# 論文 圧縮強度 400 N/mm<sup>2</sup> を有するコンクリート梁の耐衝撃挙動に及ぼ す鋼繊維混入率の影響

河野克哉<sup>\*1</sup>·栗橋祐介<sup>\*2</sup>·多田克彦<sup>\*3</sup>·小室雅人<sup>\*4</sup>

要旨:本研究では, 圧縮強度 400 N/mm<sup>2</sup> を有する無孔性コンクリート (PFC)の耐衝撃挙動に及ぼす鋼繊維混 入率の影響を検討するため, PFC 梁の重錘落下衝撃実験を行った。また, PFC の材料試験結果に基づき PFC 梁の全塑性モーメントを求め, 簡易な塑性解析により最大応答変位の算定を試みた。その結果, 1) PFC の鋼 繊維混入率を大きくすることにより梁の耐衝撃性を向上可能である, 2) 載荷点部に明瞭な塑性ヒンジが形成 される場合には, PFC 梁の全塑性モーメントを用いた塑性解析により, 最大応答変位を概ね推定可能である, ことなどが明らかになった。

キーワード:無孔性コンクリート,鋼繊維補強,衝撃載荷実験,最大応答変位

## 1. はじめに

近年,橋梁上部工の軽量化などを目的として,超高強 度繊維補強コンクリートが実用化されている<sup>1)~3)</sup>。これ は,上部工の自重を軽減することにより,下部工や基礎 工の断面を縮小可能であり,建設コストの縮減を期待で きるためである。さらに,この種のコンクリートは耐久 性が極めて高いことから,ライフサイクルコストも縮減 される。

また,最近では,400 N/mm<sup>2</sup>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 養生を行うことで水和反応を促進して空隙を極限まで減 じた無孔性コンクリート (以下,Pore free concrete (PFC)) である  $^{4)\sim 6)}$ 。また,この PFC を鋼繊維で補強した場合の 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<sup>7)</sup>。

また,著者らの研究グループでは,耐衝撃用途構造物

やその補修補強材料として利用することを目的に, PFC 梁の重錘落下衝撃実験を実施しその耐衝撃性を検証して いる<sup>8)</sup>。しかしながら,その耐衝撃性に及ぼす断面寸法 や繊維混入率および入力エネルギーの大きさの影響につ いては検討されていないのが現状であり,繊維補強 PFC 梁の実用化のためには種々のパラメータの影響について 検討することが重要であるものと考えられる。

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データの収集を目的に,繊維補強 PFC 梁の重錘落下実験を行った。ここでは,断面寸法お よび鋼繊維混入率の異なる4種類の梁を対象に,重錘落 下高さを変化させた実験により検討を行った。

## 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 に用いた材料を一覧にして示してい

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 <sup>2</sup> /g,密度:3.24 g/cm <sup>3</sup>			
	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

\*1 太平洋セメント(株)中央研究所 第2研究部 主席研究員 博(工)(正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工)(正会員)

\*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 リーダー(正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工)(正会員)

名称		W/B (%)		単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							71. *2	<b>売</b> /二月 *3	圧縮
	名称		w		В		G	Б	cp*1	DE*1		至X里"	強度
				L	Q	SF	3	Г	5P.1	DF -	(mm)	(%)	(N/mm <sup>2</sup> )
	PFC1 PFC2 15	15	5 199	00 076 2	247	347 102	927	78	B × 2.5 %	$B \times 0.02$ %	269	3.9	375
		15		8/6	8/6 34/			157			276	3.2	374

表-2 繊維補強 PFC の配合と試験結果

\*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



図-1 PFC の材料特性に関する参考データ<sup>7)</sup>

る。また, 表-2 には, 繊維補強 PFC の配合と試験結果 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 PFC の全体積の外割で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<sup>6)</sup> を参照されたい。

## (2) 練混ぜおよび養生方法

材料の練混ぜはオムニミキサ(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,所定の型 枠に打ち込んで,型枠内で封緘養生(20℃)を行い,材齢 48 h で脱型した。脱型後には,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

表-3 試験体の一覧 鋼繊維 重錘落下 梁高 試験体名 混入率 高さ (mm)(%) H (mm)A-PFC1-100 100 A-PFC1-200 1 200 A-PFC1-300 300 25 A-PFC2-100 100 A-PFC2-200 200 2 A-PFC2-300 300 B-PFC1-300 300 B-PFC1-600 1 600 B-PFC1-900 900 50 B-PFC2-300 300 B-PFC2-600 600 2 B-PFC2-900 900

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℃/h,最高温度90℃,最高温度保持時間 48 h,降温速 度 15℃/h)の後,さらに加熱養生(昇温速度 60℃/h,最高 温度 180℃,最高温度保持時間 48 h,降温速度 60℃/h,1 atm)を行った。

## (3) 繊維補強 PFC の力学的特性

繊維補強 PFC の圧縮強度は,**表**-2 に示した通りで ある。なお,本論文における PFC1, PFC2 の配合は,文 献<sup>7)</sup>における T-CPC-1, T-CPC-2 と同様である。ただし, 圧縮強度は多少異なる。また,PFC に鋼繊維を混入しな かった場合の圧縮強度は 404 N/mm<sup>2</sup> であった。**図**-1 に は,参考のためこれらの材料の圧縮応力-ひずみ関係, 切欠きはりの3点曲げ試験による荷重-ひび割れ開口変 位 (P-CMOD) 曲線,および P-CMOD 曲線から求めた引張 軟化曲線を示している。詳細については文献<sup>7)</sup>を参考に されたい。

# 2.2 載荷実験の概要

# (1) 試験体の一覧

表-3 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、梁高、鋼繊維混入率および重錘落下高さを変化させた全12体である。試験体名の第1項目は梁高(A:25 mm, B:50 mm),第2項目の文字列PFCに付随



する数値は鋼繊維混入率(%)である。また、第3項目の 数値は, 重錘落下高さ H (mm) を示している。なお, 既 往の研究<sup>9)</sup>では,部材厚 25 mm (A 試験体)の場合におい て、鋼繊維無混入では落下高さH=3mmで崩壊し、梁が 二分することを確認している。

図-2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 のA試験体と100×50mmのB試験体である。なお、ス パン長は 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 よび支点反力は起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを 用いて測定することとし,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-3**には、各試験体の時刻歴応答波形を示している。 なお、PFC 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や載荷点変位が適切に評価されない



図-4 実験終了後におけるひび割れ分布性状

ケース (A-PFC1-H300 および B-PFC1-H900) に関しては, 検討から除外することとした。

図-3(a)より,重錘衝撃力は重錘衝突直後に最大振幅 を示し継続時間の極めて短い波形が励起され,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ことが 分かる。なお,最大振幅は,重錘落下高さHが大きい場 合ほど大きくなる傾向にある。

図-3(b)より,支点反力は正弦半波状の波形を呈して いることが分かる。ただし,B-PFC1/2試験体の落下高さ H=300mmの場合には,重錘衝突直後に高周波成分が励 起されている。これは,梁の損傷度が小さいために,重 錘衝突により励起された高周波成分が支点部に伝播した ことによるものと考えられる。

また, A-PFC, B-PFC 試験体について, それぞれ同一落 下高さのケースを比較すると, 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。なお, 後述の断面分割法による計算 では, 鋼繊維混入率を 1% から 2% に増加させると梁の降 伏前の曲げ剛性も 2 倍になることを確認している。

図-3(c)より,載荷点変位はいずれの試験体の場合に おいても最大振幅を示した後,復元するものの変位が残 留していることが分かる。また,復元後における変位の 振動は見られないことから,梁はほぼ完全に塑性変形状 態に至っているものと考えられる。なお,A-PFC,B-PFC 試験体ともに,落下高さが高くなるほど最大変位や残留変 位が大きくなる傾向にある。特に,B-PFC1-900試験体は, 後述するように試験体が完全に分離して崩壊に至った。

## 3.2 ひび割れ分布性状

図-4 には実験終了後における各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。なお、図には各 試験体の残留変位  $\delta$ , も併せて示している。

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。また、B-PFC 試験体の場合には、載荷点部においてひび割れが大きく 開口する傾向にあるのに対し、A-PFC 試験体の場合には、 載荷点近傍においてひび割れが分散して発生する傾向に ある。これは、A-PFC 試験体は B-PFC 試験体と比較して 曲げ剛性が小さく、梁全体がたわみやすいことによるも のと推察される.

なお, B-PFC1-900 試験体は, 載荷点の右側においてひ び割れが開口して分離した。そのため, スパン中央部に おけるひび割れの大きな開口は見られない。



図-5 塑性ヒンジを有する梁の変形状況

## 4. 材料試験値に基づく PFC 梁の最大応答変位の算定

前章までの検討では、PFC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす断 面寸法,繊維混入率および重錘落下高さの影響を定量的 に示した。ここで,実験結果のうち最大応答変位は、PFC 梁の耐衝撃性を評価し得る指標の1つであるものと考え られる。そのため,本章では、PFCの材料試験結果に基 づき,各試験体の最大応答変位の算定を試みる。

最大応答変位は、スパン中央部に塑性ヒンジを有する梁 に関する簡易な塑性解析により評価することとした<sup>10)</sup>。 これは、本実験において、多くの PFC 梁がスパン中央部 でひび割れが大きく開口し、角折れする変形性状を示し ているためである。

最大応答変位  $\delta_{uc}$  の算定は,まず  $\mathbf{2} - 5$ のようにスパン 中央部に塑性ヒンジが形成され角折れする状況を想定し, 重錘落下による運動エネルギー  $W_e$  を式(1)により求める。

$$W_e = m \cdot g \cdot (h + \delta_{uc}) \tag{1}$$

ここで, m: 重錘質量, g: 重力加速度, h: 重錘落下高さ, である。次に, 塑性ヒンジの回転による内部仕事 W<sub>i</sub> を式 (2) により求める。

$$W_i = M_p \cdot 2\theta_p \tag{2}$$

$$\theta_p = 2\delta_{uc}/L \tag{3}$$

ここで,  $M_p$ : 全塑性モーメント,  $\theta_p$ : 塑性回転角, L: ス パン長, である。最後に,  $W_e = W_i$  であることから, 最大 応答変位  $\delta_{uc}$  は, 式(4)により求めることができる。

$$\delta_{uc} = \frac{m \cdot g \cdot h}{4M_p/L - m \cdot g} \tag{4}$$

また,全塑性モーメント $M_p$ は,文献7)の圧縮強度お よび鋼繊維の架橋応力を参照して断面分割法により求め た。ここで,架橋応力は図-1(c)に示しているように, ひび割れ発生後において鋼繊維が分担する引張応力であ る。本研究では,PFCが引張軟化域に到達する前の曲げ



図-6 曲げモーメント M - 曲率 φ 関係

モーメントを全塑性モーメント  $M_p$  と仮定する。なお,引 張軟化域を考慮した詳細な衝撃応答解析は、今後の課題 として引き続き検討する予定である。

図-6には、各試験体の曲げモーメントM-曲率関係  $\phi$ に関する計算結果を示している。断面分割法による計 算では、引張軟化域を考慮していないことより、ここで は既往の研究<sup>9)</sup>におけるA試験体の静載荷実験結果を 参考に下縁ひずみが2%に到達した時点で計算を終了し、 その時点の曲げモーメントを全塑性モーメント $M_p$ と仮 定した。図より、いずれの試験体も計算終了時において は、ほぼ全塑性状態に至っていることが分かる。

**表**-4には,各試験体に関する全塑性モーメント $M_p$ と 最大応答変位に関する計算値と実測値を比較して示して いる。表より,A-PFC1/2 試験体の場合には,最大応答変 位の計算値は実測値を2倍程度大きく評価していること が分かる。これに対し,B-PFC1/2 試験体の場合には,重 錘落下高さH = 300 mmの場合を除き,計算最大応答変 位 $\delta_{uc}$ は,実測値 $\delta_{ue}$ を±15%程度の精度で評価してい ることが分かる。

これは、図-4のひび割れ図を参照すると、A-PFC1/2 試験体の場合には、微細なひび割れが分散して発生して いるのに対し、B-PFC1/2 試験体の場合には、重錘落下高 さH=300mmの場合を除き、スパン中央部近傍において ひび割れが大きく開口しているため、明瞭な塑性ヒンジ が形成され計算条件と同様の変形性状を示したことによ るものと推察される。

これらのことから、載荷点部に塑性ヒンジが形成され る場合には、PFC 梁の全塑性モーメント M<sub>p</sub>を用いた塑 性解析により、最大応答変位を概ね推定可能であること が明らかになった。また、このことより PFC の材料試験 結果は、衝撃応答解析における材料構成則モデルの特性 値として適用できる可能性があるものと推察される。

	PFC のフ	材料特性值	M- <i>φ</i> に関	する計算	結果	重錘	計算最大	実測最大	
試験体名	圧縮	鋼繊維の	全塑性	曲率	中立軸	落下	応答変位	応答変位	(2)/(1)
	強度	架橋応力7)	モーメント		位置	高さ	$\delta_{uc}$	$\delta_{ue}$	
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	$M_p$ (kNm)	(1/m)	(mm)	(mm)	(mm) (1)	(mm) (2)	
A-PFC1-100						100	24.4	10.3	0.42
A-PFC1-200	375	4.19	0.125	0.83	0.89	200	48.8	14.9	0.31
A-PFC1-300						300	73.2	31.8	0.43
A-PFC2-100						100	11.2	7.5	0.67
A-PFC2-200	374	8.42	0.243	0.847	1.37	200	22.4	11.0	0.49
A-PFC2-300						300	33.7	16.1	0.48
B-PFC1-300						300	15.3	7.3	0.48
B-PFC1-600	375	4.19	0.506	0.413	1.82	600	30.6	26.4	0.86
B-PFC1-900						900	45.8	(崩壊)	-
B-PFC2-300						300	7.5	5.2	0.70
B-PFC2-600	374	8.42	1.004	0.422	2.63	600	15.0	12.9	0.86
B-PFC2-900						900	22.5	23.6	1.05

表-4 全塑性モーメントおよび最大応答変位の一覧

# 5. まとめ

本研究では、圧縮強度 400 N/mm<sup>2</sup> を有する無孔性コン クリート (PFC) の耐衝撃挙動に及ぼす鋼繊維混入率、断 面寸法および入力エネルギーの大きさの影響を検討する ため、繊維補強 PFC 梁の重錘落下衝撃実験を行った。本 実験により得られた知見を整理すると以下の通りである。

- PFC の鋼繊維混入率を大きくすることにより PFC 梁 の耐衝撃性が向上する。
- 載荷点部に明瞭な塑性ヒンジが形成される場合には、 PFC 梁の全塑性モーメントを用いた塑性解析により、 最大応答変位を概ね推定可能である。
- 3) 2)より PFCの圧縮および引張特性に関する材料試験 結果は衝撃応答解析における材料構成則モデルの特 性値として適用できる可能性がある。

## 謝辞

本研究を推進するに当り室蘭工業大学大学院構造力学 研究室の院生および学部生の皆様には載荷実験,データ 整理等において多大なるご支援を頂いた.また,大場啓 汰君には論文作成において尽力して頂いた.ここに記し て感謝の意を表します.

## 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,中山莉沙,多田克彦:通常流込み成型で 460 N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度を発現する新規セメント硬化 体、プレストレストコンクリート工学会、第24回プ レストレストコンクリートの発展に関するシンポジ ウム論文集,pp.545-550,2015.10

\*: 引張縁ひずみ2% 時の結果

- 5) 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
- 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, 2016.7
- 7) 柳田龍平,中村拓郎,河野克哉,二羽淳一郎:圧縮 強度 400 N/mm<sup>2</sup>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
- 曽根涼太,河野克哉,多田克彦,栗橋祐介,小室雅人: 鋼繊維で補強した最密コンクリートの耐衝撃性,土木 学会第71回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), V-597, 2016.9
- 9) 栗橋祐介,河野克哉,曽根涼太,小室雅人,多田克 彦:圧縮強度 400 N/mm<sup>2</sup> 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, 2017.3
- 石川信隆,大野友則,藤掛一典,別府万寿博:基礎 からの衝撃工学一構造物の衝撃設計の基礎,森北出 版,2008