

# 論文 連続繊維補強材を用いたコンクリートはりのせん断抵抗挙動

鳥取 誠一\*1・涌井 一\*2

要旨：連続繊維補強材を引張補強筋あるいはせん断補強筋に用いた場合のコンクリートはりのせん断抵抗挙動を、非線形 FEM 解析および荷重実験により検討した。その結果、せん断補強筋のない場合は、コンクリートの引張軟化における除荷を考慮することによって解析できることを示した。しかし、せん断補強筋が比較的多く、せん断圧縮破壊するような場合は満足すべき解析結果が得られなかった。また、実験結果の分析から、せん断補強筋のひずみを 0.01 程度とすれば、既往のせん断耐力算定式により、比較的精度良く耐力を算定し得ることを示した。

キーワード：連続繊維補強材，せん断耐力，破壊形式，非線形 FEM 解析

## 1. はじめに

連続繊維補強材を用いたコンクリートはりのせん断抵抗挙動は、鋼材を用いた場合と大きく異なることが指摘されている<sup>1)</sup>。本論では、斜め引張破壊とせん断圧縮破壊の破壊形式に留意して、上記の点を非線形 FEM 解析ならびに実験結果の分析により検討した。

## 2. せん断補強のないコンクリートはり

### 2.1 斜引張破壊する場合

#### (1) 荷重試験

図-1 に示すコンクリートはりの非線形 FEM 解析ならびに荷重試験を行った。引張補強筋には、断面積が  $0.76\text{cm}^2$ 、ヤング係数が  $137\text{Gpa}$  の炭素繊維補強材を 6 本用いた。コンクリートの圧縮強度  $f'_c$ 、引張強度  $f_t$ 、ヤング係数  $E_c$  はそれぞれ  $34.3\text{Mpa}$ 、 $2.5\text{Mpa}$ 、 $29.4\text{Gpa}$  である。

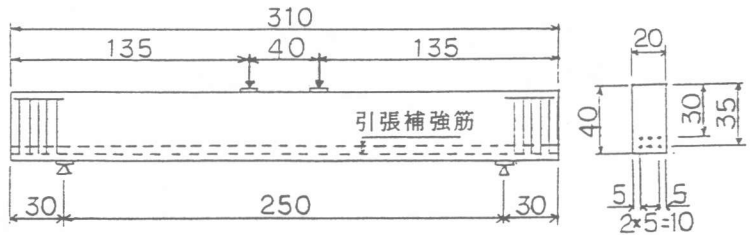


図-1 検討対象のコンクリートはり

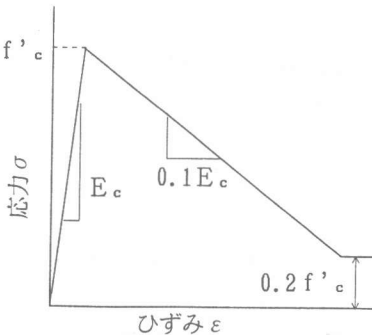


図-2 圧縮応力-ひずみ関係

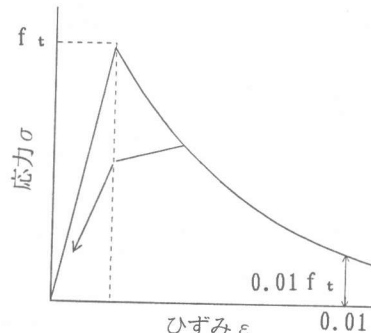


図-3 引張応力-ひずみ関係

\*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造研究室 主任研究員，工修（正会員）

\*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造研究室 室長，工修（正会員）

み関係には、1軸応力-ひずみ関係を用い、圧縮側は軟化を考慮した2直線モデルとした(図-2参照)。引張側はひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ発生後は指数関係の引張軟化を考慮した。ひび割れ発生後の除荷経路では、引張破壊ひずみの90%までは原点指向の剛性の10%、それ以上の除荷に対しては原点指向の剛性を用いた(図-3参照)。

引張補強筋は弾性体とし、コンクリートとの付着には付着界面要素を用いた(図-4参照)。

ひび割れモデルは分散ひび割れを用いた。せん断弾性係数 $\beta G_c$ の係数 $\beta$ には、コンクリートの引張軟化領域と同じ指数関係の値を用いた。 $G_c$ はコンクリートのポアソン比を $1/6$ として求めた。

ひび割れ要素において、主応力軸が回転して引張応力度が引張強度を越えた場合、ひび割れは回転するものとした。これは、曲げひび割れが斜めひび割れに変化する過程を評価するための措置である。

要素は4節点四角形平面応力要素で、1要素の大きさは $3 \times 3$  cm程度である。なお、解析ツールとして"Total-RC"<sup>2)</sup>を用いた。

解析および実験結果を図-5, 6に示す。

図-5の荷重-たわみ曲線における解析値と実験値の比較より、RCはりの全体的な変形挙動および耐力はほぼ妥当であることがわかる。

図-6のひび割れ図においては、堀井が無筋コンクリートの曲げ解析において示したように<sup>2)</sup>、コンクリートの引張軟化における除荷経路を考慮することによって、分散して生じたひび割れが局所化し、数本のひび割れに収束する傾向が示された。また、

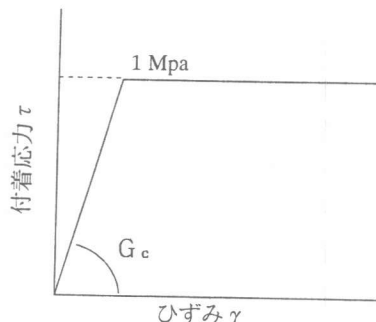


図-4 付着応力-ひずみ関係

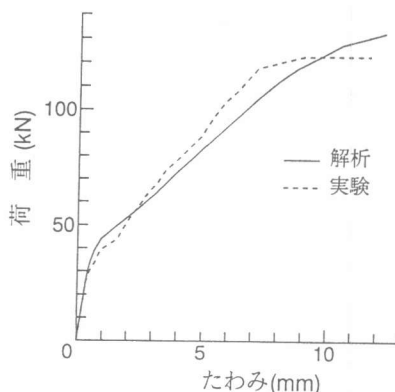


図-5 荷重-たわみ曲線

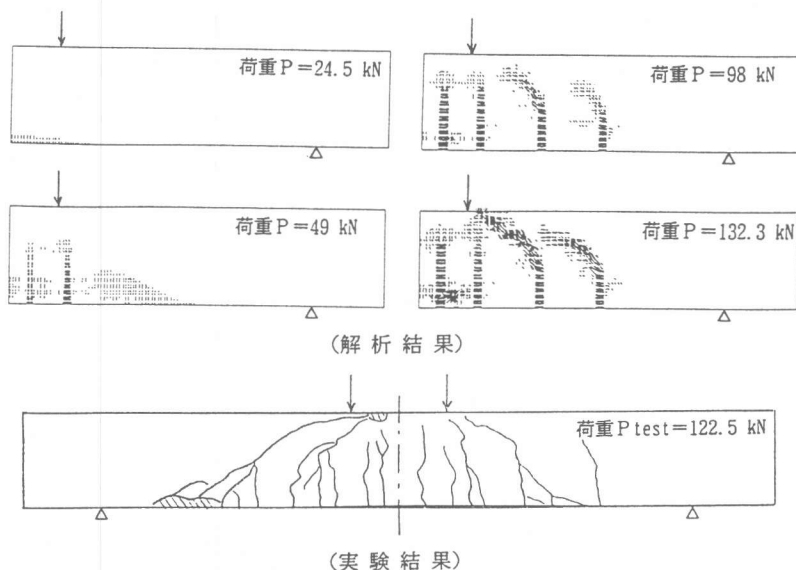


図-6 ひび割れ状況(斜め引張破壊)

解析結果のひび割れパターンは、実験結果とも概ね一致しており、ひび割れ間隔の観点からは、解析に用いたコンクリートと補強筋の付着関係はほぼ妥当なものとも考えられた。

### (3) せん断耐力の検討

上記より、図-1のモデルのせん断抵抗挙動はマクロ的に把握されたと考えられたので、換算引張補強筋比  $p_f \cdot (E_f/E_s)$  を変化させた場合のせん断耐力について検討した。図-7に解析結果、実験値および二羽らのせん断耐力算定式(式(1)参照)<sup>3)</sup>において、換算引張補強筋比を用いて求めたせん断耐力  $V_c$  を示す。

$$V_c = 200 f'_c{}^{1/3} \cdot (p_f \cdot E_f/E_s)^{1/3} d^{-1/4} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b d \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

ここに、 $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度 (Mpa)

$$p_f = 100 A_f / (b d)$$

$A_f$ : 引張補強材の断面積 (m<sup>2</sup>)

$b$ : はりの幅 (m)

$d$ : 有効高さ (m)

$a$ : せん断スパン (m)

図-7の結果より、せん断耐力の解析値は式(1)より求まる値より、やや大きな値を示すことがわかる。また、試解析の結果では、コンクリートと引張補強筋の付着性状がせん断耐力に相当に影響する結果となっており、今後、この点をより詳細に検討する必要があると考えている。

### 2.2 せん断圧縮破壊する場合

せん断スパンと有効高さの比  $a/d$  を 2.4とした矩形断面はり(幅10cm, 高さ25cm)の非線形 FEM解析ならびに載荷試験を行った。解析条件は前述のとおりである。なお、 $a/d$  が小さい場合には支承部における支圧板の部材軸方向の長さ  $r$  がせん断抵抗挙動に多大な影響を及ぼすので<sup>4)</sup>、要素分割においてもこれを考慮した。

換算引張補強筋比  $p_f \cdot (E_f/E_s)$  を 0.31%, コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  を 36 Mpaとした場合の荷重-たわみ曲線を図-8, ひび割れ進行を図-9に示す。

図-8の荷重-たわみ曲線では、解析値の方が実験値よりやや大きな剛性を与え、終局時のたわみ量は解析値の方がやや小さいが、定性的な傾向は概ね把握されている。

図-9のひび割れ進行においては、解析から得られたひび割れ本数が実験結果よりも多く、解析条件のコンクリートと引張補強筋の付着性状が、実際とは異なっていたと推測される。

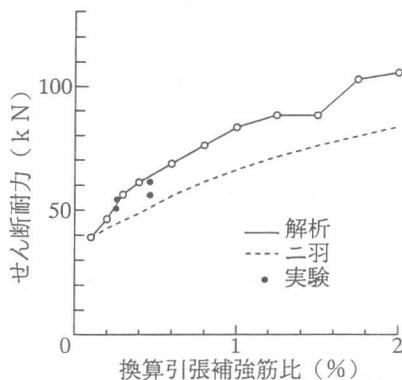


図-7 せん断耐力の比較(斜め引張破壊)

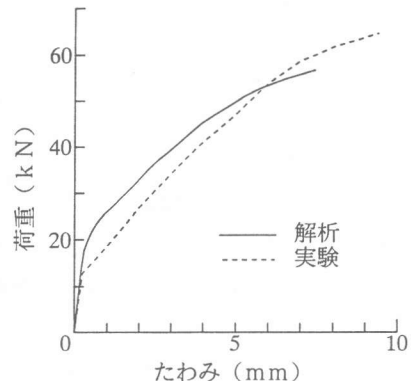


図-8 荷重-たわみ曲線

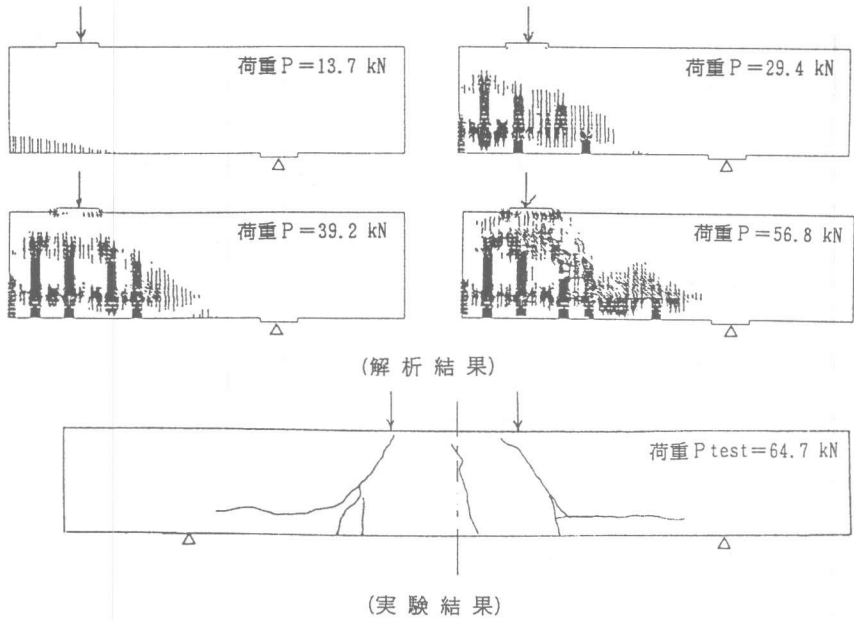


図-9 ひび割れ状況 (せん断圧縮破壊)

また、ひび割れ自体も前述の斜め引張破壊の場合と比べると、十分に局所化されていないようであった。しかし、破壊形式的にはせん断圧縮破壊となっていること、付着ひび割れ状況も実験結果と比較的一致していることから、せん断抵抗挙動は概ね把握されているものと考えた。

せん断耐力について検討するため、換算引張補強筋比  $p_f \cdot (E_f/E_s)$  を変化させた場合について検討した。結果を図-10に示す。

これより、解析結果と実験結果は比較的良好一致していること、また式(2)<sup>4)</sup>に示す二羽によるディープビームのせん断耐力算定式において、換算引張補強筋比を用いた場合の算定値と実験値も比較的良好一致していることがわかった。

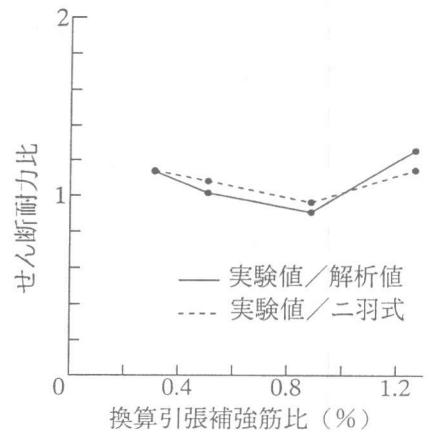


図-10 せん断耐力の検討 (せん断圧縮破壊)

$$V_c = \frac{244 f'_c{}^{2/3} \cdot (1 + \sqrt{p_f \cdot E_f/E_s}) \cdot (1 + 3.33 r/d)}{1 + (a/d)^2} b d \quad [\text{kN}] \quad (2)$$

ここに、 $r$  : 支承部における支圧板の部材軸方向の長さ

式(2)は鉄筋コンクリートはりにおいて、鉄筋比が1%以上の範囲で成立することが実験的に確認されているが、上記の検討より、鉄筋比が1%以下の範囲においても成立するであろうと考えられた。

### 2.3 既往文献等から得られるせん断耐力実験値の分析

既往文献および筆者らが行った実験結果<sup>5)</sup>から、式(1), (2)の適用性を検討した。実験せん断耐

力  $V_{c, test}$  と計算せん断耐力  $V_{c, cal}$  の比  $V_{c, test} / V_{c, cal}$  を換算引張補強筋比  $p_{fw} (E_f / E_s)$  に対して整理した結果を図-11に示す。

$V_{c, test} / V_{c, cal}$  の平均値は、供試体数27体に対して1.15、変動係数は12.1%であった。

$V_{c, test} / V_{c, cal}$  の値が1よりやや大きい原因は、現状では必ずしも明確でないが、前述の解析の結果も含めると、コンクリートと引張補強筋の付着性状が鉄筋の場合と異なることが原因しているのではないかと推測される。

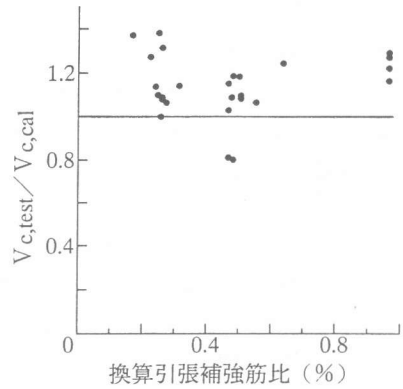


図-11  $V_{c, test} / V_{c, cal}$

### 3. せん断補強のあるRCはり

#### 3.1 検討対象のRCはり

図-1に示すRCはりにらせん状のせん断補強筋を配した供試体の非線形FEM解析ならびに載荷実験を行った<sup>5)</sup>。せん断補強筋には、ガラス繊維補強材、アラミド繊維補強材、炭素繊維補強材を用い、式(3)の単位面積当たりのせん断補強筋の軸剛性  $E_{fw} \cdot p_{fw}$  を変化させた。

$$E_{fw} \cdot p_{fw} = E_{fw} \cdot A_{fw} (\sin \alpha + \cos \alpha) / b s \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $A_{fw}$  : せん断補強筋の断面積  
 $\alpha$  : せん断補強筋が部材軸となす角度  
 $s$  : せん断補強筋の間隔  
 $E_{fw}$  : せん断補強筋のヤング係数  
 $b$  : はりの幅

#### 3.2 非線形FEM解析と載荷試験の比較

解析において、せん断補強筋とコンクリートは完全付着とした。他の条件は2.1と同様としている。 $E_{fw} \cdot p_{fw}$  を54.7 Mpa、せん断補強筋の間隔を25cm、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  を31.1 Mpa とした場合の荷重-たわみ曲線を図-12に示す。

荷重-たわみ曲線は載荷途中までは解析、実験ともほぼ一致しているが、せん断耐力には差が生じている。これは、解析上はせん断力 ( $=P/2$ ) が76kNの段階で解が収束しなくなったためである。実験では斜めひび割れの進行後も耐力を保持し、最終的には103 kNでせん断圧縮破壊した。

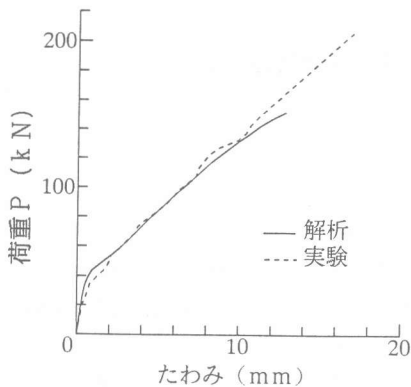


図-12 荷重-たわみ曲線

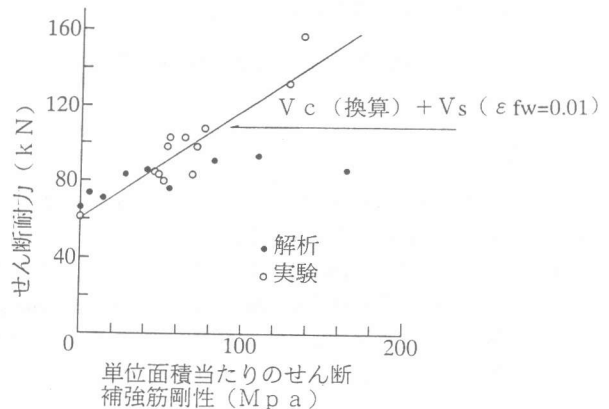


図-13  $E_{fw} \cdot p_{fw}$  とせん断耐力の関係

以上より、本解析では斜めひび割れ発生以降からせん断圧縮破壊するまでの挙動が十分捉えられていないと考えられる。この点を検討するため、 $E_{fw} \cdot p_{fw}$ を変化させた場合について解析した。

図-13は $E_{fw} \cdot p_{fw}$ とせん断耐力の関係を示したものである。図中の $(V_c + V_s)$ の直線は式(1)から求まる $V_c$ と式(4)から求まる $V_s$ を合計したもので、式(4)中のせん断補強筋のひずみ $\epsilon_{fw}$ は後述の実験結果に基づき0.01とした。

$$V_s = A_{fw} E_{fw} \epsilon_{fw} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s = E_{fw} \cdot p_{fw} \epsilon_{fw} b z \quad (4)$$

図-13の結果では、 $E_{fw} \cdot p_{fw}$ が比較的小さい範囲では、 $(V_c + V_s)$ の値と解析結果は比較的一致しているようであるが、 $E_{fw} \cdot p_{fw}$ が増加し、せん断圧縮破壊する領域では、解析結果と実験結果には乖離が認められた。

### 3. 3 既往文献等から得られるせん断耐力実験値の分析

既往文献および筆者らが行った実験結果から、せん断耐力の算定法を検討した。式(4)に基づきせん断耐力の実験値 $V_{test}$ から式(1)あるいは(2)から求まる $V_c$ を差し引き、 $\epsilon_{fw}$ の値を逆算した結果、 $\epsilon_{fw}$ の平均的な値は0.01程度であった。この値を用いて、 $V_{test} / (V_c + V_s)$ の値を求めると図-14のようであり、供試体数65体に対して平均値は1.02、変動係数は16.7%であった。

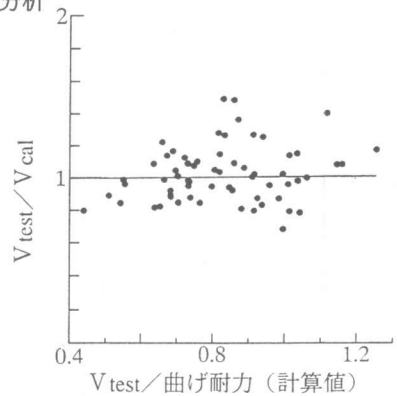


図-14  $V_{test} / (V_c + V_s)$

### 4. まとめ

- (1) せん断補強のないRCはりに関しては、実験結果と解析結果は比較的一致していた。コンクリートの引張軟化領域における除荷を考慮することによって、斜めひび割れの進行を表現できるようであった。
- (2) せん断耐力の解析値は、二羽らの提案式において換算引張補強筋比を考慮して求めた値よりやや大きく、その原因の1つとして引張補強筋とコンクリートの付着性状が考えられた。
- (3) 本論で示した解析法では、せん断補強筋剛性比が比較的大きく、せん断圧縮破壊するような場合については十分な精度が得られなかった。
- (4) せん断補強のあるRCはりでは、せん断補強筋のひずみを0.01とした場合、せん断耐力が比較的精度よく求まるようであった。

謝辞：本研究に際しては、(株)トル・インフォメーション・サービス 金刀氏に御協力戴いた。ここに記し、感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 連続繊維補強補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリー第72号, 土木学会, 1992
- 2) 破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993
- 3) 二羽ほか: せん断補強筋を用いないRCはりせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号, 1986
- 4) 二羽淳一郎: FEM解析に基づくディープ梁のせん断耐力算定式, 第2回RC構造のせん断問題に解析的研究に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 1983
- 5) 鳥取ほか: FRPロッドを引張補強筋ならびにせん断補強筋として用いたRC, PC はりのせん断耐力, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集, 土木学会, 1992