

世界最強圧縮強度を有する PFC はりの重錘落下衝撃荷重実験

Dropping-weight impact load testing for the PFC beams having strongest compressive strength in world

室蘭工業大学大学院 ○学生員 木内 洋介 (Yosuke Kinai)
 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)
 室蘭工業大学大学院 フェロー 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)}。

このような背景より、著者らの研究グループでは耐衝撃補強用材料として適用できる可能性がある PFC に着目し、その耐衝撃性に関して検討を行ってきた³⁾。これまでの研究では、高さ 25 mm、幅 100 mm、スパン長 500 mm の小型無補強 PFC はりを対象に静的および衝撃荷重実験を行い、鋼繊維混入率や、衝撃エネルギーが無補強 PFC はりの耐衝撃挙動に及ぼす影響について検討を行っている。その結果、鋼繊維を混入した PFC はりの衝撃荷重実験では、繊維混入率や圧縮強度が高い場合において、鋼繊維の架橋効果が効率的に発揮されることや、高い耐衝撃性を期待できることなどを明らかにしている。しかしながら、これらの成果は、試験体寸法が非常に小さくかつ補強筋が配筋されていない場合についての結果である。実構造物に適用することを考慮した場合には、補強筋を配置し桁高も十分に考慮した形での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、補強筋を有する PFC はりの耐衝撃挙動に関する基礎データの収集を目的として、断面寸法(幅×高さ)が 150×200 mm、純スパン長が

1,800 mm の PFC はりを対象に重錘落下衝撃荷重実験を実施した。

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。また、表-2には、PFC の配合を示している。表に示しているように結合材(B)には、低熱ポルトランドセメント(L)、石英微粉末(Q)およびシリカフェーム(SF)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 N/mm² の高強度鋼繊維を用い、外割で 2% 混入した。

PFC はオムニキサ(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°C)を行い、材齢 48 h で脱型した。脱型後、セメントの水和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ところで水を投入し、外表面から内部への水供給を行った。その後、蒸気養生(最高温度 90°C、保持時間 48h)ならびに加熱養生(最高温度 180°C、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。

2.2 荷重実験の概要

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、複鉄筋あるいは単鉄筋配置とした 2 種類である。軸方向鉄筋には D19 を使用し、複

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
	シリカフェーム	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

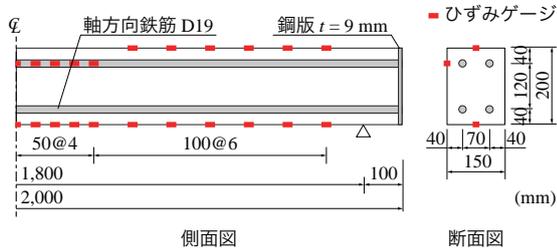
表-2 配合

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							
	W	B			S	F	SP*1	DF*1
		L	Q	SF				
15	199	876	347	102	927	157 (外割 2%)	B × 2.5 %	B × 0.02 %

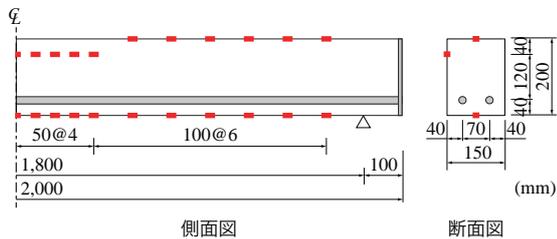
*1: W の一部に内割置換

表-3 実験ケース一覧

試験体名	配筋	実験ケース名	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		鉄筋降伏強度 f_y (MPa)
							圧縮強度 f'_c (MPa)	割裂引張強度 f_t (MPa)	
PFC-d	複鉄筋	PFC-d-H1.0	1.0	1.01	4.43	4.45	340.5	27.3	380.0
		PFC-d-H2.0	2.0	1.91	6.26	6.11			
PFC-s	単鉄筋	PFC-s-H1.0	1.0	1.01	4.43	4.45	341.0	30.1	
		PFC-s-H1.0	2.0	1.91	6.26	6.11			



(a) PFC-d 試験体



(b) PFC-s 試験体

図-1 試験体の形状寸法および配筋

鉄筋の場合には上下端に各2本, 単鉄筋の場合には下端に2本配置した. なお, 定着長を節約するために, 軸方向鉄筋の端部は厚さ9 mmの鋼版に溶接固定している.

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. 本研究では複鉄筋配置としたPFC-d試験体および単鉄筋配置としたPFC-s試験体の2種類を対象に衝撃荷重実験を実施した. なお, いずれも鋼繊維混入PFCを用いて製作している. また, いずれの試験体に関しても, 衝撃荷重実験は, 重錘落下高さを $H = 1.0$ mとする処女荷重を行った後, $H = 2.0$ mから漸増繰り返し衝撃荷重実験を実施しており, 計4ケースの実験を行った. 実験ケース名の第三項目のHに付随する数値は設定重錘落下高さ(m)である.

表には本実験に用いたPFCの圧縮強度および割裂引張強度, 鉄筋の降伏強度も示している. 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り, 鉄筋の降伏強度に関してはミルシートの値である.

写真-1には, 衝撃荷重実験の状況を示している. 衝撃荷重実験は, 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自由落下させる形で行った. 荷重方法は, 同一試験体に対して重錘落下高さを増加させていく漸増繰り返し荷重とした. 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), 荷重点変位および梁上縁・下縁の軸方向ひずみ(以後, 単にひずみ)である. さらに, 実験終了後には梁側面を撮影し, ひび割れ図も作成している.

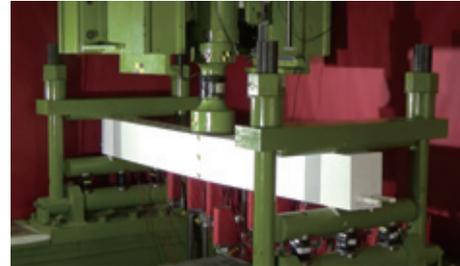


写真-1 重錘落下衝撃実験の状況 (PFC-s 試験体)

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用いて計測しており, 変位はレーザー式非接触型変位計を用いている. また, 図-1に示すように, はりの上縁(荷重点近傍部は上縁から40 mm下の梁側面部)および下縁には検長10 mmのひずみゲージを50もしくは100 mm間隔で貼付した. ひずみゲージ接着手順は以下の通りである. すなわち, 1) 梁表面の細孔をエポキシ系パテ状接着樹脂で埋め, 2) 24時間経過後に乾燥状態であることを確認した後, 3) ひずみゲージ接着箇所に厚さ0.1 mmのリン青銅板(幅2 cm × 長さ3 cm)を2液混合型のエポキシ系接着樹脂を用いて貼付けし, 4) その上にひずみゲージ用常温硬化型瞬間接着剤を用いてゲージを接着する, である.

3. 衝撃実験結果

3.1 各種応答波形

図-2には, 本研究で実施した全4ケースにおける重錘衝撃力, 支点反力および荷重点変位に関する時刻歴応答波形を示している. なお, 赤線がPFC-d試験体を, 青線がPFC-s試験体を表し, 横軸は重錘が試験体に衝突した時刻を零としている.

図-2(a)より, 重錘衝撃力波形に着目すると, 処女荷重時には, 配筋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12 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. 最大衝撃力はPFC-d試験体は $P = 1000$ kN程度, PFC-s試験体は $P = 850$ kN程度となっている.

繰り返し荷重時に着目すると, 処女荷重時と比較して, その波形性状に大きな差異は見られないものの, 第一波, 第二波目ともに継続時間が大きくなっていることが読み取れる. これは, 処女荷重による損傷が蓄積されていることにより, 梁の剛性が低下したことが要因と考えられる. また, 最大衝撃力はPFC-d試験体が $P = 1200$ kN程度, PFC-s試験体が $P = 1000$ kN程度であり, 重錘落下高さ H に対応して処女荷重時よりも大きな値を示していることが分かる.

図-2(b)より, 支点反力波形に着目すると, 処女荷重

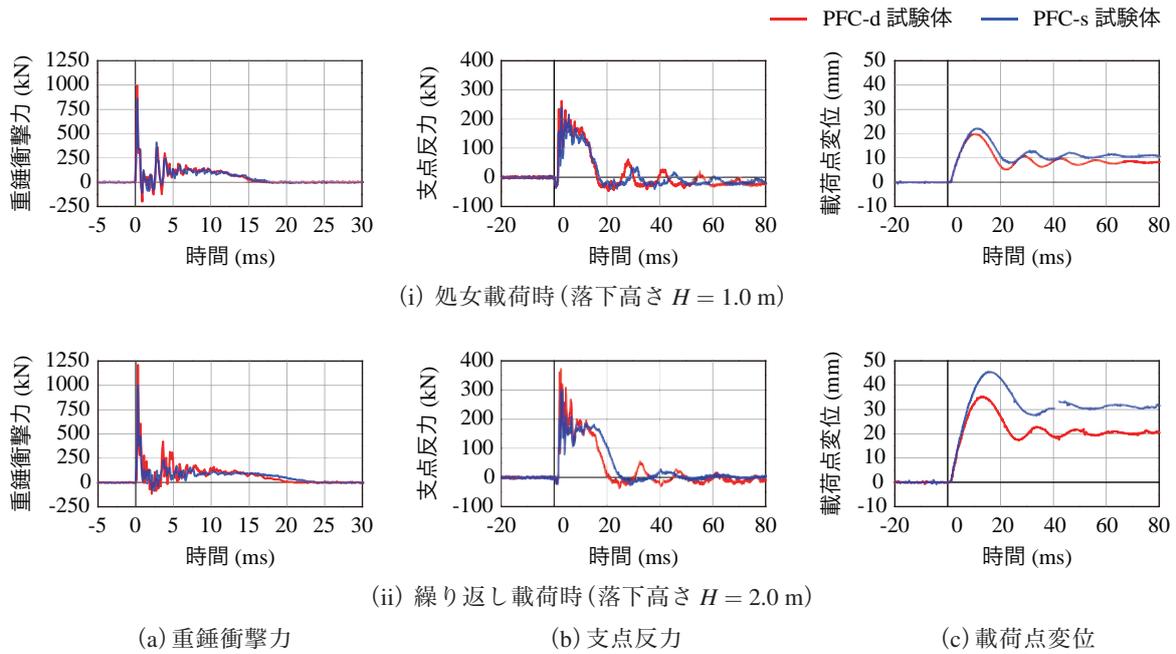


図-2 各種時刻歴応答波形

時には、配筋に関わらず継続時間が17ms程度の主波動に高周波成分が合成された分布性状を示した後、減衰自由振動状態に至っていることが分かる。なお、最大支点反力は両者ともに同程度の値を示している。繰り返し載荷時には、処女載荷による損傷により主波動の継続時間が大きくなり、PFC-d試験体は20ms程度、PFC-s試験体は25ms程度となっている。これより、損傷が累積され梁上縁部までひび割れが進展することで、上縁鉄筋の有無による差異が現れ始めているものと類推される。また、最大支点反力は重錘衝撃力と同様に重錘落下高さに対応して大きくなっていることも確認できる。

図-2(c)の載荷点変位波形に着目すると、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、処女載荷時には配筋の違いにより変位波形に極端な差異は確認できないものの、繰り返し載荷時には、PFC-d試験体は35mm、PFC-s試験体は46mm程度とその差は顕著に現れている。これは後述の図-3に示すように、PFC-s試験体の場合には、載荷点部近傍のコンクリートが圧壊し、梁下縁から上縁までひび割れが進展したことで、上縁鉄筋の有無による差異が明確に現れたものと考えられる。

3.2 実験終了後におけるひび割れ分布

図-3には、本研究で実施した実験終了後の全ケースに関する梁側面のひび割れ分布を示している。なお、処女載荷時に発生したひび割れは黒色、繰り返し載荷時に発生したひび割れは赤色で示している。

図-3(i)に示す処女載荷後のひび割れ分布に着目すると、いずれのケースにおいても載荷点近傍において、梁下縁から上縁手前にかけて非常に密に曲げひび割れや斜めひび割れが発生していることが確認できる。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判断される。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、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。

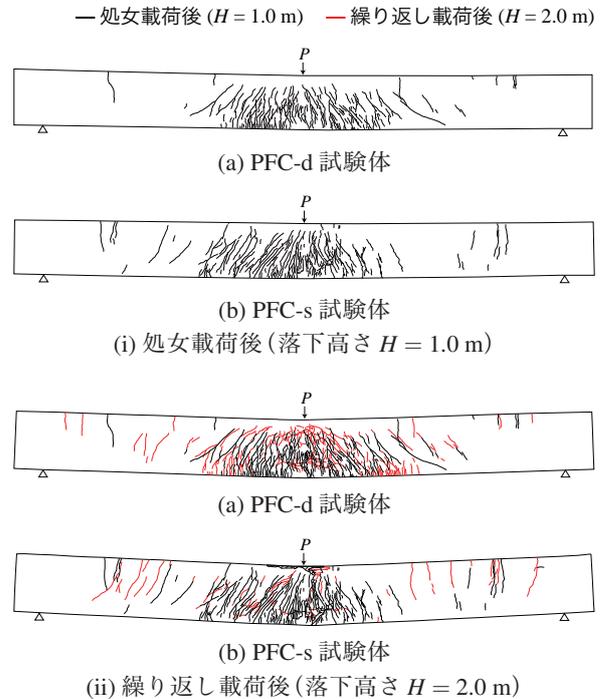


図-3 ひび割れ分布図

なお、上述の時刻歴応答波形と同様に、配筋による明確な差異はないことが窺える。

図-3(ii)に示す繰り返し載荷後のひび割れ分布に着目すると、両者ともにひび割れが進展し、かつひび割れ本数も増加しているものの、PFC-s試験体はPFC-d試験体と比較して、繰り返し載荷によるひび割れ本数が少ない。これは、PFC-s試験体の上縁が圧縮破壊し角折れ状態に至り、スパン中央部右側に発生した既存ひび割れがさらに大きく開口したことにより、応力が集中し鋼繊維の架橋効果が小さくなったことによるものと推察される。

3.3 ひずみ分布性状の時間的推移

図-4には、PFC-s試験体に関する軸方向ひずみ分布の

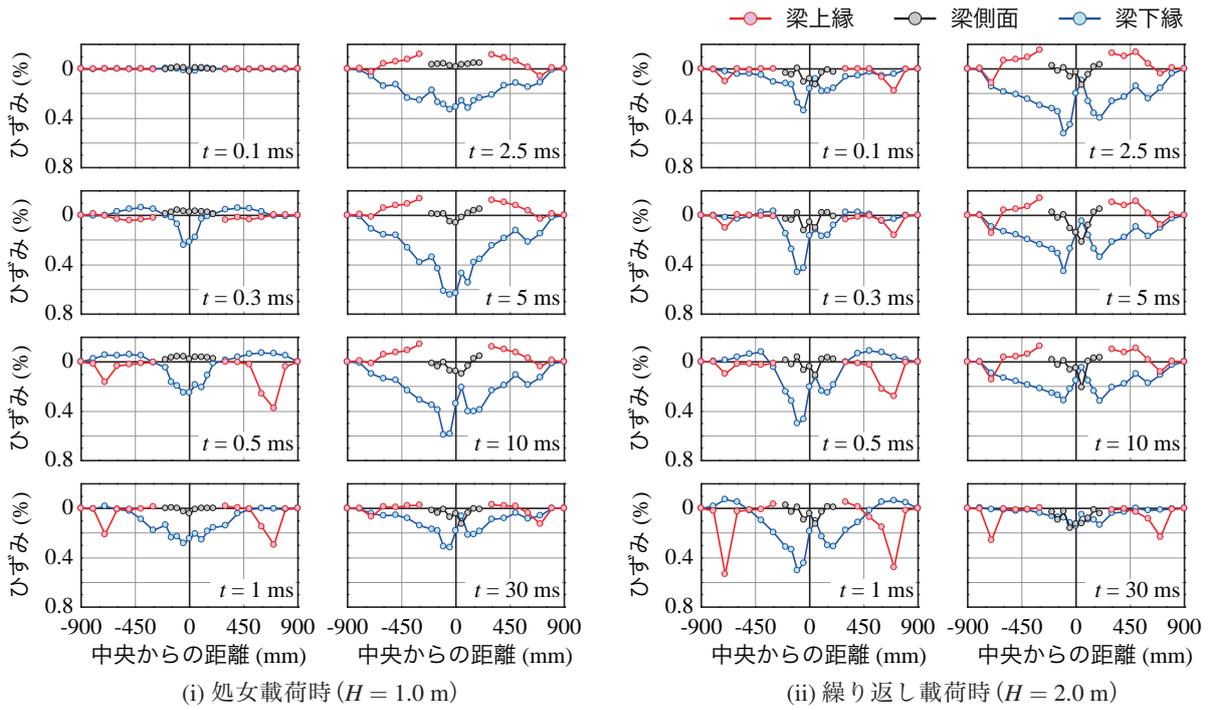


図-4 PFC-s 試験体に関する各時刻におけるひずみ分布性状

時間的推移を示している。なお、赤線は梁上縁、黒線は梁側面(梁上縁から 40 mm 下)、青線は梁下縁のひずみ分布を示しており、繰り返し載荷におけるひずみ分布は処女載荷による残留ひずみを累積した結果を示している。

図-4 (i) に示す処女載荷時に着目すると、重錘衝突直後の時間 $t = 0.1 \text{ ms}$ においては、ひずみはほぼ零の値を示しているが、 $t = 0.3 \text{ ms}$ では梁下縁に 0.2% 程度の引張ひずみが励起しており、既にひび割れが発生していることが窺われる。スパン中央から 450 mm の位置においては 0.1% 弱程度の圧縮ひずみが生じており、曲げ波の伝播により負曲げの状態になっていることが読み取れる。また、梁上縁と側面に関しては、それらに対応したひずみ分布となっている。

$t = 0.5 \sim 2.5 \text{ ms}$ については、両端固定梁の分布性状から、徐々に曲げ波が伝播していき、梁の局所変形が全体変形へと移行していく傾向が確認できる。なお、梁上縁において支点部近傍に過大な引張ひずみが生じているが、これは図-3からも分かるように、支点近傍部に梁上縁から下縁にひび割れが生じたことによるものと推察される。

$t = 5 \sim 10 \text{ ms}$ のスパン中央部に着目すると、下縁ひずみは 0.6% 程度を示しており、さらに側面ひずみが引張側に移行していることが分かる。これより、下縁部に発生したひび割れが上縁付近まで進展したことが類推される。

$t = 30 \text{ ms}$ では減衰自由振動状態に移行しているものの、梁下縁、側面において引張ひずみが卓越しており、梁上縁においては支点近傍部においても引張ひずみが発生していることが分かる。

図-4 (ii) に示す繰り返し載荷時に着目すると、 $t = 0.1 \text{ ms}$ においては、処女載荷の $t = 30 \text{ ms}$ 時とほぼ同様な分布性状を示しており、その後 $t = 0.5 \sim 5 \text{ ms}$ までは支点部まで曲げ波が伝播していく様子が窺える。その傾向は処女載荷時とほぼ同様である。なお、 $-100 \sim 100 \text{ mm}$ 程度

のスパン中央部においては、いずれの時刻においてもひずみが励起せず、三角形上の分布を示している。これは、図-3に示しているように、スパン中央部付近においてひび割れが大きく開口したことにより、応力が開放されたことが一因と考えられる。

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、鉄筋配置の異なる PFC はり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) 処女載荷時 ($H = 1 \text{ m}$) では、配筋による大きな差異はなく、ほぼ同等な挙動を示す。一方で、繰り返し載荷時 ($H = 2 \text{ m}$) においては、単鉄筋配置とした試験体の上縁が圧縮破壊し、ひび割れが大きく開口したことにより、最大載荷点変位に関して複鉄筋配置とした試験体と差異が見られた。
- 2) また、いずれの試験体も鋼繊維の架橋効果により、非常に密にひび割れが生じる。

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, 2016.7
- 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, 2016.7
- 3) 栗橋祐介, 河野克哉, 安田瑛紀, 木内洋介, 小室雅人: AFRP シート曲げ補強した PFC はりの耐衝撃性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.849-858, 2019.3