

# 論文 鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化における乾燥収縮の影響

関 友則\*1・櫻井 哲哉\*2・下村 匠\*3

**要旨:** 鉄筋コンクリートの曲げひび割れ幅の経時変化に乾燥収縮が及ぼす影響について検討を行った。まずひび割れ間コンクリートの乾燥収縮による変形挙動に着目し、その諸要因について実験的に検討を行った。また、はりの持続曲げ載荷試験を行い、ひび割れ幅の経時変化に及ぼすコンクリートの乾燥収縮の影響について前者の実験を踏まえた検証を行った。結果、ひび割れ間コンクリートの収縮ひずみに自由収縮ひずみを用いることで、乾燥収縮がひび割れ幅の経時変化に及ぼす影響を概ね適切に評価できることが確認された。

**キーワード:** ひび割れ幅, 乾燥収縮, クリープ

## 1. はじめに

従来、実構造物の長期的な曲げひび割れ幅は、土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式で求めたよりも大きくなる場合があることが指摘されている。その主たる原因は、算定式ではコンクリートの収縮の影響が過小に見積もられているからであると考えられている<sup>1)2)</sup>。現行の示方書式では、クリープ・乾燥収縮の影響を表す値( $\epsilon'_{csd}$ )は  $150\mu$  (高強度コンクリートでは  $100\mu$ ) を用いてよいこととされているが、長期的なひび割れ幅の算定精度を向上させるには、この数値の再検討が必要である。本研究では、この課題について室内実験により検討するものである。

石橋らは、ひび割れ発生後のひび割れ間コンクリートを鉄筋や他部分から拘束を受けない自由体と考え、その自由収縮ひずみを用いることで、実橋のひび割れ幅実測結果に算定値を近づけることができるとしている<sup>1)</sup>。しかしながら、自由収縮ひずみを用いることの合理性は必ずしも明らかではない。RC 部材中のひび割れ間コンクリートの乾燥収縮による変形には、ひび割れ近傍のコンクリートが他の部分よりも乾燥しやすくまた内部拘束の影響が少ないために表面が収縮しやすいこと、一方、ひび割れ発生後であっても鉄筋周囲ではコンクリートの収縮が鉄筋に拘束されること、などの影響が含まれていると考えられる。そこで本研究ではまず、ひび割れ間コンクリートの収縮による変形に及ぼすこれらの影響因子を個別に検討するために、ひび割れ間コンクリートを模擬した供試体の乾燥収縮試験を行った。

次に、RC 部材に発生したひび割れにおいて、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮を考慮することでひび割れ幅の経時的な増加を説明できるかどうかを検証するために、収縮量を実験変数とした RC はりの持続載荷試験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 ひび割れ間コンクリート模擬供試体の乾燥収縮試験

#### (1)供試体

供試体の作製には表-1 に示した配合 A を用いた。作製した供試体の一覧を表-2 に示す。供試体は図-1 に示すように、コンクリート角柱に鉄筋を一本埋め込むことで、一軸 RC 部材のひび割れ間を模擬したものである。コンクリート角柱の長さはひび割れ間隔に、端面はひび割れ面に該当する。ひび割れ面からの乾燥の有無はエポキシ樹脂系硬化剤による端面シールの有無で制御した。なお、実際の RC 部材ではひび割れ幅が小さいことにより、ひび割れ面は本実験の端面シール無の供試体よりも乾燥しにくいと考えられる。埋設した鉄筋は D13 ( $E_s = 1.69 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ) を基本とし、鉄筋による拘束作用を検討するためのシリーズでは他に D19 ( $E_s = 1.91 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ), D29 ( $E_s = 2.12 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ) を用いた。鉄筋の弾性係数は試験値である。供試体は打設後 1 日で脱型し、材齢 28 日まで  $20^\circ\text{C}$  の水中で養生した後、 $20^\circ\text{C}60\% \text{RH}$  の恒温恒湿室内にて乾燥を開始した。

#### (2)試験方法

図-1 のコンタクトチップ間の長さ変化を、精度  $1/1000$  (mm) のコンタクトゲージを用いて計測した。供試体全区間における平均ひずみと中央部 (基長 100mm)

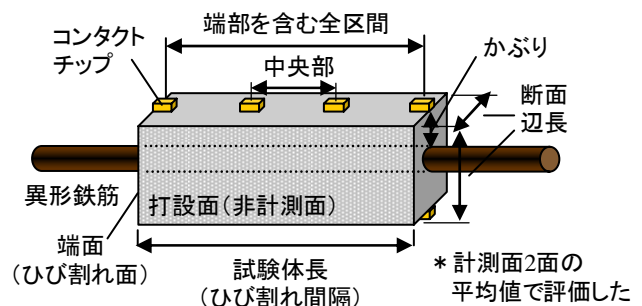


図-1 ひび割れ間コンクリート模擬供試体の概略

\*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 北陸建設弘済会 (社) 修 (工) (非会員)

\*3 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 准教授 博 (工) (正会員)

のひずみを測定した。なお、本研究の実験において測定されるひずみはすべてコンクリート表面におけるひずみである。

## 2.2 収縮量を実験変数とした RC はりの持続荷重試験

### (1) 供試体

RC はり供試体の一覧を表-3 に示す。表-1 に示した配合 A を用いた。水セメント比 50% として単位水量を BSH 供試体の倍とすることで乾燥収縮の増大を図った HSH 水準に限り、配合 B を用いた。RC はり供試体は図-2 に示すように、150×200×2500mm、有効高さ 160mm とし、軸方向鉄筋 (D13、弾性係数=1.69×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>) を 2 本配置した。鉄筋比は 1.23% であり、底面および側面のかぶりは 33.5mm である。また、RC はり供試体と同断面で供試体長が 500mm の無筋供試体を各水準に 1 体ずつ作製し、自由収縮を測定した。

### (2) 計測方法および荷重方法

作製した供試体は打設直後から脱枠まで表面をビニールシートで覆い、さらにその上から湿布で覆うことで水分の逸散を防いだ。脱枠後は直ちに全体を湿布で覆いその上からビニールシートでシールし、屋内環境下で湿潤養生を開始した。SH7 供試体に限り、材齢 7 日目から 20°C60%RH の恒温恒湿室内で乾燥を開始した。自由収縮供試体も同様の条件とした。いずれの供試体も、持続荷重は材齢 28 日目に開始した。LSH 供試体は、ひび割れ発生後にひび割れ部も含めて等曲げモーメント区間 (試験区間) にグリスを塗布し、乾燥の低減を図った。

自由供試体の収縮ひずみは、中心に埋設した埋め込み型ひずみ計により打設直後から計測した。

RC はり供試体の持続荷重試験方法を図-2 に示す。持続荷重は、2 体の供試体を組み合わせて、支点間 2200mm、等曲げ区間 900mm の 2 点荷重とした。荷重荷重は、支間両端に通した PC 鋼棒 (断面積=176.5mm<sup>2</sup>、弾性係数=1.65×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>) を手でボルト締めすることで導入した。負荷する荷重レベルは、使用荷重下での状態を再現することを勘案して、ひび割れ断面における鉄筋応力が 150N/mm<sup>2</sup> となるように設定した。持続荷重開始後、PC 鋼棒のひずみを計測し、作用曲げモーメントがほぼ一定の値となるように適宜再緊張して制御した。

ひび割れ幅の計測はひび割れ発生直後から開始した。ひび割れ幅の測定は、純粋に幅のみを抽出することを考え、鉄筋位置に軸方向に引いた線 (幅 2mm) 上で精度 1/50mm のデジタルマイクロスコープによって行った。本研究のひび割れ幅の計測値は、ある時点のひび割れ幅を基準とした相対値ではなく、絶対値である。

鉄筋の軸方向のひずみ分布は、供試体の中央部 520mm の区間に 65mm 間隔で貼り付けたひずみゲージによって、荷重直前を原点として持続荷重時も経時的に計測した。

表-1 本研究で用いた配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	S	G	Ad1	Ad2	混和材
A	50	45	165	330	821	1003	0.99	0.99	—
B	50	45	330	660	496	606	1.98	1.98	0.99

W: 水道水, C: 普通セメント (密度3.16g/cm<sup>3</sup>)

S: 信濃川産川砂 (密度2.68g/cm<sup>3</sup>, 吸水率1.63)

G: 碎石 (密度2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率1.10, 最大寸法20mm)

Ad1: AE減剤, Ad2: AE助剤, 混和材: 分離低減剤

表-2 ひび割れ間コンクリート模擬供試体の乾燥収縮試験の実験水準

シリーズ	供試体記号	検討要因	端面シール	試験体寸法	かぶり	埋設鉄筋径	基長
A	A1	端部変形	無	100×100×300	43.5	D13	100・300
	A2		有	150×150×300	68.5	D13	
	A3		無	150×150×300	68.5	D13	
	A4		有	200×200×300	93.5	D13	
	A5		無	200×200×300	93.5	D13	
B	B1	鉄筋拘束	無	100×100×300	43.5	D13	300
	B2		無	100×100×300	40.5	D19	
	B3		無	100×100×300	35.5	D29	
	B自由		—	100×100×300	—	—	
	B自由		—	100×100×300	—	—	
C	C1	ひび割れ間隔	無	100×100×100	43.5	D13	100
	C2		無	100×100×200		D13	200
	C3		無	100×100×300		D13	300
自由収縮	屋内	環境作用	—	100×100×400	—	—	200
	屋外		—	100×100×400	—	—	

\* A1, B1, C3 は同一の供試体

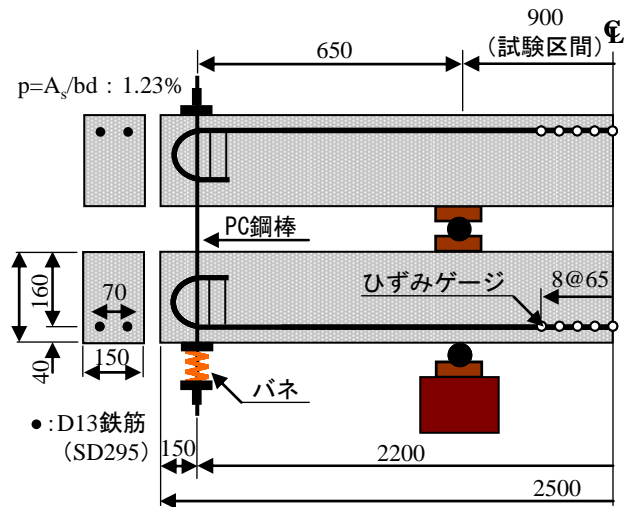


図-2 RC はりの概略および持続荷重方法

表-3 RC はりの持続荷重試験の実験水準

供試体記号	検討要因	乾燥開始材齢(日)	荷重開始材齢(日)	荷重モーメント(kNm)	引張鉄筋応力度(MPa)
BSH	比較基準 低収縮 高収縮	28	28	5.26	150
LSH					
HSH					
SH7	荷重前乾燥有	7			

\* 供試体記号: B:Basic, L:Low, H:High, SH:Shrinkage, 7:乾燥開始材齢

## 3. ひび割れ間のコンクリートの乾燥収縮に関する検討

### 3.1 ひび割れ面近傍での局所的な変形の影響

従来、ひび割れ面近傍での局所的な乾燥収縮がひび割れ幅の増大に及ぼす影響は大きいことが指摘されている<sup>1)</sup>。これは、ひび割れ面からの乾燥の影響と、ひび割

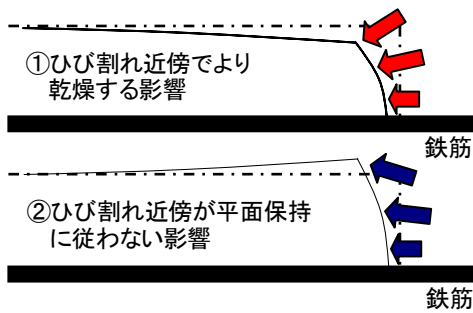


図-3 ひび割れ間コンクリートの変形の模式図

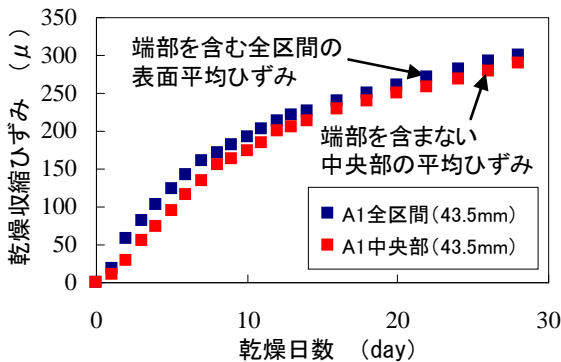


図-4 ひび割れ近傍の変形の影響

れ近傍ではコンクリートの変形が平面保持に従わないことによる影響が複合したものと考えられる (図-3)。

図-4 に、A1 供試体 (かぶり 43.5mm) の、端部を含んだ全区間 (基長 300mm) における平均表面ひずみと中央部 (基長 100mm) の表面ひずみを示す。実験結果では、たしかに供試体全体の平均表面ひずみの方が中央部における収縮ひずみよりも大きくなったが、その差は 10  $\mu$  程度であり小さい。

図-5 に、かぶりと端面シールの有無が異なる A シリーズの各種供試体の、端部を含んだ全区間における平均表面ひずみと中央部の表面ひずみを示す。端面のシールがない A3, A5 供試体においては、ひび割れ面からの乾燥の影響と、ひび割れ近傍の変形は平面保持に従わないことの影響が複合するので収縮が大きくなると予想されたが、結果からはその影響を示す有意な差は認められなかった。かぶり 93.5mm で端面をシールした A4 供試体では乾燥日数 28 日目で 70  $\mu$  程度の差が認められた。端面からの乾燥のない供試体であるので、これは平面保持に従わないことの影響が単独で表れたものと考えられる。しかし、かぶり 68.5mm の A2 供試体では差が認められなかった。このことより、ひび割れ近傍の変形はかぶりの影響を受けると考えられる。

### 3.2 鉄筋の拘束による影響

図-6 に、D13, D19, D29 鉄筋をそれぞれ埋設した B シリーズの供試体および B 自由供試体の、端部を含んだ全区間における平均表面ひずみを示す。B2, B3 供試体においては、自由収縮ひずみに比べて収縮が小さい。そ

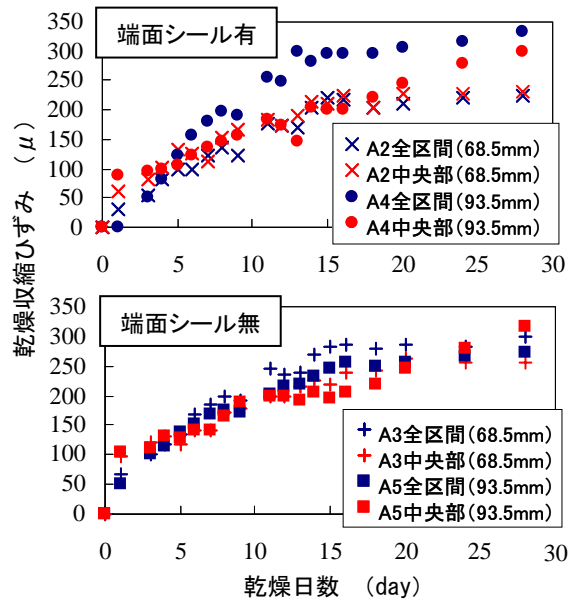


図-5 かぶりと端面からの乾燥の有無の影響 (上：端面シール有，下：端面シール無)

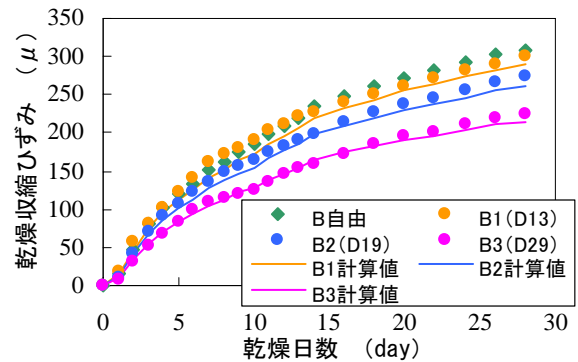


図-6 鉄筋の拘束による影響

の差は本実験結果では、自由収縮 300  $\mu$  に対して 50~100  $\mu$  程度であり小さくはない。これは、鉄筋の拘束作用によると考えられる。同図中に、B 自由供試体における自由収縮ひずみを用いた式 (1) による計算結果を示した。

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{sh}}{1 + (A_s E_s / A_c E_c)} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ :鉄筋コンクリート供試体のひずみ、 $\varepsilon_{sh}$ :自由収縮ひずみ、 $A_s$ :鋼材断面積、 $E_s$ :鋼材弾性係数、 $A_c$ :コンクリート断面積、 $E_c$ :コンクリート弾性係数、である。計算値は実験値と一致しており、一軸方向の弾性拘束により鉄筋の拘束作用を受けた表面ひずみを概ね表すことができた。

図-4, 図-6 の結果を総合すると、D13 鉄筋を埋め込んだ供試体において、全区間の平均表面ひずみがほぼ自由収縮ひずみと等しくなったのは、ひび割れ面近傍の変形の影響と、鉄筋拘束の影響が相殺したためと考えられる。このことが、ひび割れ間コンクリートの収縮を自由収縮とみなすことができた理由であると考えられる。

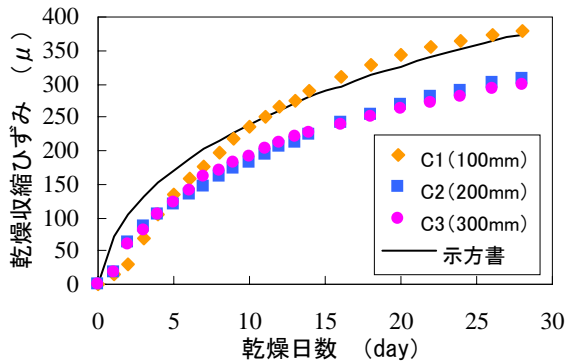


図-7 ひび割れ間隔の相違による影響

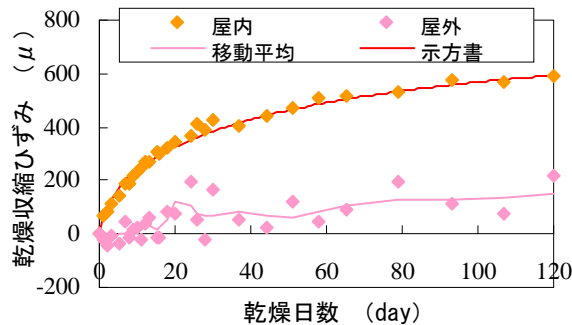


図-8 屋内と屋外の乾燥収縮の相違

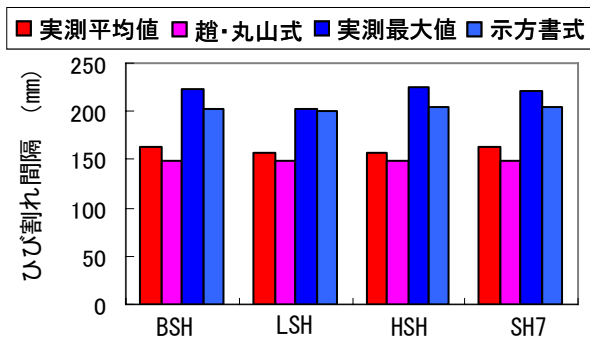


図-9 ひび割れ間隔の実測値と算定値

### 3.3 ひび割れ間隔の影響

図-7 に供試体長を変化させた C シリーズの供試体の、端部を含んだ全区間における平均表面ひずみを示す。実験結果では、供試体長 (=L) 200mm, 300mm の供試体の収縮ひずみはほぼ同等となり、それに対して L=100mm の供試体の収縮ひずみは 100 $\mu$  程度大きくなった。これは L=100mm の供試体では全区間の表面平均ひずみに占める端部の変形の影響割合が大きいと考えられる。L=200mm, 300mm の供試体では、端部が全区間に占める割合が小さいので、端部の変形が全区間の表面平均ひずみに及ぼす影響はもはや認められない。示方書の収縮予測式を用いた場合、端部を考慮せずに V/S を変化させただけではこの傾向は表現できないが、実際の RC 部材のひび割れ間隔は通常 200mm より大きいので、端部の影響を考えなくとも問題はないといえる。

### 3.4 屋内と屋外環境における自由収縮ひずみの違い

図-8 に、恒温恒湿室内と屋外でそれぞれ計測された

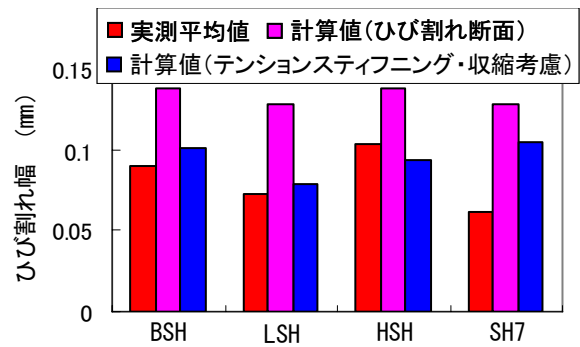


図-10 初期ひび割れ幅の実測値と算定値

乾燥収縮ひずみを示す。恒温恒湿室内での収縮に対して屋外での収縮は小さい結果となった。また、屋外の計測値は変動が大きい。これらは、降雨や日射の影響によると考えられる。本研究は、環境条件が理想的に制御された室内実験による検討であるため、このような実環境作用の影響については今後検討が必要である。示方書の収縮予測式は恒温恒湿室内の計測値に適合している。

## 4. 持続曲げ荷重を受ける RC はり供試体のひび割れ幅の経時変化に関する検討

### 4.1 ひび割れ間隔

図-9 に、RC はり供試体の等曲げ区間における実測ひび割れ間隔の平均値と最大値、示方書式による最大ひび割れ間隔の算定値、趙・丸山式による平均ひび割れ間隔の算定値を示す<sup>4)</sup>。実測値に対して各算定式はやや小さく算定する傾向にあるが、概ね適切に評価している。

また、全供試体における個々のひび割れ間隔とその供試体の平均値との比の度数分布による統計的検討も行った結果、標本数は 27 であり、変動係数は 0.236 であった。趙・丸山の研究における変動係数は 0.288 であり、ばらつきは同程度といえる<sup>4)</sup>。

### 4.2 ひび割れ幅の初期値

図-10 に、載荷直後のひび割れ幅の実測値と算定値を示す。算定値は、ひび割れ断面での鉄筋応力度の計算値、コンクリートのテンションスティフニング効果および載荷前のコンクリートの収縮による影響を考慮した鉄筋応力度と図-9 における平均ひび割れ間隔の算定値を用いた。テンションスティフニング効果については角田の研究、載荷前の収縮による影響については石橋らの研究における考慮方法に拠った<sup>2),3)</sup>。ひび割れ断面での鉄筋応力度を用いた算定値は実測値を過大評価する傾向にあることがわかる。ひび割れ間隔の実測値と算定値はほぼ一致していたので、初期ひび割れ幅の算定精度は主に鉄筋応力度の算定値に依存することとなる。鉄筋応力の算定においてテンションスティフニング効果と載荷前の収縮の影響<sup>1),5)</sup>を考慮した場合のひび割れ幅の算定値は、実測値と良く一致している。しかし、載荷前から

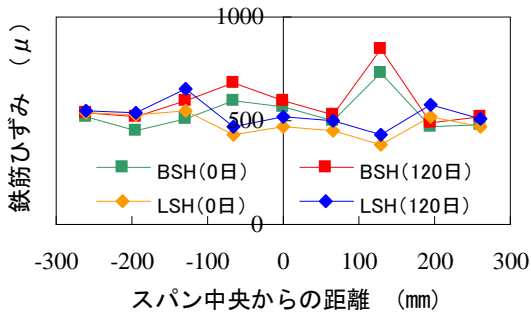


図-11 引張鉄筋ひずみ分布 (BSH・LSH供試体)

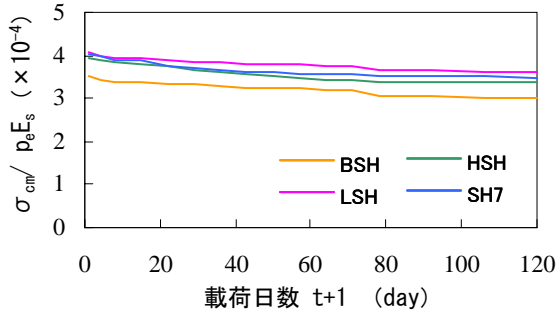


図-12 持続荷重下での  $\sigma_{cm}$  の減少

乾燥させた SH7 供試体では、それらを考慮しても算定値が実測値を上回った。これは、SH7 供試体は載荷前に乾燥を受けたが、想定よりも大きなクリープによりその影響が大部分消失していた可能性が考えられる。

#### 4.3 鉄筋ひずみの経時変化

図-11に、BSH および LSH 供試体の中央 520mm における軸方向の鉄筋のひずみの分布を示す。図中には、載荷直後および載荷後 120 日経過時の結果を示している。どの供試体においても載荷後 120 日において鉄筋ひずみの増加が認められた。すなわち、引張部コンクリートのテンションステイフニング効果が減少している。

図-12に、供試体中のコンクリートの平均応力の経時変化を示す<sup>3)</sup>。コンクリートの平均応力は、鉄筋の平均ひずみの実測値を用いて式(2)により算定した。

$$\sigma_{cm} = \frac{M - A_s E_s \varepsilon_s z}{A_c z} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{cm}$ :コンクリートの平均応力、M:持続荷重モーメント(一定)、 $A_s$ :鋼材断面積、 $E_s$ :鋼材弾性係数、 $\varepsilon_s$ :鉄筋の平均ひずみ、 $A_c$ :コンクリート引張部の断面積、z:合力間の距離(一定)、である。鉄筋ひずみの増加に影響を及ぼす要因としては圧縮部コンクリートのクリープと引張鉄筋の付着の損失が考えられるが、ここでは圧縮部コンクリートのクリープによる中立軸の変動を考慮していないため、前者と後者は分離評価されない。

各供試体の算定された載荷初期の  $\sigma_{cm}$  は、コンクリートの引張強度を  $f_t$  とするとき、 $\sigma_{cm}/f_t=0.39\sim 0.46$  であった。角田の研究によると  $\sigma_{cm}/f_t$  の値は 0.2~0.6 の間にあ

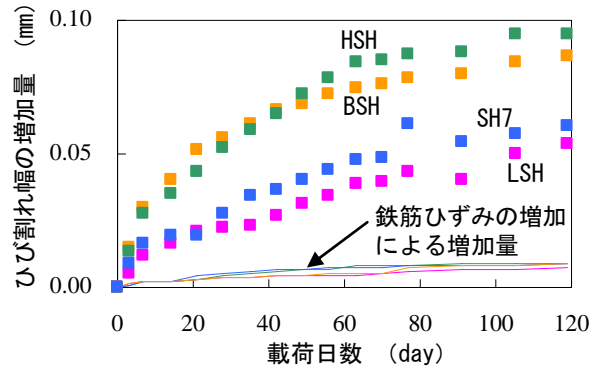


図-13 平均ひび割れ幅の増加量の経時変化

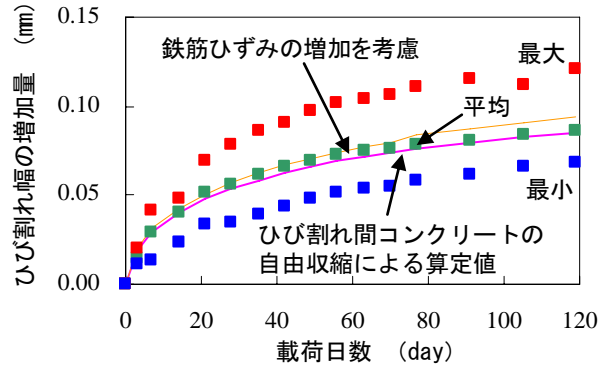


図-14 BSH 供試体のひび割れ幅の経時変化

り<sup>3)</sup>、本実験結果はこの範囲に収まっている。

また、角田の研究では、持続荷重下では  $\sigma_{cm}$  が時間とともに徐々に減少していくことから、実用上  $\sigma_{cm}$  をゼロとすることが提案されている<sup>3)</sup>。本実験結果では、 $\sigma_{cm}$  が載荷時間とともに減少する傾向は認められたが、その減少割合は載荷初期時の 10~15% 程度であり、角田の研究における 50% 程度に比べると小さい。本実験では荷重レベルが低いこと、載荷前の乾燥による引張鉄筋の付着の損失が少なかったことにより、持続荷重下でも付着が比較的健全に保たれていたためと考えられる。

#### 4.4 ひび割れ幅の経時変化

図-13に、持続荷重試験における各 RC はりのひび割れ幅の平均値の経時変化を示す。載荷開始時(材齢 28 日)のひび割れ幅からの増加量を示している。収縮量が大きい HSH、BSH 供試体のひび割れ幅の増加量は、収縮量が小さい LSH 供試体のおよそ 2 倍となった。ひび割れ幅の経時的な増大には、主としてひび割れ発生後に進行する乾燥収縮が影響を及ぼしていることが確認できる。また、図-13中に鉄筋ひずみの増加から計算されるひび割れ幅の増加量を実線で示した。これは、供試体中央部で計測している鉄筋ひずみの分布から求めた鉄筋ひずみの平均値の増加量と、ひび割れ間隔の実測値の平均値の積である。このようにして計算されるひび割れ幅の増加量は、実際のひび割れ幅の増加量のわずか 7~15% に過ぎないことから、ひび割れ幅の経時的な増大の主要因ではないといえる。このことから、ひび割れ幅の経時

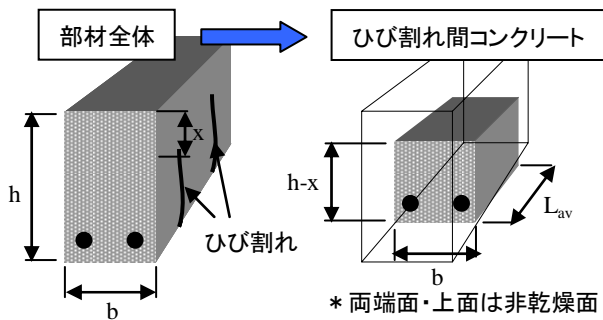


図-15 ひび割れ間コンクリートの模式図

の増大の主要原因はコンクリートの収縮であることが示唆される。

図-14 に、BSH 供試体のひび割れ幅の最大値、最小値、平均値の増加量の経時変化を示した。また図中に、ひび割れ間コンクリートの収縮から計算されるひび割れ幅増加量、およびそこに鉄筋ひずみの増加の影響を加味した算定値を実線で併記した。ひび割れ間コンクリートの収縮は、鉄筋による拘束を考慮せずひび割れ間コンクリートを断面の幅  $b \times$  中立軸高さ  $(h-x) \times$  ひび割れ間隔の平均値  $L_{av}$  で表される直方体の自由体とみなし、示方書の収縮予測式を用いて算定した。乾燥は、底面と両側面の3面から進行するとして、 $V/S$  を算出した(図-15)。

$$V/S = \frac{b(h-x)L_{av}}{2(h-x)L_{av} + bL_{av}} \quad (3)$$

このようにして評価された算定値は、実験結果に概ね適合していることが分かる。本実験結果では、鉄筋ひずみの増加を考えずとも、乾燥収縮を考慮するだけでひび割れ発生後のひび割れ幅の経時変化が表現できた。

#### 4.5 ひび割れ幅の計算方法

これまで考察したことを踏まえて、ひび割れ幅の計算方法を次のようにまとめる。

まず平均ひび割れ幅を次式により計算する。

$$w_{av} = L_{av} \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} - \frac{\sigma_{cm}}{E_s p_e} + \varepsilon'_{sh} \right) \quad (4)$$

ここで、 $L_{av}$ :平均ひび割れ間隔、 $\sigma_{se}$ :鋼材位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量、 $E_s$ :鋼材の弾性係数、 $\sigma_{cm}$ :かぶりコンクリートの負担する平均引張応力、 $p_e$ :鋼材断面積とかぶりコンクリートの有効断面積の比、 $\varepsilon'_{sh}$ :ひび割れ間コンクリートの収縮ひずみである。 $L_{av}$ は趙・丸山らの研究<sup>4)</sup>により算定する。 $\sigma_{cm}$ は $0.4f_t$ とする。ひび割れ間コンクリートの収縮ひずみは、式(3)による $V/S$ を示方書の収縮予測式に用いて算定した自由収縮ひずみに鉄筋による拘束を加味するのがよいが、自由収縮ひずみをそのまま用いてもよい。

次に、趙・丸山による統計的分析の結果に基づき、ひ

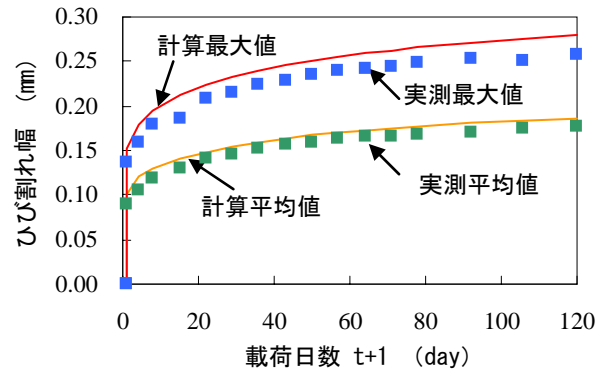


図-16 BSH供試体のひび割れ幅の実測値と算定値

び割れ幅の平均値から最大値を次式により計算する<sup>4)</sup>。

$$w_{max} = 1.5w_{av} \quad (5)$$

図-16 に本計算方法による BSH 供試体の実測値と算定値を示す。算定値は実測値を適切に評価できている。

#### 5. まとめ

本研究において以下の知見が得られた。

1. 鉄筋コンクリートのひび割れ間コンクリートの収縮ひずみが、自由収縮ひずみと同等となる理由は、ひび割れ面近傍での変形の影響と鉄筋の拘束による影響が相殺するためであると考察した。
2. ひび割れ幅の経時的な増加に及ぼす鉄筋ひずみの増加の影響は小さく、主に影響を及ぼすのは、ひび割れ間コンクリートの収縮であると考えられる。
3. 本実験供試体では、ひび割れ間コンクリートの収縮ひずみに自由収縮ひずみを用いることで、ひび割れ幅の経時的な増加を概ね評価できた。

なお、今回の実験では、荷荷前の収縮が大きいケースが含まれていないので、あらためて検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 石橋忠良, 津吉毅: コンクリート桁の表面の曲げひび割れ幅の算定法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.22, No.484, pp.33-40, 1994.2
- 2) 石橋忠良ほか: RC 梁の曲げひびわれ性状に及ぼすひびわれ発生材令の影響, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1309-1318, 1991.3
- 3) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970.9
- 4) 趙唯堅, 丸山久一: 鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅算定式の再評価, 土木学会論文集, 第 490 巻/V-23, pp.147 - 156, 1994.5
- 5) 谷村充ほか: 若材齢時長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, 第 760 巻/V-63, pp.181-195, 2004.5