

AFRP シート曲げ補強した PFC はりの静的および衝撃载荷実験

Static and impact loading tests on steel fiber reinforced PFC beam strengthened with AFRP sheet

室蘭工業大学大学院	○ 学生員	木内 洋介 (Yosuke Kinai)
室蘭工業大学大学院	正 員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
太平洋セメント (株)	正 員	河野 克哉 (Katsuya Kono)
太平洋セメント (株)	正 員	安田 瑛紀 (Eki Yasuda)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室 雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

近年、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¹⁾、著者らは、これまで PFC はりの静的および衝撃载荷実験を行い、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²⁾。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³⁾。

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、アラミド繊維 (AFRP) 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⁴⁾。衝撃载荷実験の結果、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。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として、静的および衝撃载荷実験を行い、両载荷法による応答特性を比較検討するとともに、静载荷時の計算結果に基づく耐衝撃性評価手法の提案を試みた。

2. 実験概要

2.1 载荷実験の概要

表-1 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、载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、静载荷実験の場合には、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、(幅 × 高さ × スパン長) が $100 \times 25 \times 500$ 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。

AFRP シートの接着工程は、以下の通りである。すなわち、1) はり底面の補強範囲にブラスト処理を施してプライマーを塗布し、指触乾燥状態であることを確認の後、2) エポキシ系含浸接着樹脂を用いてシートを接着し、3) 1

表-1 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-S	0	(静载荷)
PFC0-H150/300		150,300
PFC1-S	1	(静载荷)
PFC1-H300/450/600		300,450,600
PFC2-S	2	(静载荷)
PFC2-H300/450/600		300,450,600

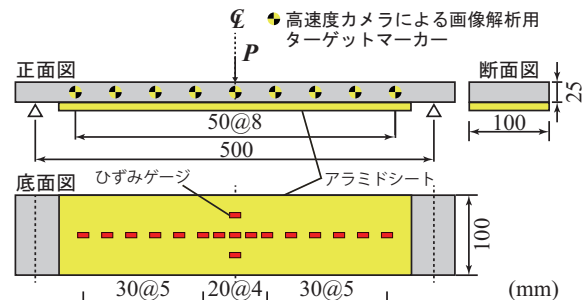


図-1 試験体形状寸法

表-2 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

週間程度養生する、である。表-2 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。なお、PFC の概要については文献²⁾を参照されたい。

表-3 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 α を示している。また、文献⁵⁾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。PFC の圧縮および引張側の応力-ひずみ関係は、文献⁶⁾を参考にして設定した。鋼繊維補強 PFC のひび割れ発生後における架橋応力⁵⁾は、鋼材の降伏強度に換算して断面計算に反映させた。また、計算せん断耐力は、文献¹⁾を参考にして下式により求めた。

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

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

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

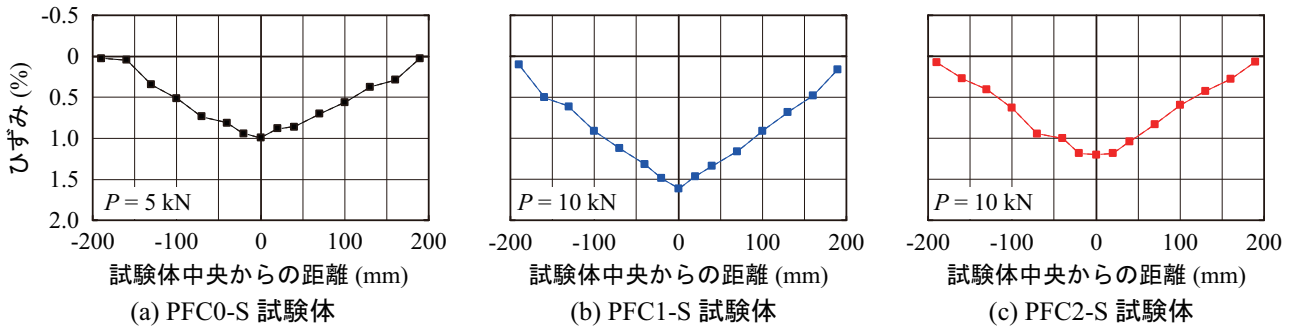
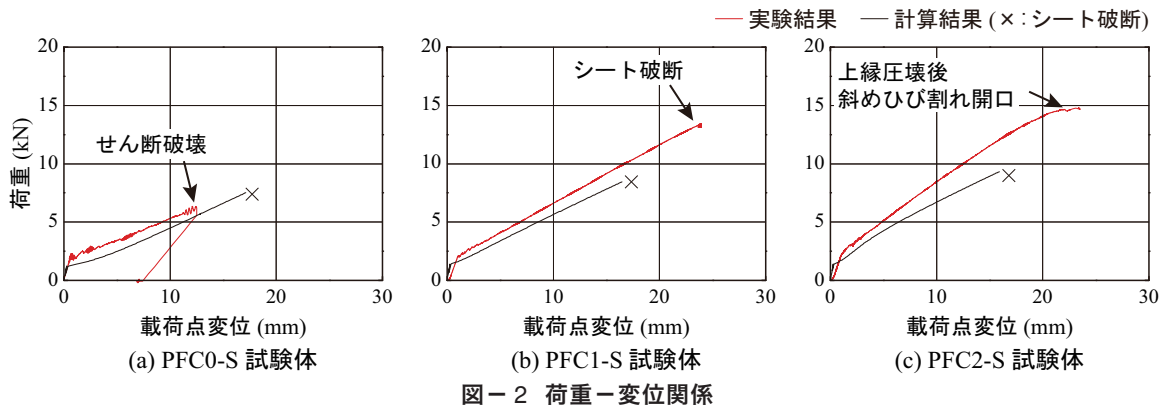


表-3 計算耐力の一覧

試験体の種類	鋼繊維の架橋応力 f_v (N/mm ²)	曲げ耐力 P_{uc} (kN) (1)	せん断耐力 V_{uc} (kN) (2)	せん断余裕度 α (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

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⁵⁾、 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-3に示す計算結果より、いずれの試験体も静荷重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。

静荷重実験は、荷重位置をスパン中央部とする三点曲げ荷重法により行った。荷重は、荷重速度を3.55 mm/分とし、変位制御で作用させた。なお、測定項目は荷重荷重、荷重点変位およびシートの軸方向ひずみである。

衝撃荷重実験は、質量20 kg、先端直径60 mmの鋼製重錘をスパン中央部に一度だけ自由落下させる単一荷重法に基づいて行った。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。

3. 静荷重実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-2には、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、いずれのはり

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、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壊に至っているが、表-3に示した計算せん断耐力は16 kN程度である。これは、静荷重実験を3点曲げで行っているため、マトリクスが脆性的なPFC0試験体の場合には、実験結果がばらつく傾向にあることや、はりが大きく変形し曲げひび割れが多数発生した結果、せん断耐力が低下したことが要因であるものと考えられる。

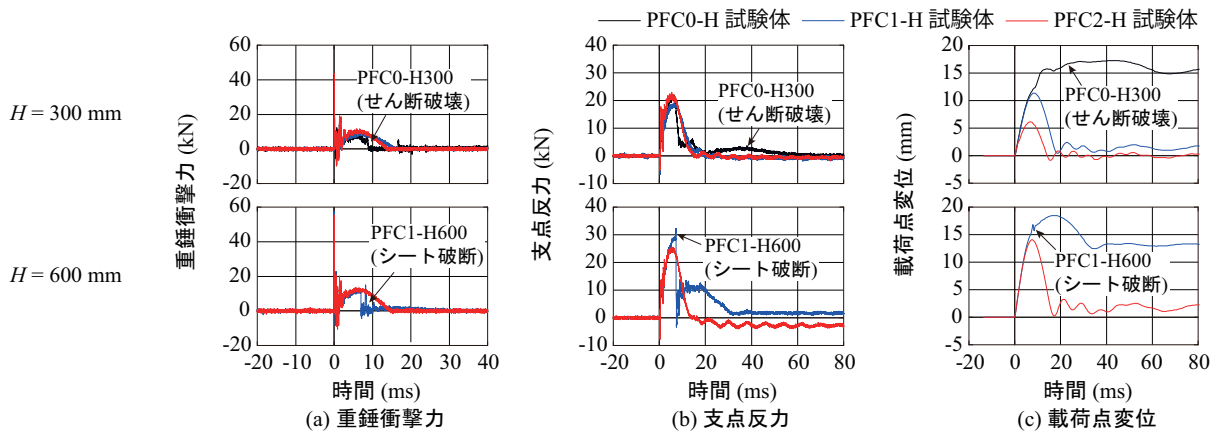
PFC1-S試験体の場合には、実験結果は荷重8 kN程度まで計算結果とよく対応している。計算結果は、シート破断により終局に至るのに対し、実験結果はさらに荷重が増大し13 kN程度でシート破断により終局に至っている。このような傾向は、PFC2-S試験体の場合にも同様である。これは、シートの実引張強度が、計算に用いている公称引張強度よりも大きいことやPFCに混入した鋼繊維の架橋応力との相乗効果が発揮されたことによるものと推察される。

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、荷重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。

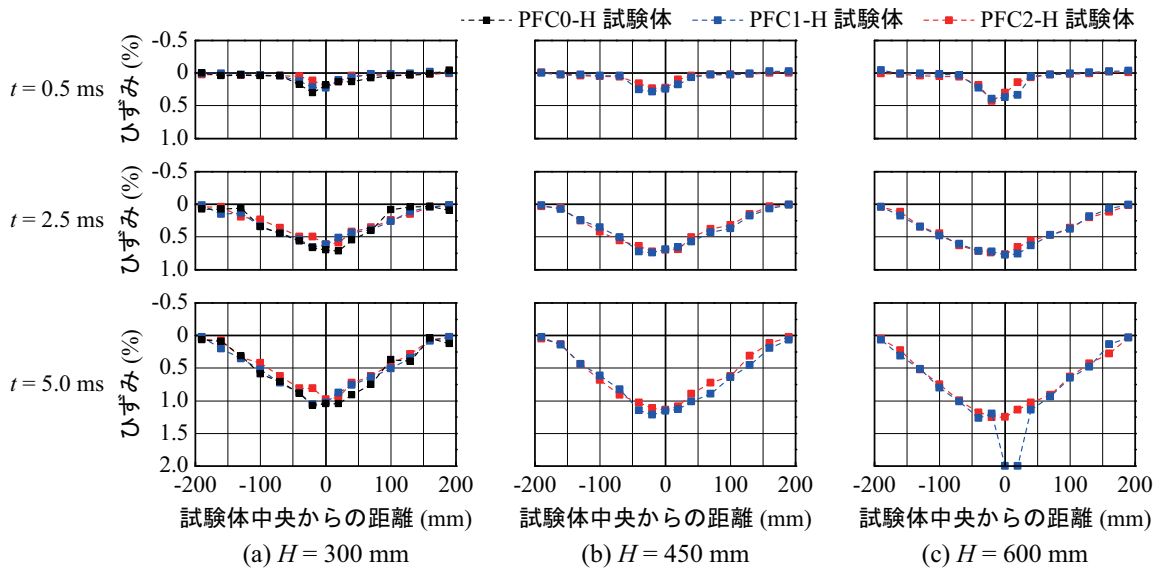
3.2 AFRPシートのひずみ分布性状

図-3には、AFRPシートのひずみ分布性状を荷重荷重 $P=5$ または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、PFC1/2-S試験体($P=10$ kN)のひずみ分布を比較



図－4 時刻歴応答波形



図－5 衝撃載荷実験に関するAFRPシートのひずみ分布性状の時間的推移

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－4には、衝撃実験によってせん断破壊またはシート破断した落下高さ $H = 300/600$ mm の場合における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20～30 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 試験体の場合には、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15～20 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。

4.2 AFRPシートのひずみ分布性状の時間的推移

図－5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0.5

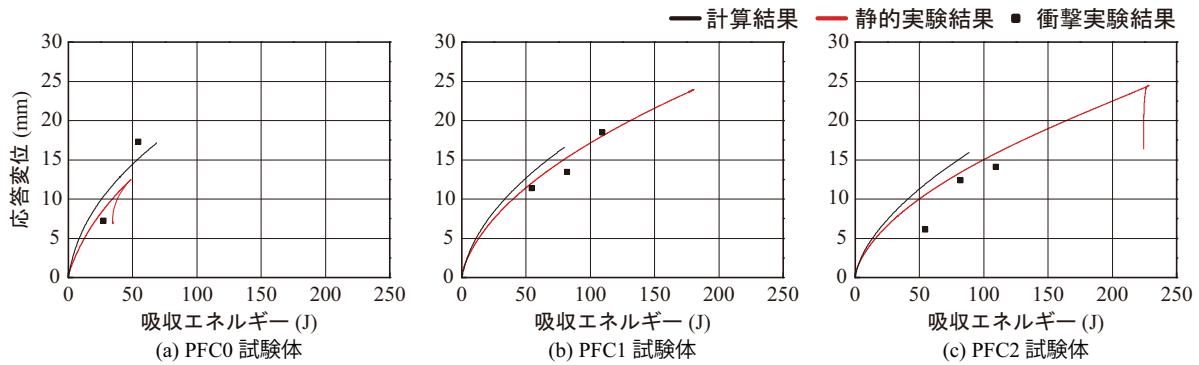


図-6 応答変位-吸収エネルギー関係

msでは荷重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、衝撃荷重初期には、曲げ応力が荷重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はりの衝撃荷重実験⁷⁾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-3に示した静荷重時の性状と類似していることから、最大応答変位時近傍においては静荷重の場合と同様の变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、本実験における衝撃荷重時のPFCはりの最大応答変位は、静的荷重時の荷重-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-6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。静荷重時の結果については図-2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、衝撃荷重時の結果については、まず下式(4)によりPFCはりへの伝達エネルギー E_t を求め、その伝達エネルギー 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。

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

ここに、 m_1 : はりの等価質量、 m_2 : 重錘の質量、 E_k : 入力エネルギーである。 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。なお、上記の伝達エネルギー E_t の式の誘導については、文献⁸⁾を参照されたい。

図-6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、衝撃荷重実験による最大応答変位は、静荷重実験の結果と概ね対応していることが分かる。また、静荷重時の荷重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。

6. まとめ

- 1) 静的荷重実験より、繊維補強PFCの引張軟化曲線に基づいて、評価されたひび割れ発生後における鋼繊維の架橋応力を用いた計算結果は、実験結果と概ね対応する。
- 2) 吸収エネルギーと荷重点変位の関係は、荷重方法によらず概ね同等である。このことから、衝撃荷重実験によるはりの最大応答変位は、静的荷重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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学-構造物の衝撃設計の基礎