

論文 部材厚が比較的大きいマスコンクリートの温度応力計測と予測ひび割れ幅に関する考察

宮田 佳和*1・河野 広隆*2・服部 篤史*3・江里口 玲*4

要旨：マスコンクリートの温度ひび割れ制御において、発生するひび割れ幅の予測は、制御計画を定めるうえで重要な項目であり、その予測精度向上は合理的設計のためにも必要となる。現在一般的に用いられている温度ひび割れ幅の予測式は、既往の研究成果から鉄筋比とひび割れ指数の関数として提案されているが、同じ鉄筋比であっても壁厚が大きい場合は鉄筋が分散して配置されるためひび割れ幅がばらつくことが知られている。本論文では、予測式の基となった研究で対象としていない、部材厚が大きい構造物(壁厚 4m)を対象に温度応力の計測およびフィッティング解析を実施し、発生したひび割れとの関係を考察した。

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」が発表され、その後、温度ひび割れ制御に関わる計画、設計、材料、施工技术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)」が発表された。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) が発表された。

2016 指針では、既設構造物から底面で連続的に拘束を受け、内部拘束、乾燥の影響を受けた壁状構造モデルに関する既往の研究成果に基づいて、最小の温度ひび割れ指数を要因とする最大ひび割れ幅の式を式 (1) として定式化しており¹⁾、これは2008 指針での式 (2) から改訂されている²⁾。

$$w_{cal} = \gamma_a \left(\frac{-0.141}{p} + 0.0938 \right) \times (I_{cr} - 1.965) \quad (1)$$

$$w_c = \gamma_a \left(\frac{-0.071}{p} \right) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (2)$$

ここで、 w_{cal} および w_c : 温度ひび割れ幅の予測値, p : 鉄筋比, I_{cr} : 温度ひび割れ指数, γ_a : 温度ひび割れ幅を評価するための安全係数

式 (1), (2) について、基となった研究成果は同じものであるが、2008 指針は壁厚 30cm および 1m の試験体を対象に予測式を提示していたが、文献 3) によれば、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

とは知られているため、特に鉄筋比が小さい場合のひび割れ幅のばらつきを安全側に評価するため、2016 指針では鉄筋比が小さい場合は部材厚 1m の試験体のみのデータで予測式を再構築したとされている。

この改訂の経緯のように、同じ鉄筋比であっても部材厚が異なれば鉄筋間隔が異なるため、発生する温度ひび割れの幅は変化する可能性がある。また、この式で使用される I_{cr} は、解析により概ね部材内部で算出される最小の温度ひび割れ指数を示しているが、部材厚が既往の研究成果 (壁厚 30cm および 1m) から逸脱した場合は、部材表面に出現するひび割れの幅と内部のひび割れ指数との関係は変化する可能性がある。部材厚が大きい場合は、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-1 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。これらのことを検証するため、本論文では、部材厚の大きなマスコンクリート部材に対して、温度応力の計測を実施し、その結果の考察を行った。

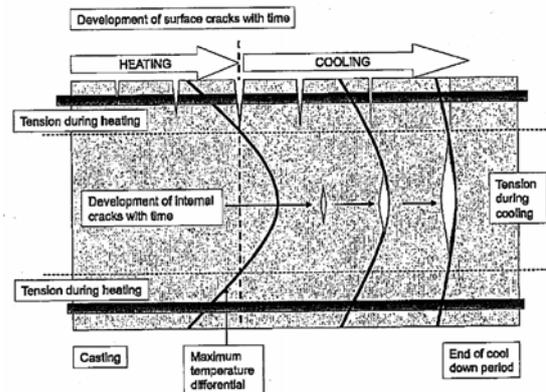


図-1 内部拘束により発生する応力の時間変化⁴⁾

*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)

*4 太平洋セメント株式会社 中央研究所インキュベーション推進チーム (正会員)

2. 計測概要

2.1 計測対象ならびに計器設置位置

計測は東北地方に建設中の橋脚の1リフト、および2リフトを対象とした。計測対象の構造図および計測対象の打設日、脱型日、リフト高さを図-2に示す。計測項目は温度、ひずみ、無応力ひずみ、有効応力とし、平面的には図-3のように計器を配置し、この橋脚を壁厚4m、延長5.4mの壁状構造物とみなして、東西方向の応力、ひずみを計測した。部材中心には有効応力計、無応力計、ひずみ計を設置し、部材表面（表面から250mm程度）には北面に有効応力計、ひずみ計を設置し、南面にはひずみ計を設置した。ダミー鉄筋は凝結始発時間の判定のため配置した。なお、南面はひずみのみの計測を行い、コンクリート標準示方書で定められた湿潤養生期間まで養生シートによる養生を行い、その後、シートは撤去した。一方で、北面では有効応力計の計器内部に詰められたコンクリートが乾燥の影響を受けにくく、近傍のひずみの計測も同様の条件で行う必要があると考え、脱型後も北面全面は養生シートで封緘養生した。

計器の配置は図-3の通りとし、設置高さは事前解析で中心のひび割れ指数が最小となる高さ（各リフト下端から500mmの高さ）および温度が最高となり、かつ、表面の有効応力計位置で最終的に圧縮力が作用する高さ（1リフト：下端から2500mm、2リフト：下端から2,000mm）とした。

2.2 使用材料、配合

使用材料を表-1に、配合表を表-2に示す。使用材料の違いによる影響を確認するため、1リフトには粗骨材に川砂利を使用した配合を、2リフトには粗骨材に石灰砕石を使用した配合を打ち込んだ。なお、当該現場は厳しい凍害環境にあることから、国土交通省東北地方整備局の「東北地方における凍害対策に関する参考資料(案

表-1 使用材料

種類	記号	品質
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S1	石灰砕砂 粗粒率2.80 表乾密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率0.97%
	S2	川砂 粗粒率2.95 表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率2.72%
粗骨材	G1	川砂利 粗粒率6.95 表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率1.35%
	G2	石灰砕石 粗粒率6.65 実積率59.0% 表乾密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率0.45%

表-2 配合表

部位	呼び方	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)					
				W	C	S1	S2	G1	G2
1リフト	30-12-25N	5.5	42.7	165	386	364	358	1031	-
2リフト	30-12-20N		44.0	170	386	740	-	-	1019

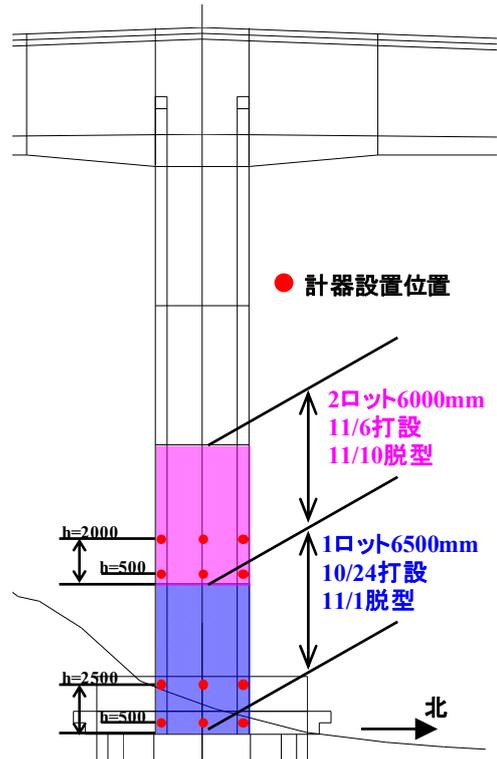


図-2 計測対象

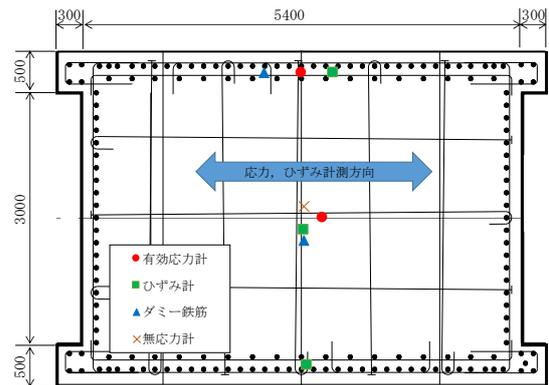


図-3 計器設置位置(平面図)

」を参考に、設計空気量を5.5%と大きくしている。

2.3 室内試験

フィッティング解析時の諸物性値把握のため、室内試験で使用配合の圧縮強度(JIS A 1108)、割裂引張強度(JIS A 1113)、ヤング係数およびポアソン比(JIS A 1149)、自己収縮(JCI-SQA4)の試験を行った。圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数およびポアソン比は材齢3, 7, 28日で試験を実施し、圧縮強度は材齢との関係を Goral 曲線による近似し、解析では有効材齢で強度発現する入力とした。割裂引張強度、ヤング係数は圧縮強度との関係を累乗近似し、その係数を解析に用いることとした。ポアソン比は3材齢での試験結果を平均した値を解析に入力した。自己収縮は埋込みひずみ計による連続計測を行い、有効材齢とひずみの

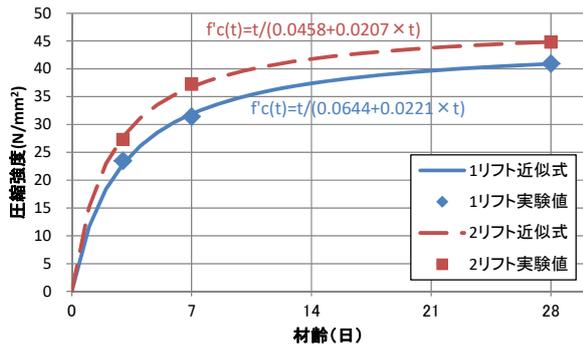


図-4 圧縮強度試験結果

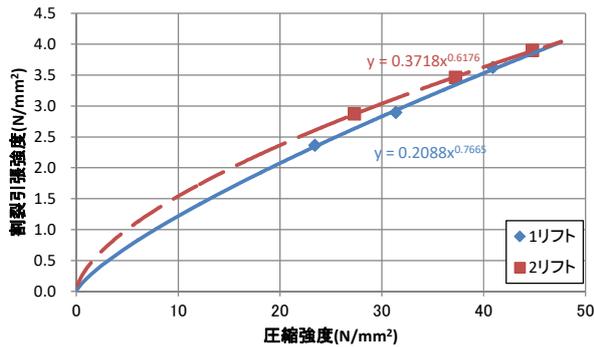


図-5 割裂引張強度試験結果

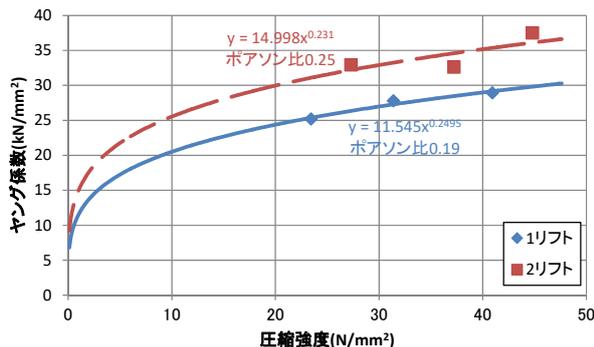


図-6 ヤング係数およびポアソン比試験結果

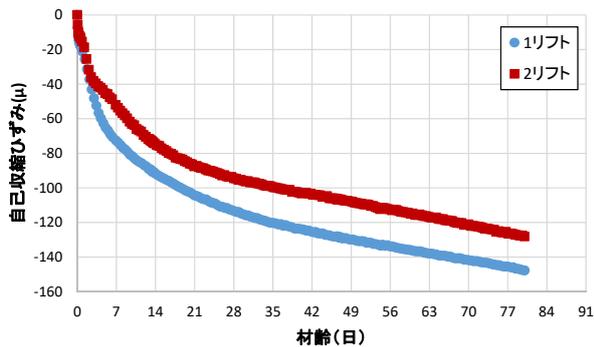


図-7 自己収縮試験結果

関係を解析に入力した。室内試験の試験結果を図-4～図-7に示す。

3. 計測結果およびフィッティング解析結果

3.1 温度計測結果および温度フィッティング解析結果

温度の計測結果および温度フィッティング解析の結果

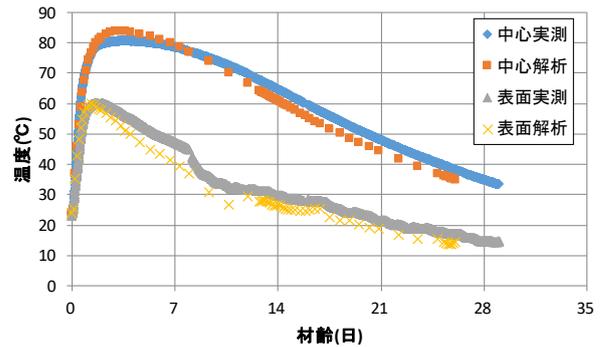


図-8 温度計測結果および温度フィッティング解析結果(1リフト)

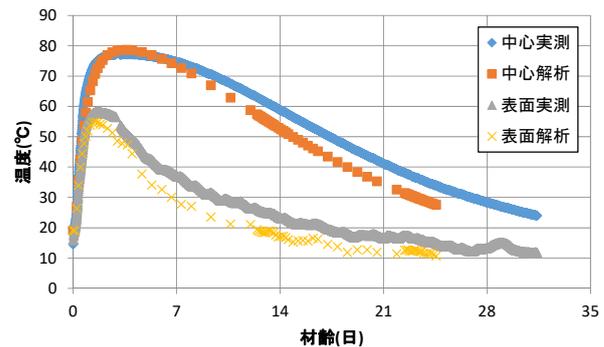


図-9 温度計測結果および温度フィッティング解析結果(2リフト)

果を図-8, 図-9に示す。フィッティング解析では断熱温度上昇特性値, 熱物性値は2016 指針の標準値をそのまま使用した。熱伝達境界の設定については, 外気温は実測値を使用し, 熱伝達率については, 合板の標準値は $8\text{W/m}^2\text{C}$ であるが, これは厚さ 12mm の合板を想定した数値であり, 今回使用した合板は厚さ 18mm であることから, コンクリート標準示方書の式 (3) ⁵⁾ を参考に $6.6\text{W/m}^2\text{C}$ を使用した。

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \sum \frac{d_{Fi}}{\lambda_{Fi}}} \quad (3)$$

ここで, η : 修正熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{C}$), β : 外気に触れる面の熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{C}$), d_{Fi} : 養生材の厚さ (m), λ_{Fi} : 養生材の熱伝導率 (W/mC)

また, 文献 5) によれば, 露出面の熱伝達率は風速 $2 \sim 3\text{m/s}$ の場合に $12 \sim 14\text{W/m}^2\text{C}$ であり, 風速 1m/s 当り $2.3 \sim 4.6\text{W/m}^2\text{C}$ 程度増加するとされている。1リフトは下端から高さ 2.5m の位置までは, 周囲に土留めがある中に施工されており, その範囲は通風がない (風速 0m/s) ことから, 文献 5) の風速による増加分を逆に引くことで, この範囲の露出面の熱伝達率は $4.4\text{W/m}^2\text{C}$ と設定した。

上記の設定により, 温度フィッティング解析結果は計測結果と温度最高となる時期, 最高温度の絶対値が概ね一致した。

3.2 応力計測結果および応力フィッティング解析結果

応力解析については、2.3 の室内試験の結果を入力した他、線膨張係数、ヤング係数の低減係数は実測結果から算出した値を用いた。

線膨張係数は無応力計のひずみと温度の関係から、温度上昇時と温度降下時でそれぞれ算出した。無応力計は各リフトで2か所(下端から500mmおよび2500mm(1リフト)もしくは2000mm(2リフト)の高さの部材中心)で計測していたため、各リフトの平均値をとって解析に入力した。無応力計の計測結果の一例を図-10に示し、線膨張係数の算出結果を表-3に示す。線膨張係数は自己収縮の影響を含んでいる可能性もあるが、ひずみと温度は直線関係を保っていたため、自己収縮の影響は小さいと考え、求めた傾きをそのまま線膨張係数として使用した。

ヤング係数の低減係数は文献6)を参考に算出した。具体的には、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、区間を圧縮応力増加領域(打込みから圧縮応力最大までの領域)、圧縮応力減少領域(圧縮応力最大から圧縮応力0までの領域)、引張応力増加領域(引張応力が0を超える領域)に分けた上で、各々の区間で拘束ひずみと有効応力の関係を二次関数で近似し、その微分による接線の傾きを見かけのヤング係数(クリープによる応力緩和を考慮したヤング係数)とした。拘束ひずみと有効応力の関係の一例を図-11に示す。この見かけのヤング係数をその材齢におけるヤング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。補正係数は各区間で平均した。ヤング係数の補正係数の算出結果を表-4に示す。

既往の研究⁶⁾では、圧縮応力減少時は最高温度に達して圧縮応力が最大となってからの1日間程度の期間(材齢0.5~1.5日程度)であり、2016指針でもヤング係数の補正係数は最高温度に達するまでの有効材齢で0.42、最高温度に達するまでの有効材齢+1日(有効材齢)以降0.65、というように切り替わるため、補正係数の絶対値こそ異なるものの、補正係数が切り替わる時期としては既往の研究と2016指針は一致していた。ただし、今回の計測においては、部材厚が大きく内部温度が降下するのに時間を要したため、圧縮応力減少区間は12~18日程度の長期間となり、2016指針の入力方法と大きく異なる。また、部材厚が大きいことによる影響で、圧縮応力減少区間で表面付近の温度降下による引張も内部に作用しながらの補正係数であるため1を超えた値になっていると考えられる。実際に表-4の通りに補正係数を入力した場合と、2016指針の標準的な入力方法を参考に、最高温度に達するまでの補正係数として、圧縮応力増加区間の補正係数を、最高温度に達するまでの有効材齢+1日(有効材齢)以降の補正係数として、引張応力増加区間の補

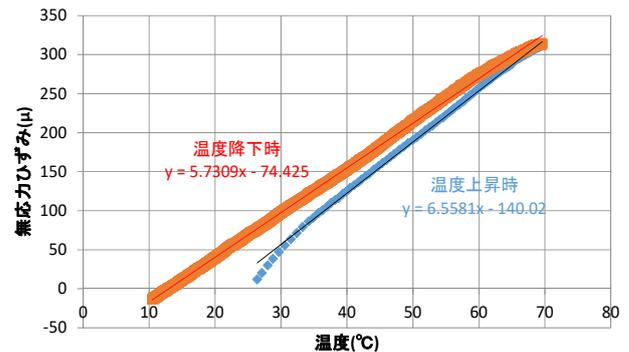


図-10 無応力計の計測結果の一例(2リフト h=500)

表-3 線膨張係数の入力値

		線膨張係数 ($\mu / ^\circ\text{C}$)	
		温度上昇時	温度降下時
1リフト	h500	7.31	7.27
	h2500	7.19	7.92
	平均	7.25	7.60
2リフト	h500	6.56	5.73
	h2000	5.06	5.12
	平均	5.81	5.43

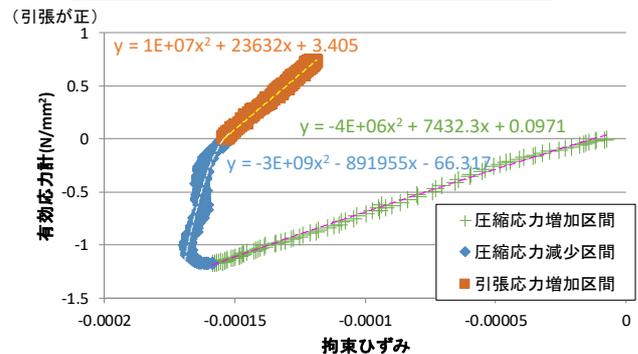


図-11 拘束ひずみと有効応力の関係の一例(1リフト h=500)

表-4 ヤング係数の低減係数の入力値

		圧縮応力増加区間	圧縮応力減少区間	引張応力増加区間
1リフト	h500	0.411	2.80	0.707
	h2500	0.418	0.916	0.901
	平均	0.415	1.86	0.804
2リフト	h500	0.426	1.78	0.804
	h2000	0.136	1.47	0.813
	平均	0.281	1.625	0.809

正係数を入力する場合を比較した結果、後の方がより実測値に近い解析結果となったことから、今回は後者の入力方法を採用することとした。なお、線膨張係数と同じく、この補正係数も各リフト2か所(下端から500mmおよび2500mm(1リフト)もしくは2000mm(2リフト)の高さの部材中心)で算出できるため、その平均値をとって解析に入力した。

上記の設定により解析を行った結果と有効応力計による実測値の比較を図-12、図-13に示す。1リフトについては、中心の解析値はh=500、h=2500とも圧縮領域では概ね実測値を再現できている。表面については、実

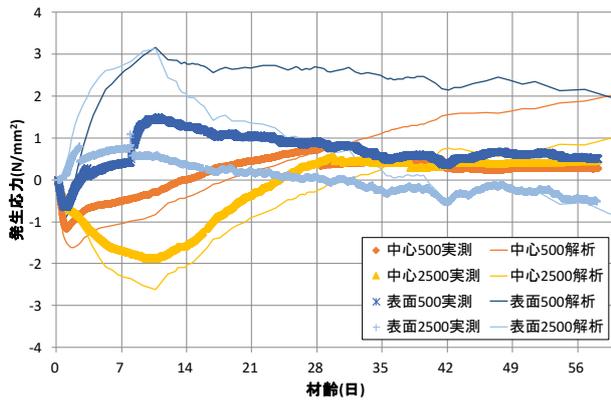


図-12 応力計測結果および応力フィッティング解析結果 (1リフト)

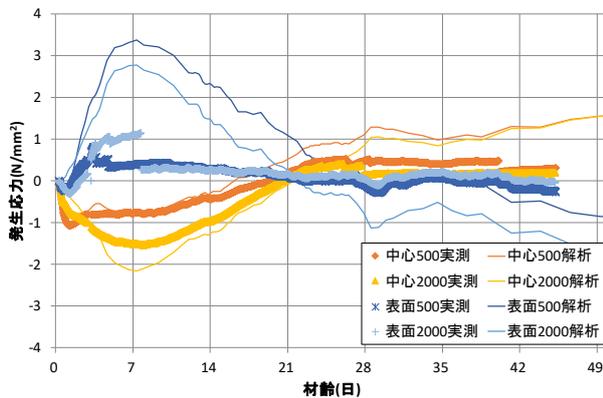


図-13 応力計測結果および応力フィッティング解析結果 (2リフト)

測値から $h=500$, $h=2500$ とも材齢 2~3 日程度でひび割れが発生していたと推測され、その後しばらくは実測と解析は一致していない。ただし、 $h=2500$ の表面については、材齢 40 日ごろから実測も解析も圧縮が作用しはじめており、圧縮領域では実測と解析が一致している。

2 リフトについては、1 リフトと同様、中心の解析値は $h=500$, $h=2000$ とも圧縮領域では概ね実測値を再現できている。表面についても 1 リフトと同様に、実測値から材齢 2~3 日程度でひび割れが発生していたと推測され、その後しばらくは実測と解析は一致していない。ただし、材齢 30 日ごろから $h=500$, $h=2000$ とも実測も解析も圧縮が作用しはじめており、特に $h=500$ の表面については、圧縮領域では実測と解析が一致している。

引張領域で中心の解析値と実測値があまり一致していないことについて、中心で発生する引張応力には、外部拘束によるものと、図-1 の要領で表面に圧縮が作用する際の反作用として発生するものが合わさっていると考えられ、解析では表面のひび割れを考慮していないため、後者の引張が作用しているが、実測では表面にひび割れが入って表面の圧縮応力が一部解放されたため、中心の引張が緩和されているものと考えられる。

3.3 ひずみの計測結果

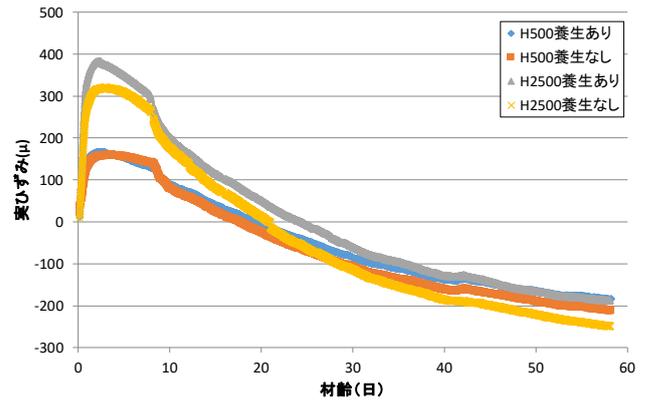


図-14 ひずみの計測結果 (1リフト)

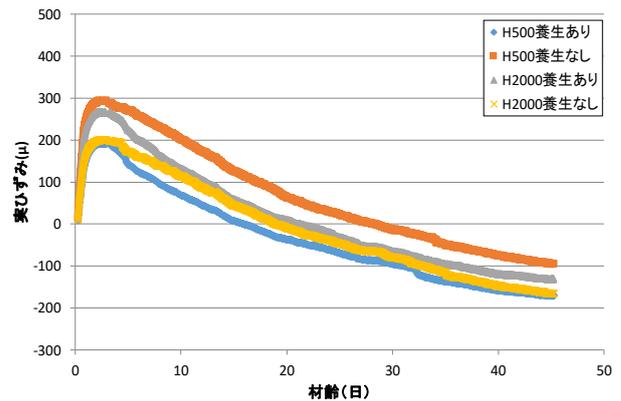


図-15 ひずみの計測結果 (2リフト)

北面、南面でのひずみの計測結果を図-14、図-15に示す。前述の通り、北面は養生シートにより養生されており、南面は標準の湿潤養生期間まで養生シートによる養生を行い、その後、シートは撤去している。

ひずみ計測の結果から、1 リフトは養生あり、なしの違いは $h=500$ で 30μ 程度、 $h=2500$ で 70μ 程度で大きな違いはなかったが、測定位置が表面から 250mm 程度内部であり、乾燥の影響はまだそれほど受けていないためであると考えられる。2 リフトもひずみの差は $h=2000$ で 30μ 程度であり、 $h=500$ では絶対値が異なるため比較はできないが、養生のあるなしで傾きは同程度であり、1 リフトと同様に、表面から 250mm の位置では乾燥の影響はほとんど受けていないと考えられる。

3.4 ひび割れ発生状況

1, 2 リフト南面の脱型直後のひび割れ発生状況を図-16に示す。図の通り 1 リフトでは、ひび割れは中心に下端から縦方向に発生している① (幅 0.1mm) と、隅角部に水平方向に発生している②~⑥ (幅 0.1~0.2mm) の 2 種類に大別でき、他の 3 面も同様のひび割れが発生していた。前者のひび割れは、外部拘束の影響を受けているものと考えられ、その後の材齢 60 日程度までのひび割れ幅追跡調査でも幅の変化はほとんどなかった。また、後者のひび割れは内部拘束の影響を受けていると考えられ、材齢 12 日でひび割れ幅を調査したところ、幅は 0.05mm

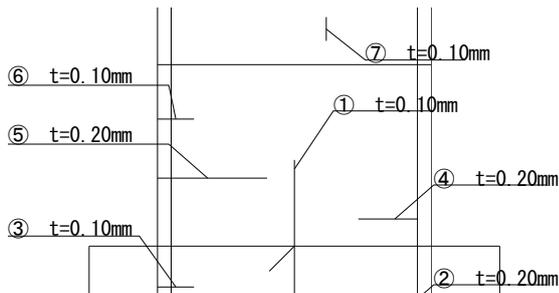


図-16 ひび割れ発生状況の一例 (南面)

程度に減少していた。2 リフトでは外部拘束の影響を受けていると考えられる縦方向のひび割れ(例えば⑦)が北面以外の3面で確認され、そのひび割れ幅は0.1mm程度であった。ただし、北面の表面の有効応力計の計測結果から、北面でもひび割れが発生した可能性が高いと考えられるが、北面はシートで養生しているため、脱型直後以降はひび割れは確認できていない。

現時点の計測結果において、実測の引張応力とその時点でのコンクリートの引張強度の比を実測のひび割れ指数と定義すると、 $h=500$ の有効応力計測位置で実測ひび割れ指数が最小となるは今回の計測最終値の時点で、それぞれ1リフト:5.17, 2リフト7.77となった。このひび割れ指数と各リフトの鉄筋比(1リフト0.54%, 2リフト0.42%)を2016指針の予測式(式(1))に適用すると、予測ひび割れ幅は1リフト, 2リフトとも0mm(計算結果は負の値)となり、実測のひび割れ幅より小さい結果となった。これに関しては、実測のひび割れ指数は現時点までの最小値であり、実際には今後外気温が低下するにつれてさらに指数は低下して最小値を更新するものと考えられ、現時点の指数は予測式に入力すべき最小値ではないためであると考えられる。ちなみに、3.2でのフィッティングをした解析では、ひび割れ指数が最小となるのは、今回の計測範囲よりも後で、最小ひび割れ指数は、1リフト:1.49, 2リフト2.08となり、この指数で予測ひび割れ幅を算出したところ1リフト:0.08mm, 2リフト:0mm(計算結果は負の値)となり、現時点の1リフトの実測のひび割れ幅と概ね一致していた。

4. まとめ

4.1 本論文のまとめ

本論文では、温度ひび割れ幅の予測式の基となった既往の研究成果を対象とした部材(壁厚30cmおよび1m)から部材寸法が逸脱した構造物において、温度応力の実測とその結果の考察を行った。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 温度解析については、2016指針の標準値を用い、熱

伝達率を型枠厚さや通風環境によって換算した値を入力することで概ね再現できた。

- (2) 応力解析については、室内試験で求めた物性値と、計測結果から求めた線膨張係数、ヤング係数の補正係数を入力したところ、概ね実測値を再現できた。ヤング係数の補正係数に関しては、今回のように部材厚が大きい場合は、圧縮応力減少区間の値は使用せず、補正係数の切り替え方法は2016指針を参考とし、圧縮応力増加区間と引張応力増加区間の補正係数を使用することで実測をよく再現できた。
- (3) 今回の計測結果から、表面にひび割れが発生した場合は、内部拘束の反作用のため中心に発生する引張応力が緩和されるというメカニズムが想定された。
- (4) 表面部のひずみの計測に関しては、今回計器を設置した箇所が表面から250mmの位置であったため、乾燥の影響は明確には見られない結果となった。
- (5) ひび割れ幅の予測については、鉄筋比と実測のひび割れ指数を2016指針の予測式に適用して求めたひび割れ幅は実際に発生したひび割れ幅と異なっていたが、フィッティングした解析で最小となる指数から算出したひび割れ幅は現時点では一部で概ね一致していた。

4.2 今後の課題

現時点の実測の最小ひび割れ指数と実測のひび割れ幅の関係は2016指針とは異なっているが、今後は外気温が低下して実測の最小ひび割れ指数が変化していくと考えられるため、今後も内部の応力の計測は継続するとともに、ひび割れ幅についても、亀裂変位計を追加して経時変化を詳細に計測し季節変動による影響を確認する。

参考文献

- 1) コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2016, p57, 2016.11
- 2) 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, p45, 2008.11
- 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) Construction Industry Research and Information Association：CIRIA C660- Early-age Thermal Crack Control in Concrete, p.67, 2011
- 5) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], p326, 2018.3
- 6) 宮田佳和, 河野広隆, 服部篤史：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1233-1238, 2018.7