

片持型落石覆工を想定した鋼管コンクリート複合 T 形ばりの変形能に関する実験的研究

Experimental study on deformation capacity of Steel tube-reinforced concrete composite T-beams
supposing Cantilever type rock-shed

塩見昌紀*, 前川幸次**, 吉田 博***

Masanori SHIOMI, Koji MAEGAWA, Hiroshi YOSHIDA

*日本ゼネスパイプ (株)・金沢大学大学院自然科学研究科学生 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

**金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

***吉田構造工学研究所 (〒932-0102 富山県小矢部市水島 561)

In reinforced concrete structures which are designed for resisting rockfalls, it is indispensable to provide ductility sufficient for bending forces. The factors which diminish the bending deformation capacity of reinforced concrete beams are generally considered to be crush of concrete caused at a comparatively early stage on the compression side and buckling of compression bars in succession. The authors have proposed a reinforcement method which emphasizes keeping a balance between the compression and the tension sides by using steel tubes instead of compression bars. The possibilities for improving the deformation capacity of concrete beams were found in experimental tests. A rock-shed of the cantilever type was taken to be the real structure, and the ductility of prestressed concrete T-beams, especially the effect of steel tube-reinforcement, was studied using static and dynamic experiment.

Key Words: composite beam, ductility, rock-shed, steel tube

キーワード: 複合はり, 靱性, 落石覆工, 鋼管

1. まえがき

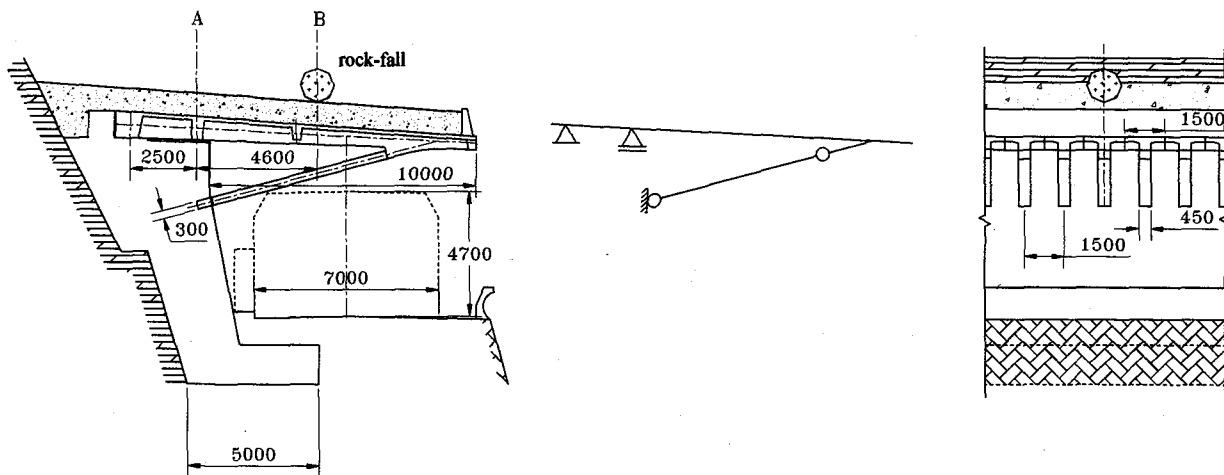
日本は国土面積の 75%を山岳・丘陵地帯が占め、広範囲に分布する脆弱な地質を有しており、また多雨多雪地帯に属していること、さらに世界でも有数の地震国であることなどから、道路防災対策上厳しい環境下におかれている。

道路防災対策の一つとして落石防護工があり、その代表的なものに落石覆工がある。落石覆工の施工箇所は国土事情に起因し、片側が山で反対側が谷になっている場合が多く、谷側の基礎に多額の工事費が必要となっている。これに対してヨーロッパで見ることができる片持型の覆工は、谷側に基礎が不要であり、また、景観にも優れた構造物である。しかし片持型は構造上、単純はり形式のものや門型あるいは逆 L 型といった形式に比べて、荷重載荷時の曲げモーメントやせん断力が大きくなるため採用されにくい。

一方、日本での落石覆工の設計法は落石の衝撃力を静的な荷重に置き換えて許容応力度法で検討している¹⁾。

しかし、落石のように衝撃的な荷重を受ける構造物では、構造物が剛であれば衝撃力は大きくなり、柔であれば小さくなる。したがって、最近では落石覆工の供用期間中に数回経験するであろう落石に対しては使用限界状態として許容応力度設計を行い、供用期間中に経験する可能性の少ない、極めて大きな落石に対しては終局限界状態としてエネルギーを指標とした設計方法とすることが合理的であるという考え方が浸透し始めている²⁾。このような設計法では、耐荷力もさる事ながら、変形能が重要になってくる。

これまでも鉄筋コンクリートはりやプレストレストコンクリートはりの変形能に着目した研究は行われているが^{3) 4)}、著者らは、鉄筋コンクリートはりの曲げ変形能を向上させる目的で、はりの圧縮鉄筋の代わりに、コンクリートとの付着力を増す目的で孔をあけた鋼管を配置した、鋼管・コンクリート複合矩形はりの静的および衝撃曲げ実験を行ない、その効果を確認している⁵⁾。これは、曲げに伴う圧縮側コンクリートの早期圧潰に続いて発生する圧縮鉄筋の座屈による耐力の低下を、コンク



図一 片持型落石覆工

リートを充填した有孔鋼管（以下、CFST と呼ぶ）の剛性を利用して遅らせることによるものである。このように曲げ変形能の優れたはり、衝撃荷重を受ける落石防護構造物への適用が期待され、終局限界を想定したエネルギーを指標とする設計法においては有利な部材となる。

ここでは、片持型の落石覆工を念頭に置き、プレストレストコンクリート T 形はりによる CFST の配置効果を静的および重錘落下実験により検討した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

図一に、試設計を行った片持型落石覆工の側面図、正面図および構造モデルを示す⁶⁾。主桁を支えている斜材は 450mm×300mm の断面を有する鉄筋コンクリート部材で、主桁とはピン接合となっており山側支持台取付部はメナーゼヒンジである。図のような片持構造では荷重載荷により正の曲げモーメントと負の曲げモーメントを生じる。この試設計においては A 断面と B 断面にそれぞれ負と正の最大曲げモーメントが生じる結果となっている。実験は、実験設備の能力およびモデル化によるシミュレーションの目的から実構造物の 1/2 モデルにおける A 断面および B 断面を有する単純ばりを製作し、静的実験と衝撃実験を行った。実験供試体のタイプと名称を表一に、供試体の断面諸元を図二（a）～（f）に示

す。

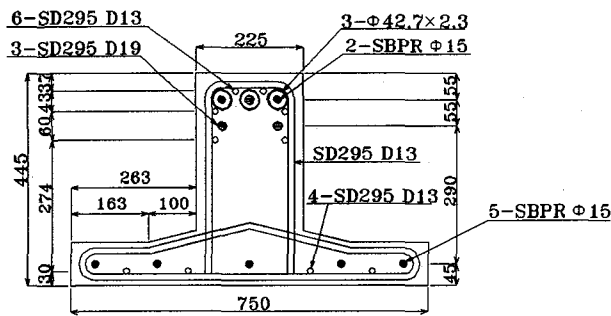
供試体は負のモーメントが作用する A 断面を「IT 形」とし、正のモーメントが作用する B 断面を「T 形」として取り出し分類した。さらに、圧縮側補強材に有孔鋼管を配置したものを「CFST」で表し、異形棒鋼を配置したものは無印とした。また、衝撃実験に用いた供試体には供試体名末尾に「D」を付し整理した。

それぞれの供試体において圧縮側以外の補強材は統一した。プレストレストコンクリートはりにおいて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有利であると考えられるので、実構造物の目的を考えてアンボンド PC 鋼棒を使用した^{4) 7)}。

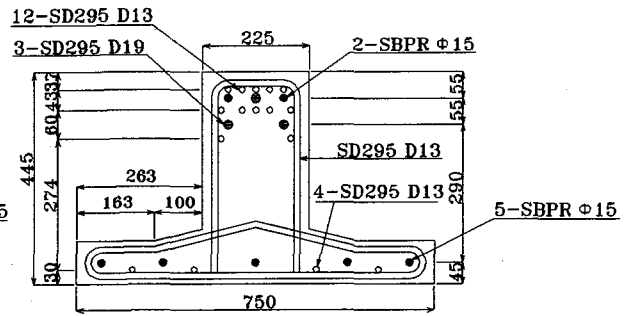
試設計を行った片持型落石覆工は道路橋示方書による弾性設計に基づいた。しかし 1/2 モデルは、当実験が塑性状態のモデル化であるという観点から、降伏開始時（最下段鋼材に降伏ひずみが発生した時点）～終局耐力時（圧縮コンクリートが破壊ひずみに達した時点）までの挙動を実物と 1/2 モデルとで近似させることにより設計を行った。供試体の断面諸元を決定するに当たり次のように配慮した。①実物試設計と 1/2 モデルの各断面において断面分割法により $M-\phi$ 関係を求め、降伏開始時と終局耐力時の抵抗モーメントおよび曲率の比率が、実物と 1/2 モデルで近似するように設計した、②1/2 モデルから取り出した単純ばりは、構造物として B 断面に集中荷重を加え、A 断面および B 断面が終局耐力に達した時に生じ

表一 供試体名称

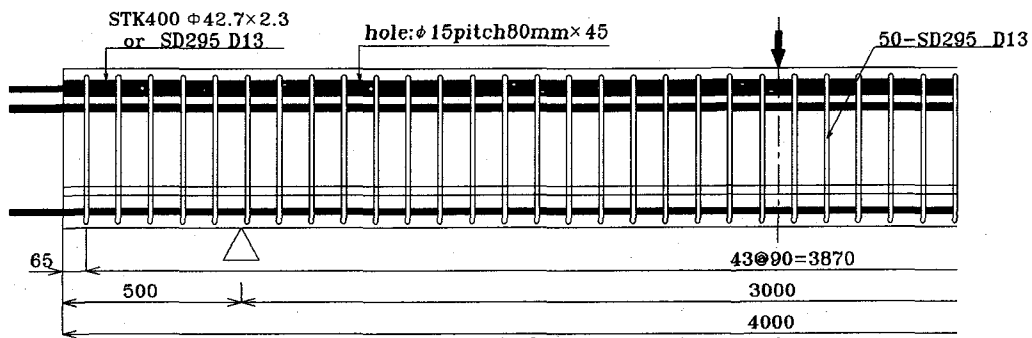
1/2 モデル	供試体名	圧縮側鋼材の差異	引張側 PC 鋼棒
A 断面	CFST-PC-IT	3 - $\phi 42.7 \times 2.3$ CFST	5 - SBPR 1080/1230 $\phi 15$ 緊張力 33.3 kN/本
	PC-IT	6 - SD295 D13	
B 断面	CFST-PC-T	6 - $\phi 42.7 \times 2.3$ CFST	4 - SBPR 1080/1230 $\phi 15$ 緊張力 55.0 kN/本
	PC-T	8 - SD295 D13, 2-SD295 D19	



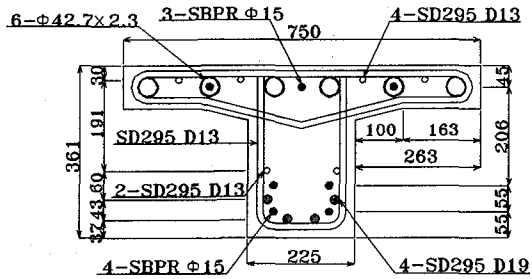
(a) CFST-PC-IT



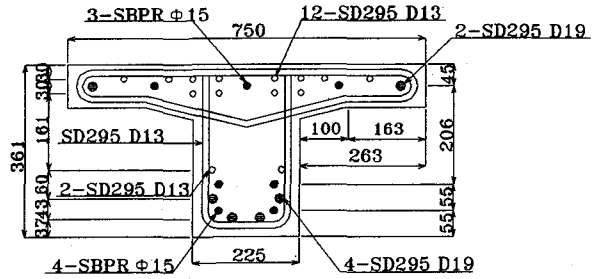
(b) PC-IT



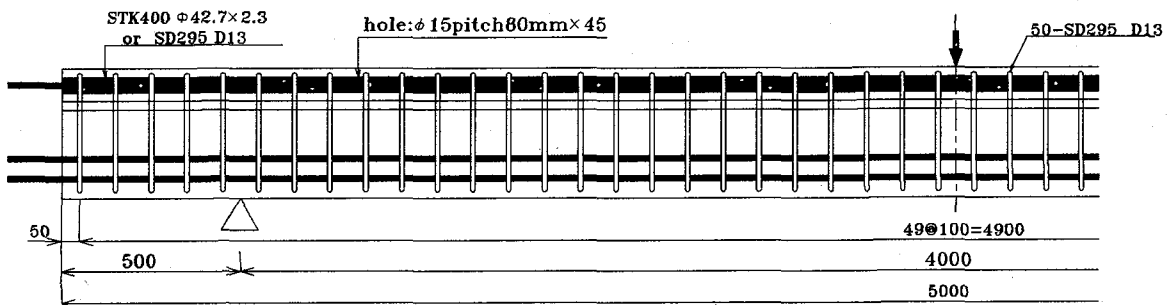
(c) Side view of reinforcements (IT-type)



(d) CFST-PC-T



(e) PC-T



(f) Side view of reinforcements (T-type)

図—2 供試体断面諸元および側面配筋図

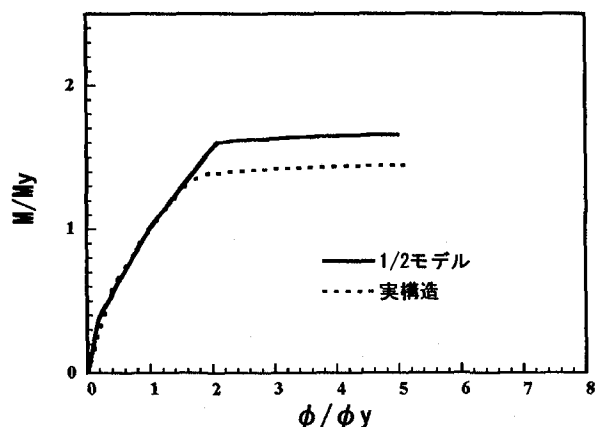


図-3 実構造物と1/2モデルのM-φ関係（A断面）

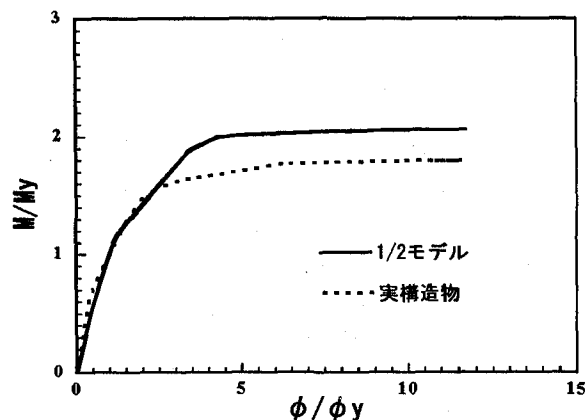


図-4 実構造物と1/2モデルのM-φ関係（B断面）

表-2 コンクリート配合 (kg/m³)

水	セメント	高炉スラグ	膨張材	細骨材	粗骨材	混和剤
165	220	280	30	913	762	5.8

る軸力をあらかじめプレストレスから相殺してある、③1/2モデルでA断面およびB断面が終局耐力に達したときに生じるせん断力に対してスターラップによるせん断補強を行う、④IT形およびT形ごとにCFSTタイプと異形棒鋼タイプの終局曲げ耐力を同程度にする、等である。

図-3および図-4は各断面の実構造物と1/2モデルのM-φ関係を、縦軸は降伏モーメントで除したモーメントとし、横軸は降伏曲率で除した曲率としてプロットし比較したものである。

図-2(c)および(f)には側面配筋図を示している。CFSTの鋼管には鋼管断面を0°, 180°, 90°, 270°, 45°, 225°, 135°, 315°の順に、長さ方向に80mmピッチで孔(φ15mm)があげられている。これにより鋼管とコンクリートの付着をよくすることが期待できる⁵⁾⁸⁾。

設計曲げ耐力 M_{ud} は断面分割法により算定し、それぞれPC-IT(446.2 kNm), CFST-PC-IT(446.6 kNm), PC-T(346.9 kNm), CFST-PC-T(347.6 kNm)となった。算定に当っ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($\sigma_{28}=40$ MPa)を用いた。また、鋼管にあげた孔の影響は欠損する量を考慮して85%を乗じた鋼材量としたが、PC鋼棒がアンボンドである影響は無視した。

表-2にコンクリートの配合を示し、表-3に各供試体の曲げ載荷時のコンクリート強度を、また、表-4に鋼材の特性値を示す。コンクリート強度のバラツキは、強度発現を促進するために蒸気養生を用い、試験時での材令が一定でなかったことが要因と考えられる。また、鋼管は汎用性の高いSTK400を使用したが高実降伏点が規格値に対して大きな値を示している。

表-3 コンクリート特性値

供試体名	圧縮強度 (MPa)
PC-IT	51.2
PC-IT-D	45.5
CFST-PC-IT	48.5
CFST-PC-IT-D	41.1
PC-T	43.4
PC-T-D	58.3
CFST-PC-T	56.4
CFST-PC-T-D	56.3

表-4 鋼材特性値

鋼材名	降伏点 (MPa)		引張強度 (MPa)	
	公称値	成績表	公称値	成績表
鋼管	235	437	400	484
鉄筋 D13	295	382	440 ~ 600	538
鉄筋 D19	295	360	440 ~ 600	529
PC鋼棒 φ15	1080	1182	1230	1273

2.2 実験方法

(1) 静的載荷実験

静的載荷はIT形およびT形に対してそれぞれ図-2(c)および(f)のように支間長は3mおよび4mとし、3点曲げで行った。その支間長は、1/2モデル構造物の終局曲げ耐力時におけるA断面およびB断面の曲げモーメントとせん断力に基づいている。支点はφ80mmの丸鋼を幅100mmの凹形鋼板で挟んだ構造となっており、これを支持台上に固定し供試体を載せた。荷重は

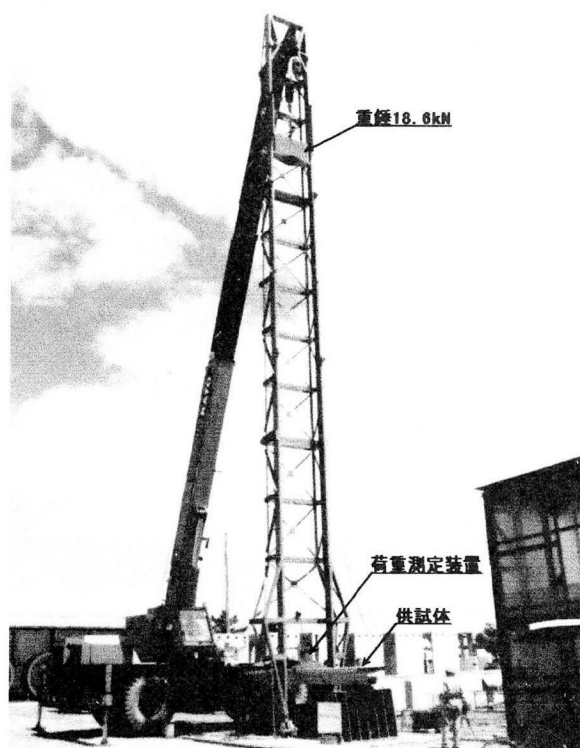


写真-1 重錘落下式衝撃試験機

支間中央一点載荷とし、載荷板と供試体は（幅 60mm×供試体上端全幅）の面で接するようにした。

載荷は 1000kN 耐圧試験機を用いて行い、荷重、載荷点変位、鋼管と鋼棒のひずみを測定した。

(2) 衝撃載荷実験

衝撃実験は、写真-1 に示す重錘落下式衝撃試験機を用いて行った。試験機のフレームは高さ 20m で、頂部をトラッククレーン先端に取り付けて懸垂し、下部はコンクリート床面にピン支承で固定してある。この構造は重錘離脱時の反力を効率よくフレームで負担することができる。重錘は鋼板をボルト締結により一体化したもので、フレーム両横の溝形部にガイドされて自由落下する。

衝撃実験においても図-2 に示した支間長で支持し、中央一点載荷としたが、衝撃実験では供試体の載荷点上に幅 200mm で長さは供試体上端全幅に接する載荷治具を介して荷重測定装置を載置した。この荷重測定装置は外径 200mm、内径 100mm、高さ 200mm の鋼製円筒体の内外面にひずみゲージを貼付したものである。また、重錘は重量 18.6kN で最大 14m の落下高さを確保でき、重錘最下面の荷重測定装置との衝突面には厚さ 60mm の鋼板を取り付けた。この鋼板と重錘本体との間には衝撃波の立ち上がりを緩やかにする目的で 10mm のコンベヤーベルトゴム板を 2 枚はさみこんだ。

計測は次の項目について行った。

- ①荷重測定装置による衝撃力。
- ②スパン中央部の異形棒鋼、鋼管、および PC 鋼棒のひずみ。

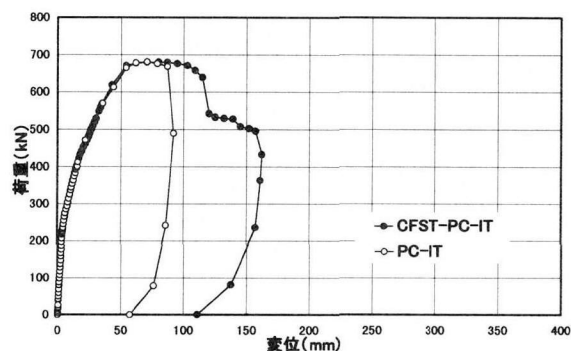


図-5 荷重-載荷点変位関係（IT形）

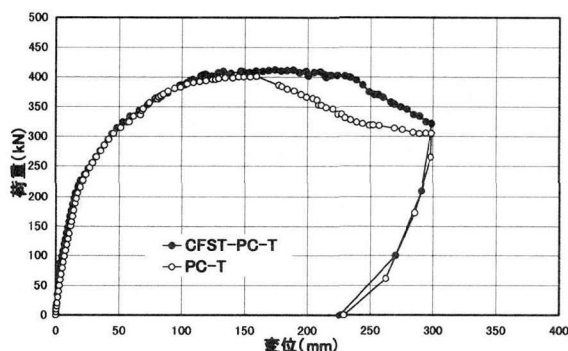


図-6 荷重-載荷点変位関係（T形）

③重錘上部にとりつけた加速度計による重錘加速度。

④レーザー変位計による載荷治具の変位。

これらのデータは DC アンプを経てデジタル変換レコーダーに記録した。サンプリング速度は 10kHz で行った。ただし、レーザー変位計の応答性能は 1kHz である。また、フィルター処理は特別行っていない。

3. 実験結果および考察

3.1 静的載荷実験

(1) 終局曲げ耐力

図-5 および図-6 は、それぞれ IT 形および T 形供試体の荷重と載荷点変位の関係を示したものである。終局耐力は断面分割法により算定した M_{ud} の約 10% 増しとなったが、これは入力値が材料の公称値であったためと考えられる。しかし、IT 形および T 形ともに、異形棒鋼タイプと CFST タイプの終局耐力はよく一致しており、荷重を指標とした設計においては差異が生じることはないと考えられる。

(2) IT 形供試体

写真-2 に示したように異形棒鋼を配した PC-IT 供試体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、写真-3 に示した CFST タイプでは圧縮側断面が異形棒鋼に比べて多くの CFST 断面で置換されているために圧潰の影響が減少する上に、CFST の剛性が高いために、曲げ座屈を起こしにくく塑性変形能が大きい。図-5 に示すように CFST タイプで

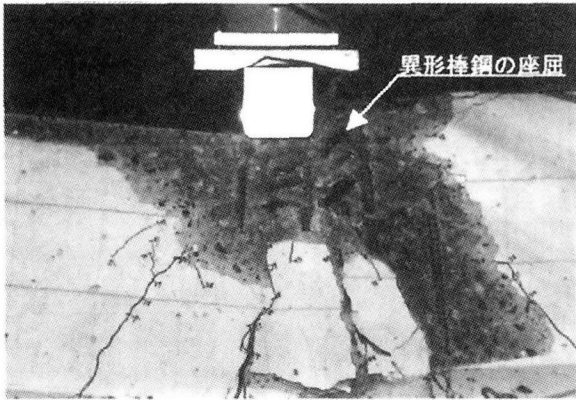


写真-2 PC-IT 供試体

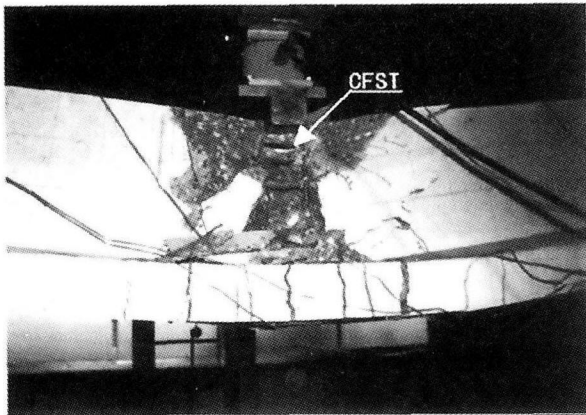


写真-3 CFST-PC-IT 供試体



写真-4 PC-T 供試体

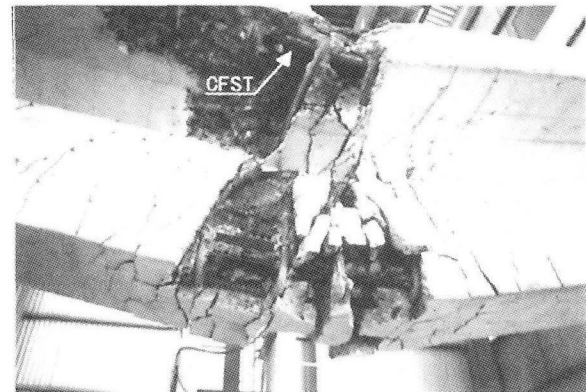


写真-5 CFST-PC-T 供試体

は、一旦コンクリートの圧潰に伴う荷重低下が見られるが、CFST はまだ健全であるため、再び耐力を維持して変位し、終局ではCFST の座屈で耐力を失った。

また、実験では載荷点の局部的なつぶれが見られたが、IT 形供試体は、片持型落石覆工の山側支持台上で負のモーメントを生じる断面を想定しており、実際の構造物ではゴム支承により十分な面積を確保し荷重を分布させることにより、実験において生じた局部的なつぶれは、ある程度回避できるものと考えられる。

(3) T 形供試体

図-6 に示すように、异形棒鋼タイプおよび CFST タイプの耐力低下は、それぞれ変位 150mm および 230mm で生じ、変位 300mm 付近で両者の耐力は再び同程度になっている。これは、异形棒鋼タイプがコンクリートの圧潰の影響を受けやすいことを示している。ただし、T 形供試体ではフランジ幅方向で圧潰の進行と影響の差があるため、IT 形供試体のように耐力を急激に失うことはない。なお、変位 300mm 程度になるとフランジ端部のコンクリートの圧潰による剥落が顕著となるため、异形棒鋼の座屈を目視することができた。

静的実験では試験機のスローク限界 (300mm) による盛替え時に載荷点が著しく崩壊したので、変位がさらに進行した段階での評価はできなかった。しかし、写真-4 および写真-5 に示すように破壊形態は异形棒鋼タイプがコンクリートの圧潰から圧縮鉄筋の座屈という経緯をたどるのに対して、CFST タイプでは CFST の上側被りコンクリートの圧潰および CFST 下側コンクリートの剥離という形態をたどった。これは、実物の 1/2 に縮小した供試体のために、CFST の純被りがフランジ部で 16mm と小さかったことによると考えられるが、実際の構造物でも CFST 下部のコンクリート被りは充分確保することが必要と考えられる。

(4) 変形能

表-5 は静的載荷実験の結果をまとめたものである。ここで、降伏変位は引張側の鉄筋ひずみが急激に増加しはじめる荷重時の変位としている。また、靱性率を算出する際には最大荷重の 95%まで荷重が低下したときの変位を用い⁵⁾、降伏変位で除して靱性率とした。また、仕事量は荷重-変位曲線の積分値である。表-5 の実験結果では CFST タイプが异形棒鋼タイプに比べて靱性率および仕事量とも 1.3~1.5 倍の数値を示している。こ

表-5 静的曲げ実験結果

供 試 体	降伏変位 δ_y (mm)	最大 荷 重 P_u (kN)	0.95 P_u 時 変 位 δ_t (mm)	靱性率 δ_t / δ_y	0.95 P_u 時 仕事量 (kNm)
PC-IT	10.4	682	87.6	8.42	48.1
CFST-PC-IT	8.2	684	111.9	13.7	64.7
PC-T	17.1	401	182.1	10.7	60.8
CFST-PC-T	15.2	412	241.0	15.9	86.0

れまでの矩形ばりでの研究⁵⁾では、約 2 倍の靱性率および仕事量を示したが、T 形はりの場合はフランジ厚さの制約を受けて大口径鋼管を配置できないため、補強材の曲げ剛性を増やすことができず、異形棒鋼タイプに対して顕著な塑性変形能の差が現れていない一つの要因になっていると考えられる。

3.2 衝撃載荷実験

(1) IT 形供試体

図-7 および図-8 は IT 形の異形棒鋼タイプおよび CFST タイプの荷重と変位の関係を示したものである。また、写真-6 は実験後の両供試体の変形量を示してい

る。重錘 18.6kN、落下高さ 14.0m の実験では異形棒鋼タイプおよび CFST タイプの双方とも結果的には重錘を受け止めることができた。両者の違いは、最大変位および残留変位が、CFST 供試体の方が小さいことである。そして異形棒鋼タイプは耐力低下の度合と残留変形が大きく、図-5 の静的実験結果との比較から、はりとしての耐力を失っていると考えられる。一方、CFST タイプでは耐力を維持したまま重錘を受け止めていることが推察される。このように、落石覆工においてはできるだけ変形量が小さく、しかも大きなエネルギーを吸収できることが重要な性能である。また、異形棒鋼タイプの破壊に至る過程は静的載荷実験の結果から、一旦、圧縮側コンクリートの圧潰により荷重が低下した後に鉄筋の座屈が生じて耐力を失うと考えられるが、衝撃実験では図-7 の▼印近傍で耐力低下が著しいことから、▼印を耐力維持の限界点としてエネルギー吸収量を求めた。一方、CFST タイプでは耐力維持の限界点には達していないと考えられるが、図-8 で示す最大変位までのエネルギー吸収量を算出して比較すると図-9 のように示される。また、図-10 には荷重の経時変化を示した。

写真-7 は実験後の載荷点を示している。異形棒鋼タイプではスターラップを押し広げるように鉄筋が座屈しているのに対して、CFST タイプでは鋼材によるコンクリートの拘束状態が維持できていることがわかる。

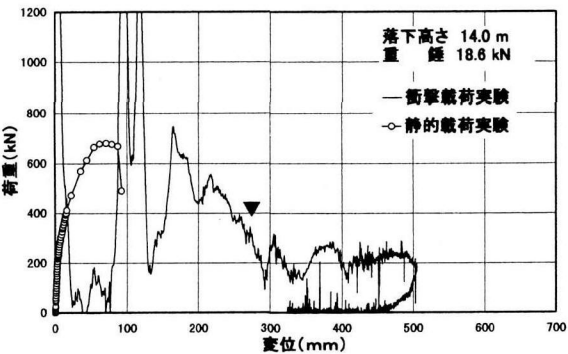


図-7 IT形衝撃実験 荷重-変位結果（異形棒鋼タイプ）

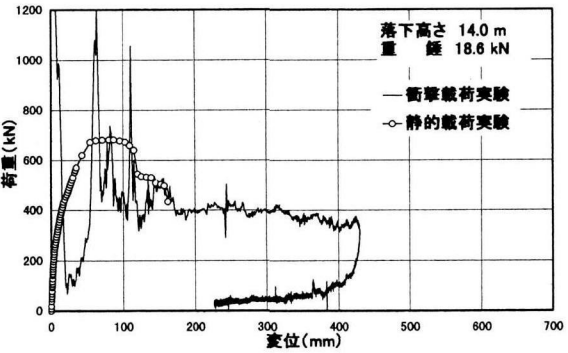


図-8 IT形衝撃実験 荷重-変位結果（CFSTタイプ）

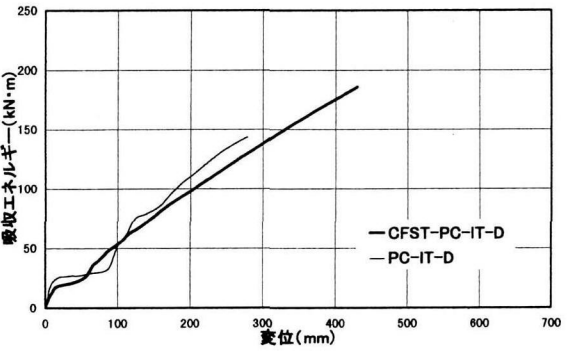


図-9 吸収エネルギー-変位結果（IT形）

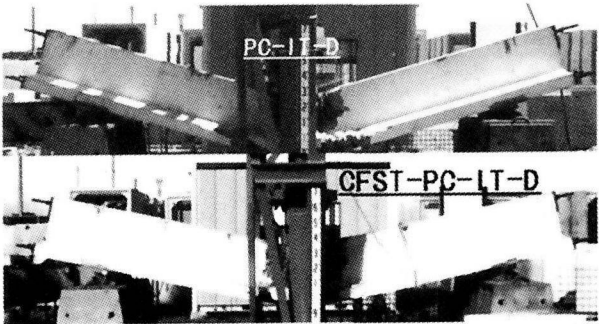


写真-6 IT形供試体

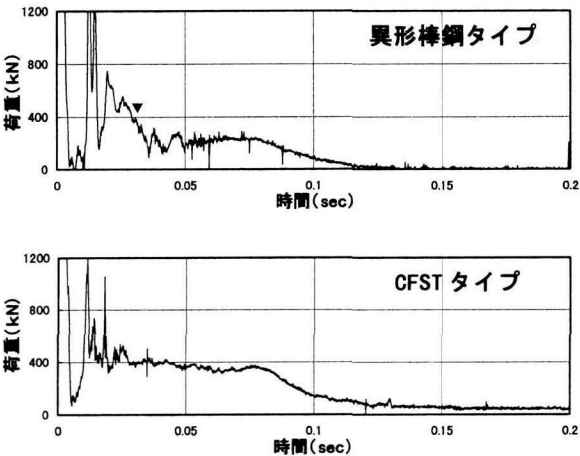


図-10 IT形衝撃実験 荷重の経時変化

(2) T 形供試体

図-11 および図-12 にそれぞれ T 形供試体の異形棒鋼タイプ
鋼タイプおよび CFST タイプの荷重と変位の関係を示し

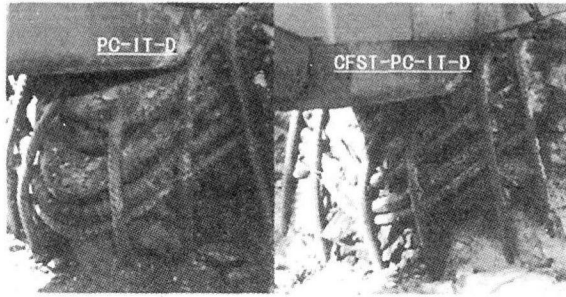


写真-7 IT 形載荷点

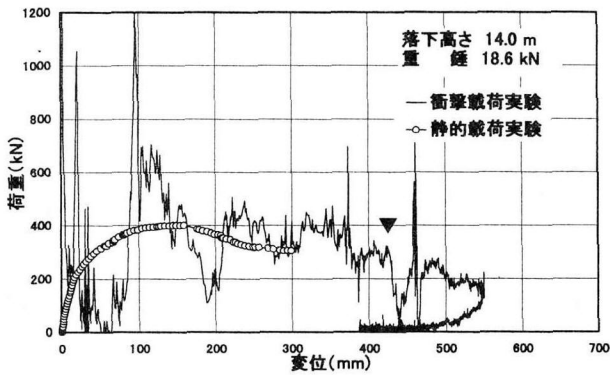


図-11 T 形衝撃実験 荷重—変位結果（異形棒鋼タイプ）

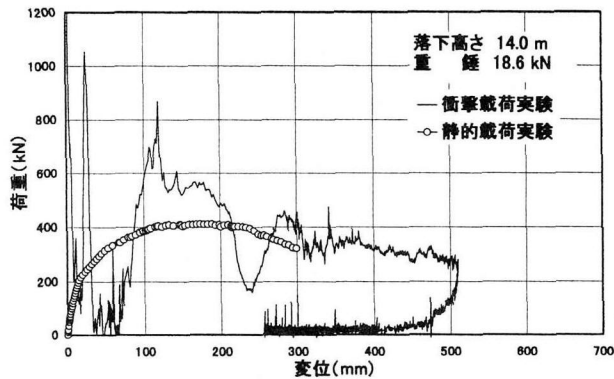


図-12 T 形衝撃実験 荷重—変位結果（CFST タイプ）

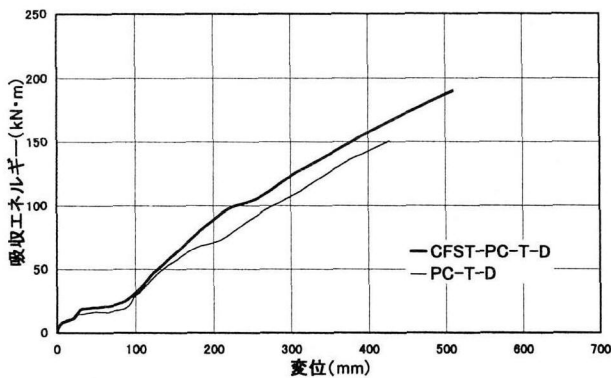


図-13 吸収エネルギー—変位結果（T 形）

た。T 形供試体においても重錘 18.6 kN、落下高さ 14.0 m の衝撃実験で両タイプとも重錘を受け止めることができた。ここでも両者の違いとしては最大変位および残留変位のみが確認された。IT 形と同様、異形棒鋼タイプでは図-11 の▼印で示した位置でほぼ耐力を喪失していることが想像される。その後の荷重の増加は、載荷治具に張り出して取り付けられたレーザー変位計のターゲット部が、“く”の字に折れ曲がった供試体に接触したものと考えられる。一方の CFST タイプは図-12 に示すように、ほぼ荷重 300 kN を維持したまま重錘を捕捉し、大きく変

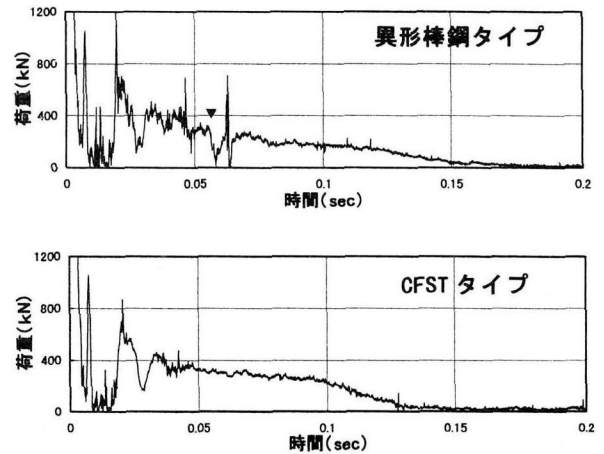


図-14 T 形衝撃実験 荷重の経時変化

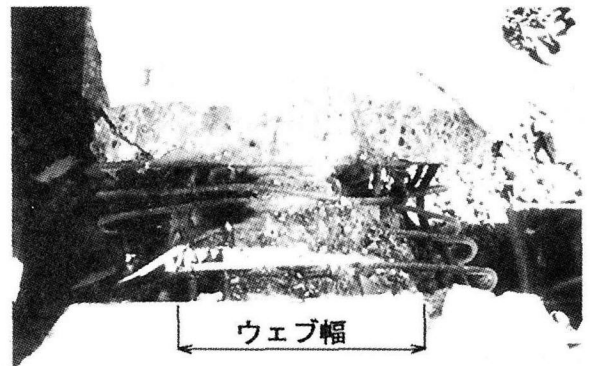


写真-8 T 形載荷点（異形棒鋼タイプ）

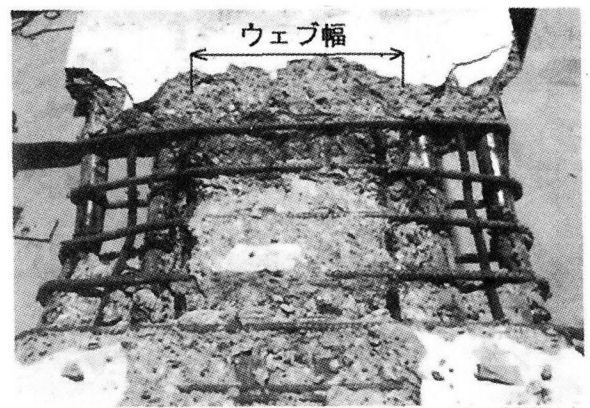


写真-9 T 形載荷点（CFST タイプ）

位を戻していることから、実験後の供試体の保有耐力という点では CFST タイプの方が勝っていると考えられる。図-13 に IT 形と同様、異形棒鋼タイプでは▼印位置までのエネルギー吸収量を、CFST タイプでは最大変位までのエネルギー吸収量を比較して示した。また、図-14 に荷重の経時変化を示した。写真-8 および写真-9 は実験後に載荷点の崩壊したコンクリートを取り除いたものであるが、異形棒鋼タイプでは、はり上部のコンクリートがほとんど圧潰しているのに対して、CFST タイプではフランジ部の圧潰は見られるものの、ウェブ上部のコンクリートは比較的健全な状態を呈している。

(3) 変形能

図-8 および図-12 に示したように、CFST タイプの供試体では最大耐力ではないものの、耐力を維持したまま重錘を受け止めていることが分る。試験機的能力を上げることにより、供試体を完全破壊に至らしめることが出来ればさらに大きな変形量が得られると考えられるが、ここでは IT 形と T 形の最大変位量をそれぞれ 400mm および 500mm と考えて塑性ヒンジの回転容量を求めると 15.2° および 28.1° となる。

一方、文献 6) では本論文中の、図-1 で示した片持型落石覆工の終局限界状態におけるエネルギー吸収能を試算しているが、建築限界を侵さない鉛直変位量を基準とし、落石落下点に形成される塑性ヒンジの最大回転角を 21.9° として、また、その時点での山側塑性ヒンジの回転角を 12.1° として計算している。今回の実験は 1/2 モデルでのものではあるが、実物と塑性状態が近似するように考慮して設計したものであり、実験で得られた塑性ヒンジの回転容量から、実物においても山側および載荷点とも、これらの数値を満足するものと推定される。今後は実物スケールでの実験を行い、1/2 モデルとの整合を確認していくことが必要と考える。

4. 結論

本研究では、片持型落石覆工を対象にしたプレストレストコンクリート T 形はりの塑性変形能を向上させるために、圧縮鉄筋に代えて CFST を用いたはりを製作し、3 点曲げによる静的曲げ載荷実験および重錘落下衝撃実験を行った。その結果、以下のような事が分った。

- (1) プレストレストコンクリートはりにおいても、圧縮側補強材として CFST を用いた供試体は、鉄筋を用いた供試体にくらべて相対的に塑性変形能に富む。これは、コンクリートの圧潰から圧縮鉄筋の座屈が生じ、耐力を失う過程において、CFST が座屈を起こしにくいことに起因すると考えられる。
- (2) 負の曲げモーメントが生じる IT 形はりにおいても同様の結果が得られるが、実験では圧潰にともなう載荷点の局部的なつぶれが発生した。したがって実構造物で変形能を期待するためには、ゴム支

承等により荷重を広く分散させる必要がある。

- (3) 正の曲げモーメントを受ける T 形はりでは、フランジ部に配置する CFST の被りを十分取ることが、CFST の効果を得るためには必要な条件になると考えられる。
- (4) 同一条件のもとでの衝撃実験では、異形棒鋼タイプに比べて CFST タイプは残留変位量が小さく、また実験後の供試体も圧縮側が比較的健全であり、落石覆工を考える上で CFST による補強は有益であると考えられる。
- (5) 片持型落石覆工では、はり（屋根部）に作用する曲げが正の領域と負の領域が存在し、静的荷重に対する単純ばりのモデル実験による検討は有効である。しかし、衝撃荷重に対する構造物の挙動は複雑になると考えられるので⁹⁾、実構造形式による衝撃実験を計画している。
- (6) 塑性状態を近似させることによる、実物と模型との変形能の整合を実物スケールでの実験により確認していくことが必要である。

参考文献

- 1) 日本道路橋会：落石対策便覧，昭和 58 年 7 月。
- 2) 吉田博，榊谷浩，右城猛，柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，土木学会論文集，第 421 号，pp. 213-222，1990。
- 3) 岸徳光，竹本伸一，三上浩，今野久志：T 型 PRC 梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1827-1838，1998。
- 4) 園林栄喜，小林一隆，香月智，石川信隆：高速載荷時の円形スパイラル筋で補強した PC はりの弾塑性挙動に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1235-1246，1996。
- 5) 前川幸次，吉田博，塩見昌紀：鋼管・コンクリート複合はりの静的および衝撃載荷実験，構造工学論文集，Vol. 43A，pp. 1481-1488，1997。
- 6) 塩見昌紀，前川幸次，吉田博，瀧上正浩：有孔鋼管・コンクリート複合はりの載荷実験と実構造物への応用，第 4 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. 153-158，1998。
- 7) 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。
- 8) 塩見昌紀，前川幸次，坂井知朗，井原朋美：鋼管とコンクリートの付着せん断強度，第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp. 117-120，1999。
- 9) 岸徳光，三上浩，安藤智啓：せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 45A，pp. 1689-1699，1999。

(1999 年 9 月 17 日受付)