

論文 AFRP シート補強 T 形 PC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす補強方法の影響

栗橋 祐介^{*1}・三上 浩^{*2}・今野 久志^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、T 形 PC 梁の合理的な耐衝撃性向上法の開発を目的に、アラミド繊維 FRP (AFRP) シート接着工法に着目し、その効果を実験的に検討した。また、AFRP シートの破断抑制法として、シートと薄鋼板を併用する鋼板併用法と AFRP シートのウェブ側面接着法を提案し、その効果について検討した。その結果、1) AFRP シート曲げ補強により T 形 PC 梁の変形量が抑制されその耐衝撃性が向上する、2) 鋼板併用法で曲げ補強した場合には、補強材が早期に剥離する傾向にある、3) AFRP シート側面接着法を用いた場合には、曲げや斜めひび割れの開口が抑制され、結果としてシートの破断が抑制される、ことなどが明らかになった。

キーワード: RC 梁, 衝撃荷重, AFRP シート, シート破断抑制法

1. はじめに

近年、異常気象による集中豪雨や凍結融解作用による岩盤風化等の影響により、落石災害が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硬化が急がれている。

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効率的な耐衝撃性向上法を検討するため、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共に、連続繊維 (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¹⁾。

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築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る。しかしながら、この種の構造物に関する耐衝撃挙動や耐衝撃性向上効果に関する研究は、今野らによる大型 PRC 梁の重錘落下衝撃実験²⁾が行われているものの、極めて少ないのが実状である。特に PC 部材の耐衝撃性向上を目的とした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。

このような背景より、本研究では、T 形 PC 梁の合理的な耐衝撃性向上法の開発を目的に、アラミド繊維 FRP (AFRP) シート接着工法に着目し、その効果を実験的に検討した。また、AFRP シートの破断抑制法として、i) AFRP シートと薄鋼板を併用する方法 (以後、鋼板併用法) と ii) AFRP シートをウェブ側面に接着する方法 (以後、側面接着法) を考案し、その効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

図-1には、補強前の試験体の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体は、プレテンション方式 PC 梁であり、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、純スパン長は 2.4 m である。梁下縁には PC 鋼より線 SWPR7A ϕ 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 を使い、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

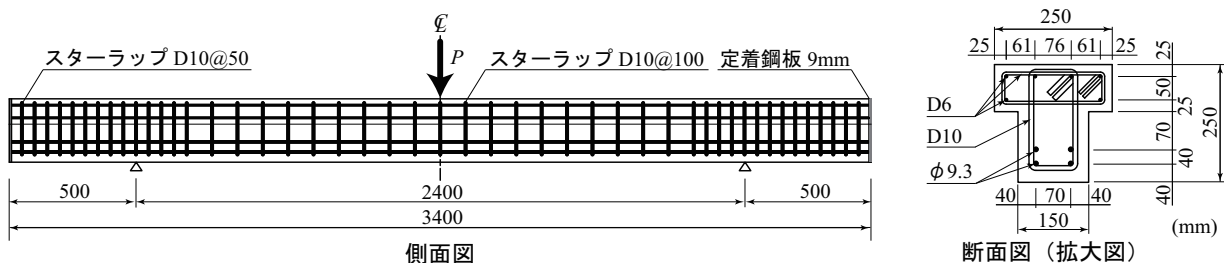


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

*1 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 博(工) (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 上席研究員 博(工) (正会員)

*3 (独) 寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 補強方法 | 衝突速度 (m/s) | 曲げ補強材の 軸剛性 (kN/m) | 曲げ補強材の 引張耐力 (kN/m) | コンクリート 圧縮強度 (MPa) | 計算 曲げ耐力 (kN) | 計算 せん断耐力 (kN) | せん断 余裕度 α |
|-------|---------------------------|---------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| N-V5 | - | 5 | - | - | 74.2 | 108.1 | 273.8 | 2.53 |
| N-V6 | | 6 | | | | | | |
| A-V5 | AFRP シート * 曲げ補強 | 5 | 67.5 | 1.18 | 67.3 | 167.9 | 271.3 | 1.62 |
| A-V6 | | 6 | | | | | | |
| AP-V6 | AFRP シート ** + 薄鋼板 曲げ補強 | 6 | 342.7 | 1.03 | 67.3 | 166.4 | 271.3 | 1.63 |
| AS-V6 | AFRP シート * 曲げ補強 + 側面接着 | 6 | 67.5 | 1.18 | 67.3 | 194.6 | 271.3 | 1.39 |

*: 保証耐力 1,200 kN/m, **: 保証耐力 600 kN/m

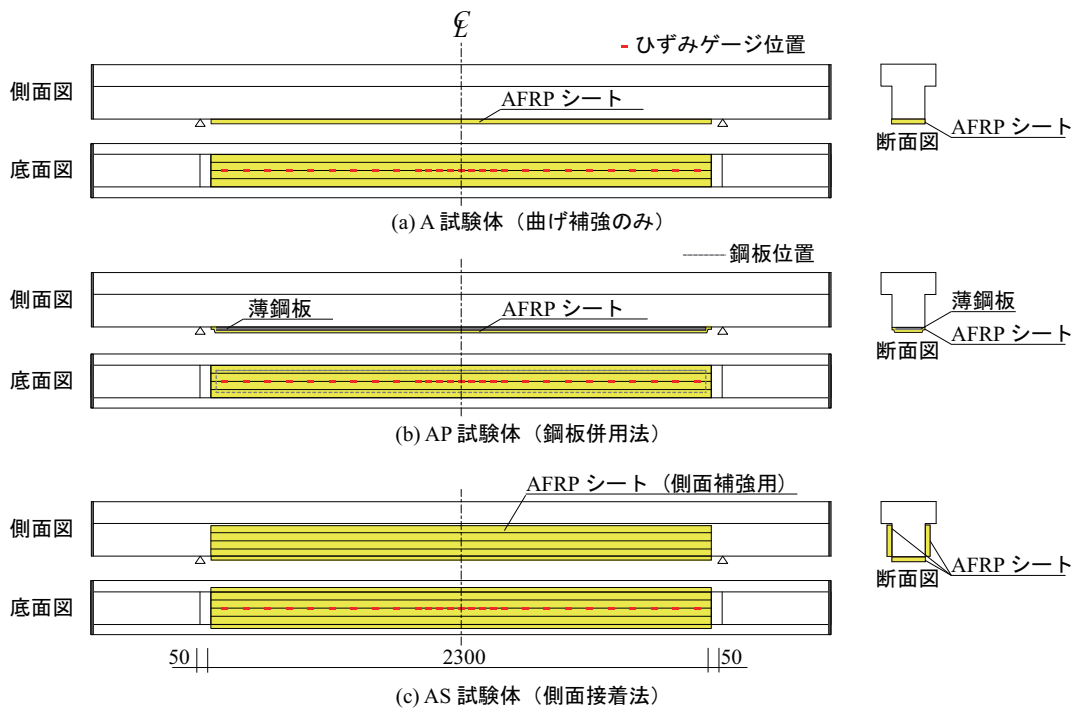


図-2 補強概要

合は 58 % である。

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。表中の試験体名の第1項は補強方法(N:無補強, A:曲げ補強, AP:鋼板併用法, AS:側面接着法)を示し、第2項の英文字Vに付随する数値は重錘の衝突速度(m/s)を示している。なお、鋼板併用法および側面接着法に関する補強概要は後述する。表より、AP試験体における曲げ補強材の引張耐力はA試験体のそれと概ね対応していることが分かる。ただし、軸剛性はAP試験体の場合がA試験体よりも5倍程度大きい。

各試験体の計算曲げ耐力は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾およびアラミド補強研究会の設計指針⁴⁾に基づいて計算した。また、計算せん断耐力は、示方書に基づきプレストレス力によるデコンプレッションモーメントを考慮して計算した。なお、AFRPシート接着による

補強効果は考慮していない。これらの耐力計算において、コンクリートおよび鉄筋の材料特性には材料試験値を用い、AFRPシートに関しては公称値を用いた。なお、安全係数は1.0とした。表より、補強後においても計算せん断耐力が計算曲げ耐力を上回っていることから、静的には曲げ破壊型として設計されていることが分かる。

図-2には、補強概要を示している。A試験体の場合には、PC梁底面に保証耐力1,200 kN/m、幅150 mmのAFRPシートを接着している。シートの接着は、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て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行った。養生は20°C程度の環境下で7日間以上行った。

なお、後述するようにA試験体の場合には、衝突速度V=6 m/s時に曲げ補強シートが破断に至ったことから、

表-2 AFRP 板の力学的特性値 (公称値)

| 繊維 目付量 (g/m ²) | 保証 耐力 (kN/m) | 厚さ (mm) | 引張 強度 (GPa) | 弾性 係数 (GPa) | 破断 ひずみ (%) |
|----------------------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| 415 | 588 | 0.286 | 2.06 | 118 | 1.75 |
| 830 | 1176 | 0.572 | | | |

その抑制法として鋼板併用法 (図-2 b) および側面接着法 (図-2 c) を提案し、その補強効果について検討を行った。

鋼板併用法は、ひび割れ発生部における応力集中を緩和して AFRP シートの破断を抑制することを目的に、薄鋼板をコンクリート - AFRP シート間に配置する工法である。薄鋼板の厚さは 1.5 mm とし、その接着範囲は AFRP シートの外縁から 15 mm 内側の範囲とした。また、鋼板の両面には、酸化皮膜の除去と表面の異形化を目的にサンドブラスト処理を施した。なお、鋼板の厚さを 1.5 mm としたのは、1) サンドブラスト時に変形しない限界厚さであること、および 2) 表-1 に示すように保証耐力 600 kN/m の AFRP シートと併用することにより、曲げ補強試験体のシート保証耐力 1,200 kN/m と同程度の引張耐力となる厚さであること、によるものである。

側面接着法は、曲げ補強試験体の AFRP シート破断時に見られた曲げひび割れ及びせん断ひび割れの開口の抑制を目的に、AFRP シートを T 形 PC 梁のウェブ側面に軸方向に接着する工法である。側面接着シートには、曲げ補強シートの場合と同様に保証耐力 1,200 kN/m の AFRP シートを用いた。

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 であった。異形鉄筋 SD295 D6/D10 の降伏強度は、それぞれ 340, 392 MPa であった。また、AP 試験体の薄鋼板には SS400 材 (降伏強度 293 MPa) を用いた。

2.2 実験方法

実験は、質量 400 kg、先端直径 230 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一衝撃荷重荷法により行った。載荷位置はスパン中央部である。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。なお、写真-1 に示すように支点治具は、PC 梁支持点の 150 mm 程度下の位置に回転軸を有し、PC 梁の水平移動を拘束しない構造となっている。そのため、ひび割れ発生後の作用軸力は極めて小さいものと考えられる。

測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 (以後、支点反力) R 、載荷点変位 (以後、変位) δ 、および AFRP シート幅

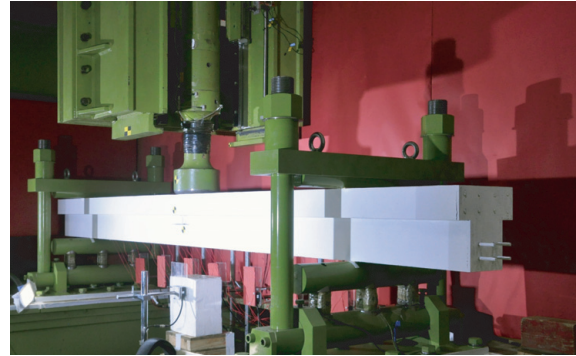


写真-1 実験状況

方向中央部の軸方向ひずみである。さらに、高速度カメラを用いて 2,000 枚/秒で PC 梁側面のひび割れ進展状況を撮影している。また、実験終了後には、ひび割れの状態を観察し、梁の側面を撮影している。

3. 実験結果および考察

3.1 時刻歴応答波形

図-3 には、各種時刻歴応答波形を衝突速度 V 毎に整理して示している。図-3(a) より、重錘衝撃力波形は、補強の有無、補強方法および重錘落下高さによらず、継続時間が 1 ms 程度の第 1 波が卓越する波形性状を示している。

図-3(b) より、支点反力波形は、いずれの試験体においても、振幅が大きく継続時間の短い第 1 波が励起した後、振幅が第 1 波の半分程度で継続時間が 15 ms 程度の第 2 波に高周波成分が合成された性状を示している。衝突速度 $V = 5$ m/s の結果より、A-V5 試験体の場合には N-V5 試験体よりも主波動の振幅が大きく継続時間が短いことが分かる。これは、AFRP シート曲げ補強により梁の曲げ剛性が向上したことによるものと考えられる。また、 $V = 6$ m/s の結果を見ると、AS-V6 試験体の場合、他の試験体よりも主波動の振幅が小さく継続時間が短い。これは、A/AP-V6 試験体はそれぞれ AFRP シートの破断および剥離で終局に至っているのに対し、AS 試験体の場合には未だ終局に至っていないことによるものと考えられる。

図-3(c) より、載荷点変位波形は、いずれの試験体においても、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。 $V = 5$ m/s の結果より、A-V5 試験体の場合が N-V5 試験体よりも主波動の振幅が小さく、継続時間が短い波形性状を示していることが分かる。また、 $V = 6$ m/s の結果より、AS-V6 試験体の場合には他の試験体よりも主波動の振幅が小さく、継続時間が短い。これらの傾向は、前述の支点反力波形の場合と同様である。

以上の結果より、T 形 PC 梁を AFRP シートで曲げ補強することにより、変形量を抑制可能であるものの、 $V = 6$ m/s においてはシートが破断して終局に至ることが明らか

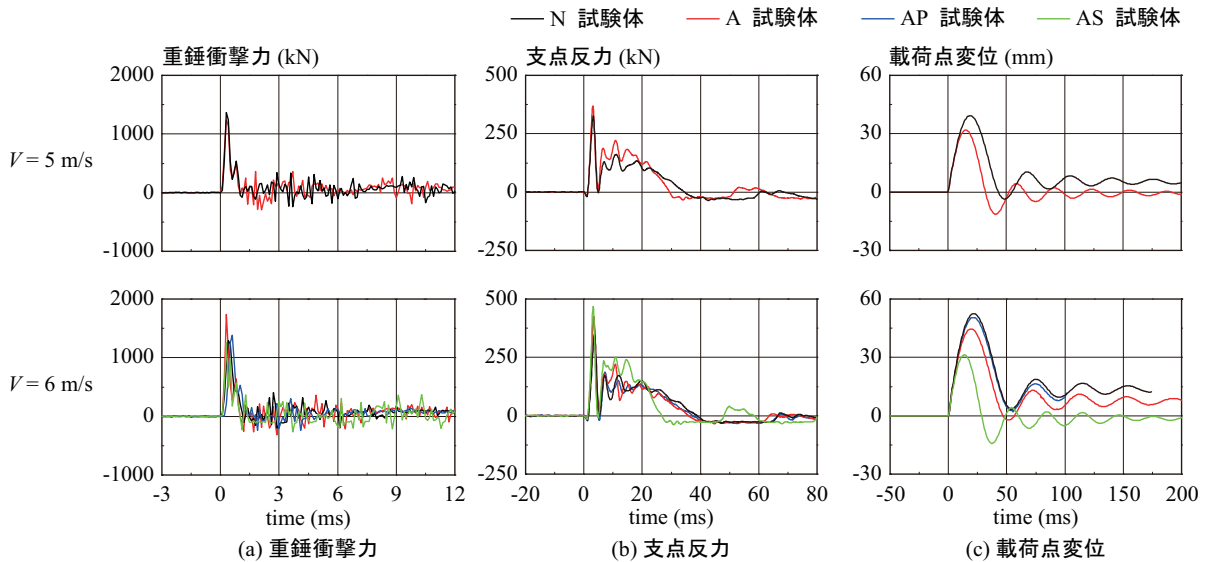


図-3 各種時刻歴応答波形

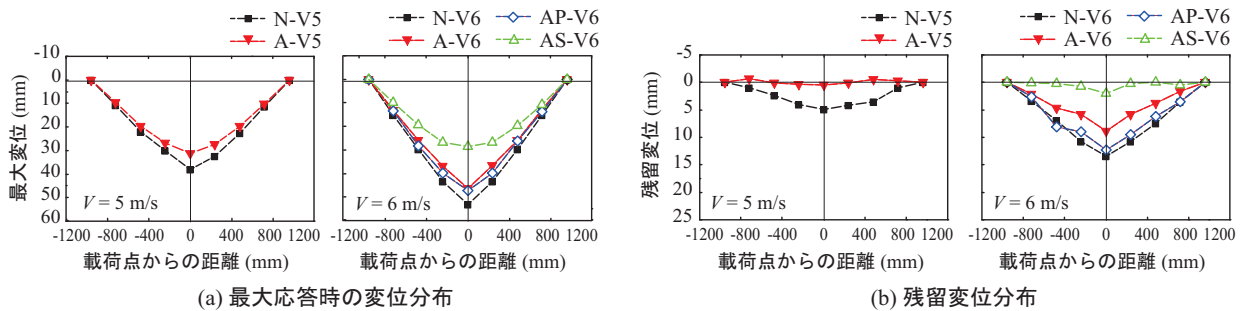


図-4 最大応答時の変位分布および残留変位分布

かになった。また、薄鋼板を併用する場合には、鋼板が早期に剥離するため十分な補強効果が得られないことや、側面補強を施す場合には、曲げひび割れの大きな開口が抑制され曲げ補強シートへの応力集中が緩和されることにより、シート破断が抑制され耐衝撃性が向上することが明らかになった。

3.2 変位分布性状

図-4には、各試験体の最大応答時の変位分布および残留変位分布を衝突速度 V 毎に整理して示している。

最大応答時の変位分布より、衝突速度 V によらずA試験体の変形量はN試験体に比べて小さくなっていることが分かる。また、 $V = 6 \text{ m/s}$ の実験結果に着目すると、AP-V6試験体の変位分布はA試験体の場合と類似の性状を示していることが分かる。これは、AおよびAP試験体は、それぞれ最大応答到達前に補強材の破断および剥離により終局に至ったためと推察される。AS試験体の変位分布は、他の試験体よりも小さい。これは、側面接着シートによって曲げや斜めひび割れの開口が抑制されたことにより、シート破断や剥離を生じていないためと推察される。

残留変位分布を見ると、 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には、N試験

体の残留変位がスパン中央部で 5 mm 程度発生しているのに対して、A試験体の場合にはほぼ零となっている。 $V = 6 \text{ m/s}$ の実験結果に着目すると、AP試験体の残留変位はN試験体とほぼ同様であるが、A試験体の場合にはこれらの試験体よりも変位が小さい。AS試験体の残留変位は、スパン中央部で 3 mm 程度発生しているものの、それ以外の箇所では概ね零である。

このように、AFRPシート曲げ補強によりT形PC梁の変形量を抑制可能であることや、側面接着することにより曲げや斜めひび割れの開口が抑制されて曲げ補強シートに発生する応力集中が緩和され、対応してシートの破断も抑制することができ耐衝撃性を向上できることなどが明らかになった。

3.3 ひずみ分布性状

図-5には、A-V5およびA/AP/AS-V6試験体の曲げ補強材の軸方向ひずみ分布の推移状況を経過時間 $t = 0.5 \sim 12.0 \text{ ms}$ について示している。

図より、A-V5試験体の場合には、 $t = 0.5 \text{ ms}$ において、荷点近傍の領域に 0.5% 程度のひずみが発生し、その両支点側の領域では -0.1% 程度の圧縮ひずみが発生していることが分かる。これは、重錘衝突直後に応力波が荷

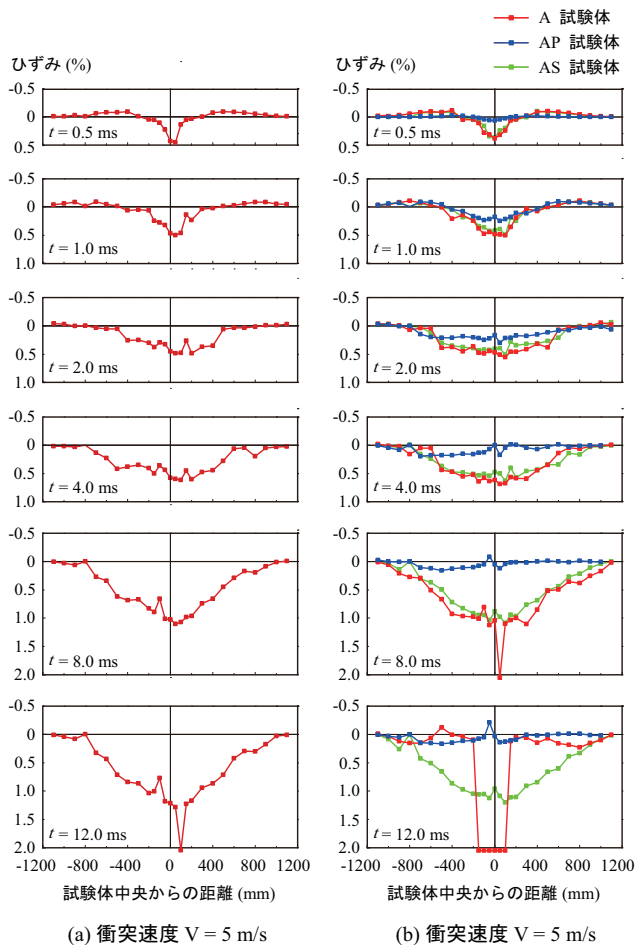


図-5 曲げ補強材のひずみ分布の推移状況

点部から両支点側に伝播する過程において、PC 梁が両端固定支持梁のように挙動したことによるものである。その後、経過時間 $t = 4.0$ ms まで 0.5 % 程度のひずみの発生範囲が両支点側に進展する傾向を示している。また、 $t = 8.0$ ms においては、荷点近傍のひずみが 1.2 % 程度に到達し、 $t = 12.0$ ms では局所的に破断ひずみ 1.75 % を超過するひずみが発生している。ただし、AFRP シートは破断していない。なお、破断ひずみを上回るひずみが生じているにもかかわらず、シート破断に至っていないのは、実引張強度が公称引張強度よりも大きいためと考えられる。

また、A-V6 試験体の場合には、 $t = 4$ ms まで A-V5 試験体と類似のひずみ分布性状を示していることが分かる。その後、 $t = 8.0$ ms において破断ひずみを超過するひずみが発生し、 $t = 12.0$ ms ではシート破断位置以外のひずみがほぼ零となっている。

AP-V6 試験体の場合には、 $t = 0.5, 1.0$ ms において荷点近傍にひずみが発生しているものの、A-V6 試験体の場合に比較すると小さい。その後、 $t = 2.0$ ms において 0.2 % 程度のひずみ発生範囲が両支点側に進展するものの、 $t = 4.0$ ms においては、ひずみ発生領域が左側せん断スパンに移行し、右側せん断スパンのひずみが減少している。

これは、後述の破壊性状から分かるように、補強材の剥離が左側支点に進展したことによるものである。

AS-V6 試験体の場合には、 $t = 4.0$ ms までは A-V6 試験体とほぼ同様のひずみ分布性状を示している、ただし、ひずみレベルは A-V6 試験体よりも多少小さい。これは、側面接着シートの曲げ補強効果が発揮されたことによるものと考えられる。 $t = 8.0$ ms 以降においても局所的なひずみの増加は見られず、シートは破断に至っていない。

3.4 破壊進展過程

写真-2には、衝突速度 $V = 6$ m/s における各試験体のひび割れ進展状況やシートの損傷過程を経過時間 $t = 0.5 \sim 12.0$ ms について示している。写真より、N-V6 試験体の場合には、経過時間 $t = 0.5$ ms においてスパン中央部に曲げひび割れが発生し、 $t = 1.0$ ms には新たな曲げおよび斜めひび割れが発生していることが分かる。その後、時間経過とともにひび割れの開口幅が大きくなっていることが分かる。特に、スパン中央部のひび割れは、最大で 10 mm 程度となっている。

A-V6 試験体の場合は、 $t = 1.0$ ms に斜めひび割れおよび曲げひび割れが発生し、その後 $t = 4.0$ ms まで荷点近傍で曲げひび割れが多数発生している。 $t = 8.0$ ms にこれらのひび割れが開口し、 $t = 12.0$ ms ではスパン中央部において AFRP シートが破断に至っている。

AP-V6 試験体の場合は、 $t = 0.5 \sim 2.0$ ms において A-V6 試験体の場合よりも斜めひび割れが明瞭に発生していることがわかる。その後、 $t = 4.0$ ms において左側せん断スパンの斜めひび割れ先端部が開口し、ピーリング作用によってシート剥離が開始されている。 $t = 8.0$ ms 以降の状況より、補強材の剥離が左側に進展していることが分かる。なお、鋼板併用工法については、今後、薄鋼板の厚さや補強範囲について検討する必要があるものと考えられる。

AS-V6 試験体の場合には、主だった変状は見られない。ただし、AFRP シート接着部において荷点から斜め下方に線状に白色化していることが分かる。これは、PC 梁に斜めひび割れが発生するものの、AFRP シートによりその開口が抑制されていることによるものと考えられる。

このように、曲げ補強用の AFRP シートの破断は、左右の斜めひび割れの内側に発生した曲げひび割れの開口が大きな影響を及ぼしていることや、側面接着シートによりこれらのひび割れを抑制することで曲げ補強シートの破断および剥離を抑制可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、T 形 PC 桁の合理的な耐衝撃性向上法の開発を目的に、アラミド繊維 FRP (AFRP) シート接着工法に着目し、その効果を実験的に検討した。また、AFRP シートの破断抑制法として、鋼板併用法と AFRP シートのウェ

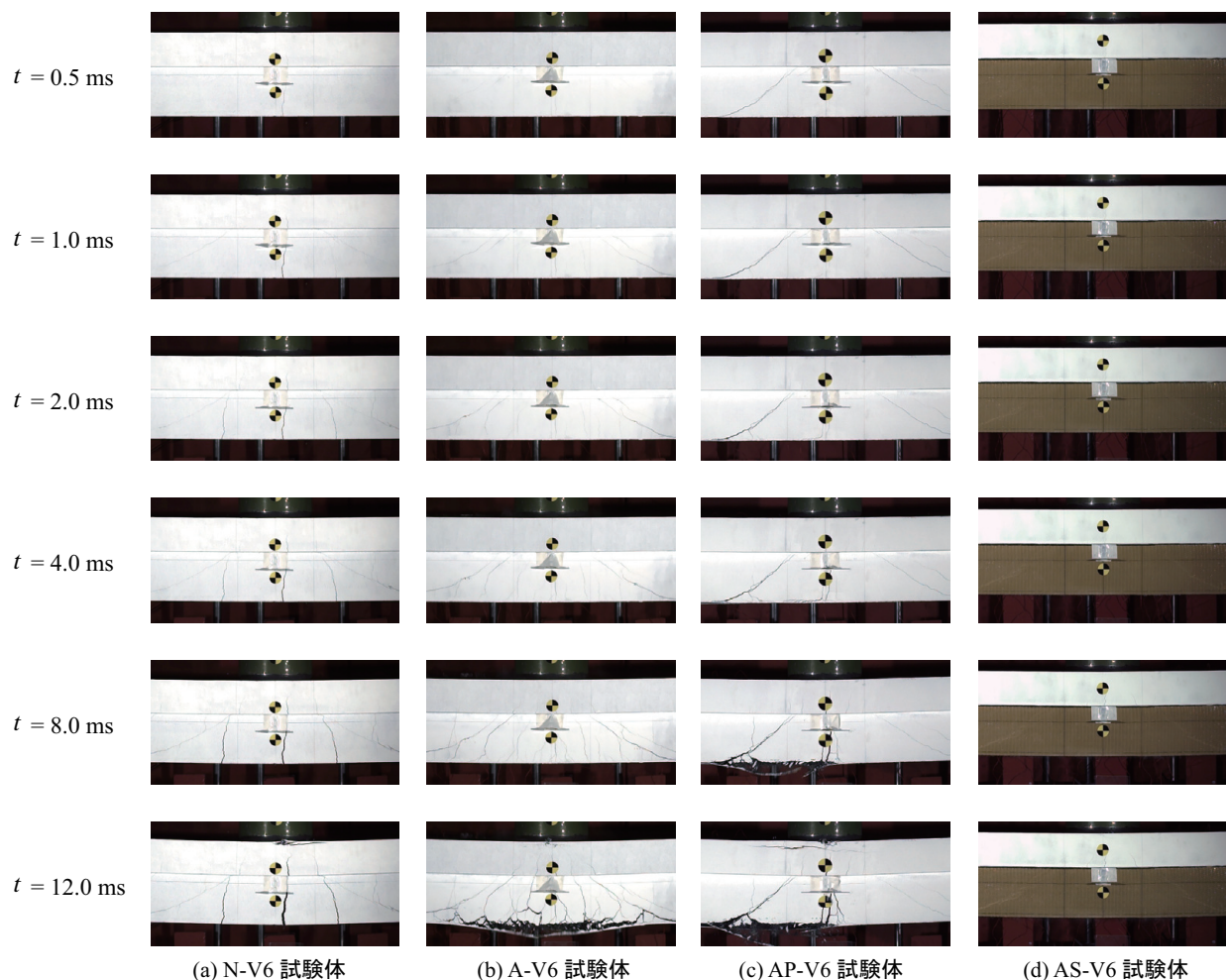


写真-2 衝突速度 $V = 6 \text{ m/s}$ におけるひび割れ進展状況およびシートの損傷過程

ブ側面接着法を提案し、その効果について検討した。本研究により得られた知見は、以下の通りである。

- 1) AFRPシート曲げ補強によりT形PC梁の変形量が抑制され、その耐衝撃性が向上する。ただし、入力エネルギーが大きくなるとシートは破断して終局に至る傾向にある。
- 2) AFRPシートおよび薄鋼板により曲げ補強した場合には、補強材が早期に剥離し、十分な補強効果が得られない。今後、薄鋼板の厚さや補強範囲について検討する必要がある。
- 3) AFRPシート側面接着法を併用することによって曲げや斜めひび割れの開口が抑制され、対応して曲げ補強シートに発生する応力集中も緩和されることによりシートの破断が抑制され、大幅な耐衝撃性の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 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
- 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, 土木学会, Vol. 44A, pp. 1872-1838, 1998.3
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2012.
- 4) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領 (案), 1998.