

# 論文 設計段階における壁状構造物の初期ひび割れ幅の予測式の提案

中谷 俊晴\*1・田村 隆弘\*2

**要旨：**設計段階において橋台たて壁等の壁状構造物の初期ひび割れの発生を簡易かつ実用的な予測手法の提案をする。山口県コンクリート施工記録データの160基分の橋台たて壁のひび割れ状況を元にし、構造物の形状や単位セメント量、平年気温、鉄筋比といった設計段階に把握できるデータを元に、施工予定の構造物にひび割れ発生するか否かの判定、発生したひび割れの最大ひび割れ幅およびひび割れ本数の予測を試みた。その結果、鉄筋比の増加や打設間隔の短縮は、最大ひび割れ幅の抑制に効果的であることを確認した。

**キーワード：**マスコンクリート、コンクリート施工記録データ、橋台たて壁、最大ひび割れ幅

## 1. はじめに

新設構造物の初期段階に発生するひび割れが問題とされている。実構造物では、施工後、温度変化や自己収縮、乾燥収縮によるひずみが重ね合わさり、いわゆる非弾性収縮ひずみが生じ、また各リフトで底面において拘束を受けることとなる。この収縮と拘束がひび割れの原因となる。この初期ひび割れの多くが構造体断面を貫通して発生するため、ひび割れ幅が大きい有害なひび割れは、構造物の耐久性を著しく低下させてしまう。従って、初期ひび割れの発生の予測は、高耐久性を目指すコンクリート構造物の施工には必要不可欠となる。

初期ひび割れの発生の予測に関する研究は、長年にわたり土木学会や JCI 等で行われているが、ひび割れの発生確率や発生位置、そして、ひび割れ幅についても正確に予測できていないのが現状である<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。現在は FEM による温度応力解析手法によるものが主流だが、解析には多大な経験と時間が必要となり、専門の業者に委託するにも相応のコストが必要となるため、小規模な建現場では運用が難しいといった声も上がっている。さらに解析に実際の降雨などの環境条件を反映できず、実測値と解析結果の間で誤差が生じるなどの事例もある<sup>5)</sup>。

そこで、本研究では、設計・施工計画段階において、

簡易かつ高精度のひび割れの予測をしたいという建設現場のニーズに応えることを目的とし、山口県がこれまでに蓄積したコンクリート施工記録データ<sup>6)</sup>（以下、施工記録）に基づき、定量的なひび割れの発生の判定と、最大ひび割れ幅とひび割れ本数の予測式の提案をする。

## 2. 検討フロー

図-1 に本検討のフローチャートを示す。第一に対象構造物にひび割れが発生するか否かを判定する。ひび割れの発生の恐れがある場合には、第二に最大ひび割れ幅とひび割れ本数の算定を行う。もしも最大ひび割れ幅の予測値が許容値を上回った場合には、ひび割れの抑制に効果的で、設計段階において変更可能なファクターを修正する。これにより発生するひび割れ幅が許容ひび割れ幅以下に誘因されるという仕組みとなっている。

本研究の対象とした構造物は、打設条件が類似している構造物での検討とするために、高炉 B 種を用いた 160 基の橋台たて壁をひび割れ発生の判定の対象としており、さらにその内 51 基を最大ひび割れ幅とひび割れ本数の検討対象としている。また、ガラス繊維や誘発目地が用いられたものは、ひび割れの発現が特異的となるため除去した。検討対象とした構造物の範囲を表-1 に示す。

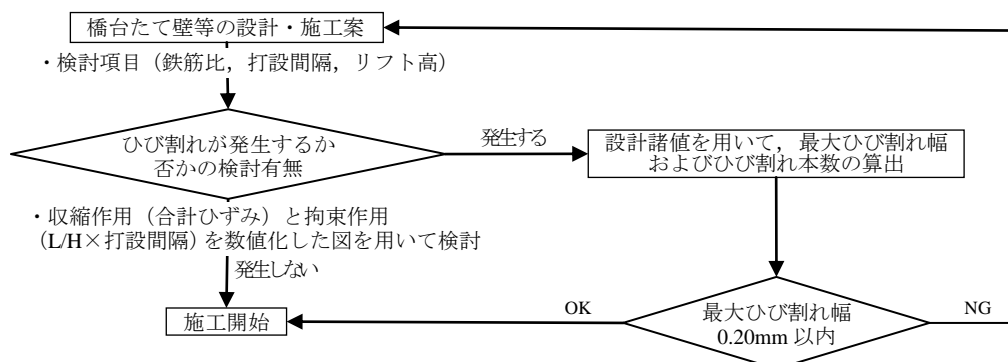


図-1 検討フローチャート

\*1 徳山工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (学生会員)

\*2 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科教授 博(工) (正会員)

表-1 検討対象にした構造物の範囲

高さ(m)	厚さ(m)	長さ(m)	最大ひび割れ幅(mm)	コンクリート打設温度(°C)	打設日の平年気温(°C)
0.6-4.7	1.2-3.0	3.1-25.0	0.04-0.40	6.0-29.0	4.1-25.7
鉄筋比(%)	圧縮試験強度(N/mm <sup>2</sup> )	使用セメント量(kg)	構造物内部最高温度(°C)	打設間隔(日)	体積表面比
0.04-0.64	30.5-37.9	7372-47876	51.3-75.5	3-139	0.44-0.86

3. ひび割れ発生の検討

3.1 概要

橋台たて壁等の壁式構造物に生じる初期ひび割れは、内部に生じるひずみと、底面からの拘束を起因する。そこで、ひび割れの発生を、「合計ひずみ」と「拘束作用」の観点から考察し、ひび割れの発生を実用的に判定する手法を考えた。

3.2 収縮作用について

(1) 合計ひずみの算定

以下に合計ひずみの算定式を示す。

$$\epsilon = \epsilon_t + \epsilon_{sh}(t_e) \quad (1)$$

$\epsilon$  : 合計ひずみ,  $\epsilon_t$  : 温度ひずみ

$\epsilon_{sh}(t_e)$  : 有効材齢 $t_e$ における自己収縮ひずみ(乾燥収縮も考慮する)

(2) 最高温度推定式

設計段階において温度ひずみを算出するためには、構造物の形状や配合条件、打設時期といった設計条件から構造物内部の最高温度を予め把握しておく必要がある。そこで、施工記録に明記された各構造物の最高温度を元にし、各パラメータとの相関性を検討した。

表-2に相関係数の一覧を示す。使用セメント量は構造物の発熱量、打設日の平年気温は構造物内部の初期温度、体積表面比は内部に蓄積された熱の発散をそれぞれ表現するものと考え、単回帰分析を行った。ここで、打設日の平年気温は、気象庁の過去のデータから施工現場に最も近い気象台における数値を使用した<sup>7)</sup>。そして、これらのパラメータを説明変数として重回帰分析を行った結果を図-2に示す。その結果、最高温度推定式の相関係数は0.93となり、設計段階で把握できるデータから、構造物内部の最高温度を概ね予測できることが分かった。

以下に最高温度の重回帰式を示す。

$$T_{max} = 26.04 - 9.623 \times 10^{-6} \times Ct + 1.033 \times T + 32.35 \times V/S \quad (2)$$

$T_{max}$  : コンクリートの最高温度推定値(°C)

$T$  : 打設日の平年気温(°C)

$V/S$  : 体積表面比

$$Ct = C \times V \quad (3)$$

$Ct$  : 使用セメント量(kg),  $C$  : 単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>),

$V$  : 構造物の体積(m<sup>3</sup>)

$$V/S = (H \cdot B \cdot L) / (2H \cdot B + 2H \cdot L + B \cdot L) \quad (4)$$

$H$  : 構造物の高さ(m),  $B$  : 構造物の厚さ(m),  $L$  : 構造物の幅(m)

(3) 温度ひずみの算定

温度ひずみの算定に用いるコンクリートの熱膨張係数は、JCIで規定された高炉B種の $12\mu$ を使用した<sup>2)</sup>。

$$\epsilon_t = \alpha(T_{max} - T) \quad (5)$$

$\alpha$  : 熱膨張係数 ( $12 \times 10^{-6}/°C$ )

(4) 自己収縮ひずみの算定

自己収縮ひずみの算定には、以下に示すJCIの高炉B種の算定式を使用した<sup>2)</sup>。なお、この算定式は、外気温度が20°C一定という条件下の実験式であるが、本検討では実構造物を対象としていることから20°Cとしている項を $T$ (平年気温)に変更した。また、材齢28日時点でのひずみとしている。

$$\epsilon_{sh}(t_e) = \epsilon_{sh,\infty} \cdot \beta_{sh}(t_e) \quad (6)$$

$\epsilon_{sh,\infty}$  : 自己収縮ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )

$\beta_{sh}(t_e)$  : 自己収縮ひずみの経時変化を表す関数

$$\epsilon_{sh,\infty} = 2350 \exp\{-5.8(W/C)\} + 80 \times [1 - \exp\{-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - T)^4\}] \quad (7)$$

$W/C$  : 水セメント比

表-2 最高温度推定式の相関係数一覧

パラメータ	相関係数
使用セメント量(Ct)	0.18
平年気温(T)	0.87
体積表面比(V/S)	0.45

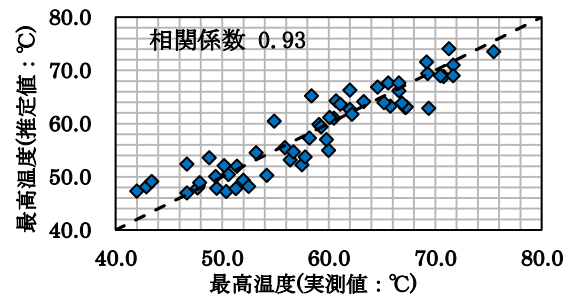


図-2 最高温度の実測値と推定値の関係

$$\beta_{sh}(t_e) = 1 - \exp\left\{-a_{sh}(t_e - t_{e, set})^{b_{sh}}\right\} \quad (8)$$

$a_{sh}$ ,  $b_{sh}$ : 自己収縮の進行速度を表わす関数

$t_{e, set}$ : 有効材齢 (高炉B種の場合, 0.30 日)

$$a_{sh} = 3.7 \exp\{-6.8 \times (\quad)\} \times (0.060T_{max} - 0.20) \quad (9)$$

$$b_{sh} = 0.25 \exp\{2.5 \times (W/C)\} \times (-0.0075T_{max} + 1.15) \quad (10)$$

### 3.3 拘束作用について

ひび割れは外部からの拘束がなければ発生しない。一般的に外部からの拘束は、拘束度として表わされているが、拘束を受ける部分が複雑であったり、旧リフトの弾性係数の経時的変化が含まれるため、拘束度を、明確な数値として表わすことは困難である。ひび割れ制御指針では、壁状構造物の拘束に影響するものは、構造体の幅(L)/高さ(H)と、旧リフトの弾性係数であることを指摘している。そこで、L/H と旧リフトの弾性係数に関係性のある打設間隔を乗算することで、拘束作用のパラメータとして考えることにした。ここで、打設間隔は、弾性係数の発現性に頭打ちがあることを考慮し、打設間隔が 28 日目までは線形として考え、28 日以降の構造物に関しては、全て 28 日一定とすることにした。

### 3.4 ひび割れの有無の判定

収縮作用となる構造体の合計ひずみを縦軸、拘束作用である L/H×打設間隔を横軸に表わした関係を図-3 に示す。図の右下に行くほど、収縮が大きく、かつ拘束が大きいのほどひび割れが発生しやすいという傾向が確認できる。また、図より合計ひずみが約 650 $\mu$  未満、L/H×打設間隔が約 30 以下の構造物では、ひび割れが発生していないことが確認できる。この傾向を踏まえると、ひび割れが発生しない領域(ホワイトゾーン)と図の色枠で囲まれたひび割れが発生する恐れがある領域(グレーゾーン)が存在することが分かる。

施工予定の構造物の合計ひずみと L/H、打設間隔を算出し、図-3 内にプロットすることで、構造物にひび割れが発生するかどうかを判定できる。

しかし、合計ひずみが約 640 $\mu$  以下、かつ L/H×打設間隔が約 150 以上の領域に関しては、施工記録のデータが存在していない。この範囲では、収縮作用が小さくとも拘束が大きければひび割れは発生することが考えられるため、今後も施工記録のデータ増加をし、判定基準の拡大を目指す。

## 4. 最大ひび割れ幅とひび割れ本数の検討

初期ひび割れの発生で最も懸念されるのは、その最大ひび割れ幅である。ひび割れの発生を防ぐことが最も望ましいことだが、前述のように確実にひび割れが発生すると予想される構造物については、発生するひび割れの幅を許容値以下に抑えることが必要である。

そこで、ひび割れの発生が予想される構造物について、設計段階で最大ひび割れ幅やひび割れ本数を予測し、その値が許容値を上回るのであれば、変更可能なパラメータを改めることで、最大ひび割れ幅を許容値以下に抑えることをこの予測式の狙いとしている。

### 4.1 既往のひび割れ幅予測式

これまでに多くの研究者が初期ひび割れ幅の予測式の提案を行っているが、あまり精度は高くなく、確立されていないのが現状である。以下の3つの初期ひび割れの予測式に表-1 に示す本稿で対象とする施工記録のデータを代入し、実測値と提案式の推定値を比較することで提案式の妥当性を検討した。

#### (1) 万木らの提案式<sup>1)</sup>

万木らが提案した初期ひび割れ幅の予測式を以下に示す。

$$W_{av} = 9.87 \times 10^{-3} B + 7.36 \times 10^{-2} \times L/H + 0.85 \times 10^{-3} f_c - 0.106 p + 6.72 \times 10^{-3} \Delta T + 0.305 \times 10^{-3} C - 0.238 \quad (11)$$

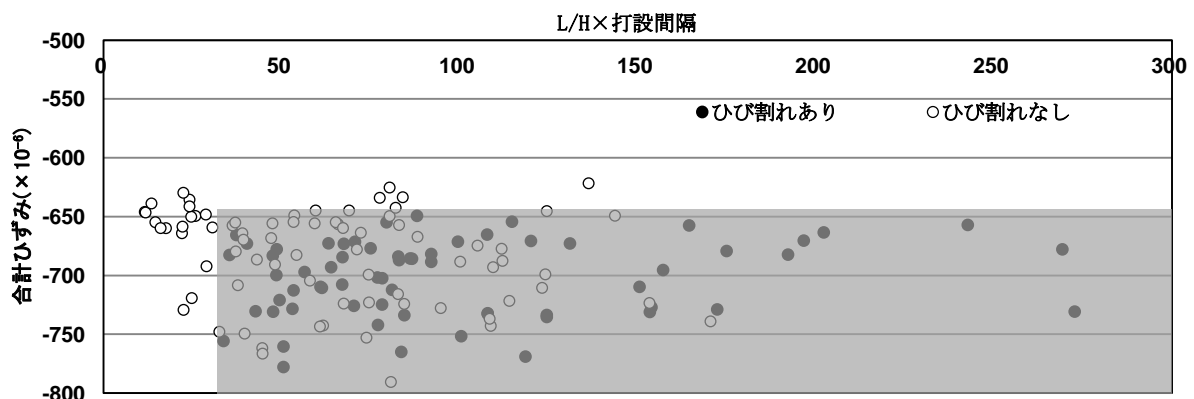


図-3 収縮作用と拘束作用の関係

B: 部材厚 L/H: 部材長高さ比  $f_c$ : 配合強度 p: 鉄筋比

$\Delta T$ : 打ち込み温度 - 外気温 C: 換算セメント量

この式の算出値に 1.5 を掛け合わせた最大ひび割れ幅の推定値と実測値の比較結果を図-4 に示す。算出値に 1.5 を掛けた理由は、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である。

図より、この式による推定値は相関係数 1 を示す点線より大きく離れ、実測値によらず、かなりバラつきがあることが確認できる。推定値が逸脱した理由として、この提案式は、水路擁壁やカルバート側壁などの様々な拘束状態となる構造物を含んだ重回帰式となっていることが原因と考えられる。また、この提案式では、打ち込み温度と外気温の事後の値を入力する式となっており、設計段階での予測はこれらの数値も予測値として仮定する必要がある。

### (2) ひび割れ制御指針における式<sup>2)</sup>

ひび割れ制御指針による初期ひび割れ幅の推定式を以下に示す。

$$I_{cr} = -0.0193T_a + 0.0028D - 0.0117Q_{\infty} + 0.0155\alpha^{\beta} - 0.0872 \log_{10}(H_R) + 0.476f_t - 0.165 \log_{10}(L/H) - 0.224 \log_{10}(E_c/E_r) - 0.285 \quad (12)$$

$T_a$ : 外気温 D: 部材厚  $Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量

$\alpha^{\beta}$ : 上昇速度に関する定数  $H_R$ : 放熱条件  $f_t$ : 引張強度

L/H: 部材長高さ比  $E_c/E_r$ : 拘束体と被拘束体の剛性比

$$W_{max} = 1.5 \times (-0.071/p) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (13)$$

p: 鉄筋比  $I_{cr}$ : 最小ひび割れ指数

また、推定値と実測値の比較結果を図-5 に示す。ひび割れ制御指針の提案式では、壁状構造物のひび割れ指数からひび割れ幅を算出するというフローになっている。図より、ひび割れ制御指針で提案された式は、設計段階で把握できる数値のみを使用するものの、推定値は実測値よりもかなり大きく上回っている。

### (3) 小野らの提案式<sup>1)</sup>

以下に小野らの提案式を示す。

$$W_{max} = K \times L \times R \times MAC \quad (14)$$

$$MAC = -5.62 \times 10^{-4} - 2.19 \times 10^{-5}x_1 - 5.48 \times 10^{-4}x_2 - 1.77 \times 10^{-2}x_3 - 2.44 \times 10^{-2}x_4 + 1.54 \times 10^{-3}x_5 + 7.00 \times 10^{-5}x_6 + 8.13 \times 10^{-3}x_7 - 3.71 \times 10^{-3}x_8 - 6.21 \times 10^{-3}x_9 \quad (15)$$

$x_1$ : 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

$x_5$ : スランプ  $x_6$ : 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

図-6 に小野らが提案する予測式に基づく推定値と実測値の比較結果を示す。前述の 2 つの式に比べ、推定値は実測値に近い値となっているが、推定値にはバラつきが大きいことが目立ち、決して精度がいいとは言えない。

## 4.2 ひび割れに影響を与えるパラメータ

上述のように、過去に提案された初期ひび割れの予測式は、ボックスカルバートや擁壁などの橋台たて壁と異なった拘束度となる構造物を含んだ重回帰式となっていることで、実測値との間に誤差を生じさせる。また、構造物の種類や部位ごとに考慮された重回帰式であるものの、施工後の数値が必要となる予測式になっているといった問題がある。したがって、設計段階における高精度な初期ひび割れの予測式は、それぞれの構造物の部位ごとに分析されることが望ましく、また、設計段階で把握可能な数値のみを用いる予測式でなければならない。

そこで本稿では、橋台たて壁を検討対象とし、初期ひび割れの予測式の構築を試みた。まず施工記録からひび割れが発生した 51 基分の構造物のデータを抽出し、構造物の設計条件と、最大ひび割れ幅およびひび割れ本数の相関性について分析した。

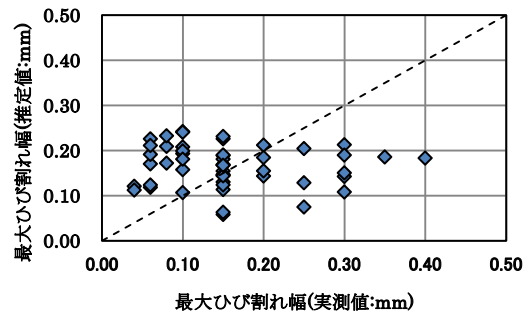


図-4 最大ひび割れ幅の関係(万木らの提案式)

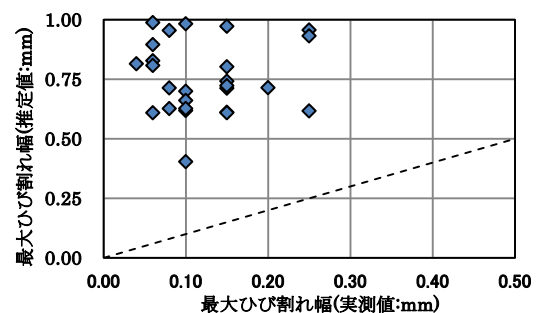


図-5 最大ひび割れ幅の関係  
(ひび割れ制御指針の提案式)

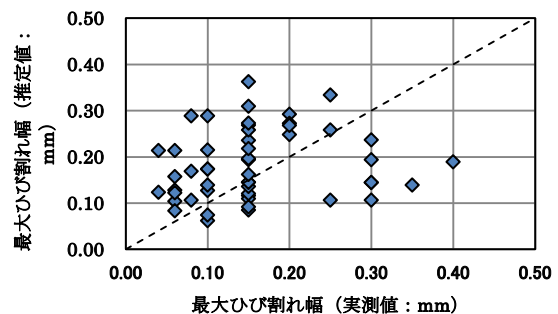


図-6 最大ひび割れ幅の関係(小野らの提案式)

表-3 相関関係一覧

項目	高さ	長さ	L/H	鉄筋比	打設間隔	最高温度推定値	平年気温
ひび割れ本数	0.504	0.796	0.311	0.391	0.131	0.334	0.279
最大ひび割れ幅	0.467	0.167	0.303	0.403	0.152	0.375	0.307

表-3 に設計段階で把握できるひび割れに影響を与える各パラメータと、最大ひび割れ幅およびひび割れ本数の相関係数の一覧を示す。

図-7 から図-13 に、設計段階で把握できる各パラメータと、最大ひび割れ幅およびひび割れ本数の関係性を示す。これらの結果より、概して、最大ひび割れ幅は、ひび割れ本数と負の相関関係となっていることが分かる。これは各パラメータがひび割れの分散性に影響を与え、ひび割れが複数本に分散することにより、1本あたりのひび割れ幅が抑制されたことが原因と考えられる。

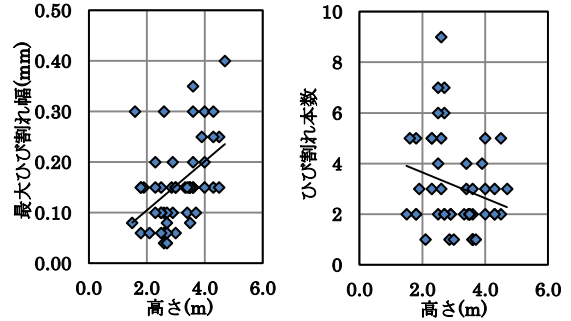


図-7 構造物高さHとの関係

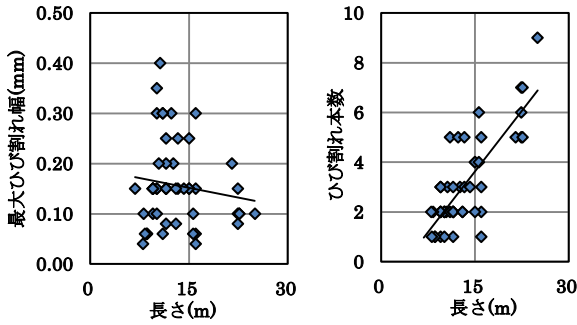


図-8 構造物長さLとの関係

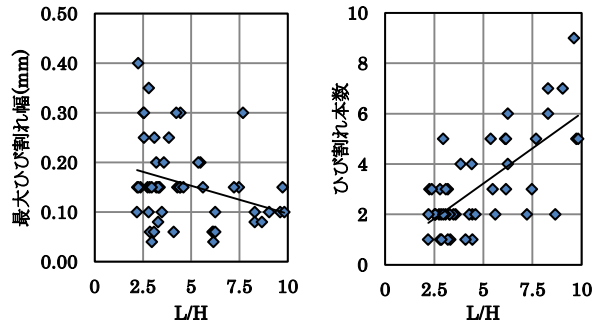


図-9 構造物の長さ高さ比(L/H)との関係

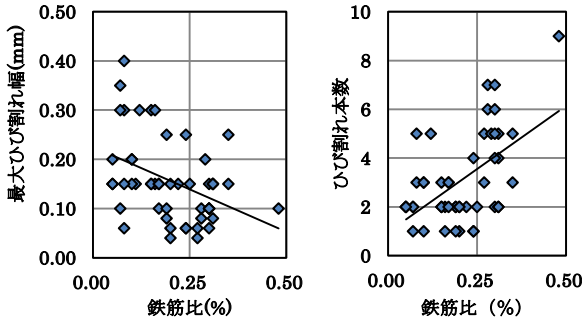


図-10 鉄筋比との関係

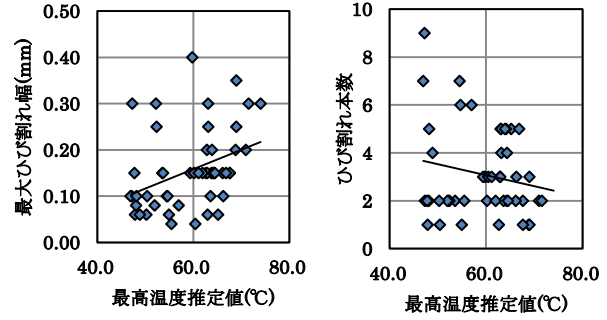


図-11 最高温度推定値との関係

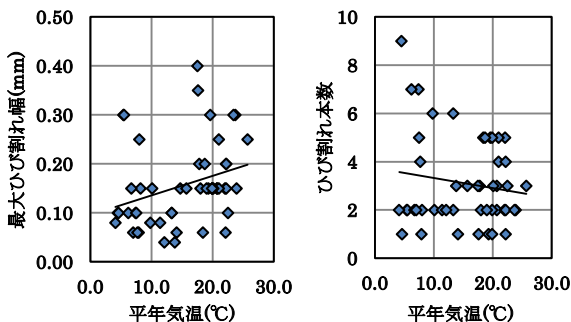


図-12 平年気温との関係

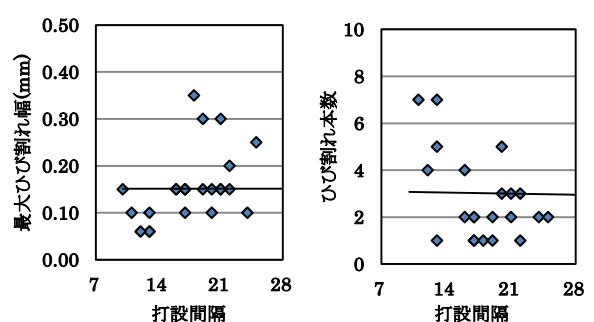


図-13 打設間隔との関係

(注：28日以降は除外している)

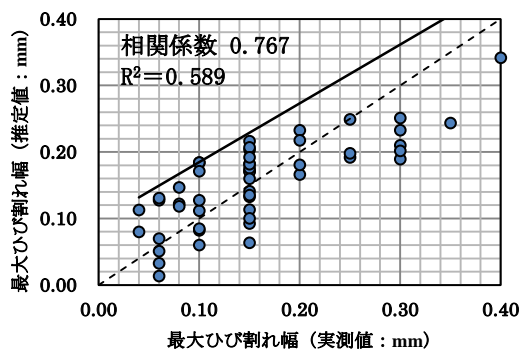


図-14 最大ひび割れ幅の実測値と推定値の関係

特に、これらの中でも高さや L/H、鉄筋比、最高温度推定値は 0.3 以上となり、相関性が高くなることが分かった。高さや L/H、鉄筋比は収縮や拘束に対する抵抗性、最高温度は収縮力に作用し、ひび割れの分散性に影響を与えていることが予想される。

#### 4.3 最大ひび割れ幅の予測式

表-3 の分析結果を元に各パラメータを用いて、重回帰分析を行った結果、最大ひび割れ幅推定式の重回帰係数は、0.77 となり、相関性が高いことが確認できた。

以下に最大ひび割れ幅の重回帰式を示す。また、本研究の最大ひび割れの予測式による推定値と実測値の関係を図-14 に示す。

##### (1) 重回帰式

$$W_{\max} = -0.5377 + 0.1438H - 1.618 \times 10^{-2}L + 6.172 \times 10^{-2}L/H - 0.4323p + 2.253 \times 10^{-3}D + 3.956 \times 10^{-3}T_{\max} - 1.672 \times 10^{-3}T \quad (16)$$

$W_{\max}$  : 最大ひび割れ幅推定値(mm)

H : 構造物の高さ(m)

L : 構造物の幅(m)

L/H : 構造物の幅と高さの比

p : 鉄筋比(%)

D : 打設間隔(28 日以上の場合は 28 日とする)

$T_{\max}$  : コンクリートの最高温度推定値 (°C)

T : 打設日の平年気温 (°C)

##### (2) 安全率の考慮

図-14 によれば、式(16)の算出式では、実測値よりも推定値の方が大きくなる構造物もある。そこで、式(16)に安全率として 1.5 を掛けることで、推定値が実測値内に収まるようにした。その安全側の推定値の近似曲線が図-14 中の実線である。

#### 4.4 ひび割れ本数の予測

以下にひび割れ本数の重回帰式を示す。ひび割れ本数を重回帰分析を行った結果を図-15 に示す。相関係数は 0.807 となった。

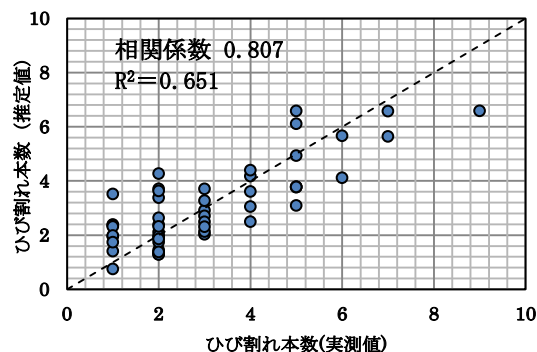


図-15 ひび割れ本数の実測値と推定値の関係

##### (1) 重回帰式

$$N = 3.292 + 0.1412H + 0.1837L + 0.3133L/H + 0.8372p - 0.02961D - 0.1035T_{\max} - 0.1415T \quad (17)$$

N : ひび割れ本数推定値

## 6. 結論

- (1) 構造物の形状や単位セメント量、打設日の平年気温を使用することで最高温度は概ね予測できる。
- (2) ひび割れの発生要因となる収縮と拘束の作用を、それぞれ合計ひずみと構造物の長ささと高さの比 (L/H) で表現し、図化すると、ひび割れが発生しない領域と、ひび割れの発生のある領域があることを確認した。
- (3) 最大ひび割れ幅とひび割れ本数に及ぼす影響を施工記録を用いて重回帰式をし、推定式を提案した。この提案式では、使用するデータが全て設計段階で把握可能な数値となっている。もし予測値が許容値を上回った場合には、適切な設計条件とすることで許容値内のひび割れ幅を目指すことが可能である。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 日本コンクリート工学協会：JCI規格集，2004
- 5) 中谷俊晴，田村隆弘，二宮純，細田暁：山口県コンクリート施工記録データに基づいた壁状構造物の初期ひび割れに関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，pp1147-1152，2015
- 6) 山口県建設技術センター：http://www.yama-ctc.or.jp
- 7) 気象庁：http://www.jma.go.jp