

鋼繊維補強無孔性コンクリート梁に関する弾塑性衝撃応答解析

室蘭工業大学大学院 学生会員 ○山越 壮之助 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人
 太平洋セメント(株) 正会員 河野 克哉 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光
 太平洋セメント(株) 正会員 小亀 大佑

1. はじめに

近年、圧縮強度 400 MPa 以上を有する無孔性コンクリート(PFC)が開発されている¹⁾。本研究では、鋼繊維補強 PFC 梁(以後、単に PFC 梁)に着目し、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た。また、別途実施した実験結果との比較により解析手法の妥当性について検討した。

2. 実験概要

表 1 には、本解析で対象とした実験ケース一覧を示している。実験では、補強鉄筋の種類と配筋の異なる 3 種類の PFC 梁を用いた。Ns と Nd 試験体は、軸方向鉄筋に D19 を用い、それぞれ下縁に 2 本(単鉄筋)、あるいは上下縁に 2 本ずつ(複鉄筋)配置している。また、Hd 試験体は、軸方向鉄筋に高強度鉄筋(USD685A)を用い、上下縁に 2 本ずつ配置した。なお、いずれの試験体もせん断補強筋は使用していない。図 1 には、Nd 試験体の形状寸法を示している。梁の形状寸法(梁幅×梁高×スパン長)は、150×200×1,800 mm である。

衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg の鋼製重錘を高さ

表 1 実験ケース一覧

試験体名	配筋	落下高さ (m)	実測 重錘速度 $V(\text{m/s})$	PFC 圧縮強度 f_c' (MPa)	鉄筋 降伏強度 f_y (MPa)
Ns	単鉄筋	1.0	4.45	341	380
Nd	複鉄筋			341	
Hd			4.38	361	712

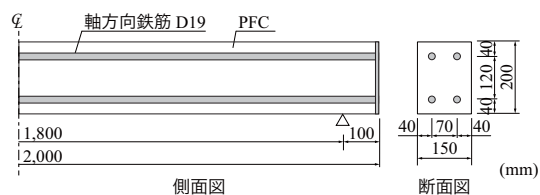


図 1 試験体概要 (Nd 試験体)

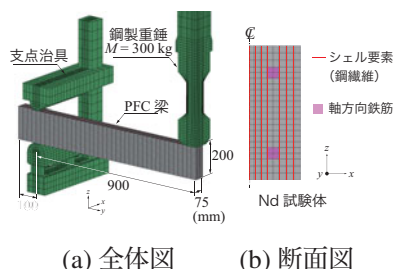


図 2 有限要素モデル

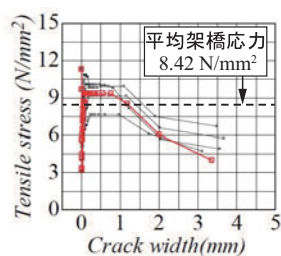
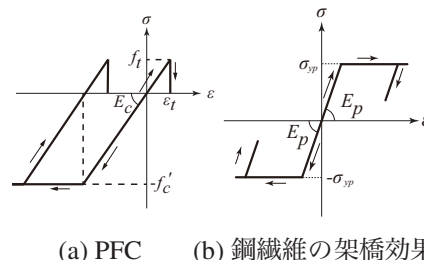
図 3 PFC の引張軟化曲線¹⁾

図 4 材料構成則

$H = 1.0$ m から試験体のスパン中央部に一度だけ自由落下させることで実施した。本実験の測定項目は、1) 重錘衝撃力、2) 合支点反力(以後、単に支点反力)、3) 載荷点変位である。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た。

3. 数値解析概要

図 2 には、本数値解析に用いた有限要素モデルを示している。ここでは、梁の対称性を考慮した 1/4 モデルを採用した。軸方向鉄筋は公称断面積と等価な正方形断面要素として簡略化している。

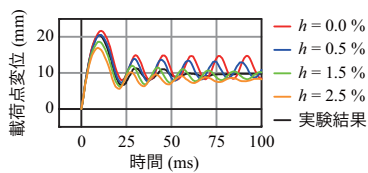
境界条件に関しては、対称切断面で法線方向変位成分を拘束し、支点治具底部に関しては実験時と同様にピン支持と設定した。解析は、重錘要素を梁上縁と接する形で配置し、実験時の実測重錘衝突速度 V を重錘全要素に付加することで実施した。PFC 梁と重錘、PFC 梁と支点治具間には、接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。なお、除荷後の減衰自由振動特性を再現するために、鉛直方向最低次固有振動数に対して、減衰定数を 0~2.5% まで変化させた予備解析を実施した。

図 3 には、PFC の引張軟化曲線¹⁾を示している。本研究では、このような軟化特性および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 要素の分割境界面に鋼繊維の架橋効果を考慮したシェル要素を配置することとした。なお、鋼繊維の架橋効果は、図 3 に示すようにひび割れ幅の増大に伴い、最終的には鋼繊維の破断によって消失する。本解析では、この現象を数値解析的に評価するために鋼繊維に対する破断ひずみ(エロージョン)を設定し、閾値の検討も行った。

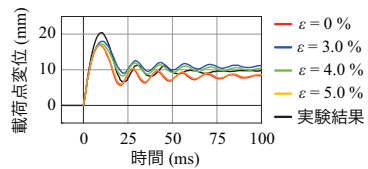
図 4 には、本数値解析で用いた PFC および鋼繊維の架橋効果モデルの応力-ひずみ関係を示している。PFC は、圧縮側は圧縮強度に到達した段階で完全降伏するバイリ

キーワード：無孔性コンクリート、鋼繊維、耐衝撃性、衝撃応答解析、構成則

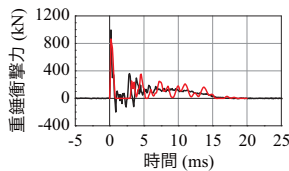
連絡先：〒050-8585 室蘭工業大学大学院 もの創造系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX 0143-46-5228



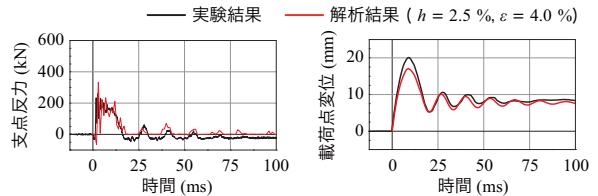
(i) 最適減衰定数 h の検討
(破壊基準なし)



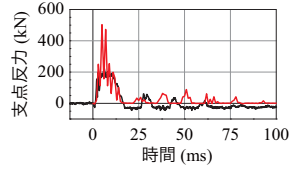
(ii) 最適破壊基準の検討 ($h = 2.5\%$)



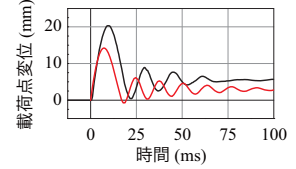
(a) 重錘衝撃力



(i) Nd 試験体



(ii) Hd 試験体



(c) 荷点変位

図5 Ns 試験体の荷点変位波形

図6 各種時刻歴応答波形の比較

ニア型としており、引張側は引張強度に到達した段階で引張応力を伝達しないモデルを採用した。なお、引張強度は文献1)を参考に決定した。圧縮強度に関しては表1の値を用い、密度 ρ_c 、弾性係数 E_c およびポアソン比 ν_c に関しては、それぞれ $\rho_c = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_c = 61.7 \text{ GPa}$ 、 $\nu_c = 0.19$ と設定した。

一方、鋼繊維の架橋効果は、完全弾塑性体として簡易にモデル化し、その降伏強度 σ_{yp} は、図3に示す平均架橋応力を鋼繊維のみで負担するものと仮定した。また、ひび割れ発生時まではPFCと同様に変形するものとし、弾性係数 E_p は、PFCと同等の値を用いることとした。

4. 数値解析結果及び考察

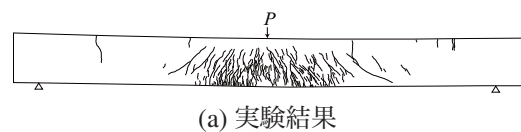
図5には、Ns試験体の荷点変位波形について、減衰定数 h および鋼繊維の破断ひずみ ε を変化させた数値解析結果を実験結果と比較して示している。

図より、減衰定数を $h = 2.5\%$ とし、かつ鋼繊維の最大主ひずみを $\varepsilon = 4.0\%$ とした場合において、最大変位および減衰自由振動状態を概ね再現可能であることが分かる。以下、これらの条件下で検討を行うこととする。

図6には、NdおよびHd試験体に関して、実験結果と解析結果を比較する形で各種時刻歴応答波形を示している。Nd試験体に着目すると、数値解析結果は実験結果よりも最大変位を若干過小評価する傾向にあるものの、梁全体の衝撃応答特性を概ね再現していることが分かる。

一方、Hd試験体に着目すると、数値解析結果は実験結果の重錘衝撃力をほぼ適切に評価しているものの、最大変位および残留変位を過小に評価している。

図7には、NdおよびHd試験体について、実験結果と解析結果のひび割れ分布を示している。Nd試験体に着目すると、実験結果および数値解析結果において荷点近傍部の曲げひび割れや、支点近傍部の梁上縁から下縁に向かって進展するひび割れが確認できる。一方で、Hd試

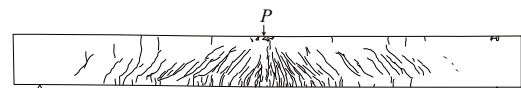


(a) 実験結果

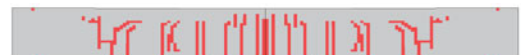


(b) 解析結果

(i) Nd 試験体



(a) 実験結果



(b) 解析結果

(ii) Hd 試験体

図7 ひび割れ分布の比較

験体に関しては、実験結果において斜めひび割れが多数生じているものの、数値解析結果では必ずしも適切にひび割れ分布を再現していないことが分かる。

5. まとめ

- (1) 本数値解析手法を適用することで、普通鉄筋を配筋したPFC梁の耐衝撃挙動を概ね再現可能である。
- (2) 一方、高強度鉄筋を配筋した場合には、数値解析結果ではその効果が明確に確認できたものの、実験結果とは必ずしも一致していないことから、更に検討が必要である。

今後は、実験的検討を継続するとともに、要素長や鋼繊維のモデル化に関して解析手法を改善し、更なる解析精度の向上について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 圧縮強度 400 N/mm^2 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.