圧縮強度 400 N/mm² を有する鋼繊維補強コンクリート梁の耐衝撃挙動

Impact resistant behavior of fiber reinforced concrete plate with 400 N/mm² compressive strength

室蘭工業大学		\bigcirc	学生	三員	小野 慎平	(Shimpei Ono)
室蘭工業大学			Æ	員	栗橋 祐介	(Yusuke Kurihashi)
太平洋セメント	(株)		Æ	員	河野 克哉	(Katsuya Kono)
太平洋セメント	(株)		非会	⋛員	曽根 涼太	(Ryota Sone)
室蘭工業大学			正	員	小室 雅人	(Masato Komuro)
太平洋セメント	(株)		非会	員	多田 克彦	(Katsuhiko Tada)

1. はじめに

セメント複合材料を超高強度化することにより, コンク リート構造物の部材断面を縮小できることから軽量化が可 能となり, 建設コストの縮減, 工期の短縮, スパンの長大 化等を実現できる.一方で, この種の材料に特有の脆性破 壊を抑制することを目的に, 繊維を混入した材料も数多く 開発されており^{1),2)}, 圧縮強度が 200 N/mm² 程度の超高強 度繊維補強コンクリート (UFC) などが実用化されている ³⁾. また, 近年では, 450 N/mm² 以上の圧縮強度を発現す る超高強度コンクリートが開発されている.これは, 最密 充填理論に基づいて配合され, かつ脱型時に吸水処理と熱 養生を行うことで空隙を極限まで減じたセメント系材料 (以下, ポアフリーコンクリート (PFC)) である⁴⁾.これま での研究では, 繊維補強 PFC に関する圧縮および引張特 性に関する材料試験が行われており, 種々の力学的な特性 が明らかにされている⁵⁾.

一方,前述のUFCにおいては,高強度でかつ靭性能に優 れる材料特性に着目し,耐衝撃用途構造物への適用性に関 する研究が推進されており,設計ガイドラインの作成等, 実用化に向けた検討が行われている⁶⁾.従って,さらに圧 縮強度の高いPFCにおいても繊維を混入することにより, 耐衝撃用途構造物やその補修補強のための材料として活用 できる可能性があるものと考えられる.しかしながら,繊 維補強 PFC の耐衝撃性については未だ検討されていない のが現状である.

このような背景より,本研究では,繊維補強 PFC の耐衝 撃挙動に関する基礎的なデータを収集することを目的に, 梁状に成形した PFC の重錘落下実験を行った.

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 使用材料および配合

表-1には、PFC および比較用の高強度コンクリート (HC)に用いた材料を一覧にして示している.また、**表-2** には、これら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)およびシリカフューム (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 用いた.また、鋼繊維 (F)は外割で1もしくは2%混入し た.その他、PFC の配合設計の考え方等については、文献 ⁶⁾を参照されたい.

(2) 練混ぜおよび養生方法

PFC および HC においてはオムニミキサ (容量 30 L) に B, W, SP, S および DF 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,所

	及 · 反用的科ジ 克								
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: 3330 cm ² /g,密度: 3.24 g/cm ³						
結合材 (B)	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: 2800 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						
102 111 111	消泡剤	DF	ポリグルコール系						

表-1 使田材料の一覧

					単位量 (kg/m ³)				2		圧縮	
名称	W/B (%)	W	С	B Q	SF	S	F	SP*1	DF*1	フロー *2 (mm)	空気量 *3 (%)	強度 (N/mm ²)
PFC0							0			280	3.9	404
PFC1	15	199	876	347	102	927	78 (外割1%)	$\rm B \times 2.5 ~\%$	$\rm B \times 0.02 ~\%$	269	3.9	375
PFC2							157 (外割2%)			276	3.2	374
HC0							0	$B \times 0.4 \%$		185	3.2	112
HC1	33	271	639	253	75	927	78 (外割1%)	$B \times 0.45$ %	$B \times 0.02 \%$	204	2.1	115
HC2							157 (外割2%)	$B \times 0.5 \%$		214	2.0	115

表一2 配合

*1: W の一部に内割置換, *2: 落下振動を与えないフロー試験による値 (JIS A 5201 準拠), *3: 空気室圧力法

	コンク	鋼繊維	重錘落下
試験体名	リート	混入率	高さ
	の種類	(%)	H (mm)
PFC0-H1			1
PFC0-H2		0	2
PFC0-H3			3
PFC1-H100]		100
PFC1-H200	PFC	1	200
PFC1-H300			300
PFC2-H100	1		100
PFC2-H200		2	200
PFC2-H300			300
HC0-H1			1
HC0-H2		0	2
HC0-H3			3
HC1-H100			100
HC1-H200	局強度	1	200
HC1-H300			300
HC2-H100			100
HC2-H200		2	200
HC2-H300	1		300

表-3 試験体の一覧





定の型枠に打ち込んで,型枠内で封緘養生 (20 °C) を行い, 材齢 48 h で脱型した. さらに, PFC の場合には脱型後, 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分供給 を行った.なお,脱気時間は水が供試体の上部まで到達後 30 分間とした.上述の吸水処理を行った試験体は,蒸気 養生 (昇温速度 15 °C/h,最高温度 90 °C,最高温度保持時間 48 h,降温速度 15 °C/h)の後,さらに加熱養生 (昇温速度 60 °C/h,最高温度 180 °C,最高温度保持時間 48 h,降温速度 60 °C/h,1 atm)を行った.

2.2 載荷実験の概要

(1) 試験体の一覧

表-3には、本実験に用いた供試体の一覧を示している.供試体の数は、コンクリートの種類、鋼繊維混入率、 載荷方法および重錘落下高さを変化させた全18体である. 試験体名の第1項目は、コンクリートの種類と鋼繊維混入 率(%)の組み合わせで示している.また、第2項目の英文 字Hに付随する数値は、重錘落下高さH(mm)である.

図-1 には,供試体の形状寸法を示している.本研究に 用いた供試体は,断面寸法(幅×高さ)が100×25 mm,純 スパン長が500 mm である.

(2) 載荷実験方法と測定項目

衝撃載荷実験は,質量 20 kg,先端直径 60 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 させる単一載荷法により行った.また,試験体の両支点部 は回転を許容し,浮き上がりを拘束するピン支持に近い構 造となっている.測定項目のうち,重錘衝撃力および支点 反力はサンプリングタイムを 0.01 ms としてデジタルデー タレコーダーにて一括収録している.載荷点変位およびひ び割れ幅は,高速度カメラによって撮影された画像を用 い,試験体に貼付したターゲットマーカーの移動量から算 出した.フレームレートは 2000 枚/秒である.実験終了後 には試験体のひび割れ性状を観察し記録した.

3. 衝撃載荷実験結果

3.1 時刻歴応答波形

図-2には、各試験体の時刻歴応答波形を示している. なお、支点反力波形においてはコンクリート梁が大きく角 折れし、部材回転角が大きくなることにより支点反力が適 切に評価されないケースに関しては、検討から除外するこ ととした.

図-2(a)より, PFC/HC-0 試験体の重錘衝撃力は, 落下 高さがH = 1, 2および3 mmと低いため,その最大値も小 さい.実験では,両試験体ともH = 3 mmで梁が二分し崩 壊している.鋼繊維補強 PFC/HC 試験体の重錘衝撃力は, 最大振幅を示し継続時間が極めて短い波形が励起し,その 後振幅の小さい波形が複数回生じる性状を示している.な お,これらの試験体の最大振幅は, PFC/HC-0 試験体の10 倍程度大きい.

図-2(b)より, PFC/HC-0 試験体の支点反力波形は,最 大振幅が2kN程度で継続時間が10ms程度の三角波を呈 していることが分かる.また,その最大振幅は繊維補強 PFC/HCの場合に比較して小さい.繊維補強PFC/HC試験 体の場合は,正弦半波状の波形が励起している.また,同 一落下高さ(H=100mm)のケースを比較すると,圧縮強 度が高く繊維混入率が高いほど主波動継続時間が短くなる 傾向にある.これは,梁の曲げ剛性が大きいほど,固有振 動周期が短くなることによるものと考えられる.

図-2(c)より, PFC/HC-0 試験体の応答変位波形は, 落 下高さH=1および 2 mm の場合には最大振幅が 1 mm 以 下であるが, H=3 mm の場合には 5 mm 程度となってお り,この時点で梁は二分されている.繊維補強 PFC/HC 試 験体の場合はいずれも最大振幅を示した後, 復元するもの の変位が残留している.また, PFC2 試験体の場合が, 最 も最大変位や残留変位が小さい.このことから, PFC2 試 験体の耐衝撃性が最も高いことが分かる.

3.2 **ひび割れ分布性状**

図-3 には実験終了後における繊維混入試験体の側面 および底面のひび割れ分布性状を示している.また,残留 変位 δ_r も併せて示している.なお PFC/HC-0 試験体の場合 には,落下高さ H=1 および 2 mm ではひび割れが発生せ ず,落下高さ H=3 mm で梁が二分し崩壊したため図から 除いている.図より,いずれの試験体においても落下高さ H が大きい場合ほどひび割れ本数が増加し,載荷点近傍の ひび割れ幅が大きくなる傾向にあることが分かる.

繊維補強 PFC/HC 試験体のひび割れ分布を比較すると,

平成28年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第73号



図-2 各種時刻歴応答波形

HC 試験体の場合には PFC 試験体よりもひび割れ間隔が広 く載荷点近傍のひび割れが大きく開口する傾向にあること が分かる.これに対し, PFC 試験体の場合には微細なひび 割れが分散して多数発生する傾向にある.

このような傾向は, PFC2 試験体の場合に顕著に現れて おり,特にH=300mmの場合には他の試験体よりも繊維 混入によるひび割れ分散効果が効率的に発揮され,残留変 位も小さい.なお,載荷点近傍の曲げひび割れは梁上縁ま で到達していることから,最大応答時には梁の全断面に引 張応力が作用したものと考えられる.

従って、繊維補強 PFC の高い耐衝撃性に対しては、圧縮 強度よりもひび割れ発生後の引張特性が大きく貢献してい るものと考えられる.また、これは PFC – 鋼繊維間の付 着抵抗が引張靱性能の向上に大きく寄与しているためと考 えられる.これらのことから、部材厚の大きい梁や RC/PC 梁などの圧縮強度が耐力に及ぼす影響が大きい部材に PFC を適用することにより、PFC の材料特性がより効果的に発 揮されるものと推察される.

3.3 ひび割れ進展状況

図-4 には, *H* = 300 mm の場合においての曲げひび割 れ幅の推移を時刻歴波形として示している. なお, 曲げひ び割れは高速度カメラを用い、載荷点近傍に貼り付けた隣 接するターゲットマーカーの距離として評価した.ここで は、載荷点位置のターゲットマーカーとその左右のター ゲットマーカーの距離について画像計測した.

図より,いずれの試験体も重錘衝突後ひび割れ幅が増大 し,最大値を示した後,ひび割れ幅が残留する性状を示し ている.また,PFC2-H300 試験体の曲げひび割れが最も小 さく,その最大値は1mm 程度である.文献⁵⁾によると鋼 繊維混入率2%のPFCの引張軟化曲線においては,ひび 割れ発生後に一定の引張応力を保持できるひび割れ開口幅 が1mm 程度弱であることから,PFC2-H300 試験体は衝撃 載荷実験終了後においても実験前と概ね同等の曲げ耐力を 保持しているものと推察される.

このように、本実験においては PFC 試験体に鋼繊維を 2% 混入することにより、耐衝撃性能が飛躍的に向上する ことが明らかになった. 今後は断面寸法が異なる場合や、 RC/PC 構造とした場合に関する検討を推進する必要がある ものと考えている.

4. **まとめ**

1) 圧縮強度が高く、かつ繊維混入率が高い場合ほど、コ



図-3 実験終了後におけるひび割れ分布性状



図-4 H = 300 mm の場合のひび割れ幅の時刻歴波形

ンクリート梁の耐衝撃性能が向上する.特に,耐衝撃 性能は PFC に鋼繊維を 2% 混入することで飛躍的に 向上する.

- 2) 衝撃載荷時におけるコンクリート梁のひび割れ開口幅は、PFC に鋼繊維を2% 混入した場合において最も小さい.これは、PFC 鋼繊維間の付着抵抗が引張靭性能の向上に大きく寄与しているためと考えられる.
- 3) 衝撃荷重時におけるコンクリート梁のひび割れ開口幅が、1 mm 程度以下の場合には、梁は著しい角折れには至らない.これは、PFCの引張軟化曲線の性状と対応する結果である.

参考文献

- 日本コンクリート工学会:繊維補強セメント系複合 材料の新しい利用法に関するシンポジウム, JCI-C82, 2012.9
- 2) 土木学会:繊維補強コンクリートの構造利用研究小 委員会成果報告書,コンクリート技術シリーズ106, 2015.8
- 3) 土木学会:超高強度繊維補強コンクリートの設計・施 工指針(案),コンクリートライブラリー113,2004
- 4)河野克哉,森香菜子,多田克彦,田中敏嗣:世界最高 強度を発現するコンクリートの開発ならびにさらなる 性能向上の可能性,コンクリート工学,Vol. 54, No. 7, pp.702-709, 2016.7
- 5) 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
- 6)防衛施設学会:高速衝突を受けるコンクリート構造物の局部破壊に対する設計ガイドライン(案),2014.3