

鋼管・コンクリート複合はりの静的および衝撃載荷実験

Static and Impact Tests on Steel Tube-Reinforced Concrete Composite Beams

前川 幸次* , 吉田 博** , 塩見 昌紀***
Koji MAEGAWA , Hiroshi YOSHIDA and Masanori SHIOMI

*工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)

**工博 吉田構造工学研究所代表 (〒932-01 富山県小矢部市水島 561)

***日本ゼニスパ이프株式会社 開発部主任 (〒103 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

A great many of rock-sheds are constructed with the reinforced-concrete members and are widely used to protect vehicles against the falling rocks. The ductility capacity of the RC-beams, used in such structures, are governed by the compression rupture of concrete. Because, the strength of the RC-beams sharply decreases due to rapid increase in buckling of the compression re-bars caused by the rupture of concrete.

In this research, to improve the ductility capacity of RC-beams, the concrete-filled steel tubes (CFST) are employed instead of compression re-bars. A series of experiments was carried out on two types of specimens; CFST-RC beams and RC-beams, having the same profiles. The specimens were designed so that to have equal bending strength. The ductility capacity of both types of beams under static and impact loading are discussed. From the experimental results it is remarked that the CFST improves the ductility capacity of beams more than two times as compared with the re-bars usually used for the RC-beams.

Key Words: steel tube, impact test, deformation ability, composite beam

1. まえがき

衝撃的な荷重が作用する落石防護構造物のような鉄筋コンクリート製 (以下, RC という) あるいはプレストレストコンクリート製 (以下, PC という) 構造物においては, せん断破壊を防ぐとともに, 曲げに対して十分な強度と靱性を確保しておく必要がある。一般に, RC はりや PC はりの曲げ変形能が十分でない要因は, 早期に起こるコンクリートの圧潰とそれに続く圧縮鉄筋の曲げ座屈である。そこで本研究では, RC や PC はりの圧縮鉄筋の代わりにコンクリートを充填した円形鋼管 (以下, CFST という) を用いることにした。CFST は高耐力と高靱性を期待できるばかりでなく, CFST の周囲のコンクリートが圧潰した後も曲げ剛性の高い CFST は曲げ座屈を起こしにくい。その結果として, CFST を用いた鋼管・コンクリート複合はりは, RC や PC はりに比較して十分に大きな曲げ変形能を有すると考えられる。

鋼管・コンクリート複合部材に関する最近の研究としては, 高橋脚の省力化・急速施工を目指して行われ, また構造的にも耐震性が期待できることから, 軸力と繰返し曲げ載荷による実験的研究^{1),2)}が行われている。本研究では, 衝撃荷重の作用する落石防護構造物において, 終局変位に至るまでにより多くのエネルギーを吸収できる曲げ部材の開発を目指して, CFST を用いたはりの静的および落錘衝撃載荷実験を行った。

表-1 供試体タイプと名称

供試体タイプ (供試体名)	圧縮側鋼材	引張側鋼材
CFST-PC (A)	2-φ 60.5x2.3 CFST	2-SBPR 1080/1230 C 種 1 号 φ 17**
PC (B)	4-SR235 φ 16	2-SBPR 1080/1230 C 種 1 号 φ 17**
CFST-RC (C1,C2,C3,C4,CN*)	2-φ 60.5x2.3 CFST	3-SD295 D25
RC (D1,D2,D3,D4)	4-SR235 φ 16	3-SD295 D25

* CFST に孔無し鋼管使用

** アンボンド型 PC 鋼棒 (初期緊張力 14 tf/本)

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験供試体のタイプと名称を表-1 に, その断面諸元を図-1(a)~(d)に示す。供試体のタイプは, 引張側補強材が PC 鋼棒の場合を 'PC' とし, 異形鉄筋の場合を 'RC' で表す。さらに, 圧縮側補強材がコンクリート充填鋼管の場合を 'CFST' で表し, 丸鋼の場合は無印とした。それらの組み合わせにより 4 タイプとなり, 供試体の名称は整理の都合上, 表-1 の A~D4 のように表す (詳細は表-2)。なお, PC はりで動的靱性を期待する場合, PC 鋼棒とコンクリートは付着の無い方が効果的であるため^{3),4)}, アンボンド PC 鋼棒を用いた。

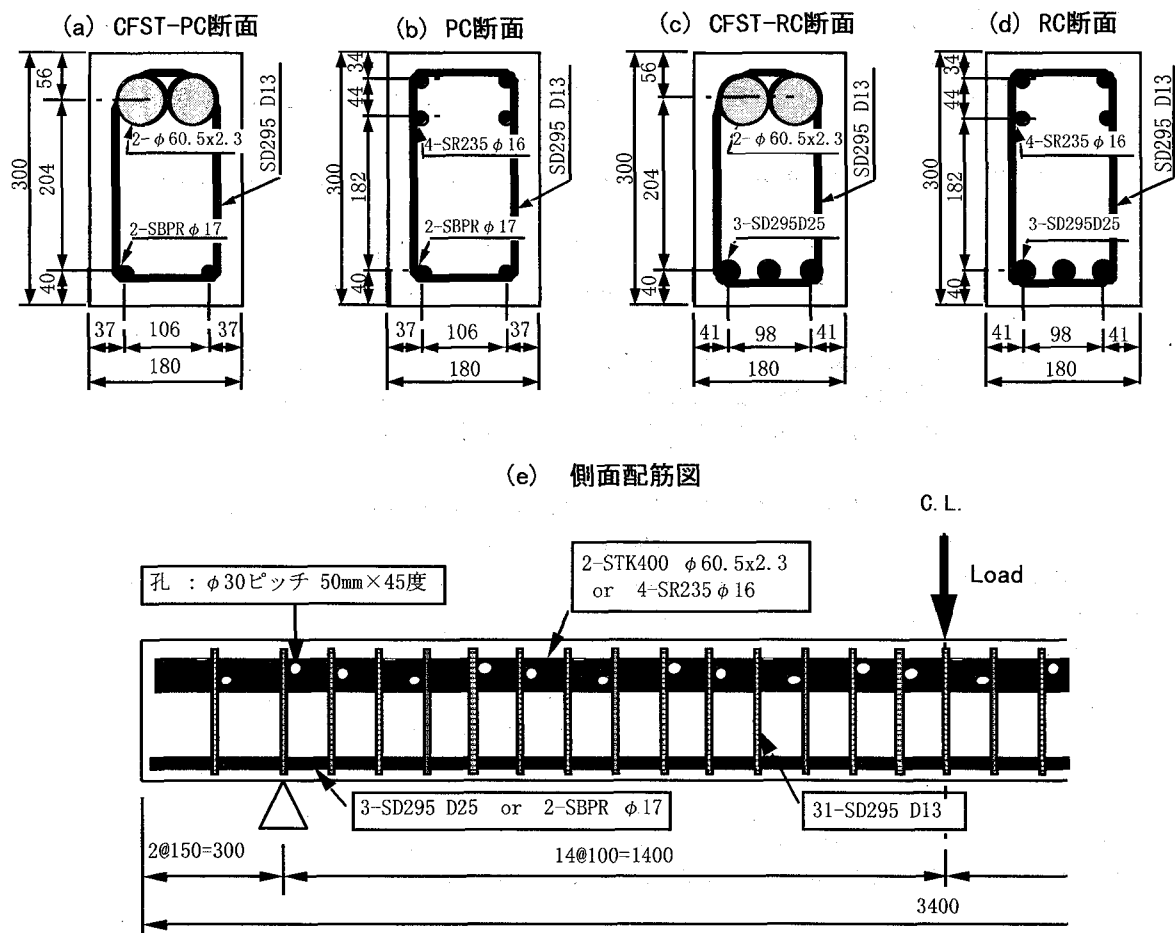


図-1 断面諸元および側面配筋図

供試体の断面諸元を決定するに当たり次のように配慮した。①設備の都合上、断面高を 30cm 以下とする、②CFST-PC および CFST-RC ではコンクリートの圧潰領域を小さくするとともに鋼管にコンクリートを充填する容易さのために鋼管径をできるだけ大きくする、③曲げ変形能に着目するためにせん断スパンを長くするとともにスターラップによるせん断補強を行う、④全タイプの設計終局曲げ耐力を同程度にする、⑤釣り合い鉄筋量で設計すると、上記①、②の製作条件のために終局状態においては中立軸が CFST 断面を横切るが、研究の目的からそれを避けるために引張鉄筋量は釣り合い鉄筋比よりも多くする、等である。

図-1(e)には側面配筋図を示している。CFST の鋼管には、鋼管断面の上・下・左・右・左上・右下・左下・右上の順に、長さ方向に 50mm ピッチで孔 (φ 32mm) があけられている。これにより鋼管と外側および内側コンクリートの一体化ならびにコンクリートの充填の容易さを期待している。しかし、本研究では孔の径や配置による影響についての検討はせず、孔の無い場合 (供試体 CN) との比較のみ行った。

設計終局曲げ耐力 M_{ud} は、4 タイプの断面に対してそれぞれ、CFST-PC はり (10.16 tfm) , PC はり (10.23tfm) ,

CFST-RC はり (9.80tfm) , および RC はり (9.83tfm) であり、ほぼ同等な設計曲げ耐力とした。その算定において、材料特性は鋼材の公称値およびコンクリートの設計基準強度を採用し、断面分割法による計算を行った。その際に、CFST の鋼管にあけた複数の孔および PC 鋼棒がアンボンドであることによる曲げ耐力への影響は無視した。

表-2 供試体名とコンクリート特性値

供試体名	荷条件	製作日 (材令日数)	圧縮強度 (Mpa)
A, B	静的 荷	H7.10.24 (31)	49.0
C1, D1		H7.10.11 (38)	52.5
C2, D2		H7.10.12 (40)	54.2
CN		H7.10.23 (39)	52.8
C3, D3	衝撃 荷	H7.10.16 (114)	54.4
C4, D4		H7.10.19 (111)	51.4

コンクリート部材のバラツキを考慮して、荷条件別に表-2 のような組み合わせで供試体の製作日を決めた。

なお、引張側にアンボンド PC 鋼棒を用いたタイプの靱性は他のタイプに比べて劣ることが予備実験の段階で明らかになったため、供試体 A (CFST-PC) および供試体 B (PC) を製作して静的荷重のみを行った。その際の PC 鋼棒の緊張力は、RC タイプの許容曲げモーメント (4.8tfm) に対して I 種設計 (コンクリートに引張応力が生じない設計) により算定し、荷重直前に PC 鋼棒 1 本に付き 14tf の初期緊張力を与えた。

製作にあたって、鋼管内へのコンクリートの充填の容易さおよび鋼管とコンクリートの間に空隙が入らないようにするために、型枠を直立させて上方 (はり端部) から高流動コンクリートを打設した。そして、3 日後に脱型して気中で養生した。実験時のコンクリートの特性値、コンクリートの配合、および鋼材の特性値を、それぞれ表-2、表-3 および表-4 に示す。

表-3 コンクリート配合 (kgf/m³)

水	セメント	スラグ	砂	粗骨材(≦15mm)	混和剤
166	220	280	924	770	5.7

表-4 鋼材の特性値

鋼材名	降伏点 (MPa)		引張強度 (MPa)	
	成績表	試験	成績表	試験
鋼管 (STK400)	396	406	487	509
鉄筋 D25	355	408	527	613
鉄筋 φ 16	332	369	456	484
PC 鋼棒 φ 17	1180	1241	1277	1358

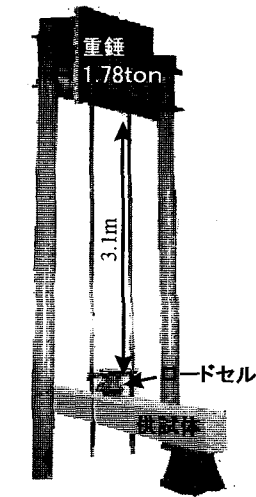


写真-1 落錐衝撃装置

2.2 実験方法

図-1(e)のように支間長が 2.8m になるように φ 10cm の丸鋼を支持台に固定し、供試体を載せた。荷重はスパ

ン中央 1 点荷重とし、載荷板と供試体は幅 5cm×長さ 18cm の面で接するようにした。これらは、静的荷重および衝撃荷重ともに同じである。

静的曲げ荷重実験においては、500ton 耐圧試験機を用いた変位制御 (ラム速度 0.5~4mm/min.) により加力を行った。そして、150mm のストローク限界に達する毎に除荷・加力ヘッドの盛り替え・再荷重を行ったが、後述の実験結果の図では、この除荷・盛り替えの過程を省略して示す。荷重は容量 30tf のロードセルを用い、たわみはスパンの 6 等分点でレーザー変位計を用いて計測した。また、鋼管および鋼棒のひずみはワイヤーストレインゲージを用いて行ったが、本研究の目的とする大きな変形領域までは計測できなかった。

一方、落錐衝撃荷重実験は写真-1 の装置を用いた。重錐 (1.78ton) は鋼塊をボルト締めで一体化したもので、φ 16cm の鋼管柱と φ 5cm のガイドパイプに沿って 3.1m の自由落下をする。はり上には重錐下面の突起部を誘導する穴を設けた直撃部と容量 100tf のロードセルを一体化させた鋼製載荷治具がガイドパイプで支持され、供試体と幅 5cm×長さ 18cm の面で接している。支点には跳ね上がり防止の治具は設けていない。また、供試体と床面の間のクリアランスは 35.3cm である。測定は、①ロードセルによって衝撃荷重、②スパン中央の鉄筋・鋼管ひずみ、③重錐上部に取り付けた加速度計によって重錐加速度、および④エンコーダーによる重錐変位、である。①~③のデータは、ロードセルの出力レベル (10tf) をプレトリガーとし、DC アンプを経てデジタル変換レコーダーに 10kHz で記録した。著者らはこれまで、高速ビデオやレーザー変位計を用いてはりの変位を計測してきたが³⁾、前者は分解能が不十分であり、後者はコンクリートの破壊によりターゲットが飛散するという問題がある。そこで、重錐の移動量をエンコーダーにより求め、重錐が衝突してからリバウンドするまでの値をはりの載荷点変位とした。使用したエンコーダーのパルスデジタル変換システムは最大 100Hz のサンプリングであったため、データ整理に当たっては補間を行った。なお、エンコーダーは回転軸の回転角度に応じて信号を出力するもので、NC 工作機や産業用ロボットのアームの位置検出などに用いられている。ここでは、重錐変位をベルトドライブにより回転軸に伝達し、出力されるパルスをデジタル量 (変位) に変換した。

3 実験結果および考察

3.1 静的曲げ荷重実験

(1) 引張側補強材 (PC 鋼棒と鉄筋) による比較

図-2 は荷重とスパン中央たわみの関係を示している。引張側にアンボンド PC 鋼棒を用いた供試体 CFST-PC (A) および PC (B) の I 種設計としての許容荷重は約 6.9tf (= 4.8tfm×4÷2.8m) であり、それよりも大きな荷重 (約

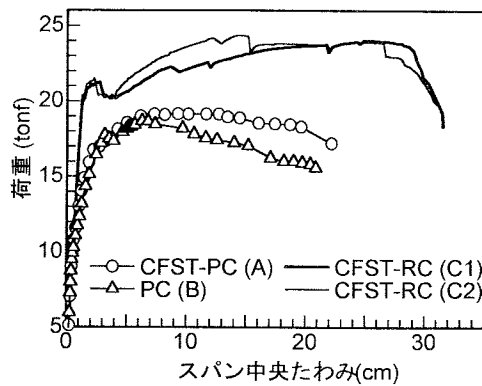


図-2 荷重－たわみ曲線 (PCとRCの違い)

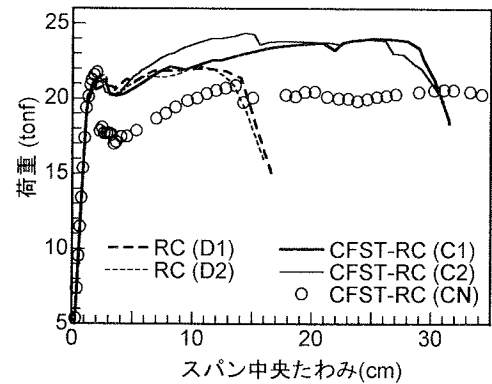


図-3 荷重－たわみ曲線 (CFSTの効果)

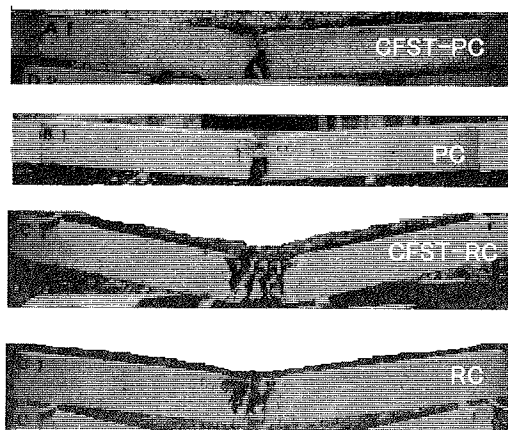


写真-2 静的荷重試験による破壊状況

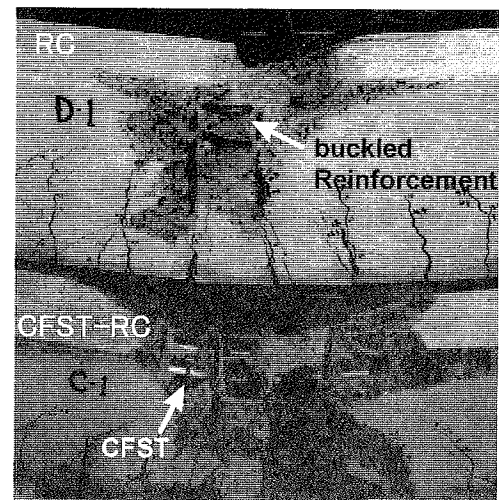


写真-3 載荷点の破壊状況

10tf) を過ぎて非線形挙動が現れている。それらの最大耐力は、設計曲げ耐力を同じにした供試体 CFST RC (C1, C2) の約 80% であり、PC 鋼棒がアンボンドであることが影響している。

文献 3), 4) にあるように、引張側補強材としてアンボンド PC 鋼棒を用いることにより、強度は高いが『伸び』(破断ひずみ) が小さい PC 鋼棒の材料特性を有効に利用し、はりの強度と靱性を確保することができる。しかし本研究では、写真-2 の CFST-PC や PC のように載荷点の狭い範囲に曲げクラックが集中し、圧縮側コンクリートの圧潰と引張側コンクリートの崩落のために耐力が低下し、CFST-RC (C1, C2) に比べて靱性も劣っている。ただし、図-2 の CFST-PC (A) の耐力は PC (B) に比べて緩やかに低下しており、これは次項に示すように CFST の効果であると考えられる。

(2) コンクリート充填鋼管 (CFST) の効果

図-3 は、荷重とスパン中央のたわみの関係を表しており、引張側補強材を鉄筋とし、圧縮側に CFST を用いた CFST-RC タイプと鉄筋を用いた RC タイプについて示している。2 体ずつ行った各タイプの実験値のバラツキは少なく、実験の再現性がある。CFST-RC (C1, C2) と RC (D1,

D2) の曲げ耐力は同等になるように設計されており、実験でも耐力の差は小さいことがわかる。しかし、両タイプの終局変位には明らかな差があり、CFST を用いて圧縮側を補強する効果が認められる。

写真-3 に示すように、RC タイプではコンクリートの圧潰に続いて圧縮鉄筋の曲げ座屈を生じて耐力が低下する。一方、CFST-RC タイプでは圧縮側断面の多くが CFST 断面で置換されているために圧潰の影響が少ない上に、CFST は曲げ座屈を起こしにくいので高い靱性を有する。このように高靱性を示す CFST-RC タイプが終局状態 (耐力の急激な低下) に至った要因として、① CFST の鋼管の孔が極端に楕円状に押し潰されて耐力を失った、② 載荷板に接するコンクリートの崩落が著しく、載荷治具が不安定になったためである。

孔の無い鋼管を用いた供試体 CN では、変位が約 2.2cm のとき支点上のはり上側断面に鉛直方向のき裂が入り、耐力が 22tf から 18tf へ突然低下した。その後、耐力は約 20tf を維持しているが、たわみの増加に伴ってはり端部の仕上げモルタルを押し出すようにして鋼管が突き出し、その量は最終的に 40mm にも達した。このように鋼管とコンクリートの付着せん断破壊のために変形の初期段

階で耐力が急激に低下するのは好ましくないので、鋼管とコンクリートの一体化のための対策として孔明き鋼管は有効である。

(3) 塑性変形能

図-4は供試体C1とD1のスパン中央から150mmの断面における鋼材ひずみと荷重の関係を示している。引張側の鉄筋ひずみが急激に増加し始める荷重を降伏荷重とし、そのときのたわみを降伏たわみ δ_y とする。静的曲げ載荷実験結果として、各供試体の δ_y 、最大耐力 P_U 、その95%の耐力におけるたわみ δ_L 、および δ_L に基づいた靱性率($=\delta_L/\delta_y$)と吸収エネルギー(荷重-たわみ曲線の δ_L までの積分値として求めた)を表-5に示す。なお、靱性率の基準たわみ δ_L は統一された指標ではなく、最大耐力に達した後の除荷域で降伏荷重に対応するたわみを用いる場合もある。

CFST-RCははりRCはりに比べて2倍以上の靱性率および吸収エネルギーを示しており、塑性変形能が優れている。また、供試体CNも優れた塑性変形能を有している。これは、変形の初期段階で耐力が急減しているものの、①鋼管とコンクリートの付着せん断破壊としてひずみエネルギーが部材長方向へ分散する、および②CFSTの鋼管に孔が無いので孔が潰れることによる耐力の低下はない、ためであると考えられる。

表-5 静的曲げ載荷実験結果

供試体 タイプ	名称	降伏 変位 δ_y (mm)	最大 荷重 P_U (tf)	0.95 P_U 時変位 δ_L (mm)	靱性率 δ_L/δ_y	0.95 P_U 時の 吸収エネルギー (tfm)
CFST-PC	A	24.4	19.2	196	8.0	3.52
PC	B	33.8	18.7	108	3.2	1.82
CFST-RC	C1	17.5	24.0	292	16.7	6.55
CFST-RC	C2	15.4	24.3	278	18.1	6.27
RC	D1	18.5	22.1	143	7.7	2.98
RC	D2	15.0	22.1	132	8.8	2.72
CFST-RC	CN	16.4	21.7	340	20.7	6.65

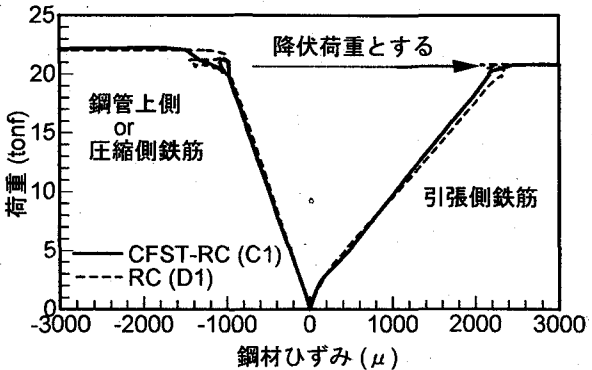


図-4 荷重とスパン中央の鋼材ひずみ関係

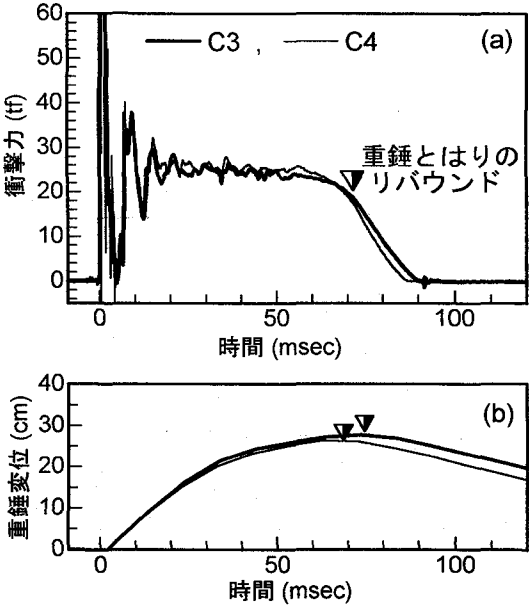


図-5 衝撃力・重錘変位の時刻歴 (CFST-RC)

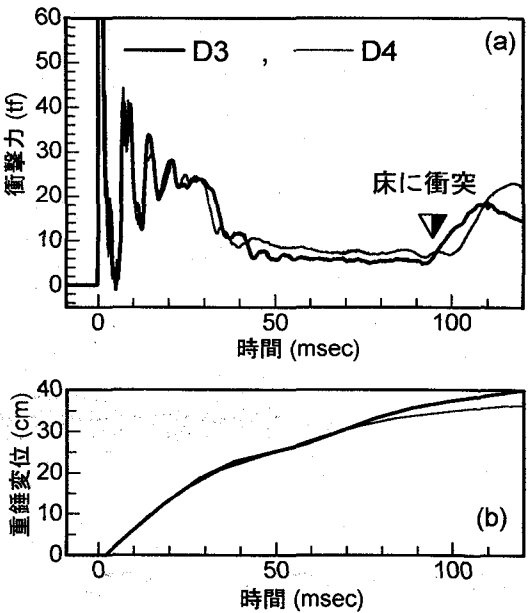


図-6 衝撃力・変位の時刻歴 (RCはり)

3.2 落錘衝撃載荷実験

(1) 衝撃力・重錘変位の時刻歴

図-5および図-6はそれぞれCFST-RCはり(C3, C4)およびRCはり(D3, D4)について、ロードセルにより測定した衝撃力と重錘変位の時刻歴を示している。同一タイプの供試体C3とC4,あるいはD3とD4においては、測定結果の違いは認められない。図-5のCFST-RCはりでは重錘の能力不足により完全破壊(はりとしての機能を完全に失って床に衝突する状態)に至らなかった。そのため、約70msec以降における衝撃力の減少は、重錘変位の減少を伴っており、供試体が重錘をリバウンドさせ

る能力を有していることを表している。一方、図-6 の RC はりは完全破壊したため、約 30msec で衝撃力は減少しているが重錘変位は増加し、約 95msec で床に衝突している。なお、平均的な衝撃力は両タイプともほぼ 25tf に収束しており、衝撃耐荷力としては同程度である。

CFST-RC はりおよび RC はりの破壊状況を写真-4 に示す。RC はりでは、破壊がはり中央部に集中して圧縮鉄筋が座屈している。CFST-RC はりでは、引張側コンクリートの破壊の範囲が RC はりに比べて広いが完全破壊には至らず、鋼管に明けた孔が楕円状に押し潰された状態が認められた。

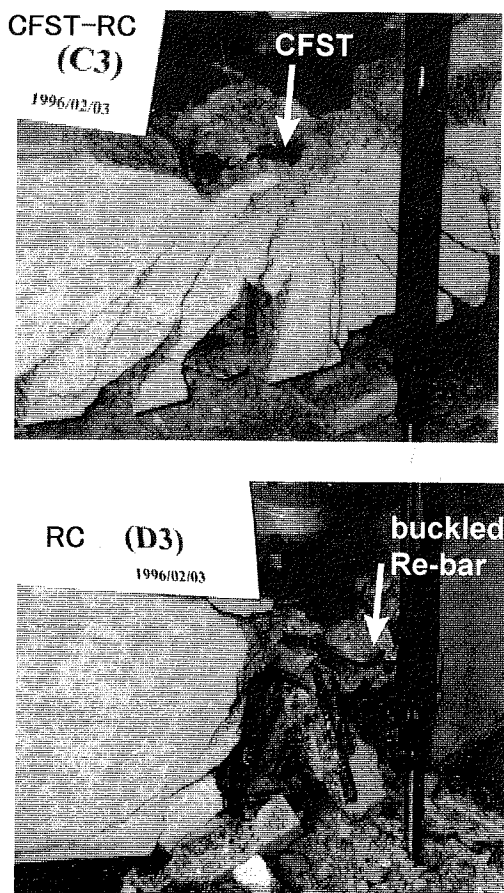


写真-4 衝撃载荷の破壊状況

(2) 载荷点変位と衝撃力・伝達エネルギー関係

図-7 において、実線は各供試体の载荷点変位と衝撃力の関係を表し、破線は衝撃力の変位に関する積分値、すなわち重錘からはりに伝達されたエネルギーを表している。CFST-RC はりでは完全破壊に至らなかったため最大変位までの積分値を図中に示し、RC はりでは衝撃力が急激に低下する点を限界変位とし、そこまでの積分値を図中に示した。また、落下高に最大変位または限界変位を考慮して求めた重錘エネルギー（位置エネルギー）も示してある。CFST-RC はりの伝達エネルギーが重錘エネルギーよりも約 4 % 大きいのは変位計測の精度によるものであり、重錘エネルギーを完全に吸収したと言える。言

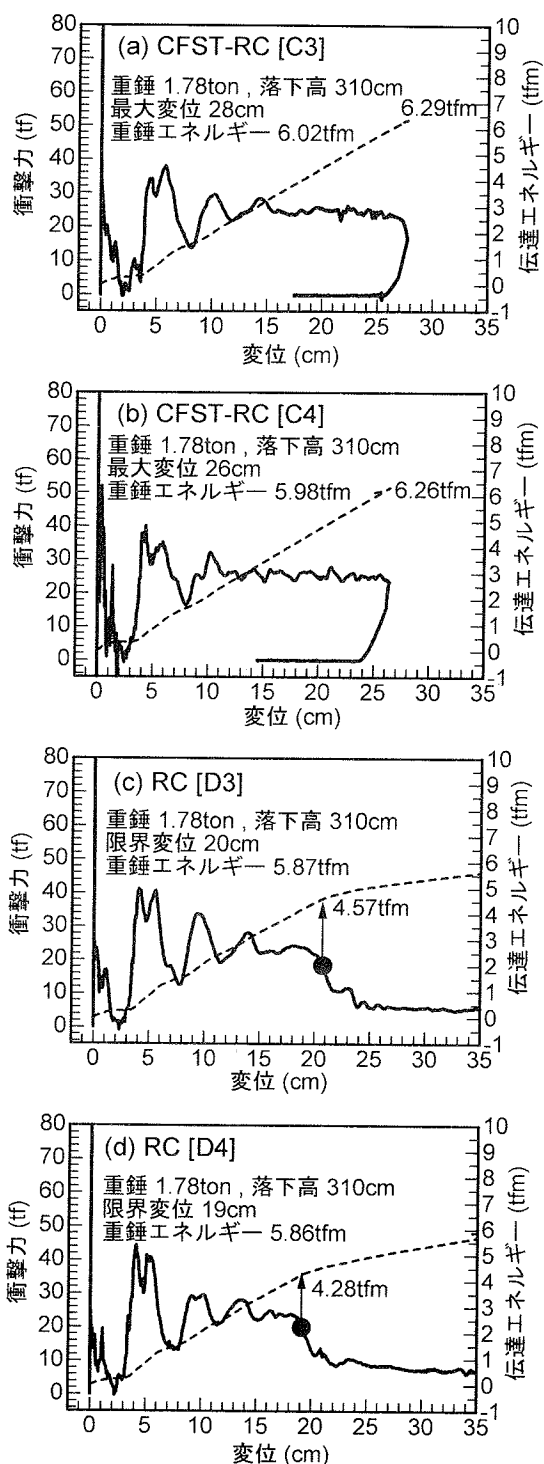


図-7 载荷点変位と衝撃力・伝達エネルギー関係

い換えれば、CFST-RC はりは完全破壊に至るまでにはまだ余裕があることを表している。一方、RC はりでは完全破壊したために重錘エネルギーの約 75% が伝達されている。その伝達エネルギーは、RC はりの静的载荷実験における吸収エネルギー（表-5）に比べて約 1.5 倍である。なお、両者のエネルギーを求めるための限界変位の決め方は異なっているが、結果に大差を生じることはない。

CFST-RC はりは 1 回の衝撃载荷で完全に破壊しなかったため、C4 に対して落下高 2m の 2 回目の衝撃载荷

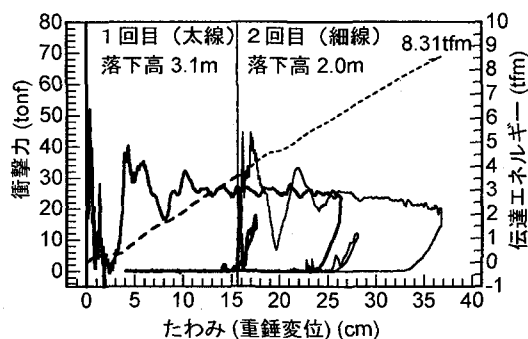


図-8 CFST-RC (C4)の繰返し衝撃载荷実験

を行った。図-8には、1回目および2回目の結果がそれぞれ太線および細線で表されている。1回目の载荷では最終変位が15.6mmで静止したので、この点までを1回目の荷重-変位関係および吸収エネルギーとし、2回目のデータに対する初期値とした。2回目の载荷においても重錘がリバウンド（図で変位が戻っている）することによって衝撃力が減少しており完全破壊とは言えないが、スパン中央部は著しい損壊が見られた。この最大変位までの累積伝達エネルギーは8.31tfmである。これは図-7のRCはりに吸収された伝達エネルギーに比べて約1.9倍にもなり、CFST-RCはりの耐衝撃性が優れていることを示している。また、この累積伝達エネルギーは静的载荷実験における吸収エネルギー（表-5）に比べて約1.3倍であり、RCタイプの場合と同様に、衝撃载荷実験における吸収エネルギー量は静的载荷実験のそれより大きくなっている。

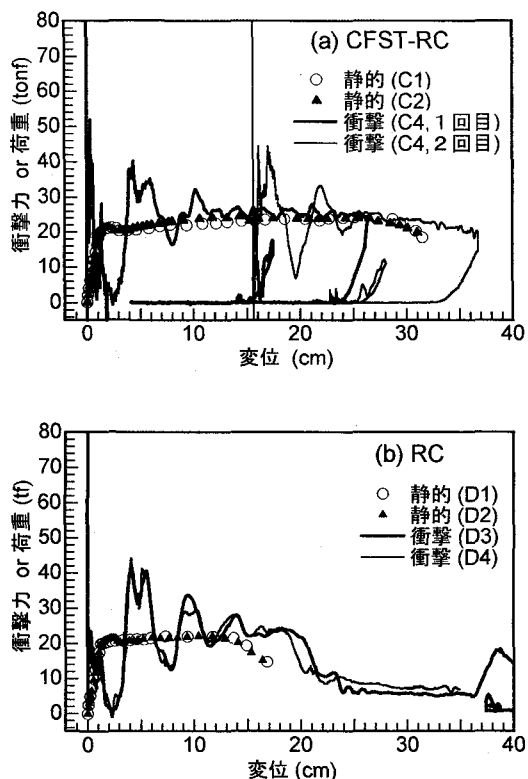


図-9 静的载荷と衝撃载荷の比較

(3) 静的曲げ载荷と落錘衝撃载荷の比較

図-9(a)および(b)は、それぞれCFST-RCタイプおよびRCタイプについて静的曲げ载荷または衝撃载荷における荷重とスパン中央変位の関係を表している。両タイプとも終局変位は、衝撃载荷の方が大きくなる傾向を示しているが、耐力については局所的な変動部分を除いて静的载荷と衝撃载荷による差はない。したがって、前項のように衝撃载荷の場合の吸収エネルギーが大きくなる。

4. 結論

本研究では、PCはりやRCはりの耐衝撃性および靱性を向上させるために、圧縮鉄筋に代えてコンクリート充填鋼管（CFST）を用いたCFST-PCはりおよびCFST-RCはりを製作し、1点载荷による静的曲げ载荷実験と重錘（1.78tf）を自由落下（3.1m）させる衝撃载荷実験を行った。その結果、静的载荷のみならず衝撃载荷においても結果の再現性を確認すると同時に、以下のようにCFST-RCはりは優れた塑性変形能と耐衝撃性を有することがわかった。

- (1) アンボンドPC鋼棒を引張側補強材として用いた供試体では、载荷点の狭い範囲に曲げクラックが集中してコンクリートが崩落するため、鉄筋を用いた場合に比べて耐力・靱性とも劣った。
- (2) 圧縮側補強材として鉄筋を用いた供試体では、コンクリートの圧潰と鉄筋の座屈のために靱性が劣る。一方、コンクリート充填鋼管（CFST）を用いた供試体では、コンクリートの圧潰の影響が少ない上にCFSTは曲げ座屈を起こしにくいので靱性が高く、静的载荷実験において得られた靱性率および吸収エネルギーは鉄筋を用いた場合の2倍以上となった。
- (3) CFSTの鋼管に複数の直径35mmの孔をあけたが、孔の径や配置による影響についての検討はせず、孔の無い供試体との比較のみを行った。鋼管に孔のない供試体では、変形の初期段階で鋼管とコンクリートの付着せん断破壊を起こして耐力が急激に低下するが、その後、耐力を持続する。一方、鋼管に孔のある供試体では、変形が大きくなると孔が楕円状に潰れるため、耐力の低下をもたらすことになる。本実験で用いたCFST-RCはりの場合、静的载荷実験における終局たわみを塑性回転角に換算すると約23°にもなり、十分な塑性変形能を有する。しかし、鋼管の径厚比、孔径および配置による影響についての検討が必要である。
- (4) 静的曲げ载荷と衝撃载荷に対して、各供試体の曲げ耐力力はほぼ同じであるが、終局変位および吸収エネルギーは衝撃载荷の方が大きくなる傾向を示した。
- (5) 耐衝撃性を伝達（吸収）エネルギーで評価するならば、本研究で用いたCFST-RCはりは、RCはりに比べて約2倍の耐衝撃性がある。

参考文献

- 1) 田中浩一, 大内 一: 鋼管・コンクリート複合構造橋脚模型の繰返し曲げ載荷試験, 第 50 回土木学会年次学術講演会, V-428, 1995.
- 2) 跡部俊郎, 田村多佳志, 岡本 隆, 水谷慎吾: プレキャストセグメントと鋼管からなる合成構造橋脚の力学特性に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 6 巻第 2 号, pp.107-116, 1995.
- 3) 前川幸次, 吉田 博: コンクリート充填鋼管はりの静的および重錘衝撃実験, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.117-127, 1995.
- 4) 圓林栄喜, 園田佳巨, 小林一隆, 石川信隆, 佐藤弘史: 高速載荷を受けるアンボンド PC はりの動的靱性に関する一考察, 第 3 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.315-320, 1996.

(1996 年 9 月 6 日受付)