

## AFRP シート曲げ補強した PFC はりの耐衝撃性に関する実験的研究

Experimental study on impact resistant capacity of steel fiber reinforced PFC beam strengthened with AFRP sheet

栗橋祐介<sup>†</sup>, 河野克哉<sup>\*</sup>, 安田瑛紀<sup>\*\*</sup>, 木内洋介<sup>\*\*\*</sup>, 小室雅人<sup>\*\*\*\*</sup>

Yusuke Kurihashi, Katsuya Kono, Eki Yasuda, Yosuke Kinai, Masato Komuro

<sup>†</sup>博(工), 室蘭工業大学講師, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)<sup>\*</sup>博(工), 太平洋セメント(株), 中央研究所 第2研究部, 主席研究員 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)<sup>\*\*</sup>修(工), 太平洋セメント(株), 中央研究所 第2研究部, 研究員 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)<sup>\*\*\*</sup>室蘭工業大学大学院, 環境創生工学系専攻, 土木工学コース (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)<sup>\*\*\*\*</sup>博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this study, to establish the impact resistant design method for steel fiber reinforced Porosity Free Concrete (PFC) beam strengthened with Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) sheet, static and impact loading tests were conducted, and then influence of loading method on deformation behavior of beam were investigated. Also, the impact resistant design method based on basic calculation result was suggested. Consequently, it was revealed that the maximum deflection under impact loading can be estimated by means of calculated load-deflection curve under static loading. And then, performance based impact resistant design concept was shown by using the magnitude of tensile strain of AFRP sheet as performance index.

*Key Words: porosity free concrete, steel fiber, AFRP sheet strengthening method, impact resistant capacity*

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

## 1. はじめに

近年, 圧縮強度 200 N/mm<sup>2</sup> 程度の超高強度コンクリート (UFC) が開発され, その実用化が進められている<sup>1)</sup>. 最近では, 最密充填理論に基づく材料設計と配合設計および脱型直後の強制吸水処理とその後の2段階熱養生により, さらに圧縮強度を向上させた無孔性コンクリート (PFC) が開発され, 圧縮強度 450 N/mm<sup>2</sup> 以上を発現可能であることが確認されている<sup>2)</sup>.

著者らは, これまで PFC はりの静的および衝撃載荷実験を行い, 鋼繊維混入率が大きいほど耐衝撃性が高くなる傾向にあることやその効果はマトリクス強度が高い場合ほど効率的に発揮されることなどを明らかにしている<sup>3)</sup>. また, 鋼繊維補強 PFC の引張軟化曲線に基づいて架橋応力を評価し, 断面耐力を求めることで PFC はりの耐衝撃性を概ね推定可能であることを明らかにしている<sup>4)</sup>.

さらに, はり部材において PFC の超高強度特性を効率的に活用するため, 高強度繊維シートを引張補強材としてはり下面に接着する場合についても検討し

ている<sup>5)</sup>. シートには, しなやかで耐衝撃性, 耐折損性に優れる有機系材料として, アラミド製連続繊維 (AFRP) シートを用いている. 衝撃載荷実験の結果, AFRP シートの PFC との付着性能は極めて高く, 耐衝撃性が大きく向上することなどを明らかにしている. 従って, 本研究を推進することにより, PFC と AFRP シートの軽量かつ耐衝撃性に優れる特性を生かした耐衝撃用プレートなどを開発できるものと考えられる. しかしながら, 現状では耐衝撃性の定量的な評価手法の確立には至っていない.

このような背景より, 本研究では, AFRP シート曲げ補強 PFC はりの耐衝撃性評価手法の確立を目的に, 静的および衝撃載荷実験を行い, 両載荷法による応答特性を比較検討するとともに, 静載荷時の計算結果に基づく衝撃載荷時の応答変位の推定法を提案した.

## 2. 実験概要

## 2.1 PFC の概要

## (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

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: kuri@mmm.muroran-it.ac.jp

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 <sup>2</sup> /g, 密度：3.24 g/cm <sup>3</sup>
	石英微粉末	Q	密度：3.24 g/cm <sup>3</sup> , 純度：99.9% 以上
	シリカフェーム	SF	比表面積：20 m <sup>2</sup> /g, 密度：2.29 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	珪砂	S	最大寸法：0.3 mm, 密度：2.61 g/cm <sup>3</sup>
短繊維	鋼繊維	F	直径 0.2 mm, 長さ 15 mm, 密度 7.84 g/cm <sup>3</sup> 引張強度：2,800 N/mm <sup>2</sup> , 引張弾性率：210 kN/mm <sup>2</sup>
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

表-2 各 PFC の配合

名称	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							フロー *2 (mm)	空気量 *3 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		W	B			S	F	SP*1				DF*1
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 試験体の一覧

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

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) には引張強度 2,800 N/mm<sup>2</sup> の高強度鋼繊維を用い、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) に鋼繊維 (F) を除く材料を投入して 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、試験体用の型枠に打ち込んで、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。その後、蒸気養生 (最高温度 90 °C, 保持時間 48h) ならびに加熱養生 (最高温度 180 °C, 保持時間 48h) を実施した。その他の養生方法の詳細については文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 2.2 載荷実験の概要

### (1) 試験体の一覧

表-3 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、鋼繊維混入率、載荷方法および重錘落下高さを変化させた全 11 体である。試験体名の第 1 項目は、コンクリートの種類 (PFC) 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。なお、静載荷実験の場合には、第 2 項目を英文字 S と示している。

図-1 には、試験体の形状寸法を示している。本研究に用いた試験体は、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。

### (2) 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

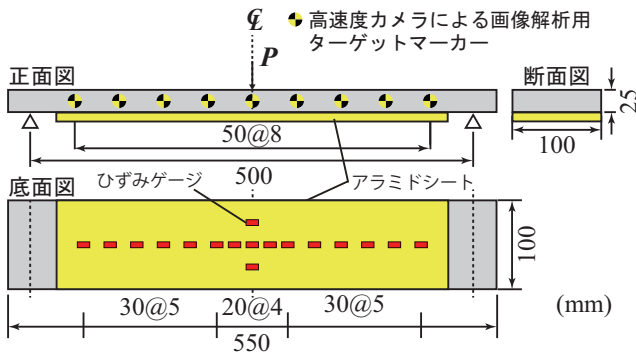


図-1 試験体形状寸法

表-4 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	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-5 計算耐力の一覧

試験体の種類	鋼繊維の架橋応力 $f_v$ (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ耐力 $P_{uc}$ (kN) (1)	せん断耐力 $V_{uc}$ (kN) (2)	せん断余裕度 $\alpha$ (2)/(1)
PFC0	-	7.52	16.3	2.16
PFC1	4.19	8.45	35.1	4.15
PFC2	8.42	9.32	53.1	5.70

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 シートを含浸接着した。なお、養生期間は 1 週間程度とした。表-4 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。

### (3) 計算耐力

表-5 には、各試験体の計算曲げ耐力  $P_{uc}$ 、計算せん断耐力  $V_{uc}$ 、および  $V_{uc}$  を  $P_{uc}$  で除したせん断余裕度  $\alpha$  を示している。また、文献<sup>6)</sup>を参考に PFC における鋼繊維の架橋応力  $f_v$  も示している。ここで、計算曲げ耐力は、AFRP シートと PFC の完全付着を仮定した断面分割法によって算定した。なお、各材料の応力-ひずみ関係は以下のように設定した。すなわち、PFC については、文献<sup>1)</sup>を参考に UFC と同様の応力-ひずみ関係に材料試験結果 (圧縮強度) を反映させる形で設定した。また、鋼繊維補強 PFC の場合には、ひび割れ発生後における鋼繊維の架橋応力を考慮した引張応力-ひずみ関係を設定する必要がある。ここでは、鋼繊維の架橋応力は、鋼材の降伏応力に換算して断面計算に反映させた。すなわち、図-2 に示すように、断面内に分散する鋼繊維を、その架橋応力と等価な降

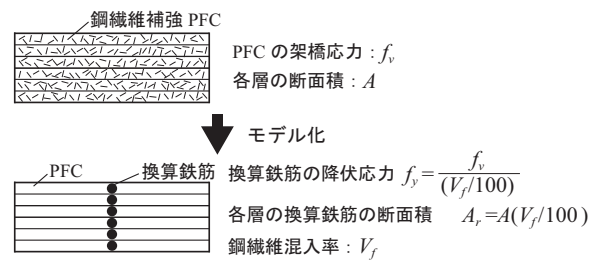


図-2 断面分割の概要

伏強度を有する鋼材 (換算鉄筋) として断面計算を行なった。また、AFRP シートの応力-ひずみ関係は、アラミド補強研究会の補強設計指針<sup>7)</sup>を参考にして設定した。

なお、3 章以降に示す荷重-変位関係に関する計算結果は、以下のように算出した。すなわち、i) 断面高さ方向の分割数は 25、スパン方向の分割数は 100 とする、ii) 上縁ひずみを 10  $\mu$  ずつ増加させて、各段階における断面中立軸を求め、曲率-曲げモーメント関係を求める、iii) 各荷重ステップにおけるスパン方向の曲げモーメント分布を求め、対応する曲率分布を求めて、弾性荷重法によりスパン中央部の変位を算定する、である。

一方、計算せん断耐力は、文献<sup>1)</sup>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<sup>6)</sup>、 $\beta_u$ : 軸方向と斜めひび割れのなす角度である。なお、 $\beta_u$  は 45° と仮定した。

表-5 に示す計算結果より、いずれの試験体も静載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。

### (4) 実験方法と測定項目

写真-1 には、静載荷実験の状況を示している。静載荷実験は、載荷位置をスパン中央部とする三点曲げ載荷法により行った。荷重は、載荷速度を 3.55 mm/分とし、変位制御で作用させた。なお、測定項目は載荷荷重、載荷点変位およびシートの軸方向ひずみである。

写真-2 には、衝撃載荷実験の状況を示している。衝撃載荷実験は、質量 20 kg、先端直径 60 mm で先端形状が曲率半径 226 mm の球面状の鋼製重錘を一度だけ自由落下させる単一載荷法に基づいて行った。なお、重錘落下位置ははり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



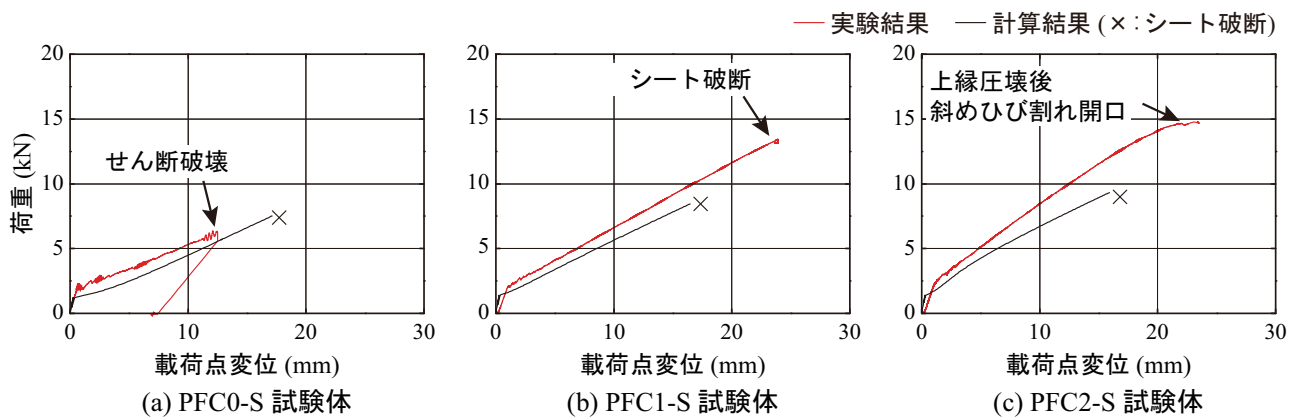


図-3 荷重-変位関係

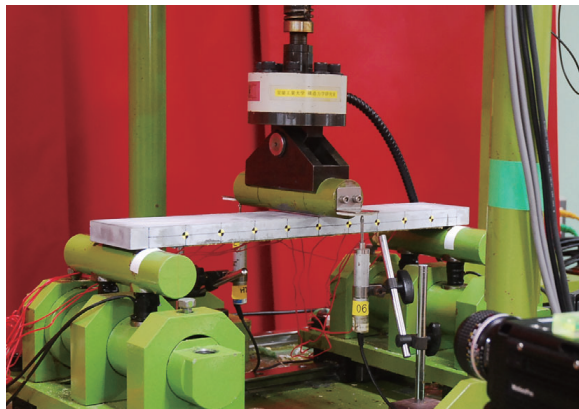


写真-1 静載荷実験の状況

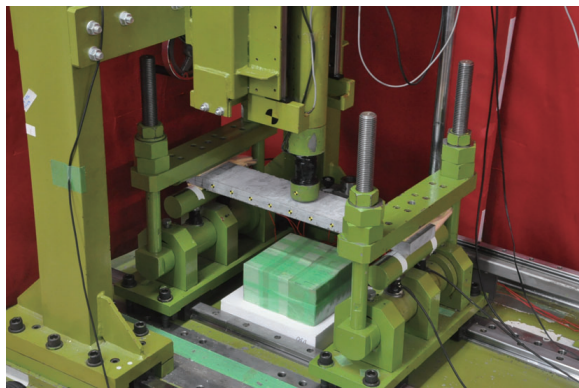


写真-2 重錘落下衝撃実験の状況

／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。載荷点変位は、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ゲットマーカの移動量から算出した。フレームレートは 2,000 枚/秒である。

### 3. 静載荷実験結果

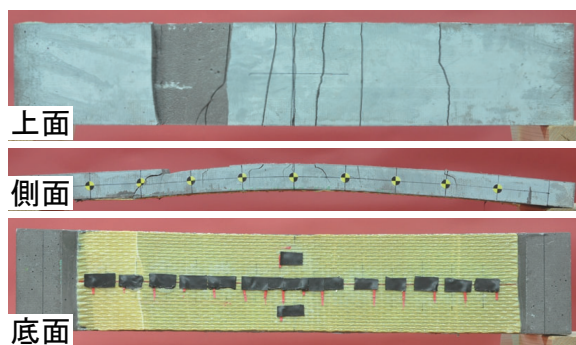
#### 3.1 荷重-変位関係

図-3 には、静載荷による各試験体の荷重-変位関係に関す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、前述の断面分割法により求めた。計算上は、いずれのほりもシート破断により終局に至っていることを確認している。

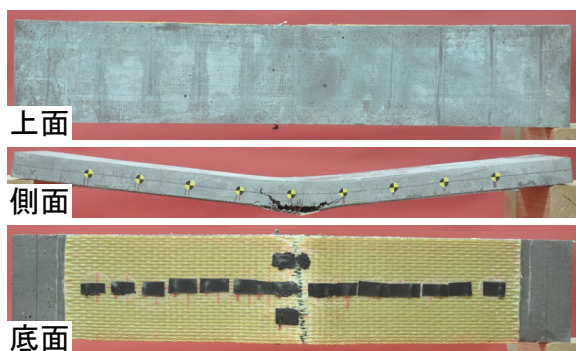
図より、いずれの試験体においても、実験および計算結果ともに、荷重 2~3 kN において勾配が大きく変化していることが分かる。これは、PFC はりの下縁にひび割れが発生したことによるものと考えられる。なお、各実験結果を比較すると、鋼繊維混入率が高い場合ほど、勾配の変化が緩やかになっていることが分かる。これは、鋼繊維の混入により、ひび割れの急激な開口が抑制されていることによるものと考えられる。

PFC0-S 試験体の場合には、実験では荷重 6 kN 程度ではりがせん断破断に至っている。表-5 に示した PFC0-S 試験体の計算せん断耐力は 16 kN 程度であることから、実測耐力は計算耐力を大きく下回っている。これは、文献<sup>6)</sup>の式が i) セメントマトリクスに短繊維が混入され、かつ ii) ポストテンション式の PC 鋼材が配置された PC 桁の載荷実験に基づいて提案された実験式であり、本実験の前提条件と大きく異なるためと考えられる。短繊維を混入しない PFC はりのせん断耐力算定式を提案するためには、別途実験結果に基づく検討が必要であるものと考えられる。

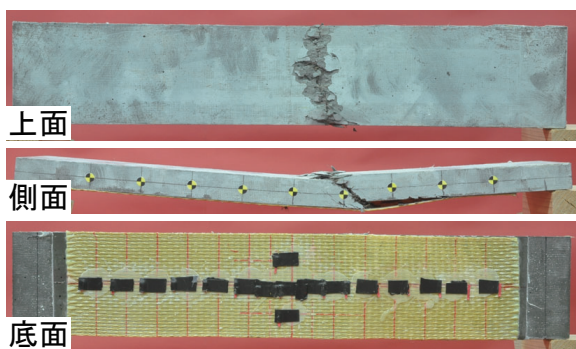
PFC1-S 試験体の場合には、実験結果は荷重 8 kN 程度まで計算結果とよく対応している。計算結果は、シート破断により終局に至るのに対し、実験結果はさらに荷重が増大し 13 kN 程度でシート破断により終局に至っている。このような傾向は、PFC2-S 試験体の場合にも同様である。これは、シートの実引張強度が、計算に用いている公称引張強度よりも大きいことや PFC に混入した鋼繊維の架橋応力との相乗効果が



(a) PFC0-S 試験体



(b) PFC1-S 試験体



(c) PFC2-S 試験体

写真-3 静載荷実験終了後における各試験体の破壊性状

発揮されたことによるものと推察される。

PFC2-S 試験体は、後述するように、上縁の PFC が圧縮破壊した後、載荷点近傍において斜めひび割れが大きく開口して終局に至っている。

以上のことから、せん断破壊に至った PFC0-S 試験体を除き、前述の断面分割法による計算結果は実験結果を安全側に評価することが明らかになった。

### 3.2 破壊性状

写真-3 には、静載荷実験終了後における各試験体のひび割れ分布および AFRP シートの損傷状況を示している。

写真より、PFC0-S 試験体の場合には、左側スパンにおいて斜めひび割れが発生し、せん断破壊に至っていることが分かる。また、上縁では PFC が大きく剥

落しており、ひび割れも数多く発生している。なお、側面図を見ると、はりが上側に反り上がっているが、これははりが大きくたわんだ後、せん断破壊に至り、その後シートの復元力が発揮されたことによるものである。

PFC1-S 試験体の場合には、左右対称の曲げ変形を呈しており、スパン中央部においてシートが破断していることが分かる。また、PFC2-S 試験体の場合には、上縁では PFC が圧縮破壊し、側面においては載荷点の右側において斜めひび割れの開口が見られる。

### 3.3 載荷荷重に対する AFRP シートのひずみ分布性状

図-4 には、AFRP シートのひずみ分布性状を載荷荷重  $P=5$  および  $10$  kN の場合について示している。図より、いずれの試験体においても、ほぼ左右対称の逆三角形の分布性状を示していることが分かる。また、荷重が大きい場合ほど、大きなひずみが発生している。このことから、いずれのはりも曲げが卓越する変形状態を示していることが分かる。

また、同一荷重時における各試験体のひずみ分布を比較すると、鋼繊維混入率 2% の場合において発生ひずみが最も小さい。これは、鋼繊維の混入によりシートに作用する引張応力が低減されたことによるものと考えられる。

## 4. 衝撃実験結果

### 4.1 各種応答波形

図-5 には、各試験体の重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形を示している。

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、はりの抵抗力が急激に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  $20 \sim 30$  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。

載荷点変位波形も、PFC0-H300 および PFC1-H600 試験体を除き、継続時間が  $15 \sim 20$  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

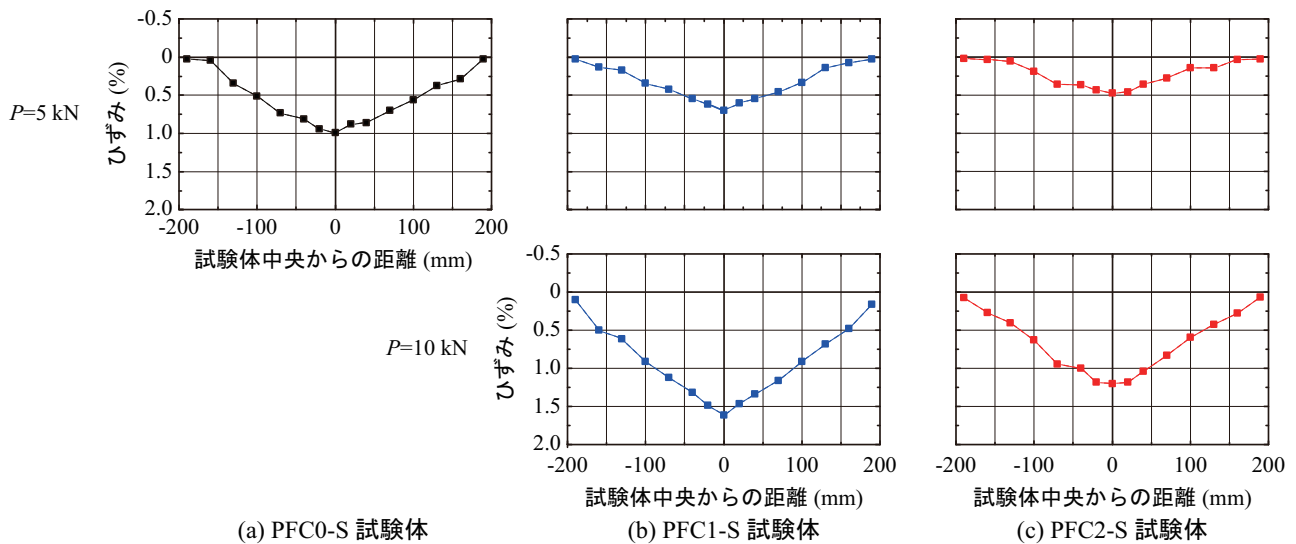


図-4 静載荷実験に関するAFRPシートのひずみ分布性状

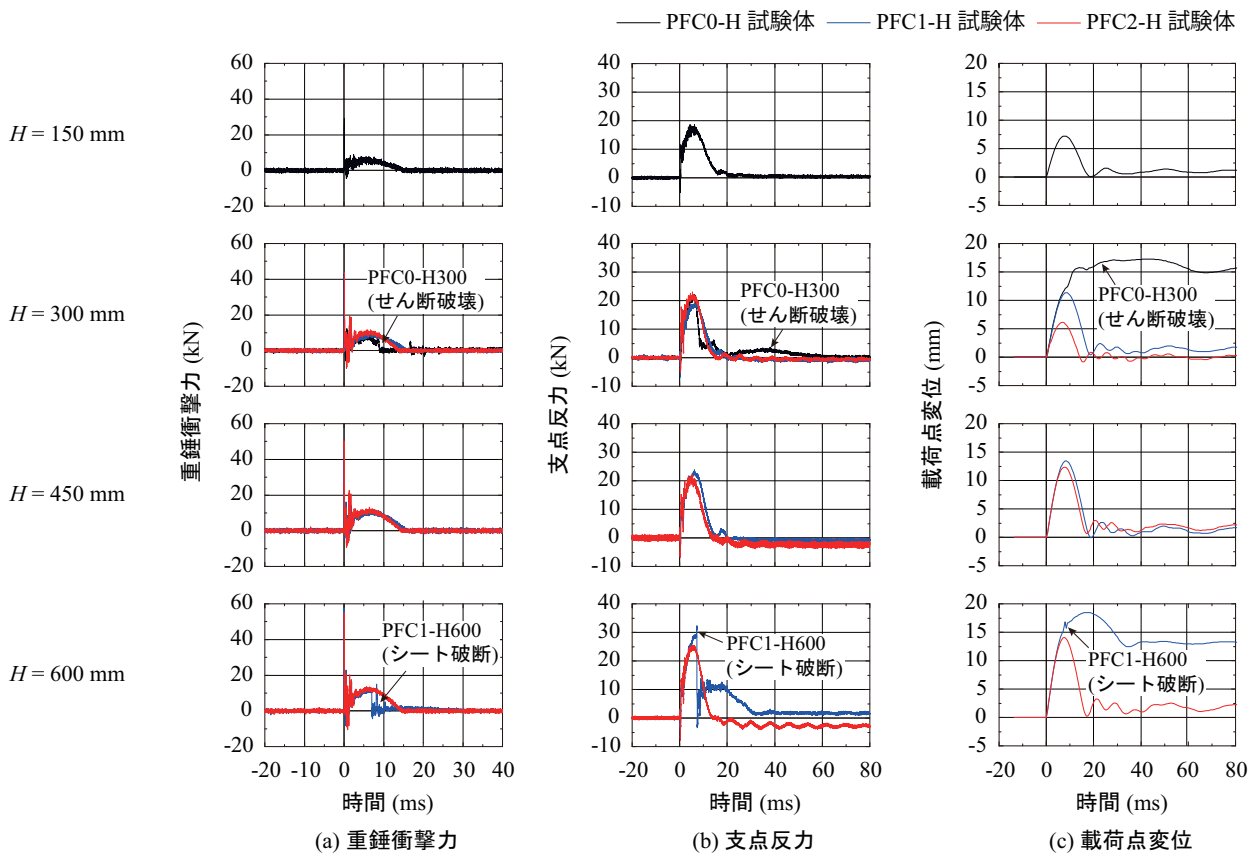


図-5 時刻歴応答波形

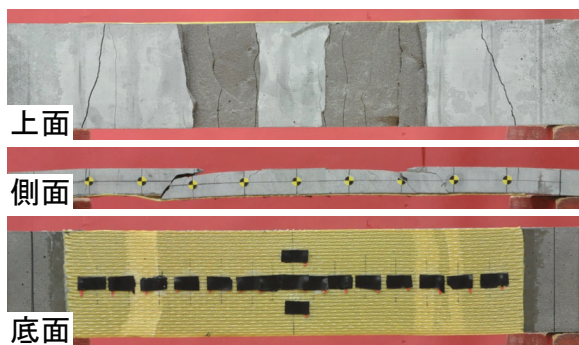
においては、PFC0-H300 試験体の変位が大きく残留していることから、著しく損傷していることが伺われる。落下高さ  $H = 600$  mm においては、PFC1-H600 試験体の最大変位が PFC2-H600 試験体の場合よりも大きく、その後変位が 5 mm 程度復元するもの大きく残留しており、曲げ変形が残留していることが伺われる。なお、せん断破壊やシート破断が生じないケースにおいては、最大応答値到達後大きく復元し、残留変

位をほとんど生じていない。このことから、アラミド繊維シートの復元性能が顕著に発揮されていることが分かる。

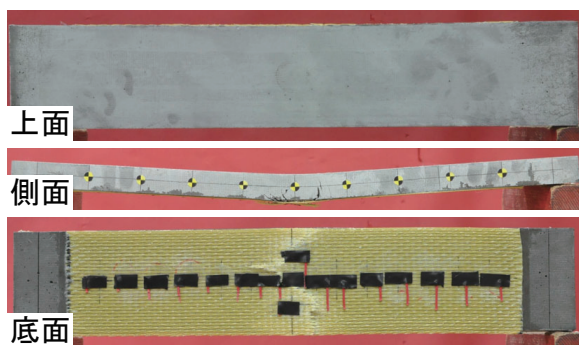
#### 4.2 破壊性状

写真-4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-H300 および PFC1/2-H600 試験体に関する実験終了後の破壊性

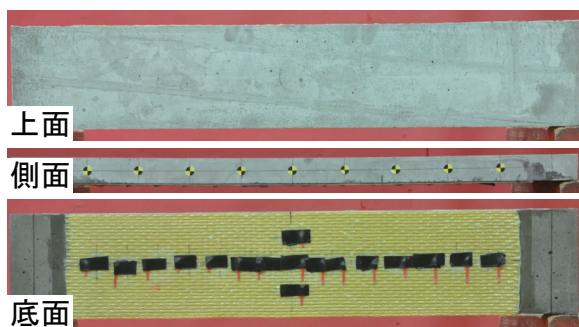




(a) PFC0-H300 試験体



(b) PFC1-H600 試験体



(c) PFC2-H600 試験体

写真-4 衝撃载荷実験終了後における各試験体の破壊性状

状を示している。また、写真-5には、PFC1-H600試験体のシート破断状況を拡大写真にて示している。

図より、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。なお、PFC0の場合には、静载荷実験においてもせん断破壊に至っていることより、本実験においては、载荷方法によらず鋼繊維を混入していない場合には、せん断破壊に至ることが明らかになった。

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、载荷点近傍においては、はり側面にひび割れの開口、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、PFC2-H600試験体の場合には、PFC1-H600試



写真-5 PFC1-H600試験体のシート破断状況

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。これは、鋼繊維混入率 $V_f$ 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 $V_f$ 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。

#### 4.3 AFRPシートのひずみ分布性状の時間的推移

図-6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示している。ここでは、はりの変形モードを確認するため、重錘衝突直後の局所変形が全体変形に移行するまでについて示した。

図より、いずれの実験ケースにおいても、経過時間0.5msでは载荷点近傍のみで局所的にひずみが発生していることが分かる。その後経過時間2.5msまでひずみの発生領域が両支点側に進展している。経過時間5ms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。これは、衝撃载荷初期には、曲げ応力が载荷点近傍において両端固定梁の状態が発生し、その後両支点方向に向かって伝播し、最終的に単純支持梁の状態に移行する性状を示すことによるものと推察される。このような、耐衝撃挙動は、FRPシート曲げ補強したRCはりの衝撃载荷実験<sup>8)</sup>においても同様に確認されている。

また、経過時間5msにおけるひずみ分布性状は、図-4に示した静载荷時の性状と類似していることから、最大応答時近傍においては静载荷の場合と同様の変形モードを呈しているものと考えられる。

### 5. 耐衝撃設計法の一提案

#### 5.1 最大応答変位の推定

前章までの検討より、衝撃载荷時における最大応答

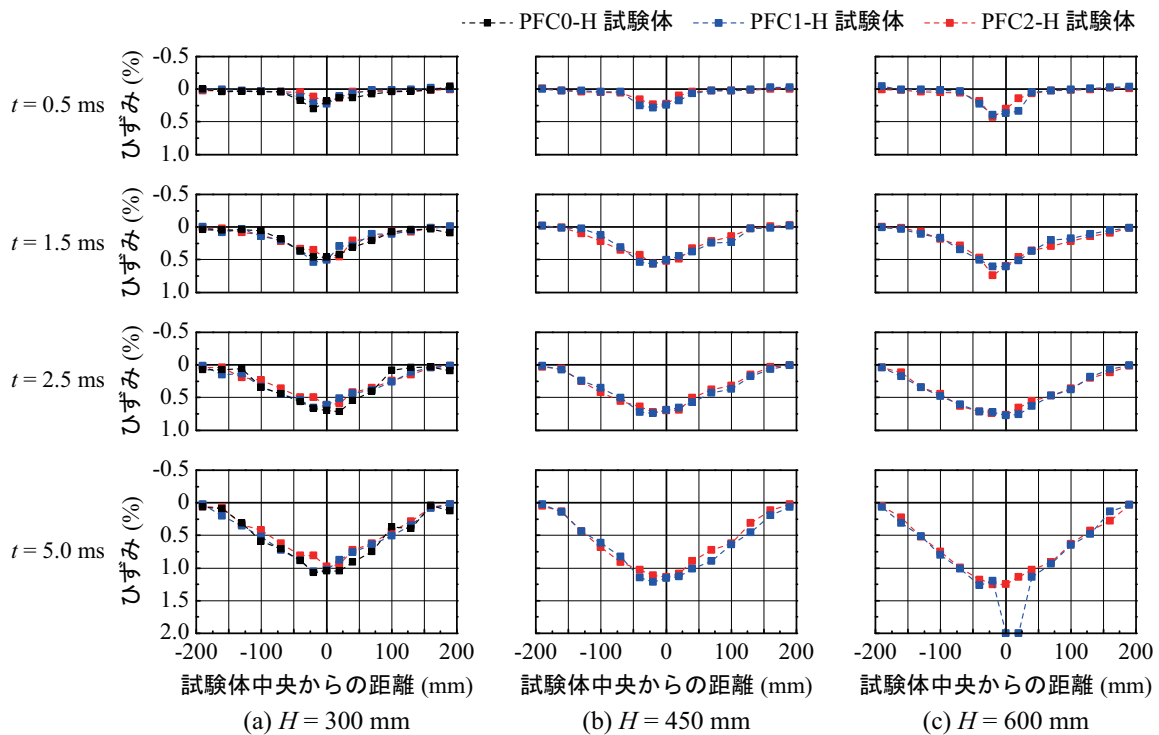


図-6 衝撃载荷実験に関する AFRP シートのひずみ分布性状の時間的推移

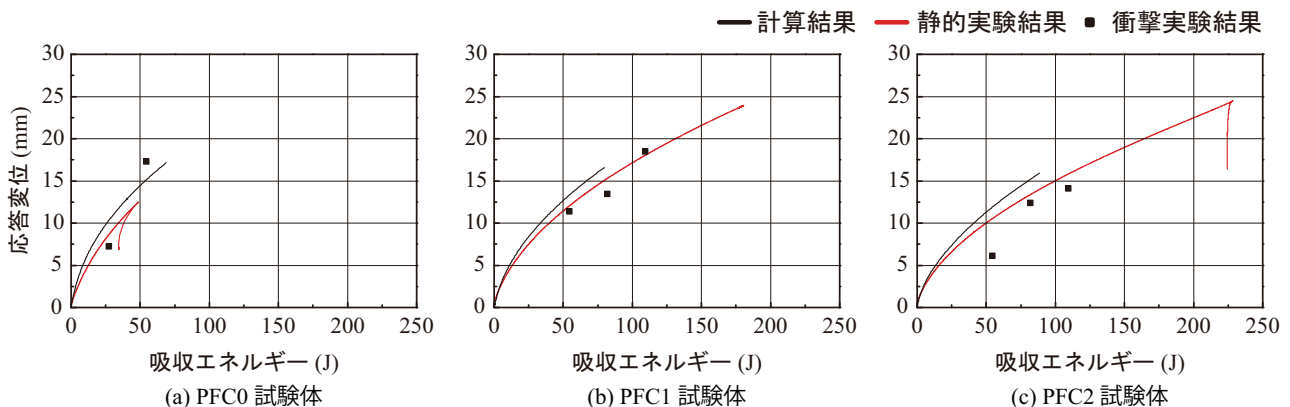


図-7 応答変位-吸収エネルギー関係

時の変形モードは、曲げ一次振動に類似した性状を示しており、静的载荷時のモードに類似していることが明らかになった。これは、本実験に用いた PFC はりの断面形状が扁平で、かつせん断スパン比 (= せん断スパン長 / はり高) が比較的大きく、曲げ変形が卓越する特性を有していることによるものと考えられる。このことから、本実験における衝撃载荷時の PFC はりの最大応答変位は、静的载荷時の荷重-変位曲線を用いて推定できる可能性があるものと考えられる。

図-7には、はりの吸収エネルギーと変位量の関係を示している。ここで、静载荷時の結果については図-3の荷重-変位曲線を対象に任意の変位量まで積分して吸収エネルギーを求め、吸収エネルギーと変位量との関係を描いている。ここでは、断面分割法によ

る計算結果も合わせて示している。

一方、衝撃载荷時の結果については、重錘と試験体の完全非弾性衝突を仮定して下式(4)により、伝達エネルギー  $E_t$  を求めた。これは、衝突直後、重錘と試験体が一体となって挙動しており、かつ図-5に示すように重錘衝撃力と支点反力や载荷点変位の主波動継続時間は概ね対応しているためである。

$$E_t = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot E_k \quad (4)$$

ここに、 $m_1$ : はりの等価質量、 $m_2$ : 重錘の質量である。 $m_1$  は、はりの振動モードが曲げ一次モードと等価であるものと仮定して、純スパンにおけるはりの質量を 17/35 倍して求めた。

その後、伝達エネルギー  $E_t$  が PFC はりの最大応答



変位時の吸収エネルギー  $E_a$  と等価であるものと仮定して、実験結果をプロットした。すなわち、各実験ケースにおける吸収エネルギー (= 伝達エネルギー  $E_t$ ) と最大応答変位との関係をプロットした。

なお、上記の伝達エネルギー  $E_t$  の式は、以下のよう誘導される。すなわち、まず、重錘が PFC はりに衝突する直前と直後における運動量保存則の式として下式 (5), (6) を用いる。

$$m_2 v_{20} = (m_1 + m_2) v_0 \quad (5)$$

$$v_0 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_{20} \quad (6)$$

ここに、 $v_{20}$ : 衝突直前の重錘速度、 $v_0$ : 衝突直後の合質点の速度である。次に、衝突前後の運動エネルギーを下式 (7), (8) 式のように考える。

$$E_{kb} = \frac{1}{2} m_2 v_{20}^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_{ka} &= \frac{1}{2} (m_2 + m_1) v_0^2 \\ &= \frac{m_2^2}{2(m_1 + m_2)} v_{20}^2 \\ &= \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot E_{kb} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $E_{kb}$ : 衝突直前の運動エネルギー、 $E_{ka}$ : 衝突直後の運動エネルギーである。なお、 $E_{kb}$  は重錘落下による入力エネルギー  $E_k$  と等価であり、 $E_{ka}$  ははりへの伝達エネルギー  $E_t$  に対応することから、前述の式 (4) が誘導される。

図-7 より、はりのせん断破壊やシート破断が生じたケースを除き、衝撃载荷実験による最大応答変位は、静载荷実験の結果と概ね対応していることが分かる。また、静载荷時の载荷点変位に関する計算結果は、実験結果を 1 割程度大きく評価していることから、安全側の評価を与えていることが分かる。

なお、上述の通りせん断破壊やシート破断が生じたケースについては適用範囲外となるため、耐衝撃設計においては予め破壊モードを推定しておくことが重要である。破壊モードの推定は、静的設計が基本となるがその適用性の詳細については、今後さらに検討を進める必要がある。

また、本研究では応答変位-吸収エネルギー関係の計算結果において载荷速度の効果を考慮していない。ただし、さらに衝突速度が大きい場合には、ひずみ速度に応じて検討する必要があるものと考えられる。

## 5.2 シートひずみに基づく耐衝撃設計法

ここで、AFRP シート曲げ補強 PFC はりの性能設計の一例として、入力エネルギー  $E_k$  とシートひずみ  $\varepsilon_s$  との関係について検討する。

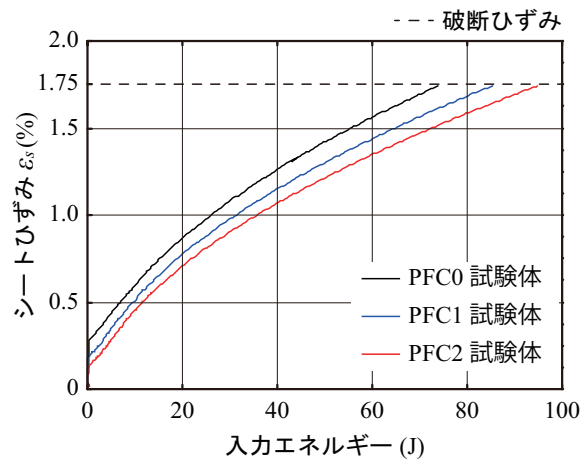


図-8 シートひずみ-入力エネルギー関係

図-8 には、入力エネルギー  $E_k$  とシートひずみ  $\varepsilon_s$  との関係を示している。なお、入力エネルギー  $E_k$  は下式により求めた。

$$E_k = \frac{m_1 + m_2}{m_2} \cdot E_a \quad (9)$$

また、シートひずみ  $\varepsilon_s$  は、静的計算結果における各荷重ステップにおける吸収エネルギー  $E_a$  に対応する下縁シートひずみである。

図より、各 PFC はりの入力エネルギー  $E_k$  とシートひずみ  $\varepsilon_s$  の関係が明らかになっており、同一入力エネルギーにおけるシートひずみ  $\varepsilon_s$  は鋼繊維混入率の最も大きい PFC2 試験体の場合において最も軽微であることが分かる。このことから、各限界状態をシートひずみ  $\varepsilon_s$  を用いて適宜設定することで、耐衝撃用途の AFRP シート曲げ補強 PFC はりの入力エネルギーに基づく性能設計が可能になるものと考えられる。ただし、PFC0 試験体のようにせん断破壊する場合も考えられることから、実設計では想定される破壊モードに応じて検討する必要がある。

## 6. まとめ

本研究では、AFRP シート曲げ補強 PFC はりの耐衝撃性評価手法の提案を目的に、静的および衝撃载荷実験を実施し、その耐荷挙動を比較検討するとともに、静的载荷に関する計算結果に基づく衝撃载荷時の応答変位の推定法を提案した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) PFC に混入した鋼繊維の架橋応力を考慮した静的耐力の計算結果は、実験結果と概ね対応する。
- 2) 衝撃载荷実験より、AFRP シート曲げ補強 PFC はりは、高い復元性能を有することが明らかになった。これは、AFRP シートが弾性材料であり、そ

の復元特性が顕著に発揮されたことによるものであると考えられる。

- 3) 衝撃載荷実験における伝達入力エネルギーに対応する載荷点変位は、静載荷実験結果による吸収エネルギー-載荷点変位関係と概ね対応している。このことから、衝撃載荷実験によるはりの最大応答変位は、静的載荷に関する計算結果を用いて、吸収エネルギーとの関係から推定できることが明らかになった。
- 4) 各限界状態をシートひずみに基づいて設定することで、耐衝撃用途のAFRPシート曲げ補強RCはりの入力エネルギーに基づく性能設計の考え方を示した。ただし、せん断破壊する場合には適用範囲外となることに留意する必要がある。

本研究では、入力エネルギーとシートひずみとの関係を明らかにする手法を提案した。本手法により、要求性能に応じて適切なシートを選定できるものと考えられる。今後は、材料特性や補強量が異なるシートを対象とした検討を実施する必要があるものと考えられる。

#### 謝辞

変形計測においては(国研)土木研究所寒地土木研究所所有の高速度カメラを使用させて頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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, 2004.9
- 2) 河野克哉，中山莉沙，多田克彦，田中敏嗣：450

N/mm<sup>2</sup>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

- 3) 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/mm<sup>2</sup>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
- 4) 河野克哉，栗橋祐介，多田克彦，小室雅人：圧縮強度400 N/mm<sup>2</sup>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
- 5) 木内洋介，栗橋祐介，河野克哉，安田瑛紀：AFRPシートで曲げ補強した鋼繊維補強した無孔性コンクリートはりの耐衝撃性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40, No. 2, pp. 1423-1428, 2018.7
- 6) 柳田龍平，中村拓郎，河野克哉，二羽淳一郎：圧縮強度400 N/mm<sup>2</sup>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
- 7) 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)，1998.1
- 8) 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

(2018年9月21日受付)

(2019年2月1日受理)