

論文 山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的評価

稲津 貴和子*1・田村 隆弘*2・澤村 修司*3

要旨：ひび割れ幅を予測する研究は土木学会，建築学会，コンクリート工学協会等で扱われており，様々な予測式が提案されている。本研究では，まず山口県で蓄積している実構造物のコンクリート打設管理記録のデータを分析し，次にそれらのデータを用いて，各種提案されている式の精度について統計的な評価を行った。データ分析からは，構造物の形状，鉄筋比，型枠存置日数と最大ひび割れ幅の間に一定の傾向を確認した。そして，提案されている式の評価結果からは，ひび割れに影響を与えていると思われる要因を複数考慮しても，その説明変数の数に関係なく，ひび割れ幅を正確に予測することは難しいことが示された。

キーワード：ひび割れ幅，初期ひび割れ，打設管理記録，データベース，予測式，統計的手法

1. はじめに

従来，コンクリート構造物は一般に耐久性に優れているとされ，半永久的でメンテナンスフリーの材料と考えられていた。しかし，高度経済成長期に大量に建設されたコンクリート構造物の早期劣化現象が指摘され始め，また，トンネル等のコンクリート剥落事故に代表されるような，ひび割れに起因する構造物の欠陥により，工事そのものに対する信頼性が失われつつある。

早期に発生するひび割れは，美観や耐久性を損なう恐れがあり，補修しても長期にわたる性能に何らかの影響を与えると考えられることから，早期劣化に伴う機能性の低下を最小限にとどめ，構造物の供用期間を延ばすためには，施工前の段階でひび割れを適切に予測し，問題の発生が予測される場合には，十分な対策を検討することが重要となっている。このような背景から，山口県では施工段階はもとより，発注や設計段階においても事前にひび割れの抑制対策を検討することを目的として，実構造物による試験施工を行い，ひび割れ発生状況や温度等の施工状況，発生したひび割れ幅について整理したデータを蓄積している。これらのデータより，発生するひび割れは材料・施工・環境・構造などの様々な要因が複雑に関連しており，施工で努力しても有害なひび割れを防ぐことが難しい場合もあることが確認できる。

これまで，ひび割れ幅に関する研究については土木学会コンクリート標準示方書¹⁾や建築学会，日本コンクリート工学協会などで取り上げられているが，未だ精度の良い予測が出来るまでには至っていない。1992年のマスコンクリートの温度応力研究委員会報告書²⁾の中で，小野ら及び万木らによりひび割れ幅を求める式が提案されているが，それ以降は，ひび割れ幅を直接求める式は

提案されておらず，ひび割れ指数を求め，鉄筋比との関係からひび割れ幅を求めるに留まっている。

そこで，本研究では，山口県の実構造物のデータを分析するとともに，これらのデータを用いて，これまでに提案されているひび割れ幅の予測式について統計的に評価を行った。

2. 山口県の取り組みとデータベース

2.1 山口県におけるひび割れ抑制対策

(1) 経緯

建設工事では，有害と判定されたひび割れが生じると，調査や補修のために工事工程が延びるだけでなく，余分な労力と工事費が必要となるため，請負者・発注者ともにひび割れ発生抑制の必要性を強く感じるようになった。そこで，山口県では，ひび割れの原因究明と抑制対策を目的とし，実構造物の施工時にコンクリート打設管理記録³⁾を残し，数値解析に頼らない，生のデータによる事前検討・事後検証に役立てている。

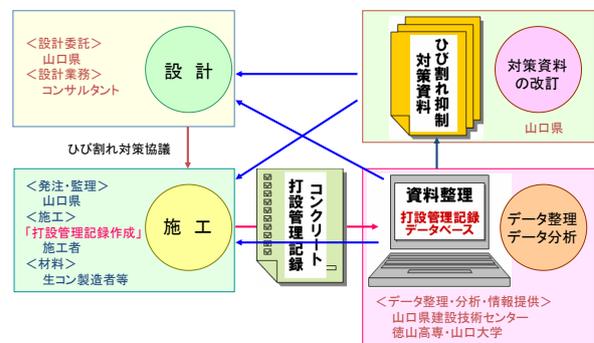


図-1 山口県のひび割れ抑制対策システムの概要

*1 徳山工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (正会員)

*2 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科教授 工博 (正会員)

*3 (財)山口県建設技術センター 技術部技術課

(2) システム

「山口県のひび割れ抑制システム」の構成を図-1に示す。設計・施工の段階において、発注者・材料製造者・施工者はデータベースを基に対策を検討するだけでなく、施工後も得られたデータを「打設管理記録」として記録し、整理・分析することで、より効果的なひび割れ対策を事前に検討することが可能となる。このような作業のなかで、関係者間で知識・認識を共有し、協働意識を高めることで、それぞれの役割を理解し、意欲・技術力の向上を図り、そしてコンクリート構造物の品質向上に繋げることを期待する循環型システムである。

(3) コンクリート工事に関するデータベース

コンクリートの打設管理記録は「鉄筋コンクリート構造物」と「止水性を必要とする無筋構造物」の現場打ちコンクリートを対象としており、2011年3月現在で、約860リフトのデータが蓄積されている。

2.2 データベースの分析

(1) 分析対象構造物

分析に用いた構造物のデータは表-1に示す5種類である。データの数、各々の構造物での1打設リフトを1個のデータとして、RC構造物706個、無筋構造物154個の合計860個である。打設管理記録のデータでは、構造物の施工時期はほぼ各季節にわたって蓄積されている。また、ひび割れは脱枠後初期に発生したものであり、ひび割れ調査はひび割れ発見から概ね1カ月程度行ったものである。

(2) 全構造物のひび割れ発生状況

打設管理記録にある全てのデータについて、打設時期やセメントの種類によってひび割れの発生状況について分析した。

① 打設時期別ひび割れ発生状況

図-2は打設時期とひび割れ発生状況の関係を示している。5月から10月の気温が高い時期にひび割れが多く発生している。しかし、3月と12月の気温が穏やかな時

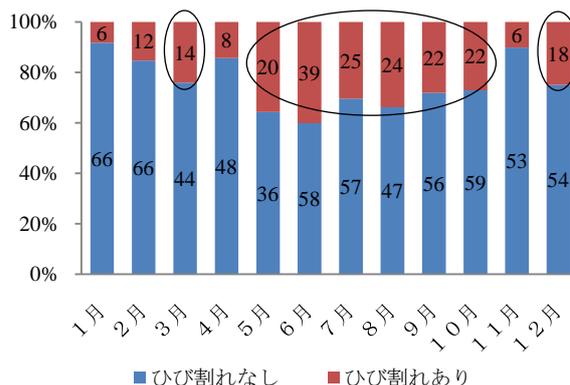


図-2 打設時期別ひび割れ発生状況

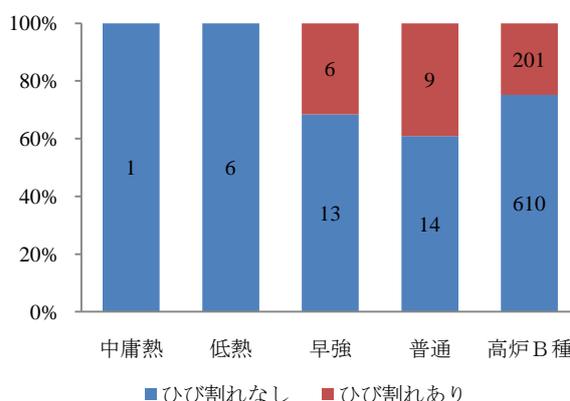


図-3 セメントの種類別ひび割れ発生状況

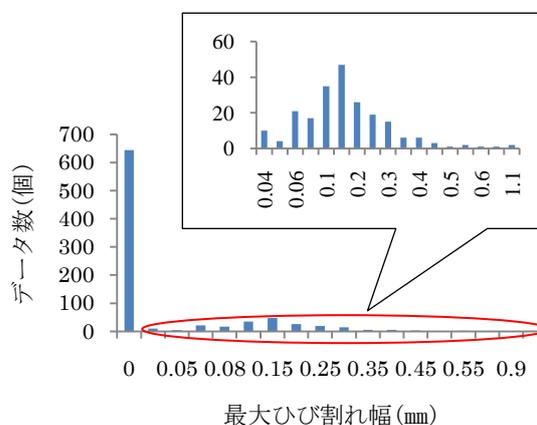


図-4 最大ひび割れ幅の分布

表-1 構造物の種類

	構造物	データ数	リフト高さ (m)	厚さ (m)	長さ (m)	誘発目地 間隔(m)	セメント	鉄筋比 (%)	試験強度 (N/mm ²)	温度降下量 (°C)
1	函渠	124	0.3~6.9	0.3~12.0	4.7~15.0	2.5~4.8	L, N, H, BB	データなし	26.4~46.5	2.5~41.5
2	橋台	279	0.1~5.4	0.5~16.5	3.5~25.0	—	L, N, BB	0.04~1.27	27.0~41.2	10.9~49.9
3	橋脚	167	1.1~6.3	1.3~11.4	0.1~28.6	—	N, BB	0.05~0.29	24.0~38.2	27.6~51.3
4	擁壁	75	0.4~6.5	0.3~27.2	0.5~21.0	—	L, H, BB	0.06~0.42	25.0~37.6	7.9~48.9
5	その他	215	0.5~9.4	0.3~14.0	3.0~42.0	—	M, N, H, BB	データなし	23.8~49.8	4.4~52.8

※低熱：L, 普通：N, 高炉B種：BB, 早強：H, 中庸熱：M

期にも多くひび割れが発生しており、これは、ひび割れの発生が温度のみの問題ではないことを示している。

②セメントの種類別ひび割れ発生状況

図-3 はセメントの種類とひび割れ発生状況の関係を示している。中庸熟、低熟は施工した事例が少ないこともあり、ひび割れは一つも発生していないが、早強、普通セメントを使用した場合には高い確率でひび割れが発生している。

(3) RC 構造物のひび割れ発生状況

山口県では、コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料⁹⁾において、鉄筋コンクリート構造物における最大ひび割れ幅の制限値を 0.15 mm としている。躯体の形状や打設リフト条件や施工条件が各現場によって異なることから、最大ひび割れ幅との関係を集計する。

①最大ひび割れ幅の分布

図-4 はデータ数と最大ひび割れ幅の関係を示している。全体の約 25%の構造物にひび割れが発生している。ひび割れが発生した部分を拡大してみると、最大ひび割れ幅が 0.15 mm をピークに、それより大きいひび割れの本数は減少している。これは有害なひび割れを発生させないように対策を検討し、施工していることを示しているといえるが、一方で、0.15 mm を超えるひび割れも少なくないことを示している。

②鉄筋比と最大ひび割れ幅

図-5 は RC 構造物の鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係を示している。鉄筋比が大きくなるにつれて最大ひび割れ幅が小さくなる傾向がみられる。鉄筋比を 0.5% 程度確保すると最大ひび割れ幅を 0.2 mm 以内に抑える確率が高いことが確認できる。

③L/H と最大ひび割れ幅

図-6 は RC 構造物での部材形状の指標 L/H と最大ひび割れ幅の関係を鉄筋比の割合別に示したものである。2m までは L/H が大きくなるにつれて最大ひび割れ幅は大きくなっているが、2m 以上は L/H が大きくなるにつれて最大ひび割れ幅は小さくなっている。これは部材の長さが短い場合、ひび割れの本数が少なく、1 本当たりのひび割れ幅が大きくなり、長さが長くなるにつれてひび割れは分散して発生し、1 本当たりのひび割れ幅が小さくなるためと考えられる。

④型枠存置日数と最大ひび割れ幅

図-7 は RC 構造物の型枠存置日数と最大ひび割れ幅の関係を鉄筋比が 0.1% 未満の構造物については、型枠存置日数が長くなるにつれて最大ひび割れ

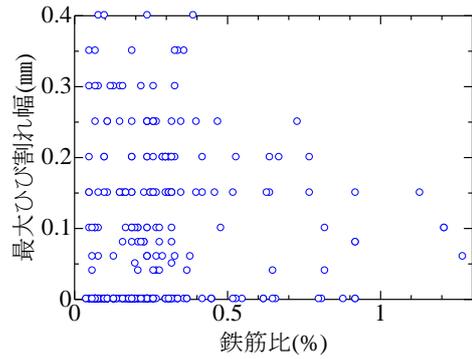


図-5 鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係 (RC 構造物)

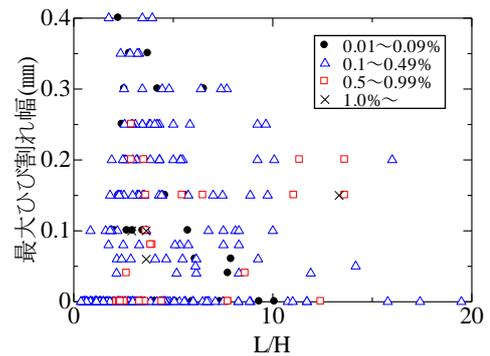


図-6 L/H と最大ひび割れ幅の関係 (RC 構造物)

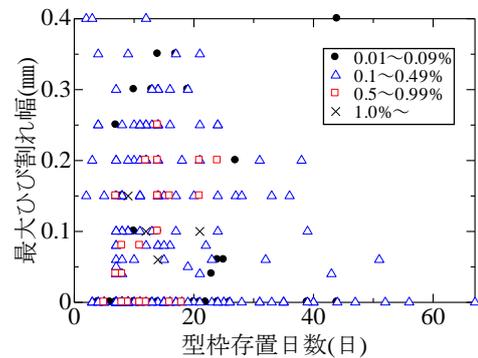


図-7 型枠存置日数と最大ひび割れ幅の関係 (RC 構造物)

幅が小さくなる傾向がみられるが、0.1%以上の構造物については、型枠存置日数と最大ひび割れ幅の間に相関関係はみられない。これは、鉄筋比 0.1%以上の構造物の型枠存置日数が 20 日を越えるもののデータ数が少ないことも影響していると考えられるが、鉄筋比が少ない場合、ひび割れは分散しにくくなることから、1 本のひび割れに対する型枠存置日数の影響が高くなり、結果的に型枠存置日数が多くなるほど最大ひび割れ幅が小さくなったと考えられる。逆に鉄筋比が多い場合は、ひび割れは分散しやすくなるため、1 本のひび割れに対する型枠存置期間の影響は小さくなり、結果的に型枠存置期間が長くなってもひび割れ幅はあまり小さくならなかったものと考えられる。

(4) 橋台のひび割れ状況

図-8, 図-9は, 橋台における鉄筋比, L/Hと最大ひび割れ幅の関係を示している。躯体の形状や打設リフト条件, 施工条件が比較的同程度のものだが, 傾向としては, さまざまな条件が含まれる2.2(3)RC構造物とほぼ同様であった。

3. 既往の統計的研究によるひび割れ幅提案式の評価

ひび割れ幅の予測式は小野ら, 万木ら, そして丸山によって提案されている。ここでは, 山口県の打設管理記録を用いてこれらの式について統計的に評価した。なお, ここでは各式の誘導に用いられた構造物の条件の適用範囲内と参考までに適用範囲外のデータについても示している。

3.1 小野らの式²⁾

小野らによる最大ひび割れ幅の推定方法として式(1)が提案されている。

$$W_{max} = K \times L \times R \times MAC \quad (1)$$

$$MAC = -5.62 \times 10^{-4} - 2.19 \times 10^{-5}x_1 - 5.48 \times 10^{-4}x_2 - 1.77 \times 10^{-2}x_3 - 2.44 \times 10^{-2}x_4 + 1.54 \times 10^{-3}x_5 + 7.00 \times 10^{-5}x_6 + 8.13 \times 10^{-3}x_7 - 3.71 \times 10^{-3}x_8 - 6.21 \times 10^{-3}x_9 \quad (2)$$

x_1 :長辺長 L x_2 :短辺長 x_3 :短期の外部拘束度 R x_4 :鉄筋比
 x_5 :スランブ x_6 :単位セメント量 x_7, x_8, x_9 :打設時期
 x_{10} :短期の温度降下量 x_{11} :壁厚(リフト高さ) K:1.59

式(1)の誘導に用いられたのは, 壁状構造物及びスラブ状構造物である。

この式に表-1に示す構造物のデータのうち, 式(1)の誘導に用いられた構造物と同じ条件のデータを代入し, 最大ひび割れ幅を算定し, 実測値と比較した結果を図-10に示す。推定値のばらつきが大きく, 実測値が0mmのものに対しても大きなひび割れが出ると予測したものが多くみられる。

3.2 万木らの式^{2)①}

万木らによる平均ひび割れ幅の推定方法として式(3)が提案されている。

$$W_{av} = 9.87 \times 10^{-3}B + 7.36 \times 10^{-3}L/H + 0.85 \times 10^{-3}f_c - 1.06 \times 10^{-1}p + 6.72 \times 10^{-3}\Delta T + 0.305 \times 10^{-3}C - 0.238 \quad (3)$$

B:部材厚 L/H:部材長高さ比 f_c :配合強度 p:鉄筋比
 ΔT :打ち込み温度-外気温 C:換算セメント量

式(3)の誘導に用いられた構造物は水路擁壁, 防液堤, 調整池導流壁, 洪水吐導流堤, カルバート側壁, モデル擁壁で, ブロック長は7.5~34m, 最大部材厚は0.8~1.5m,

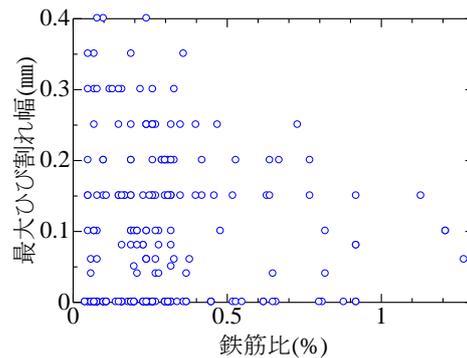


図-8 鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係(橋台)

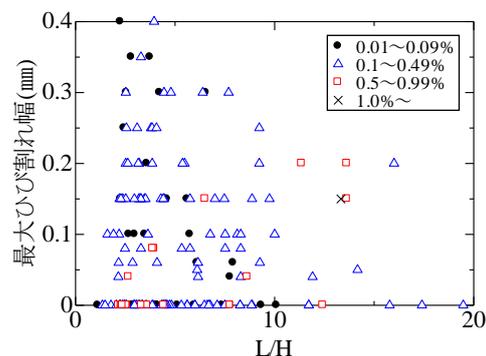


図-9 L/Hと最大ひび割れ幅の関係(橋台)

L/Hは1.7~10, 鉄筋比は0.08~0.66%, 単位セメント量は236~380kg/m³である。

この式に表-1に示す構造物のデータのうち, 式(3)の誘導に用いられた構造物と同じ条件のデータを代入し, 平均ひび割れ幅を求めた。そして, ACIでは平均ひび割れ幅の1.5倍を最大ひび割れ幅としているため, 式(3)で得られた値を1.5倍し, 最大ひび割れ幅を算定し, 実測値と比較した結果を図-11に示す。推定値は, 適用範囲内の場合の最も小さいもので0.21mm, 適用範囲外の場合においても0.13mm以下のひび割れを予測することは出来なかった。

3.3 万木らの式^{2)②}

万木らによる平均ひび割れ幅の推定方法として式(4)が提案されている。

$$W_{av} = 0.337 - 0.18F_s - 0.114p \quad (4)$$

F_s :温度ひび割れ指数 p:鉄筋比

ここで, 温度ひび割れ指数 F_s は通常の場合, 土木学会の標準示方書に記載されている式(5)である。

$$I_{cr}(=F_s) = 10/(R \times \Delta T_0) \quad (5)$$

R:外部拘束度 ΔT_0 :平均温度の降下量

式(4)の誘導に用いられた構造物の条件は式(3)と同様であり, この条件と同じデータを用いて3.2と同様に平均ひび割れ幅を求め, 最大ひび割れ幅を算定し, 実測値

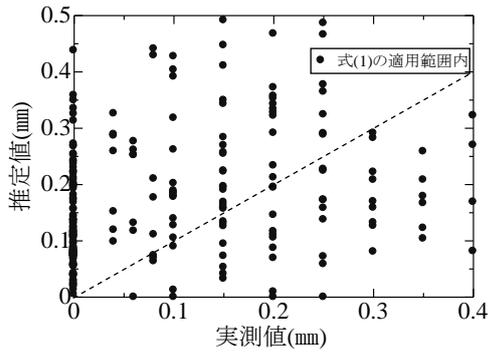


図-10 最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較
(小野らの式)

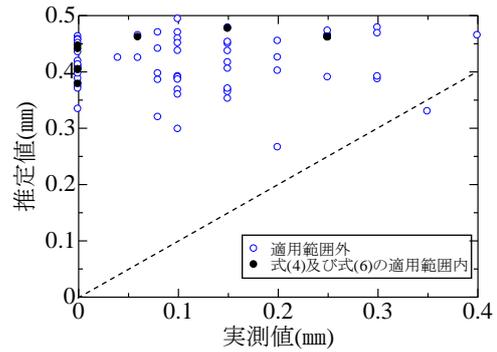


図-13 最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較
(万木らの式③)

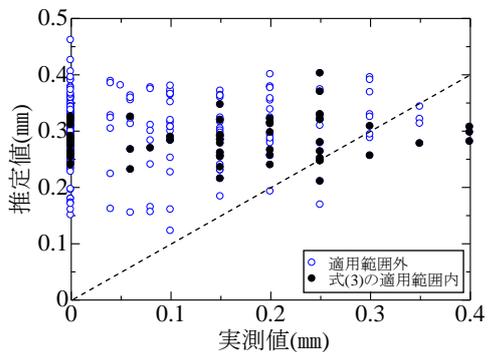


図-11 最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較
(万木らの式①)

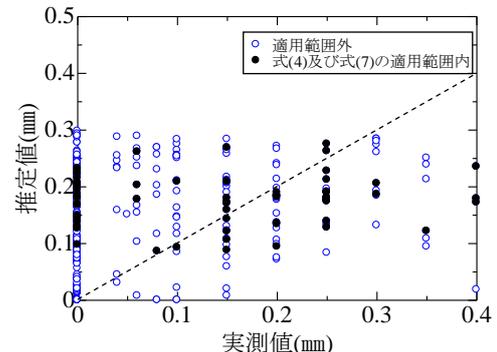


図-14 最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較
(万木らの式④)

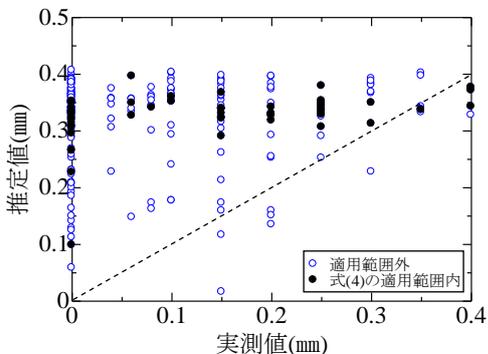


図-12 最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較
(万木らの式②)

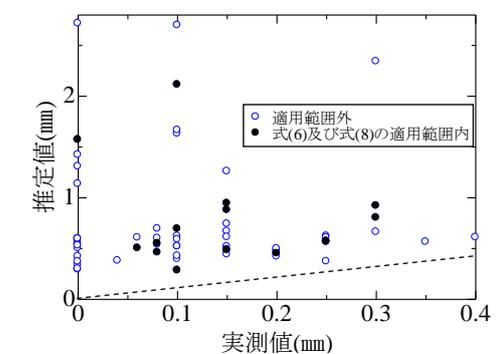


図-15 最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較
(丸山の式)

と比較した結果を図-12に示す。計算に用いる説明変数は外部拘束度、平均温度降下量、鉄筋比のみだが、図-11と同じような分布になった。しかし、図-11と比べ、推定値は全体的に大きくなっており、0.3~0.4 mmの範囲に集中して分布している。

3.4 万木らの式^{2)③}

万木らにより提案されている平均ひび割れ幅の予測式(4)の温度ひび割れ指数 F_5 に、溝洫により提案されている層状構造物の温度ひび割れ指数の簡易評価式⁴⁾、式(6)をあてはめて、ひび割れ幅を求めてみた。

$$I_{cr}(=F_5) = -0.0342T_a + 0.0103D - 0.0930Q_{\infty} + 0.149\alpha^{\beta} - 0.312 \log_{10}(H_R) + 0.142f_t - 0.236 \log_{10}(L/H) - 0.0767 \log_{10}(E_c/E_R) + 5.68 \quad (6)$$

T_a : 外気温 D : 部材厚 Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量

α^{β} : 上昇速度に関する定数 H_R : 放熱条件 f_t : 引張強度

L/H : 部材長さ高さ比 E_c/E_R : 拘束体と被拘束体の剛性比

式(6)の誘導に用いられたのは層状構造物で、打設温度5~33.5℃、リフト高さ0.5~4.45m、終局断熱温度上昇量38.5~46℃(単位セメント量200~277kg/m³)、上昇速度に関する定数0.14~1.12、放熱条件24~434、引張強度2.24

～3.34N/mm², L/H 0.2～31.4, E_c/E_r 1 以上である。

この式に代入するデータは表-1 に示す構造物のデータのうち、全てのデータが揃っている橋台たて壁のみを使用する(2.2(4)参照)。なお、この式の単位セメント量は実構造物に比べて低いため、打設管理記録には対応するデータがなかったことから、今回は 282～314 kg/m³ のものを使用することにしたが、その他の項目については式(4)式及び(6)式双方の式の誘導に用いられた構造物と同じ条件のデータを使用した。そして、3.2, 3.3 と同様に平均ひび割れ幅を求め、最大ひび割れ幅を算定し、実測値と比較した結果を図-13 に示す。適用範囲内の場合でも実測値が 0 mm のものに対して 0.37 mm 以上と予測している。適用範囲外の場合においても 0.26 mm 以下を予測することが出来なかった。

3.5 万木らの式^{2)④}

万木らにより提案されている平均ひび割れ幅の予測式(4)の温度ひび割れ指数 F_s に、大友により提案されている、自己収縮、乾燥収縮を考慮した場合のひび割れ指数評価式⁵⁾、式(7)をあてはめて、ひび割れ幅を求めてみる。

$$I_{cr}(=F_s) = 0.71 + 0.30(1/B) + 1.16(1/(L/H))^{1.2} - 0.60(T_0/20) + 0.53(T_s/20) \quad (7)$$

B: 壁厚 L: 壁長 H: 壁高 T₀: 打込み温度 T_s: 外気温

式(7)誘導に用いられたのはスラブの上に打設される壁状構造物である。式(4)及び式(7)の双方の式の誘導に用いられた構造物と同じ条件のデータを使用して、3.2, 3.3, 3.4 と同様に平均ひび割れ幅を求め、最大ひび割れ幅を算定し、実測値と比較した結果を図-14 に示す。他の式に比べ、推定値の最大値は全体的に小さいものの、実測値が 0 mm のものに対して大きなひび割れが出ると予測したものが多くみられた。適用範囲内の場合においても大きなばらつきがみられる。

3.6 丸山式⁴⁾

丸山による最大ひび割れ幅の推定方法として式(8)が提案されている。

$$W_c = (-0.071/p) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (8)$$

p: 鉄筋比 I_{cr}: 最小ひび割れ指数

式(8)の誘導に用いられたのは、底面で連続拘束を受ける壁状構造物の供試体である。ここで、最小ひび割れ指

数 I_{cr} を溝測により提案されている式(6)により求める。式(6)及び式(8)の双方の式の誘導に用いられた構造物と同じ条件のデータを使用して、3.1 と同様に最大ひび割れ幅を算定し、実測値と比較した結果を図-15 に示す。推定値は 0.3～0.8 mm の範囲に集中して分布している。適用範囲内の場合においても、実測値が 0 mm のものに対して 1.6 mm となり、全体的に過度に安全側に分布しており、実測値より下回るものはなかった。

4. まとめ

本研究では、山口県がデータベース化している「コンクリート構造物の打設管理記録」の分析を行い、そして、そのデータを用いて現在までに提案されているひび割れ幅の予測式について統計的に評価を行った。蓄積されている実構造物のデータにより、工事着手前の段階で把握できるサイズ等の諸条件だけでもある程度のひび割れの予測をし、打設時期を考慮したり、鉄筋比を増やしたりする等の対策を検討することは可能であることが確認できた。今回の予測式の結果では、説明変数が多いものと少ないもの間にあまり大きな違いがみられなかった。そのため、ひび割れの発生には様々な要因が関連しているが、影響を与えていると思われる要素を複数考慮したとしても、ひび割れ幅まで正確に予測することは非常に難しいといえる。

今後、より多くの正確な実構造物でのデータを収集・蓄積し、分析を行うことで、より簡易で精度の高いひび割れ幅の予測式を確立することを目指したい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2007
- 2) 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
- 3) 財団法人 山口県建設技術センター：<http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html>
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 山口県土木建築部：コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料，2007.10