

## T 型 PRC 梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON STATIC AND IMPACT RESISTANCES OF T-SHAPED PRC BEAMS

岸 徳光\* 竹本伸一\*\* 三上 浩\*\*\* 今野久志\*\*\*\*

Norimitsu KISHI, Shin-ichi TAKEMOTO, Hiroshi MIKAMI and Hisashi KONNO

\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町 27-1)

\*\* ドービー建設工業 (株) 技術センター (〒170 東京都豊島区北大塚 1-16-6)

\*\*\* 工博 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員 (〒270-01 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*\* 工修 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸 1-3)

In this paper, in order to accumulate basic data for establishing a rational impact design procedure of PC (Prestressed Concrete) members in PC rock-sheds, static and impact tests were conducted for six types of PRC (Prestressed Reinforced Concrete) T-shaped beams, in which number of PC strands, tensioning ratio per one PC strand and volume of rebars for crack control were taken as variable parameters. Using 400 kgf steel weight, impact tests were conducted by iterative loading method with 1 m/sec of initial and incremental impact velocity up to beam failure. All PRC beams considered here were reached to the ultimate state characterized by bending tension type of failure mode. The results obtained from these experiments are as follows: 1) the ultimate static and energy absorption capacities of PRC beams may not be affected by tensioning ratio; 2) increasing number of PC strands and/or arranging rebars for crack control, impact resistance of PRC beams can be effectively improved; and 3) absorption energy at the ultimate state of PRC beams can be rationally estimated by means of the multi-section method.

Key Words: impact load, PC rock-sheds, PRC beam, impact resistance, absorption energy

## 1. はじめに

我が国の道路には落石に対する安全性確保のために落石覆工が多く設けられている。落石覆工の多くは RC (鉄筋コンクリート) 製あるいは PC (プレストレストコンクリート) 製である。PC 覆工の場合は、工場内で製作した PC 梁や柱を現地に搬入し組み立てることにより施工されるもので、2 ヒンジ 1 剛結接合構造 (一般に、これを逆 L 型構造と呼んでいる) が多く採用されている。PC 覆工は、品質管理もよく将来予想される労働者不足の解消や、RC 覆工に比較して工期の短縮を計ることが可能であることから、今後ますます需要が増えるものと予想される。

しかしながら、平成元年 7 月に発生した一般国道 305 号線福井県越前海岸における岩盤崩落や、平成 8 年 2 月に発生した一般国道 229 号線北海道豊浜トンネル上の岩盤崩落に見られるように、道路周辺地山の経年変化によって設計時より落石荷重の大きくなる箇所が多くなるものと予想される。ライフラインとしての道路交通システムを落石災害から守るためには緩衝性能や荷重分散性に優れた緩衝構造の開発と耐衝撃性に優れた安全余裕度の大きい構造部材の設計手法開発が急務である。

緩衝構造に関しては、敷砂緩衝材や緩衝性能、荷重分散性に優れた三層緩衝構造に関する一連の実証的な実験研究がある<sup>1~5)</sup>。特に三層緩衝構造に関しては設計手法

を含め実構造への適用が可能な段階まできている<sup>6)</sup>。

PC 部材の耐衝撃性に関しては、RC 構造が PC 構造より衝撃靱性が高いとして RC 構造と PC 構造の特徴を利用した PRC 梁の耐衝撃性に関する研究がある<sup>7)</sup>。一般に PC 部材の設計は PC 鋼材の降伏応力の 80% 以上のプレストレスを導入することを前提にしている。この考え方に基づくならば、PC 鋼材の残存耐力が小さくなるため終局吸収エネルギー量も小さなものになるものと考えられる。また、PC 覆工の自重による断面力は衝撃荷重を含む全断面力の 0.2~0.3 程度であり、かつ落石による衝撃荷重の不確か性は大きい。著者らはこれらの点に着目し、PC 鋼材の緊張率を小さくし PC 梁の残存耐力や吸収エネルギーを増大させることに関する数値解析的検討を行っている<sup>8)</sup>。また、矩形断面 PC 梁を用いて、PC 鋼材の緊張率、本数、ひびわれ制御用異形鉄筋量を変化させた静載荷実験や重錘落下衝撃実験を行っている<sup>9)</sup>。その結果、全ての PC 梁が曲げ圧縮型の破壊モードを示して終局に至っているが、ひびわれ制御用異形鉄筋の配筋や、PC 鋼材の緊張率を 50% 程度に低減すること、あるいは PC 鋼材本数を増やすことにより、PC 梁の耐衝撃性を向上させることができることを明らかにしている。

本研究では、上述のような力を基本とする設計思想にエネルギー論的な考え方を導入した合理的な PC 梁の耐衝撃設計手法を確立するための基礎資料を蓄積すること

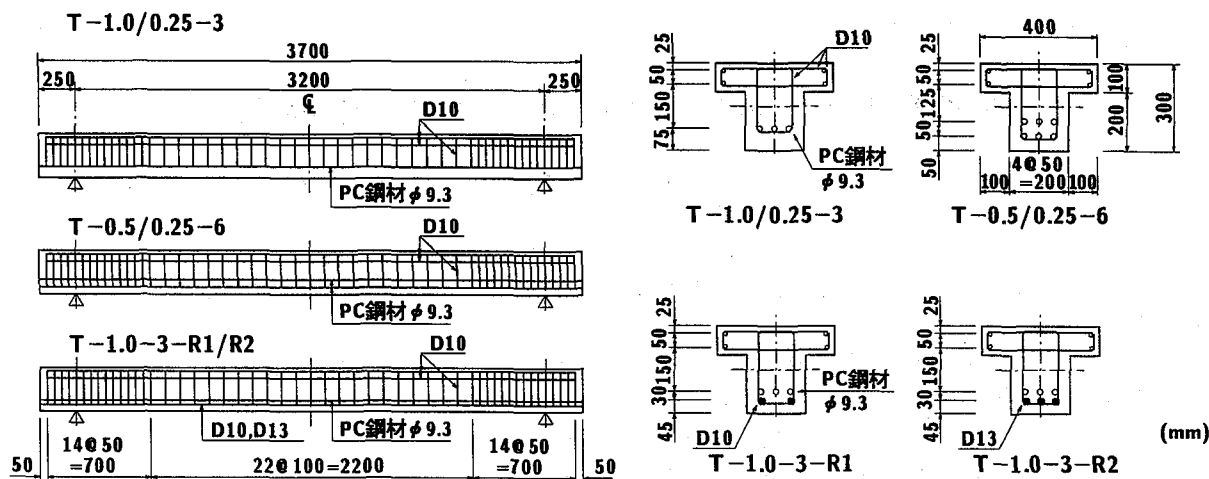


図-1 各試験体の配筋図

を目的として、PC 鋼材の緊張率、本数やひびわれ制御用異形鉄筋量を変化させた6種類のT型 PC (PRC) 梁を用いた静載荷及び重錘落下衝撃実験を行った。本実験では終局時の破壊モードを曲げ引張型とするために T 型断面とした。

また、本研究では全ての PC 梁にひびわれ制御用異形鉄筋を配筋していないが、煩雑さを避けるためこれらを総称して PRC 梁と呼ぶこととした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

各 PRC 梁はプレテンション方式で製作した。用いた緊張材は、PC 鋼より線 SWPR-7A 9.3mm (公称断面積 51.61 mm<sup>2</sup>) である。この PC 鋼より線の公称引張荷重、降伏点荷重はそれぞれ 9.06 tf, 7.70 tf であり、使用状態における許容緊張力は 5.88 tf である。

本実験に用いた試験体及びその特性値の一覧を表-1 に示している。試験体は PC 鋼材の公称緊張率 (以下、単に緊張率と呼ぶ)、PC 鋼材本数、ひびわれ制御用異形鉄筋本数をパラメータにとった全 6 種類 12 体 (静載荷実験、重錘落下衝撃実験各 1 体) である。なお、PC 鋼材の緊張率 (使用状態における許容緊張力 5.88 tf に対する) は設定有効緊張力を基にラウンドナンバーで表し、またひびわれ制御用異形鉄筋量 D10×2, D13×3 はそれぞれ R1, R2 と記号化している。実験に使用した異形鉄筋は全て SD295 である。

なお、T-1.0-3 の場合の緊張力はコンクリート打設時の施工誤差により有効緊張力で 1.12 tf/本 だけ小さな値となっているが定性的な特性は変わらないものと判断されることより、設定有効緊張力に基づいた試験体名をそのまま用いることとした。

図-1 に試験体の配筋図を示している。純スパンは静載荷、衝撃載荷実験とも同一で 3.2m としている。各ケースの PC 鋼材の配筋位置はその重心位置が等しくなるように、また異形鉄筋はひびわれ制御用であることより

表-1 試験体一覧

| 試験体名       | PC 鋼材<br>公称<br>緊張率 | PC<br>鋼材<br>本数 | 異形<br>鉄筋<br>本数 | 設定有効<br>緊張力<br>(tf/本) | 実験時有効<br>緊張力<br>(tf/本) | 実験時全<br>有効緊張<br>力(tf) |
|------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| T-1.0-3    | 1.0                | 3              | -              | 5.12                  | 4.00                   | 12.00                 |
| T-0.25-3   | 0.25               | 3              | -              | 1.13                  | 1.13                   | 3.39                  |
| T-0.5-6    | 0.5                | 6              | -              | 1.96                  | 1.96                   | 11.76                 |
| T-0.25-6   | 0.25               | 6              | -              | 0.83                  | 0.83                   | 4.98                  |
| T-1.0-3-R1 | 1.0                | 3              | D10×2          | 5.13                  | 5.13                   | 15.39                 |
| T-1.0-3-R2 | 1.0                | 3              | D13×3          | 5.14                  | 5.14                   | 15.42                 |

梁下縁に配筋することとした。コンクリートは実験時における平均圧縮強度が 662 kgf/cm<sup>2</sup>、弾性係数が 3.13 × 10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup> である。実験はコンクリート打設後 24~35 日経過後に行っている。

### 2.2 実験方法

各 PRC 梁の支点部は、静載荷実験の場合には鋼棒上に梁を設置して単純支持状態としている。一方、重錘落下衝撃実験の場合には支点反力測定用ロードセル (容量 50 tf) を介して跳ね上がり防止用治具で梁の上下縁を固定し鋼製のピンを用いて支持している。

静載荷実験：断面方向に全幅、スパン方向に 10cm の部分分布荷重になるように鋼製の治具を設置して油圧ジャッキにより加圧した。実験は梁が曲げ引張破壊型であることより、PC 鋼材が破断した時点を終局と仮定し載荷を終了している。測定項目は荷重及び各点の変位である。実験終了後には各梁に発生したひびわれ状態も記録している。写真-1 は静載荷実験状況である。

衝撃荷重載荷実験：衝撃荷重は円柱状のロードセル付鋼製重錘 (重量 400kgf, 載荷点部直径 15cm, ロードセル容量 200tf, 2mm のテーパ付) を所定の高さにセットして梁中央部に自由落下させることにより載荷している。載荷実験は載荷速度 V=1 m/sec から 1 m/sec ずつ終局に至るまで増加させる漸増繰り返し荷重載荷とした。測

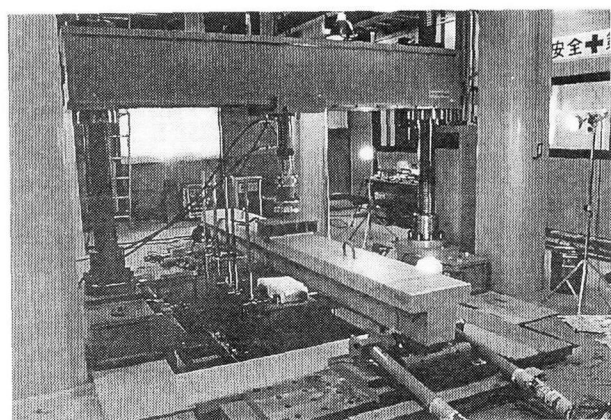


写真-1 静載荷実験状況

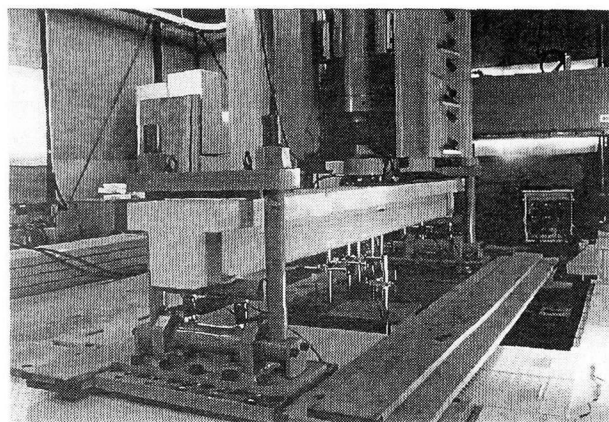


写真-2 衝撃荷重載荷実験状況

定項目は重錘衝撃力、支点反力、変位波形である。変位波形の測定は非接触型レーザ式変位計を用いて行った。その測定範囲は  $30 \pm 10$  cm である。各波形は高帯域用のデータレコーダーで一括収録し、 $50 \mu\text{sec}$  の時間間隔で  $100 \text{ msec}$  だけ A/D 変換している。各波形データは、A/D 変換後  $1 \text{ msec}$  の矩形移動平均法 ( $1 \text{ kHz}$  のローパスフィルター処理に相当) による平滑化を施している。なお、梁の終局状態として、当初最大累積残留変位が純スパンの  $2\%$  ( $6.4 \text{ cm}$ ) を越えた時点を設定したが、T-0.25-3 を除きいずれの梁においても基準値に達する前に大きな角折れか下縁部あるいは上縁部のコンクリート塊の剥離がみられたため、断面欠損の状態から目視により終局状態を判定した。写真-2 は衝撃荷重載荷実験状況である。

### 3. 静載荷実験結果と考察

#### 3.1 静載荷時の耐力及びエネルギー吸収能

表-2 には、実験結果の荷重-変位曲線の変曲点より求めたひびわれ発生時の荷重 ( $P_{cr}$ )、下端鋼材 (-R1, -R2 は鉄筋、それ以外の梁は PC 鋼材) の降伏時の荷重 ( $P_y$ )、終局荷重 ( $P_u$ )、終局変位 ( $\delta_u$ )、エネルギー吸収量 ( $E_{us}$ ) と、参考のために断面分割法によって得られた荷重-変位曲線において最大荷重状態で残留変位するものと仮定した場合のエネルギー吸収量 ( $E_a$ ) を一覧に示している。比較を容易にするために、各項目に関し T-1.0-3 の値に対する無次元化した値を ( ) で示している。なお、エネルギー吸収量 ( $E_{us}$ ) は載荷荷重と載荷点変位による荷重-変位曲線に囲まれた面積を用いて評価することとした。断面分割法による曲げモーメント曲率関係は断面方向の分割数を 60 とし、土木学会コンクリート示方書に基づいたコンクリート、異形鉄筋、PC 鋼材の応力-歪関係を用いて評価している。また、断面分割法を用いたエネルギー吸収量の算定において、載荷点変位はスパン方向の分割数に大きく影響される。本研究では、各梁間のエネルギー吸収能に関する概略的な特性比較を行うことを目的としていることより、載荷点変

表-2 静載荷実験結果の一覧

| 試験体名       | 実験結果             |                 |                 |                    |                     | 解析結果             |
|------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------|------------------|
|            | $P_{cr}$<br>(tf) | $P_y$<br>(tf)   | $P_u$<br>(tf)   | $\delta_u$<br>(cm) | $E_{us}$<br>(tf·cm) | $E_a$<br>(tf·cm) |
| T-1.0-3    | 4.00<br>(1.00)   | 9.10<br>(1.00)  | 9.93<br>(1.00)  | 8.47<br>(1.00)     | 72.87<br>(1.00)     | 42.60<br>(1.00)  |
| T-0.25-3   | 2.20<br>(0.55)   | 8.10<br>(0.89)  | 9.90<br>(1.00)  | 8.54<br>(1.01)     | 64.44<br>(0.88)     | 44.77<br>(1.05)  |
| T-0.5-6    | 4.50<br>(1.13)   | 14.50<br>(1.59) | 17.70<br>(1.78) | 10.02<br>(1.18)    | 145.04<br>(1.99)    | 56.49<br>(1.33)  |
| T-0.25-6   | 2.80<br>(0.70)   | 15.70<br>(1.73) | 17.99<br>(1.81) | 9.75<br>(1.15)     | 134.92<br>(1.85)    | 57.05<br>(1.34)  |
| T-1.0-3-R1 | 5.00<br>(1.25)   | 10.60<br>(1.16) | 11.90<br>(1.20) | 9.31<br>(1.10)     | 95.61<br>(1.31)     | 43.79<br>(1.03)  |
| T-1.0-3-R2 | 5.70<br>(1.43)   | 11.20<br>(1.23) | 14.82<br>(1.49) | 11.87<br>(1.40)    | 155.53<br>(2.13)    | 44.99<br>(1.06)  |

位はスパン方向に 10 分割 (一要素の長さが桁高程度) し、曲率の線形変化を仮定して一義的に算定している。従って、エネルギー吸収量に関する実験結果との差異は最大 3.5 倍、最小 1.4 倍程度となっている。図-2 には各組合せに対する梁の荷重-変位曲線を比較して示している。以下、表-2、図-2 を用いて各組合せ毎に考察を行う。

#### (1) PC 鋼材緊張率の影響 (図-2 a)

T-0.25-3 の場合は PC 鋼材の緊張率を  $25\%$  と低減していることより、 $P_{cr}$  が T-1.0-3 の  $1/2$  程度の値となっている。しかしながら、 $P_y$  は  $1 \text{ tf}$  程度小さいのみであり、 $P_u$ 、 $\delta_u$  は両者ほぼ等しい値を示している。T-0.25-3 のエネルギー吸収量に関して、解析結果は  $5\%$  程度 T-1.0-3 より大きな値を示しているが、実験結果は逆に  $10\%$  程度小さな値を示している。

これより、曲げ引張破壊型の PRC 梁の場合には、PC 鋼材の緊張率を低減することによってエネルギー吸収量の増加を期待することが不可能であるものと考えられる。これは、曲げ引張破壊型の場合には、PC 鋼材の

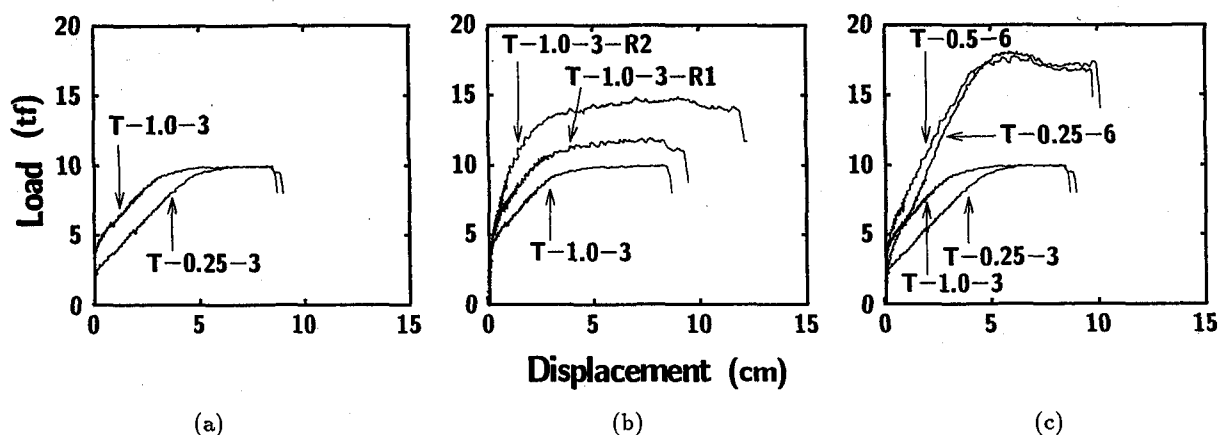


図-2 静載荷実験による荷重-変位曲線



図-3 静載荷実験終了後の各 PRC 梁のひびわれ状況図

緊張率の低減とともにひびわれ発生時の荷重  $P_{cr}$  が低下し、これと対応して荷重の増大とともにひびわれ幅も拡大するため、緊張率の大小にかかわらず同程度のたわみ値で PC 鋼材が破断し、終局に至る傾向を示すためと推察される。

## (2) 異形鉄筋本数の影響 (図-2 b)

T-1.0-3-R1/R2 は異形鉄筋を下端に配筋することにより、T-1.0-3 に対して  $P_{cr}$  が 25~43 % 程度、また  $P_u$  が 20~50 % 程度向上している。一方、エネルギー吸収量に関しては、解析結果では数 % 程度向上するのみであるが、実験結果では 31~113 % と鉄筋量の増加に対応して大きく示されている。これより、下端に異形鉄筋を配筋し PRC 梁とすることより、 $P_u$  は勿論のこと変形能も大きくなることより相乗的にエネルギー吸収能も大きく向上することがわかる。

## (3) PC 鋼材本数の影響 (図-2 c)

PC 鋼材本数が 6 本の場合 (T-0.5/0.25-6) の結果をみると、 $P_u$ ,  $\delta u$  とも両者類似の値を示しており、エネルギー吸収量  $E_{us}$  は T-0.5-6 が T-0.25-6 よりも若干大きい程度である。これらの傾向は PC 鋼材本数 3 本の場合 (T-1.0/0.25-3) と同じである。これより、曲げ引張破壊を示す PRC 梁で PC 鋼材本数が同一の場合には、 $P_u$ ,  $\delta u$ , 及びエネルギー吸収量  $E_{us}$  は PC 鋼材の緊張率に大きく影響されないことが再確認された。

PC 鋼材本数に対する各実験結果を比較すると、T-0.5/0.25-6 の場合は T-1.0/0.25-3 に対して、 $P_u$  は 80 % 程度、 $\delta u$  は 15 % 程度大きく上がっていることがわかる。エネルギー吸収量  $E_{us}$  は  $P_u$  の効果が大きく T-0.5/0.25-6 が 85 % 以上向上している。これより、曲げ引張破壊型 PRC 梁の場合には、PC 鋼材本数を増加させる

ことより、 $P_u$  及びエネルギー吸収量  $E_{us}$  を効率よく増大させることが可能であることがわかる。

### 3.2 静載荷時のひびわれ状況

図-3には各 PRC 梁の静載荷実験終了後のひびわれ状況を一覧にして示している。いずれの梁も中央部下縁に大きなひびわれが発生しており、曲げ引張破壊で終局に至った状況が示されている。また、T-1.0/0.25-3 及び T-1.0-3-R1/R2 の場合には載荷点部を中心にほぼスパン長の 1/2 の領域にひびわれが分散している。一方、T-0.5/0.25-6 の場合にはより広範囲にひびわれが分散しているようである。T-1.0/0.25-3 を見ると、ひびわれの分散領域や発生本数が同程度であるが、T-0.25-3 の中央部のひびわれ幅は T-1.0-3 より大きく示されている。これは、PC 鋼材の緊張率が小さいことにより、T-1.0-3 より低い荷重レベルの状態ではひびわれが発生し、荷重の増大とともにそれが拡大するためと考えられる。

一方、T-1.0-3 と T-1.0-3-R1/R2 を比較すると、ひびわれの分散領域は 3 者ほぼ類似であるが、ひびわれ本数は T-1.0-3-R2 が最も多く鋼材比の増加によってひびわれ分散効果が明確に示されていることがわかる。また、T-0.5/0.25-6 において、T-0.25-6 が T-0.5-6 よりもひびわれの分散領域が拡大していることがわかる。これより、T-0.25-6 はひびわれ分散領域が最も広く梁全体でエネルギーを吸収する特性を有しかつ終局耐力も向上しているものと判断される。

従って、エネルギー吸収性や終局耐力は、ひびわれの分布性状から判断すると、T-0.25-6 がひびわれ制御用異形鉄筋を配筋した T-1.0-3-R1/R2 よりも優れているといえる。

## 4. 重錘落下衝撃実験結果と考察

衝撃荷重載荷実験は 400 kgf の重錘を初期載荷速度を 1 m/sec から、終局状態まで載荷速度を 1 m/sec 毎増加させる繰り返し載荷実験法に基づいて行った。表-3に最終載荷速度と実験終了後の最大累積残留変位、破壊状態を一覧にして示している。最終載荷速度は 8 m/sec ± 1 m/sec となっている。しかしながら、損傷状態から目視によって終局状態を判断することとしているため、最大累積残留変位は最小 1.6cm、最大 8.8cm と大きく異なっている。勿論、いずれの梁も載荷点部の角折れ状態か、長さが 10cm 程度の下縁部あるいは上縁部のコンクリート塊が剝離し、断面欠損が大きくなっていることを確認している。以下、各項目毎に考察を行うこととする。

### 4.1 重錘衝撃力、全支点反力、載荷点変位の時間的な分布性状

図-4には、代表的な 4 つの PRC 梁 (T-1.0-3, T-0.25-3, T-0.5-6, T-1.0-3-R1) の重錘衝撃力、全支点反力、載荷点変位 (図中、それぞれ Impact Force, Reaction Force, Displacement で表示) の載荷速度  $V=1, 3, 5, 7$  m/sec 及び最終載荷速度における時系列分布を示してい

表-3 終局時の最大残留変位及び破壊状態

| 試験体名       | 最終載荷速度<br>( m/sec ) | 最大残留変位<br>( cm ) | 終局時破壊状態           |
|------------|---------------------|------------------|-------------------|
| T-1.0-3    | 7                   | 3.2              | 中央部下縁<br>コンクリート剝離 |
| T-0.25-3   | 7                   | 8.8              | 中央部<br>角折れ状態      |
| T-0.5-6    | 9                   | 2.4              | 載荷点部<br>コンクリート剝離  |
| T-0.25-6   | 8                   | 1.6              | 中央部下縁<br>コンクリート剝離 |
| T-1.0-3-R1 | 8                   | 5.4              | 中央部下縁<br>コンクリート剝離 |
| T-1.0-3-R2 | 8                   | 4.2              | 中央部下縁<br>コンクリート剝離 |

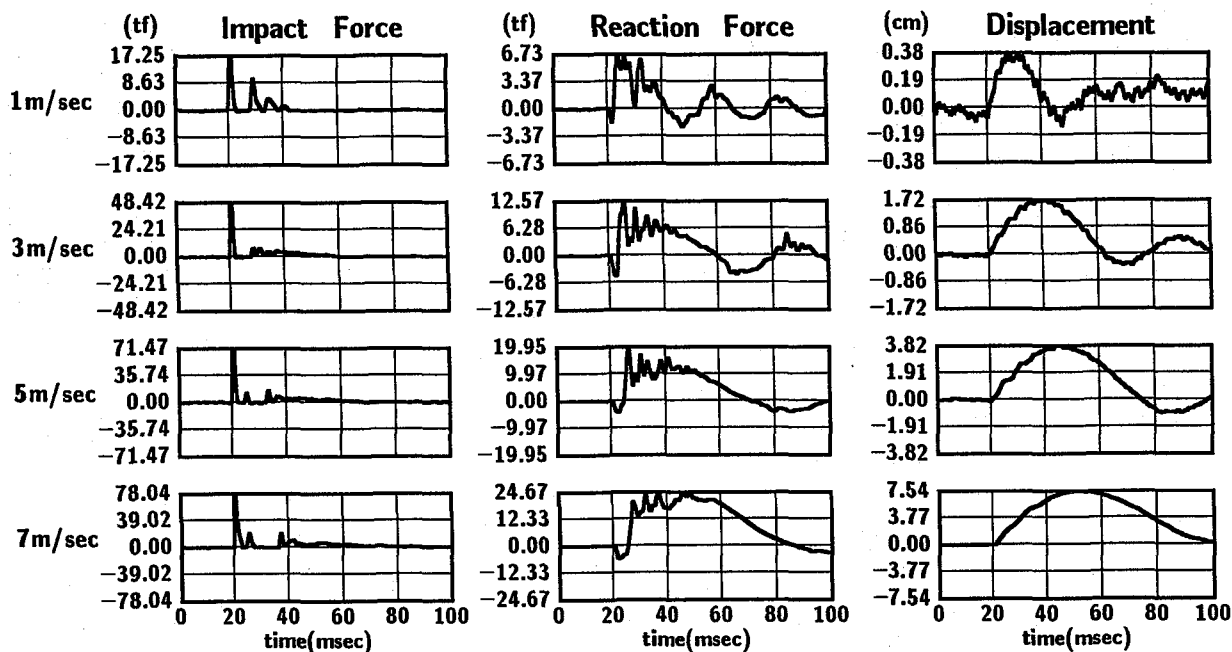
る。なお、全支点反力波形は両支点反力波形の時間軸を合わせて単純に加え合わせたものである。図中、T-0.5-6、T-1.0-3-R1 の載荷点変位はコンクリートの飛散により測定不能になったため、隣接する測点 (載荷点から 32 cm 離れた) の波形で代用している。図より各応答波形は PC 鋼材の緊張率、PC 鋼材本数や異形鉄筋の有無に関わらず各載荷速度毎大略類似の応答分布を示していることがわかる。以下、各測定項目について考察を行うこととする。

### (1) 重錘衝撃力波形及び全支点反力波形

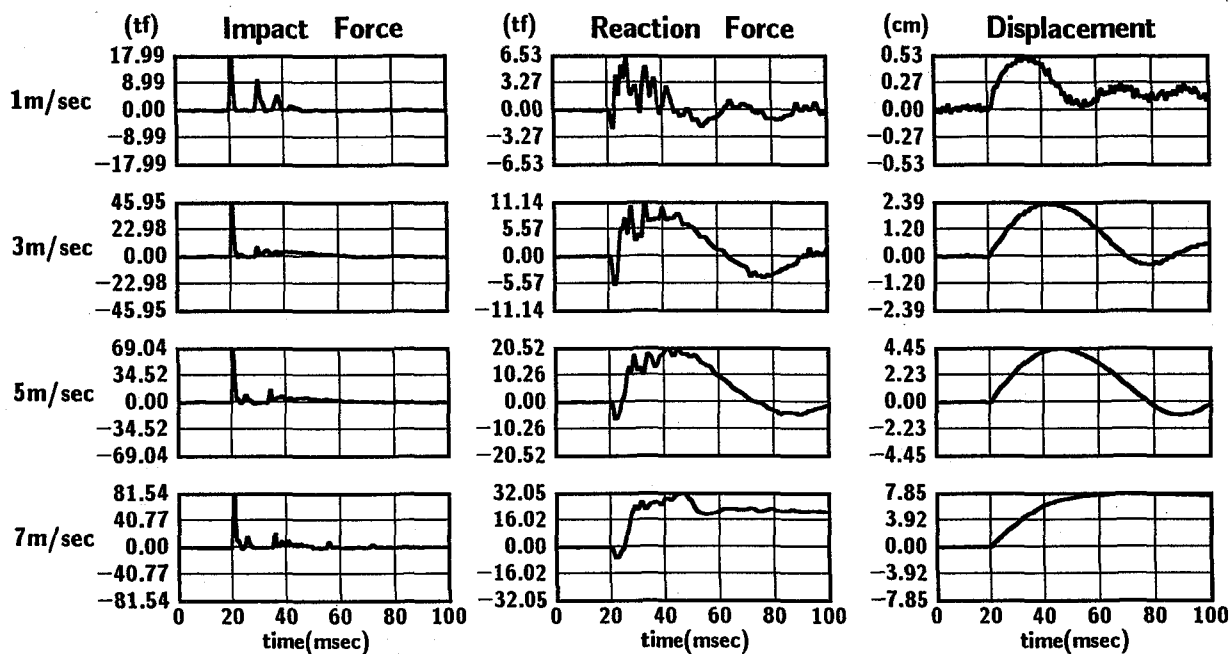
重錘衝撃力波形は、いずれの梁も載荷速度が  $V = 1$  m/sec の場合に、20 msec 程度の中に 3 波の独立した大きな波形が発生している。載荷速度の増大とともに継続時間が延び、載荷速度  $V=7$  m/sec の場合の荷重の継続時間は 40 msec 程度となっている。

全支点反力波形に関しては、いずれの梁に対しても載荷初期に主波動が発生し、その後除荷とともに大きく減衰している。主波動の継続時間は載荷速度の増大とともに延びており、ひびわれの進行に伴って梁の塑性化が進行しているものと考えられる。

図-5に最大の重錘衝撃力及び全支点反力 (以後、これらを単に重錘衝撃力、支点反力と呼ぶ) を載荷速度を横軸に取って整理している。図より、重錘衝撃力は載荷速度に比例して線形に増加し、やがて一定値に漸近する傾向を示していることがわかる。一方、支点反力に関しては、T-1.0-3-R2 は載荷速度が小さい領域で比較的大きな値を示しており、また、T-1.0-3、T-1.0-3-R1 は、載荷速度が  $V = 5$  m/sec 以上で支点反力の増加率が小さくなっている。しかしながら、その他の梁の場合は大概最終載荷速度まで載荷速度に比例して線形に増加していることがわかる。重錘衝撃力と支点反力の線形増加部の勾配を比較すると、支点反力は重錘衝撃力の 1/4 程度の大きさとなっている。これは、1) 重錘衝撃力が図-4に示されているように継続時間が短く振幅の大きい数個の正弦半波の波形を示す。2) この入力エネルギーに

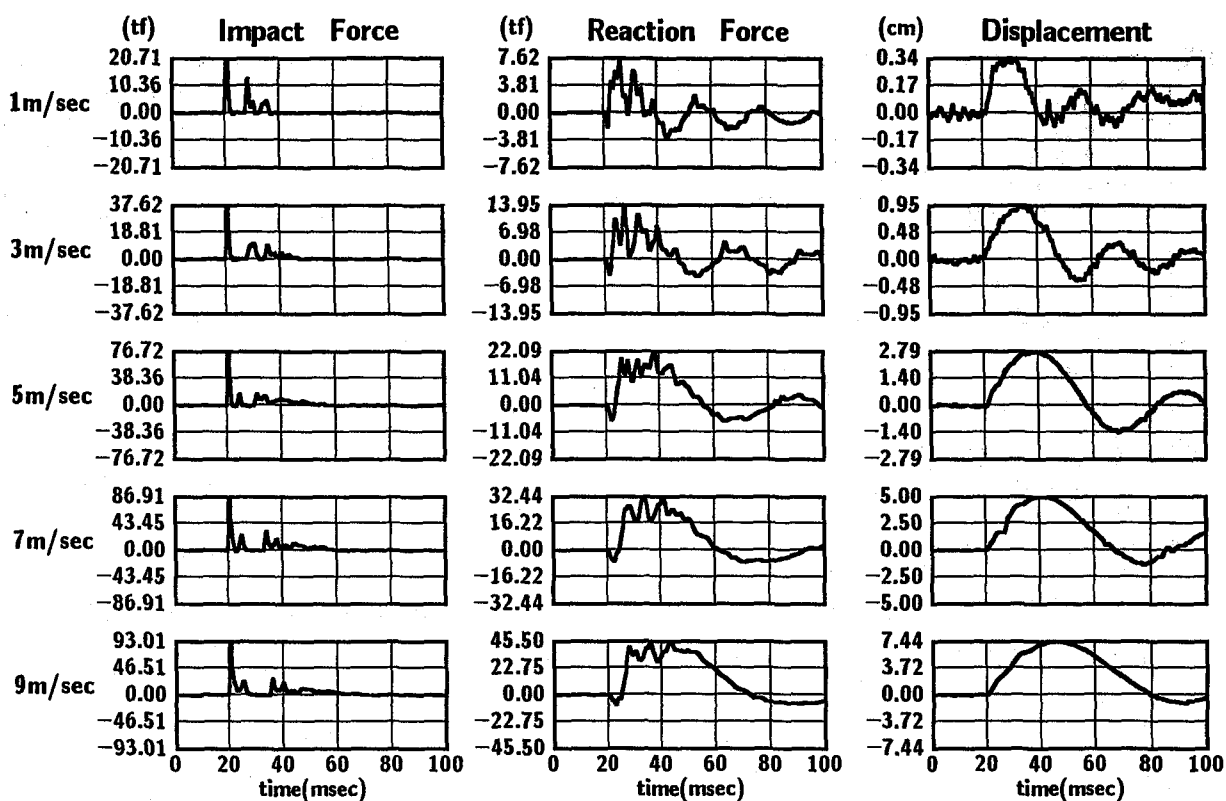


(a) T-1.0-3

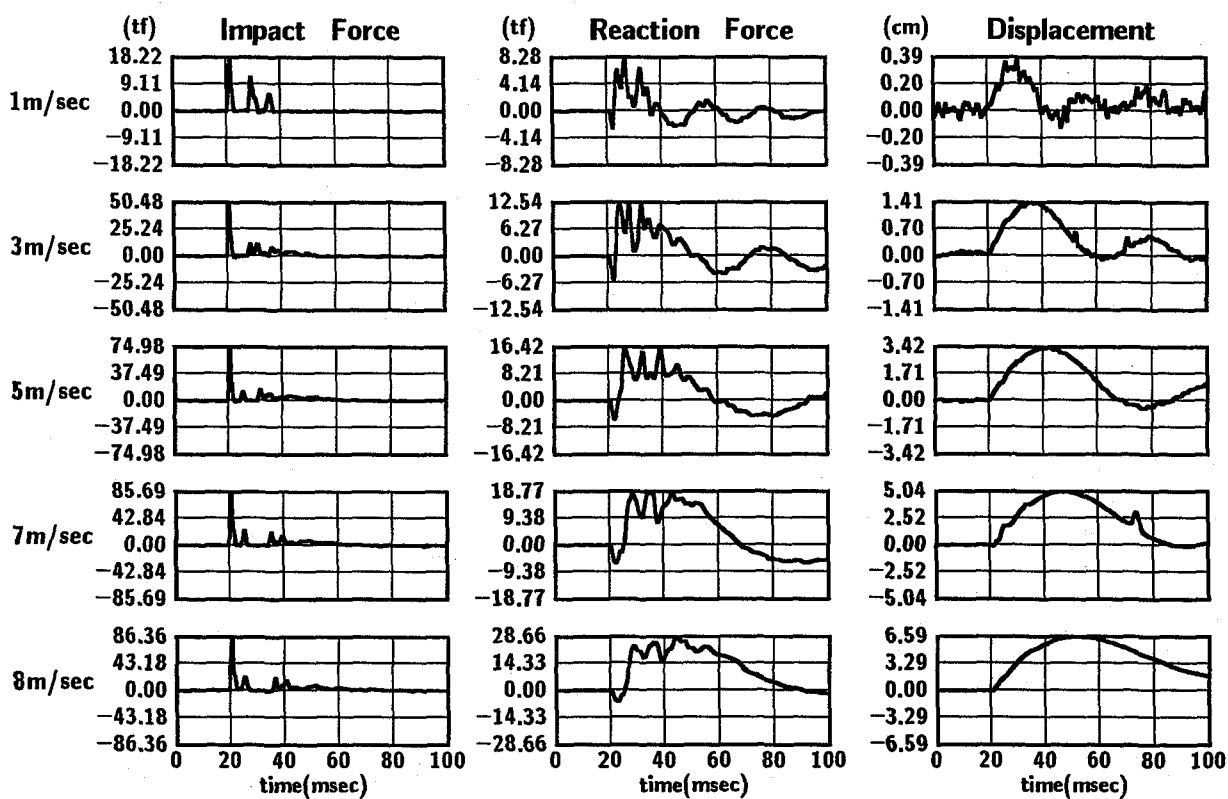


(b) T-0.25-3

図-4 各 PRC 梁の重錘衝撃力, 全支点反力, 載荷点変位波形図



(c) T-0.5-6



(d) T-1.0-3-R1

図-4 続き 各 PRC 梁の重錘衝撃力，全支点反力，載荷点変位波形図

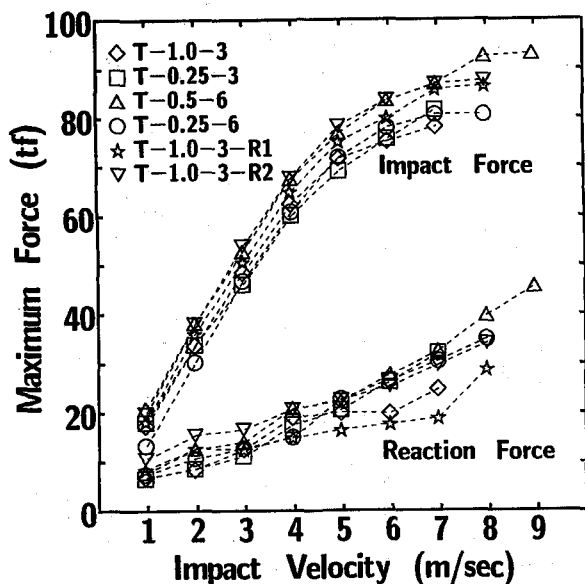


図-5 載荷速度と重錘衝撃力及び支点反力の関係

よって、PRC 梁には構造系及び材料の塑性化によるエネルギー吸収を伴いながら低次の減衰自由振動が励起される。3) 従って、支点反力もこの振動に対応して挙動し重錘衝撃力に比べ 1/4 程度の小さな振幅になったものと考えられる。重錘衝撃力分布は全梁とも載荷速度  $V = 4 \text{ m/sec}$  前後より増加率が減少しているようである。

最終載荷速度における重錘衝撃力値を調べると、T-0.5-6 が最も大きく、次いで T-1.0-3-R1/R2 となっており、T-1.0/0.25-3、T-0.25-6 が最も小さいグループとなっている。最終載荷速度における支点反力は T-0.5-6 や T-1.0-3-R2 が重錘衝撃力と同様大きい値を示しているが、T-1.0-3-R1 は他の梁に比較して小さな値を示している。これらの値は T-0.25-3 を除きほぼ静的終局耐力 ( $P_u$ ) に対応して分布しているようである。すなわち、T-0.5-6 が最も大きく T-1.0-3 が最も小さい。また、T-1.0-3-R1 の支点反力が小さいことも  $P_u$  の大きさに対応したものとなっている。

最終載荷速度における支点反力と静的耐力の比を求めてみると、最大が T-0.25-3 で 3.23、最小は T-0.25-6 で 1.93 となっており、その他の梁は平均 2.41 となっている。これは、最終載荷速度における動的支点反力が衝撃耐力として評価可能であると仮定するならば、曲げ引張型破壊を示す PRC 梁の衝撃耐力は支点反力を用いて静的耐力の 2 倍程度で安全側で設計できることを示唆している。

表-4 には概略的な支点反力の主波動継続時間を一覧にして示している。載荷速度  $V = 1 \text{ m/sec}$  における結果を見ると、全緊張力の大きい梁ほど継続時間が短く示されている。また、それぞれ T-1.0/0.25-3、T-0.5/0.25-6、T-1.0-3-R1/R2 の値を比較すると、載荷速度  $V = 1 \text{ m/sec}$  から最終載荷速度に至るまで緊張率の大きい梁、

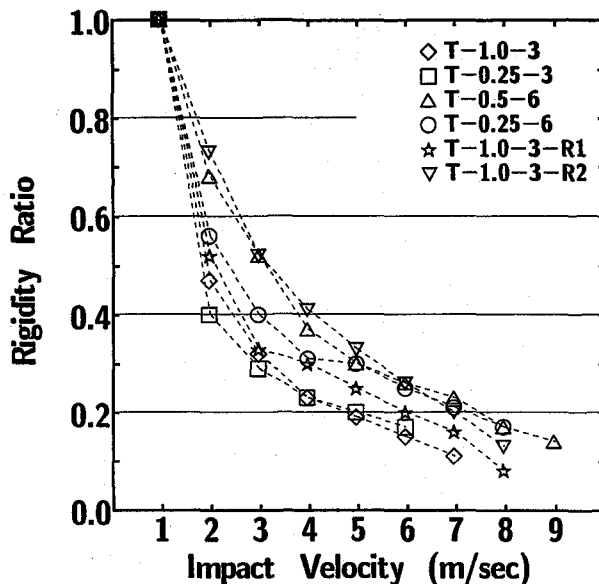


図-6 支点反力の主波動継続時間から評価した剛性比

表-4 支点反力波形主波動継続時間 ( msec )

| 試験体名       | 載荷速度 ( m/sec ) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| T-1.0-3    | 21.7           | 31.7 | 38.3 | 45.0 | 50.0 | 56.7 | 66.7 |      |      |
| T-0.25-3   | 23.3           | 36.7 | 43.3 | 48.3 | 51.7 | 56.7 |      |      |      |
| T-0.5-6    | 19.2           | 23.3 | 26.7 | 31.7 | 35.0 | 37.5 | 40.0 | 46.7 | 51.7 |
| T-0.25-6   | 20.0           | 26.7 | 31.7 | 35.8 | 36.7 | 40.0 | 43.3 | 49.2 |      |
| T-1.0-3-R1 | 19.2           | 26.7 | 33.3 | 35.0 | 38.3 | 43.3 | 47.5 | 70.0 |      |
| T-1.0-3-R2 | 19.2           | 22.5 | 26.7 | 30.0 | 33.3 | 37.5 | 43.3 | 53.3 |      |

表-5 載荷点変位波形主波動継続時間 ( msec )

| 試験体名       | 載荷速度 ( m/sec ) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|            | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
| T-1.0-3    | 20.0           | 35.0 | 43.3 | 46.7 | 55.0 | 63.3 | 71.7 |      |      |
| T-0.25-3   | 36.7           | 50.0 | 50.0 | 51.7 | 56.7 | 61.7 |      |      |      |
| T-0.5-6    | 20.0           | 25.0 | 28.3 | 38.3 | 38.3 | 41.7 | 46.7 | 51.7 | 60.0 |
| T-0.25-6   | 26.7           | 35.0 | 36.7 | 40.0 | 40.0 | 41.7 | 50.0 | 58.3 |      |
| T-1.0-3-R1 | 23.3           | 30.0 | 38.3 | 41.7 | 48.3 | 63.3 | 65.0 | 80.0 |      |
| T-1.0-3-R2 | 20.0           | 20.0 | 28.3 | 34.2 | 38.3 | 46.7 | 60.0 | 68.3 |      |

あるいは異形鉄筋量の多い梁の継続時間がより短いことがわかる。さらに全緊張力が大略等しい T-1.0-3 と T-0.5-6 を比較すると、全ての載荷速度において T-0.5-6 の継続時間が短い。

図-6 には、支点反力の主波動継続時間が最低次固有振動状態の半周期に等しいと仮定した場合の繰り返し載

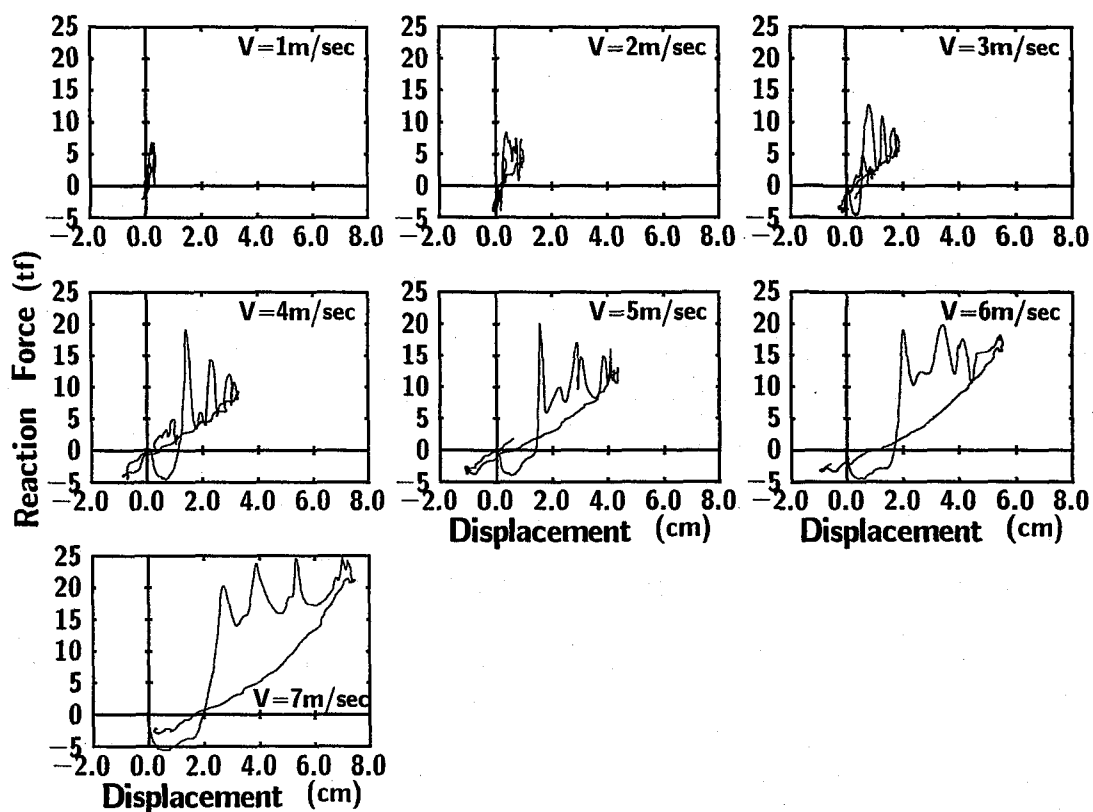


図-7 支点反力-載荷点変位曲線の一例 ( T-1.0-3 の場合 )

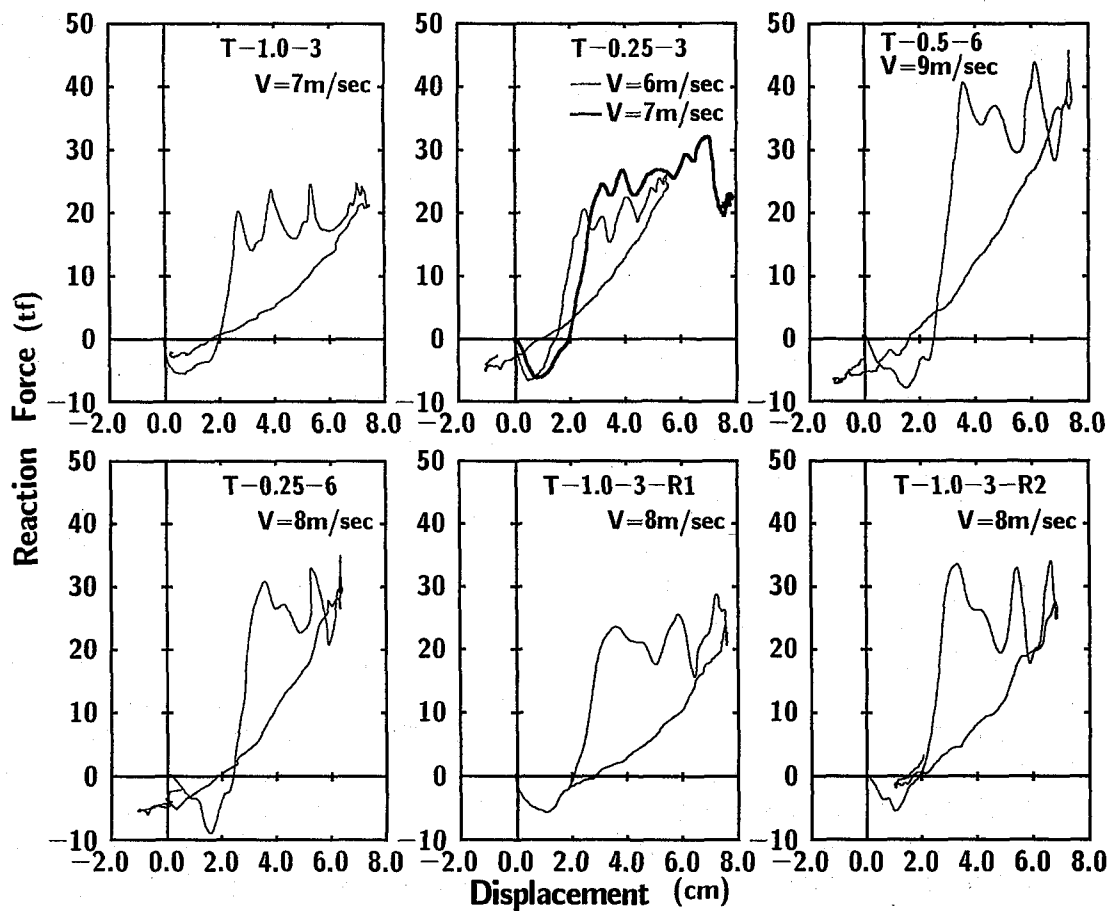


図-8 最終載荷速度における支点反力-載荷点変位曲線

表-6 エネルギー吸収量とエネルギー吸収比

| 試験体名       | V = 6 m/sec 時の<br>エネルギー吸収量<br>(tf·cm) | 最終載荷速度時の<br>エネルギー吸収量<br>Eud (tf·cm) | 静載荷実験結果に対する<br>エネルギー吸収比<br>Eud/Eus | 静解析結果に対する<br>エネルギー吸収比<br>Eud/Ea |
|------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| T-1.0-3    | 25.32                                 | 45.86 (V: 7 m/sec)                  | 0.63 (Eus: 72.87 tf·cm)            | 1.08 (Ea: 42.60 tf·cm)          |
| T-0.25-3   | 29.09                                 | 129.39 (V: 7 m/sec)                 | 0.45*~2.01 (Eus: 64.44 tf·cm)      | 0.65*~2.89 (Ea: 44.77 tf·cm)    |
| T-0.5-6    | 10.54                                 | 59.87 (V: 9 m/sec)                  | 0.41 (Eus: 145.04 tf·cm)           | 1.06 (Ea: 56.49 tf·cm)          |
| T-0.25-6   | 15.10                                 | 39.93 (V: 8 m/sec)                  | 0.30 (Eus: 134.92 tf·cm)           | 0.70 (Ea: 57.05 tf·cm)          |
| T-1.0-3-R1 | 21.98                                 | 67.16 (V: 8 m/sec)                  | 0.70 (Eus: 95.61 tf·cm)            | 1.53 (Ea: 43.79 tf·cm)          |
| T-1.0-3-R2 | 21.98                                 | 60.71 (V: 8 m/sec)                  | 0.39 (Eus: 155.53 tf·cm)           | 1.35 (Ea: 44.99 tf·cm)          |

\*: 載荷速度 V = 6 m/sec における値

荷実験による曲げ剛性の低下を検討するため、各載荷速度における曲げ剛性を載荷速度 V = 1 m/sec の場合の曲げ剛性に対する比 (剛性比) の形で整理している。図より、1) 初期剛性低下率の最も大きい梁は T-0.25-3 であり、次いで T-1.0-3 となっている。2) T-0.25/0.50-6, T-1.0-3-R2 の剛性低下は小さい。3) 最終載荷速度の剛性比は大略 0.1~0.2 程度であることがわかる。

以上、図-6 及び表-4 の結果を整理すると、1) 衝撃初期には PC 鋼材量に関わらず導入緊張力が大きいほど梁の曲げ剛性が高く評価され、ひびわれ等による劣化の程度が小さいものと判断される。2) PC 鋼材量が等しい場合には衝撃初期から最終載荷速度まで、緊張率の大きい梁あるいは異形鉄筋量の多い梁は、曲げ剛性が高く評価され健全性に優れている。3) PC 鋼材量の多い梁あるいは異形鉄筋量の多い梁は載荷速度に対する曲げ剛性の低下率が小さいことより、劣化の進行度合いも小さいものと判断される。4) いずれの梁の場合も、最終載荷状態では劣化の進行により、曲げ剛性が衝撃初期の 1/10 ~ 1/5 程度となっている。

表-5 には載荷点変位に関する初期主波動の継続時間を表-4 と同様にして整理している。表-4 の支点反力の主波動継続時間と比較すると、T-0.25-3/6 を除き載荷速度 V = 1 m/sec では変位波動が数 msec 程度長いようである。一方、T-0.25-3/6 はその差がそれぞれ 13.4 msec, 6.7 msec となっている。これは、緊張率が小さいため梁中央部に初期載荷の時点でひびわれが発生し、載荷点部の塑性化が進行していることを示唆している。その後は T-0.25-3/6 も両者の差が小さく、他の梁と同様の性状を示している。

#### 4.2 支点反力-載荷点変位曲線

衝撃荷重載荷によるエネルギー吸収量を検討するために、支点反力と載荷点変位を用いた衝撃荷重載荷時のヒステリシスループを求めた。図-7 に T-1.0-3 の場合の例を示す。本来入力エネルギーを議論する場合には、荷重は重錘から得られた波形を用いなければならない。しかしながら、1) 重錘衝撃力は重錘と梁の相互作用状態で

発生し、かつ重錘中を伝播する弾性波動を含む高周波で物理的に複雑な波形であること、2) 図-4 に示されているように、支点反力波形と変位波形は継続時間が多少異なるものの類似なものとなっており、静載荷時の考え方の延長上で議論が可能であると判断されること、3) 支点反力波形を用いることにより、衝突体形状の差異等を含め、より一般化した形でエネルギー収支や動的耐力に関する議論ができるものと判断されることより、本研究ではエネルギー吸収量算定のための入力荷重として支点反力波形を用いることとした。また、同一の載荷速度におけるエネルギー吸収量を用いて梁の健全性を論ずる場合には、エネルギー吸収量の少ない梁ほど健全であることに留意する必要がある。図-7 より、載荷速度が V = 1, 2 m/sec と小さい場合にはエネルギー吸収量もほとんどなく、ほぼ弾性状態であることがわかる。その後、載荷速度の増大とともに、変位も大きくかつエネルギー吸収量も大きくなっていく様子が示されている。

図-8 には最終載荷速度における各梁の支点反力-載荷点変位曲線を示している。ただし、T-0.25-3 の場合には、最終載荷速度 V = 7 m/sec において梁が大きく角折れし、重錘が梁に食い込みかつ載荷状態で実験が終了していることより、最終載荷速度である V = 7 m/sec の場合と 1 つ前の載荷速度である V = 6 m/sec 時の結果を比較して示している。従って、この場合の V = 6 m/sec 時におけるエネルギー吸収量は他の梁と比較して小さく示されていることがわかる。また T-0.5-6, T-1.0-3-R2 のエネルギー吸収量は、他に比較して大きく示されている。

表-6 には各梁に対する載荷速度 V = 6 m/sec 時と最終載荷速度における載荷状態 (第 1 象限) のエネルギー吸収量を静載荷時や簡易解析により得られるエネルギー吸収量、それらを基本にした場合の最終載荷速度時のエネルギー吸収比を一覧にして整理している。なお、T-0.25-3 における最終載荷速度時のエネルギー吸収量は、上述の実験終了状況を考慮し最終負荷状態で変位が残留したものと仮定して算定している。このようにして求められた T-0.25-3 のエネルギー吸収量は入力エネルギー

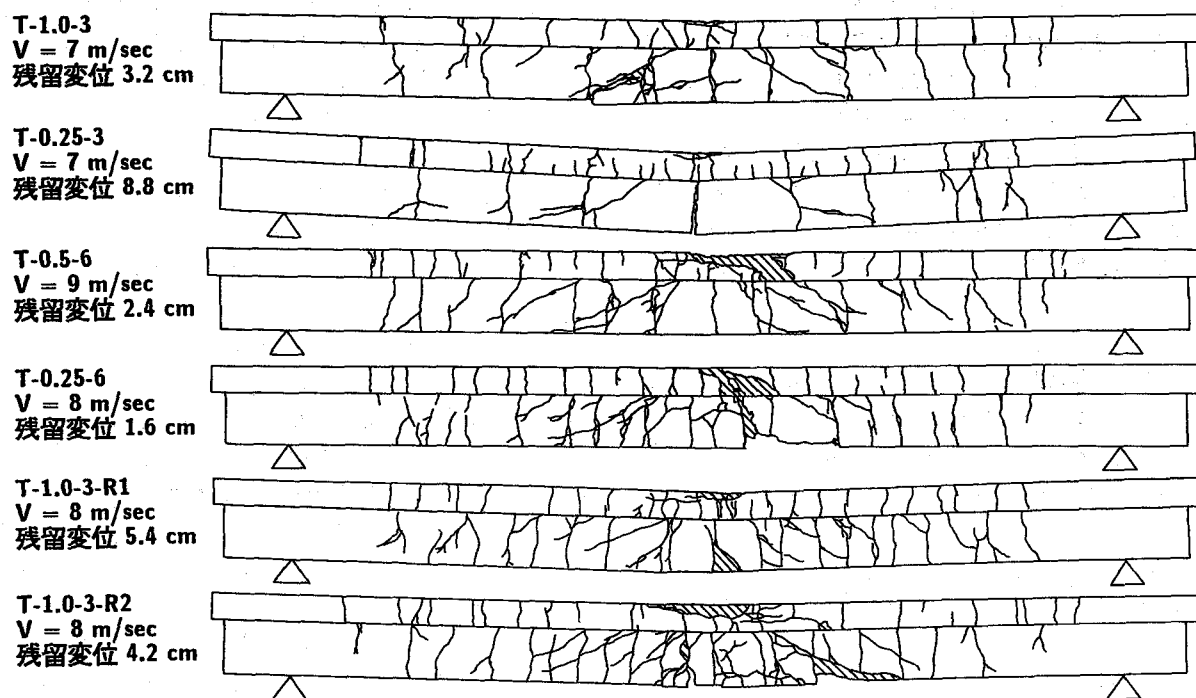


図-9 衝撃荷重実験終了後の各 PRC 梁のひびわれ状況図

量 (100 tf・m) よりも大きく示され、エネルギー収支が成立しない。本文では、誤解を避けるため、載荷速度が  $6 \text{ m/sec} < V < 7 \text{ m/sec}$  で既に終局に至ったものとして評価し、静載荷時および解析結果のエネルギー吸収比の項には  $V = 6 \text{ m/sec}$  における値も示している。

載荷速度  $V = 6 \text{ m/sec}$  におけるエネルギー吸収量一覧において、T-0.5-6 のエネルギー吸収量が最も小さい。これは支点反力あるいは載荷点変位の主波動継続時間と同様、塑性化の程度や量も小さいことに対応しており、この時点では T-0.5-6 が最も健全であることを示している。次に T-0.25-6 のエネルギー吸収量が小さい。T-1.0-3-R1/R2 は両者同程度である。また、エネルギー吸収量の最も大きい梁は T-0.25-3 である。この結果は静載荷時の耐力特性によく対応している。

最終載荷速度における各梁のエネルギー吸収量を見ると、T-0.25-3 が最も大きい。この場合には、前述のとおり大きな角折れとともに残留変位が 8.8 cm で重錘がリバウンドせず梁に食い込んだ状態で実験が終了しており、 $6 \text{ m/sec} < V < 7 \text{ m/sec}$  で完全に終局状態に至っているものと判断される。T-0.25-6 のエネルギー吸収量は最も小さな値を示している。これは十分な剛性を保有しているものの、コンクリート塊の剝離により終局に至ったことを暗示している。

次に静載荷実験結果に対するエネルギー吸収比について考察を行う。表より、T-0.25-3 は  $6 \text{ m/sec} < V < 7 \text{ m/sec}$  で既に静的エネルギー吸収量を越えた状態となっていることがわかる。また、T-0.5-6 は最終載荷速度が  $V = 9 \text{ m/sec}$  でありながら 0.4 程度の値を示しており、

また T-0.25-6 の場合も  $V = 8 \text{ m/sec}$  で 0.3 程度と PC 鋼材本数効果の大きいことがわかる。T-1.0-3-R2 は静載荷時のエネルギー吸収量が大きいことより、エネルギー吸収比も 0.4 と小さいが、異形鉄筋量に対応してエネルギー吸収比も小さくなっていることがわかる。断面分割法に基づくエネルギー吸収量に関する解析結果（梁の変位評価において、梁軸方向の一要素の長さを桁高程度とする）及びエネルギー吸収比を見ると、T-0.25-6 を除き全て 1 以上の値を示している。これより、曲げ引張型破壊を伴う PRC 梁の衝撃荷重載荷時の終局エネルギー吸収量は本解析手法により安全側で評価可能であるものと考えられる。

#### 4.3 衝撃荷重載荷後のひびわれ状況

図-9 には最終載荷速度までの繰り返し荷重載荷実験終了後の各梁のひびわれ図及び累積残留変位値を示している。静載荷時に発生するひびわれ（図-3）は前述のように T-0.5/0.25-6 を除き、載荷点部を中心にスパン長の 1/2 程度の領域に分布している。これに対して重錘落下衝撃実験の場合には、いずれの梁に対してもひびわれはスパン全体かつ上下に貫通した状態で分布していることがわかる。これは繰り返し荷重載荷によって塑性化が支点方向に進展すると同時にリバウンドによって梁が負載荷状態になることに起因しているものと考えられる。T-0.25-3 は前述のように載荷点で大きく角折れしており損傷が載荷点部に集中している。T-1.0-3 は曲げひびわれと同時に載荷点から押し抜き型のせん断ひびわれが発生している。ひびわれ制御用異形鉄筋を配筋した T-1.0-3-R1/R2 の場合は、T-1.0-3 に比べひびわれの数も多く

異形鉄筋の配筋により効率よくひびわれが分散しているのは静載荷時と同様である。最終的には載荷点下縁あるいは上縁のコンクリート塊の剝離によって終局に至っている様子がうかがえる。PC 鋼材本数が最も多い T-0.5/0.25-6 の場合は、T-0.25-6 が T-0.5-6 よりもひびわれが分散しているようである。これより、残留変形量も他の梁に比較して少なく静載荷時同様 PC 鋼材量が多い場合には、曲げ剛性が大きく評価されることが類推される。

## 5. まとめ

耐衝撃性に優れた PC ( PRC ) 覆工の部材設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的とし、PC 鋼材の本数、緊張率、ひびわれ制御のための下端異形鉄筋量を変化させた場合の静的耐荷性状や耐衝撃性、エネルギー吸収量に着目して 6 種類の PRC 梁を用いた実験を行った。本研究では、特に静的に曲げ引張破壊型で終局に至る T 型 PRC 梁を対象として実験を行った。本研究で得られた結果を要約すると：

静載荷実験結果より、

- (1) 曲げ引張破壊型で終局に至る PRC 梁の場合には PC 鋼材の緊張率を低減することによってエネルギー吸収性能を向上させることは期待できない。
- (2) 梁下端に異形鉄筋を配筋して PRC 梁にすることによりエネルギー吸収能を向上させることができる。
- (3) PC 鋼材数を多くすることにより、静的耐力、エネルギー吸収性能とも向上させることができる。

衝撃荷重載荷実験結果より、

- (4) 重錘衝撃力、全支点反力、載荷点変位は PC 鋼材の緊張率や本数、異形鉄筋量に関わらずほぼ類似の応答波形を示す。
- (5) 全支点反力や載荷点変位波形の継続時間は、梁の剛性の低下に対応しているようである。また、載荷点部の塑性化の程度の進行により、載荷点変位の継続時間は全支点反力のそれより延びる傾向にある。
- (6) 静載荷実験同様、PC 鋼材の緊張率を低減することによって耐衝撃性能を向上させることは期待できない。
- (7) ひびわれ制御のために異形鉄筋を配筋し PRC 梁とすることや PC 鋼材量を増やすことにより、衝撃荷重載荷時のエネルギー吸収量や静的なエネルギー吸収量に対するエネルギー吸収比を低下させ、耐衝撃性を向上させることが可能である。

以上より、曲げ圧縮型<sup>9)</sup>及び曲げ引張型の破壊モードを示す PRC 梁の耐衝撃性に関する基礎的なデータを得ることができた。今後は、実規模の PRC 梁に関する衝撃荷重載荷実験を行うとともに、これら PRC 梁に対

して繰り返し荷重載荷時と実設計に対応する単一荷重載荷時のエネルギー吸収量や耐力の関係を明らかにして、エネルギー論的な考え方を導入した合理的な PRC 梁の耐衝撃設計法を確立したいと考えている。

謝辞：本実験を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科大学院生の吉川 卓君他大学院生に多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 西 弘明, 佐藤 昌志, 岸 徳光, 松岡 健一：敷砂緩衝材を用いた実規模 PC 落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 2, pp.691-696, 1995.6.
- 2) 西 弘明, 佐藤 昌志, 岸 徳光, 松岡 健一：敷砂緩衝材を用いた実規模門型 PC 落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1181-1186, 1996.6.
- 3) 佐藤昌志, 岸 徳光, 西 弘明, 松岡健一：三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす芯材 RC スラブの継手部の影響, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp.1249-1256, 1995.3.
- 4) 岸 徳光, 佐藤昌志, 中野 修：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp.1257-1265, 1995.3.
- 5) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一：三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp.1137-1346, 1996.3.
- 6) 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一：三層緩衝構造の伝達衝撃力算定式の定式化, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1137-1346, 1996.3.
- 7) 今野久志, 佐藤弘史, 長尾彰洋：PC 鋼材量および鉄筋の割合を多くした PRC 梁の衝撃実験について, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, 1-B, pp.1620-1621, 1994.
- 8) 岸 徳光, 佐藤昌志, 西 弘明, 三上 浩, 竹本伸一：落石覆工用の PC 桁の静的耐力に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol. 51A, pp.184-187, 1995.
- 9) 竹本伸一, 岸 徳光, 佐藤昌志, 三上 浩：各種 PRC 梁の静的及び衝撃耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp.1155-1160, 1997.6.

(1997 年 9 月 26 日受付)