# 世界最強圧縮強度を有する PFC 梁に関する弾塑性衝撃応答解析

Elasto-plastic impact response analysis of PFC beams with strongest compressive strength in world

室蘭工業大学大学院	○学生員	山越 壮之助	(Sonosuke Yamakoshi)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室 雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
太平洋セメント	正 員	河野克哉	(Katsuya Kono)
室蘭工業大学大学		鈴木健太	(Kenta Suzuki)

# 1. はじめに

近年,400 MPa 以上の圧縮強度を有するセメント系材 料(以下,ポロシティフリーコンクリート,PFC)が開発さ れている<sup>1)</sup>.この材料は,現在のところ世界で最も高強度 である.本材料に関しては,早速静的な設計式を確立す るために,鋼繊維を混入した場合の力学的特性について の研究が行われている<sup>2)</sup>.本材料は,鋼繊維を混入するこ とによりその架橋効果によってせん断耐力も著しく向上 することから,静力学的な観点からの応用は勿論のこと, 耐衝撃構造物への適用についても大いに魅力のあるとこ ろである.しかしながら,実構造物への応用に向けた検 討はまだ緒に就いたばかりであり,多方面からの研究が 急がれるところである.

このような観点から,著者等の研究グループでは鋼繊 維混入 PFC 部材の耐衝撃性に係る基本的な特性を検討す ることを目的に,梁部材(以後,単に PFC 梁)にした場合 の耐衝撃性に着目し,重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し ている.本研究では,その耐衝撃挙動を精度良く評価可能 となる数値解析手法の確立を目的に,三次元弾塑性衝撃応 答解析を試み,実験結果との比較によって提案手法の妥 当性について検討を行った.なお,本数値解析には,陽 解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA を用いている.

# 2. 実験概要

# 2.1 PFC の概要

本研究で用いた PFC は,結合材には低熱ポルトランド セメント,石英微粉末およびシリカフューム,細骨材に は珪砂,混和剤には高性能減水剤ならびに消泡剤が用い られている.また,鋼繊維は外割で2%混入した.なお, 図-1には,参考のために PFC の圧縮応力-ひずみ関係, および切欠きはりの3点曲げ試験による荷重-ひび割れ 開口変位曲線から求めた引張軟化曲線の一例を示してい る.詳細については文献2)を参考にされたい.

試験体の製作は、上述の材料を練混ぜ後、所定の型枠

に打ち込み,型枠内で封緘養生を行い,材齢48hで脱型 した.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 から内部への水供給を行った.さらに吸水処理を行った 試験体は,蒸気養生の後,加熱養生を行っている.なお, 詳細に関しては文献1)を参照されたい.

#### 2.2 試験体概要

図-2には、本研究で対象とした複鉄筋配置の試験体 に関する形状寸法および配筋状況を示している.本実 験に用いた梁の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は、 150×200×1,800 mm である.本研究では、軸方向鉄筋 (D19)を下端に2本配置した単鉄筋配置,および上下端に 2本ずつ配置した複鉄筋配置の2種類について検討するこ ととした.なお、鉄筋は定着長を節約するために梁軸方 向端面に設置した厚さ9 mm の定着鋼板に溶接固定して いる.





図-2 形状寸法と配筋状況(PFC-d)

表-1 試験体一覧

試験体名	設定重錘	計算重錘	実測重錘		PFC			鉄筋
	落下高さ	衝突速度	衝突速度	配筋	圧縮強度	割裂引張強度	残存強度#	降伏強度
	$H(\mathbf{m})$	V (m/s)	V' (m/s)		$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$f_y$ (MPa)
PFC-s	1.0	4.43 4.45	4.45	単鉄筋	341.0	30.1	22.3	200
PFC-d			4.45	複鉄筋	340.5	27.3	20.3	380

<sup>#</sup> 図ー1を参考に引張強度と平均架橋応力の比から簡易に算出



写真-1 実験装置と試験体の設置状況

**表**-1には本研究で対象とした試験体の一覧を示して いる.試験体名に関して PFC に付随する第二項目は鉄筋 の配置(s:単鉄筋, d:複鉄筋)を表しており,衝撃載荷実 験は重錘落下高さを 1.0 m とした全 2 ケース実施した.ま た,表中の PFC および 鉄筋の材料特性値は,PFC の残存 強度を除き別途実施した材料試験から得られた値である. なお,残存強度  $f_r$  は  $\mathbf{Z}$ -1 (b)を参考に,引張強度および 平均架橋応力(8.42 MPa)の比を用いて,**表**-1 に示す割裂 引張強度から簡易に算出した値である.

# 2.3 実験方法

衝撃荷重載荷実験は,質量 300 kg,載荷点部直径 φ = 200 mm の鋼製重錘を所定の高さから試験体のスパン中央部に一度だけ自由落下させる単一載荷法に基づいて実施した.また,試験体両端支点部は,試験体を設置した後,跳ね上がりを防止用鋼製梁状治具で締め付けており,回転を許容したピン支持に近い構造となっている.

本実験の測定項目は、(1) 重錘に内蔵されたロードセル による重錘衝撃力、(2) 支点治具に設置されたロードセル による支点反力の合計値(以後、単に支点反力)、(3) レー ザ式非接触型変位計によるスパン中央点変位(以後、載荷 点変位)である.また、実験終了後には試験体側面につい てひび割れ分布を記録した.

# 3. 数值解析概要

#### 3.1 数値解析モデル

図-3には、本数値解析に用いた数値解析モデルの要素 分割状況を示している.図-3(a)に示すように、本数値 解析モデルは、梁の対称性を考慮して梁幅方向(x方向)お よびスパン方向(y方向)にそれぞれ2等分した1/4モデル を採用し、試験体から支点治具、鋼製重錘に至るまで実 際の形状寸法に基づき忠実にモデル化している.ただし、 軸方向鉄筋に関しては公称断面積と等価な正方形断面要 素として簡略化した.なお、梁軸方向の要素長はL=12.5 mmとしている.

適用した要素タイプは,図-3(b)に示す鋼繊維の架橋 効果をモデル化した要素(後述)は四節点シェル要素,そ れ以外は全て8節点の三次元固体要素を用いている.ま た,要素の積分点数は,いずれの要素に対しても1点積 分を基本としている.

拘束条件に関しては、それぞれの対称切断面において 法線方向変位成分を拘束しており、支点治具底部に関し ては実験時と同様にx軸回りの回転のみを許容するよう に設定した.荷重条件に関しては、重錘要素を梁上縁と 接する形で配置し、**表-1**に示す実験時の実測重錘衝突



速度V'を重錘全要素に付加することで与えている.

PFC 梁と重錘, PFC 梁と支点治具の要素間には, それぞ れ面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義 している.また, PFC 要素と軸方向鉄筋および鋼繊維の要 素間は, 完全付着を仮定した.なお,本解析では簡略化の ために, 摩擦, 重力および減衰は考慮しないこととした.

図-3(b)には、単鉄筋あるいは複鉄筋配置とした数値 解析モデルの断面図を示している.ここでは、既往の研究 <sup>3)</sup>を参考に、鋼繊維の架橋効果を簡易かつ合理的に再現す るために、PFC 要素の分割境界面部に鋼繊維の架橋効果 を考慮したシェル要素を配置する複合要素を採用するこ ととした.また、断面方向に配置した各シェル要素は全 て等厚と仮定している.その厚さ*t*は、梁幅*b*において、 鋼繊維混入率 $V_f = 2\%$ に対応した厚さとなるように、下 式により算出した.

$$t = \frac{b \times (V_f/100)}{n} \tag{1}$$

ここで, n:断面方向に配置したシェル要素の枚数である. なお,後述するように,鋼繊維の架橋効果は,残存引張強 度 f<sub>r</sub>を降伏応力とする完全弾塑性型にモデル化した. 3.2 材料物性モデル

図-4には、本数値解析で用いた PFC および鋼繊維の 架橋効果モデルの応力-ひずみ関係を示している。以下 に、各材料物性モデルの概要を述べる。

図-4(a)には、PFCの応力-ひずみ関係を示している. 圧縮側は圧縮強度に到達した段階で完全降伏するバイリ



図-4 材料構成則

ニア型としており,降伏の判定には Drucker-Prager の降伏 条件式を採用している.引張側に対しては線形の相当応 カー相当ひずみ関係を仮定し,破壊圧力に到達した段階で 引張力を伝達しないモデル(カットオフモデル)を採用し た.なお,圧縮強度および引張強度に関しては**表**-1に 示すように,別途実施した材料試験から得られた値を用 い,密度 $\rho_c$ ,弾性係数 $E_c$ およびポアソン比 $v_c$ に関して は,文献 2)を参考にそれぞれ $\rho_c = 2.5 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,  $E_c =$ 62 GPa,  $v_c = 0.19$ と設定した.

図-4(b)には、鋼繊維の架橋効果をモデル化したシェル要素の応力-ひずみ関係を示している.ここでは、図-1に示した PFC の引張応力-開口変位関係を参考に、降伏までは弾性係数  $E_p$ を有する弾性体として挙動し、降伏後は降伏強度  $\sigma_{yp}$ を保持した引張特性を有する完全弾塑性体として簡易にモデル化することとした.なお、圧縮側についても引張側と同様の特性とし、降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している.

ここで,降伏強度  $\sigma_{yp}$  は,鋼繊維の架橋効果をモデル化 したシェル要素の降伏強度であることから,鋼繊維混入 PFC の残存引張強度  $f_r$  を鋼繊維のみで負担するものと仮 定し,下式により算出した.

$$\sigma_{yp} = \frac{f_r}{(V_f/100)} \tag{2}$$

弾性係数  $E_p$  に関しては PFC 要素が圧縮強度に到達す るまでは一体となって変形すると仮定し、PFC と同様の 弾性係数 ( $E_p = 62$  GPa) と設定した.また、残存強度  $f_r$  は **表**-1 に示す値を用いることとし、単位体積質量  $\rho_p$  および ポアソン比  $v_p$  には公称値として、それぞれ  $\rho_p = 7.85 \times 10^3$ kg/m<sup>3</sup>、 $v_p = 0.3$  と設定した.

なお、図-1に示すように、鋼繊維による架橋効果が 発揮された後、さらにひび割れが開口した場合には引張 応力が減少していき、最終的には鋼繊維の架橋効果が消 失する.この現象を簡易に再現するために、本研究では PFC-s 試験体に関する載荷点変位波形を基に、破壊基準を 設定することで鋼繊維要素が削除されるエロージョンに ついても検討を行っている.

鉄筋に関して降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア 型の構成則モデルを適用した.降伏応力  $f_y$  は**表**-1に示 す値を用い,単位体積質量  $\rho_s$ ,弾性係数  $E_s$  およびポアソ ン比  $v_s$  に関しては公称値を用い,それぞれ  $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m<sup>3</sup>,  $E_s = 206$  GPa,  $v_s = 0.3$  とした.また,降伏の判定 は, von Mises の降伏条件に従うこととし,塑性硬化係数 H' は弾性係数  $E_s$  の 1% と仮定している.



支点治具,定着鋼板および重錘の全要素に関しては,実 験時に塑性変形が確認されていないことより,弾性体モ デルを適用している.弾性係数 $E_s$ およびポアソン比 $v_s$ に は公称値を用いることとし,それぞれ $E_s = 206$  GPa, $v_s =$ 0.3 と仮定している.単位体積質量 $\rho_s$ については,支点 治具および定着鋼板はともに公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m<sup>3</sup>を用いているが,重錘に関しては重錘質量 300 kg を 解析モデルの体積で除した値を入力している.

# 4. 実験および数値解析結果

# 4.1 鋼繊維要素の破壊基準検討

図-5は、PFC-s 試験体に関する載荷点変位波形に関して、鋼繊維要素の破壊基準考慮の有無における計4ケースの数値解析結果を実験結果と比較する形で示している. なお、鋼繊維要素の破壊基準は、要素の最大主ひずみ $\varepsilon_1$ が $\varepsilon_1 = 1, 3, 5\%$ を超過した段階で、その要素が削除され るものと設定した.

まず,実験結果に着目すると,10 ms 付近で最大変位を 示した後,25 ms 以降自由減衰振動状態に至っていること が分かる.一方で,数値解析結果に着目すると,いずれの 場合においても,実験結果と同様に最大変位到達後,減 衰自由振動状態に至っており,波形性状が概ね一致して いる.また,破壊基準を $\epsilon_1 = 5\%$ と設定した場合には最 大変位および残留変位もほぼ実験結果を適切に再現して いることが分かる.以上より,これ以降は鋼繊維要素に 破壊基準として $\epsilon_1 = 5\%$ の要素削除を設定したケースに ついて検討を行うこととする.

### 4.2 各種時刻歴応答波形

図-6には、本研究で対象とした2つの試験体に関して、各種時刻歴応答波形の実験結果と解析結果を比較する形で示している.黒線が実験結果を、赤線が解析結果を示しており、横軸は重錘がPFC梁に衝突した時刻を原点としている.

まず,図-6(a)に示す重錘衝撃力波形より,実験結果 に着目すると,いずれのケースにおいても,重錘衝突直 後に最大衝撃力を示す継続時間が1ms程度の第一波が励 起した後,継続時間が12ms程度の第二波が後続する波 形性状を示している.数値解析結果に着目すると,両者 ともに第一波,第二波と最大値および継続時間をほぼ適 切に再現していることが分かる.

次に、図-6(b)に示す支点反力波形より、実験結果に 着目すると、いずれのケースも、継続時間が20ms程度の 主波動が励起した後、減衰自由振動状態に至っている.数 値解析結果においても、高周波成分が卓越する傾向にあ るものの、概ね全体の波形性状を再現可能である.



図-6(c)に示す載荷点変位波形からは、数値解析結果 はいずれのケースにおいても、実験結果の最大変位およ び残留変位をほぼ適切に再現していることが確認できる.

なお、本研究の範囲内においては、配筋の有無による 大きな差異は確認できなかった.これは、PFC が 300 MPa 以上の圧縮強度を有しており、梁上縁に鉄筋を配置した 場合にその補強効果が小さいことを暗示している.

# 4.3 ひび割れ図

図-7には、本研究で対象とした2つの試験体に関して、梁側面のひび割れ分布を実験結果と数値解析結果を比較する形で示している.なお、数値解析結果は、ひび割れ発生位置を特定するために、図-4(a)で仮定したPFCの材料構成則に基づき、第1主応力が零近傍応力(±0.001 MPa)状態を示す要素を赤色で示している.

図-7(i)に示す PFC-s 試験体に着目すると,実験結果 では載荷点付近に梁下縁から上縁手前まで曲げひび割れ や斜めひび割れが進展しており,鋼繊維の架橋効果によっ て非常に密にひび割れが生じていることが分かる.また, 重錘衝突初期には曲げ波の伝播により,支点部近傍にお いては,負曲げの状態を呈すことより,梁上縁から下縁 にひび割れが生じている.この傾向は,図-7(ii)に示す PFC-d 試験体においても同様である.

一方で,数値解析結果に着目すると,いずれのケースに おいても載荷点部あるいはスパンの1/4付近に数本のひび 割れが確認できるものの,実験結果のように密にひび割れ が生じるような現象の再現には至っていない.また,負 曲げにより支点部近傍に生じるひび割れも確認できない.

## 5. まとめ

本研究では、PFC 梁の重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し、その耐衝撃挙動を精度良く評価可能な数値解析手法の確立を目的に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した.

その結果,本解析手法を適用することで,PFC 梁の各 種時刻歴応答波形をほぼ適切に評価可能であることが明 らかとなった.しかしながら,実験結果のような載荷点 部に密にひび割れが生じる現象については忠実な再現に 至っていないことより,今後は解析モデルを更に検討し, 解析精度の向上を図る予定である.

# 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, 2016.7
- 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
- 岸徳光,栗橋祐介,三上浩:PVA 短繊維を混入した RC 梁の 重錘落下挙動に関する数値シミュレーション,構造工学論文 集, Vol. 54A, pp.1044-1054, 2008.3