

# 論文 若材齢コンクリートの拘束収縮におけるハイブリッド・ファイバー補強の影響

中村 成春<sup>\*1</sup>

**要旨**：本研究は、微細繊維と短繊維と粗骨材を混合したハイブリッド・ファイバー・コンクリート(HFC)について、新たに収縮力学モデルを考案し、若材齢からの擬似完全拘束実験による収縮力学特性を検討した。モルタルをマトリクスとしたハイブリッド・ファイバー補強効果を、モルタルのクリープを考慮した有効弾性率発現に基づき、繊維寸法と余剰モルタルとシアラグと2相並列・直列の混合モデルによる単位セルで定量化した。この単位セルを構成材体積率に基づき3相直列モデルで定量化し、モルタルベースのHFCに粗骨材を混合した2相直列モデルで定量化し、HFCの若材齢からの完全拘束収縮挙動を定量評価した。

**キーワード**：拘束，収縮，複合則，繊維，粗骨材，若材齢，引張，クリープ，有効弾性率

## 1. はじめに

コンクリートの引張破壊は、拘束収縮の有無に関わらず、まず微細ひび割れが発生し、それが累積・連結成長して、結合応力0の巨視ひび割れに至る破壊進行領域を形成する。この微細ひび割れは、引張強度の0.7~1倍でごく限られた領域にて顕在化し、破壊局所化の始まりが引張強度の0.7倍近傍となる。これは、引張強度に達する前に、巨視ひび割れにつながる微細ひび割れの局所損傷蓄積を表す。

そこで、微細ひび割れ発生を積極的に抑制することで、破壊局所化を抑え込み、巨視ひび割れ発生を抑制させることが考えられる。著者は、拘束収縮ひび割れについて、微細ひび割れ抑制を長さ10mm未満の微細繊維で、巨視ひび割れ抑制をそれ以上の長さの短繊維で対応させるハイブリッド・ファイバー・コンクリート(HFC)を検討し、微細ひび割れ発生抑制効果を明らかにしてきた<sup>1)2)3)</sup>。

本研究は、若材齢時からのHFCの擬似完全拘束時の収縮力学挙動について、粗骨材の混合有無に対する影響も考慮した拘束収縮に対するハイブリッド・ファイバー補強効果を、理論的に検討することを目的とした。

## 2. HFCの完全拘束時の力学挙動の定量化

### 2.1 擬似完全拘束実験の力学挙動のモデル化

図-1に擬似完全拘束実験の拘束収縮力学挙動の概要を示す。擬似完全拘束実験は、恒温恒湿環境下で、拘束引張応力 $\sigma$ を測定する完全拘束試験体と自由収縮歪 $\varepsilon_{free}$ を測定する別置き自由収縮試験体からなる。拘束試験機器詳細は文献<sup>1)</sup>に示している。注水時からの材齢 $t$ より、拘束開始までの時間を $t0$ とすると、拘束材齢 $tr$ は $t-t0$ となる。 $\varepsilon_{free}$ は完全拘束時の拘束引張歪となり、ヤング率 $E$ の発現と拘束に伴う引張クリープ作用によって、若材齢時の収縮力学特性が影響を受ける。クリープ無考慮の弾性解析は、拘束時の拘束引張応力を多大に見積もることになる。経時変化を $tr$ の時間関数とし、引張クリープ作用を最も簡易なクリープ係数 $\phi$ で考えると、有効弾性率 $E'$ は式(1)に、 $\sigma$ は式(2)になる。

$$E'(tr) = \frac{E(tr)}{1 + \phi(tr)} \quad (1)$$

$$\sigma(tr) = \varepsilon_{free}(tr) \cdot E'(tr) \quad (2)$$

### 2.2 HFCの完全拘束時の力学挙動のモデル化

図-2にHFCの完全拘束時の力学挙動に対する複合則モデル化を示す。図-2(a)図のHFCの

\*1 宇都宮大学 工学部建設学科建築学講座准教授 博(工) (正会員)

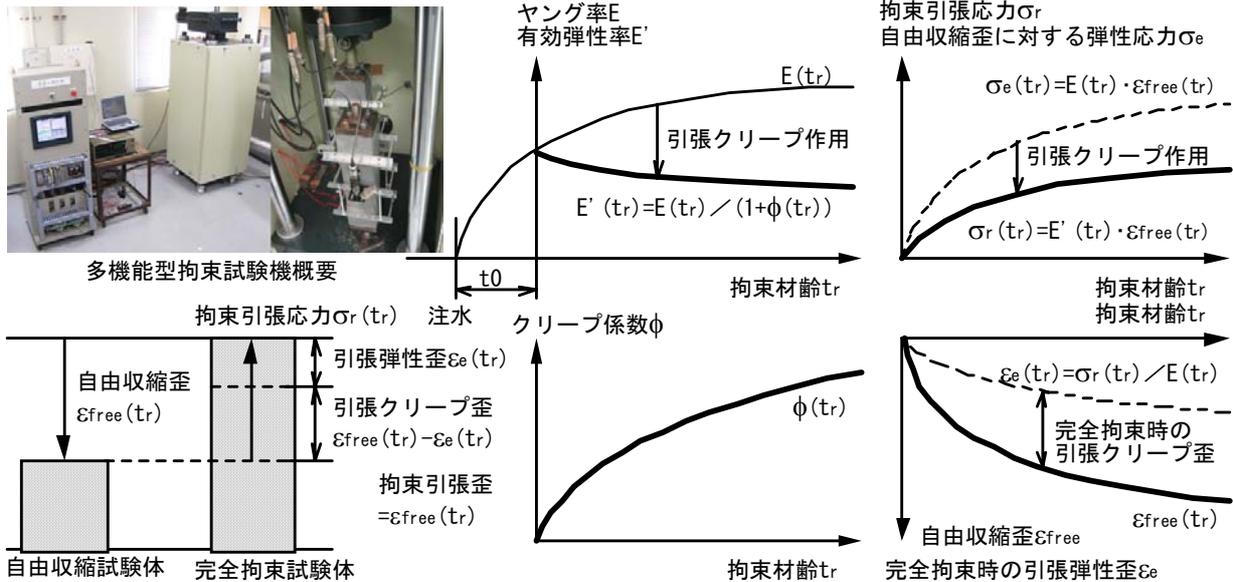


図-1 若材齢コンクリートの擬似完全拘束実験のクリープを単純化した時の収縮力学挙動の概要

構成について、粗骨材無しタイプを HFCm に、粗骨材有りタイプを HFCc とし、粗骨材を g、微細繊維を fa、短繊維を fb、モルタルを m、文献<sup>1)2)</sup>で示した余剰マトリクスモデルによる各繊維に対する余剰モルタルを mea と meb、繊維拘束モルタルを mc、各繊維の複合をセルとして cella と cellb で呼称し、式(3)の体積率 V で定義した。

$$\begin{aligned} V_{cella} &= V_{mea} + V_{fa} ; V_{cellb} = V_{meb} + V_{fb} \\ ; V_{hfcm} &= V_{cella} + V_{cellb} + V_{mc} ; V_{hfcc} = V_{hfcm} + V_g \end{aligned} \quad (3)$$

図-2 (b)図の HFCc の力学挙動は、HFCm と粗骨材 g の 2 相直列モデル化によって、各相の体積率から、歪構成式(4)と拘束応力構成式(5)を得、HFCc の有効弾性率構成式(6)が定量できる。

$$\varepsilon_{hfcc} = \varepsilon_{hfcm} \frac{V_{hfcm}}{V_{hfcc}} + \varepsilon_g \frac{V_g}{V_{hfcc}} \quad (4)$$

$$\sigma'_{hfcc} = \varepsilon_{hfcm} \cdot E'_{hfcm} = \varepsilon_g \cdot E_g \quad (5)$$

$$E'_{hfcc} = \frac{\sigma'_{hfcc}}{\varepsilon_{hfcc}} = \left( \frac{1}{E'_{hfcm}} \frac{V_{hfcm}}{V_{hfcc}} + \frac{1}{E_g} \frac{V_g}{V_{hfcc}} \right)^{-1} \quad (6)$$

ここで、粗骨材の自由収縮歪 $\varepsilon_g$ とヤング率 $E_g$ は、文献<sup>4)</sup>の評価式(7)を参照引用することにした。

$$\varepsilon_g(t) = \frac{t}{R_a R_s (0.322 \cdot W/C + 4.77) + t} \varepsilon_{g\infty} \quad (7)$$

ここで、 $t = 20^\circ\text{C}60\%RH$ 乾燥期間(日),  $W/C(\%)$ ,  $E_g = 60\text{GPa}$ ,  $\varepsilon_{g\infty} = 180 \times 10^{-6}$ ,  $R_a = 0.22$ ,  $R_s = 3.29 \log\left(\frac{V}{S}\right) + 1.17$ ,  $\frac{V}{S} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 40}{40 \cdot 40} = 2.5\text{cm}$ 。

また、図-2 (b)図の HFCm の力学挙動は、微細繊維 fa によるセル cella と短繊維 fb によるセル cellb とハイブリッド・ファイバー時の拘束モルタル mc の 3 相直列モデル化によって、各相の体積率から、歪構成式(8)と拘束応力構成式(9)を得、HFCm の有効弾性率構成式(10)が定量できる。

$$\varepsilon_{hfcm} = \varepsilon_{cella} \frac{V_{cella}}{V_{hfcm}} + \varepsilon_{cellb} \frac{V_{cellb}}{V_{hfcm}} + \varepsilon_m \frac{V_{mc}}{V_{hfcm}} \quad (8)$$

$$\sigma'_{hfcm} = \varepsilon_{cella} \cdot E'_{cella} = \varepsilon_{cellb} \cdot E'_{cellb} = \varepsilon_m \cdot E'_m \quad (9)$$

$$E'_{hfcm} = \frac{\sigma'_{hfcm}}{\varepsilon_{hfcm}} = ER \left( \frac{1}{E'_{cella}} \frac{V_{cella}}{V_{hfcm}} + \frac{1}{E'_{cellb}} \frac{V_{cellb}}{V_{hfcm}} + \frac{1}{E'_m} \frac{V_{mc}}{V_{hfcm}} \right)^{-1} \quad (10)$$

ここで、式(10)中のパラメータ ER は、各相の構成材の体積率を考慮した複合則モデル適用に対して、不整合な場合の調整パラメータとして設定した。例えば、各相の構成材を練り混ぜて製造した時、巻き込み連行空気等の影響で(有効)

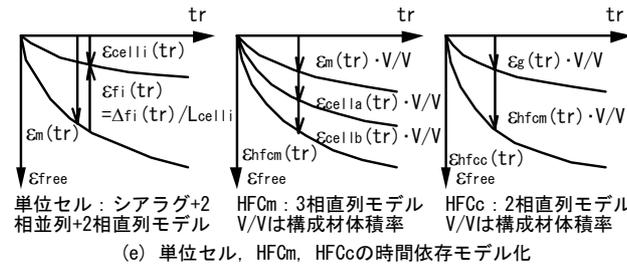
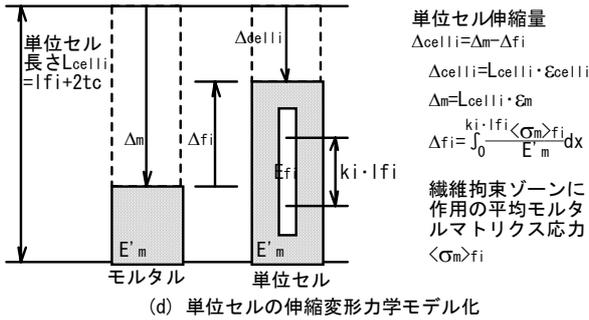
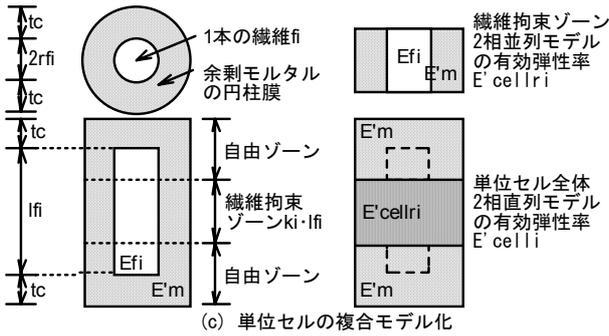
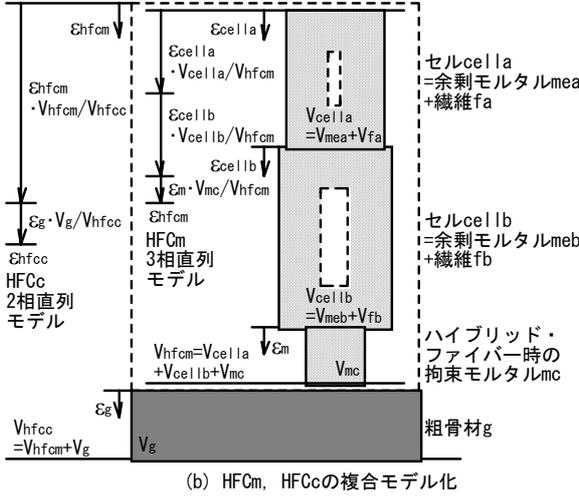
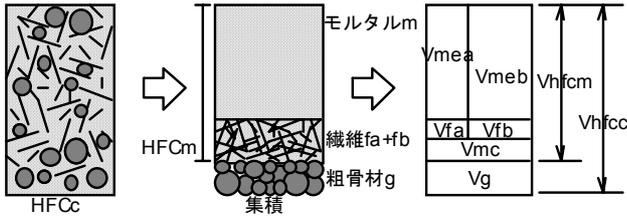


図-2 HFCの完全拘束時の拘束収縮力学挙動に対する複合則モデル化の概要

弾性率の低下が予想されるが、この空気相を複合時の構成材として反映していないと複合則モデル解析の精度が低下することもある。複合則モデル化が適切な状況では、 $ER=1$  とすれば良い。

図-2(c)図は、繊維1本を円柱体と考え、その繊維が、ハイブリッド・ファイバー補強時の余剰マトリクスモデルから得る余剰マトリクスで包み込まれた円柱複合体の単位セルでモデル化した。繊維を包含する円柱膜厚  $tc$  は、繊維種類を  $i$  として、繊維断面半径  $r_{fi}$  と繊維長さ  $l_{fi}$  とハイブリッド・ファイバー補強時の繊維実積率  $G_{fab}$  (%) と各繊維混入率  $v_{fir}$  によって、式(11)の解から求められる。詳細は文献<sup>2)</sup>に示している。

$$\begin{aligned}
 & (2r_{fa}^2 l_{fa} v_{fbr} + 2r_{fb}^2 l_{fb} v_{far}) tc^3 \\
 & + (l_{fa} r_{fb}^2 l_{fb} v_{far} + 4r_{fa} r_{fb}^2 l_{fb} v_{far} \\
 & + l_{fb} r_{fa}^2 l_{fa} v_{fbr} + 4r_{fa}^2 l_{fa} v_{fbr} r_{fb}) tc^2 \\
 & + (2r_{fa} l_{fa} r_{fb}^2 l_{fb} v_{far} + 2r_{fa}^2 r_{fb}^2 l_{fb} v_{far} \\
 & + 2r_{fa}^2 l_{fa} r_{fb} l_{fb} v_{fbr} + 2r_{fa}^2 l_{fa} r_{fb}^2 v_{fbr}) tc \\
 & - r_{fa}^2 l_{fa} r_{fb}^2 l_{fb} + r_{fa}^2 l_{fa} r_{fb}^2 l_{fb} (v_{far} + v_{fbr}) \frac{100}{G_{fab}} \\
 & = 0 \tag{11}
 \end{aligned}$$

この繊維補強単位セルの力学挙動は、繊維配向を考慮した繊維拘束ゾーンと単位セル全体で考えた。まず、繊維拘束ゾーンは、繊維配向係数  $k_i=0.5$  (3次元ランダム) として  $k_i \cdot l_{fi}$  で規定し、2相並列モデル化して、各構成材の体積率を式(12)で、有効弾性率を構成式(13)で定量した。

$$\begin{aligned}
 V_{cellrfi} &= \pi r_{fi}^2 k_i l_{fi}, V_{cellri} = \pi (r_{fi} + tc)^2 k_i l_{fi}, \tag{12} \\
 V_{cellmi} &= V_{cellri} - V_{cellrfi}
 \end{aligned}$$

$$E'_{cellri} = E_{fi} \frac{V_{cellrfi}}{V_{cellri}} + E'_m \frac{V_{cellmi}}{V_{cellri}} \tag{13}$$

単位セル全体は、自由ゾーンと繊維拘束ゾーンを2相並列モデル化して、各構成材の体積率を式(14)で、有効弾性率を構成式(15)で定量した。

$$\begin{aligned}
 V_{cellui} &= \pi (r_{fi} + tc)^2 (l_{fi} + 2tc), \tag{14} \\
 V_{cellmi} &= V_{cellui} - V_{cellri}
 \end{aligned}$$

$$E'_{celli} = \left( \frac{1}{E'_{cellri}} \frac{V_{cellri}}{V_{cellui}} + \frac{1}{E'_m} \frac{V_{cellmi}}{V_{cellui}} \right)^{-1} \quad (15)$$

図-2 (d)図は、単位セル中の繊維拘束に伴う伸縮挙動を、繊維拘束ゾーンに作用するシアラゲモデルから得る平均モルタルマトリクス応力  $\langle \sigma_m \rangle_{fi}$  でモデル化した。 $\langle \sigma_m \rangle_{fi}$  を式(16)で、繊維拘束時の伸び量  $\Delta_{fi}$  を式(17)で、単位セルの収縮歪  $\varepsilon_{celli}$  を式(18)で定量した。シアラゲモデル適用の詳細は文献<sup>2)</sup>に示している。

$$\langle \sigma_m \rangle_{fi} = \frac{A_{fi}}{A_{mi}} E_{fi} \varepsilon_m \left\{ 1 - \frac{\cosh \left( \beta_i \left( \frac{k_i l_{fi} - 2x}{2r_{fi}} \right) \right)}{\cosh \left( \beta_i \frac{k_i l_{fi}}{2r_{fi}} \right)} \right\} \quad (16)$$

$$\text{ここで, } \frac{A_{fi}}{A_{mi}} = \frac{\pi r_{fi}^2}{\pi (r_{fi} + tc)^2 - \pi r_{fi}^2} = \frac{r_{fi}^2}{tc(tc + 2r_{fi})}$$

$$\beta_i = \sqrt{\frac{E'_m}{(1 + \nu_m) E_{fi} \ln \left( \frac{r_{fi} + tc}{r_{fi}} \right)}}$$

$$\nu_m = 0.2$$

$$\Delta_{fi} = \int_0^{k_i l_{fi}} \frac{\langle \sigma_m \rangle_{fi}}{E'_m} dx = \frac{E_{fi}}{E'_m} \frac{A_{fi}}{A_{mi}} k_i l_{fi} \times \left\{ 1 - \frac{2r_{fi}}{k_i l_{fi} \beta_i} \tanh \left( \beta_i \frac{k_i l_{fi}}{2r_{fi}} \right) \right\} \cdot \varepsilon_m \quad (17)$$

$$\varepsilon_{celli} = \varepsilon_m - \frac{1}{l_{fi} + 2tc} \Delta_{fi} \quad (18)$$

最後に、図-2 (e)図は、各モデルの歪を  $tr$  の時間関数で表示した。これで、繊維の寸法やヤング率や混合条件を反映した HFC の若材齢からの完全拘束時の収縮力学挙動が定量評価できる。

### 3. HFC の拘束収縮力学挙動の解析的検討

#### 3.1 HFC の擬似完全拘束実験の概要

新たに提案した HFC 収縮力学モデルの解析結果を、実際の擬似完全拘束実験結果と比較検証する。比較用の実験値について、HFCm は文献<sup>2)</sup>の 20°C60%RH 条件の m60 と hfc60 を、HFCc

は今回実施の matrix-c と hfc-c の結果を用いた。表-1 に使用材料と擬似完全拘束実験の調査を示す。HFCc のモルタルは HFCm のモルタルより細骨材混入量が若干少ないが同等とみなし、m60 の結果を解析に反映させる。すべての擬似完全拘束実験は、注水から約 24 時間経過で実施した。

表-1 使用材料と擬似完全拘束実験の調査

(a) 使用材料の品質							
セメントc	普通ポルトランドセメント, 3.16g/cm <sup>3</sup>						
シリカフュームsf	2.2g/cm <sup>3</sup>						
細骨材s	鬼怒川産川砂, 表乾密度2.58g/cm <sup>3</sup> , f.m.=2.6						
粗骨材g	硬質砂岩砕石, 表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup> , 最大寸法20mm						
化学混和剤sp	ポリカルボン酸系高性能減水剤, 1.1g/cm <sup>3</sup>						
(b) PVA繊維の品質							
PVA繊維種類	長さ	直径	密度	引張強度	繊維ヤング率	特性表面積	繊維実積率
fa	3	0.2	1.3	0.91	29.4	20.67	33.05
fb	30	0.4	1.3	0.9	29	10.07	9.20
パブリック時の繊維実積率Gfab (%)				vfbr/vfar<0.7 : Gfab=-17.971(vfbr/vfar)+34.08 vfbr/vfar>=0.7 : Gfab=8.6034(vfbr/vfar)+9.19			
(c) 調査条件							
共通条件		w/c=0.2, w/(c+sf)=0.18, sf置換率=10wt%*c, sp置換率=3wt%*c, 設計空気量=1vol%*conc					
調査種類	細骨材率	細骨材モルタル容積比	細骨材混入率vol%	粗骨材混入率vol%	繊維混入率		
	s/a	s/mor	*conc	*conc	vfarc	vfbr	
HFCm: m60	100	40	40	0	0	0	
HFCm: hfc60	100	40	40	0	3	1.5	
HFCc: matrix-c	41.6	35.1	23.5	33	0	0	
HFCc: hfc-c	41.6	35.1	23.5	33	3	0.3	

#### 3.2 HFC の完全拘束挙動解析の設定条件の概要

解析条件について、HFCm と HFCc 共通のモルタルのヤング率とクリープ係数の経時変化は、拘束材齢  $tr$  (hr)により、文献<sup>12)</sup>の歪ゲージ実測値に対応するよう、式(19)&(20)で定量化した。

$$E_m(tr) = 41000 \sqrt{\exp \left\{ 0.4 \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{tr/24}} \right) \right\}} \quad (19)$$

$$\phi_m(tr) = \frac{1.8}{0.5 \ln(tr/24)} \quad (20)$$

また、式(10)中の調整パラメータ  $ER$  の設定を次で考えた。PVA 短繊維を混入した繊維補強セメント系複合体の実測ヤング率について、文献<sup>3)5)</sup>では、繊維混入率の増加とともに低下し、また、曲げ剛性も低下している。PVA 繊維のヤング率は、若材齢モルタルより高く、複合則が成り立つ場合、低下は考えられない。様々な短繊維補強セメント系複合体の製造時の連行空気量を調査した結果、繊維混入率の増加とともに無視できない空気量も増加する結果を得た。そこで、文献<sup>3)</sup>の結果を、式(21)の  $ER$  に適用する。

$$ER = \frac{E_{hfc_m}(tr)}{E_m(tr)} \quad (21)$$

$$= \left\{ -52168(v_{far} + v_{fbr}) + 23921 \right\} / 23921$$

図-3 に文献<sup>12)</sup>と式(19)&(21)のヤング率の比較結果を示す。式(19)&(21)の設定値は、文献<sup>12)</sup>の実測値の平均に近く、ほぼ妥当である。

さらに、モルタルの自由収縮歪の経時変化は、m60 に対応するよう、式(22)で定量化した。

$$\varepsilon_m(tr) = \frac{-440 \cdot tr}{49 + tr} \cdot 10^{-6}; \text{負が収縮} \quad (22)$$

ハイブリッド・ファイバー補強による収縮抑制の効果は、文献<sup>2)</sup>で示した収縮比率  $shr$  で定量できる。式(23)に HFCm と HFCc の  $shr$  を示す。

$$shr_m(tr) = \frac{\varepsilon_{hfc_m}(tr)}{\varepsilon_m(tr)}; shr_c(tr) = \frac{\varepsilon_{hfc_c}(tr)}{\varepsilon_c(tr)} \quad (23)$$

なお  $\varepsilon_c$  は繊維補強無しコンクリート自由収縮歪。

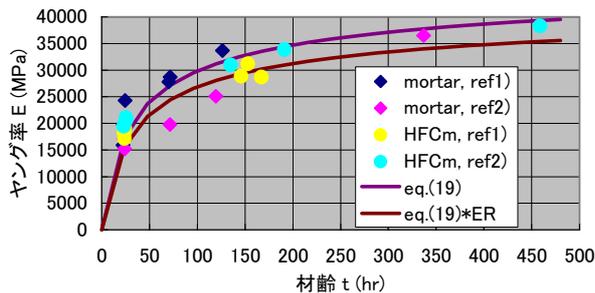


図-3 ヤング率の実験値と解析値の比較

### 3.3 HFC の完全拘束挙動の解析結果及び考察

図-4 に HFCm の完全拘束挙動の解析結果を実験結果とともに示す。ER=1 のハイブリッド・ファイバー補強時の自由収縮歪と拘束引張応力は、実験結果と少し乖離しているが、 $shr_m$  から繊維補強による収縮抑制を得た。適切な ER の設定により、歪と応力とも実験結果とほぼ同じ状況を得た。ER=1 の時は、歪と応力とも経時変化がモルタルとあまり変わらなかったが、モルタルの破壊強度 (約 3~3.5MPa) よりも、少し破壊強度が向上 (約 3.5~4MPa) していることから、微細繊維による微細ひび割れ損傷蓄積の抑制によって、破壊材齢の遅延が説明できる。ER が絡むと、収縮抑制が強まる分、拘束応力の発現がより小さくなり、さらに破壊材齢が遅延する。

図-5 に HFCc の完全拘束挙動の解析結果を実験とパラメトリック解析結果とともに示す。粗骨材混合時の HFCc の収縮歪と拘束応力が定量評価できた。収縮歪は、繊維補強有無にかかわらず実験値とほぼ同じになった。モルタルの ER 考慮は、HFCc の収縮歪よりも拘束応力に影響する。ER=1 にて、繊維ヤング率のみ小→大の変化は収縮歪が大→小に変化し、モルタルヤング率のみ大→小の変化は拘束応力が大→小に変化し、収縮歪や拘束応力の各制御の材料設計に役立つ。

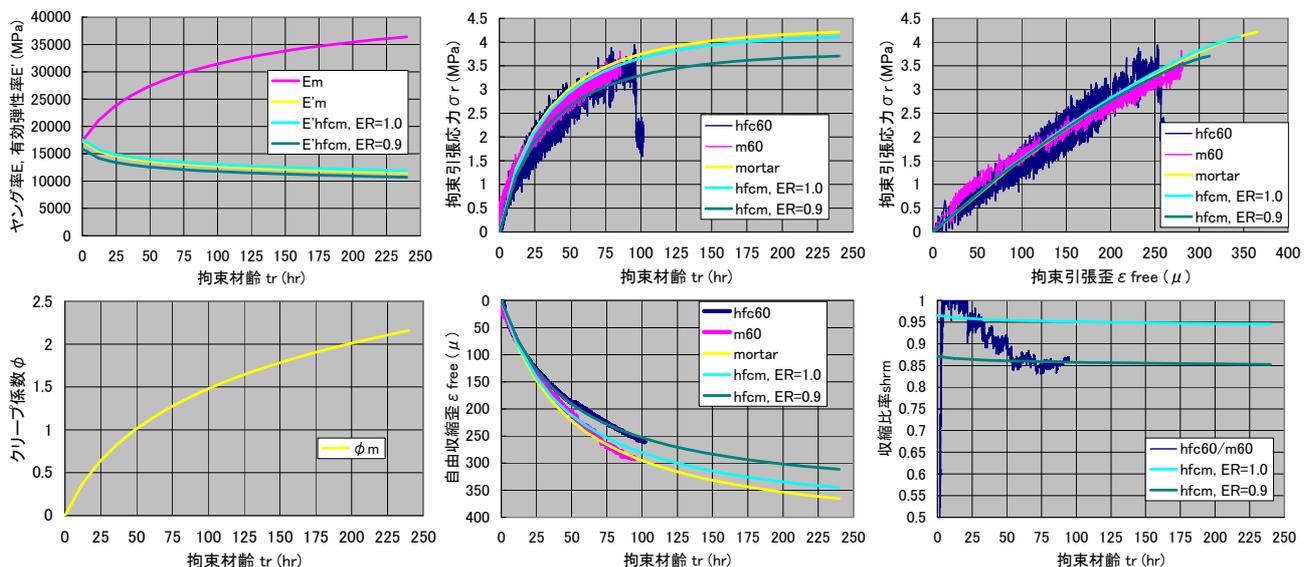
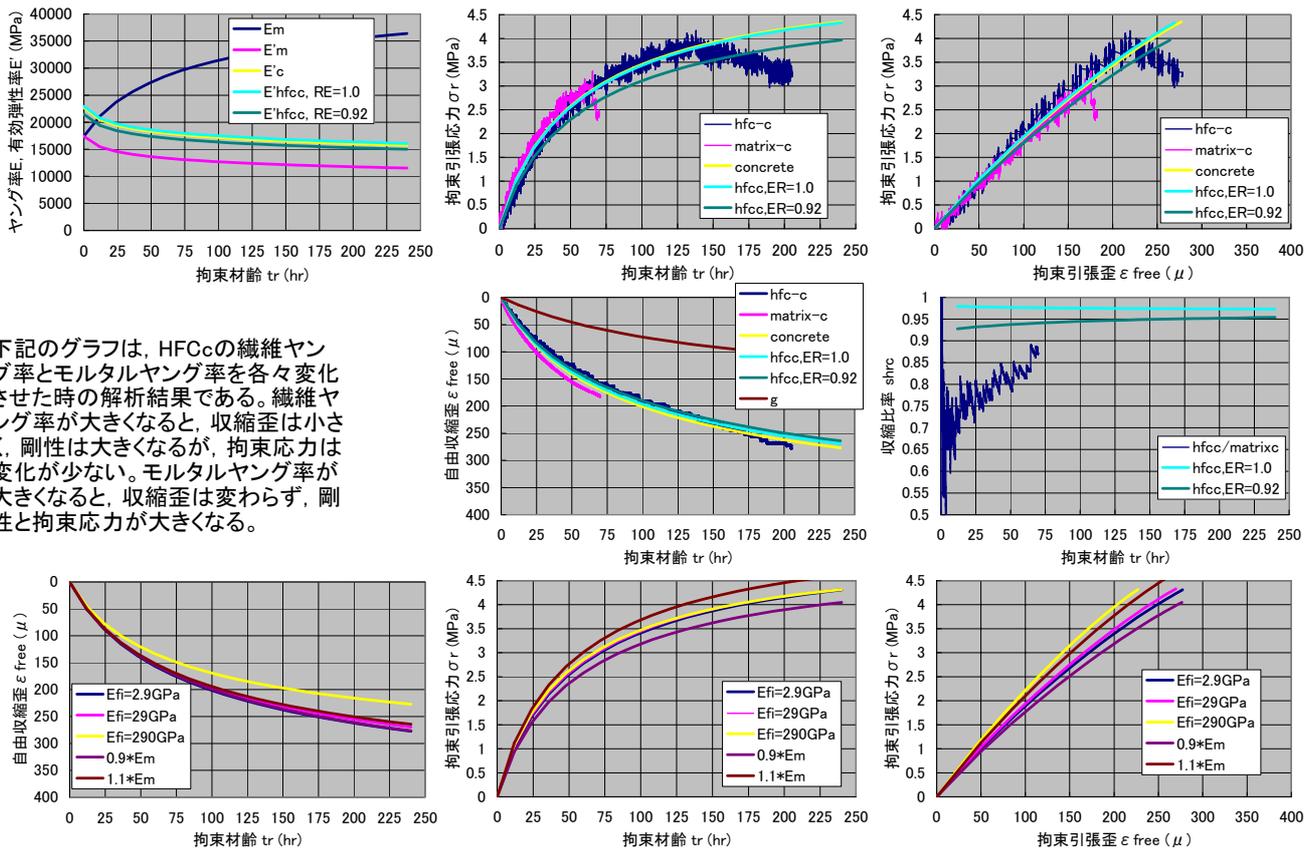


図-4 HFCm の完全拘束挙動の解析結果と実験結果の比較



下記のグラフは、HFCcの繊維ヤング率とモルタルヤング率を各々変化させた時の解析結果である。繊維ヤング率が大きくなると、収縮歪は小さく、剛性は大きくなるが、拘束応力は変化が少ない。モルタルヤング率が大きくなると、収縮歪は変わらず、剛性と拘束応力が大きくなる。

図－5 HFCc の完全拘束挙動の解析結果と実験結果の比較とパラメトリック解析結果

以上より、様々な繊維補強条件や粗骨材混入による多種の若材齢コンクリートの拘束収縮力学特性が定量評価可能となった。

#### 4. まとめ

若材齢下の HFC の完全拘束挙動について、ハイブリッド・ファイバー補強効果と粗骨材混合を考慮した収縮力学モデル解析法を新たに提案し、その有効性を実測値との比較から実証した。

#### 謝辞

本研究は、平成 17・18 年度文部科学省科学研究費補助金若手研究 B(課題番号：17760448, 研究代表者：中村成春)と財団法人トステム建材産業振興財団平成 17 年度(第 14 回)研究補助金の助成を受けました。また、実験実施にて、宇都宮大学大学院生の小島一樹君と井坂幸俊君に協力頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

1) 中村成春, 榎田佳寛：ハイブリッド・ファイ

バー・コンクリートの拘束収縮ひび割れ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.319-324, 2005.6

- 2) 中村成春：ハイブリッド・ファイバー・コンクリートの拘束収縮ひび割れに及ぼす乾燥の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.383-388, 2006.7
- 3) 中村成春：多様な組合せの PVA 繊維を使用したハイブリッド・ファイバー・コンクリートの曲げ破壊時の破壊進行領域に関する一考察, AIJ 大会学術講演梗概集(関東)材料施工, Vol.A-1, pp.291-292, 2006.9
- 4) 寺西浩司, 佐藤嘉昭：複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 3 相モデルへの展開および外的要因の影響の考慮, AIJ 構造系論文集, No.602, pp.21-28, 2006.4
- 5) 住学, 竹内博幸, 中出 睦, 谷垣正治：ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.257-262, 2003.7