

鉄筋比の異なる鋼繊維補強無孔性コンクリートはりの
静荷重及び衝撃荷重載荷実験

Static and impact loading tests on Porosity-Free Fiber Reinforced Concrete beams with different reinforcement ratio

室蘭工業大学
室蘭工業大学
太平洋セメント(株)
太平洋セメント(株)
室蘭工業大学

○正員
正員
正員
正員
名誉会員

小室雅人 (Masato Komuro)
瓦井智貴 (Tomoki Kawarai)
河野克哉 (Katsuya Kono)
溝口愛美 (Manami Mizoguchi)
岸徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、我が国では、暴風雨による土石流や落石などの自然災害が多発しており、このような偶発(衝撃)作用を受ける社会基盤施設の安全性向上が重要視されている。このような偶発作用に対する安全対策の1つとして、構造材料の高強度化が挙げられる。近年では、超高強度コンクリートに関する研究が進み、圧縮強度 400 N/mm² 以上を発現する無孔性コンクリート(Porosity Free Concrete)も開発され、一部実用化されつつある^{1), 2)}。

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、前述の PFC に着目し、その耐衝撃性に関して種々の検討を行ってきた^{3), 4)}。既往の研究では、PFC に鋼繊維を混入(補強)したはり部材(以後、PFFRC, Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete)を対象に、鋼繊維の混入率を3水準に変化させた衝撃荷重載荷実験を実施し、同一入力エネルギーの場合には、鋼繊維混入率が高いほど最大変形は小さく、耐衝撃性が向上することを実験的に明らかにした⁴⁾。しかしながら、これらの結果は、主鉄筋に異形 PC 鋼棒を2本配置した場合に限定されたものであり、主鉄筋比が耐衝撃性に及ぼす影響については十分な検討がなされていない。

このような観点より、本研究では、鉄筋比の異なる PFFRC はりを対象にその耐衝撃挙動に関する基礎データの収集を目的として、静荷重ならびに重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。試験体寸法は既往の研究と同一(幅 150 mm, 高さ 200 mm, スパン長 1,800 mm)とし、主鉄筋本数を既往研究の2倍(4本)とした場合について実験を実施し、既往の実験結果⁴⁾も含めて比較・検討を行った。

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(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(石英微粉末)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)を用いた。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、体積比の外割で2%混入した。表-2には PFFRC の配合を示している。水結合材比(W/B)は15%とした。

PFFRC 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、試験体用の型枠に打設し封緘養生(20℃)を行い、材齢 48h で脱型した。脱型後、セメントの水和反応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後、試験体を水没させ内部に水の供給(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。

2.2 試験体概要

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 であり、軸方向鉄筋には異形 PC 鋼棒(φ9, JIS G 2137)を使用し、上下端に各2本あるいは4本配置した。

表-3には実験ケース一覧を示している。本研究では、鋼繊維混入率を2%と固定し、補強筋量を変化させた2種類の PFFRC はりと普通コンクリートを用いせん断補強筋を配置せずかつ鋼繊維を混入していない RC はり1種類を対象に、静荷重および衝撃荷重載荷実験を実施した。なお、衝撃荷重載荷実験は、PFFRC はりの場合には重錘落下高さを $H = 1.0, 1.5, 2.0$ m と3段階に変化させ、RC はりの場合には $H = 0.5$ m に限定して実施した。

表-2 PFFRC の配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤添加量* (kg)	
	W	B	S	F	SP	DF
15	199	1331	934	157	B × 1.05%	B × 2%

*: 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 専用プレミックス粉体	B	最密度粉体, 密度: 2.97×10^3 kg/m ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法: 0.3 mm, 密度: 2.61×10^3 kg/m 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: 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

次に (b), (c) 図の PFFRC はりに関するひび割れ分布を見

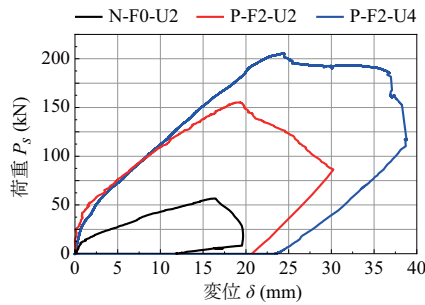


図-2 荷重-変位関係

表-4 最大荷重値および到達時変位一覧

試験体名	降伏荷重	最大荷重	最大荷重時変位
	$P_{s,y}$ (kN)	$P_{s,max}$ (kN)	d_{max} (mm)
N-F0-U2	15 (1.00)	57 (1.00)	16.5 (1.00)
P-F2-U2	40 (2.67)	155 (2.72)	19.3 (1.18)
P-F2-U4	35 (2.33)	205 (3.60)	24.5 (1.48)

() は N はりの値に対する比

ると、いずれの場合においても、はり下面から上方に向かう曲げひび割れが発生している。U2 はりの場合には、ひび割れがスパン中央の一方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。一方、U4 はりの場合には、載荷点より左側スパンのひび割れが大きく開口して終局に至っている。これは、はり内部の鋼繊維の分散やその方向性に多少なりとも偏りが生じ、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 衝撃荷重載荷実験

図-4 には、本研究で実施した全7ケースにおける重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形を示している。なお、RC はりの場合には、せん断補強筋を配筋していないことや静荷重載荷時の最大荷重も小さいことが明らかになっていることから、衝撃荷重載荷時においても低い入力エネルギーで終局に至ることが想定されたため、重錘の落下高さを $H = 0.5$ 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、PFFRC はりの場合には主鉄筋本数にかかわらず重錘落下高さごとにほぼ類似の分布性状を示していることが分かる。また、落下高さごとに比較すると、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 $H \leq 1.5$ m では 17.5 ~ 25 ms の正弦半波状の波形を示している。一方、 $H = 2$ m の場合には継続時間が短くなる傾向にあることが分かる。これは、はりが大きな損傷を受けたことによるものと考えられる。

(b) 図より、支点反力波形に着目すると、落下高さが $H = 1$ m の PFFRC はりの場合には、主鉄筋本数に関係なく両者で類似の分布を示している。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おり、減衰自由振動状態に移行していることが分かる。一方、RC はりの場合には、最大支点反力も PFFRC はりに比較して 1/2 以下の値を示し、さらに除荷後には負反力を示していない。これより、はりは著しく損傷した状態と判断され、後述のひび割れ分布(図-5a)を見る

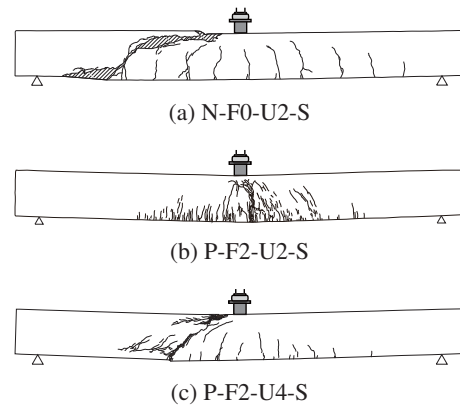
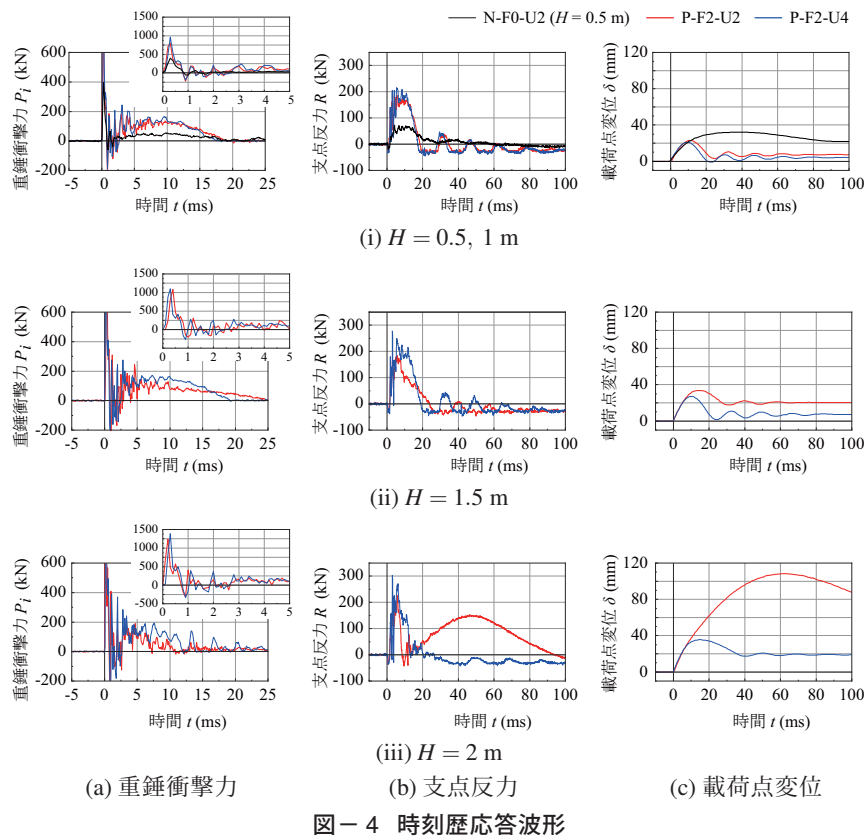


図-3 静荷重載荷実験後のひび割れ分布

とせん断破壊によって終局に至っていることが分かる。重錘落下高さが $H = 1.5$ m の場合には、U2 はりの荷重継続時間が U4 はりに比較して長く示されているとともに、除荷後における正負交番反力の周期が長くなっており、損傷が大きくなっていることが予想される。一方、U4 はりの場合には、最大反力は $H = 1$ m の場合に比較して大きく示されているものの、荷重継続時間などを含めた波形性状は $H = 1$ m の場合と類似していることから、はりの損傷は軽微であるものと推察される。重錘落下高さが $H = 2$ m の場合には、U2 はりの反力波形は他の場合と大きく異なることが確認される。これは、後述のひび割れ分布(図-5b)からも分かるように主鉄筋が破断したことで、はりは載荷点を中心に著しい角折れに至ったことによるものと考えられる。一方、U4 はりにおいても、荷重の継続時間が短くなるとともに、負反力の周期が長く示されていることから損傷が大きいたうかがえる。

(c) 図の載荷点変位波形に着目すると、落下高さが $H = 1$ m の場合には、PFFRC はりでは主鉄筋本数にかかわらず両者でほぼ類似の波形性状を示していることが分かる。重錘衝突後は正弦半波状の波形を示した後、変位が残留しながら減衰自由振動状態に移行している。一方、RC はりの場合には、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ものと判断される。落下高さが $H = 1.5$ m の場合には、U2 はりにおいて最大変位が U4 はりと比較して若干大きく、かつ除荷後の自由振動成分がほとんど確認されない。一方、U4 はりの場合には、 $H = 1$ m の場合と比較して最大変位は大きくなっているものの、除荷後の自由振動波形は類似となっており、はりはまだ終局に至っていないものと判断される。落下高さが $H = 2$ m の場合には、U2 はりの波形性状は、 $H = 0.5$ m における RC はりと同様な波形性状を示している。これは、入力エネルギーの増加によって、主鉄筋が破断したことではりが角折れ状態に至ったことによるものと推察される。一方、U4 はりにおいても、最大変位後の自由振動成分が消失していることから、はりは大きな損傷を受けていることが推察される。ただし、U2 はりのような角折れ状態には至っていない。

図-5 には、衝撃荷重載荷実験終了後のはり側面のひび割れ分布を比較して示している。ここでは、各試験体の最大落下高さの結果のみを抜粋している。(a) 図より、



RC はりの場合には、静荷重載荷時と同様に曲げひび割れの発生とともに、せん断補強筋が配筋されていない場合における RC はり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。一方、落下高さ $H = 2 \text{ m}$ における PFFRC はりの場合には、主鉄筋本数にかかわらず、載荷点を中心に広い範囲で曲げひび割れが発生している。また、静荷重載荷時には確認できない、はり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。なお、U2 はりの場合にはスパン中央部のひび割れが大きく開口し、主鉄筋の破断とともに大きく角折れ状態に至っているのに対し、U4 はりの場合にはスパン中央を介して左右でひび割れ分布に差異が確認されるものの、いまだ角折れ状態には至っていないことが分かる。

4. まとめ

本研究では、PFFRC はりの耐衝撃挙動に関する基礎データ収集を目的として、鉄筋比の異なるはりを対象に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) 静荷重載荷実験結果より、主鉄筋本数を2倍とすることにより、耐荷性能は1.3倍程度向上する。
- 2) 衝撃荷重載荷実験結果より、主鉄筋量を増加させることで耐衝撃性能は向上する。一方、大きな入力エネルギーを受ける場合には、主鉄筋が破断し終局に至る傾向が確認された。
- 3) これより、主鉄筋の破断を防止し、より高い耐衝撃性能を確保するためには、主鉄筋量をさらに増加させる必要があるものと考えられる。

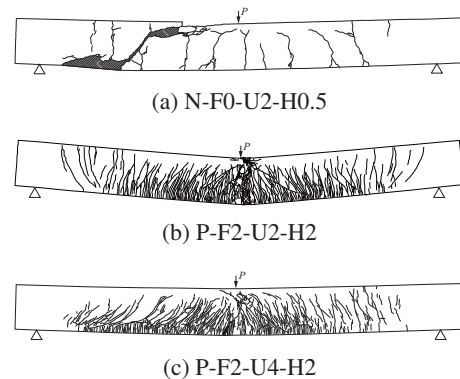


図-5 衝撃荷重載荷実験後のひび割れ分布

謝辞

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) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 圧縮強度 400 N/mm² 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.
- 3) 栗橋祐介, 河野克哉, 曾根涼太, 小室雅人, 多田克彦: 圧縮強度 400N/mm² を有する鋼繊維補強コンクリート梁の耐衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1201-1209, 2017.
- 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. 763-768, 2021.