# 鋼繊維混入率の異なる無孔性コンクリート梁に関する静載荷実験

Static loading tests for Porosity Free Concrete beams with different steel fiber mixing rates

太平洋セメント(株)	○正 員	小亀大佑	(Daisuke Kogame)
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	名誉会員	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	学生員	山越 壮之助	(Sonosuke Yamakoshi)

## 1. はじめに

近年,我が国では異常気象に伴う自然災害が多発して おり,巨大台風や暴風雨による土石流や落石災害,ある いは竜巻飛来物の被害が各地で毎年のように発生してい 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 ある構造物などに関しては,その安全性(耐衝撃性能)向 上が要求されるようになってきた.一方,近年では高強 度コンクリートに関する研究が積極的に推進され,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<sup>1),2)</sup>.

このような状況を鑑み,著者らの研究グループでは高 い圧縮強度を有する鋼繊維補強 PFC に着目し,その静的 耐荷性能や耐衝撃性能に関して実験的な検討を行ってき た<sup>3)</sup>.これまでの研究では,幅150 mm,高さ200 mm,ス パン長1800 mmの PFC 梁を対象として,コンクリートや 鉄筋の種類を変化させて静載荷実験や衝撃荷重載荷実験 を実施している.その結果,鋼繊維補強 PFC (混入率2%) を用いることで,高い圧縮強度と鋼繊維の架橋効果によっ て,衝撃荷重下における最大変位や残留変位が低減され, 耐衝撃性能が向上することなどを明らかになっている.し かしながら,より高い耐衝撃性能を有する PFC 部材を開 発するためには,鋼繊維混入率や使用する鉄筋の材料特 性の影響などを実験的に確認しておくことが極めて重要 であるものと判断される. このような観点より、本研究では、繊維混入率に着目 し、混入率の違いが PFC 梁の耐荷性能に与える影響を検 討するために、既往の研究と同様の形状寸法を有する PFC 梁を対象に静載荷実験を実施した.ここでは、補強筋とし て高強度鉄筋を使用するとともに、鋼繊維混入率を3種 類に変化させた場合について検討を行った.

## 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. 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<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)を用いた.また,鋼繊維(F)には引張強度 2,800 N/mm<sup>2</sup>の高強度鋼繊維を用い,混入率を外割で1, 2,3.5%と3種類に変化させることとした.**表**-2には PFC の配合を示している.いずれも水結合材比(W/B)を 15%,細骨材の絶対容積を355 L/m<sup>3</sup>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8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°C)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状態にし

☆~↓ C円付付の一見						
種類	名称	略号	成分ならびに物性			
	低熱ポルトランドセメント	L	比表面積:3,330 cm <sup>2</sup> /g,密度:3.24 g/cm <sup>3</sup>			
結合材 (B)	石英微粉末	Q	密度:3.24 g/cm <sup>3</sup> ,純度:99.9 %以上			
	シリカフューム	SF	比表面積:20 m <sup>2</sup> /g,密度:2.29 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	鋼繊維	F	直径 0.2 mm, 長さ 15 mm, 密度 7.84 g/cm <sup>3</sup>			
			引張強度: 2,800 N/mm <sup>2</sup> ,引張弾性率: 210 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	ポリグルコール系			

表-1 使用材料の一覧

	111/D	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
名称	W/B (%)	W	В	S	F	SP*1	DF*1
F 1					78 (外割 1.0 %)		
F 2	15	199	1328	934	157(外割 2.0 %)	$B\times1.6~\%$	$B\times1.6~\%$
F 3.5					273(外割 3.5 %)		

表一2 配合

\*1: W の一部に内割置換

最大荷重時 繊維 PFC 最大 実験 混入率 圧縮強度 荷重 変位 ケース名  $f_c'$  (N/mm<sup>2</sup>)  $P_{\max}$  (kN)  $\delta_{\max}$  (mm) (%) F1-S 1.0 331.8 128.9 26.7 336.8 155.1 F2-S 2.0 19.3 F3.5-S 3.5 326.5 175.6 17.8







図-2 ウルボンの荷重-伸び線図<sup>4)</sup>

表-4 ウルボンの材料特性値<sup>4)</sup>

種類	0.2 % 耐力	引張強さ	伸び	弾性係数
	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	(%)	$(kN/mm^2)$
ウルボン-SR8	1457	1489	10	200

た後に水を投入し,外表面から内部への水供給を行った. その後,蒸気養生(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 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種類を対象に静荷重載荷実験を実施した. 実験ケース名に関しては、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Sは静荷重載 荷実験を表している.また、表には別途実施した材料試 験より得られた PFCの圧縮強度も併せて示している.い ずれの混入率においても、300 N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を 有していることが分かる.

図-1には、本研究で使用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 である.軸方向鉄筋については上下



写真-1 実験状況



端に各2本配置する複鉄筋配置とし、PFCの高圧縮強度特 性を活かすことを目的として異形 PC 鋼棒(ウルボン-SR8, JIS G 3137)を使用した.また、本研究では、図-1に示す ように梁下面における断面中央および上端筋位置におけ る表面にひずみゲージを貼付した.

図-2にはウルボンの荷重-伸び関係を,表-4には材料試験より得られた材料特性値<sup>4)</sup>を示している.図より, ウルボンは降伏後,荷重が増加せずに伸びのみが進行す る特性を有している.また,引張強さは1400 N/mm<sup>2</sup>以上 であり,普通鉄筋の4倍程度の引張強度を有している. 2.3 実験方法

写真-1 には、静荷重載荷時における載荷装置と試験 体の設置状況を示している。本実験では、梁幅方向に400 mm,梁軸方向に100 mmの載荷板をスパン中央部に設置 し、容量500 kNの油圧ジャッキを用いて荷重を作用させ ている。実験は最大荷重到達後、ひび割れが開口し荷重 が低下した段階で終局と判断し、実験を終了することと した。

本実験の測定項目は、(1) ロードセルによる載荷荷重, (2) レーザ式非接触型変位計による載荷点変位,および(3) 図-1に示す位置に貼付したひずみゲージによる梁軸方 向ひずみである.

# 3. 実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

図-3には、本研究で実施した全3ケースにおける静荷 重載荷実験結果の荷重-変位関係を比較して示している.

図-3より,荷重が30kN程度までは,いずれの試験体







図-4 実験終了後のひび割れ分布

においても同様な挙動を示していることが分かる. これ は、いずれの試験体も鉄筋や配筋が同様であることから、 ひび割れが大きく開口しない領域では鋼繊維による架橋効 果が小さいことを示唆しているものと考えられる. その 後、荷重の増加とともに、混入率1%のF1-S 試験体では、 他の試験体よりも小さい荷重でひび割れが開口し、徐々 に剛性が低下している.

また、荷重が 100 kN 近傍の段階に着目すると、3 試験 体で変位量に明確な差異が確認できる.これは、ひび割 れの開口に伴い、鋼繊維の架橋効果が発揮されるものの、 その効果は混入率が大きい(繊維量が多い)ほど大きいこ とを示唆している.

**表**-3に示す各試験体の最大荷重  $P_{max}$  を見ると, 混入率 1, 2, 3.5% に対して, それぞれ 129.1, 155.4, 176.2 kN となっている. 混入率 1%を基準に取ると, 混入率を 2% とすることにより, 最大荷重は約 20%, 3.5% にすることにより, 約 36% 増大している. これより, 静荷重載荷時には, 最大荷重は, 鋼繊維の混入率が高いほど増加傾向にあることが明らかとなった. 一方, 最大荷重時変位  $\delta_{max}$ に関しては, それぞれ 26.5, 18.8, 17.6 mm となっており, 混入率が大きいほど変位量は小さくなる結果となった.

## 3.2 ひび割れ分布

図-4には、実験終了後における側面のひび割れ分布 状況を各試験体で比較して示している.図-4(a)より、 F1-S 試験体に着目すると、梁下面から上方に向かう曲げ ひび割れが梁全体に広く分布していることが分かる.ま た,載荷点直下においては,ほぼ上縁までひび割れが進 展していることも見て取れる.最終的には,載荷点直下 近傍におけるひび割れが大きく開口したことで,荷重が 低下し終局に至っている.

図-4(b)に示す F2-S 試験体に着目すると, F1-S 試験 体と比較して鋼繊維の架橋効果によって,ひび割れ本数 が減少するとともに,その分布範囲も狭くなっているこ とが分かる.最終的には,F2-S 試験体も F1-S 試験体と同 様,載荷点直下においてひび割れが大きく開口したこと で終局に至っている.

一方, 図-4(c)に示す F3.5-S 試験体の場合には他の試 験体と異なり,ひび割れ本数が少ないことが見て取れる. また,ひび割れは載荷点から左側に集中して発生してい ることも確認できる.これは,混入率が3.5%と高いこと から,鋼繊維の架橋効果によって曲げひび割れの開口が 抑制されたことで,載荷荷重が大きい状態下で多少の鋼 繊維の分散の不完全性から一カ所に損傷が集中したこと によりひび割れが大きく開口し,終局に至ったものと推 察される.

#### 3.3 ひずみ分布

図-5には、最大荷重到達時における梁下縁、側面および上縁のひずみ分布を比較する形で示している。図中、赤線が下縁、黒線が側面、青線が上縁のひずみ分布であり、 上縁のひずみに関しては、下縁と側面のひずみを用いて 平面保持を仮定して評価した。

図-5(a)より,F1-S 試験体に着目すると,最大荷重時 において載荷点近傍に発生した曲げひび割れが大きく開 口したことにより,下縁ひずみの計測が不能となったこと から点線で表示をしている.図より,載荷点から250mm の範囲における上端筋位置の側面ひずみが引張側の値を 示していることことから,中立軸は上端筋よりも上方に 推移していることが窺われる.このことは,図-4(a)に 示す載荷点直下のひび割れが上端筋位置まで進展してい ることからも理解できる.

図-4(b)に示す F2-S 試験体の場合には、載荷点直下の 下縁において 1.2%の引張ひずみが発生しており、下縁筋 が降伏しているものと推察される.また、側面ひずみも F1-S 試験体と比較して小さく、ほぼ0近傍の値を示して いることから、中立軸は上縁筋付近に位置しているもの と推察される.なお、梁上縁では -0.25% 程度の圧縮ひ ずみとなっており、梁上縁は圧壊状態には至っていない ことが分かる.これは、図-4(b)に示すひび割れ図から も確認される. 図−4(c)に示す F3.5-S 試験体の場合においても, F2-S 試験体とほぼ同類似の分布性状を示していることから,最大荷重時には中立軸は上端筋位置近傍にあるものと推察される.

# 4. まとめ

本研究では,高強度鉄筋を配置した PFC 梁の耐荷性能 に関する基礎データの収集を目的として,鋼繊維混入率 の異なる3種類の PFC 梁を対象に静荷重載荷実験を実施 した.本研究で得られた結果は以下の通りである.

- 鋼繊維の混入率を増大させることにより,最大荷重 は増加する傾向があることを実験的に確認した。最 大荷重は,混入率を1%から2%とすることで1.2倍 程度,3.5%とすることで1.36倍程度増大することを 明らかになった。
- また、混入率が2%以下の場合には、曲げひび割れの 開口によって荷重が低下し終局に至るのに対し、3.5 %の場合には、荷重レベルが大きいことにより鋼繊 維の分散の若干の不完全性によって損傷が一カ所に 集中し、ひび割れの開口によって終局に至ることを

確認した.

## 参考文献

- 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.
- 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.
- 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)