

コンクリート部材への水の浸透・乾燥に及ぼすひび割れの影響に関する実験と数値解析

コンクリート研究室 工藤めい
指導教員 下村 匠

1. はじめに

水の浸透によるコンクリート中の鋼材腐食が問題となっており、コンクリート中への水の浸透過程を精密に予測する手法がいつそう求められている。一方、供用中のコンクリート構造物には、ひび割れが生じているものが多く存在するが、ひび割れがコンクリートの水の浸透および乾湿挙動に及ぼす影響について、定量的な関係は明らかとなっていない。ひび割れの影響を精度よく考慮できる技術的基盤を構築することが望ましい。

そこで本研究では、一本および複数本のひび割れを有するコンクリート供試体を用いて乾湿繰返し試験を行った。また、ひび割れの影響を考慮した数値解析法を開発し、その結果に基づき、複数本のひび割れを有するコンクリートの乾湿挙動について、ひび割れの影響を効果的に表す指標について検討した。

2. 一本のひび割れを有するコンクリートの乾燥・吸水挙動に関する実験

2.1 供試体概要および試験方法

実験 1 では、ひび割れがコンクリートの吸水および乾燥に及ぼす基本的な影響を把握するために、1本のひび割れを有するコンクリート供試体を用いて、吸水過程を含む乾湿繰返し試験を実施した。

供試体は、1つの供試体に対して1本のひび割れを有する $100 \times 100 \times 150 \text{mm}$ のものとした。ひび割れ幅は、0, 0.04, 0.15, 0.27, 0.63, 0.74mm の6水準とした。

吸水を伴う乾湿繰返し試験において、吸水過程は供試体の質量増加量を20日間測定し、乾燥過程では、温度 20°C ・湿度 50% の環境で供試体の質

量減少量を15日間測定した。乾湿繰返しは3サイクル実施した。

2.2 実験結果

各供試体の乾湿による質量変化を図-1に、乾燥開始時を原点にした1サイクル目の乾燥過程の質量変化を図-2示す。吸水過程、乾燥過程ともに質量変化量は、ひび割れ幅の大きい供試体ほど大きくなっている。これより、表面ひび割れはコンク

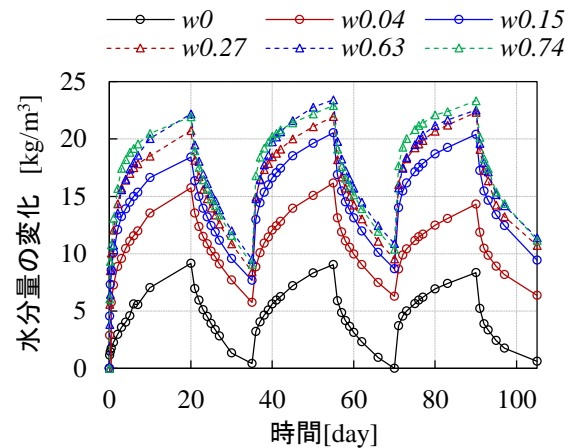


図-1 各供試体の乾湿による水分量の変化

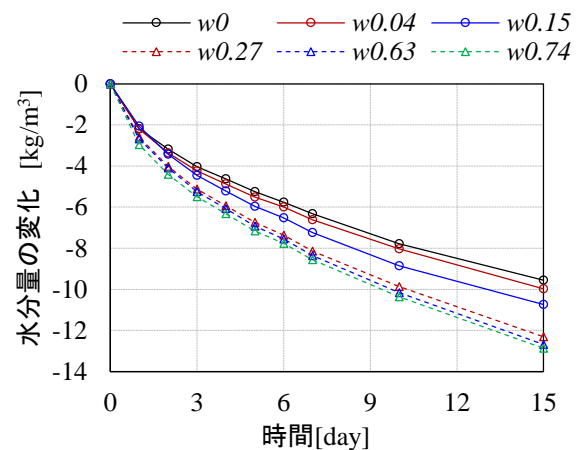


図-2 各供試体の1サイクル目の乾燥過程の水分量の変化

リートの乾湿挙動に影響を及ぼすこと、その影響の程度はひび割れ幅に依存することが明らかとなった。

3. ひび割れの影響を考慮したコンクリートの吸水過程の解析法の構築

コンクリート細孔組織中の水分移動とひび割れ内における水分移動およびそれらの相互作用を考慮して、供試体の乾湿挙動の2次元解析を行う。

3.1 コンクリート細孔組織中の水分移動

コンクリートが大気に接した状態（不飽和状態）におけるコンクリート細孔組織中の水分移動（乾燥・吸湿）は、コンクリートの細孔構造と細孔組織中の気液二相水分の熱力学的挙動に基づいた下村らのモデル¹⁾を用いて解析した。本研究では乾燥過程と吸水過程を2次元解析で統一的に扱うことを優先し、コンクリート表面がR.H.100%の空気に接した場合の液状水移動として吸水現象を表した。

3.2 ひび割れ内の水分移動およびコンクリート細孔中の移動との相互作用

ひび割れ部の吸水は表面張力による平行板間の液状水の移動として表し²⁾浸透速度を計算した。液状水で満たされているひび割れ部分からのコンクリート細孔中への液状水の浸透は吸水現象として表した。各時間におけるひび割れ内の液状水の浸透深さの増分 Δx_{cr} [m]は、ひび割れ内部に存在する液状水量とひび割れからコンクリート細孔中に吸水される液状水量の質量保存を考慮し、**図-3**に示す考え方の下、式(1)により求めた。

$$\Delta x_{cr} \cdot w = \Delta t \cdot v \cdot w - \Delta W_{suc} \quad (1)$$

ここに、 Δt : 時間増分[s], v : ひび割れ内の液状水の浸透速度 [m/s], Δx_{cr} : 時間増分における液状水の移動距離 [m], ΔW_{suc} : 単位奥行あたりのひび割れ面からコンクリート細孔内に吸水される液

状水体积[m³], w : ひび割れ幅[m]である。 ΔW_{suc} は既往研究²⁾の吸水モデルにより算定した。ひび割れ内は浸透距離 $x_{cr} + \Delta x_{cr}$ までが液状水で満たされているとし、改めて2次元解析によりひび割れ部分以外のコンクリートへの吸水量を求めた。

乾燥過程では、コンクリート表面およびひび割れ面からの乾燥を考慮した。ひび割れ幅が小さいほどひび割れ面からの乾燥速度が小さくなるとしたモデルを用いた³⁾。

3.2 提案数値解析法による実験結果の再現

図-4に実験1の各供試体の乾湿挙動の解析結果を実験結果とともに示す。いずれの供試体も吸水

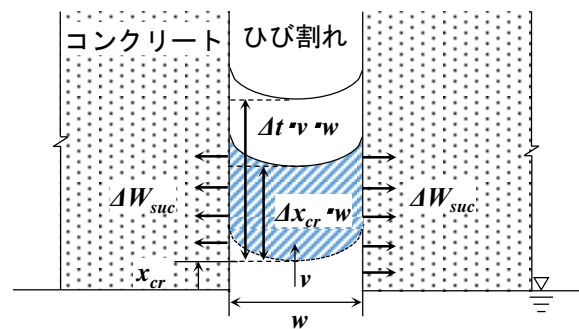


図-3 ひび割れ内への吸水とひび割れ面からコンクリート中への吸水

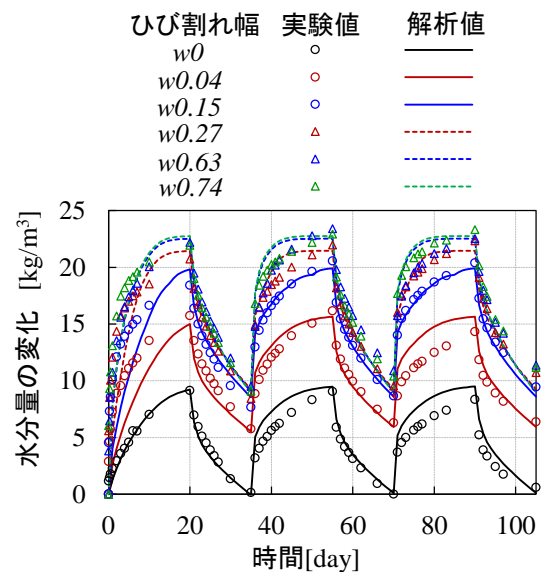


図-4 提案解析法による実験1の各供試体の乾湿挙動の解析結果

過程・乾燥過程ともに解析値と実験値はほぼ一致しており、ひび割れ幅が大きいほど吸水、乾燥ともに質量変化量が大きくなる傾向が再現されている。これより、コンクリート細孔中とひび割れ内における水分移動、およびそれらの相互作用を考慮することで、ひび割れの影響を含むコンクリートの乾湿挙動が良好に再現できた。

4. 複数のひび割れを有するコンクリート部材の乾湿挙動に関する実験と解析

4.1 供試体概要および試験方法

実験2では複数のひび割れを有するコンクリート供試体を用いて、乾湿繰返し試験を実施した。複数のひび割れを表す指標としてひび割れ幅・間隔の平均値、ひび割れひずみ（ひび割れ幅とひび割れ間隔の比）に着目する。

供試体は、供試体1体に対して7本のひび割れを有する160シリーズ3体(平均ひび割れ幅:0.15, 0.32, 0.75mm)、供試体1体に対して4本のひび割れを有する1100シリーズ2体(平均ひび割れ幅:0.60, 1.26mm)、ひび割れなしの6水準とした。

吸水を伴う乾湿繰返し試験において、吸水過程は供試体の質量増加量を2日間測定し、乾燥過程では、温度20℃・湿度50%の環境で供試体の質量減少量を12日間測定した。乾湿繰返しは5サイクル実施した。

4.2 実験結果および再現解析結果

各供試体の乾湿による質量変化を図-5に、吸水開始時を原点にした1サイクル目の吸水過程の質量変化を図-6に示す。ひび割れ間隔が約60mmの160シリーズおよびひび割れ間隔が約100mmの1100シリーズの各供試体の質量変化量をそれぞれ比較すると、いずれのシリーズにおいても吸水過程、乾燥過程ともに平均ひび割れ幅が大きい供試体ほど吸水および乾燥が促進される傾向を示している。これらの傾向は、実験1の傾向と一致する。図-7は、構築した解析法に、各供試体のひび

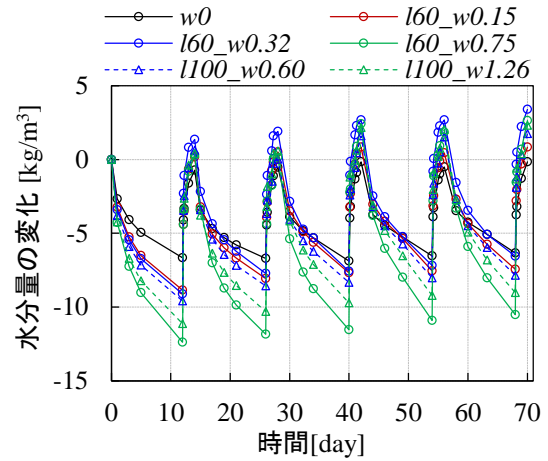


図-5 各供試体の乾湿による水分量の変化

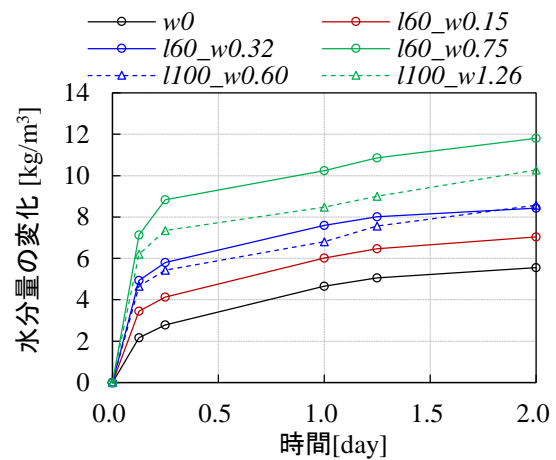


図-6 各供試体の1サイクル目の吸水過程の水分量の変化

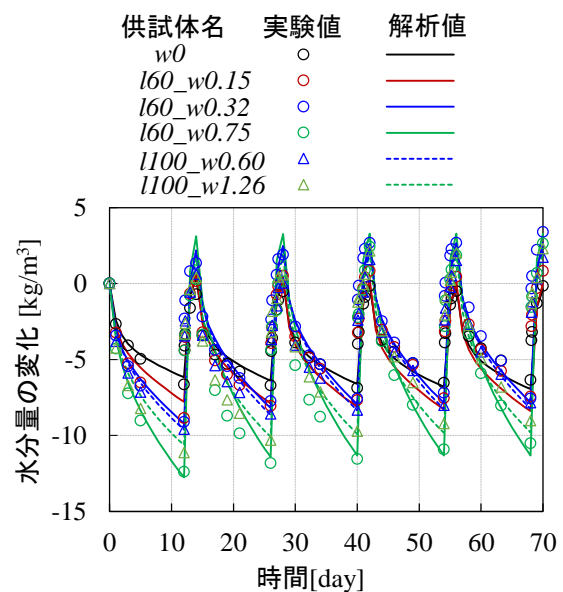


図-7 提案解析法による実験2の各供試体の乾湿挙動の解析結果

割れ幅・間隔の平均値を適用させて計算した解析結果であり、ひび割れ様態の影響を適切に考慮しつつ実験結果の傾向を良好に再現している。これより、複数のひび割れを有するコンクリートの乾湿挙動は、ひび割れに関する平均値を用いて一本のひび割れを有する供試体の乾湿挙動から予測できるといえる。

また、図-5～図-7 よりひび割れ間隔、幅ともに異なるがひび割れひずみが近い値である I60_w0.32 と I100_w0.60 および I60_w0.75 と I100_w0.1.26 はそれぞれ乾燥・吸水ともに近い挙動を示した。図-8 は、I60 シリーズおよび I100 シリーズの全ての供試体の乾燥過程および吸水過程の水分量をひび割れひずみで整理したものである。図-8 より、乾燥・吸水ともに、ひび割れ幅およびひび割れ間隔の値に関わらず、全ての供試体が同一線上に乗り、ひび割れひずみで乾湿挙動が共通して表現できることがわかる。

以上より、複数本のひび割れを有するコンクリート部材の乾湿挙動を予測する場合、ひび割れひずみがひび割れの状態を表す有効な指標となるといえる。

5. コンクリート部材の乾燥・吸水に及ぼすひび割れの影響に関する感度解析

本章では、本研究で構築した水分移動解析法を用いて、ひび割れを有するコンクリート部材の乾燥・吸水に及ぼす各種要因の影響を系統的に検討する。

5.1 ひび割れひずみが長期乾湿挙動に及ぼす影響（検討1）

図-9 は、検討1 および検討2 における供試体の乾湿挙動の評価指標の抽出方法を示したものである。長期の乾湿挙動の評価指標として、平衡水分量（定常状態における水分量の平均値）と水分量の変動（定常状態における乾湿を伴う水分量の変化の振幅）を用いることとする。

図-10 は、各ひび割れ幅のひび割れひずみに対

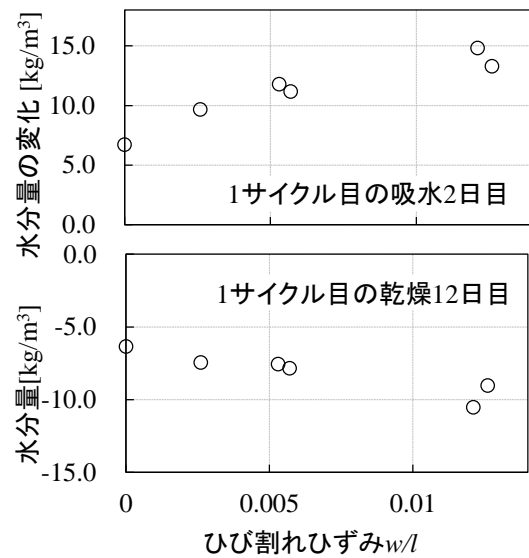


図-8 ひび割れひずみがコンクリートの乾燥・吸水に及ぼす影響

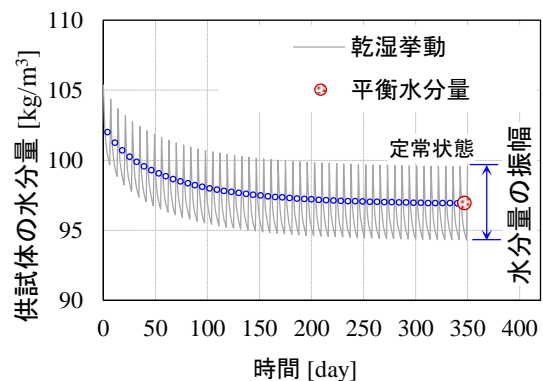


図-9 長期乾湿挙動の指標の抽出方法

する長期乾湿挙動の平衡水分量、図-11 は水分量の振幅を示したものであり、1 サイクルの吸水日数の割合 $W_i/(W_i+D_i)$ が異なる3 ケースを記載している。図-10 より、乾湿繰返し環境下の平衡水分量は、ひび割れひずみによらず、吸水日数の割合で決まることがわかる。また、図-11 より、同じ乾湿条件下での乾湿による水分量の振幅は、ひび割れひずみ w/l の値に依存しており、実験2 で見られた傾向と一致する。さらに、いずれの乾湿条件もひび割れひずみが大きいほど乾湿による変動幅が大きく、乾湿作用の影響を受ける傾向が確認できる。

5.2 乾湿のサイクルの長さが乾湿挙動に及ぼす影響（検討2）

図-12 は、ひび割れ幅 w およびひび割れ間隔 l をそれぞれ 0.6mm, 180mm で一定とし、乾湿 1 サイクルの日数 $Wt+Dt$ を 7 日, 28 日, 350 日とし、吸水日数の割合 $Wt/(Wt+Dt)$ を 0.14~0.86 の範囲で変化させた場合における平衡水分量である。図-12 より、乾湿 1 サイクルの日数を 7 日とした場合と 28 日とした場合の平衡水分量は、ほぼ同じ値となった。一方、乾湿 1 サイクルの日数を 350 日とした場合は、前二者とは異なる傾向を示した。これより、予測対象を長期の平衡水分量に限れば、およそ月単位の乾湿サイクルのモデルデータを用いても、実際にはそれより細かいサイクルの乾湿作用を受ける場合と同じ予測結果が得られる可能性が示唆された。

5.2 水の浸透による鉄筋腐食に対するひび割れ幅の限界値に関する検討（検討3）

検討3では、土木学会コンクリート標準示方書で設けられている鉄筋コンクリートのひび割れ幅の限界値の妥当性について検討した。図-13 および図-14 は、ひび割れ間隔 l が 100mm でひび割れ幅 w を 0.0mm~1.5mm の範囲で変化させた場合の、連続吸水時間が 6 時間, 12 時間および 24 時間時点の鉄筋位置の平均水分量であり、かぶり c が 50mm (図-13) と 100mm (図-14) の計算結果を示している。図中には、示方書によるかぶり c に対するひび割れ幅の限界値 w_{lim} ($0.005c$) も記してある。

図-13 および図-14 より、かぶりが 50mm および 100mm のいずれの場合も、全ての連続吸水時間のケースにおいて限界値 w_{lim} 以下のひび割れ幅は、ひび割れがないコンクリートの水分量とほぼ同じであり、ひび割れによる影響がみられない。しかし、限界値 w_{lim} より大きいひび割れは、ひび割れ幅が大きいほど水分量が高くなっており、徐々にひび割れ幅による影響は鈍感になっている。これより、ひび割れ幅の限界値以下のひび割

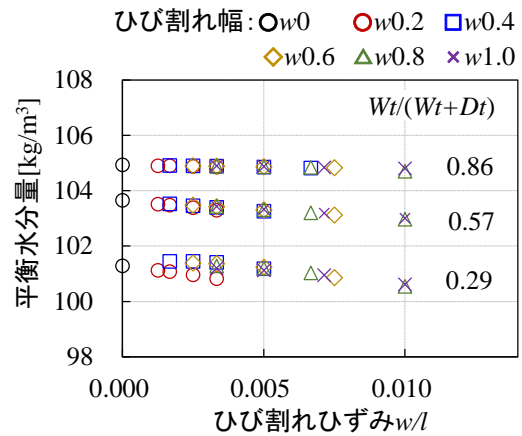


図-10 ひび割れひずみと乾湿条件が平衡水分量に及ぼす影響

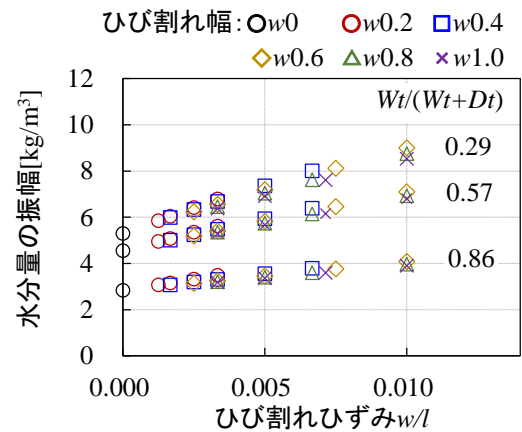


図-11 ひび割れひずみと乾湿条件が乾湿に伴う水分量の変化に及ぼす影響

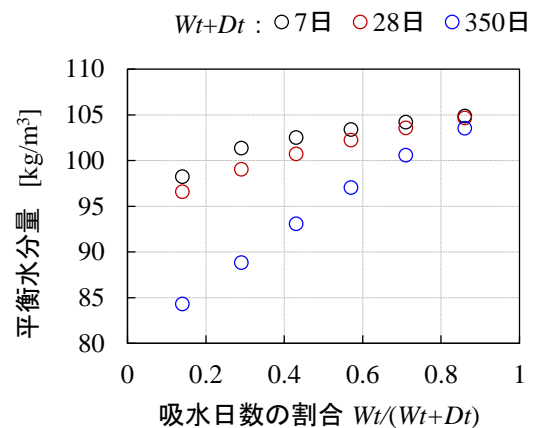


図-12 乾湿 1 サイクルの長さとして吸水日数の割合が平衡含水量に及ぼす影響

れを制御することがコンクリート中の鋼材腐食に対して有効であり、ひび割れ幅の限界値は、鉄筋位置の水分量で比較すれば、かぶり異なる場合においてもほぼ同等であることがわかる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) コンクリートの表面に生じたひび割れはコンクリートの表面からの吸水および乾燥を促進し、吸水過程・乾燥過程ともにひび割れ幅が大きいほどその影響が大きいことを実験により確認した。
- 2) コンクリート細孔中とひび割れ内における水分移動およびそれらの相互作用を考慮した数値解析により、ひび割れを有するコンクリートの乾湿挙動が、ひび割れの影響を含めて良好に再現できた。
- 3) 複数のひび割れを有するコンクリート部材の乾湿挙動の予測には、ひび割れの状態を表す指標としてひび割れ幅とひび割れ間隔の比であるひび割れひずみが有効であることを実験および感度解析により示した。
- 4) ひび割れひずみは乾湿繰返しを受けるコンクリートの長期平衡水分量には影響しないが、乾湿に伴う水分量の変動の大きさはひび割れひずみが大きいほど大きくなることが感度解析により明らかとなった。
- 5) 実環境に置かれたひび割れを有するコンクリートの長期の乾湿挙動を予測する場合、乾湿サイクルの1サイクルの長さを1か月程度に設定した環境作用モデルを用いても十分な予測結果が得られる可能性を感度解析により示した。
- 6) 水の浸透によるコンクリート部材の内部鋼材の腐食には、土木学会コンクリート標準示方書によるひび割れ幅の限界値以下のひび割れを制御することが有効であることを感度解析により示した。

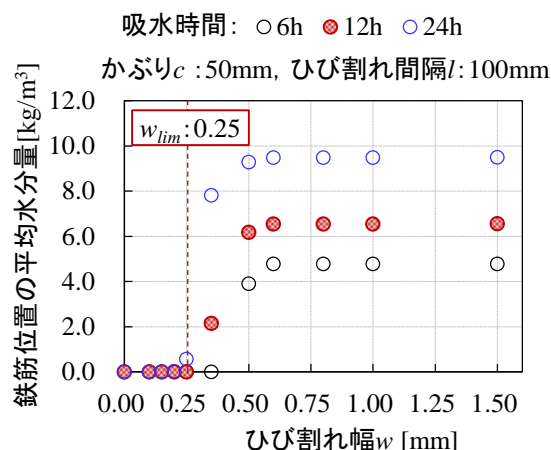


図-13 各ひび割れ幅の鉄筋位置の平均水分量

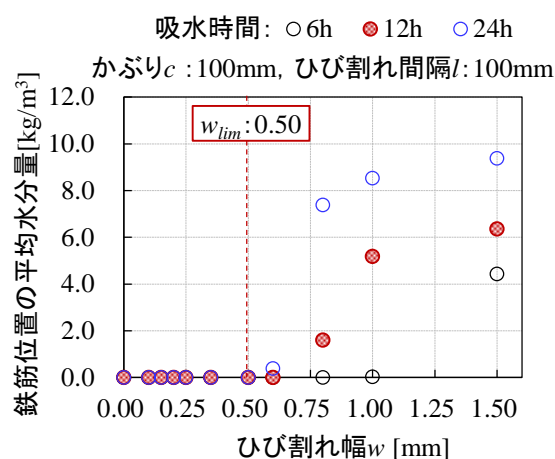


図-14 各ひび割れ幅の鉄筋位置の平均水分量

参考文献：

- 1) 下村匠，前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，土木学会論文集，No.520,pp.35-45，1995.8
- 2) H. T. Thynn and T. Shimomura: Hybrid computational method for capillary suction and nonsaturated diffusion in concrete, ConMat'09, pp.1075-1080, 2009
- 3) Nguyen Thi Hien and Takumi Shimomura: Evaluation of Influence of Flexural Crack on Chloride Ingress Into Concrete in RC member by Numerical Simulation, コンクリート構造物の補修，補強アップグレード論文報告集，第14巻，pp.221-226，2014.10