論文 300 MPa 以上の圧縮強度を有する PFC 梁の静的および衝撃荷重載荷実験

木内　洋介[*1]・小室　雅人[*2]・河野　克哉[*3]・岸　徳光[*4]

要旨：本論文では，近年開発された圧縮強度 300 MPa 以上を発現する無孔性コンクリート（PFC）の耐荷性能および耐衝撃性能に関する基礎データの収集を目的として，スパン長 1.8 m の鋼繊維混入 PFC 梁を対象に，静荷重載荷実験および重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。配筋に関しては，普通鉄筋に加えて，降伏強度が 700 MPa 程度の高強度鉄筋を用いた場合も同様に検討した。その結果，1）PFC と高強度鉄筋を併用することにより，耐荷性能が大きく向上すること，2）衝撃荷重載荷時には，鋼繊維混入 PFC を用いることにより普通コンクリートを用いる場合に比較して最大変位を 45 % 程度抑制可能であること，などが明らかとなった。

キーワード：無孔性コンクリート，鋼繊維，耐衝撃性，衝撃荷重載荷実験

1. はじめに

我が国では自然災害が多発しており，暴風雨による土石流や落石，あるいは竜巻飛来物による被害が毎年のように発生している。また，世界各地では年々テロ行為のリスクが高まる傾向にあり，偶発作用を受ける可能性のある構造物は，その耐衝撃性を向上させることが極めて重要となる。

一方で，近年では高強度コンクリートの研究が積極的に推進されており，既に圧縮強度 400 MPa 以上を発現する無孔性コンクリート（以後，PFC）も開発されている[1),2)]。

このような状況を鑑み，著者らの研究グループでは耐衝撃補強用材料として適用できる可能性がある PFC に着目し，その耐衝撃性に関して検討を行ってきた[3)]。これまでの研究では，高さ 25 mm，幅 100 mm，スパン長 500 mm の小型 PFC 梁を対象に静荷重および衝撃荷重載荷実験を行っている。その結果，鋼繊維を混入した PFC 梁において，1）繊維混入率が高いほど PFC 梁の静的耐荷性能および耐衝撃性能が高くなる傾向にあること，2）その効果はコンクリートの圧縮強度が大きい場合ほど，ひび割れ発生後の架橋効果が効率的に発揮され，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。

しかしながら，これらの成果は，試験体寸法が非常に小さくかつ補強筋が配筋されていない場合についての結果である。実構造物に適用することを想定した場合には，補強筋を配置し桁高も十分に考慮した形での性能を評価することが肝要であるものと判断される。

このような背景より，本研究では，補強筋を有する PFC 梁の耐衝撃挙動に関する基礎データの収集を目的として，断面寸法(幅 × 高さ)が 150 × 200 mm，純スパン長が 1,800 mm の PFC 梁を対象に重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。なお，基本的な耐荷性能を把握するために，静荷重載荷実験も合わせて実施している。

2. 実験概要

2.1 PFC の概要

表－1 には，PFC に用いた材料を一覧にして示してい

表－2　配合

W/B (%)	単位量 (kg/m^3)					
	W	B	S	F	SP*	DF*
15	199	1328	934	157	B × 1.6 %	B × 1.6 %

＊W の一部に内割置換

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	PFC 専用プレミックス結合材	B	最密粒度粉体，密度：2.82 g/cm3
細骨材	珪砂	S	最大寸法：0.3 mm，密度：2.63 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 MPa，引張弾性率：210 GPa
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　室蘭工業大学大学院　工学研究科　博士前期課程　環境創生工学系専攻（学生会員）
*2　室蘭工業大学大学院　もの創造系領域　教授　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　リーダー　博（工）（正会員）
*4　室蘭工業大学大学院　もの創造系領域　特任教授　工博（正会員）

表－3　実験ケース一覧

試験体名	実験ケース名	設定重錘落下高さ H (m)	実測重錘落下高さ H' (m)	設定重錘衝突速度 V (m/s)	実測重錘衝突速度 V' (m/s)	コンクリート 圧縮強度 f'_c (MPa)	コンクリート 割裂引張強度 f_t (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	せん断筋降伏強度 f_{sy} (MPa)
RC-N	RC-N-S	静的	-	-	-	30.7	2.26*	380	390
	RC-N-I	1.0	0.98	4.43	4.38				
PFC-N	PFC-N-S	静的	-	-	-	340.5	27.3		-
	PFC-N-I	1.0	1.01	4.43	4.45				
PFC-H	PFC-H-S	静的	-	-	-	356.2	29.8	712	
	PFC-H-I	1.0	0.98	4.43	4.38	365.5	28.9		

*コンクリート標準示方書[4]に基づいて圧縮強度から算出

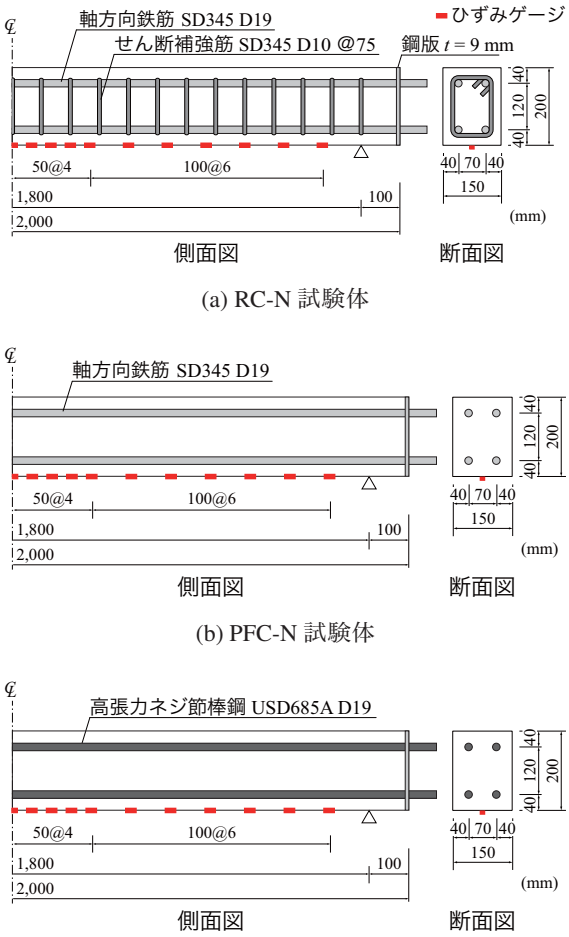
る。表より，結合材(B)には，最大粒子の低熱ポルトランドセメントと最小粒子のシリカフュームに対して中間粒子となる粉体を加えて最密粒度としたプレミックス結合材[1]を，細骨材には珪砂(S)を，混和剤には高性能減水剤(SP)ならびに消泡剤(DF)を用いている。また，鋼繊維(F)には引張強度 2,800 MPa の高強度鋼繊維を用い，外割で 2 % 混入した。PFC の配合については，**表－2** に示す通りであり，水結合材比（W/B）を 15 %，細骨材の絶対容積を 355 L/m^3 とした。

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(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 2) を参照されたい。

2.2 試験体概要

表－3 には，本研究で実施した実験ケースの一覧を示している。試験体はコンクリートおよび鉄筋種類を変化させた計 3 体である。表中の試験体名のうち，第一項目はコンクリートの種類(RC：普通コンクリート，PFC：鋼繊維混入 PFC)を，第二項目は鉄筋の種類(N：普通鉄筋，H：高張力ネジ節棒鋼[5])を示している。また，実験ケースは各試験体いずれも静荷重および衝撃荷重載荷実験を実施しており，実験ケース名の第三項目は載荷方法(S：静荷重載荷，I：衝撃荷重載荷)を示している。

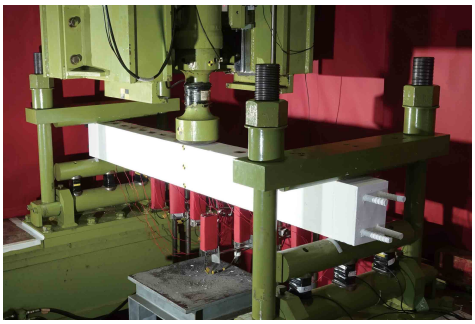
表には，本実験に用いた普通コンクリートおよび PFC の圧縮強度と割裂引張強度，軸方向およびせん断補強鉄筋の降伏強度も併せて示している。本研究に用いた普通コンクリートの圧縮強度は 30 MPa 程度であるのに対して，PFC の圧縮強度は 340 MPa 以上で，普通コンクリートの 10 倍以上の強度であることが分かる。普通鉄筋には SD345 を用いており，降伏強度は 380 MPa である。一方で，高張力ネジ節棒鋼[5]の場合には降伏強度が 712 MPa となっている。なお，PFC の材料特性値は別途実施した材料試験の結果であり，鉄筋の降伏強度に関してはミルシートの値である。



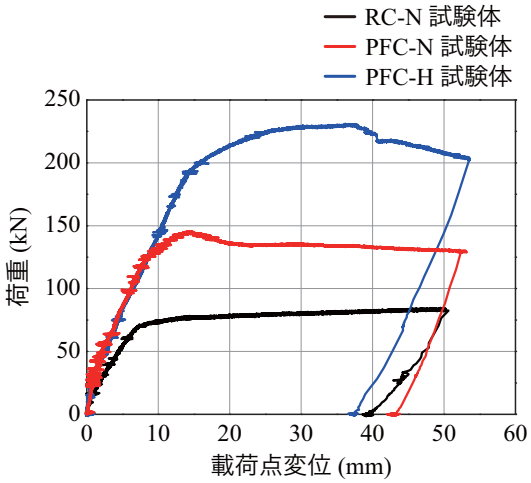
図－1　試験体の形状寸法および配筋

図－1 には，本研究で対象とした試験体の形状寸法を示している。試験体の形状寸法(幅 × 高さ × スパン長)は，150 × 200 × 1,800 mm である。いずれの試験体においても複鉄筋配置を基本として，軸方向鉄筋は D19 を用いているものの，PFC-H 試験体には軸方向鉄筋に高張力ネジ節棒鋼(USD685A)を配置している。また，RC-N 試

写真－1　静荷重載荷実験の状況



写真－2　衝撃荷重載荷実験の状況



図－2　荷重－変位関係

験体に関しては 75 mm 間隔でせん断補強鉄筋（D10）を配置した。なお，定着長を節約するために，軸方向鉄筋の端部は厚さ 9 mm の鋼版に溶接固定している。

2.3 実験方法

写真－1には，静荷重載荷実験の状況を示している。静載荷の場合には梁幅方向に 400 mm，梁軸方向に 100 mm の載荷板をスパン中央部に設置し，容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて荷重を作用させた。いずれの試験体においても，主鉄筋降伏後，載荷点変位が 50 mm 程度に至るまで載荷することとした。

写真－2には，衝撃荷重載荷実験の状況を示している。実験は，質量 300 kg，先端直径 200 mm の鋼製重錘を 1 m からスパン中央部に一度だけ自由落下させる形で行った。支点部では，試験体の跳ね上がりを防止するために鋼製の矩形梁状治具を用いて試験体を締め付けている。また，支点部は回転を許容するピン支持に近い構造となっている。

本実験の測定項目は，重錘衝撃力，合支点反力（以後，単に支点反力），載荷点変位および梁上下縁（載荷点部近傍においては梁側面）の軸方向ひずみである。さらに，実験終了後には梁側面を撮影し，ひび割れ図を作成している。

なお，重錘衝撃力と支点反力は起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用い，変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。また，**図－1**に示すように，梁の下縁には検長 10 mm のひずみゲージを 50 もしくは 100 mm 間隔で貼付した。ひずみゲージ接着手順は以下の通りである。すなわち，1）梁表面の細孔をエポキシ系パテ状接着樹脂で埋め，2）24 時間経過後に乾燥状態であることを確認した後，3）ひずみゲージ接着箇所に厚さ 0.1 mm のリン青銅板（幅 2 cm × 長さ 3 cm）を 2 液混合型のエポキシ系接着樹脂を用いて貼付けし，4）その上にひずみゲージ用常温硬化型瞬間接着剤を用いてゲージを接着する，である。

3. 実験結果

3.1 静載荷実験

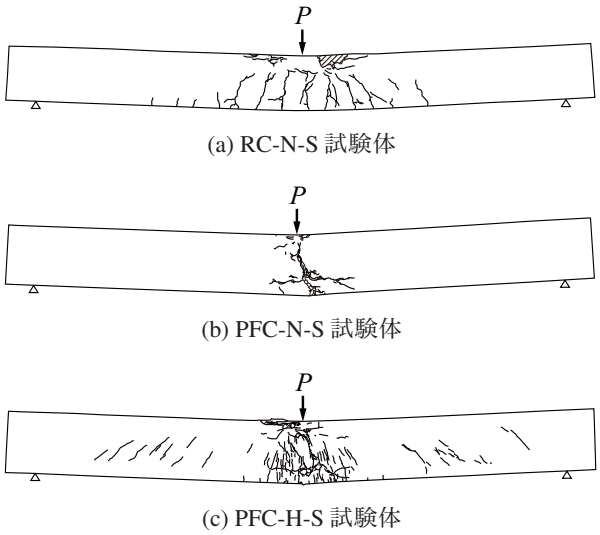
(1) 荷重－変位関係

図－2には，静荷重載荷実験における各試験体の荷重－変位関係を比較して示している。図より，初期勾配は，PFC-N 試験体の場合が RC-N 試験体よりも 1.5 倍程度大きく，PFC を用いることにより梁の剛性が向上していることが分かる。また，PFC-N と PFC-H 試験体を比較すると，主鉄筋の弾性係数が同程度であるため，初期勾配は同程度になっている。

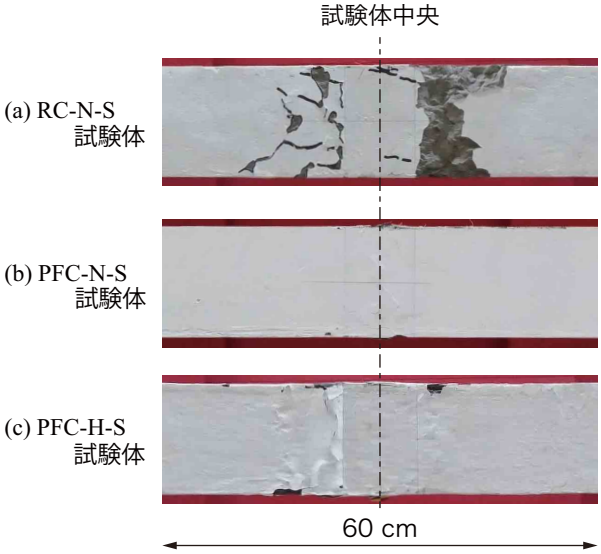
RC-N，PFC-N，PFC-H 試験体に関する主鉄筋降伏荷重は，それぞれ 70，120，190 kN であり，最大荷重は 85，146，231 kN である。これより，普通コンクリートの代わりに PFC を用いることで降伏荷重および最大荷重は共に 1.7 倍程度向上し，普通鉄筋の代わりに高強度鉄筋を配置することで降伏荷重および最大荷重は 2.7 倍程度向上することが明らかになった。

なお，RC-N 試験体の場合には鉄筋降伏後緩やかな増加勾配を示しているのに対して，PFC を用いた試験体の場合には最大荷重到達後荷重が低下する傾向を示している。これは，PFC 試験体の場合には，コンクリートの圧縮強度が非常に高いことにより，載荷点部における小さな圧壊現象が耐荷性状に大きく影響したものと推察される。

以上より，静荷重載荷時には，PFC と高強度鉄筋を併用することで耐荷力が飛躍的に向上することが明らかとなった。



図－3　ひび割れ分布（静荷重載荷実験後）



図－4　静荷重載荷実験後における梁上縁の損傷状況

(2) **静載荷実験終了後におけるひび割れ分布**

図－3には，静荷重載荷実験終了後の各試験体に関する梁側面のひび割れ分布を示している。また，**図－4**には，実験終了後における各試験体の梁上縁損傷状況を示している。ここでは，載荷点を中心に 60 cm の範囲について示している。

図－3 (a) より，RC-N 試験体の場合には，載荷点部近傍にて下縁から上縁に向かって進展する曲げひび割れが数本発生しており，曲げ変形が卓越していることが分かる。また，**図－4**からも明らかなように梁上縁の載荷点部においてはコンクリートが圧壊し，角折れ状態にあることも確認できる。

図－3 (b) より，PFC-N 試験体の場合には，スパン中央部で 1 本の曲げひび割れが大きく開口しているものの，鋼繊維の架橋効果による微細なひび割れは確認されなかった。これは，鉄筋が早期に降伏することで，PFC の圧縮特性を活かせず，損傷が載荷点直下に集中したことが一因と考えられる。なお，梁下縁における最大ひび割れ幅は 19.1 mm であった。また，梁上縁において，**図－4**からも明らかなように載荷面には目に見える圧壊は示されていないが，上縁側面部には圧壊の傾向が見て取れる。

一方で，**図－3** (c) より，降伏強度が 700 MPa 程度の高強度鉄筋を配置した PFC-H 試験体の場合には，局所的に曲げひび割れが大きく開口するような性状は示さず，梁中央部に多数のひび割れが確認できる。スパンの 1/4 付近においても斜めひび割れが発生しており，PFC-N 試験体よりも明確にひび割れの分散傾向が現れていることが分かる。また，梁上縁においては圧壊の傾向が確認できるものの，**図－4**より梁上縁が完全に剥落するような損傷状況ではないことも確認できる。

以上より，**図－2**からも明らかなように，PFC と高強度鉄筋を併用することで，PFC の高強度の圧縮特性を有効に活かすことが可能となり，耐荷性能が大きく向上したものと考えられる。

3.2 衝撃載荷実験

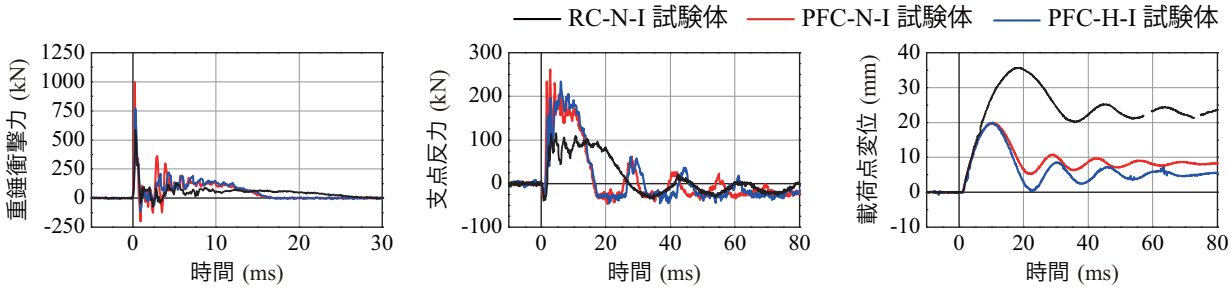
(1) **各種時刻歴応答波形**

図－5には，各試験体の衝撃載荷実験に関する重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位の時刻歴応答波形を示している。なお，黒線が RC-N 試験体，赤線が PFC-N 試験体，青線が PFC-H 試験体の結果を表し，横軸は重錘が試験体に衝突した時刻を零としている。

図－5 (a) より，重錘衝撃力波形に着目すると，いずれの試験体に関しても，振幅が大きく作用継続時間が極めて短い第一波が励起され，その後継続時間の長く振幅が小さい第二波目が励起していることが分かる。また，RC-N，PFC-N，PFC-H 試験体に関する最大衝撃力はそれぞれ $P = 586, 995, 768$ kN となっている。さらに，第二波の作用継続時間に着目すると，RC-N 試験体は 24 ms 程度であるが，PFC を用いた場合には鉄筋の種類に関わらず 13 ms 程度と短くなっている。これは，**図－2**からも分かるように，PFC を用いたことで梁の剛性が増大したことによるものと考えられる。

図－5 (b) より，支点反力波形に着目すると，RC-N 試験体は，継続時間が 27 ms 程度の主波動に高周波成分が合成された分布性状を示した後，減衰自由振動状態に至っていることが分かる。また，PFC-N および PFC-H 試験体も同様の波形性状を示しているものの，重錘衝撃力波形と同様に，作用継続時間は 19 ms 程度と RC-N 試験体と比較して短い傾向にあることが分かる。

図－5 (c) の載荷点変位波形に着目すると，いずれの試験体に関しても，最大振幅を示す第一波が励起した後，減



(a) 重錘衝撃力　(b) 支点反力　(c) 載荷点変位

図－5　各種時刻歴応答波形

衰自由振動状態に至っていることが分かる。また，RC-N, PFC-N, PFC-H 試験体に関する最大変位はそれぞれ，35.7, 19.9, 19.9 mm であり，残留変位はそれぞれ，23.5, 8.6, 5.7 mm となっている。すなわち，PFC を用いることで最大変位は 45 % 程度，残留変位は 65 ～ 75 % 程度低減可能であることが分かる。

一方で，PFC 梁に関して主鉄筋の影響に着目すると，両者で最大変位は同等であるが，残留変位は高強度鉄筋を配置した PFC-H 試験体の場合が 3 mm 程度向上しており，高強度鉄筋の効果を確認することができる。最大変位が同程度であることは，落下高さを $H = 1.0$ m と設定したことにより，比較的小さい入力エネルギーであったことが一因と推察される。すなわち，本実験では鉄筋が大きく塑性化するような領域には到達しておらず，鉄筋の降伏強度の影響が小さくなったものと推察される。

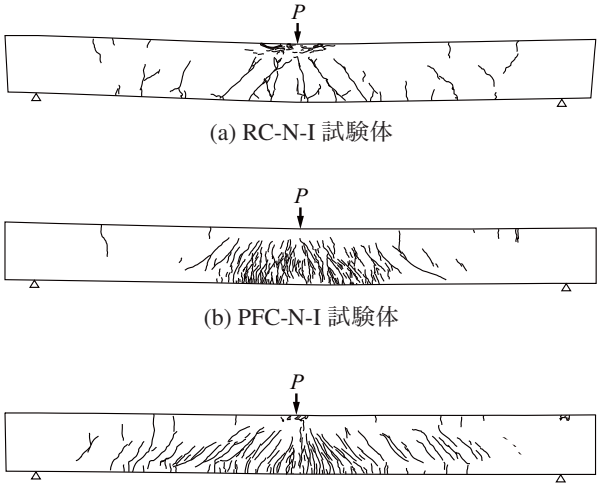
(2) 衝撃載荷実験終了後におけるひび割れ分布

図－6 には，本研究で実施した実験終了後の各試験体に関する梁側面のひび割れ分布を示している。

図－6 (a) より，RC-N 試験体の場合には，下縁から上縁に向かって進展する曲げひび割れがスパン全体に分布していることが分かる。また，載荷点部近傍には斜めひび割れも数本確認できる。さらに，後述するように重錘衝突初期には載荷点から支点部に向かって両端固定梁のような性状を示して曲げ波が伝播することにより，梁上縁から下縁に向かってひび割れが生じていることが分かる。なお，梁上縁の載荷点部近傍に着目すると圧壊の傾向が見て取れる。

図－6 (b) より，PFC-N 試験体の場合には，RC-N 試験体の場合と同様に梁上縁から下縁に進展するひび割れを確認できるものの，載荷点部付近においては **図－3** (b) に示した静載荷時の損傷状況とは大きく異なり，多数の微細なひび割れが発生していることが分かる。また，梁上縁において圧壊の傾向は見られない。

図－6 (c) より，PFC-H 試験体の場合には，RC-N および PFC-N 試験体の損傷状況が合成されたような分布となっており，多数の微細な曲げひび割れや斜めひび割れが確認できる。また，若干ではあるものの，圧壊の傾向が現れ始めていることも窺える。



(a) RC-N-I 試験体

(b) PFC-N-I 試験体

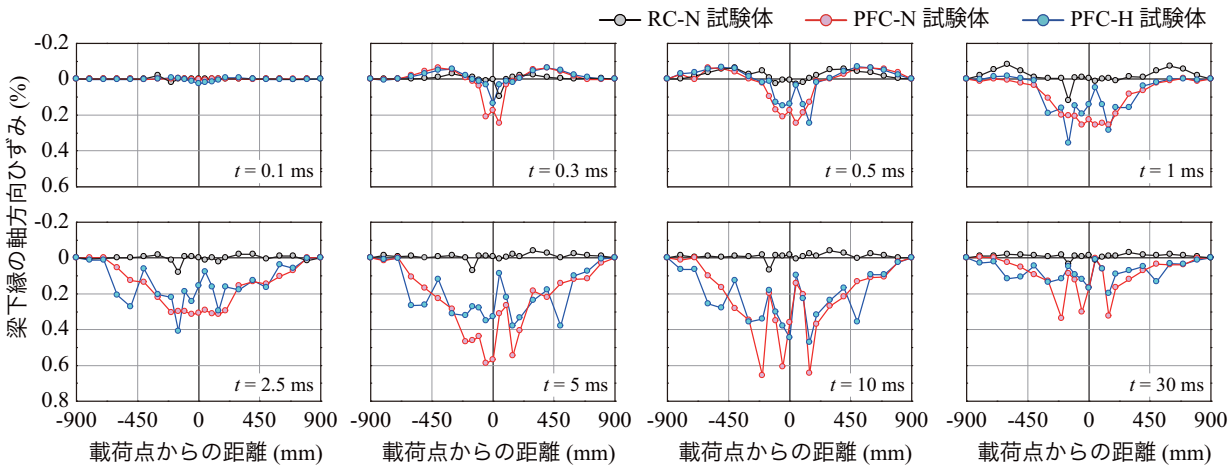
(c) PFC-H-I 試験体

図－6　ひび割れ分布（衝撃載荷実験後）

3.3 ひずみ分布性状の時間的推移

図－7 には，各試験体に関する梁下縁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，重錘衝突直後から減衰自由振動状態に移行するまでの状況を示している。なお，黒線は RC-N，赤線は PFC-N，青線は PFC-H 試験体の結果を表しており，横軸には載荷点からの距離を取って整理している。

まず，黒線で示す RC-N 試験体に着目すると，重錘衝突直後 $t = 0.1$ ms 時においては，励起しているひずみは小さいが，$t = 0.3 \sim 1.0$ ms 時には梁が両端固定梁のような両端部で負のひずみ分布を示しつつ支点方向に伝播していく様子が窺える。しかしながら，載荷点部においては正側のひずみ値が小さく示されており，その傾向は時間の経過によっても変化がない。これは，曲げ作用によってひび割れが発生しひずみゲージ添付位置近傍で応力が解放されたことによるものと推察される。これに対して，後述の PFC を用いた梁の場合には，鋼繊維の架橋効果によってひび割れ幅が小さいことにより，正側のひずみ分



図－7　梁下縁のひずみ分布に関する経時変化の比較

布も計測されている。

次に，赤線で示す PFC-N 試験体に着目すると，$t = 0.3$ ms 時においては 0.2 % 程度の正ひずみが励起しており，ひび割れの発生と共に上述の両端固定状のひずみ分布が明確に示され，$t = 1 \sim 2.5$ ms 時点で波動が支点に到達し，単純支持状態のひずみ分布を呈していることが分かる。

$t = 5 \sim 10$ ms においては，最大ひずみが 0.6 % 程度に達していることが分かる。この時点においてもひずみ分布は滑らかな分布に至っていない。これは，前述の通りひずみゲージ添付位置近傍にひび割れが発生し，ある程度応力が解放されていることを暗示している。

$t = 30$ ms 時点では，最大ひずみも 0.3 % 程度に低減していることにより，衝撃荷重が除荷され減衰自由振動状態に移行していることが窺われる。

青線で示す PFC-H 試験体に着目すると，いずれの時間においても PFC-N 試験体とほぼ同様な分布性状を示していることが分かる。

なお，$t = 30$ ms 時点のひずみ分布を見ると，最大ひずみ値は PFC-N 試験体の場合に比して，小さい値を示しており，**図－5** (c) における減衰自由振動状態における振動振幅と対応していることが分かる。

4. まとめ

本研究では，スパン長 1.8 m の鋼繊維混入 PFC 梁の耐荷性能および耐衝撃挙動に関する基礎データの収集を目的として，コンクリートおよび鉄筋の種類が異なる 3 種類の梁を対象に，静荷重および重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。配筋に関しては，複鉄筋配置を基本として，普通鉄筋及び降伏強度が 700 MPa 程度の高張力ネジ節棒鋼を用いた場合について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると，以下のように示される。

1) 静荷重載荷時においては，鋼繊維混入 PFC を用いることで，通常用いられる RC 梁よりも耐荷性能が 1.7 倍程度向上し，さらに，普通鉄筋の代わりに高強度鉄筋を配置することで，2.7 倍程度耐荷力が向上した。

2) 衝撃荷重載荷時には，PFC を用いることで最大変位は 45 % 程度，残留変位は 65 ～ 75 % 程度低減可能であり，耐衝撃性も向上する。

3) PFC と高強度鉄筋を併用することで，PFC の高強度の圧縮特性を効率的に活かすことが可能となり，耐荷性能が大きく向上することが明らかになった。

今後は，入力エネルギーが大きい場合や，その他の構造形式についても検討を行い，PFC 梁の耐衝撃挙動について詳細に検討を進めていく予定である。

参考文献

1) 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

2) 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

3) 栗橋祐介，河野克哉，安田瑛紀，木内洋介，小室雅人：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，構造工学論文集，Vol.65A, pp.849-858, 2019.3

4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2017 年制定

5) 東京鉄鋼：ネジテツコン（高張力ネジ節棒鋼），https://www.tokyotekko.co.jp/ja/prd/tekko/tc/tc01.html