

格子状連續繊維補強材によるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ幅制御

松尾栄治¹・楊 士傑²・牧角龍憲³・松下博通⁴

¹正会員 博士(工学) 山口大学工学部助手(〒755 宇部市常盤台2557)

²正会員 博士(工学) 株式会社小松設計事務所(〒812 福岡市南区横手1-10-14)

³正会員 工博 九州共立大学工学部教授(〒813 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

⁴正会員 工博 九州大学工学部教授(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

コンクリート構造物には種々の要因によりひび割れが発生し、ひび割れ幅には環境条件等により厳しく制限がなされている。

本研究では、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ幅を制御することを目的に、格子状連續繊維補強材を、コンクリート表層付近に配置する補強について検討を行い、横線間隔、かぶり厚さ、素線種類、織り込み方法等の影響を調べた。さらに縦線の付着を考慮した場合のひび割れ幅の算定式を提案し、実測値と計算値が適合することから提案式の妥当性を確認した。

Key Words : control of cracking, drying shrinkage, grid-type continuous fiber reinforcements
crack width, anchorage length

1. はじめに

コンクリートに生じるひび割れは、構造物の機能性、耐久性、美観等に悪影響を及ぼす。なかでも乾燥収縮に起因するひび割れは最も発生しやすいものであり、構造物の機能性、耐久性を保つためには、ひび割れ幅を適切な制限範囲内に収める必要がある。

従来のひび割れ対策としては、収縮低減剤の使用、低水セメント比、高性能減水剤の使用等、配合面からの対策、補強材配置方法等による工夫がある^{1)~5)}。

本研究は、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ幅を制御することを目的に、炭素繊維の格子状連續繊維補強材（以下CFNと称する。）の適用を試みた。CFNは高応力まで弾性範囲を示す引張特性、高引張強度、軽量、化学抵抗性に優れる等の特性を有しております^{6)~10)}、コンクリート構造物の補強材として研究、開発がなされている。また乾燥収縮はコンクリート構造物の表面から生じるので、補強材を表層に配置すればひび割れ幅を低減するのに有効¹¹⁾と考えられるが、CFNは格子状であるため、小さなかぶり厚さでも定着が容易に得られ、ひび割れ幅の低減に有効であると考えられる。ただし、CFNとコンクリート付着作用は鉄筋補強材と異なり、主として横線補強材の断続的機械的定着によるため、その付着作用を明らかにする必要がある。

これまでの研究により、CFNをコンクリートの

表層近くに配置することで、ひび割れ幅を約1/2に抑えることが可能のことや、その場合CFNの横線による抵抗により、縦線のひずみが段階的に減少すること等が明らかになっている¹²⁾。

本研究では、CFNとコンクリートの付着、定着性状を明らかにし、相対滑り変形によるひび割れ幅の推定方法を論じ、ひび割れ幅算定式を提案した。その際、従来^{13), 14)}ではCFNの縦線による付着力を無視していたのに対して、今回はその影響も考慮して補強材交点の相対変位を導き、ひび割れ幅を算出した。さらに実験値との比較により、提案式の妥当性を検証した。

2. 実験方法

(1) 実験概要

実験では、外部拘束材によりコンクリート供試体を両端で固定し、コンクリートの乾燥収縮を拘束することでコンクリートに引張応力を与えた。この応力が引張強度を越えると、予め供試体中央に設けた切り欠き位置にひび割れが発生する。

ひび割れ発生前は拘束材とコンクリートは一体となって収縮変形する。ひび割れが生じると拘束材は元の長さに戻ろうとするが、コンクリート内部に補強材が存在する場合は、ひび割れ位置の補強材に生

表-1 使用した炭素繊維の種類・物性

実験 シリーズ	炭素繊維の 素線種類	素線径 μm	引張強度 MPa	弾性係数 MPa	炭素繊維素線 織り込み方法	メッシュ間隔(mm) 縦線間隔×横線間隔	繊維結合材
I	ピッチ系 炭素繊維	10	1960	1.76×10^5	もしや織り	30×30	ビスフェノール系 エポキシ樹脂
II					平織り	50×40 50×70 50×100 50×∞(横線なし)	
III	PAN系 炭素繊維	7	3528	2.30×10^5	からみ織り	50×50 50×70 50×100 50×∞(横線なし)	

もしや織り
平織り
からみ織り

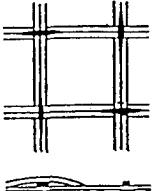
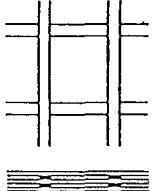
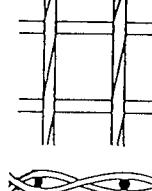




表-2 配合表 (I, II)

W/C (%)	G _{max} (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	混和剤 (cc)	材齢28日において 圧縮強度33.5MPa 引張強度 3.0 MPa 弾性係数 3.2×10^4 MPa
			W	C	S	G				
50	20	44	170	340	771	1065	8±1	4±1	1020	

表-3 配合表 (III)

W/C (%)	G _{max} (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	混和剤 (cc)	材齢28日において 圧縮強度33.5MPa 引張強度 3.3 MPa 弾性係数 2.7×10^4 MPa
			W	C	S	G				
38.0	20	37.4	184	485	592	1031	10±1	4±1	1212	

じる引張力と拘束材に生じる圧縮力が釣り合う形となる。すなわち、拘束材のひずみから補強材に生じる引張応力を算出することが出来る。

実験は以下の3シリーズを行った。

シリーズI :

C FNと鉄筋補強材のひび割れ幅制御結果を比較し、補強材かぶり厚さを変化させて、C FNの付着・定着性状について検討した。

シリーズII :

C FNの横線間隔と付着・定着性状及びひび割れ幅の関係を検討した。

シリーズIII :

C FNの付着能力及びひび割れ発生後の表層コンクリートの乾燥収縮によるひび割れ幅の増分に影響を及ぼすかぶり厚さについて検討した。

(2) 補強材の物性

使用した炭素繊維素線はピッチ系及びPAN系炭素繊維素線であり、ビスフェノール系エポキシ樹脂を用いて熱硬化させ形成した。樹脂含浸はネット状に形成した後行ったため、いずれも格子接点は剛接されたものである。

また、ピッチ系炭素繊維素線の素線径は $10\text{ }\mu\text{m}$ 、引張強度は 19.6 MPa 、弾性係数は $1.76 \times 10^5\text{ MPa}$ であり、PAN系炭素繊維素線の素線径は $7\text{ }\mu\text{m}$ 、引張強度は 35.3 MPa 、弾性係数は $2.3 \times 10^5\text{ MPa}$ である。本研究に使用した連続繊維の種類、物性を表-1に示す。

(3) コンクリートの配合

シリーズI、IIに使用した材料及び配合は同じである。海砂（粗粒率2.61、表乾比重2.57、吸水率

表-4 拘束装置の諸元

実験 シリーズ	拘束材の種類	断面積 (cm ²)	拘束材比 (%)
I	丸鋼 φ22	3.801	5.07
	丸鋼 φ25	4.909	6.55
II	軽溝形鋼 (呼び名1205)	6.063	8.08
III	溝形鋼	31.33	10.4

1.8%), 普通ポルトランドセメント(比重3.15), 砕石(最大寸法20mm, 表乾比重2.71, 吸水率0.7%)を用いた。配合及び強度試験結果を表-2に示す。

シリーズⅢにはレディーミクストコンクリートを使用した。その配合及び強度試験結果を表-3に示す。

(4) 供試体作製方法

表-4に拘束装置の一覧を、表-5に補強材の配置方法を示す。拘束装置はJIS「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」¹⁵⁾に準じて作製した。図-1~3に供試体の形状・寸法を示す。

また、供試体の諸元一覧を表-6に示す。打設は養生室内で行い、材齢2日で脱型した。材齢7日まで標準養生を施し、その後温度20±1°C, 湿度60±3%の恒温恒湿室内に搬入し、その時点を乾燥材齢の零点として測定を開始した。

(5) 測定方法

拘束材、補強材及びコンクリートのひずみは乾燥材齢2週間までは1日4回測定し、その後は1日2回測定した。同時にひび割れの発生や本数等を観察した。ひび割れ幅は供試体表面の3点でクラックメータを用いて測定し、平均値をひび割れ幅とした。自由収縮ひずみ測定用供試体は10×10×40cmを2体作製し、それらの平均値を求めた。補強材のひずみは図-4~5に示す貼付位置にて測定した。

シリーズⅢにおいては、CFNの縦線のたわみが少ないので織り成形であり、ひずみゲージは補強材の上面だけに貼付した。また、同じひび割れ断面に複数本の繊維補強材が均等に引張力を分担するかどうかを調べるために、ひび割れを誘発させるための切り欠き位置の6本の縦線にもひずみゲージを貼付した。

ある横線に交差する縦線に着目し、その横線の両側における縦線補強材のひずみを求めた。これらのひずみ差と補強材の弾性係数及び断面積を掛け合わせることにより、その横線補強材の抵抗力が算出できる。

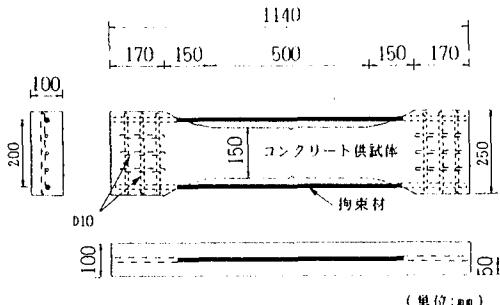


図-1 供試体の形状・寸法(I)

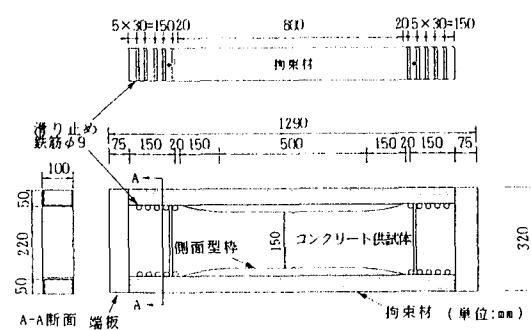


図-2 供試体の形状寸法(II)

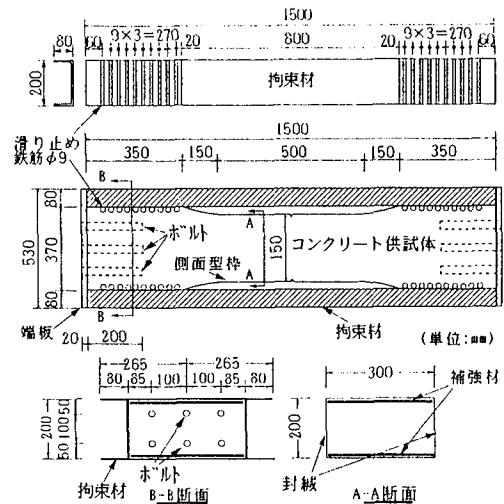


図-3 供試体の形状・寸法(III)

3. ひび割れ幅制御に及ぼす補強材の諸要因

(1) 補強材形態

図-6にコンクリートの乾燥収縮ひずみの、図-7~9に各シリーズの拘束材のひずみの経時変化を示す。ひび割れ発生前、拘束材はコンクリートと一体となり収縮変形する。ひび割れ発生後、プレーン供試体

表-5 補強材の配置

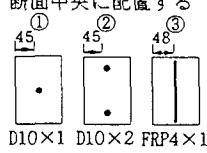
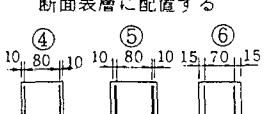
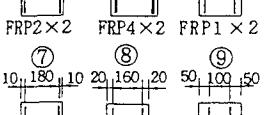
実験 シリーズ	補強材の種類	補強材 断面積 (cm ²)	補強材比 (%)	配 置 方 法
I I	鉄筋補強材 D10鉄筋1本 D10鉄筋2本	①0.71 ②1.42	0.48 0.96	断面中央に配置する  D10×1 D10×2 FRP4×1
	格子状連続繊維 補強材(FRP) 4枚	③0.28	0.188	
II I II III III III	格子状連続繊維 補強材(FRP) 2枚ずつ断面両 側	④0.28	0.188	断面表層に配置する  FRP2×2 FRP4×2 FRP1×2  FRP1×2 FRP1×2 FRP1×2
	4枚ずつ断面両 側	⑤0.57	0.377	
	1枚ずつ断面両 側	⑥0.28	0.188	
	1枚ずつ断面両 側	⑦0.89	0.147	
	"	⑧0.89	0.147	
	"	⑨0.89	0.147	

表-6 供試体の諸元一覧

実験	供試体番号	補強材種類	補強材配置	かぶり (cm)	補強材比 (%)
I	D10×1	D10鉄筋1本	断面中央	4.5	0.48
	D10×2	D10鉄筋2本			0.96
	FRP4×1	繊維補強材(FRP) 横線間隔3cm 〃 4枚		4.8	0.188
	FRP2×2	〃 2枚ずつ		1.0	〃
	4×2	〃 4枚ずつ			0.377
	プレーン	無補強コンクリート			
II	1-L4	繊維補強材(FRP) 横線間隔4cm1枚ずつ	断面両側		
	2-L4	〃			
	3-L4	〃			
	1-L7	7cm1枚ずつ			
	2-L7	〃			
	3-L7	〃			
	1-L10	10cm1枚ずつ		1.5	0.188
	2-L10	〃			
III	N.T.1	横線なし(直線状) 〃 1枚ずつ	断面両側		
	N.T.2	無補強コンクリート			
	L5-1	繊維補強材(FRP) 横線間隔5cm1枚ずつ		1	
	L5-2	〃		2	
	L5-5	〃		5	
	L7-1	7cm1枚ずつ		1	
	L10-1	10cm1枚ずつ		〃	
	N.T.-1	横線なし(直線状) 1枚ずつ		〃	
	プレーン	無補強コンクリート			

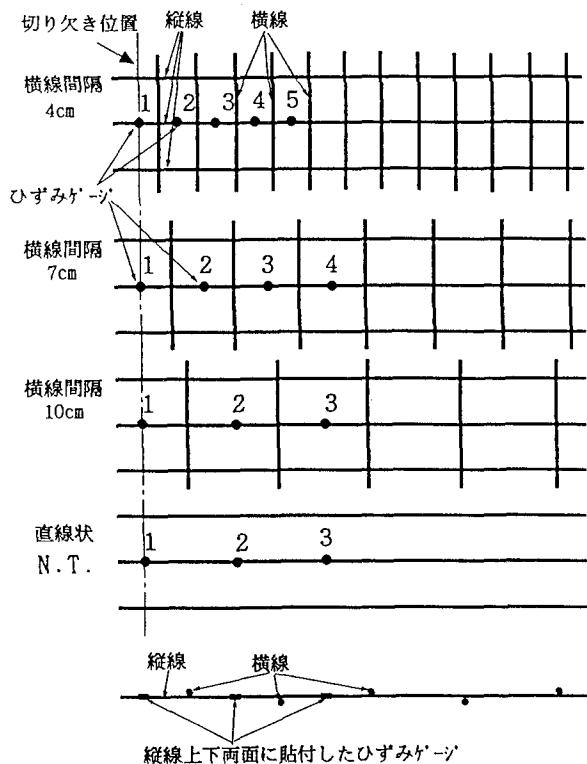


図-4 ひずみゲージ位置 (II)

の拘束材のひずみが零点に戻ったのに対して、補強供試体の拘束材のひずみはいずれも零点に戻らずに、一定値に保たれている。すなわち補強材がコンクリートに生じていた引張応力を受け持つことになり、定着域において補強材がコンクリートと一体となっていることが考えられる。

(2) 横線間隔の影響

図-10～11に横線間隔を変化させた場合のひび割れ幅経時変化を示す。横線間隔が小さいほどひび割れ幅は小さく制御され、ひび割れ発生直後からその傾向は確認できる。材齢が大きくなればその傾向は益々大きくなる。

(3) かぶり厚さの影響

図-12～13に補強材のかぶりを変化させて得られた実測値を示す。点線は補強材がない場合のひび割れ幅であり、実線との差が制御されたひび割れ幅を意味する。ひび割れ発生直後においては、かぶりによるひび割れ幅への影響はみられないが、乾燥収縮の進行につれ、かぶりが小さいほうがひび割れ幅を制御している。

また、乾燥日数150日を経過すると、かぶりが大きい場合、ひび割れ幅は乾燥収縮により生じるひび割れ幅増加量に近づいているが、かぶりが小さい場合、

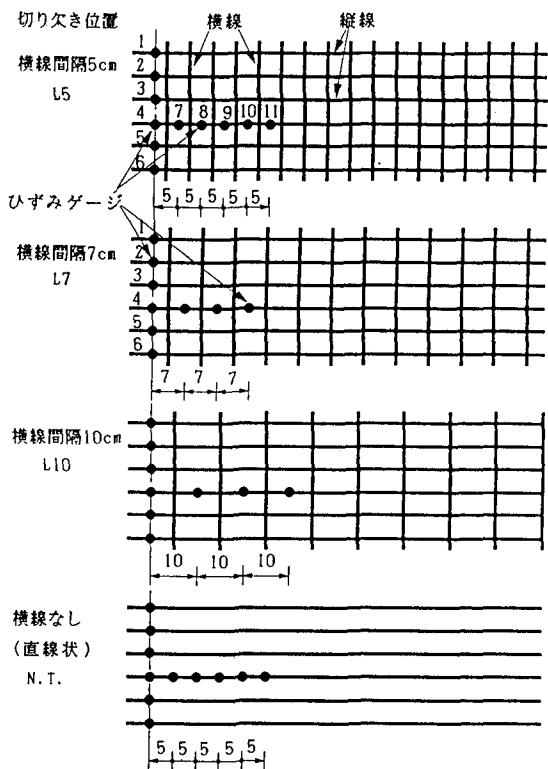


図-5 ひずみゲージ位置 (III)

(単位: cm)

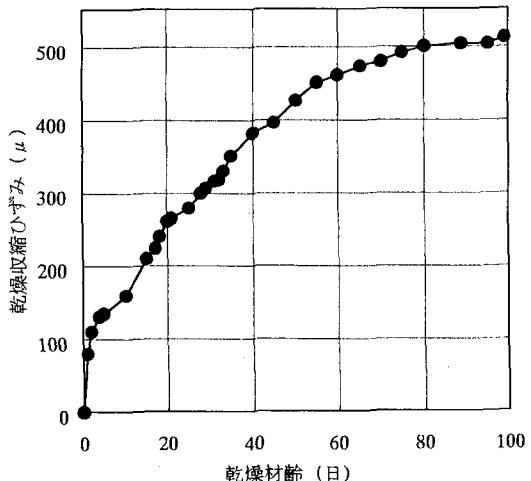


図-6 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

補強材の拘束によりひび割れ幅は制御される。

本試験においては、かぶりが1cmでも十分な乾燥収縮ひび割れ幅制御効果を得られた。

(4) 繊維素線種類の影響

図-14にピッチ系及びPAN系炭素繊維素線で作製したCFN補強供試体のひび割れ幅経時変化を示す。

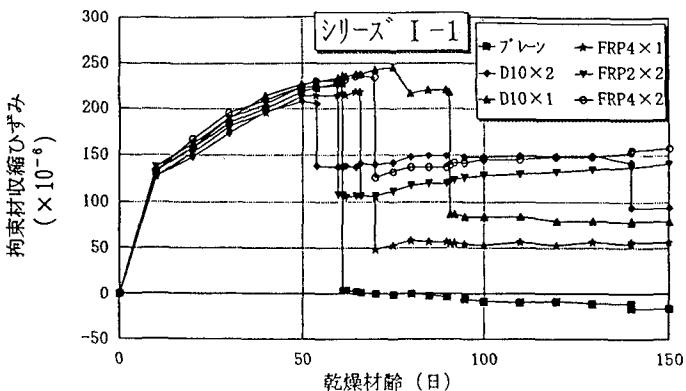


図-7 拘束材のひずみ経時変化（I）

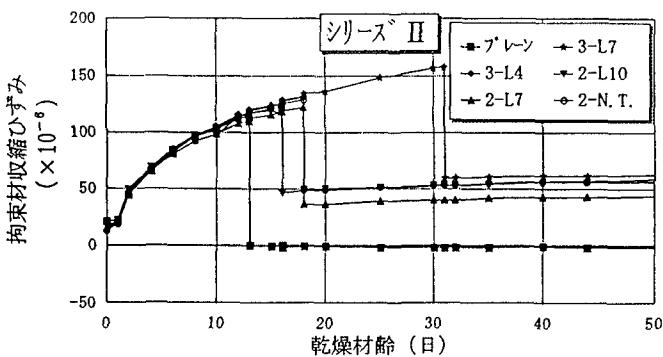


図-8 拘束材のひずみ経時変化（II）

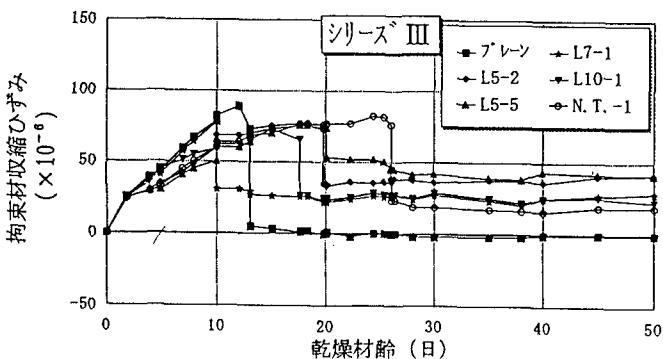


図-9 拘束材のひずみ経時変化（III）

ピッチ系CFNの補強材比は0.188%であるのに対し、PAN系CFNの補強材比は0.147%と小さいにも関わらず、ほぼ同等のひび割れ制御効果が得られた。

すなわち、弾性係数が大きい補強材を使用すれば、ひび割れ幅制御に有効であるといえる。

(5) 織り込み方法の影響

本実験では、平織り、からみ織り、もしや織りという3種類の織り込み方法でCFNを作製した。

図-15に織り込み方法とひび割れ幅の関係を示す。織り込み方法の差異によるひび割れ幅制御への影響は小さいといえる。

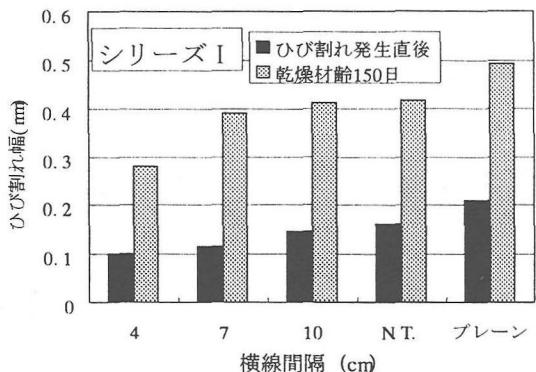


図-10 ひび割れ幅経時変化（I）

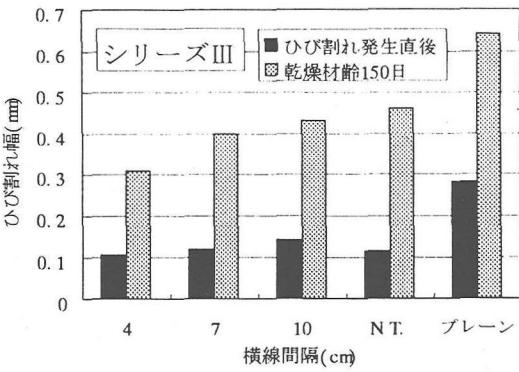


図-11 ひび割れ幅経時変化（III）

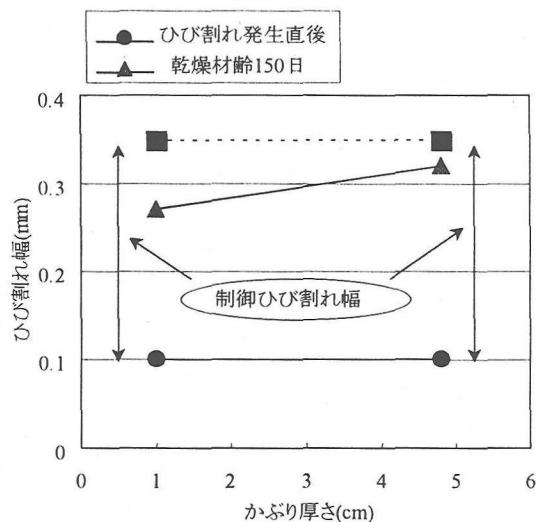


図-12 かぶり厚さとひび割れ幅の関係（I）

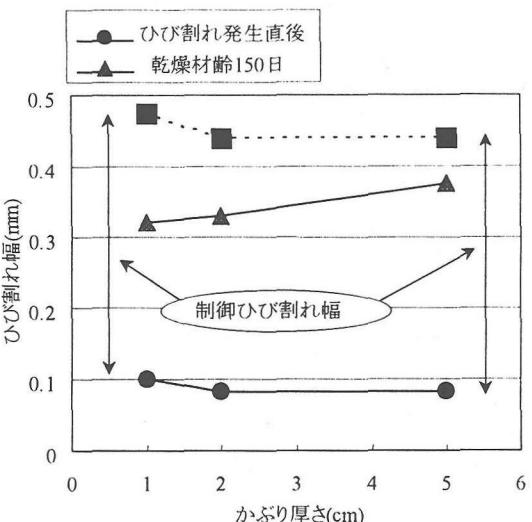


図-13 かぶり厚さとひび割れ幅の関係（III）

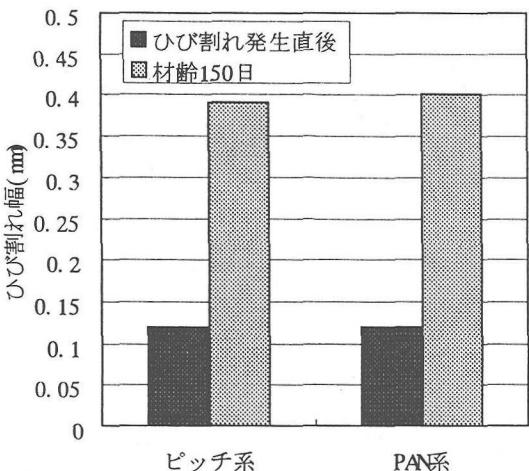


図-14 連続繊維補強材種類とひび割れ幅の関係

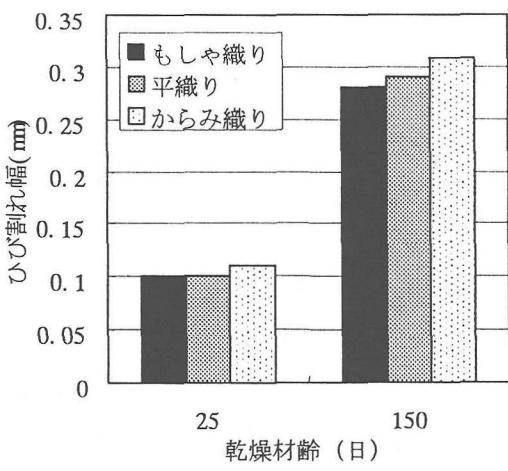


図-15 織り込み方法とひび割れ幅の関係

4. ひび割れ幅算定式の提案

(1) 記号の説明

まず、計算式に用いた記号の例を示す。

L_f : 直線状補強材の定着長

L : 乾燥収縮が生じる前の供試体長

$S_{f,x}$: ひび割れ位置から距離 x の補強材のひずみ

$S_{c,x}$: ニコンクリートのひずみ

$S_{c,0}$: ひび割れ位置のコンクリートのひずみ

$S_{f,0}$: ニ補強材のひずみ

M : $= n_f \cdot p_f$

n_f : コンクリートに対する弾性係数比

p_f : ニ断面積比

$\sigma_{ct,0}$: ひび割れ発生前のコンクリートの拘束引張応力

$\sigma_{ct,1}$: ひび割れ発生直後の定着域コンクリートの拘束引張応力

A_c : コンクリートの断面積

E_r, A_r : 拘束材の弾性係数及び断面積

E_f, A_f : 補強材のニニ

$\varepsilon_{r,1}$: ひび割れ発生直後の拘束材の収縮ひずみ

$\varepsilon_{f,1}$: ひび割れ発生直後のひび割れ位置の補強材の収縮ひずみ

$\varepsilon_{c,1}$: ひび割れ発生直後の定着域におけるコンクリートの拘束収縮ひずみ

U : 補強材の周長

(2) ひび割れ発生前後の拘束材、コンクリート及び補強材の長さ、ひずみ及び応力の変化

図-16にひび割れ発生前後の拘束材、コンクリート及び補強材の長さ、ひずみ及び応力の変化について示す。ひび割れ発生前はコンクリート、拘束材及び補強材は一体となって収縮変形するから、

$$\varepsilon_{c,0} = \varepsilon_{r,0} = \varepsilon_{f,0} \quad (1)$$

が成り立つ。

ここで、 $\varepsilon_{c,0}, \varepsilon_{r,0}, \varepsilon_{f,0}$ はそれぞれコンクリート、拘束材、補強材のひずみであり、添字0はひび割れ発生前を意味する。さらに力の釣合より

$$\sigma_{ct,0} \cdot A_c = -\varepsilon_{r,0} \cdot E_r \cdot A_r - \varepsilon_{f,0} \cdot E_f \cdot A_f \quad (2)$$

式(1)を式(2)に代入すると

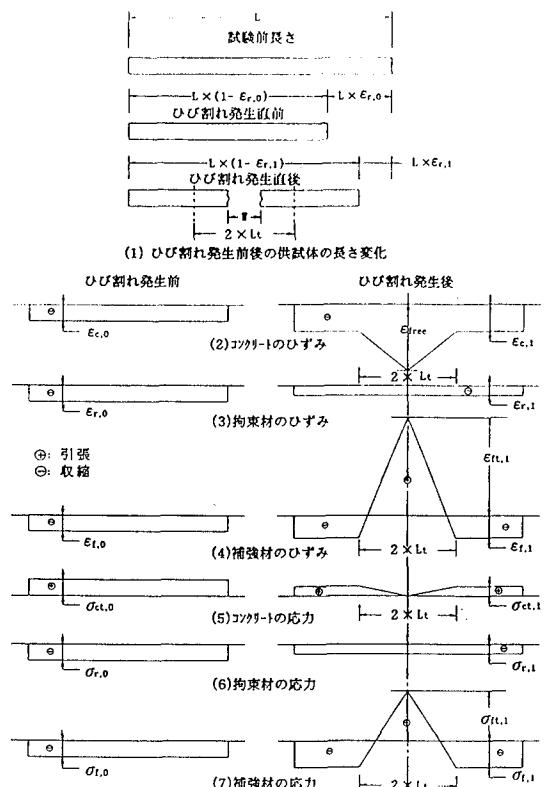


図-16 ひび割れ発生前後の供試体の長さ及びコンクリート、拘束材、補強材のひずみ、応力変化

$$\sigma_{ct,0} \cdot A_c = -\varepsilon_{c,0} \cdot (E_r \cdot A_r + E_f \cdot A_f) \quad (3)$$

が得られる。

拘束による引張応力がコンクリートの引張応力を超えるとひび割れが発生し、ひび割れ発生後は、補強材が全ての引張応力を受け持つ。

従って力の釣合より

$$\varepsilon_{f,1} \cdot E_f \cdot A_f = -\varepsilon_{r,1} \cdot E_r \cdot A_r \quad (4)$$

$$\therefore \varepsilon_{f,1} = -\frac{E_r \cdot A_r}{E_f \cdot A_f} \cdot \varepsilon_{r,1} = -H \cdot \varepsilon_{r,1} \quad (5)$$

となる。ここで

$$H = \frac{n_r \cdot p_r}{n_f \cdot p_f}, \quad n_r = \frac{E_r}{E_c}, \quad p_r = \frac{A_r}{A_c}, \quad n_f = \frac{E_f}{E_c},$$

$p_f = \frac{A_f}{A_c}$ とおく。定着域においては、コンクリートと補強材が一体となって収縮変形するため、相対変位は生じない。コンクリート、拘束材及び補強材間

の力の釣合より

$$\sigma_{ct,1} \cdot A_c = -(\varepsilon_{r,1} \cdot E_{r,1} \cdot A_r + \varepsilon_{f,1} \cdot E_f \cdot A_f) \quad (6)$$

となる。式(4)を式(6)に代入

$$\sigma_{ct,1} \cdot A_c = -(\varepsilon_{f,1} - \varepsilon_{r,1}) \cdot E_f \cdot A_f \quad (7)$$

ひび割れ発生後、拘束材のひずみは全長に渡って一定の圧縮ひずみ $\varepsilon_{r,1}$ であり、補強材のひずみはひび割れ部が引張ひずみ $\varepsilon_{f,1}$ 、定着域が圧縮ひずみ $\varepsilon_{f,1}$ である。ひび割れ部と定着域との間の補強材のひずみは直線的に変化すると仮定する。全長に渡る変形量は拘束材と補強材のいずれも等しいから、

$$L \cdot \varepsilon_{r,1} = L \cdot \varepsilon_{f,1} + (1/2) \cdot 2L_t \cdot (\varepsilon_{f,1} - \varepsilon_{r,1})$$

$$\therefore \varepsilon_{r,1} = \left(1 - \frac{L_t}{L}\right) \cdot \varepsilon_{f,1} + \frac{L_t}{L} \cdot \varepsilon_{f,1} \quad (8)$$

式(5)を式(7)、式(8)に代入すると、ひび割れ位置及び定着域における補強材のひずみは定着域のコンクリートの収縮応力によって表される。

$$\varepsilon_{f,1} = -\frac{1 + \frac{L_t}{L} \cdot H}{1 + H} \cdot \frac{\sigma_{ct,1} \cdot A_c}{E_f \cdot A_f} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{f,1} = \frac{\left(1 - \frac{L_t}{L}\right) \cdot H}{1 + H} \cdot \frac{\sigma_{ct,1} \cdot A_c}{E_f \cdot A_f} \quad (10)$$

式(5)を式(10)に代入すると、拘束材のひずみも定着域におけるコンクリートの収縮拘束応力を表すことができる。

$$\varepsilon_{r,1} = -\frac{1}{H} \cdot \varepsilon_{f,1} = -\frac{1 + \frac{L_t}{L}}{1 + H} \cdot \frac{\sigma_{ct,1} \cdot A_c}{E_f \cdot A_f} \quad (11)$$

式(9)、式(10)、式(11)により、補強材及び拘束材のひずみは、定着域のコンクリートの拘束応力に比例することがいえる。すなわちコンクリートは連続的に乾燥するため、定着域コンクリートの応力は増加し、引張応力を達したとき定着域において次のひび割れが発生すると考えられる。

図-16に示すように、ひび割れ発生後、コンクリー

トの拘束が一部解放され、コンクリートの拘束引張応力が減少する。定着域においてコンクリートの拘束収縮ひずみ $\varepsilon_{c,1}$ はひび割れ発生前の拘束収縮ひずみ $\varepsilon_{c,0}$ より収縮方向に増加している。この増加量は拘束引張応力を減少させた分 ($\sigma_{ct,0} - \sigma_{ct,1}$) に相当するから、

$$\varepsilon_{c,1} = \varepsilon_{c,0} + \frac{(\sigma_{ct,0} - \sigma_{ct,1})}{E_c} \quad (12)$$

式(2)、式(6)を式(12)に代入すると、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c,1} \cdot E_c \cdot A_c &= \varepsilon_{c,0} \cdot E_c \cdot A_c - \varepsilon_{c,0} (E_r \cdot A_r + E_f \cdot A_f) \\ &\quad + \varepsilon_{r,1} \cdot E_r \cdot A_r + \varepsilon_{f,1} \cdot E_f \cdot A_f \end{aligned} \quad (13)$$

となる。定着域においては $\varepsilon_{c,1} = \varepsilon_{f,1}$ であるから、

$$\varepsilon_{f,1} (1 - n_f \cdot p_f) = \varepsilon_{c,0} (1 - n_r \cdot p_r - n_f \cdot p_f) + \varepsilon_{r,1} \cdot n_r \cdot p_r \quad (14)$$

が成り立つ。また、式(5)を式(8)に代入して、 $\varepsilon_{f,1}$ を消去すると、拘束材の収縮ひずみは定着域における補強材の収縮拘束ひずみを用いて、次式で表される。

$$\varepsilon_{r,1} = \frac{1 - L_t / L}{1 + (L_t / L) \cdot H} \cdot \varepsilon_{f,1} \quad (15)$$

式(15)を式(14)に代入して整理すると、定着域における補強材のひずみは、ひび割れ発生前のコンクリートの収縮拘束ひずみを用いて次式で表される。

$$\varepsilon_{f,1} = \frac{G \cdot \left(1 + \frac{L_t}{L} \cdot H\right)}{G + (1 - n_r \cdot p_r) \cdot \frac{L_t}{L} \cdot H + \frac{L_t}{L} \cdot n_r \cdot p_r} \cdot \varepsilon_{c,0} \quad (16)$$

ここで、 $G = 1 - n_r \cdot p_r - n_f \cdot p_f$

式(16)を式(15)に代入して

$$\begin{aligned} \varepsilon_{r,1} &= \frac{1 - L_t / L}{1 + (L_t / L) \cdot H} \cdot \varepsilon_{f,1} \\ &= \frac{G \cdot (1 - L_t / L)}{G + (1 - n_r \cdot p_r) \cdot \frac{L_t}{L} \cdot H + \frac{L_t}{L} \cdot n_r \cdot p_r} \cdot \varepsilon_{c,0} \end{aligned} \quad (17)$$

上式を式(5)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{f,1} &= -H \cdot \varepsilon_{r,1} \\ &= \frac{G \cdot H \cdot (1 - L_t / L)}{G + (1 - n_r \cdot p_r) \cdot \frac{L_t}{L} \cdot H + \frac{L_t}{L} \cdot n_r \cdot p_r} \cdot \varepsilon_{c,0} \quad (18)\end{aligned}$$

(3) 縦線の付着を考慮した直線状補強材の付着・定着性状

縦線の付着を考慮した直線状補強材の付着・定着性状の概念図を図-17に示す。ひび割れ発生後、ひび割れ発生位置においては、コンクリートは自由収縮状態になり、引張応力は生じない。その点を相対座標の零点とする。ここで補強材とコンクリートの見かけのひずみを S_f , S_c とする。

外部拘束状態では、ひび割れ発生後、拘束材のひずみ、拘束材に作用する圧縮力 C_r は全長に渡って一定であるから、

$$C_r = \varepsilon_{r,1} \cdot E_r \cdot A_r \quad (19)$$

また補強材に作用する力は

$$T'/2 = (S_{f,x} + \varepsilon_{f,1} - S_{f,n}) \cdot E_f \cdot A_f \quad (20)$$

コンクリートの自由収縮ひずみを ε_{free} 、補強材の定着域におけるコンクリートの収縮拘束ひずみを $\varepsilon_{c,1}$ とすると

$$\varepsilon_{ct,1} = \varepsilon_{free} - \varepsilon_{c,1} \quad (21)$$

また、コンクリートに作用する引張力 T_c は、

$$T_c = S_{c,x} \cdot E_c \cdot A_c \quad (22)$$

ひび割れ位置における力の釣合により

$$\begin{aligned}-\varepsilon_{r,1} \cdot E_r \cdot A_r &= (S_{f,x} + \varepsilon_{f,1} - S_{f,n}) \cdot E_f \cdot A_f \\ &\quad + S_{c,x} \cdot E_c \cdot A_c \quad (23)\end{aligned}$$

よってコンクリートのひずみは

$$S_{c,x} = -\varepsilon_{r,1} \cdot n_r \cdot p_r - (S_{f,x} + \varepsilon_{f,1} - S_{f,n}) \cdot n_f \cdot p_f \quad (24)$$

となる。ひび割れ位置において、コンクリートの見かけのひずみは $S_{c,0} = 0$ であるから

$$\begin{aligned}0 &= -\varepsilon_{r,1} \cdot n_r \cdot p_r - (S_{f,0} + \varepsilon_{f,1} - S_{f,n}) \cdot n_f \cdot p_f - \varepsilon_{r,1} \cdot H \\ &= (S_{f,0} + \varepsilon_{f,1} - S_{f,n}) \quad (25)\end{aligned}$$

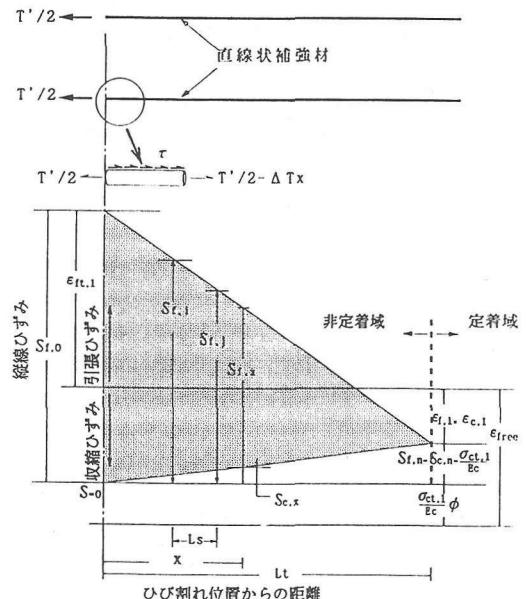


図-17 直線状補強材の付着・定着性状の概念図

式(5)を式(25)に代入して、ひび割れ位置における補強材のひずみは

$$\varepsilon_{f,1} = (S_{f,0} + \varepsilon_{f,1} - S_{f,n}) \quad (26)$$

補強材の定着域において、 $S_{f,n} = S_{c,n}$ であるから式(24)よりコンクリートの見かけのひずみは次式で表される。

$$S_{f,n} = S_{c,n} = n_f \cdot p_f \cdot (-\varepsilon_{r,1} \cdot H + \varepsilon_{f,1}) = M \cdot (\varepsilon_{f,1} + \varepsilon_{r,1}) \quad (27)$$

式(9), (10)を式(27)に代入して、定着域におけるコンクリート及び補強材の見かけのひずみは定着域におけるコンクリート拘束引張応力を用いて

$$S_{f,n} = S_{c,n} = M \left\{ \frac{\left(1 - \frac{L_t}{L}\right) \cdot H}{1 + H} + \frac{1 + \frac{L_t}{L} \cdot H}{1 + H} \right\} \cdot \frac{\sigma_{ct,1} \cdot A_c}{E_f \cdot A_f}$$

$$\begin{aligned}S_{f,n} &= S_{c,n} = M \cdot \frac{\sigma_{ct,1} \cdot A_c}{E_f \cdot A_f} \\ &= \frac{E_f \cdot A_f}{E_c \cdot A_c} \cdot \frac{\sigma_{ct,1} \cdot A_c}{E_f \cdot A_f}\end{aligned}$$

$$= \frac{\sigma_{ct,1}}{E_c} \quad (28)$$

式(5), (15)を式(27)に代入して、定着域におけるコンクリート及び補強材の見かけのひずみは拘束材のひずみにより次式のように表される。

$$\begin{aligned} S_{f,n} &= S_{c,n} = M \cdot \left(-H \cdot \varepsilon_{r,1} - \frac{L_t}{1+H} \cdot \varepsilon_{r,1} \right) \\ &= -M \cdot \frac{1+H}{L_t} \cdot \varepsilon_{r,1} \end{aligned} \quad (29)$$

式(26)により、ひび割れ位置における補強材の見かけのひずみは、

$$S_{f,0} = (\varepsilon_{f,1} - \varepsilon_{f,1} + S_{f,n}) \quad (30)$$

となる。この式に式(27)を代入して、ひび割れ位置における補強材の見かけのひずみを求める

$$\begin{aligned} S_{f,0} &= (1+m) \cdot (\varepsilon_{f,1} - \varepsilon_{f,1}) \\ &= \frac{1+M}{M} \cdot S_{f,n} \end{aligned} \quad (31)$$

この式に式(28)を代入して、ひび割れ位置における補強材のひずみは定着域におけるコンクリートの収縮拘束応力を用いて次式で表される。

$$S_{f,0} = \left(1 + \frac{1}{M} \right) \cdot \frac{\sigma_{ct,1}}{E_c} \quad (32)$$

式(29)を式(31)に代入して、ひび割れ位置における補強材のひずみは拘束材のひずみを用いて式(33)で表される。

$$\begin{aligned} S_{f,0} &= \left(1 + \frac{1}{M} \right) \cdot \left(-M \cdot \frac{1+H}{1-L_t/L} \cdot \varepsilon_{r,1} \right) \\ &= -(1+M) \cdot \frac{1+H}{1-L_t/L} \cdot \varepsilon_{r,1} \end{aligned} \quad (33)$$

式(5), (29)を式(24)に代入して整理すると、ひび割

れ位置から距離 x の位置におけるコンクリートの見かけのひずみは、補強材の見かけのひずみを用いて式(34)で表される。

$$S_{c,x} = M \cdot (S_{f,0} - S_{f,x}) \quad (34)$$

上式において

$$\begin{aligned} x = 0 : S_{c,0} &= M \cdot (S_{f,0} - S_{f,0}) = 0 \\ x = L_t : S_{c,n} &= M \cdot (S_{f,0} - S_{f,n}) \\ &= M \cdot (\varepsilon_{f,1} - \varepsilon_{f,1} + S_{f,n} - S_{f,n}) \\ &= S_{f,n} \end{aligned}$$

であり、境界条件を満たす。

定着域におけるコンクリートの拘束引張応力は $\sigma_{ct,1}$ は第一番目のひび割れ発生後、乾燥収縮の進行と共に増加するが、この収縮拘束応力がある時点のコンクリートの引張強度を超えると、第二番目のひび割れが生じる。

コンクリートと補強材の付着が十分である限り、乾燥収縮ひび割れは分散して発生し、ひび割れ位置の補強材の応力は、そのひび割れの次のひび割れが発生する直前に最大となり、ひび割れ数が増すにつれて一定値に落ち着くものと考えられる。

この第二番目のひび割れが生じる直前に第一番目のひび割れ幅は最大となり、第二番目のひび割れ後の増加はわずかである^[6]。

ここで、第二番目のひび割れが生じる直前の直線材の定着長さを L_t とし、直線材に作用する付着応力 τ は全長に渡って一定値とする。

ひび割れ位置から定着域にかけて補強材に作用する付着力 ΔT は、次式で表される。

$$\Delta T = \tau \cdot U \cdot L_t \quad (35)$$

また、 ΔT はひび割れ位置から定着域にかけて補強材にかかる力の差であるから

$$\begin{aligned} \Delta T &= S_{f,0} \cdot E_f \cdot A_f - S_{f,n} \cdot E_f \cdot A_f \\ &= (S_{f,0} - S_{f,n}) \cdot E_f \cdot A_f \end{aligned} \quad (36)$$

が成り立つ。よって、補強材に作用する付着応力は

$$\tau = \frac{E_f \cdot A_f}{U \cdot L_t} \cdot (S_{f,0} - S_{f,n}) \quad (37)$$

となる。ひび割れ位置から距離 x の位置の縦線に作用する付着力は

$$\Delta T_x = \tau \cdot U \cdot x \quad (38)$$

であり、ひび割れ位置及びひび割れ位置から x の位置における補強材の見かけのひずみ $S_{f,0}$, $S_{f,x}$ を用いて、この縦線に作用する付着力を示すと

$$\Delta T_x = (S_{f,0} - S_{f,x}) \cdot E_f \cdot A_f \quad (39)$$

となる。この式よりひび割れ位置から距離 x の位置における補強材の見かけのひずみは次式で表される。

$$S_{f,x} = S_{f,0} - \frac{\Delta T_x}{E_f \cdot A_f} \quad (40)$$

式(38), 式(37)を式(40)に代入して整理すると、

$$S_{f,x} = S_{f,0} - \frac{x}{L_x} \cdot (S_{f,0} - S_{f,n}) \quad (41)$$

式(31)を式(41)に代入して次式を得る。

$$S_{f,x} = S_{f,0} \cdot \left(1 - \frac{1}{1+M} \cdot \frac{x}{L_t} \right) \quad (42)$$

この式において

$$\begin{aligned} x = 0 & : S_{f,x} = S_{f,0} \cdot (1 - 0) = S_{f,0} \\ x = L_t & : S_{f,x} = S_{f,0} \cdot \left(1 - \frac{1}{1+M} \cdot \frac{L_t}{L_t} \right) \\ & = S_{f,0} - \frac{S_{f,0}}{1+M} \\ & = S_{f,0} - (\varepsilon_{f,1} + \varepsilon_{f,1}) \\ & = \varepsilon_{f,n} \end{aligned}$$

となり式(42)は境界条件を満たす。

ひび割れ領域における間隔 L_s の i 断面及び j 断面に挟まれた補強材を考える。両断面における補強材の見かけのひずみを $S_{f,i}$ と $S_{f,j}$ とすると、両断面に挟まれた補強材に作用する付着力は

$$\Delta T_x = \tau \cdot U \cdot L_s \quad (43)$$

$$= (S_{f,i} - S_{f,j}) \cdot E_f \cdot A_f \quad (44)$$

となる。 j 断面における補強材の見かけのひずみは

$$S_{f,j} = S_{f,i} - \frac{\Delta T_x}{E_f \cdot A_f} \quad (45)$$

式(37), 式(43)を式(45)に代入して整理し、 i 断面における補強材のひずみを用いて表すと、

$$\begin{aligned} S_{f,j} & = S_{f,i} - \frac{\frac{E_f \cdot A_f}{U \cdot L_t} \cdot (S_{f,0} - S_{f,n}) \cdot U \cdot L_s}{E_f \cdot A_f} \\ & = S_{f,i} - \frac{L_s}{L_t} \cdot (S_{f,0} - S_{f,n}) \end{aligned} \quad (46)$$

となり、さらに式(31)を式(46)に代入して、 j 断面における補強材のひずみは、ひび割れ位置及び i 断面におけるひずみを用いて次式で示される。

$$S_{f,j} = S_{f,i} - \frac{L_s}{L_t} \cdot \frac{1}{1+M} \cdot S_{f,0} \quad (47)$$

(4) 縦線の付着を考慮したCFNの付着・定着性状

図-18に示すように、同じ引張応力が作用するとき、直線状補強材及びCFNのひずみ分布は、CFNの縦線と直線状補強材の表面性状及び径が等しい場合、それらのコンクリートとの付着性状は等しくなる。

直線状補強材のひずみは、ひび割れ位置から定着域にかけて直線的に変化すると仮定すると、CFNの場合、横線の機械的抵抗により縦線のひずみは横線が存在する位置において不連続となり、一定値に低減すると思われる。すなわち横線の抵抗により縦線のひずみが低減し、直線状補強材より定着長が低減できると考えられる。ここで、直線状補強材と同じ相対座標系を用いる。

CFNの付着・定着性状の概念図を図-19に示す。引張力を受ける補強材の交点 i における補強材とコンクリートの相対変位を δ_i とする。交点間隔 L_s のメッシュ i 区間における縦線とコンクリートのひずみ差（相対ひずみ）は交点 i と交点 $i+1$ との相対変位量の差によって生じるものとすると、

$$\delta_i - \delta_{i+1} = \int_0^{L_s} (S_{f,ix} - S_{c,ix}) dx \quad (48)$$

が成り立つ。式(34)を上式に代入して、

$$\delta_i - \delta_{i+1} = \int_0^{L_s} \{(1+M) \cdot S_{f,ix} - M \cdot S_{f,0}\} dx \quad (49)$$

を得る。メッシュ i 区間にて、交点 i における

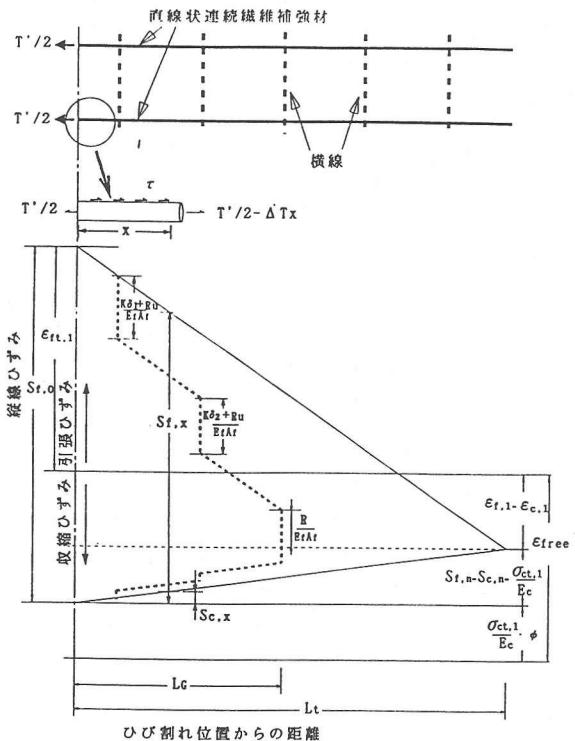


図-18 直線状及びC FNの定着長の比較

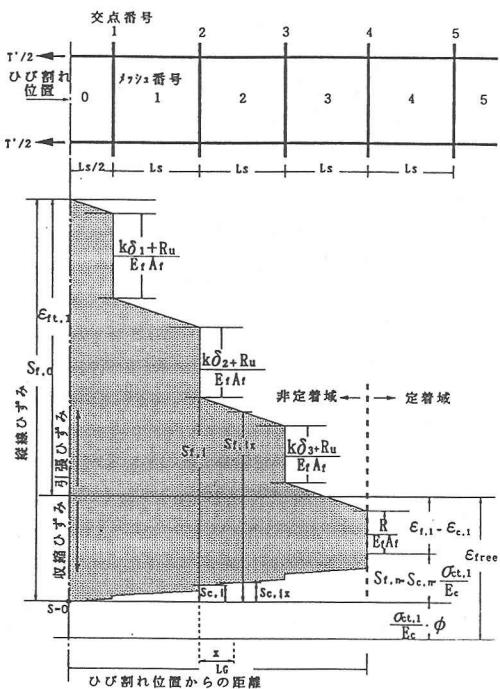


図-19 C FNの定着・付着性状

補強材のひずみを $S_{f,i}$ とする。式(46)により、交点 i から距離 x の位置の断面における補強材のひずみは、

$$S_{f,ix} = S_{f,i} - \frac{x}{L_t} (S_{f,0} - S_{f,n}) \quad (50)$$

式(50)を式(49)に代入して、

$$\begin{aligned} \delta_i - \delta_{i+1} &= \int_0^{L_s} \left\{ (1+M) \cdot \left[S_{f,i} - \frac{x}{L_t} (S_{f,0} - S_{f,n}) \right] - M \cdot S_{f,0} \right\} dx \\ &= (1+M)L_s \cdot S_{f,i} - (1+M) \frac{L_s^2}{2L_t} (S_{f,0} - S_{f,n}) - M \cdot L_s \cdot S_{f,0} \end{aligned} \quad (51)$$

式(31)を式(51)に代入して整理すると、

$$\delta_i - \delta_{i+1} = (1+M) \cdot L_s \cdot S_{f,i} - \left(\frac{L_s^2}{2L_t} + M \cdot L_s \right) \cdot S_{f,0} \quad (52)$$

となる。ここで $\alpha = \frac{L_s^2}{2L_t} + M \cdot L_s$, $\beta = (1+M) \cdot L_s$ とする。式(52)を δ_{i+1} について整理すると

$$\delta_{i+1} = \delta_i - \beta \cdot S_{f,i} + \alpha \cdot S_{f,0} \quad (53)$$

また、同式を $S_{f,i}$ について整理すると

$$S_{f,i} = \frac{\delta_i - \delta_{i+1} + \alpha \cdot S_{f,0}}{\beta} \quad (54)$$

となる。引張力を受ける補強材の交点 i における補強材とコンクリートのズレ δ_i に対応した反力 $K \cdot \delta_i$ が横線を介してコンクリート部に伝達されると考える。ここで K はコンクリートの見かけのバネ定数である。さらに補強材とコンクリートのズレが生じない状態でも、横線を介して弾性的にコンクリート部に伝達される力を R 、その限界値を R_u とする。

縦線の付着力を考慮すると、ズレが生じている状態での横線の抵抗力と縦線のひずみの関係は次式で表される。

$$K \cdot \delta_i + R_u = \left\{ S_{f,i-1} - \frac{L_s}{L_t} (S_{f,0} - S_{f,n}) - S_{f,i} \right\} \cdot E_f \cdot A_f \quad (55)$$

上式を変形すると

$$M_K \cdot \delta_i + M_R = S_{f,i-1} - C_m - S_{f,i} \quad (56)$$

となる。

$$\text{ここで, } M_K = \frac{K}{E_f \cdot A_f}, \quad M_R = \frac{R_u}{E_f \cdot A_f},$$

$$C_m = \frac{L_s}{L_t} (S_{f,0} - S_{f,n}) \text{とする。}$$

従って、メッシュ i 区間において、交点 i における縦線のひずみは次式で表される。

$$S_{f,i} = S_{f,i-1} - C_m - M_K \cdot \delta_i - M_R \quad (57)$$

次にコンクリートの見かけのバネ定数について考える。補強材は n 番目のメッシュまでに定着すると仮定すると、 n 番目のメッシュ以後の補強材とコンクリートが一体となって収縮変形するから、交点 n において補強材とコンクリートの相対変位は生じない。定着条件としては非定着域 ($n-1$ 番目のメッシュ) と定着域 (n 番目のメッシュ) の境界の横線の位置 (交点 n) において $\delta_n = 0$ 、または横線の抵抗力 R_u は横線の限界抵抗力 R_n を超えないことになる。すなわち $R_n \leq R_u$ である。式(55)により横線の抵抗力は、

$$R_n = \left\{ S_{f,i-1} - \frac{L_s}{L_t} \cdot (S_{f,0} - S_{f,n}) - S_{f,i} \right\} \cdot E_f \cdot A_f \quad (58)$$

である。このとき非定着域 ($n-2$ 番目のメッシュ) と ($n-1$ 番目のメッシュ) の境界の横線位置 (交点 $n-1$) において、ズレ δ_{n-1} が生じているので、横線の抵抗力は

$$R_{u-1} = K \cdot \delta_{n-1} \quad (59)$$

で表される。コンクリートと補強材のズレが生じない状態では、引張力に対する横線の限界抵抗力は R_u 以下であるが、ズレが生じると、 R_u を超えた分の引張力が交点 n に伝達される。

このとき、交点 $n-1$ のズレにより生じる反力 $K \cdot \delta_{n-1}$ が交点 n に伝達され、交点 n における横線の抵抗力が生じると考えられる。縦線の付着を考慮すると、

$$K \cdot \delta_{n-1} - \frac{L_s}{L_t} (S_{f,0} - S_{f,n}) \cdot E_f \cdot A_f = R_u \quad (60)$$

となる。そのとき $\delta_n = \delta_{n+1} = \dots = 0$ である。

式(58)を式(60)に代入して整理すると、

$$K \cdot \delta_{n-1} = (S_{f,n-1} - S_{f,n}) \cdot E_f \cdot A_f \quad (61)$$

式(54)を式(61)に代入して整理すると、

$$K \cdot \delta_{n-1} = \frac{\delta_{n-1}}{\beta} \cdot E_f \cdot A_f \quad (62)$$

となる。 $\delta_{n-1} \neq 0$ のので、コンクリートの見かけのバネ定数は次式で表される。

$$K = \frac{E_f \cdot A_f}{\beta} = \frac{E_f \cdot A_f}{(1+M) \cdot L_s} = \frac{1}{L_s} \cdot \frac{E_c \cdot A_c \cdot E_f \cdot A_f}{E_c \cdot A_c + E_f \cdot A_f} \quad (63)$$

ここで求めたコンクリートの見かけのバネ定数は補強材とコンクリートの弾性係数、断面積及び横線間隔によって決まり、想定される引張荷重及び定着長さとは無関係である。

次に、縦線のひずみ及び交点の相対変位量を求める。式(54), 式(57)により

$$\frac{\delta_i - \delta_{i+1} + \alpha \cdot S_{f,0}}{\beta} = S_{f,i-1} - C_m - M_R \cdot \delta_{i+1} + \alpha \cdot S_{f,0}$$

$$\delta_{i+1} = \alpha \cdot S_{f,0} + (1+M_K \cdot \beta) \cdot \delta_i - \beta \cdot S_{f,i-1} - \beta \cdot M_R + \beta \cdot C_m \quad (64)$$

となり、また式(56)により

$$S_{f,i+1} = S_{f,i} - M_K \cdot \delta_{i+1} - M_R - C_m \quad (65)$$

となる。式(64), 式(65)により、 $i+1$ を変化させて、メッシュ $i+1$ 区間ににおける補強材の見かけのひずみ及び交点の相対変位量は、式(66), 式(67)で算出される。

$$S_{f,i+1} = C_{1,i} \cdot S_{f,0} + C_{2,i} \cdot \delta_1 + C_{3,i} \cdot M_R + C_{4,i} \cdot C_m \quad (66)$$

$$\delta_{i+1} = C_{5,i} \cdot S_{f,0} + C_{6,i} \cdot \delta_1 + C_{7,i} \cdot M_R + C_{8,i} \cdot C_m \quad (67)$$

ここで、 $C_{1,i}, C_{2,i}, C_{3,i}, C_{4,i}, C_{5,i}, C_{6,i}, C_{7,i}, C_{8,i}$ は係数であり、まとめて表-7に示す。

また、式(66), (67)中のひび割れ位置における力の釣合による補強材の見かけのひずみ $S_{f,0}$ は、式(33)による拘束材のひずみの測定値 $\varepsilon_{r,1}$ または式(32)に

表-7 係数の一覧

係数	$i=0$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
	$M_K = K / (E_f A_f)$	$M_R = R_u / (E_f A_f)$	$C_m = (L_s / L_t) \cdot (S_{f,0} - S_{c,0})$	
$C_{1,j}$	1	$1 - M_K(\alpha - \beta)$	$1 - M_K(\alpha - \beta)(3 + M_K \beta)$	$1 - M_K(\alpha - \beta)(2 + M_K \beta)(3 + M_K \beta)$
$C_{2,j}$	$-M_K$	$-M_K(2 + M_K \beta)$	$-M_K(1 + M_K \beta)(3 + M_K \beta)$	$-M_K(1 + M_K \beta)[(1 + M_K \beta)(4 + M_K \beta) + M_K^2 + \beta^2]$
$C_{3,j}$	-1	$-(2 + M_K \beta)$	$-(1 + M_K \beta)(3 + M_K \beta)$	$-(1 + 2M_K + M_K \beta)(3 + M_K \beta) + 1$
$C_{4,j}$	$-C_m$	$-C_m(2 + M_K \beta)$	$-C_m(1 + M_K \beta)(3 + M_K \beta)$	$-C_m[(1 + 2M_K + M_K \beta)(3 + M_K \beta) + 1]$
$C_{5,j}$		$\alpha - \beta$	$(\alpha - \beta)(2 + M_K \beta)$	$(\alpha - \beta)(1 + M_K \beta)(3 + M_K \beta)$
$C_{6,j}$		$1 + M_K \beta$	$(1 + M_K \beta)^2 + M_K \beta$	$(1 + M_K \beta)^2 + M_K \beta(3 + 2M_K \beta)$
$C_{7,j}$		β	$3 + M_K \beta$	$(3 + M_K \beta)(1 + \beta)$
$C_{8,j}$		$\beta \cdot C_m$	$(3 + M_K \beta) C_m$	$(3 + M_K \beta)(1 + \beta) C_m$

よる定着域におけるコンクリートの拘束引張応力 $\sigma_{c,1}$ を用いて表される。

さらに、交点 1 における補強材とコンクリートとのズレ δ_1 は補強材の定着条件

$$\delta_n = C_{5,n-1} \cdot S_{f,0} + C_{6,n-1} \cdot \delta_1 + C_{7,n-1} \cdot M_R + C_{8,n-1} \cdot C_m = 0$$

により次式で表される。

$$\delta_1 = \frac{C_{5,n-1} \cdot S_{f,0} + C_{7,n-1} \cdot M_R + C_{8,n-1} \cdot C_m}{C_{6,n-1}} \quad (68)$$

$M_R = \frac{R_u}{E_f \cdot A_f}$, $C_m = \frac{L_s}{L_t} (S_{f,0} - S_{c,n})$, R_u は実験により得られた値を使用する。よって、想定される補強材の定着長に対し、与えられる引張応力に応じた各メッシュ間隔内の補強材の見かけのひずみ及び交点変位量を式(66), 式(67)で算出することができ、かつ定着条件 $R_n \leq R_u$ を加えて照合することができる。

(5) ひび割れ幅算定式

ひび割れ幅は非定着域におけるコンクリートとの伸び量の差によって算出されるから、直線状補強材の場合、補強材とコンクリートのひずみはひび割れ位置から定着域にかけて直線的に変化すると仮定して、補強材とコンクリートのひずみの差をひび割れ位置から定着域に渡って積分して求めると、

$$w = 2 \int_0^{L_t} (S_{f,x} - S_{c,x}) dx \quad (69)$$

となる。式(34)を式(69)に代入して

$$w = 2 \int_0^{L_t} [(1 + M) S_{f,x} - M \cdot S_{f,0}] dx \quad (70)$$

を得る。さらに式(42)を式(70)に代入して

$$\begin{aligned} w &= 2 \int_0^{L_t} \left[(1 + M) S_{f,0} \left(1 - \frac{1}{1 + M} \cdot \frac{x}{L_t} \right) - M \cdot S_{f,0} \right] dx \\ &= 2 \left[(1 + M) S_{f,0} \left(L_t - \frac{1}{1 + M} \cdot \frac{L_t^2}{2L_t} \right) - M \cdot L_t \cdot S_{f,0} \right] \\ &= L_t \cdot S_{f,0} \end{aligned} \quad (71)$$

となる。

一方、CFN の場合は横線の抵抗力により縦線のひずみは各メッシュ間隔ごとに段階的に変化しているが、補強材とコンクリートのひずみの差を非定着域における各メッシュ間隔ごとに積分すれば、伸び量の差を算出することができる。すなわち

$$w = 2L_s \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (S_{f,ix} - S_{c,ix}) \quad (72)$$

となり、式(34)を式(72)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} w &= 2L_s \cdot \sum_{i=0}^{n-1} [(1 + M) S_{f,i} - M \cdot S_{f,0}] \\ &= L_s \cdot S_{f,0} + 2L_s \cdot \sum_{i=0}^{n-1} [(1 + M) S_{f,i} - M \cdot S_{f,0}] \end{aligned} \quad (73)$$

となる。

ひび割れ幅を予測する場合、与えられた境界条件のもとで想定されるコンクリートの拘束引張応力を決めれば、補強材の定着長及び補強材の見かけのひずみによりひび割れ幅を算出することが可能になる。

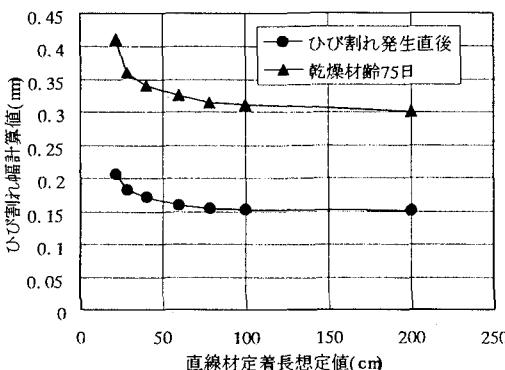


図-20 直線材の定着長とひび割れ幅計算値の関係

(6) 実測値との比較による提案式の検証

提案したひび割れ幅算定式の妥当性を検証するために、計算値と実測値の比較を行った。

提案式における仮定条件については、まず、横線抵抗力の限界値は既往の研究結果¹⁶⁾により $R_u = 78$ 4Nとした。また、本研究で使用した直線状補強材と CFN の縦線の径、表面性状は同じであり、付着性状も等しくなるはずである。よって、直線状補強材の定着長を決定すれば、CFN の縦線の付着抵抗も決定される。

ここで、直線状補強材の定着長を変化させて、ひび割れ幅の計算値と実測値を比較すると、図-20に示すように定着が100cm以上になると計算値はほとんど一定である。よって、本検討においては直線状補強材の定着長を100cmと決定した。

図-21～24に縦線のひずみ分布及びひび割れ幅の実測値と計算値の関係を示す。ひび割れ発生直後から乾燥収縮の進行まで、縦線ひずみの計算値はほぼ実測値を追随していることがわかる。

しかし、図-21～22に示すように、乾燥収縮の進行につれ、横線間隔が小さいL5-2, L5-5供試体の場合、補強材の第一横線間隔内における縦線ひずみの実測値は計算値より大きい。これは、ひび割れ幅算定式において、ひび割れ位置から定着域にかけて補強材とコンクリートの付着応力を一様と仮定しているためである。

実際は乾燥収縮の進行に伴い、ひび割れ近傍（ひび割れ位置から約2.5cm離れたところ）に応力集中が生じ、第一番目の横線補強材とコンクリートとの間にズレが生じ、コンクリートの乾燥収縮に対する拘束が減少し、第一番目の横線で受け持つ引張力が第一横線間隔内の縦線補強材に伝達された。それにより、第一番目の横線間隔内における縦線ひずみが計算値より幾分か大きくなっていると考えられる。第二番目の横線は、伝達された引張力を十分受け持

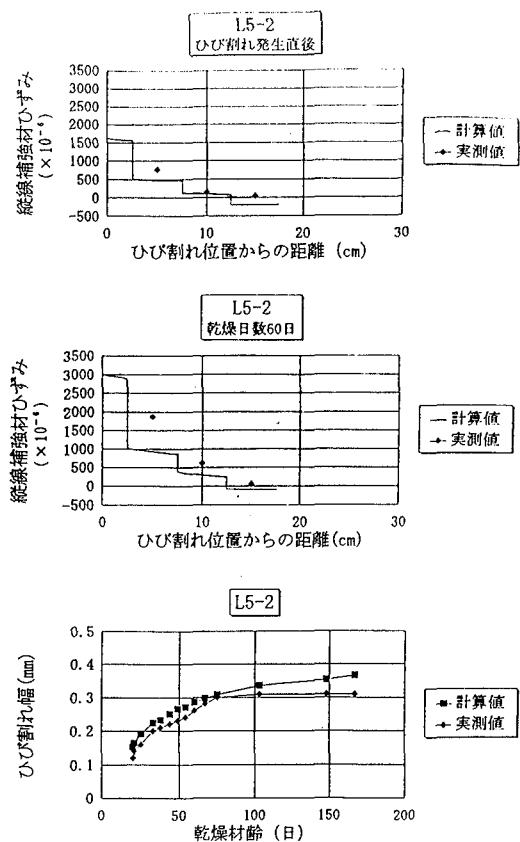


図-21 計算値と実測値の比較(1)

っているから、第二番目以降の補強材のひずみ分布では計算値と実測値がよく一致している。

図-24に示すように、横線間隔が大きいL10-1供試体では、第一番目の横線はひび割れ位置から5cm離れており、引張力は縦線補強材の付着により補強材に伝達され、補強材とコンクリートの付着応力が補強材に沿ってほぼ均等になっていると考えられる。よって、補強材ひずみ分布の実測値と計算値はよく一致している。

また、横線間隔が小さいL5-2, L5-5供試体の場合、乾燥日数が約70日を経過すると、第一横線間隔内における縦線補強材ひずみは約 3000×10^{-6} 以上に達した。L7-1供試体は約 2500×10^{-6} , L10-1供試体は約 2000×10^{-6} に達している。

ひび割れ本数に関しては横線間隔が小さいほど本数の増加傾向が見られ、そのひび割れ分散効果によりひび割れ幅が小さくなると考えられる。

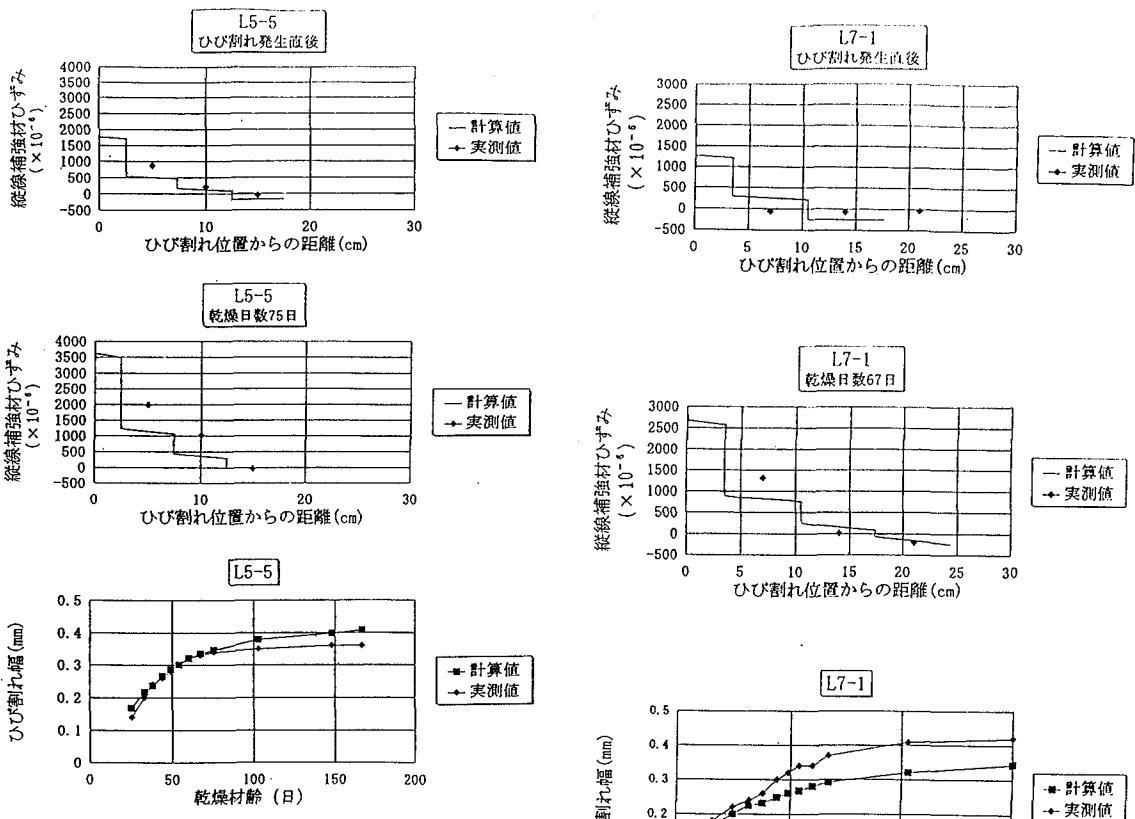


図-22 計算値と実測値の比較 (2)

5. 結論

以下に本研究で得られた結論を要約する。

- (1) ひび割れ発生前は、CFNとコンクリートは一体となって収縮し、補強材の種類、補強材量、横線間隔等の影響はほとんどない。
- (2) ひび割れ発生後は、CFNがコンクリートの引張力を分担し、横線の抵抗により、少ない補強材比でも鉄筋補強材より優れたひび割れ幅制御効果を示す。
- (3) ひび割れ幅をより低減するためには、CFNの横線間隔を小さくする、かぶり厚さを小さくする、高弾性係数の素線材料によりCFNを作製する等の手法が有効である。
- (4) CFNの場合、ひび割れ発生によって引張力を負担する際、 2000×10^{-6} 以上のひずみが生じても、ひび割れ幅を制御することが可能である。
- (5) CFN交点の織り込み方法の差違によるひび割れ幅制御効果への影響は小さい。
- (6) CFNの横線を弹性支床上のはりにモデル化して、横線の抵抗を考慮した縦線の引張力分布の推定方法及び補強材とコンクリートとの相対滑り変形に着目したひび割れ幅算定式が適合することから、CFNのひび割れ幅を合理的に算出できる。

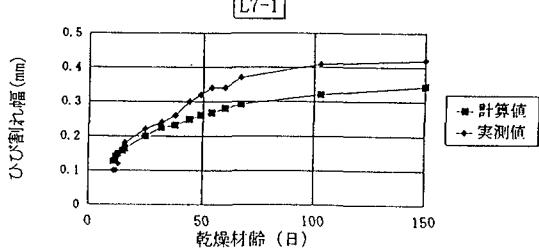


図-23 計算値と実測値の比較 (3)

FNのひび割れ幅制御メカニズムとその有効性が明らかになった。

- (7) ひび割れ幅算出において、縦線とコンクリートの付着を考慮することで定着長さを定めることが可能となり、また、横線の限界抵抗力の概念を導入することにより、ひび割れ幅を合理的に算出できる。

参考文献

- 1) American Concrete Institute Committee 224R-80, *Control of Cracking in Concrete Structures*. Jour. of ACI, 1972.
- 2) BORIS BRESLER : *REINFORCED CONCRETE ENGINEERING*, VOLUME 1, Materials, Structural Elements, Safety. 1974, John Wiley & Sons, Inc.
- 3) Rüsch, H. and Jungwirth, D. : *Stahlbeton-Spannbeton Band 2*. Wornerverlag, 1976 : 百島祐信訳, コンクリート構造物のクリップと乾燥収縮, 鹿島出版会.
- 4) 中西正俊 : 周辺拘束を受けるコンクリート壁体の収縮ひび割れに関する研究, 清水建設研究所研究報告.

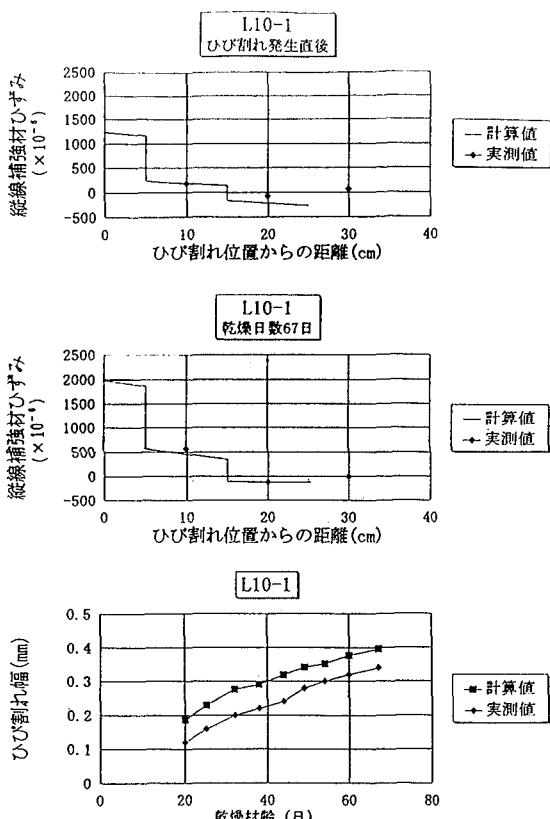


図-24 計算値と実測値の比較 (4)

第10号, 1979.

- 5) 土木施工研究委員会: コンクリートのひび割れ、その原因と対策・調査・補修、経営開発センター出版部, 1977.
- 6) Grzybowski, M. and Shah,S.P. : *Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete*, ACI Materials Journal, V.87, No.2, Mar-Apr.1990.
- 7) Malmberg,B. and Skarendahl,A. : *Method of Studying the Cracking of Fiber Concrete under Restrained*

Shrinkage, Testing and Test Method of Fiber Cement Composites, RILEM Symposium 1978.

- 8) State-of-the Art Report on Continuous Fiber Reinforcing Materials. *Tentative Proposals on Test Methods for Continuous Fiber Reinforcing Materials*, JSCE, Japan, Concrete Engineering Series 3. 1993.
- 9) Makitani,E. : *Investigation of Bond in Concrete Member with Fiber Reinforced Plastic Bars*. International Symposium "Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures", ACI SP-138.
- 10) Krenchel,H. and Shah,S.P. : *Restrained Shrinkage Test with Fiber Reinforced Concrete*. Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- 11) 愛知五男: かぶりコンクリートがひび割れ性状に及ぼす影響, 土木学会第43回年次学術講演概要集, 1988.
- 12) 牧角龍憲, 阪本好史, 南英明: 炭素繊維ネットによるひびわれ制御について, セメント・コンクリート論文集 No. 45, 1991.
- 13) 楠士傑, 牧角龍憲, 阪本好史: 乾燥収縮ひび割れ制御における連続繊維補強材表層配置の効果, セメント・コンクリート論文集No. 49, 1995.
- 14) Yang,S. and Makizumi,T. : *Control of Cracking in Concrete due to Drying Shrinkage Using Grid-Type Continuous Fiber Reinforcement*, Memories of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol.55, No.4, 1995.
- 15) 青柳征夫: 温度ひび割れ, ひび割れJIS原案の紹介, セメント・コンクリート, NO. 433, 1983.
- 16) 牧角龍憲: 拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮性状に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 1984.
- 17) 鶴田浩章, 牧角龍憲, 長島玄太郎: 弹性ばねモデルによる炭素繊維ネットの定着性状に関する検討, 土木学会第50回年次学術講演会, 1995.

(1996. 7. 1受付)

CONTROL OF CRACK WIDTH IN CONCRETE DUE TO DRYING SHRINKAGE BY GRID-TYPE CONTINUOUS FIBER REINFORCEMENT

Eiji MATSUO, Shijie YANG, Tatsunori MAKIZUMI
and Hiromichi MATSUSHITA

In this paper, an elastic spring model considering the adhesion of longitudinal strand is presented for estimating the drying shrinkage crack width of the concrete reinforced with the grid-type continuous fiber reinforcement.

The strains of reinforcement and the crack width in concrete are estimated by the proposed model and satisfied agreement with measured one was obtained.