

## AFRP シートで曲げ補強した T 型 PC 梁の重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact tests of flexurally reinforced T-shaped PC beams with AFRP sheet

栗橋祐介\*, 西弘明\*\*, 三上浩\*\*\*, 小室雅人\*\*\*\*, 岸徳光\*\*\*\*\*

Yusuke Kurihashi, Hiroaki Nishi, Hiroshi Mikami, Masato Komuro and Norimitsu Kishi

\* 博 (工), 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット, 講師 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)  
kuri@news3.ce.muroran-it.ac.jp

\*\* 博 (工), 寒地土木研究所 寒地構造チーム, 上席研究員 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

\*\*\* 博 (工), 三井住友建設 (株), 技術開発センター, 上席研究員 (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*\* 博 (工), 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット, 准教授 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)  
\*\*\*\*\* 工博, (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校, 校長 (〒 084-0916 釧路市大楽毛西 2-32-1)

In this study, in order to investigate the impact resistant behavior of PC beams and to develop an effective flexurally reinforcing method for those, falling-weight impact tests of the flexurally reinforced T-shaped PC beams with AFRP sheet were conducted taking with/without bonding FRP sheet, loading method (static and impact loading), and impact velocity as experimental variables. From this study, the following results were obtained: 1) the PC beams suffered by tendon yielding tend to be collapsed easily with slightly increasing impact energy; 2) the deflection of the PC beams can be restrained due to flexurally reinforcing with AFRP sheet; and 3) the AFRP sheet was debonded due to the peeling action of the critical diagonal crack developed in the lower concrete cover near the loading points, irrespective of the loading method.

**Key Words :** PC beam, AFRP sheet, flexural strengthening, falling-weight impact test

**キーワード :** PC 梁, AFRP シート, 曲げ補強, 衝撃载荷実験

## 1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物やプレストレストコンクリート (PC) 構造物の耐荷性能の向上を目的として, コンクリート増厚工法や鋼板接着工法その他, 連続繊維 (FRP) シート接着工法も採用されるようになってきた。一方, 最近では異常気象によって集中豪雨が発生し, 土砂災害が激甚化している。また落石災害の規模も凍結融解作用による岩盤風化も相まって甚大化する傾向にある。落石から人命や交通網を確保するために, 道路に沿って各種落石防護施設が敷設されているが, この種の構造物に関しても, 経年劣化や上述の異常気象に伴う災害の甚大化を未然に防ぐための強靱化が急がれている。

これまで, 著者らは落石防護施設等構造物の耐衝撃挙動や耐衝撃性向上効果を検討するため, RC 梁および版部材に関する重錘落下衝撃実験を実施し, 合理的な耐衝撃設計法を提案するとともに, 前述の FRP シート接着工法による耐衝撃性向上効果を明らかにしてきた<sup>1)~3)</sup>。一方, 落石防護施設の代表的な構造物であるロックシェッドや大規模建造物などに適用されている PC 部材に関しても RC 部材の場合と同様に耐衝撃性の向上が求められている。特に, PC 部材の耐衝撃挙動に関する研究は, これまで種々の研究機

関で実施されているものの<sup>4)~6)</sup>, その耐衝撃性向上法や補強工法に関する研究は, 国内外においてほとんど見当たらないのが現状である。

このような背景より, 本研究では, PC 部材の耐衝撃挙動の解明とその効率的な補強法に関する開発を最終目的に, 無補強および FRP シートで曲げ補強した T 型 PC 梁の重錘落下衝撃実験を行った。検討は, 静载荷実験および漸増繰返し衝撃载荷実験の結果に基づいて行った。なお, FRP シートにはしなやかで高強度かつ高伸び特性を有するアラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用いることとした。

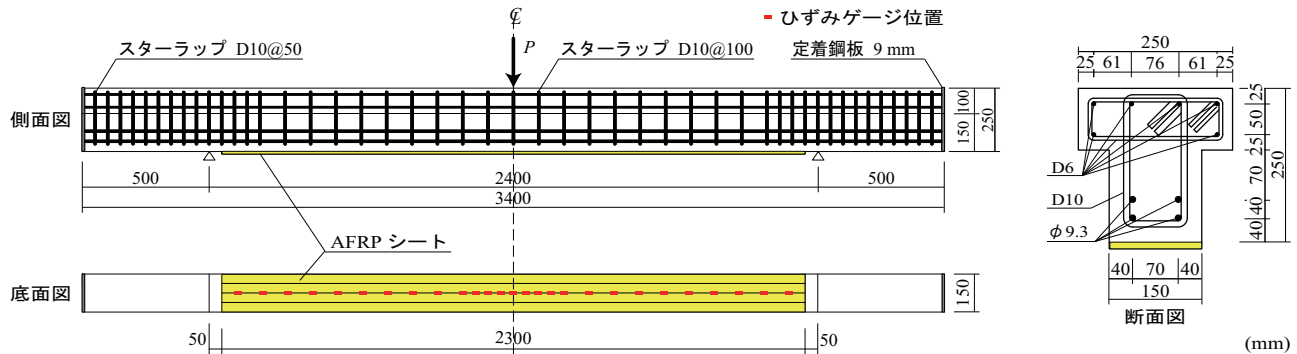
## 2. 実験概要

## 2.1 試験体の概要および材料の力学的特性

表-1 には, 本実験に用いた試験体の一覧を示している。また, 計算曲げ耐力, 計算せん断耐力およびせん断余裕度も併せて示している。ここで, 計算曲げ耐力および計算せん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に準拠して算定した。なお, AFRP シートはせん断耐力の向上に寄与しないものとしている。せん断余裕度は計算せん断耐力を計算曲げ耐力で除した値である。表より, いずれの試験体においても, せん断余裕度が 1.0 を上回っていることから,

表－１ 試験体一覧

| 試験体名 | 補強の有無 | 載荷方法 | 衝突速度<br>V (m/s)  | コンクリート<br>強度 (MPa) | 計算曲げ耐力<br>(kN) | 計算せん断耐力<br>(kN) | せん断<br>余裕度 |
|------|-------|------|------------------|--------------------|----------------|-----------------|------------|
| N-S  | 無     | 静載荷  | -                | 75.5               | 105.6          | 286.7           | 2.71       |
| N-I  |       | 衝撃載荷 | 1, 2, 3, 4, 5, 6 | 72.9               | 104.7          | 285.5           | 2.73       |
| A-S  | 有     | 静載荷  | -                | 69.9               | 168.5          | 284.1           | 1.69       |
| A-I  |       | 衝撃載荷 | 1, 2, 3, 4, 5, 6 | 69.0               | 167.6          | 283.7           | 1.69       |



図－１ 試験体の形状寸法および配筋状況

静載荷時には曲げ破壊によって終局に至る設計となっていることが分かる。

本実験に用いた試験体は、AFRP シート補強の有無や載荷方法を変化させた全 4 体である。載荷方法は静載荷および初速度と増分速度を 1 m/s とする漸増繰返し衝撃載荷である。表中の試験体名のうち、第一項目は AFRP シート補強の有無 (N: 無, A: 有) を示し、第二項目は載荷方法 (S: 静的, I: 衝撃) を示している。

図－１には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた PC 梁の断面寸法は、断面高さが 250 mm、フランジ厚および幅がそれぞれ 100 および 250 mm、ウェブ幅が 150 mm であり、スパン長は 2.4 m である。梁下縁には PC 鋼より線 SWPR7A  $\phi$  9.3 mm を 4 本、上縁のフランジ部には SD295 D6 を 6 本配置した。また、せん断補強鉄筋には SD295 D10 を用い、100 mm 間隔で配置している。ただし、梁両端部には、PC 鋼より線の定着を確保するために 50 mm 間隔で配置した。PC 鋼より線の初期導入緊張力は 57.8 kN/本であり、鋼材の引張強度に対する割合は 58% である。

FRP シートには保証耐力 1,176 kN/m の AFRP シートを用了。AFRP シートは、PC 梁底面の補強範囲にブラスト処理 (処理深さ 1 mm 程度) を施し、プライマーを塗布し指触乾燥状態にあることを確認した後、含浸接着樹脂を用いて接着した。養生は 20°C 程度の環境下で 7～10 日間行った。

表－２には、本実験に用いた AFRP シートの力学的特性値 (公称値) を示している。また、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 69.0～75.5 MPa、PC 鋼より線の降伏強度および引張強度はそれぞれ 1,802 および 1,938 MPa で

表－２ AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

| 目付量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | 保証<br>耐力<br>(kN/m) | 設計厚<br>(mm) | 引張<br>強度<br>(GPa) | 弾性<br>係数<br>(GPa) | 破断<br>ひずみ<br>(%) |
|----------------------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 830                        | 1,176              | 0.572       | 2.06              | 118               | 1.75             |

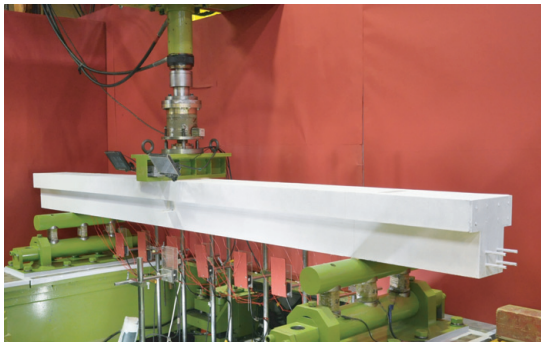
あった。また、異形鉄筋 D6 および D10 の降伏強度は、それぞれ 340, 392 MPa であった。

## 2.2 実験方法および測定項目

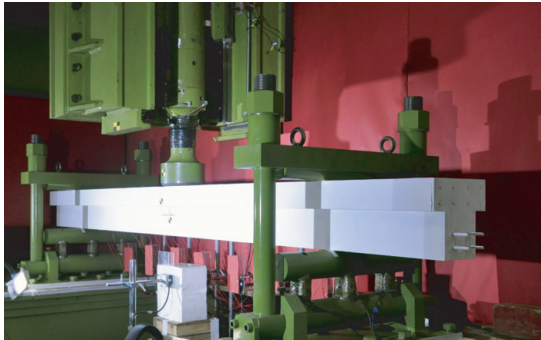
写真－１には、静載荷実験の実験状況を示している。静載荷の場合には梁幅方向に 200 mm、梁長さ方向に 100 mm の載荷板をスパン中央部に設置し、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて載荷した。

写真－２には、衝撃載荷実験の実験状況について示している。梁の両支点部は回転を許容し、浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。衝撃荷重載荷は、質量 400 kg、先端直径 230 mm の鋼製重錘を所定の高さから PC 梁のスパン中央部に自由落下させることにより行った。ここで、落下高さは、事前に行ったキャリブレーション試験結果に基づき、所定の衝突速度となるように調整している。なお、本研究では、梁の終局状態を、既往の RC 梁に関する研究成果<sup>1),3)</sup>に基づき、残留変位がスパン長の 2% に達した状態になるか、もしくは AFRP シートが剥離・破断した状態と定義することとした。

測定項目は、重錘衝撃力 (静載荷の場合は載荷荷重)  $P$ 、合支点反力 (以後、支点反力)  $R$ 、載荷点および梁各点の変



写真－1 静載荷実験状況



写真－2 衝撃載荷実験状況

位(以後、変位)  $\delta$ 、および AFRP シート幅方向中央部の軸方向ひずみである。静荷重の測定は、容量 500 kN の静載荷用ロードセルを用いて行った。重錘衝撃力の測定は、重錘に内蔵した容量が 1,470 kN、応答周波数が DC ～ 4.0 kHz のロードセルを用いて行った。また、支点反力の測定は、容量が 980 kN、応答周波数が DC ～ 2.4 kHz のロードセルを用い、支点治具に内蔵する形で測定している。変位は、容量 200 mm、応答周波数 915 Hz の非接触式レーザ変位計を用いて測定した。実験では、これらの応答波形を広帯域用メモリレコーダを用いて一括収録した。また、本実験では衝撃荷重載荷時における梁の動的挙動を高速度カメラを用いて 2,000 枚/秒で撮影している。実験終了後には、梁の側面を撮影し、ひび割れの状態を観察し記録している。

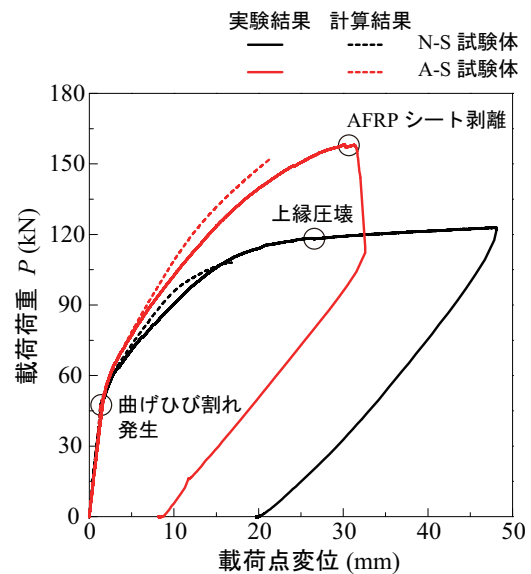
### 3. 実験結果

#### 3.1 静載荷実験結果

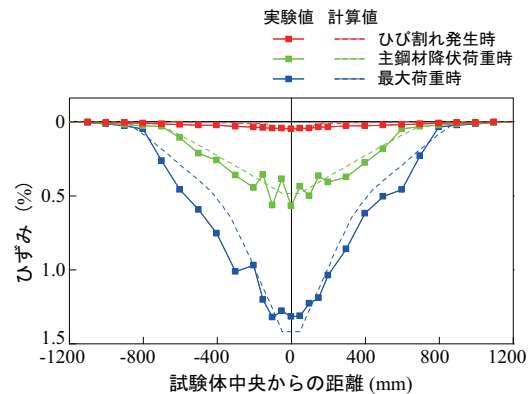
##### (1) 荷重－載荷点変位関係

図－2 には、梁の荷重－載荷点変位関係に関する実験結果および計算結果を比較して示している。なお、計算曲げ耐力は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に準拠して各材料の応力－ひずみ関係を設定し、平面保持およびコンクリートと AFRP シートの完全付着を仮定して断面分割法により算出した。また、計算時における終局状態は、梁上縁コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみ(試験体の平均圧縮強度  $f'_c = 71.8 \text{ MPa}$  時)である  $2,773 \mu$  に至った時点と定義している。

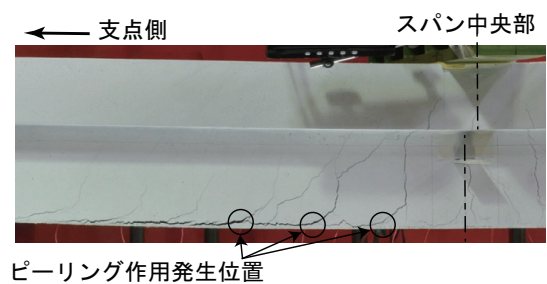
図より、無補強の N-S 試験体の場合には、荷重  $P = 50$



図－2 静載荷実験における荷重－変位関係



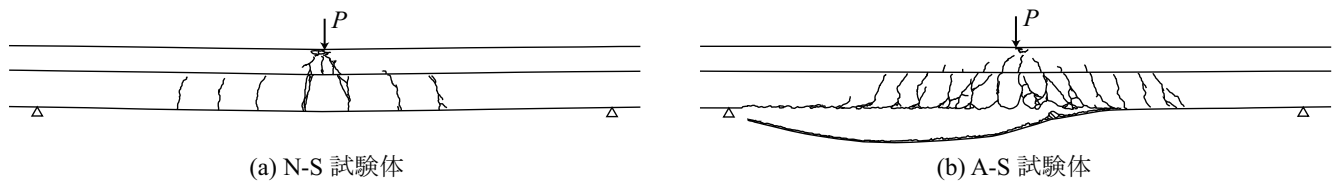
図－3 静載荷実験における AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状



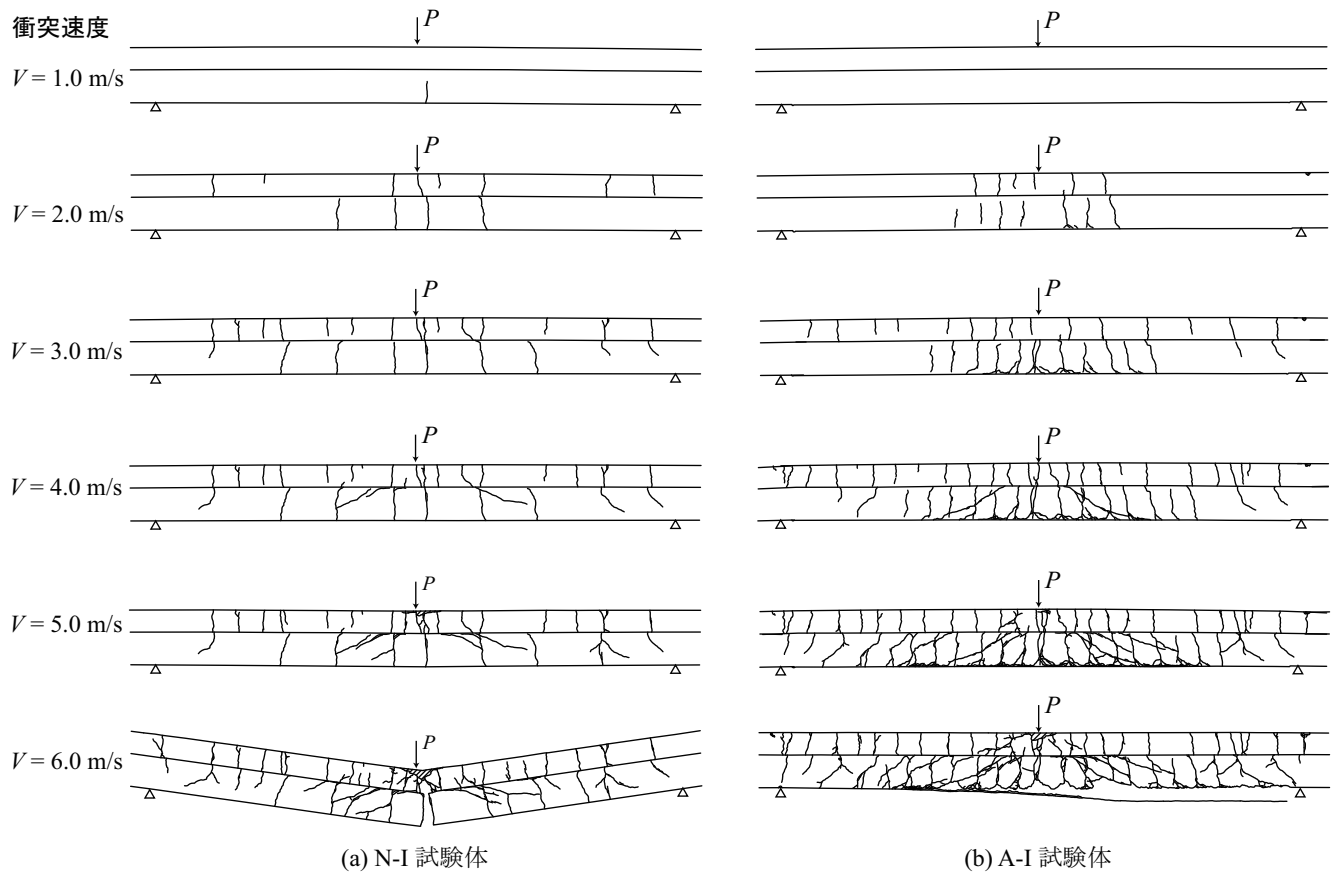
写真－3 斜めひび割れ先端部のピーリング作用による AFRP シートの部分剥離状況

kN 程度において剛性勾配が低下し始めていることから、この時点において曲げひび割れが発生しているものと推察される。その後、 $P = 100 \text{ kN}$  程度において剛性勾配が大きく低下し始めている。これは、PC 鋼より線が降伏したことによるものと判断される。一方、AFRP シート補強した A-S 試験体の場合には、荷重  $P = 50 \text{ kN}$  程度までは無補強とほぼ同様の耐荷性状を示しているものの、その後の剛性勾配は無補強の場合よりも大きい。また、最大荷重も無補強の





図－４ 静載荷実験終了後におけるひび割れ分布



図－５ 各衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布

場合を上回っている。これは、AFRP シートで曲げ補強を施すことにより、梁の曲げ剛性や曲げ耐力が向上したことによるものと考えられる。

また、実験結果は計算結果と概ね対応しているが、A-S 試験体の場合には終局荷重に関する実験結果が計算結果を 10 ～ 20 kN 程度下回っていることが分かる。これは、後述するように、AFRP シートが部分的に剥離し、上縁圧壊前にシートが全面剥離に至ったためと推察される。

## (2) ひずみ分布性状

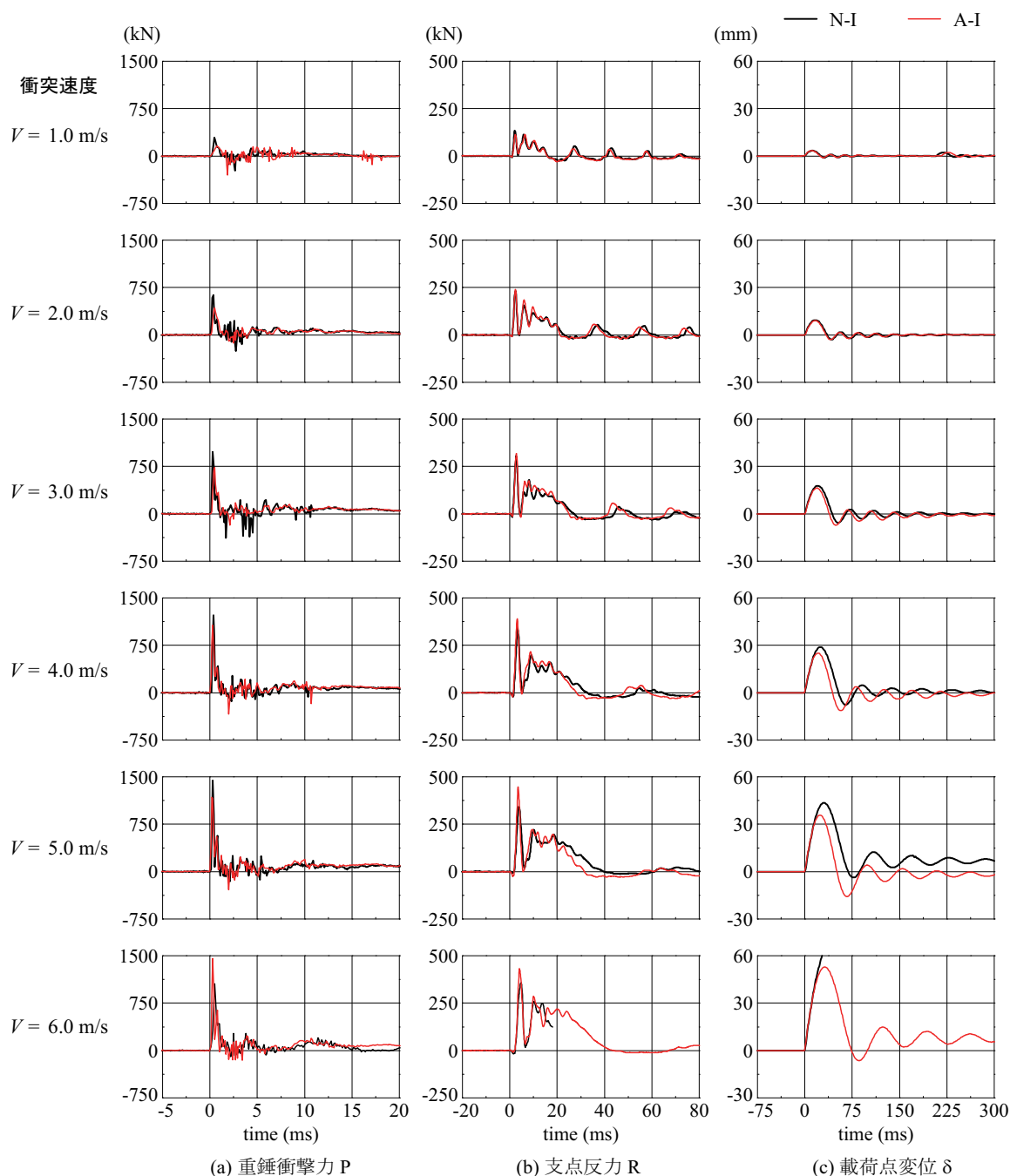
図－３には、A-S 試験体の AFRP シートの軸方向ひずみ分布に関する曲げひび割れ発生時、主鋼材降伏荷重時および最大荷重時における実験結果を計算結果と比較して示している。なお、計算結果は AFRP シートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法の結果に基づいて算出している。

図より、実験結果は、主鋼材降伏荷重時までは計算結果とほぼ対応していることが分かる。従って、この時点まではシートとコンクリートの付着はほぼ確保されているものと考えられる。一方、最大荷重時における実験結果に関し

ては、荷重点近傍では計算結果とほぼ同様であるものの、等せん断力区間では局所的に計算結果を大きく上回っていることが分かる。これは、ひび割れの発生によって AFRP シートに大きなひずみが発生したことや斜めひび割れの先端部がシートを下方に押し下げて引き剥がすピーリング作用<sup>8)</sup>によるものと考えられる。実験では、ピーリング作用によりシートが全面的に剥離したことを確認している（写真－３参照）。なお、スパン中央部では計算結果が実験結果を上回っている。これは、実験結果の場合には斜めひび割れやシートの部分剥離により荷重点近傍における AFRP シートひずみが均等化したことによるものと推察される。

## (3) ひび割れ分布性状

図－４には、静載荷実験終了後の梁側面のひび割れ分布を示している。図より、無補強の N-S 試験体の場合には、荷重点近傍において曲げひび割れが大きく開口するとともに、上縁のフランジ部が圧壊していることが分かる。一方、補強した A-S 試験体の場合には、無補強の場合よりもひび割れ発生領域が広く、かつ多数のひび割れが密な間隔で発



図－6 重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

生していることが分かる。また、シートは載荷点部から左側支点部に向かって全面的に剥離している。

## 3.2 衝撃載荷実験結果

### (1) ひび割れ分布性状

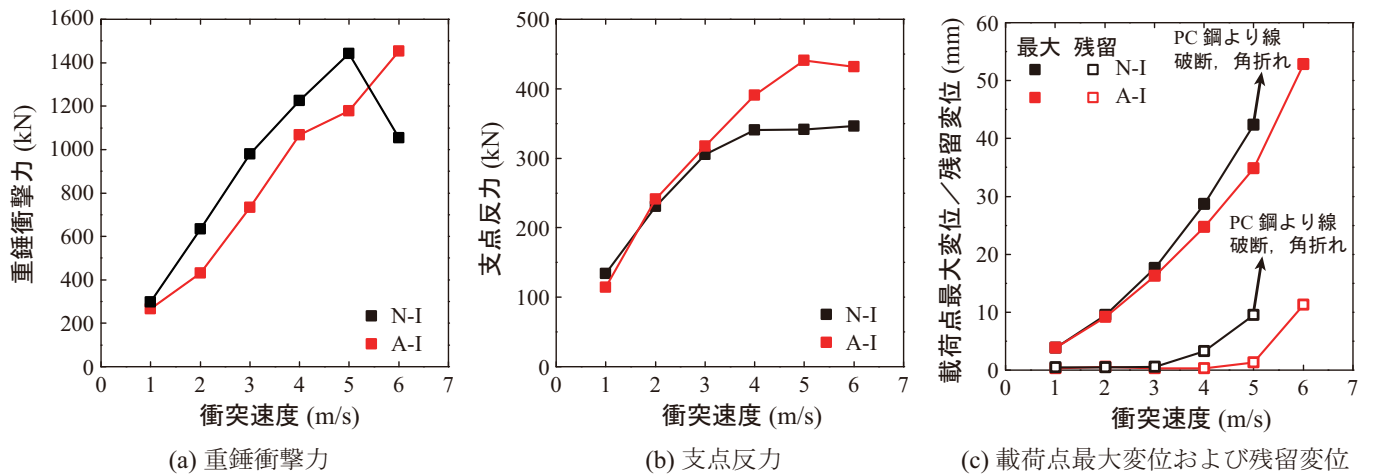
図－5 には、衝撃実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。図より、無補強および補強試験体ともに衝突速度  $V = 3 \text{ m/s}$  までは曲げひび割れが卓越し、 $V = 4 \text{ m/s}$  以降においてウェブに斜めひび割れが発生していることが分かる。ただし、補強試験体は無補強の場合よりもひび割れ間隔が密で多数発生している。このような傾向は、静載荷実験の場合と同様である。

また、衝突速度  $V = 6 \text{ m/s}$  の場合には、無補強試験体は

載荷点断面部の PC 鋼より線が全て破断し角折れしていることが分かる。これに対して、補強試験体の場合には、シートが剥離するものの PC 鋼より線の破断には至っていない。これらのことから、AFRP シート曲げ補強を施すことによってひび割れ分散効果が発揮されることや、PC 鋼より線の負担が軽減されて損傷や変形量が抑制されることなどが明らかになった。

### (2) 時刻歴応答波形

図－6 には、各種時刻歴応答波形を示している。図－6(a) より、重錘衝撃力波形は、補強の有無や衝突速度によらず継続時間が 2 ms 程度の第 1 波が卓越する性状を示していることが分かる。また、これらの波形には高周波成分が励起している。なお、重錘衝撃力の最大値は衝突速度  $V$  の増



図－7 各種応答値と衝突速度の関係

加に対応して大きくなる傾向にあることが分かる。

図－6(b) より、支点反力波形は、継続時間が 20 ～ 40 ms 程度の主波動に高周波成分が合成された波形性状を示している。また、主波動のピーク値および継続時間は、衝突速度が大きい場合ほど大きい。AFRP シート曲げ補強試験体の主波動継続時間は、無補強試験体よりも短くなる傾向にあることが分かる。これは、曲げ補強により PC 梁の曲げ剛性が増加したことによるものと考えられる。

図－6(c) より、載荷点変位波形は、補強の有無や衝突速度にかかわらず、第 1 波が励起した後減衰自由振動状態に至っていることが分かる。また、最大変位は衝突速度が大きい場合ほど大きくなる傾向にあるものの残留変位は極めて小さく、衝突速度  $V = 4$  m/s までは、残留変位はほとんど生じていないことが分かる。補強試験体の場合には、最大変位および主波動継続時間が無補強試験体よりも小さい。このことから、AFRP シート補強によって曲げ剛性が向上するとともに、変形量も抑制されることが明らかになった。従って、AFRP シート接着工法は、T 形 PC 梁の耐衝撃性向上法として有効であるものと考えられる。

### (3) 各種応答値と衝突速度との関係

図－7 には、(a) 重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、(b) 支点反力  $R_{ud}$ 、(c) 載荷点最大変位  $\delta_{ud}$  および残留変位  $\delta_{rd}$  と衝突速度  $V$  との関係を示している。なお、最大変位および残留変位は各載荷時の値である。

図－7(a) より、重錘衝撃力  $P_{ud}$  は、衝突速度の増加に伴って大きくなる傾向にあることが分かる。なお、同一衝突速度における重錘衝撃力は無補強試験体の方が大きい。これは、重錘衝撃力が重錘衝突部の硬さやひび割れ性状に強く影響されて励起する物理量であることから、無補強試験体のコンクリート強度が補強試験体の強度よりも多少高いことなどが影響したものと推察される。なお、衝突速度  $V = 6$  m/s では、無補強試験体の重錘衝撃力が急激に低下している。これは、衝撃荷重載荷時に PC 鋼より線が破断し、耐荷性能が急激に低下したことによるものである。

図－7(b) より、支点反力  $R_{ud}$  は、衝突速度  $V = 3$  m/s までは、補強の有無に関わらずほぼ線形に増加していること

が分かる。衝突速度  $V = 4$  および 5 m/s では、補強試験体の場合には  $V$  の増加に対応して概ね線形に増加しているのに対して、無補強試験体の場合には増加率が減少している。これは、後述の残留変位分布から、 $V = 4$  m/s 以降において無補強試験体の場合に変位が大きく残留していることから、この時点で PC 鋼より線が降伏し始めていることによるものと推察される。また、 $V = 6$  m/s において補強試験体の支点反力が低下している。これは、AFRP シートが剥離したことによるものと考えられる。

図－7(c) より、載荷点変位  $\delta_{ud}$  は、衝突速度  $V = 3$  m/s までは、無補強および補強試験体ともに同様の増加傾向を示しているものの、衝突速度  $V = 4$  m/s 以降では無補強試験体において増加率が大きくなっていることが分かる。また、残留変位  $\delta_{rd}$  に関しては、補強試験体の場合には衝突速度  $V = 4$  m/s まではほぼ弾性状態を示しており残留変位はないが、無補強試験体の場合には  $V = 4$  m/s 時点で変位が残留しており、PC 鋼より線の塑性化と共にひび割れも顕在化していることがうかがわれる。

なお、衝突速度  $V = 5$  m/s 載荷終了後における無補強試験体の残留変位は 10 mm 程度であり、スパン長 (2,400 mm) の 0.4% 程度であった。その後、 $V = 6$  m/s 載荷時には PC 鋼より線が破断し、梁は角折れして壊滅的な破壊状態となっている。このことから、PC 鋼材が降伏した場合における PC 梁の耐衝撃性は、RC 梁の場合に比較して衝突速度 (入力エネルギー) の僅かな増加に対して極めて敏感であることが分かる。また、PC 梁は RC 梁と異なり、通常弾性に近い状態で用いられることから、その耐衝撃性を残留変位で評価する場合には注意が必要である。

なお、著者らは既往の RC 梁に関する耐衝撃性の研究成果から、RC 梁の終局を残留変位がスパン長の 2% に達した時点と定義していた。本実験では  $V = 5$  m/s 載荷時における残留変位が 0.4% 程度であり、その値は RC 梁に比較して 1/5 程度と極めて小さいことが分かる。仮に、PC 鋼より線が降伏に至った時点と破壊と定義すると、 $V = 4$  m/s 載荷時の残留変位が 0.2% 程度となり、RC 梁に比較して 1/10 程度と小さい値になる。

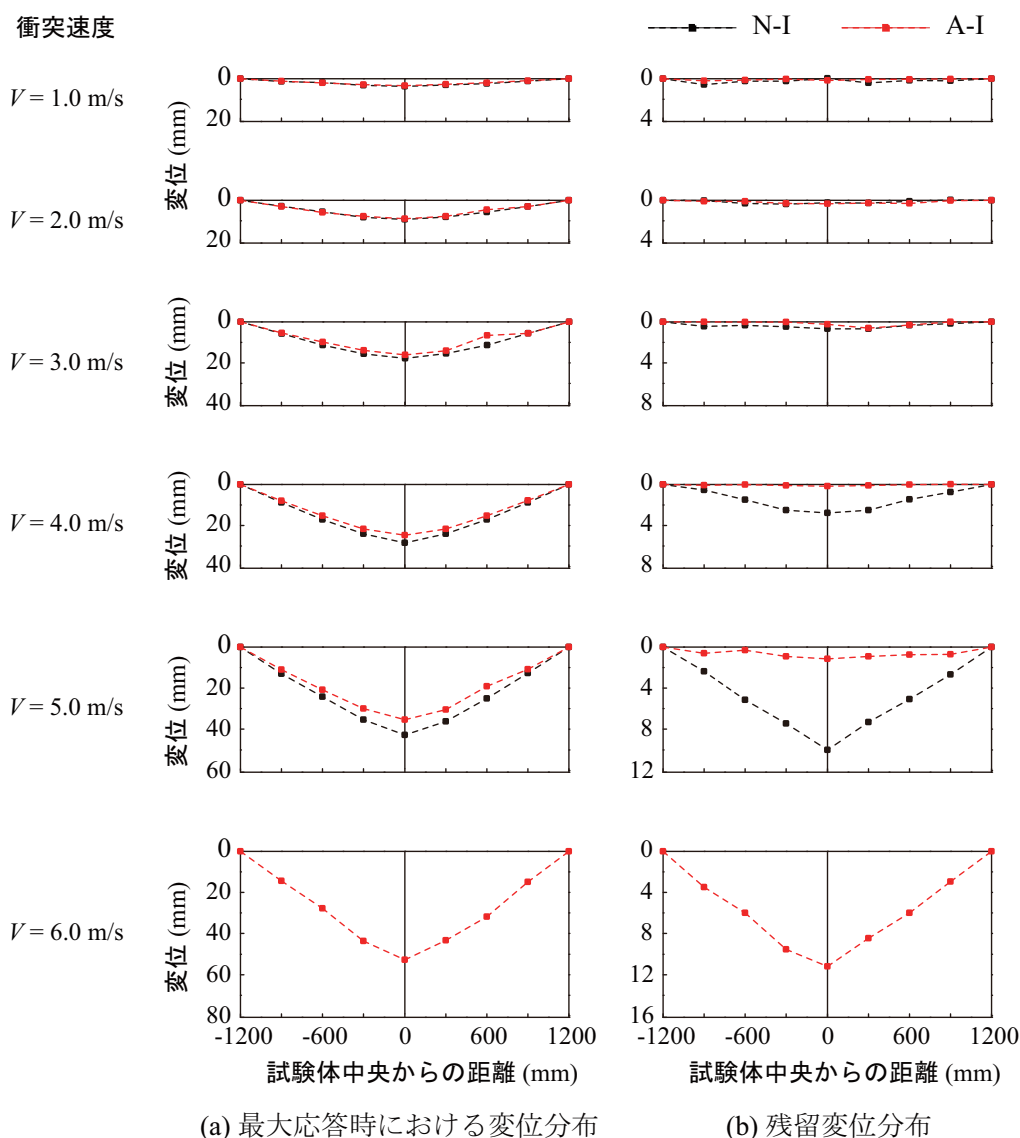


図-8 最大応答時における変位分布および残留変位分布

前述の通り、 $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時には載荷点断面部の PC 鋼より線が破断し PC 梁は角折れしている。このことから、残留変位を指標とした耐衝撃性や各種限界状態に関する RC 梁の規定を PC 梁に適用することは困難であるものと考えられる。従って、合理的設計法確立のためには PC 梁固有の残留変位もしくは新たな指標による規定法を検討する必要がある。

#### (4) 最大応答時における変位分布と残留変位分布

図-8 には、無補強および補強試験体に関する最大応答時における梁全体の変位分布および残留変位分布を各実験ケースについて示している。なお、無補強試験体の衝突速度  $V = 6 \text{ m/s}$  の場合については、PC 鋼より線が破断し角折れしていることから、分布図は示していない。

図より、最大応答時の変位分布は、補強の有無に関わらず左右対称の分布性状を示していることが分かる。また、衝突速度  $V = 3 \text{ m/s}$  までは、補強の有無に関わらずほぼ同様の分布性状を示しているものの、衝突速度  $V = 4 \text{ m/s}$  以降の場合には、補強試験体が無補強試験体よりも小さな

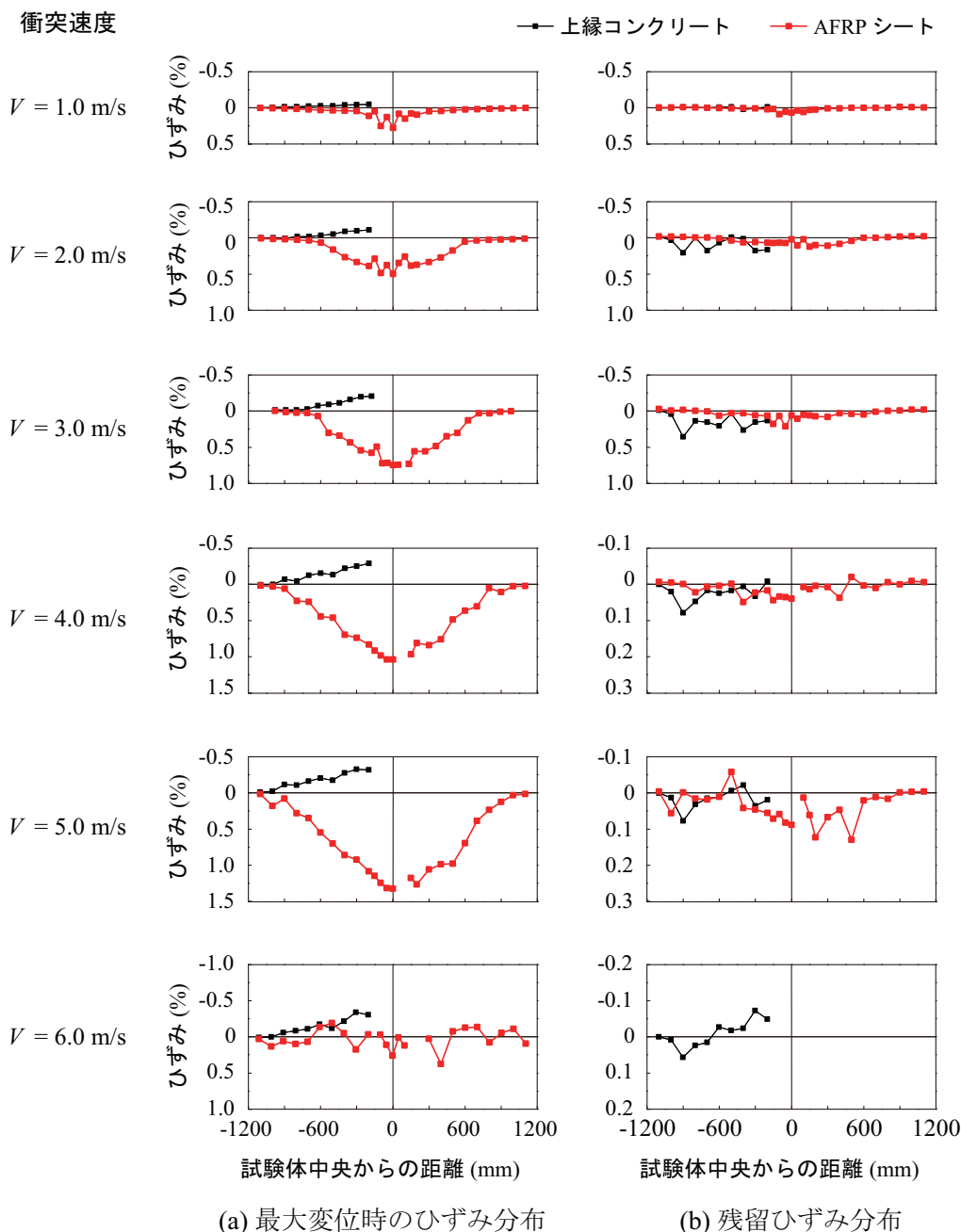
る傾向を示している。

一方、残留変位分布は、補強の有無に関わらず衝突速度  $V = 3 \text{ m/s}$  までは発生していない。従って、その時点まではほぼ弾性体として挙動しているものと考えられる。衝突速度  $V = 4 \text{ m/s}$  の場合には無補強試験体で残留変位が発生し、 $V = 5 \text{ m/s}$  でさらに増加して三角形の分布性状を示している。これは、無補強試験体がスパン中央部で角折れの傾向を示しており、このことが  $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時に見られた PC 鋼より線の破断に密接に関連しているものと推察される。また、補強試験体の場合には、 $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時にシートが剥離しているため、残留変位が急激に増加している。

#### (5) AFRP シートおよび上縁コンクリートの軸方向ひずみ分布

図-9 には、最大変位発生時(以後、最大変位時)および実験終了後における AFRP シートおよび上縁コンクリートの軸方向ひずみ分布を示している。ここで、実験終了後のひずみは残留ひずみと呼ぶこととする。なお、ひび割れ等の影響によって測定レンジ(2%)を超過したひずみ出力は





図－9 AFRP シートおよび上縁コンクリートのひずみ分布

除いている。

図より、最大変位時のシートひずみは、衝突速度  $V = 5$  m/s までは概ね左右対称の分布性状を示し、衝突速度の増加に対応して増加の傾向を示していることが分かる。また、上縁コンクリートのひずみも同様に増加傾向を示している。このことから、衝突速度の増加に対応して梁の変形曲率が増加する傾向にあることや、AFRP シートの補強効果も大きくなることが分かる。なお、衝突速度  $V = 5$  m/s では、右側せん断スパンにおいて、ひずみ分布が不連続な分布性状を示している。これは、ピーリング作用による AFRP シートの部分剥離が発生したことによるものと推察される。また、衝突速度  $V = 6$  m/s では、最大変位時にシートが全面剥離に至っていることから、AFRP シートのひずみは零に近いレベルまで戻っている。

一方、残留ひずみは、衝突速度  $V = 5$  m/s までは、部分剥離等の影響で局所的にシートひずみが残留している部分を除き、非常に小さいことが分かる。特に、上縁コンクリートのひずみは、ほとんど残留していない。衝突速度  $V = 6$  m/s では、シートが全面剥離に至ったためにシートのひずみ分布は示していないが、上縁コンクリートのひずみは多少残留する傾向にあることがうかがわれる。

このように、シート補強した試験体の場合には、終局に至るまでは最大変位時に大きなひずみが発生するものの、衝撃荷重除荷後には零レベルまで復元し、残留ひずみは小さいことが明らかとなった。

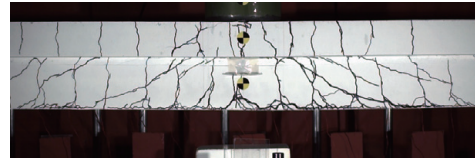
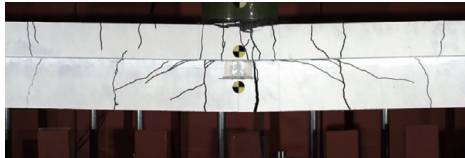
#### (6) 無補強および補強 PC 梁の破壊性状

写真－4 には、衝突速度  $V = 6$  m/s における無補強および補強試験体の破壊性状に関する高速度カメラ画像を示し

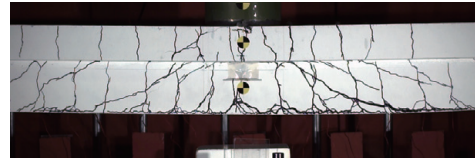
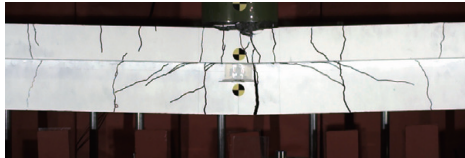


経過時間

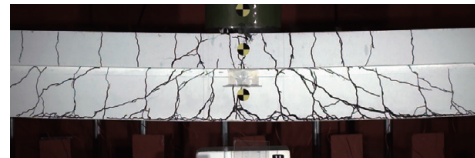
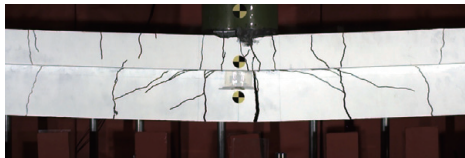
$t = 1 \text{ ms}$



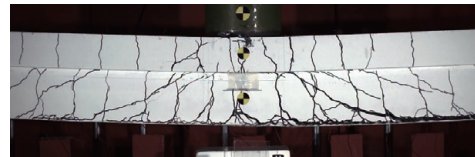
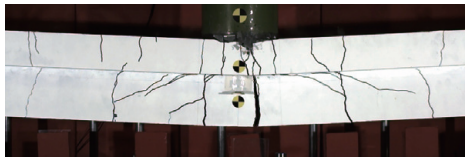
$t = 4 \text{ ms}$



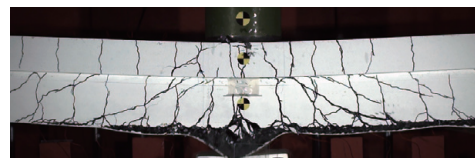
$t = 8 \text{ ms}$



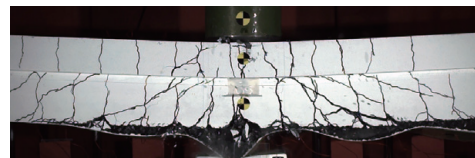
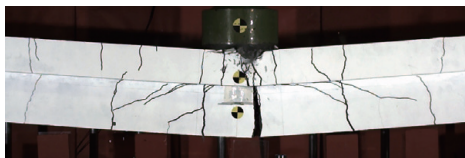
$t = 12 \text{ ms}$



$t = 16 \text{ ms}$



$t = 20 \text{ ms}$



(a) N-I 試験体

(b) A-I 試験体

写真-4 衝突速度  $V = 6 \text{ m/s}$  荷重時における破壊進展状況

ている。なお、各試験体には  $V = 5 \text{ m/s}$  荷重までに発生したひび割れ線が描かれている。写真より、無補強試験体の場合には、時間経過に対応してスパン中央部近傍の1本の曲げひび割れが大きく開口すると共に、たわみが増加傾向にあることが分かる。前述の通り、実験ではPC鋼より線が全て破断し、梁は角折れの状態に至っている。

これに対して、補強試験体の場合には、無補強試験体の場合よりも多くのひび割れが発生し、かつ著しいひび割れの開口は見られない。また、右側せん断スパンに発生した斜めひび割れの先端部においては、荷重初期からピーリング作用によるシートの部分剥離が見られる。経過時間  $t = 12 \text{ ms}$  において部分剥離が顕在化し、その後全面的なシート剥離に至っていることが分かる。このことから、AFRPシートの剥離は、荷重方法によらずウェブに発生した斜めひび割れの先端部がシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用によって発生することが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究では、PC部材の耐衝撃挙動の解明およびその効率的な補強方法の開発を最終目的として、無補強およびFRPシートで曲げ補強したT型PC梁の重錘落下衝撃実験を行った。検討は、静荷重実験および漸増繰り返し衝撃荷重実験の結果に基づいて行った。本実験の範囲内で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 荷重履歴によりPC鋼材が降伏に至ったT型PC梁の耐衝撃性は、RC梁の場合に比較して衝突速度(入力エネルギー)の僅かな増加に対して極めて敏感である。また、PC梁は通常弾性に近い状態で供用されることから、残留変位を指標とした耐衝撃性や各種限界状態に関するRC梁の規定をPC梁に適用することは困難である。従って、PC梁固有の残留変位もしくは新たな指標による規定法を検討する必要がある。

- (2) T 型 PC 梁は AFRP シートで曲げ補強を施すことによって変位量を抑制可能であり，残留変位の抑制効果も高い．従って，AFRP シート接着工法は，T 形 PC 梁の耐衝撃性向上法として有効であるものと考えられる．
- (3) AFRP シートの剥離は，載荷方法によらずウェブに発生した斜めひび割れの先端部がシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用によって発生する．今後は，AFRP シートの剥離および破断などの抑制手法を検討することにより，さらに効果的な耐衝撃性向上法として提案できるものと考えられる．

## 謝辞

本論文の取りまとめにあたり，室蘭工業大学構造力学研究の佐藤元彦君を始めとする学生諸君に多大なるご支援を頂いた．ここに感謝の意を表する．

## 参考文献

- 1) 岸 徳光，三上 浩：衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，土木学会，Vol. 53A, pp. 1251-1260, 2007.3
- 2) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：四辺支持 RC 版の耐衝撃性に及ぼすコンクリート強度の影響と耐衝撃設計法，構造工学論文集，Vol. 57A, pp. 1239-1250, 2011.3
- 3) 栗橋祐介，今野久志，三上 浩，岸 徳光：AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性能に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 953-962, 2014.3
- 4) 竹本憲介，圓林栄喜，香月 智，石川信隆：重錘落下実験による PC はりの衝撃破壊挙動に関する一考察，土木学会論文集 No. 675, I-55, pp. 273-286, 2001.
- 5) 黒田一郎，畑野真吾，古屋信明，中村佐智夫：支点近傍に衝撃荷重を受けた PC 梁の残存耐荷性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28, No.2, pp. 853-858, 2006.7
- 6) 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，土木学会，Vol. 44A, pp. 1872-1838, 1998.3
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012 年制定, 2012
- 8) 岸 徳光，三上 浩，栗橋祐介：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 683/V-52, pp. 47-64, 2001.

(2014年 9月24日受付)

(2015年 2月 1日受理)