論文　再生ＲＣ部材の早期時間依存性挙動について

岡　幸秀[*1]・平松　洋一[*2]・近藤　拓也[*3]・佐藤　良一[*4]

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 ヶ月における,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ーとして,検討した。その結果,再生骨材を用いることにより単位クリープひずみは大きくなるが,クリープ係数は通常とほぼ等しいこと,はりの短期変位はバージンのそれの比べ大きいが,持続荷重下での増加量はほぼ等しいこと,ひび割れ間隔は小さいがひび割れ幅は大きくなることなどが明らかとなった。

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

1.　はじめに

近年,既存の構造物の解体に伴い排出される建設廃材が増加し,このような建設廃棄物の最終処分場において処理能力の限界が近づいてきている。現在,これらの廃棄物の再利用化が進められ,建設廃棄物の中でも大きな割合を占めているアスファルト塊やコンクリート塊の再利用率はともに 90%を超えるようになった[1)]。しかし,コンクリート塊の再利用はそのほとんどが路盤材や埋め戻し材など要求性能の低いものに限定されており,一般の構造部材には使用されていないのが現状である。今後,解体され排出されるコンクリート塊の増加と,路盤材等の需要の限界,さらには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の構造部材として使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してはこれまでにも多くの研究がなされているが,それらのほとんどが短期的な視点からの研究であり,一般構造物への適用にとって重要な長期的な視点からの研究はほとんどなされていない。

そこで本研究では,湿潤と乾燥の 2 養生条件をパラメーターとし,再生骨材及び,天然骨材を使用した RC はりをそれぞれ作成し,持続載荷試験を行うことにより,時間依存性挙動を把握し,再生骨材を使用したコンクリートの一般構造部材への適用性を検討する。なお,材齢の関係から本論文においては,持続載荷開始後約 30 日（材齢約 65 日）までを検討対象としている。

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** に示し,本研究で製造したコンクリートの配合を**表－2** に示す。

CFRC は再生細骨材,再生粗骨材を使用したコンクリートであり,VC は天然細骨材,天然粗骨材を使用したものである。以下,これらのコンクリートを使用した RC を 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ている。OC45 及び OC60 は VC と同様の骨材を使用して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。これらの原コンクリート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

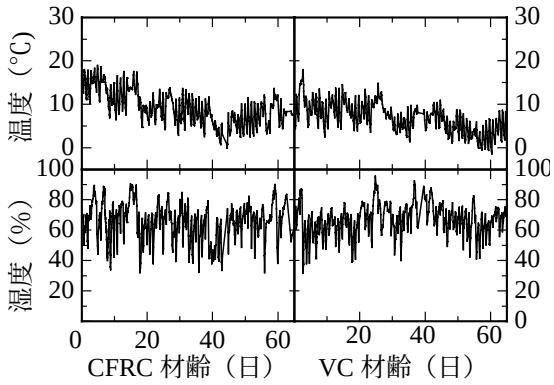
*1　広島大学　工学部第四類（建設系）　（正会員）
*2　広島大学大学院　工学研究科社会環境システム専攻　（正会員）
*3　西日本旅客鉄道株式会社　小郡土木技術センター　工修　（正会員）
*4　広島大学教授　工学研究科社会環境システム専攻　工博　（正会員）

表－1　使用材料

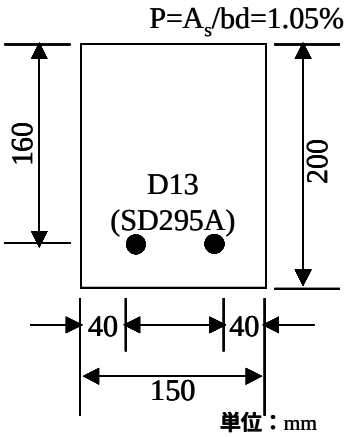
		表乾比重	吸水率（%）	ペースト混入率（%）	モルタル混入率（%）
天然細骨材	相模川産川砂	2.63	2.63	－	－
天然粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石	2.66	0.69	－	－
再生細骨材	FR45	2.32	9.94	38.2	－
	FR60	2.30	11.02	33.0	－
再生粗骨材	CR45	2.41	5.13	－	50.8
	CR60	2.41	5.28	－	50.3

表－2　コンクリートの配合

名称	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				単位量(g/m^3)			
			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	－



図－1　環境条件

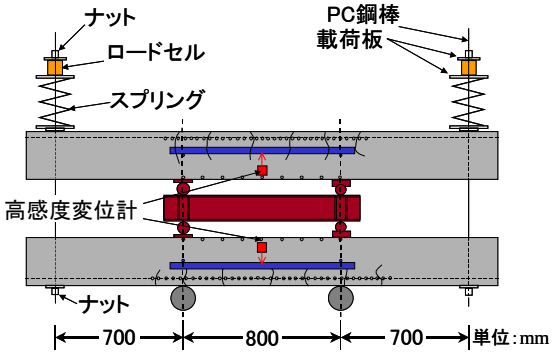


図－2　RC 供試体断面

を 2:1 の質量比で混合したものを CFRC はりの骨材として使用した。

供試体は RC 供試体に加え,収縮特性,クリープ特性を把握するために無拘束供試体,圧縮クリープ供試体をそれぞれの配合,養生条件で作製した。養生方法は打ち込み後脱型までの間,コンクリート表面を湿潤状態に保ち,材齢2日で脱型を行い濡れ新聞を供試体に巻くことにより湿潤状態とし,さらにラップフィルムを巻くことにより乾燥を防いだ。材齢 7 日に供試体の半数の濡れ新聞,ラップフィルムを除去し,気中乾燥下に暴露した。また,試験期間中の環境条件を**図－1** に示す。平均温度は CFRC の場合 9.2℃,VC の場合 7.0℃であり,平均湿度は CFRC で 65.1%,VC で 67.0%となっている。

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。断面は**図－2** のようになっており,鉄筋は引張鉄筋のみでヤング係数は 193kN/mm^2 であった。載荷方法は**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応力を導入した。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^2 となるように設定した。載荷は材齢 35 日に行い,載荷時の有効材齢は CFRC はりで約 25 日,VC はりで約 21 日であった。ここに有効材齢はコンクリート標準示方



図－3　RC 供試体載荷方法

書の式[2)]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。導入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 日の 2 材齢とした。

2.2 測定方法

図－3 のように,はり中央部に高感度変位計を設置し,中央点における変位を測定し,等曲げ区間の平均曲率を次式により算出した。

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

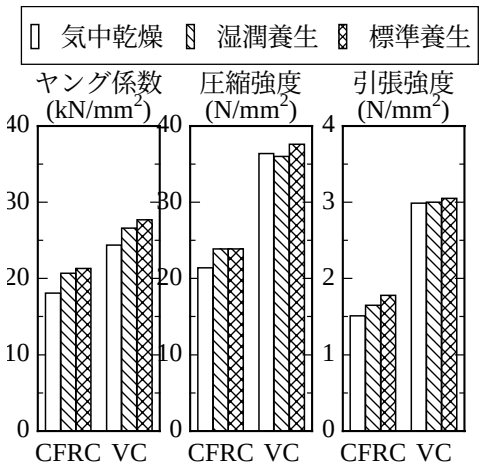
ここで, ψ：平均曲率

δ：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ゲージ(ヤング係数：約 40N/mm^2)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±1%となるように努めた。



図－4 強度特性

3. 結果と考察

3.1 コンクリートの強度特性

図－4 に材齢 28 日の各配合及び養生条件におけるヤング係数,圧縮強度,引張強度を示す。

これらの結果より,再生骨材を使用したことによる強度の低下割合は圧縮強度が気中乾燥で 41%,湿潤養生で 34%であったのに対し,引張強度は気中乾燥で 50%,湿潤養生で 45%であった。これは再生骨材の表面に付着している原コンクリートのモルタル分が新しいモルタルと原骨材との付着を阻害することにより, モルタルと原骨材が剥離しやすい条件となり,その影響が圧縮強度に比べ,引張強度に顕著に表れることを示している。

3.2 乾燥収縮特性

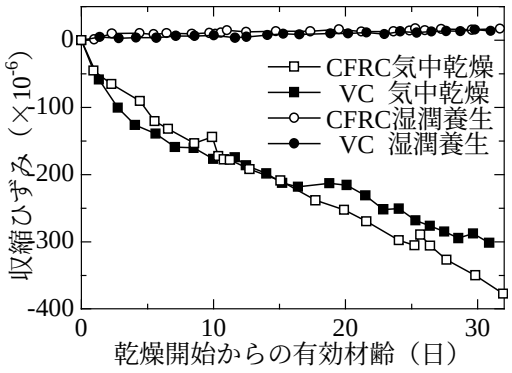
図－5 に CFRC および VC の乾燥収縮を示す。あわせて湿潤養生下のひずみを参考値として示した。

実験期間の温度,湿度は**図－1** のようであるが,CFRC の乾燥収縮は,VC のそれに比べ大きくなる傾向があり,乾燥開始後有効材齢 30 日で約 1.3 倍の値を示した。

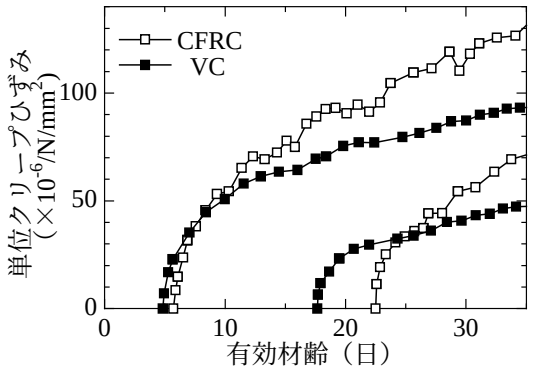
3.3 クリープ特性

図－6,**図－7** に気中乾燥及び湿潤養生での単位クリープひずみを,**図－8**,**図－9** に気中乾燥及び湿潤養生でのクリープ係数を示す。なおクリープひずみは,クリープ供試体のひずみから,載荷時の弾性ひずみおよび無拘束供試体のひずみを差し引いて求め,クリープ係数の算出には標準養生 28 日のヤング係数を用いた。

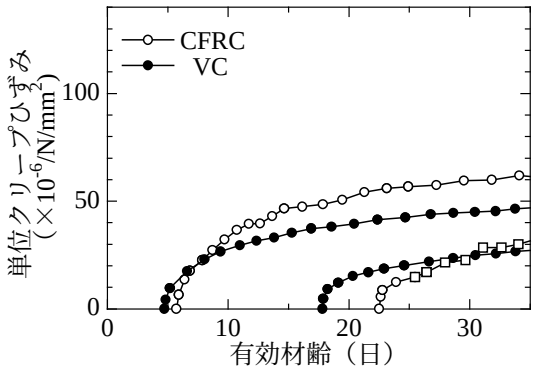
これらより単位クリープひずみは,両養生条



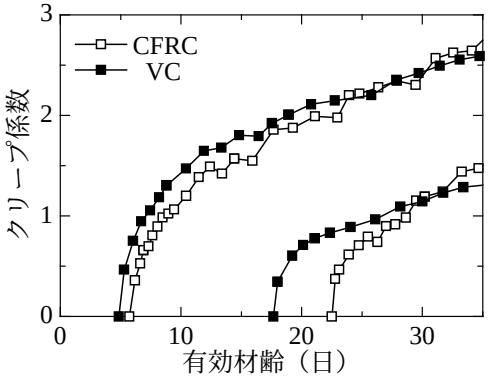
図－5 収縮ひずみ



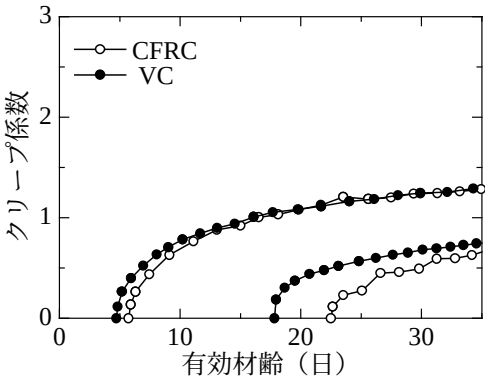
図－6　単位クリープひずみ(気中乾燥)



図－7　単位クリープひずみ(湿潤養生)



図－8　クリープ係数(気中乾燥)



図－9　クリープ係数(湿潤養生)

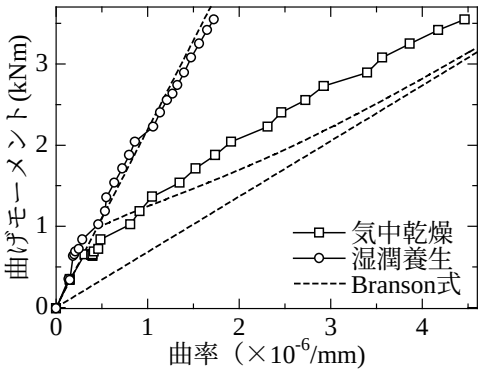
件とも，有効材齢 6 日で載荷された場合,CFRC の方が載荷後 30 日で 1.45 倍大きなひずみを生じた。しかし,クリープ係数には配合間の相違は小さい。これはヤング係数が CFRC の方が小さく,単位クリープをヤング係数で除した結果,クリープ係数がほぼ等しくなったと考えられる。

3.4　変形特性

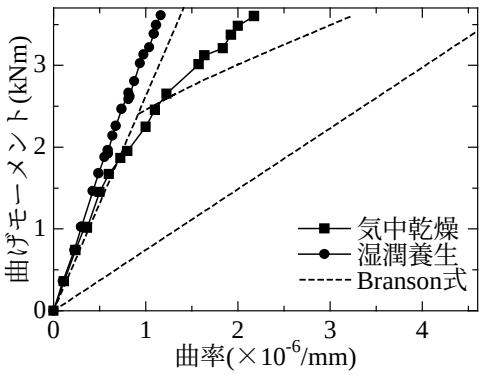
図－10 に短期載荷における CFRC はりの曲率を,**図－11** に短期載荷における VC はりの曲率を示す。また,**図－12** に材齢と持続載荷中の平均曲率の関係を,**図－13** に短期載荷直後と持続載荷後 30 日経過した後の平均曲率を示す。

湿潤養生の供試体においては両配合とも,ひび割れは生じず,全断面有効とした計算値と実測値はほぼ一致している。CFRC はりでは気中乾燥供試体のひび割れ発生モーメントの 3 倍のモーメントに対してもひび割れていない。

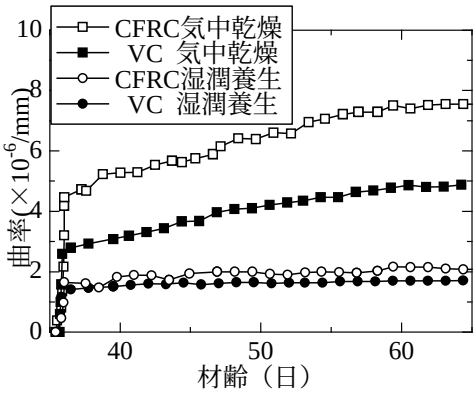
一方,気中乾燥供試体は両配合ともひび割れは生じている。気中乾燥供試体のひび割れ発生モーメントは,天然骨材を使用した VC ではほぼ 2.6kNm,再生骨材を使用した CFRC ではほぼ 1.0kNm と約 60%低下している。これは再生骨材を使用した CFRC の気中乾燥下での引張強度が小さいこと,およびはりに乾燥収縮力が生じていることが主な原因と考えられる。ひび割れ発生荷重が CFRC はりの方が小さいため,短期



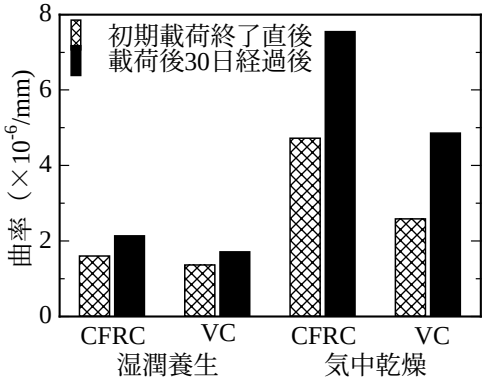
図－10　M－φ関係(CFRC)



図－11　M－φ関係(VC)



図－12　平均曲率の経時的変化



図－13　平均曲率の変化

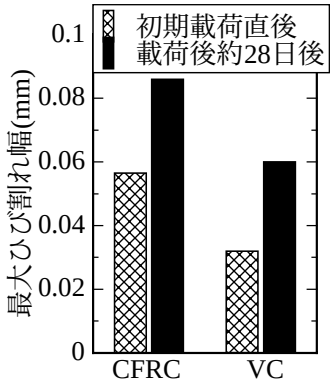
載荷直後の曲率が約 80%大きくなっている。

持続載荷中の挙動の場合,気中乾燥供試体は変形が進行しているが,湿潤養生供試体は曲率の増加はほとんど見られない。これは,全断面有効であるのでコンクリート応力が小さく,クリープによる変形量が小さく,さらに乾燥収縮による変形が付加されないためと考えられる。気中乾燥供試体の曲率の増加量は,乾燥収縮ひずみ及びクリープひずみの差に対応して CFRC はりの方が VC はりより約 20%大きい。

3.5　ひび割れ特性

図－14 に短期載荷直後と持続載荷後 30 日経過した後の最大ひび割れ幅を示す。これに対応する最大ひび割れ間隔は CFRC で 13.0cm,VC で 19.2cm で CFRC の方が 30%小さかった。

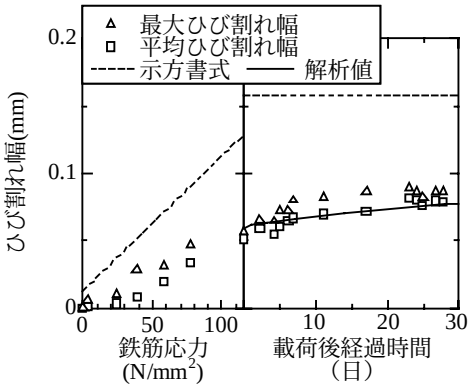
短期載荷直後の CFRC はりの最大ひび割れ幅は,最大ひび割れ間隔に対応せず VC はりより 75%程度大きい。これは CFRC はりの場合, 引張強度が小さい一方付着剛性も小さい [3)]ことによると考えられる。また CFRC はり,VC はりともに短期載荷直後からのひび割れ幅の増加量は 0.03mm 程度であり,変形と同様,配合間におけるひび割れ増加量には相違は見られない。



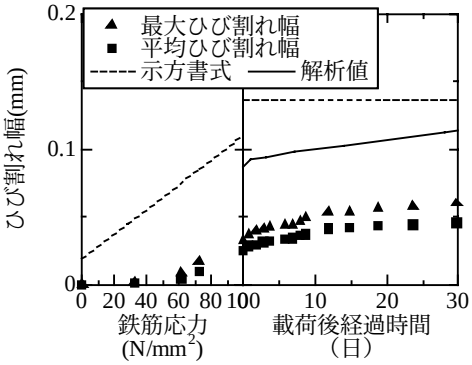
図－14　最大ひび割れ幅の変化

図－15 に CFRC はり,**図－16** に VC はりの最大・平均ひび割れ幅,コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式 [2)]による計算値をあわせて示す。前節で述べたように湿潤養生の供試体にはひび割れが生じていないのでともに気中乾燥の供試体のデータのみである。示方書の式を以下に示す。

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



図－15　ひび割れ幅（CFRC）



図－16　ひび割れ幅(VC)

なお,収縮・クリープの影響を表す ε'_{csd} の値は 150×10^{-6} ,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,コンクリート圧縮強度の影響を表す k_2 は CFRC で 1.04,VC で 0.96 である。また,鉄筋応力が 0 のとき示方書式のひび割れ幅が 0 となっていないのは引張鉄筋位置のコンクリート応力が 0 となる点を原点にとったことによる。これより VC はり,CFRC はりともに示方書による計算値よりも実測値は小さく,安全側の評価となっている。

図－15 及び **16** には安齋らの方法[4] による解析値も示した。この解析法は凝結から時間とともに変化するコンクリートのヤング係数,収縮,クリープ,付着剛性などを考慮でき,任意材齢におけるプレストレスの導入,持続荷重とその変動をコンクリートと付着の応力履歴を考慮しながら扱えることが特徴である。なお,解析で用いた付着剛性は VC の場合 139N/mm3, CFRC の場合 106 N/mm3 である[3]。ひび割れ間隔には実測の平均ひび割れ間隔（CFRC：9.12cm,VC：14.7cm）を用いた。コンクリートのクリープは重ね合わせの原理に基づいて考慮しており,コンクリート部材任意断面の圧縮縁から z の位置における着目している時点 $t_{i+1/2}$ でのコンクリートのひずみ $\varepsilon_{c,i+1/2}(z)$,および応力 $\sigma_{c,i+1/2}(z)$ は以下のようである。

$$\varepsilon_{c,i+1/2}(z)=\sum_{j=1}^{i}\frac{\Delta\sigma_{c,j}(z)}{E_e(t_{i+1/2},t_j)}+\varepsilon_{fr,i+1/2} \quad (3)$$

$$\sigma_{c,i+1/2}(z)=E_e(t_{i+1/2},t_j)\{\varepsilon_{c,i+1/2}(z)-\varepsilon_{c,sum,i-1/2}(z)-\varepsilon_{fr,i+1/2}\} \quad (4)$$

ここで $\Delta\sigma_{c,j}=\sigma_{c,j+1/2}-\sigma_{c,j-1/2}$

$$E_e(t_{i+1/2},t_i)=\frac{E_{c,j}}{1+(E_{c,j}/E_{28})\phi_c(t_{i+1/2},t_j)}$$

$E_{c,j}$,E_{28} は t_j および標準養生材齢 28 日におけるコンクリートのヤング係数である。$\phi_c(t_{i+1/2},t_j)$は,t_j に生じた変動応力に対する $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数である。$\varepsilon_{fr,i+1/2}$ は $t_{i+1/2}$ における自由収縮ひずみである。$\varepsilon_{c,sum,i-1/2}(z)$は,断面内 z の位置における,$t_{i-1/2}$ までの応力履歴によって生じたひずみである。また,本解析法は,鉄筋とコンクリートの付着すべり関係においても重ね合わせの原理が成り立つものとし,同様に取り扱っている。

以上の関係から,全断面およびひび割れ断面（引張部コンクリート無視）においては断面内の軸力とモーメントのつりあい式を解き,ひび割れ間任意断面では,付着すべり関係と関連付けて着目時点のひずみ分布を決定する。

4. まとめ

本研究の範囲で以下のことが考えられる。

（1）CFRC の乾燥収縮ひずみは,VC のそれに比べ大きい傾向を示し,乾燥開始後有効材齢 30 日で 1.3 倍の値を示した。

（2）気中乾燥において CFRC の単位クリープひずみは VC より載荷後有効材齢 30 日でおよそ 1.45 倍であった。しかし,クリープ係数は,ヤング係数が小さいため,ほぼ等しかった。

（3）CFRC はりのひび割れ発生モーメントにおよぼす乾燥の影響は大きく,湿潤養生供試体のひび割れ発生モーメントは気中乾燥供試体のそれの 3 倍以上であった。

（4）短期載荷による CFRC はりの変形は,VC はりと比べ,およそ 80%大きい。しかし,持続載荷中での増加量は 20%大きいのみで特に大きな差はなかった。

（5）CFRC はりの最大曲げひび割れ間隔は,VC はりと比べ,30%小さいが最大ひび割れ幅は 75%大きかった。

参考文献

1)平成 13 年度国土交通白書,pp.155

2)土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編],pp.30,pp.100,2002

3）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, pp.168，2001

4)安齋慎介，佐藤良一他：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