

論文 マスコンクリートのひび割れ制御指針における温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係式に関する考察

宮田 佳和*1・河野 広隆*2・服部 篤史*3

要旨：マスコンクリートの温度ひび割れ制御は、コンクリート構造物の耐久性を確保するうえで検討すべき項目の一つであると言え、耐久性に関連する温度ひび割れ幅の予測精度向上は合理的設計のためにも必要となる。本論文では、その精度向上に資するため、解析により予測した温度ひび割れによるひび割れ幅と、実施工で発生したひび割れ幅の比較を行った。その結果、本論文の調査の範囲では、示方書に従った施工を行った場合、2016 指針から求めた予測ひび割れ幅は実測のひび割れ幅よりも大きく算出され安全側の結果となり、実施工でのひび割れ幅は施工条件の影響を受けることが示唆された。

キーワード：マスコンクリート、温度ひび割れ指数、ひび割れ幅

1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ制御は、コンクリート構造物の耐久性を確保するうえで検討すべき項目の一つであると言える。そのため、わが国では 1986 年に「マスコンクリートのひび割れ制御指針」が発刊され、その後、温度ひび割れ制御に関わる計画、設計、材料、施工技術が目覚ましく進歩したことを受け、改訂版の「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008（以下、2008 指針）」が発刊された。また、2016 年には、制御の考え方や手順は 2008 指針を踏襲し、最新の情報、技術を取り入れた改訂版（以下、2016 指針）が発刊された。

指針では温度ひび割れ発生確率曲線が与えられているが、これは指針に定められる標準的な条件で解析を行った際の温度ひび割れ指数と、実際の 65 件、724 の部材におけるひび割れ発生の有無をワイブル分布として回帰した曲線である。温度ひび割れの発生確率に関しては、施工管理によるばらつき等の影響により変化しうることが報告されており（例えば¹⁾、²⁾）、発生するひび割れ幅に関しても、同様にばらつきの影響を受けることが考えられる。

本論文では、解析により予測した温度ひび割れによるひび割れ幅と、実施工で発生したひび割れ幅の比較を行い、温度ひび割れ幅予測の精度向上に資することを目的とした。

2. 指針の改訂概要

2008 指針から 2016 指針での主な改訂点は①コンクリートの若材齢物性の設計用値の精度向上と適用範囲の拡張、②温度ひび割れ指数の簡易評価式および最大温度ひ

び割れ幅の予測式の見直し、③エトリンタイトの遅延生成（Delayed Ettringite Formation ; DEF）によるひび割れの防止に関する条文の規定と、④DEF 照査のための最高温度の簡易予測式の提案、⑤海外工事に資するための温度ひび割れ制御対策（断熱温度上昇の簡易推定法など）などの技術資料の充実等である。

ここで②に関して、温度ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係式は 2008 指針の式 (1) から 2016 指針の式 (2) へと改められた。これらの式は、外部拘束が卓越し、内部拘束、乾燥の影響を受ける実大壁構造モデルの実験結果に基づいて、温度ひび割れ指数の関数として定式化されたものである。

$$w_c = \gamma_a \left(\frac{-0.071}{p} \right) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (1)$$

$$w_{cal} = \gamma_a \left(\frac{-0.141}{p} + 0.0938 \right) \times (I_{cr} - 1.965) \quad (2)$$

ここで、 p ：鉄筋比は適用範囲は 2008 指針で 0.2~0.9%、2016 指針で 0.25~0.93% と異なるものの内容はほぼ一致しており、また、 I_{cr} ：温度ひび割れ指数（適用範囲 1.85 以下）に関しては定義は一致している。しかし、式の各係数と γ_a ：温度ひび割れ幅を評価するための安全係数に関しては 2008 指針と 2016 指針で異なっており、2008 指針では γ_a は構造物の要求性能に応じて 1.0~1.7 とされていたが、2016 年指針では 1.0 とされている。

この理由として、文献 3) によれば、2008 指針では部材厚さの異なる試験体（30cm と 1m）の最大ひび割れ幅から予測式を提示し、部材厚 1m の試験体の最大ひび割れ幅が、部材厚 30cm の試験体の 1.7 倍大きかったことから、こういったばらつきを考慮するための安全係数とし

*1 清水建設株式会社 関西支店土木技術部 工修（正会員）

*2 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 教授 工博（正会員）

*3 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 准教授 工博（正会員）

て γ_a を定めていたが、実務においてはこの安全係数がほとんど考慮されず、トラブルの元となったという情報があり、2016 指針では部材厚 1m の試験体のみでのデータで予測式を再構築したとされている。最大ひび割れ幅は、鉄筋比が同じであってもひび割れの分散に依存し、ひび割れの分散は鉄筋径や部材厚に依存することは知られているが、2016 指針の改訂では鉄筋間隔が密な壁厚 30cm の結果を廃し、安全側に評価する方向の改訂と言える。

3. 実施工との比較

2. の通り、2016 指針では壁厚 1m の試験体のひび割れ幅から予測式を導いているため、壁厚 1m 程度の実施工のデータを対象に比較を行うこととした。

対象とした構造物は表- 1 に示す 6 件、23 部材で壁厚は 0.9~1.35m であり、鉄筋比も指針の適用範囲である 0.25~0.93% となっているものを選定した。施工は土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）に従った標準的な方法で行われた。これらの構造物はいずれも事前の解析では 2007 年版示方書、もしくは 2008 指針に従ってひび割れ指数 1.0 程度、ひび割れ幅 0.2mm 程度を目標としていた。

図- 1 に 2016 指針、および、2008 指針による予測ひび割れ幅と実測ひび割れ幅の比較を示す。今回調査した範囲では、実測のひび割れ幅は予測ひび割れ幅より小さくなった。この原因としては、一つは施工前の解析では 2007 年示方書、もしくは、2008 指針に従ってひび割れ幅を予測して 0.2mm 程度とすることを目標としていたが、2016 指針で予測ひび割れ幅が大きくなる改訂が行われたことが挙げられる。また、もう一つの原因として、

予測式の算出根拠となった試験体の実験では打設後 46 ~64 時間で脱型されたため、今回の標準的な施工方法よりは乾燥の影響を受けていたことも考えられる。このように、施工条件（特に、養生等の施工条件）が実際に発生するひび割れ幅に与える影響は少なくないと言える。

今回の調査で対象とした部材の数は決して多くはないが、ひび割れ誘発目地を用いた部材では、ひび割れ指数 1.0 程度、すなわち、ひび割れ発生確率 50% となっている部材でも、そのほとんどで「ひび割れなし」となっており、このことから既往の研究と同様に、温度ひび割れ発生確率曲線は施工によるばらつきや施工方法により影響を受けることが示唆される。

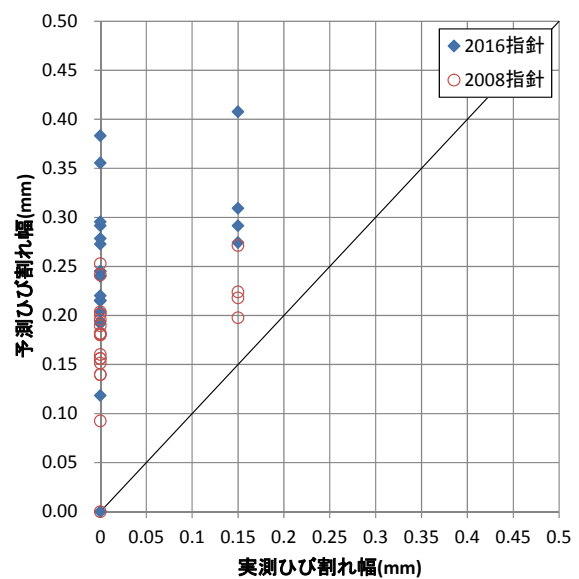


図- 1 予測ひび割れ幅と実施工の比較

表- 1 温度ひび割れ幅の予測値と実施工の比較

No.	種類	底板厚 (mm)	壁厚 (mm)	リフト	打込み高さ (m)	延長 (m)	配合	混和材	ひび割れ誘発目地	ひび割れ指数	鉄筋比 (%)	ひび割れ幅 (mm)		備考
												予測値	実測値	
1	U型擁壁	1350	1350	1	1.7	20.0	30-8-20N	-	5mピッチ	0.97	0.28	0.41	0.15	
2	ボックス	1200	1100	1	3.0	12.3	30-8-20BB	-	-	1.01	0.37	0.27	0.15	マスコン用BB
3	水槽①	1200	950	1	1.0	15.8	24-12-20L	膨張材	6mピッチ	2.09	0.30	0.00	なし	
4			950	2	2.5	15.8	24-12-20L	-	6mピッチ	1.45	0.30	0.19	なし	
5			950	3	2.0	15.8	24-12-20L	-	6mピッチ	1.24	0.30	0.27	なし	
6	水槽②	1500	1000	1	1.5	19.0	24-12-20L	-	6mピッチ	1.23	0.38	0.20	なし	
7			1000	2	2.2	19.0	27-12-20M	-	6mピッチ	1.13	0.33	0.28	なし	
8			1000	3	1.6	19.0	24-12-20L	-	6mピッチ	1.39	0.33	0.19	なし	
9			1000	4	3.6	19.0	24-12-20L	-	6mピッチ	1.61	0.33	0.12	なし	
10			1000	5	1.2	19.0	24-12-20L	-	6mピッチ	1.27	0.35	0.21	なし	
11			1000	6	1.5	19.0	24-12-20L	-	6mピッチ	1.16	0.39	0.22	なし	
12	水槽③	1500	950	1	1.5	23.6	24-12-20L	-	6mピッチ	1.15	0.25	0.38	なし	
13			950	2	2.2	23.6	27-12-20M	-	6mピッチ	1.19	0.30	0.29	なし	
14			950	3	1.6	23.6	24-12-20L	-	6mピッチ	1.38	0.30	0.22	なし	
15			950	4	3.6	23.6	27-12-20M	-	6mピッチ	1.18	0.30	0.30	なし	
17			950	6	1.5	23.6	24-12-20L	-	-	1.02	0.30	0.36	なし	
18	放水路	1400	1000	1	2.3	30.0	30-12-25BB	膨張材	5mピッチ	0.81	0.39	0.31	0.15	
19			1000	2	3.0	30.0	30-12-25BB	膨張材	5mピッチ	1.05	0.39	0.24	なし	
20			1000	3	2.4	30.0	30-12-25BB	膨張材	5mピッチ	1.05	0.39	0.24	なし	
21			900	1	2.3	30.0	30-12-25BB	膨張材	5mピッチ	0.72	0.43	0.29	0.15	
22			900	2	3.0	30.0	30-12-25BB	膨張材	5mピッチ	0.94	0.43	0.24	なし	
23			900	3	2.4	30.0	30-12-25BB	膨張材	5mピッチ	0.94	0.43	0.24	なし	

4. 逆解析により求めた予測ひび割れ幅と実測値の比較

3. で予測ひび割れ幅と実測ひび割れ幅が一致しなかった理由として、解析で求めた温度ひび割れ指数が実施工時の温度ひび割れ指数（実際の発生応力と引張強度の比）と異なっていたことも原因と考えられる。2016 指針における設計用値はあらゆる材料の平均的な値であり、使用する材料によって各種物性値は異なる。

ここでは、温度計、有効応力計等を内部に設置した壁状構造物に対して逆解析を行ってひび割れ指数を求め、そのひび割れ指数から算出された予測ひび割れ幅と2016 指針による標準的な解析で求めた予測ひび割れ幅を比較する。

4.1 計測概要

部材寸法、施工時期、配合、および、計測器の設置場所を図- 2 に示す。壁にはひび割れ誘発目地が 5m ピッチで設置されている。計測は温度、有効応力、有効ひずみ、無応力ひずみについて行い、計測は、壁部の 1 リフト目（膨張材使用）および 2 リフト目（膨張材なし）で行った。計測位置は、事前に行った標準解析により温度および応力が最大となる位置とした。また、同配合の圧縮強度(図- 3)、割裂引張強度(図- 4)、静弾性係数(図- 5)、自己収縮ひずみ、膨張ひずみ（膨張ひずみは 1 リフト使用分のみ）の室内試験を行い、事後解析に物性値を使用した。なお、自己収縮ひずみと膨張ひずみの試験は構造物内と同じ温度履歴を与えて無拘束で実施した。

4.2 計測結果の評価

1 リフトの計測結果を図- 6 に、2 リフトの計測結果を図- 7 に示す。有効応力計の結果から、1 リフトは材齢 3

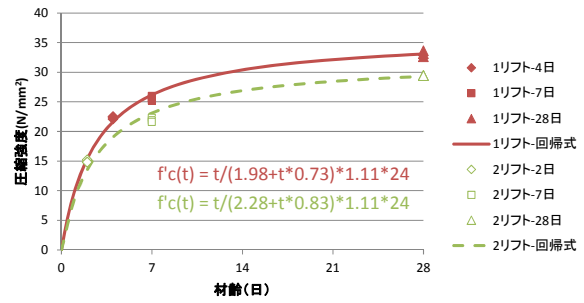


図- 3 圧縮強度試験結果

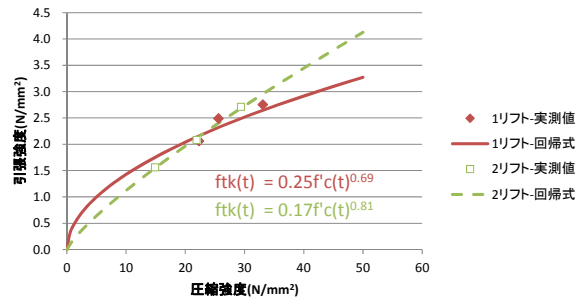


図- 4 圧縮強度と引張強度との関係

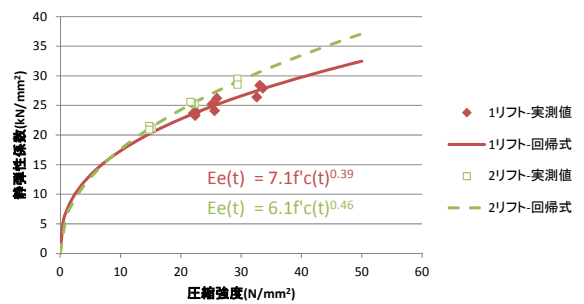


図- 5 圧縮強度と静弾性係数との関係

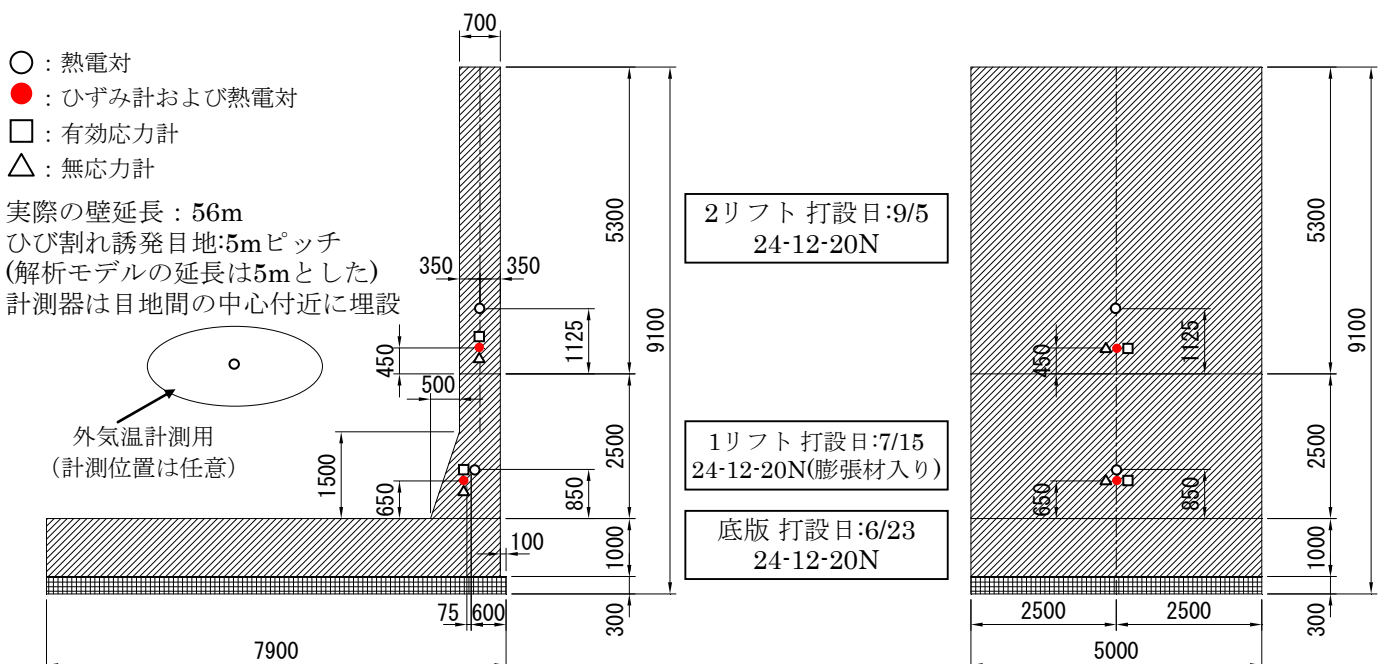


図- 2 計測概要および施工情報

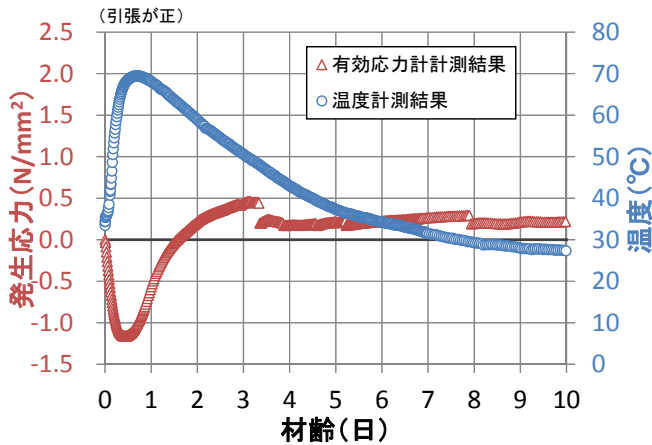


図-6 温度および有効応力計測結果 (1 リフト)

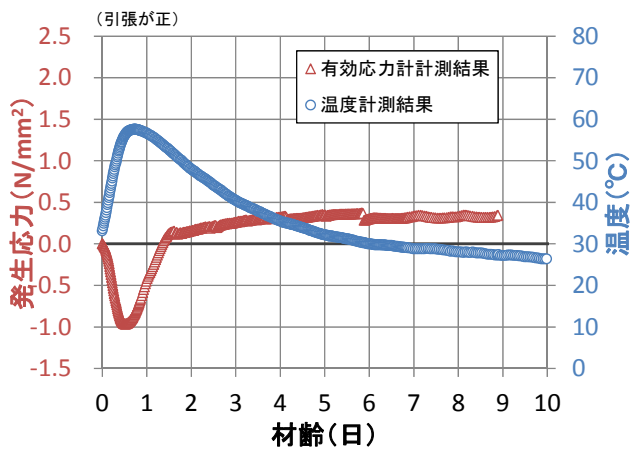


図-7 温度および有効応力計測結果 (2 リフト)

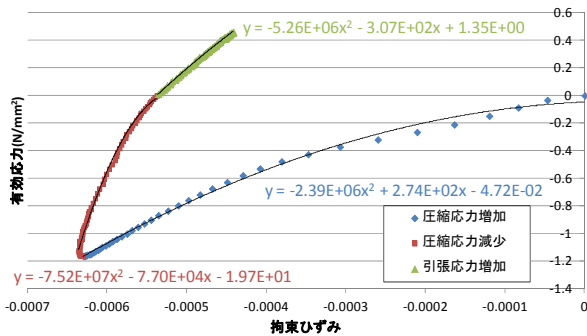


図-8 拘束ひずみと有効応力の関係 (1 リフト)

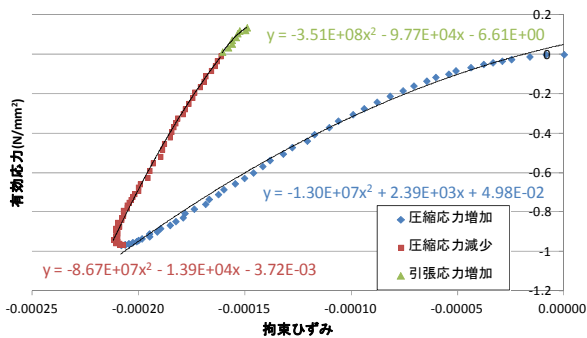


図-9 拘束ひずみと有効応力の関係 (2 リフト)

日程度で、2 リフトは材齢 2 日程度でひび割れが発生したものと考えられる。既往の研究⁴⁾を参考に、計測された実ひずみと無応力ひずみとの差を拘束ひずみと定義し、その拘束ひずみと有効応力の関係を図-8、図-9に示す。区間を圧縮応力増加領域、圧縮応力減少領域、引張応力増加領域に分け、各々の区間での関係を二次関数で近似し、その微分による傾きを有効ヤング係数(クリープによる応力緩和を考慮したヤング係数)とした。この有効ヤング係数を静弾性係数で除すことでクリープの影響による補正係数 ϕ を求めることができる。補正係数の経時変化を図-10に、各区間の補正係数の平均を表-2に示す。1 リフトの引張応力増加時の補正関数に関しては、ひび割れ発生までの極めて短い期間内での平均であり、膨張材を使用した影響も考えられること、ほかの既往の研究^{5)~7)}と値が大きく異なること(表-3参照)から、引張応力増加時の補正係数は2016指針を参考に0.65とした。また、2 リフトの圧縮応力減少時の補正係数の平均は1.25となったが、補正係数は1以下の値であるため、この区間の補正係数は1.0とした。

温度応力解析に影響を与える線膨張係数に関しては、無応力計で計測されたひずみと温度の関係から算出した。さらに、既往の研究⁸⁾を参考に、凝結始発から終結までの若材齢の線膨張係数は式(3)を用いた。

$$\alpha(t) = A + B \cdot \exp\left\{-\frac{(t-t_0)}{C}\right\} \quad \text{式(3)}$$

ここで、 $\alpha(t)$ は材齢 t 日における線膨張係数、 A は凝結終結後の線膨張係数(1リフト:10.7, 2リフト:9.56)、 t_0 は凝結始発時間、 B 、 C は定数でそれぞれ22.53, 0.107である。この線膨張係数は、自己収縮試験や膨張試験の温度補正にも用いた。

膨張ひずみや自己収縮ひずみについては、上記の補正を行った実測値を解析で用いることとした。

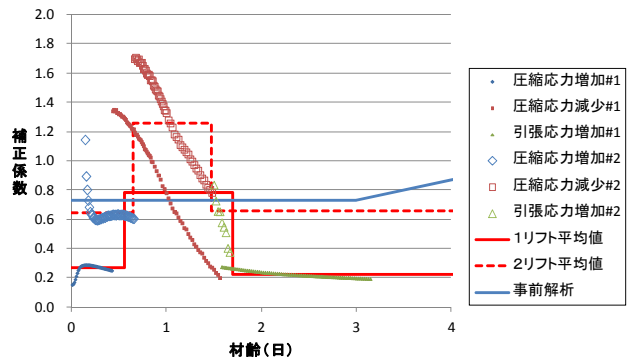


図-10 静弾性係数の補正係数と平均値

表-2 静弾性係数の補正係数平均値一覧

	1 リフト		2 リフト	
	材齢 (日)	補正係数	材齢 (日)	補正係数
圧縮応力増加時	0~0.565	0.260	0~0.657	0.643
圧縮応力減少時	0.565~1.70	0.793	0.657~1.48	1.25⇒1.0
引張応力増加時	1.70~3.28	0.227⇒0.65	1.48~1.67	0.660

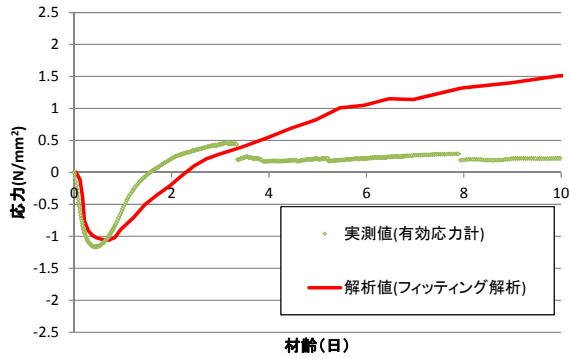


図-11 逆解析結果 (1 リフト)

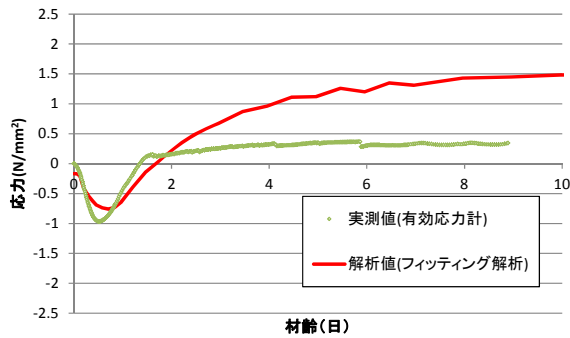


図-12 逆解析結果 (2 リフト)

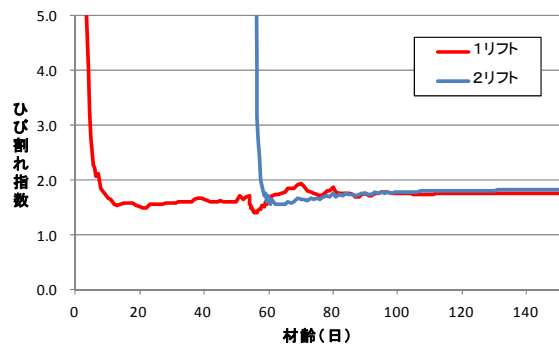


図-13 ひび割れ指数の経時変化図

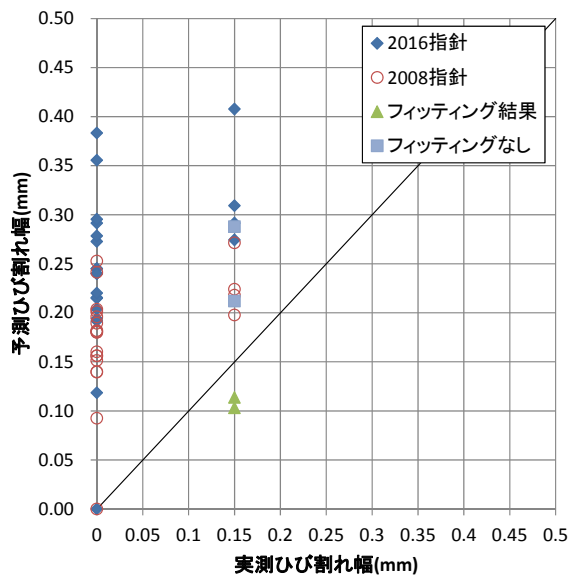


図-14 予測ひび割れ幅と実測ひび割れ幅の比較 (2)

表-3 既往の研究の補正係数

	圧縮応力増加時	圧縮応力減少時	引張応力増加時
入矢 ⁴⁾	0.75	1.00	0.50
田沢 ⁵⁾	0.3程度	1.0程度	0.6程度
江渡① ⁴⁾	0.50	1.00	0.70
江渡② ⁴⁾	0.63	1.02	0.61
江渡③ ⁶⁾	0.4	1.0	0.7
西岡 ⁷⁾	0.308	0.958	0.769
		平均	0.65

4.3 逆解析結果と実施工の比較

フィッティングされた温度履歴、実測値に基づいた力学特性値を用いることにより、ひび割れ発生以前の区間に関しては、応力解析結果は概ね実測値を再現できた(図-11, 図-12 参照)。逆解析により求めたひび割れ指数の経時変化を図-13に示す。求めた最小のひび割れ指数は1リフト:1.54, 2リフト:1.51となり、2016指針の物性値を入力した結果(フィッティングなし)の指数(1リフト:0.89, 2リフト:1.03)と大きく異なった。

このひび割れ指数と鉄筋比から算出される予測ひび割れ幅と実施工のひび割れ幅のプロットを図-14に追加すると図-14となる。なお、実施工で発生したひび割れは、ひび割れ誘発目地間に0~3本、ひび割れ幅は最大で0.15mmであった。今回対象とした構造物においては、3で取り上げた他の事例と同じく、フィッティングなしの結果は実測よりも安全側の結果となり、また、逆解析を行った結果を反映すると、予測ひび割れ幅と実施工のひび割れ幅は、予測値が実測値を下回る若干危険側の結果となった。この原因としては、フィッティングした指数は実際の現象は良く再現出来ているものの、2016指針でのひび割れ幅予測式は2016指針の標準的な物性値を用いて算出された指数と、実際に発生したひび割れ幅の関係を蓄積して数式化したものであるため、この関係式にフィッティングした指数を適用することが不適當であったという可能性が考えられる。

5. まとめと今後の課題

5.1 まとめ

本論文では温度ひび割れ幅の予測値と実施工のひび割れ幅を比較し、以下の結論を得た。

- ①本論文の調査の範囲では、示方書に従った施工を行った場合、2008指針および2016指針から求めた予測ひび割れ幅は、実測のひび割れ幅よりも大きく算出され安全側の結果となった。
- ②既往の研究で温度ひび割れ発生確率曲線は施工によるばらつきや施工方法により影響を受けることが示されたことと同様に、温度ひび割れ幅も施工方法により影響を受けることが示された。
- ③逆解析に関して、各種物性値に実測値を反映すること

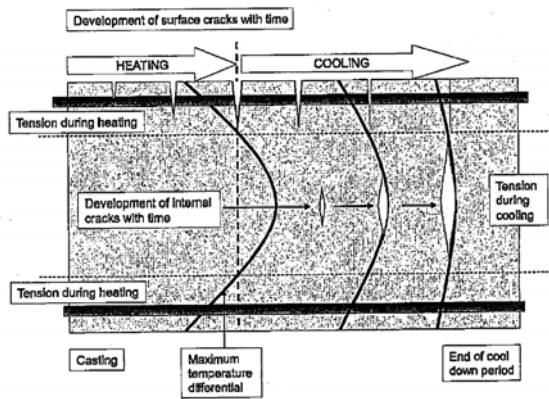


図-15 外部拘束と内部拘束が複合的に作用する場合の模式図⁹⁾

により実測結果を概ね再現でき、得られた温度ひび割れ指数から算出した予測ひび割れ幅と実施工のひび割れ幅は近くなった。

①について、この理由としては、施工前の解析では2007年示方書、もしくは、2008指針に従ってひび割れ幅を予測して0.2mm程度とすることを目標としていたが、2016指針で予測ひび割れ幅が大きく出る改訂が行われたこと、また、予測式の算出根拠となった試験体の実験では示方書の標準的な施工よりも早期に脱型されたため、測定されたひび割れ幅には乾燥の影響を受けていたことも考えられる。

②について、温度ひび割れ幅にも施工方法により影響を受けることが示されたため、温度ひび割れ幅の予測式の精度向上のためには、採用するデータのひび割れ指数、鉄筋比等のデータだけでなく、そのデータが標準的な条件で施工されたものも含めて把握し、情報を収集する必要があることがわかった。

③について、実測値を用いる際には、既往の研究と同様に算出したクリープ補正係数を用いること、若材齢時の線膨張係数を適切に評価すること等により発生応力の算定精度を高めることができた。

5.2 今後の課題

本論文で、逆解析により現実に即した物性値を用いれば発生応力が解析で概ね再現できることが分かった。ただし、現実的には多くの構造物において施工前に詳細な室内試験を行うことは現実的ではない。したがって、温度ひび割れ幅の予測精度向上に関して、指数の精度向上に対しては、各種設計用値の改訂等によって精度を向上させていく必要があると考えられる。例えば、使用する骨材や使用工場の強度実績等を反映した物性値を用いることで解析精度を向上させる方法等が考えられる。

また、ひび割れ幅の算定式の精度向上に対しては、2016指針の式(2)は1.0mの試験体において得られた温度ひび割れ指数とひび割れ幅の関係式であり、この試験

でのひび割れ幅には乾燥の影響が排除しきれていないと考えられるため、実際の施工条件も加味した関係式とすることで精度向上できる余地があると考えられる。

また、近年、構造物の大型化や大深度化で増加傾向にある、壁厚が1mをはるかに超える構造物に対する予測精度向上に関して、壁厚が大きい場合は小さい場合と比べ、乾燥の影響を受けにくいこと、また、特に壁厚が大きい場合は、外部拘束が卓越する構造物であっても、内部拘束の影響も大きく受け、図-15に示すように内部温度の低下とともに部材表面には圧縮応力が作用することも考慮に入れる必要がある。後者の現象は現在主に用いられている3次元FEM解析では再現されているものの、現在の予測式には反映されていない。

参考文献

- 1) 杉橋直行, 岸利治: マスコンクリートの温度ひび割れ照査法の改訂の変遷と要因整理による本質的な改善についての一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1485-1490, 2016
- 2) 大野又稔, 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, Vol.34, No.1, pp.1288-1293, 2012
- 3) 佐藤良一, 金津努: 改訂版「マスコンクリートのひび割れ制御指針2016」について, コンクリート工学, Vol.55, No.12, pp.1034-1041, 2017.12
- 4) 徳永法夫, 鈴木 威, 江渡正満, 安本礼持: 開削トンネルマスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する実験および解析的検討, コンクリート工学年次論文集, vol.13, No.2, pp.79-88, 2002
- 5) 田沢栄一, 飯田一彦: 硬化時温度応力の発生メカニズムについて, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp.101-104, 1982
- 6) 江渡正満, 丸山久一, 野添秀昭: マスコンクリートの温度応力推定に用いる有効ヤング係数の評価に関する検討, 構造工学論文集, vol.45A, pp.27-34, 1999
- 7) 西岡真帆, 名倉健二, 杉橋直行, 庭瀬一仁, 枝松良展: 膨張材のひび割れ抑制効果に関する実規模試験体計測結果とその解析的評価手法に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol.62, No.cs05, pp.233-234, 2007
- 8) 丁 海文, 河野広隆, 渡辺博志, 佐藤重一: 高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.22, No.2, pp.955-960, 2000
- 9) Construction Industry Research and Information Association: CIRIA C660- Early-age Thermal Crack Control in Concrete, p.67, 2011