

論文 主鉄筋に異形 PC 鋼棒を用いた鋼繊維補強無孔性コンクリート梁の非線形有限要素解析

Erdenesuren Gantulga^{*1}・小室 雅人^{*2}・瓦井 智貴^{*3}・岸良 竜^{*4}

要旨: 本研究では、鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete) 部材の基礎的な耐荷力特性を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として、主鉄筋に PC 鋼棒を使用した PFFRC 梁を対象に、三次元非線形有限要素解析を実施した。提案した解析手法の妥当性は、別途実施した静荷重実験結果との比較により検討した。その結果、提案手法を用いることにより、実験結果の荷重-変位関係や梁下縁のひずみ分布を良好に再現できることを確認した。

キーワード: 鋼繊維補強, 無孔性コンクリート, 非線形有限要素解析, PC 鋼棒

1. はじめに

著者らの研究グループでは、圧縮強度 400 MPa 以上を有し、耐摩耗性や非透水性、非透気性、塩化物イオンの非拡散性にも優れる無孔性コンクリート (Porosity Free Concrete, PFC)¹⁾に着目し、同材料の耐衝撃用構造物への適用を念頭に研究を進めている。具体的には、PFC に鋼繊維を混入した鋼繊維補強無孔性コンクリート (Porosity-Free Fiber-Reinforced Concrete, PFFRC) 梁を対象として、圧縮強度、主鉄筋本数、および鋼繊維混入率を変化させた重錘落下衝撃荷重実験を実施し、耐衝撃性に関する基礎データの収集を行ってきた²⁾⁻⁵⁾。また、これらの検討の一環として、PFFRC 梁の基礎的な耐荷力特性を把握するために、静荷重実験も実施している⁶⁾。今後、PFFRC の実構造物への効率的な応用・展開を進めるためには、実験的検討に加え数値解析的手法による検討も重要であると考えられる。

本研究では、PFFRC 部材の静的な耐荷力特性に着目し、これを適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、別途実施した PFFRC 梁の静荷重実験⁶⁾を対象に三次

元非線形有限要素解析を実施した。得られた数値解析結果と実験結果を比較することにより、提案する解析手法の妥当性を検証した。なお、本数値解析には有限要素解析プログラム DIANA⁷⁾を用いた。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本研究で対象とした PFFRC 梁の形状寸法を示している。PFFRC 梁の形状寸法 (梁幅×梁高×スパン長) は、120×120×1,400 mm である。主鉄筋には、PC 鋼棒 (φ12.6) を用い、その本数を 1, 2, 3 本 (鉄筋比: 0.011, 0.022, 0.033) と 3 水準に変化させた。鋼繊維の混入率は 3.5% である。なお、せん断補強筋は配筋していない。また、PFFRC 梁の製作方法の詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

表-1には、本実験で用いた試験体一覧と材料物性値を示している。なお、表中の材料物性値は、別途実施した材料試験から得られた PFFRC の弾性係数 E_c および圧縮強度 f'_c 、ミルシート (鋼材検査証明書) から得られた PC 鋼棒の降伏強度 f_y および引張強度 f_u である。

2.2 実験方法と測定項目

写真-1には、静荷重実験の状況を示している。静荷重実験は、3点曲げ試験を採用し、梁幅方向に 400 mm、梁軸方向に 100 mm の載荷板を梁のスパン中央部に

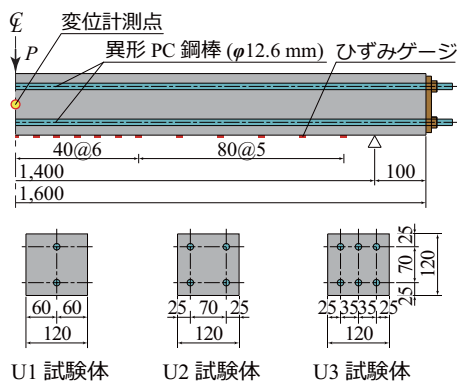


図-1 試験体の形状寸法および配筋

表-1 試験体一覧および材料物性値

試験体名	PC 鋼棒本数 (本)	鋼繊維混入率 (%)	PFFRC		PC 鋼棒	
			弾性係数 E_c (GPa)	圧縮強度 f'_c (MPa)	降伏応力 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)
U1	1	3.5	61.4	318	1,392	1,488
U2	2					
U3	3					

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士前期課程 環境創生工学系専攻 (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 教授 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 助教 博(工) (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進部高機能コンクリートチーム 博(工) (正会員)

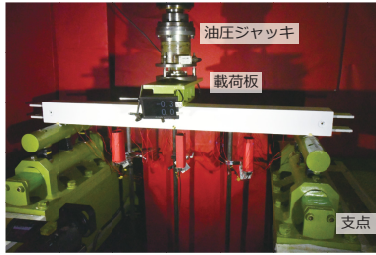


写真-1 実験状況

設置し、油圧ジャッキを用いて荷重を作用させることにより実施した。実験は、主鉄筋が降伏して最大荷重に到達後、ひび割れが大きく開口し荷重が低下するまで実施した。

本実験における計測項目は、1) 荷重荷重 P 、2) スパン中央の断面高さの $1/2$ に位置する計測点 (図-1 参照) における鉛直変位 δ (以後、単に変位)、3) 梁下縁部の軸方向ひずみである。なお、荷重荷重は油圧ジャッキに取り付けた静荷重測定用ロードセルを、変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。また、ひずみ計測には検長が 10 mm のひずみゲージを用い、微細なひび割れにも追従できるように、目付量が 280 g/m^2 のアラミド繊維束3本を梁下縁中央部に接着し、その上にひずみゲージを接着することとした。なお、ひずみゲージは、図-1 に示すようにスパン中央から支点に向かって、 240 mm の範囲までは 40 mm 間隔とし、それ以降は 80 mm 間隔で貼付した。さらに、実験終了後にはひび割れ分布の記録も行った。

3. 数値解析概要

3.1 有限要素モデル

図-2には、数値解析モデルを示している。実験条件と同様に、梁軸方向に 100 mm の荷重板をスパン中央部に作成し、梁上面とはインターフェイス要素を介して接触するようにモデル化した。インターフェイス要素は、法線 (z 軸) 方向の剛性を大きくし、せん断 (x, y 軸) 方向の剛性に関しては限りなく小さな値 ($=0.001\text{ N/mm}^3$) を設定した。支点に関しては、支点治具のモデル化が煩雑であることから、支点治具を参考に丸棒 (直径 100 mm) で簡略化することとし、梁下面と丸棒間には荷重板と同様にインターフェイス要素を用いた。梁に使用した要素は8節点固体要素とし、要素サイズは 10 mm とした。PC 鋼棒と PFFRC の付着特性に関する詳細なデータが得られていないため、本研究ではPC 鋼棒に埋め込み鉄筋要素を適用し、両者が完全に付着しているものと仮定した。

数値解析は、荷重板に鉛直 (z 軸) 方向変位を与えることで実施し、1ステップの変位量は 0.1 mm と設定した。

3.2 材料構成則

(1) PFFRC

本研究では、PFFRC に関して詳細な材料実験を実施し

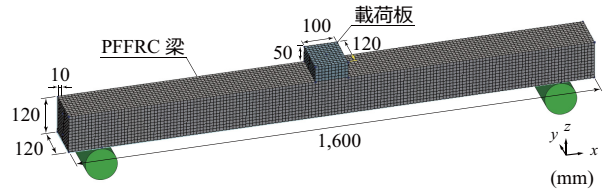


図-2 数値解析モデル

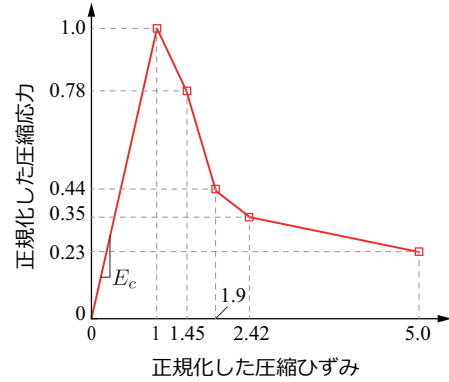


図-3 正規化した圧縮応力-ひずみ曲線

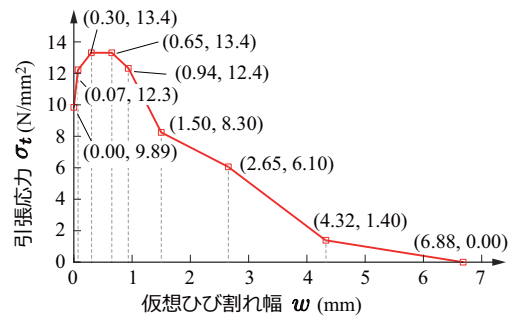


図-4 引張軟化曲線

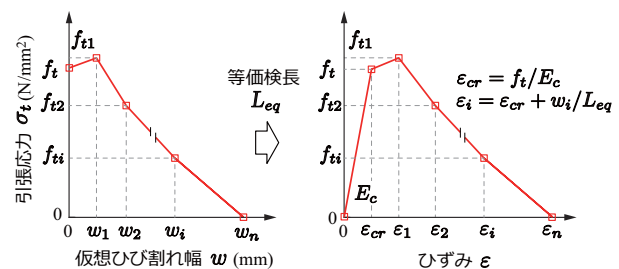


図-5 ひび割れ軟化曲線から引張応力-ひずみ関係への変換

ていないことから、圧縮軟化および引張軟化挙動に関しては既往の研究成果をもとに材料構成則を設定した。圧縮軟化挙動には、黒田らの論文⁸⁾を参考に図-3に示すような正規化した圧縮応力-ひずみ関係を設定した。

また、引張軟化挙動についても黒田らの論文⁸⁾に記載されている引張軟化曲線を参考にし、その挙動をトレースする形で図-4に示すように設定した。なお、数値解析では引張応力-ひずみ関係を仮定する必要があることか

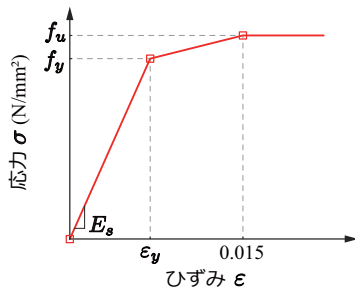


図-6 PC鋼棒の応力-ひずみ関係

ら、図-5に示すように等価検長 L_{eq} を用いて図-4に示す仮想ひび割れ幅 w をひずみ ε に換算することとした。ひび割れの発生までは弾性係数 E_c で線形挙動を示すものとし、ひび割れ発生以降は、ひび割れ発生ひずみ ε_{cr} をそれ以降のひずみと足し合わせることによって換算した。等価検長 L_{eq} には、柳田らが提案した次式⁹⁾を用いた。

$$\frac{L_{eq}}{h} = 0.99 \left[1 - \frac{1}{\left(1.07 + 83.7 \frac{h}{l_{ch}} \right)^{0.7}} \right] \quad (1)$$

ここで、 L_{eq} : 等価検長

h : 梁高さ

l_{ch} : 特性長さ ($= G_f \cdot E_c / f_t^2$)

特性長さに含まれる G_f は破壊エネルギー、 f_t は引張強度である。なお、本研究では、使用した PFFRC に関する詳細な材料試験を実施していないことから、鋼繊維混入率が 3.5% の既往の研究⁸⁾を参考に $G_f = 34.7 \text{ N/mm}$ 、 $f_t = 12.4 \text{ N/mm}^2$ と設定した。また、梁高さ h に関しては、主鉄筋の影響を排除するために、便宜的に上下 PC 鋼棒間の軸線距離である 70 mm と設定した。ひび割れモデルには、DIANA で提供されている分散ひび割れモデル (回転ひび割れモデル)⁷⁾を用いた。

(2) PC 鋼棒

図-6には、PC 鋼棒の応力-ひずみ関係を示している。PC 鋼棒の降伏応力 f_y および引張強度 f_u は、表-1に示す値を用い、弾性係数 E_s は 200 GPa と設定した。なお、引張強度時のひずみに関しては土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾に基づき、 $\varepsilon = 0.015$ と設定し、それ以降はひずみのみが増大するものと仮定した。降伏判定には von Mises 条件を用いた。

4. 数値解析結果と考察

4.1 荷重-変位関係

図-7には、数値解析から得られた荷重-変位関係を実験結果と比較する形で示している。また、表-2には実験結果および数値解析結果から得られた最大荷重 P_{max} とその時点の変位 δ_{max} を一覧にしている。

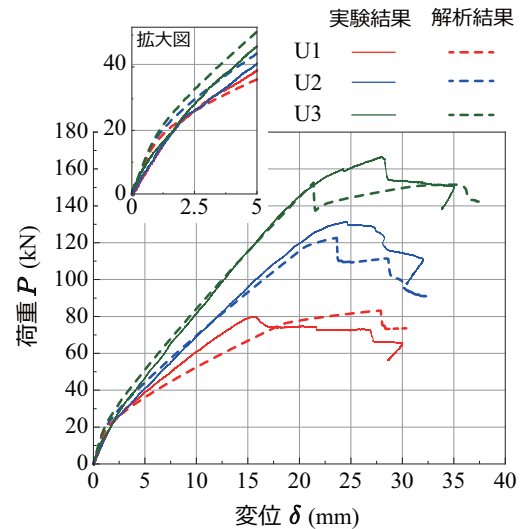


図-7 荷重-変位関係

表-2 最大荷重および到達時変位に関する比較

試験体名	実験結果		解析結果	
	最大荷重 $P_{e,max}$ (kN)	到達時変位 $\delta_{e,max}$ (mm)	最大荷重 $P_{a,max}$ (kN)	到達時変位 $\delta_{a,max}$ (mm)
U1	81	16	83.2	27.5
U2	133	25	122.7	23.3
U3	168	28	155.0	21.5

まず、数値解析結果の初期勾配に着目すると、いずれの試験体においても数値解析結果は実験結果より若干大きく示されている。一方、ひび割れ発生後の 2 次勾配に着目すると、主鉄筋が 1 本の U1 試験体の場合には数値解析結果が実験結果より小さく評価される傾向が見られるものの、2 本以上の U2 および U3 試験体の場合には両者は非常によく一致している。表-2に示す各試験体の最大荷重 P_{max} およびその到達時変位 δ_{max} について、実験結果と数値解析結果を比較すると、U1 試験体の場合には最大荷重は両者でほぼ一致しているものの、その到達時変位に大きな差が確認される。一方、U2 および U3 試験体の場合には、数値解析結果の最大荷重は実験結果よりも過小に評価しているものの、全体的に見ると実験結果の荷重-変位関係を概ね再現しているものと判断される。

4.2 梁下縁の軸方向ひずみ分布

図-8には、代表的な変位時における梁下縁の軸方向ひずみについて実験結果と数値解析結果を比較して示している。ここでは代表的な変位として、1) 荷重の立ち上がり時点の変位 ($\delta_1 = 2.5 \text{ mm}$)、2) 実験結果における最大荷重時到達変位 $\delta_{e,max}$ の中間変位 ($\delta_2 = 7.5$ あるいは 12.5 mm)、3) 最大荷重到達直前の変位 (δ_3)、および 4) 最大荷重後の変位 (δ_4) を選択した。また、図中の下向きの矢印は、実験結果において 2% を超えるひずみが生じていることを示している。

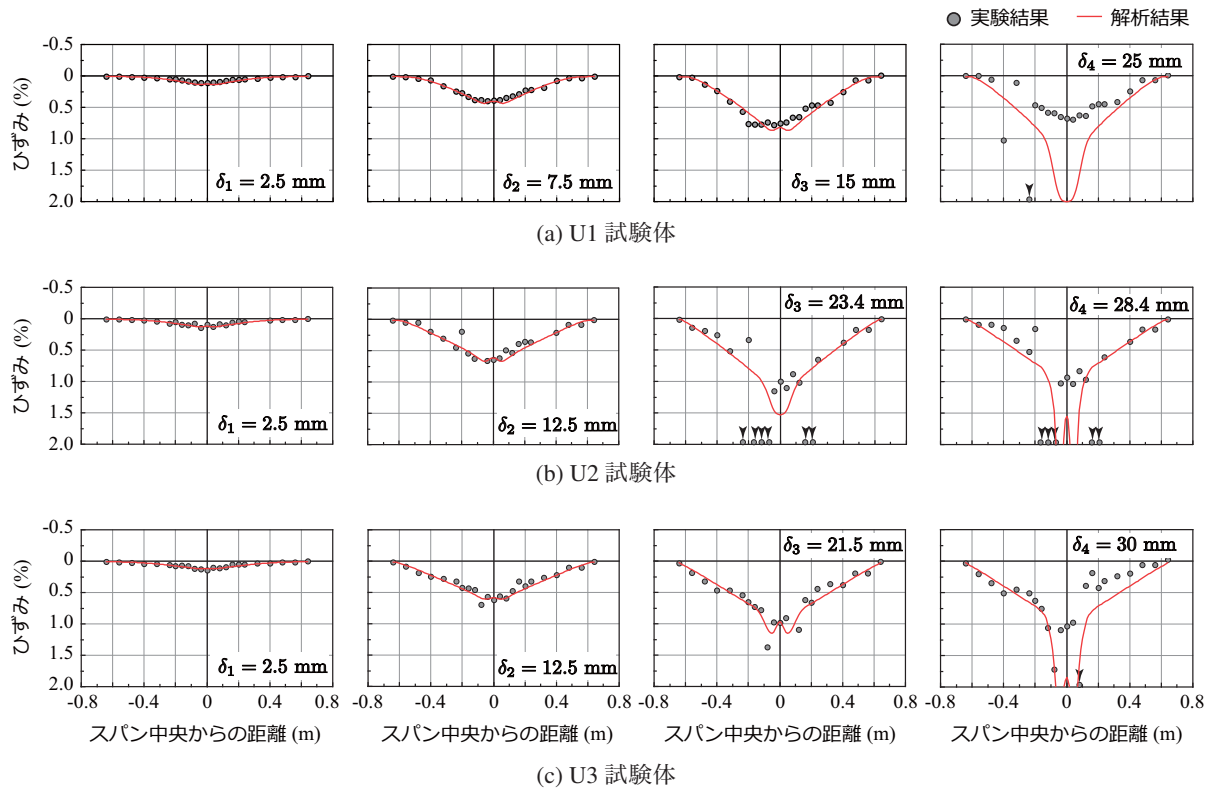


図-8 各試験体における梁下縁の軸方向ひずみ分布

図-8より、荷重初期にひずみの立ち上がりが確認される $\delta_1 = 2.5$ mm に着目すると、いずれの試験体においても荷重点を中心にほぼ対称のひずみ分布を示していることが分かる。また、数値解析結果は実験結果と非常に良く対応している。なお、ひずみは最大でも0.1%程度である。

次に、変位が増大した δ_2 時点 (U1 試験体では 7.5 mm, U2/U3 試験体では 12.5 mm) を見ると、実験結果のひずみには多少のばらつきが確認されるものの、数値解析結果は実験結果と概ね対応していることが分かる。また、スパン中央における最大ひずみは、試験体によって異なるものの0.5%程度を示している。

最大荷重到達直前変位時 (δ_3) に着目すると、(a) 図に示す U1 試験体の場合には、実験結果のひずみ分布の対称性が失われ、最大ひずみ発生位置が左側に若干移動していることが分かる。これは、後述の図-9に示す実験終了後のひび割れ分布からも読み取れるように、顕著なひび割れが発生する兆候を示しているものと推察される。一方、(b) 図に示す U2 試験体の場合には、実験結果においてスパン中央から 0.2 m 程度離れた領域において、2%を超えるひずみが発生している。数値解析結果では、それらの局所的なひずみの変動は再現できないものの、それ以外の領域では実験結果を概ね対応していることが分かる。(c) 図に示す U3 試験体の場合には、主鉄筋が3本と増えたことにより、実験結果において2%を超えるひずみは確認されていない。なお、数値解析結果は、スパン

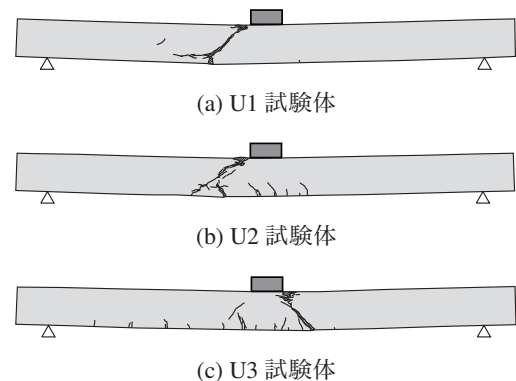


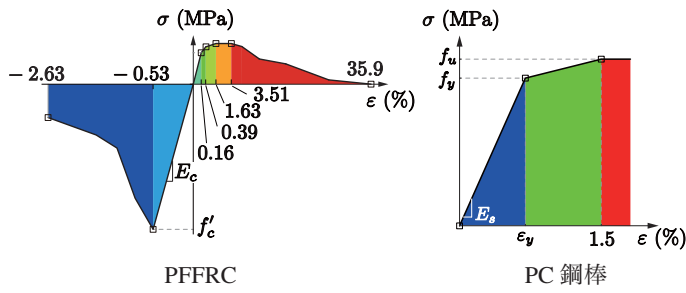
図-9 実験終了後のひび割れ分布状況

ン中央部で実験結果との差異が確認されるものの、全体的に見ると他の試験体と同様に実験結果を適切に表現できているものと考えられる。

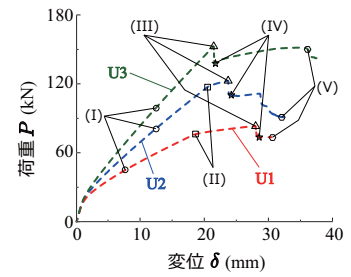
最大荷重到達直後の変位 (δ_4) について着目すると、最大荷重到達前のひずみ分布と比較して数値解析結果の再現性は低下しているものの、U1 試験体を除き、ひび割れが顕著な領域以外では実験結果のひずみ分布を定量的に再現できているものと判断される。

4.3 ひび割れ分布および PFFRC 梁の軸方向ひずみ分布

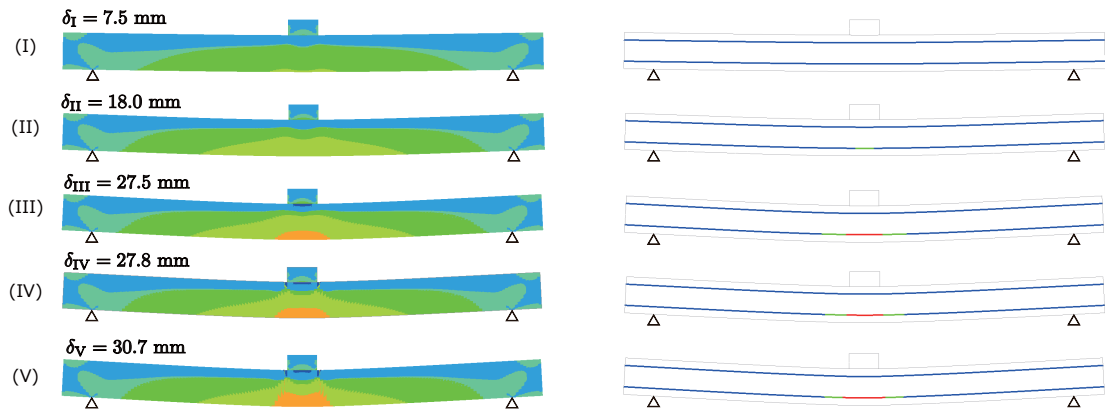
図-9には、実験終了後における梁側面のひび割れ分布状況を示している。図より、ひび割れはいずれの試験体においても少なく、数本のひび割れのみ生じている様子が確認できる。また、いずれの試験体も斜めひび割れが大きく開口し、終局に至っている状況がうかがわれる。



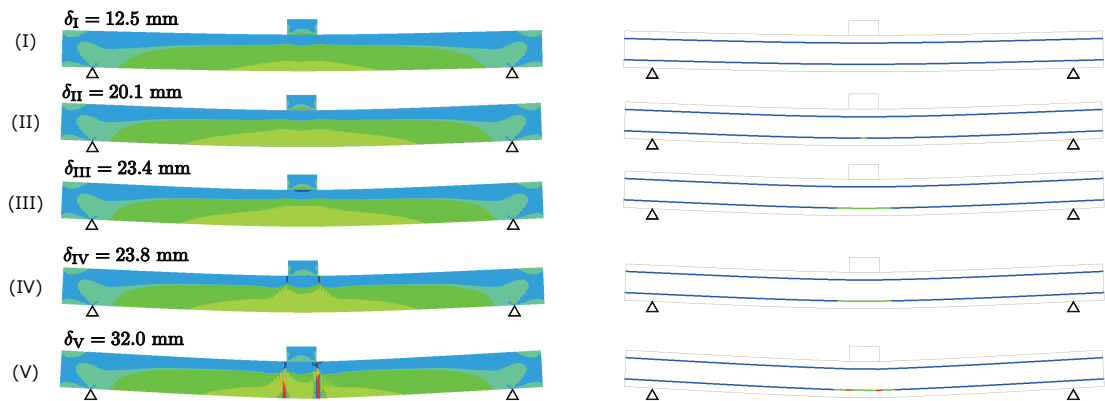
(i) 応力-ひずみ関係とコンターの凡例



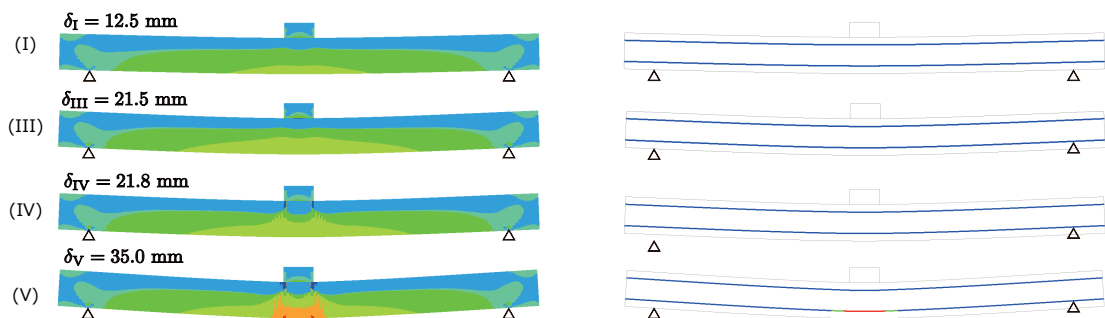
(ii) 荷重-変位関係 (解析結果)



(a) U1 試験体



(b) U2 試験体



(c) U3 試験体

図-10 PRRFC 梁側面および主鉄筋に関する軸方向ひずみ分布の比較

これは、鋼繊維の分散性に関する不均一性が影響し、脆弱点が生じることでひび割れが発生し、さらに荷重の増加に伴いひび割れの開口が局所的に進展したものと推察される。また、各試験体間で比較すると、試験体の鉄筋

比が大きいほどひび割れ本数も増加していることが確認できる。これは、鉄筋比に対応してひび割れの分散性も向上することによるものと推察される。

図-10には、数値解析結果から得られる各イベント時

表-3 着目したイベントの状態

イベント	状態
(I)	主鉄筋が弾性状態にある変位
(II)	主鉄筋が降伏する変位
(III)	最大荷重に到達する変位
(IV)	最大荷重後、荷重が低下する変位
(V)	解析終了時変位

における梁側面および主鉄筋の軸方向ひずみ分布について示している。なお、主鉄筋が3本配筋されているU3試験体に関しては、中央の主鉄筋について示した。また、図中のコンターレベルは、(i)図に示す応力-ひずみ関係と対応している。着目した各イベントに関しては、(ii)図および表-3にその状態をまとめている。

まず、図-10(a)に示すU1試験体に着目する。変位が18mmに到達すると、荷重点近傍の主鉄筋が降伏状態に至ることが分かる。最大荷重には変位27.5mmで到達し、その後、荷重点近傍にて圧壊が生じることで荷重が低下している。なお、最大荷重時には、荷重点直下の主鉄筋は引張強度に到達し、塑性状態に至っていることが分かる。

図-10(b)に示すU2試験体に着目すると、変位20.1mmにおいて荷重点近傍の主鉄筋が降伏状態に至ることが分かる。その後、変位の増加に伴い変位23.4mm時に最大荷重に到達している。この際、荷重点近傍の主鉄筋降伏領域は若干拡大したものの、U1試験体で観察された塑性状態には至っていない。これは、主鉄筋を2本配筋したことによる影響であると推察される。なお、最大荷重到達後は、U1試験体と同様に荷重点近傍にて圧壊が発生し終局に至っている。

図-10(c)に示すU3試験体に着目すると、他の試験体よりも主鉄筋を多く配筋していることから、最大荷重に到達するまで主鉄筋は降伏状態に達しないことが分かる。その後、他の試験体と同様に荷重点近傍にて圧壊が発生し、それに伴い荷重が低下し終局に至ることが分かる。なお、図-7に示す荷重-変位関係を見ると、U3試験体における実験結果では変位が約21mm付近で勾配が変化していることから、主鉄筋が降伏状態に達していると推察される。一方、本数値解析では、この現象を完全に再現するまでには至っていないものの、主鉄筋本数が耐荷性能に及ぼす影響については、定性的な把握ができたものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、鋼繊維補強無孔性コンクリート(PFFRC)梁の耐荷特性を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、別途実施したPFFRC梁の静荷重実験を対象に三次元非線形有限要素解析を実施した。得られた数値

解析結果と実験結果を比較することにより、提案する解析手法の妥当性を検証した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 提案の解析手法を用いることにより、実験結果の荷重-変位関係や梁下縁におけるひずみ分布をほぼ適切に再現可能であることを確認した。
- 2) また、主鉄筋本数が耐荷特性に及ぼす影響について定性的な把握が可能であることを示した。

今後は、適用するひび割れモデルの見直しや、主鉄筋とPFFRCの付着特性などを検討することで、より精度の高い解析手法の確立を目指す予定である。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP21K04229の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450 N/mm²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, 2016.6
- 2) 山越壮之助, 小室雅人, 河野克哉, 岸 徳光: 繊維混入率の異なるPFC梁の静荷重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. 43, No. 2, pp. 427-432, 2021.6
- 3) 岸 徳光, 小室雅人, 瓦井智貴, 河野克哉: 圧縮強度及び鋼繊維混入率の異なる繊維補強無孔性コンクリート梁に関する静荷重及び重錘落下衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 44, No. 2, pp. 925-930, 2022.6
- 4) Norimitsu Kishi, Masato Komuro, Katsuya Kono, Tomoki Kawarai: Impact resistance of porosity-free fiber-reinforced concrete (PFFRC) beams under low-velocity impact loading, *International Journal of Protective Structures*, 13(2), pp. 344-362, 2022.2
- 5) 松原 涼, 小室雅人, 岸良 竜, 岸 徳光: 重錘衝突を受ける主鉄筋に異形PC鋼棒を用いた鋼繊維混入無孔性コンクリート梁の耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 2, pp. 871-876, 2024.6
- 6) エルデネスレン ガントゥルガ, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸良 竜, 森 寛晃, 小島克仁, 松原 涼, 岸 徳光: 主鉄筋に異形PC鋼棒を用いて鉄筋比を変化させた鋼繊維補強無孔性コンクリート梁の静荷重載荷実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第80号, A-33, 2024.1
- 7) DIANA FEA: DIANA User's Manual, Release 10.8, 2023.
- 8) 黒田拓海, 柳田龍平, 小亀大祐, 河野克哉: 鋼繊維を多く混入した無孔性コンクリートの力学特性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第21巻, pp. 319-324, 2021.10
- 9) 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(材料・コンクリート構造), Vol. 74, No. 1, pp.10-20, 2018.1
- 10) 土木学会: 2022年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2023.