

論文 AFRP シートで曲げ補強した鋼繊維補強無孔性コンクリートはりの耐衝撃性

木内 洋介^{*1}・栗橋 祐介^{*2}・河野 克哉^{*3}・安田 瑛紀^{*4}

要旨: 本論文では、アラミド繊維 (AFRP) シート補強した無孔性コンクリートはりの耐衝撃挙動を検討することを目的に、鋼繊維混入率の異なる PFC はりを対象に AFRP シート曲げ補強を施し、重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、1) 鋼繊維混入率を大きくすることにより、ひび割れ発生後における架橋効果が発揮されるため、はりのせん断抵抗性が向上するとともに、AFRP シートの引張応力負担が低減されることや、2) AFRP シートと無孔性コンクリートの付着性能は、シート破断後においても十分に確保されていることなどが明らかになった。

キーワード: 無孔性コンクリート, 鋼繊維, AFRP シート, 曲げ補強, 耐衝撃性

1. はじめに

暴風雨による土石流, 落石, 竜巻飛来物の他, テロ行為による爆破飛来物などのリスクが世界各地で高まる傾向にあり, 衝突作用を受ける可能性のある構造物や重要建築物においては, その耐衝撃性を向上させることが極めて重要である。近年, 超高強度コンクリート (UFC) の高強度でかつ靱性能に優れた材料特性に着目し, 耐衝撃用途構造物への適用性に関する研究¹⁾が推進されており, 設計指針の作成等, 実用化に向けた検討が行われている²⁾。

一方, 最近では 400 MPa 程度の世界最高水準の圧縮強度を有する無孔性コンクリート (PFC) が開発されており^{3),4)}, 著者らはこれまで PFC はりを対象に鋼繊維混入率や, 衝撃エネルギーが PFC はりの耐衝撃性挙動に及ぼす影響について実験的な検討を行っている^{5),6)}。その結果, 鋼繊維補強した PFC はりの衝撃載荷実験では, 繊維混入率が高くかつ圧縮強度が高い場合において, 鋼繊維の架橋効果が効率的に発揮されることや, 高い耐衝撃性を期

待できることなどを明らかにしている。ただし, PFC はりに鋼繊維を混入する場合においても, 最終的にはスパン中央部に発生した曲げひび割れが大きく開口して終局に至ることが明らかになっている。

これらの知見に基づくと, PFC はりの引張応力作用面に引張強度特性に優れた補強材を用いることにより, PFC の高い圧縮強度特性を活かした複合部材を開発できるものと考えられる。一般的な引張材としては鉄筋や PC 鋼線を適用することが考えられるが, 1) 鉄筋の場合は, その降伏強度が PFC の圧縮強度と同程度以下であるため, 引張鉄筋比が過大になることや, 2) PC 鋼線の場合には衝撃荷重作用下における必要定着長や定着方法に関する検討が別途必要になる等の制約条件が生じる。

これらの条件に鑑み, ここでは引張材として連続繊維シートを用いる方法に着目した。これは, 著者らの既往の研究では, 連続繊維シートを RC 部材の引張応力作用面に接着することで, その耐衝撃性を向上可能であることを明らかにしているためである^{7),8)}。本研究では, 引

表-1 使用材料の一覧

種類	名称	略号	成分ならびに物性
結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント	L	比表面積: 3,330 cm ² /g, 密度: 3.24 g/cm ³
	石英微粉末	Q	密度: 3.24 g/cm ³ , 純度: 99.9% 以上
	シリカフェューム	SF	比表面積: 20 m ² /g, 密度: 2.29 g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法: 0.3 mm, 密度: 2.61 g/cm ³
短繊維	鋼繊維	F	直径 0.2 mm, 長さ 15 mm, 密度 7.84 g/cm ³ 引張強度: 2,800 N/mm ² , 引張弾性率: 210 kN/mm ²
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリグルコール系

*1 室蘭工業大学 工学部 建築社会基盤系学科 (学生会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (正会員)

*3 太平洋セメント (株), 中央研究所第 2 研究部高機能コンクリートチーム, 主席研究員 博 (工) (正会員)

*4 太平洋セメント (株), 中央研究所第 2 研究部高機能コンクリートチーム, 研究員 修 (工) (正会員)

表-2 配合

名称	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)								フロー *2 (mm)	空気量 *3 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
		W	B			S	F	SP*1	DF*1			
			L	Q	SF							
PFC0	15	199	876	347	102	927	0	B × 2.2 %	B × 0.02 %	233	3.8	327
PFC1							78 (外割 1 %)	B × 2.5 %	B × 0.02 %	269	3.7	351
PFC2							157 (外割 2 %)	B × 2.5 %	B × 0.02 %	268	3.4	336

*1: Wの一部に内割置換, *2: 落下振動を与えないフロー試験による値 (JIS A 5201 準拠), *3: 空気室圧力法

表-3 AFRP シートの力学的特性値 (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 (%)
280	392	0.193	2.06	118	1.75

表-4 試験体の一覧

試験体名	鋼繊維混入率 (%)	重錘落下高さ H (mm)
PFC0-H150	0	150
PFC0-H300		300
PFC1-H300	1	300
PFC1-H450		450
PFC1-H600		600
PFC2-H300	2	300
PFC2-H450		450
PFC2-H600		600

張強度および弾性係数の大きな合成繊維として、アラミド繊維 (AFRP) シートを用いることとした。

このような背景より、本論文では、アラミド繊維 (AFRP) シート補強した PFC はりの耐衝撃挙動を検討することを目的に、鋼繊維混入率の異なる PFC はりを対象に AFRP シート曲げ補強を施し、重錘落下衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 使用材料および配合

表-1 には、PFC に用いた材料を一覧にして示している。また、表-2 には、これらの配合を示している。表に示しているように結合材 (B) には、低熱ポルトランドセメント (L)、石英微粉末 (Q) およびシリカフェーム (SF) を、細骨材には珪砂 (S) を、混和剤には高性能減水剤 (SP) ならびに消泡剤 (DF) を用いた。また、鋼繊維 (F) は外割で1もしくは2%混入した。

(2) 練混ぜおよび養生方法

PFC はオムニミキサ (容量 30 L) に B, W, SP, S および DF を投入して 8 分間の練混ぜを行い、さらに F を投入して 2 分間の練混ぜを行った。その後、所定の型枠に打ち込んで、型枠内で封緘養生 (20 °C) を行い、材齢 48 h

で脱型した。脱型後、セメントの水和を促進するため試験体を密閉容器内に配置し、真空ポンプを用いて減圧状態にしたところで水を投入し、外表面から内部への水供給を行った。なお、脱気時間は水が供試体の上部まで到達後 30 分間とした。上述の吸水処理を行った試験体は、蒸気養生 (昇温速度 15 °C/h, 最高温度 90 °C, 最高温度保持時間 48 h, 降温速度 15 °C/h) の後、さらに加熱養生 (昇温速度 60 °C/h, 最高温度 180 °C, 最高温度保持時間 48 h, 降温速度 60 °C/h, 1 atm) を行った。

(3) AFRP シートの接着方法

AFRP シートの接着工程は、以下の通りである。すなわち、1) コンクリート表面のレイタンスをブラスト処理により除去し、2) プライマーを塗布し翌日触れてもベトつかない程度に硬化したことを確認した後、3) エポキシ系含浸接着樹脂を用いて、接着界面に気泡が残らないように AFRP シートを含浸接着する手順で行った。なお、養生期間は 1 週間程度とした。表-3 には、本実験に用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。

2.2 載荷実験の概要

(1) 試験体の一覧

表-4 には、本実験に用いた供試体の一覧を示している。供試体の数は、鋼繊維混入率および重錘落下高さを変化させた全 8 体である。試験体名の第 1 項目は、コンクリートの種類と鋼繊維混入率 (%) の組み合わせを示している。また、第 2 項目の、H に付随する数値は、重錘落下高さ H (mm) である。

図-1 には、供試体の形状寸法を示している。本研究に用いた供試体は、断面寸法 (幅 × 高さ) が 100 × 25 mm、純スパン長が 500 mm の繊維補強 PFC に AFRP シートを接着したはりである。AFRP シートは、はり下面の幅方向に全域、軸方向には中央部から両支点側に 220 mm の範囲に接着した。また、シート上には検長 10 mm のひずみゲージを 20 もしくは 30 mm 間隔で貼付した。写真-1 には、実験状況を示している。

(2) 計算耐力

表-5 には、計算耐力の一覧を示している。ここで、表中の計算曲げ耐力 P_u は、コンクリート標準示方書⁹⁾ に基づき平面保持を仮定した断面分割法により算定した。なお、PFC の応力-ひずみ関係は文献⁴⁾を参照した。また、

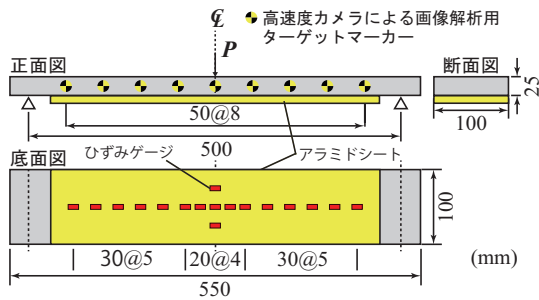


図-1 供試体形状寸法

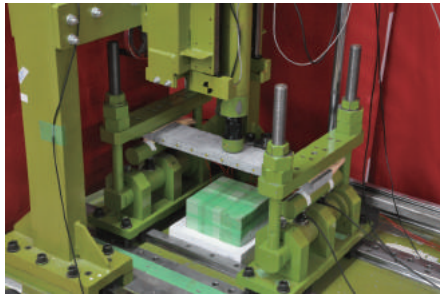


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況

AFRPシートの応力-ひずみ関係は公称値(表-3)を用いた。PFCとAFRPシートは、計算終局時まで完全付着状態にあるものと仮定した。計算上はシート破断によって終局に至ることを確認している。

計算せん断耐力 V_u は文献¹⁰⁾を参考にして下式により求めた。

$$V_u = V_c + V_f \quad (1)$$

$$V_c = 0.18 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

$$V_f = (f_v / \tan \beta_u) \cdot b \cdot d / 1.15 \quad (3)$$

ここに、 f'_c : PFCの圧縮強度、 b : はり幅、 d : 有効高さ(=はり高)、 f_v : 鋼繊維補強PFCの架橋応力⁴⁾、 β_u : 軸方向と斜めひび割れのなす角度、である。なお、 β_u は 45° と仮定した。

表-5の計算結果より、いずれの試験体も静荷荷時には曲げ破壊で終局に至る設計となっていることが分かる。

(3) 実験方法と測定項目

衝撃荷重実験は、質量20 kg、先端直径60 mmの鋼製重錘を一度だけ自由落下させる単一荷法に基づいて行っている。なお、重錘落下位置は梁のスパン中央部に限定している。実験は、はりが崩壊もしくはAFRPシートが剥離/破断するまで行うこととした。また、試験体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。

測定項目のうち、重錘衝撃力および支点反力はサンプリングタイムを0.01 msとしてデジタルデータレコーダーにて一括収録している。荷点変位は、高速度カメラによって撮影された画像を用い、試験体に貼付したター

表-5 計算耐力の一覧

試験体の種類	曲げ耐力 P_u (kN) (1)	せん断耐力 V_u (kN) (2)	せん断余裕度 α (2)/(1)
PFC0	7.52	16.3	2.16
PFC1	8.45	35.1	4.15
PFC2	9.32	53.1	5.70

ゲットマーカの移動量から算出した。フレームレートは2000枚/秒である。

3. 実験結果

3.1 各種応答波形

図-2には、各試験体の重錘衝撃力、支点反力および荷点変位に関する時刻歴応答波形を示している。なお、荷点変位は、鉛直下向きのためひずみを正としている。

図より、重錘衝撃力波形は、PFC0-H300およびPFC1-H600試験体を除き、重錘衝突時に継続時間が極めて短く振幅の大きい波形が励起した後、継続時間が15 ms程度で振幅が10 kN程度の主波動が励起していることが分かる。なお、PFC0-H300およびPFC1-H600試験体は、経過時間10 ms程度で重錘衝撃力が急激に低下した。これは、後述するように、PFCはりのせん断破壊やAFRPシートの破断によりはりの抵抗力が消失したことによるものと考えられる。

支点反力波形は、PFC0-H300およびPFC1-H600試験体を除き、継続時間が15 ms程度で最大振幅が20~30 kNの主波動が励起しており、その最大振幅は落下高さの増大に伴って大きくなる傾向を示していることが分かる。PFC0-H300およびPFC1-H600試験体の場合は、重錘衝撃力波形の場合と同様に経過時間10 ms程度で急激に低下している。

荷点変位波形も、PFC0-H300およびPFC1-H600試験体を除き、継続時間が15~20 ms程度の正弦半波が励起しており、その振幅は落下高さの増大に伴って大きくなる傾向にある。また、落下高さ $H=300$ mmにおいては、PFC0-H300試験体の変位が大きく残留していることから、著しく損傷していることが伺われる。落下高さ $H=600$ mmにおいては、PFC1-H600試験体の最大変位がPFC2-H600試験体の場合よりも大きく、その後変位が5 mm程度復元するものの大きく残留しており、曲げ変形が残留していることが伺われる。

3.2 破壊性状

写真-2には、ひび割れやシート破断、および残留変形などの損傷が顕著に見られた、PFC0-H150/300、PFC1-H600およびPFC2-H600試験体に関する実験終了後の破壊性状を示している。

図より、PFC0-H150試験体の場合には、はりが上向き

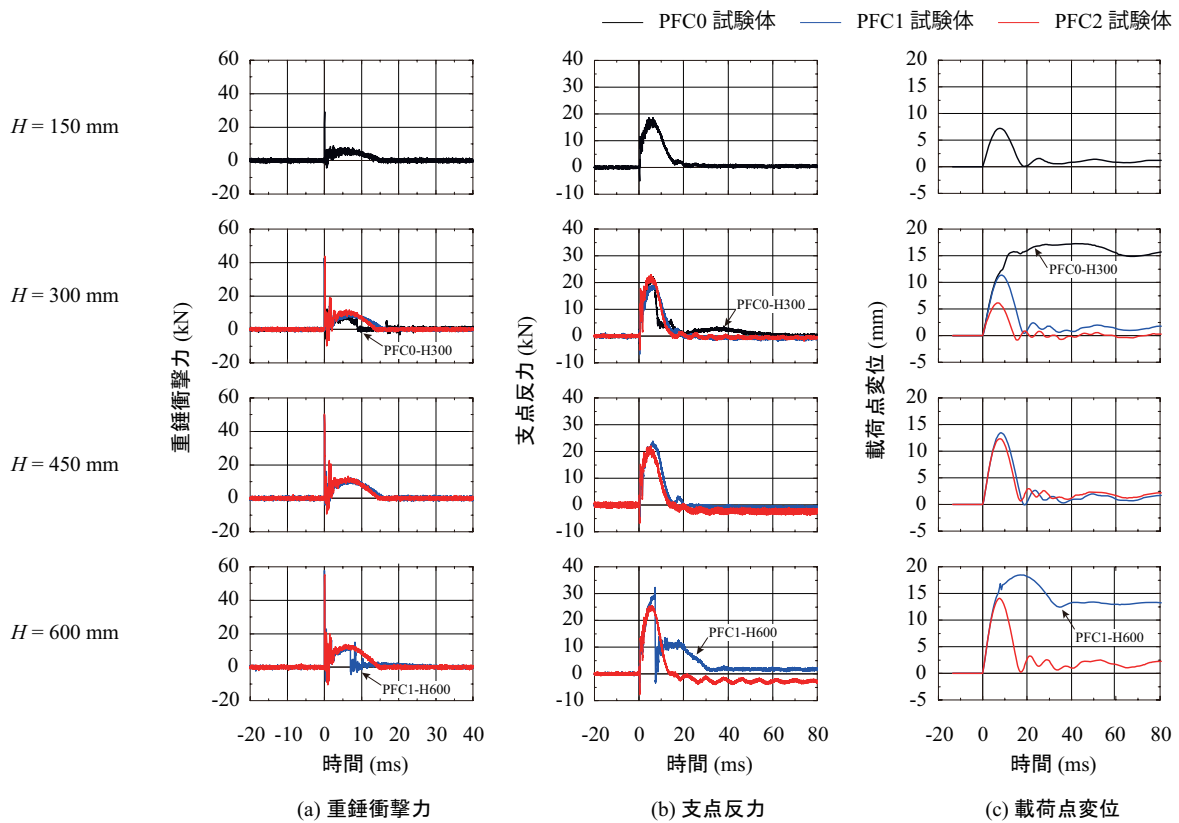


図-2 時刻歴応答波形

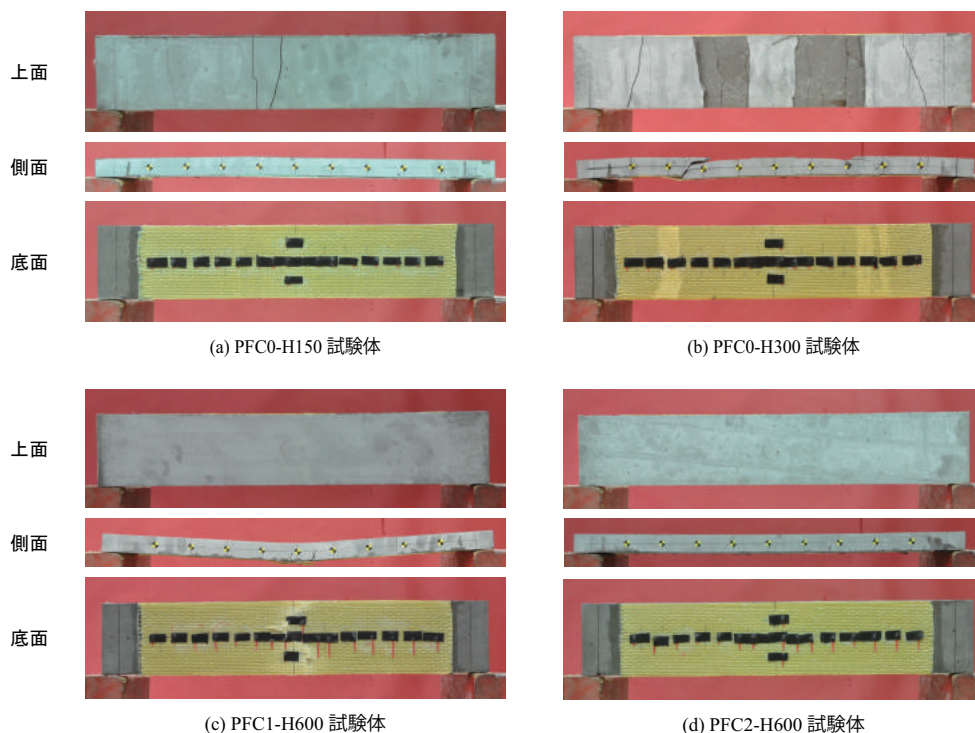


写真-2 実験終了後における各試験体の破壊性状

に曲げ変形し、上面には曲げひび割れが2本発生していることが分かる。これは、衝撃載荷実験において、最大変位到達後、AFRPシートの復元力により、変位が復元する過程で生じていることを別途高速カメラ画像で確認している。

PFC0-H300 試験体の場合には、左右のせん断スパンの中央部周辺に斜めひび割れが発生しており、上面ではPFCが広範囲に渡って剥落していることが分かる。

PFC1-H600 試験体の場合には、左右対称の曲げ変形が残留しており、載荷点近傍においてはやはり側面にひび割

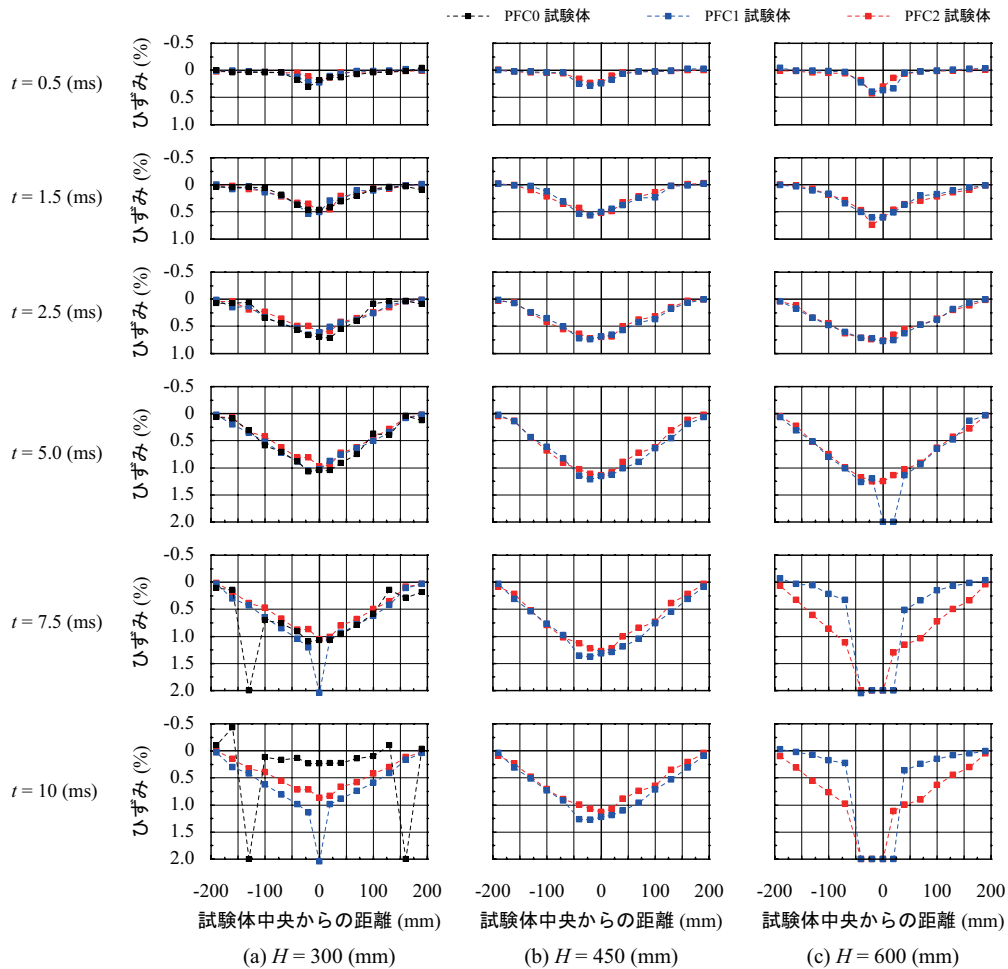


図-3 AFRP シートのひずみ分布性状の時間的推移

れの開口、底面のシートには破断が見られる。ただし、PFC0-H300 試験体に見られた、斜めひび割れや上面のひび割れや剥離は見られない。これは、鋼繊維の架橋効果が発揮されているためである。

また、写真-2(c), (d)を比較すると、PFC2-H600 試験体の場合には、PFC1-H600 試験体に見られた著しい残留変形やシートの破断は見られないことが分かる。これは、鋼繊維混入率を大きくすることにより、PFCのひび割れ発生後における架橋効果が発揮されるため、ひび割れの開口が抑制されて、AFRPシートの引張応力負担が低減されたことによるものと考えられる。

これらのことから、PFCへの鋼繊維混入により、負曲げによる曲げひび割れや、せん断ひび割れが抑制されることが明らかになった。また、鋼繊維混入率を大きくすることにより、AFRPシートの引張応力負担が低減されシートの破断が抑制されることが明らかになった。

なお、表-5の計算結果では、いずれの試験体も静的設計上の破壊モードは曲げ破壊型となっている。これに対し、PFC0試験体はせん断破壊に至っている。この破壊モードの相違には荷重方法の違いが影響を与えているものと考えられる。すなわち、衝撃荷重実験において重錘

衝突直後にスパン中央部に局所的に変形が生じるため、見かけ上のスパン長が短くなり曲げ耐力が増大したことによるものと考えられる。

3.3 AFRP シートのひずみ分布性状の時間的推移

図-3には、各試験体のAFRPシートの軸方向ひずみ分布の時間的推移を最大応答近傍まで示している。

図-3(a)より、落下高さ $H = 300$ mm の場合には、いずれの試験体も経過時間 0.5 ms では荷重点近傍のみで局所的にひずみが発生しており、その後経過時間 2.5 ms までひずみの発生領域が両支点側に進展していることが分かる。経過時間 5 ms 以降では、いずれの試験体もほぼ曲げ一次振動モードを呈している。

経過時間 7.5 ms 以降では、PFC0-H300 試験体の場合には、左側せん断スパンにおいて大きなひずみが発生していることが分かる。その後、10 ms では、右側せん断スパンにおいても同様の性状を示している。これは、前述のようにPFC0-H300試験体の両側に発生した斜めひび割れの発生・開口により、シートが部分的に剥離しその部分に大きな引張応力が生じたことによるものと考えられる。なお、実験では、シートの破断は確認されていない。

一方、PFC1/2-H300 試験体の場合には、経過時間 7.5 ms

において最大応答を示し、10 ms では変位の復元に伴ってひずみ値が減少に転じている。なお、PFC1-H300 試験体のスパン中央部で測定容量 (20,000 μ) を超過するひずみが発生しているが、実験ではシートの破断は認められていない。従って、これはひずみゲージ接着部の樹脂の局所的な亀裂等によるものと考えられる。

図-3(b)より落下高さ $H = 450$ mm の場合には、 $H = 300$ mm の場合と同様に、経過時間 2.5 ms まではひずみ発生領域が両支点側に伝播する性状を示していることが分かる。その後、7.5 ms 近傍で最大応答を示し、10 ms では変位の復元により減少に転じている。各試験体のひずみ値は $H = 300$ mm の場合よりも大きい。また、PFC1-H450 試験体の場合が PFC2-H450 試験体に比較して、ひずみ値が大きく、その分布形状が幾分左側に偏っている。これは、鋼繊維混入率が小さいため、AFRP シートの負担する引張応力が大きくなったことによるものと考えられる。

図-3(c)より落下高さ $H = 600$ mm の場合には、経過時間 2.5 ms まではひずみ発生領域が両支点側に拡大する性状を示し、ひずみ値は $H = 300, 450$ mm の場合よりも大きいことが分かる。経過時間 5.0 ms において PFC1-H600 試験体の場合には、載荷点右側で測定容量 (20,000 μ) を超過するひずみが発生し、7.5 ms 以降においては、両せん断スパンのひずみが急激に低下している。これは、シートが破断したことによるものと考えられる。

一方、PFC2-H600 試験体の場合には、経過時間 7.5 ms において、載荷点近傍のひずみが 20,000 μ を超過しているものの、10 ms においても急激なひずみ値の低下は見られない。このことから、載荷点近傍のシートは破断に近い状態であったものの、最終的には破断には至らなかったものと考えられる。

以上のことから、鋼繊維混入率を大きくすることにより、AFRP シートに作用する引張応力が低減され、はりの耐衝撃性が向上することが明らかになった。また、本実験においては、AFRP シートが破断するケースが見られたものの、シートが剥離するケースは見られなかった。従って、ひずみ分布性状は曲げ変形に対応した分布性状を呈していることから、シートと PFC の付着性能は十分に確保されていたものと推察される。

4. まとめ

本研究では、アラミド繊維 (AFRP) シート補強した無孔性コンクリート (PFC) の耐衝撃挙動を検討することを目的に、鋼繊維混入率の異なる PFC はりを対象に AFRP シート曲げ補強を施し、重錘落下衝撃実験を実施した。本実験で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 鋼繊維の混入により、変位復元後の上反りに伴うはり上縁のひび割れが抑制される。

- 2) 鋼繊維混入率を大きくすることにより、PFC のひび割れ発生後における架橋効果が発揮されるため、はりのせん断抵抗性が向上するとともに、AFRP シートの引張応力負担も低減される。
- 3) AFRP シートと無孔性コンクリートの付着性能は、シート破断に至るまで十分に確保されている。

謝辞

変形計測においては土木研究所寒地土木研究所所有の高速カメラを使わせて頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋 順, 別府万寿博: 剛飛翔体の高速衝突下での UFC パネルの補強効果の評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 13 巻, pp. 405-412, 2013.10
- 2) 防衛施設学会: 高速衝突を受けるコンクリート構造物の局部破壊に対する設計ガイドライン (案), 2014.3
- 3) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450 N/mm² 以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造方法と硬化組織の変化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp.1443-1448, 2016.7
- 4) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 圧縮強度 400 N/mm² の最密充填マトリクスを有する繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp.279-284, 2016.7
- 5) 栗橋祐介, 河野克哉, 曾根涼太, 小室雅人, 多田克彦: 圧縮強度 400N/mm² を有する鋼繊維補強コンクリート梁の耐衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp.1201-1209, 2017.3
- 6) 河野克哉, 栗橋祐介, 多田克彦, 小室雅人: 圧縮強度 400 N/mm² を有する鋼繊維補強コンクリート梁の耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 1087-1092, 2017.7
- 7) 栗橋祐介, 三上 浩, 今野久志, 佐藤元彦, 岸 徳光: AFRP シート曲げ補強した RC 梁のシート破断抑制法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp 1043-1052, 2016.3
- 8) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: 衝撃荷重により損傷した扁平 RC 梁の AFRP シート曲げ補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 763-768, 2016.7
- 9) 土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2012
- 10) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー 113, 2004