

# 論文 重錘衝突を受ける主鉄筋に異形 PC 鋼棒を用いた鋼繊維混入無孔性 コンクリート梁の耐衝撃挙動

松原 涼<sup>\*1</sup>・小室 雅人<sup>\*2</sup>・岸良 竜<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文では、主鉄筋に異形 PC 鋼棒を用い、釣り合い鉄筋比を基準に鉄筋比が比較的大きい場合における鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete, PFFRC) 製 RC 梁を対象に、重錘落下衝撃荷重実験を実施した。また、比較として同程度の最大たわみを示す普通コンクリートおよび通常の鉄筋を用いた RC 梁についても同様に実験を行っている。検討の結果、1) 鉄筋比を増加させることによって、PFFRC の高強度特性と鋼繊維の架橋効果が発揮され、耐衝撃性能はより向上すること、2) PFFRC と PC 鋼棒を併用することで、梁部材の断面縮小化および軽量化が可能であること、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, 鉄筋比, PC 鋼棒

## 1. はじめに

近年、我が国では、暴風雨などの異常気象に伴う土石流や落石、竜巻飛来物による構造物への被害など、様々な自然災害が多発しており、年々甚大化する傾向にある。それらの事象に適切に対応するため、耐衝撃用途社会基盤施設の耐衝撃性向上が重要となっている。耐衝撃性向上法には、通常緩衝材を設置する方法の他に構造物自体の耐衝撃性を向上させる手法がある。特に、後者の場合における鉄筋コンクリート部材について考えると、耐衝撃性を向上させるためには部材断面の大型化や補強筋比を増加させることが必要となる。

このような状況下で、近年超高強度コンクリートに関する研究が進み、400 N/mm<sup>2</sup> 以上の圧縮強度を発現可能とする無孔性コンクリート (Porosity Free Concrete, PFC) が開発されており<sup>1)</sup>、部材断面の小型化や長スパン化と共に耐衝撃性向上効果も期待される。しかしながら、この種のコンクリートを用いた場合における部材の耐衝撃性向上効果に関しては、未だ明確な知見が示されるには至っていない。

このような観点から、著者らの研究グループでは、PFC を用いた RC 部材の耐衝撃性に関する基本的な性質を確認

するために種々の実験的検討を行っている。既往の研究<sup>2)~6)</sup>では、PFC に鋼繊維を混入(補強)させた鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete, PFFRC) 製 RC 梁を対象に、圧縮強度や鋼繊維混入率の水準を変化させた重錘落下衝撃荷重実験を実施し、耐衝撃性に関する基礎データの収集を行ってきた。なお、鉄筋に関しては、PFC の高強度特性を活用するために、異形 PC 鋼棒 (以後、PC 鋼棒) を用いている。その結果、圧縮強度や鋼繊維混入率を増加させることで最大変位や残留変位を低減させ、耐衝撃性が向上することを明らかにしている。一方で、入力エネルギーが大きい場合には、PC 鋼棒が破断する現象も確認されている<sup>4)</sup>。これは、鉄筋比が釣り合い鉄筋比に比べて 1/10 以下と小さいことが理由の一つと考えられる。また、PC 鋼棒の破断により、PFFRC の耐衝撃性能が最大限発揮されずに終局に至っている可能性も考えられる。従って、PC 鋼棒の破断を防止しかつ耐衝撃性を確保するためには、鉄筋比が釣り合い鉄筋比を基準にして比較的大きい場合に対する検討が必要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、釣り合い鉄筋比を基準に鉄筋比が既往の研究<sup>4)</sup>よりも大きい場合の PFFRC

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 <sup>3</sup>  |
| 細骨材 | 珪砂             | S  | 最大寸法: 0.3 mm, 密度: 2.61 g/cm <sup>3</sup>   |
| 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 <sup>3</sup><br>引張強度: 2,800 N/mm <sup>2</sup> , 引張弾性率: 200 kN/mm <sup>2</sup> |
| 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 土木工学ユニット 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 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 土木工学ユニット 特任教授 工博 (正会員)

表-2 試験体一覧

| 試験体名    | PC 鋼棒<br>本数<br>(本) | 鉄筋比<br>$p$ | 釣合<br>鉄筋比<br>$p_b$ | 鋼繊維<br>混入率<br>(%) | 設定重錘<br>落下高さ<br>$H$ (m) | 設定重錘<br>衝突速度<br>$V$ (m/s) | 実測重錘<br>衝突速度<br>$V'$ (m/s) | 実測入力<br>エネルギー<br>$E_i$ (kJ) | コンクリート               |                     |                       | PC 鋼棒<br>降伏強度<br>$f_y$ (MPa) |
|---------|--------------------|------------|--------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|
|         |                    |            |                    |                   |                         |                           |                            |                             | 圧縮強度<br>$f'_c$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_c$ (GPa) | 割裂引張強度<br>$f_t$ (MPa) |                              |
| N-H1    | 2<br>(鉄筋)          | 0.024      | 0.053              | -                 | 1.0                     | 4.43                      | 4.44                       | 2.96                        | 30                   | 28.9                | 2.2*                  | 393<br>(鉄筋)                  |
| N-H2    |                    |            |                    |                   | 2.0                     | 6.26                      | 6.10                       | 5.58                        |                      |                     |                       |                              |
| P-U1-H1 | 1                  | 0.011      | 0.054              | 3.5               | 1.0                     | 4.43                      | 4.46                       | 2.98                        | 318                  | 61.4                | 9.9                   | 1392                         |
| P-U1-H2 |                    |            |                    |                   | 2.0                     | 6.26                      | 6.29                       | 5.93                        |                      |                     |                       |                              |
| P-U2-H1 | 2                  | 0.022      | 0.054              | 3.5               | 1.0                     | 4.43                      | 4.42                       | 2.93                        | 318                  | 61.4                | 9.9                   | 1392                         |
| P-U2-H2 |                    |            |                    |                   | 2.0                     | 6.26                      | 6.29                       | 5.93                        |                      |                     |                       |                              |
| P-U3-H1 | 3                  | 0.033      | 0.054              | 3.5               | 1.0                     | 4.43                      | 4.50                       | 3.04                        | 318                  | 61.4                | 9.9                   | 1392                         |
| P-U3-H2 |                    |            |                    |                   | 2.0                     | 6.26                      | 6.24                       | 5.84                        |                      |                     |                       |                              |

\*:コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>を参考に圧縮強度より算出

梁を対象に、重錘落下衝撃荷重実験を実施した。なお、PFRC 梁の形状寸法（梁幅 × 梁高 × スパン長）は 120 × 120 × 1,400 mm であり、断面形状が既往の研究<sup>4)</sup>の場合（形状寸法が、150 × 200 × 1,800 mm）よりも小さい。また、補強筋には径が 12.6 mm の PC 鋼棒を用い、その本数を 1, 2, 3 本として、鉄筋比を釣り合い鉄筋比に対して 0.2, 0.4, 0.6 程度に変化させた場合について検討を行った。

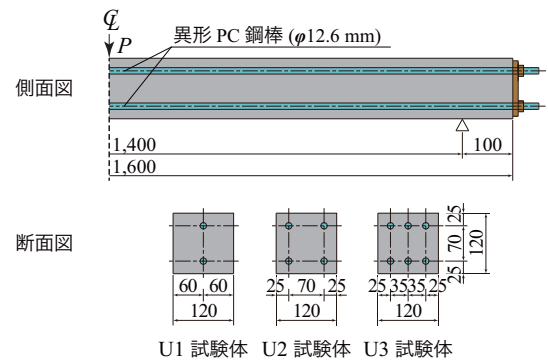
さらに、比較用の RC 梁として、既往の研究<sup>4)</sup>と等しい断面形状を有し、かつ補強筋として普通鉄筋の D19 を上下端に 2 本配置した場合についても同様に実験を実施した。なお、この RC 梁は、PVA 短繊維混入 RC 梁に関する数値解析手法<sup>7)</sup>を参考にして実施した事前の数値解析結果より、PFRC を用い主鉄筋として PC 鋼棒を 2 本配筋した場合における梁と最大変位が類似の値を示すことを確認している。

## 2. 実験概要

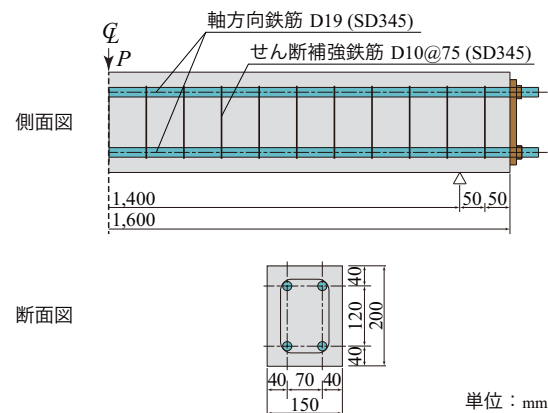
### 2.1 PFRC の概要

表-1 には、PFRC 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ュ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)<sup>1)</sup>を用いた。また、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。短繊維には引張強度が 2,800 MPa の高強度鋼繊維 (F) を用い、外割の体積比 3.5 % を混入した。なお、水結合材比 (W/B) は 14 % である。

PFRC は、オムニミキサ（容量 30 ℓ）に F を除く材料を投入した後に 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 40°C の一次蒸気養生を 12 時間行った。脱型後、セメントの水和反応を促進するために、PFRC 内部に水を供給する煮沸吸水処理を 30 分を行った。その後、蒸気養生（最高温度 90 °C、保持時間 48 h、1 気圧）を行い、さらに加熱養生（最高温度 180 °C、保持時間 48 h、1



(a) P 試験体



(b) N 試験体

図-1 試験体の形状寸法および配筋

気圧) を実施した。なお、ひずみ硬化や軟化特性などの詳細については、文献 1), 8) を参照されたい。

### 2.2 試験体概要

表-2 には、本実験で用いた試験体一覧を示している。本研究では、PFRC の鋼繊維混入率を最大混入率である 3.5% と固定した。主鉄筋には、前述の通り径が 12.6 mm の PC 鋼棒を 1, 2, 3 本に変化させることとした。鉄筋比  $p$  は、それぞれ  $p = 0.011, 0.022, 0.033$  となる。また、基準試験体は、前述の通り普通コンクリートを用い既往の研究<sup>4)</sup>と等しい断面形状を有する場合において、最大応答変位が PFRC を用い PC 鋼棒を 2 本配置する場合と類似の

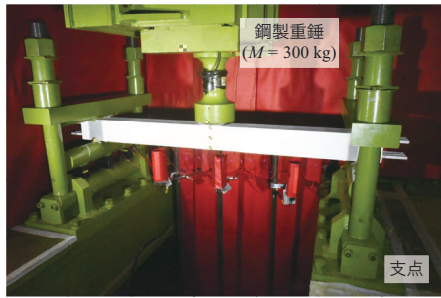


写真-1 実験状況

値を示すように上下端にD19を2本配筋する通常RC梁とした。設定重錘落下高さ(以後、単に落下高さ)は、いずれの試験体も $H=1,2$  mの2水準に変化させている。

試験体名に関して、第一項目はコンクリートの種類(N:普通コンクリート, P:鋼繊維混入率3.5%のPFRC)を表している。P試験体の場合には、第二項目にPC鋼棒の本数( $U_n:n$ は鋼棒の本数)を示している。また、N試験体の場合は第二項目, P試験体の場合は第三項目として、重錘の設定落下高さ( $H_n:n$ は落下高さ(m))を表している。

なお、表には、実験から得られた重錘衝突速度や入力エネルギー、材料試験より得られたコンクリートの圧縮強度 $f'_c$ や割裂引張強度 $f_t$ 、ミルシート(鋼材検査証明書)から得られたPC鋼棒の降伏強度 $f_y$ なども併せて示している。

図-1には、本研究で対象としたP試験体と、基準試験体としてのN試験体の形状寸法を示している。P試験体の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は $120 \times 120 \times 1,400$  mmとし、相対的に鉄筋比を大きくするために既往の研究<sup>4)</sup>よりも小さい断面とした。また、N試験体の場合には、既往の研究<sup>4)</sup>と等しい断面( $150 \times 200 \times 1,400$  mm)とした。

P試験体の軸方向鉄筋には、PFCの高強度特性を最大限発揮するため、PC鋼棒( $\phi 12.6$  mm)を使用し、上下端にそれぞれ1, 2, 3本配置した。また、N試験体に関しては、軸方向鉄筋としてD19を上下端に2本配置し、せん断補強筋にはD10を75 mm間隔に配筋している。

### 2.3 実験方法

写真-1には、衝撃荷重実験の状況を示している。実験は、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、所定の落下高さ $H$ からリニアウェイレールを介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。試験体の支点部上縁は、重錘衝突による跳ね上がりを防止するために鋼製矩形梁を用いて締め付けている。締め付け力は片側支点で15 kN程度とした。なお、実験時には試験体を締め付けた状態でロードセルの零バランスを取っていることにより、30 kN程度までの跳ね上がりによる合反力が計測可能である。また、支点下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、1) 重錘衝撃力(以後、単に衝撃力) $P$ 、2) 合支点反力(以後、単に支点反力) $R$ 、3) 載荷点変位(以後、単に変位) $\delta$ である。なお、衝撃力と支点反力波形は起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを、変位波形はレーザ式非接触型変位計を用いて測定した。さらに、変位計のバックアップとして2,000 fpsの高速カメラ撮影も行っている。実験終了後にはひび割れ分布の記録も行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 各種時刻歴応答波形

図-2には、本研究で実施した計8体の試験体に関する各種時刻歴応答波形を落下高さ毎に比較して示している。なお、時間軸に関しては、重錘が衝突した時点を零としている。また、(a)図の衝撃力波形 $P$ に関しては、衝突初期における拡大図も合わせて示した。表-3には、全ケースに関する最大変位および残留変位を一覧にして示している。

#### (1) 重錘衝撃力波形

まず、図-2(a)図の衝撃力波形 $P$ に着目すると、いずれの試験体も、落下高さ $H$ にかかわらず最大応答値や継続時間を除き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1 ms程度の振幅の大きい高周波成分を含んだ第1波が励起し、その後、P-U1-H2試験体を除き継続時間が20~27.5 ms程度の正弦半波状の第2波が後続する波形性状を示している。なお、P-U1-H2試験体における第2波目の継続時間は50 ms以上の値を示している。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状況が見て取れる。

最大衝撃力に着目すると、桁高が高いN試験体の場合がP試験体の場合よりも大きいことが分かる。また、P試験体間では、P-U3-H1試験体の場合を除いて、落下高さにかかわらず鉄筋比に対応して最大衝撃力も増加する傾向を示している。各試験体の波動継続時間に着目すると、落下高さ $H=1$  mの場合には、P-U1試験体が最も長く、NおよびP-U3試験体の継続時間はほぼ同程度である。また、落下高さ $H=2$  mの場合においても、この傾向は同様であることが見て取れる。これより、最大衝撃力は梁の初期曲げ剛性の大きさに対応して増加傾向を示し、波動継続時間は減少傾向にあることが推察される。従って、前述のP-U3-H1試験体の最大衝撃力が他試験体に比して小さくなる要因は実験誤差等によるものと推察されるが、現在の処不明である。

なお、落下高さ $H=2$  mのP-U1試験体の第2波目に関しては、高周波成分の振幅が他の試験体と比較して大きく示されている様子がうかがえる。これは、後述のひび割

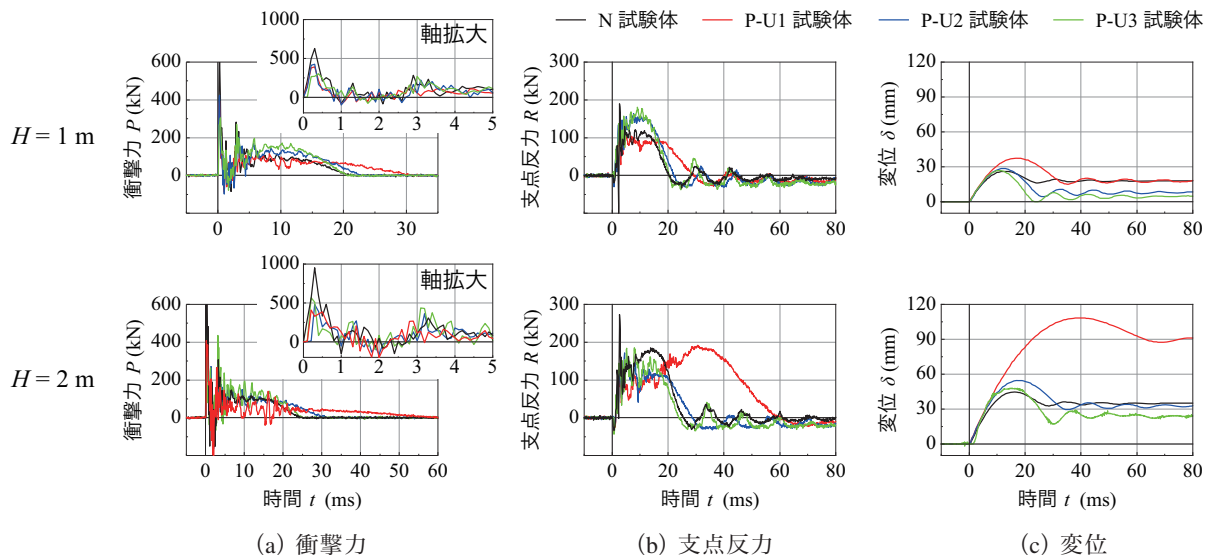


図-2 各種時刻歴応答波形の比較

表-3 最大変位および残留変位の一覧

| 落下高さ<br>$H$ (m) | 試験<br>体名 | 最大変位<br>$\delta_{max}$ (mm) | 残留変位<br>$\delta_{res}$ (mm) |
|-----------------|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1               | N        | 26.0 (1.0)                  | 17.8 (1.0)                  |
|                 | P-U1     | 37.3 (1.4)                  | 17.6 (1.0)                  |
|                 | P-U2     | 28.4 (1.1)                  | 7.7 (0.4)                   |
|                 | P-U3     | 26.7 (1.0)                  | 4.4 (0.2)                   |
| 2               | N        | 44.5 (1.0)                  | 35.1 (1.0)                  |
|                 | P-U1     | 108.3 (2.4)                 | 88.9 (2.5)                  |
|                 | P-U2     | 54.6 (1.2)                  | 32.8 (0.9)                  |
|                 | P-U3     | 47.8 (1.1)                  | 24.0 (0.7)                  |

\*()はN試験体を基準にした倍率

れ分布からも明らかなように、他の試験体と比較してひび割れが大きく開口し著しく損傷したためと推察される。

### (2) 支点反力波形

次に、図-2 (b) 図の支点反力波形  $R$  に着目すると、いずれのケースにおいても、衝突初期に負反力を示しその後最大値を示す高周波成分を伴った正弦半波状の主波動が励起する性状を示していることが分かる。また、衝撃荷重除荷後には、周期が12~14ms程度の減衰自由振動波形が励起していることが見て取れる。衝突初期の負反力に関しては、前述の通り衝撃力の作用によって試験体支点部が上方に跳ね上がる傾向を示したことによるものと推察される。

最大支点反力に着目すると、落下高さ  $H=1$  m のP試験体の場合には、鉄筋比の増加に対応して大きい値を示す傾向にある一方で、主波動継続時間は逆に短くなる傾向が確認できる。これより、前述の衝撃力波形と同様に、鉄筋比に対応して剛性が大きくなる場合には、主波動の継続時間が短くなることを示唆している。

衝撃力波形柵部における最大支点反力を詳細に見ると、P-U2試験体とP-U3試験体の差は12.5kN程度と小さいが、P-U1試験体の場合にはP-U2試験体の場合に比して

65.4kN程度小さく90kN程度の値を示している。また、N試験体の場合には、衝撃力波形柵部の平均支点反力が100kN程度でP-U1試験体よりも10kN程度大きい値を示し、主波動継続時間がP-U3試験体と同様となっていることから、その挙動性状は前述の衝撃力波形と対応していることが分かる。これは、鉄筋比の増加に対応して初期曲げ剛性も増加したことによるものと推察される。

落下高さ  $H=2$  m の場合における衝撃力波形柵部の最大支点反力に着目すると、P試験体の場合には、前述のように損傷が大きいP-U1試験体を除き、P-U3試験体の場合がP-U2試験体の場合より若干大きい値を示していることが分かる。一方、P-U1試験体の場合には、载荷初期からの経過時間（以後、単に経過時間） $t=30$  ms近傍で最大支点反力を示し、明らかにP-U2/U3試験体の挙動と異なっていることが分かる。これは、後述の変位波形からも明らかなように試験体が大きく変形したことによって、その支点近傍部が跳ね上がり防止用鋼製矩形梁に過度に締め付けられるような状態に至ったことによるものと推察される。また、N試験体の場合における衝撃力波形柵部の最大支点反力は、P-U3試験体の場合よりも大きい値を示していることが分かる。これは、梁が角折れによって、P-U1試験体の場合と同様に跳ね上がり防止用鋼製矩形梁によって過度に締め付けられたことによるものと推察される。なお、落下高さ  $H=1$  m の場合におけるN試験体の最大支点反力は、P-U2/U3試験体の場合より小さい値を示していることから、このような結果は、試験体の多少の製作誤差や実験誤差が含まれたことによるものと推察される。

### (3) 载荷点変位波形

図-2 (c) 図の変位波形  $\delta$  に着目すると、各試験体は落下高さ  $H$  にかかわらず類似の波形性状を示しているこ

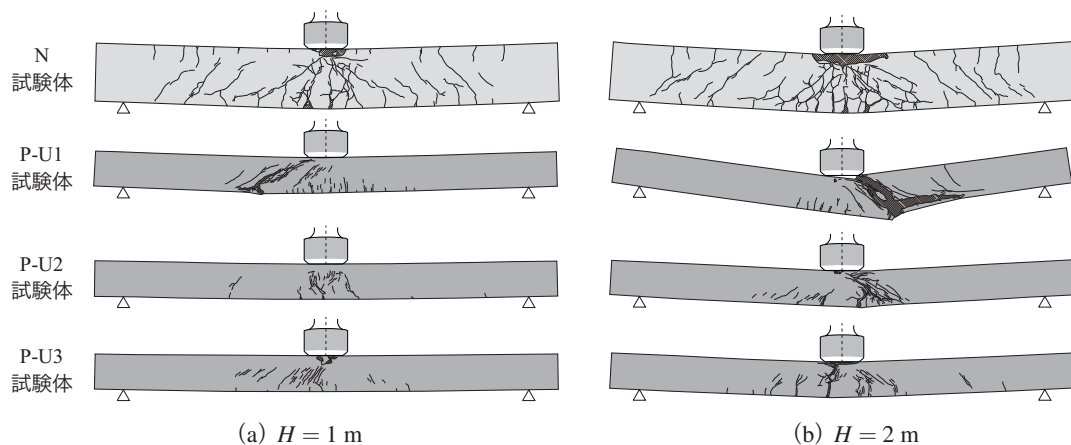


図-3 衝撃荷重実験終了後のひび割れ状況

と分かる。すなわち、荷重時における正弦半波状の波形を示し、除荷後に変位が残留して減衰自由振動状態に至っている。

落下高さ  $H$  毎に考察すると、 $H = 1\text{ m}$  の場合において、P-U2/U3 試験体と N 試験体の最大変位は類似の値を示していることが分かる。除荷後の残留変位は、P-U3 試験体の場合が P-U2 試験体の場合よりも若干小さく、N 試験体の場合が最も大きい。その値は、表-3 より、P-U2/U3 試験体の 2 倍程度以上の値を示していることが分かる。これは、P 試験体の場合には PFFRC の高強度と架橋効果で弾性領域が広い PC 鋼棒の効果によって、復元力が大きくなったことによるものと推察される。また、減衰自由振動の周期は、残留変位の大きさに対応して延びていることも確認できる。一方、P-U1 試験体の場合には、前述の 3 試験体よりも最大変位が大きいことが分かる。しかしながら、残留変位は N 試験体と同程度であり、大きく復元している。このような現象も、前述のように PFFRC の架橋効果と PC 鋼棒の高強度・高弾性域の効果であるものと推察される。

落下高さ  $H = 2\text{ m}$  の場合において、最大変位に関しては、N 試験体の場合が最も小さいものの P-U3 試験体と類似している。P-U2 試験体の場合には、これら 2 試験体よりも若干大きい。これに対して、残留変位は P-U3 試験体の場合が最も小さく、P-U2 試験体の場合が N 試験体の場合より若干小さい。これは、落下高さ  $H = 1\text{ m}$  の場合と同様に、PFFRC の架橋効果と PC 鋼棒の高強度・高弾性域の効果であるものと推察される。これより、P-U2/U3 試験体の場合には N 試験体と概ね同程度かそれ以上の耐衝撃性能を有しており、PFFRC と PC 鋼棒を併用することによって、PFFRC の高強度特性を効率よく発揮するとともに、梁部材の断面縮小化・軽量化が可能であることが確認される。

一方、P-U1 試験体の場合には、最大変位が 108 mm に達しており、また残留変位も他 3 試験体の場合に比して

2.5 倍程度の 90 mm 程度に達している。いま、梁の終局を残留変位がスパン長の 4% を超える状態に至った場合と仮定すると、P-U1 試験体は終局に至っていることが分かる。

### 3.2 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布状況

図-3 には、衝撃荷重実験終了後における各試験体側面のひび割れ分布状況を落下高さ  $H$  毎に比較して示している。

#### (1) $H = 1\text{ m}$ の場合

落下高さ  $H = 1\text{ m}$  の場合において、N 試験体に着目すると、ひび割れは試験体全体に生じており、上縁からも進展していることが見て取れる。これは、衝撃荷重初期に曲げ波が波頭部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。また、荷重点近傍部には斜めひび割れも発生していることが分かる。次に、P 試験体に着目すると、いずれの試験体においても上縁からの曲げひび割れや N 試験体の場合に発生したような荷重点から左右に進展する明確な斜めひび割れはほとんど確認されない。これは、上縁からの曲げひび割れに関しては、P 試験体の引張強度が N 試験体のそれと比較して大きいことによるものと推察される。また、荷重点から左右に進展する斜めひび割れに関しては、鋼繊維の架橋効果によって N 試験体におけるせん断補強筋の効果よりも斜めひび割れの開口が抑制されたことによるものと推察される。これより、鋼繊維を混入することによるせん断補強効果は、衝撃荷重時においても効果的に作用し、せん断補強筋以上であることが推察された。

P-U1 試験体に着目すると、荷重点近傍下縁に長さの短い曲げひび割れが発生しており、かつ左側荷重点近傍に斜めひび割れが発生し開口する傾向を示している。これは、曲げ剛性が小さい状況下において、鋼繊維の分散の偏りによって局所的に弱点が生じたことによるものと推察され、N 試験体に生じている荷重点から左右に進展する斜めひび割れとは性状が異なるものと判断される。しかしながら、PC 鋼棒は破断に至っていないことから、前

述のように大きな復元力特性を示したものと推察される。

一方、P-U2/U3 試験体の場合には、配置する PC 鋼棒の本数が増加して曲げ剛性も増加したことによって、P-U1 試験体のような一カ所に集中するようなひび割れは発生せず、曲げひび割れや曲げせん断ひび割れが梁中央部に分散して発生していることが分かる。

#### (2) $H = 2 \text{ m}$ の場合

落下高さ  $H = 2 \text{ m}$  の場合において、N 試験体の場合には、入力エネルギーが  $H = 1 \text{ m}$  の場合よりも増加したことによって、上下縁から伸びる曲げひび割れもより進展していることが分かる。また、載荷点部における斜めひび割れの数も増加しており、載荷点近傍下縁のかぶりは曲げひび割れと斜めひび割れが連結して剥落の傾向を示している。さらに、載荷点部の圧壊領域もより広く示されており、角折れの傾向を示していることが分かる。

一方、P-U1 試験体の場合には、 $H = 1 \text{ m}$  の場合と同様の傾向を示すものの、入力エネルギーが増加したことによって一カ所に集中した斜めひび割れは大きく開口し、かつ下縁かぶりも支点に向かって剥落の傾向を示していることが分かる。これより、試験体は終局の状態であることが確認できる。なお、このような状態においても、PC 鋼棒は未だ破断に至っていないことを確認している。

また、P-U2/U3 試験体に着目すると、P-U2 試験体の場合には P-U1-H1 試験体と類似のひび割れ分布性状を示していることが分かる。また、P-U3 試験体の場合には、載荷点近傍の 1 本の曲げひび割れが開口する傾向を示していることが分かる。P-U2 試験体の場合に一カ所の斜めひび割れ、P-U3 試験体の場合には曲げ剛性が大きいにもかかわらず一カ所の曲げひび割れが開口していることから、大きく開口するひび割れは、鋼繊維の不均一な分散による局所的な弱点化が要因であることが分かる。しかしながら、両試験体共にその開口は小さく、PFRC における鋼繊維の架橋効果や PC 鋼棒の高強度・高弾性域の効果でたわみは復元していることが見て取れる。

#### 4. まとめ

本研究では、耐衝撃性に優れた構造部材の開発を最終目的として、PFRC の耐衝撃性に関する基本的な特性の検討を目的として、釣り合い鉄筋比を基準に既往の研究よりも大きい鉄筋比を有する梁を対象に重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。また、事前解析の下に、断面形状が大きく普通鉄筋を用いた PFRC 梁と同程度の最大変位を示すような基準試験体 (N 試験体) に関する実験も実施した。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) PFRC と主鉄筋に PC 鋼棒を用いる場合 (P 梁) には、PFRC の高強度特性と架橋効果及び PC 鋼棒

の高強度・高弾性域の効果が発揮され、鉄筋比を増加させることによって耐衝撃性能はより向上する。

- 2) P 梁の場合には、PFRC における鋼繊維の架橋効果及び PC 鋼棒の高強度・高弾性域の効果によって、N 梁の場合に比較して高い復元力特性を示す。
- 3) 鉄筋比を大きくすることによって、PC 鋼棒の破断は抑制される。
- 4) 断面の小さい P 梁の場合においても、衝撃荷重載荷時における最大変位や載荷後における残留変位等の耐衝撃性能は、断面の大きい N 梁と同程度以上に発揮可能であることが確認された。
- 5) これより、PFRC と PC 鋼棒を併用することで、PFRC の高強度特性および鋼繊維混入に伴う架橋効果が効率的に発揮され、耐衝撃性を必要とする梁部材の断面小型化および軽量化、あるいは普通 RC 梁と断面形状が同一の場合にはスパン長の長大化が可能であるものと判断される。

#### 参考文献

- 1) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450 N/mm<sup>2</sup> 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) Kurihashi, Y., Kono, K., and Komuro, M.: Impact-resistant behavior of steel-fiber-reinforced porosity-free concrete beam, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(4), pp. 146-156, 2020.
- 3) 木内洋介, 小室雅人, 河野克哉, 岸徳光: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 631-636, 2020.
- 4) 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載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 427-432, 2021.
- 5) Kishi N, Komuro M, Kono K, and Kawarai T: Impact resistance of porosity-free fiber-reinforced concrete (PFRC) beams under low-velocity impact loading, *International Journal of Protective Structures*, 13(2), pp. 344-362, 2022.
- 6) 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載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 2, pp. 925-930, 2022.
- 7) Kishi N, Mikami H, Kurihashi Y, and Adachi Y: Numerical simulation of LW-AG RC beams mixed with PVA short-fiber under impact loading, *Proceedings of PROTECT2009*, Hayama, Japan, 2009.
- 8) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 圧縮強度 400 N/mm<sup>2</sup> 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.
- 9) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.