

# ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いた部材の構造性能評価に関する研究

リハビリテーション工学研究室 青木 貴

## 1 研究の背景と目的

近年、変形能力に富んだセメント系複合材料の開発の一環として、ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料(以下 HFRCC)の研究が行われており、変形性能、軸力支持性能が求められるピロティ柱や耐震壁に用いるのが効果的だと考えられている。しかし、HFRCC をそれら構造部材に用いた際の変形性能や破壊モードに関しては、未だ明らかになっていない部分も多い。そこで本研究では、HFRCC 柱、耐震壁部材の強度や変形性能を明らかにし、それらを用いた建物の性能を検証することを目的とし、部材の特性を把握するための静的載荷実験及び、部材の復元力特性を適切に評価できるような解析モデルの構築を行う。梗概では柱部材に関してのみ記述する。

## 2 HFRCC ピロティ柱の静的載荷実験

### 2.1 実験概要

昨年度の実験を参考に、ピロティ階を有する 10 階建 RC 造建物を想定し、1/4 スケールで試験体を計画した。

試験体の概要を表 1 に示す。寸法は柱断面 250mm 角、内法高さ 800mm である。HFRCC の引張強度 $\sigma_t$ の効果を考慮した修正指針式(1)と曲げ終局強度略算式を用いたせん断余裕度( $Q_{su}/Q_{mu}$ )に加え、昨年までの実験<sup>3)</sup>で曲げ降伏後に脆性破壊した試験体が存在したため、(2)式で定義する「HFRCC の負担せん断応力度」 $\tau_{HF}$ の引張強度に対する比( $\tau_{HF}/\sigma_T$ )を 1 程度とすることで、脆性破壊を防止できるか検証した。試験体は $\tau_{HF}/\sigma_T$ を 1 程度とし、せん断余裕度を変えた 2 体を設計した。逆対称曲げモーメントが生じるようにせん断力を加え、変動軸力による正負交番繰返し載荷を行った。

### 2.2 実験結果

実験で得られた荷重-変形角関係を図 2 に示す。また、各々の曲げ変形成分、せん断変形成分を図 3、最終破壊時写真を図 4 に示す。

V-HF12\_10 試験体に関しては、+1/50rad.時に最大耐力を迎え、その後も安定した曲げ型の挙動を示し、-1/12.5rad.にて主筋が破断し、載荷を終了した。一方 V-HF10\_09 試験体は、V-HF12\_10 に比べせん断ひび割れの発生が目立っており、+1/33rad.時に最大耐力を迎えた後、せん断ひび割れが大きく開き始め耐力も低下していくが、脆性破壊には至らなかった。

試験体毎のせん断抵抗限界 ( $0.8Q_{max}$ )、変動軸力支持限界、長期軸力支持限界を表 2 に示す。いずれの試験体においても、各限界変形角は計算値より大きく、脆性破壊を防止できたことに加え、最終破壊時まで長期軸力を支持することができたので、 $\tau_{HF}$ を用いた設計が有効であったと言える。

図 5 に実験結果によるせん断余裕度  $Q_{su}/Q_{mu}$  と  $\tau_{HF}/\sigma_T$  の関係を示す。V-HF10\_09 試験体は、V-HF12\_10 試験体に比べ  $\tau_{HF}/\sigma_T$  が小さく、変形性能が高いことが予想されたが、せん断破壊の傾向を見せ、変形能力も V-HF12\_10 試験体に比べると小さかった。これは V-HF10\_09 試験体のせん断余裕度が V-HF12\_10 試験体より小さいことによると思われる、よ

表 1 試験体配筋等一覧

試験体名	V-HF12_10	V-HF10_09
主筋	12-D13	12-D19
	SD345	
帯筋	2-D6@67	
	SD295	SD785
$p_w \sigma_{wy}$	1.35	3.60
$Q_{su}/Q_{mu}$	1.19	0.99
$\tau_{HF}/\sigma_T$	1.01	0.93

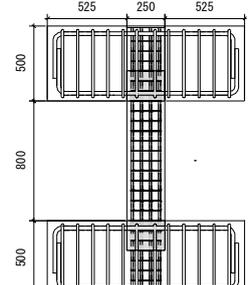


図 1 試験体図 (単位:mm)

$$Q_{su} = b_j (\rho_w \sigma_{wy} + \sigma_t) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D u \sigma_B / 2 \quad \dots(1)$$

$\sigma_t$ : HFRCC の引張強度

$$\tau_{HF} = \tau_{mu} - \tau_{su} = Q_{mu} / b_j - Q'_{su} / b_j \quad \dots(2)$$

$$Q'_{su} = b_j p_w \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D u \sigma_B / 2$$

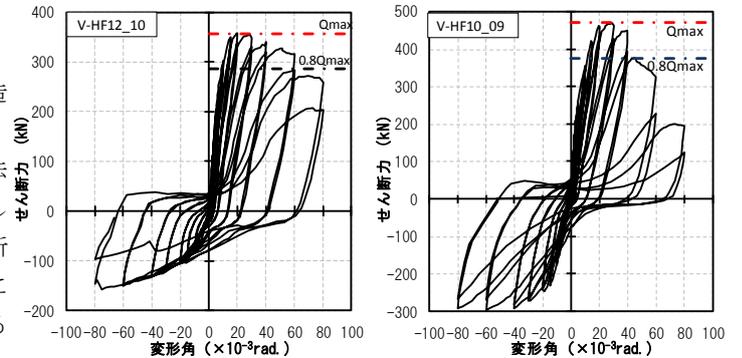


図 2 荷重-変形角関係

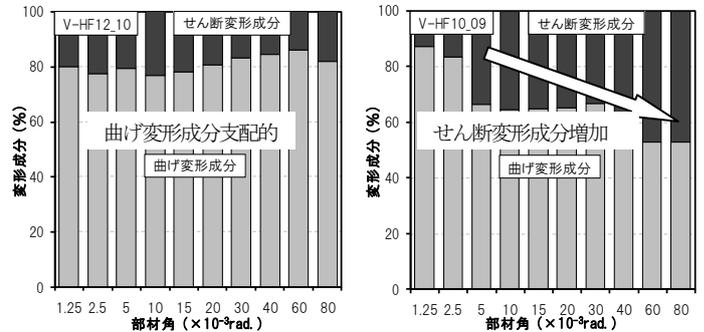


図 3 曲げ変形成分とせん断変形成分

表 2 限界変形角

試験体名	0.8 $Q_{max}$	変動軸力支持限界	長期軸力支持限界	計算値
	$\times 10^{-3} \text{rad.}$			
V-HF12_10	60	>80	>80	22
V-HF10_09	40	80	>80	21



図 4 最終破壊時写真

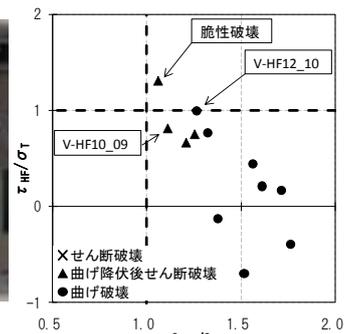


図 5  $Q_{su}/Q_{mu}$  と  $\tau_{HF}/\sigma_T$

り詳細な変形性能の評価には、せん断余裕度と $\tau_{HF}/\sigma_T$ 双方の影響を考慮する必要がある。

### 3 柱部材解析モデルによる性能評価

#### 3.1 解析概要

静的載荷実験の結果を受け、骨組解析プログラムを用いてモデル化した柱部材を静的漸増載荷し、構造性能の評価を行った。モデル化の概念図を図 6 に示す。材端ヒンジ位置に HFRCC バネと鉄筋バネによるマルチスプリング(MS)モデルを、線材部にせん断バネを組み込んだ。MS モデルのヒンジ長さは、柱せい  $D=250\text{mm}$  とした。HFRCC バネ及び鉄筋バネの復元力特性を図 7 に示す。HFRCC に関しては最大圧縮応力後応力が低下するモデルを用い、また引張側はひび割れ強度 $\sigma_T$ を維持するモデルとした。鉄筋に関しては Bi-Linear 型でモデル化した。せん断バネの復元力特性はひび割れ強度に靱性指針式 ((3)式)<sup>4)</sup>、降伏強度に前述した修正指針式 ((1)式)を用いた Tri-Linear 型とした。

#### 3.2 解析結果

解析による各試験体の荷重-変形角関係を、実験結果と併せて図 8 に示す。また、実験結果と解析結果の初期剛性、最大耐力、最大耐力時変形の比較を表 3 に示す。V-HF12\_10 試験体は耐力が実験と解析でほぼ同程度となっているが、V-HF10\_09 試験体はせん断バネが降伏し、実験より 1 割程度高い耐力となっており、せん断バネの復元力特性が不適切である可能性がある。また、双方で最大耐力に至るまでの剛性が実験に比べ高いが、これに関しては後述する。

実験と解析の曲げ変形、せん断変形の比較を図 9 に示す。曲げ変形が支配的な V-HF12\_10 試験体、せん断変形が大きい V-HF10\_09 試験体に関して、その傾向を捉えられている。

V-HF12\_10 試験体の実験と解析における主筋の変形角毎の応力を図 10 に示す。実験では主筋のスタブからの抜け出しが発生しているため、同じ変形角で解析よりも応力が小さくなり、前述したように実験での剛性が解析より小さくなっていることが考えられる。そこで、図 10、図 11 のように主筋に抜け出しを考慮した復元力特性を用いて解析を行ったところ、図 8 の点線に示すように変形の進行を実験結果に近づけることができた。しかし、未だ実験結果との差異はあり、抜け出しの定量的な評価や、前述したせん断バネの復元力特性についての検討を行うことが課題となった。

#### 4 まとめ

HFRCC 部材の実建物への適用に向けた構造性能の適切な評価を目的として、静的載荷実験及び部材解析モデルの構築を行い、以下の知見を得た。

- 柱部材に関して、 $\tau_{HF}/\sigma_T$  を 1 程度に抑えることで、脆性破壊を防ぐことが可能となった。より詳細な変形性能の評価には、せん断余裕度と $\tau_{HF}/\sigma_T$ の双方を考慮した設計を行う必要がある。

- 部材モデルの解析では耐力や変形の評価がある程度可能となったが、特に変形で実験結果との差異が残った。せん断バネの復元力特性の改善や主筋の抜け出しを考慮したモデルを組み込むことで、より適切な評価が可能になると考えられる。

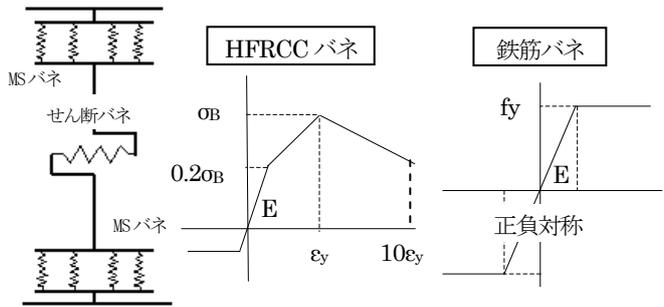


図 6 モデル図

図 7 MS 要素の復元力特性

$$V_{cr} = \phi(\sqrt{\sigma^2 + \sigma_t \sigma_0})bD/\kappa \dots(3)$$

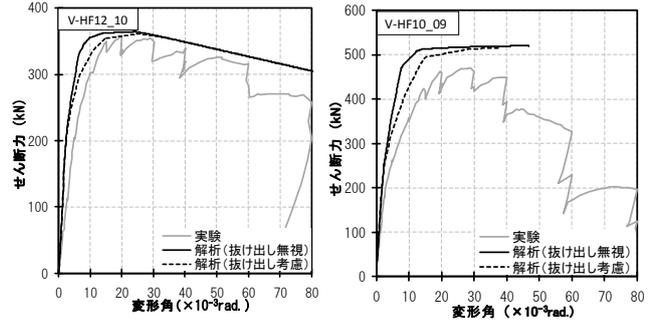


図 8 解析結果 荷重-変形角関係

表 3 解析結果 諸数値の比較

試験体名	初期剛性 (kN/mm)		最大耐力 (kN)		最大耐力時変形角 ( $\times 10^{-3}\text{rad}$ )	
	実験	解析	実験	解析	実験	解析
V-HF12_10	67	112	357	365	20	24
V-HF10_09	81	144	471	521	29	14

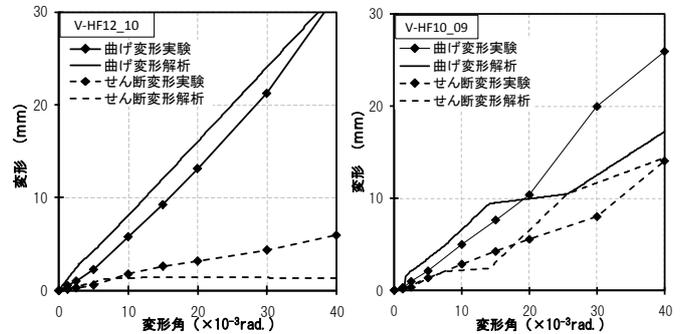


図 9 曲げ変形、せん断変形

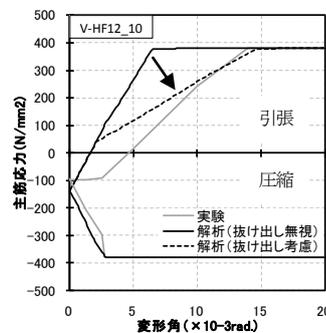


図 10 主筋の応力比較

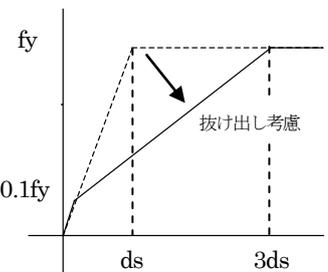


図 11 引張主筋修正モデル

#### [参考文献]

- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針,1999
- 永井寛・金子貴司・関田徹志・丸田誠：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いたダンク部材の構造性能,コンクリート工学年次論文集,Vol.29,No.2,2004
- 中村 匠：2009 修士論文「ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料のピロティ構造部材への適用に関する研究」
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針,1990