

V - 3

T 型 PRC 梁模型の重錘落下衝撃実験

ドービー建設工業(株)	正 員	竹 本 伸 一
室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
三井建設(株)	正 員	三 上 浩
開発土木研究所	正 員	今 野 久 志

1. はじめに

落石覆工の多くは RC 製あるいは PC 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、品質管理もよく将来予想される労働者不足の解消や、工期の短縮が可能であることから、今後需要が増えるものと予想される。一方、近年岩盤崩落による PC 覆工やトンネル及びトンネル巻き出し部（覆工）の倒壊が報告されている。道路を落石災害から守るためには優れた緩衝構造の開発と同時に耐衝撃性に優れた安全余裕度の大きな構造部材設計法の開発が急務である。

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両者の特徴を利用した PRC 製覆工の耐衝撃性に関する研究が行われている。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。このため、プレストレスを導入しない場合に比較して部材の残存耐力及び終局エネルギー吸収量が小さくなるものと考えられる。一方、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実性は大きい。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。また、曲げ圧縮型の破壊モードを示す矩形断面 PC 梁を用いた静載荷実験や重錘落下衝撃実験を行っている。その結果、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ことを目的として、曲げ引張破壊型 PRC 梁に関し、PC 鋼材の緊張率や本数、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) 梁を用いた重錘落下衝撃実験を行った。なお、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。

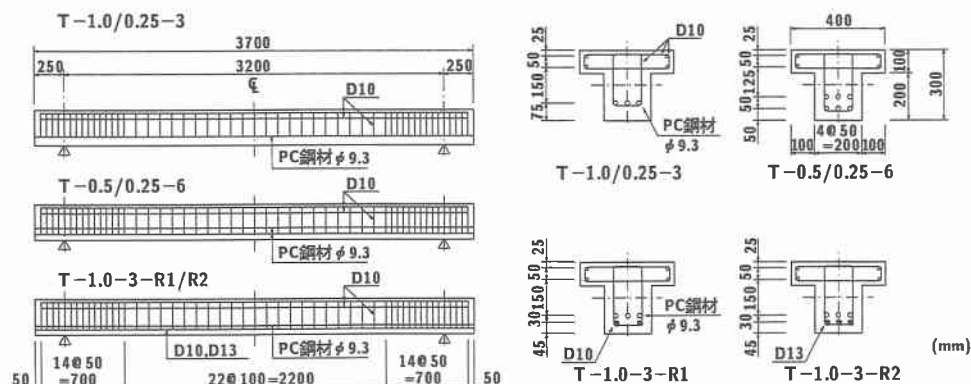
2. 実験概要

2.1 試験体及び実験方法

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 mm²) 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。また、同一の試験体を用いて行った静載荷実験結果による終局荷重を併せて示している。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 の緊張力は施工時の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。

Impact Test of T-Type PRC Beams Due to Weight Falling
by Shin-ichi TAKEMOTO, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Hisashi KONNO



図－1 各試験体の配筋図

図－1 に試験体の配筋図を示している。純スパンは 3.2 m とし、各梁の 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梁下縁に配筋している。実験はコンクリート打設後 24～35 日経過後に行っており、実験時の平均圧縮強度が 662 kgf/cm²、弾性係数が 3.13×10^5 kgf/cm² である。

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、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。支持部は、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。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繰り返し載荷とした。測定項目は重錘衝撃力、支点反力、レーザ式変位計（測定範囲 30 ± 10 cm）を用いて測定した載荷点変位である。各波形は高帯域用のデータレコーダで一括収録し、50 μ sec の時間間隔で 100 msec だけ A/D 変換している。各波形データは、A/D 変換後 1 msec の矩形移動平均法（1 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、梁終局状態として、当初最大累積残留変位が純スパンの 2 % を越えた時点を設定したが、T-0.25-3 を除く全ての梁が基準値に達する前に下縁部あるいは上縁部のコンクリート塊の剝離がみられ、断面欠損の状態から目視により終局状態を判定した。

3. 実験結果と考察

表－2 には最終載荷速度と終局時の最大累積残留変位及び破壊状態を示している。最終載荷速度は 8 ± 1 m/sec となっている。しかしながら、破壊状態が中央部の角折れあるいは、長さが 10cm 程度のコンクリート塊の剝離により実験を終了しているため、最大累積残留変位は 1.6～8.8cm と大きく異なっている。以下、各項目毎に考察を行う。

表－1 試験体一覧

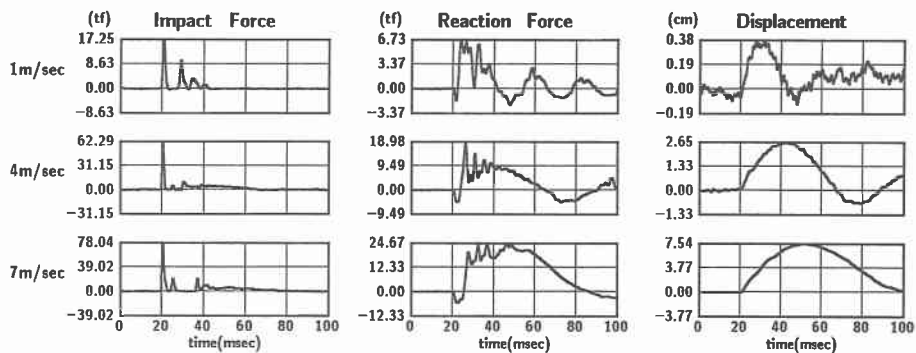
試験体名	PC鋼材 公称 緊張率	PC 鋼材 本数	異形 鉄筋 本数	設定有効 緊張力 (tf/本)	実験時有効 緊張力 (tf/本)	実験時有効 緊張力 (tf/本)	静載荷重 終局荷重 (tf)
T-1.0-3	1.0	3	-	5.12	4.00	12.00	9.93
T-0.25-3	0.25	3	-	1.13	1.13	3.39	8.54
T-0.5-6	0.5	6	-	1.96	1.96	11.76	10.02
T-0.25-6	0.25	6	-	0.83	0.83	4.98	9.75
T-1.0-3-R1	1.0	3	D10×2	5.13	5.13	15.39	9.31
T-1.0-3-R2	1.0	3	D13×3	5.14	5.14	15.42	11.87

表－2 終局時の最大残留変位及び破壊状態

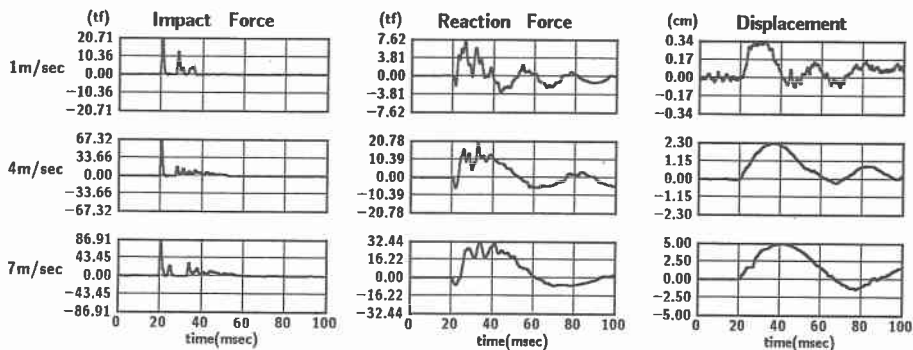
試験体名	最終載荷速度 (m/sec)	最大残留変位 (cm)	終局時 破壊状態
T-1.0-3	7	3.2	中央部下縁 コンクリート剝離
T-0.25-3	7	8.8	中央部 角折れ状態
T-0.5-6	9	2.4	載荷点部 コンクリート剝離
T-0.25-6	8	1.6	中央部下縁 コンクリート剝離
T-1.0-3-R1	8	5.4	中央部下縁 コンクリート剝離
T-1.0-3-R2	8	4.2	中央部下縁 コンクリート剝離

3.1 重錘衝撃力，全支点反力，載荷点変位の時間的な分布性状

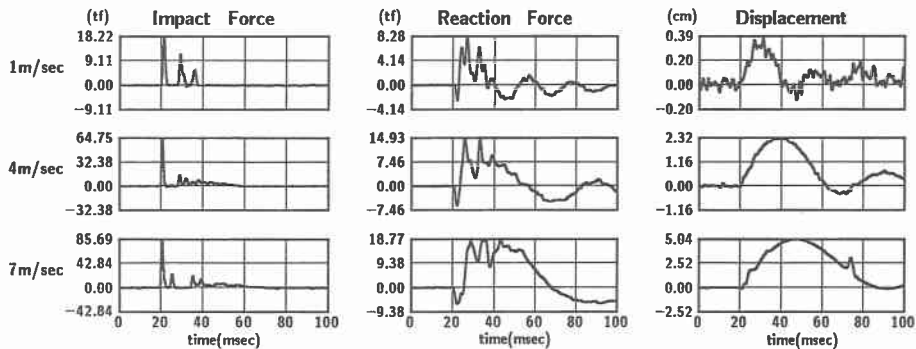
図-2には，代表的な PRC 梁 (T-1.0-3, T-0.5-6, T-1.0-3-R1) の重錘衝撃力，全支点反力，載荷点変位 (図中 Impact Force, Reaction Force, Displacement で表示) の載荷速度 $V=1, 4, 7$ m/sec における時系列分布を示している。図より各応答波形は PC 鋼材の緊張率，PC 鋼材本数と異形鉄筋の有無に関わらず各載荷速度毎大略類似の応答分布を示していることがわかる。各測定項目について考察すると，1) 重錘衝撃力波形は，いずれの梁も載荷速度が $V=1$ m/sec の場合に，20 msec 程度の間に 3 波の独立した大きな波形が発生



(a) T-1.0-3



(b) T-0.5-6



(c) T-1.0-3-R1

図-2 各 PRC 梁の重錘衝撃力，全支点反力，載荷点変位波形図

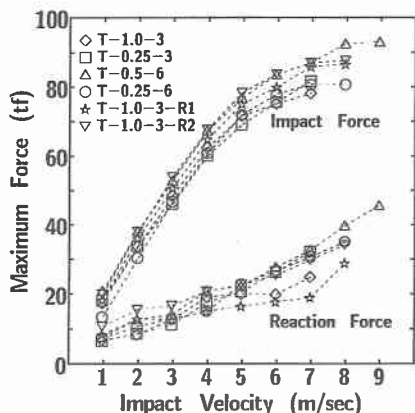


図-3 載荷速度と重錘衝撃力及び支点反力の関係

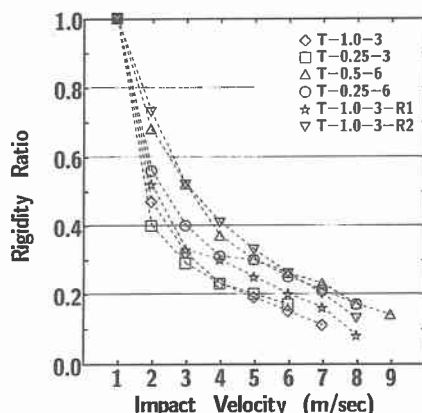


図-4 剛性比

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 時の荷重の継続時間は 40 msec 程度となっている。2) 全支点反力波形及び載荷点変位波形は、継続時間が多少異なるものの類似の形状となっている。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、ひびわれの進展に伴って梁の塑性化が進行してものと考えられる。

図-3 には載荷速度と最大の重錘衝撃力及び全支点反力（以後、単に重錘衝撃力、支点反力と呼ぶ）の関係を示している。図より、重錘衝撃力は全ての梁で載荷速度 $V = 4$ m/sec 前後まで線形に増加し、以後、勾配が小さくなり一定値に漸近する傾向を示している。一方、支点反力は T-1.0-3-R2 が載荷速度の小さな領域で比較的大きな値を示している。また、T-1.0-3、T-1.0-3-R1 は $V = 5$ m/sec 以上で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、重錘衝撃力が図-2 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。この入力エネルギーによって 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、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るものと考えられる。最終載荷速度に着目すると重錘衝撃力は、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。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に対応しているようである。

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

表-3 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-4 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	

り、その他の梁は平均 2.41 となっている。これより、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可能であるものと考えられる。

表一 3 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。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、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。また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、載荷速度 $V > 1 \text{ m/sec}$ において T-0.5-6 の継続時間が短い。

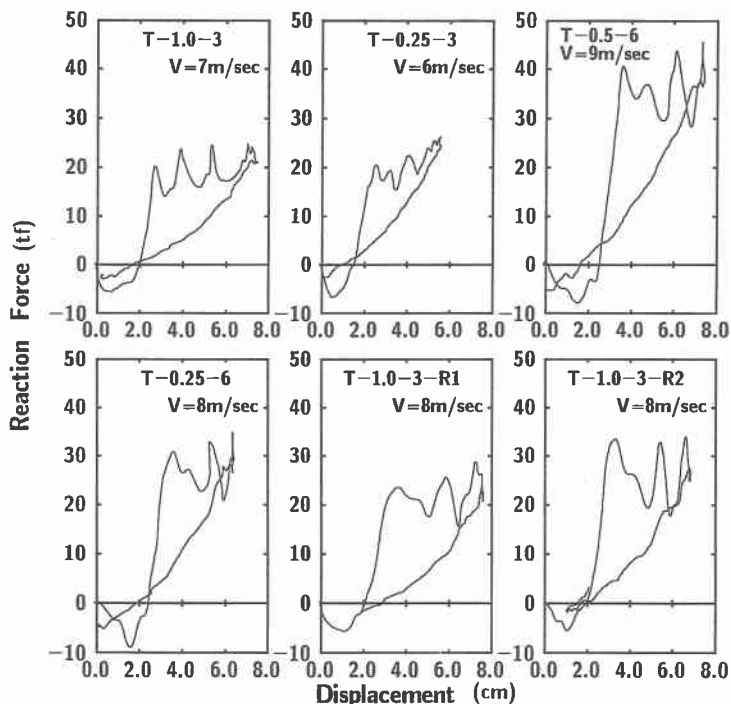
図一 4 には、繰り返し載荷による曲げ剛性の低下を検討するため、支点反力の主波動継続時間が最低次固有振動状態の半周期に等しいと仮定した場合の各載荷速度における曲げ剛性を $V = 1 \text{ m/sec}$ の場合の曲げ剛性に対する比（剛性比）の形で整理している。図より、1) 載荷初期における剛性低下率の最も大きい梁は T-0.25-3 であり、次いで T-1.0-3 となっている。また、T-0.5-6、T-1.0-3-R2 は他の梁と比較して剛性低下が小さい。2) 最終載荷速度の剛性比は大略 0.1~0.2 程度であることがわかる。

表一 4 には載荷点変位に関する初期主波動の継続時間を表一 3 と同様にして整理している。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 $V = 1 \text{ m/sec}$ 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。

3.2 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。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) 図一 2 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より、本研究では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、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。

図一 5 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 の場合は、最終載荷速度 $V = 7 \text{ m/sec}$ 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



図一 5 最終載荷速度における支点反力-載荷点変位曲線

終了していることより、 $V = 6$ m/sec 時の曲線を示している。従って、この場合のエネルギー吸収量は比較的小さく示されている。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-5 には各梁の載荷速度 $V = 6$ 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及び、静載荷実験時

表-5 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 エネルギー 吸収量 (tf·cm)	最終載荷速度 時のエネルギー 吸収量 (tf·cm)	静載荷時の エネルギー 吸収量 (tf·cm)
T-1.0-3	25.32 (0.35)	45.86 (0.63)	72.87
T-0.25-3	29.09 (0.45)	129.39 (2.01)	64.44
T-0.5-6	10.54 (0.07)	59.87 (0.41)	145.04
T-0.25-6	15.10 (0.11)	39.93 (0.30)	134.92
T-1.0-3-R1	21.98 (0.23)	67.16 (0.70)	95.61
T-1.0-3-R2	21.98 (0.14)	60.71 (0.39)	155.53

のエネルギー吸収量を示している。また、() 内には静載荷実験時に対する各載荷速度におけるエネルギー吸収比である。載荷速度 $V = 6$ m/sec におけるエネルギー吸収量において、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 は両者同程度であり、エネルギー吸収量の最も大きい梁は T-0.25-3 である。

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、完全に終局状態に至っているものと推察される。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。これはこの時点においても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する。 $V = 6$ m/sec 時における各梁の値は静載荷時の耐力特性とよく対応していることがわかる。また、T-1.0/0.25-3 及び T-0.5/0.25-6 のエネルギー吸収量がそれぞれ類似した値となっている。これより、緊張率の低減による耐衝撃性向上に関する効果は期待できないことがわかる。最終載荷速度におけるエネルギー吸収比を見ると、上述のように T-0.25-3 は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 $V = 9$ 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 $V = 8$ 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。

4. 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 鋼材緊張率及び本数、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：

- (1) 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性状を示す。
- (2) 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。
- (3) 曲げ引張型破壊を示し終局に至る PRC 梁において、PC 鋼材の緊張率を低減することによる耐衝撃性向上に関する効果は見られない。
- (4) PC 鋼材量を増やすことや、ひびわれ制御のために梁下縁部に異形鉄筋を配筋し PRC 梁とすることによって衝撃荷重載荷時のエネルギー吸収量や静載荷時の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。