

論文 各種 PRC 梁の静的及び衝撃耐荷性状

竹本伸一^{*1}・岸 徳光^{*2}・佐藤昌志^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨：PC 落石覆工等を対象とし、耐衝撃性に優れた PRC 部材の断面設計法を確立することを目的として、PC 鋼材の緊張率やひびわれ制御のための鉄筋量を変化させた矩形 PRC 梁を用いた静載荷実験及び重錘落下衝撃実験を行った。その結果、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増加させることができること、また、PC 鋼材本数を増加させることや異形鉄筋を配置することによって耐衝撃性を向上させることができること等が明らかになった。

キーワード：耐衝撃性、PRC 梁、エネルギー吸収、重錘落下衝撃

1. はじめに

落石覆工構造物は RC 構造物と PC 構造物に大別される。特に、PC 覆工は工場で構成部材を製作し、現場に搬入して組み立てるもので、2 ヒンジ 1 剛結接合逆 L 型構造が一般的である。PC 覆工はプレハブ構造であるため、品質管理もよく工期の短縮も可能であることより、ますます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 覆工やトンネルおよびトンネル巻き出し部（覆工）の倒壊が報告されている。このように、道路周辺地山の経年変化によって、落石規模が設計時より大きくなることによる設計荷重の見直しを迫られ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を落石による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同時に、耐衝撃性に優れかつ安全余裕度の大きな構造部材の設計手法の開発が肝要であるものと判断される。

PC 覆工に関しては、佐藤等は独自の実験研究より RC 構造が PC 構造よりも耐衝撃性に優れているとして、RC 構造と PC 構造の特徴を利用した PRC 覆工を提案し研究を行っている [1]。落石覆工のように、死荷重による断面力比率が全断面力に対して 0.2 ～ 0.3 程度と衝撃荷重によるそれに比較して小さく、かつ落石荷重の不確実性が大きい場合には、従来からの力による設計思想にエネルギー論的な考え方を導入し、エネルギー吸収容量を大きくすることによって安全余裕度の高い断面設計が可能になるものと判断される。

このような観点より、本研究では耐衝撃性に優れた PC (PRC) 部材の断面設計法を確立することを目的として、PC 鋼材の緊張率やひびわれ制御のための異形鉄筋量を変化させた 6 種類の矩形 PRC 梁を用いた静載荷実験及び重錘落下衝撃実験を行った。なお、本実験では全ての PC 梁にひびわれ制御のための異形鉄筋を導入しているわけではないが、煩雑さを避けるためこれらを総称して PRC 梁と呼ぶこととする。

2. 実験概要

-
- *1 ドーピー建設工業（株）技術センター（正会員）
 - *2 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博（正会員）
 - *3 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長（正会員）
 - *4 三井建設（株）技術研究所 主任研究員、工博（正会員）

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。本実験に用いた試験体の一覧を表 1 に示している。試験体は、PC 鋼材の有効緊張率 (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) はラウンドナンバーで表し、また補強筋量 D10 × 2 本、D13 × 3 本をそれぞれ R1, R2 としている。

図 1 には試験体の配筋図を示している。コンクリートは実験時における平均圧縮強度が 663 kgf/cm²、弾性係数が 3.27×10^5 kgf/cm² である。実験はコンクリート打設後 37 ~ 46 日経過後に行っている。支点部は静載荷実験、重錘落下衝撃実験とも同一の治具を用いている。すなわち、梁の上下を支点反力測定用ロードセルを介して固定し、治具全体は梁の回転を許容するピン支持に近い構造となっている。各実験の概要は以下のとおりである。

1) 静載荷実験は純スパンを 3 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設置して断面方向に線荷重、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。測定項目は荷重及び載荷点部の変位である。

2) 衝撃荷重載荷実験は、純スパンを 3.2m (衝撃荷重載荷装置の制約より、純スパンが静載荷実験の場合と異なっている) として行った。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

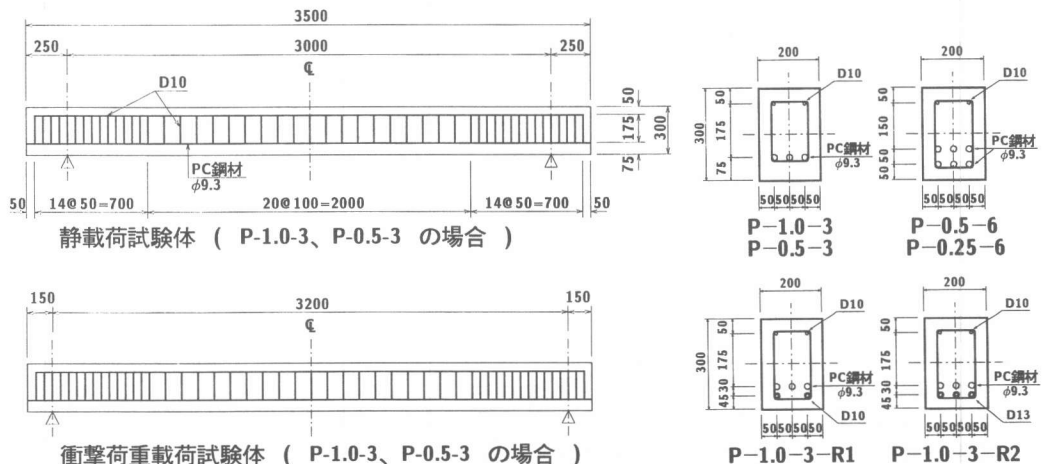


図 1 試験体の配筋図

(mm)

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

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、たわみ波形である。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。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 % 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 静載荷実験に基づいた耐力及び 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)
 及びエネルギー吸収量 (E) 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 P-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) 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する。また、断面分割法は土木学会コ
 ンクリート標準示方書 [2] に基づいてコンクリート、鋼材の応力－歪曲線を決定し、断面方向
 に 60 分割して有効緊張力導入時の各断面の曲げモーメント－曲率関係を求めている。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。以下、各組合せごとに考
 察を行う。

(1) P-1.0-3, P-0.5-3 の比較 (図－2 a)

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
 断面圧縮の状態の設計が可能であるものと推察される。

表－2 実験結果の比較

試験体名	実験結果				解析結果
	P_{cr} (tf)	P_y (tf)	P_u (tf)	E (tf·cm)	E_a (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)

(2) P-1.0-3, P-1.0-3-R1, P-1.0-3-R2 の比較

(図-2b)

P-1.0-3-R1, -R2 は異形鉄筋を下端に配置することにより, 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置し PRC 梁にすることにより, P_u は勿論のことエネルギー吸収能も明らかに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) P-1.0-3, P-0.5-3, P-0.5-6, P-0.25-6 の比較

(図-2c)

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-1.0-3 に対して P_{cr} がほぼ等しいが, P_y , P_u がそれぞれ 80 %, 70 % 以上大きい値を示している. 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. 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初期の段階より変形量が大きく, 上段に配置された 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-0.5-6 と P-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基づいた全支点反力-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, 支点反力) と載荷点変位 (以後, 変位) を用いた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. 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

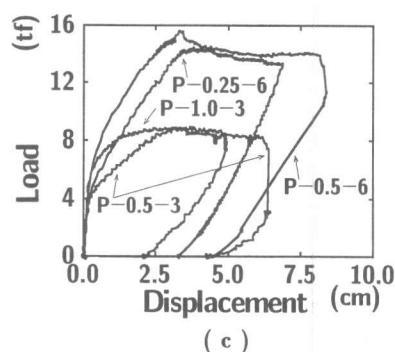
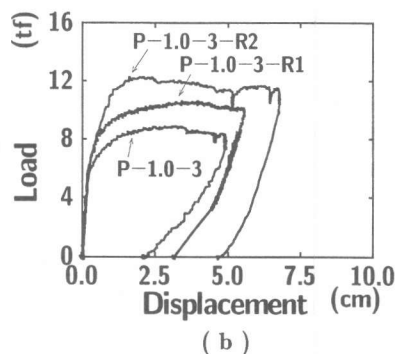
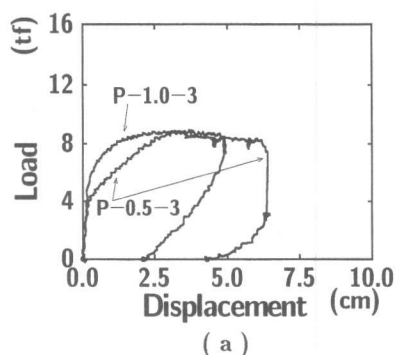


図-2 荷重-変位曲線の比較

衝撃力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接触問題の現象や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) 支点反力波形は重錘衝撃力波形に比較して変位波形とより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等より、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。

図-3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-4には載荷速度 $v = 7$ m/sec における各梁の支点反力-載荷点変位曲線を示している。P-1.0-3、P-0.5-3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。また、P-1.0-3-R2は他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には正載荷状態（第一象限）のエネルギー吸収量と、概略的な特性を把握するためにスパン長が異なっていることを前提に静載荷実験におけるエネルギー吸収量及びその値に対する正載荷状態におけるエネルギー吸収比率を示している。従って、エネルギー吸収比率がより小さい場合は、残存エネルギー吸収能が大きく、耐衝撃性により優れていることを意味している。表より、P-1.0-3の場合にはエネルギー吸収量が静的エネルギー吸収量と同程度に達しており、耐衝撃能が限界に近いことを示している。P-0.5-3の場合は70%前後でPC鋼材の緊張率低

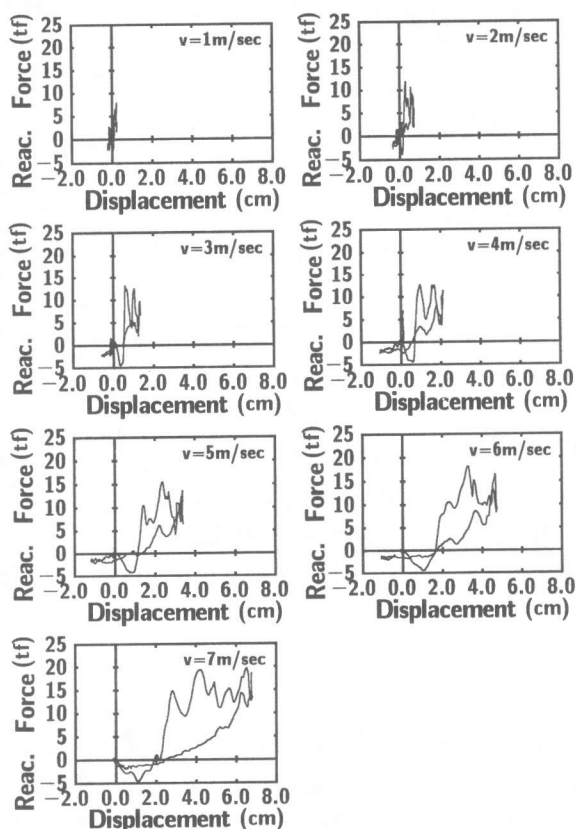


図-3 全支点反力-載荷点変位曲線の例 (P-1.0-3)

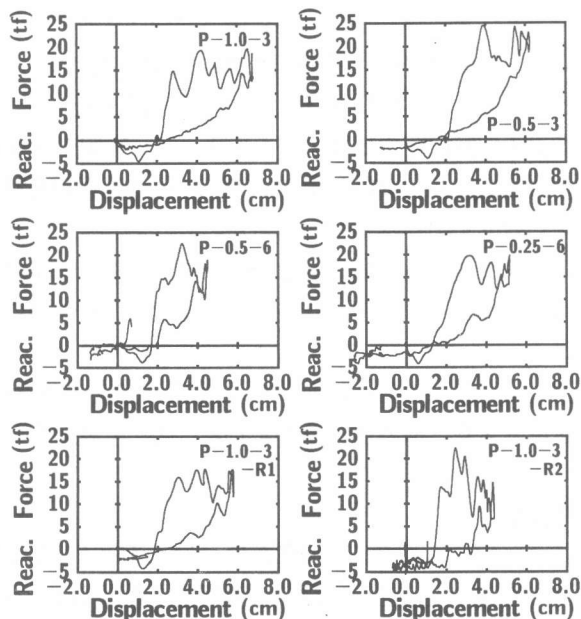


図-4 7 m/sec 載荷時の全支点反力-載荷点変位曲線

減による効果が示されている。P-1.0-3-R1, -R2 の場合は異形鉄筋量に対応してエネルギー吸収比率が低下しており、異形鉄筋量のエネルギー吸収比率低減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 のエネルギー吸収比率が最も小さく、耐衝撃性に優れていることがわかる。

以上、繰り返し衝撃荷重載荷実験結果より、PC 鋼材の許容緊張力を有効に利用して断面設計する従来の方法に比較し、ひびわれ制御のため下端に異形鉄筋を配置して PRC 梁にすることや、PC 鋼材の緊張率を 50 % 程度に低減すること、あるいは PC 鋼材数を増やすことによって、PC 梁の耐衝撃性は飛躍的に向上することが明らかになった。

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 種類の矩形 PRC 梁を用いた実験を行った。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置して PRC 梁とすることにより、エネルギー吸収能を向上させることができる。3) PC 鋼材の全緊張力を一定とし、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。

衝撃荷重載荷実験結果より、PRC 梁の耐衝撃性能は、静載荷時のエネルギー吸収容量の大きさに対応していることが明らかになった。

本研究で用いた PRC 梁は全て上端コンクリートの圧壊で終局に至った。今後、T 形梁などを用い、梁上端部圧壊で終局に至らない場合についても検討を行う予定である。

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亀石暁君と吉川卓君に多大なる御支援を頂きました。記して謝意を表すものであります。

参考文献

- [1] 佐藤弘史, 今野久志, 長尾彰洋, 若林 修：構造形式の異なるロックシェッド模型の衝撃載荷実験, 第 3 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.191-196, 1996.6
- [2] コンクリート標準示方書, 設計編, 平成 8 年度制定, 土木学会

表－ 3 載荷速度 $V=7\text{m/sec}$ における
エネルギー吸収量

試験体名	① $V=7\text{m/sec}$ 時のエネルギー 吸収量 (tf·cm)	② 静載荷時の エネルギー 吸収量 (tf·cm)	エネルギー 吸収比率 ① / ②
P-1.0-3	33.55	31.05	1.08
P-0.5-3	33.53	46.24	0.73
P-0.5-6	20.48	81.05	0.23
P-0.25-6	28.28	59.54	0.47
P-1.0-3-R1	30.18	44.65	0.68
P-1.0-3-R2	28.60	66.95	0.43