

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

Impact resistant behavior of fiber reinforced concrete beam with 400 N/mm² compressive strength

栗橋祐介[†], 河野克哉^{*}, 曾根涼太^{**}, 小室雅人^{***}, 多田克彦^{****}

Yusuke Kurihashi, Katsuya Kono, Ryota Sone, Masato Komuro and Katsuhiko Tada

[†]博(工), 室蘭工業大学大学院講師, 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

^{*}博(工), 太平洋セメント (株), 中央研究所 第2研究部, 主任研究員 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

^{**}太平洋セメント (株), 中央研究所 第2研究部 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

^{***}博(工), 室蘭工業大学大学院准教授, 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

^{****}太平洋セメント (株), 中央研究所 第2研究部, リーダー (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

In this study, in order to investigate impact resistant behavior of steel fiber reinforced Pore Free Concrete (PFC), that is newly developed ultra-high-strength concrete with 400 N/mm² compressive strength, falling-weight impact loading tests of PFC beam were conducted taking mixing ratio of steel fiber and height of falling-weight as variables. To investigate the effects of compressive strength on impact resistant behavior of concrete beam, the tests using high-strength concrete (HC) with 100 N/mm² were also conducted. From this experimental study, following results were obtained: 1) Impact resistant capacity of PFC beam can be more drastically improved by mixing 2 vol.% of steel fiber than the case of HC beam; 2) bonding resistance between PFC and steel fiber could play an important role for upgrading the impact resistance.

Key Words: pore free concrete, steel fiber, falling-weight impact test, energy absorption capacity

キーワード: ポアフリーコンクリート, 鋼繊維, 衝撃載荷実験, エネルギー吸収能

1. はじめに

セメント複合材料を超高強度化することにより, コンクリート構造物の部材断面を縮小できるため軽量化が可能となる。これにより, 下部工や基礎工の断面を縮小可能であることから建設コストの縮減, 工期の短縮, スパンの長大化等を期待できる。また, 材料の長期耐久性が高いことから, ライフサイクルコストを考慮したトータルコストの削減が期待できる。一方で, この種の高強度材料に特有の脆性破壊を抑制することを目的に, 繊維を混入した材料も数多く開発されており^{1),2)}, 圧縮強度が 200 N/mm² 程度の超高強度繊維補強コンクリート (UFC) などが実用化されている³⁾。また, 近年では, 450 N/mm² 以上の圧縮強度を発現する超高強度コンクリートが開発されている。これは, 最密充填理論に基づいて配合され, かつ脱型時に吸水処理と熱養生を行うことで空隙を極限まで減じたセメント系材料 (以下, ポアフリーコンクリート (PFC)) である^{4)~6)}。これまでの研究では, 繊維補強 PFC に関する圧縮および引張特性に

関する材料試験が行われており, 種々の力学的な特性が明らかにされている⁷⁾。

一方, 前述の UFC においては, 高強度でかつ靱性能に優れる材料特性に着目し, 耐衝撃用途構造物への適用性に関する研究⁸⁾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⁹⁾。従って, さらに圧縮強度の高い PFC においても繊維を混入することにより, 耐衝撃用途構造物やその補修補強のための材料として活用できる可能性があるものと考えられる。しかしながら, 繊維補強 PFC の耐衝撃性については未だ検討されていないのが現状である。

このような背景より, 本研究では, 繊維補強 PFC の耐衝撃挙動に関する基礎的なデータを収集することを目的に, 梁状に成形した PFC の重錘落下実験を行った。PFC に混入する繊維には鋼繊維を用い, 混入率は体積割合 (外割) で 1 および 2 % とした。実験は, 比較のため圧縮強度が 100 N/mm² 程度の高強度コンクリートについても実施した。重錘質量は 20 kg とし, 落下高さを 3 種類に変化させて梁中央部に直撃させる形で実験を行った。

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: kuri@news3.ce.muroran-it.ac.jp

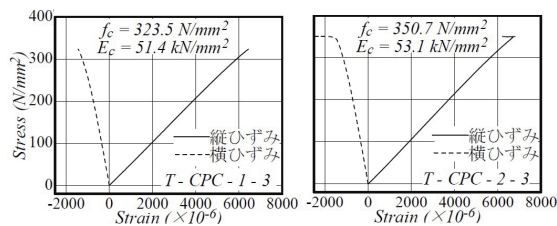
表－１ 使用材料の一覧

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：3330 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：2800 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

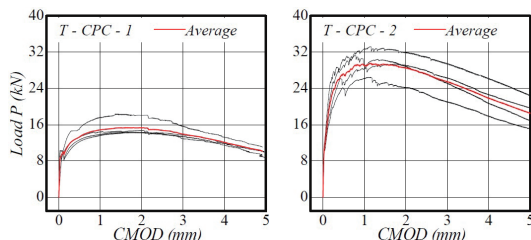
表－２ 配合

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 × 2.5 %	B × 0.02 %	280	3.9	404
PFC1							78 (外割 1 %)			269	375	
PFC2							157 (外割 2 %)			276	374	
HC0	33	271	639	253	75	927	0	B × 0.4 %	B × 0.02 %	185	3.2	112
HC1							78 (外割 1 %)	B × 0.45 %		204	2.1	115
HC2							157 (外割 2 %)	B × 0.5 %		214	2.0	115

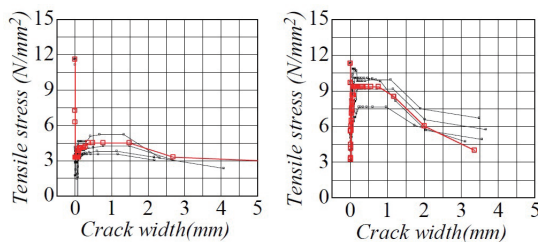
*1: W の一部に内割置換, *2: 落下振動を与えないフロー試験による値 (JIS A 5201 準拠), *3: 空気室圧力法



(a) 圧縮応力－ひずみ関係



(b) 荷重－開口ひび割れ変位 (P-CMOD) 曲線



(c) P-CMOD 曲線から求めた引張軟化曲線

図－１ PFC の材料特性に関する参考データ 7)

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 および比較用の高強度コンクリー

ト (HC) 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。その他、PFC の配合設計の考え方等については、文献⁶⁾を参照されたい。

(2) 練混ぜおよび養生方法

PFC および HC においてはオムニミキサ (容量 30 L) に W, B, S, SP 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℃) を行い、材齢 48 h で脱型した。さらに、PFC の場合には脱型後、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℃/h, 最高温度 90℃, 最高温度保持時間 48 h, 降温速度 15℃/h) の後、さらに加熱養生 (昇温速度 60℃/h, 最高温度 180℃, 最高温度保持時間 48 h, 降温速度 60℃/h, 1 atm) を行った。

(3) PFC および HC の力学的特性

PFC および HC の圧縮強度は、表－２に示した通りである。PFC の場合には、鋼繊維の混入により、圧縮強度が 1 割程度低下している。また、HC の場合には鋼繊維混入率によらずほぼ同等である。なお、本論文における PFC1, PFC2 の配合は、文献⁷⁾における T-CPC-1, T-CPC-2 と同様である。ただし、圧縮強度は多少異な

表－3 試験体の一覧

試験体名	コンクリートの種類	鋼繊維混入率 (%)	重錘落下高さ H (mm)
PFC0-H1	PFC	0	1
PFC0-H2			2
PFC0-H3			3
PFC1-S		1	(静载荷)
PFC1-H100			100
PFC1-H200			200
PFC1-H300			300
PFC2-S		2	(静载荷)
PFC2-H100			100
PFC2-H200			200
PFC2-H300			300
HC0-H1	高強度	0	1
HC0-H2			2
HC0-H3			3
HC1-S		1	(静载荷)
HC1-H100			100
HC1-H200			200
HC1-H300			300
HC2-S		2	(静载荷)
HC2-H100			100
HC2-H200			200
HC2-H300			300

る。図－1 には、参考のためこれらの材料の圧縮応力－ひずみ関係、切欠きはりの3点曲げ試験による荷重－ひび割れ開口変位 (P-CMOD) 曲線、および P-CMOD 曲線から求めた引張軟化曲線を示している。詳細については文献⁷⁾を参考にされたい。なお、PFC はマトリクスが極めて緻密であることから、その耐久性は HC の場合³⁾よりもさらに高いものと考えられる。そのため、ほぼメンテナンスフリーでの供用が十分に期待できる。

2.2 载荷実験の概要

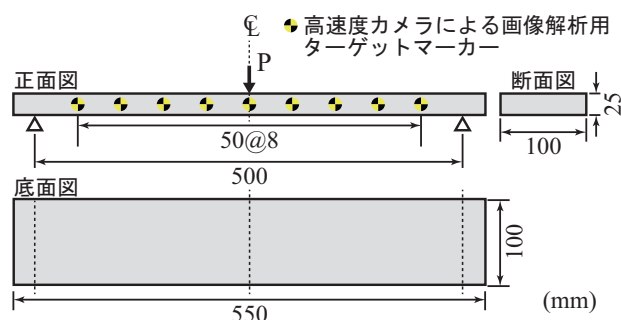
(1) 試験体の一覧

表－3 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、コンクリートの種類、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 22 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 (%) の組み合わせで示している。また、第 2 項目の英文字 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。

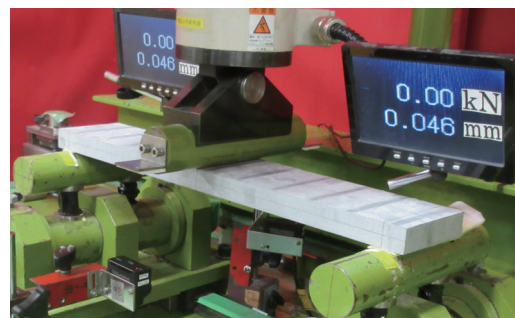
図－2 には、供試体の形状寸法を示している。本研究に用いた供試体は、断面寸法 (幅 × 高さ) が 100 × 25 mm、純スパン長が 500 mm である。

(2) 载荷実験方法と測定項目

写真－1 には、静载荷実験の状況を示している。静载荷実験は、载荷位置をスパン中央部とする三点曲げ载荷



図－2 供試体形状寸法



写真－1 静载荷実験の状況

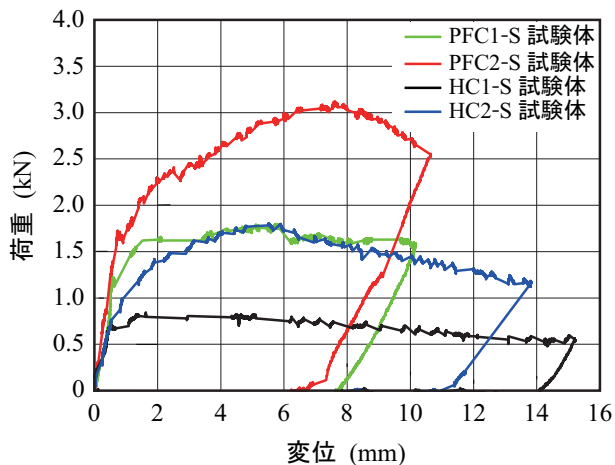


写真－2 衝撃载荷実験の状況

法により行った。荷重は、载荷速度を 0.12 mm / 分とし変位制御で作用させた。なお、測定項目は载荷荷重および载荷点変位である。

写真－2 には、衝撃载荷実験の状況を示している。衝撃载荷実験は、衝撃試験装置の寸法や载荷容量を勘案して質量 20 kg、先端直径 60 mm の鋼製重錘を所定の落下高さからスパン中央部に 1 度だけ自由落下させる単一载荷法により行った。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。

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。载荷点変位およびターゲットマーカの相対距離は、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 2000 枚 / 秒であ



図－3 荷重－変位関係

る。また、一面素の寸法は $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 程度であり、ターゲットマーカの移動量は汎用の画像解析ソフト View Point (IDT 社製) を用いて評価した。なお、移動量の精度は、 $\pm 0.05\text{ mm}$ 程度であることを確認している。実験終了後には試験体のひび割れ性状を観察し記録した。

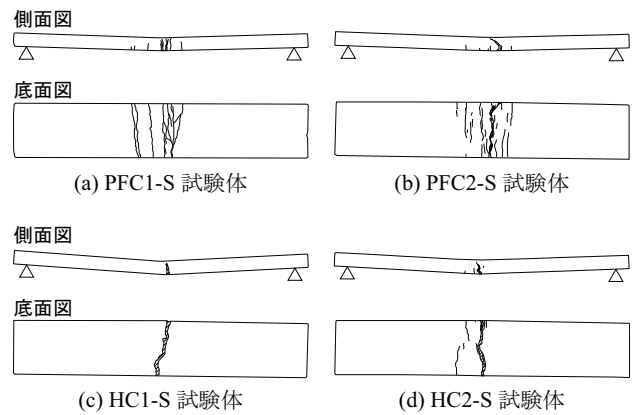
3. 静載荷実験結果

3.1 荷重－変位関係

図－3 には、繊維補強 PFC/HC 試験体の荷重－変位関係を比較して示している。図より、いずれの試験体も変位 $0.5 \sim 1.0\text{ mm}$ までは荷重が線形的に増加し、その後、増加勾配が小さくなるか、もしくは減少に転じている。これは載荷点近傍において曲げひび割れが開口し、その後、鋼繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制されたことによるものと考えられる。なお、鋼繊維が混入されていない場合には、曲げひび割れ発生直後に梁が二分され崩壊することを確認している。

PFC1-S 試験体の場合には曲げひび割れ発生後、荷重が徐々に低下している。これは鋼繊維によりひび割れの開口が抑制されるものの、鋼繊維が徐々に抜け出しているためであるものと考えられる。一方、繊維混入率を 2 % とした PFC2-S 試験体の場合には、曲げひび割れ発生後も荷重が増加し、変位が 8 mm に到達した後、減少に転じている。これは曲げひび割れ開口後、鋼繊維が抜け出すものの、その付着抵抗力が PFC1-S の場合よりも大きいためと考えられる。

一方、HC 試験体は PFC 試験体よりも曲げひび割れ発生荷重や最大荷重が小さい。これは、HC 試験体の圧縮強度が PFC 試験体の場合よりも小さいため、引張強度も小さく鋼繊維との付着抵抗性が低いためであるものと考えられる。なお、鋼繊維混入による曲げ耐力の向上効果については、PFC 試験体の場合とほぼ同様の傾向を示している。



図－4 静載荷実験後におけるひび割れ分布性状

3.2 ひび割れ分布性状

図－4 には、静載荷実験後におけるひび割れ分布性状を示している。図より、PFC1/2-S 試験体の場合には複数の微細なひび割れが分散して発生しているのに対し、HC1/2-S 試験体の場合には載荷点近傍のひび割れが大きく開口していることが分かる。これは、PFC の圧縮強度が HC よりも大きいため、鋼繊維との付着強度が高く、そのひび割れ架橋効果が効果的に発揮されたためと考えられる。なお、ひび割れ分散効果は繊維混入率が大きい場合の方が大きい。

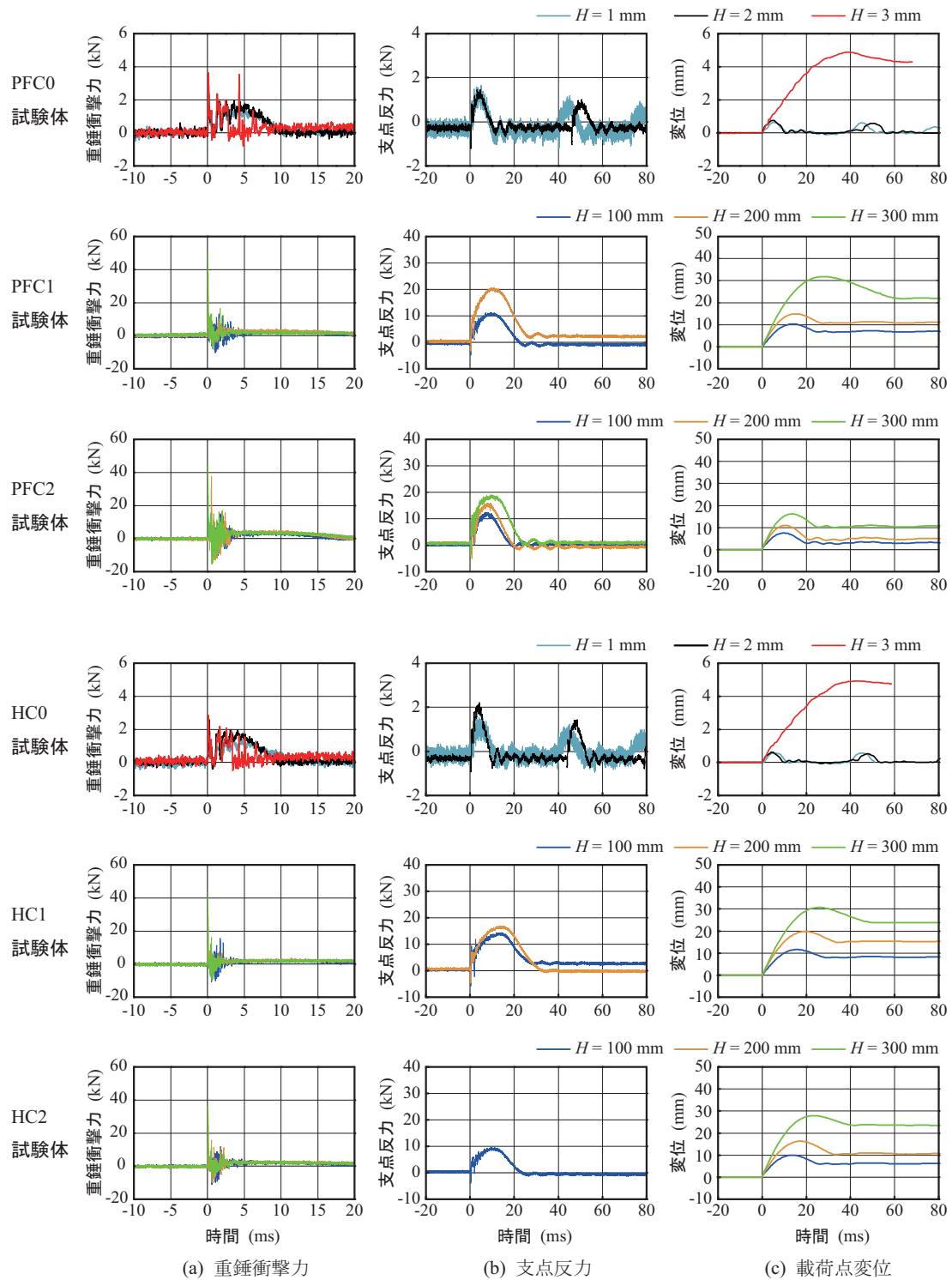
4. 衝撃載荷実験結果

4.1 時刻歴応答波形

図－5 には、各試験体の時刻歴応答波形を示している。なお、支点反力波形においてはコンクリート梁が大きく角折れし、部材回転角が大きくなることにより支点反力が適切に評価されないケースに関しては、検討から除外することとした。

図－5 (a) より、PFC/HC-0 試験体の重錘衝撃力は、落下高さが $H = 1, 2$ および 3 mm と低いため、その最大値も小さい。実験では、両試験体とも $H = 3\text{ mm}$ で梁が二分し崩壊している。鋼繊維補強 PFC/HC 試験体の重錘衝撃力は、最大振幅を示し継続時間が極めて短い波形が励起し、その後振幅の小さい波形が複数回生じる性状を示している。なお、これらの試験体の最大振幅は、PFC/HC-0 試験体の 10 倍程度大きい。

図－5 (b) より、PFC/HC-0 試験体の支点反力波形は、最大振幅が 2 kN 程度で継続時間が 10 ms 程度の三角波を呈していることが分かる。また、その最大振幅は繊維補強 PFC/HC の場合に比較して小さい。繊維補強 PFC/HC 試験体の場合には、正弦半波状の波形が励起している。また、同一落下高さ ($H = 100\text{ mm}$) のケースを比較すると、圧縮強度が高く繊維混入率が高いほど主波動継続時間が短くなる傾向にある。これは、梁の曲げ剛性が大きいほど、固有振動周期が短くなることによるもの

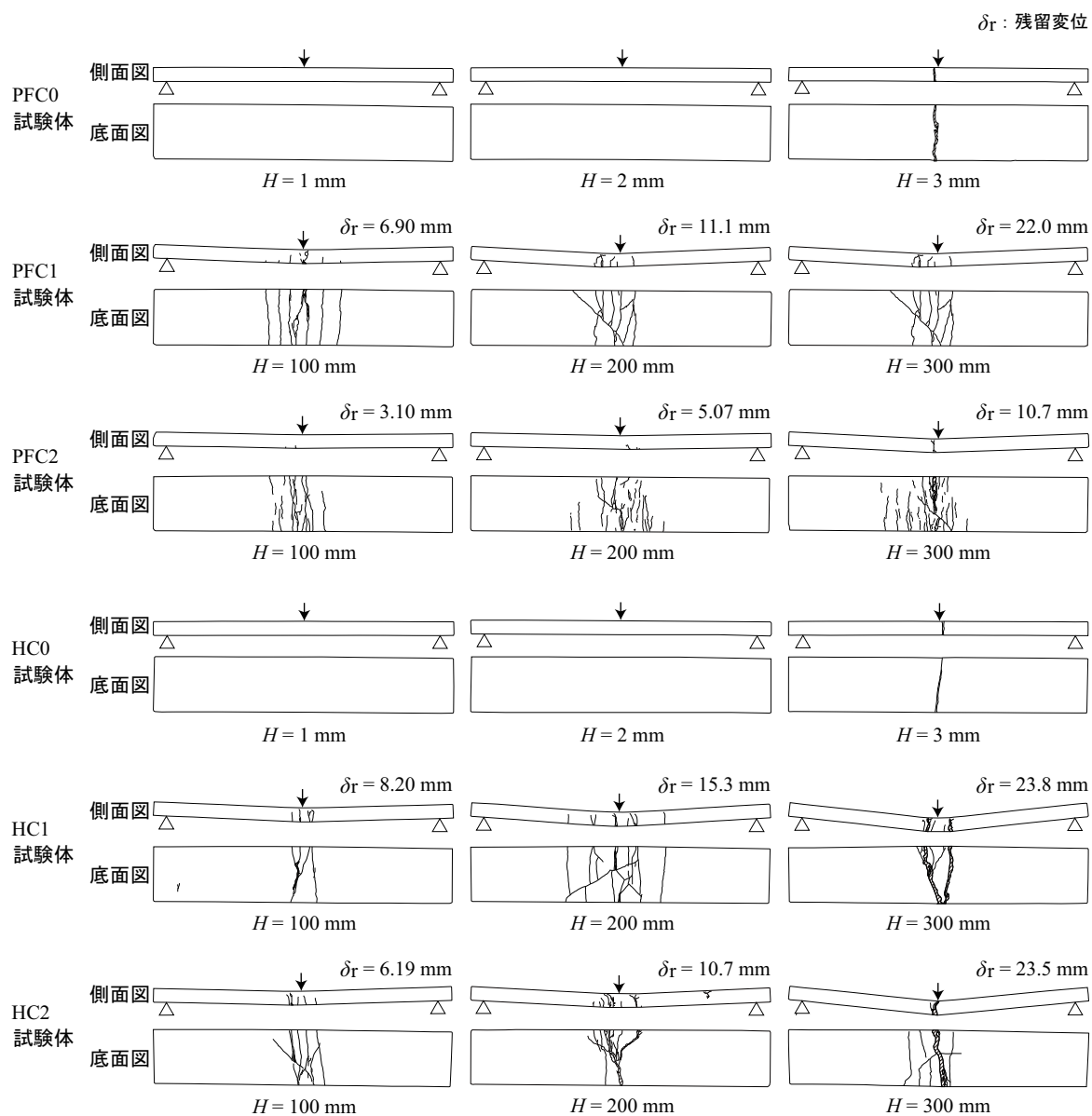


図－5 各種時刻歴応答波形

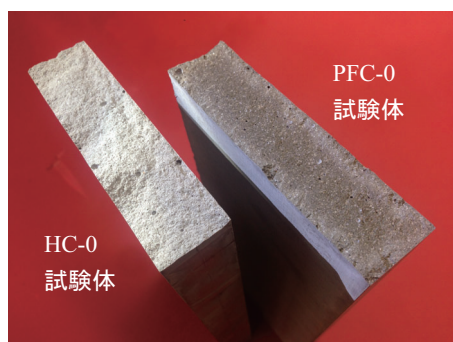
と考えられる。なお、固有振動周期は、曲げ剛性の平方根に反比例する。本実験においては、鋼繊維混入率を1%から2%と増大させることにより、固有振動周期がPFCおよびHCの場合でそれぞれ0.78および0.92倍となっているため、曲げ剛性はそれぞれ1.64および1.18倍程度向上したものと評価される。

図－5(c)より、PFC/HC-0試験体の応答変位波形は、落下高さ $H=1$ および 2 mm の場合には最大振幅が1

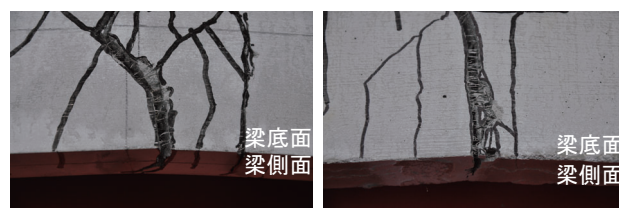
mm以下であるが、 $H=3\text{ mm}$ の場合には5 mm程度となっており、この時点で梁は二分されている。繊維補強PFC/HC試験体の場合はいずれも最大振幅を示した後、復元するものの変位が残留している。また、PFC2試験体の場合が、最も最大変位や残留変位が小さい。このことから、PFC2試験体の耐衝撃性が最も高いことが分かる。



図－6 実験終了後におけるひび割れ分布性状



写真－3 PFC/HC-0 試験体のひび割れ面



(a) HC1-H300 試験体

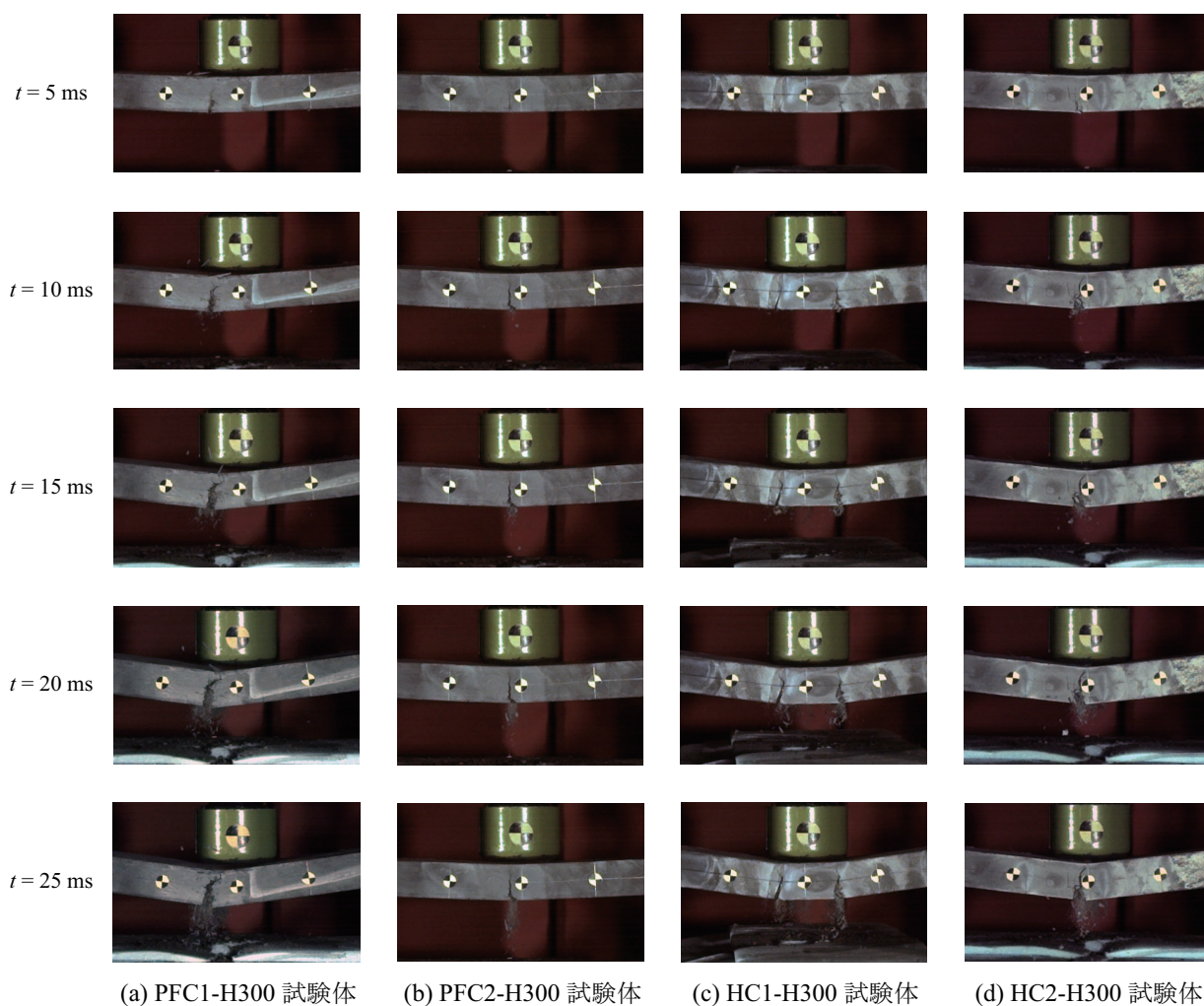
(b) HC2-H300 試験体

写真－4 HC-1/2-H300 試験体底面のひび割れ開口状況

4.2 ひび割れ分布性状

図－6 には実験終了後における各試験体の側面および底面のひび割れ分布性状を示している。また、残留変位 δ_r も併せて示している。図より、いずれの試験体におい

ても落下高さ H が大きい場合ほどひび割れ本数が増加し、載荷点近傍のひび割れ幅が大きくなる傾向にあることが分かる。PFC/HC-0 試験体の場合には、落下高さ $H = 3 \text{ mm}$ で梁が二分し崩壊した。写真－3 には、両試験体のひび割れ面を示している。写真より、PFC-0 試験体の方が HC-0 試験体よりも気泡が少ないことが分かる。



写真－5 ひび割れ進展状況

また、PFC 試験体の方がひび割れ面が平滑であることから、PFC 試験体の強度が高いため破壊時の挙動がより脆性的であったものと推察される。

繊維補強 PFC/HC 試験体のひび割れ分布を比較すると、HC 試験体の場合には PFC 試験体よりもひび割れ間隔が広く荷点近傍のひび割れが大きく開口する傾向にあることが分かる。写真－4 には、HC1/2-H300 試験体のひび割れ開口状況を示している。これに対し、PFC 試験体の場合には微細なひび割れが分散して多数発生する傾向にある。このような傾向は、静荷重実験の場合においても同様に見られた。

また、PFC2-H300 試験体の場合には、他の試験体よりも繊維混入によるひび割れ分散効果が効率的に発揮され、残留変位も小さいことが分かる。なお、荷点近傍の曲げひび割れは梁上縁まで到達していることから、最大応答時には梁の全断面に引張応力が作用したものと考えられる。

従って、繊維補強 PFC の高い耐衝撃性に対しては、圧縮強度よりもひび割れ発生後の引張特性が大きく貢献しているものと考えられる。また、これは PFC－鋼繊維

間の付着抵抗が引張靱性能の向上に大きく寄与しているためと考えられる。これらのことから、部材厚の大きい梁や RC/PC 梁などの圧縮強度が耐力に及ぼす影響が大きい部材に PFC を適用することにより、PFC の材料特性がより効果的に発揮されるものと推察される。

4.3 ひび割れ進展状況

写真－5 には、 $H = 300$ mm における繊維補強 PFC/HC 試験体のひび割れ進展状況を示している。ここでは、重錘衝突後の経過時間 $t = 5$ ms からほぼ最大変位を示す $t = 25$ ms まで 5 ms 間隔で示している。

写真より、時間の経過とともに荷点変位と曲げひび割れの幅が大きくなっていることが分かる。また、曲げひび割れは、荷点近傍に 1 もしくは 2 本発生し、梁下面から上面に向かって進展し、 $t = 10$ ms においてはほぼ上面付近まで到達している。 $t = 20$ ms 以降において、大きく開口したひび割れからは細かなコンクリート片が落下している様子が伺える。PFC2-H300 試験体の場合には他の試験体よりも変形量およびひび割れ幅が小さくなっていることが分かる。PFC2-H300 試験体は静

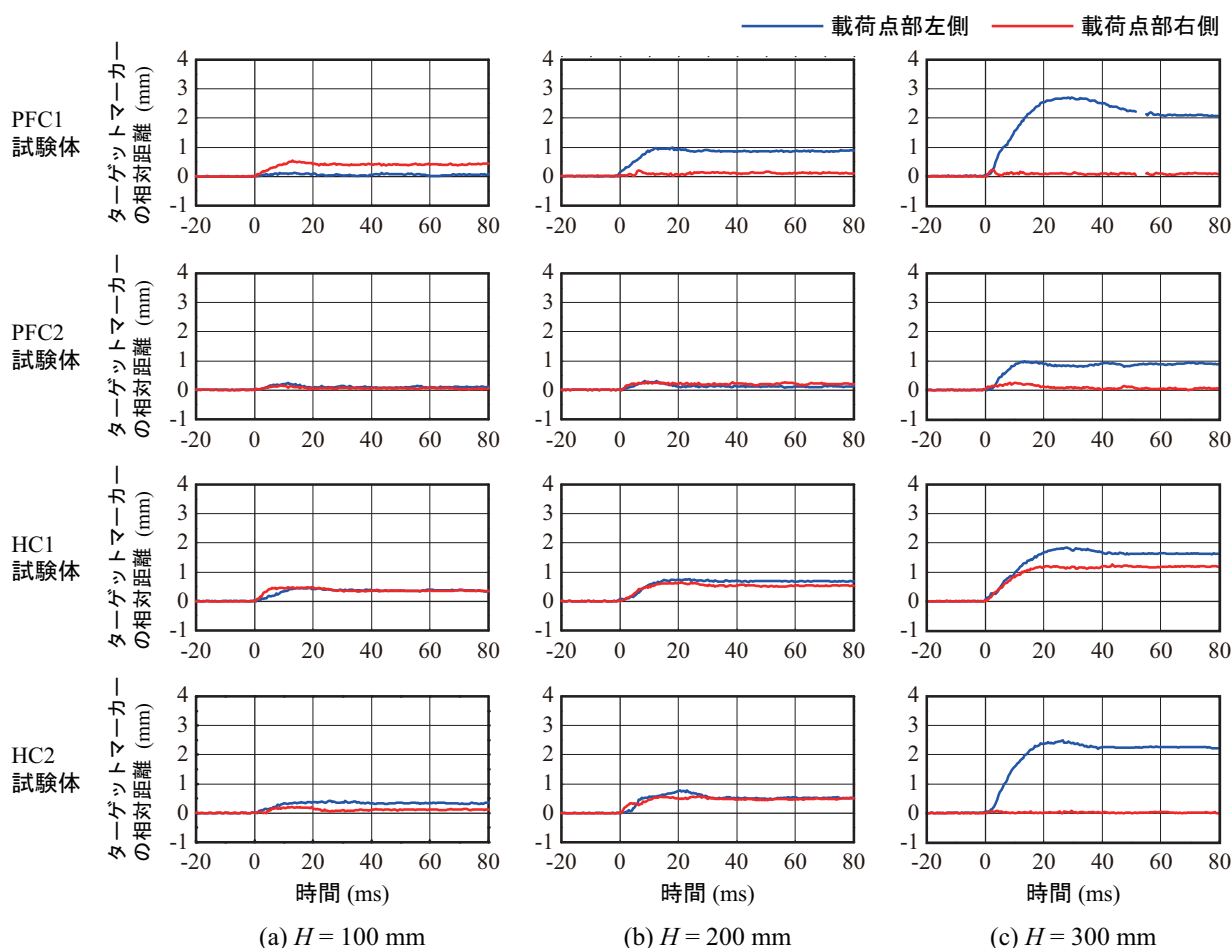


図-7 ターゲットマーカの相対距離の時刻歴波形

的曲げ耐力が最も大きいことから、衝撃载荷実験の傾向は静载荷実験の場合と対応しているものと考えられる。なお、HC-1-H300 試験体において、载荷点近傍に 2 本のひび割れが発生したのは、重錘直径の影響を受けたことによるものと考えられる。

図-7 には、写真-5 の高速度カメラ画像に見られるターゲットマーカの相対距離（以後、相対距離）の推移を時刻歴波形として示している。相対距離は、载荷点位置とその左右のターゲットマーカとの距離を画像解析により求めて評価した。なお、いずれの試験体もひび割れが大きく開口していることから、ターゲットマーカの相対距離は、曲げひび割れ幅の目安として評価できるものと考えられる。

図より、いずれの試験体も重錘衝突後相対距離が増大し、最大値を示した後、相対距離が残留する性状を示している。これらの波形性状は、図-5 に示した载荷点変位波形と概ね対応している。また、PFC2-H300 試験体の曲げひび割れが最も小さく、その最大値は 1 mm 程度である。文献⁷⁾によると鋼繊維混入率 2 % の PFC の引張軟化曲線（図-1 (c) 参照）においては、ひび割れ発生後に一定の引張応力を保持できるひび割れ開口幅が 1 mm 程度弱であることから、PFC2-H300 試験体は衝撃载荷実験終了後においても実験前と概ね同等の曲げ耐力

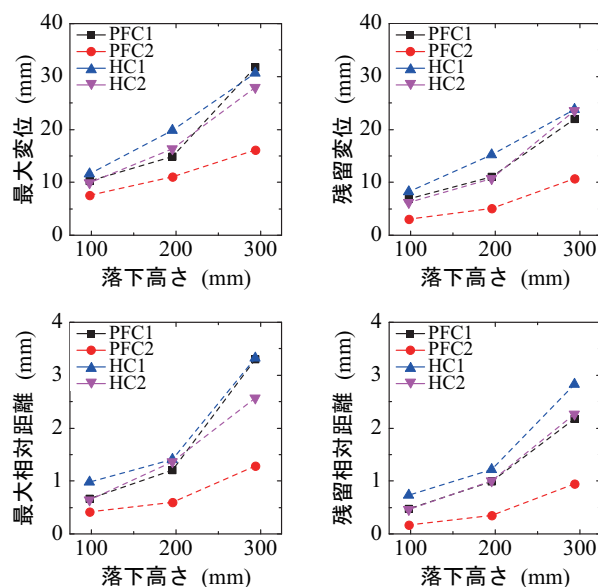


図-8 各応答値と落下高さとの関係

を保持しているものと推察される。

4.4 载荷点変位とターゲットマーカの相対距離

図-8 には、最大変位、残留変位、最大相対距離および残留相対距離と落下高さ H との関係を示している。な

お、相対距離は載荷点部左右の値を合算して評価した。図より、いずれの試験体も落下高さの増加に伴って変位および相対距離が大きくなる傾向にあることが分かる。また、PFC1 および HC1/2 試験体は $H = 300 \text{ mm}$ において、変位および相対距離の増加率が大きくなる傾向にある。これに対し PFC2 試験体の場合には、その傾向が顕著には見受けられない。これは、ひび割れ図（図-6）やひび割れ進展状況（写真-5）に示しているように、 $H = 300 \text{ mm}$ の場合において、PFC1 および HC1/2 試験体 の場合には、梁が載荷点近傍で角折れしているのに対し、PFC2 試験体の場合にはひび割れが分散して発生し明瞭な角折れには至っていないためである。

このように、本実験においては PFC 試験体に鋼繊維を 2 % 混入することにより、静的曲げ耐力および耐衝撃性能が飛躍的に向上することが明らかになった。今後は断面寸法が異なる場合や、RC/PC 構造とした場合に関する検討を推進する必要があるものと考えている。

5. まとめ

本研究では鋼繊維補強 PFC の耐衝撃挙動を検討することを目的に、梁状に成形した PFC の重錘落下実験を行った。実験は比較のため圧縮強度が 100 N/mm^2 程度の高強度コンクリート (HC) 梁についても実験を行い、比較検討した。また、鋼繊維混入率は体積割合（外割）で 1 および 2 % とした。本研究により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 圧縮強度が高く、かつ繊維混入率が高い場合ほど、コンクリート梁の静的耐荷性能および耐衝撃性能が向上する。特に、耐衝撃性能は PFC に鋼繊維を 2 % 混入することで飛躍的に向上する。
- 2) 衝撃載荷時におけるコンクリート梁のひび割れ開口幅は、PFC に鋼繊維を 2 % 混入した場合において最も小さい。また、ひび割れ分散効果も高い。これは、PFC-鋼繊維間の付着抵抗が引張性能の向上に大きく寄与しているためと考えられる。
- 3) 衝撃荷重時におけるコンクリート梁のひび割れ開口幅が、 1 mm 程度以下の場合には、梁は著しい角折れには至らない。これは、PFC の引張軟化曲線の性状と対応する結果である。

謝辞

本研究を行うにあたり、土木研究所寒地土木研究所には高速度カメラの貸出しおよび使用方法に関するご助言などのご支援を頂いた。また、室蘭工業大学構造力学研究室の大場啓汰君および小野慎平君をはじめとする大学院生、学部生には、実験からデータ整理に至るまでご支援頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法に関するシンポジウム，JCI-C82, 2012.9
- 2) 土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書，コンクリート技術シリーズ 106, 2015.8
- 3) 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
- 4) 河野克哉，中山莉沙，多田克彦：通常流込み成型で 460 N/mm^2 の圧縮強度を発現する新規セメント硬化体，プレストレストコンクリート工学会，第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.545-550, 2015.10
- 5) 河野克哉，森香菜子，多田克彦，田中敏嗣：世界最高強度を発現するコンクリートの開発ならびにさらなる性能向上の可能性，コンクリート工学，Vol. 54, No. 7, pp.702-709, 2016.7
- 6) 河野克哉，中山莉沙，多田克彦，田中敏嗣： 450 N/mm^2 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
- 7) 柳田龍平，中村拓郎，河野克哉，二羽淳一郎：圧縮強度 400 N/mm^2 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
- 8) 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
- 9) 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

(2016 年 9 月 26 日受付)

(2017 年 2 月 1 日受理)