

## コンクリート部材への水の浸透解析に基づくひび割れ幅の限界値の検討

長岡技術科学大学 学生会員 工修 ○工藤 めい  
長岡技術科学大学 正会員 博士 (工学) 下村 匠

Abstract : The limit value of the crack width of concrete member under wetting and drying condition was evaluated based on the moisture transfer analysis considering the influence of the crack. As a result, it was confirmed that the limit value of the crack width depends on the cover thickness and that the smaller the cover thickness is, the more influence of the water ingress becomes. In addition, the limit value of the crack width based on the numerical simulation showed the same tendency with that in the practical design codes including the JSCE standard specifications for concrete structures. Therefore, it was confirmed that the critical crack width that has been used in practical design is reasonable also from the viewpoint of penetration of water.

Key words : water absorption, cyclic drying-wetting, moisture transfer, crack width

### 1. はじめに

供用中の鉄筋コンクリート構造物には、一般に曲げひび割れや乾燥収縮ひび割れなどが生じる。これらひび割れは構造物の耐久性低下の原因となるため、現在の設計基準の多くではひび割れ幅の限界値が設けられている<sup>1)~3)</sup>。限界値を設定して構造物のひび割れ幅を制限することは、結果として有効であることに疑いはないが、その値を理論的に導き出すことは困難であったので、ひび割れ幅の限界値は経験や工学的判断に基づき定められてきた。しかし多様な条件下でひび割れ幅の限界値を適切に設定するためには、理論的な観点からの検討も必要であると考え、著者らはひび割れを有したコンクリート中の水分と塩分の連成移動解析法を用いて、塩分浸透による鋼材腐食の観点からひび割れ幅の限界値を数値解析結果に基づき導き出し、設計に用いられている値と比較しその妥当性を検証した<sup>4)</sup>。

一方、近年、コンクリート中の鋼材腐食の原因として、塩分や中性化のみでなく、水分の浸透が注目されるようになった<sup>1)</sup>。そこで本研究では、水分の浸透の観点からひび割れの影響が増大するひび割れ幅の限界値を、数値解析により導き出し、設計に用いられている値と比較検討する。

本論文では、著者らが開発したひび割れの影響を考慮したコンクリート中への水の浸透解析法を用いる。本解析法は、乾湿繰返し条件下におけるコンクリート中への水の浸透を精度よく予測できることを実験により確認している<sup>5)</sup>。

### 2. ひび割れの影響を考慮したコンクリートの乾燥・吸水過程の解析法

#### 2.1 解析対象供試体

図-1に示すように、解析対象供試体は2次元とし、ひび割れに関して対称であるとして領域Aを解析対象領域とする。ひび割れ幅は表面から先端まで幅が一定であるとする。吸水過程ではコンクリート表面からの吸水、ひび割れ内への吸水およびひび割れ面からコンクリート中への吸水を考

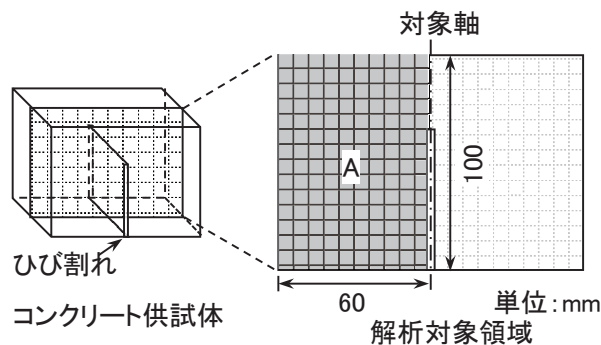


図-1 ひび割れを有するコンクリート供試体の解析対象領域

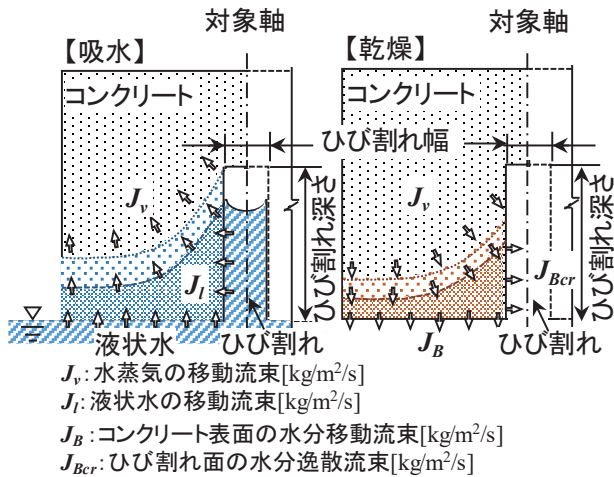


図-2 不飽和状態におけるコンクリート細孔中の水蒸気および液状水の移動

慮し、乾燥過程ではコンクリート表面からの乾燥およびひび割れ面からの乾燥を考慮する。

2.2 コンクリート細孔組織中の水分移動

コンクリート細孔組織中の水分移動は、著者らが開発した細孔構造に基づく水分移動モデルを用いる<sup>6)</sup>。図-2に模式的に示したように、細孔組織中の水分移動の流束として、分子拡散による水蒸気移動と不飽和領域における熱力学的圧力低下の勾配を駆動力とした液状水移動を考慮している。大気に接したコンクリート表面では、湿度差を駆動力とした水分移動流束によりコンクリートからの水分の出入りを表現する。

コンクリート表面からの吸水は、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表した<sup>7)</sup>。

2.3 ひび割れ内への吸水

ひび割れが存在するコンクリートの表面が液状水に接したとき、コンクリートへの吸水と同時に、ひび割れ内への吸水が起こる。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毛細管吸水として表現する<sup>8)</sup>。

2.4 ひび割れ面からコンクリート中への吸水およびひび割れ面からの乾燥

ひび割れ内に浸透した液状水は、ひび割れ面からコンクリート細孔中に吸水される。図-3に模式的に示したように、ひび割れ内へ浸透する液状水量、ひび割れ内の液状水量の変化量、ひび割れ面

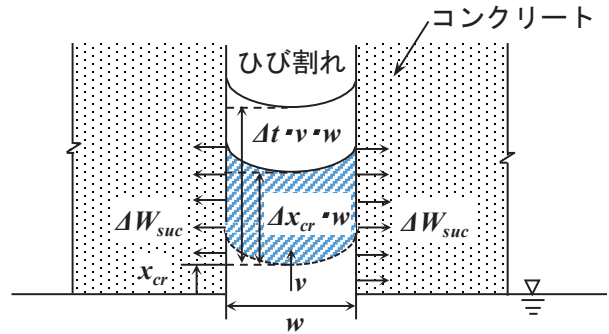


図-3 ひび割れ内への吸水とひび割れ面からコンクリート中への吸水

表-1 計算条件

供試体寸法 [mm]	100*100*120
外部温度 [°C]	20
外部湿度 [%]	50
コンクリートの初期相対水分量 [%]	50
かぶり $c$ [mm]	30, 50, 70, 100
ひび割れ深さ $d$ [mm]	鉄筋位置に設定
ひび割れ幅 $w$ [mm]	0.0~1.5
連続吸水時間 [h]	6, 12, 24
吸水日数の割合 $Wt/(Wt+Dt)$	0.14, 0.43, 0.86
1 サイクルの日数 $Wt+Dt$ [day]	7
$Wt$ : 吸水日数[day], $Dt$ : 乾燥日数[day]	

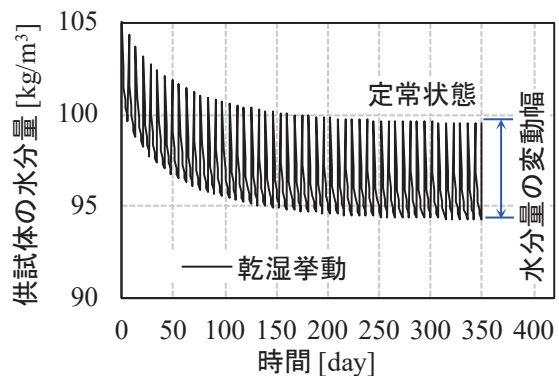


図-4 長期乾湿挙動の指標の抽出方法

からコンクリート細孔中への吸水量 ( $\Delta W_{suc}$ ) の間には質量保存が成り立つことから、ひび割れ内への吸水距離を求める。

$$\Delta t \cdot v \cdot w = \Delta x_{cr} \cdot w + W_{suc} \tag{1}$$

ここに、 $x_{cr}$ はある時間 $t$ における浸透距離、 $\Delta x_{cr}$ は時間 $t$ から時間ステップ $\Delta t$ の間の浸透距離である。

また、ひび割れ内空間は外部との湿度交換が行われにくいと考えられることから、ひび割れ面からの乾燥速度はひび割れ幅が小さいほど小さくなる<sup>9)</sup>とした。

### 3. ひび割れが水の浸透および乾湿挙動に及ぼす影響に関する検討

#### 3.1 検討方法

コンクリート表面が降雨などにより水に曝され連続的に吸水が生じる条件下と乾湿繰り返し条件下において、ひび割れを有するコンクリートへ水分浸透を解析し、鋼材位置における水分量に及ぼす影響を検討する。計算条件および変動パラメータの値を表-1に示す。計算に用いるモデル中の各種材料パラメータの値は、別報<sup>4)</sup>と同じ値を用いた。連続吸水時間は、全国平均で24時間以下の割合が比較的多いことから<sup>10)</sup>6, 12, 24時間とした。乾湿繰り返し条件は、まず1サイクルの日数が週単位(7日)となるように設定し、雨天日数の割合を気象庁の過去30年気象データより全国の平均雨天日数の割合(0.14)

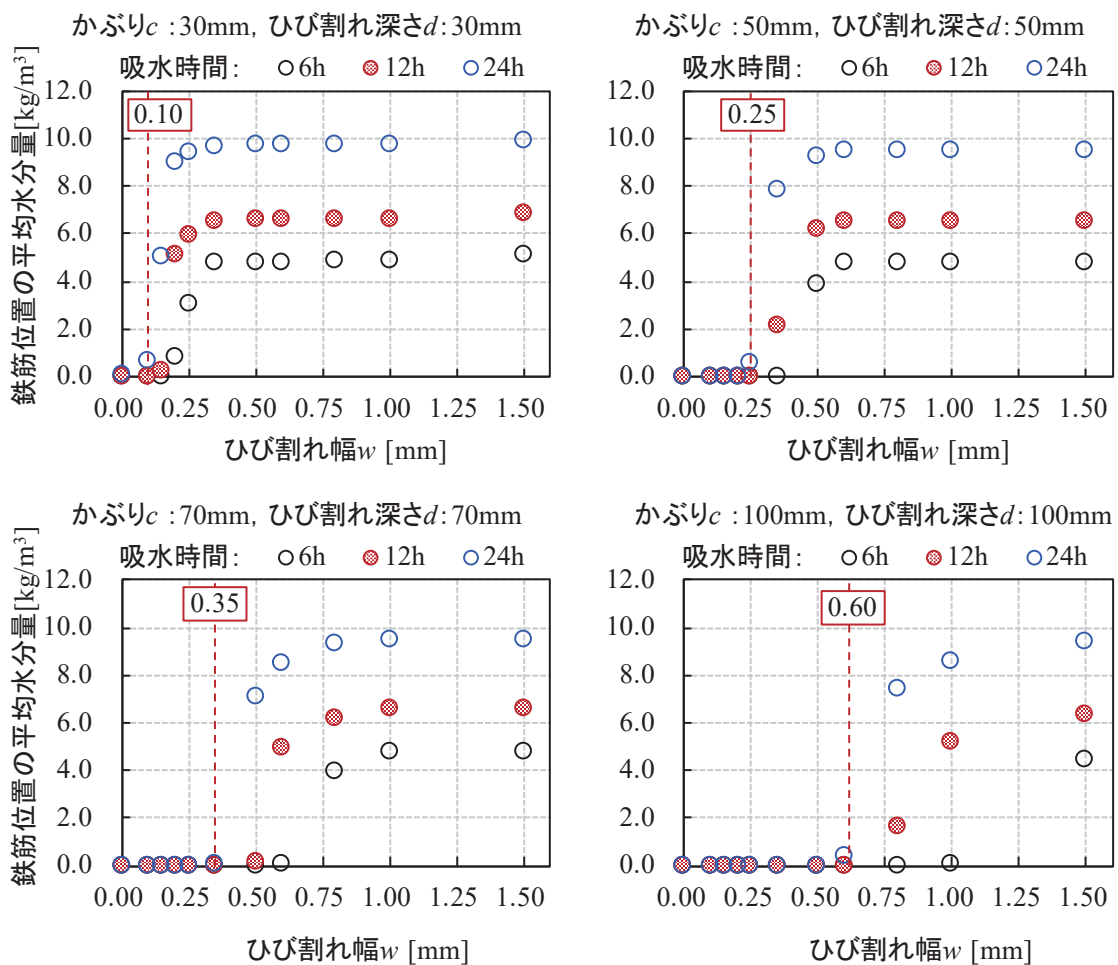


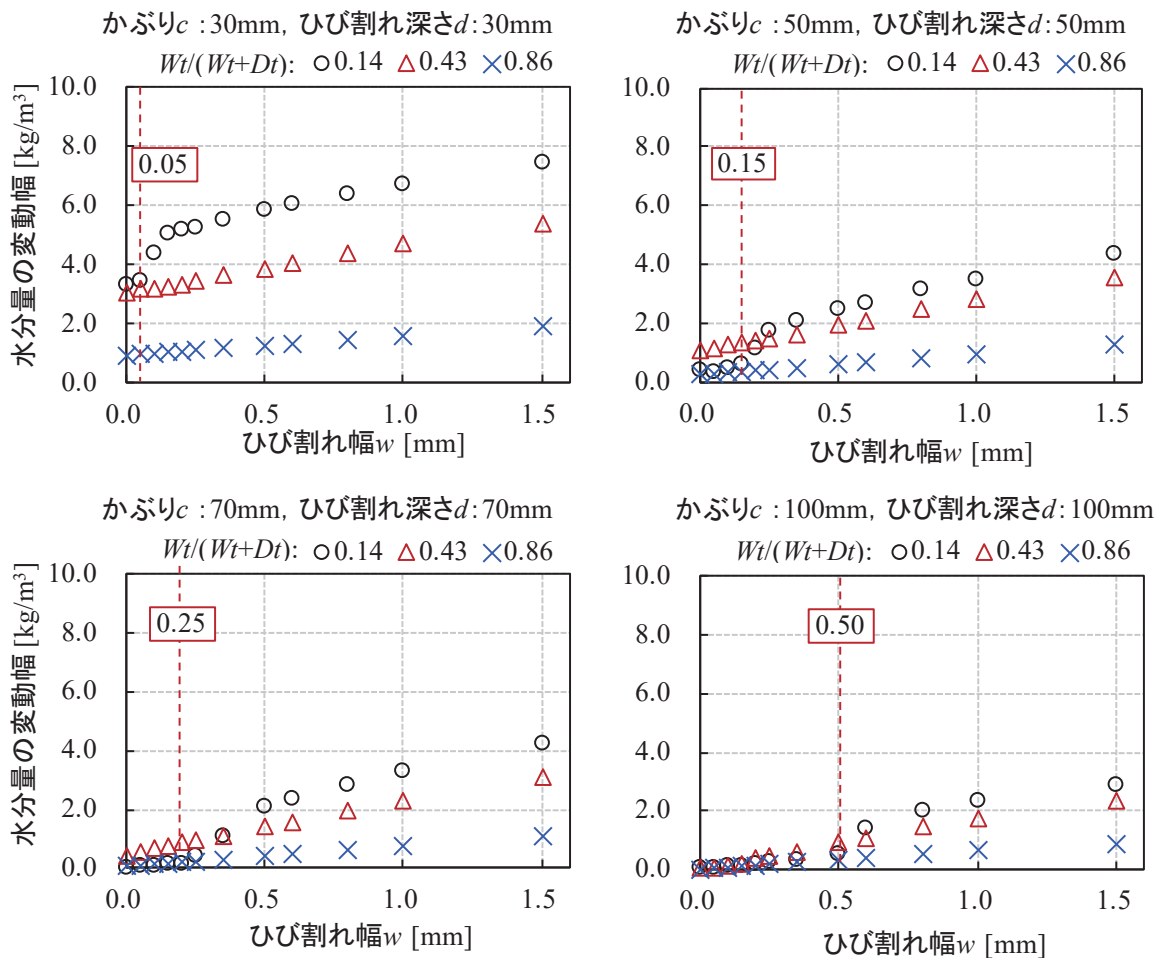
図-5 連続吸水条件下における各ひび割れ幅のコンクリートの鉄筋位置の水分量  
(かぶり  $c$ [mm]: 30, 50, 70, 100, 連続吸水時間[h]: 6, 12, 24)

を参考に設定した。

連続吸水条件下においてひび割れが水の浸透に及ぼす影響については、各ひび割れ幅を有するコンクリートのある吸水時間における鉄筋位置の水分量の軸方向平均値を指標として検討する。乾湿繰返し条件下においてひび割れが水の浸透に及ぼす影響については、**図-4**に示したように鉄筋位置での平均水分量の変動幅（定常状態における乾湿を伴う水分量の変化の振幅）を指標として検討する。乾湿繰返し条件下の指標として水分量の変動幅を取り上げたのは、ひび割れは乾燥と吸水の両方に影響するため、乾湿繰返し条件下における定常状態には、ひび割れ幅の影響は平均水分量よりも水分量の変動幅に現れることが、これまでの検討<sup>5)</sup>より明らかになっているからである。

### 3.2 連続吸水条件下における水分浸透性状

**図-5**は、連続吸水条件下において吸水時間が6時間、12時間および24時間における鉄筋位置の平均水分量である。4つのグラフはかぶりを30mm、50mm、70mm、100mmと設定したシリーズの計算結果をそれぞれ示している。ひび割れ幅は0.0mm～1.5mmの範囲で変化させている。すべてのかぶりのシリーズにおいて、ひび割れ幅がある大きさ以下の場合には、ひび割れ内への吸水量が微小であるので、鉄筋位置の平均水分量はひび割れがない場合と同じくほぼゼロで、ひび割れによる影響がみられない。その閾値となるひび割れ幅は、かぶりが30mm、50mm、70mm、100mmそれぞれに対し、ひび割れ幅0.1mm、0.25mm、0.35mm、0.60mmである。これらのひび割れ幅より小さいひび割れは、吸水



**図-6** 乾湿繰返し条件下における各ひび割れ幅のコンクリートの鉄筋位置の水分量の変動幅  
(かぶり  $c$ [mm] : 30, 50, 70, 100,  $Wt/(Wt+Dt)$  [day] : 0.14, 0.43, 0.86)

時間 24 時間以下ではひび割れ内の液状水の浸透距離が鉄筋位置まで到達しないため、ひび割れの影響がみられない。一方、ひび割れ内の液状水の浸透距離が鉄筋位置まで到達したのものについては、連続吸水時間の長さに応じた鉄筋位置での平均水分量の増加がみられ、ひび割れ幅が大きいほど平均水分量が高くなる傾向を確認した。

### 3.3 乾湿繰返し条件下における水分浸透性状

図-6 は、乾湿 1 サイクルの日数 ( $Wt+Dt$ ) が 7 日、吸水日数の割合 ( $Wt/(Wt+Dt)$ ) が 0.14, 0.43, 0.86 とした乾湿繰返し条件下における鉄筋位置における水分量の変動幅である。4 つのグラフはかぶりを 30mm, 50mm, 70mm, 100mm としたシリーズの計算結果をそれぞれ示している。ひび割れ幅は 0.0mm~1.5mm の範囲で変化させている。図-6 より、かぶりが小さいシリーズほど水分量の変動幅が大きい傾向あることから、乾湿作用の影響を大きく受けるといえる。また、すべてのかぶりにおいて、吸水日数の割合  $Wt/(Wt+Dt)$  が実環境下における乾湿サイクルに近い 0.14 のシリーズでは、ある大きさのひび割れ幅以下では、ひび割れがないコンクリートとの差が小さく、ひび割れによる影響がみられない。その閾値のひび割れ幅は、かぶりが 30mm, 50mm, 70mm, 100mm に対し、ひび割れ幅がそれぞれ 0.05mm, 0.15mm, 0.25mm, 0.50mm である。なお、吸水日数の割合が大きい  $Wt/(Wt+Dt)=0.43, 0.86$  の場合には、ひび割れ幅の増大に伴い水分量の変動幅は大きくなるものの、水分量の変動幅が急変するひび割れ幅の閾値は現れなかった。

### 3.4 水の浸透および乾湿作用に対するひび割れ幅の限界値

図-7 および図-8 は、本解析で得られた連続吸水条件下および乾湿繰返し条件下において鉄筋位置への水の浸透性状が変化するひび割れ幅の限界値 (閾値) を、各設計基準において規定されているひび割れ幅の限界値とともに示したものである。図-7 および図-8 より、本解析で得られたひび割れ幅の限界値はかぶりの大きさに依存し、その依存性 (傾き) は fib Model Code2010 ( $0.3(c/40)$ )<sup>2)</sup>、および土木学会コンクリート標準示方書 ( $0.005c$ )<sup>1)</sup> と概ね似た傾向を示すことが明らかとなった。

図-7 の解析により求めた連続吸水条件下におけるひび割れ幅の限界値は、吸水時間 24 時間での値であり、その絶対値は吸水時間により変化するので、絶対値の妥当性は鋼材の腐食の観点から改めて議論しなければならないが、今回平均的な連続降雨時間を参考に設定した吸水時間 24 時間で求めた値が、土木学会コンクリート標準示方書で従来用いられてきた値とほぼ同じとなったことは興味深い。

図-8 の解析により求めた乾湿繰返し条件下におけるひび割れ幅の限界値は、定常状態での値であるので、判定時間によらない。そのようにして得られたひび割れ幅の限界値が、絶対値およびかぶりへ

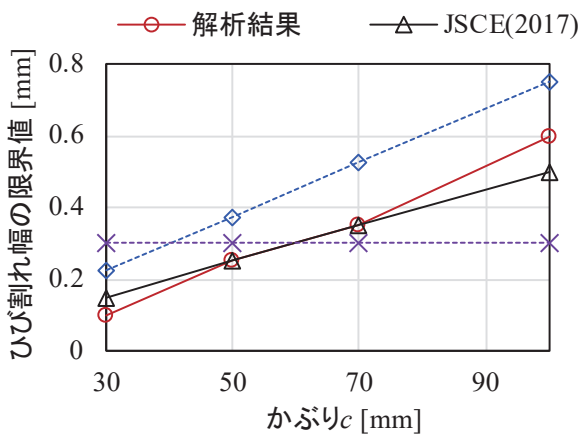


図-7 水の浸透に対するひび割れ幅の限界値

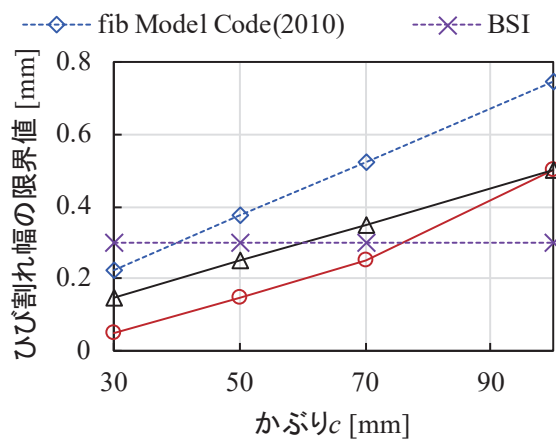


図-8 乾湿作用に対するひび割れ幅の限界値



の依存性ともに土木学会コンクリート標準示方書で従来用いられてきた値とほぼ同じとなったことは、示方書のひび割れ幅の限界値と本解析法の妥当性の双方を示すものであると考えている。

また、BSI (0.3)<sup>3)</sup>については一定値であるが、本解析で得られたかぶりが30mm~100mmの範囲でのひび割れ幅の限界値の平均値とおおむね一致する。

以上より、現在の設計で採用されているひび割れ幅の限界値は、コンクリート中への乾湿繰返しを含む水の浸透に対しても有効であると考えられる。

#### 4. まとめ

コンクリート部材の水の浸透に対するひび割れ幅の限界値について、著者らが提案しているひび割れの影響を考慮した水の浸透解析法を用いて評価した。得られた結果を以下に示す。

- 1) ひび割れを有したコンクリート中への水分浸透に及ぼすひび割れ幅の影響を、連続吸水条件下では一定吸水時間における鉄筋位置の水分量を指標に、乾湿繰返し条件下では定常状態における鉄筋位置の水分量の変動幅を指標にそれぞれ評価した。いずれの条件下においてもかぶりが小さいほど小さいひび割れ幅で外部からの水の浸透の影響を受けることを確認した。したがって、乾湿繰返しを含む水分の浸透に対するひび割れ幅の限界値をかぶりの関数として設定することは適切であるといえる。
- 2) 解析により求めた水の浸透に対するひび割れ幅の限界値およびそのかぶりとの関係は、各設計基準で規定されている鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値と同様の傾向を示した。したがって、現在の設計において用いられている鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値は、塩分の浸透だけでなくコンクリート中への水の浸透による鋼材腐食に対しても有効であることが示唆される。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2017
- 2) fib Model Code for Concrete Structures, 2010
- 3) BS 8110-1. Structure use of concrete. Part1: General Rules and Rules for design and construction , British Standards Institution, 1997
- 4) Nguyen Thi Hien and Takumi Shimomura: Evaluation of critical crack width for reinforcement corrosion in RC member based on numerical simulation of transport of chloride ions in concrete, Journal of Asian Concrete Federation, Vol. 3, No. 2, pp.67-81, Dec. 2017
- 5) 工藤めい：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，長岡技術科学大学修士論文，2019.3
- 6) 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
- 7) H. T. Thynn and T. Shimomura: Hybrid computational method for capillary suction and nonsaturated diffusion in concrete, ConMat'09, pp.1075-1080, 2009
- 8) Htut Thynn Thynn : Numerical simulation of long-term cycle drying-wetting behavior of concrete under natural environmental action, Ph.D Thesis,, Nagaoka University of Technology, Aug., 2012.
- 9) 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
- 10) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書改訂資料，2017