

実構造物におけるコンクリートの 温度ひび割れの解析的研究

中谷俊晴^{*1} 田村隆弘^{*2}

Analytical Study on Thermal Crack with Actual Concrete Structure

Toshiharu NAKATANI^{*1} and Takahiro TAMURA^{*2}

Abstract The purpose of this research is to control the thermal cracks of concrete structures. The construction division of the Yamaguchi Prefecture stores the data of concrete construction projects. From this data, we investigated the relationships between a crack and the reinforcement ratio. Moreover, we analyzed the crack with temperature stress analysis software using the finite element method. Here, the temperature and the crack were analyzed by the same model in an actual structure and the results were compared. In the analysis model, the crack width was computed, while assuming the crack in the same position as an actual crack. The partial crack model proposed by the authors agreed well with the actual crack width.

Key Words: thermal crack, finite element analysis, crack width, crack index

1 はじめに

近年、コンクリート構造物のひび割れが問題となっている。マスコンクリートでは、建設初期段階で温度ひび割れが発生する。温度ひび割れとは、セメントの水和熱により、構造体は外部拘束を受けながら体積変化するため、引張応力によって発生するひび割れのことである。実構造物において、構造体は底面または底面と両端を固定されていることが多く、温度ひび割れが発生しやすい状態にある。温度ひび割れは構造物を橋軸直角方向に貫通するものが多く、長期的耐久性に大きな影響を与えるため、施工前の段階から十分なひび割れの対策をすることが重要となる。ひび割れの発生を防ぐことは技術的には可能であるが、実構造物で考えるとコストの面などから難しいといえる。これまで多くの研究者によって研究がなされているものの、ひび割れの発生確率やひび割れ幅を予測することは非常に難しいとされている^{1),2),3)}。また、現在では温度応力解析によるひび割

れ発現の可能性は比較的精度良く予測できるようになってきたが、ひび割れ幅や鉄筋等によるひび割れ分散効果を表現することは難しく、複雑な環境条件等が含まれることで実構造物での結果と一致しない場合も多くみられる。そのため、ひび割れからの劣化が問題とならないようなひび割れ幅の場合には、それを許容するという考え方がある。すなわち、ひび割れは発生することよりも、その幅を問題としている。従って、建設現場において、ひび割れ幅を制限値以内に留めることが要求されており、ひび割れ幅やひび割れ指数を容易に求める算定式の確立が望まれている。

本研究では、そうした建設現場のニーズに応えることを目的とし、温度ひび割れを解析的に調査した。我々は山口県が蓄積した工事データを分析し、打設間隔および鉄筋比の違いがひび割れに与える影響について確認した。また、実構造物と同じ解析モデルを作成し、温度やひび割れの解析値を実際の測定値と比較した。

^{*1} 環境建設工学専攻

^{*2} 土木建築工学科

表-1 構造物のデータ範囲

高さ(m)	厚さ(m)	幅(m)	セメント種類
1.2~5.4	1.2~3.0	6.7~31.1	普通 3 体, 高炉 B 種 89 体, 低発 1 体
鉄筋比(%)	試験強度(N/mm ²)	コンクリート打設温度(°C)	コンクリート最高温度(°C)
0.04~0.48	30.3~40.9	6.0~29.0	37.3~75.5

2 実構造物に発生したひび割れの状況

2.1 概要

実構造物のひび割れの状況を確認するために、山口県が蓄積したコンクリート工事のデータベース⁴⁾を使用した。橋台たて壁のうち、ひび割れが発生した93リフトを対象に、ひび割れと鉄筋比の関係を調査した。橋台は高さが高いため、複数のブロックに分け、打設する。文中では、底盤部分をスラブ、壁状部分のブロックをリフトと呼ぶこととしている。調査した構造物のデータを表-1に示す。

2.2 鉄筋比—合計ひび割れ幅

鉄筋比と合計ひび割れ幅の関係を図-1に示す。鉄筋比0.1%付近のリフトと鉄筋比0.3%付近のリフトのどちらも、合計ひび割れ幅は約0.05mm~約1mmと鉄筋比の増加による合計ひび割れ幅の変化はあまり見られなかった。

2.3 鉄筋比—最大ひび割れ幅

鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係を図-2に示す。鉄筋比が増加するにつれ、最大ひび割れ幅が小さくなることが確認できる。

2.4 鉄筋比—平均ひび割れ幅

鉄筋比と平均ひび割れ幅の関係を図-3に示す。平均ひび割れ幅は、式(1)により求める。

$$\text{Wave} = \Sigma W / n \quad (1)$$

Wave：平均ひび割れ幅

ΣW ：合計ひび割れ幅

n：ひび割れ本数

鉄筋比が増加するにつれてひび割れ本数が増加し、ひび割れが分散してひび割れ1本当たりの幅が抑制されていると考えられる。

2.5 鉄筋比—ひび割れ本数

鉄筋比とひび割れ本数の関係を図-4に示す。鉄筋比が0.1%付近のリフトは、ひび割れ本数が1本~5本で

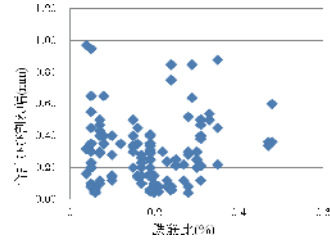


図-1 鉄筋比—合計ひび割れ幅

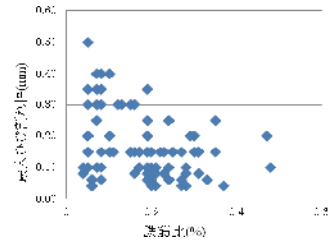


図-2 鉄筋比—最大ひび割れ幅関係

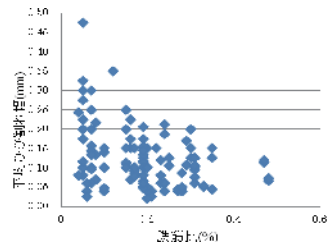


図-3 鉄筋比—平均ひび割れ幅関係

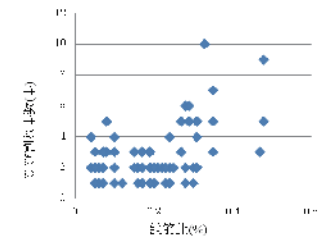


図-4 鉄筋比—ひび割れ本数関係

あるのに対し、鉄筋比が0.3%付近のリフトは1本~6本、鉄筋比が0.4%付近のリフトは3本~10本と鉄筋比が増加するにつれてひび割れ本数が増えており、ひび割れが分散している傾向がみられる。つまり、鉄筋比増加はひび割れの抑制に寄与することが言える。

3 温度応力解析

温度応力解析には、有限要素法 (FEM) を用いたコンクリート構造物専用の 3 次元温度応力解析用ソフトを使用した。構造物の形状、温度条件、力学条件を設定して、温度ひび割れについて解析的に検証した。使用したソフトの欠点は、ひび割れの発生本数、発生位置の予測ができないことである。そこで、図-6 に示すひび割れ要素⁹⁾を用いて、ひび割れを表現する。ひび割れは、ひび割れ要素の持つ引張強度を超える引張応力が発生した際、要素の剛性を低下させることで表現できる仕組みになっている。解析では、ひび割れが予想される位置にひび割れ要素を入力し、そのひずみからひび割れ幅を算定した。ひび割れ制御指針⁴⁾によれば、ひび割れの発生確率は、最小ひび割れ指数から算出できる。最小ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係を図-7 に示す。ひび割れ発生確率の算定式¹⁾、ひび割れ指数の算定式²⁾を式(2)、式(3)に示す。

$$P(I_{cr}) = 1 - \exp(- (I_{cr} / 0.92)^{-4.29}) \quad (2)$$

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t) \quad (3)$$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t におけるコンクリートの引張強度

$\sigma_t(t)$: 材齢 t におけるコンクリートの最大引張応力

$P(I_{cr})$: ひび割れ発生確率

$I_{cr}(t)$: 最小ひび割れ指数

3.1 打設間隔の違いによるひび割れの影響

3.1.1 概要

高さのある構造物では、構造体をいくつかのリフトに分けてコンクリートを打設するため、リフトごとにひび割れが生じている。そこで先に打ち込まれるリフトが後に打ち込まれるリフトのひび割れに及ぼす影響を打設間隔に着目して検討した。底版の打設時からリフト打設時の時間間隔を 1 週間、2 週間、4 週間の 3 パ

ターンで解析した。解析期間は、3 パターンともリフト打設時から 6 週間後とした。

3.1.2 解析条件

図-8 に解析モデルを示す。幅 5.0m、長さ 15m、高さ 1.5m の底版の上に打ち込まれたリフトの幅 1.0m、高さ 1.5m、鉄筋比 0.27% の構造物を解析対象とした。緑色の部分が地盤、青色の部分が底版、赤色の部分がリフトを示している。ひび割れの発生が一般的に予想される橋軸方向中央部にひび割れ要素を入力している。表-2 に物性値を示す。

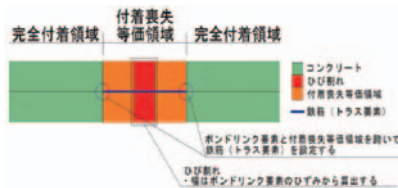


図-6 ひび割れ要素モデル

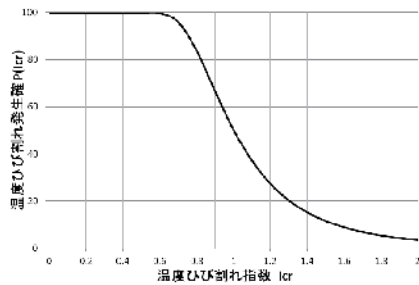


図-7 ひび割れ発生確率とひび割れ指数の関係

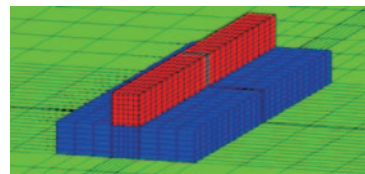


図-8 解析モデル

表-2 物性値

物性値	実構造物解析 (3.3)		変量解析 (3.1 および 3.2)	
	地盤	底版・リフト	地盤	底版・リフト
熱伝導率 W/°C	3.45	2.7	1.7	2.6
密度 kg/m ³	2650	2400	2100	2400
比熱 kJ/kg°C	0.79	1.15	1.4	1.2
断熱温度上昇量	—	JSCE 推奨式	—	JSCE 推奨式
初期温度	20	測定値	20°C	20°C
ヤング率 GPa	6000	土木学会示方書	500	200
圧縮強度 N/mm ²	JSCE 実験式	JSCE 実験式	22.6	JSCE 実験式
引張強度 N/mm ²	JSCE 実験式	土木学会示方書	1.96	土木学会示方書
線膨張係数 μ /°C	10	10	10	10
外気温°C	測定値	20	20	20

3.1.3 解析結果

図-9 にひび割れ指数履歴、図-10 にひび割れ幅履歴を示す。また、図-11 に底版と各打設間隔のリフトの中心部における温度と弾性係数の履歴を示す。これらの値は、底版中央上部およびリフト中央下部の表面位置における値である。点線矢印は、リフト中心部の温度が最高温度に達した時点での底版と各時間間隔の弾性係数の差を示している。

3.1.4 考察

図-9、図-10 より、時間間隔が短くなると、最小ひび割れ指数が高くなり、ひび割れ幅が小さくなっている。つまり、時間間隔を短くすると、ひび割れの発生確率は低減しているということであり、ひび割れが発生した場合のひび割れ幅も狭まっている。時間間隔を短くすることは、温度ひび割れの抑制に対して効果的であることがいえる。

図-11 より、時間間隔が長くなるにつれて、底版とリフトの弾性係数の差が大きくなっていることがわかる。底版の弾性係数が小さい間、つまり、底版のコンクリートが完全に硬化する前にリフトを打設することで、リフトに発生する引張応力が小さくなったのではないかと考える。以上より、短い時間間隔がリフトのひび割れの抑制効果に寄与する可能性があると考えられる。

3.2 鉄筋とひび割れ幅の関係

3.2.1 概要

前述に示す通り、実構造物に発生したひび割れは鉄筋比の増加に伴い、ひび割れ幅が小さくなる傾向を確認した。解析においても、鉄筋比の増加に伴うひび割れ幅の縮小を確認した。

3.2.2 解析対象

図-8 に示す解析モデルを解析対象とした。構造物内部に鉄筋を配筋し、11 パターンの鉄筋比を用いた。橋軸方向中央部にひび割れ要素を入力しているが、図-12 に示すように、リフトの下部から上部にわたる全部分にひび割れ要素を入力し、上下方向の貫通ひび割れを想定したモデル、および図-13 のようなひび割れ要素を入力し、部分的なひび割れを想定したモデルの2 ケースで解析した。

3.2.3 解析結果および考察

図-14 に、ひび割れ幅の解析結果を図-1 上にプロットしたグラフを示す。二つの解析結果ともに、鉄筋比の

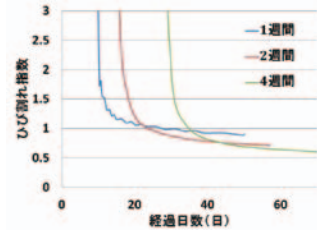


図-9 ひび割れ指数履歴

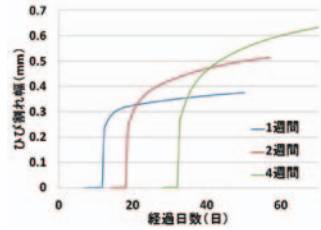


図-10 ひび割れ幅履歴

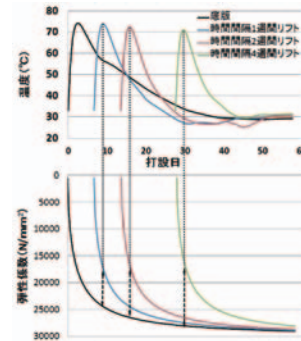


図-11 底版と各打設間隔のリフトの中心部における温度と弾性係数

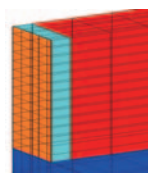


図-12 貫通ひび割れ
想定解析モデル

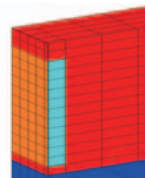


図-13 部分ひび割れ
想定解析モデル

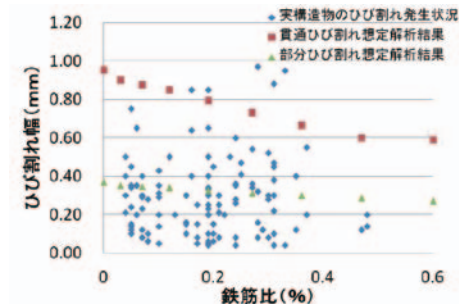


図-14 実際のひび割れ幅と解析結果

増加に伴って、ひび割れ幅の縮小が確認できたものの、実際の構造物のひび割れ幅は分散して、分布しているため、貫通ひび割れを想定した解析結果と同じとは言えない。貫通ひび割れを想定した解析は、下部のひび割れ要素が底版部分の要素によって固定されているため、上部のひび割れ要素は大きく変位する。変位が大幅に増大したことが貫通ひび割れを想定した解析結果に大きく影響したのではないかと考える。山口県工事データによれば、実際に発生するひび割れは部分的に発生することが多く、図-13に示すひび割れ要素の部位に発生することが多い。また、厚さ1mを越える大きな構造物は上下方向に貫通するひび割れは見られない傾向にある。

一方、部分ひび割れを想定した解析結果は、実際のひび割れ幅に比較的近い値となった。これらのことより、ひび割れ幅解析では、実際に発生するひび割れを想定したモデルで解析することを提案する。しかし、ひび割れ要素の位置および大きさによってひび割れ幅が大きく異なることが予想されるため、ひび割れ要素の入力方法は今後の検討課題になる。

3.3 実構造物解析

実構造物と同様の解析モデルを用いて内部温度とひび割れ幅の比較を行い、実構造物へ解析結果の適用が可能か確認した。

3.3.1 解析対象および条件

解析対象は県道山口宇部線工事に伴う橋台とした。長さ14m、幅8.0mの底盤に、その上部に厚さ2.4m、高さ7.0mの橋台たて壁部分が3回にわたる打ち込みで施工された。橋台施工時、各リフトの中心部に温度センサーを設置し、継続的に内部温度を計測した。

打設日程、コンクリートの初期温度および物性値、外気温は全て実際の計測値を用いて解析した。図-15に示す2分の1スケールの解析モデルとした。設計図面に基づき、鉄筋は同様の位置に入力している。物性値を表-2に示す。

3.3.2 温度解析および結果

図-16に構造物の計測温度、図-17に温度解析結果を示す。各リフトの温度が比較的一致していることが確認できる。しかし、外気との境界面に近い部分の温度や温度低下の勾配は異なっている。これは養生手段が異なったことや、送風など解析では表現できなかった

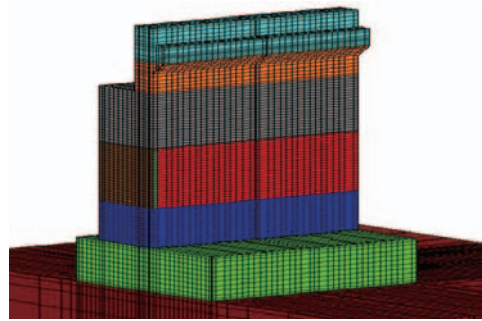


図-15 実構造物解析モデル

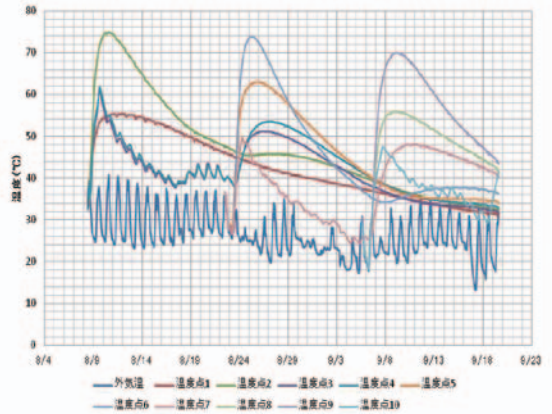


図-16 構造物内部温度実測値

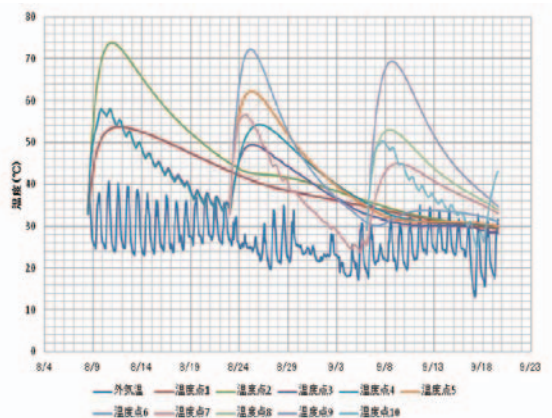


図-17 構造物内部温度解析値

ことにより、熱特性に影響したことが原因であると考えられる。

3.3.3 ひび割れ幅解析および結果

打設後27日目に第2リフトにひび割れが1本発生し

た。図-18 にひび割れ発生位置、ひび割れ幅を示す。ひび割れ幅解析は、第2リフトに貫通ひび割れを想定したケース、実際のひび割れの位置にひび割れ要素を入力したケースの2パターンで行った。表-3 にひび割れ幅の実測値と解析値を示す。橋台表面におけるひび割れ指数分布を図-19 に示す。



図-18 ひび割れ発生位置

3.3.4 考察

貫通ひび割れを想定したモデルの解析値は実測値に比べて、大きく異なっている。一方、実際のひび割れと同様の位置に入力したモデルの解析値は近い値となった。原因として、熱特性の差によることが考えられる。また、実際の構造物には目視が難しい小さな無数のひび割れが生じ、内部の応力が分散したのではないかと考える。応力が分散することにより、1本当たりのひび割れ幅が小さくなったことを原因として挙げる。

図-19によると、構造物中心部に近い部位はひび割れ指数が低い値となっており、構造物中心部と底版および、リフト隅角下部では、指数が極めて低くなっている。地盤、または底盤からの拘束力を受けながら、膨張収縮の現象が起こり、応力が発生したことを原因と考える。

第1リフト中心部の最小ひび割れ指数は0~0.5である。つまり、ひび割れの発生確率が極めて高いにも関わらず、実際にはひび割れは発生していない。また、たて壁部分では、全てのリフトの最小ひび割れ指数が1を下回っており、ひび割れ確率が50%以上であるが、第2リフトにしかひび割れは生じていない。解析結果と実際の状況では、ひび割れの結果が大きく異なることから現時点で実構造物のひび割れ解析の適用は不可能である。

4 結論

- 1) 山口県工事データ調査および解析結果より、鉄筋比の増加に伴い、ひび割れ幅が抑制されること、また、ひび割れが複数本に分散していることを確認した。
- 2) いくつかのブロックに分けてコンクリートを打設する際は、前のブロックの打設時と後のブロックの打設時の間隔が短いほうが後のブロックのひび割れを抑制することができる。
- 3) ひび割れ幅を解析する際、ひび割れ要素は下部から上部まで貫通させずに、実況に基づいたひび割れの発生が予想される部位にひび割れ要素を設け、ひび割れ幅を解析する手法が望ましい。

表-3 ひび割れの実測値および解析値

実測値	0.10mm
貫通ひび割れ想定解析値	0.61mm
部分ひび割れ想定解析値	0.21mm

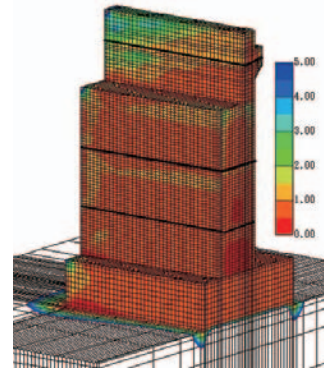


図-19 実構造物ひび割れ指数分布図

- 4) 実構造物の温度解析は、実測値と解析値は比較的一致した。しかし、ひび割れ幅解析では、ひび割れ幅が実測値と一致しない。現段階では、実構造物のひび割れ幅の予測は難しいことがいえる。

謝辞:本研究を行うにあたり、山口県土木建築部の方々には実構造物温度計測でご協力いただきました。関係の皆様へ心から謝意を表します。

文献

- 1) 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。
- 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に関する研究委員会 報告書，2006。
- 3) 日本コンクリート工学協会：JCI規格集，2004。
- 4) 山口県建設技術センター：
<http://www.yamactc.or.jp/data/index.html>
- 5) 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。