

高強度鋼材を使用した落石覆工用 PRC 桁の重錘落下衝撃実験

Falling-weight Impact Test of Prototype PRC Beams with High Strength Steel for Rock-sheds

室蘭工業大学

北海道開発土木研究所

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 Kon-no)

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、小型試験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),3)}を実施している。その結果、1)従来設計に基づく PC 桁に対して、PC 鋼材の緊張比を 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、2)下端筋を高強度鋼材とすることによって耐衝撃性を向上できること、3) PC 鋼材の緊張率を低減させることによって、せん断耐力も低減し、桁がせん断破壊に至る危険性のあること等の知見が得られている。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、まず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なければならないことが明らかとなっている。このように、PRC 部材の耐衝撃性向上法も実規模レベルで大略把握されている。しかしながら、これまでの実験結果からは、いずれの耐衝撃性向上法が最も効果的であるかが明示されるに至っていない。

このような背景より、本研究では、せん断余裕度を同程度とし、1)従来からの設計法に従う場合を基準として、2) PC 鋼材の緊張比を 0.5 とする場合、3) PC 道路防災構造物マニュアル⁴⁾に基づき、ひび割れ分散のための下端筋を二段配置とする場合や、下端筋鋼材として高強度鋼材を適用する場合等の実規模 PRC 桁を取り上げ、いずれの考え方に基づいた PRC 桁が最も耐衝撃性に優れているかを検討することを目的として、3,000 kg 重錘を用いた単一重錘落下衝撃実験を試みた。

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。試験体の純スパン長は 6 m である。また、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。衝撃荷重は、直径が 1 m、3,000 kg 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、桁の載荷点部には桁の局部破壊を防止するために 120×120 cm、厚さ 20 cm の敷砂層を設置している。

実験は、過去に実施した実験結果に基づき、残留変位

が純スパン長(6 m)の 100 分の 1(6 cm)に達した時点を終局と定義し、この残留変位を目安として実験を実施している。載荷方法は単一載荷とし、各試験体の耐衝撃性を直接比較するために落下高さを 22.5 m と固定している。測定項目は、重錘加速度、両支点反力(以下、単に支点反力)、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. 試験体

表-1には試験体の一覧を示している。試験体は、PC 鋼材の有効緊張力および緊張比、下端筋鋼材の種類と本数、せん断補強筋量を変化させた全 4 種類である。また、静的せん断余裕度(静的せん断耐力/静的曲げ耐力)は各試験体間で同一としている。なお、せん断余裕度評価のための静的曲げ耐力は、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。各試験体は過去の実験³⁾ケースの連番としており、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。

Type 7 は、緊張比の影響を検討するための試験体であり、Type 1 を基本とし、緊張比を 0.5 に低減したものである。

Type 9 は PC 道路防災構造物マニュアルによる設計断面であり、緊張比を 0.8 とし、さらに下端筋鋼材を 2 段配置として鉄筋の依存度を高めたものである。

Type 10 は下端筋鋼材を高強度材料とした場合の影響を検討するための試験体であり、緊張比を 0.5、下端筋を総ネジ PC 鋼棒、桁高を 65 cm とし、他 Type に対して約 20 % の容積減となっている。

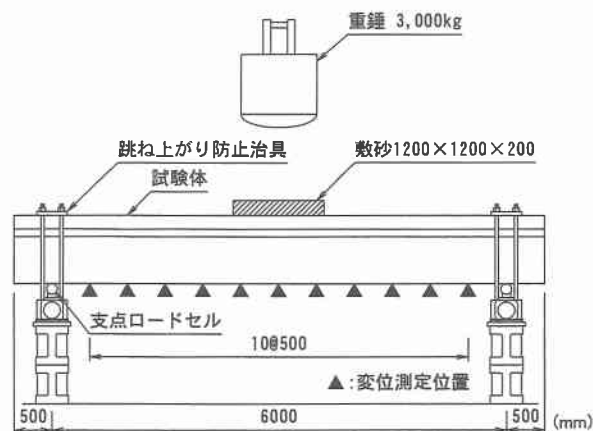
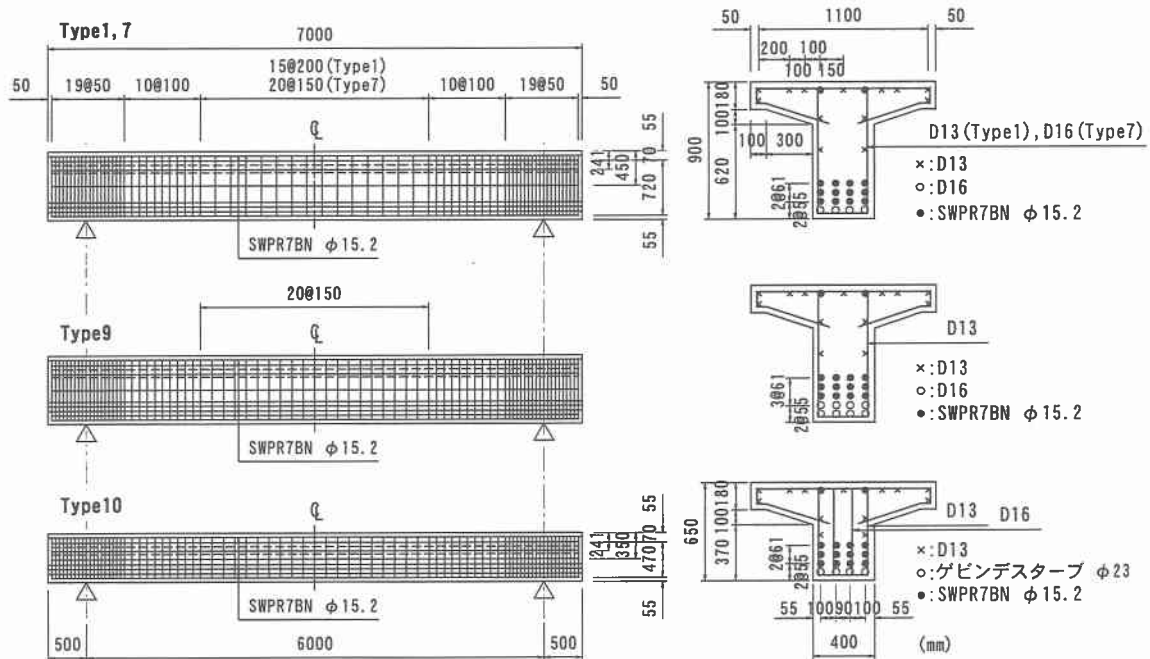


図-1 実験概略図

表－１ 実験ケース一覧

試験体名	有効緊張力 (kN/本)	PC鋼材 緊張比	下端筋鋼材 種類・径×本数 ^{*1}	静的曲げ 耐力 (MN)	静的せん断 耐力 (MN)	静的せん断 余裕度	桁高 (cm)
Type1	133.3	1.0	D16×4	1.53	1.99	1.30	90
Type7	67.2	0.5	D16×4	1.53	1.99	1.30	90
Type9	106.6	0.8	D16×8	1.55	2.01	1.30	90
Type10	67.2	0.5	G23×4	1.53	2.00	1.31	65

注) *1 D : 異形鉄筋, G : 総ネジ PC 鋼棒



図－２ 試験体の形状寸法および配筋図

図－２には、試験体の断面および配筋図を示している。いずれの試験体もプレテンション方式により製作された単純 T 型断面の PRC 桁である。また、桁長 700 cm、ウェブ幅 40 cm、上フランジ幅 120 cm であり、桁高は Type1, 7, 9 が 90 cm、Type10 が 65 cm である。使用した PC 鋼材は全て SWPR7BN-φ15.2 (公称断面積 138.7 mm²) である。また、下端に配筋されている軸方向異形鉄筋および総ネジ PC 鋼棒は、それぞれ SD 345-D16 およびゲビンデスターブ φ23 (母材部断面積 415.5 mm²) であり、圧縮側鉄筋には SD 295-D13 を使用している。せん断補強筋は全て SD295-D13 であるが、せん断余裕度を同程度に確保するため、各試験体で補強量は異なっている。コンクリートは設計基準強度が 58.8 MPa、実験時の材令は 22~30 日で平均圧縮強度が 68.4 MPa、弾性係数が 34.7 GPa、ポアソン比が 0.203 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。

3. 実験結果および考察

3.1. 応答波形

図－３には、各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 δ の応答波形を示している。なお、重錘衝撃力波形は重錘に設置した加速度計により得られ

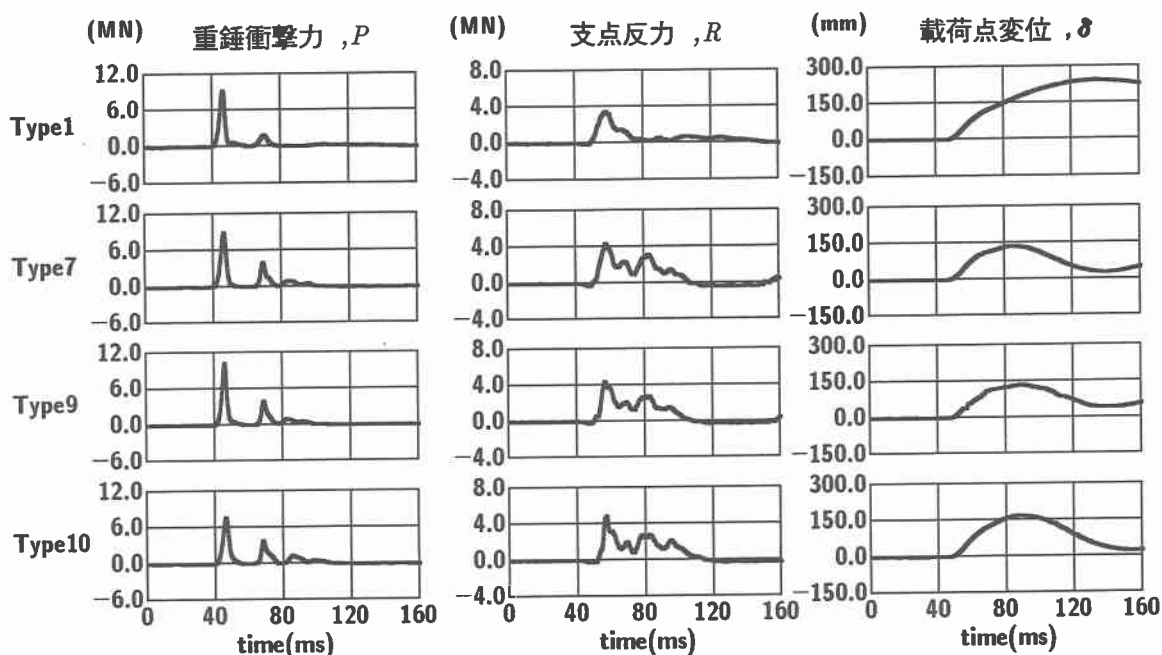
表－２ 鋼材の特性値一覧

鋼材名	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)
SD295A(D13)	372.8	520.8	206
SD345(D16)	394.0	573.0	206
SBPD 930/1080 (ゲビンデスターブ φ23)	1069.0	1165.0	203.4
SWPR7BN	1769.7	1954.5	192.3

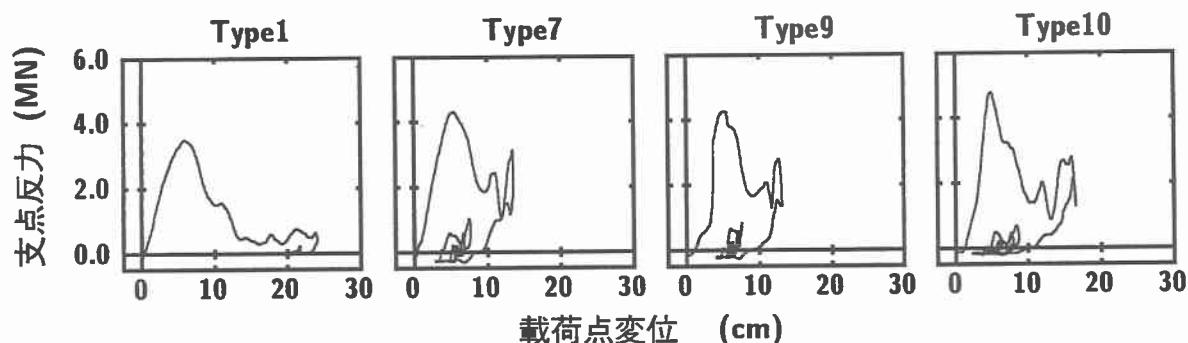
た加速度波形に重錘質量を乗じて求めたものである。また、支点反力波形は両支点反力波形の時間軸を一致させて単純に加え合わせたものである。

重錘衝撃力 P は、いずれの試験体も継続時間が 10 ms 程度の 2 つの正弦半波が連なった分布性状を示している。また、Type7, 9, 10 に関しては、2 波目の直後に振幅の小さい波形が形成されている。これらの波形は、後述の載荷点変位波形の波形性状からも明らかのように、試験体の応答と重錘の相互作用によって発生するものと推察される。

支点反力波形 R は、いずれの試験体においても重錘の衝突時点より若干遅れて励起している。これは載荷点からの波動伝播差によるものと考えられる。また、支点反



図－3 重錘衝撃力，支点反力，載荷点変位の時系列応答波形図 ($m = 3,000 \text{ kg}$, $h = 22.5 \text{ m}$)



図－4 支点反力－載荷点変位履歴曲線 ($m = 3,000 \text{ kg}$, $h = 22.5 \text{ m}$)

力波形は重錘衝撃力波形の正弦半波に高周波成分が合成されたような分布性状を示しており，その継続時間は3波を含めた重錘衝撃力波形の継続時間とほぼ対応している。

載荷点変位波形 δ は，支点反力波形と同様にいずれの試験体も重錘衝突から若干遅れて励起している。荷重除荷後の変位は，緩やかな減衰自由振動状の波形を示している。Type 7, 9, 10 の各応答波形は3者ほぼ同様な分布性状を示しているものの，Type 1 の場合は重錘衝撃力および支点反力波形の2波目以降の形状が他の3試験体の場合と大きく異なっている。これは，載荷点変位波形からも明かなようにこの時点でせん断破壊により大きな残留変位を生じ，終局に至ったためと推察される。

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示している。

Type 1 については底面の広い三角形状の履歴曲線を示しており，せん断破壊に至っていることが確認できる。

Type 7, 9, 10 では緊張比や下端筋鋼材の種類，本数が異なるため履歴曲線の形状が各試験体で若干異なっている。Type 10 の履歴曲線は単純な三角形状の分布性状を示しているものの，除荷後は変位の小さい状態で振動傾向を示しており，未だ終局に至っていないことがわかる。

3.3. 最大変位，残留変位およびエネルギー吸収量

表－3には最大変位，残留変位およびエネルギー吸収量を示している。ここで，エネルギー吸収量は，図－4における履歴曲線の正載荷状態（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。

現行設計法に基づいた基準試験体である Type 1 は，せん断破壊により残留変位が20 cm以上を示したのに対して，他の3試験体はいずれも残留変位が破壊基準値を多少超えた程度を示し，前述のように未だ限界耐力に至っていないことがわかる。Type 1 を除く3試験体について比較すると，下端筋鋼材として総ネジPC鋼棒を用い桁高を65 cmと他のタイプに比較して25 cm低減し，かつ曲げ耐力，せん断耐力をType 1と同程度に設

表-3 実験結果の最大変位，残留変位およびエネルギー吸収量一覧

試験体	最大変位 δ_{max} (cm)	残留変位 δ_r (cm)	エネルギー吸収量 E_s (kJ)
Type 1	24.2	21.5	303.2
Type 7	13.7	6.3	311.0
Type 9	13.4	6.5	256.7
Type 10	16.6	6.8	325.2

定した Type 10 の場合は，最大変位，残留変位，とも 3 者間で最も大きいものの限界耐力に至っていないことから，最も効率的な断面になっているものと判断される。また Type 7 と Type 9 の比較より，最大変位は緊張率を 0.8 とし，下端異形鉄筋を 2 段配筋とした Type 9 の場合が小さいものの，残留変位は Type 7 が小さく，また後述するひび割れ損傷の程度からも Type 7 が耐衝撃的に優れているものと推察される。

3.4. 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。いずれの試験体も載荷点に向かう斜めひび割れが発生しており，せん断破壊型の傾向を示していることが確認できる。

緊張比のみ異なる Type 1 と Type 7 を比較すると，Type 1 は，上縁から下縁方向に貫通するひび割れが大きく開口し終局に至っている。一方，緊張比が 0.5 である Type 7 の場合には中央部にひび割れが集中するものの緊張比を低減したことによって桁全体で衝撃荷重に抵抗するため，桁全体にひび割れが分散しており，未だ終局に至っていないことがわかる。これより，曲げ耐力，せん断余裕度が同程度の場合には，緊張比を 0.5 程度に低減することにより，耐衝撃性を向上させることが可能であることがわかる。

次に緊張比が 0.5 である Type 7 と緊張比が 0.8 で下端筋鋼材本数が Type 7 の 2 倍配筋されている Type 9 を比較すると，Type 9 の場合は桁中央部にひび割れが集中する傾向を示しているのに対して，Type 7 の場合には上述のようにひび割れ間隔が大きいもののひび割れが桁全体に分散分布しており桁全体で衝撃荷重に抵抗していることがわかる。また，損傷の程度も Type 7 が軽微であり，下端異形鉄筋量を増加させることによって，桁の耐衝撃性が向上しないことがわかる。

Type 10 は，下端筋鋼材として総ネジ PC 鋼棒を用いて，曲げ耐力を Type 7 と同程度にするために桁高を 65 cm に低減した場合である。そのひび割れ分布性状は，Type 7 に比較してひび割れ間隔も小さくかつ分散性も向上していることがわかる。また，載荷点近傍部においてコンクリートの剝落している部分も見られるが，角折れも生じず，未だ終局に至っていないことがわかる。これより，総ネジ PC 鋼棒を用いることにより，断面の小型化が可能となる Type 10 は，Type 7 に比較してもよ

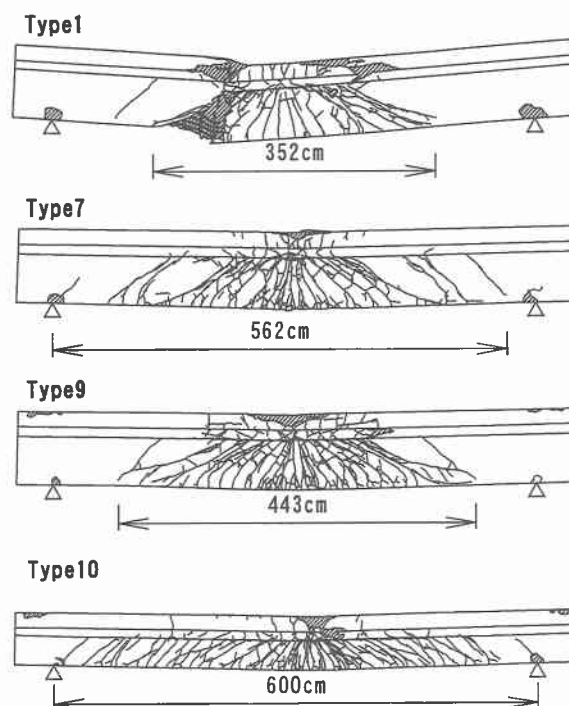


図-5 ひび割れ状況

り効率的な断面であるものと判断される。

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) PC 道路防災構造物マニュアルに基づき下端異形鉄筋を 2 段配置する場合よりも，下端筋として総ネジ PC 鋼棒を配置する場合の方が，ひび割れが桁全体に分散し，耐衝撃性に優れている。
- 2) 現行設計法に基づく PRC 桁に対して，緊張比を 0.5 に低減することによって，終局時までの靱性能を向上でき，より大きな落石に対処可能である。
- 3) 現行設計法に基づく PRC 桁に対して，せん断余裕度を同程度とする条件下で，PC 鋼材の緊張比を 0.5 程度に低減し下端筋鋼材を高強度材料である総ネジ PC 鋼棒とする場合には最も耐衝撃性に優れ，桁高が同じ場合にはより大きな落石に対応可能である。また，同じ落石荷重に対しては桁高を縮小できるためコスト縮減が可能である。

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
- 4) 北海道土木技術会 コンクリート研究委員会：PC 道路防災構造物マニュアル，2001.3