

論文 実構造物のデータベースを用いた初期ひび割れ幅の予測式に関する研究

田村 隆弘^{*1}・稲津 貴和子^{*2}・国重 典宏^{*3}

要旨：実構造物において、若材齢時に発生するひび割れのひび割れ幅を簡易に確認する予測式を、山口県がコンクリートひび割れ抑制対策として蓄積しているデータをもとに誘導した。式の誘導にあたり、コンクリートのひび割れ幅に影響を与えている要因を抽出したが、そこでは、実構造物ならではの、例えば、型枠存置期間や、層状構造物における打設間隔といった要因がひび割れ幅に関与していることが確認された。そして、これらの相関の強いものについて、その影響を仮定し誘導した予測式は、実施工において考えられる対策とひび割れ幅との関係を簡易に表現することが出来た。

キーワード：初期ひび割れ、ひび割れ幅、データベース、統計的手法、予測式

1. はじめに

(1) 背景

コンクリート構造物の品質確保の観点から、建設現場では竣工時にコンクリートに発生しているひび割れが有害か無害かという点で評価されている。このため、建設現場では、有害なひび割れを抑制するための対策が検討され、近年では各種のひび割れ抑制対策が研究開発されている。

一方で、温度応力や乾燥収縮によるひび割れ幅の予測や評価については、長い間、多くの研究者によって研究が進められ、コンクリートに関係する各学会においてもそれぞれに予測式や評価方法が改訂を繰り返しながら示されている^{1),2),3),4)}。現在では、有限要素法による解析により、実構造物における温度上昇量を、精度良く求めることができる状況にある。しかしながら、「ひび割れ幅」の予測については、実状を精度良く再現できる状況に至っていないのが現状である。また、有限要素法による解析は、その都度、構造物をモデル化する必要がありコストも掛かるため、現状では、建設現場における汎用性に乏しい。建設現場では、構造物の条件や環境条件から、簡易にひび割れ幅が算定でき、また、ひび割れ幅を許容値以内に納めるためにはどのような対策を取ればよいのかが容易に検討できる設計式が求められている。

本研究では、山口県のデータベース⁵⁾を基に、簡易にひび割れ幅を求める設計式の誘導を試みた。

(2) 既往の研究

これまで、有限要素法による数値解析的な研究の他にも、ひび割れ幅を予測する研究は多く行われており、その成果についてはコンクリート工学協会のマスコンクリートに関連した研究委員会が継続的に成果をまとめ

ている^{1),2),3),4)}。ひび割れ幅予測式の解析的な誘導は、実構造物やモデル実験から得た情報をもとに重回帰したものや一軸部材の問題から、コンクリートと鉄筋の付着に着目して誘導したものなどがある。著者らは、それらの予測式の性能について、山口県のデータベースによって確認した。しかし、ひび割れ幅やひび割れ指数を重回帰によって求めた式は、ひび割れ幅に関与する項目がそれぞれ独立で存在する形で表現されるため、データの範囲や数が変わるとそれぞれの係数が変化する。従って、その回帰式の誘導に使用した以外の構造物に対して、精度の良い解を得ることは困難である。

(3) 山口県のコンクリート打設管理記録

山口県では、コンクリート工事で発生するひび割れ対策を発注者や施工者が共同で解決する取り組みを行っている⁵⁾。その中で、コンクリート工事毎に、「コンクリート打設管理記録」を整理し、これをデータベース化している。そこでは、構造物や使用したコンクリートの情報、ひび割れ対策、発生したひび割れの状況等々が分類されており、ホームページ上に公開されている⁶⁾。完全な情報となっていないものも散見するが、現在では、860件（打設リフト数）のデータが確認できる。ここで記録されたひび割れは、計測が竣工時であり、乾燥収縮により、今後ひび割れ幅がさらに進展する可能性はあるが、温度ひび割れの観点からは、貴重な情報を提供している。

2. ひび割れ幅予測式の誘導

2.1 基本概念

ひび割れ問題をコンクリート一軸部材の変形を基本として考えると、ひび割れ幅の基本式を、 $\varepsilon = \Delta L / L$ とするならば、

*1 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科教授 工博 (正会員)

*2 徳山工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (正会員)

*3 山口県 技術管理課

$$\Delta L = \varepsilon \times L \quad (1)$$

であり、ここで ε は、温度や収縮といった材料特性に起因するコンクリートのひずみ、 L は部材長である。

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

ε_t ：温度ひずみ ε_{sh} ：収縮ひずみ

このひずみが拘束を受けることで、引張応力が発生し、その応力度がコンクリートの引張強度を越えることでひび割れが発生する。

両端（完全）拘束を受けた無筋コンクリート部材が温度低下や乾燥により収縮した場合、両端の拘束が完全であれば、コンクリートは収縮によって、引張強度までの応力度までは弾塑性変形し、応力度が引張強度に達するとひび割れが発生する。この時、引張強度でのひずみを引張限界ひずみ ε_{tu} として考慮すると、

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_{sh} - \varepsilon_{tu} \quad (3)$$

となり、ひび割れ幅 W は、

$$W = \varepsilon \times L = (\varepsilon_t + \varepsilon_{sh} - \varepsilon_{tu}) \times L \quad (4)$$

しかし、温度や乾燥収縮による収縮量に関与する要因は多く、実構造物においてひずみ量を正確に予測することは難しい。

また、実際の部材での拘束は両端固定ではなく、多くは下面のみ、あるいは、下面と両端といった3面が拘束され、そして、その拘束も、ほとんどの場合、完全拘束とはならず弾（塑）性拘束状態にある。さらに、拘束のパターンには、構造体の自由変形を外部から拘束する外部拘束と、構造体内部で鉄筋などがコンクリートを拘束する場合や、内部コンクリートと表面付近のコンクリートの温度差や乾燥収縮の差で応力が発生してしまう場合のような内部拘束がある。これらの要因による影響を拘束度 K とすると、ひび割れ幅 W は、

$$W = \varepsilon \times L \times K \quad (5)$$

となるが、拘束度 K についても、正確な評価をすることは極めて困難である。

一方、鉄筋コンクリート部材では、鉄筋によってひび割れが分散されることは良く知られている。ひび割れ幅と鉄筋比の関係を土木学会示方書ではひび割れ指数を利用して表現している⁷⁾が、著者等は、ガラス連続繊維によって、ひび割れを分散させる手法も効果があることを確認している⁸⁾。したがって、実際のひび割れ幅は、これらの要因が複雑に絡み合った大きさになり、このことを単純化して表現すると平均ひび割れ幅 W_{ave} は、

$$W_{ave} = \varepsilon \times L \times K \times D \quad (6)$$

K ：拘束度

D ：ひび割れ分散度

となり、拘束度 K やひび割れ分散度 D の各要因のひび割れ幅に与える影響度を評価することで得ることができる。ここで、実構造物で発生する複数のひび割れのひび

割れ幅は一定ではなく、実構造物で問題になるのは、最大ひび割れ幅であるため、平均ひび割れ幅から最大ひび割れ幅を予測する必要があるが、小野等の研究結果⁹⁾では $W_{max} = 1.59W_{ave}$ 、ACIでは $W_{max} = 1.5W_{ave}$ としている¹⁾。

2.2 設計式に取り込む要因の絞り込み

設計式の基本となる式(6)の右辺の ε 、 K （拘束度）、 D （ひび割れ分散性）の3つの要素に関係する要因について検討した。要素の絞り込みにあたっては、山口県のコンクリート打設管理記録のデータベースから、影響が強く表れている（ひび割れ幅との相関が認められる）ものを対象とした。

(1) 温度ひずみに関連する要因

温度ひずみに関連する要因とこれを変現する要素を表-1に挙げる。セメント量が増加するに従い水和熱が大きくなるが、実構造物では、部材の大きさや環境条件によって最高温度は変化する。

表-1 温度ひずみに関連する要因

関連する要因	これを変現する要素
コンクリート断熱温度上昇量	セメントの種類、水セメント比、セメント量、単位水量など
部材の大きさ	長さ、高さ、厚さ
雰囲気温度	気温など
保温性	型枠など

図-1は、データベースから抽出した単位セメント量と温度上昇量の関係である。実構造物においても単位セメント量が大きくなるに従い、温度が上昇する傾向が感じられるが、部材の大きさや環境の影響、そして、温度計測位置がまちまちであるため傾きは明瞭ではない。

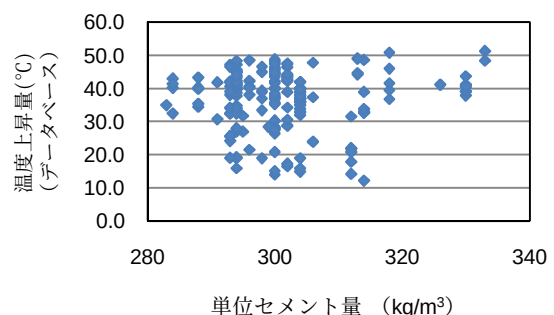


図-1 単位セメント量と温度上昇量（データベース）

コンクリートの断熱温度上昇量については、土木学会示方書においても使用するセメントや配合によって求められるが、実構造物での温度上昇量は、部材サイズや型枠、養生等の条件によって異なる。

図-2 は、山口県のデータベースで材料の温度に関連する情報が得られた部材について、土木学会示方書⁷⁾により単位セメント量と断熱温度上昇量について温度解析を行った結果である（セメントは高炉 B 種）。土木学会式では打設温度毎に係数が異なるため、等しいセメント量でも打設温度によって異なる断熱温度上昇量となるが、セメント量と断熱温度上昇量 Y_{t1} の関係は以下の式で示されるようにほぼ線形となる（図-2 参照）。

$$Y_{t1} = 0.111C + 17.28 \quad (7)$$

C: 単位セメント量 (kg/m³)

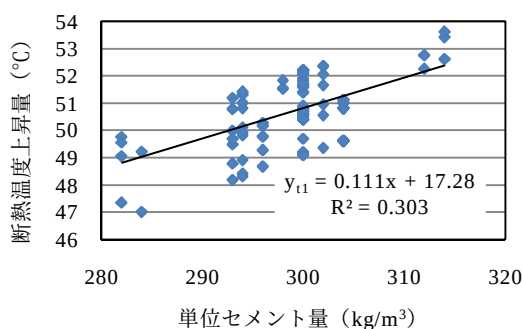


図-2 土木学会示方書による温度解析結果

一方、実構造物におけるコンクリートの温度上昇量が、構造物の形状や容積と表面積に影響されることは自明である。図-3 は山口県データベースから得た部材容積（長さ×高さ×厚さ）と表面積の比と、温度上昇量の実測値関係を示している。図より、部材容積/部材表面積と温度上昇量 Y_{t2} の関係として以下の式(8)を得る。

$$Y_{t2} = 59.37 \times ((H \times B \times L) / 2(H \times B + H \times L + B \times L))^{0.5502} \quad (8)$$

H:部材高さ(m), B:部材厚さ(m), L:部材長さ(m)

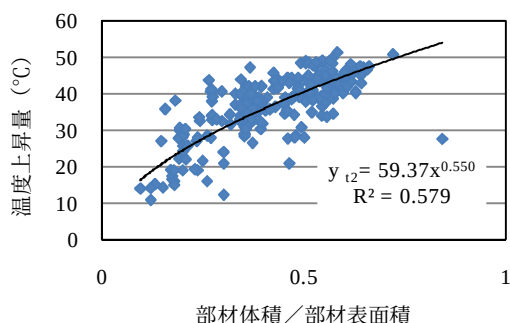


図-3 部材体積/部材表面積と温度上昇量（データベース）

図-4 では、温度上昇量 Y_t を単位セメント量と部材形状の関数として、式(7)と式(8)を纏めた式(9)で表現して、データベースの実測値と相関させた。

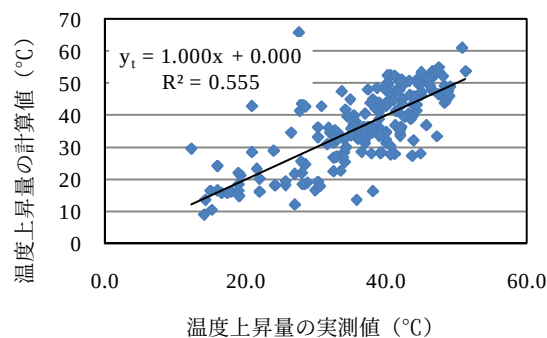


図-4 温度上昇量の計算値と実測値

$$Y_t = Y_{t1} \times Y_{t2} \times 0.11 - 20.7 \quad (9)$$

$$Y_{t1} = 0.11C$$

$$Y_{t2} = 50 \times ((H \times B \times L) / 2(H \times B + H \times L + B \times L))^{0.55}$$

(2) 乾燥(自己)収縮ひずみに関連する要因

乾燥（自己）収縮に関連する要因を、表-2 に挙げる。コンクリートの乾燥収縮（および自己収縮）の大きさについても多くの研究が行われており、土木学会示方書で算定式が示されているが、実構造物における乾燥収縮量は、コンクリートの材料特性はもとより型枠や環境にも大きく影響を受ける。後述の 2.3 定式化では、土木学会示方書⁷⁾を参考にしてコンクリートの収縮ひずみを仮に $\varepsilon_{sh} = 400 \times 10^{-6}$ とした。膨張材や収縮低減剤の効果については、山口県のデータでは明確な傾向を得るに至っていないことから、今後も情報収集して確認する必要がある。

表-2 乾燥（自己）収縮ひずみに関連する要因

関連する要因	これを表現する要素
コンクリートの材料特性	セメントの種類、水セメント比、セメント量、単位水量、材令など
環境要因	雰囲気湿度、風など
収縮低減効果	膨張材、収縮低減剤など

(3) コンクリート引張限界ひずみに関連する要因

コンクリートの引張限界ひずみに関連する要因は、コンクリートの強度 (f_t) と弾性係数 (E_c) であり、引張強度を圧縮強度 (f'_c) の関数⁷⁾とし、引張強度までの弾性係数を圧縮時の初期弾性係数に等しいとすると、以下の式で与えられる。

$$\varepsilon_u = f_t / E_c = (0.23 f'_c{}^{2/3}) / (2 f'_c / 0.002) \quad (10)$$

(4) コンクリート応力度及び拘束度に関連する要素

コンクリートの応力度は、部材の拘束度に依存するが、実構造物では、多くの要因が関わっている。土木学会示

方書⁷⁾では、例えば、拘束体がコンクリートの場合、拘束度 $K=0.6$ を与えている。

橋台や壁式橋脚などの層状にコンクリートを打ち重ねる構造物（以下、層状構造物）において打設間隔は、先に打設したコンクリートの弾性係数の大きさに影響し、このことは拘束度に深く関わる。図-5 に示すように山口県のデータベースから抽出した結果からは、打設間隔が大きくなるに従い、ひび割れ幅も大きくなる傾向が認められる。一方、一般的に後から打ち重ねるコンクリートは、圧縮強度が高い程ひび割れ幅が小さくなる。よって、この時（打設間隔の情報がある場合）打設間隔とひび割れ幅 Y_{x1} の関係を以下の式で表現した。

$$Y_{x1} = X_1 / f'_c \quad (11)$$

X_1 ：層状構造物のコンクリート打設間隔（日）

f'_c ：後から打ち重ねるコンクリートの圧縮強度

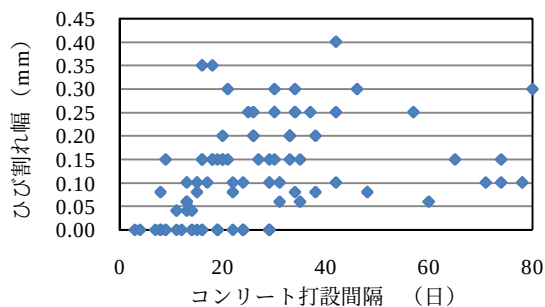


図-5 打設間隔とひび割れ幅（データベース）

(5) ひび割れ分散性に関連する要因

ひび割れの分散性に関連する要因を、表-3 に挙げる。この中で、データベースにおいて特に影響の大きい L/H と鉄筋比について以下に解説する。

表-3 ひび割れ分散性に関連する要因

ひび割れ幅に関連する要因	これを表現する要素
ひび割れが1本だけの場合のひび割れ幅	全ひずみ量, 部材長さ, 応力度(拘束度)など
外部拘束状態	L/H , 境界条件など
内部拘束状態	鉄筋(量や配筋状態), ガラス繊維量, 温度状態, 乾燥状態など

a) L/H とひび割れ幅の関係

底面が拘束され両端と上面が自由端である場合、ひび割れ幅は、上に行くほど細くなる。また、図-6 に示すように、 L/H が大きくなるに従い、ひび割れ幅が減少している傾向が確認できる。すなわち、底面を拘束された実構造物では部材が長くなるに従って、ひび割れが分散

していると言える。 L/H とひび割れ幅 Y_{x2} の関係を以下の式で表現した。

$$Y_{x2} = 1/X_2 \quad (12)$$

$$X_2 : L/H$$

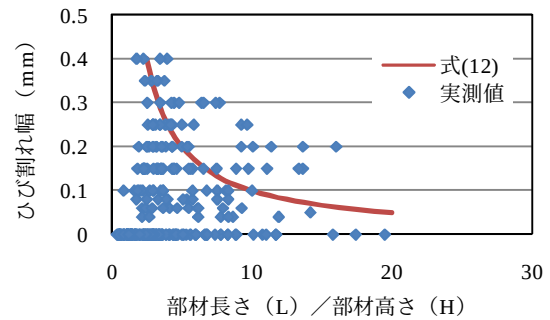


図-6 L/H とひび割れ幅（データベース）

b) 鉄筋に関連する要素

ひび割れの幅は、部材内に配置された鉄筋に影響され、ひび割れ幅を正確に求めるには、鉄筋の配置や鉄筋比など多くの要因を考慮する必要があるが、ここでは、データベースで見られる鉄筋比 p とひび割れ幅 Y_p の関係(図-7 参照)を基に以下の式で表現する。

$$Y_p = 1/(p \times 100)^{1/4} - 0.2 \quad (13)$$

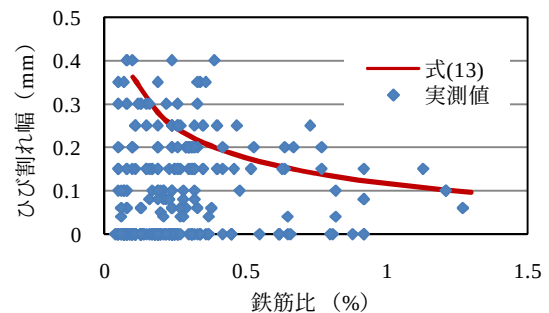


図-7 鉄筋比とひび割れ幅（データベース）

(6) 温度勾配、乾燥速度に関連する要素

ひび割れの発生時期やひび割れ幅は、コンクリート強度の成長速度と温度降下の速度や乾燥収縮の速度にも依存する。実構造物で関連する要因を表-4 に挙げる。

表-4 温度降下速度、乾燥収縮速度に関連する要因

温度降下速度	乾燥収縮速度
外気温と内部温度の差, 最高温度と外気温の差, 保温環境など ・型枠の種類, ・型枠存置期間, ・養生方法, ・養生期間など	雰囲気湿度, 風, 保湿環境など ・型枠の種類, ・型枠存置期間, ・養生方法, ・養生期間など

データベースからは、型枠存置期間が長くなるとひび割れ幅が小さくなる傾向が見られた（図-8 参照）。よって、温度勾配や乾燥速度の影響を型枠存置期間とひび割れ幅 Y_{x3} の関係から以下の式で表現する。

$$Y_{x3} = (1/X_3)^{1/4} - 0.35 \quad (14)$$

X_3 ：型枠存置期間（日）

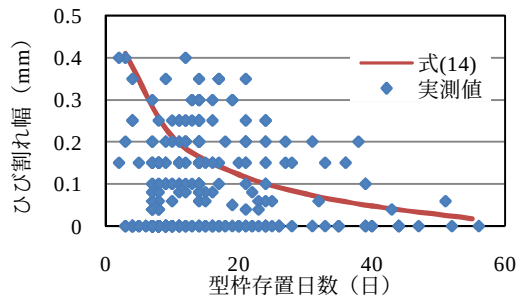


図-8 型枠存置日数とひび割れ幅（データベースから）

2.3 定式化

上記のように、実構造物で見られる各種要因を仮定することで、ひび割れ幅予測式を以下に提案する。提案式では、部材サイズ、単位セメント量、コンクリート強度、鉄筋比、型枠存置期間、そして、打設間隔を与えることで、簡易にひび割れ幅が求まる。

$$W_{ave} = (\varepsilon_t + \varepsilon_{sh} - \varepsilon_{tu}) \times L \times K \times D \times Z \quad (15)$$

あるいは、

$$W_{ave} = (\Delta L_t + \Delta L_{sh} - \Delta L_{tu}) \times K \times D \times Z \quad (16)$$

ここで、 L は部材長さ、 K は拘束度、 D はひび割れ分散度、 Z は温度降下の勾配や乾燥速度に関する係数である。

$$\varepsilon_t = \alpha Y_t ((Y_{t1} \times Y_{t2} \times 0.1) - 20) \times \alpha \quad (\text{温度ひずみ})$$

$$\varepsilon_{sh} = 400 \times 10^{-6} \quad (\text{乾燥収縮ひずみ})$$

$$\varepsilon_{tu} = f_t / E_c \quad (\text{コンクリートの引張限界ひずみ})$$

そして、収縮量(ΔL_t)は、

$$\Delta L_t = L \times (Y_{t1} \times Y_{t2} \times \alpha)$$

$$\Delta L_{sh} = L \times 400 \times 10^{-6}$$

$$\Delta L_{tu} = L \times (0.23 f_c^{2/3}) / (2 f_c' / 0.002)$$

$$Y_{t1} = 0.1C,$$

$$Y_{t2} = 50 \times ((H \times B \times L) / (2(H \times B + H \times L + B \times L)))^{0.55}$$

$$\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (\text{コンクリートの熱膨張係数})$$

拘束度 K は、拘束に関して打設間隔を考慮すること、また、その他の各要因の影響度を係数とした場合この中に含まれる（係数の掛算となる）ことから、ここでは、

$$K = 0.6 \times Y_{x1}$$

$$Y_{x1} = X_1 / f_c'$$

X_1 ：層状構造物のコンクリート打設間隔（日）

とする。ひび割れ分散性の項 D は、 L/H と鉄筋比によって、それぞれ以下のように表現する。なお、鉄筋比の項 Y_p については、式(13)の定数-0.2を除いた形で与えた。

$$D = Y_{x2} \times Y_p$$

$$Y_{x2} = 1/X_2, \quad Y_p = 1/(p \times 100)^{1/4}$$

X_2 ： L/H 、 p ：鉄筋比

そして、温度降下の勾配、乾燥速度に関する項 Z は、型枠存置期間により表現する。なお、ここでの Y_{x3} については、式(14)における定数-0.35を除いた形で与えた。

$$Z = Y_{x3} = (1/X_3)^{1/4}$$

X_3 ：型枠存置期間（日）

3. 提案式によるデータベースの評価

提案した予測式とデータベースの中で必要な情報のある橋台や橋脚の 296 リフトのデータについて相関を確認した。なお、図-9～図-14 は、いずれも縦軸を計算値、横軸をデータベースにある実測値としている。

図-9 は、解析対象とした構造物が一軸部材と仮定した場合である。図-10 では、図-9 に拘束度の項を $K=0.6^7$ とした上で、 L/H の影響を考慮した。図-11 では、図-10 にさらに鉄筋比の項を考慮している。

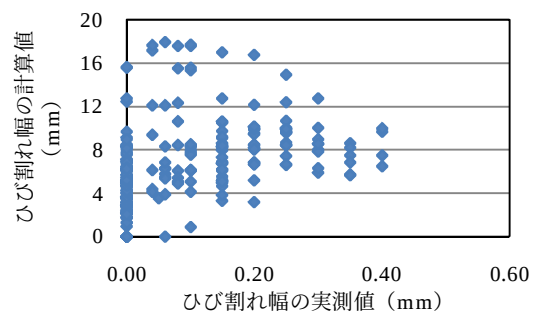


図-9 一軸部材として収縮量を考慮した場合

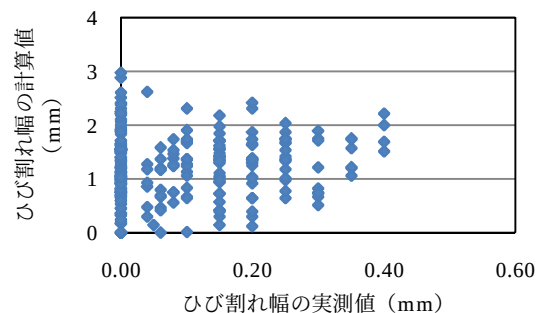


図-10 図-9 に L/H を考慮した場合のひび割れ幅

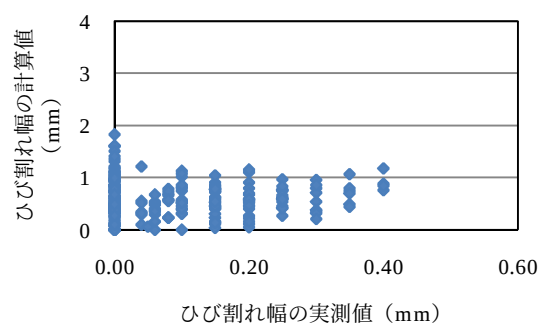


図-11 鉄筋比を考慮した場合のひび割れ幅

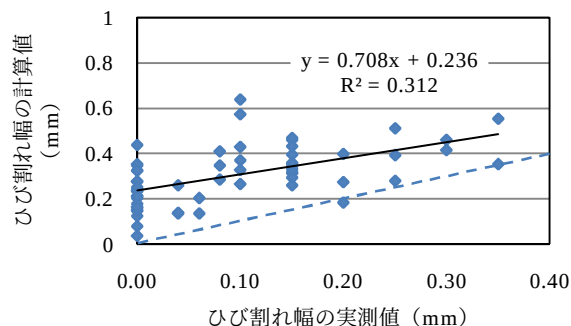


図-12 型枠存置期間を考慮した場合のひび割れ幅

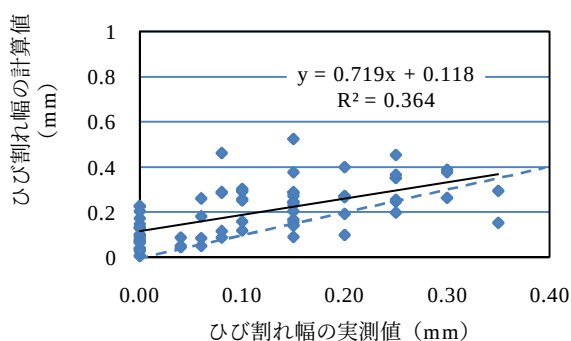


図-13 打設間隔を考慮した場合のひび割れ幅

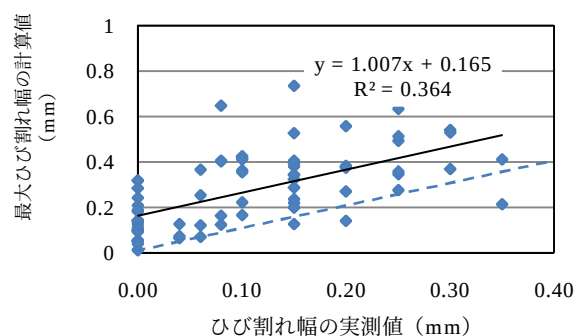


図-14 最大ひび割れ幅を平均ひび割れ幅の1.5倍とした場合

図-12 では、図-11 に型枠存置期間を考慮し、図-13 では打設間隔を考慮したものである。図-14 では、最大ひび割れ幅を平均ひび割れ幅の1.5倍¹⁾として、図-13の値を単純に1.5倍している。ただし、打設間隔については、山口県のデータベースで記録が確認できたものについて、そして、打設間隔が40日を超えるものはバラツキが大きいため対象外としたため、図-13と図-14は、データ数が77個である。

これらの図から、今回提案した予測式は、様々な要素を含んでいる実測値の傾向を概ね表現しているが、その精度には課題が残された。この原因としては、実構造物で使用されたコンクリートの乾燥収縮ひずみを、一律に $\varepsilon_{sh}=400 \times 10^{-6}$ として計算していることや、提案した式は、ひび割れ幅に関与する個々の要因の影響を独立して表現しようとするために、それらの相互関係が適切に関連

づけできていないことが考えられる。

4. おわりに

実務者が設計段階でひび割れ幅を制御するために、簡易にひび割れ幅を確認できる予測式の誘導を試みた。以下に提案式の特徴と今後の課題についてまとめる。

- 1) 実構造物から得られたデータからひび割れ幅に影響のあるものを抽出し、その傾向を掛け合わせることである程度ひび割れ幅を捉えることが出来る。
- 2) 提案式では、拘束度Kがひび割れ幅に影響を各要因の持つ係数を包括するため、この値についてより詳細な分析が必要である。
- 3) 膨張材や収縮低減剤の効果を、ひずみの低減量としてどのように組み込むか、また、ガラス繊維やひび割れ分散性を高める材料の性能をどのように組み込むかといった点が、今後の課題である。

最後に、提案式はひび割れ幅の傾向は表現したが、実測値との比較においては、その精度に課題を残した。これは、提案式にも問題があるが、実構造物におけるひび割れ幅の計測時期や計測手法等にも課題があることを感じている。今後は、多方面から研究を進めると共に、より多くのデータを分析することによって、より精度の高いひび割れ幅予測式の確立を目指したい。

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1992.9
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書，2006.6
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，2008.11
- 4) (社)日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)，2008.2
- 5) 山口県技術管理課，<http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a18000/hibiware/hibiwareyokusei.html>
- 6) 山口県建設技術センター，<http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html>
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」，2007
- 8) Tamura, T., Maida, Y.: A study on the cracks dispersible performance of reinforced materials for R/C member, Proc. of the eight international conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures, Vol.2, pp.1321-1328, Sep./Oct.200
- 9) 小野定：マスコンクリートの温度ひび割れ特性の数量化に関する検討，(社)日本コンクリート工学協会，1981