

論文 底面を拘束されたスラブにおける自己収縮によるひび割れ発生現象の解明

須網功二^{*1}・大友 健^{*2}・原 毅^{*3}・山上正敏^{*4}

要旨：低発熱型高炉スラグセメントB種を使用した水セメント比 54%のコンクリートを用いて施工した底面を拘束されたスラブ構造において、スラブ表面に発生したひび割れの原因を、構造体の温度・ひずみおよび無拘束断熱マスブロックの温度・ひずみの計測値と、これらの計測値を反映して行なった温度応力解析により明らかとした。そしてコンクリートの自己収縮が実構造物のひび割れ現象に及ぼす影響を評価した。

キーワード：自己収縮，温度応力，有効ひずみ，マスコンクリート，ひび割れ，計測

1. はじめに

高強度コンクリートの収縮が主に自己収縮であることが発見されてから約 10 年が経過し、現行のコンクリート標準示方書に準拠して施工段階におけるひび割れ照査を行なう場合にも、セメントの水和に起因する体積変化と同等に自己収縮による体積変化を考慮することが原則とされるようになっている¹⁾。一般に自己収縮を無視することができない場合として、低水結合材比のいわゆる高強度コンクリートや、粉末度の大きい高炉スラグを大量に配合したコンクリートがあげられており¹⁾、JCIの自己収縮研究委員会報告書で取り上げられている実構造物の計測例のほとんども、高強度コンクリートに関するものである²⁾。

本研究は、一般のマスコンクリート構造物において、主に自己収縮の影響によってひび割れが発生したと考えられる現象を対象として、コンクリート自体の膨張・収縮特性と実構造物における温度・ひずみ挙動の計測およびこれらに基づいた温度応力解析の結果から、コンクリートの自己収縮による体積変化が構造物のひび割れの発生に及ぼす影響を考察したものである。

2. 構造物の特性とひび割れ状況・温度履歴

検討の対象とした構造物は、軟岩上に敷き均した捨てコン(厚さ約 10cm)上に構築された大きさ 35 m×35m, 厚さ 80cm の単純なスラブ構造である。スラブの下端・上端に格子状の配筋がなされており、上端の主鉄筋量は各断面方向ともに全断面に対する鉄筋比で約0.2%である。

コンクリートの仕様・配合および力学的特性を表-1に示す。マスコン用高炉セメントB種を使用しているが、水セメント比は54%であり、セメント量も比較的小さいので、いわゆる自己

表-1 コンクリートの配合・材料および特性値

配合・材料	設計基準強度	24 N/mm ²
	粗骨材の最大寸法	20 mm
	水セメント比	54 %
	単位セメント量	270 kg/m ³
材料	セメント	高炉セメントB種 (高炉スラグ微粉末置換率:50%)
	骨材	粗:石灰石砕石, 細:陸砂
	混和剤	A E減水剤(標準型)
力学的性質	$f'_{c0} = 0$ (M=10) (M=10, 0.5日が硬化原点) $f'_{c} = 8.53 \text{ LN}(M) - 19.7$ (10<M<50) $f'_{c} = 12.4 \text{ LN}(M) - 34.9$ (M>50) ただし, M:積算温度(日), (基準温度:0) $f_t = 0.11 f'_{c}{}^{0.93}$ $E_c = 0.51 f'_{c}{}^{0.52}$ *圧縮強度 f'_{c} , 引張強度 f_t , ヤング係数 E_c は、各々標準養生供試体の測定値から定式化	
	線膨張係数: $0.58 \times 10^{-5} /$ *材齢28日の 12.5x25cm供試体の20~40の範囲の長さ変化から算出(昇温降温とも1.5日間, 埋込型ひずみ計により測定)	

*1 大成建設(株) 土木本部 土木設計部 陸上第二設計室 課長代理 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木材工研究室 主任研究員 博(学術)(正会員)

*3 大成建設(株) 国際支店 主任

*4 大成建設(株) 土木本部 作業所長

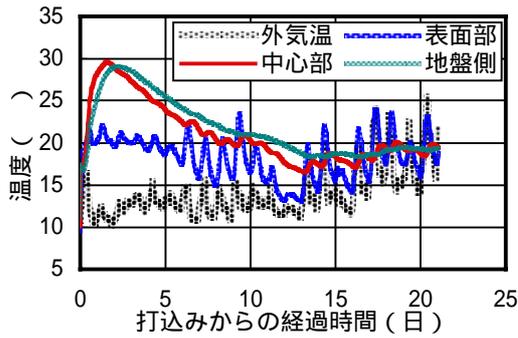


図-1 構造物の温度履歴

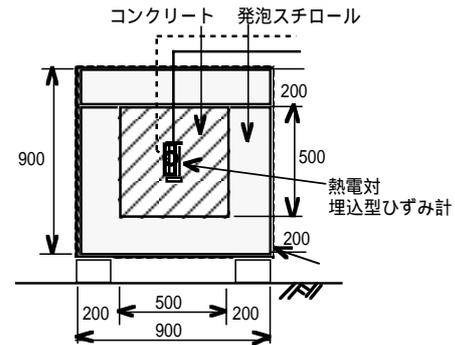


図-2 無拘束断熱マスブロックの形状寸法

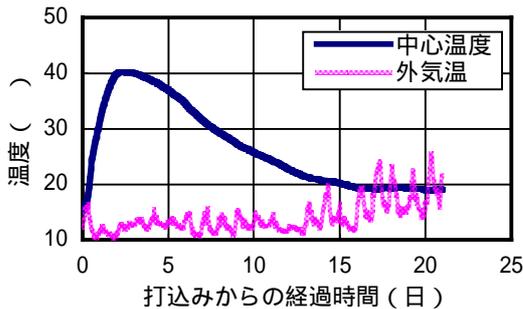


図-3 無拘束断熱マスブロックの温度履歴

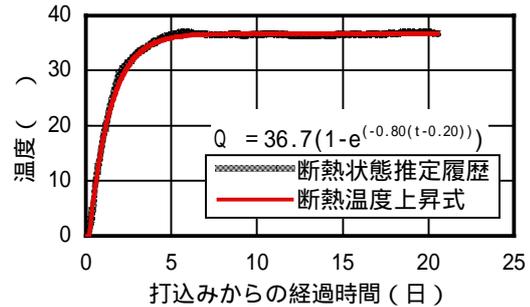


図-4 断熱温度上昇特性の推定値

収縮に配慮が必要なコンクリートの範ちゅうにはないものである。

このコンクリートを打込み温度約 16 で型枠内に打ち込み、翌日から材齢 10 日まで湛水養生（湛水深さ 5～10cm，上面に断熱マットを設置）したところ，養生終了後のス

ラブ面に幅 0.2～0.25mm 程度のひび割れが 4～5 本発生していることが確認された。

スラブ中央部の表面部・中心部・地盤側（各々スラブ底面から 70cm・40cm・10cm の高さ）における温度計測の結果を図-1 に示す。打込み後 約 1.5 日でスラブ中心部は 30 程度となり，その後温度が降下し，材齢 13 日では打込み温度程度となった。この間の温度降下量は約 13 にすぎない。

3. コンクリートの発熱特性・収縮特性

構造体に打ち込んだものと同じコンクリートにより，図-2 に示す無拘束断熱マスブロック試験体と強度測定用および線膨張率測定用供試

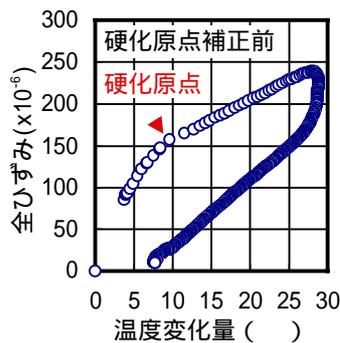


図-5 温度変化量と全ひずみとの関係

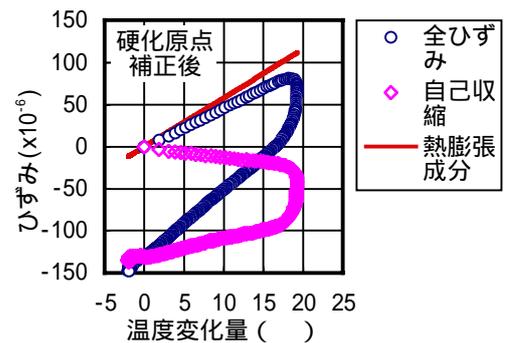


図-6 温度ひずみ成分と自己収縮ひずみ成分との関係

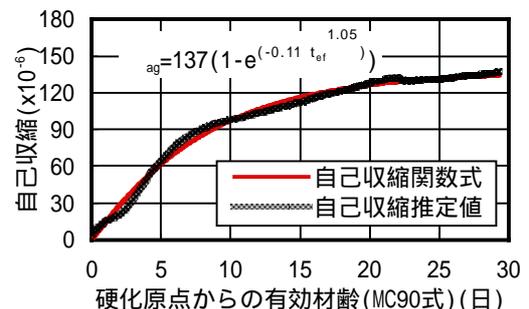


図-7 自己収縮ひずみの変化(有効材齢表示)

体とを作製した。図-3 および図-4 は，マスブロック中心部の温度履歴と，この履歴とブロックからの放熱特性を考慮して推定した³⁾コンクリートの断熱温度上昇特性である。

図-5 には，ブロック中心部の温度変化量と全ひずみとの関係を示した。ここで，打込みか

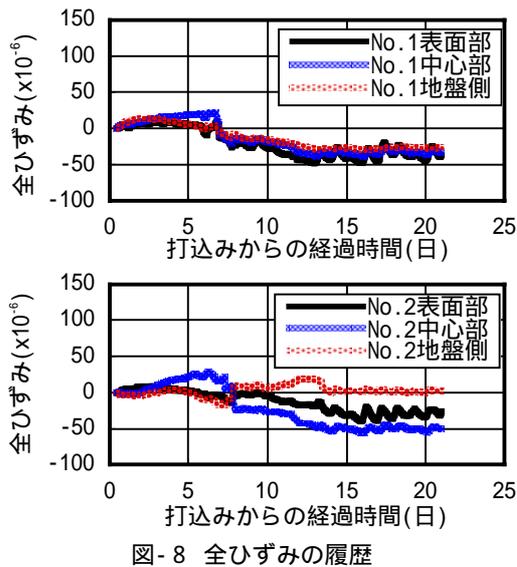


図-8 全ひずみの履歴

らの温度変化量と全ひずみとの関係が屈曲している点(材齢 0.5 日)はコンクリートの硬化原点を示すものと解釈した⁴⁾。硬化原点以降は温度の上昇に比例して直線的に全ひずみが増大するが、最大温度にいたる直前からコンクリートが大きく収縮する傾向が明らかとなった。

水和による収縮の影響がほぼ無視できると考えられる材齢 28 日以降で測定した線膨張係数を初期材齢においても適用すれば、図-6 に示すように、測定した全ひずみから熱膨張ひずみ成分を差し引いたものを自己収縮ひずみと解釈できる。自己収縮はコンクリートの硬化原点から継続して生じており、その増加を有効材齢(RILEM-MC90 式の表示)との関係式として示せば、図-7 のように、指数関数式を適用することができる。

4. 有効ひずみの算定とひび割れ発生の評価

3.により得られた、線膨張係数と自己収縮関数を用いて、実測の全ひずみから有効ひずみを算定した。ここで全ひずみは、スラブ中央部(No.1 測点)およびこの点から 5m 離れた位置(No.2 測点)の各々の表面部・中心部・地盤側(スラブ底面から 70cm・40cm・10cm の高さ)で計測した。No.1 測点と No.2 測点では、長さ変化の測定方向は異なる(直交状態にある)。スラブの L/H を考慮すれば、両測点での拘束条件はほとんど同等であると考えられる。

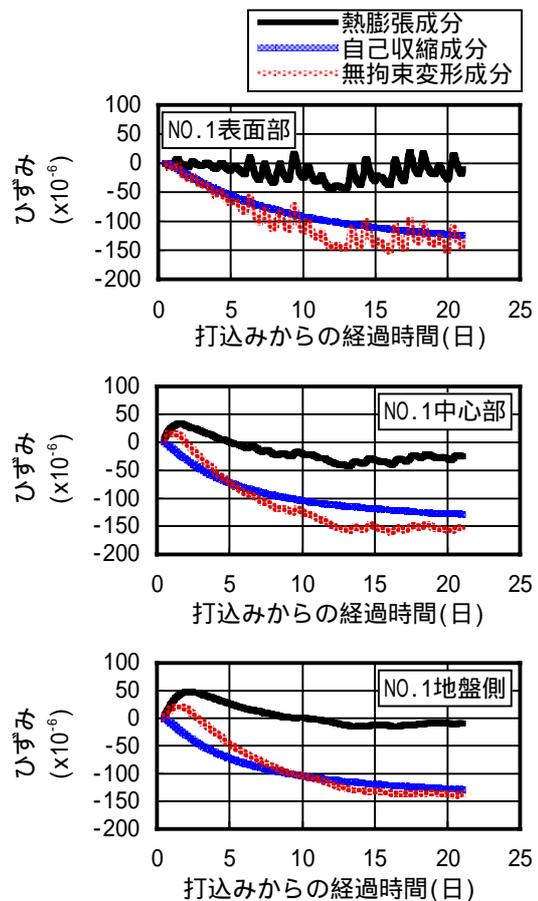


図-9 熱膨張ひずみと自己収縮ひずみの履歴

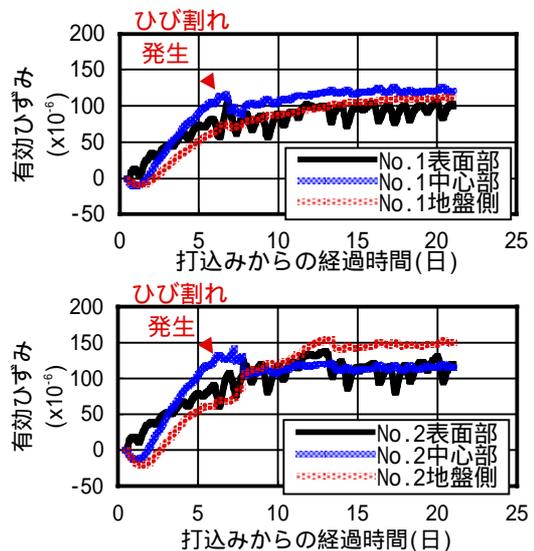


図-10 有効ひずみの履歴

図-8には全ひずみの履歴を示す。全ひずみの変化は小さいので、スラブが地盤から受ける拘束がかなり大きいことが分かる。

図-9には、No.1 の各測点について、温度履歴から算出した熱膨張成分と、温度履歴と自己収縮関数を用いて算出した自己収縮ひずみ成分

とを示す。これらの和が無拘束状態でのひずみの履歴となる。温度変化による体積変化よりも自己収縮による体積変化のほうが大きいことが明らかである。

全ひずみからこの無拘束のひずみ成分を差し引けば有効ひずみが求められる。

図-10に示すよう

に、一般的なスラブ構造にみられる温度上昇期の圧縮側の有効ひずみがほとんど発生せずに、温度降下後からすぐに引張側の有効ひずみが増大する傾向が認められた。有効ひずみは材齢5~6日程度で 100×10^{-6} 以上に達しており、有効ひずみが 120×10^{-6} 程度の時にひび割れの発生と思われる不連続性を示すものとなった。

有効ひずみに時間差分ごとに有効ヤング係数を積和して算出した応力の時刻歴変化と、この応力と引張強度から算定したひび割れ指数とを図-11に示す。ここで、みかけのクリープ係数は、JCIのひび割れ制御指針の記述に準拠して、温度上昇時 $=1.0$ 、温度降下時 $=0.5$ (ここで、有効ヤング係数： $E_{ef}=E_c/(1+)$)と設定した⁵⁾。

ひび割れが発生したと思われる材齢でのひび割れ指数は $1.0 \sim 1.2$ となり、おおむね妥当な応力履歴が算定されたものと考えられる。

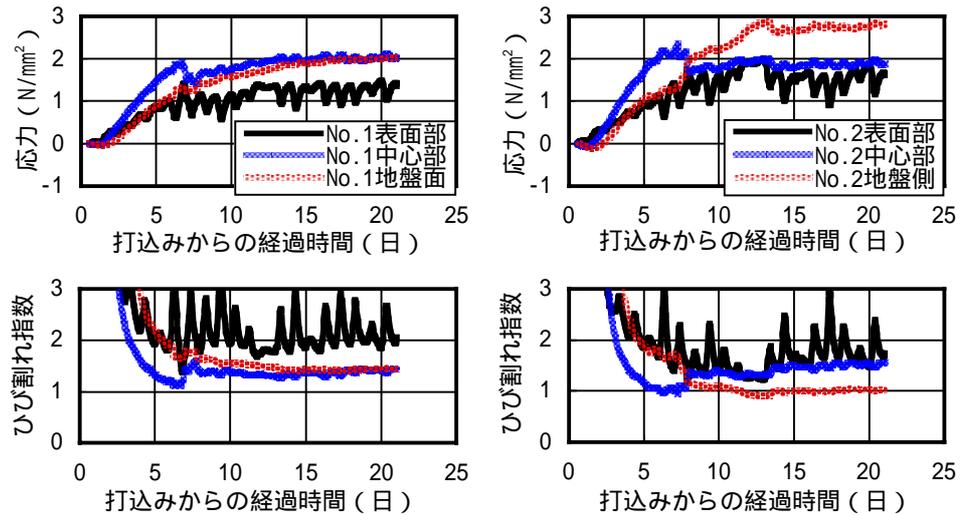


図-11 有効ひずみから推定した応力とひび割れ指数の履歴

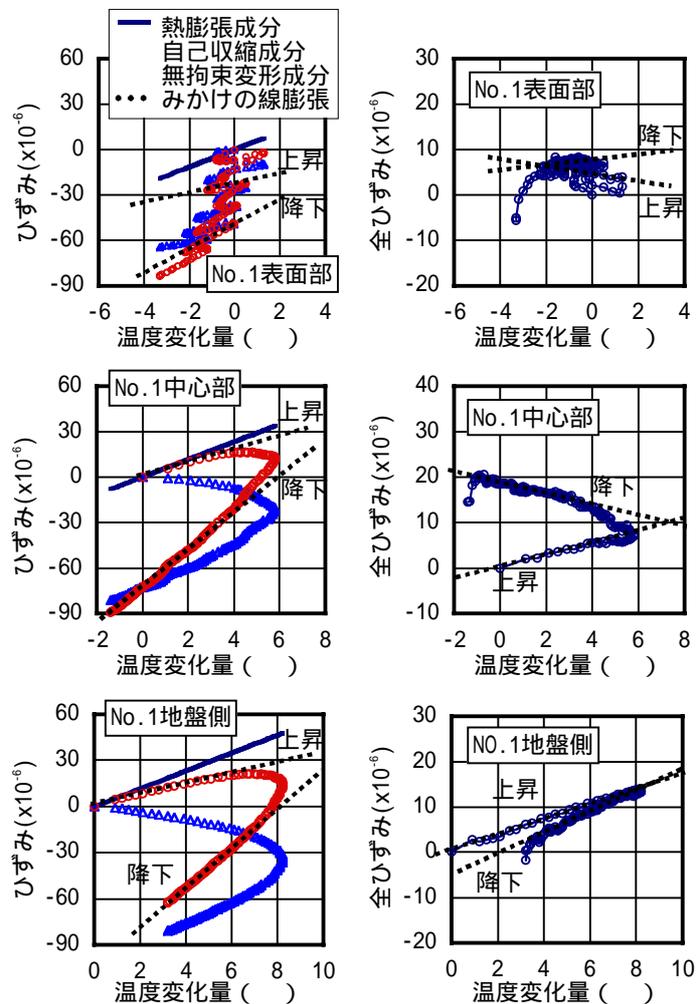


図-12 みかけの線膨張係数および温度変化量と全ひずみの関係

5. 自己収縮の有無を考慮した温度応力解析

5.1 拘束度の算定

本構造物のマスコンクリートとしての特性として、図-8における全ひずみの挙動からも明

らかなように、地盤からの拘束が大きいことがあげられる。図-12には、拘束度の算定にあたって温度変化量と全ひずみとの関係を作図した結果(No.1測点の場合の例)を示す。

表-2 みかけの線膨張係数と拘束度の算定結果

温度状態		温度上昇時			温度降下時		
場所	高さ位置	みかけの線膨張係数		拘束度	みかけの線膨張係数		拘束度
		無拘束	拘束		無拘束	拘束	
No. 1	表面部	2.8	-1.0	1.36	7.4	0.8	0.89
	中心部	3.9	1.1	0.72	12.8	-1.1	1.09
	地盤側	4.0	1.7	0.58	13.0	2.4	0.82
No. 2	表面部	3.3	-0.7	1.21	8.2	1.1	0.87
	中心部	3.3	-0.6	1.18	12.0	3.0	0.75
	地盤側	3.0	-0.2	1.07	12.1	2.7	0.78

*みかけの線膨張係数の単位は 10^{-6} /

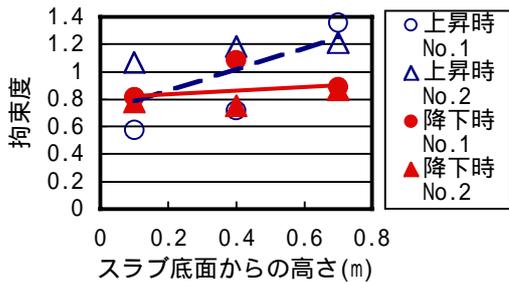


図-13 高さ方向の拘束度の分布

自己収縮の無視できるコンクリートでは、拘束度は、線膨張係数を基準として算出することができる。しかしながら自己収縮が大きい場合には、みかけの線膨張係数が構造体温度と時間とに依存して変化するので、このことを考慮する必要がある。ここでは、各測点ごとに、温度上昇期・温度降下期で異なるみかけの線膨張係数を、図-12中に示す破線の傾きから設定して、これらに対する各々の拘束度を算定した。算定結果を表-2および図-13に示す。

温度降下時の拘束度は、スラブの高さ方向にほぼ一様で、平均が0.86となり、温度上昇時には、スラブ上面になるほど拘束度がやや大きくなる傾向となった。みかけの線膨張係数は、温度上昇期と降下期では著しくことなり、また温度降下期にはスラブの内部と表面でも差が生じている。これは、自己収縮の進行状態が材齢と温度により異なることの影響を受けたものと推察される。

5.2 CL法による温度応力シミュレーション

JCI-CL法を用いて、自己収縮がある場合と自己収縮がない場合との温度応力の発生状態の差異を検討した。

JCI-CL法のプログラムでは自己収縮関数が

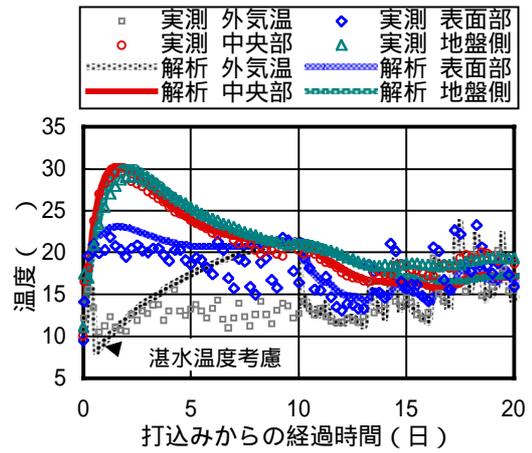


図-14 解析の温度履歴

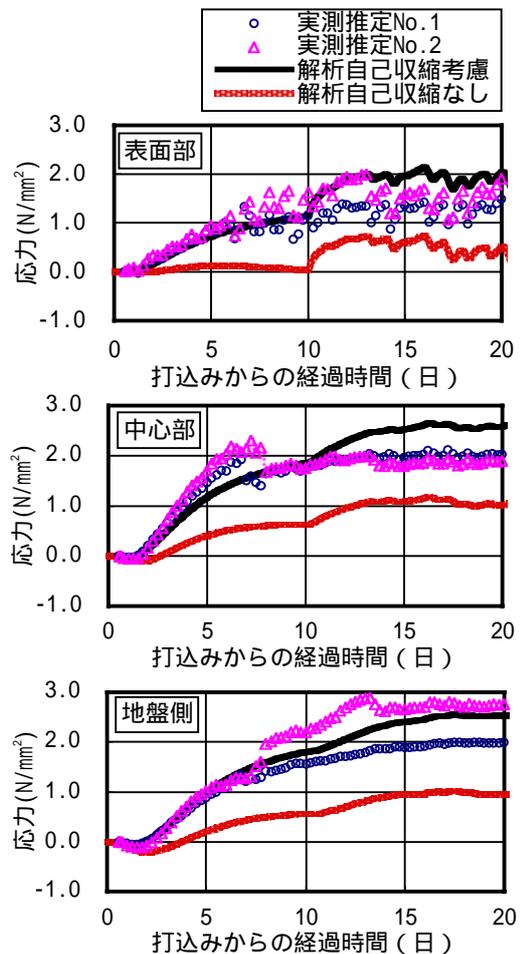


図-15 自己収縮の有無による応力履歴の差異

直接入力できないので、まず自己収縮がない状態での解析を行なった後に、構造体の温度履歴から有効材齢を考慮して部材各高さ位置での自己収縮ひずみを算定し、その各高さ位置での有効ヤング係数と拘束度を乗じて自己収縮に起因する応力成分を算出した。これを自己収縮がない状態での温度応力成分に重ね合わせて、自己収縮がある状態での温度応力とした。

L/H が非常に大きいスラブ構造の中央部の温度応力を算定したので、曲げ拘束は完全拘束状態 ($R_{M1}=1, R_{M2}=1$) とし、軸拘束係数には実測の拘束度 0.86 を入力した。温度上昇期の発生ひずみは小さいので、温度上昇期の拘束度についても温度降下期と同じに設定した。

温度応力解析に使用した温度履歴は図-14 に示すものである。発熱特性には図-4 のものを用い、実測温度履歴に適合するようにコンクリートの熱特性と表面熱伝達率を調整した。結果的に湛水養生中のスラブ表面は外気の影響を直接受けにくかったため、湛水の保温・温度上昇を模擬した表面温度変化曲線を設定している。

図-15 には、実測ひずみから推定した応力 (図-11 に同じ) と自己収縮を考慮した場合の応力解析値および自己収縮がないとした場合の応力解析値とを示す。中心部において解析値が実測ひずみからの推定値に比して若干小さいことを除けば、自己収縮を考慮した場合の解析応力の履歴は実測のひずみから推定した応力とおおむねの一致を示すことが確認できる。すなわち、前述したような自己収縮に起因する応力成分と JCI-CL 法による温度応力成分との重合わせ計算が、本スラブ構造のような簡単な拘束系の構造物では有効であったものと推察される。

自己収縮がないとしたコンクリートの解析では、発生する温度応力は、実測ひずみからの推定応力値に比べて、ひび割れ発生時点で 1/3 程度になっている。したがって、このスラブ構造では水和熱に起因する体積変化だけではひび割れが発生しなかったものが、自己収縮による体積変化の影響を受けてひび割れが発生したという事象が推察できるものである。

6. 結論

高炉セメントを使用して施工した一般のマスコンクリートスラブ構造物について、無拘束断熱マスブロックでのコンクリートの収縮挙動と実構造物でのひずみ挙動を計測し、温度応力解析による検討を行った結果、以下の知見を得た。(1) 自己収縮はコンクリートの硬化原点から継

続して生じており、有効材齢との指数関数式として表わすことができる。

- (2) 地盤の拘束が大きいスラブでは、自己収縮の影響により、温度上昇期にほとんど圧縮側の有効ひずみが発生せずに、温度降下後からすぐに引張側の有効ひずみが増大してひび割れが発生する現象が認められた。本スラブ構造では、自己収縮による体積変化の影響は水和熱に起因するそれに比べて大きいことが推察されるものであった。
- (3) JCI-CL 法により解析した自己収縮がない状態での温度応力に、構造体の有効材齢から自己収縮ひずみを算出し任意位置での有効ヤング係数と拘束度とを乗ずることによって算定した自己収縮に起因する応力を重ね合わせる方法は、簡単な拘束系の構造物では有効であると推察される。

本構造の解析に際しては簡単な JCI-CL 法プログラムを使用したが、実際に著者らが保有する 3 次元温度応力解析プログラムには、自己収縮とその温度依存の影響を関数として考慮できる³⁾ サブルーチンを付加しており解析性能は日々進歩している。むしろ、本研究のコンクリートのように低水結合材比でも高炉スラグ微粉末高添加でもない一般の土木用コンクリートに、なぜ非常に大きい自己収縮が生じたのかという材料性能評価の問題のほうにひび割れ抵抗性能の照査の確立には重要と思える。これについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮委員会報告書，2002.9
- 3) 大友ほか：鋼管・コンクリート複合構造橋脚における温度ひび割れの発生機構とその評価方法に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.13, No.3, 2001.9
- 4) 岡本ほか：自己収縮のコンクリート初期温度・ひずみ関係に及ぼす影響について，土木学会年次学術講演会講演概要集 V，Vol.50, 1995, 10
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ制御指針，1986.3