

(31) 矩形 PRC 梁の衝撃吸収性能に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT ABSORPTION CAPACITY
OF RECTANGULAR PRC BEAMS

岸 徳光*, 竹本伸一**, 三上 浩***, 今野久志****, 吉川 卓*****

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

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** ドービー建設工業(株) 技術センター (〒170-0004 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 (〒270-0132 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 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

***** 工修 オリエンタル建設工業(株) (〒102-0093 東京都千代田区平河町 2-1-1)

キーワード: PC 覆工, PRC 梁, 衝撃吸収性能, エネルギー吸収
(PC rock-shed, PRC beam, impact absorption capacity, energy absorption)

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優れた衝撃吸収性能を有し、かつ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、PC 部材の残存耐力や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[1]。

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得ることを目的として、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 種類の矩形 PC (PRC) 梁を用いて実験を行った。実験は、曲げ圧縮破壊を示し終局に至る PRC 梁に着目し、静載荷および重錘落下衝撃実験を行い、耐荷性状やエネルギー吸収量、衝撃吸収性能について検討を行った。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

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 SWPR-7A 9.3 mm (公称断面積 51.61 mm²) である。その特性は、公称引張荷重、降伏点荷重がそれぞれ 9.06 tf, 7.70 tf であり、使用状態の許容緊張力を 5.88 tf としている。表-1 には、本実験に用いた試験体およびその特性値の一覧を示している。試験体は、PC 鋼材の有効緊張率(以下、

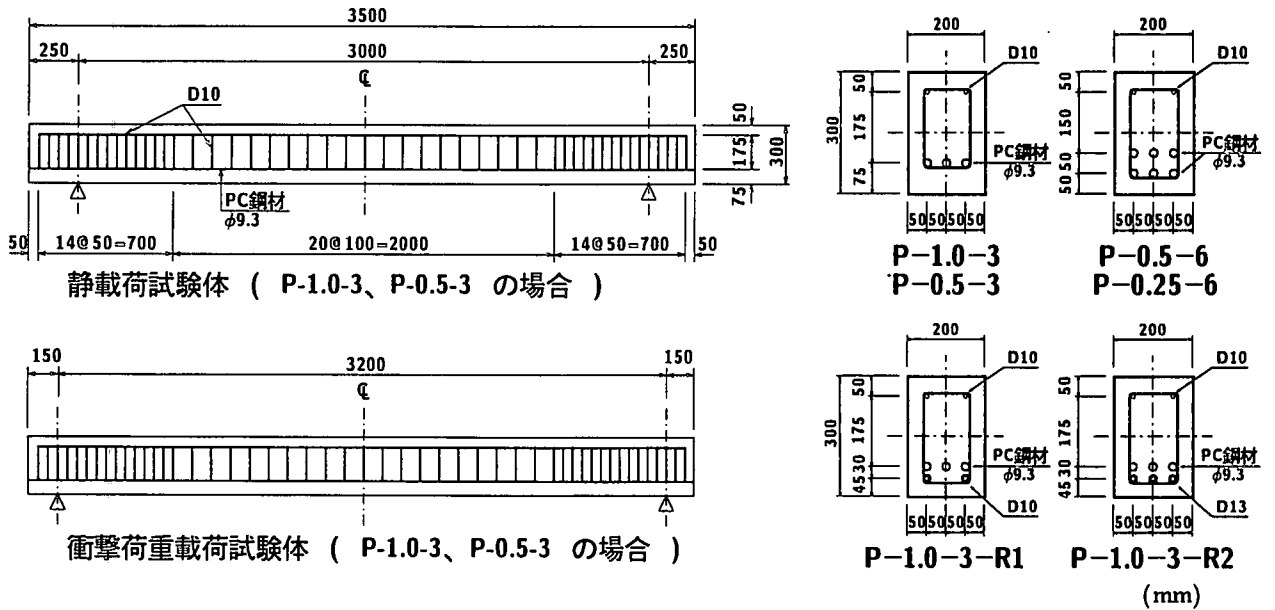


図-1 試験体の配筋図

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、重錘落下衝撃実験各 1 体) である。PC 鋼材の緊張率 (使用状態における許容緊張力 5.88 tf/t に対する) はラウンドナンバーで示し、次項は PC 鋼材本数を示している。また、ひびわれ制御用異形鉄筋本数 D10×2、D13×3 をそれぞれ R1、R2 とし記号化している。なお、使用した異形鉄筋は全て SD295 である。

図-1 には、本実験に用いた試験体の配筋図を示している。梁の断面寸法は幅 20 cm、桁高 30 cm であり、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配筋している。また、異形鉄筋はひびわれ制御用であることより、梁下縁に配筋することとした。コンクリートは実験時の材令における平均圧縮強度が 663 kgf/cm²、弾性係数は 3.27×10⁵ kgf/cm² である。また、実験はコンクリート打設から 37~46 日経過後に行っている。

支点部には静載荷実験、重錘落下衝撃実験とも同様の原理で製作された治具を用いている。すなわち、梁を支点反力測定用ロードセルを介して鋼製のピンを用いて単純支持状態としている。ただし、重錘落下衝撃実験の場合には衝撃荷重載荷による端部の跳ね上がりが大きくなるものと予想されたため、静載荷実験の場合よりも大型の治具を用いることとした。各実験の概要は以下のとおりである。

静載荷実験：梁の純スパンを 3.0 m とし、スパン中央点に 50 mm 径の鋼棒を半割にした載荷治具を

表-1 試験体一覧

試験体名	PC鋼材緊張率	PC鋼材本数	異形鉄筋本数	有効緊張力 (tf/本)	全有効緊張力 (tf)
P-1.0-3	1.0	3	-	5.43	16.28
P-0.5-3	0.5	3	-	2.61	7.82
P-0.5-6	0.5	6	-	2.78	16.70
P-0.25-6	0.25	6	-	1.34	7.98
P-1.0-3-R1	1.0	3	D10×2	5.44	16.34
P-1.0-3-R2	1.0	3	D13×3	5.46	16.46

設置して断面方向に全幅、軸方向に集中荷重状態となるようにして油圧ジャッキにより加圧した。測定項目は荷重および載荷点部の変位である。なお、載荷点部が圧壊した時点を梁の終局状態とし、その時点で実験を終了している。

重錘落下衝撃実験：純スパンは 3.2 m (支点治具固定台の制約により、静載荷実験の場合と異なっている) として実験を行った。衝撃荷重は円柱状のロードセル付鋼製重錘 (重量 300 kgf、載荷点部直径 20 cm、2 mm 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 ずつ破壊に至るまで増加させる繰り返し荷重載荷とした。測定項目は重錘衝撃力、支点反力、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

表-2 実験結果の比較

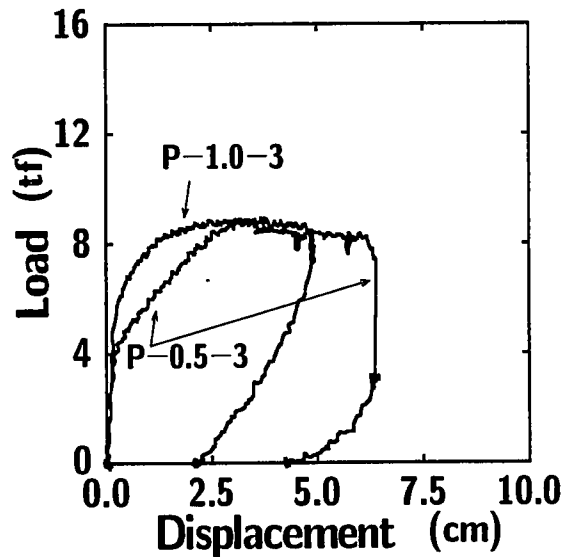
試験体名	実験結果				解析結果
	Pcr(tf)	Py(tf)	Pu(tf)	Eus(tf·cm)	Ea(tf·cm)
P-1.0-3	4.80 (1.00)	6.77 (1.00)	8.80 (1.00)	31.05 (1.00)	13.33 (1.00)
P-0.5-3	3.52 (0.73)	7.25 (1.07)	8.74 (0.99)	46.24 (1.49)	16.58 (1.24)
P-0.5-6	5.01 (1.04)	12.80 (1.89)	15.47 (1.76)	89.05 (2.87)	22.69 (1.70)
P-0.25-6	3.73 (0.78)	11.68 (1.73)	14.19 (1.61)	59.54 (1.92)	25.11 (1.88)
P-1.0-3-R1	5.54 (1.15)	7.57 (1.12)	10.40 (1.18)	44.65 (1.44)	13.74 (1.03)
P-1.0-3-R2	5.33 (1.11)	10.13 (1.50)	11.09 (1.26)	66.95 (2.16)	14.13 (1.06)

変換している。各波形データは、A/D変換後 1msec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) による平滑化が施されている。なお、梁破壊の基準として、当初最大残留変位が純スパンの 2% (6.4 cm) を越えた状態を設定したが、いずれの梁においても基準値に達する前に梁上端部が圧壊し、コンクリートが剝離した状態となったため、この時点を終了段階とした。全ての梁の繰り返し載荷実験による最終載荷速度は $V = 7 \text{ m/sec}$ である。

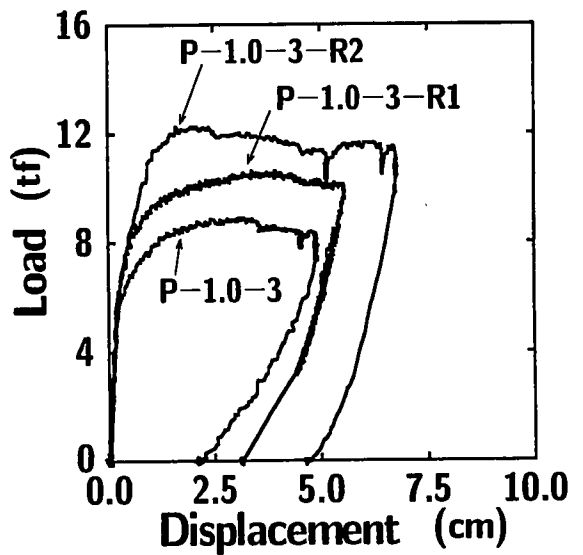
3. 実験結果と考察

3.1 静載荷時の耐力およびエネルギー吸収能

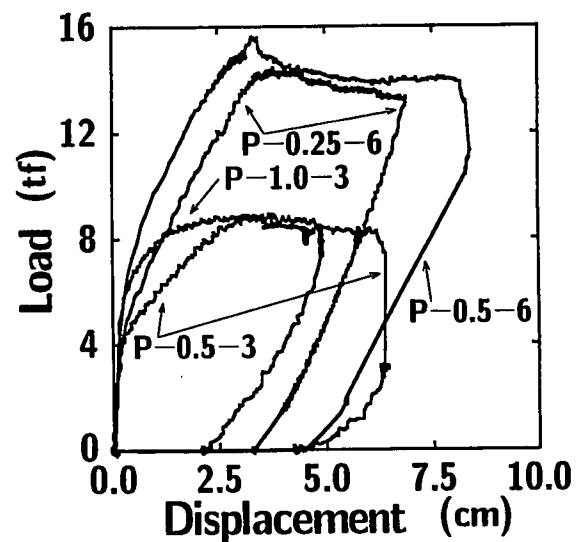
表-2 には、実験結果の荷重-変位曲線の変曲点より求めたひびわれ発生時の荷重 (Pcr)、下端鋼材 (-R1, -R2 は鉄筋、それ以外の梁は PC 鋼材) の降伏時の荷重 (Py)、終局荷重 (Pu) およびエネルギー吸収量 (Eus) と、参考のために断面分割法によって得られた荷重-変位曲線において最大荷重状態で残留変位するものと仮定した場合のエネルギー吸収量 (Ea)を一覧にして示している。() 内には、比較を容易にするために、各項目に関し P-1.0-3 の値に対する無次元化した値を示している。なお、エネルギー吸収量 (Eus) は載荷荷重と載荷点変位による荷重-変位曲線によって囲まれた面積を用いて評価することとした。また、断面分割法を用いたエネルギー



(a)



(b)



(c)

図-2 荷重変位曲線

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、載荷点変位はスパン方向に 20 分割（一要素の長さが桁高の 1/2）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 4.7 倍、最小 2.3 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、各組合せ毎に考察を行う。

(1) PC 鋼材の緊張率の影響 (図-2 a)

緊張率を変化させた P-1.0-3 および P-0.5-3 の実験結果の比較を行う。P-0.5-3 の場合には PC 鋼材の緊張率を 50% としていることより、 P_{cr} が P-1.0-3 に比較して 70% 程度に低減するものの、 P_u は両者ほぼ等しく、エネルギー吸収量は逆に 1.5 倍の大きさになっている。なお、実験結果のエネルギー吸収量の増加割合は解析結果より 25% 程度大きく示されている。これより、PC 鋼材量が同一の場合には、PC 鋼材の緊張率を低減することによって、 P_u を同程度に保ちつつエネルギー吸収量を増加させることが可能であることがわかる。また、実 PC 覆工の場合における死荷重の全荷重に対する断面力の比率が 0.2~0.3 程度であることより、PC 鋼材の緊張率が 50% 程度の場合には、死荷重に対しては未だ全断面圧縮状態の設計が可能であるものと推察される。

(2) 異形鉄筋量の影響 (図-2 b)

異形鉄筋量を変化させた P-1.0-3, P-1.0-3-R1/R2 の実験結果の比較を行う。P-1.0-3-R1/R2 は下端に異形鉄筋を配筋することにより、P-1.0-3 に対して P_{cr} が 11~15% 程度、また P_u が 18~26% 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 44%, 116% 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 梁とすることにより、 P_u は勿論のことエネルギー吸収能も大きく向上することがわかる。また、P-0.5-3 も考慮に入れて比較すると、実験結果では P-0.5-3 と P-1.0-3-R1 のエネルギー吸収量がほぼ同程度になっている。これより、エネルギー吸収能の観点から考察すると、P-0.5-3 は使用鋼材量からも効率のよい PC 梁であることがわかる。

(3) PC 鋼材本数の影響 (図-2 c)

まず、PC 鋼材の全緊張力が等しい P-1.0-3 と P-0.5-6 の実験結果を比較する。P-0.5-6 の場合は P-1 ほぼ等しいが、 P_y , P_u がそれぞれ 80%, 70% 以上大きな値を示している。また、エネルギー吸収量は解析結果が 70% 程度の増大となっているが、実験結果は 3 倍弱の値となっている。これより、PC 鋼材の全緊張力を一定にし、緊張率を 50%、鋼材量を 2 倍にすることにより、静的耐力、エネルギー吸収能とも飛躍的に向上させることが可能であることがわかる。次に、P-0.5-3 と P-0.25-6 の場合について同様の比較を行うと、P-0.25-6 は P-0.5-3 に対して、 P_y , P_u が 60% 程度大きい値を示しているが、エネルギー吸収量は 30% 前後と P-0.5-6 の場合よりも増加率が小さい。これは、P-0.25-6 の場合には 1 本あたりの導入プレストレス量が少ないため載荷初期の段階より変形量が大きく、上段に配筋された PC 鋼材がエネルギー吸収に十分寄与しない状態で梁上端部圧壊により終局に至ったためと推察される。

P-0.5/0.25-6 の実験結果を比較すると、P-0.5-6 の場合は全ての項目に関して P-0.25-6 より大きな値を示している。ただし、解析結果のエネルギー吸収量は P-0.25-6 が P-0.5-6 よりも若干大きなものとなっている。このような結果も、上述と同様 P-0.25-6 の上段の PC 鋼材がエネルギー吸収に効率的に寄与していない状態で梁上端部圧壊により終局に至ったためと考えられる。

3.2 重錘落下衝撃実験における全支点反力-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、全支点反力（以後、単に支点反力と呼ぶ）と載荷点変位（以後、単に変位と呼ぶ）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-3 に P-1.0-3 の場合の例を示す。なお、全支点反力は両支点反力波形を時間軸を合わせて単純に加え合わせたものである。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) 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衝撃吸収性能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、同一の载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り、衝撃吸収性能に優れていることに留意する必要がある。

図-3より、载荷速度が $V = 1, 2$ m/sec と小さい場合にはエネルギー吸収量も極小さなものであり、ほぼ弾性状態であることがわかる。その後、载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-4には、繰り返し荷重载荷実験の最終载荷速度である $V = 7$ m/sec における各梁の全支点反力-载荷点変位曲線を示している。図より、P-1.0-3, P-0.5-3, P-1.0-3-R1 のエネルギー吸収量は、他の梁に比較して大きく示されている。また、P-1.0-3-R2 は他の梁と比較して複雑なヒステリシスループを示している。

表-3には繰り返し载荷実験の最終载荷速度における正荷重状態(第1象限)のエネルギー吸収量を、静载荷実験におけるエネルギー吸収量(スパン長が3m)および断面分割法を用いた解析結果によるエネルギー吸収量に対する比(エネルギー吸収比)で整理している。従って、エネルギー吸収比がより小さい場合は、残存エネルギー吸収能が大きく、より健全な状態であることを意味している。

表中の $V = 7$ m/sec におけるエネルギー吸収量を見ると、P-0.5-6のエネルギー吸収量が最も小さい。これより、P-0.5-6がこの時点で最も健全であるものと判断される。P-0.25-6とP-0.5-6において、両者のPC鋼材本数が等しいものの前者のエネルギー吸収量が後者より大きい。これは、図-2、表-2の静载荷実験結果からも明らかのように、Pcr後の接線剛性が両者等しいものの、前者のPcrやPuが後者より小さく载荷点変位が大きくなるためと考えられる。また、P-1.0-3, P-1.0-3-R1/R2の場合は、PC鋼材本数、緊張率が等しく、ひびわれ制御用の異形鉄筋量のみが異なる場合であるが、異形鉄筋量に応じてエネルギー吸収量が小さく示されている。この結果も静载荷実験結果に示されているように、異形鉄筋量の増大とともにPcr後の接線剛性やPuが大

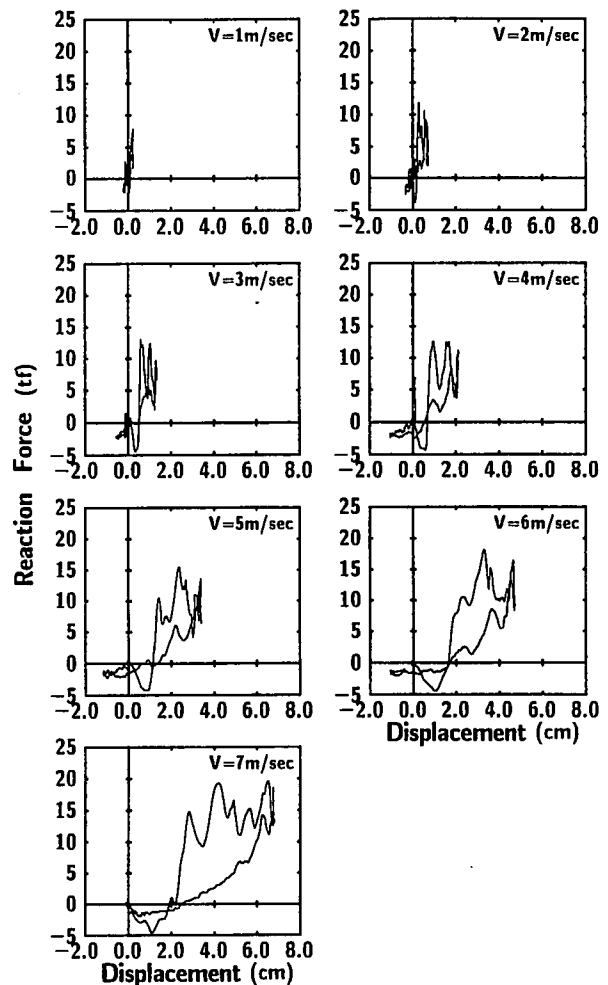


図-3 支点反力-载荷点変位曲線の一例 (P-1.0-3の場合)

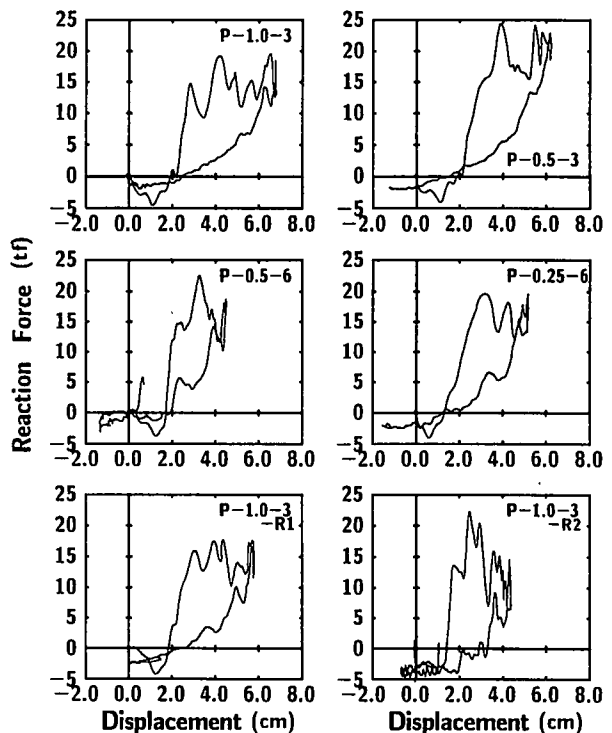


図-4 最終载荷速度における支点反力-载荷点変位曲線 ($V = 7$ m/sec)

表-3 最終載荷速度 $V = 7 \text{ m/sec}$ 時のエネルギー吸収比

試験体名	$V = 7 \text{ m/sec}$ 時の エネルギー吸収量 $E_{ud} \text{ (tf}\cdot\text{cm)}$	静的載荷時に対する エネルギー吸収比 E_{ud}/E_{us}	解析結果に対する エネルギー吸収比 E_{ud}/E_a
P-1.0-3	33.55	1.08 (Eus: 31.05 tf·cm)	2.52 (Ea: 13.33 tf·cm)
P-0.5-3	33.53	0.73 (Eus: 46.24 tf·cm)	2.02 (Ea: 16.58 tf·cm)
P-0.5-6	20.48	0.23 (Eus: 89.05 tf·cm)	0.90 (Ea: 22.69 tf·cm)
P-0.25-6	28.28	0.47 (Eus: 59.54 tf·cm)	1.13 (Ea: 25.11 tf·cm)
P-1.0-3-R1	30.18	0.68 (Eus: 44.65 tf·cm)	2.20 (Ea: 13.74 tf·cm)
P-1.0-3-R2	28.60	0.43 (Eus: 66.95 tf·cm)	2.02 (Ea: 14.13 tf·cm)

きくなることに対応しているものと考えられる。

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。表より、P-1.0-3は既に静載荷時のエネルギー吸収量と同程度に達していることがわかる。それに対し、P-0.5-3は70%前後で緊張率低減による効果が示されている。P-1.0-3-R1/R2は異形鉄筋量に対応してエネルギー吸収比が低下しており、異形鉄筋量の衝撃吸収性能向上に関する効果が明確に示されている。本研究では、P-0.5-6の梁が最もエネルギー吸収比率が小さく、衝撃吸収性に優れていることがわかる。また、P-0.25-6とP-1.0-3-R2のエネルギー吸収比は、ほぼ同程度である。これより、両梁はほぼ同程度の衝撃吸収性能を有しているものと考えられる。

解析結果に対するエネルギー吸収比はP-0.5-6を除き1.1~2.5程度であり、実験結果を安全側に評価している。またP-0.5-6についても0.9程度であることから、本解析手法により繰り返し荷重載荷による梁破壊時の吸収エネルギー量を安全側に評価可能であるものと考えられる。

以上、曲げ圧縮破壊型PRC梁を用いた繰り返し衝撃載荷実験結果より、PC鋼材の緊張率を50%程度に小さくすることや、PC鋼材量を増やすこと、あるいは、梁下端にひびわれ制御のための異形鉄筋を配筋してPRC梁にすることにより、合理的にPC梁の衝撃吸収性能が向上することが明らかになった。

4. まとめ

衝撃吸収性に優れた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て、

PC鋼材の本数、緊張率、ひびわれ制御のための異形鉄筋量を変化させた場合の耐荷性状やエネルギー吸収量、衝撃吸収性能に着目して6種類のPRC梁を用いた実験を行った。本実験では、静的に曲げ圧縮型破壊で終局に至る矩形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) PC鋼材量が同一の場合には、緊張率を50%程度に低減させることにより、静的耐力を同程度に保ちつつエネルギー吸収量を50%程度増加させることができる。
 - (2) 梁下端に異形鉄筋を配筋してPRC梁とすることにより、エネルギー吸収量を向上させることができる。
 - (3) PC鋼材の全緊張率一定とし、緊張率を50%、鋼材量を2倍にすることにより、静的耐力は1.7倍、エネルギー吸収量は3倍弱に向上する。
- 重錘落下衝撃実験より、
- (4) 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鋼材の緊張率を50%程度に小さくすること、あるいは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、衝撃吸収性能を向上させることが可能である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 竹本伸一: PRC梁の耐衝撃性に関する基礎的研究, 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, 土木学会, Vol.3, pp.301-304, 1996.6.