

論文 RC 部材の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関する数値解析

須田晶彦*1・下村 匠*2

要旨：鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅は、ひび割れ間のコンクリートの乾燥収縮により経時的に増加する。本研究では、ひび割れ間のコンクリートの乾燥収縮挙動を数値解析により評価した。ひび割れ幅の経時変化の傾向およびこれに及ぼす環境の相対湿度、かぶり、ひび割れ間隔、鉄筋比、コンクリートの配合、ひび割れ発生材齢の影響が合理的かつ適切に表現できることを確認した。著者らが行った室内実験の傾向が再現できること、石橋らが提案したひび割れ発生以降にひび割れ間コンクリートを自由体とみなす計算手法が再現できることを示した。

キーワード：乾燥収縮、ひび割れ幅

1. はじめに

鉄筋コンクリートのひび割れ幅は構造物の美観や耐久性に関する指標となっている。ひび割れ幅算定式は、以下の変形適合条件式を基本としている。

$$w = l \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_c) \quad (1)$$

ここに、

w ：ひび割れ幅

l ：ひび割れ間隔

ε_s ：鉄筋の平均ひずみ

ε_c ：ひび割れ間コンクリートの平均ひずみ

供用中の構造物のひび割れ幅はいくつかの原因により時間とともに増大する。そのうちコンクリートの乾燥収縮の影響は無視できない。土木学会コンクリート標準示方書等の実構造物の設計に用いるひび割れ幅算定式においても、コンクリートの乾燥収縮の影響が考慮されている。ひび割れ発生後のコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ幅の増大は、ひび割れ間コンクリートの平均ひずみにより考慮される。示方書ではその標準値として 150μ を用いてきたが、実構造物のひび割れ幅の実測値は、 150μ を用いて求めたひび割れ幅よりも大きい場合があることが指摘されている¹⁾。また、一律に 150μ とするのではなく、かぶり、コンクリートの配合、環境条件などに応じて、適切に収縮の値を設定する方法も望まれている。

石橋らは、ひび割れ発生後、ひび割れ間コンクリートを自由体とみなし、ひび割れ発生材齢を起点として計算した自由収縮により、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみを計算する手法を提案している²⁾。さらに著者らは、ひび割れ間コンクリートを模擬した RC 供試体の試験結果から、石橋らが見出した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ことを実

験室において確認した。またそのような結果が得られる理由は、ひび割れ近傍では乾燥が促進され収縮が大きい影響と、鉄筋の拘束による影響とが相殺するためであると考察した³⁾。

本論文では、コンクリート中の水分移動解析と乾燥収縮を考慮した有限要素法によるひび割れ間コンクリートの変形解析により、鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化の数値シミュレーションを行う。これを用いて、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関する実験結果、ならびに既往の知見を包括的に説明できるかを検討する。あわせて、かぶり、鉄筋比、環境条件、コンクリートの配合、ひび割れ発生材齢の影響について、解析結果に基づき論じる。

2. ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮挙動の数値解析法

RC 部材のかぶり部分のコンクリートを 2 次元でモデル化し、水分移動と乾燥収縮に伴う変形・応力の導入を評価する。コンクリート中の水分移動と乾燥に伴う各部分の収縮は、著者らが開発したコンクリートの細孔構造と細孔組織中における水分の熱力学的挙動に立脚したモデルを用いる⁴⁾。モデル中の種々の材料パラメータの値は既往の実験と解析に基づき作成した推定式を用いて、配合より推定する⁴⁾。乾燥収縮に伴うコンクリートおよび鉄筋の変形・応力は、弾性解析により評価する。クリープは考慮しない。

図-1 は、ひび割れ間コンクリートの水分移動解析、応力解析の概要を示すものである。ひび割れ間の鉄筋より外側のかぶりコンクリートの半分を解析対象とする。図の XY 面内で 2 次元解析する。水分移動解析では、ひび割れが発生する材齢まではひび割れ面からの水分逸散は

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

ないものとし、ひび割れが発生したら、ひび割れ面からの水分逸散も考慮する。ひび割れ面における水分逸散は通常の開放面よりも少ないと考えられるので、水分伝達係数を通常の開放面の 1/2 と仮定した。水分移動解析は差分法により行う。

変形・応力解析では、鉄筋による拘束を考慮するために、鉄筋とかぶりコンクリートを合わせて解析対象とした。2次元解析モデルにおける鉄筋の断面積は、鉄筋とコンクリートの部材軸方向の剛性比が実物と同じになるように設定した。鉄筋とコンクリートは完全付着とした。変形・応力解析は有限要素法により行う。

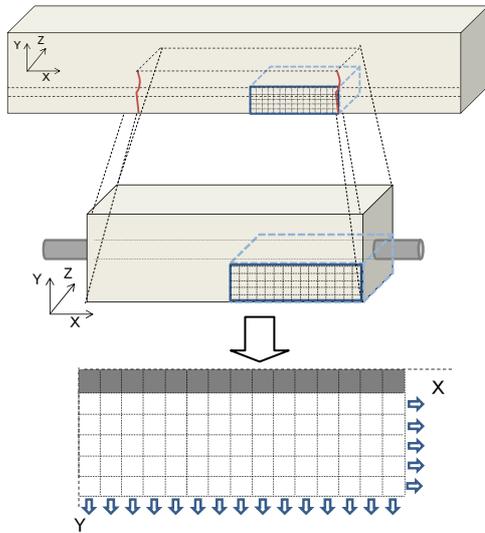


図-1 RC 部材のひび割れ間コンクリートの水分移動および乾燥収縮による変形解析

3. ひび割れ間コンクリートを模した供試体の室内実験とその再現解析

3.1 実験概要

まず、著者らが過去に行った、ひび割れ間コンクリートを模した供試体を用いて行ったひび割れ間コンクリートの乾燥収縮に関する室内実験⁵⁾の結果が、本研究の解析によって再現可能かどうか検討した。

図-2 に同一ひび割れ間隔のシリーズの供試体の概要を、表-1 に全供試体の一覧を示す。自由収縮供試体、シール無供試体、シール有供試体は供試体全体が一つのひび割れ間コンクリートを模したものである。ひび割れ無供試体とはひび割れが無い領域の様な収縮ひずみを測定するため長い供試体の中央部を測定対象としている。ひび割れ有供試体とは実際のひび割れを割裂により生じさせ、ひび割れ間コンクリートの収縮を測定している。コンクリート表面のひずみの測定は、側面2面に貼り付けたコンタクトチップにより行った。実験結果は、ひび割れ幅の経時変化に相当する、ひび割れ間コンクリート

のひずみの測定値にひび割れ間隔をかけた量で表すこととする(図-3)。実験結果では、この値の変化を便宜上ひび割れ幅の経時変化と呼ぶ。

水セメント比 50% のコンクリートを使用した。供試体は、材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで 20°C の水槽内にて水中養生した。その後、20°C 60%RH の恒温恒湿室内にて試験した。

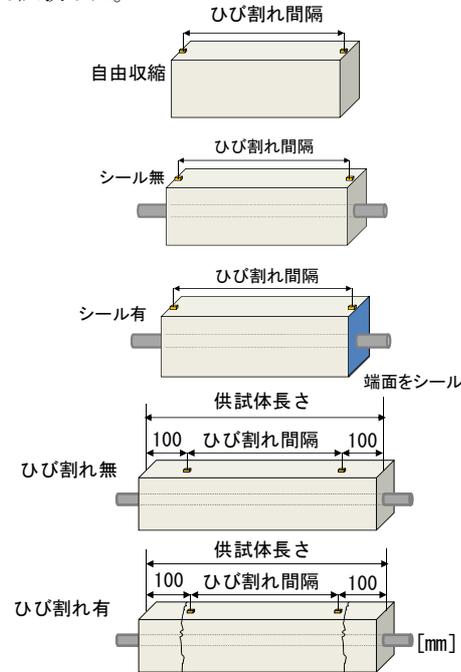


図-2 供試体

表-1 実験供試体一覧

供試体記号	供試体種類	ひび割れ間隔 (mm)	供試体長さ (mm)	使用鉄筋
F1	自由収縮	100	100	—
D1	シール無		100	D13
S1	シール有		100	
NC1	ひび割れ無		300	
C1	ひび割れ有		300	
F2	自由収縮	200	200	
D2	シール無		200	D13
S2	シール有		200	
NC2	ひび割れ無		400	
C2	ひび割れ有		400	
F3	自由収縮	300	300	
D3A	シール無		300	D13
D3B				D16
D3C				D19
D3D				D22
D3E		D29		
S3	シール有	500	300	D13
NC3	ひび割れ無		500	
C3	ひび割れ有		500	

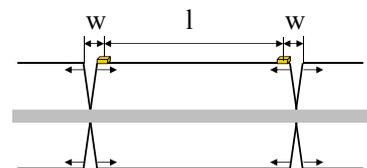


図-3 供試体の長さ変化とひび割れ幅の変化の関係

3. 2 実験結果と解析結果

(1) ひび割れ近傍の乾燥の影響

ひび割れ間隔が 300mm のシリーズの実験結果および解析結果を図-4 に示す。実験値と解析値の差異の原因は、供試体を 2 次元に置きかえて解析したためと、材料パラメータの値を今回の実験値に合うように定めたのではなく、配合より推定される標準値を使用したためであると考えられ、供試体間の大小関係を比較するうえでは大きな問題ではないと考えている。解析結果は、供試体間のひび割れ幅の経時変化の大小関係を概ね再現できている。

実験値では、端面シールのない供試体(D3A)のひび割れ幅の増加量が最も大きい。ひび割れ面からの乾燥がひび割れ近傍のコンクリートの収縮を生じさせ、このことがひび割れ幅の増加させているためと考えられる。

実験値、解析値ともに、ひび割れ無供試体(NC3)よりもひび割れ有供試体(C3)の結果が大きくなっているのは、ひび割れ面からの乾燥と、ひび割れ近傍のコンクリートの変形が一樣な区間の変形よりも大きいことの二つの影響が考えられる。ただし、実験値ではひび割れ有供試体(C3)の結果が、シール有供試体(S3)よりも小さくなっているが、両者の違いがひび割れ面からの乾燥の違いだけであれば、ひび割れ面から乾燥するひび割れ有供試体の方がシール有供試体よりも大きくなるはずであるので、ひび割れ有供試体(C3)の実験値が実験実施上の何らかの原因で異常に小さくなった可能性がある。

(2) ひび割れ間隔の影響

ひび割れ間隔に相当する供試体長さを 100mm, 200mm, 300mm と変化させたシール無し供試体のひび割れ幅の経時変化の実験結果と解析結果を図-5 に示す。ひび割れ間隔 100mm の D1 供試体のひび割れ幅の変化量が最も小さく、200mm (D2), 300mm (D3A) とひび割れ間隔が大きくなるほどひび割れ幅の変化量も大きくなる傾向が実験結果に表れ、解析結果においても再現されている。この傾向は、従来の基本的な知見に合致する。

(3) 鉄筋による拘束の影響

供試体長さが 300mm のシリーズにおいて、鉄筋径を D13 から D29 まで変化させた実験結果および解析結果を図-6 に示す。本実験条件下では、自由収縮供試体(F3)と D13 鉄筋を用いた供試体(D3A)の結果はほぼ同じであり、鉄筋径をそれ以上大きくすることで、鉄筋の拘束効果が高まり、乾燥収縮量が抑えられ、ひび割れ幅の変化量も減少していることが確認できる。解析でもその傾向が再現されている。なお、解析結果では自由収縮供試体(F3)と D13 鉄筋を用いた D3A 供試体の結果は重なっている。なお、実験結果では D16 鉄筋を用いた D3B 供試体の結果が、D19 鉄筋を用いた D3C 供試体および D22 鉄筋を用いた D3D 供試体の結果よりも小さくなっており、

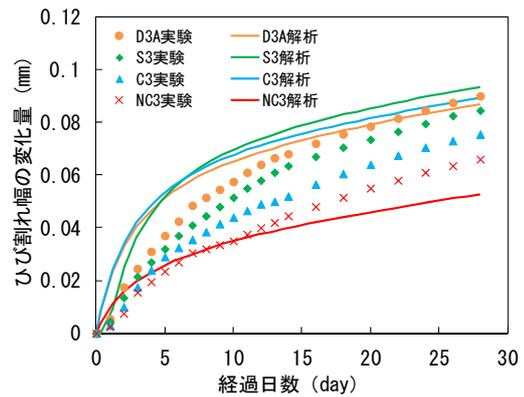


図-4 ひび割れ間隔 300mm のシリーズの結果

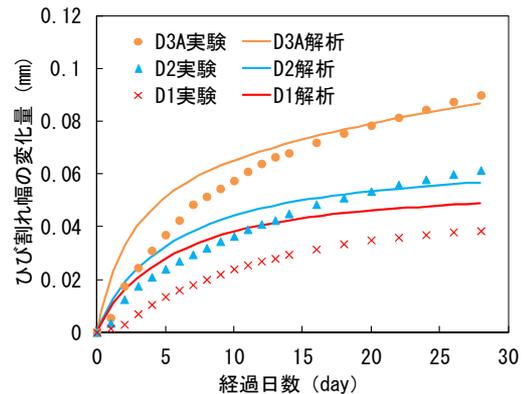
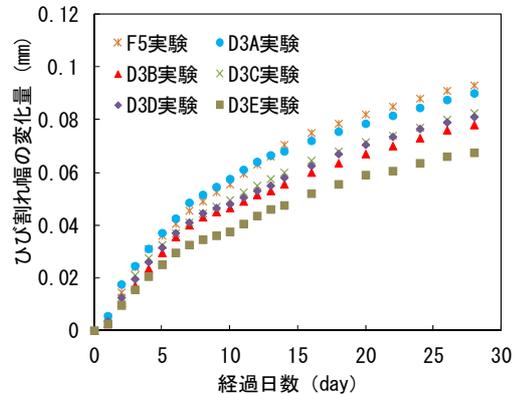
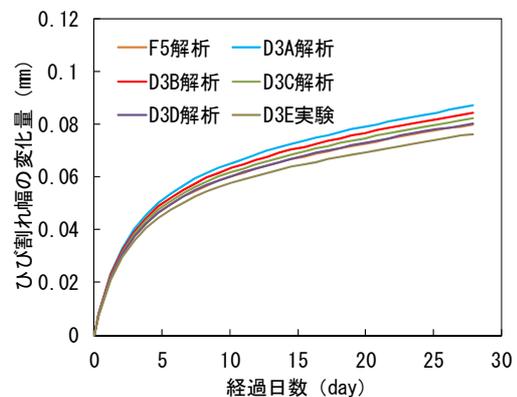


図-5 ひび割れ間隔の影響



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図-6 鉄筋による拘束の影響

鉄筋径による結果の大小の順序を逆転しているが、実験上の誤差であると考えており、正しく測定されていても、予想される差は小さい。以上より、本研究で用いた解析手法は、ひび割れ間コンクリートの収縮挙動の傾向を再現可能であるといえる。

4. ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみの計算手法の検討

4.1 石橋らによる計算手法の概要

石橋らは、供試体試験の結果から、表面ひび割れ幅を増大させる乾燥収縮ひずみは、躯体断面定数を用いて算定した乾燥収縮ひずみよりもかなり大きく、その値は若材齢でひび割れが発生したほど大きくなることを明らかにしている²⁾。さらにこの現象を表現するため、**図-7**に示すように、ひび割れ発生に伴い、表面のひずみが、躯体断面定数を用いて算定した場合の乾燥収縮ひずみの経時変化曲線Aから、ひび割れにより分割された小部材の乾燥収縮ひずみの経時変化曲線Bへと移行するモデルを提案している。図中の ϵ_{sh2} がひび割れ幅算定に用いる収縮の影響を考慮するためのひずみである。この考え方に基づき、設計において曲げひび割れ算定時に用いるコンクリートの乾燥収縮を考慮するための値として、**表-2**の値がひび割れ発生材齢ごとに提案されている。

ここでは、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮挙動を数値解析することによりこの傾向の再現を試みる。

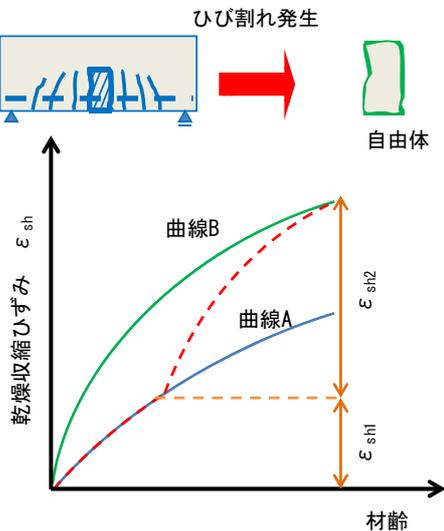


図-7 ひび割れ発生後の乾燥収縮度の経時変化モデル

表-2 ひび割れ発生時材令別乾燥収縮ひずみ

ひび割れ発生材齢(day)	乾燥収縮ひずみ(10^{-6})
30	450
100	350
200以上	300

4.2 解析手法

解析は2章で説明した2次元有限要素解析と平面保持を仮定した自由収縮解析の2種類行う。いずれの解析においても、水分移動と収縮モデルは共通である⁴⁾。モデル中の材料パラメータは、既往の研究⁴⁾において提案した単位水量、水セメント比、養生日数を入力値とした推定式を用いて決定する。たとえば、単位水量を増大させれば総細孔量が増大し、計算されるコンクリート中の水分量、収縮が増大する。

有限要素解析では、ひび割れ発生材齢までは部材底面から乾燥させ、ひび割れ発生以降はひび割れ面からも乾燥させる。そして、ひび割れ発生時を起点とした表面の収縮ひずみの変化量を出力する。

平面保持を仮定した自由収縮の解析では、部材全体の収縮(曲線A)とひび割れによって分割された自由体の収縮(曲線B)とを算定し、ひび割れ発生後曲線Aから曲線Bに移行すると仮定し ϵ_{sh2} を求める。**図-7**に示したように実際には曲線Aから曲線Bへの移行は徐々に進行すると思われるが、計算ではひび割れ発生後ただちに移行すると仮定した。

ここでの検討の目的はひび割れ発生以降のひび割れ間コンクリートの収縮によるひび割れ幅の増大の比較であるので、ひび割れ発生前の部材全体の収縮算定は簡略化して行うことを考え、鉄筋拘束の影響は無視することとした。なお、クリープは考慮していないが、荷重による鉄筋応力がない条件下で検討するので、クリープによるひび割れ幅の増大は小さいと考えられること、ここではふたつの計算方法の比較に主眼を置くことから、検討結果に大きな影響を及ぼさないと判断する。ひび割れ間コンクリートを自由体とみなす際には、石橋らが提案したように、自由体の高さを部材高さの1/5と仮定する。

4.3 石橋らの算定結果との比較

図-8, 9, 10には**表-2**を求めたのと同じ**表-3**の条件のもと、ひび割れ発生時材齢(t_{cr})をパラメータとし、本研究の数値解析法で計算した結果を示す。ひび割れ発生後の乾燥収縮ひずみを比較するために、横軸はひび割れが発生してから材齢、縦軸は ϵ_{sh2} とした。

ひび割れ発生時材齢 $t_{cr}=30$ 日の結果を**図-8**に、 $t_{cr}=100$ 日、 $t_{cr}=200$ 日の結果をそれぞれ**図-9, 図-10**に示す。また、ひび割れ発生材齢別のひび割れ発生後から3000日経過後の解析値を**図-11**に示す。3000日の結果を示したのは、有限要素解析の収縮ひずみがほぼ終局値を迎えたからである。結果より、有限要素解析によって求められた収縮ひずみは、石橋らの提案した収縮ひずみの値に収まることが確認された。自由収縮解析による結果は、石橋らの計算値を超える結果となった。ひび割れ発生材齢が

短いほどその後の乾燥収縮によるひび割れ幅の増大が大きくなることが解析においても確認された。なお、平面保持を仮定した自由収縮解析の値が大きいのは、鉄筋拘束の影響を無視しているためと考えられる。

表-3 解析諸元

W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	相対湿度 (%)	かぶり (mm)	ひび割れ間隔 (mm)
166	325	70	66	300

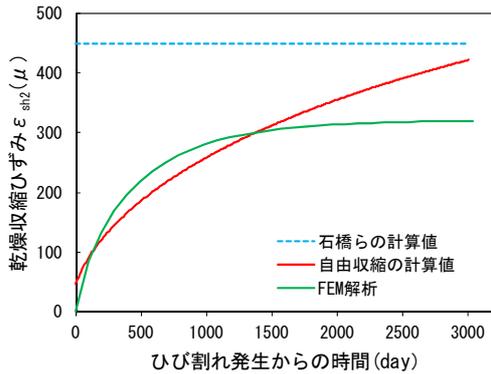


図-8 ひび割れ発生材齢 30 日の ϵ_{sh2}

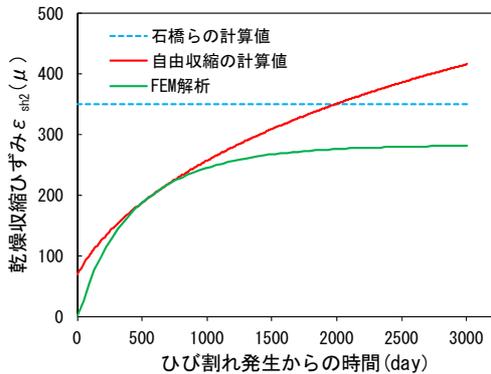


図-9 ひび割れ発生材齢 100 日の ϵ_{sh2}

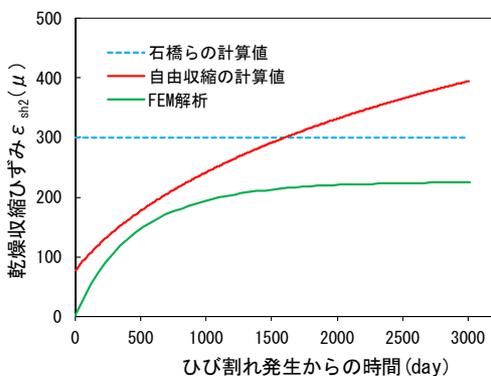


図-10 ひび割れ発生材齢 200 日の ϵ_{sh2}

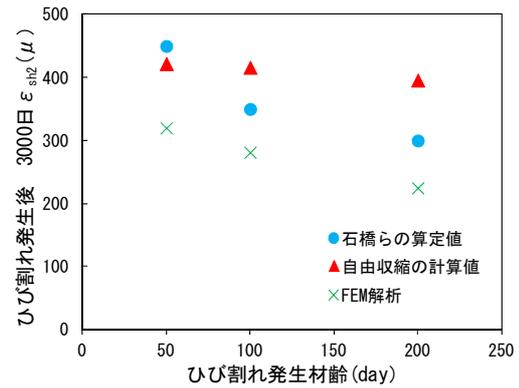


図-11 ひび割れ発生材齢別ひび割れ発生後 3000 日 ϵ_{sh2}

表-4 パラメータスタディの水準

	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	かぶり (mm)	相対湿度 (%)	鉄筋径 (mm)	ひび割れ間隔 (mm)
30	166	325	66	70	32	300
A-30-1	166	325	66	60	32	300
A-30-2	166	325	66	80	32	300
B-30-1	151	296	66	70	32	300
B-30-2	181	354	66	70	32	300
C-30-1	166	325	36	70	32	300
C-30-2	166	325	96	70	32	300

4.4 ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみに関するパラメータスタディ

本研究で用いた水分移動解析および有限要素法による変形・応力解析によりひび割れ間コンクリートの乾燥収縮の傾向が再現可能であることが確かめられた。そこで、表-4 の条件下でパラメータスタディを行い、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす諸要因の影響について検討する。ひび割れ発生材齢を 30 日とする。

(1) 相対湿度の影響

図-12 に相対湿度を 60%、70%、80% と変えたときのひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみの解析結果を示す。相対湿度が高いほど乾燥しにくいことがわかる。また、他の条件を変えたシリーズよりも大きな差が現れていることから、環境条件は乾燥収縮によるひび割れ幅の増大への影響が大きいと言える。

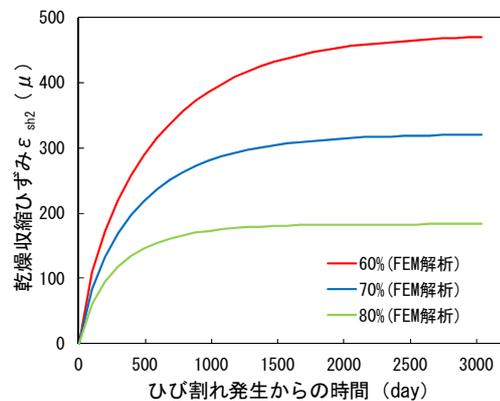


図-12 ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮に及ぼす相対湿度の影響

(2) 単位水量の影響

図-13 に単位水量を 151kg/m^3 , 166kg/m^3 , 181kg/m^3 と変えたときのひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみの解析結果を示す。ただし、水セメント比は一定としている。この結果より、単位水量が少ないほど収縮が小さく、ひび割れ幅の経時的な増大が少ないことがわかる。

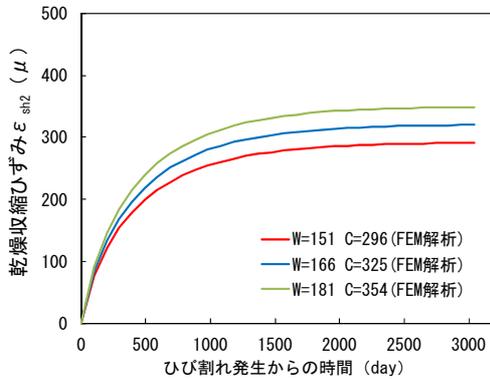


図-13 ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮に及ぼす単位水量の影響

(3) かぶりの影響

図-14 にかぶりを 36mm , 66mm , 96mm と変えたときのひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみの解析結果を示す。長期ではかぶり大きい方が乾燥収縮によるひび割れ幅の増大が大きいことがわかる。これは、かぶり大きい方が、鉄筋の拘束を受けにくいからである。

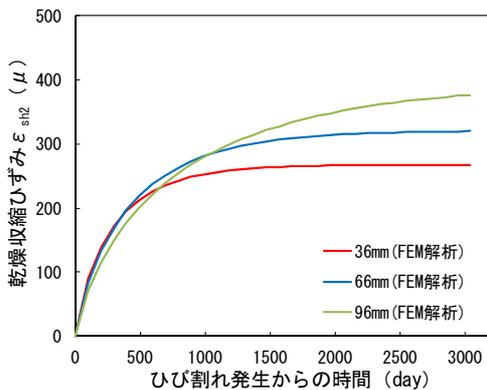


図-14 ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮に及ぼすかぶりの影響

5. まとめ

本研究では、RC 部材のひび割れ幅の経時変化に及ぼすひび割れ間コンクリートの乾燥収縮に関する著者らの実験結果を、かぶりコンクリート中の水分移動解析と乾燥収縮を考慮した有限要素法による変形・応力解析により再現した。また、本解析法を用いて、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみへの、かぶり、鉄筋比、環境

条件、コンクリートの配合、ひび割れ発生材齢の影響について、検討した。以下のことが明らかになった。

- (1) ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみはひび割れの無い様な棒部材の乾燥収縮ひずみよりも大きい。これは、ひび割れ面からの乾燥による収縮の影響と、ひび割れ近傍のコンクリートは収縮が拘束される程度が小さいことによる。
- (2) ひび割れ面は、構造物表面よりも乾燥しにくい。
- (3) 従来の知見通り、ひび割れ間隔が大きいほどひび割れ幅の経時変化が大きいことが確認できた。
- (4) ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮は、鉄筋により拘束されることが確認された。ただし、かぶりと鉄筋径によってはその影響が小さくなり、自由収縮と同じ程度収縮することもある。
- (5) 石橋らが見出したようにコンクリートのひび割れ発生材齢が早いほど、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなるのが、かぶりコンクリート中の水分移動と乾燥収縮を考慮した有限要素法による変形・応力解析によっても再現できた。
- (6) 環境の相対湿度が低いほど、コンクリートの単位水量が大きいほど、かぶりが大きいほど、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくひび割れ幅の経時的な増大が大きくなるのが数値解析により確認できた。

参考文献

- 1) 下村 匠：コンクリートの収縮と構造物の変形・応力・ひび割れ，橋梁と基礎，Vol.46，pp.40-45，2012
- 2) 石橋忠良，斉藤啓一，津吉毅，大庭光尚，末弘保：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) 関 友則，櫻井哲哉，下村 匠：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.211-216，2010
- 4) 下村 匠：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，東京大学学位論文，1993.9
- 5) 櫻井哲哉：鉄筋コンクリートのひび割れ幅に及ぼす乾燥収縮の影響，長岡技術科学大学修士論文，2002.3