

鋼繊維混入率の異なる PFC 梁の衝撃荷重載荷実験

Impact loading tests on Porosity Free Concrete beams with different steel fiber mixing rates

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

○ 学生員 山越 壮之助 (Sonosuke Yamakoshi)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
正 員 河野 克哉 (Katsuya Kono)
正 員 小亀 大佑 (Daisuke Kogame)
名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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構造物などは，その耐衝撃性を向上させることが極めて重要となる．

一方で，近年では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 MPa 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の可能性の高い PFC に着目し，その耐衝撃性に関して検討を行ってきた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 1800 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きた．

しかしながら，これらの成果は，鋼繊維の混入率が 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把握するためには，混入率が 2 % 以外の異なる鋼繊維の混入量での耐衝撃性についても性能を評価することが肝要であると判断される．

このような背景より，本研究では，鋼繊維混入率(1,2,3.5 %)が異なる 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 梁を対象に衝撃荷重載荷実験を実施した．

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(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)を用いている．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，外割で 1， 2， 3.5 % 混入した．表－2 には PFC の配合を示している．水結合比 (W/B) を 15 %，細骨材の絶対容積を 355 L/m³ とした．

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 8 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(高温度 90℃，保持時間 48h)ならびに加熱養生(最高温度 180℃，保持時間 48h)を実施した．その他の養生方法の詳細については文献 2) を参照されたい．

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 (B)	低熱ポルトランドセメント	L	比表面積：3,330 cm ² /g，密度：3.24 g/cm ³
	石英微粉末	Q	密度：3.24 g/cm ³ ，純度：99.9 % 以上
	シリカフューム	SF	比表面積：20 m ² /g，密度：2.29 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	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

表－2 配合

名称	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	B	S	F	SP*1	DF*1
F 1	15	199	1328	934	78 (外割 1.0 %)	B × 1.6 %	B × 1.6 %
F 2					157(外割 2.0 %)		
F 3.5					273(外割 3.5 %)		

*1: W の一部に内割置換

表-3 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)	PFC 圧縮強度 f'_c (MPa)
F1-H1	1.0	1.0	1.14	4.43	4.42	331.8
F1-H1.5		1.5	1.68	5.42	5.40	
F1-H2		2.0	2.24	6.26	6.23	
F2-H1	2.0	1.0	1.14	4.43	4.47	336.8
F2-H1.5		1.5	1.68	5.42	5.41	
F2-H2		2.0	2.24	6.26	6.28	
F3.5-H1	3.5	1.0	1.14	4.43	4.44	326.5
F3.5-H1.5		1.5	1.68	5.42	5.41	
F3.5-H2		2.0	2.24	6.26	6.19	

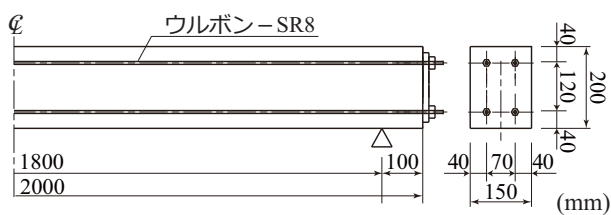


図-1 試験体の形状寸法および配筋

表-4 ウルボンの機械的性質(公称値)

種類	耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
ウルボン-SR8	1457	1489	10

2.2 試験体概要

表-3には、本研究で実施した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1, 2, 3.5%に変化させた試験体3種類を対象に衝撃载荷実験を実施した。また、いずれの試験体に関しても、重錘落下高さ $H = 1.0, 1.5, 2.0$ mと三段階に変化させて実施しており計9ケースの衝撃载荷実験を行った。

実験ケース名に関して、第一項目のFに付随する数値は鋼繊維の混入率(%)であり、第二項目のHに付随する数値は設定重錘落下高さ(m)である。また、表には本実験に用いたPFCの圧縮強度を示している。なお、PFCの材料特性値は別途実施した材料試験の結果である。

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、 $150 \times 200 \times 1,800$ mmであり、軸方向鉄筋にはウルボン-SR8⁴⁾を使用し、上下端に各2本配置した。表-4にはウルボンの機械的性質を示している。

2.3 実験方法

写真-1には、衝撃载荷実験の状況を示している。衝撃载荷実験は、質量300 kg、先端直径200 mmの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

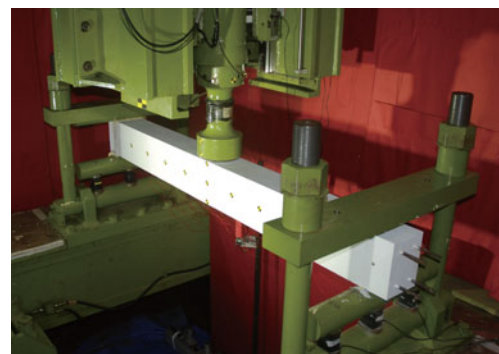


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況

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)、载荷点変位である。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より、変位はレーザ式非接触型変位計より測定している。

3. 実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図-2には、本研究で実施した全9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。なお、F1を黒線、F2を赤線、F3.5を青線で表し、横軸は重錘が試験体に衝突した時刻を零としている。また、表-3に各実験ケースの最大荷重、最大荷重時変位、残留変位を示している。

図-2(a)より、重錘衝撃力波形に着目すると、落下高さ1 mでは、鋼繊維混入率に関わらず振幅が大きく継続時間の極めて短い第一波が励起され、その後継続時間が20 ms程度の振幅が小さい第二波目が励起していることが分かる。波形の概形は、落下高さおよび鋼繊維混入率によらずほぼ同様であることが読み取れる。

落下高さ1.5 mの場合は、1 mに比べ第二波目の継続時間が短くなっており、落下高さ2 mの場合はさらに短くなっていることが分かる。これは入力エネルギーの増加に伴いリバウンド力も増加したことが一因と推察される。また、最大衝撃力に着目すると、落下高さ $H = 1.5$

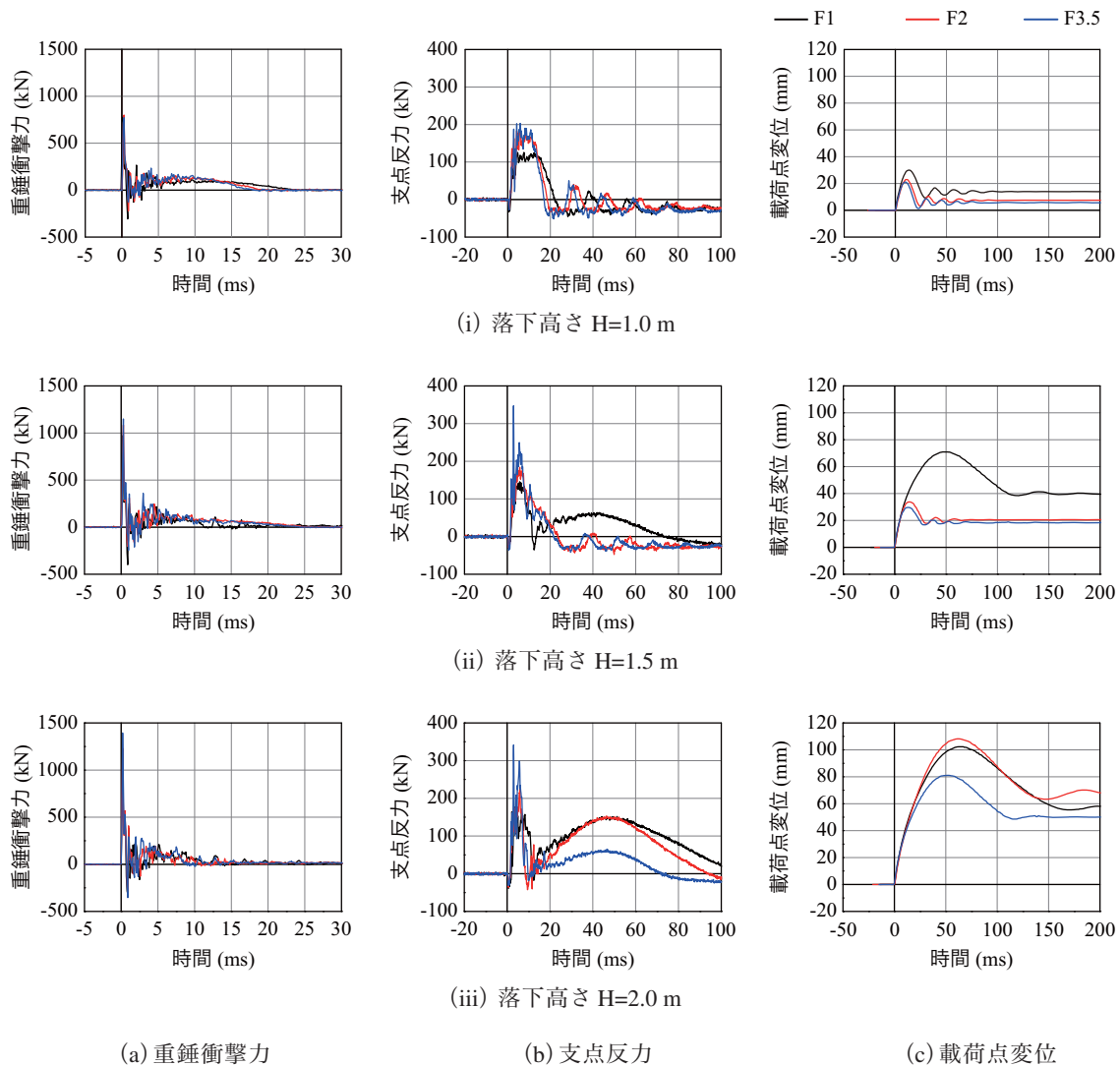


図-2 各種時刻歴応答波形

m の場合には、鋼繊維混入率 1, 2, 3.5 % の場合においてそれぞれ $P = 971, 1084, 1151$ kN, $H = 2$ m の場合には $P = 1225, 1232, 1394$ kN となっており混入率の増大によって若干最大値が大きくなる傾向にあることが確認できる。

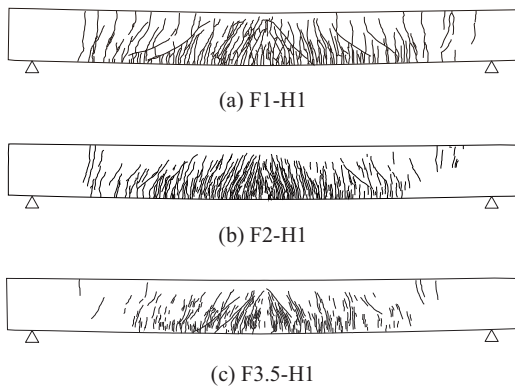
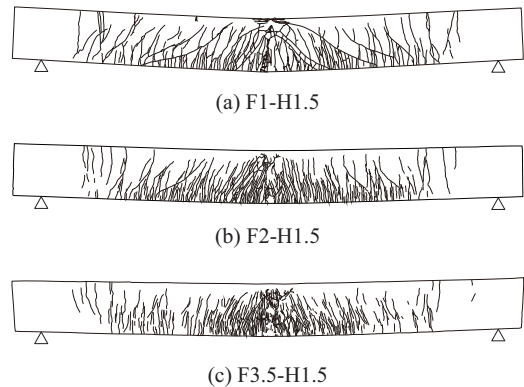
図-2 (b) より、支点反力波形に着目すると、落下高さ 1 m では、主波動に高周波成分が合成された分布性状を示していることが分かる。また鋼繊維混入率における主波動の継続時間に着目すると、混入率が高くなるほど、継続時間は短くなる傾向にある。これは繊維量の増大に伴い梁の剛性が大きくなっていることを示唆している。落下高さ 1.5 m の場合には鋼繊維混入率 1 % を除き、同様の波形性状を示していることが分かる。鋼繊維混入率が 1 % の場合には重錘衝突後、梁が大きく変形し、鋼繊維の架橋効果が消失したことで継続時間が大きく延びた第二波が確認できる。落下高さ 2 m の場合にはいずれの試験体に関しても、梁が大きく変形しひび割れが開口したことにより、第一波に加え継続時間が 50 ms 以上の第二波の励起が確認できる。

図-2 (c) の載荷点変位波形に着目すると、落下高さお

よび鋼繊維混入率によらずいずれの試験体に関しても、最大振幅を示す第一波が励起した後、減衰自由振動状態に至っていることが分かる。また 1 m 落下における最大変位は鋼繊維混入率 1, 2, 3.5 % に関してそれぞれ、29, 24, 21 mm となっており、残留変位はそれぞれ 14, 7.5, 5.6 mm となっている。すなわち、混入率が 1 % から 3.5 % に増大することで最大変位は 28 %, 残留変位は 60 % 低減することが分かる。

落下高さ 1.5 m の場合は、上述の支点反力波形と対応する形で混入率 1 % の場合のみ他の試験体と比較して、最大変位が 30 mm 程度大きくなっている。これは後述するように載荷点直下においてひび割れが大きく開口したことによるものと考えられる。

落下高さ 2 m の場合には、鋼繊維混入率 1, 2 % に関して載荷点直下に大きくひび割れが開口し主鉄筋が破断に至ったため、最大変位が 100 mm 程度まで達し終局に至っている。混入率 3.5 % においても、同様にひび割れが大きく開口して終局に至っているものの、鋼繊維によって変形が抑制されたことで鉄筋は破断には至っていない。

図-3 ひび割れ分布 ($H = 1$ m)図-4 ひび割れ分布 ($H = 1.5$ m)

3.2 ひび割れ分布

図-3～図-5には、実験終了後における各試験体に関する梁側面のひび割れ分布を比較して示している。

図-3に示す1 m落下のひび割れ分布に着目すると、いずれの試験体においても荷重点近傍において、梁下縁から上縁手前にかけて非常に密に曲げひび割れが発生しており、斜めひび割れも確認できる。これは、鋼繊維の架橋効果によってひび割れが分散したためであると考えられる。また、重錘衝突初期には支点近傍部が曲げ波の伝播によって固定端のような挙動を示すことより、衝撃荷重載荷特有の梁上縁から下縁に向かって生じるひび割れも確認できる。さらに、混入率の増大に伴って徐々にひび割れ本数が少なくなる傾向も確認できる。これは、他の試験体と比較して曲げ剛性が大きいことを示唆している。

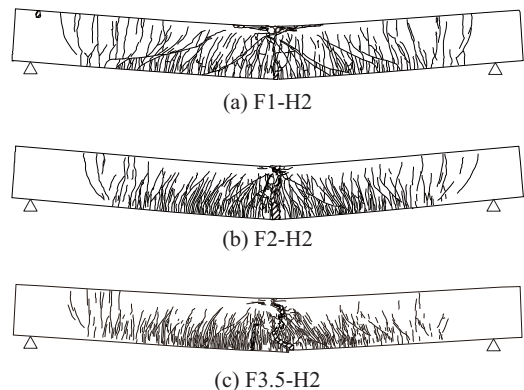
図-4に示す1.5 m落下のひび割れ分布に着目すると、混入率が2, 3.5 %の場合には1 m落下と比較してひび割れ本数が多くなっているものの、分布性状に大きな差異は確認されない。一方で、混入率が1 %の場合には他の試験体とは異なり、荷重点部から梁下縁に30°程度の角度を有したせん断ひび割れが卓越しており、かつ荷重点部の圧壊によって角折れの状況が確認できる。これより、混入率が1 %の場合には荷重点変位からも明らかなように1.5 m落下において終局に至ったものと判断される。

図-5に示す2 m落下のひび割れ分布に着目すると、混入率によらず梁上面の荷重点近傍に圧壊の傾向が見て取れる。また、いずれも角折れの性状が確認できる。せん断ひび割れに着目すると、混入率の増加に伴いその傾向が小さくなっていることも読み取れる。すなわち、いずれも角折れにより終局に至っているものの、鋼繊維の架橋効果が発揮されたことにより変形量が抑制されたものと判断される。

4. まとめ

本研究では、PFC梁の耐衝撃挙動に関する基礎データ収集を目的として、鋼繊維混入率を1, 2, 3.5 %と3種類に変化させたPFC梁を対象に重錘落下衝撃実験を実施した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 衝撃荷重載荷時において、鋼繊維混入率を増やすことにより、最大変位および残留変位を低減することが可能である。

図-5 ひび割れ分布 ($H = 2$ m)

- 2) また、鋼繊維を混入することで梁全体に非常に密に曲げひび割れが生じ、かつ混入率を増大させることで曲げ剛性が向上するため支点近傍のひび割れは減少傾向にある。
- 3) 本研究の範囲内においては、いずれの試験体も角折れによって終局に至る。また、混入率が少ない場合には主鉄筋に用いたPC鋼棒が破断に至った。

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 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.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)