

# 鋼繊維補強無孔性コンクリートパネルを側面に接着した RC 梁の 静荷重および衝撃荷重載荷実験

Static and impact loading tests of RC beams strengthened with Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete Panels

室蘭工業大学大学院 ○学生員 松原 涼 (Ryo Matsubara)  
室蘭工業大学大学院 正 員 瓦井智貴 (Tomoki Kawarai)  
太平洋セメント(株) 正 員 岸良 竜 (Ryo Kishira)  
太平洋セメント(株) 正 員 小島克仁 (Katsuhito Kojima)

室蘭工業大学大学院 正 員 小室雅人 (Masato Komuro)  
太平洋セメント(株) 正 員 河野克哉 (Katsuya Kono)  
太平洋セメント(株) 正 員 溝口愛実 (Manami Mizoguchi)  
室蘭工業大学大学院 名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

## 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、それらの大型化に対する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  $400 \text{ N/mm}^2$  以上を有する無孔性コンクリート (Porosity Free Concrete, PFC) が開発され<sup>1)</sup>、一部実用化されつつある。

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<sup>例えば、2)</sup>。既往の研究では、PFC に鋼繊維を混入した鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete, PFFRC) 製の梁を対象に、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載荷実験を実施した。その結果、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 パネルを接着した場合における PFFRC パネルの耐衝撃補強効果に関する検討を行うことを目的に、静荷重および重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。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）を加えて最密粒度とした PFC 専用プレミックス結合材 (B)<sup>1)</sup> 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  $2,800 \text{ MPa}$  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  $15\%$  としている。

PFFRC は、オムニミキサ (容量  $30 \ell$ ) 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、型枠に打設し封緘養生 ( $20^\circ\text{C}$ ) 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 PFFRC を密閉容器内に配置し、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:  $0.5 \text{ h}$ ) を行った。その後、蒸気養生 (最高温度  $90^\circ\text{C}$ 、保持時間  $48 \text{ h}$ 、 $1 \text{ 気圧}$ ) を行い、さらに加熱養生 (最高温度  $180^\circ\text{C}$ 、保持時間  $48 \text{ h}$ 、 $1 \text{ 気圧}$ ) を実施した。その他、詳細については文献 1), 3) 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 (P 試験体) の形状寸法を示している。RC 梁の形状寸法 (幅 × 高さ × スパン長) は  $200 \times 250 \times 3,000 \text{ mm}$  であり、P 試験体の場合には、その両側面に  $250 \times 20 \text{ mm}$  (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

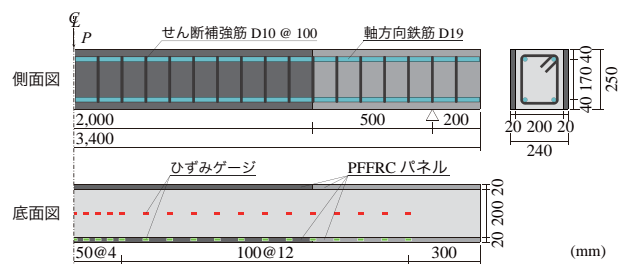


図-1 P 試験体の形状寸法および配筋

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: $2.97 \text{ g/cm}^3$
細骨材	珪砂	S	最大寸法: $0.3 \text{ mm}$ , 密度: $2.61 \text{ g/cm}^3$
短繊維	高強度鋼繊維	F	直径: $0.2 \text{ mm}$ , 長さ: $15 \text{ mm}$ , 密度: $7.84 \text{ g/cm}^3$ 引張強度: $2,800 \text{ N/mm}^2$ , 引張弾性率: $200 \text{ kN/mm}^2$
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

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)	設定重錘 衝突速度 $V$ (m/s)	実測重錘 衝突速度 $V'$ (m/s)	実測入力 エネルギー $E$ (kJ)	コンクリート 圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	主鉄筋 降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断補強筋 降伏強度 $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )
N-S	無	-	-	-	-	-	28.9	397	388
N-H2.5			2.5	7.00	6.83	7.00			
P-S	有	3.5	-	-	-	-	30.0	397	388
P-H2.5			2.5	7.00	6.99	7.33			

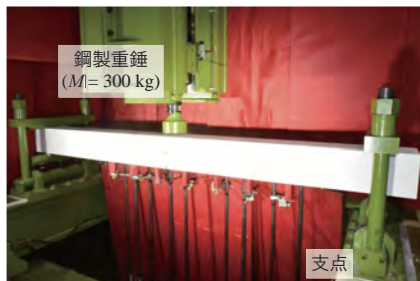


写真-1 衝撃荷重実験の状況

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枚ずつの、梁片面当たり計3枚を両側面に接着した。RC梁とパネルの接着材にはエポキシ樹脂を用いており、多少の不陸を考慮してボンドの厚さを3 mm程度とし、接着後余分な樹脂を取り除いて整形した。なお、接着部の養生期間は、片面ごとに一週間ずつ設けた。

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、パネル補強の有無や荷重荷重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、第二項目は荷重方法(S:静荷重荷重、H2.5:落下高さを2.5 mとする重錘落下衝撃荷重荷重)を表している。なお、本研究で用いたPFFRCの圧縮強度は $f'_{pffrc} = 300$  MPa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 $f_y$ 、 $f_{sy}$ も併せて示している。

### 2.3 実験方法

静荷重荷重実験は、梁軸方向に100 mmの荷重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。

写真-1には、衝撃荷重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、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) 荷重荷重 $P_s$ あるいは重錘衝撃力 $P_i$ 、2) 合支反力 $R$ (以後、単に支反力)、3) 荷重点変位 $\delta$ (以後、単に変位)、4) RC梁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、変位はレーザー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、実験時に

はひび割れ分布の他、変位計のバックアップとして、2,000 fpsの高速度カメラを用いた撮影も行っている。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 静荷重荷重実験結果

図-2には、N/P-S試験体に関する静荷重荷重実験結果の荷重-変位関係を比較して示している。なお、実験は残留変位がスパン長の2%程度( $\delta_{s,res} \geq 60$  mm)に達するように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、58 kNにおいて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、鉄筋降伏後は荷重が徐々に増大する傾向を示している。これは、主鉄筋の塑性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、ひび割れ発生後の荷重がN試験体と比較して大きく示されており、主鉄筋降伏荷重値は72 kNである。これより、降伏荷重はN試験体の場合に比して24%程度向上していることが分かる。これは、PFFRCの高強度の状態下における鋼繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと推察される。鉄筋降伏後を見ると、N試験体とは異なり、荷重点変位が増大する一方で荷重値は一定を示しており、完全弾塑性的な性状を示していることが分かる。これは、混入鋼繊維の均一化の不完全性によってパネル内の一カ所にひび割れが集中し、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。

図-3には、静荷重荷重実験終了後におけるN/P-S試験体に関する側面および上面のひび割れ分布状況を示している。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り、上面図に関してはひび割れが発生した荷重点近傍部のみを示した。

N試験体の場合に注目すると、スパン中央部に集中して曲げひび割れが発生し、かつ荷重点直下のひび割れは梁の上部まで到達しており、梁は角折れの状態に至っている。なお、荷重点から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、荷重点周辺において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、梁中央に接着した2 mのパネルにおいて、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とともに、荷重点直下において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。また、

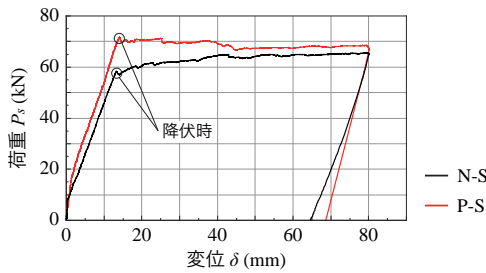


図-2 荷重-変位関係

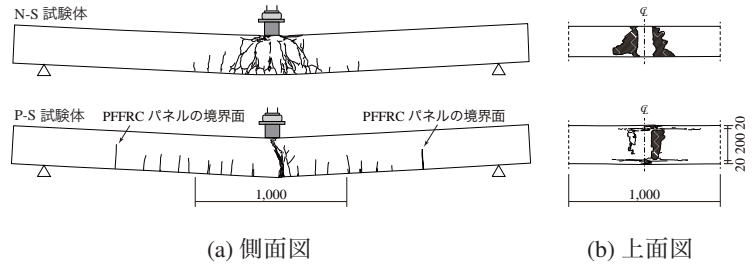


図-3 静荷重載荷実験後のひび割れ分布

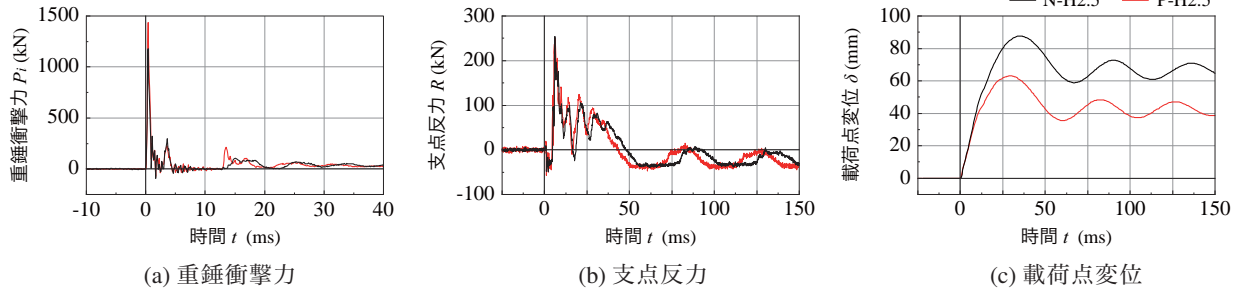


図-4 衝撃荷重載荷時における各時刻歴応答波形

左右のパネルとの接着面において亀裂が生じ、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 試験体と同様に荷重点周辺に圧縮破壊が確認できる一方で、梁とパネルの接着面にひび割れ(剥離)が生じている。これは、荷重点部において梁軸方向に圧縮力が作用するとともに、梁軸直角方向には引張力が作用するためと推察される。

3.2 衝撃荷重載荷実験結果

図-4には、N/P-H2.5 試験体における重錘衝撃力  $P_1$ 、支点反力  $R$  および荷重点変位  $\delta$  に関する各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関わらず、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波が後続する分布性状を示している。なお、詳細を見ると、最大衝撃力はN 試験体の場合よりもP 試験体の方が約250 kN 大きい値となっている。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、重錘衝突初期に励起する負の反力は、スパン中央部に衝撃荷重が作用することにより試験体端部が浮き上がる傾向を示している。主波動の継続時間に着目すると、N/P 試験体に関して、それぞれ49, 44 ms 程度であり、P 試験体の方が短く示されている。これはパネル接着補強によって梁の剛性が增大したことによるものと推察される。

(c) 図より、荷重点変位波形に着目すると、両者ともに

重錘衝突後、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振動周期に着目すると、P 試験体の場合がN 試験体の場合よりも周期が短く示されており、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 試験体に関してそれぞれ、88, 63 mm であり、残留変位に関してはそれぞれ、66, 43 mm である。すなわち、パネル接着補強によって40% 程度耐衝撃性が向上することが明らかとなった。

図-5には、N/P-H2.5 試験体に関する衝撃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、静荷重載荷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、荷重点部近傍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、衝撃荷重載荷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ためと推察される。破壊モード的には、衝撃荷重載荷時には、静荷重載荷時における曲げ破壊型から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、荷重点部近傍に関しては圧壊現象が卓越し、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。これは、衝撃荷重下においてもPFRC の高強度特性と鋼繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと推察される。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。この現象は、N 試験体の場合と同様であ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の傾向を示しており、かつ支点部近傍

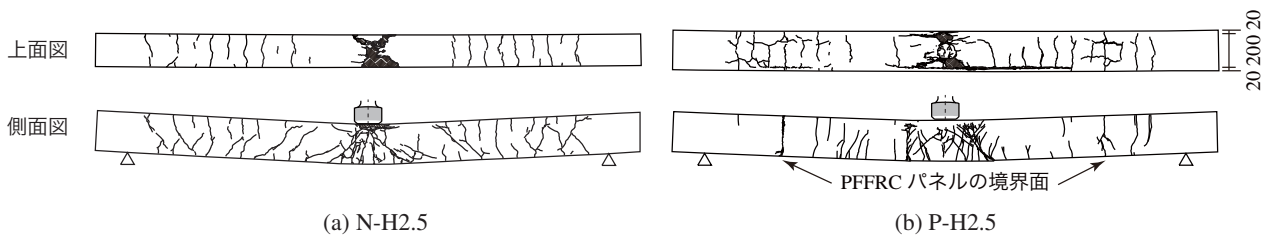


図-5 衝撃荷重実験後のひび割れ分布

梁上縁にも多数のひび割れが確認できる。これは、RC 梁自体は補強なしの場合と類似の性状を示すものの、パネルの高強度・高靱性特性によってパネルまでは進展しないことによるものと推察される。

図-6には、N/P-H2.5 試験体における RC 梁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、RC 梁部下縁のひずみ分布に着目すると、 $0.5 \sim 2.5$  ms 時に、いずれの試験体につ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進展するようなひずみ分布を示し、 $5$  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ずみの進展を裏付けているものと判断される。

また、 $5, 30$  ms 経過時点では、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とが見て取れる。これは、ひずみゲージ貼付位置や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ひずみが解放されるためと推察される。

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、衝突初期から  $t = 30$  ms にかけて、RC 梁部下縁のひずみ分布と概ね対応していることが分かる。ただし、 $t = 5$  ms 以降において、左側パネル領域でひずみがほぼ励起していない。これは、パネルの高強度・高靱性特性によってひび割れが発生しないこと等によるものと推察される。

#### 4. まとめ

本研究では、鋼繊維補強無孔性コンクリート (PFRC) パネルの耐衝撃補強効果を検討することを目的に、RC 梁に関する静荷重および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、PFRC パネルを RC 梁の両側面に接着することによって、降伏荷重は 1.2 程度向上する。
- 2) 衝撃荷重実験結果より、無補強試験体と比較して、最大変位や残留変位を 40 % 程度抑制可能であり、耐衝撃性能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 PFRC パネルを接着補強した場合における梁の耐衝撃性能向上効果は、静荷重荷重時における向上効果に比較して大きく、耐衝撃用途実 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。

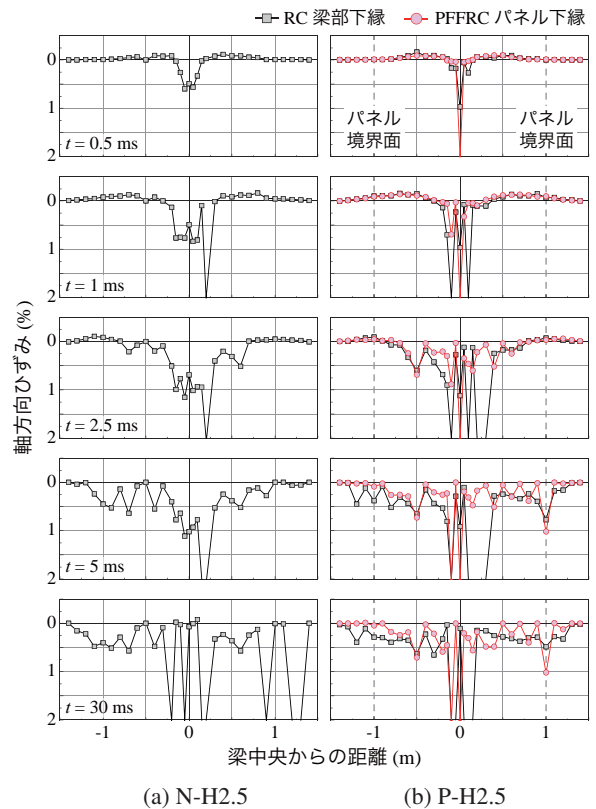


図-6 RC 梁および PPFRC パネル下縁のひずみ分布

#### 謝辞

本研究の PPFRC 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。さらに、(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/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) 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.
- 3) 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.