

# コンクリート充填鋼管ばりの静的および動的挙動について

## STATIC AND IMPULSIVE BEHAVIOR ON CONCRETE-FILLED TUBULAR STEEL BEAM REINFORCED WITH TENDON

石谷留美子\*, 藤井智弘\*\*, 西田陽一\*, 吉田 博\*\*, 大森清武\*\*\*, 前川幸次\*\*\*\*

Rumiko ISHITANI, Tomohiro FUJII, Yoichi NISHIDA, Hiroshi YOSHIDA, Kiyotake OMORI, Koji MAEGAWA

\* (株) エイ・シー・デイ (〒939-1362 砺波市太郎丸 3903)

\*\* 工博 (株) エイ・シー・デイ (〒939-1362 砺波市太郎丸 3903)

\*\*\* 日本ゼニスパイプ (株) (〒103-0004 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

\*\*\*\* 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-0942 石川県金沢市小立野 2-40-20)

キーワード：落石覆工, 合成構造, 動的挙動, 靱性, エネルギー吸収  
(rock-shed, composite structure, impulsive behavior, ductility, energy absorption)

### 1. はじめに

コンクリート充填鋼管は, 鋼管とコンクリートの合成効果により部材剛性が向上し, 鋼管の局部座屈やコンクリートの圧潰を防ぐことにより部材の靱性が向上し, エネルギー吸収能が高くなることが知られている<sup>1),2)</sup>.

過去にコンクリート充填鋼管を落石防護柵の支柱に使用することを目的として, コンクリート充填鋼管単純ばりの静的および落錘衝撃載荷試験が行われている. この実験の結果, コンクリート充填鋼管ばりの引張側に適量のアンボンド PC 鋼棒を配置し, 部材両端で定着させたものが耐荷力, エネルギー吸収能ともに優れていることが確認されている<sup>3)</sup>.

一方, 現在のロックシェッドの設計は, 落石の衝撃力を静的な力に置き換えて, 許容応力度設計法によって設計されている<sup>4)</sup>. しかし落石の発生は不規則性の強いものである上, 落石を受ける構造物の挙動にも影響されるため落石荷重の推定は非常に困難である. このようなことから, 荷重に基づく設計法は合理性を欠く可能性があり, エネルギー的観点からの設計法が合理的であるとされてきた<sup>5),6)</sup>.

本研究は前述のコンクリート充填鋼管を使用し, エネルギー吸収能に優れたロックシェッドの開発を

目的として, 弾性域から破壊域にいたるまでの実験を行い, その静的および動的挙動特性とエネルギー吸収能に対する検討を行った. また, コンクリート充填鋼管部材の最大曲げ耐力が 400kN・m 程度であるため, これと比較するために同等の曲げ耐力を有した PRC 部材の静的および動的挙動についても確認した.

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体

図-1 に供試体の形状寸法を, 表-1 にコンクリート充填鋼管部材に用いた材料特性を, 表-2 に PRC 部材に用いた材料特性を示す.

コンクリート充填鋼管部材 (以後, 充填鋼管部材とする.) の供試体の種類は PC 鋼棒を全周に配置した 1 種類とし, 静的, 衝撃用に各 1 体ずつ用意した.

また, ロックシェッドは梁部, 柱部から形成されたものが一般的であり, 支間中央部と剛接部で正負の曲げが発生する. ことから PRC 部材の供試体は, 終局曲げ耐力  $M_u=312\text{kN}\cdot\text{m}$  とした正曲げ用 (以後, 中央部 PRC 部材とする) および終局曲げ耐力  $M_u=177\text{kN}\cdot\text{m}$  とした負曲げ用 (以後, 剛接部 PRC 部材とする) の 2 種類を静的, 衝撃用それぞれに各

1 体ずつ用意した。

充填鋼管部材は、 $\phi 267.4 \times 6.6$  の鋼管にアンボン  
ド PC 鋼棒  $\phi 23$  を等間隔に 9 本配置し、高流動コン  
クリートを充填した。PC 鋼棒の両端はプレートとナ  
ットで定着させている。

PRC 部材は、幅 300×高さ 500 の矩形断面とし、  
PC 鋼より線および引張鉄筋 D13 を配置し、初期緊  
張力として  $\sigma_{pi} = 1000 \text{ N/mm}^2$  を導入した。

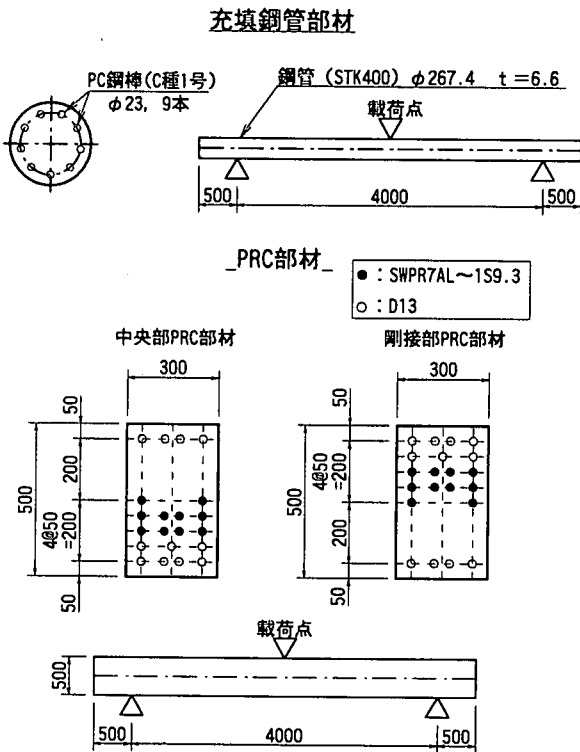


図-1 供試体形状寸法

表-1 充填鋼管部材の材料特性

品名・寸法	降伏点 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)
鋼管： $\phi 267.4 \times 6.6$ (STK400)	235	400	23
PC 鋼棒：SBPR1080/1230 $\phi 23$ (C 種 1 号)	1080	1230	5
高流動コンクリート	$\sigma_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$		

表-2 PRC 部材の材料特性

品名	降伏点 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)
鉄筋 $\phi 13$ (SD295A)	295	440~600	16 以上
PC 鋼より線 (A 種 9.3 $\phi$ )	1450	1700	3.5 以上
コンクリート	$\sigma_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$		

### 3. 静的載荷試験

#### 3. 1 載荷方法と計測方法

図-2 に試験装置の概要を示す。試験体の支持条件  
は充填鋼管部材、PRC 部材ともに支間 4m の単純支  
持として一点載荷を行った。

静的載荷試験は、耐圧試験機を用い、弾性域は荷重  
制御、塑性域は変位制御により加力した。ただし、  
試験機のスロークに限界があるため、スローク  
限界に達する毎に除荷、加力ヘッドの再セット、再  
載荷を行った。荷重は載荷点に設置したロードセル  
で計測し、変位は支点部がダイヤルゲージ式変位計、  
供試体中央部は巻込型変位計にて計測を行った。加  
えて、充填鋼管部材は鋼管と PC 鋼棒の各所の軸方  
向ひずみを、PRC 部材はコンクリート上下縁、鉄筋  
の各所の軸方向ひずみを計測した。

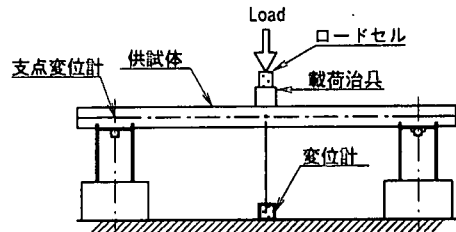


図-2 静的載荷試験装置

#### 3. 2 実験結果および考察

図-3 は各供試体の荷重-載荷点変位関係を示した  
ものである。同じ曲げ耐力を持つように設計した中  
央部 PRC 部材と充填鋼管部材を比較すると、最大荷  
重値は 456 kN, 437 kN でほぼ同値であるが、最大変  
位は、102mm, 1202mm で充填鋼管部材が中央部 PRC  
部材のおよそ 10 倍の値となっている。なお充填鋼管  
部材は最大変位 1202mm に至っても鋼管に亀裂が入  
らなかったが、試験装置の変位限界を越えたため、  
ここで計測を終了した。

中央部 PRC 部材と剛接部 PRC 部材の最大荷重は  
456 kN, 276kN で理論値の約 1.5 倍となっている。  
この理由として、理論値は材料特性値として公称値  
を使用したことによると思われる。最大変位は中央  
部 PRC 部材が 102mm、剛接部 PRC 部材が 137mm で  
剛接部 PRC 部材が中央部 PRC 部材のおよそ 1.4 倍  
の値をとっていることが分かる。

このことから、充填鋼管部材は靱性に非常に優れ  
ていることが分かる。

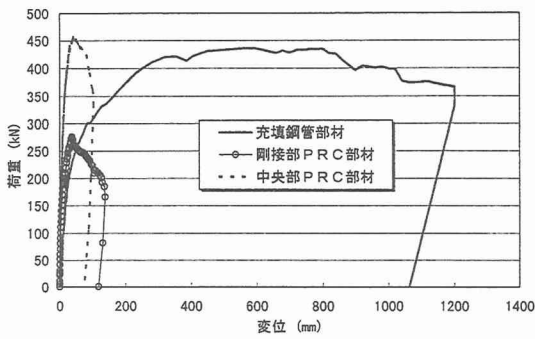


図-3 荷重-載荷点変位関係

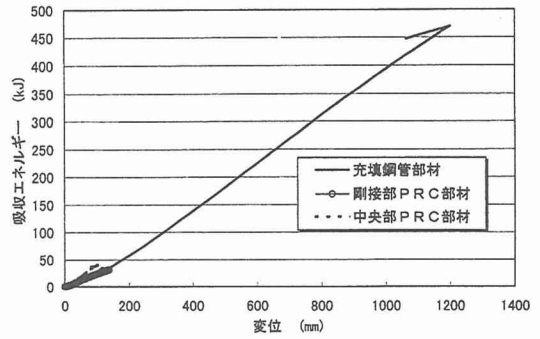


図-4 吸収エネルギー-載荷点変位関係

図-4 は各供試体の吸収エネルギー-載荷点変位関係を示したものである。まず中央部 PRC 部材と剛接部 PRC 部材を比較すると、両者の吸収エネルギーは 40kJ, 30kJ で中央部 PRC 部材が 1.3 倍の値となっている。それに対して、充填鋼管部材の吸収エネルギーは 470 kJ で中央部 PRC 部材のおよそ 12 倍となっており、エネルギー吸収能に非常に優れていることが分かる。実験後の供試体の状況として写真-1 に充填鋼管部材を、図-5 に PRC 部材のクラック図を示す。

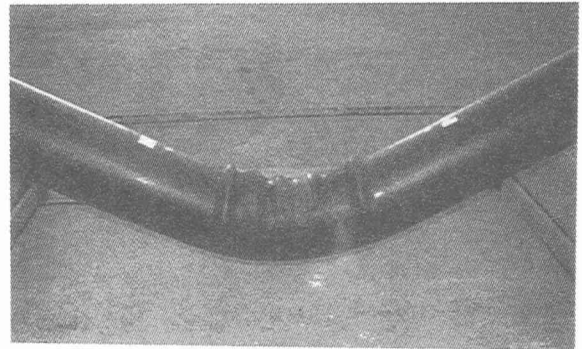


写真-1 充填鋼管部材の変形状況

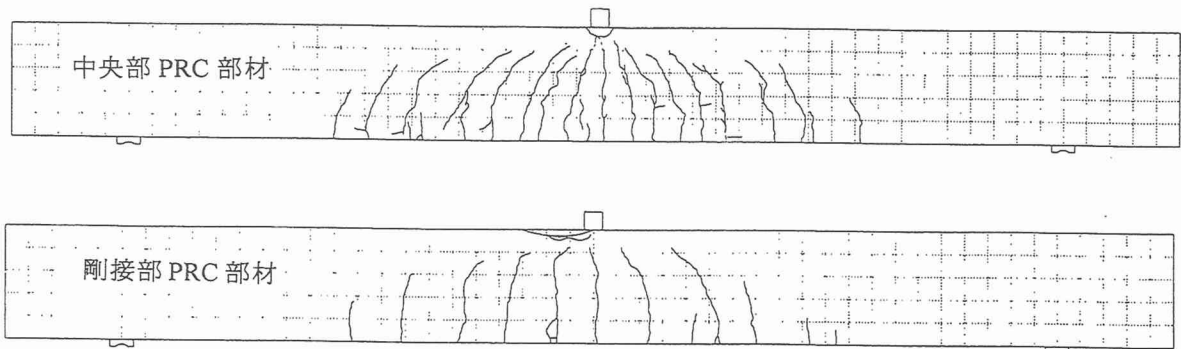


図-5 PRC 部材のクラック図

#### 4. 落錘衝撃載荷試験

##### 4. 1 載荷方法と計測方法

表-3 は各供試体の落下条件を示したものであり、図-6 は落錘衝撃載荷試験装置の概要を示したものである。試験体の支持条件は静的載荷試験と同じ支間 4m の単純支持として、それぞれ一発載荷を行った。

重錘は鋼板をボルトで連結したもので、クレーンによって落下位置までつり上げ、エア式離脱装置を用いて重錘を落下させた。落下後、重錘は載荷装置のガイドに沿って、自由落下する。重錘の質量はすべて 3.8t とし、静的試験の結果から各供試体が破壊に至るように落下高を設定した。なお充填鋼管部材の載荷時には載荷治具を半円状とし、供試体に面タッチとなるようにした。

測定項目は、重錘加速度、載荷点荷重、載荷点変位とし、充填鋼管部材については鋼管および PC 鋼棒の要所の軸方向ひずみを、PRC 部材についてはコンクリート上下縁および鉄筋の要所の軸方向ひずみもそれぞれ計測した。計測値はアナログ信号を増幅し、0.1msec 間隔でデジタル量として記録した。また供試体の挙動を確認するために高速ビデオカメラを用い、毎秒 200 コマで撮影した。

表-3 各供試体の落下条件

供試体名	落下高	重錘質量
充填鋼管部材	13.0m	3.8t
中央部 PRC 部材	4.0m	
剛接部 PRC 部材	1.0m	

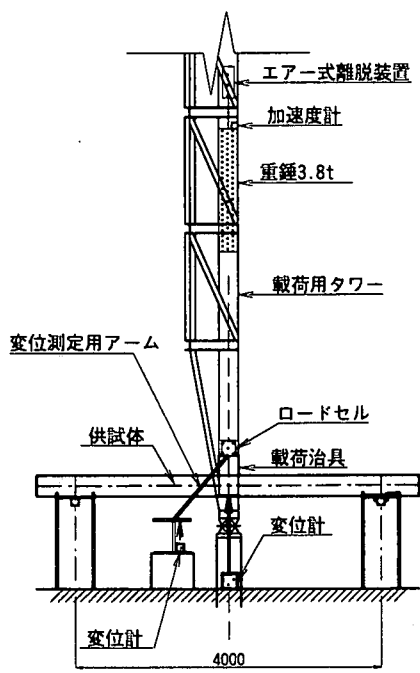


図-6 落錘衝撃載荷試験

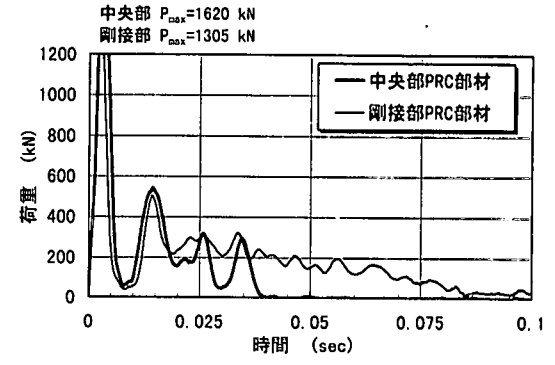
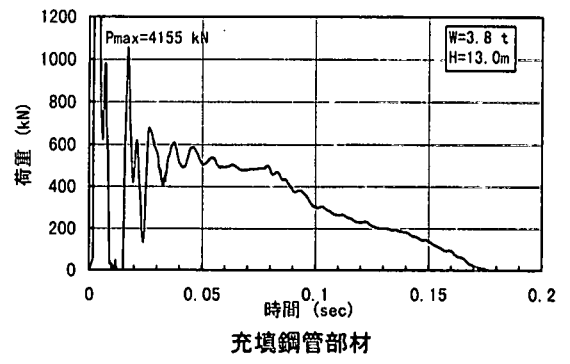


図-7 荷重の経時変化

#### 4. 2 実験結果と考察

まず実験後の供試体の状況であるが、充填鋼管部材は鋼管円周方向に亀裂が生じたが、完全破壊には至らなかった。PRC部材は中央部、剛接部ともに載荷点で二つに折れ、完全破壊した。実験後の供試体の状況を写真-2に示す。

図-7は各供試体の荷重の経時変化を示したものであり、図-8は代表的な例として中央部 PRC 部材の軸方向ひずみ経時変化を示したものである。図中 CU はコンクリート上縁ひずみ、S5 は最下段の鉄筋ひずみ、S3 は二段目の鉄筋ひずみを意味している。図-9にこれらのひずみゲージの張付位置を示す。なお、鋼管のひずみは計測器のレンジを超えてしまったため計測できなかった。

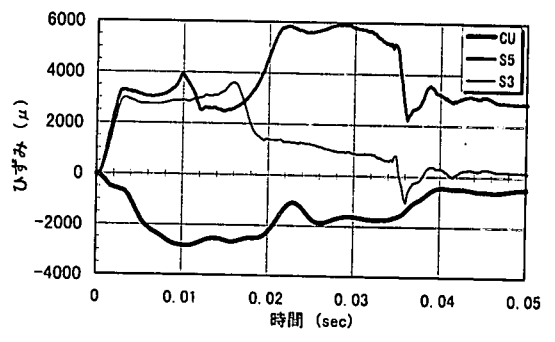


図-8 中央部 PRC 部材 ひずみの経時変化

充填鋼管部材は荷重が立ち上がり、直後にピークを示した後、約0.06secの間平均で500kN保持した。その後徐々に荷重は減少し約0.18secで荷重は消滅した。PRC部材は荷重が立ち上がり、ピーク値に達した後、大きく変動しながら消滅している。これは図-8に示すひずみの経時変化から推定すると、載荷直後に最下段鉄筋が降伏し約0.01secで上縁コンクリートが終局ひずみに達した後、鉄筋およびPC鋼棒が順に破断したことによると推定できる。また、剛接部 PRC 部材においては、載荷時間が中央部 PRC 部材の2倍程度となっていることが分かる。

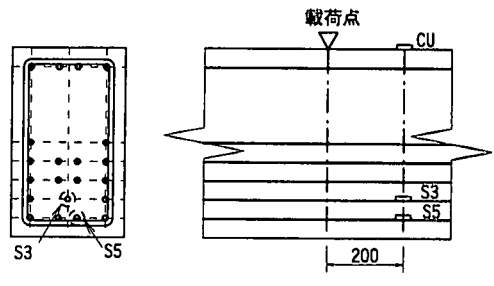


図-9 ひずみゲージ張付位置

図-10は各供試体の載荷点変位の経時変化を示したものである。PRC部材は、中央部、剛接部ともに完全破壊したため、変位は増加し続けている。

充填鋼管部材は 0.15sec で最大変位に達し、その後緩やかに減少した。これは供試体が完全破壊しなかったためである。

図-11 は各供試体の荷重-載荷点変位関係を、図-12 は吸収エネルギーと載荷点変位の関係を示す。

充填鋼管部材の吸収エネルギーは 425kJ であり、入力エネルギーの約 80% の値を示している。

また PRC 部材の吸収エネルギーは入力エネルギーに近い値を示しているが、これは供試体が完全破壊したためである。両者の荷重値にあまり差は見られないが、吸収エネルギーは充填鋼管部材が PRC 部材のおよそ 9 倍の値となった。このことから、充填鋼管部材は塑性およびエネルギー吸収能に非常に優れていることが分かる。

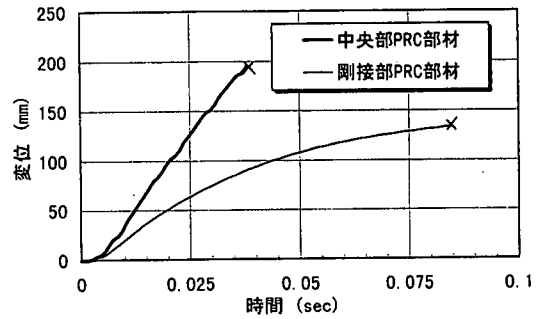
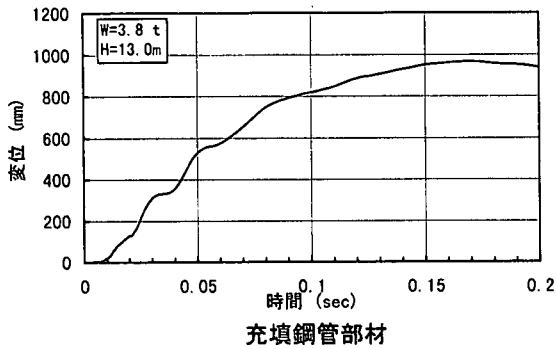


図-10 載荷点変位の経時変化

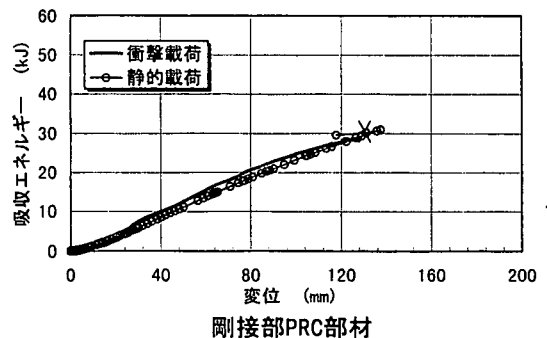
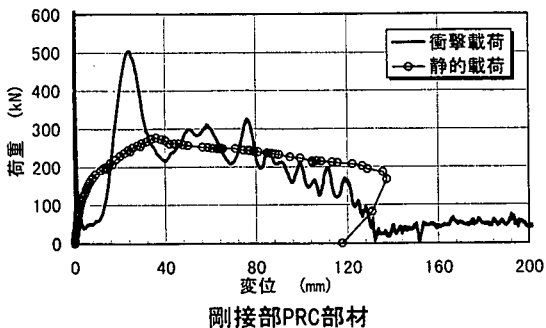
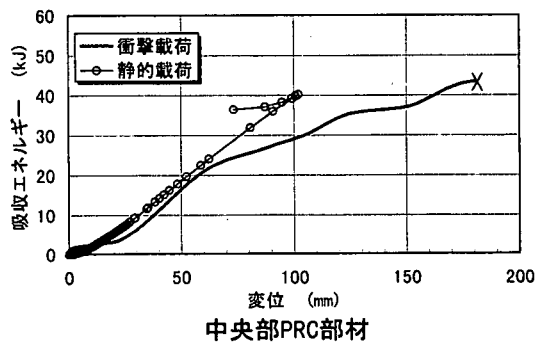
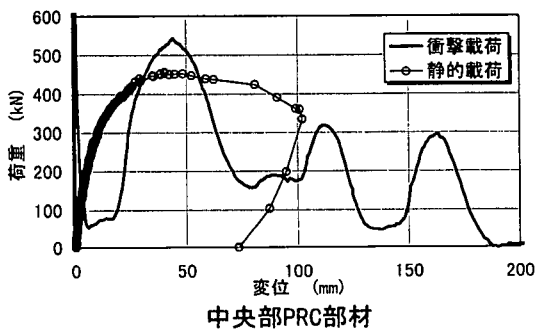
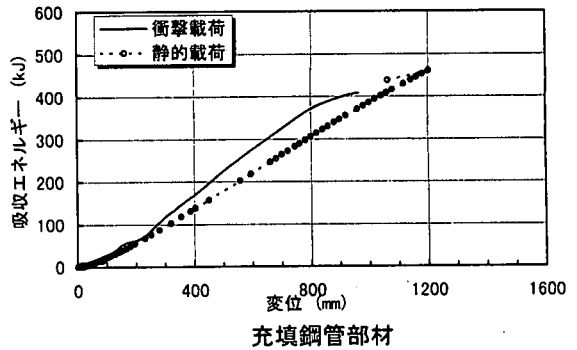
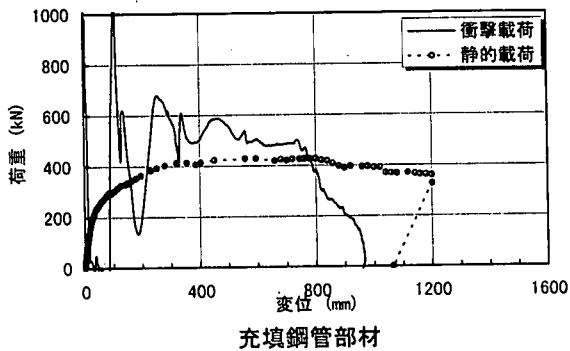


図-11 荷重-載荷点変位関係

図-12 吸収エネルギー-載荷点変位関係

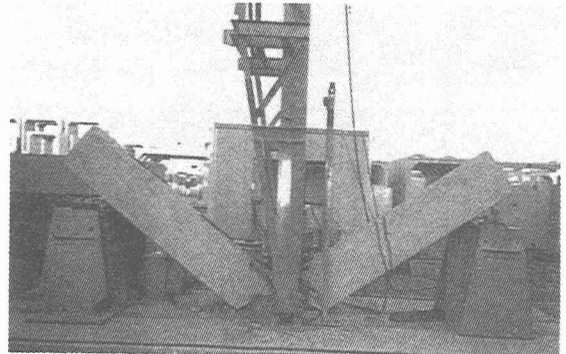
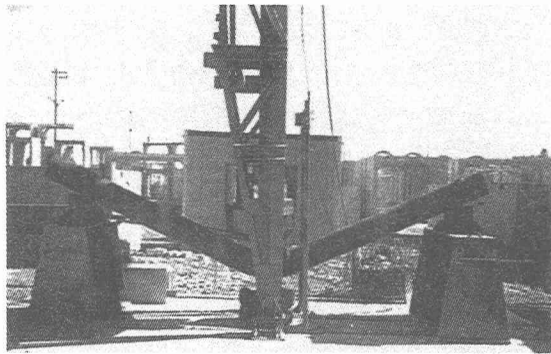


写真-2 衝撃载荷後の供試体変形状況

## 5. 結論

本研究は、ロックシェッドにコンクリート充填鋼管部材を使用することを目的として、静的载荷試験と落錘衝撃試験を行い、そのエネルギー吸収能、および動的挙動の考察を行った。その結果、以下のような結果が得られた。

- ① 同様な曲げ耐力を有した PRC 部材に比べ、そのエネルギー吸収能は約 10 倍程度であった。
- ② 完全破壊しなかった充填鋼管部材の吸収エネルギーは入力エネルギーの約 80%であった。

これらのことから、エネルギー吸収能が大きいコンクリート充填鋼管部材を衝撃荷重が作用する部材に使用することにより、靱性の高い構造物とすることができる。

また今後、この実験の結果を基に解析を行い、コンクリート充填鋼管部材の力学的挙動を照査する必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 伊藤一雄, 他: モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察, 構造工学論文集, Vol.37A, pp1581-1589, 1991
- 2) 伊藤一雄, 他: コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する解析的考察, 構造工学論文集, Vol.38A, pp1553-1563, 1992
- 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, pp117-127, 1995
- 4) 日本道路協会: 落石対策便覧, 昭和 58 年 7 月
- 5) 園田佳巨, 佐藤紘志, 石川信隆: エネルギー基準による落石覆工のサンドクッション厚の算定法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.37A, pp1617-1625, 1991
- 6) 園田恵一郎: 落石覆工の設計法についての一考察, 構造工学論文集, Vol.39A, pp1563-1572, 1993