

AFRP シート補強 T 形 PC 梁の耐衝撃性に及ぼす補強方法の影響

Effects of strengthening method on impact resistant capacity of T-shaped PC beams flexural strengthened with AFRP sheet

室蘭工業大学大学院 ○ 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 (独) 寒地土木研究所 正会員 今野 久志 (Hisashi konno)
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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る。しかしながら、この種の構造部材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 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、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。

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。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。曲げ補強試験体の場合には、PC 梁底面に保証耐力 1,200 kN/m の AFRP シートを接着している。シートの接着は、補強範囲にプラスト処理 (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

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	1.04	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

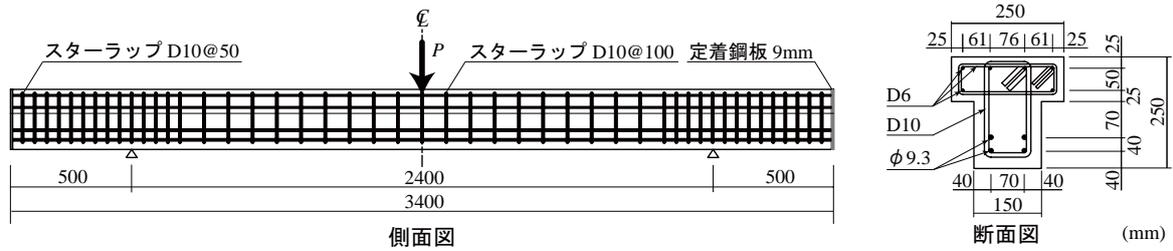


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

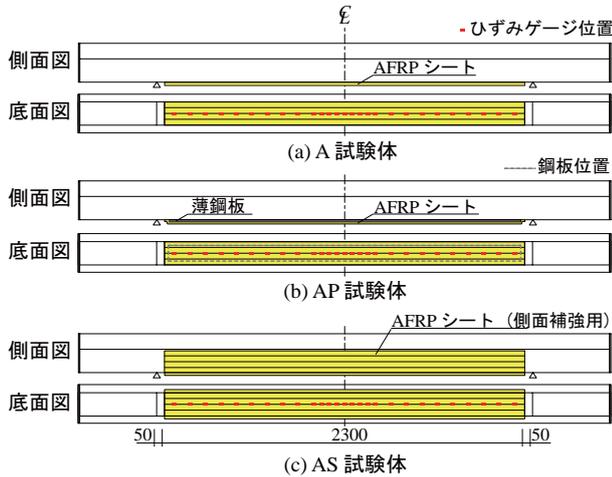


図-2 補強概要

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、後述するように曲げ補強試験体の場合には、衝突速度 $V = 6 \text{ m/s}$ 時に曲げ補強シートが破断に至ったことから、その抑制法として鋼板併用法 図-2 (b) および AFRP シートによるウェブ側面接着法 (以後、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

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

目付量 (g/m ²)	保証耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	600	0.286	2.06	118	1.75
830	1,200	0.572			

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。

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載荷法により行った。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。

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2.0 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15.0 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 $V = 5 \text{ m/s}$ 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、 $V = 6 \text{ m/s}$ の結果を見ると、AS-V6 試験体の場合には、他の試験体よりも主波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。 $V = 5 \text{ m/s}$ 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、 $V = 6 \text{ m/s}$ の結果より、AS-V6 試験体の場合には他の試験

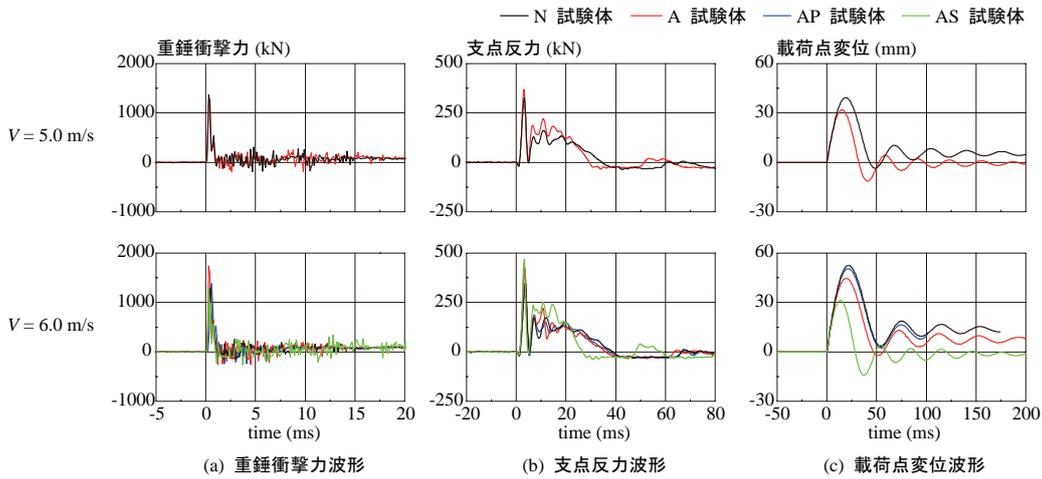


図-3 重錘衝撃力、支点反力および荷重点変位に関する時刻歴応答波形

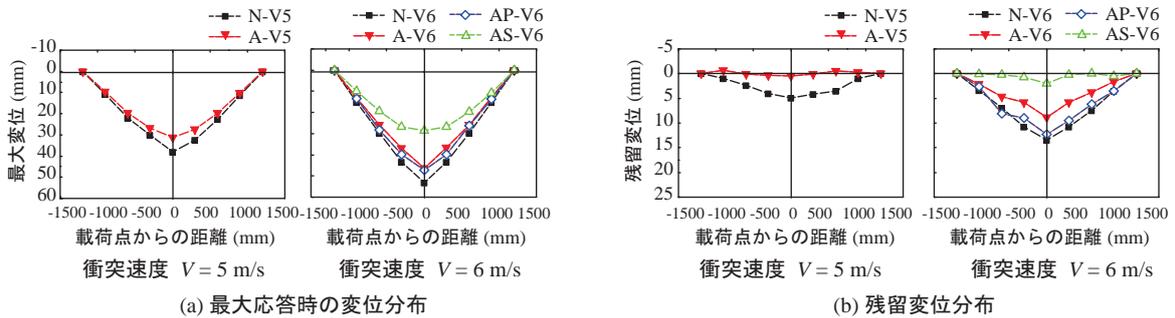


図-4 最大応答時の変位分布および残留変位分布

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、 $V = 6 \text{ m/s}$ 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、側面補強を施すことによって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、各試験体の最大変位発生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るためと推察される。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 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、荷重点近傍の領域に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重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 $t = 4.0 \text{ ms}$ 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、 $t = 8.0 \text{ ms}$ においては、荷重点近傍のひずみが1.2%程度に到達し、 $t = 12.0 \text{ ms}$ 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。

また、A-V6試験体の場合には、 $t = 4.0 \text{ ms}$ までA-V5試

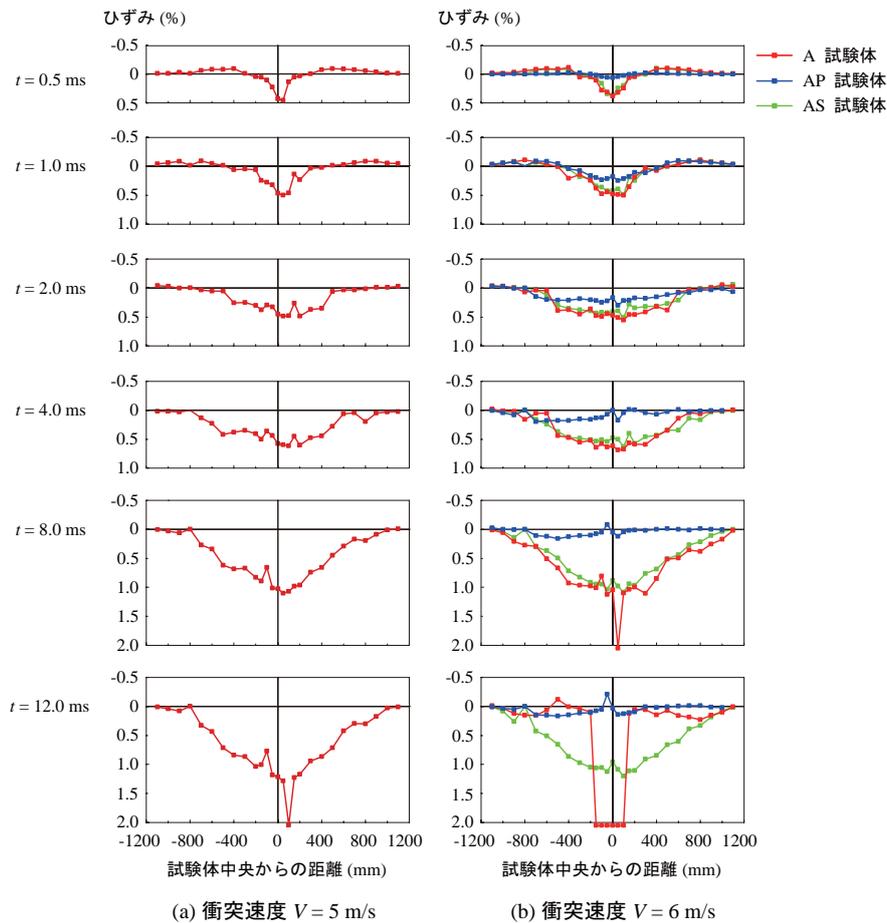


図-5 曲げ補強材のひずみ分布の推移状況

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 において荷重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到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。

4. まとめ

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、鋼板併用法と AFRP シートのウェー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の破断によっ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)