

# 論文 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の発生に関する解析的研究

中谷 俊晴<sup>\*1</sup>・田村 隆弘<sup>\*2</sup>・二宮 純<sup>\*3</sup>・細田 暁<sup>\*4</sup>

**要旨：**壁状構造物の初期ひび割れの発生をより実用的に、かつ精度よく予測する手法を見出すことを目的として、温度応力解析と実構造物の施工データの分析を行った。解析では、実施工した橋台と同様のモデルを作成し、実際に使用した材料や外気温の計測値を物性値に使用し、内部温度とひび割れ指数を実測値と比較した。解析の結果、温度は実測値とほぼ同等の値となったが、ひび割れの予測では、実測値と解析値に差異が生じた。また、併せて山口県のコンクリート施工データを利用して、コンクリートに生ずるひずみと拘束に関係する要素を考慮し、初期ひび割れの発生条件について考察した。

**キーワード：**マスコンクリート、温度応力解析、コンクリート施工記録データ、初期ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリート構造物の高品質化が求められる中で、今なお、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。特に壁式橋台では、構造体は底面、または、底面と両端が拘束されており、かつ橋脚等に比較して、鉄筋量が少ないため、比較的幅の広いひび割れが発生しやすい状態になっている。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るが、各リフトで底面において拘束を受けることとなる。この収縮と拘束が初期ひび割れの原因となる。この初期ひび割れは、多くが構造体の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、コンクリート構造物の初期ひび割れの発生の予測は、高品質の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、長年にわたり国内でも土木学会や建築学会、そして JCI 等で活発に行われているが、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>。大野らも温度解析によるひび割れの予測値と実測値の比較を行い、予測値に比べて実測値のひび割れ幅が小さくなることなどを確認しており<sup>5)</sup>、解析的手法の実構造物への適用性と精度については未だに課題を残している。

本研究では、壁状コンクリート構造物の初期ひび割れの発生をより精度よく、かつ実用的に予測することを目的として、まず実際に施工された橋台の温度とひび割れの実測値と解析値の比較をおこなった。また、山口県が

蓄積しているコンクリート施工記録データ<sup>6)</sup>を用いて、初期ひび割れの発生要因を検討した。

## 2. 実構造物の温度応力解析

### 2.1 概要

実際に施工され、ひび割れが発生した橋台の温度応力解析を試みた。温度応力解析には、3次元有限要素法が用いられた市販のソフト「ASTEAMACS」を使用した。解析対象は、平成25年に山口県内で新設された橋台とした。施工時の様子を写真-1に示す。施工時に橋台内部に10個の温度計を設置し、第1リフト(底盤)打設時から約2ヵ月間、図-1に示す位置で内部温度および外気温を測定した。解析では、打設日程や外気温など実際と同じの値を適用し、得られた結果を実測値と比較することで温度応力解析の精度を確認し、誤差の原因について考察した。

### 2.2 解析条件

解析対象とする橋台は、高さ2.0m、長さ14.0m、幅8.0mの底盤、その上部には高さ7.0m、長さ14.0m、幅



写真-1 橋台施工時の様子

\*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)

\*3 山口県 土木建築部 審議監 (正会員)

\*4 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授 博(工) (正会員)

表-1 解析に用いる地盤およびコンクリートの物性値

物性値	実構造物解析		変量解析	
	地盤	コンクリート	地盤	コンクリート
断熱温度上昇および水和	—	JCI2008	—	JCI2008
初期温度 °C	20	測定値	20	20
圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	JCI2008	JCI2008	JCI2008	JCI2008
引張強度 N/mm <sup>2</sup>	JCI2008	JCI2008	JCI2008	JCI2008
線膨張係数 μ/C	10	10	10	10
自己収縮	—	JCI2008	—	JCI2008
外気温 °C	測定値	測定値	20	20

2.4mのたて壁となっている。たて壁部分は3回に分けて打設された。解析モデルは2分の1対称モデルとし、内部鉄筋は設計図面に基づき考慮した。解析モデルおよび断面配筋図を図-1に示す。

コンクリートの初期温度、外気温は計測値を用い、実際の打設日程と同様の時刻歴で解析を行った。表-1にひび割れ解析で使用した物性値を示す。表中の「JCI2008」はJCIひび割れ制御指針(2008)を基に物性値を設定したことを示している。また、「実構造物解析」は2章での実構造物に対する解析、「変量解析」の表記の意味は3章で後述される変量解析に用いたことを指している。

2.3 解析結果

(1) 温度

図-2に構造物の実測温度、図-3に温度解析結果をそれぞれ示す。10点の計測点とも概ね解析値と一致しており、特に各リフトの中心温度はよく一致した結果となった。

表面付近での解析結果は実測値に対して若干誤差があったが、実構造物の表面に近い位置での温度は、コンクリートの外気温のみならず風雨の影響も受けることがその原因として考えられる。

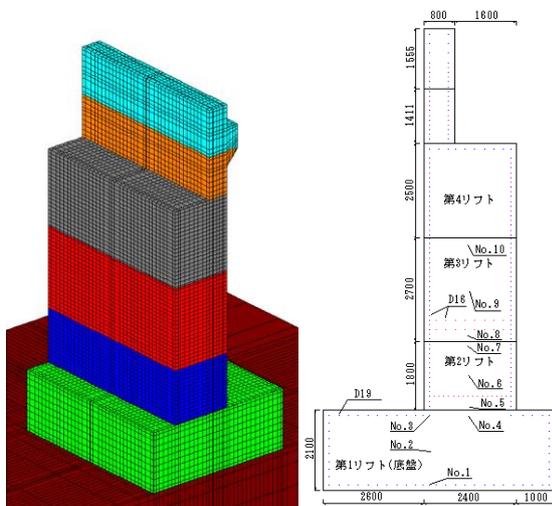


図-1 実構造物解析モデルおよび断面配筋図

(2) ひび割れ

1) ひび割れ指数とひび割れ発生状況

橋台に発生した実際のひび割れ状況を逐次弾性解析によるひび割れ指数から考察した。図-4に各リフトの最小ひび割れ指数と橋台中心部の最小ひび割れ指数分布図を示す。各リフトとも内部温度が外気温まで低下したところで最小ひび割れ指数を示しており、いずれのリフトにおいても中心部分のひび割れ指数が最も低い値となっている。

実際のひび割れの有無とひび割れ指数、ひび割れ指数

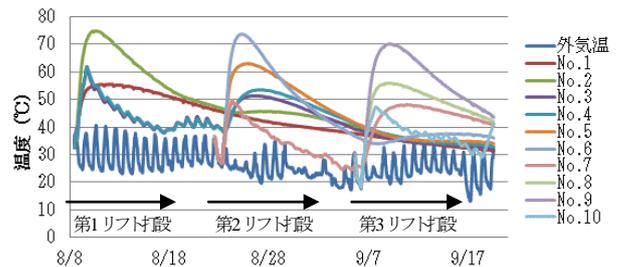


図-2 温度実測値の履歴

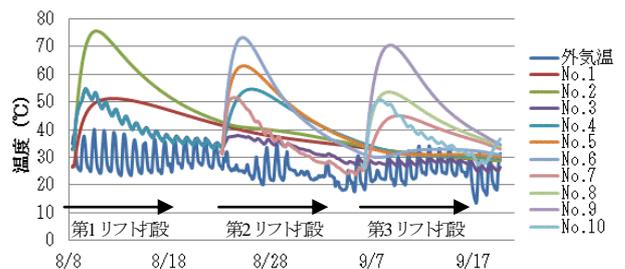


図-3 温度解析値の履歴

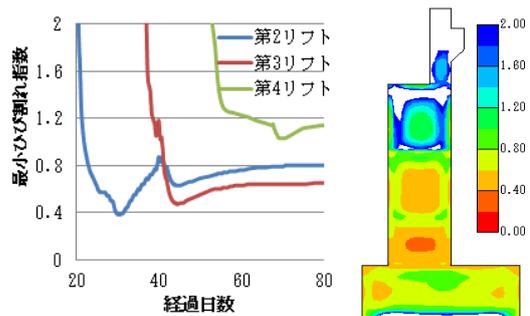


図-4 最小ひび割れ指数の履歴と分布図

から簡易的に求めたひび割れ発生確率を表-2に示す。実際の橋台には、図-5に示す通り第3リフトに貫通したひび割れが1本発生した。第3リフトのひび割れ発生確率は100%であり、ひび割れの発生予測はできたといえる。しかし、第2リフトでは、ひび割れ発生確率が100%という解析結果になったにも関わらず、実際にはひび割れは発生していない。

## 2) ひび割れ幅

解析では、第3リフト部分の中心部にひび割れが発生したと仮定して、解析ソフトのひび割れ幅解析手法<sup>7)</sup>に基づいた離散ひび割れモデルとして、ひび割れ幅の解析を行った。

表-2にひび割れ幅の実測値と解析値を示す。中心部でのひび割れを仮定した解析値は、実測値をやや上回る結果となった。この原因として、ひび割れがリフトの中心部ではなく、中心からおおよそ2m離れた位置で発生したことや、ひび割れ調査が目視(クラックスケール)に依るため、計測精度に問題があることが挙げられる。

## 3) ひび割れに関する考察

これらの解析と実測の差異の原因として、第2リフトの打設直後の降雨による影響が考えられる。図-6に気象庁<sup>8)</sup>のデータに基づいた山口市における降水量と湿度のグラフを示す。これによると、第2リフト打設後に、比較的多い降水になっており、湿度も100%に近い値となっている。また、1週間の型枠養生期間直後にも降水があり、湿度も高くなっている。一方、ひび割れが発生した第3リフトでは、コンクリートを打設後には降水がなく、湿度も比較的低い値となっており、乾燥を受けやすいことが確認できる。解析では、降雨による“温度降下”は考慮できるが、“外部からの水分供給”の影響は考慮できない。すなわち、第2リフトではコンクリートを打設後、温度変化や乾燥によって収縮する期間に外部から水分が供給されたことで、乾燥収縮や自己収縮による収縮力が低減したことから、実際のトータルでの収縮量は解析よりも小さい値となったことがひび割れが発生しなかったという要因の一つとして考えられる。

その他の理由としては、ひび割れ制御鉄筋の配置により応力が分散し、1本のひび割れが複数の微小なひび割れに分裂することでひび割れの幅が小さなものになり、目視の難しいひび割れとなったことも考えられる。

## 3. データに基づくひび割れ発生の検討

### 3.1 山口県施工記録データについて

山口県では、コンクリート構造物の品質向上を目的として、コンクリート工場の施工記録の蓄積している。この施工記録には、構造物の形状やコンクリートの物性値、打設時の温度、最高温度、そして、発生したひび割れのスケッチ図など工事に関する複数のデータが記録されている。山口県ではこれまでもコンクリート施工記録データを活用して、初期ひび割れの抑制の対策を講じているが、精度の高いひび割れ予測手法の確立には至っていない<sup>9)</sup>。ここでは、このデータに基づき初期ひび割れの発生に影響を及ぼす因子について検討した。分析の対象は、高炉セメントB種が使用された橋台たて壁計174基である。アラミド繊維やガラス繊維が用いられたものは除去している。構造物のデータの範囲を表-4に示す。

表-2 実測値と解析値のひび割れの比較

リフト	ひび割れ	ひび割れ指数	ひび割れ発生確率
2	なし	0.38	100%
3	あり	0.47	100%
4	なし	1.03	47%

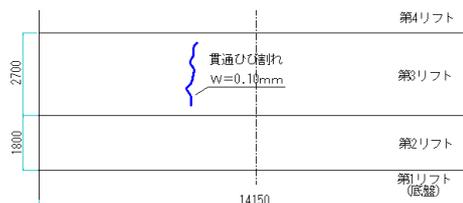


図-5 実際のひび割れ状況

表-3 実測と解析によるひび割れ幅

実測値	0.10mm
解析値	0.19mm

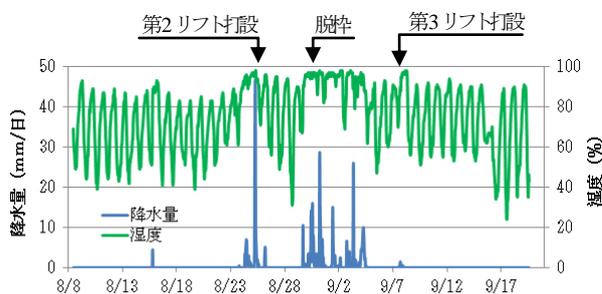


図-6 山口市における降水量と湿度

表-4 構造物のデータの範囲

高さ (m)	厚さ (m)	長さ (m)	セメント種類	コンクリート打設温度 (°C)
1.6-5.4	1.4-2.9	8.8-22.6	高炉B種	6.0-29.0
鉄筋比 (%)	圧縮試験強度 (N/mm <sup>2</sup> )	打設間隔 (日)	構造物内部最高温度 (°C)	
0.05-0.47	30.5-37.9	3-139	51.3-75.5	

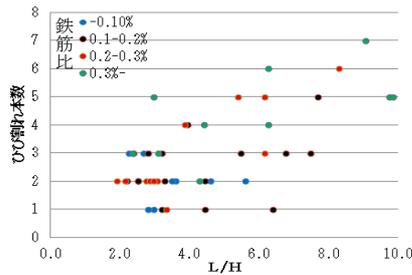


図-7 L/H とひび割れ本数の関係

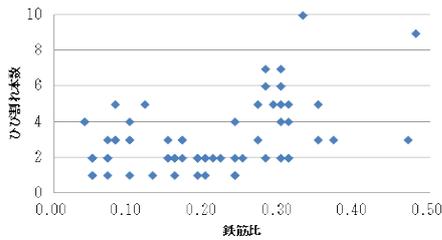


図-8 ひび割れ本数と鉄筋比の関係

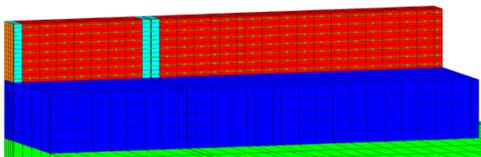


図-9 変量解析モデル

### 3.2 鉄筋比とひび割れ本数およびひび割れ幅との関係

#### (1) L/H とひび割れ本数の関係

図-7 に鉄筋比ごとに分類したひび割れ本数と  $L/H$  (長さ) $/H$  (高さ) の関係を示す。 $L/H$  が大きくなると、ひび割れ本数が増加している傾向が確認できる。図-8 にひび割れ本数と鉄筋比の関係を示す。これらより、鉄筋比が増加することで、ひび割れ本数が増加していることがわかる。 $L/H$  が大きくなると曲げによる外部拘束が大きくなるため、鉄筋によってこれが分散したことでひび割れ本数が増加したことが考えられる。

#### (2) 変量解析によるひび割れ幅の予測

解析モデルの形状は、図-9 に示すように長さ 15.5m、厚さ 1.0m、高さを 1.5m、2.5m、3.5m の 3 パターンと変化させた。ここで高さは、一つの要素の大きさは変えずに要素数を増やすことで対応した。鉄筋比は 0.07%、0.27%、0.60% の 3 パターンと変化させた。解析に用いた物性値を表-1 に示す。

図-10 にひび割れ本数と最大ひび割れ幅の関係を示す。ひび割れ本数が増加することで、最大ひび割れ幅が縮小している。実構造物ではひび割れが有害であるかどうかの判定は、ひび割れ幅を評価基準としている。適切な鉄筋量を内部に配置し、ひび割れを分散させ、最大ひび割れ幅を抑制することは構造物の耐久性を確保するための一つの有効な手法と言える。

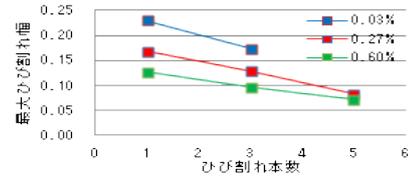


図-10 最大ひび割れ幅とひび割れ本数の関係

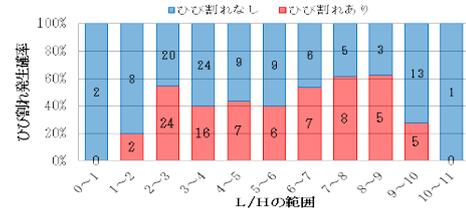


図-11 L/H の範囲ごとのひび割れ発生確率

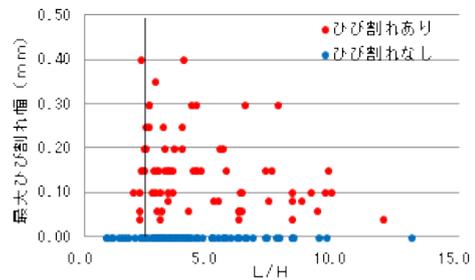


図-12 最大ひび割れ幅と L/H の関係

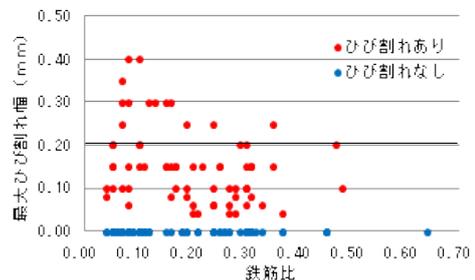


図-13 最大ひび割れ幅と鉄筋比の関係

### 3.3 ひび割れの発生とひび割れ幅に及ぼす因子

#### (1) 長さ と高さの比 (L/H)

初期ひび割れの発生は、構造物の長さ と高さの比 ( $L/H$ ) に関係があることが確認されている。図-11 に  $L/H$  の範囲ごとのひび割れの発生確率を示す。 $L/H$  が増加に伴い、ひび割れ発生確率が高くなることが予想されたが、実構造物のデータからは明確な傾向を得られなかった。

図-12 に最大ひび割れ幅と  $L/H$  の関係を示す。 $L/H$  が約 2.0 を超えると 0.20mm を超えるひび割れが発生しやすくなる。しかし、それ以上の領域では、逆に  $L/H$  が大きくなると、最大ひび割れ幅が縮小している。このことと、図-7 および図-8 より、ひび割れが発生した場合には、ひび割れ本数は増加 (ひび割れが分散) することでひび割れ幅は縮小することがわかった。

## (2) 鉄筋比

図-13に最大ひび割れ幅と鉄筋比の関係を示す。鉄筋比の増加に伴って、最大ひび割れ幅が縮小している。鉄筋比を0.3%程度にすると、最大ひび割れ幅は示方書に定められた許容ひび割れ幅である0.20mm以下の範囲に入ることが確認できる。

## (3) 最高温度

図-14に最大ひび割れ幅と最高温度の関係を示す。最高温度が高くなるとともに、最大ひび割れ幅が増大している。特に夏季の打設や構造物が大きい場合は、最高温度が上昇し、その結果、温度下降が大になり収縮力が大きくなっている。逆に冬季の打設や比較的小さな構造物の場合はひび割れは発生しない状況にあることが確認できた。そして、最高温度が約40℃付近を境に、ひび割れが発生するか、発生しないかが分かれていることが確認できる。

## (4) 打設間隔

図-15に最大ひび割れ幅と打設間隔の関係を示す。約20日間までの打設間隔であれば、ひび割れ幅は0.20mm以下にあることが確認できる。また、打設間隔が長くなると、最大ひび割れ幅が増大している。これらは、打設間隔の違いで旧リフトのコンクリートの弾性係数が変化することが影響していることが考えられる。すなわち打設間隔が短い間は旧リフトの弾性係数が小さいため、拘束度が低く、新設コンクリートに発生する外部拘束応力も小さくなることから、ひび割れが発生しにくく、また発生してもひび割れ幅が小さなものになったことが考えられる。

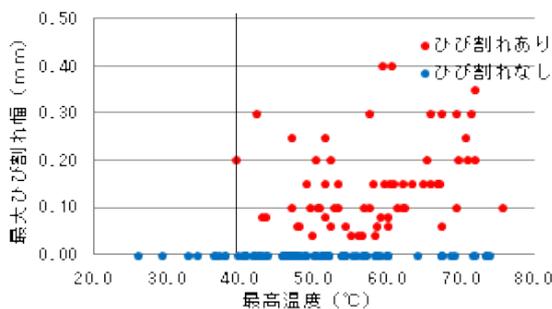


図-14 最大ひび割れ幅と最高温度の関係

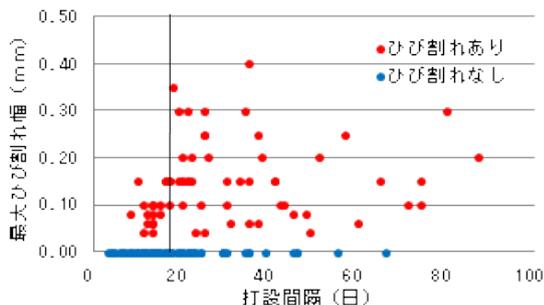


図-15 最大ひび割れ幅と打設間隔の関係

## 3.4 収縮と拘束の関係

### (1) 概要

以上の結果からひび割れの発生に大きく関与する要素として、構造物の内部温度や形状と先行リフトの弾性係数であることが確認できた。よって、コンクリート施工記録データに基づいて、温度や形状などひび割れの発生を、「合計ひずみ」および「拘束作用」の観点から考察し、ひび割れの発生を実用的に予測する手法を考えた。

### (2) 合計ひずみの算定

合計ひずみの算定式を以下に示す。

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_{sh}(t_e) \quad (1)$$

$\varepsilon$  : 合計ひずみ

$\varepsilon_t$  : 温度ひずみ

$\varepsilon_{sh}(t_e)$  : 有効材齢 $t_e$ における自己収縮ひずみ（乾燥収縮も考慮される）

$$\varepsilon_t = \alpha(T_{max} - T) \quad (2)$$

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

$T_{max}$  : コンクリートの最高温度 (°C)

$T$  : コンクリートの打設温度 (°C)

自己収縮ひずみの算定には、JCIの高炉B種の自己収縮ひずみ算定式を使用した。なお、算定式では、温度を20°C一定という条件下の式であるため、20°Cとしている項を構造物の打設初期温度と変更した。また、有効材齢20日時点でのひずみとしている。

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \varepsilon_{sh,\infty} \cdot \beta_{sh}(t_e) \quad (3)$$

$\varepsilon_{sh,\infty}$  : 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

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

W/C : 水セメント比

$$\beta_{sh}(t_e) = 1 - \exp\left\{-a_{sh}(t_e - t_{e, set})^{b_{sh}}\right\} \quad (5)$$

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

$$a_{sh} = 3.7 \exp\left\{-6.8 \times \left(\frac{W}{C}\right)\right\} \times (0.060T_{max} - 0.20) \quad (6)$$

$$b_{sh} = 0.25 \exp\left\{2.5 \times \left(\frac{W}{C}\right)\right\} \times (-0.0075T_{max} + 1.15) \quad (7)$$

### (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変化が含まれ、拘束度は明確な数値として表わすことが困難である。ひび割れ制御指針では、壁状構造物の拘束に影響するのは、構造体の断面形状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關係の深い打設間隔を乗算することで、拘束のパラメータとして表した。

#### (4) L/H×打設間隔と合計収縮ひずみの關係

図-16に各リフトごとの合計ひずみとL/H×打設間隔の關係を示す。図の右下に行くほど、収縮が大きく、かつ拘束が大きいほどひび割れが発生しやすいという傾向が確認できる。この傾向を踏まえて、ひび割れが全く発生していない領域を青色(ブルーゾーン)、確実にひび割れが生じている領域を赤色(レッドゾーン)、両者が混在した領域を灰色(グレーゾーン)でカテゴライズした。ここで用いたパラメータは、水セメント比や構造物の形状など設計段階で把握できるため、使用材料や構造条件が決まれば、この図よりひび割れが発生するか発生しないかを簡易的に予測することができる。

また、図には橋台の温度応力解析に使用した“解析対象構造物”の値を併せてプロットしている。なお、ひずみの算定に用いる最高温度は、温度解析結果を用い、その他の値は構造物の設計値を使用した。第2リフト、第3リフトの値ともひび割れの判断が難しいグレーゾーンに含まれている。これらのリフトが降雨による外部からの水分の影響によって乾燥収縮によるひずみが抑制されたと仮定した場合、ブルーゾーンに含まれる緑のプロット点となる。つまり、外部からの水分の影響によって、ひび割れが発生しなくなる可能性が高いということになる。

#### 4. まとめ

実際に施工された橋台の温度応力解析による結果と実測値との比較を行った。また、山口県施工記録データを

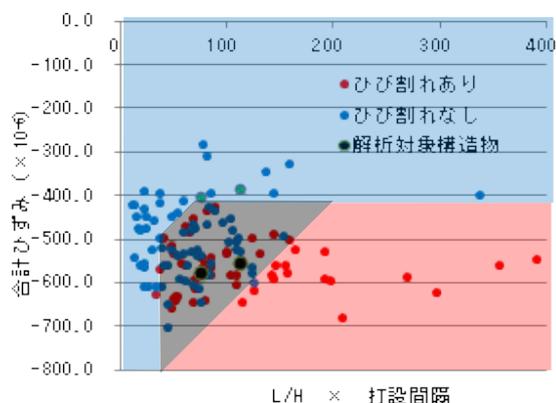


図-16 ひずみと拘束の關係

用いて、ひび割れの発生に影響を及ぼす因子を検討した。得られた結果より、以下に結論を示す。

- (1) 鉄筋比および L/H の増加によって、ひび割れ本数が増加することを確認した。また、ひび割れ本数が増加することで、最大ひび割れ幅が縮小することを解析と実構造物の施工記録データから確認した。
- (2) 施工記録データにより、ひび割れの発生には、最高温度や打設間隔が影響を与えることを確認した。合計収縮ひずみと L/H×打設間隔で表現した収縮と拘束の關係から、ひび割れが発生する領域、ひび割れが発生しない領域、両者が混在する領域を概ね把握することができた。
- (3) 今回解析対象とした構造物における実際のひび割れの発生と温度応力解析によるひび割れ発生確率との差異の原因は、降雨による影響が考えられる。外部からの水分の供給が初期ひび割れの発生の抑制に有効であるということは、施工後の養生が重要であることに一致する。コンクリート打設後の養生時に高頻度で散水を行うことや、型枠存置期間を長くすること、養生シートを用いて乾燥から防ぐことなどは、コンクリートを緻密にする効果のみならず、初期ひび割れ対策としても有効な手法である。

#### 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) 大野又念，細田暁：山口県の実構造物のデータベースの温度応力解析による分析，コンクリート工学年次論文集，pp1337-1342，2011
- 6) 山口県建設技術センター：http://www.yama-ctc.or.jp/
- 7) 計算力学研究センター：離散ひび割れモデルの作成について（改訂版），2011
- 8) 気象庁：http://www.jma.go.jp
- 9) 田村隆弘，稲津貴和子，澤村修司：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，コンクリート工学年次論文集，pp1331-1336，2011