

# 論文 再生 RC 部材の時間依存性挙動について

岡 幸秀<sup>\*1</sup>・平松 洋一<sup>\*2</sup>・丸山 一平<sup>\*3</sup>・佐藤 良一<sup>\*4</sup>

要旨：再生細・粗骨材および天然骨材をそれぞれ使用したコンクリートのクリープ, 乾燥収縮, さらに RC はり供試体の, 載荷後およそ 1 年における, 時間依存性変形・ひび割れ性状を, 湿潤と乾燥の 2 養生条件をパラメータとして検討した。再生骨材を使用すると天然骨材を使用した場合に比べ, クリープ, 乾燥収縮が大きく, 変形が大きくなる。

キーワード：再生コンクリート, クリープ, 乾燥収縮, 時間依存性挙動, RC はり

## 1. はじめに

近年, 建設廃棄物の再利用化が進められ, 排出されるコンクリート塊の再利用率も高まってきている。しかし現状では, コンクリート廃材の再利用のほとんどは路盤材など要求性能の低いものであり, 一般構造部材には使用されていない。今後, 路盤材等の需要の限界, 良好な骨材資源の枯渇からコンクリート廃材から製造される再生骨材を使用したコンクリートを一般構造部材に適用することが必要となってくると考えられる。

再生コンクリートに関するこれまでの研究は, それらのほとんどが短期的視点からの研究であるが, 再生コンクリートの一般構造部材への適用性を検討するためには長期的視点から構造性能

を検討する必要があると考えられる。

そこで前報<sup>1)</sup>では, 湿潤と乾燥の 2 養生条件をパラメータとし, 再生骨材及び, 天然骨材を使用した RC はりの持続載荷試験を行い, 載荷後約 30 日の時間依存性挙動を検討した。本論文は, これをさらに延長したもので, 持続載荷期間約 1 年の変形, ひび割れ幅の挙動を実験的に明らかとするとともに, 既往の線形クリープ則で, どの程度説明できるかを検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び供試体概要

本研究で使用した使用材料を表 - 1 に, 本研究で製造したコンクリートの配合を表 - 2 に示す。

表 - 1 使用材料

		表乾比重	吸水率 (%)	ペースト混入率 (%)	モルタル混入率 (%)
天然細骨材	相模川産川砂	2.63	2.63	-	-
天然粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石	2.66	0.69	-	-
再生細骨材	FR45	2.32	9.94	38.2	-
	FR60	2.30	11.02	33.0	-
再生粗骨材	CR45	2.41	5.13	-	50.8
	CR60	2.41	5.28	-	50.3

表 - 2 コンクリートの配合

名称	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				単位量(g/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G	高性能AE減水剤	AE減水剤	AE助剤	顔料
CFRC	60	46.9	176	293	755	885	-	432.4	732.4	5859
VC	60	46.9	170	283	860	900	-	424.5	849	-
OC45	45	43	170	378	749	1004	3402	-	-	-
OC60	62.5	47	167	267	867	988	-	-	667.5	-

\*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)  
 \*2 株式会社ピーエス三菱 修士(工学) (正会員)  
 \*3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻助手 博士(工学) (正会員)  
 \*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

ここに,CFRC は再生細・粗骨材を,VC は天然細・粗骨材を使用したコンクリートである。以下,これらのコンクリートを使用した RC はりをそれぞれ CFRC はり,VC はりと称する。再生骨材には原コンクリート(OC45 及び OC60)を材齢 656 日で破砕して製造したものを使用した。OC45 及び OC60 は VC と同様の骨材を使用し,それぞれ水セメント比を 45%及び 62.5%として製造したコンクリートである。OC45 及び OC60 からつくられた再生細骨材をそれぞれ FR45 及び FR60,再生粗骨材をそれぞれ CR45 及び CR60 と呼び,これらを 2 : 1 の質量比で混合したものを CFRC の骨材として使用した。なお,粗骨材の表乾状態は目視により確認し,細骨材は表面水率を求めて補正を行った。

RC はり供試体と同時に,無拘束供試体,圧縮クリープ供試体をそれぞれ作製し,収縮特性,クリープ特性を検討した。

すべての供試体は打込み後脱型までの間,コンクリート表面を湿潤状態に保った。材齢 2 日で脱型し,供試体に濡れ新聞を巻き湿潤状態とし,さらにラップフィルムを巻き乾燥を防いだ。材齢 7 日に半数の供試体の濡れ新聞,ラップフィルムを除去し,気中乾燥下に暴露した。実験はすべて室内で行った。試験期間中における供試体付近で測定した温度及び湿度を図 - 1 に示す。平均温度は CFRC の場合 16.6 ,VC の場合 15.7 ,平均湿度は CFRC で 62.3%,VC で 66.9%であった。

RC 供試体の寸法は 200 × 150 × 2800mm で等曲げ区間が 800mm,せん断区間が 700mm である。はり断面を図 - 2 に示す。鉄筋のヤング係数は 193kN/mm<sup>2</sup> であった。載荷は図 - 3 のように 2 体の供試体を積み上げ,PC 鋼材を締め付けることにより行った。載荷荷重はひび割れ断面における鉄筋応力の計算値が約 100N/mm<sup>2</sup> となるように設定した。載荷は材齢 35 日に行い,載荷時の

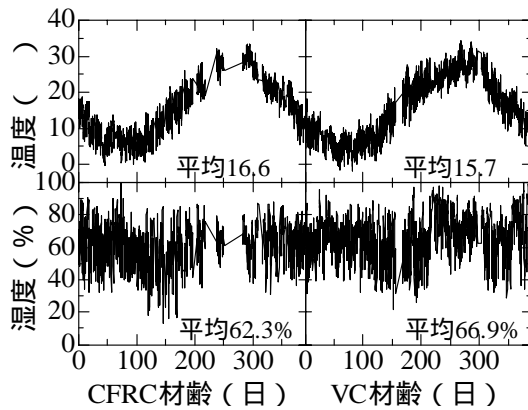


図 - 1 環境条件

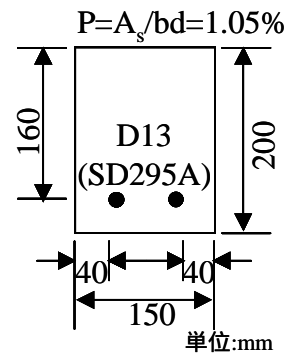


図 - 2 RC はり断面

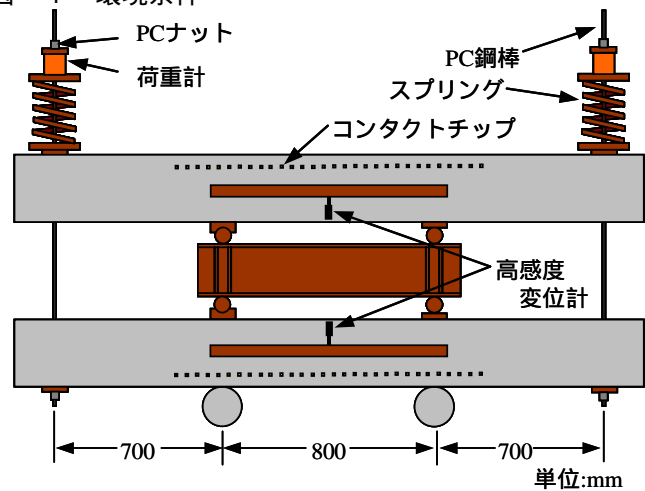


図 - 3 RC はり供試体載荷方法

有効材齢は CFRC はりで約 25 日,VC はりで約 21 日であった。ここに有効材齢は土木学会標準示方書の式<sup>2)</sup>に従い求めた。

無拘束供試体の寸法は 200 × 150 × 300mm とした。また,圧縮クリープ供試体の寸法は 200 × 150 × 300mm であり,軸方向断面中央には載荷用 PC 鋼棒のシースとして塩化ビニル製パイプ(外径 32mm)を予め設置し,ポストテンション方式によりコンクリートに応力を導入した。載荷応力は載荷時材齢の圧縮強度の 20%とし,載荷時材齢は 7 日,28 日,180 日の 3 材齢とした。

## 2.2 測定方法

平均曲率は,図 - 3 のようにスパン中央に高感度変位計を設置し,その変位を測定し,等曲げ区間の変形を円弧と仮定し,次式により求めた。

$$\psi = \frac{2\delta}{L^2 + \delta^2} \quad (1)$$

ここで,  $\psi$  : 平均曲率

$\delta$  : 載荷点変位を基準とするスパン中央の変位

$L$  : 等曲げ区間長さの 1/2

また,等曲げ区間のひび割れ幅を測定するために RC 供試体両面の引張鉄筋位置に,標点距離 40mm となるようにコンタクトチップを貼り付け,コンタクトゲージ法により測定し,その実測値をひび割れ幅とした。

無拘束供試体及び圧縮クリープ供試体は低弾性埋込型ひずみ計(ヤング係数:約 40N/mm<sup>2</sup>)を設置し測定した。圧縮クリープ試験では載荷応力を一定に保つよう定期的に荷重を導入し,導入応力の変動が ±3% となるように努めた。

### 3. 解析概要

本研究では安齋・佐藤らの方法<sup>3)</sup>により計算した。本解析法は図 - 4 に示すように,ひび割れ間中央断面からひび割れ断面の間の任意断面について解く。本解析法の特徴を以下に述べる。

#### 3.1 コンクリートのクリープ

コンクリートのクリープは載荷時材齢の影響を考慮したクリープ係数に基づく重ね合わせの原理により求める。

#### 3.2 コンクリートの収縮

コンクリートの収縮は実測値を用い,断面内で一様に生じるとした。

#### 3.3 付着応力 - すべり関係

図 - 4 のように付着剛性はひび割れ近傍以外では一定値とし,ひび割れ近傍の引張鉄筋径の 1.5 倍の区間において直線的に劣化させ,ひび割れ部では 0 としている。付着クリープは,載荷時

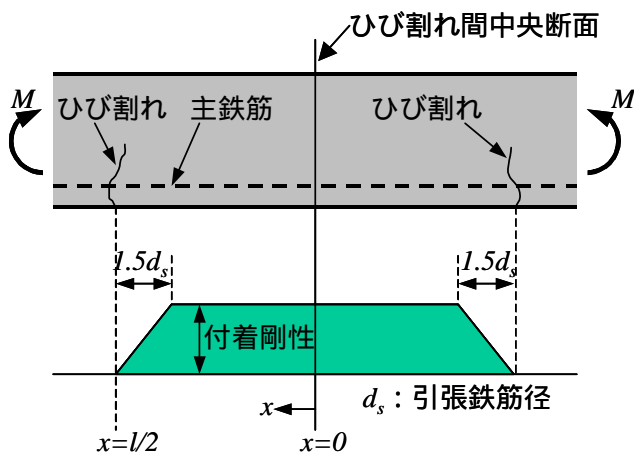


図 - 4 解析概念図

材齢の影響を考慮した付着クリープ係数を用いた重ね合わせの原理に基づいて求める。

### 3.4 解析に用いた諸元

解析に用いた諸元を表 - 3 に示す。ヤング係数,ひび割れ間隔は実測値,付着剛性は,本実験と同一もしくは,ほぼ同一の配合で行われた実験<sup>4)</sup>の結果より得られた値である。

表 - 3 解析に用いた諸元

	ヤング係数	ひび割れ間隔	付着剛性 <sup>4)</sup>
CFRC	18.1kN/mm <sup>2</sup>	9.1cm	106N/mm <sup>3</sup>
VC	24.4kN/mm <sup>2</sup>	14.7cm	139N/mm <sup>3</sup>

## 4. 結果と考察

### 4.1 無筋コンクリート

#### (1) 強度特性

強度特性は前報<sup>1)</sup>で述べたとおりである。

#### (2) 収縮特性

図 - 5 に CFRC 及び VC の乾燥収縮ひずみを示す。

これより,CFRC の乾燥収縮ひずみは,VC のそれに比べ非常に大きく,乾燥開始 382 日後において約 1.8 倍の値を示した。これは,再生骨材には多孔質なペースト及びモルタル分が含まれていること,収縮に抵抗する実質の骨材部分が少ないこと,及び CFRC の暴露期間中の平均相対湿度が VC のそれに比べ小さいことによると考えられる。ちなみに,土木学会標準示方書の収縮予測式<sup>1)</sup>によれば,CFRC と VC の暴露期間の相対湿度差による乾燥収縮ひずみ差は,VC を対象とした場合であっても 10% 程度であり,CFRC と VC の乾

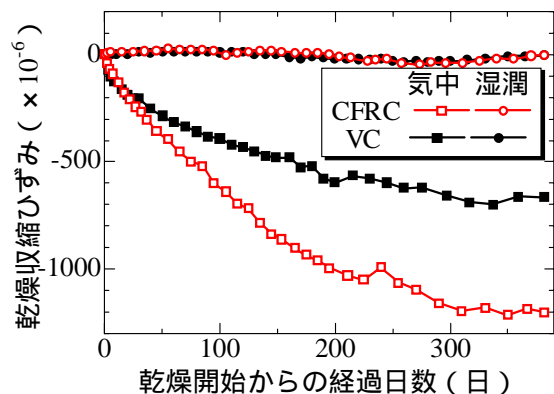


図 - 5 乾燥収縮ひずみ

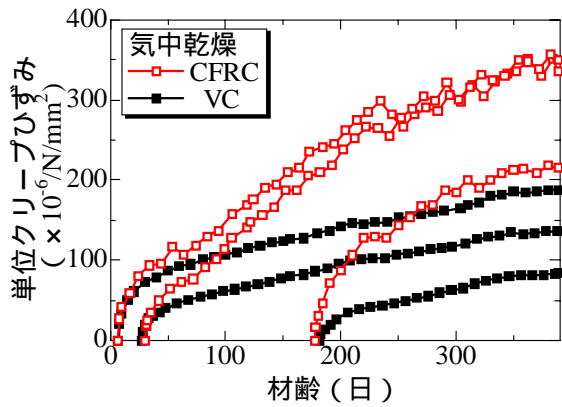


図 - 6 単位クリープひずみ (気中乾燥)

乾燥収縮ひずみの相違に及ぼす影響は大きくはないと考えられる。

(3) クリープ特性

図 - 6 に気中乾燥下での、図 - 7 に湿潤養生での単位応力あたりのクリープひずみをそれぞれ示す。なお、クリープひずみは、圧縮クリープ供試体のひずみから、載荷時の弾性ひずみ及び、無拘束供試体のひずみを差し引いて求めた。

これらの図より、単位クリープひずみも VC に比べ、CFRC で大きな値となった。材齢 389 日の時点で、気中乾燥下において材齢 7 日に載荷した供試体は VC に比べ CFRC で 2 倍近い値であり、材齢 28 日及び 180 日に載荷したものはともに約 2.5 倍の値となった。湿潤養生の供試体においても、各載荷時材齢の供試体で、それぞれ 1.3 ~ 1.5 倍の値となった。VC に比べ CFRC で、クリープひずみに与える乾燥の影響が大きい、これは CFRC では VC に比べ乾燥収縮が大きく、それに伴って蓄積される内部の損傷が大きくなるためであると考えられる。

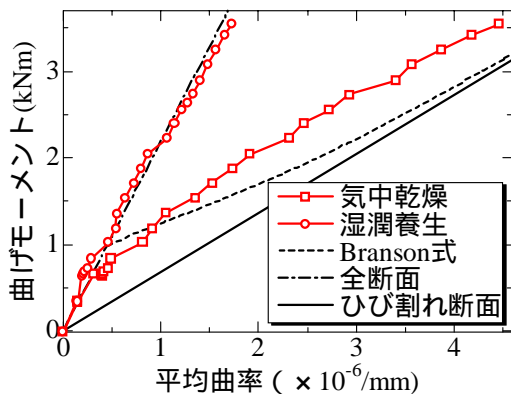


図 - 8 M - 関係 (CFRC)

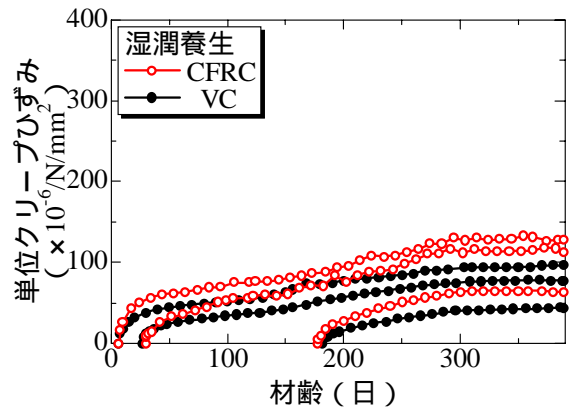


図 - 7 単位クリープひずみ (湿潤養生)

また、単位クリープひずみと標準養生 28 日のヤング係数 (CFRC: 20.9kN/mm<sup>2</sup>, VC: 27.7kN/mm<sup>2</sup>) を用い、クリープ係数を求めた。材齢 7 日に載荷した供試体の、材齢 389 日におけるクリープ係数は、気中乾燥下では、CFRC で 7.28, VC で 5.19 と、CFRC が VC に比べ 1.4 倍の値となった。一方、湿潤養生では CFRC で 2.71, VC で 2.68 とほとんど同等の値となった。これは、CFRC は VC に比べ、単位クリープひずみは大きい、ヤング係数が小さいため、それらを掛け合わせた結果、クリープ係数がほぼ等しくなったと考えられる。

4.2 鉄筋コンクリート

(1) 変形特性

図 - 8 に CFRC はりの、図 - 9 に VC はりの載荷時における平均曲率を示す。

これらより、湿潤養生において、両配合ともひび割れが生じておらず、全断面有効とした計算値と実測値がほぼ一致している。一方、気中乾燥においては、両配合ともひび割れが生じている。ひび割れ発生モーメントは VC はりで約 1.9kNm で

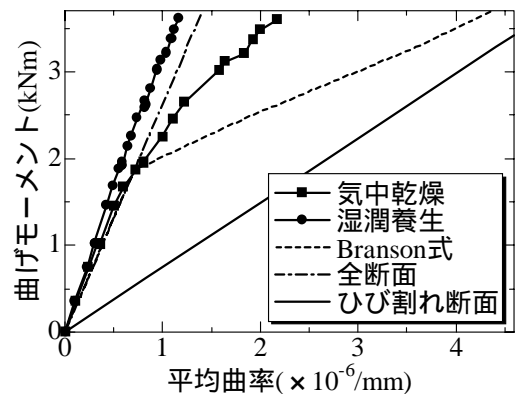


図 - 9 M - 関係 (VC)

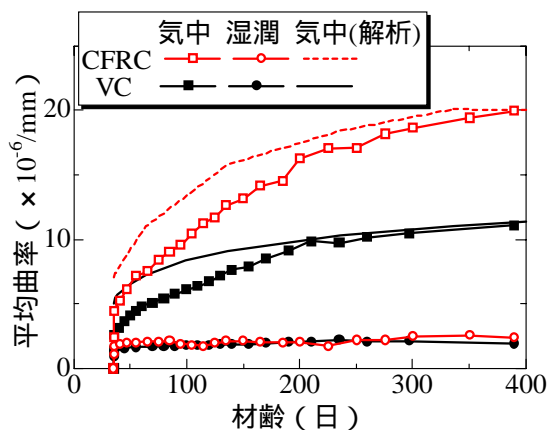


図 - 10 平均曲率の経時変化

あったのに対し、CFRC はりでは約 1.0kNm と 47%程度の低下がみられた。これにより、載荷直後の平均曲率は VC はりに比べ、CFRC はりでは、およそ 80%大きくなった。

持続荷重下における平均曲率の経時的変化を図 - 10 に示す。また、図 - 11 に載荷直後と持続載荷後約 1 年経過した後の平均曲率を示す。

これらより、湿潤養生供試体では平均曲率の増加はあまり見られない。これは、ひび割れが発生していないため全断面有効であり、コンクリートの応力が小さく、クリープがあまり進行しないこと、また乾燥収縮による変形の付加が小さいことが原因と考えられる。また、気中乾燥供試体については、クリープ、乾燥収縮の影響を受け、平均曲率が増大している。その増加量は持続載荷後約 1 年において、CFRC が VC に比べ約 80%大きい。

また、図 - 10 には 3. 章で述べた安齋らの方法<sup>3)</sup>による解析値も合わせて示した。この図より、この解析値は、載荷後約 200 日以降について実測値とよく一致しているが、それ以前の材齢において、実測値を過大評価している。これは、この解析法ではひび割れ断面の引張部コンクリートを無視している一方、実際には後述のようにひび割れ幅が小さいため、無視し得ない引張応力が生じているためと考えられる。この影響は、主に乾燥収縮により、材齢とともに増大するひび割れ幅に対応して、小さくなっている。

## (2) ひび割れ特性

前節で述べたように湿潤養生供試体についてはひび割れが発生していないため、本節では気中

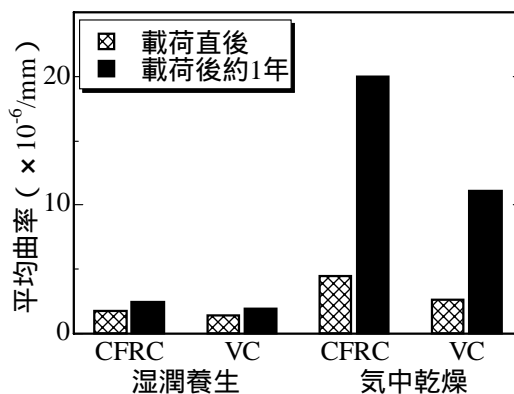


図 - 11 平均曲率の変化

乾燥供試体についてのみ検討する。まず、図 - 12 には載荷直後とその約 1 年後における最大及び平均のひび割れ幅の値を示す。またこれに対応するひび割れ間隔を図 - 13 に示す。載荷後に新たなひび割れは生じず、ひび割れ間隔に変化はない。載荷直後において、CFRC は VC に比べ、ひび割れ間隔が小さいが、最大ひび割れ幅が 1.8 倍、平均ひび割れ幅が 2.1 倍大きな値となった。これは、後者に比べ前者の場合、引張強度が小さくひび割れ分散が起こりやすい一方、付着が弱く<sup>4)</sup>幅の制御性能が低いためと考えられる。持続載荷後約 1 年間のひび割れ幅の増加量は、最大ひび割れ幅で CFRC が 0.08mm 程度、VC が 0.09mm 程度であり、平均ひび割れ幅はともに 0.06mm 程度となり、増加量は両配合間でほぼ同等であった。

また、図 - 14、図 - 15 に、それぞれ CFRC はり及び VC はりの最大・平均ひび割れ幅の経時的変化を示す。合わせて土木学会標準示方書のひび割れ幅算定式<sup>2)</sup>による計算値、及び 3. 章で述べた安齋らの方法<sup>3)</sup>による解析値も示した。示方書の式を以下に示す。

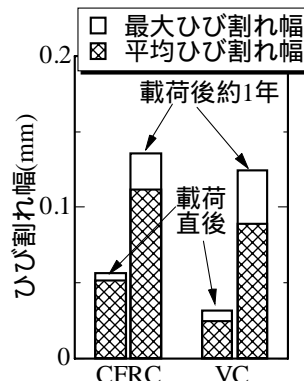


図 - 12 ひび割れ幅の変化

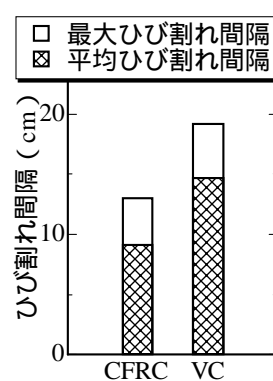


図 - 13 ひび割れ間隔

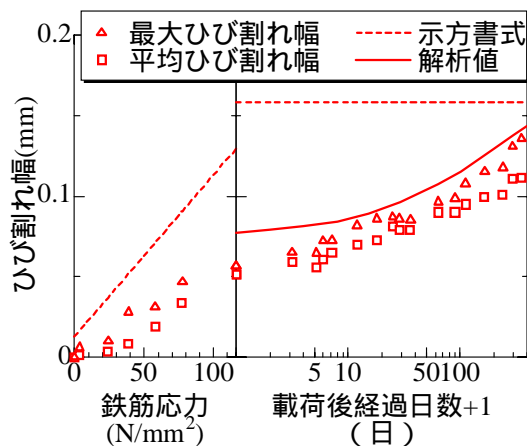


図 - 14 ひび割れ幅 (CFRC)

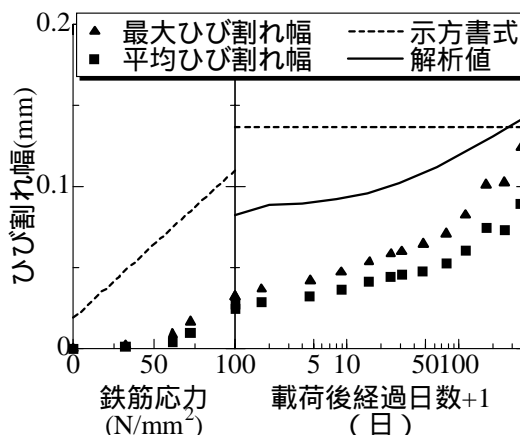


図 - 15 ひび割れ幅 (VC)

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[ \frac{\sigma_{se} + \varepsilon'_{csd}}{E_s} \right] \quad (2)$$

今回、収縮・クリープの影響を表す  $\varepsilon'_{csd}$  の値は、示方書の記述に従い  $150 \times 10^{-6}$  を用いた。また、鋼材表面形状を表す係数  $k_1$  及び、引張鋼材の段数を表す  $k_3$  は両配合とも 1.0、コンクリートの圧縮強度の影響を表す  $k_2$  は CFRC で 1.04、VC で 0.96 である。実測値は示方書による計算値に比べ小さく、安全側の評価となっている。

安齋らの方法による計算値は平均ひび割れ幅に対応するものであるが、実測値を過大評価している。これは、この解析法は、ひび割れ断面における引張部コンクリートの応力寄与を無視しており、ひび割れ幅が小さい場合、この影響が大きく、実測値を過大評価したと考えられる。

## 5. まとめ

本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

- (1) CFRC の乾燥収縮ひずみは VC のそれに比べ大きく、乾燥開始 382 日後において、およそ 1.8 倍の値となった。
- (2) CFRC の単位クリープひずみは VC に比べ、気中乾燥下で特に大きく、材齢 389 日において 2 倍以上の値となった。
- (3) 気中乾燥下において CFRC の平均曲率は、クリープ・乾燥収縮の影響をうけ増大し、その増加量は、持続荷重後約 1 年で VC に比べ約 80% 大きい。
- (4) 荷重時におけるひび割れ幅は、ひび割れ間

隔に対応せず、CFRC が VC に比べ 2 倍程度大きい。持続荷重後 1 年間におけるひび割れ幅の増加量は、両配合間に大きな差は見られない。この間、新たなひび割れは発生せず、ひび割れ間隔の変化はなかった。

- (5) 既往の線形クリープ則による計算値について、平均曲率は、荷重後およそ 200 日間、実測値を過大評価しているが、その後は、実測値とよく一致していると考えられる。ひび割れ幅については、ひび割れ断面の引張部コンクリートを無視している影響が VC で特に大きく、実測値を過大評価している。

## 参考文献

- 1) 岡幸秀, 佐藤良一ほか: 再生 RC 部材の早期時間依存性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.997-1002, 2003
- 2) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp.30,100, 2002
- 3) 安齋慎介, 佐藤良一ほか: 応力履歴を考慮した高強度 PRC 部材のクリープ解析について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.187-192, 1999
- 4) 日本学術振興会: ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発, 平成 8 年度 ~ 平成 12 年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書, p.168, 2001