

各種大型 PRC 桁の耐衝撃挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Impact Resistant Behavior
of Prototype PRC Beams

今野久志* 岸 徳光** 池田憲二*** 竹本伸一****

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

* 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)

** 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)

*** 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)

In order to establish an impact resistant design method on Prestressed Reinforced Concrete (PRC) type rock-sheds, prototype weight falling impact test is conducted for five kinds of PRC beams. Here, tensioning ratio per one PC strand, volume of PC strands, and rebar volume are taken as variables. In this paper, using two ton steel weight, two kinds of loading methods are applied which are: iterative loading method with initial 1 m falling height and increment of 2.5 m falling height; and single loading method with the same height to the final one of the iterative loading. Results obtained from these experiments are as: 1) the load-displacement hysteresis loop for all types considered here forms an isosceles triangle which means that PRC beams tends to be collapsed with shear-failure mode; 2) the PRC beam prestressed with 50 % tensioning ratio has the best impact resistant performance among all types considered here; and 3) upgrading of impact resistant capacity cannot be expected by increasing rebar ratio.

Key Words: PRC beams, Impact load, PC Rock-shed, rock falling

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 覆工が用いられることが多い。この中で、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。このような背景のもと、筆者らはこれまでに PC 製の単桁試験体や道路軸方向に横締めを行った多主桁試験体に対する衝撃荷重載荷実験¹⁾、さらには柱や下部構造を含めた形での実規模 PC 覆工模型を用いた各種衝撃荷重載荷実験を行い^{2),3),4)}、単桁の耐衝撃性状や、多主桁とする場合の荷重分担率や動的応答倍率、さらに覆工構造とした場合の構造形式の違いによる耐衝撃挙動や終局耐力に関する検討を行っており、現行の PC 覆工に対する合理的な耐衝撃設計手法を確立しつつある。

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⁵⁾。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^{6),7)}、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て行われたものであり、大型模

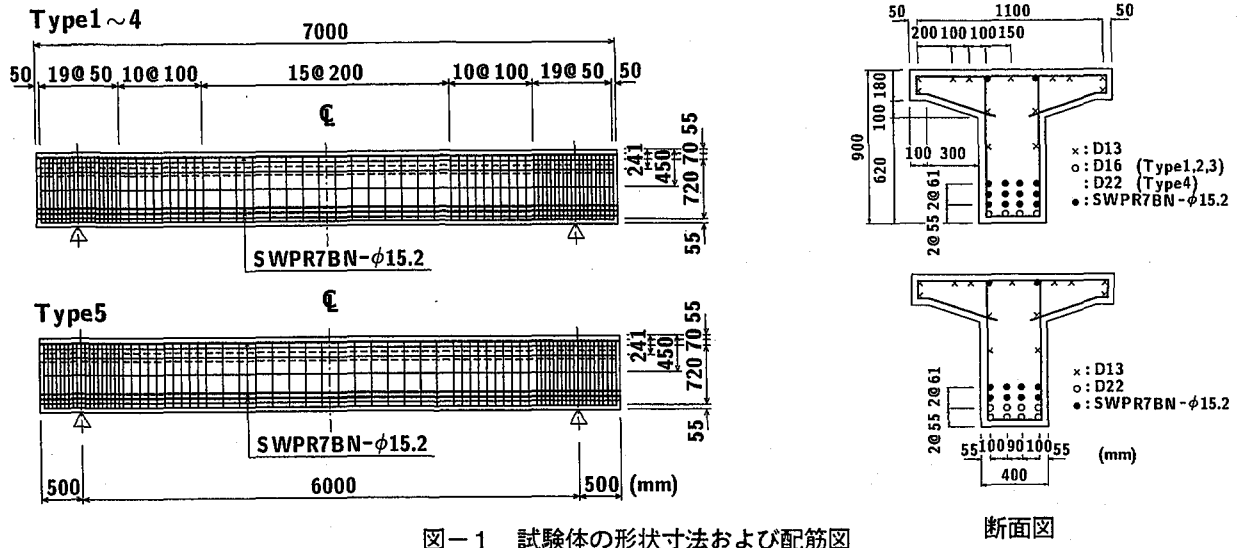


図-1 試験体の形状寸法および配筋図

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 |

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 PRC 桁模型を用いた実験結果を基に、PRC 部材の実 PC 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、PC 鋼材量、異形鉄筋量を変化させた実規模 PRC 桁を製作して第 1 段階として静載荷実験を実施した⁸⁾。本研究は同一のパラメーターで製作した PRC 桁に関し、3 ton の重錘を用いた重錘落下衝撃実験を行い、各試験体に関する耐衝撃性を実験的に検討を行ったものである。なお、静載荷実験結果より、後述のように下縁異形鉄筋量の増加によるひび割れ分散幅の改善の他、PC 鋼材の緊張率を減少させることによって、せん断耐力も低減され、桁が曲げ破壊型からせん断破壊型に移行するため吸収エネルギー量が減少し、桁の靱性が乏しくなることが明らかになっている。本論文では、このような静載荷実験結果を踏まえ、考察を行うこととする。

2. 実験の概要

2.1 試験体

実験に使用した試験体は、前述のように全長 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-φ 15.2 (公称断面積 138.7 mm²) である。この PC 鋼より線の公称引張荷重、降伏点荷重はそれぞれ 261 kN、222 kN であり、使用状態における許容緊張力は 155 kN である。また、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 0.217 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。また、換算鋼材比は、コンクリート内の鋼材量を表す指標であり、鋼材過多による脆性破壊の防止に対する指標として使用されている。現在実際に施工されている落石覆工用標準設計 PC 桁の換算鋼材比は 0.0128~0.0256 程度の範囲に分布しており⁹⁾、本試験体の換算鋼材比は 0.016 程度で上記範囲内の値となっている。表中の試験体名は、PC 鋼材の緊張率、異形鉄筋径および本数の順に並べ記号化している。

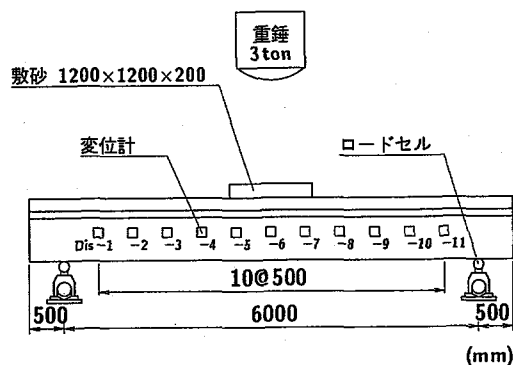


図-2 実験概要図

表-2 実験ケース

| 試験体名 | 落下高さ H (m) | |
|--------|--|------|
| | 繰り返し載荷 | 単一載荷 |
| Type 1 | 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 | 12.5 |
| Type 2 | 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, (15.0) | 15.0 |
| Type 3 | 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, (10.0) | 10.0 |
| Type 4 | 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, (12.5) | 12.5 |
| Type 5 | 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 | 10.0 |

表-3 断面分割法による静載荷時の解析結果一覧

| Type | Type 1 | Type 2 | Type 3 | Type 4 | Type 5 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 総緊張力 (kN) | 1867.2 | 947.3 | 466.8 | 1867.2 | 1333.7 |
| 初期上縁ひずみ (μ) | 20 | 10 | 5 | 19 | 1 |
| 初期下縁ひずみ (μ) | -183 | -93 | -46 | -181 | -108 |
| 下縁コンクリートひび割れ発生荷重 (kN) | 731.6 | 459.0 | 260.9 | 751.4 | 529.6 |
| 下縁鋼材降伏荷重 (MN) | 1.16 | 0.82 | 0.61 | 1.29 | 1.22 |
| 曲げ耐力 (MN) | 1.63 | 1.63 | 1.63 | 1.79 | 1.59 |
| せん断耐力 (MN) | 1.87 | 1.35 | 1.08 | 1.93 | 1.56 |
| せん断余裕度 | 1.15 | 0.83 | 0.66 | 1.08 | 0.98 |
| 静載荷時の最大荷重 (MN) | 1.76 | 1.70 | 1.64 | 1.90 | 1.72 |

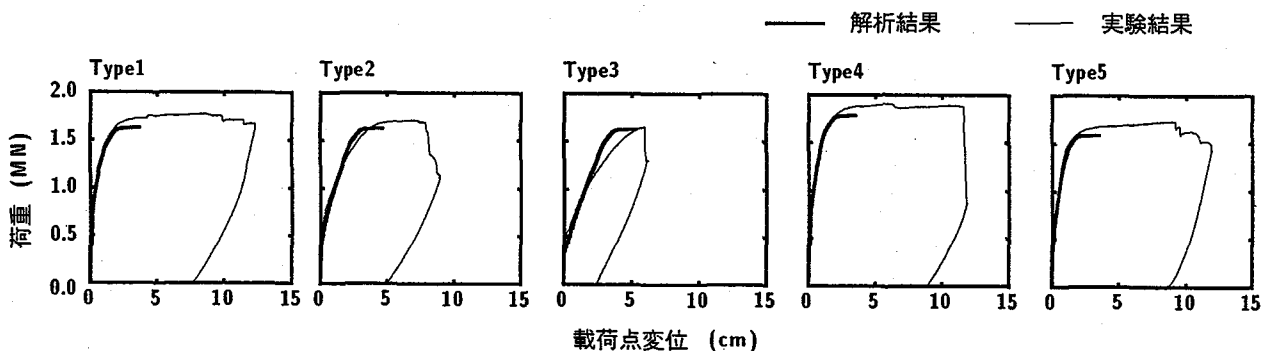


図-3 静載荷時の荷重-変位曲線

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6mとし、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。衝撃力は質量が3ton、直径1m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120cm×120cm、厚さ20cmの敷砂を設置している。実験は、最初に落下高さ1mからの実験を行い、その後高さを2.5mから2.5m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。また、本実験は落石覆工の構造部材を想定して

いることより、実現象により近い単一載荷実験も行っている。単一載荷実験の落下高さは、繰り返し載荷実験において桁が終局に至ったときの落下高さとした。桁の破壊基準は当初残留変位量が純スパン(6m)の100分の1(6cm)に達した時点と定義したが、目視によりフランジ部分の剝離等、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。測定項目は重錘加速度、両支点反力、50cm間隔毎の変位である。また、各載荷実験終了毎にひび割れ状況を記録している。なお、各変位はストローク200mm、応答周波数915Hzのレーザ式変位計を用いて測定している。

表-2に実験ケースの一覧を示している。表中の繰り返し

返し載荷実験における括弧付きの実験ケースは、試験体下縁コンクリート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. 静載荷時の実験結果の概要

表-3には断面分割法を用いて評価した初期の上下縁ひずみ、各段階の荷重および曲げ耐力、さらにコンクリート標準示方書に基づいたせん断耐力、せん断余裕度および静載荷時の最大荷重を一覧にして示している。ここでせん断余裕度は曲げ耐力に対するせん断耐力の比として定義している。なお、断面分割法の分割数は177とし、各材料の応力-ひずみ関係は材料試験結果およびコンクリート標準示方書に従って決定している。表より、Type 2, 3のせん断余裕度は緊張力の低減により0.83, 0.66と1.0より小さいことがわかる。図-3には、スパン中央点載荷時の荷重-変位曲線を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、断面分割法によって大略耐力を評価可能であることがわかる。また、Type 1~Type 3の実験結果を比較すると、せん断余裕度の減少とともに最大変位も小さくなり、せん断破壊モードの影響が現れていることを示唆している。

4. 繰り返し載荷実験結果と考察

4.1 応答波形

図-4には、Type 1, 2試験体の繰り返し載荷実験における重錘衝撃力、合支点反力（両支点反力を足し合わせた値、以後単に支点反力）、載荷点変位の時系列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た加速度波形に重錘質量を乗じて求めたものであり、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。

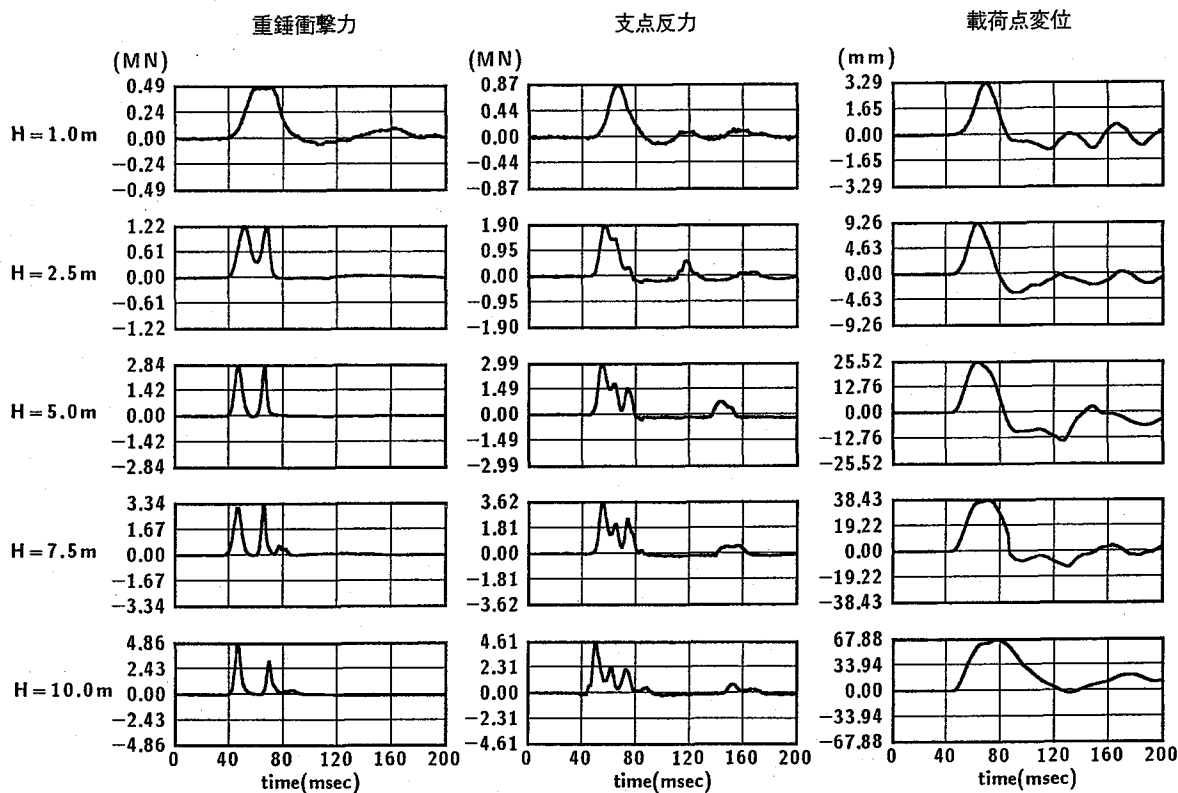
(a) 図のType 1の結果について考察すると、重錘衝撃力波形は、落下高さが $H=1\text{ m}$ の場合には主波動の継続時間が40~50 ms程度の独立した1波で示されているが、落下高さ $H=2.5\text{ m}$ 以降の波形は2つの正弦半波の波が連なった分布性状を示している。それらの波形は落下高さの増大とともに分離していく傾向にあり、落下高さ $H=10\text{ m}$ の場合には完全に独立した2波の波形から成り立っている。 $H=1\text{ m}$ における1波の波形は、落下高さが小さいため敷砂の締め固まり度も小さくかつ桁断面方向の応答も小さいことより、主に重錘が敷砂を介して桁に衝突することによってのみ衝撃力が励起されるためと推察される。一方、落下高さが $H\geq 2.5\text{ m}$ の場合の2波形は、重錘が敷砂を介して桁に衝突する際に衝撃力が発生するが、桁断面方向の応答が落下中の重錘と相互に干渉し一旦除荷状態になるものの未だ重錘が落下中であることにより2波目の衝撃力波形が形成されたも

のと推察される。落下高さの増大とともに2波目の1波目からの分離や振幅が小さくなる傾向は、入力エネルギーの増大によって桁の損傷が大きくなり、吸収エネルギーが大きくなることや断面方向の応答が遅延することによるものと推察される。

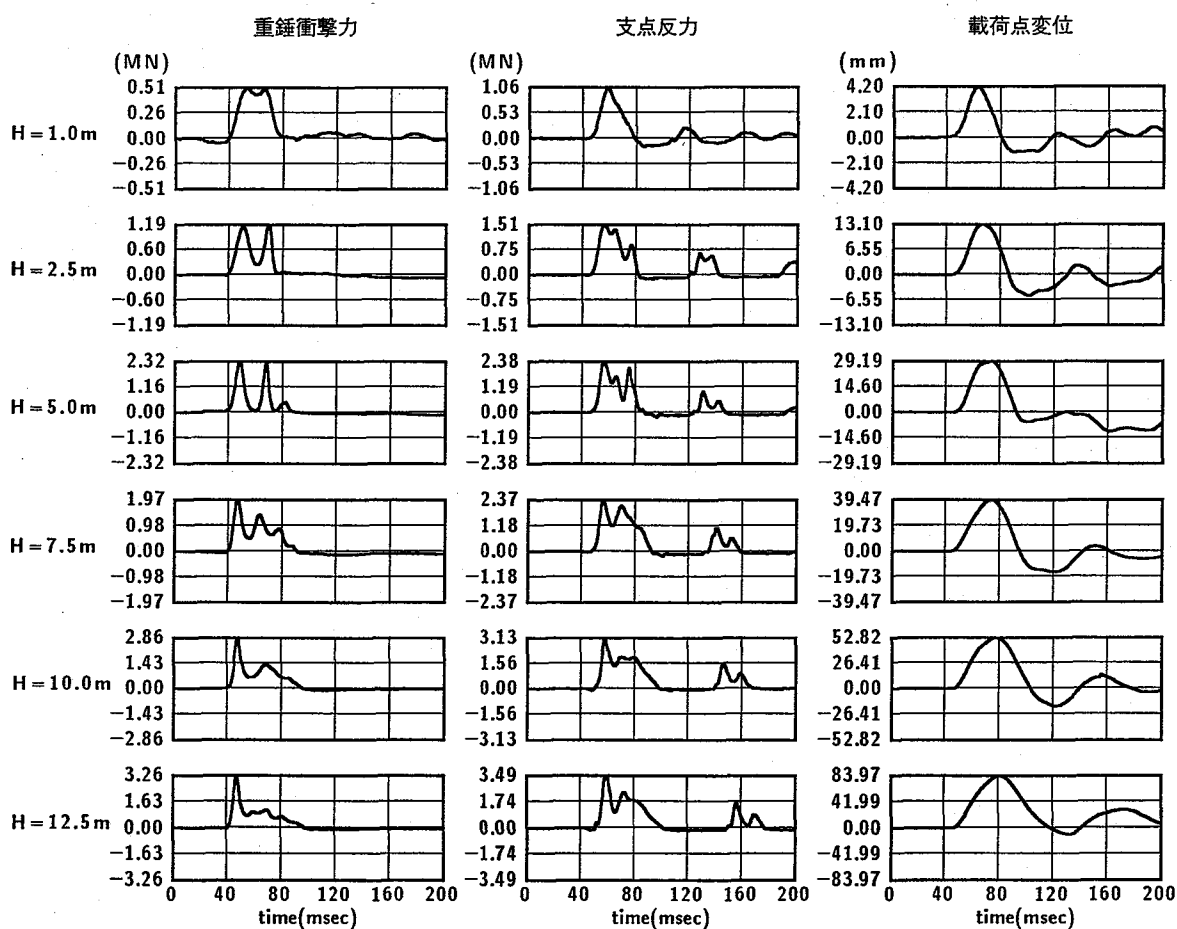
支点反力波形は、重錘の衝突時点より若干遅れて励起している。これは載荷点からの波動伝播差によるものと考えられる。各落下高さにおける主波動を比較すると、落下高さが小さい場合には正弦半波的な波形を示しているが、落下高さの増大とともに高周波成分が励起されている。支点反力の継続時間は2波を含めた重錘衝撃力のそれとほぼ対応している。また、主波動終了後には落下高さの小さい段階では自由振動的な性状を示しているが、落下高さの増大とともに小振幅の正弦半波波形以外は出現していない。これは、変位波形からも明らかのように、主波動終了後に主桁が自由振動状態に移行するものの、主桁が負荷状態時に支点を上方に押し上げようとすることより、支点部ロードセルが無負荷状態となり直流成分のみの波形になるためと推察される。なお、直流成分が負の値を示しているのは、リバウンド防止のために実験開始前に支点部をボルト締めしていることによるものである。

載荷点変位波形は、支点反力波形と同様に重錘の衝突から若干遅れて励起している。荷重除荷後の変位波形は、落下高さが小さい段階では比較的周波数が高く、かつ小さな振幅で振動している。また、落下高さの増大とともに試験体の損傷が進行し桁の剛性が低下することから、主波動を含め各波形の継続時間が長くなっていることがわかる。最大変位発生時間と最大支点反力発生時間を比較すると、落下高さの小さい場合($H=1\text{ m}$)には両者ほぼ同一時点であることを示しているが、落下高さが $H\geq 2.5\text{ m}$ の場合には前者が後者より遅れて発生しており、その差は落下高さの増大とともに大きくなっている。この現象は両者がほぼ同一時点に発生している過去の曲げ破壊型を示す小型矩形断面やT型断面桁に関する実験結果と異なっている^{6),7)}。この違いは、破壊モードが曲げ破壊型と異なっている可能性のあることを示唆している。

(b) 図のType 2の重錘衝撃力波形分布を見ると、落下高さ $H=5\text{ m}$ まではいずれの波形もType 1と類似の分布性状を示している。しかしながら、落下高さが $H\geq 7.5\text{ m}$ では継続時間が60 ms前後の連続した波形を形成している。落下高さ $H=7.5\text{ m}$ 時点では主波動上に3波の高周波成分が出現しているが、その後落下高さの増大とともに1波目を除き、2波目と3波目が合成されて1波の低周波成分となっている。これは、支点反力波形や変位波形からも明らかのように、落下高さ $H\geq 7.5\text{ m}$ ではひび割れ等の塑性化の進行によって主桁の断面方向の応答と重錘落下時の挙動が同調する傾向を示し衝撃力が緩和されるためと推察される。支点反力波形を見ると、



(a) Type 1



(b) Type 2

图-4 重錘衝擊力, 支点反力, 載荷点变位波形图

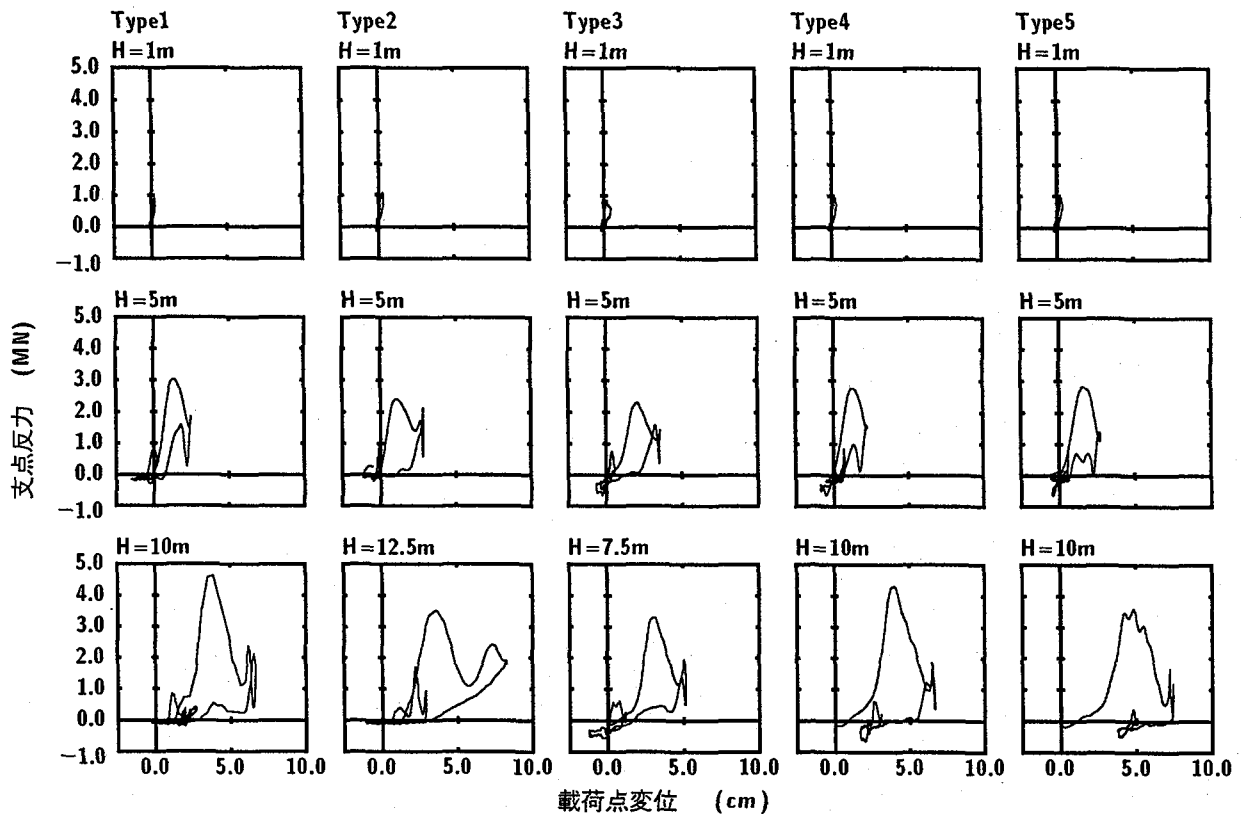


図-5 支点反力-載荷点変位曲線 (繰り返し載荷実験)

自由振動状態における波形の振幅は Type 1 の場合より大きく示されている。これは変位波形からも明らかなように主桁が交番する振動状態となっていることより、重錘のリバウンドや主桁の慣性力も大きくなり、結果的に大きな支点反力が励起されたものと考えられる。なお、ここでは示していないが Type 3 ~ Type 5 は Type 1 と類似な波形分布性状を示していることを確認している。これは、緊張率 100 % である Type 1, 4, 5 の場合にはひび割れが発生するもの見かけ上曲げ剛性が大きいことより、衝撃力を効率よく緩衝するなどの振動状態に至らないこと、また緊張率 25 % である Type 3 の場合はプレストレス量が少ないことより、初期の段階からひび割れが発生し曲げ剛性が低下するため、結果的に衝撃を効率的に緩和するような振動状態に至らないためと考えられる。従って、本実験の場合には緊張率 50 % (Type 2) の状態において主桁の曲げ振動により重錘衝撃力を効率よく緩衝することがわかる。

4.2 支点反力-載荷点変位関係

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、支点反力と載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

表-4 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

作用状態で発生し、波形が複雑で高周波である。2) 図-4 に示されるように、重錘衝撃力波形は支点反力や載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) 支点反力波形と載荷点変位波形の主波動が類似していることより、支点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点反力を用いることとした。

図-5 は、繰り返し載荷実験における落下高さ $H=1$ m, 5 m および最終落下高さにおける支点反力-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-4 に各実験ケース

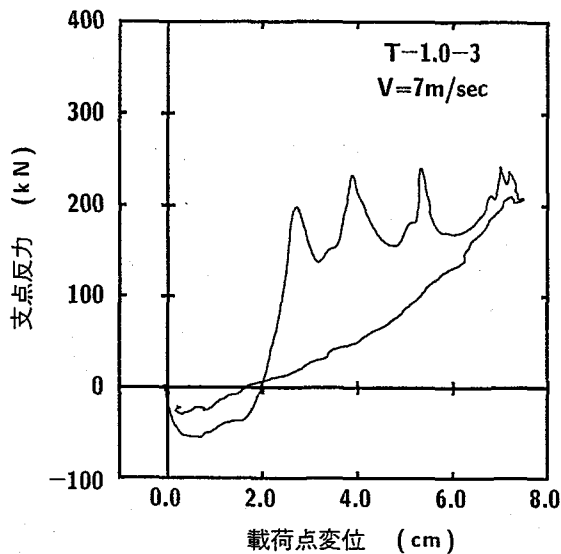


図-6 最終落下時支点反力-載荷点変位曲線⁷⁾

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 $H = 1 \text{ m}$ 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 $H = 5 \text{ m}$ 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-4 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 $H = 12.5 \text{ m}$ 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。

履歴曲線分布形状について考察すると、曲げ破壊型小型 T 型 PRC 桁に関する最終落下時荷重-変位履歴曲線は、図-6 に示すようにほぼ逆三角形形状の分布となっている⁷⁾。また、せん断破壊型 RC 梁に関する重錘落下

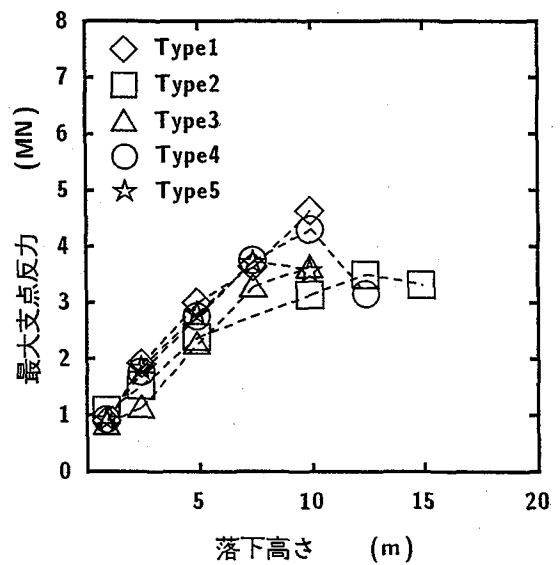
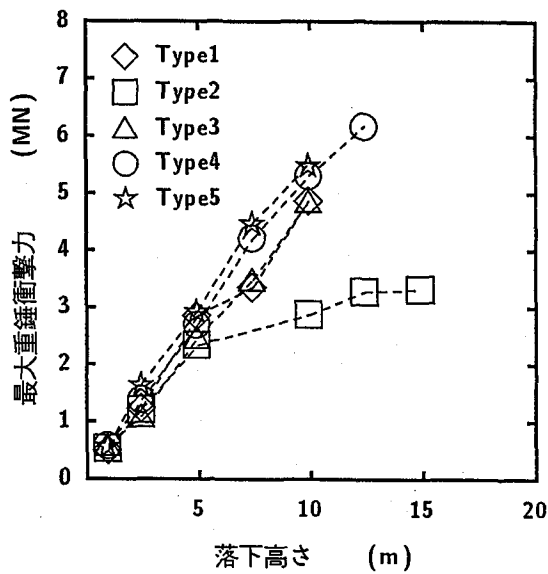
衝撃実験結果の履歴曲線は本実験結果と類似の三角形分布となっている¹⁰⁾。さらに静載荷実験結果より、緊張率を減少させることによって破壊モードが曲げ破壊型からせん断破壊型に移行することも明らかになっている。以上のことを考慮すると、本実験結果は静的せん断余裕度が 1.0 以上の場合も含めいずれの場合も終局時にせん断破壊型の履歴特性を示していることがわかる。

表-4 より吸収エネルギー量を比較すると、落下高さが $H = 7.5 \text{ m}$ 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 $H = 10 \text{ m}$ の場合では、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 $H = 10 \text{ m}$ 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-8 (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 $H = 7.5 \text{ m}$ 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 $H = 10 \text{ m}$ では累積残留変位（図-8 (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。

4.3 重錘衝撃力および支点反力

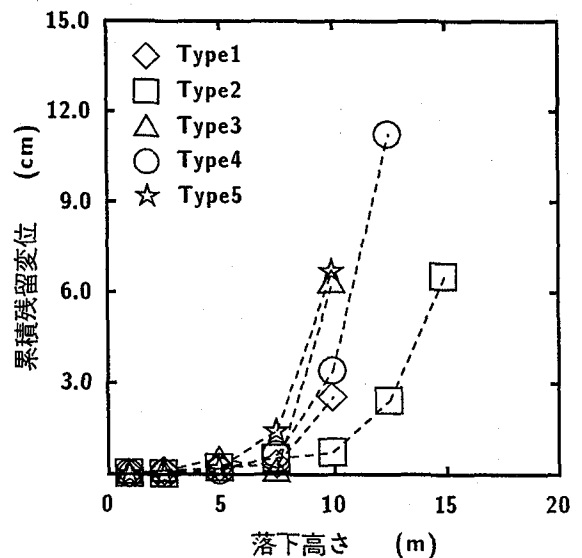
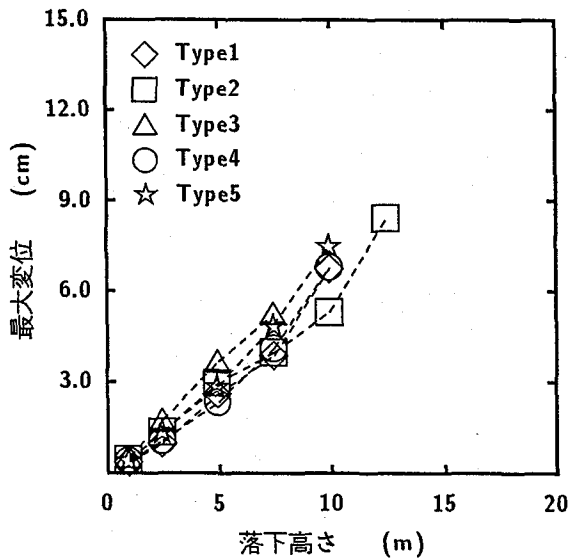
図-7 は、実験結果の最大重錘衝撃力および最大支点反力と落下高さの関係を示している。図より、最大重錘衝撃力は Type 2 試験体を除いて落下高さの増大とともにほぼ線形に増加していることがわかる。Type 2 試験体の最大重錘衝撃力は落下高さ $H = 5 \text{ m}$ までは他の試験体と同様な増加傾向を示しているが、それ以降では増加の傾きが減少し、落下高さ $H = 12.5 \text{ m}$ 以降ではほぼ一定値となり終局に至っている。これは重錘衝撃力波形等



(a) 最大重錘衝撃力

(b) 最大支点反力

図-7 最大重錘衝撃力および最大支点反力



(a) 最大変位

(b) 累積残留変位

図-8 最大変位および累積残留変位

に関する考察で述べたように、ひび割れによる塑性化の進行によって適度な自由振動状態が励起され効率的に衝撃力が緩和されるためと考えられる。

最大支点反力に関しては、各試験体とも落下高さの増大とともに増加し、Type 1を除いて桁が終局に至った落下高さにおいて増加の傾きが減少、あるいは反力値が前段階よりも小さな値を示している。特に、終局時に著しく支点反力が減少する現象は、載荷点部が圧壊して終局に至る場合や、貫通する斜めひび割れの発生によってPC鋼材や異形鉄筋のみが衝撃力に抵抗し、変形による吸収エネルギー量が増大して支点到衝撃力が十分伝達されないために発生するものと考えられる。Type 2に関

しては、前述の重錘衝撃力分布と同様の分布性状を示している。これは、せん断破壊型の支点反力-変位履歴曲線を示すもののせん断破壊よりも、載荷点部が大きく圧壊せずに曲げ引張破壊型で終局に至る傾向であることを暗示している。

4.4 最大変位および累積残留変位

図-8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、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。

4.5 ひび割れ状況（繰返し載荷実験）

図-9 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

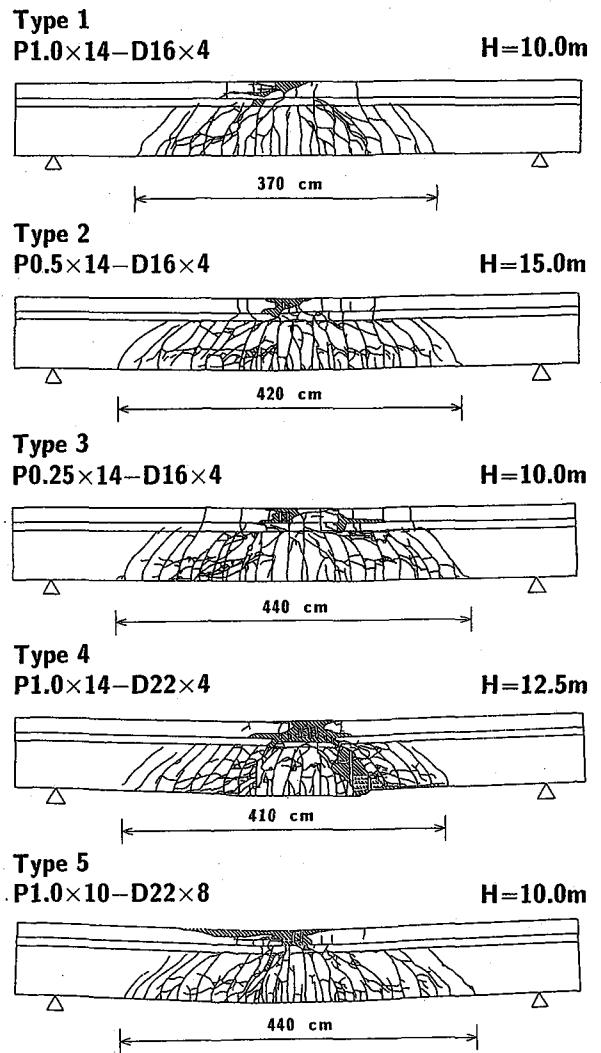


図-9 ひび割れ状況（繰返し載荷実験）

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。

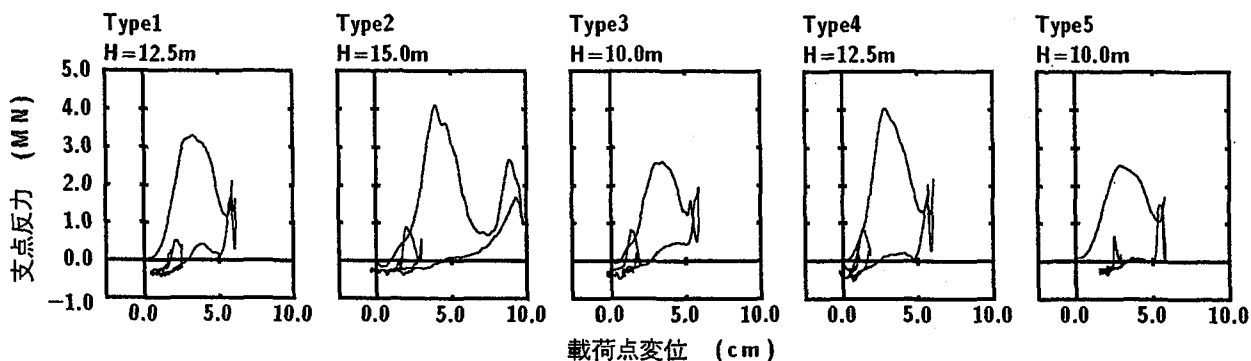


図-10 支反力-載荷点変位曲線(単一載荷実験)

表-5 実験結果の最大変位, 残留変位および吸収エネルギー一覧

| 試験体 | 繰り返し載荷 | | 単一載荷 | | | |
|--------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | 落下高さ H (m) | 残留変位 δ_r (cm) | 落下高さ H (m) | 最大変位 δ_{max} (cm) | 残留変位 δ_r (cm) | 吸収エネルギー E_a (kJ) |
| Type 1 | 10.0 | 2.2 | 12.5 | 6.2 | 2.1 | 95.0 |
| Type 2 | 15.0 | 4.5 | 15.0 | 9.8 | 3.3 | 133.4 |
| Type 3 | 10.0 | 6.2 | 10.0 | 6.0 | 1.7 | 65.3 |
| Type 4 | 12.5 | 7.8 | 12.5 | 6.1 | 1.8 | 107.2 |
| Type 5 | 10.0 | 5.3 | 10.0 | 5.9 | 2.9 | 75.4 |

5. 単一載荷実験結果と考察

5.1 支反力-載荷点変位曲線

繰り返し荷重載荷実験の場合と同様に、支反力と載荷点変位波形を用いた履歴曲線を図-10に示している。図より、落下高さの大きい Type 2, 4 の場合には大きな支反力値および鋭い三角形形状の履歴曲線を示していることより、せん断ひび割れが卓越しているものと推察される。一方、他 Type 1, 3, 5 の場合には最大支反力近傍部で丸みをおびた履歴曲線を呈し、支反力も小さいことより、せん断ひび割れの他、曲げひび割れの割合も多くなっているものと考えられる。また、Type 2 の履歴曲線は繰り返し載荷実験と同様、第2ピークの支反力発生時には載荷点変位も対応して挙動する特性を示しており、効率的に衝撃力を緩和していることがわかる。これに対して他の結果は、支反力の第2ピーク発生時に載荷点変位が変化せず、重錘が敷砂を介して主桁に衝突する時の衝撃力を吸収できないことを示している。これより、繰り返し載荷実験結果同様 Type 2 が最も耐衝撃性に優れているものと推察される。

5.2 最大変位および残留変位

表-5には、単一載荷実験における最大変位、残留変位、吸収エネルギー量を整理している。なお、比較のため繰り返し載荷実験結果の最終落下高さ時残留変位も示している。ただし、Type 1 の結果は単一載荷実験の場合と落下高さが異なる。表より、単一載荷時の場合には、

には、いずれの場合も当初の終局規定である 6 cm の残留変位に至っていないことがわかる。また、繰り返し載荷実験結果と比較すると、いずれの場合も繰り返し載荷の場合の値が大きいことより、繰り返し載荷によって損傷が蓄積されていることがわかる。

落下高さの等しい Type 毎の耐衝撃性を吸収エネルギー量から比較すると、落下高さが $H=12.5$ m である Type 1 と Type 4 の場合は、異形鉄筋量の少ない Type 1 の方が吸収エネルギー量が少なく耐衝撃性に優れていることがわかる。これは、異形鉄筋量を多くすることにより、必ずしも耐衝撃性が向上しないことを意味している。また、落下高さが $H=10$ m の場合である Type 3 と Type 5 の場合には、鋼材比がほぼ等しく PC 鋼材量が多いものの、総プレストレス力量が $1/2.8$ と少ない Type 3 の場合が若干吸収エネルギー量が少なく耐衝撃性に優れている。このことより、鋼材比が等しい場合には、総プレストレス力量の大小に関わらず、PC 鋼材量の多い場合が耐衝撃性に優れていることがわかる。

5.3 ひび割れ状況(単一載荷実験)

図-11には、単一載荷実験終了後の各桁のひび割れ状況を示している。いずれの試験体も繰り返し載荷実験結果に比較して損傷の程度が小さい。図より、落下高さがより高く、荷重-変位履歴曲線が鋭い三角形形状を示す Type 2, 4 の結果を見ると、いずれ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

ていることを確認できる。緊張率が 100 % と等しく、異形鉄筋量が異なる Type 1 と Type 4 を比較すると Type 1 の場合は中央部に曲げせん断型のひび割れがスパン中央部に集中しているのに対し、異形鉄筋量の多い Type 4 の場合はひび割れが広く分散しており異形鉄筋のひび割れ分散効果を確認できる。しかしながら、前項で述べているように Type 4 の場合は同一落下高さで吸収エネルギー量が大きく、耐衝撃性が若干劣る結果になっている。緊張率 25 % である Type 3 の場合には、総プレストレス力量が少ないことより粗なひび割れが広く分散して生じている。また、落下高さが $H = 10 \text{ m}$ と同一である Type 5 の結果と比較すると、ひび割れ分散幅は Type 3 が勝っており、かつ載荷点が圧壊していないことより、繰り返し載荷時の実験結果同様 PC 鋼材量の多い場合が総プレストレス力量の大小に関わらず耐衝撃性に優れていることが確認できる。

6. 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、ひびわ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。

繰り返し載荷実験結果：

- 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。

単一載荷実験結果：

- 1) 残留変位量から判断すると単一載荷による損傷度は繰り返し載荷の場合より小さい。
- 2) 支点反力-載荷点変位履歴曲線より、落下高さの大きい場合には鋭い二等辺三角形分布となり、せん断破壊型の傾向を示す。その性状はひび割れ図からも確認できる。

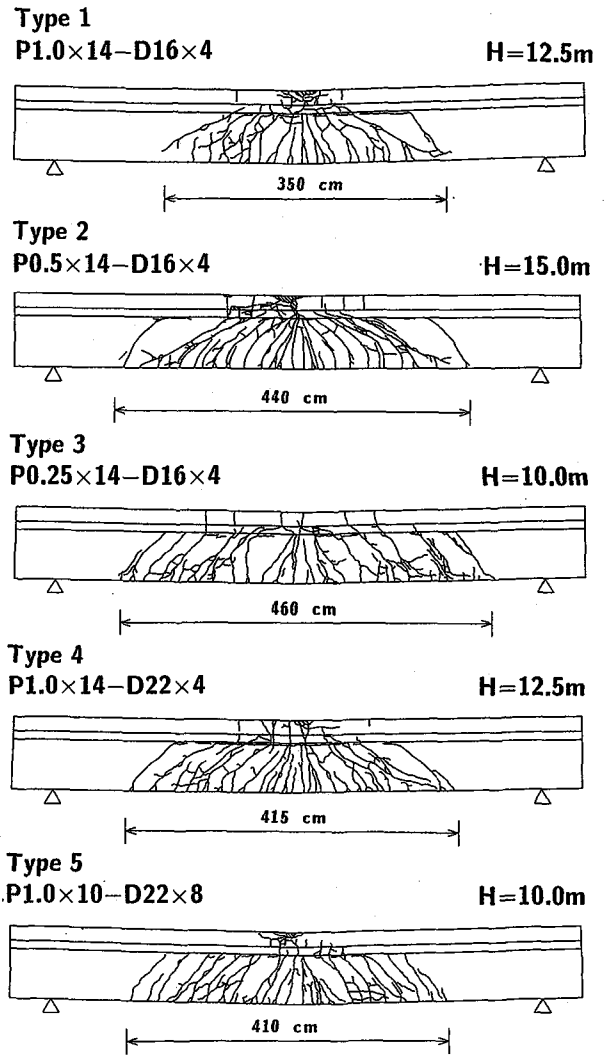


図-11 ひび割れ状況(単一載荷実験)

- 3) その履歴曲線は繰り返し載荷実験における最終載荷時のそれと類似しており、緊張率 50 % の場合が最も耐衝撃性に優れているものと推察される。
- 4) 鋼材比が等しい場合には総プレストレス力量の大小に関わらず PC 鋼材量の多い場合が耐衝撃性に優れている。

総合して：

従来までの基準に基づいて設計された 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果的に耐衝撃性を向上させることができ、その割合は、入力エネルギー的に 10 ~ 20 % 程度であるものと推察される。

本実験桁は、実部材を想定して製作されたものであるが静的にせん断余裕度が 1.0 以上の場合でも落下高さが大きい場合には曲げ破壊よりもせん断破壊が卓越することが明らかになった。今後、せん断余裕度と衝撃破壊モードに関し、さらに研究を行う予定である。

謝辞：本論文の作成に当たり、室蘭工業大学建設システム工学科松岡健一教授には、その都度適切なご指導を戴きました。また、同大学建設システム工学科構造力学研究室の学生諸君には多大なご協力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 菅田紀之, 中野 修, 岸 徳光, 三上 浩: PC 多主桁上に設置した新素材を用いた RC 版を有する緩衝構造の緩衝特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.941~946, 1993
- 2) 西 弘明, 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 敷砂緩衝材を用いた実規模 PC 落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.691~696, 1995
- 3) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一: 三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1347~1356, 1996.3
- 4) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一: 実規模 PC 覆工モデルの耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1851~1860, 1998.3
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 今野久志, 佐藤昌志, 竹本伸一, 松岡健一: 各種大型 PRC 桁の静的耐荷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.21, No.3, pp.925~930, 1999
- 9) 建設省土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設協会: PRC 製ロックシェッドの設計法に関する共同研究報告書, 1996.3
- 10) 岸 徳光, 三上 浩, 安藤智啓: せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, No.3, pp.1689~1699, 1999.3

(1999年9月17日受付)