

## 論文 超高強度繊維補強コンクリートの構造性能に関する基礎的研究

本田 智昭<sup>\*1</sup>, 一宮 利通<sup>\*1</sup>, 曾我部直樹<sup>\*2</sup>, 日紫喜 剛啓<sup>\*2</sup>

**要旨:** 高い圧縮強度と曲げ靱性を有する超高強度繊維補強コンクリートを開発し、実用化を進めている。本研究では、基本的な構造特性を把握する目的で、要素試験として、圧縮試験、直接引張試験、曲げ試験および疲労強度試験を実施した。また、部材の曲げおよびせん断試験を行い、既往の設計方法で耐力を評価できることを確認するとともに、合理的な設計が可能となる材料モデルについて解析的に検討した。

**キーワード:** 超高強度繊維補強コンクリート, 構造性能, 曲げ耐力, せん断耐力

## 1. はじめに

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)」<sup>1)</sup>(以下、UFC 指針)に示された標準配合粉体を用いた超高強度繊維補強コンクリート(以下、既存の UFC)と同程度の機能を持つ材料を開発し、実用化に関する検討を進めている。今回開発した超高強度繊維補強コンクリート(以下、本 UFC)は、プレミックス結合材、骨材、水および混和剤から構成されるマトリクスに、引張強度  $2 \times 10^3 \text{N/mm}^2$  以上、直径 0.2mm、公称繊維長 15mm と 20mm の 2 種類の鋼繊維をブレンドした補強用繊維を 1.75vol.% 混入したものである。

本研究では、本 UFC について、基礎的な材料の力学特性の確認と、曲げおよびせん断に対する安全性照査についての評価方法を確立することを目的とし、要素試験と部材実験および解析を実施した。

## 2. 検討方法

試験は、大きく分けてテストピースによる要素試験と、部材レベルの載荷実験の 2 種類を行った。前者は圧縮強度、引張強度などの特性値の把握と、引張軟化特性や疲労強度など材料特性の把握が目的であり、後者は曲げおよびせん断に対する設計方法の確認が目的である。

以下で、使用材料および試験方法について述べる。なお、各試験体の試験体の打設方法については、UFC 指針に準じた。

## 2.1 使用材料

表-1 に本 UFC の配合と、基本とする養生条件を示す。本 UFC では、蒸気養生を基本としており、材齢 24 時間で脱型し、85℃20 時間の蒸気養生を行った。ただし圧縮強度試験、曲げ強度試験、割裂引張強度試験および直接引張試験については、低強度時のヤング係数やひび割れ強度などを把握する目的から、標準養生(20℃水中)の試験体も使用した。

## 2.2 試験方法

## (1)圧縮強度試験

JIS A 1108 および JIS A 1149 に準じて、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  のテストピースを用い、圧縮強度およびヤング係数を確認した。

## (2)直接引張試験

$10 \times 50 \times 300 \text{mm}$  の平板試験体に幅 1.5mm、深さ 5mm の切欠きを設け、直接引張試験を実施し

表-1 本 UFC の配合と養生条件

| 配合                      |               |     |      |                   | 養生条件            |
|-------------------------|---------------|-----|------|-------------------|-----------------|
| 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |               |     |      | 補強用<br>繊維<br>(kg) |                 |
| 水*                      | プレミックス<br>結合材 | 骨材  | 混和剤  |                   |                 |
| 195                     | 1287          | 905 | 32.2 | 137.4             | 85℃20時間<br>蒸気養生 |

\*混和剤 32.2kg/m<sup>3</sup> 中の固形分を除いた 22kg/m<sup>3</sup>を含む

\*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造・材料グループ 工修 (正会員)

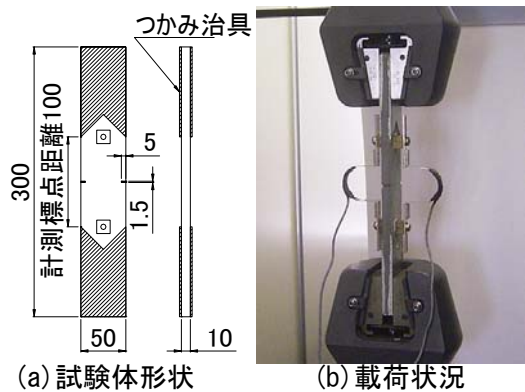
\*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造・材料グループ 工博 (正会員)

\*3 鹿島建設(株) 技術研究所次長 工博 (正会員)

た。試験方法は、UFC 指針「参考資料 3」に準じ、荷重速度を 0.2mm/min とし、荷重荷重およびリガメント(切欠きを設けた破壊面)の開口変位を計測した。図－1 に試験体形状および荷重状況を示す。

(3)曲げ強度試験

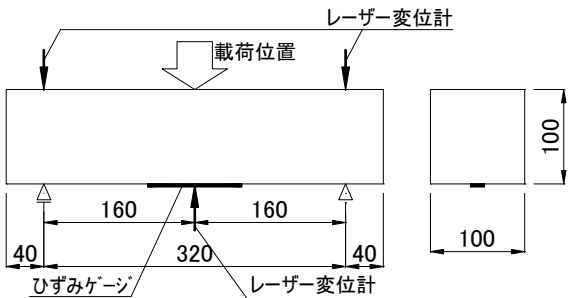
JSCE-G552 に準ずる試験方法にて、100×100×400mm のテストピースを用い、曲げ強度および曲げひび割れ発生強度を確認した。本試験では荷重と変位を連続的に計測し、計測値が不連



図－1 直接引張試験方法

表－2 疲労強度試験ケース

| ケース No. | 静的曲げ強度の平均値 $f_m$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 上限応力 $\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 下限応力 $\sigma_{min}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 荷重強度比 $(\sigma_{max} - \sigma_{min}) / (f_m - \sigma_{min})$ |
|---------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1       | 26.34                                 | 8.01                                     | 1.90                                     | 0.25                                                         |
| 2       | 32.20                                 | 14.02                                    | 1.90                                     | 0.40                                                         |
| 3       | 26.34                                 | 11.68                                    | 1.90                                     | 0.40                                                         |
| 4       | 32.20                                 | 15.54                                    | 1.90                                     | 0.45                                                         |
| 5       | 30.13                                 | 14.60                                    | 1.90                                     | 0.45                                                         |
| 6       | 26.34                                 | 15.34                                    | 1.90                                     | 0.55                                                         |
| 7       | 26.34                                 | 15.34                                    | 1.90                                     | 0.55                                                         |
| 8       | 32.20                                 | 18.57                                    | 1.90                                     | 0.55                                                         |
| 9       | 32.20                                 | 21.60                                    | 1.90                                     | 0.65                                                         |
| 10      | 32.20                                 | 21.60                                    | 1.90                                     | 0.65                                                         |
| 11      | 26.34                                 | 19.01                                    | 1.90                                     | 0.70                                                         |
| 12      | 26.34                                 | 19.01                                    | 1.90                                     | 0.70                                                         |
| 13      | 32.20                                 | 24.63                                    | 1.90                                     | 0.75                                                         |
| 14      | 32.20                                 | 24.63                                    | 1.90                                     | 0.75                                                         |
| 15      | 26.34                                 | 21.70                                    | 1.90                                     | 0.81                                                         |
| 16      | 32.20                                 | 26.44                                    | 1.90                                     | 0.81                                                         |
| 17      | 32.20                                 | 26.44                                    | 1.90                                     | 0.81                                                         |
| 18      | 32.20                                 | 27.66                                    | 1.90                                     | 0.85                                                         |
| 19      | 32.20                                 | 27.66                                    | 1.90                                     | 0.85                                                         |



図－2 疲労試験 荷重要領

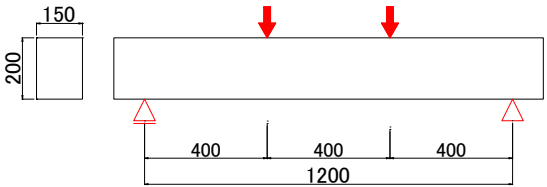
続になった点から曲げひび割れ発生強度を特定した。

(4)割裂引張強度試験

JIS A 1113 に準ずる試験方法にて、φ100×150mm のテストピースを用い、割裂ひび割れ強度を確認した。割裂ひび割れ強度は、テストピースの両端面の中心に、荷重と直角方向にひずみゲージを貼付け、連続的に計測を行い、計測が不連続になった点から特定した。

(5)疲労強度試験

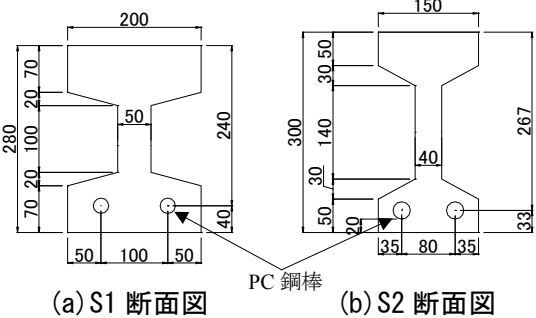
100×100×400mm のテストピースを用いて、スパン 320mm、中央線荷重により繰返し曲げ荷重を行い、疲労強度を確認した。荷重は、上限および下限荷重を設定して sin 波(周波数 5.0Hz)



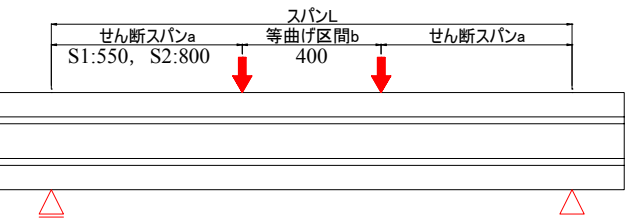
図－3 部材曲げ試験体

表－3 せん断試験ケース

| 試験ケース名 |         |                    | S1                    | S2                    |
|--------|---------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 試験条件   | 桁幅      | B mm               | 200                   | 150                   |
|        | 桁高      | H mm               | 280                   | 300                   |
|        | 有効高さ    | d mm               | 240                   | 267                   |
|        | ウェブ幅    | bw mm              | 50                    | 40                    |
|        | 引張鋼材種別  |                    | 異形PC鋼棒 SBPD930, 2-φ23 | 異形PC鋼棒 SBPD930, 2-φ26 |
|        | 引張鋼材量   | As mm <sup>2</sup> | 831                   | 1061.8                |
|        | スパン     | L mm               | 1500                  | 2000                  |
|        | せん断スパン  | a mm               | 550                   | 800                   |
|        | せん断スパン比 | a/d                | 2.3                   | 3.0                   |
|        |         |                    |                       |                       |



(a) S1 断面図 (b) S2 断面図



(c) 試験体側面図

図－4 せん断試験体形状

の繰返し荷重を与えた。なお、繰返し回数の上限は、UFC 指針にならい、200 万回とした。

表－2 に試験ケース、図－2 に载荷要領を示す。試験は、計 19 ケースとし、応力振幅と疲労破壊する繰返し回数との関係を確認した。

#### (6)部材曲げ実験

図－3 に試験体形状寸法を示す。引張補強鋼材を配置しない試験体を 3 体製作し、それぞれ 2 点载荷により、曲げ耐力を確認した。

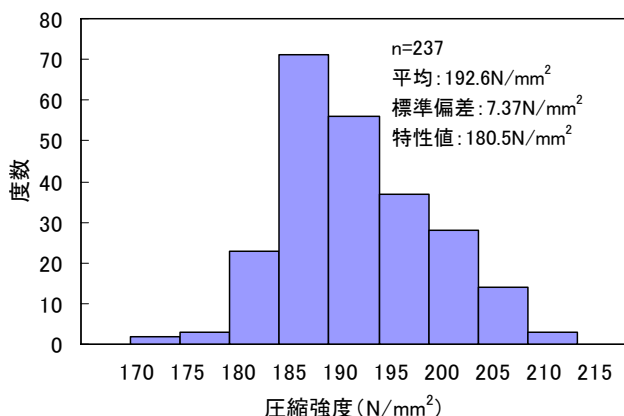
#### (7)部材せん断実験

表－3 に試験ケース、図－4 に試験体形状寸法を示す。両ケースともにせん断破壊を先行させるため、異形 PC 鋼棒を引張補強鋼材として配置し、2 点载荷によりせん断耐力を確認した。

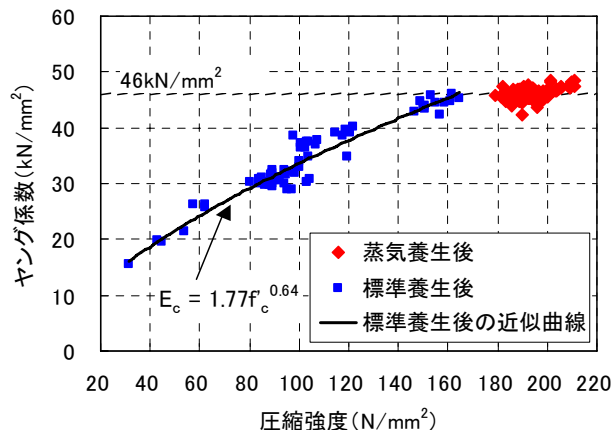
### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 圧縮強度およびヤング係数

図－5 に圧縮強度試験結果の度数分布を示す。圧縮強度の平均値は  $192.6\text{N/mm}^2$ 、標準偏差は  $7.4\text{N/mm}^2$ (変動係数 3.8%)となった。この結果か



図－5 圧縮強度の度数分布



図－6 圧縮強度とヤング係数の関係

ら正規分布を仮定し、危険率 5%となる特性値を求めると、 $180.5\text{N/mm}^2$ となった。

図－6 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。なお、ここでは蒸気養生を行った供試体以外に、標準養生( $20^\circ\text{C}$ 水中養生)による供試体も用いた。

蒸気養生を行った本 UFC のヤング係数は、平均値が  $46\text{kN/mm}^2$ となり、標準養生を行った供試体では、以下の関係式が得られた。

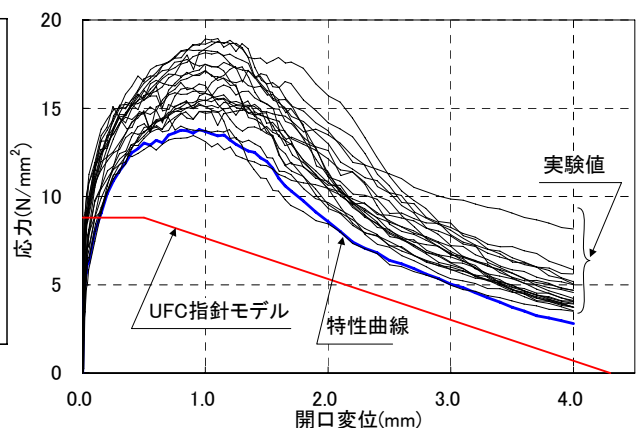
$$E_c = 1.77f_c^{0.64} \quad (1)$$

#### 3.2 引張軟化特性

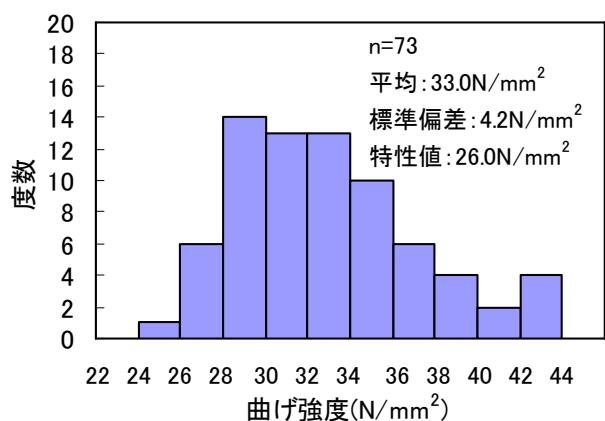
図－7 に試験結果として载荷荷重をリガメントの断面積で除した値を引張応力とし、引張軟化曲線を示す。

試験体毎にばらつきはみられるが、ほぼ同様の傾向となり、ひび割れ発生後、鋼繊維の架橋効果により応力が増加し、更に開口変位が増加するに伴い、応力が徐々に低下する傾向を示した。

また図－7 には試験結果のばらつきを正規分布と仮定し、危険率 5%となる引張応力の特性値



図－7 引張軟化曲線



図－8 曲げ強度の度数分布

を開口変位毎に算出し、特性曲線を示した。この特性曲線と、UFC 指針で示されている既存の UFC の引張軟化特性モデル(図-7 中の UFC 指針モデル)を比較しても、十分な安全性を有していることが確認された。なお、危険率 5%となる引張強度の特性値は  $14.2\text{N/mm}^2$  となった( $n=25$ )。

### 3.3 曲げ強度

図-8 に曲げ強度試験結果の度数分布を示す。曲げ強度の平均値は、 $33.0\text{N/mm}^2$ 、標準偏差は  $4.2\text{N/mm}^2$ (変動係数 12.7%)となった。この結果から正規分布を仮定し、危険率 5%となる特性値を求めると、 $26.0\text{N/mm}^2$  となった。

また図-9 に曲げ強度と直接引張試験による引張強度の関係を示す。本 UFC は、既存の UFC に比べ同一曲げ強度に対する引張強度が高い傾向にあり、UFC 指針で示される関係式と傾きはほぼ同じであるが、切片が負方向にシフトした傾向となった。直接引張試験を実施しない場合は、この相関を用いて曲げ強度から引張強度を算出することとした。

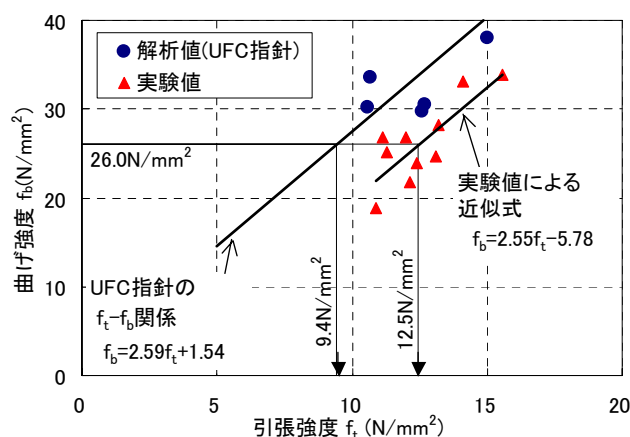


図-9 曲げ強度と引張強度の関係

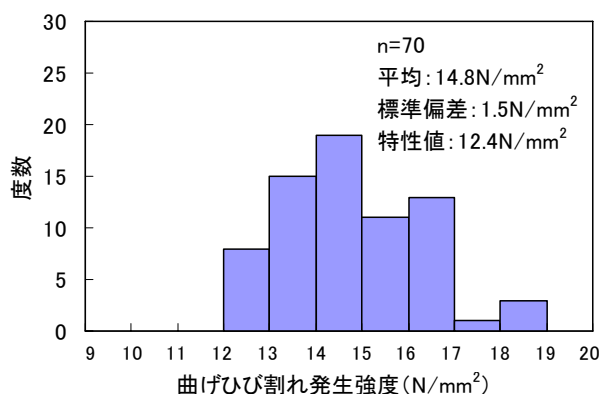


図-10 曲げひび割れ強度の度数分布

### 3.4 ひび割れ発生強度

図-10 に前項の曲げ強度試験において得られた曲げひび割れ発生強度の度数分布を示す。ひび割れ発生強度の平均値は  $14.8\text{N/mm}^2$ 、標準偏差  $1.5\text{N/mm}^2$ 、危険率 5%となる特性値は  $12.4\text{N/mm}^2$  となった。

図-11 に割裂ひび割れ強度と曲げひび割れ強度の関係を示す。UFC 指針の両者の関係式  $y=0.6875x$  に対して、本 UFC では  $y=0.6662x$  とほぼ同じ傾向にあった。なお、割裂引張強度試験は、テストピースと試験装置の加圧版との接触精度が重要であり、試験が難しいことから、本 UFC のひび割れ強度は、曲げ強度試験により確認することを基本としている。そのため、割裂ひび割れ強度の試験は、割裂ひび割れ強度と曲げひび割れ強度の関係を確認するために必要な数のみ実施した。従って、割裂ひび割れ強度の特性値については、図-11 の UFC 指針の関係式より算出した値  $8.5\text{N/mm}^2$  を用いることとした。

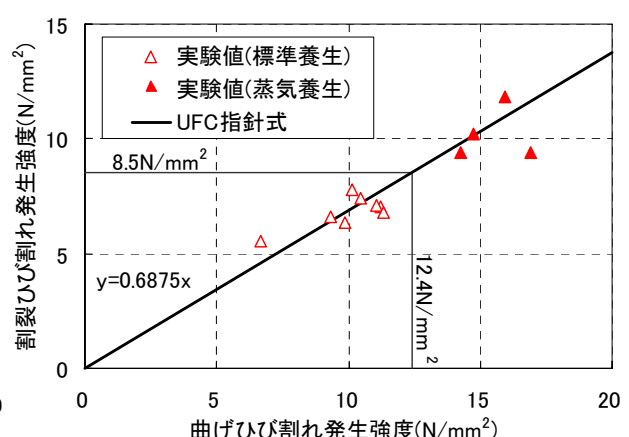


図-11 ひび割れ強度の相関

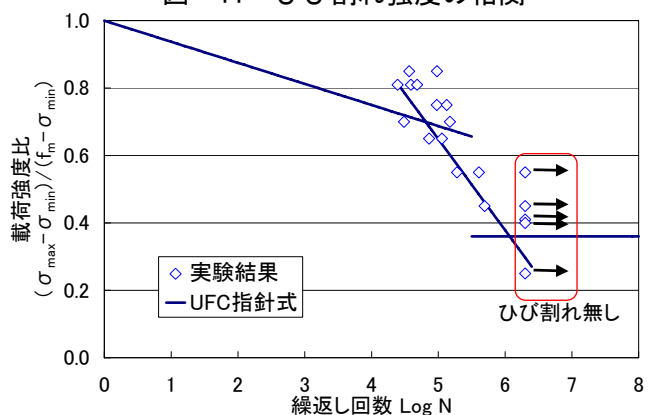


図-12 疲労試験結果 S-N 曲線

### 3.5 疲労強度試験

図-12 に疲労強度試験で得られた S-N 関係を示す。載荷強度比 0.40 以下のケースでは 200 万回の繰返しに対してひび割れが発生せず、疲労破壊しなかった。

全体の傾向は、UFC 指針に示される S-N 曲線とほぼ一致していることが確認された。

### 3.6 曲げ耐力の評価

#### (1)実験結果

表-4 に試験体の材料物性と部材曲げ実験結果、図-13 に載荷荷重と中央鉛直変位の関係を示す。

各ケースではほぼ同様の傾向となり、ひび割れ発生以後、荷重の増加に伴い微細なひび割れが増加し、剛性が徐々に低下した。その後、鋼繊維の架橋効果により、荷重は増加し続けたが、最大荷重で等曲げ区間に発生したひび割れ幅が拡大し、荷重が低下した。

#### (2)計算耐力および設計耐力について

計算耐力として、UFC 指針 6.2「曲げモーメントおよび軸方向力に対する安全性の検討」に準じ、以下の条件で耐力を算出した。

- ・平面保持の仮定を使用
- ・圧縮強度は、実験値を使用
- ・引張強度は、曲げ強度からの換算値を使用  
(換算式は、図-9 の実験式を使用)
- ・安全係数は 1.0 とする

図-13 中にファイバーモデルによる解析結果として、計算耐力を併せて示した。なお、この解析では UFC 指針で示されている既存の UFC の引張軟化特性モデルを用いた。実験値と比較すると、N1-1 については最大耐力を精度良く評価することができたが、N1-2 および N1-3 については、耐力を 15%程度大きく評価する結果となった。本 UFC を含め UFC は、繊維の配向性や試験体の製作状況の違いなどにより、曲げ強度のばらつきが大きい傾向にあり、表-4 に示すように N1-2、N1-3 のテストピースの曲げ強度は、圧縮強度に対して大きな値となっている。これは、N1-1 と N1-2 および N1-3 を比較すると、曲

げ強度は異なるが、部材としての耐力はほとんど変わっていないことから、テストピースの曲げ強度のばらつきと推察される。曲げ耐力の算定においては、圧縮強度よりも引張強度が支配的であり、ここでは曲げ強度から換算した引張強度を用いていることから、計算耐力が大きくなったと考えられる。

なお、実際の設計においては、UFC 指針と同様に、ばらつきを考慮し、危険率 5%となる引張強度の特性値を使用し、さらに安全係数で除した値を耐力とするため、テストピースのばらつきも考慮した評価となる。図-13 中に示した特性値を用いた解析結果と、UFC 指針に準じ算出した設計耐力を、実験結果とそれぞれ比較すると、特性値を用いた解析値については、各ケースの耐力を精度良く求められており、設計値については 2 倍程度と十分安全な評価となった。

解析で得られた荷重-変位関係を実験値と比較すると、ひび割れが発生し、剛性が徐々に低下し始めた以降の挙動について、解析では剛性を過大に評価する結果となった。これは、使用した引張応力とひずみ(開口変位)の関係モデルが、実験で確認した挙動と異なることに起因していると考えられる。より高い精度の解析を目

表-4 部材曲げ実験結果

| 試験ケース            |        |        |                    | N1-1  | N1-2  | N1-3  |
|------------------|--------|--------|--------------------|-------|-------|-------|
| 材<br>料<br>物<br>性 | 圧縮強度   | $f_c'$ | N/mm <sup>2</sup>  | 210.2 | 194.2 |       |
|                  | ヤング係数  | $E_c$  | kN/mm <sup>2</sup> | 44.6  | 47.4  |       |
|                  | 曲げ強度   | $f_b$  | N/mm <sup>2</sup>  | 27.1  | 32.4  |       |
|                  | 換算引張強度 | $f_t$  | N/mm <sup>2</sup>  | 12.9  | 15.0  |       |
| 曲げ破壊荷重           |        | $P_u$  | kN                 | 160.2 | 159.1 | 153.2 |
| 計算耐力             |        | $P_d$  | kN                 | 162.1 | 186.1 | 186.1 |
| Pu/Pd            |        |        |                    | 0.99  | 0.85  | 0.82  |

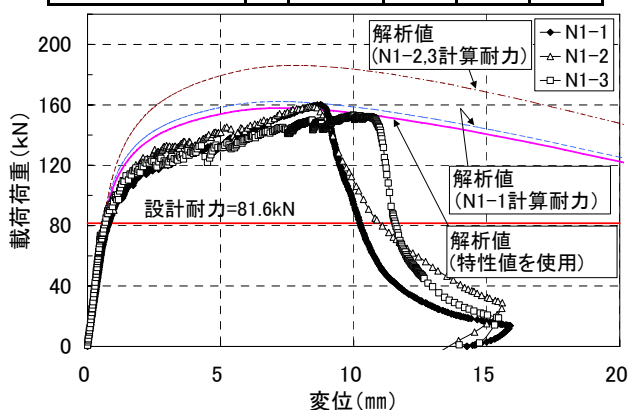


図-13 部材曲げ試験 P- $\delta$  曲線

表－5 セン断実験結果

| 試験ケース名 |               |                          | S1    | S2    |
|--------|---------------|--------------------------|-------|-------|
| 材料物性   | 圧縮強度          | $f'_c$ N/mm <sup>2</sup> | 202.9 | 179.0 |
|        | 曲げ強度          | $f_b$ N/mm <sup>2</sup>  | 32.4  | 38.4  |
|        | 換算引張強度        | $f_t$ N/mm <sup>2</sup>  | 15.0  | 17.3  |
| 試験結果   | 斜めひび割れ発生      | $Q_c$ kN                 | 87.5  | 68.5  |
|        | 最大せん断力        | $Q_u$ kN                 | 273.9 | 158.8 |
|        | 破壊時の斜めひび割れ角度* | °                        | 34    | 19    |
| 計算値    | 計算耐力1         | kN                       | 226   | 217   |
|        | 実験値/計算耐力      |                          | 1.2   | 0.7   |
|        | 計算耐力2         | kN                       | 257   | 237   |
|        | 実験値/計算耐力      |                          | 1.1   | 0.7   |

\* 部材軸とひび割れのなす角度

指す上では、今後は引張応力とひずみの関係のモデル化に対する検討が必要と思われる。

### 3.7 セン断耐力の評価

#### (1)実験結果

表－5 に材料試験による物性と部材せん断試験結果、図－14 にせん断試験時の作用せん断力と中央鉛直変位の関係を示す。

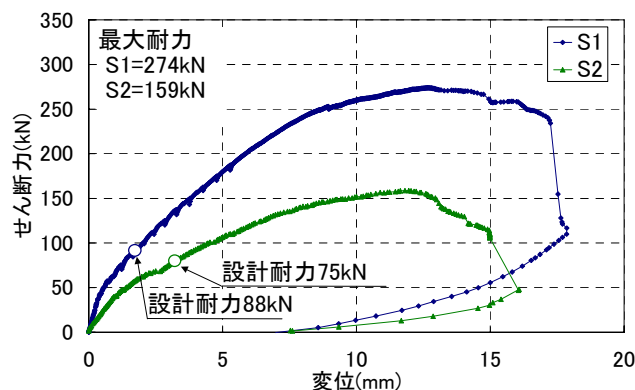
S1, S2 とともに曲げひび割れ発生後、せん断スパンに斜めひび割れが発生し、荷重の増加に伴い徐々に微細なひび割れの本数が増加した。その後、最大荷重付近で斜めひび割れの幅が拡大し、破壊に至った。

#### (2)計算耐力および設計耐力

UFC 指針 6.3.3 「棒部材の設計せん断耐力式」に示されている式(計算耐力 1)と、「参考資料 4 超高強度繊維補強コンクリートのせん断耐力」で提案されている式(計算耐力 2)により、計算耐力を算定した。算定の条件は以下の通りとした。

- ・圧縮強度は、実験値を使用
- ・引張強度は、曲げ強度からの換算値を使用(換算式は、図－9 の実験式を使用)
- ・安全係数は 1.0 とする
- ・軸力を受けない場合の斜めひび割れが部材軸となす角度は 40 度とする(既存の UFC と同様)

計算耐力 1,2 とともに、実験値/計算耐力比は 0.7～1.2 倍程度となり、既存の UFC と同程度の実験値/計算耐力比となった。しかし今回は、2 ケースのみでの確認であり、試験ケースが十分とは言えないため、今後は試験ケースの追加と



図－14 セン断力と中央変位の関係

表－6 UFC の特性値

| 特性値      | 単位                | 本 UFC | UFC 指針の適用範囲 | 既存の UFC |
|----------|-------------------|-------|-------------|---------|
| 圧縮強度     | N/mm <sup>2</sup> | 180.5 | 150 以上      | 181.4   |
| 引張強度     | N/mm <sup>2</sup> | 12.5  | 5.0 以上      | 8.8     |
| 割裂ひび割れ強度 | N/mm <sup>2</sup> | 8.5   | 4.0 以上      | 10.4    |
| 曲げ強度     | N/mm <sup>2</sup> | 26.0  | —           | 24.4    |

設計式の精度の向上が課題と考えられる。

なお、実際の設計においては、強度のばらつきを考慮した特性値を用い、安全係数で除した値を設計耐力とするため、図－14 中に示したとおり、S1, S2 とともに実験値/設計耐力比は、2 ～3 倍程度と、十分安全な評価となる。

### 4. まとめ

今回の新たに開発した UFC について、要素試験により圧縮強度、曲げ強度、ひび割れ強度の特性値および引張軟化特性、疲労強度について確認した。その結果、UFC 指針で示されている基準およびモデルに対して、同程度の性能を有していることが確認された(表－6)。

曲げに対する安全性の評価手法については、UFC 指針で規定している設計式を用いることで評価が可能であることが確認できた。またせん断に対する安全性の評価については、実験ケースが十分とは言えないものの、UFC 指針で規定している設計式を用いることで、一定の評価が可能であることを確認した。

### 参考文献

- 1) 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），2004.9