

論文 収縮ひび割れに及ぼす鉄筋比の影響

中川 隆夫*¹・徐 泰錫*²・大野 義照*³・李 維*⁴

要旨: 鉄筋コンクリート壁のひび割れ対策の一つとして鉄筋によるひび割れ幅制御が行われているが、その効果を定量的に評価するまでには至っていない。本報告では鉄筋によるひび割れ制御効果を、鉄筋を2本~5本埋設した試験体長2000mm, 幅350mm, 厚さ100mmの試験体(鉄筋比0.4~1.02%)の一軸拘束ひび割れ試験によって調べるとともに先に提案した付着解析に基づくひび割れ幅算定法の適合性を検討した。その結果、鉄筋量に応じてひび割れ幅が制御されていることやひび割れ幅算定法はひび割れ発生時期、ひび割れ本数及びひび割れ幅等のひび割れ性状についてほぼ妥当な値を与えることなどを確認した。

キーワード: 拘束ひび割れ試験, 鉄筋比, ひび割れ幅, 乾燥収縮, クリープ

1. はじめに

通常のコンクリートを用いる限り乾燥収縮によるひび割れの発生を防ぐことは困難であり、鉄筋コンクリート(RC)壁における構造上のひび割れ対策の一つとして鉄筋によりひび割れを分散させて各ひび割れ幅を小さく制御する対策がある。しかし、この鉄筋によるひび割れ制御効果はひび割れ幅の予測ができないことから定量的に評価されるまでには至っていない。

既報¹⁾において JIS 原案の一軸拘束ひび割れ試験装置²⁾を用いて鉄筋の径(D10, D13, D16)及び本数(1, 2本)を要因に鉄筋を埋設した試験体のひび割れ試験を行い、鉄筋量が増えるとひび割れの数が増え、ひび割れ幅は小さくなることや、ひび割れ幅はひび割れ近傍の鉄筋ひずみとコンクリートひずみの差を積分することによって求めることができることなどを示した。続いて、力の釣り合い条件と部材全体の変形(あるいは拘束材の変形)が鉄筋ひずみの部材全長にわたる積分値と等しいという条件から鉄筋ひずみ分布とコンクリートひずみ分布を求め、収縮ひび割れ幅を算定する方法を提案した³⁾。この方法では複数のひび割れが生じる場合、それらのひび割れ幅は同じ値に計算されるので、前報⁴⁾ではひび割れ発生順

のひび割れ幅に及ぼす影響を二つのひび割れが生じる長さの一軸拘束ひび割れ試験体を用いて調べた。

本報告では、乾燥収縮ひび割れ性状に及ぼす補強鉄筋の効果を調べることに上述のひび割れ幅算定法の適合性を検討することを目的とし、実際の壁の条件に近づけるため、複数本のひび割れが材齢の経過とともに順次発生するようにこれまでの試験体より試験体長を長く(2,000mm)、また複数の鉄筋を配筋できるように幅を広く(350mm)したコンクリート部分に異形鉄筋 D10 を 2~5 本(鉄筋比 0.4~1.02%)埋設した

表-1 コンクリートの調査

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G		
68.0	47.9	196	288	836	933	18.0	5.0

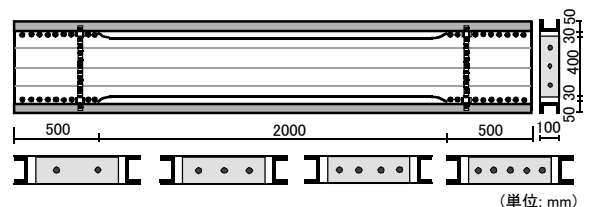


図-1 拘束ひび割れ試験体の形状

*1 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 助手 (正会員)
 *2 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 院生 工修 (正会員)
 *3 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 教授 工博 (正会員)
 *4 大阪大学大学院工学研究科 建築工学専攻 院生

一軸拘束収縮ひび割れ試験を行った。試験では埋設鉄筋ひずみや収縮拘束応力、ひび割れ発生時期、ひび割れ本数、ひび割れ幅の経時変化等を測定した。また提案したひび割れ幅算定法による解析値と実測値を比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

コンクリートの調合を表-1に示す。コンクリートはレディーミクストコンクリートを用いた。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は海砂(表乾密度 2.56g/cm³, 吸水率 1.71%, 粗粒率 2.60%)と砕砂(表乾密度 2.66g/cm³, 吸水率 1.64%, 粗粒率 2.85%)を混合(1:1)したものを、粗骨材は砕石(表乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.34%, 実績率 58.0%)を、混和剤は AE 剤を使用した。拘束ひび割れ試験の埋設鉄筋には横ふし異形棒鋼 D10 (ヤング係数 1.98×10⁵ N/mm², 降伏点は 360 N/mm²)を用いた。

2.2 試験体の形状と種類

拘束ひび割れ試験体の形状を図-1に、その種類を表-2に示す。試験体は全長が 3,000mm で、拘束区間 2,000mm, 試験断面幅 350 mm×厚さ 100mm のコンクリート中に異形鉄筋 D10 を 2~5 本(鉄筋比 0.41~1.02%)埋設したものである。試験体両側の拘束鋼材は市販のみぞ形鋼 100×50×5×7.5(mm)を用いた。断面積は 11.92cm²で拘束鋼材比は 6.81%である。試験体は各 1 体製作した。乾燥収縮試験体は長さ 400mm×幅 100mm×厚さ 100mm, 圧縮クリープ試験体は長さ 500mm×幅 100mm×厚さ 100mm の角柱試験体で、各 2 体製作した。

2.3 実験方法及び測定方法

試験は 20±1℃, R.H.60±5%の恒温・恒湿室で実施した。各試験体ともコンクリート打設後、湿

潤養生を行い、材齢 7 日に型枠を脱型し、以後は気中養生を行った。拘束試験体の測定項目は拘束鋼材と埋設鉄筋のひずみ及びひび割れ幅で、ひずみの測定は鉄筋ゲージ(F.S.G)を用い、拘束鋼材は両側の拘束鋼材のウェブ中央に 1 枚、鉄筋は各試験体とも複数本の埋設鉄筋のうち幅方向の中央または中央よりの 1 本に、拘束区間 2000mm において 100mm 間隔で 21 枚を軸方向に貼付し、4 時間毎のインターバル設定で計測した。ひび割れ幅の測定はコンタクトストレインゲージ (C.S.G) を用いて、埋設鉄筋位置に沿った打設面・底面において埋設鉄筋貼付ゲージが中央になるよう 50mm ずらした 21 区間を検長 100mm で測定した。鉄筋ゲージ、コンタクトポイントの貼付位置を後掲の図-5に示す。乾燥収縮試験は材齢 7 日から開始した。圧縮クリープ試験は材齢 14 日に持続圧縮応力 (6N/mm²)を載荷した。乾燥収縮およびクリープ試験体は C.S.G を用いて、角柱試験体中央部の 4 側面を検長 300mm で測定した。

3. 付着解析によるひび割れ幅算定法

3.1 算定方法

付着解析によるひび割れ算定フローを図-2に示す。1 本目のひび割れは乾燥収縮 ε_{sh} が式(1)の値の時に発生するとし、ひび割れ発生日を求める。ここで、ひび割れ発生基準になる引張強度は実験結果(表-3参照)より得た式(2)を用いた。なお、収縮応力強度比は 0.7 にする。また、ひび割れが発生してない場合の拘束率は式(3)にて計算した。

$$\varepsilon_{sh} = f_t / E_c' / R \quad (1)$$

$$f_t = 0.7 \times (0.083 F_c + 0.21) \quad (2)$$

$$R = \frac{E_s (A_{sr} + A_s)}{E_s (A_{sr} + A_s) + E_c' A_c} \quad (3)$$

ここに、 f_t : コンクリート引張強度、 E_c' : 等価ヤング係数、 R : 拘束率、 F_c : コンクリート圧縮強度、 E_s : 鉄筋及び拘束鋼材ヤング係数、 A_{sr} : 拘束鋼材断面積、 A_s : 鉄筋断面積、 A_c : コンクリートの断面積、 ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ

表-2 試験体の種類

拘束試験体 記号	埋設鉄筋			拘束鋼材 鋼材比(%)
	種類	本数	鉄筋比(%)	
No.1	D10	2	0.41	6.81
No.2		3	0.61	
No.3		4	0.81	
No.4		5	1.02	

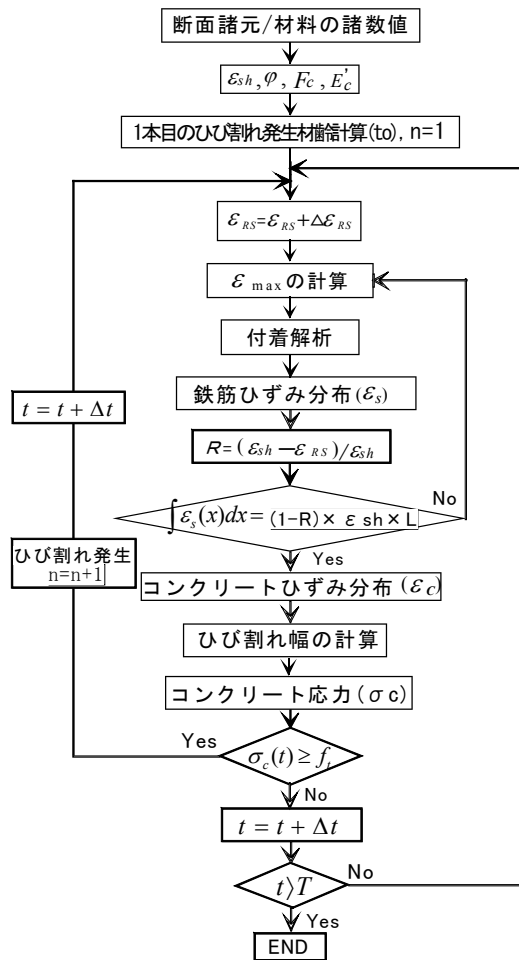


図-2 ひび割れ算定フロー

1 本目のひび割れが生じた後はひび割れ発生後の一軸拘束試験体における拘束鋼材の圧縮力とひび割れ断面における鉄筋の引張力の和が0であることから式(4)が得られる。

$$\epsilon_{RS} \cdot E_s \cdot A_{sr} + \epsilon_{\max} \cdot A_s \cdot E_s = 0 \quad (4)$$

ここに、 ϵ_{RS} : 拘束鋼材のひずみ、
 ϵ_{\max} : ひび割れ位置の鉄筋ひずみ

ひび割れ発生後の拘束試験体の拘束率 R は次のように表される。

$$R = (\epsilon_{sh} - \epsilon_{RS}) / \epsilon_{sh} \quad (5)$$

拘束試験体の収縮変形は拘束鋼材の変形 $\epsilon_{RS} \times L$ に等しいことから拘束率 R を用いて表すと $(1-R) \times \epsilon_{sh} \times L$ となる。式(4)から ϵ_{RS} を増やしながらひび割れ断面における鉄筋応力 ($\epsilon_{RS} \cdot E_s \cdot A_{sr} / A_s$) を求め、付着解析を行い、鉄筋

ひずみ分布を求め、鉄筋ひずみ分布の全長にわたる積分値が $(1-R) \times \epsilon_{sh} \times L$ である条件を満足するまでこの計算を繰り返す。条件を満足するとコンクリートひずみ分布を求め、鉄筋ひずみとコンクリートひずみに囲まれている部分を積分してひび割れ幅を計算する。コンクリート応力が引張強度より大きくなると次のひび割れが発生する

なお、材齢とともに変化するコンクリートの特性(乾燥収縮, クリープ係数, コンクリート強度及びヤング係数)は今回の実験から求めた回帰式を用いた。

4. 実験結果及び考察

4.1 コンクリートの力学的性質

コンクリートの力学的性質を表-3に示す。強度試験は7日, 14日, 28日に行った。材齢28日の圧縮強度は 28N/mm^2 , 割裂強度は 2.57N/mm^2 およびヤング係数は 23.7kN/mm^2 である。

4.2 乾燥収縮及びクリープひずみ

乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみの経時変

表-3 コンクリートの力学的性質

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
7	18	1.72	22.7
15	25	2.25	23.5
28	28	2.57	23.7

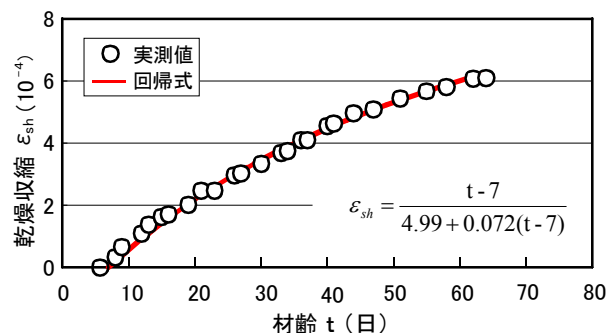


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

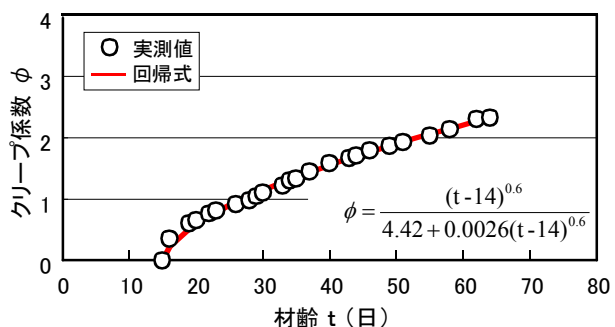


図-4 クリープひずみの経時変化

化をそれぞれ図-3, 図-4に示す。実験は継続中であるがコンクリート材齢 68 日における乾燥収縮ひずみは 622×10^{-4} , クリープ係数は 2.3 である。図中の実線は回帰式による値を示す。

4.3 拘束ひび割れ試験

(1) 拘束ひび割れ状況

材齢 68 日におけるひび割れ状況を図-5に示す。No.1 ではコンクリート打設面(以下, 表面と呼ぶ)と底面(以下, 裏面と呼ぶ)を貫通したひび割れが 1 本, No.2 では表裏面を貫通したひび割れが 1 本と表面に生じたひび割れが 1 本, No.3 では表

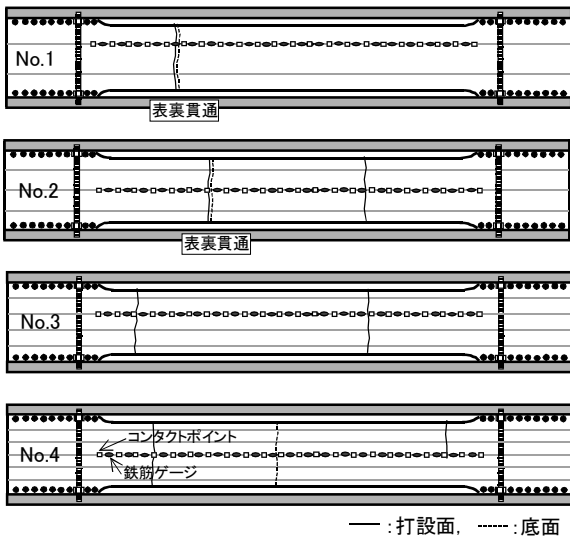


図-5 ひび割れ状況

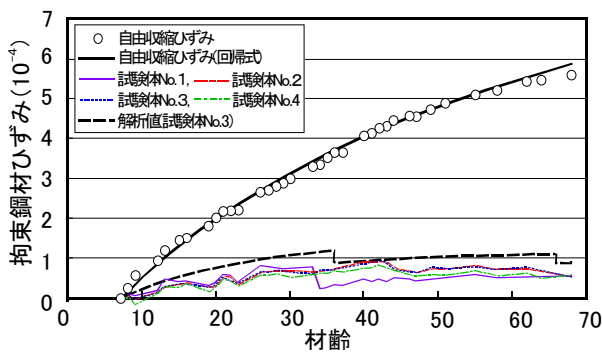


図-6 拘束鋼材ひずみの経時変化

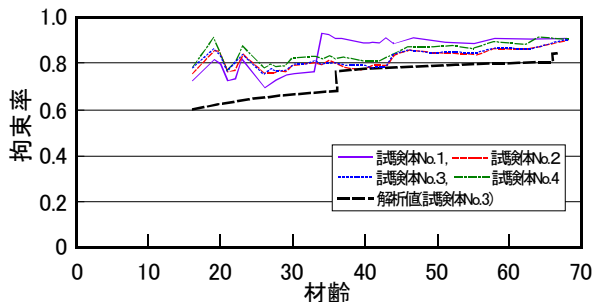


図-7 拘束率の経時変化

面に生じたひび割れが 2 本, No.4 では表面に生じたひび割れが 2 本と裏面に 1 本生じ, 鉄筋の本数に応じてひび割れ数は多くなっている。

(2) 拘束試験体の拘束鋼材ひずみの経時変化

拘束鋼材ひずみの経時変化を図-6に示す。

No.1~No.4 の拘束鋼材ひずみはほぼ等しく, ひび割れの発生によって変動している。図中の破線は試験体 No.3 の拘束鋼材ひずみ解析値で, ひび割れ発生までは弾性解析により, ひび割れ発生後は付着解析により求めた。材齢 36 日と同 66 日の変化はそれぞれひび割れの発生によるものである。

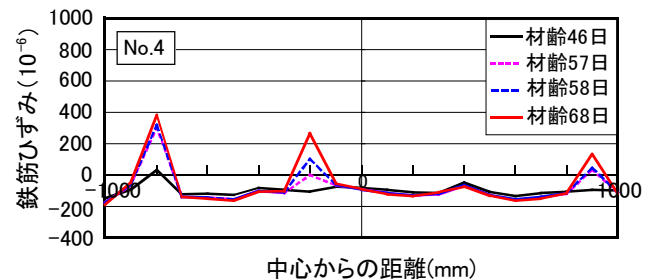
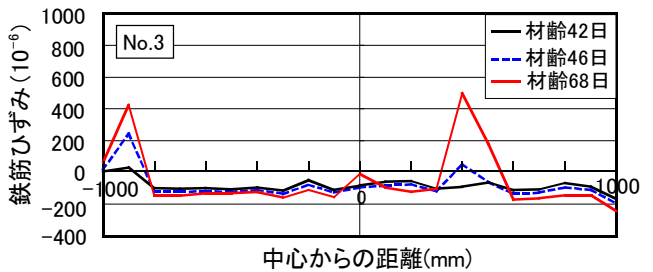
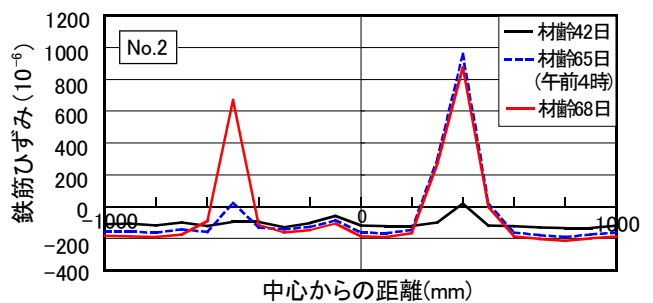
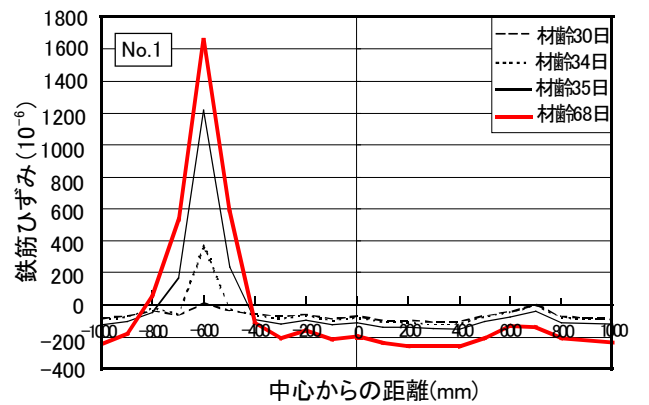


図-8 鉄筋ひずみ分布

図-7に式(5)で計算される拘束率の経時変化を示す。図中の破線は試験体 No.3 の拘束率解析値で、ひび割れ発生までは弾性解析である式(3)により、ひび割れ発生後は付着解析により求めた。式(3)は0.1~0.2, 付着解析は0~0.1程度実測値より小さく算出している。なお、拘束試験体の乾燥収縮は乾燥収縮試験体との形状の差異を仮想厚さ⁵⁾で考慮して図-3に示した値の0.9倍としている。

(3) 鉄筋ひずみ分布

図-8に鉄筋に100mm間隔で貼付したひずみゲージで測定した鉄筋ひずみ分布を示す。試験体 No.1 では試験体中心から585mmの位置に材齢34日にひび割れが生じ、ひび割れ近くの600mmの位置の鉄筋ひずみは材齢34日で約 400×10^{-6} , 材齢68日で約 1600×10^{-6} となっている。ひび割れから約300mm離れた位置のひずみは一樣に収縮しており鉄筋とコンクリート間にすべりは生じていないものと考えられる。試験体 No.2 では、65日に2本目のひび割れが発生し、1本目のひび割れ位置のひずみが 960×10^{-6} から68日には 870×10^{-6} まで 90×10^{-6} 減少している。また、図-8から埋設した鉄筋の鉄筋比が0.41%, 0.61%, 0.81%, 1.02%と大きくなると材齢68日におけるひび割れ位置の鉄筋ひずみが 1600×10^{-6} , 1000×10^{-6} , 500×10^{-6} , 400×10^{-6} と鉄筋比に応じて小さくなっていることがわかる。

図-9に試験体 No.1 と No.2 の材齢68日におけるひび割れ近傍の鉄筋ひずみとコンクリートひずみの付着解析値をそれぞれ破線と点線で、鉄筋比の実測値を実線で示す。鉄筋ひずみの解析値は実測値とほぼ一致している。

(4) ひび割れ幅と本数

図-10に材齢68日までのひび割れ幅の経時変化を示す。同中には解析結果も示している。試験体 No.1 では材齢34日に打設面と底面にほぼ同時にひび割れが発生し、全断面を貫通している。その後、ひび割れ幅は漸増している。解析によるひび割れ発生日は37日で、ひび割れ本数は1本で実測値と一致している。No.2 では40日と65日にひび

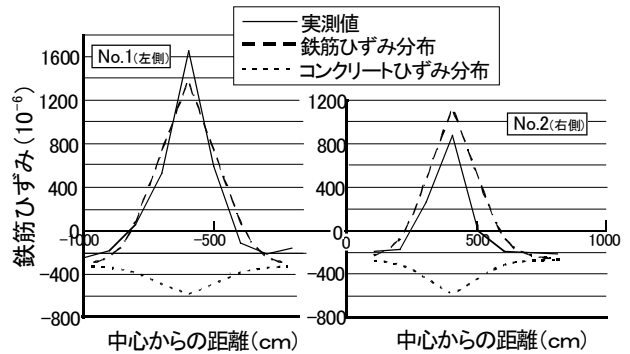


図-9 鉄筋ひずみ分布(試験体No.1, No.2)

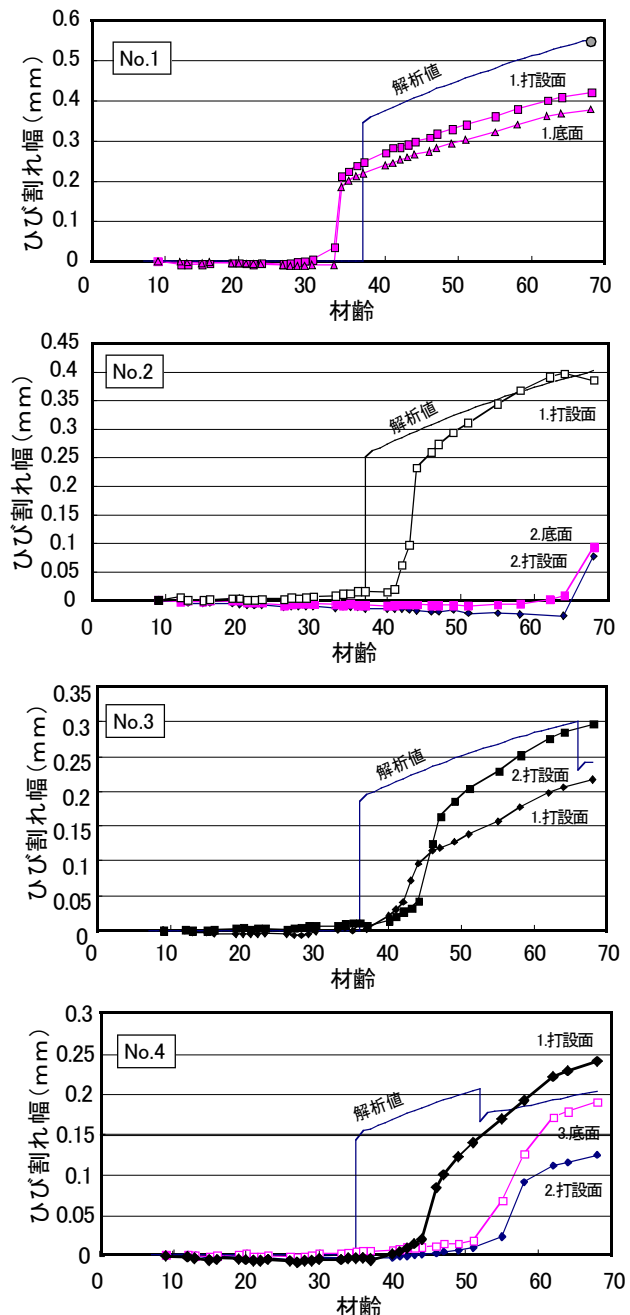


図-10 ひび割れ幅の経時変化

割れが発生した。1本目のひび割れは打設面のみに生じ、断面を貫通していない。解析では材齢37

日にひび割れが発生し、その後は生じていない。なお、1本目のひび割れ幅は2本目のひび割れの発生によって僅かに減少している。No.3では42日と46日にひび割れがいずれも打設面に生じた。ひび割れ発生日の解析値は36日と66日である。No.4では3本のひび割れが生じた。いずれも打設面あるいは底面の片面でのひび割れで、発生日は46日、57日と58日である。解析では2本のひび割れが生じ、発生日は35日と52日である。No.2とNo.4のひび割れ本数の実測値が解析値より多い理由の一つとしてひび割れが片面に生じていることが考えられる。

表-4に材齢68日におけるひび割れ発生材齢、ひび割れ本数及びひび割れ幅の実測値や計算値、解析値などを示す。同表のひび割れ発生材齢の実験値は鉄筋ひずみの変化によって判定した値で、ひび割れ発生の目視による確認は1日から数日遅れる。またひび割れ幅の実測値は打設面と底面におけるコンクリート表面での測定値の平均値で、ひび割れが打設面か底面の片方にしか生じていない場合は片面の測定値の1/2を実測値としている。同表から鉄筋比に応じてひび割れ幅は制御されていることがわかる。ひび割れ幅の計算値はひび割れが複数生じている場合は1本目のひび割れ幅について、図-8に示した鉄筋ひずみ分布の実測値からコンクリートひずみを計算し、鉄筋ひずみとコンクリートひずみの差を積分して算出した値である。この計算値は実測値とほぼ一致している。付着解析によるひび割れ幅の解析値は、ひび割れの数の解析値が実測値より少ないNo.2, No.4を除いて実測値より少し大きめではあるがほぼ妥当な値を与えている。なお、ひび割れ幅は複数の埋設鉄筋のうちの1本の鉄筋位置で測定しているが、

No.1試験体における材齢68日の2本の埋設鉄筋のうち1本の位置のひび割れ幅は0.55mmで、実測値と一致している。

5. まとめ

鉄筋D10を2~5本埋設した一軸拘束ひび割れ試験体(鉄筋比0.41~1.02%)のひび割れ性状を調べるとともに先に提案したひび割れ算定法の適合性を検討した結果をまとめると次のようになる。

(1) ひび割れ本数

ひび割れは材齢30日(乾燥日数23日)から68日にかけて、鉄筋比が最小(0.41%)の試験体で1本、最大(1.02%)の試験体で3本発生した。ひび割れ発生日とひび割れ本数の解析結果は実験値とほぼ一致している。

(2) ひび割れ幅

ひび割れが断面を貫通している場合は打込み面と底面の幅の平均値で、片面にしか生じていない場合はその1/2として材齢68日におけるひび割れ幅を比較すると、鉄筋比0.41%の試験体で0.40mm、0.6%で0.19mm、0.8%で0.18mm、1.02%で0.12mmと鉄筋比に応じてひび割れ幅は制御された。付着解析は大略実測値の傾向を捉えている。

本研究は平成17年度科学研究費補助金(基盤研究C, 研究代表者; 大野義照)の助成を得た。

参考文献

- 1) 劉 勇, 大野義照, 中川隆夫, 林田都芳: コンクリートの収縮ひびわれ幅に及ぼす鉄筋量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.751~756, 2001.7
- 2) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫, 太田寛: コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.25~28, 1981
- 3) 劉 勇, 大野義照, 中川隆夫: 鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅算定法の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.437~442
- 4) 徐 泰錫, 大野義照, 中川隆夫, 岸本一蔵: 鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ発生順序のひび割れ幅への影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.437~442, 2005.7
- 5) CEB-FIPコンクリート構造物設計施工国際指針, 鹿島出版会

表-4 ひび割れ発生材齢・本数・幅(材齢:68日)

試験体 記号	ひび割れ 番号	発生材齢(日)		ひび割 れ本数	ひび割れ幅(mm)		
		実験値	解析値		実測値	計算値	解析値
No.1	1.貫通	30	37	1	0.40	0.48	0.55
No.2	1.打設面	40	37	2	0.19	0.22	0.40
	2.貫通	65	—				
No.3	1.打設面	42	36	2	0.18	0.16	0.24
	2.打設面	46	66				
No.4	1.打設面	46	35	3	0.12	0.12	0.20
	2.打設面	57	52				
	3.底面	58	—				

(ひび割れ発生材齢の実験値は鉄筋ひずみの変化から判定。)