

論文 鋼繊維補強無孔性コンクリートパネルを側面接着した RC 梁の重錘落下衝撃実験

松原 涼^{*1}・小室 雅人^{*2}・河野 克哉^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本論文では、鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete, PFFRC) 製パネルを用いて普通コンクリート製 RC 梁の両側面に接着補強を施した試験体および無補強 RC 梁を対象として、PFFRC パネルの耐衝撃補強効果に関する検討を目的に、静荷重および重錘落下衝撃荷重実験を実施した。検討の結果、PFFRC パネルを RC 梁の両側面に接着することによって、無補強試験体と比較して、1) 静荷重実験結果より、鋼材降伏時の荷重は 1.2 倍程度向上すること、2) 衝撃荷重実験結果より、最大変位や残留変位を 30~35 % 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: 鋼繊維補強, 無孔性コンクリート, 接着補強, 衝撃荷重

1. はじめに

近年、我が国では、異常気象に伴う土石流や落石などの自然災害が多発しており、それらの甚大化に対応するため社会基盤施設の安全性向上が求められている。このような偶発（衝撃）作用を受ける構造物の安全対策の一つとして、高強度材料を用いた補強法が挙げられる。近年では、コンクリートの超高強度化に関する研究が進み、圧縮強度 400 N/mm² 以上を有する無孔性コンクリート (Porosity Free Concrete, PFC) が開発され¹⁾、一部で実用化されている。

著者らの研究グループでは、耐衝撃性に優れた構造部材の開発を目的として、PFC 部材の耐衝撃性能に関する基礎的な検討を種々行っている²⁾⁴⁾。既往の研究においては、PFC に鋼繊維を混入した鋼繊維補強無孔性コンクリート (PFFRC) 製梁を対象に、鋼繊維混入率やコンクリート強度を変化させた重錘落下衝撃荷重実験を実施した。その結果、鋼繊維混入率やコンクリート強度の増加に対応して耐衝撃性能も向上することが明らかとなっている。一方で、高強度・高靱性特性を有する PFFRC をプレキャスト化することにより、普通コンクリート製 RC 部材の耐衝撃補強材料としての活用も期待される。

このような観点から、本研究では、普通コンクリート製 RC 梁の両側面に PFFRC パネルを接着した試験体を対象に、PFFRC パネルの耐衝撃補強効果に関する検討を目的として、静荷重および重錘落下衝撃荷重実験を実施した。また、比較のために無補強 RC 梁についても同様に実験を実施し、比較・検討を行っている。なお、補強方法としては、RC 梁下面に PFFRC パネルを接着した場合における曲げ補強に着目した検討も想定される。しかしながら、本研究では、鋼繊維の架橋効果に基づくせん断補強効果も期待することとし、側面接着補強法に着目して検討を行うこととした。

2. 実験概要

2.1 PFFRC の概要

表-1には、PFFRC に用いた材料を示している。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ェームに対して中間粒子となる粉体（石英微粉末）を加えて最密粒度化した PFC 専用プレミックス結合材 (B)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、短繊維には引張強度が 2,800 MPa の高強度鋼繊維 (F) を

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	B	最密度粉体, 密度: 2.97 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	高強度鋼繊維	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: 200 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	ポリアルキレングリコール誘導体

*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 社会基盤ユニット 教授 博(工) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進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 社会基盤ユニット 特任教授 工博 (正会員)

表-2 実験ケース一覧

試験体名	PFFRC パネル 接着補強 の有無	鋼繊維 混入率 (%)	設定重錘 落下高さ H (m)	実測重錘 衝突速度 V' (m/s)	実測入力 エネルギー E (kJ)	普通コンクリート の圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	主鉄筋 降伏強度 f_y (N/mm ²)	せん断補強筋 降伏強度 f_{sy} (N/mm ²)
N-S	無	-	-	-	-	28.9	397	388
N-H2.5			2.5	6.83	7.00			
P-S	有	3.5	-	-	-	30.0	397	388
P-H2.5			2.5	6.99	7.33			

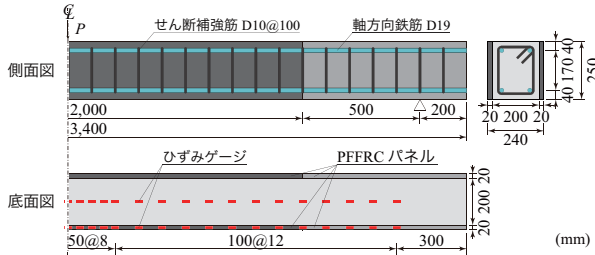


図-1 P 試験体の形状寸法および配筋

用い、外割の体積比 3.5 % を混入した。なお、水結合材比 (W/B) は 15 % としている。

PFFRC は、オムニミキサ (容量 30 ℓ) に F を除く材料を投入した後 6 分間の練混ぜを行い、その後 F を投入し、さらに 2 分間の練混ぜを行った。練混ぜ終了後、型枠に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、PFFRC を密閉容器内に配置して真空ポンプを用いて減圧した後 PFFRC を水没させ、外表面から内部に水の供給 (保持時間: 0.5 h) を行った。その後、蒸気養生 (最高温度 90℃, 保持時間 48 h, 1 気圧) を行い、さらに加熱養生 (最高温度 180℃, 保持時間 48 h, 1 気圧) を実施した。なお、本研究で用いた PFFRC に関しては既往の研究³⁾⁻⁵⁾より、弾性係数は 60 GPa 程度、割裂引張強度は 10 MPa 程度、引張強度到達時ひずみは 150 μ 程度である。その他、ひずみ硬化や軟化特性など詳細については文献 1), 5) を参照されたい。

2.2 試験体概要

図-1 には、本研究で対象とした RC 梁の両側面に PFFRC パネル (以後、単にパネル) を接着した梁 (以後、P 試験体) の形状寸法を示している。無補強 RC 梁 (以後、N 試験体) の形状寸法 (幅 × 高さ × スパン長) は 200 × 250 × 3,000 mm であり、P 試験体の場合には、その両側面に 250 × 20 mm (高さ × 厚さ) のパネルを接着している。なお、製作の都合上、1 枚のパネルの最大長さが 2,000 mm であることより、梁中央部に長さ 2,000 mm のパネルを 1 枚、その両側に長さ 700 mm のパネルを 1 枚ずつ、梁片面当たり計 3 枚を両側面に接着した。接着方法に関しては、1) 接着面の目粗しを行い、2) 多少の不陸を考慮して厚さ 3 mm 程度となるようにエポキシ系接着樹脂を塗布した後、3) 気泡が入らないように十分注意し RC 梁の側



(a) 静荷重載荷実験



(b) 衝撃荷重載荷実験

写真-1 静荷重および衝撃荷重載荷実験の状況

面にパネルを接着した。パネル設置後は、十分にパネルを押し、パネル側面から余分な樹脂を取り除いて成形した。パネル接着後における養生期間中は圧着などの処理は行わず、片面ごとに一週間ずつ養生期間を設けた。また、養生温度は常温 (20℃ 程度) とし、接着剤以外の機械的接合は併用していない。なお、接着面の含水率管理は実施せず、パネル接着の耐久性についても現時点では不明であることから、実構造に適用する場合には、これらについて今後さらなる検討が必要である。パネルと RC 梁間の付着力については、事前に付着引張試験を実施しており、コンクリートの引張強度以上の強度を有することを確認している。

表-2 には、本研究で対象とした実験ケースの一覧を示している。ここでは、パネル接着補強の有無や荷重載荷方法を変化させた計 4 ケースの実験を実施した。試験体名に関しては、第一項目はパネル接着補強の有無 (N: 補強無し, P: 補強有り) を、第二項目は載荷方法 (S: 静荷重載荷, H2.5: 落下高さを 2.5 m とする重錘落下衝撃荷重載荷) を表している。なお、本研究で用いた PFFRC の圧縮強度は $f'_{pffrc} = 300 \text{ N/mm}^2$ 程度である。また、表には、別途実施した材料試験より得られた普通コンクリートの圧縮強度 f'_c 、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_y ,

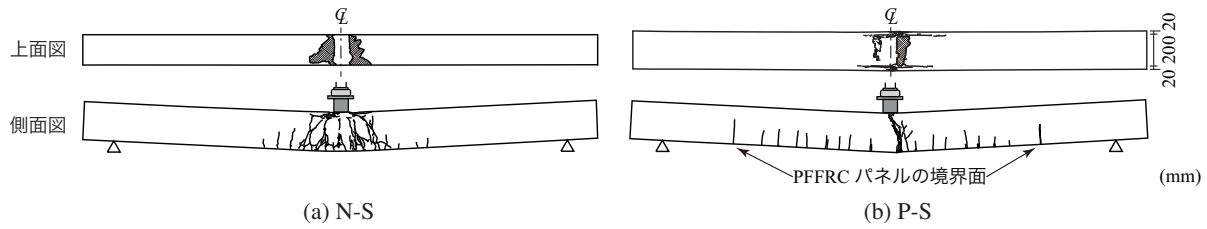


図-3 静荷重試験後のひび割れ分布

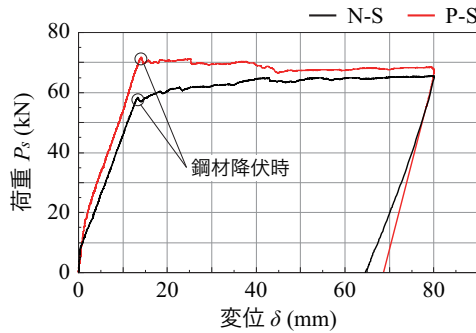


図-2 荷重-変位関係

表-3 鋼材降伏時の荷重および変位一覧

試験体名	鋼材降伏時荷重 $P_{s,y}$ (kN)	鋼材降伏時変位 $d_{s,y}$ (mm)
N-S	58 (1.00)	13.4 (1.00)
P-S	72 (1.24)	14.1 (1.05)

() は N 試験体の値に対する比

f_{sy} も併せて示している。

2.3 実験方法

写真-1には、静荷重および衝撃荷重試験の状況を示している。

静荷重試験は、梁幅方向に 400 mm、梁軸方向に 100 mm の載荷板を梁のスパン中央部に設置し、100 kN 油圧ジャッキを用いて荷重を作用させることにより実施した。

衝撃荷重試験は、質量 300 kg、先端部が直径 150 mm、高さ 2 mm の球形状を有する鋼製重錘を、設定落下高さを $H = 2.5$ m として、スパン中央部に一度だけ自由落下させる形で実施した。支点部は、試験体の跳ね上がりを防止するために RC 梁の上縁を鋼製の矩形梁を用いて締め付けており、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、1) 載荷荷重 P_s あるいは重錘衝撃力 P 、2) 合支点反力 R (以後、単に支点反力)、3) 載荷点変位 δ (以後、単に変位)、4) RC 梁下縁およびパネル下縁の軸方向ひずみ、である。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、変位はレーザ式非接触型変位計を、ひずみは図-1に示した位置に貼り付けた箔ひずみゲージを用いて測定した。また、ひずみゲージはゲージ長が 10 mm のものを使用しており、微細なひび割れにも追従できるように、RC 梁には目付量

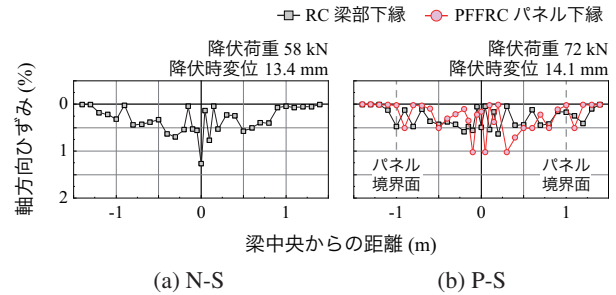


図-4 主鉄筋降伏時におけるひずみ分布

が 280 g/m^2 用に加工されたアラミド繊維束 3 本を、パネルには板厚が 0.2 mm のリン青銅板を接着し、その上にひずみゲージを接着することとした。さらに、ひび割れ分布の他、変位計のバックアップとして 2,000 fps の高速度カメラ撮影も行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 静荷重試験結果

(1) 荷重-変位関係

図-2には、N/P-S 試験体に関する静荷重試験結果の荷重-変位関係を比較して示している。また、表-3には、鋼材降伏時の荷重および変位の一覧を示している。なお、実験は残留変位がスパン長の 2% 程度 ($\delta_{s,res} \geq 60$ mm) に達するまで載荷することとした。

図より、N 試験体の場合に注目すると、 $P_s = 8$ kN 程度において荷重勾配が変化していることより、ひび割れが発生したものと推察される。その後、 $P_s = 58$ kN において主鉄筋が降伏したことで、更に荷重勾配の低下が確認できる。また、主鉄筋降伏後は荷重が徐々に増加する傾向を示している。これは、主鉄筋のひずみ硬化によるものと推察される。以上より、N 試験体は典型的な曲げ破壊型の静的耐荷性状を示すことが確認された。なお、後述のひび割れ分布においても曲げひび割れが卓越する傾向が見て取れる。

一方、P 試験体の場合に注目すると、主鉄筋降伏時変位は N 試験体とほぼ同様であるが、ひび割れ発生後の荷重は P 試験体の方が大きく、主鉄筋降伏時荷重は $P_s = 72$ kN となっている。これより、主鉄筋降伏時荷重は N 試験体の場合に比較して 24% 程度向上していることが分かる。これは、パネル接着による断面積や剛性の増大に加え、PPFRC の高強度特性および鋼繊維の架橋効果が発揮され

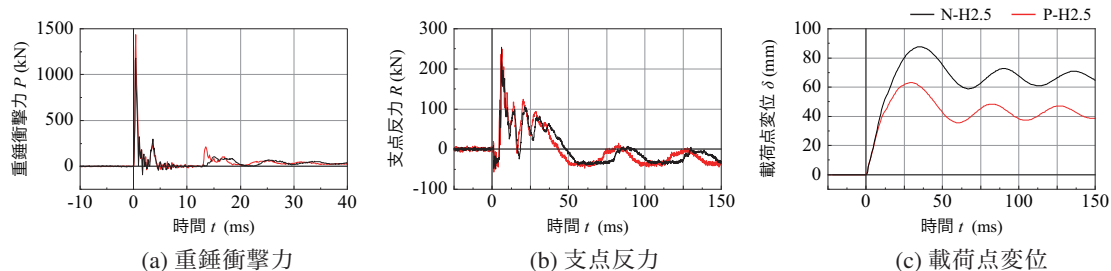


図-5 衝撃荷重載荷時における各種時刻歴応答波形

たことによるものと推察される。また、主鉄筋降伏後を見ると、N試験体とは異なり、載荷点変位が増大する一方で荷重値はほぼ一定値を保持しており、完全弾塑性的な性状を示していることが分かる。これは、パネル内混入鋼繊維の架橋効果が発揮し、変形の増大と共にひび割れ部の鋼繊維の抜け出しや破断が徐々に進行したことによるものと推察される。

(2) ひび割れ分布

図-3には、N/P-S試験体に関する静荷重載荷実験終了後における側面および上面のひび割れ分布状況を比較して示している。なお、P試験体に関してはパネルを接着した状況下における結果である。

N試験体の場合に注目すると、曲げひび割れがスパン中央部に集中して発生しており、その他の部分に関してはひび割れは生じていない。また、載荷点直下のひび割れは梁の上縁まで到達しており、梁は角折れの状態に至っている。さらに、載荷治具から45度程度の角度で左右に斜めひび割れが生じている。これは、上面図からも分かるように、載荷治具設置周辺に生じた圧縮破壊に伴って進展したものと推察される。

P試験体の場合に注目すると、N試験体とは異なり、スパン中央部に接着した2,000 mmのパネル全体にひび割れが生じており、梁下縁から数本の曲げひび割れがほぼ均等に生じている。これは、パネルに混入された鋼繊維の架橋効果によって、ひび割れがパネル全体に分散したためと推察される。また、載荷治具直下ではひび割れ幅が大きい1本の曲げひび割れが確認できる。これは、パネル内混入鋼繊維の抜け出しや破断が局所的に生じ、架橋効果が低下したことが要因の一つであるものと推察される。さらに、左右のパネルとの接着面にひび割れが生じ、中央に接着したパネルのみにひび割れが生じている。上面図を見ると、N試験体と同様に載荷治具設置周辺の圧縮破壊が確認できる一方で、梁とパネルの接着面には部分的な付着切れが生じている。これは、載荷部近傍の梁軸方向に曲げ圧縮応力が作用するとともに、梁軸直角方向にはそのポアソン効果によって接着剤の引張強度以上の引張応力が作用するためと推察される。

(3) 主鉄筋降伏時におけるひずみ分布

図-4には、N/P-S試験体に関する主鉄筋降伏時にお

けるRC梁部およびパネル下縁のひずみ分布を比較して示している。なお、黒線がRC梁部下縁、赤線がパネル下縁の結果である。

まず、RC梁部下縁のひずみ分布に着目すると、N試験体の場合には図-3に示されているように、載荷点直下でひび割れが生じていることにより大きいひずみが発生しているとともに、その値は乱れていることが確認できる。これは、ひずみゲージ貼付位置近傍にひび割れが生じたことで、局所的にひずみ値が大きくなるあるいは引張応力が解放されるためと推察される。

一方、P試験体の場合には、N試験体に比べて主鉄筋降伏時の荷重は大きいものの、スパン中央部領域で平均的に0.5%程度のひずみ分布を示し、局所的に大きいひずみは生じていない。これは、PFRCの混入鋼繊維による架橋効果が発揮されたことによって、局所的に生じるひずみが抑制されたためと推察される。

また、P試験体に関するパネル下縁のひずみ分布に着目すると、ひび割れが開口している載荷点直下においては、ひずみがRC梁部よりも大きく示されていることが確認できる。これは、目視不能なひび割れの発生によってひずみが局所的に大きくなったことによるものと推察される。

3.2 衝撃荷重載荷実験結果

(1) 各種時刻歴応答波形

図-5には、N/P-H2.5試験体における重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する各種時刻歴応答波形を示している。

(a)図より、重錘衝撃力波形に着目すると、パネル接着の有無にかかわらず、ほぼ類似の波形分布性状を示していることが分かる。すなわち、重錘衝突初期には、継続時間が非常に短く振幅の大きい第1波が励起し、その後最大300 kN程度の第2波が後続する波形性状を示している。詳細に見ると、最大衝撃力はN試験体の場合よりもP試験体の場合が約250 kN大きい値となっており、第3波に関してもP試験体の方が大きく示されている。一方で、主波動の継続時間もP試験体の方が短い。これは、パネルを接着補強することによって梁の剛性が向上したことによるものと推察される。

(b)図より、支点反力波形に着目すると、重錘衝撃力波形と対応して、両者ともに類似の波形分布性状を示してい

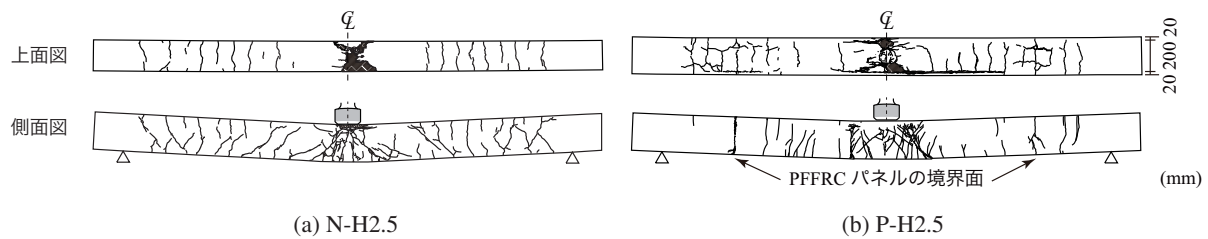


図-6 衝撃荷重実験後のひび割れ分布

ることが分かる。すなわち、重錘衝突直後には負の値を示した後に、45 ms 程度の継続時間と最大約 250 kN の反力を示す高周波成分が合成された正弦半波の波形性状を示している。また、50 ms 以降には減衰自由振動状態に移行していることも見て取れる。なお、重錘衝突初期の負反力の励起は、スパン中央部に衝撃荷重が作用することによって試験体端部がリバウンド状態に至ったことによるものと推察される。主波動の継続時間に着目すると、N/P 試験体の場合にはそれぞれ 49, 44 ms 程度であり、P 試験体がより短く示されている。これは、パネル接着補強によって梁の剛性が増大したことによるものと推察される。

(c) 図より、変位波形に着目すると、両者ともに重錘衝突後 10 ms 程度まで同様の波形を示している。その後、いずれの梁も最大値を示す正弦半波状の波形が励起し、除荷後に減衰自由振動状態に移行する傾向が確認できる。減衰自由振動状態における周期に着目すると、P 試験体の場合が N 試験体の場合よりも短く示されており、パネルを接着補強したことによる曲げ剛性の向上が確認できる。

ここで、最大変位に着目すると、N/P 試験体でそれぞれ 88, 63 mm、残留変位は 66, 43 mm であり、P 試験体の両変位はパネルの接着補強によって N 試験体よりも共に減少していることが分かる。すなわち、パネルの接着補強によって、梁の耐衝撃性は 30~35% 程度向上することが明らかとなった。

(2) ひび割れ分布

図-6には、N/P-H2.5 試験体に関する衝撃荷重実験終了後における側面および上面のひび割れ分布状況を比較して示している。なお、P 試験体に関してはパネルを接着した状況下における結果である。

N 試験体に着目すると、静荷重実験終了後のひび割れ分布と異なり、ひび割れは梁全体に下縁のみならず上縁からも進展しており、荷重点近傍部には斜めひび割れも発生していることが確認できる。上縁からのひび割れの発生は、衝撃荷重初期に曲げ波が波頭で固定梁のような性状を示して支点に向かって伝播することによるものと推察される。破壊モード的には、衝撃荷重時には、静荷重時における曲げ破壊型からせん断と共に曲げ作用によって終局に至る曲げせん断破壊型に移行していることが確認できる。上面図に着目すると、荷重点近傍部では圧壊しており、梁全体が荷重点を中心

に角折れ状態に至っていることが確認できる。

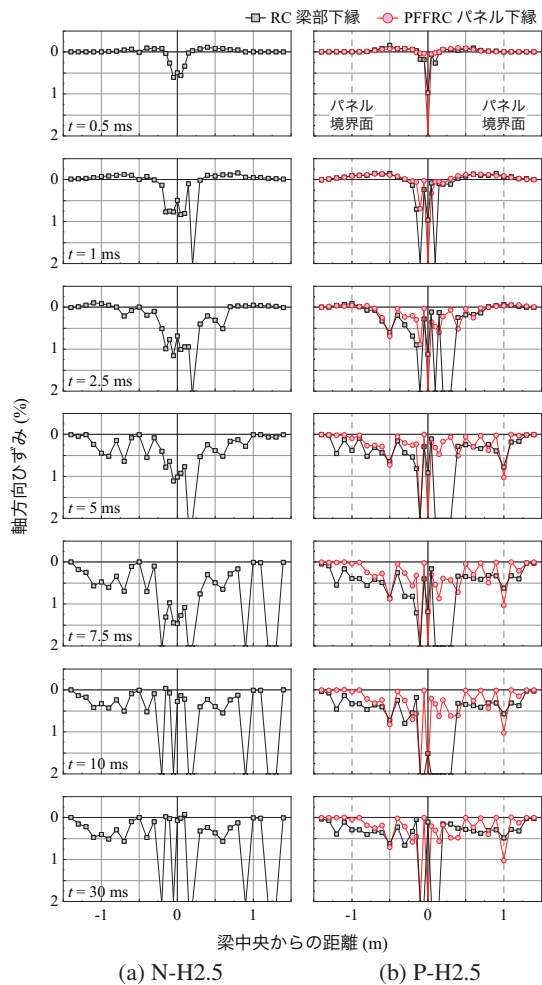
次に、P 試験体に着目すると、パネル面では斜めひび割れよりも曲げひび割れが卓越して進展していることが確認できる。また、ひび割れは、N 試験体の場合と比較して本数が少ない。

さらに、N 試験体と同様に上縁からのひび割れも確認できるが、下縁のひび割れと比較すると減少していることが分かる。これは、パネルの接着によって鋼繊維の架橋効果も発揮され、引張強度が向上したことによるものと推察される。上面図を見ると、N 試験体と同様に圧壊傾向を示しており、かつ支点近傍上縁にも多数のひび割れが確認できる。また、RC 梁自体はパネル補強無しの場合と類似の性状を示すものの、パネルの高強度特性によってパネルまでひび割れは進展していないことが読み取れる。さらに、静荷重時の P 試験体と同様に RC 梁とパネルの接着面における接着剤の付着切れによる開口が確認できる。これは、静荷重時と同様に、大きい曲げ圧縮力の発生に対応してポアソン効果による引張応力が発生し、その引張応力が接着剤の接着応力よりも大きくなったことによるものと推察される。

(3) RC 梁部および PPFRC パネル下縁のひずみ分布

図-7には、N/P-H2.5 試験体に関する RC 梁部およびパネル下縁のひずみ分布に関する経時変化を比較して示している。なお、黒線が RC 梁部下縁、赤線がパネル下縁の結果であり、いずれも $t = 0.5 \sim 30$ ms までの結果を示している。

まず、黒線で示した RC 梁部下縁のひずみ分布に着目すると、 $t = 0.5 \sim 2.5$ ms 時には、いずれの試験体においてもスパン長の短い両端固定梁が時間の経過と共にスパン長が支点に向かって拡張するようなひずみ分布を示し、 $t = 5$ ms 時点では波頭が支点に到達して単純支持梁のひずみ分布状態に推移している状況が確認できる。この現象は、上述の上縁からの曲げひび割れの進展を裏付けているものと判断される。また、 $t = 5$ ms 以降においては、両試験体ともに荷重点部から支点部にかけて滑らかなひずみ分布性状を示していない。これは、静的荷重時と同様に、ひずみゲージ接着位置とひび割れ発生位置の兼ね合いから、ひずみゲージ接着点において局所的にひずみ値が大きくなるあるいは引張応力が解放されるためと推察される。さらに、N 試験体に関しては $t = 7.5$ ms



図ー 7 RC 梁部および PFFRC パネル下縁のひずみ分布

以降において、梁右側のひずみが急激に大きくなっていることが分かる。これは、ひずみゲージ接着位置とひび割れ発生位置が対応した箇所において、局所的にひずみが増大したためと推察される。

P 試験体に関するパネル下縁のひずみ分布に着目すると、 $t = 0.5 \sim 2.5$ ms 時点では RC 梁部下縁のひずみ分布とほぼ同様の挙動を示しており、 $t = 5 \sim 30$ ms においても概ね対応していることが分かる。一方で、 $t = 5$ ms 以降において、左側端パネルではひずみが励起していないことが分かる。これは、パネルの接合部近傍にひび割れが発生したことによって、端パネルへの曲げ応力伝播が抑制されたことによるものと推察される。また、中央部パネルと右側端パネルの接合点で大きいひずみが確認できる。これは、接合部において大きなひび割れの開口に至らずにひずみが計測可能になったことと、応力が多少なりとも端部に伝播していることによるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、普通コンクリート製 RC 梁の両側面に鋼繊維補強無孔性コンクリート (PFFRC) 製パネルを接着した試験体を対象に、PFFRC パネルの耐衝撃補強効果に関

する検討を目的として、RC 梁に関する静荷重および重錘落下衝撃荷重実験を実施した。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) 静荷重実験結果より、PFFRC パネルを RC 梁の両側面に接着することによって、主鉄筋降伏時荷重は無補強試験体と比較して 1.2 倍程度向上する。
- 2) 衝撃荷重実験結果より、PFFRC パネル接着補強を施すことによって、最大変位や残留変位を 30~35 % 程度抑制可能であり、耐衝撃性の向上効果を確認することができた。
- 3) 以上より、普通コンクリート製 RC 梁の両側面に PFFRC パネルを接着補強した場合における梁の耐衝撃性向上効果は、静的耐力向上効果に比較して大きく、耐衝撃用途実用 RC 部材への適用も十分可能であることが明らかになった。

謝辞

本研究の PFFRC パネル接着作業に関しては、(株) えがお石川浩行氏より多大なるご支援を頂いた。また、(株) 構研エンジニアリング牛渡裕二氏より、実験に関する技術的なご支援を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。なお、本研究は JSPS 科研費 JP21K04229 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450 N/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) 山越壮之助, 小室雅人, 河野克哉, 岸徳光: 繊維混入率の異なる PFC 梁の静荷重および衝撃荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp.763-768, 2021.
- 3) 岸徳光, 小室雅人, 瓦井智貴, 河野克哉: 圧縮強度及び鋼繊維混入率の異なる繊維補強無孔性コンクリート梁に関する静荷重及び重錘落下衝撃荷重実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 2, pp. 925-930, 2022.
- 4) N.Kishi, M.Komuro, T.Kawarai, K.Kono: Impact resistance of porosity-free fiber-reinforced concrete (PFFRC) beams under low-velocity impact loading, *International Journal of Protective Structures*, Vol. 13, No. 2, pp. 344-362, 2022.
- 5) R.Yanagida, T.Nakamura, K.Kono, J.Niwa: Mechanical behavior and models for porosity-free concrete reinforced with high amounts of steel fiber, *Construction and Building Materials*, Vol. 354, 129098, 2022.