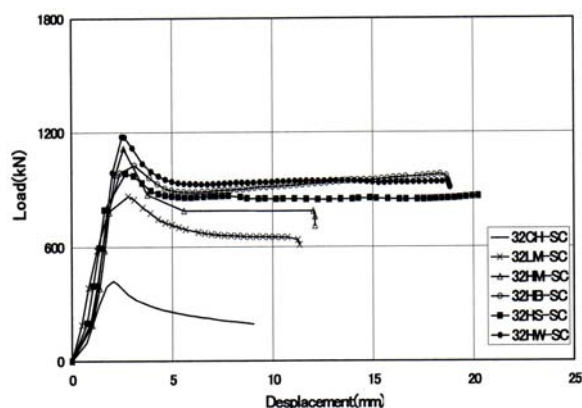


図-2・7 正方形柱供試体 (鋼管厚3.2mm) の荷重・変位曲線

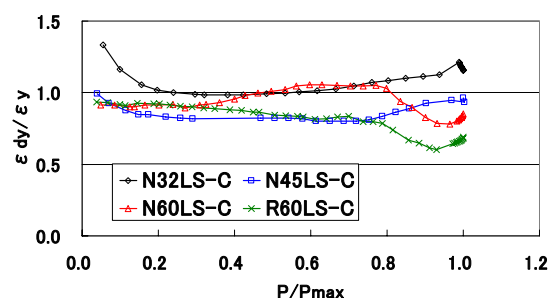


図-2・8 円形柱R C F Tにおける鋼材とコンクリートの荷重分担比率の変化

克服するためにR C F Tの概念が必要である。

- (2) R C F Tの鋼材とコンクリートの合成効果は小さく、軸力には重ね梁として扱うべきである。
- (3) R C F Tは変形性能に優れ、大きな靱性を有するのでエネルギー一定則を適用する設計に相応しい。
- (4) 円形断面も角形断面もR C F Tとして良好に機能するが、円形断面の方が性能上、優っている。
- (5) R C F Tは鋼材の弱点を補い、長所を大きく引き出す、優れた構造部材として利用できる。

なお、本論文は八戸工業大学の学生諸君の実験成果に基づいていることを記し、感謝の意を表したい。

SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE FILLED TUBE (RCFT)

Yukitake SHIOI, Akira HASEGAWA, Hiroshi KUDOH and Takuya SUZUKI

The concept of reinforced concrete filled tube (RCFT) is required to overcome the limited resistance of tough concrete members reinforcing the central axis part of the section to prevent collapse of RC structures during a large earthquake. Through a series of compression tests instead of shear test, it is found that RCFT members with circular and rectangular sections has the combined strength of steel and concrete with little compos effect and excellent ductility with the nearly ultimate strength. They are suitable for the structural design applied with the equal-energy principle method proposed by Prof. Newmark and can endure any strong seismic forces. Although RCFT is a member which mutually complements weak points of steel and concrete and enforces their good points, RCFT member should be estimated as a built-up one of steel and reinforced concrete for axial force.