

I-66

各種大型 PRC 桁の重垂落下衝撃実験

室蘭工業大学	正員	岸 徳 光
北海道開発局	正員	佐 藤 昌 志
三井建設(株)	フェロー	三 上 浩
北海道開発局	正員	今 野 久 志
室蘭工業大学	〇学正員	佐 藤 大

1. はじめに

落石による災害から道路交通網を確保するために建設されている覆工構造物には RC (鉄筋コンクリート) 製と PC (プレストレストコンクリート) 製がある。PC 製覆工は工場製作された桁や柱などの構成部材を現場で組み立てる工法のため、比較的品质管理が容易なこと、工期の短縮が可能なことなどの利点がある。一方、RC 構造部材は PC 構造部材よりも衝撃靱性が高いとされており、両者の特徴を利用した PRC 製覆工 (PC 構造形式にひびわれ制御用の異形鉄筋を配筋したもの) に関する研究が行われている¹⁾。

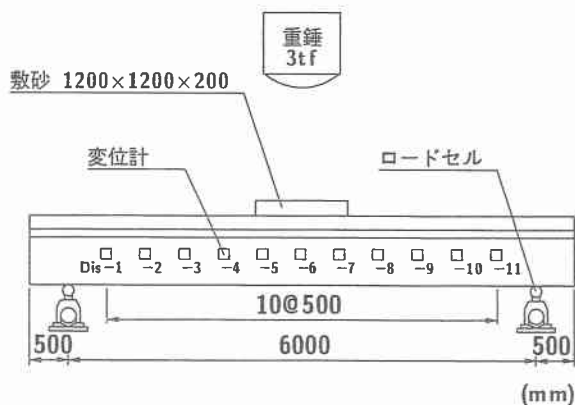
著者らはこれまで、通常の PC 部材の設計が PC 鋼材の換算降伏応力の 80 % 程度の有効プレストレスを導入することを前提としていることより、残存耐力が小さく、従って終局の吸収エネルギー量が小さくなることに着目し、PC 鋼材の緊張率を小さくし、残存耐力やエネルギー吸収量を増大させることの実験的研究を行ってきた^{2)~3)}。過去の研究成果より、1) 曲げ圧縮破壊型の矩形断面 PRC 桁においては、ひび割れ制御用の異形鉄筋を配筋することや PC 鋼材の緊張率を 50 % 程度に低減することによりエネルギー吸収能を大きくすることが可能となり、耐衝撃性を向上できること。2) 曲げ引張破壊型の T 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試験体を用いて行われたものであり、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、本論文では、全長が 7 m、桁高 90 cm、フランジ幅 1.2 m で緊張率、PC 鋼材量、異形鉄筋量を変化させた実規模大型 PRC 模型を対象として重量 3 tf の重錘を用いた重垂落下衝撃実験を行い、PRC 桁の有効緊張率、異形鉄筋量が耐衝撃性に与える影響、特に吸収エネルギー量、ひびわれ状況、および残留変位に着目し検討を行った。

2. 実験の概要

2.1. 実験方法

図一 1 に実験状況の概略図を示している。衝撃力は重量が 3 tf、直径が 1 m の重錘を所定の落下高さから自由落下させることで与えている。また、桁の載荷点部には重錘の転倒を防止するため、桁の載荷点部における局部破壊を防止するために 120cm × 120 cm、厚さ 20 cm の敷砂を設置している。両支点は試験体の跳ね上がりを防止し、かつ回転を拘束しないように鋼製の治

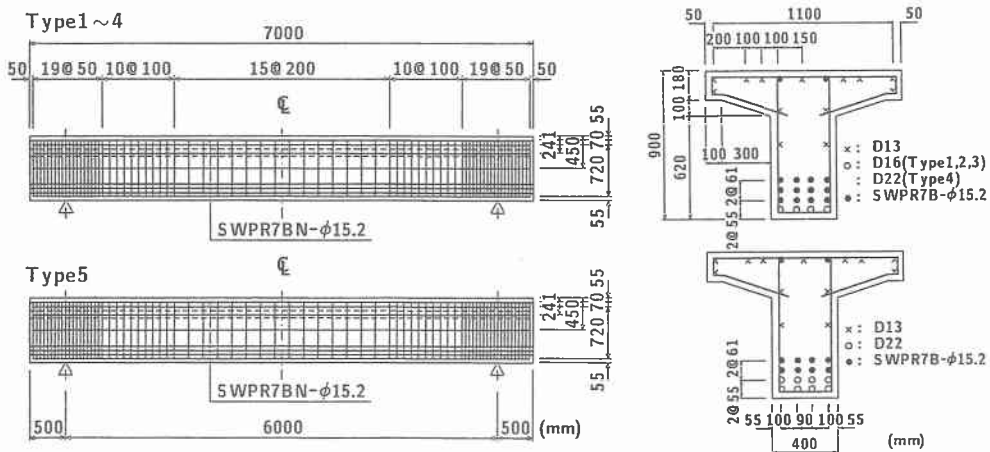


図一 1 実験概略図

Impact Test on Various Types of Prototype PRC Beam by Mean of Weight Falling Method
by Norimitsu KISHI, Masasi SATO, Hiroshi MIKAMI, Hisasi KONNO and Dai SATO

表－１ 実験ケース一覧

試験体名	有効緊張力 (kgf/本)	PC 鋼材 本数 (本)	異形鉄筋量	換算鋼材比	終局曲げ耐力 (tf)	落下高さ (m)
Type1 P1.0×14-D16×4	13.6	14	D16×4	0.0157	166.2	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, (10.0)
Type2 P0.5×14-D16×4	6.9	14	D16×4	0.0157	166.2	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, (15.0)
Type3 P0.25×14-D16×4	3.4	14	D16×4	0.0157	166.1	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, (10.0)
Type4 P1.0×14-D22×4	13.6	14	D22×4	0.0174	182.0	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, (12.5)
Type5 P1.0×10-D22×8	13.6	10	D22×8	0.0156	162.0	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0



図－２ 試験体の断面および配筋図

具を用いてピン支持に近い構造としている。実験は、最初に高さ 1 m からの実験を行い、その後高さ 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実験を行った。桁の破壊規準は当初残留変位量が純スパン (6m) の 100

分の 1 (6cm) に達した時点としたが、目視によりフランジ部分の剝離など断面損傷が著しく実験の継続が危険と判断された場合にはその時点で実験を終了している。なお、測定項目は重錘加速度、両支点反力、50 cm 間隔に設置したレーザ式変位計から得られる変位である。

2.2. 実験ケースおよび試験体

本実験ケースの一覧を表－１に示している。試験体は全てプレテンション方式で製作し、PC 鋼材の有効緊張率（以下単に緊張率とする）、PC 鋼材本数、ひび割れ制御用の異形鉄筋量を変化させた 5 種類である。表中の試験体名は「PC 鋼材の緊張比率 × PC 鋼材本数 - 異形鉄筋の種類 × 異形鉄筋本数」を表している。PC 鋼材の緊張率は通常の使用状態における許容緊張力（15.8 tf/本）に対する実際の有効緊張力比をラウンドナンバーで示している。なお、落下高さが（ ）付きの実験についてはコンクリート破片の飛散など危険防止のため変位計を取り外して実験を行ったことを意味している。また、参考のために理論上の終局曲げ耐力を示している。終局曲げ耐力は後述の材料の特性値を考慮し、断面分割法を用いて算出した。断面の

表－２ 鋼材の特性値一覧

鋼材名	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
SD295A	3892.9	5469.4	2.1×10 ⁶
SD345	4010.2	6051.0	2.1×10 ⁶
SWPR7BN	17509.5	19863.7	2.0×10 ⁶

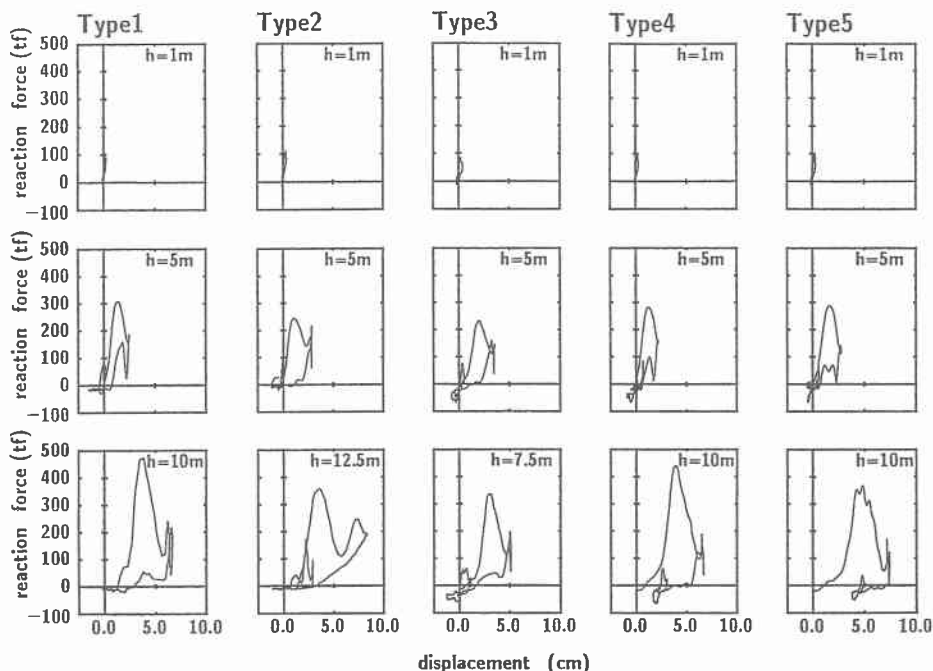


図-3 支点反力-載荷点変位

分割数は約 5 mm 間隔の 177 である。

図-2 に試験体の断面および配筋図を示している。試験体は全長が 7 m、桁高が 90 cm、フランジ幅 120 cm、ウェブ幅 40 cm の単純 T 型断面桁である。使用したコンクリートの実験時の材令は 63 ～ 70 日で平均圧縮強度が 722 kgf/cm^2 、弾性係数が $3.44 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比が 0.217 である。また、使用した鋼材の特性値の一覧を表-2 に示している。

表-3 吸収エネルギー量 (tf・m)

試験体	落下高さ						
	1.0m	2.5m	5.0m	7.5m	10.0m	12.5m	15.0m
Type1	7.5	86.8	324.0	542.2	1009.7	-	-
Type2	15.5	122.4	379.5	**	581.9	1127.0	*
Type3	20.6	94.0	326.9	545.0	*	-	-
Type4	14.2	109.1	317.4	596.4	1002.9	*	-
Type5	17.1	124.2	345.8	664.2	988.6	-	-

* : 変位計測せず

** : 支点反力計測不良のため算出不可

3. 実験結果と考察

3.1. 支点反力-載荷点変位

図-3 に実験より得られた支点反力と載荷点変位から求めたヒステリシスループを落下高さ各 1 m, 5 m および終局に至った落下高さについて示している。ここで、終局時の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、その一段階前の落下時の結果を示している。また、表-4 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ヒステリシスループで囲まれた第一象現部のみの面積を考慮して算出した。

図より、1 m 落下時に関しては、ループの形状が Type3 試験体を除いてはほぼ同様であり、吸収エネルギー量もほとんど見られず弾性域における応答であることがわかる。Type3 試験体は、他の試験体に比べ、

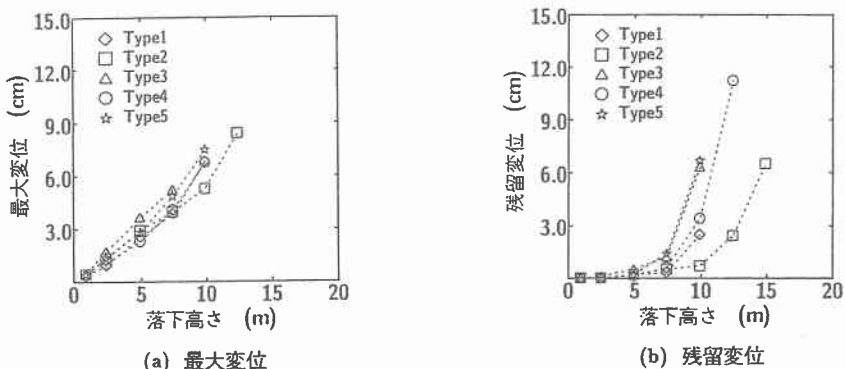


図-4 最大変位および残留変位

最大変位，吸収エネルギー量が大きいことや，実験終了後に載荷点直下にひび割れが確認されたことから，緊張率低減の影響が顕著に表れているものと考えられる。

落下高さ 5 m の場合における結果を比較すると，緊張率をそれぞれ 50 %，25 % に低減させた Type2，Type3 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おり，剛性が低下していることがわかる。しかしながら，緊張率の大小によって吸収エネルギー量に大きな差がないことより，この時点では緊張率 100 % の Type1，4，5 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重錘落下によるエネルギーを吸収しているものと考えられる。測定可能な最終落下時におけるヒステリシスループより，緊張率 100 % である Type1，4，5 の試験体に関する結果はいずれも大きい支点反力と除荷後の小さな変形により鋭角な三角形のループを描いており，緊張率が高いことにより，見かけ上剛性が大きく評価されているものと考えられる。一方，緊張率 50 % である Type2 の場合は最大支点反力が小さくかつ除荷後の変形量も大きく示されており，明らかに緊張率 100 % の場合と異なった特性を示している。またリバウンド時の変形量も他に比較して大きい。緊張率 25 % の場合には落下高さが 7.5 m と最も低い段階で測定可能な最終段階に至り，かつ支点反力も小さいことより，緊張率の大幅な低減による吸収エネルギーの増大を期待できないことがわかる。

吸収エネルギー量を比較すると，落下高さが 7.5 m 程度までは各試験体においてその値に大きな差はみられない。落下高さが 10 m の場合では，緊張率を 100 % とした Type1，4，5 試験体において 1000 tf·cm 程度の値を示しているのに対し，Type2 試験体では約 580 tf·cm 程度の値を示している。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破損度が小さいことを意味していることより，この結果は Type2 試験体が，他の桁に比べ残存耐力が大きいことを示唆している。また，Type1，4 試験体は支点反力，変位の各最大値，ヒステリシスループの形状ともに類似しているが，PC 鋼材量を減じ，異形鉄筋量を増加させた Type5 試験体は Type1，4 試験体と同程度の吸収エネルギー量であるものの，残留変位量も破壊基準である 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必ずしも PC 鋼材量を減じ，異形鉄筋量を増加させることにより耐衝撃性が向上するものではなく，適度な剛性確保のためにプレストレス力の導入が必要であることを意味している。また，Type3 試験体についても落下高さが 10 m で残留変位が 6 cm を超え，終局状態に至っており，Type5 と同様の現象が現れないものと推察される。

3.2. 累積残留変位

図-4 に最大変位および実験終了後の残留変位について落下高さとの関係を示している。図より，最大変位は，落下高さ 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 % とした Type3 試験体，PC 鋼材量を減らし異形鉄筋量を増加させた Type5 試験体で最大変位，

残留変位ともに他に比べ若干大きくなっている。終局時の残留変位は Type4 試験体で最も大きく、Type1 試験体で最も小さくなっており、他の試験体は当初終局基準とした 6 cm 程度の残留変位で終局に至っている。ここで、Type1 試験体と Type4 試験体はヒステリシスループによる動的挙動および落下高さ 10 m までの残留変位などの挙動が互いに類似しており、後述のひび割れ状況を考慮すると、両者とも終局に至る残留変位は 6 cm 程度で、その時の落下高さは 10 m ～ 12.5 m の間に存在するものと推察される。

以上を総合して各 PRC 桁の耐衝撃性について検討すると、1) Type1 と Type4 試験体は同一落下高さに対する残留変形量にも大差がなく、同一 PC 鋼材量、緊張率に対して約 2 倍のひび割れ制御用異形鉄筋量の増加によっても著しく耐衝撃性が向上しないことがわかる。2) 緊張率を 25 % に低減した Type3 と PC 鋼材本数を減じ、異形鉄筋量を増加させた Type5 試験体では耐衝撃性の向上はみられず、基準試験体である Type1 よりも落下高さは低い時点で終局に至っている。これより、耐衝撃性向上のためには最適な導入緊張率が存在すること、また換算鋼材比は最適な耐衝撃性の指標にはなり得ないことが明らか

となった。3) 緊張率が 50 % である Type2 の場合は落下高さが 15 m と最も大きい入力エネルギーで終局に至っており、本論文で設定した試験体中で最も耐衝撃性に優れていることがわかる。

3.3. ひび割れ状況

図-5 に各試験体の実験終了後のひび割れ状況を示している。緊張率およびプレストレス導入量が等しく異形鉄筋量が異なる Type1 と Type4 を比較すると、最終落下高さが異なるため、損傷の程度が異なるものの両者類似のひび割れ分布性状を示しているものと考えられ、異形鉄筋量の差異によるひび割れ分布性状に大差がないものと判断される。異形鉄筋量が等しく、緊張率のみが異なる Type1 ～ Type3 を比較すると、

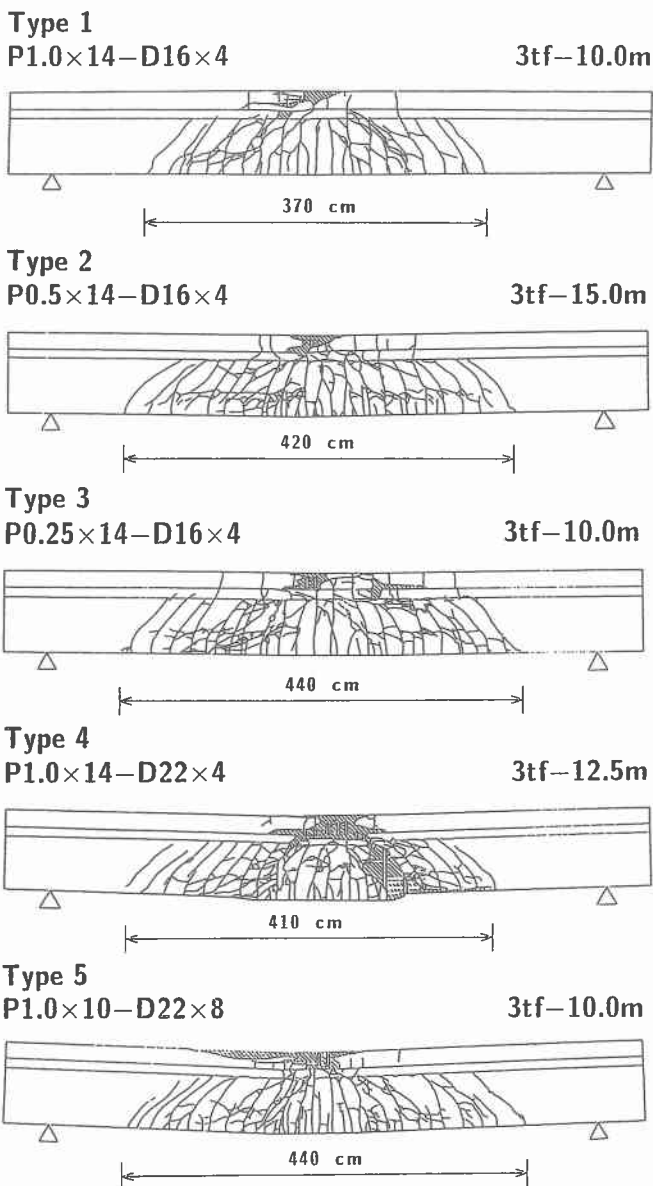


図-5 ひび割れ状況

Type1 の場合の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が、落下高さが異なるものの 3 者はほぼ類似のひび割れ性状を示しているものと考えられる。Type5 は 10 m 落下状態で上縁の剝離が著しく、圧壊型の破壊形態を示している。

4. まとめ

耐衝撃性に優れた PRC 部材の合理的設計法を確立することを目的として、PC 鋼材の緊張率、PC 鋼材本数、および異形鉄筋量をそれぞれ変化させた 5 種類の大型 PRC 桁について 3 tf 重錘を用いた重錘落下衝撃実験を行い、その耐衝撃性について、特に吸収エネルギー量、残留変位量およびひび割れ性状に着目し検討を行った。その結果をまとめると以下のようである。

- 1) 損傷程度の小さい段階では、PC 鋼材の緊張率を低減することで吸収エネルギー量は大きく変化しないものの、吸収メカニズムは異なり、緊張量の大きい桁は大きな反力を生じさせることによりエネルギーを吸収する。一方、緊張量の少ない桁は大きな変形量によって同程度のエネルギー吸収を行っている。
- 2) 緊張率を 25 % 程度まで低減させた試験体および、換算鋼材比を類似の値に保ち異形鉄筋量を増加させた試験体に関しては、耐衝撃性の向上は見られず、耐衝撃性を向上させるためにはプレストレス力の導入により適度な剛性の確保が必要である。本実験の範囲では緊張率を 50 % 程度に低減した試験体において最も大きな耐衝撃性向上が得られた。
- 3) 換算鋼材比 0.014 程度の PC 鋼材量で緊張率を同一とした場合は、換算鋼材比 0.0017 程度の PC 異形鉄筋量を 2 倍に増加しても耐衝撃性向上効果は期待できない。

参考文献

- 1) 今野久志，佐藤弘志，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) 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，No2，pp.1155-1160，1997.6
- 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，pp1827-1838，1998.3