

鉄筋コンクリートの曲げひび割れ幅の経時変化に及ぼす乾燥収縮の影響

コンクリート研究室 関 友則
指導教員 下村 匠

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^{1) 2)}。現行の示方書式では、クリープ・乾燥収縮の影響を表す値(ϵ'_{csd})は 150μ (高強度コンクリートでは 100μ) 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¹⁾。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により、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

燥の有無は端面シールの有無で制御した。

埋設した鉄筋は D13 (弾性係数 $=1.69 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) 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 (弾性係数 $=1.91 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)、D29 (弾性係数 $=2.12 \times 10^5 \text{N/mm}^2$) を用いた。供試体は打設後 1 日で脱型し、材齢 28 日まで水中養生 (水温 20°C) 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) 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。

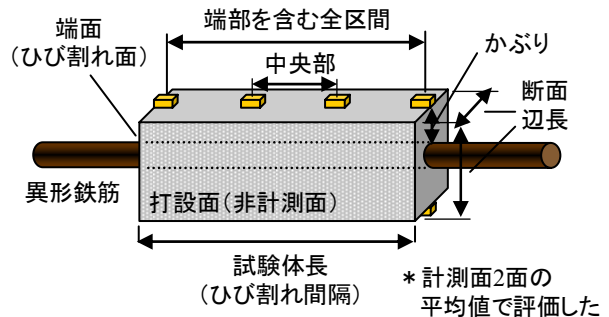


図-1 ひび割れ間コンクリート模擬供試体の概略

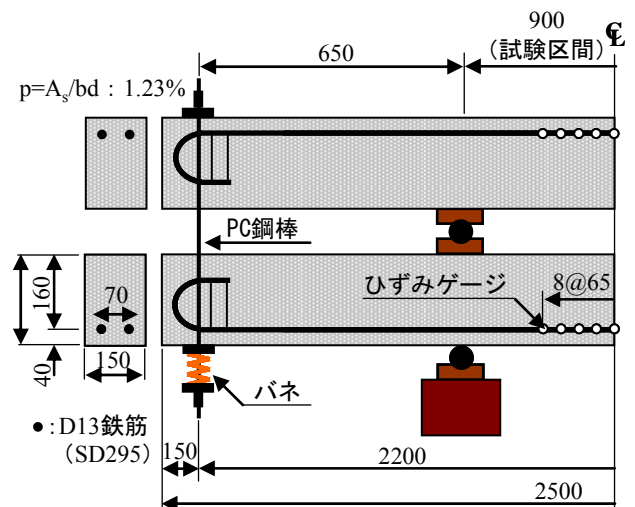


図-2 RC はりの概略および持続載荷方法

2.2 コンクリートの収縮量を実験変数とした RC はりの持続載荷試験

(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。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=1.69×10⁵N/mm²) 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厚は 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) 計測方法および載荷方法

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℃60% 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、持続載荷は材齢 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 はり供試体の持続載荷試験方法を図-2 に示す。持続載荷は、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 点載荷とした。載荷荷重は、支間両端に通した PC 鋼棒 (断面積=176.5mm²、弾性係数=1.65×10⁵N/mm²) を手動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度が 150N/mm² となるように設定した。持続載荷開始後、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、ひび割れ幅の絶対値である。

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、載荷直前を原点として持続載荷時も経時的に計測した。

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

表-1 本研究で用いた配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位置 (kg/m ³)						混和材
			W	C	S	G	Ad1	Ad2	
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/cm³)
 S: 信濃川産川砂 (密度2.68g/cm³, 吸水率1.63)
 G: 砕石 (密度2.65g/cm³, 吸水率1.10, 最大寸法20mm)
 Ad1: AE減水剤, 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	—	—	
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

表-3 RC はりの持続載荷試験の実験水準

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

幅の増大に及ぼす影響は大きいことが指摘されている¹⁾。これは、ひび割れ面から乾燥することによる影響と、ひび割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であると考えられる (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 10μ 程度であり小さい。

図-5 に、かぶり厚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 70μ 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。その差は本実験結果では、自由収縮 300μ に対して $50\sim 100\mu$ 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 自由供試体の結果を用いた式(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、 ε ：鉄筋コンクリート供試体のひずみ、 ε_{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、ひび割れ幅算定においてひび割れ間コンクリートを自由体と考えてもよいことと理由であると考えられる。

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 100μ 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ためと考えられる。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。この傾向は、示方書の収縮予測式において端部を考慮せずに V/S を変化させただけでは表現できないが、実際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。

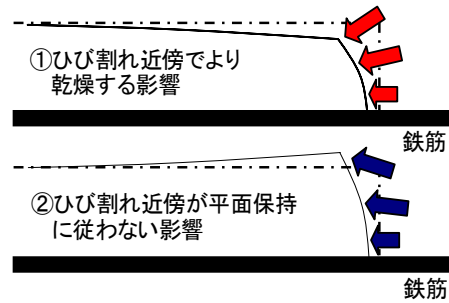


図-3 ひび割れ間コンクリートの変形の模式図

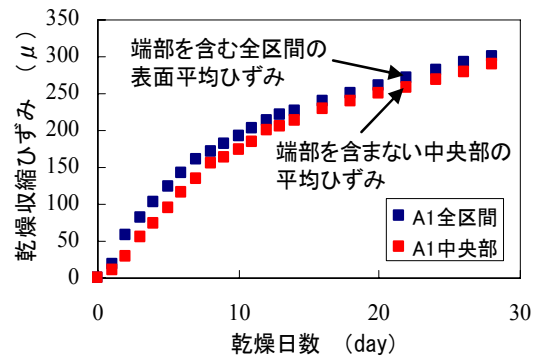


図-4 ひび割れ面近傍の乾燥収縮による変形

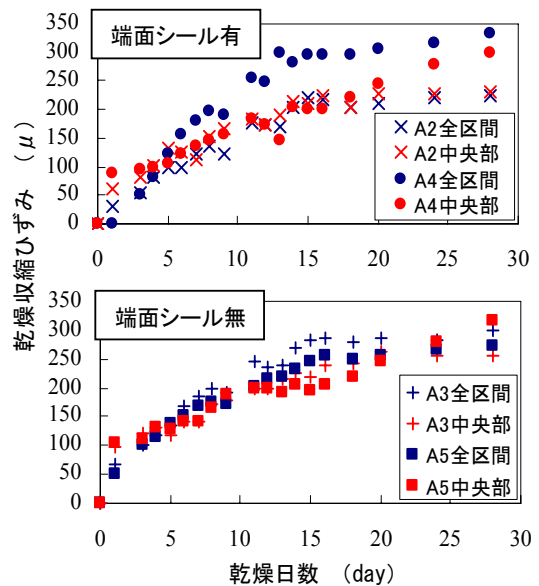


図-5 かぶり厚さと端面からの乾燥の有無の影響

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とから、降雨や日射の影響を受けていることが考えられる。佐藤らの研究においても、屋外の収縮は恒温恒湿室のおよそ 1/2 であったことが報告されている⁴⁾。示方書の収縮予測式による予測値は恒温恒湿室内の計測値を概ね評価できている。

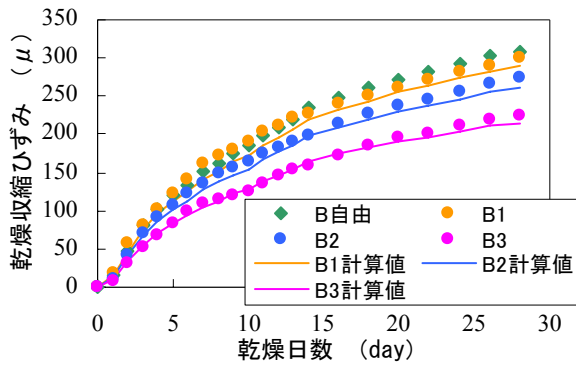


図-6 鉄筋による拘束の影響

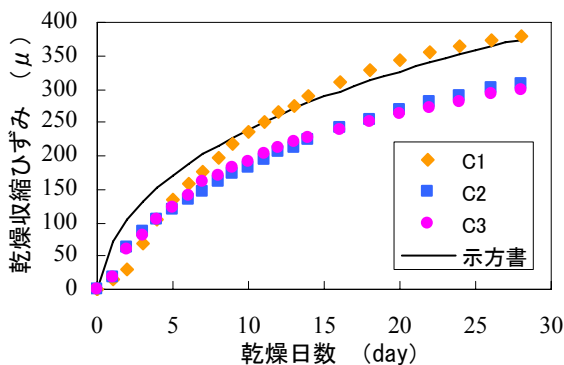


図-7 ひび割れ間隔の相違による影響

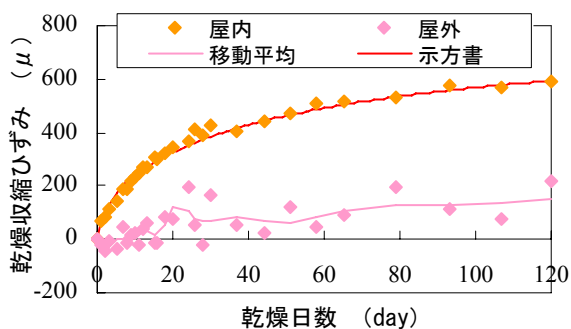


図-8 屋内と屋外の乾燥収縮の相違

4. 持続曲げ荷重をうける 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⁷⁾。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⁵⁾。

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

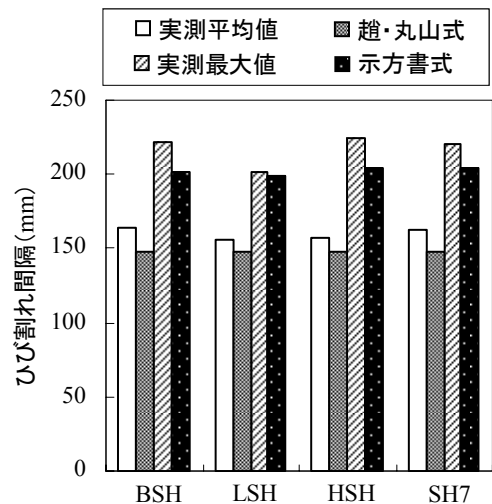


図-9 ひび割れ間隔の実測値と算定値

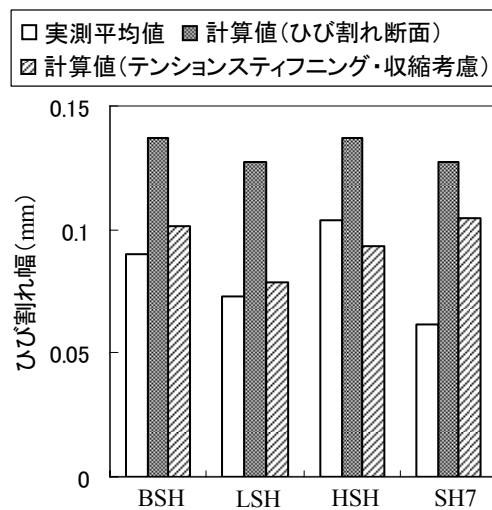


図-10 初期ひび割れ幅の実測値と算定値

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²⁾³⁾。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¹⁾⁶⁾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 供試体が載荷前に乾燥を受けたことにより、想定よりも大きなクリープが生じ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。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、 σ_{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、 ε_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 σ_{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 σ_{cm}/f_t の値は $0.2 \sim 0.6$ の間にあり³⁾、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 σ_{cm} が時間とともに徐々に減少していくことから、実用上 σ_{cm} をゼロとすることが提案されている³⁾。本実験結果では、 σ_{cm} が載荷時間とともに減少する現象は認められたが、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。また、図-14 に、各 RC はりの載荷開始時（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-14 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

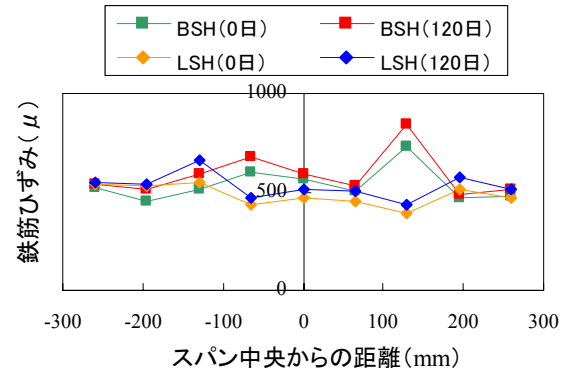


図-11 引張鉄筋ひずみの分布

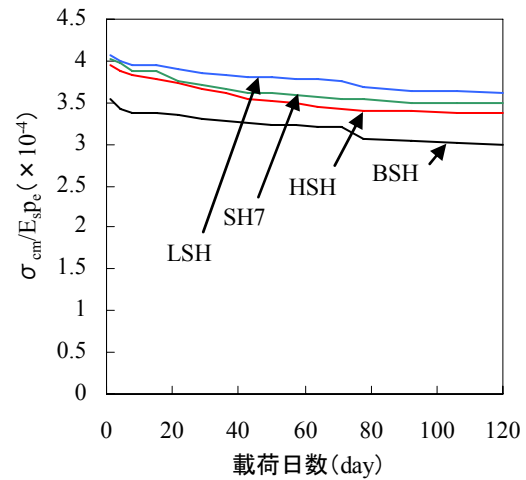


図-12 コンクリートの平均応力の経時変化

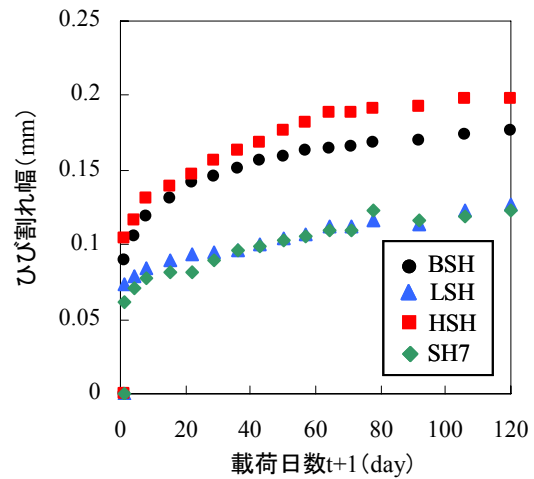


図-13 平均ひび割れ幅の経時変化

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、ひび割れ幅の経時的増大の主要原因はコンクリートの収縮であることが間接的に示唆される。

図-15 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自由収縮ひずみ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自由収縮ひずみは、ひび割れ間コンクリートを断面積 $b \times$ 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-16)。

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

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慮せずとも、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。

5. ひび割れ幅の計算方法

これまでに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、 σ_{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、 σ_{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、 ε'_{sh} ：ひび割れ間コンクリートの自由収縮ひずみ、である。 L_{av} は趙・丸山らの研究⁵⁾により算定する。 σ_{cm} は $0.4f_t$ とする。ひび割れ間コンクリートの自由収縮ひずみは示方書の収縮予測式を用いて算定し、その際に用いる V/S は式 (3) で計算する。また、鉄筋による拘束の影響は、弾性拘束として考慮している。

次に、趙・丸山による統計的分析の結果に基づき、ひび割れ幅の平均値から最大値を次式により計算する⁵⁾。

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

図-17 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。また、図-18 に、本計算方法による既往の研究¹⁴⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾において報告されているひび割れ幅の実測値と算定値を示す。様々な条件下での実験値についても概ね評価できている。

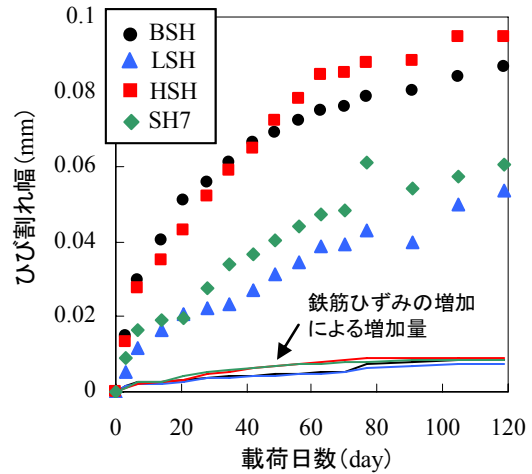


図-14 平均ひび割れ幅の増加量の経時変化

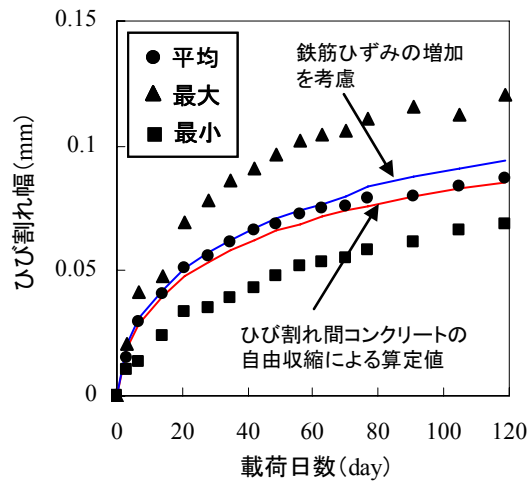


図-15 BSH供試体のひび割れ幅の経時変化

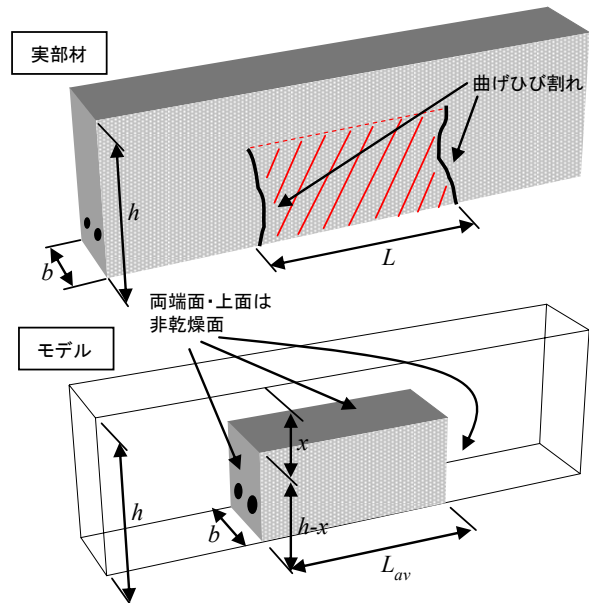


図-16 ひび割れ間コンクリートの模式図

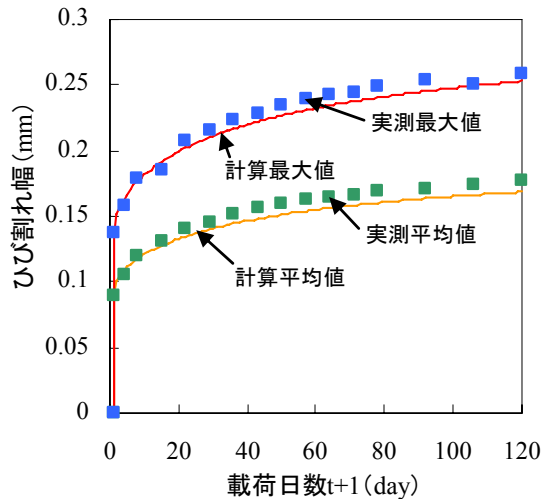


図-17 BSH供試体のひび割れ幅の実測値と算定値

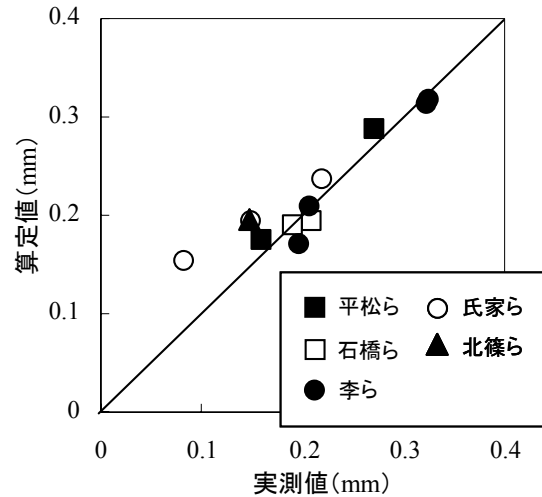


図-18 過去に報告されているひび割れ幅の実測値と算定値の比較

6. まとめ

本研究において以下の知見が得られた。

- ひび割れ近傍での局所的な変形が、ひび割れ幅に及ぼす影響は小さい。また、鉄筋による拘束の影響は無視しえない。
- 鉄筋コンクリート中のひび割れ間コンクリートの収縮は、コンクリートの収縮が埋設鉄筋により弾性拘束されるとして評価できる。
- 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、ひび割れ近傍での局所的な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。
- 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。
- ひび割れ間コンクリートをモデル化して導出したV/Sを用いることで、示方書の収縮予測式からひび割れ間コンクリートの自由収縮ひずみを算出する方法を提案した。鉄筋による拘束の影響は、弾性拘束として考慮することとした。
- ひび割れ幅算定に用いる引張鉄筋応力度を求める際には、コンクリートのテンションスティフニング効果と、荷重前の収縮によって部材に導入された初期応力がひび割れ発生とともに解放されることの影響を考慮する必要がある。
- 実験から得られた知見を踏まえて、ひび割れ幅の算定手法を提案した。本研究が提案した算定方法は、本実験および既往の実験によるひび割れ幅の実験値を概ね評価することができる。

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) 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) 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
- 4) 北篠泰秀ほか: RC 部材の長期変形・ひび割れ幅に及ぼす環境条件の影響の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.359-364, 1993
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 平松洋一ほか: 高強度コンクリートの低収縮化による RC 部材の時間依存性曲げ挙動の改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.835-840, 2003
- 8) 李振宝ほか: 鉄筋コンクリート部材の長期曲げひび割れ幅算定法, 日本建築学会構造系論文集, No.565, pp.103-110, 2003
- 9) 氏家勲ほか: 鉄筋コンクリート部材の長期ひび割れ幅とかぶりコンクリートの損傷, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.463-468, 2000