

V-30 各種 PRC 梁の重錘落下衝撃実験

室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光
開発土木研究所	正 員	佐 藤 昌 志
ドービー建設工業(株)	正 員	竹 本 伸 一
ドービー建設工業(株)	正 員	森 哲 哉
室蘭工業大学	学生員	吉 川 卓

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 I 型構造が一般的である。本覆工は品質管理もよく、工期の短縮も可能であることより、今後ますます需要が増えるものと予想される。一方、平成元年には一般国道 305 号線福井県越前海岸における岩盤崩落によって PC 覆工が倒壊され、本年 2 月には一般国道 229 号北海道豊浜トンネル上の岩盤崩落によって、トンネルやトンネル巻き出し部(覆工)が破壊された。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り、設計荷重の見直しを迫られる箇所が今後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成部材の断面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、建設省は、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 型覆工を提案し研究を行っている。著者等も、通常の PC 部材の設計が降伏応力度の 80 % 程度の有効プレストレス量を導入することを前提としていることより、残存耐力が小さく、従って終局の吸収エネルギー量が小さくなることに着目し、PC 鋼材の緊張率を小さく、残存耐力や吸収エネルギーを増大させることの数値解析的検討を行なっている。落石覆工のように死荷重による断面力比率が 0.2 ~ 0.3 程度と衝撃荷重によるそれに比して小さく、かつ前述のように落石荷重の不確実性が大きい場合には、従来からの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り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) 覆工の部材設計法を研究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場合の重錘落下衝撃実験を行った。本実験では、幅 20 cm、桁高 30 cm、全長 3.5 m の共通断面梁に対し、PC 鋼材の緊張率や補強筋量の異なる 6 種類の PRC 梁を製作し、300 kgf の重錘を初期速度を 1 m/sec とし 1 m/sec 刻みで梁が破壊に至るまで载荷速度を増加させる形で行った。

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。

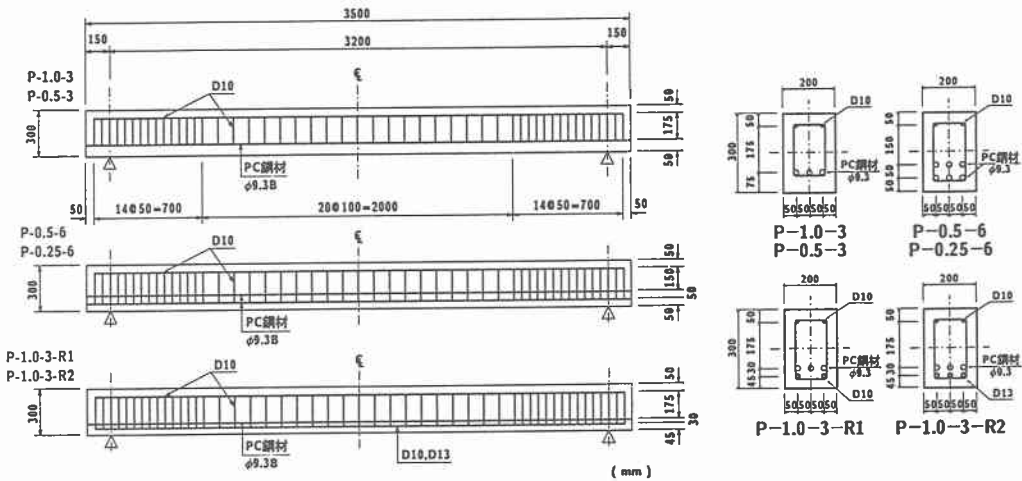
本実験に用いた試験体の一覧を表-1 に示している。試験体数は PC 鋼材の有効緊張率 (以下、単に緊張率と呼ぶ)、PC 鋼材本数、ひびわれ制御用異形鉄筋本数をパラメータにとった全 6 体である。なお、PC 鋼材の緊張率 (使用状態における許容緊張力 5.88 tf に対する) はラウンドナンバーで表し、補強筋量 D10×2、D13×3 をそれぞれ R1、R2 としている。表-1 の右端には、上述の物性値を考慮し、断面分割法を用いて算定した初期の上下縁歪値および、スパン長 3.2 m 中央点載荷時の終局曲げ耐力値を示している。本解析

Impact Test on Various Type of PRC Beams by Weight Falling
by Norimitsu KISHI, Masashi SATO, Shin-ichi TAKEMOTO, Tetsuya MORI and Taku YOSHIKAWA

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)	初期上 縁歪(μ)	初期下 縁歪(μ)	終局曲げ 耐力 (tf)
P-1.0-3	1.0	3	-	5.43	16.28	26	-132	6.74
P-0.5-3	0.5	3	-	2.61	7.82	13	-63	6.79
P-0.5-6	0.5	6	-	2.78	16.70	26	-133	12.50
P-0.25-6	0.25	6	-	1.34	7.98	13	-63	12.42
P-1.0-3-R1	1.0	3	D10×2	5.44	16.34	25	-129	8.05
P-1.0-3-R2	1.0	3	D13×3	5.46	16.46	24	-126	10.00

使用状態における許容緊張力：5.88 tf



図－１ 試験体の配筋図

では、土木学会コンクリート標準示方書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モーメント－曲率関係を求めている。

図－１ に試験体の配筋図を示している。コンクリートは実験時の平均圧縮強度が 663 kgf/cm^2 、弾性係数が $3.27 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 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。衝撃荷重は円柱状のロードセル付鋼型重錘（載荷点部直径 20 cm、重量 300 kgf）を所定の高さにセットし、梁中央部に自由落下させて載荷した。支点は供試体端面から 15 cm の位置で梁の上下を支点反力測定用ロードセルを介し鋼製のピンを用いて単純支持した。載荷実験は載荷速度 1 m/sec 刻みで破壊するまで行い、重錘と支点到に設置したロードセル出力としての重錘衝撃力、支点反力、たわみを測定し、各載荷速度毎にひびわれ状況を観察している。なお、梁の破壊の基準として、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載荷点部上縁が圧壊し、コンクリートが剝離した状態となったため、この時点を経済段階とした。

なお、実験結果と考察のために断面分割法を用いて荷重-変位曲線を求めた。図-2 にその結果を示す。
 なお、変位は半スパンを 10 分割し曲率の線形変化を仮定して算出している。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力、全支点反力、載荷点変位の時間的な挙動性状

図-3 には、代表的な 4 つの PRC 梁 (P-1.0-3、P-0.5-3、P-0.5-6、P-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、Reac. Force、Disp. で表示) の載荷速度 1、3、5、7 m/sec における時系列分布を示している。図中、P-1.0-3-R1 の載荷速度 5 m/sec における載荷点変位はコンクリート破片の飛散により測定不可能になったため、隣近する測点の波形で代用している。図より、各波形は緊張率、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

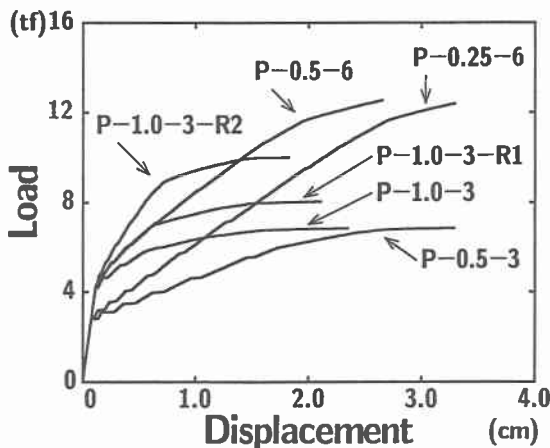


図-2 断面分割法を用いた荷重-変位曲線

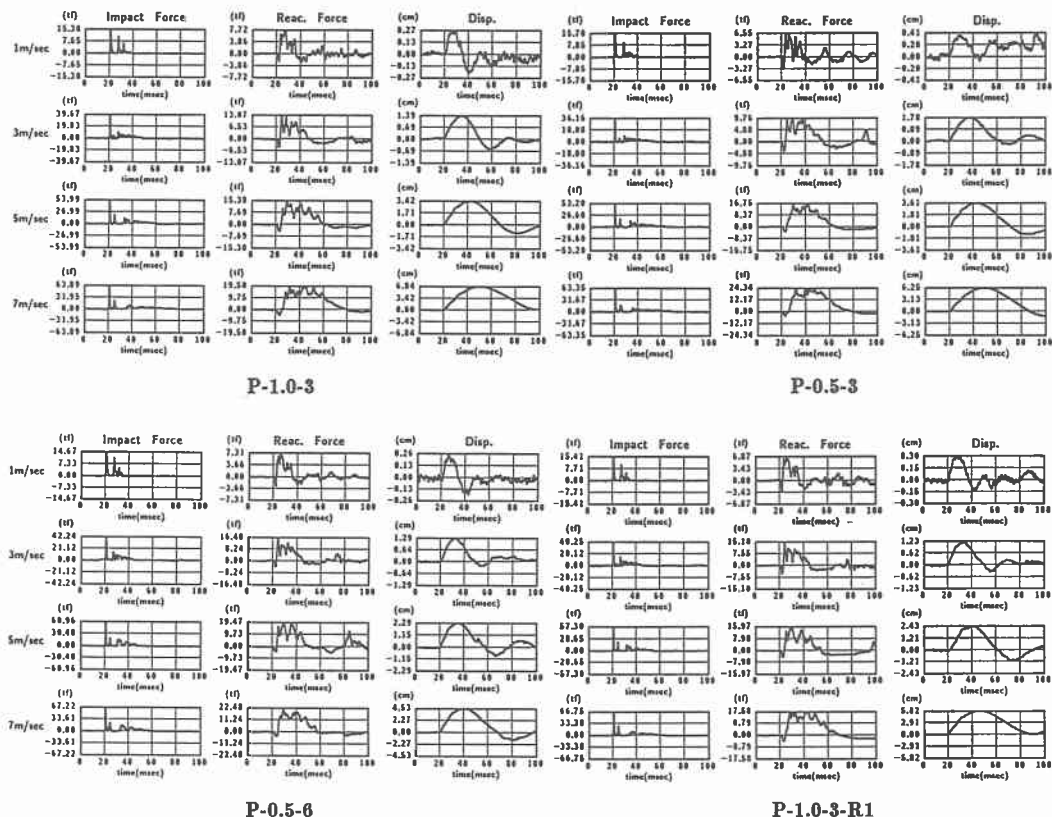


図-3 出力波形の一例

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

重錘衝撃力波形は、いずれの梁の場合も載荷速度が 1 m/sec の場合には、15 msec 程度の間に 3 波の独立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、載荷速度が 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。

(2) 全支点力波形

全支点力波形に関しては、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いることがわかる。

表-2 には概略的な全支点反力の主波動継続時間を一覧にして示している。載荷速度が 1 m/sec の場合には緊張率、鋼材量等によらず 4 試験体とも類似の値を示していることより、いずれの梁も弾性状態の応答を示しているものと考えられる。

その後、P-1.0-3、P-0.5-6、P-1.0-3-R1 は載荷速度 5 m/sec まで類似の継続時間を示している。これより、この時点までこれら 3 梁は類似の剛性を有しているものと推察される。載荷速度が 7 m/sec の場合には、継続時間が P-0.5-6、P-1.0-3-R1、P-1.0-3 の順に長く示されており、この順序で塑性の程度が進行しているものと判断される。このような結果は図-2 の断面分割法による荷重-変位曲線の結果と符合している。すなわち、荷重-変位曲線において、衝撃力の小さい段階では 3 梁とも同一の剛性を有し、衝撃荷重の増大とともに、P-0.5-6、P-1.0-3-R1、P-1.0-3 の順に剛性が低下していることがわかる。

P-1.0-3 と P-0.5-3 の継続時間を比較すると、載荷速度が 3、5 m/sec の場合には、P-0.5-3 の継続時間が P-1.0-3 より長く示されている。しかしながら、載荷速度が 7 m/sec の場合には両者類似の継続時間を示している。これは、図-2 の断面分割法による荷重-変位曲線からも推察できるように、載荷速度が 3、5 m/sec の場合には緊張率の大きい P-1.0-3 が高い剛性を示している。最終載荷速度である 7 m/sec の場合には両者の耐力が類似しており、繰返し載荷実験であることより載荷前の残留変位状態を基準とした割線剛性で評価するものとすれば、両者類似の剛性を示すためと考えられる。

(3) 載荷点変位波形

載荷点変位波形に関しては、前述の全支点反力波形と同様の性状を示している。主波動の継続時間を一覧にして示すと表-3 のように示される。表-2 の全支点反力波形の主波動継続時間と比較すると、載荷速度が 3 m/sec 以降は 6 ～ 10 msec 以上長い継続時間を示し、より顕著な特性を示しているものと考えられる。

3.2 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、全支点反力と載荷点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-4 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

表-2 全支点反力の主波動継続時間 (msec)

試験体名	載荷速度			
	1 m/sec	3 m/sec	5 m/sec	7 m/sec
P-1.0-3	14.0	22.8	34.0	51.0
P-0.5-3	15.7	31.4	40.0	50.0
P-0.5-6	14.0	20.0	28.6	32.9
P-1.0-3-R1	14.3	21.4	30.0	44.2

表-3 載荷点変位の主波動継続時間 (msec)

試験体名	載荷速度			
	1 m/sec	3 m/sec	5 m/sec	7 m/sec
P-1.0-3	14.3	28.6	45.7	74.3
P-0.5-3	21.4	41.4	48.6	64.3
P-0.5-6	12.9	27.1	37.1	47.1
P-1.0-3-R1	17.1	28.6	38.6	71.4

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) 図- 3 に示されているように、全支点反力波形と変位波形は類似なものとなっており、静的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、全支点反力波形を用いることとした。

図- 4 より、載荷速度が 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- 5 には載荷速度 7 m/sec における各梁の全支点反力-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- 5 には正荷重状態（第一象限）のエネルギー吸収量と、静載荷実験におけるエネルギー吸収率（スパン長が 3 m）および両者の比を示している。表より、P-1.0-3 は既に静的エネルギー吸収量と同程度に達している。

表- 5 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 静的載荷時 のエネルギー 吸収量 (tf·cm)	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

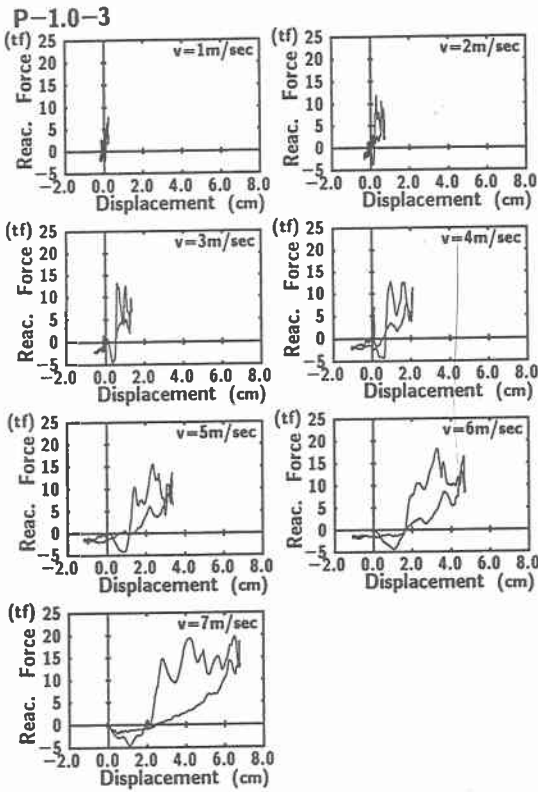


図- 4 全支点反力-載荷点変位曲線の一例

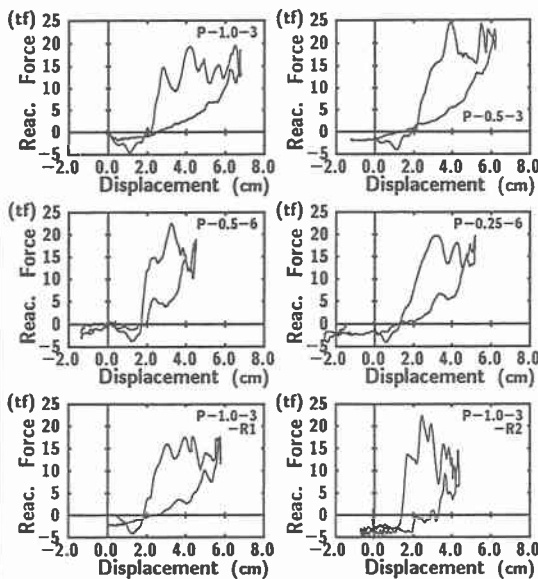


図- 5 7 m/sec 載荷時の全支点反力
-載荷点変位曲線

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率が低下しており、異形鉄筋量のエネルギー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 の梁が最もエネルギー吸収比率が小さく、耐衝撃性に優れていることがわかる。

以上、繰り返し衝撃載荷実験結果より、ひびわれ制御のため下端筋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 % 程度に小さくすること、あるいは PC 鋼材数を増やすことにより、現状の設計手法に基づいた PC 梁よりも、耐衝撃性が向上することが明かになった。

4. まとめ

耐衝撃性に優れた PC (PRC) 製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耐衝撃性やエネルギー吸収量に着目して 300 kgf の重錘を用いた自由落下による繰り返し載荷実験を行った。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。
- (3) ひびわれ制御のために異形鉄筋を配置し 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 鋼材数を増やすことにより、エネルギー吸収率を低下させ、耐衝撃性を向上させることができる。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 横山公一、大塚久哲、金子学：衝撃荷重を受ける PC・RC 桁の破壊時挙動と変位照査法について、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1543 - 1551、1992。
- 3) 菅田紀之、佐藤昌志、西弘明、岸徳光：緩衝材を設置した実大 PC 覆工の衝撃応答性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.949 - 954、1994.6。
- 4) 佐藤昌志、岸徳光、三上隆、西弘明：落石覆工用実大 PC 桁の衝撃破壊実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.943 - 948、1994.6。
- 5) 岸徳光、佐藤昌志、西弘明、三上浩、竹本伸一：落石覆工用 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。