

V-29 PRC 梁の静的耐荷性状に関する実験的研究

ドービー建設工業(株) 正員 竹本 伸一
 開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 三井建設(株) 正員 三上 浩
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一

1. はじめに

落石覆工構造物の多くは RC 製あるいは PC 製である。前者は現場施工型で、12 m を 1 ブロックとし谷(海側)を柱形式あるいは窓形式にするラーメン構造である。後者は工場製作した構成部材を現場で組み立てる工法で、現在は 2 ヒンジ 1 剛結接合逆 L 型構造が一般的である。PC 製は、将来の労働者不足の解消や工期短縮を計る手段としてますます需要が増えるものと予想される。

一方、平成元年の一般国道 305 号線福井県越前海岸における岩盤崩壊による PC 製覆工の倒壊事故を機に、PC / RC 部材の耐衝撃性や覆工構造物の合理的設計手法開発に関する数値解析的、実験的研究が盛んに行われるようになった。

PC 部材に限定すると、建設省では 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 製覆工に関する研究を行っている^{1),2)}。著者等も、実規模の 5 連から成る PC 製覆工模型を用い、緩衝材の開発やその性能評価を含めた設計レベルの重錘落下実験を行っている^{3),4)}。また、通常の PC 部材はその設計が降伏応力の 80 % 以上のプレストレスを導入することを前提としていることより、残存耐力が小さく、従って終局吸収エネルギー量が小さいことに着目して、PC 鋼材の緊張率を小さくすることにより、残存耐力や吸収エネルギー量を増大させることに関する数値解析的検討も行っている⁵⁾。特に、落石覆工のように死荷重による断面力比率が 0.2 ~ 0.3 程度と衝撃荷重のそれに比して小さく、かつ衝撃荷重の不確定性が大きい場合には、エネルギー論的な考え方を考慮した設計がよいものと判断される。

このような観点より、本研究では耐衝撃性に優れた PC 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静的耐荷性状およびエネルギー吸収量について実験的に検討を行った。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、衝撃実験と同一の中央点載荷による静的実験を行った。

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が 5.88 tf となっている。

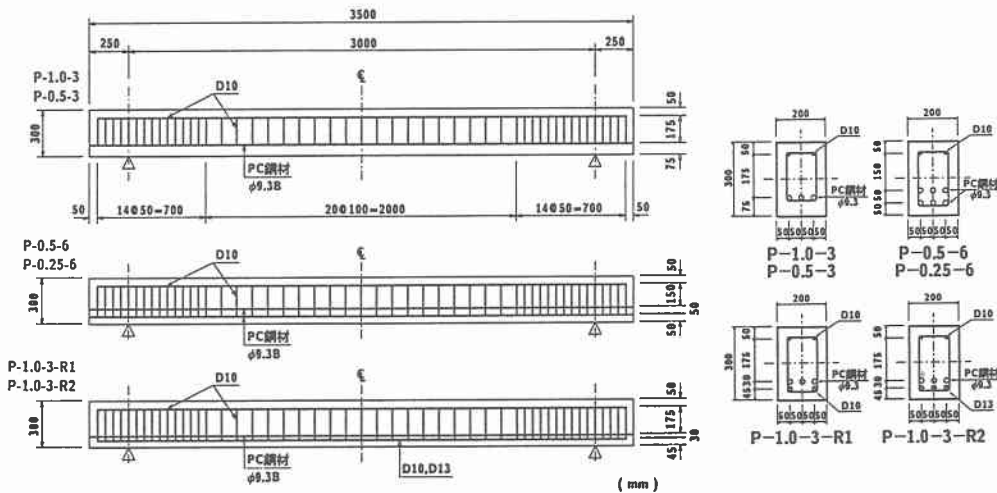
本実験に用いた試験体の一覧を表-1に示している。試験体数は PC 鋼材の有効緊張率 (以下、単に緊張率と呼ぶ)、PC 鋼材本数、ひびわれ制御用異形鉄筋本数をパラメータにとった全 6 体である。

表中の試験体名は、PC 鋼材の緊張率、PC 鋼材の本

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

使用状態における許容緊張力 : 5.88 tf



図－１ 試験体配筋図

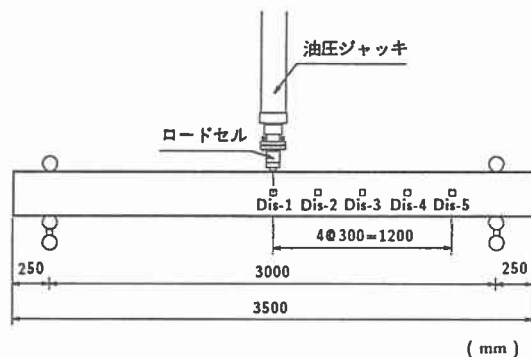
表－２ 断面分割法を用いた計算結果

試験体名	P-1.0-3	P-0.5-3	P-0.5-6	P-0.25-6	P-1.0-3-R1	P-1.0-3-R2
総緊張力 (tf)	16.28	7.82	16.70	7.98	16.34	16.46
初期上縁ひずみ (μ)	26	13	26	13	25	24
初期下縁ひずみ (μ)	-132	-63	-133	-63	-129	-126
下縁コンクリート ひびわれ発生時の荷重 (tf)	4.44	2.93	4.56	3.05	4.51	4.56
下縁鋼材 降伏時の荷重 (tf)	6.19	6.28	11.29	11.05	6.60	8.59
終局時荷重 (tf)	7.19	7.24	13.33	13.25	8.59	10.67

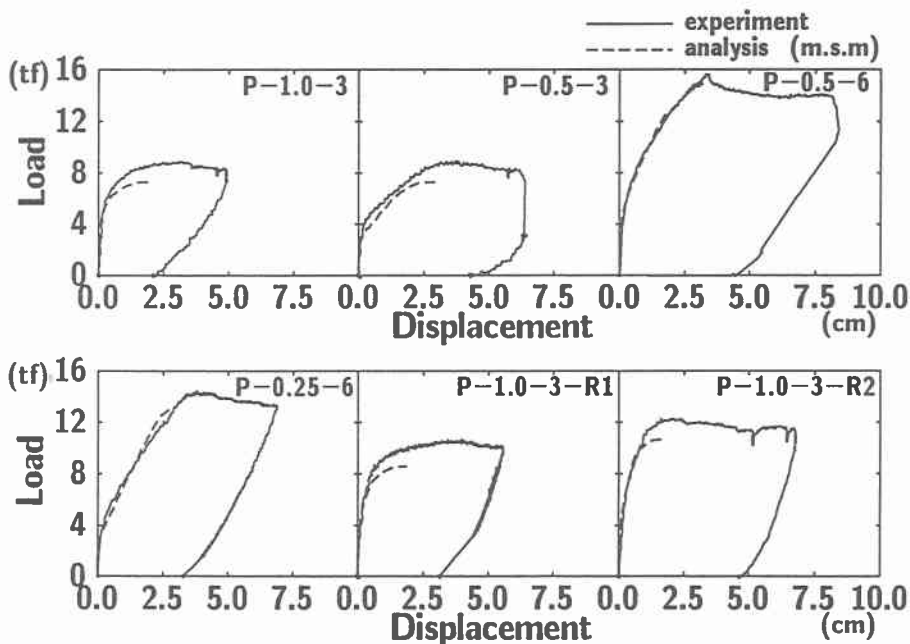
数、異形鉄筋本数の順にハイフンで結び記号化している。なお、PC 鋼材の緊張率（使用状態における許容緊張力 5.88 tf に対する）はラウンドナンバーで表し、異形鉄筋本数 D10 × 2、D13 × 3 をそれぞれ R1、R2 としている。

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。なお実験はコンクリート打設後 37 ～ 46 日経過後に行っている。表－２ には、上述の物性値を考慮し、断面分割法を用いて初期の上下縁歪および各荷重

段階の荷重を一覧にして示している。なお、断面方向の分割数は 60 とし、コンクリート、異形鉄筋、PC 鋼材の応力－歪関係は土木学会コンクリート標準示方書に基づいて評価している。図－２ に実験概要図を示している。試験体は、純スパンを 3.0 m としている。また、測定項目は、載荷荷重の他、半スパンの 5 等分点に設置した測定範囲が 20 cm のレーザ式変位計から得られた変位である。また、実験終了後にひびわれ状態も記録している。



図－２ 実験概要図



図－３ 荷重－変位曲線

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果と断面分割法による解析結果の比較

図－３ に実験結果より求めた荷重－載荷点変位曲線を断面分割法による解析結果と比較して示している。なお、断面分割法による載荷点の変位は半スパンを 10 分割し、曲率の線形変化を仮定して算定している。図より、1) いずれの試験体に関しても、実験結果の最大変位は解析結果よりも大きく示されている、2) P-0.5-3 の場合には、第 2 勾配が両者類似なものとなっているものの、実験結果は解析結果より全体的に大

きく示されている、3) その他の試験体に関しては、ひびわれ発生後の下端鋼材の降伏点近傍まで両者類似の分布曲線を示している。その後、実験値が解析値より若干大きく示されていること、等がわかる。

表－３ には、図－３ に示されている実験結果の荷重－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})、下端鋼材の降伏時の荷重 (P_y)、終局荷重 (P_u) および最大荷重発生時の載荷点変位 (δ_u) を解析結果と比較して示している。表中 () は解析値に対する実験値の割合を示している。表より、実験値の P_{cr} 、 P_y 、 P_u は最大でも 20 % 程度、 δ_u は最大 60 % 前後解析値より大きな値を示していることがわかる。以上より、この種の梁においても断面分割法は、最大荷重載荷時の載荷点変位を除き安全側で各レベルの荷重を推定できることが明かになった。

表－３ 実験値と計算結果の比較

試験体名	断面分割法の結果				実験結果			
	P_{cr} (tf)	P_y (tf)	P_u (tf)	δ_u (cm)	P_{cr} (tf)	P_y (tf)	P_u (tf)	δ_u (cm)
P-1.0-3	4.44	6.19	7.19	2.06	4.80 (1.08)	6.77 (1.09)	8.80 (1.22)	3.23 (1.57)
P-0.5-3	2.93	6.28	7.24	2.89	3.52 (1.20)	7.25 (1.15)	8.74 (1.21)	3.75 (1.30)
P-0.5-6	4.56	11.29	13.33	2.33	5.01 (1.10)	12.80 (1.13)	15.47 (1.16)	3.35 (1.44)
P-0.25-6	3.05	11.05	13.25	2.90	3.73 (1.22)	11.68 (1.06)	14.19 (1.07)	4.00 (1.38)
P-1.0-3-R1	4.51	6.60	8.59	1.85	5.54 (1.22)	7.57 (1.15)	10.40 (1.21)	3.85 (1.35)
P-1.0-3-R2	4.56	8.59	10.67	1.60	5.33 (1.17)	10.13 (1.18)	11.09 (1.04)	2.10 (1.31)

() : 実験結果 / 断面分割法による結果

3.2 各梁の耐力および エネルギー吸収能に関する比較検討

表－４には実験結果で得られた P_{α} 、 P_y 、 P_u およびエネルギー吸収量 E 、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_u 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 の値を基準に無次元化した値を () で示している。以下、各組合わせごとに考察を行う。

(1) P-1.0-3、P-0.5-3、の比較 (図－４(a))

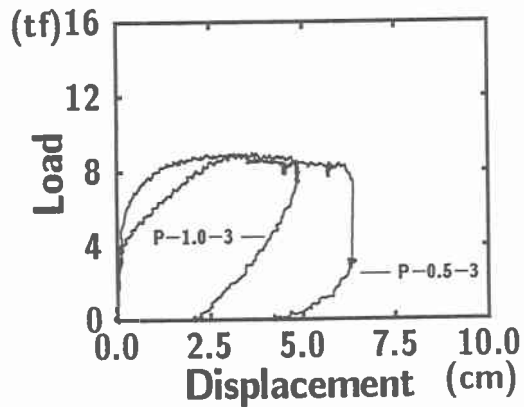
P-0.5-3 の場合には緊張率を 50 % としていることより、 P_{α} が 70 % 程度に低減するものの、 P_u は両者ほぼ等しく、エネルギー吸収量は逆に 1.5 倍の大きさになっている。なお、実験結果のエネルギー吸収量の増加割合は解析結果より 25 % 程度大きく示されている。これより、PC 鋼材量が同一の場合には、緊張率を低減することによって、 P_u を同程度に保ちつつエネルギー吸収量を増加させることが可能であることがわかる。また、実 RC 覆工の場合における死荷重の全荷重に対する断面力の比率が 0.2 ～ 0.3 程度であることより、緊張率が 50 % 程度の場合には、死荷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

(2) P-1.0-3、P-1.0-3-R1、 P-1.0-3-R2、の比較 (図－４(b))

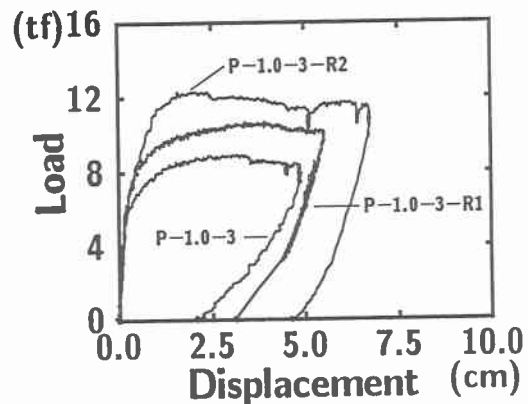
P-1.0-3-R1、-R2 の PC 鋼材を鉄筋に換算した鋼材比はそれぞれ 1.68 %、2.15 % である。この程度の異形鉄筋を下縁に配置することにより、P-1.0-3 に対して P_{α} は 15 % 程度、また P_u は 18 ～ 26 % 程度向上している。一方、エネルギー吸収量に関しては、解析結果では数 % 程度向上するのみであるが、実験結果では 44 %、116 % と鉄筋量の増加に対応して大きく示されている。これより、下縁に異形鉄筋を配置し PRC 梁にすることにより、 P_u は勿論のことエネルギー吸収能も明らかに向上することがわかる。また、P-0.5-3 も考慮にいれて比較すると、解析的には P-0.5-3 は P-1.0-3-R1、-R2 よりもエネルギー吸収量が大きく示されている。一方、実験的には 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いえば、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。

表－４ 実験結果の比較

試験体名	実験結果				解析結果
	P_{α} (tf)	P_y (tf)	P_u (tf)	E (tf-cm)	E_u (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)



(a)

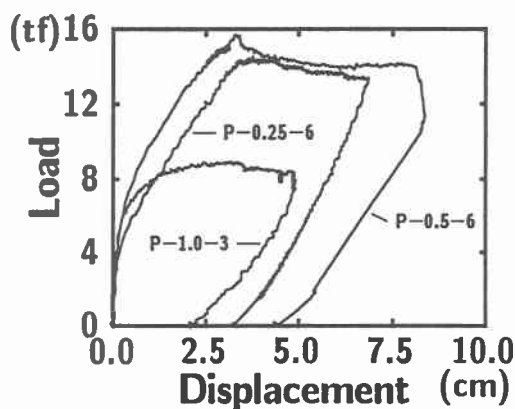


(b)

図－４ 荷重－変位曲線の比較

(3) P-1.0-3、P-0.5-6、
P-0.25-6、の比較 (図-4(c))

まず、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_u がほぼ等しいが、 P_y 、 P_u がそれぞれ 90 %、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 2 倍前後の値となっている。これより、全緊張力を一定にし、緊張率を 50 % にして鋼材量を 2 倍にすることにより、全耐力、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



(c)

図-4 荷重-変位曲線の比較

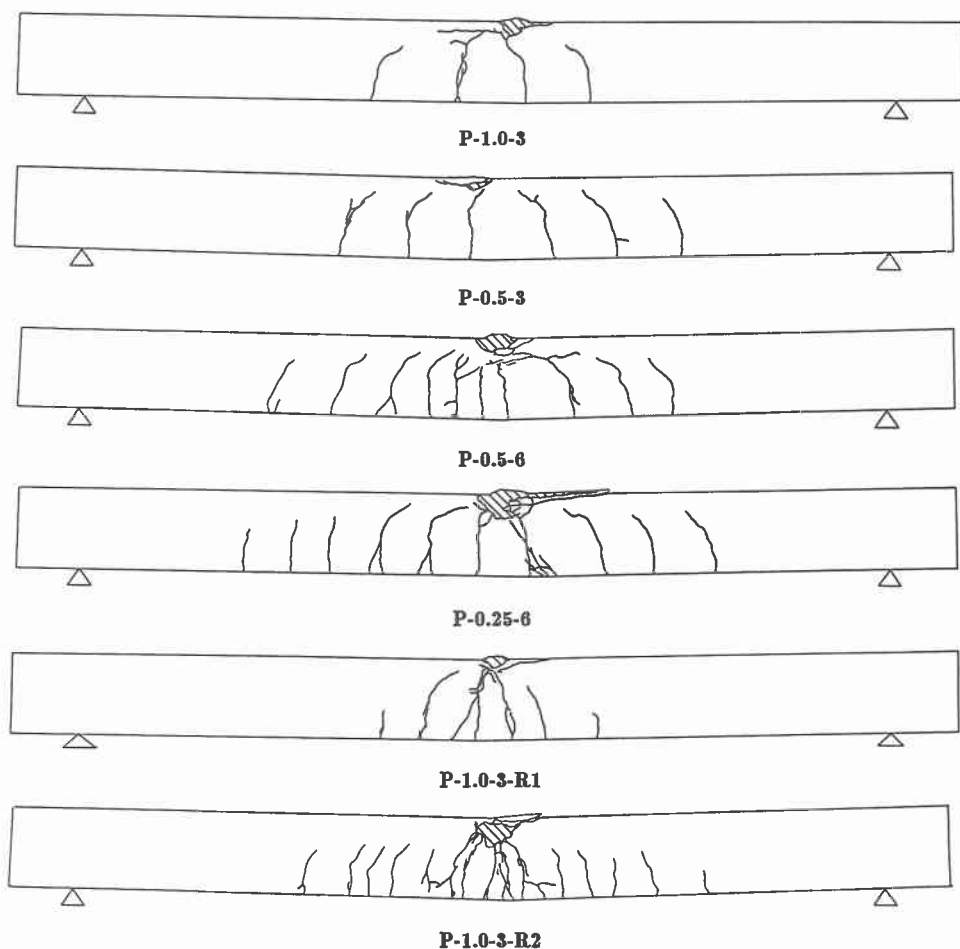


図-5 ひびわれ状況

増加率が小さい。これは、P-0.25-6 の場合は、1 本あたりの導入プレストレス量が少ないことより、初期の段階より変形量が大きく、上段に配置された PC 鋼材が十分にエネルギー吸収に寄与しない状態で上縁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 鋼材が効率的にエネルギー吸収に寄与していない状態で上縁部圧壊により終局に至ったためと考えられる。

3.3 ひびわれ状況

図-5 に実験終了後のひびわれ図を一覧にして示している。いずれの梁も、下縁に曲げひびわれ発生後、載荷点部の圧壊により破壊に至った状況が示されている。P-1.0-3、P-1.0-3-R1、-R2 を比較すると、下端に異形鉄筋を配置していない P-1.0-3 のひびわれ本数が最も少なく、-R1、-R2 の順に多く示されている。特に -R2 の場合は、ひびわれの分散、発生領域も改善されており、鋼材比の増加によってその効果が明確に示されていることがわかる。P-1.0-3、P-0.5-3、P-0.25-6 を比較すると、緊張率が小さくなるに従ひひびわれ発生領域が拡大していることがわかる。これは、緊張力の低下とともに、ひびわれ発生時の荷重が小さくなることに対応している。P-0.5-3 と P-0.5-6 を比較すると、-6 の方が若干ひびわれの分散性が改善されているようである。一般にエネルギー吸収量を増加させるためには、ひびわれをできるだけ広い領域に分散分布させ、かつ梁全体の剛性を同程度に低減させることが重要であると考えられる。この考え方に従えば、P-0.5-6、P-0.25-6、P-1.0-3-R2、P-0.5-3 が他に比較してひびわれの分散性もよく、エネルギー吸収量も大きいものと判断される。この結果は前項で考察した結果とよく対応していることがわかる。

4. まとめ

耐衝撃性に優れた PC 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静的耐荷性状やエネルギー吸収量に着目して実験を行った。本研究で得られた結果を要約すると

- (1) 断面分割法を用いた解析結果は、各段階での荷重レベルを安全側で推定できる。
- (2) 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、耐力を同程度に保ちつつエネルギー吸収量を増加することができる。
- (3) 梁下縁に異形鉄筋を配置し PRC 梁とすることにより、エネルギー吸収能を向上することができる。
- (4) 全緊張力を一定とし、緊張率を 50 % にして鋼材量を 2 倍にすることにより全耐力、エネルギー吸収能ともに飛躍的に向上する。
- (5) 従って緊張率を 50 % 程度に低減させ、かつひびわれ制御用の異形鉄筋を下端に配置することにより耐力、エネルギー吸収量とも格段に向上させることが可能なものと判断される。
- (6) 実験終了後のひびわれの分布状況はエネルギー吸収量の大小によく対応している。

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。