

論文 繊維混入率の異なる PFC 梁の静荷重および衝撃荷重載荷実験

山越 壮之助^{*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 400 N/mm² 以上を発現する無孔性コンクリート(PFC) の静荷重及び衝撃荷重載荷時の耐荷性能に関する基礎データの収集を目的として、鋼繊維混入率の異なるスパン長 1.8 m の PFC 梁を対象に、スパン中央点載荷による静荷重および重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。なお、軸方向鉄筋には引張強さが 1,400 N/mm² 以上を有する異形 PC 鋼棒を使用した。その結果、1) 静的耐力は、鋼繊維混入率を 1% あるいは 3.5% にすることで、RC 梁に比較してそれぞれ 2 倍、3 倍以上向上すること、2) 衝撃荷重載荷時には、鋼繊維混入率を 3.5% にすることで、耐衝撃性が最も向上すること、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、梁、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発生している。また、世界各地ではテロ行為による爆発飛来物など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コンクリート構造物は、その耐衝撃性を向上させることが極めて重要となっている。

一方で、近年では超高強度コンクリートの研究が積極的に推進されており、圧縮強度 400 N/mm² 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の高い PFC に着目し、その耐衝撃性に関する検討を行ってきた³⁾。既往の研究では、PFC に鋼繊維を混入(補強)した梁部材(幅 150 mm、高さ 200 mm、スパン長 1,800 mm)を対象に衝撃荷重載荷実験を実施し、耐衝撃性の向上を実験的に確認している。

しかしながら、これらの成果は、鋼繊維混入率が 2% の場合についての限定された結果である。繊維補強コンクリートの耐衝撃挙動を適切に評価するためには、混入率の異なる場合についても種々検討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、鋼繊維混入率の異なる 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、既往の研究と同様な形状寸法を有する PFC 梁を対象に鋼繊維混入率を 1, 2, 3.5% に変化させた場合における試験体に対して、静荷重及び重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。また、基準試験体として鋼繊維を混入していない普通コンクリート(RC)梁も作製し、同様の実験を実施した。

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る。表より、結合材には、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(P)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 N/mm² の高強度鋼繊維を用い、体積比の外割で 1, 2, 3.5% 混入した。

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 4 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

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 専用プレミックス粉体	P	最密粒度粉体、密度 2.97g/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 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)

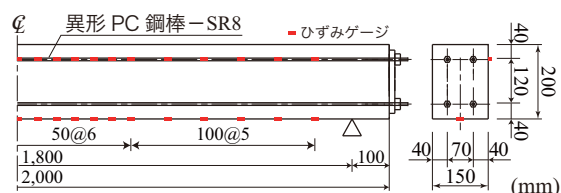
*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 教授 博(工)(正会員)

*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)

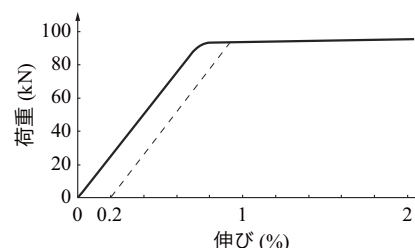
*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 特任教授 工博(正会員)

表－２ 実験ケース一覧

実験 ケース名	繊維混入率 (%)	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 (N/mm ²)	コンクリート 割裂引張強度 f_t (N/mm ²)	実験終了後 PC 鋼棒の 破断の有無
F1-S	1.0	—	—	—	—	332	9.70	無
F1-H1		1.0	1.00	4.43	4.42			無
F1-H1.5		1.5	1.49	5.42	5.40			有
F1-H2		2.0	1.98	6.26	6.23			有
F2-S	2.0	—	—	—	—	337	11.0	無
F2-H1		1.0	1.02	4.43	4.47			無
F2-H1.5		1.5	1.49	5.42	5.41			無
F2-H2		2.0	2.01	6.26	6.28			有
F3.5-S	3.5	—	—	—	—	327	11.3	無
F3.5-H1		1.0	1.01	4.43	4.44			無
F3.5-H1.5		1.5	1.49	5.42	5.41			無
F3.5-H2		2.0	1.95	6.26	6.19			有
RC-S	無し	—	—	—	—	40.8	2.70	無
RC-H0.5		0.5	0.51	3.13	3.16			無



図－１ 試験体の形状寸法および配筋状況

図－２ 異形 PC 鋼棒の荷重－伸び線図の一例⁴⁾

打ち込んで、封緘養生(20℃)を行い、材齢 48 h で脱型した。脱型後、セメントの水和反応を促進するために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後に水分を与えることで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 90℃、保持時間 48 h)ならびに加熱養生(最高温度 180℃、保持時間 48 h)を実施した。その他の養生方法の詳細は文献 2) を参照されたい。

2.2 試験体概要

表－２には、本研究で実施した実験ケースの一覧を示している。本研究では、PFC で鋼繊維混入率を 1, 2, 3.5% に変化した試験体 3 種類と RC でせん断補強筋を配置せずかつ鋼繊維を混入していない試験体 1 種類を対象に、静荷重及び重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。静荷重載荷実験は各試験体 4 種類を対象に行った。また、衝撃荷重載荷実験は、PFC 梁の場合には重錘の落下高さを $H = 1.0, 1.5, 2.0$ m と 3 段階に変化させ、また RC 試験体の場合には $H = 0.5$ m に限定して、常に新しい試験体に対して実施した。

実験ケース名は、PFC 梁において第一項目の F に付随する数値は鋼繊維の混入率(%), 第二項目の H に付随する数値は設定重錘落下高さ (m) であり, S は静荷重載荷

表－３ 異形 PC 鋼棒の材料特性値⁴⁾

種類	0.2% 耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び [°] (%)	弾性係数 (kN/mm ²)
PC 鋼棒-SR8	1,457	1,489	10	200

を表している。なお、表には別途実施した材料試験より得られた圧縮強度及びひび割れ発生強度(割裂引張強度)も示している。また、実験終了後における後述の PC 鋼棒の破断の有無についても示している。

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。補強筋は、上下端に各 2 本配置した複鉄筋配置とし、PFC の高圧縮強度特性に対応して可能な限り衝撃荷重載荷時の上縁圧壊を抑制するために高強度鉄筋を用いることとし、公称径が 9 mm、公称断面積が 64 mm² の异形 PC 鋼棒を使用した。図－２には本研究で用いた异形 PC 鋼棒の荷重－伸び関係の一例を、表－３には材料試験より得られた材料特性値⁴⁾を示している。図および表より、本研究で用いた异形 PC 鋼棒の引張強さは 1,400 N/mm² 以上であり、普通鉄筋の 4 倍程度の引張強度を有していることが分かる。

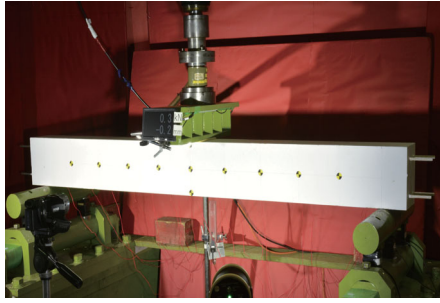


写真-1 静荷重実験の状況

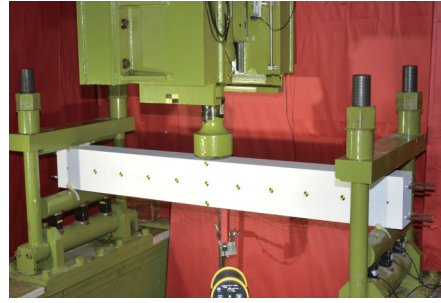


写真-2 衝撃荷重実験の状況

2.3 静荷重載荷および衝撃荷重載荷実験の概要

写真-1には、静荷重載荷の実験状況を示している。静荷重載荷の場合には、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ている。実験は最大荷重到達後、ひび割れが開口し荷重が低下した段階で終局と判断し、実験を終了することとした。

写真-2には、衝撃荷重載荷の実験状況を示している。衝撃荷重載荷実験は、質量300 kg、円柱部直径200 mmで載荷点部を円形状に絞り込んで直径150 mmとし、高さが2 mmの球形状になっている鋼製重錘を、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形で行った。試験体両端支点部に関しては、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(以後、単に変位)、梁底面中央部及び上端筋と同位置の梁側面に貼り付けたひずみゲージ出力である。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を行っている。また、ひずみ測定に用いたひずみゲージは、ゲージ長が10 mmで、PFCの微細なひび割れにも追従できるように、目付が280 g/m²用に加工されたアラミド繊維束3本を梁表面に接着し、その上に接着することとした。

3. 実験結果

3.1 静荷重載荷実験

(1) 荷重-変位関係

図-3には、本研究で実施した全4ケースにおける静荷重載荷実験の荷重-変位関係を比較して示している。図には、大きく変化する剛性勾配の交点を降伏荷重近傍とし、その交点を明記している。以後、この点の荷重を便宜的に降伏荷重とする。図-3より、PFC梁に関する

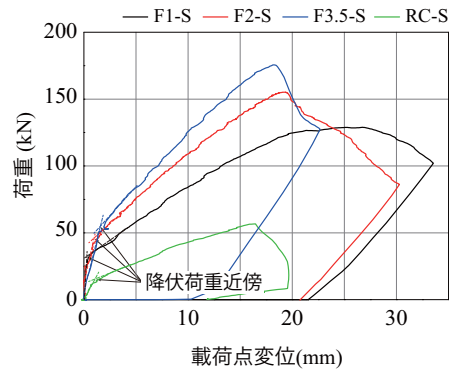


図-3 荷重-変位関係

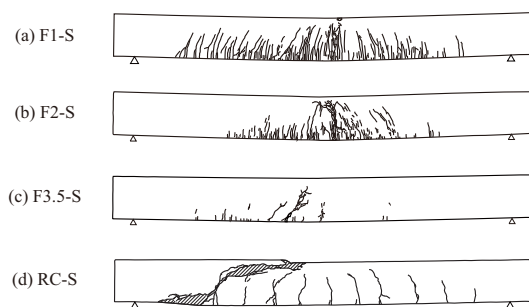
実験結果は降伏荷重、最大荷重共にRC梁に比較して大幅に増加しており、その割合はいずれの荷重に対してもF1梁で2倍以上、F3.5梁で3倍以上の値になっていることが分かる。なお、RC梁の場合はコンクリート標準示方書⁵⁾に準拠した計算せん断耐力が42.4 kN、計算曲げ耐力が51.8 kNで、計算せん断余裕度が1.0以下であることより、後述のひび割れ分布からも明らかなように典型的なせん断破壊型で終局に至っている。一方、PFC梁の場合には、文献6)に準じて算定した計算せん断耐力がF1/2/3.5梁でそれぞれ332、510、658 kNであることにより、後述のひび割れ分布からも明らかなように曲げ破壊型で終局に至っていることは勿論である。

PFC梁間で比較すると、降伏荷重、最大荷重、主筋降伏後の剛性勾配はいずれの場合も鋼繊維混入率に対応して増加の傾向を示しているが、いずれも鋼繊維混入率に線形な増加傾向は示していない。

なお、F1梁の場合には、最大荷重到達後荷重は比較的緩やかな減少傾向を示しているが、F2/3.5梁の場合には最大荷重値に到達後急激に荷重が減少していることが分かる。これは、後述のひび割れ分布からも明らかなように、載荷点近傍部でひび割れが一カ所に集中する傾向を示し、その部分のひび割れが大きく開口し、角折れ的な状態に至ったことによるものと推察される。

(2) 実験終了後のひび割れ分布

図-4には、静荷重載荷実験終了後における側面のひび割れ分布状況を各試験体で比較して示している。



図－４ 実験終了後のひび割れ分布

まず、(d)図の RC 梁に着目すると、ほぼ等間隔に曲げひび割れが発生しているが、帯鉄筋が配筋されていない場合における典型的な RC 梁のせん断破壊型のひび割れを呈して終局に至っている。ほぼ等間隔の曲げひび割れの発生は、前述の計算曲げ耐力が計算せん断耐力と大差がないことにより、せん断破壊荷重近傍までは曲げひび割れが進展したことによるものと推察される。

次に(a)～(c)図の PFC 梁に関するひび割れ分布を見ると、いずれの梁においても基本的に梁下面から上方に向かう曲げひび割れが発生し、斜めひび割れは発生していない。また、鋼繊維混入率に対応して、ひび割れの本数と共に分布領域も減少傾向にあることが分かる。さらに、特に F2/3.5 梁の場合においては、ひび割れが一カ所に集中する傾向を示し、そのひび割れが大きく開口して終局に至っている。これは、鋼繊維の PFC 中における分散と方向性に多少なりとも偏りが生じ、载荷荷重の増加に対応してその部分が弱点になったためと推察される。

3.2 衝撃荷重载荷実験

(1) 各種時刻歴応答波形

図－５には、本研究で実施した全 10 ケースにおける重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位に関する時刻歴応答波形を示している。図中、RC 梁の場合には、せん断補強筋を配筋していないことや静荷重载荷時の耐力も小さいことが明らかになっていることから、衝撃荷重载荷時にも低入力エネルギーで早期に耐力を失うことが想定されたため、重錘の落下高さを $H = 0.5 \text{ m}$ に設定して実験を行っている。

(a)図より、重錘衝撃力波形に着目すると、PFC 梁の場合には鋼繊維混入率の大きさに拘わらず重錘落下高さ毎に類似の分布性状を示していることが分かる。また、重錘の落下高さ毎に比較すると、落下高さに対応して最大衝撃力は増加傾向を示している。波形分布性状は、いずれの落下高さに対しても類似であり、初期に振幅の大きい継続時間が 1 ms 程度の高周波成分を含んだ波形性状を示し、その後継続時間が 17.5 ms ～ 25 ms の正弦半波状の波形を示している。高周波振動成分は時間の経過と共に徐々に減衰している。

基準となる RC 梁の場合には、重錘落下高さが $H = 0.5 \text{ m}$ であることや、コンクリートの圧縮強度が $f'_c = 40 \text{ N/mm}^2$ 程度であることにより、最大重錘衝撃力も 400 kN 程度と $H = 1 \text{ m}$ 落下時における PFC 梁の 1/2 程度の値を示している。

(b)図より、支点反力波形に着目すると、落下高さが $H = 1 \text{ m}$ の PFC 梁の場合には、最大支点反力は鋼繊維混入率の大きさに対応して大きくなっており、主波動継続時間は逆に小さくなる傾向を示している。なお、衝撃荷重除荷後には周期が 15 ～ 20 ms 程度の正負交番の支点反力が励起されていることを確認できる。これより、梁は減衰自由振動状態に移行し、負反力の場合には梁が上に凸状態に至っていることが類推される。

一方、RC 梁の場合には、最大支点反力も PFC 梁に比較して 1/2 以下の値を示し、さらに除荷後に負反力をしていないことより梁は著しく劣化損傷していることが窺われる。後述のひび割れ分布から、梁はせん断破壊に至っていることを確認している。

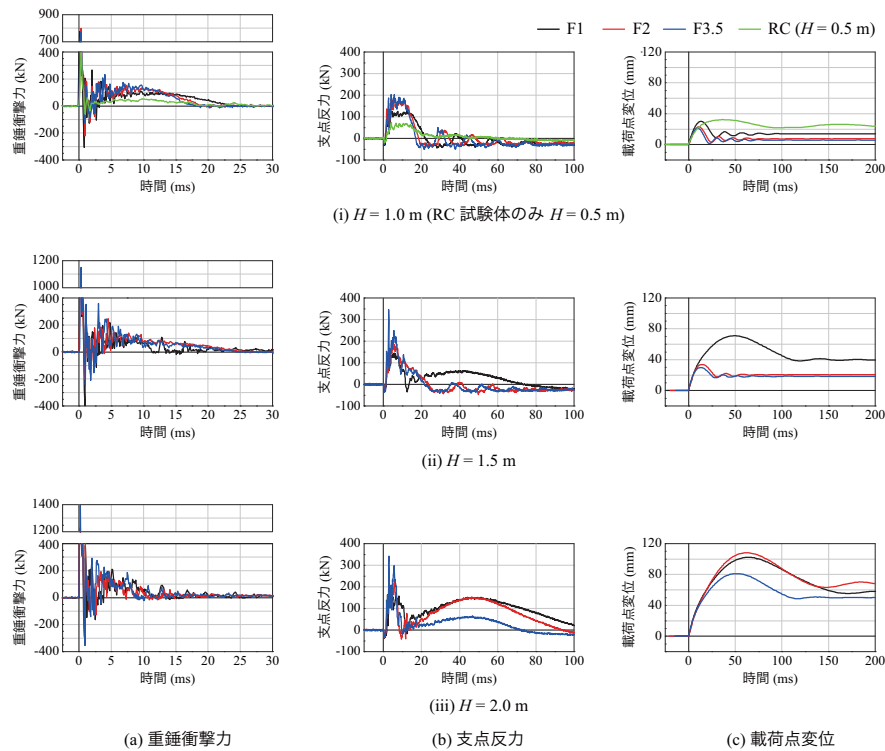
重錘落下高さが $H = 1.5 \text{ m}$ の場合には、F2 梁と F3.5 梁は類似の波形性状を示しているが、F1 梁の場合には载荷後約 10 ms 時点で除荷に至り、その後継続時間が 60 ms 程度の正弦半波の波形性状を示している。ここでは示していないが、梁は主鋼材が破断に至りスパン中央部で鋭角に角折れの状態に至っていることを確認している。

重錘落下高さが $H = 2 \text{ m}$ 落下時には、F1 梁と F2 梁が $H = 1.5 \text{ m}$ 落下時における F1 梁と類似の波形性状を示していることが分かる。これらの梁も前述同様に主鋼材が破断し、梁は载荷点を中心に著しく角折れに至っていた。但し、F3.5 梁の場合には F1/2 梁と類似の性状を示すものの第 2 波目の継続時間が 20 ms 以上短い。これより、F3.5 梁の場合にも主鋼材が破断に至っているものの、角折れは F1/2 梁の場合に比して鋼繊維のより大きな架橋効果によって抑制されているものと推察される。

(c)図の载荷点変位波形に着目すると、重錘の落下高さが $H = 1 \text{ m}$ の場合における PFC 梁の場合には、载荷時に正弦半波状の波形を示した後、変位が残留して減衰自由振動状態に推移していることが分かる。最大変位は F1 梁が最も大きい、F2 梁と F3.5 梁間では 20 mm 程度で著しい差は生じていないことが分かる。

一方、RC 梁の場合には、除荷状態が明確ではなく、変位は大きく残留し、周期が 100 ms 以上の緩やかな振動状態を呈しており、明らかに終局に至っていることを示している。

落下高さが $H = 1.5 \text{ m}$ の場合には、F2/3.5 梁において载荷時の正弦半波の継続時間は 25 ms 前後であるのに対し、F1 梁の場合には 75 ms 程度に至っており、最大変位も前者の 2 倍以上に達していることが分かる。これは、



図－５ 各種時刻歴応答波形

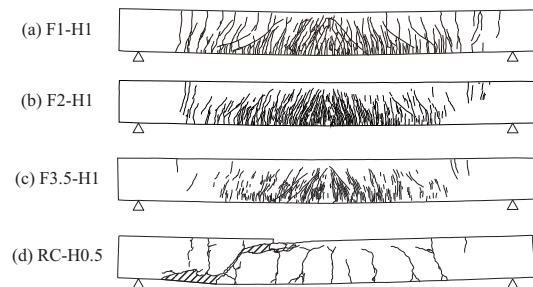
前述のとおり、主鋼材の破断によって梁が著しく角折れの状態に至っていることによるものと推察される。F2 梁と F3.5 梁の波形を比較すると、最大変位が 30 mm 程度と入力エネルギーの増加に対応して大きくなっているが、その性状は $H = 1$ m と類似していることが分かる。

落下高さが $H = 2$ m の場合には、F2 梁が F1 梁と類似した性状を示していることが分かる。これは、前述の通り入力エネルギーの増加によって F2 梁も主鋼材の破断によって、梁が大きく角折れの状況に至っていることによるものと推察される。しかしながら、F3.5 梁の場合には上述の F1/2 梁に比較して最大変位が 20 mm 程度小さく示されている。これは、主鋼材が破断に至っているものの、鋼繊維のより大きな架橋効果によって梁の角折れや最大変位が抑制されたことによるものと推察される。

以上より、鋼繊維混入率を 3.5% としたことによって、梁の耐衝撃性が最も大きく向上することが明らかになった。

(2) 実験終了後のひび割れ分布

図－６には、全ての試験体で主鉄筋あるいは主鋼材が破断に至っていない、重錘落下高さが $H = 1.0$ m (RC 試験体のみ $H = 0.5$ m) の場合における実験終了後の梁側面のひび割れ分布を比較して示している。図より、PFC 梁の場合には、いずれの試験体においても静荷重載荷時と同様に曲げひび割れが発生しており、ひび割れの本数及び発生領域は鋼繊維混入率の増加と共に減少傾向にあることが分かる。これは、鋼繊維混入率の増加に対応して鋼繊維の架橋効果も向上することによるものと推察され



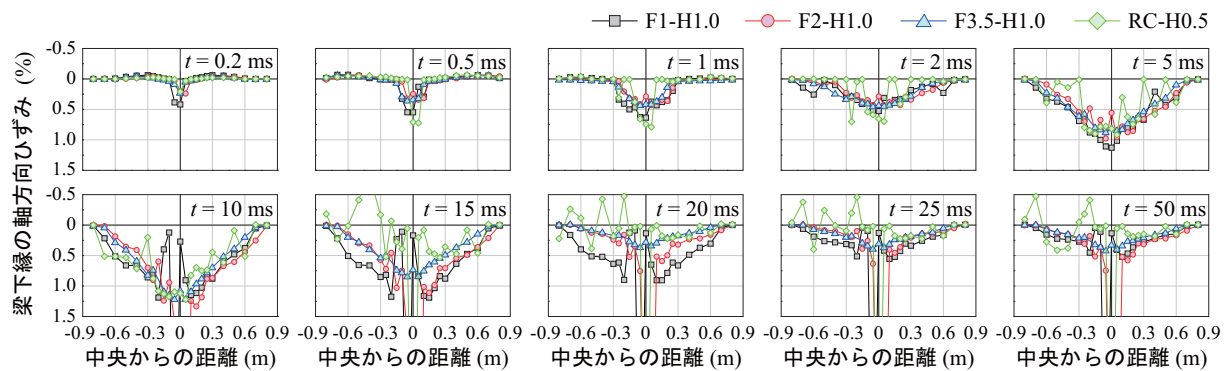
図－６ 実験終了後のひび割れ分布

る。また、静荷重載荷時には確認できない、梁上縁から下縁に向かって進展する負曲げの発生に起因するひび割れや斜めひび割れも確認できる。これは、衝撃荷重載荷初期の波動伝播の効果によるものと推察される。

一方、RC 梁の場合には、静荷重載荷時と同様に曲げひび割れの発生と共に、せん断補強筋が配筋されていない場合における RC 梁特有のせん断破壊型のモードで終局に至っていることが分かる。

(3) 梁下縁ひずみ分布の時間的推移

図－７には、重錘落下高さが $H = 1.0$ m におけ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へと移行するまでの状況を示した。図より、PFC 梁に着目すると、衝撃荷重載荷初期には載荷点部で正のひずみを示しているが、その周辺のひずみは負の分布を示していることが分かる。これは、載荷初期には曲げの主波動が支点まで到達



図ー 7 各時刻における梁下縁の軸方向ひずみ分布の経時変化

達していないことにより、スパン長の短い固定梁と類似した状態になっていることによるものと推察される。

$t = 2$ ms 経過後にはほぼ単純支持の状態に移行していることが確認でき、かつスパン中央部に集中荷重が載荷する場合の静的な曲げモーメント分布と類似した三角形状の分布を示している。その分布は、鋼繊維混入率の大きさに拘わらず類似なものとなっていることが分かる。

$t = 5$ ms 経過後には、スパン中央部のひずみが 1% 程度に達しているが、梁全体の分布性状は $t = 2$ ms 経過時と類似している。 $t = 10$ ms 経過後もひずみが増加傾向を示しているが、F1 梁の場合には載荷点近傍部でひずみ分布が大きく乱れている。これは、F2/3.5 梁に比較して鋼繊維混入率が少ないために対応して剛性も小さく、変形も大きくなるため(図ー 5 参照)、ひび割れが大きく開口したことによるものと推察される。また、F2 梁の場合も載荷点中央部で多少の乱れがあるが、局所的である。

$t = 15 \sim 20$ ms 時点では、F3.5 梁はひずみ分布の乱れもなく単調に除荷状態に至っている。それに対して、F1 梁の場合は F3.5 梁に比較して緩やかに除荷に至っている。また、F2 梁の場合には載荷点近傍部でひずみの乱れが若干進展し、かつ半スパンで F3.5 梁よりも大きなひずみ分布を呈しており、鋼繊維混入率の大きさに対応した分布性状を示していることが分かる。

一方、RC 梁の場合には、 $t = 0.5$ ms までは PFC 梁と類似した性状を示している。その後時間の経過と共に半スパンで曲げ的な性状を示しつつひずみ分布は大きく乱れて行く。 $t = 10$ ms で PFC 梁と類似の分布性状を示すものの、その後ひずみ分布の乱れは梁全体に伝わり、ひずみも減少傾向にあることより、著しいせん断破壊に至ったことが類推される。

以上より、F1/2 梁の場合には比較的入力エネルギーが小さい場合においてもひび割れの開口等による損傷が顕在化する傾向にあるが、F3.5 梁の場合にはひずみレベルでも損傷が顕在化していないことが確認され、耐衝撃的にも最も優れていることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、鋼繊維混入 PFC 梁の耐衝撃挙動に関する基礎データを収集することを目的として、鋼繊維混入率の異なる梁を対象に、静荷重および重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 静荷重載荷実験の結果、最大荷重は PFC 梁の鋼繊維混入率を 1 %, 3.5 % にすることで、RC 梁に比較してそれぞれ 2 倍、3 倍以上増加する。
- 2) 衝撃荷重載荷実験の結果、PFC 梁で鋼繊維混入率を 3.5% にする場合が最も耐衝撃性に優れてい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.
- 2) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 鋼繊維で補強した無孔性コンクリートの圧縮・引張に対する力学モデル, 土木学会論文集 E2, Vol. 74, No. 1, pp. 10-20, 2018.
- 3) 木内洋介, 小室雅人, 河野克哉, 岸徳光: 400 N/mm² 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 637-642, 2020.
- 4) 高周波熱錬株式会社: 異形 PC 鋼棒 ”ウルボン”, <http://www.k-neturen.co.jp/products/steel/tabid/233/Default.aspx> (最終閲覧日: 2020 年 12 月 20 日)
- 5) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.
- 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.