

重錘落下衝撃を受ける PRC 梁の耐荷性状に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPACT RESISTANT BEHAVIOR OF PRC
BEAMS UNDER WEIGHT FALLING

今野久志*, 池田憲二**, 竹本伸一***, 岸 徳光****

Hisashi KONNO, Kenji IKEDA, Shin-ichi TAKEMONO, and Norimitsu KISHI

- * 工修 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)
 ** 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)
 *** ドービー建設工業(株)北海道本店 技術部 (〒060-0001 札幌市中央区北1西6)
 **** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

キーワード: PRC 梁, 衝撃荷重, PC 製覆工, 落石
 (PRC beam, impact load, PC Rock-shed, falling rock)

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路には落石による災害から人命を守るため, また道路交通の安全を確保するために落石覆工が建設されている。現在落石覆工として, 鉄筋コンクリート製 (RC), プレストレストコンクリート製 (PC), 鋼製が施工されている。その中で落石規模が比較的小さい場合には鋼製覆工が, 落石規模が大きい場合には RC あるいは PC 覆工が用いられる場合が多い。特に PC 覆工は工場内で品質管理されて製作されたプレキャスト部材を現地で組み立てることによって施工されることから, 労働者不足への対応や工期短縮が可能であることより, 今後需要が増加するものと予想される。

一方, PC 覆工は RC 覆工に比較し施工性には優れているものの, プレストレスの影響により靱性能は劣るとされており, RC 構造と PC 構造の両者の特徴を利用した PRC 製覆工 (PC 構造形式の主桁部材にひび割れ制御用の異形鉄筋を配筋した構造) に関する研究も行われている¹⁾。PC 覆工の安全性の向上や大規模落石への対応を考慮すると, PC 主桁部材の残存耐力や終局までの吸収エネルギー量を可能な限り大きくすることが重要と考えられる。現行の PC 覆工部材は, PC 鋼材の降伏応力の 80% 程度のプレストレスを導入することを前提として設

計されているが, PC 覆工の自重による断面力が衝撃荷重を含む全断面力の 20 ~ 30% であることを考慮すると, PC 鋼材の緊張率を低減すること, あるいは PC 鋼材量を低減してひび割れ制御用の異形鉄筋量を増加させることによって残存耐力や吸収エネルギー量を増加させることが可能であるものと考えられる。筆者らのこれまでの研究成果より^{2),3)}, 1) 曲げ圧縮破壊型の矩形断面 PRC 桁の場合には, ひび割れ制御用の異形鉄筋を配筋することや PC 鋼材の緊張率を 50% 程度に低減することによりエネルギー吸収能を大きくすることが可能となり, 耐衝撃性を向上できること; 2) 曲げ引張破壊型の T 型断面 PRC 桁においては, PC 鋼材の緊張率を低減させることで飛躍的に耐衝撃性を向上させることはできず, 異形鉄筋を配筋すること, または PC 鋼材量を増加させることで耐衝撃性の向上が期待できること, 等が明らかとなっている。しかしながら, これらの研究成果は小型供試体を用いたものであり, 大型模型等で実証的に確認されたものではない。

このような観点から, 著者らは上記小型模型を用いた実験結果を基に, PRC 部材の実覆工への適用性を検討することを目的として, 全長が 7 m, 桁高 90 cm, フランジ幅 1.2 m で PC 鋼材の緊張率, 鋼材量, 異形鉄筋量を変化させた実規模 PRC 桁を製

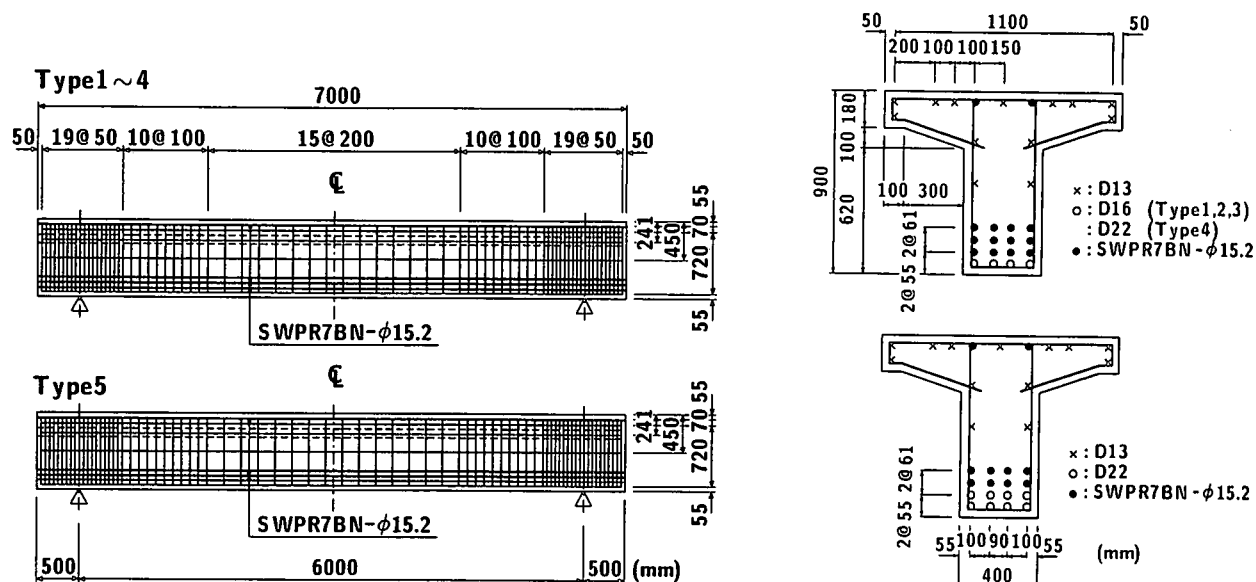


図-1 試験体の形状寸法および配筋図

表-1 試験体の一覧

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 (kN/本)	総プレストレス 力量 (kN)	換算 鋼材比
Type1 : P1.0×14 - D16×4	100	14	D16×4	133.4	1867.6	0.0157
Type2 : P0.5×14 - D16×4	50	14	D16×4	67.7	947.8	0.0157
Type3 : P0.25×14 - D16×4	25	14	D16×4	33.3	466.2	0.0157
Type4 : P1.0×14 - D22×4	100	14	D22×4	133.4	1867.6	0.0174
Type5 : P1.0×10 - D22×8	100	10	D22×8	133.4	1334.0	0.0156

作り、3 ton の重錘を用いた重錘落下衝撃実験を行い、各試験体の耐衝撃性を実験的に検討をした。

2. 実験の概要

2.1. 試験体

実験に使用した試験体は、全長7 m、桁高90 cm、フランジ幅1.2 m、ウェブ幅40 cmのプレテンション方式で製作した単純T型断面のPRC桁である。図-1に試験体の形状寸法および配筋図を示す。用いた緊張材は、SWPR7BN-φ15.2（公称断面積138.7 mm²）である。試験体下縁の軸方向異形鉄筋はSD345-D16またはD22であり、圧縮側鉄筋およびスターラップにはD13を使用している。また、実験に用いたコンクリートの設計基準強度は58.8 MPa、実験時の平均圧縮強度は70.8 MPa、弾性係数が35.3 GPaであり、ポアソン比は0.22である。

表-1には試験体の一覧を示している。試験体はPC鋼材1本当たりの有効緊張率（以下、単に緊張

率と呼ぶ）、PC鋼材本数、ひび割れ制御用異形鉄筋本数をパラメータにとった全5体である。ここで、緊張率はPC鋼材1本当たりの有効緊張力が133.4 kNの場合を100%として整理している。

2.2. 実験方法

図-2に実験概要図を示している。試験体は、純スパンを6 mとし、両支点は試験体の跳ね上がり防止し、かつ回転を拘束しないように、鋼製の治具を用いてピン支持に近い構造としている。衝撃力は質量が3 ton、直径1 mの重錘を所定の高さから自由落下させることで与えている。また、桁の載荷点部には局部破壊を防止するために120 cm×120 cm、厚さ20 cmの敷砂を設置している。実験は、最初に落下高さ1 mからの実験を行い、その後高さを2.5 mから2.5 m刻みで桁が破壊に至るまで落下高さを増加させる繰り返し載荷方法により行った。

表-2に実験ケースの一覧を示している。表中の括弧付きの実験ケースは、試験体下縁コンクリート

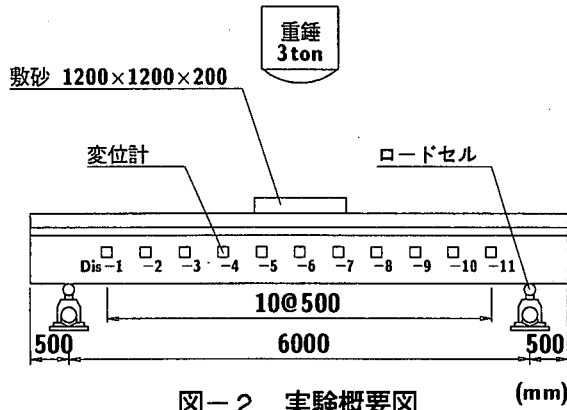


図-2 実験概要図

表-2 実験ケース

試験体名	落下高さ H (m)
Type 1	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0
Type 2	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, (15.0)
Type 3	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, (10.0)
Type 4	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, (12.5)
Type 5	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0

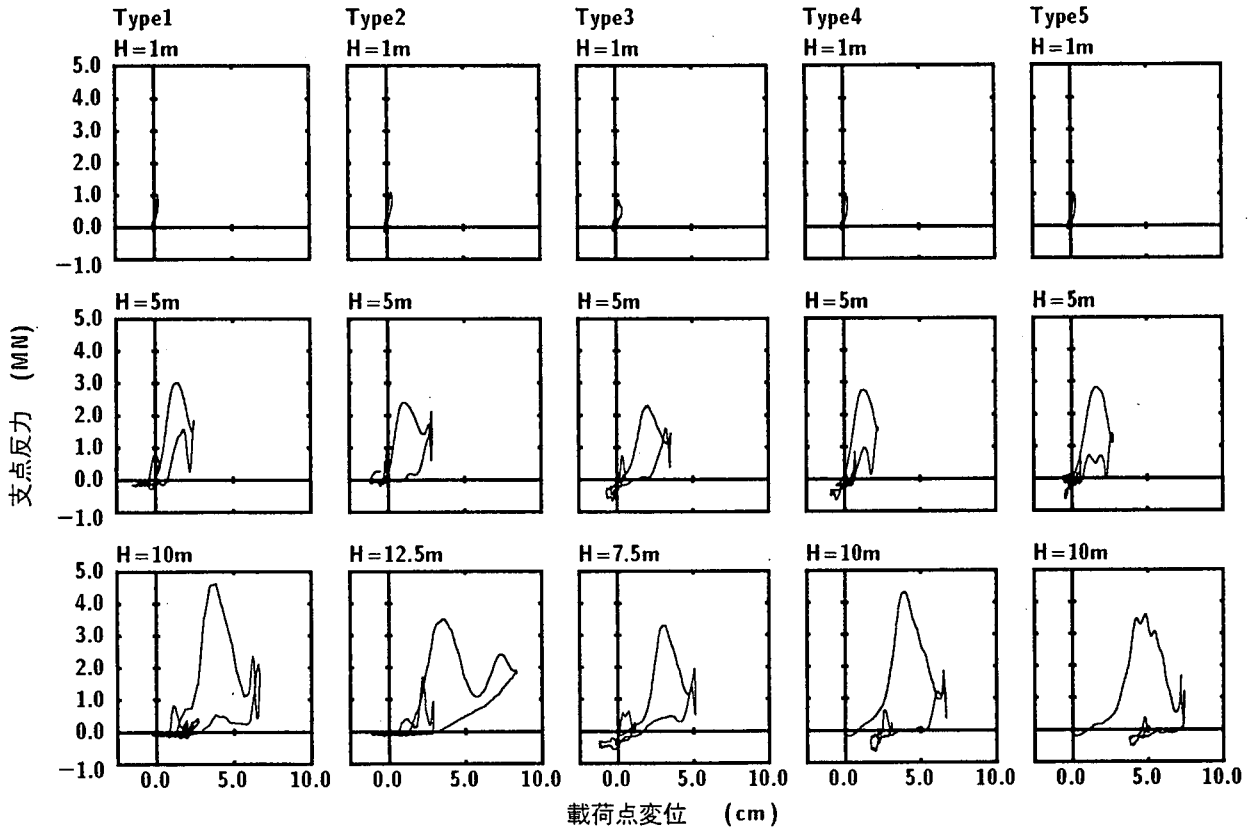


図-3 支反力-载荷点変位曲線

の剥落などの危険性から変位計を取り外して実験を行ったため変位が計測されていないことを意味している。

3. 実験結果と考察

3.1. 支反力-载荷点変位関係

衝撃荷重載荷時の各ケースの荷重-変位履歴特性および吸収エネルギー特性を検討するため、支反力と载荷点変位に関する履歴曲線を求めた。本来、入力エネルギーを議論する場合には、重錘より得られる衝撃力波形を用いなければならないものと考えられる。しかしながら、1) 重錘衝撃力波形は重錘

と敷砂および桁も含めた相互作用状態で発生し、波形が複雑で高周波成分を含む；2) 重錘衝撃力波形は支反力や载荷点変位波形と照らして、その形状、周期等が大きく異なっている；3) 支反力波形と载荷点変位波形の主波動が類似していることより、支反力波形を用いることによって、衝突体形状の差異等を含め、より一般化した形で荷重-変位履歴特性、エネルギー収支や衝撃耐力に関する議論が可能になるものと判断される。以上の理由から、本研究では荷重-変位履歴曲線のための入力荷重として支反力を用いることとした。

図-3は、繰り返し載荷実験における落下高さ H

表-3 吸収エネルギー量 (kJ)

試験体	落下高さ H (m)						
	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
Type1	0.7	8.5	31.8	53.2	99.0	-	-
Type2	1.5	12.0	37.2	30.3	57.1	110.5	*
Type3	2.0	9.2	32.1	53.5	*	-	-
Type4	1.4	10.7	31.1	58.5	98.4	*	-
Type5	1.7	12.2	33.9	65.1	97.0	-	-

* : 変位計測せず

= 1 m, 5 m および最終落下高さにおける支点反力一載荷点変位曲線を示している。ここで、最終落下高さにおいて変位を測定していない試験体については、その1段階前の落下時の結果を示した。また、表-3に各実験ケースにおける吸収エネルギー量を示している。なお、吸収エネルギー量は、正載荷状態(第1象限)におけるループで囲まれた部分の面積を用いて評価している。図より、落下高さ $H = 1$ m の場合にはいずれの場合も変位が小さく、ほぼ弾性的に挙動していることがわかる。落下高さ $H = 5$ m における結果を比較すると、緊張率をそれぞれ 50%, 25% に低減した Type 2, Type 3 試験体では支点反力が小さく、かつ変位量が大きくなっていることから剛性が低下していることがわかる。しかしながら、吸収エネルギー量(表-3参照)は各試験体とも大きな差がないことより、この時点では緊張率が 100% である Type 1, 4, 5 試験体に比較して緊張率を低減させることで桁がより大きく変形し、同程度に重錘落下エネルギーを吸収しているものと考えられる。

各タイプの測定可能な最大落下高さにおける履歴曲線を比較すると、緊張率が 100% である Type 1, 4, 5 試験体の場合には、いずれも大きな最大支点反力と除荷後の 5 cm 以上の最大変位によりほぼ二等辺三角形形状の履歴曲線を示している。一方、緊張率が 50% である Type 2 の場合は、落下高さが $H = 12.5$ m と最も大きい場合であるが、支点反力の第 2 ピーク発生時の変位が最も大きく示されているものの、最大支点反力が Type 1 に比較して 1.5 MN 程度小さく、基本的に Type 1, 4, 5 と同様二等辺三角形形状の履歴曲線を示している。また、緊張率 25% である Type 3 の場合は測定可能な最大落下高さが 7.5 m であり、最大支点反力、最大変位とも

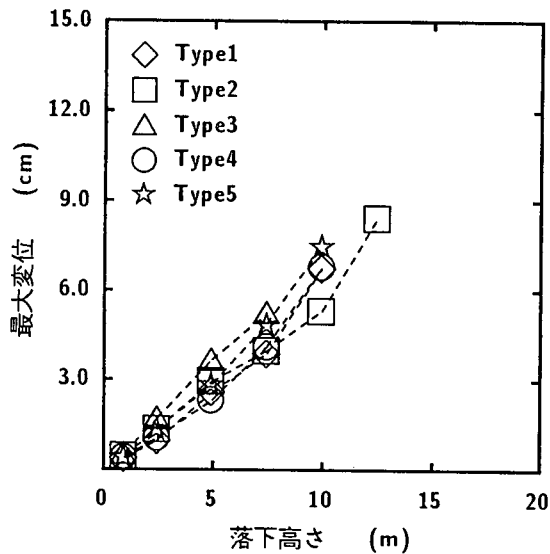
本実験ケース中で最も小さい結果になっているが、他同様の履歴曲線分布を示している。この二等辺三角形形状の履歴曲線はせん断破壊型 RC 梁のそれに類似しており、いずれのタイプもせん断破壊型で終局に至ることをうかがわせる。

表-3より吸収エネルギー量を比較すると、落下高さが $H = 7.5$ m 程度までは Type 2 で若干小さなエネルギー量となっているのを除き各試験体ともほぼ同程度の値を示している。落下高さが $H = 10$ m の場合には、緊張率を 100% とした Type 1, 4, 5 試験体においてほぼ 100 kJ 程度の値を示しているのに対し、Type 2 試験体では約 57 kJ の値を示している。同一の落下高さに対して吸収エネルギー量が小さいことは、その段階での桁の損傷度合いが小さいことを意味していることより、この結果は Type 2 試験体が他の桁に比較して残存耐力が大きく耐衝撃性に優れていることを示唆している。また、Type 1, 4 試験体は支点反力、載荷点変位の各最大値、荷重-変位履歴曲線の分布性状ともに類似しており同様の特性を示している。これより、0.17% 程度の異形鉄筋量の増加では顕著な耐衝撃性の向上が期待できないことがわかる。

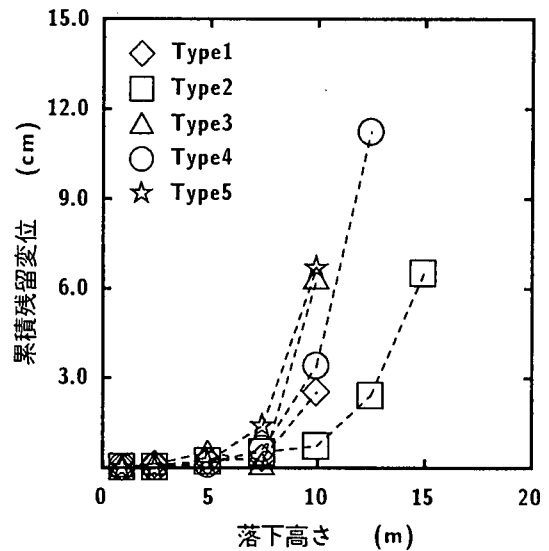
一方、PC 鋼材量を低減し異形鉄筋量を増加させた Type 5 試験体は、落下高さ $H = 10$ m において Type 1, 4 試験体と同程度の吸収エネルギー量であるものの、累積残留変位量(図-4(b)参照)が破壊基準である 6 cm を超え、桁が終局状態に至っている。このことは、換算鋼材比が同程度の条件下で、PC 鋼材量を低減し異形鉄筋量を増加させても、必ずしも耐衝撃性が向上するものではなく、剛性確保のために適度なプレストレス力の導入あるいは PC 鋼材量が必要であることを示している。また、Type 3 試験体では落下高さ $H = 7.5$ m において吸収エネルギー量が 53.5 kJ と PC 鋼材量が等しい Type 1, 4 と同程度であるが、落下高さ $H = 10$ m では累積残留変位(図-4(b)参照)が 6.3 cm で終局状態に至っている。これより、緊張率が 25% 程度と大幅に低い場合には、緊張率 100% の場合に比較して落下高さの小さい段階から剛性低下が著しくなり、早期に終局に至る可能性があるため、前述のように耐衝撃性は向上しないものと判断される。

3.2. 最大変位および累積残留変位

図-4は、実験により得られた最大変位および累積残留変位と落下高さの関係を示している。図より、



(a) 最大変位



(b) 累積残留変位

図-4 最大変位および累積残留変位

最大変位は落下高さ $H=7.5$ m 程度まで全ての試験体においてほぼ線形に増加していることがわかる。また、緊張率を 25% に低減した Type 3 試験体と PC 鋼材量を減じ異形鉄筋量を増加させた Type 5 試験体は、同一落下高さに対する最大変位が他の試験体に比較し若干大きくなっている。これは前述のようにあるいは総プレストレス力量が小さいことより、ひび割れの発生も早く曲げ剛性の低下が著しいことを暗示している。Type 2 試験体に関しては、落下高さ $H=10$ m まで最大変位が線形に増加し、その後増加の傾きが大きくなり終局に至っている。特に $H=10$ m までの比較的小さい変位状況は主桁の優れた衝撃緩和作用により、衝撃力が低減されていることによるものと考えられる。

累積残留変位に関しては、Type 1, 2 を除き他のいずれの Type とも終局時に著しい残留変形を示すことがわかる。Type 1 の場合は落下高さ $H=10$ m で実験を終了したことにより、顕著な残留変形を示していない。緊張率 50% である Type 2 の場合は効率的に残留変形量が抑制されており、最も耐衝撃性が優れていることがわかる。また、落下高さ $H=10$ m における Type 1 と異形鉄筋量のみが異なる Type 4 を比較すると、両者に大差のないことより 0.17% 程度の異形鉄筋量の増加による耐衝撃性向上効果は小さいことがわかる。同じく $H=10$ m における Type 1 と鋼材比が同程度で異形鉄筋量が多い Type 5 を比較すると、Type 5 の残留変形量が Type 1 の 2 倍以上の値となっており、鋼材比が

同程度の場合には異形鉄筋量の効果は小さく、総プレストレス力量の大きい方が有利であるものと考えられる。

3.3. ひび割れ状況

図-5 は、各試験体の実験終了後のひび割れ状況を示している。いずれの場合もスパン中央部下縁には曲げひび割れが多数発生しているが、スパンセンターから離れた領域では、いずれも載荷点に向かう斜めひび割れとなっている。最終的には、Type 2 を除いた全ての Type で隣り合うひび割れが連結して載荷点を頂点とする押し抜け型のせん断破壊を呈しているようである。落下高さが $H=12.5$ m である Type 4 の場合は、中央部の押し抜けられた状態が明確に示されている。この Type 4 の結果は、Type 2 に比較して PC 鋼材量が等しくかつ異形鉄筋量が多いものの、最終落下高さが $H=12.5$ m と Type 2 より低くかつ損傷度合も著しく大きく示されている。これより、耐衝撃性向上に関する異形鉄筋量の効果が小さいこと、緊張率 50% 程度の場合が耐衝撃性に優れていることが確認できる。また、Type 5 は上縁の圧壊を伴い角折れ状態となっている。この損傷度合は、Type 5 に比較して PC 鋼材量が多いものの総プレストレス力量が最も少なくかつ異形鉄筋量も少ない Type 3 の結果よりも大きいことより、耐衝撃性の向上には適度な総プレストレス力量の導入のもと PC 鋼材量を増加させることが最も効果的であることがわかる。Type 2 は曲げひび割れから載荷点に向かうせん断ひび割れへと進

展しているが、未だこれらが連結してせん断圧壊型に移行していないように判断され、前述の最大重錘衝撃力分布における考察結果と対応している。また、鋼材のダボ作用により、下端鋼材位置に顕著な水平ひび割れが発生している。これより、ひび割れ分布性状からも Type 2 が最も耐衝撃性に優れていることを確認できる。

試験体下縁のひび割れ分散幅について、PC 鋼材量および異形鉄筋量が同一で緊張率のみが異なる Type 1, 2, 3 試験体を比較すると、Type 1 試験体の場合には最終残留変形量が終局状態よりも若干小さいため損傷の程度が小さいものの、緊張率が低くなるほどひび割れの分散幅が大きくなる傾向が示されている。また、緊張率が 100%，換算剛材比もほぼ等しいが、総プレストレス力量のみが異なる Type 1 と Type 5 を比較すると、総プレストレス力量の少ない Type 5 の場合が Type 1 よりもひび割れ分散幅が大きく示されている。その程度は Type 3 と同程度であり、ひび割れ分散幅が大きくなる現象は、異形鉄筋量の効果よりも総プレストレス力量の影響が大きいものと判断される。

4. まとめ

本研究は、実 PC 覆工への PRC 部材の適用性を検討することを目的とし、PC 鋼材の緊張率、PC 鋼材量、異形鉄筋量を変化させた 5 種類の実規模大型 PRC 桁を製作して重錘落下衝撃実験を行い、PC 鋼材の有効緊張率、異形鉄筋量が耐衝撃性状や吸収エネルギー量、ひび割れ性状に与える影響について検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりとなる。

- 1) 静的なせん断余裕度が 1.0 以上の場合においても終局に近い時点における支点反力-載荷点変位履歴曲線は二等辺三角形形状の分布を示し、せん断破壊型の傾向を示す。
- 2) 緊張率を 25% まで低減させることや、換算鋼材比を一定に保ち異形鉄筋量を増加させることによって耐衝撃性を向上させることはできず、適度な緊張力の導入が必要である。
- 3) このことは、耐衝撃性を向上させるためには適度な緊張力の導入のもと、PC 鋼材量を増加させることが最も効果的であることを意味している。
- 4) 緊張率 50% に低減する場合には、ひび割れに

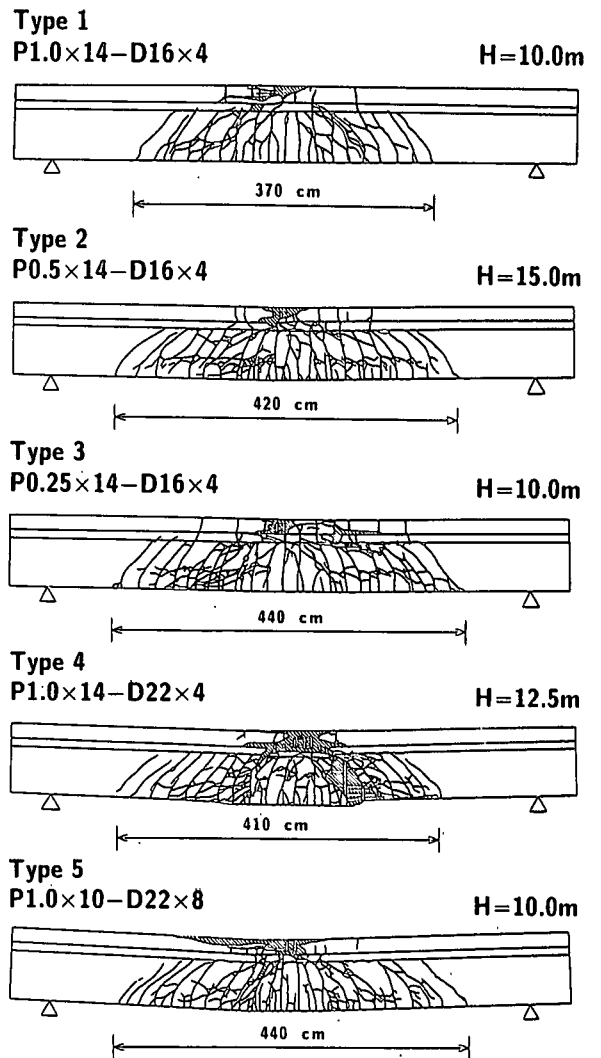


図-5 ひび割れ状況

よる塑性化の進行により適度な自由振動状態が励起され効率的に衝撃力を緩和し、最も耐衝撃性に優れている。

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 桁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, 1994.9
- 2) 竹本 伸一, 岸 徳光, 佐藤 昌志, 三上 浩: 各種 PRC 梁の静的及び衝撃耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1155~1160, 1997
- 3) 岸 徳光, 竹本 伸一, 三上 浩, 今野 久志: T 型 PRC 梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1827~1838, 1998.3