

各種大型 PRC 桁の重錘落下衝撃実験

Weight Falling Impact Test on Various Types of Prototype PRC Beams

室蘭工業大学
北海道開発局
ドービー建設工業(株)
室蘭工業大学

正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
正員 竹本 伸一 (Shin-ichi Takemoto)
○学生員 武井 信雄 (Nobuo Takei)

1. はじめに

著者らは、これまでプレストレストコンクリート(PC)覆工への PRC 部材 (PC 部材にひび割れ制御用の異形鉄筋を配筋した部材)の適用性を検討することを目的として、小型供試体を用いた室内実験¹⁾や大型模型を用いた野外実証実験²⁾を実施してきた。その結果、1)耐衝撃性を向上させるためには適度な緊張率のもと、PC 鋼材量を増加させることが最も効率的であること、2)従来設計に基づく PC 桁に関して、PC 鋼材の緊張率を従来からの値を 1 として 0.5 程度に低減することにより最も効率的に耐衝撃性を向上できること、等が明らかになった。しかしながら、PC 鋼材の緊張率を低減させることによって、せん断耐力も低減され、桁がせん断破壊に至る危険性のあることも明らかになった。これより、PRC 桁の合理的な耐衝撃設計手法を確立するためには、静的なせん断余裕度 (静的せん断耐力/静的曲げ耐力)を現行設計による PC 桁と同程度の値に確保しつつ、PC 鋼材の緊張率を低減させることが肝要であるものと判断される。

このような観点より、本研究では、せん断余裕度を現行設計による場合と同程度とし、PC 鋼材の緊張率や鉄筋の材料強度を変化させた 4 種類の大型 PRC 模型を製作し、それぞれの試験体に対して、繰り返し載荷による重錘落下衝撃実験を行った。なお、鉄筋の材料強度を変化させた実験は、限られた断面寸法で耐荷力を向上させる一つの方法として異形鉄筋の代わりに高強度鋼材を使用することを考え、この方法の有効性検討のために実施したものである。

2. 実験の概要

2.1. 実験方法

図-1には実験状況の概略図を示している。衝撃力は質量が 3,000 kg、直径が 1 m の重錘を所定の高さから桁のスパン中央部に自由落下させることにより与えている。また、載荷点部の桁上には重錘の転倒を防止することや、載荷点部における桁の局部破壊を防止することを目的として、120×120 cm 四方に厚さ 20 cm の敷砂を設置した。また、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、鋼製の治具を用いてピン支持に近い構造としている。

実験は、最初の落下高さ 1 m として、その後の落下

高さを 2.5 m から 2.5 m 刻みで、桁が破壊に至るまで増加させる繰り返し載荷方法により行っている。桁の破壊基準は、当初、残留変位量が純スパン (6 m) の 100 分の 1 (6 cm)に達した時点と定義したが、目視によりフランジ部コンクリートの剝離等、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 (以下、支点反力)、50 cm 間隔毎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

表-1には本実験ケースの一覧を示している。試験体は、全てプレテンション方式により、PC 鋼材の有効緊張率 (以下、単に緊張率とする)および異形鉄筋の種類とせん断補強筋量を変化させた全 4 種類を製作した。各試験体は過去の実験³⁾ケースの連番として Type 1 および Type 6 ~ 8 とした。従って、Type 1 は過去の実験ケースと同一で本シリーズの基準となる試験体である。

PC 鋼材の緊張率は通常の使用状態における許容緊張力 (154.9 kN/本)に対する実際の有効緊張力比として示している。また、落下高さ欄の () 付きの実験に関しては、コンクリート破片の飛散が予測される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。なお、参考のために静的曲げ耐力、静的せん断耐力、せん断余裕度も示している。このうち、静的曲げ耐力は後述の材料特性値を考慮し、断面分割法を用いて算出している。

図-2には、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。Type 1,

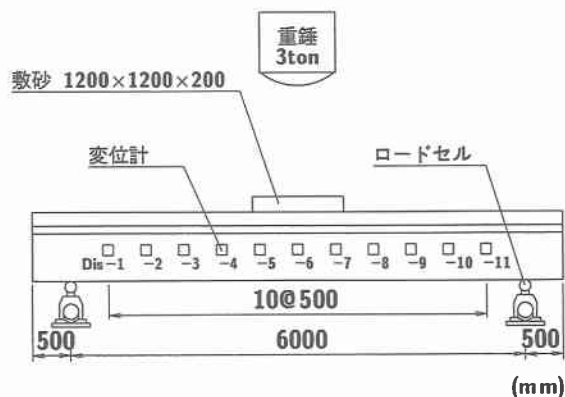
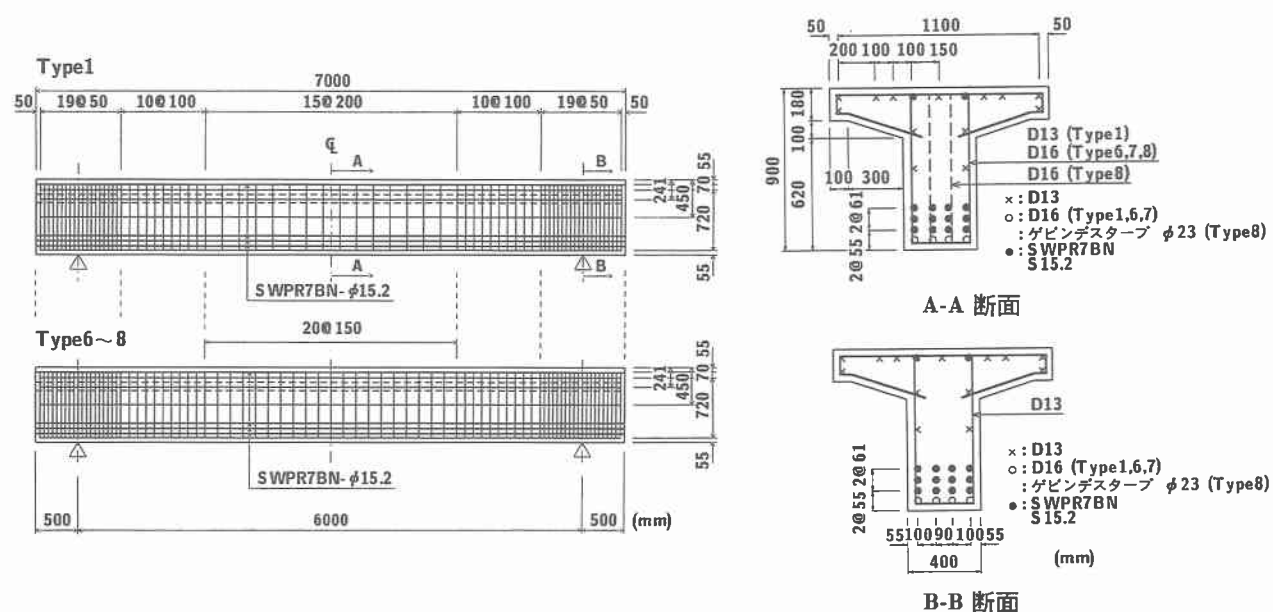


図-1 実験概略図

表－１ 実験ケース一覧

試験体名	有効緊張力 (kN/本)	緊張率 (%)	せん断補強筋比	静的曲げ 耐力(MN)	静的せん断 耐力(MN)	静的せん断 余裕度	落下高さ (m)
Type1	133.3	100	0.0032	1.62	1.99	1.23	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5
Type6	133.3	100	0.0062	1.62	2.45	1.51	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, (15.0)
Type7	67.2	50	0.0062	1.62	1.99	1.23	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, (15.0)
Type8	67.2	50	0.0132	2.40	2.92	1.22	1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0



図－２ 試験体の形状寸法および配筋図

6, 7 では主鉄筋に SD 345-D16 (以下, D16) を用いている。また, Type 6, 7 についてはせん断スパン 3 m の区間におけるせん断補強筋を SD 295A-D13 から D16 に変化させている。また, Type 8 については主鉄筋に高強度鋼材であるゲビンデスターブを用いることにより静的曲げ耐力を向上させているため, せん断余裕度を他試験体の場合と合わせるためせん断スパン 3 m の区間においてせん断補強筋量を増加させている。使用したコンクリートの実験時の材令は 75 ~ 88 日で平均圧縮強度が 64.1 MPa, 弾性係数が 30.2 GPa, ポアソン比が 0.193 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－２ 鋼材の特性値一覧

鋼材名	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)
SD295A(D13)	360.7	501.7	206
SD345(D16)	400.0	588.3	206
SBPD 930/1080 (ゲビンデスターブ φ23)	1090.3	1184.0	202.5
SWPR7BN	1741.3	1940.3	193.4

周波成分が敷砂によって吸収されるためと推察される。その継続時間は約 40 ms である。また, この継続時間は支点反力波形 R および変位波形 δ のそれと良く対応している。

$h = 2.5$ m 以上の場合には, P はいずれの試験体においても二つの正弦半波が連なった分布性状を示している。その二つの正弦半波は, 落下高さ h の増加に伴い分離していく傾向にある。その二波の波形は後述の変位波形からも明らかなように桁の振動と重錘の相互作用によって発生するものと推察される。 $h = 12.5$ m における二波目の振幅は, せん断補強筋量が最も少ない Type 1 の場合が最も小さく, Type 8 の場合にはこれと逆に最も大きく示されている。これより, Type 1 が最も早

3. 実験結果および考察

3.1. 応答波形

図－３には, 各 PRC 桁の重錘衝撃力 P , 支点反力 R および変位 δ の応答波形を示している。また, ここでは紙面の都合により, 落下高さが $h = 1, 2.5, 7.5, 12.5$ m の結果のみに着目し検討することとする。

図より, 重錘衝撃力 P は, 落下高さが $h = 1$ m と小さい場合には, いずれの桁も台形状分布を示していることがわかる。これは, 衝突速度が小さいことより, 重錘のコンクリートに直接衝突することによって発生する高

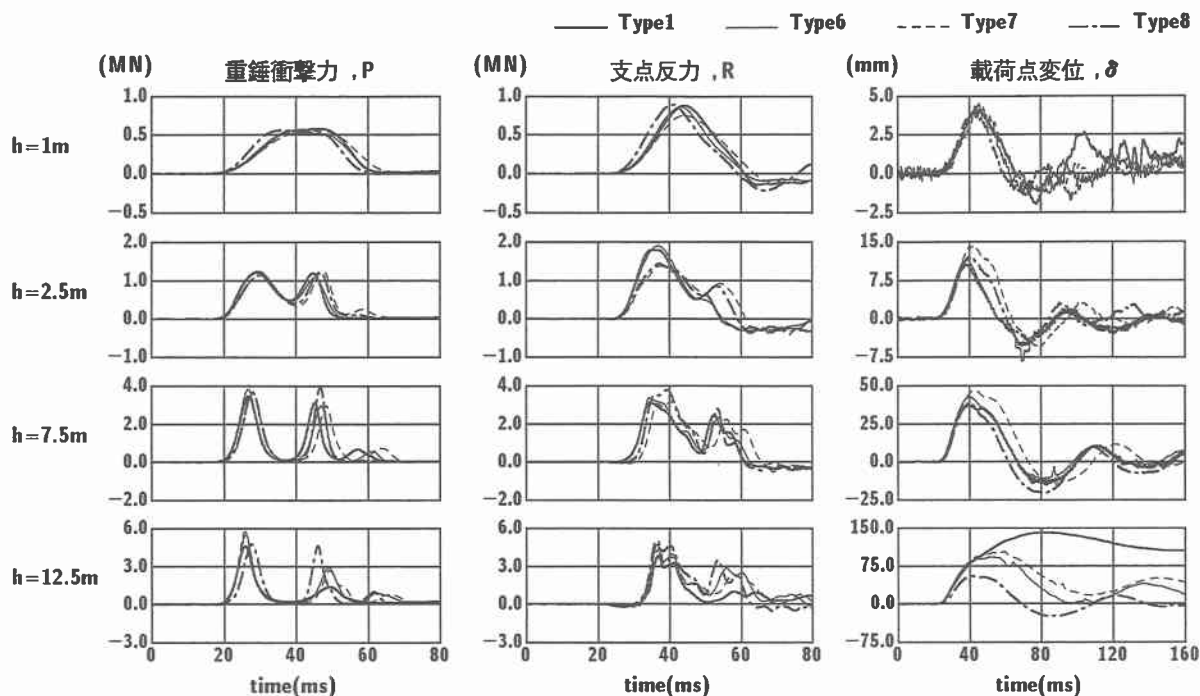


図-3 重錘衝撃力, 支点反力, 載荷点変位波形図

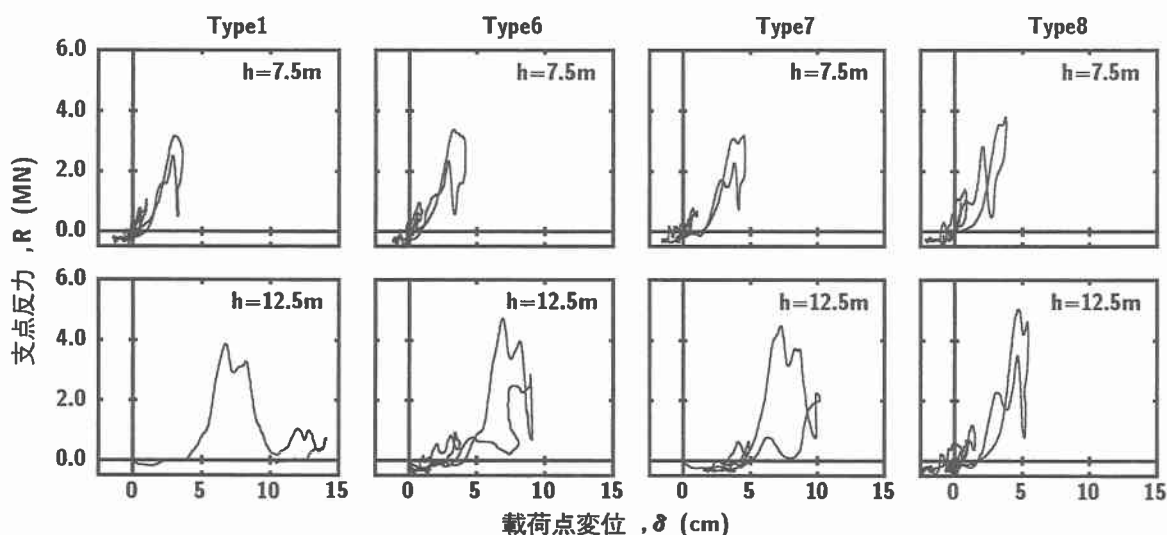


図-4 支点反力-載荷点変位履歴曲線

く塑性化が進行していること、また Type 8 の桁が最も健全で損傷程度の少ないことがわかる。

一方、支点反力波形 R はいずれの試験体においても、落下高さの増加に伴い、一波の正弦半波状の分布から、二波から成る分布性状に推移していることが分かる。また、その分布性状は各落下高さで試験体に関わらず大略類似している。しかしながら、 $h = 12.5 \text{ m}$ では試験体間で分布性状の差異が見られる。すなわち、Type 1 の二波目の振幅は他に比べて小さく、継続時間は長い。Type 8 の場合にはこれと反対の傾向を示している。これは、変位波形 δ の分布性状からも明らかのように、Type 1 の場合には劣化の進行が著しく変位も残留していることにより、重錘と桁の振動に伴う相互作用の程度が小さくなったためと推察される。一方、Type 8 の場

合には未だ弾性的な振動性状を示しており依然として重錘と桁間の相互作用による応答が示されている。

変位波形 δ について見ると、 δ はいずれも荷重載荷時に正弦半波状の分布を形成していることが分かる。また、いずれの試験体も落下高さの増加に伴い振幅は増大し、周期も徐々に長くなっている。落下高さが $h = 12.5 \text{ m}$ の場合に注目すると、Type 1 の波動は明らかに他試験体とは異なっており、大きく正方向にドリフトした状態でわずかに振動している。これに対して、Type 8 の場合には波動の負載荷状態も示され、未だ弾性的な振動性状を示している。なお、Type 6 と Type 7 を比較すると、Type 7 の方が若干振幅が大きくまた周期は長く示されているものの、全体的に両者大略類似の挙動を示し、緊張率の違いによる影響はそれほど見られない。

3.2. 支点反力－載荷点変位履歴曲線

図－4には、実験結果より得られた支点反力 R と載荷点変位 δ に関するヒステリシスループを、落下高さ $h=7.5\text{ m}$ および 12.5 m の場合について示している。なお、ここでは示していないが、 $h=5.0\text{ m}$ 以下の場合には、 R が単調に増加し、最大値を示した後、ほぼ同じ経路で除荷される大略類似の弾性的な挙動を示していることを確認している。

図より、 $h=7.5\text{ m}$ の場合には、Type 8 の最大支点反力が他に比べて大きく示されており、静的曲げ耐力が他に比べて大きく、最も健全であることの効果が現れている。その他の試験体に関しては、ループで囲まれる面積（吸収エネルギー）等、その分布性状は大略類似している。

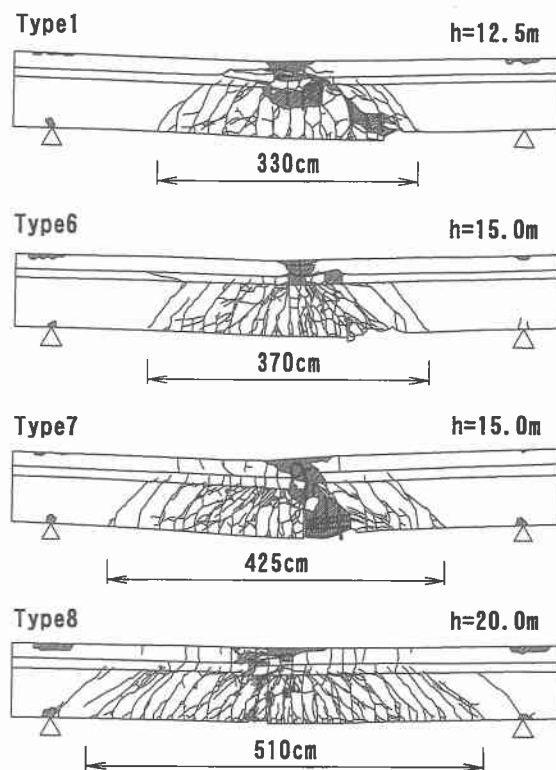
$h=12.5\text{ m}$ の場合には、各試験体間の分布性状に明確な差異の生じていることが分かる。すなわち、Type 1 の場合には、最大支点反力が最も小さくかつ最大変位が最も大きく示され、吸収エネルギーも大きい。分布性状は三角形状で、せん断破壊特有の性状を示している。Type 7 の場合には除荷後変位がほぼ零レベルまで復元しているが、Type 1 と同様に三角形状の分布を示しており、せん断破壊型の傾向を示していることが分かる。これより、静的曲げ耐力およびせん断耐力が等しい場合には、プレストレス導入量の小さい場合が大きい場合よりも耐衝撃性に優れていることが分かる。Type 6 の場合には Type 7 と類似の分布性状でせん断破壊型の傾向を示しているが、Type 7 よりも早い段階から復元作用が働いており、より耐衝撃性に優れていることが分かる。これは、Type 6 の静的せん断耐力が Type 7 より大きいことと対応している。Type 8 の場合には $h=7.5\text{ m}$ の場合に比べて最大支点反力、最大載荷点変位とも増加しているものの両者類似の性状を示しており、未だ弾性に近い挙動を示していることを伺わせる。

これより、PRC 桁の耐衝撃性は静的せん断余裕度が 1.2 以上であることを前提に、プレストレス導入量の大小を問わず静的せん断耐力が大きいほど耐衝撃性に優れ、せん断耐力が等しい場合にはプレストレス導入量の小さい場合が大きい場合よりも耐衝撃性に優れていることが明らかになった。

3.3. ひび割れ状況

図－5には、実験終了後のひび割れ状況を示している。なお、各試験体で最終落下高さは異なっている。図より、Type 1、Type 7 は隣り合うひび割れが連結して載荷点を頂点とするせん断型の破壊性状を呈していることがわかる。Type 6 もせん断型の破壊性状を呈しているが、その損傷の程度は Type 1、Type 7 に比べて小さい。

静的せん断耐力の異なる Type 6 と Type 7 を比較すると、Type 6 の損傷の程度が Type 7 より小さいことが分かる。これは、Type 6 の静的せん断耐力が Type 7 より大きいことに対応している。Type 8 の場合には、



図－5 ひび割れ状況

重錘落下高さが $h=20\text{ m}$ と最も耐衝撃性に優れていることが分かる。ひび割れ分布は曲げせん断型のひび割れが桁全体に分散分布しており、 $h=20\text{ m}$ の段階でも未だ他 Type のような終局に至る顕著なせん断ひび割れが発生していない。

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 1) せん断耐力が同じ場合には、静的せん断余裕度が 1.2 以上の条件下で、緊張率を 50 % に低減することによって耐衝撃性が向上する。
- 2) ひび割れ制御用として用いられている異形鉄筋の替わりに高強度鋼材であるゲビンデスターブを用いることにより曲げ耐力を向上させることができる。
- 3) さらに、所用のせん断耐力を確保（静的せん断余裕度が 1.2 以上）することにより、緊張率 50 % の状態で最も耐衝撃性を向上させることが可能となる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 今野久志，岸 徳光，池田憲二，竹本伸一：各種大型 PRC 桁の耐衝撃挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp1819-1830，2000.3