

論文 自己収縮を考慮したマスコンクリートの温度応力に関する 解析的検討

中村博之^{*1}・竹田宣典^{*2}・十河茂幸^{*3}・川口 徹^{*4}

要旨: コンクリートのひび割れ発生に影響を及ぼす要因として自己収縮が指摘されているが、自己収縮の影響を考慮した解析は行われていない。自己収縮による影響を把握するために、自己収縮を考慮したマスコンクリートの温度応力解析の検討を行った。本研究では、自己収縮の発現性が異なるコンクリートについて、二次元FEM温度応力解析を行い、自己収縮を考慮した温度応力と従来の自己収縮を無視した場合を比較して定量的に評価した。その結果、使用材料や配合によっては自己収縮による引張応力の増分を無視するには大きすぎる場合があり、自己収縮に起因する応力を考慮しなければならないことが明らかとなった。

キーワード: 自己収縮, マスコンクリート, 温度応力, 引張応力

1. はじめに

マスコンクリートの水和熱によるひび割れ発生予測を目的として、マスコンクリートの温度応力解析方法が、各方面で開発¹⁾²⁾されている。

マスコンクリート構造物において、温度ひび割れの予測解析を行い、適切なひび割れ制御対策を行ったにもかかわらず、ひび割れが発生してしまう場合がある。

この理由は、構造物の拘束条件、外気温等の環境条件、コンクリートの初期特性など物性値の入力条件が正確に把握されていないためと考えられる。

高強度コンクリートや高流動コンクリートのような水結合材比が小さく、単位結合材量が多いコンクリートは、自己収縮ひずみが大きいことが指摘されている³⁾。このようなコンクリートは、水和熱に起因する温度応力と自己収縮による応力が共に生じるため、ひび割れ発生を促進することが考えられる。

本論文では、マスコンクリート構造物に自己収縮の発現性が異なる4ケースのコンクリートを用いた場合について、自己収縮に起因する応

力を考慮した温度応力解析を行い、自己収縮の大小がマスコンクリートの発生応力に及ぼす影響について検討した結果について述べる。

2. 解析モデル

2.1 形状

解析モデルは、図-1に示すような岩盤上に打

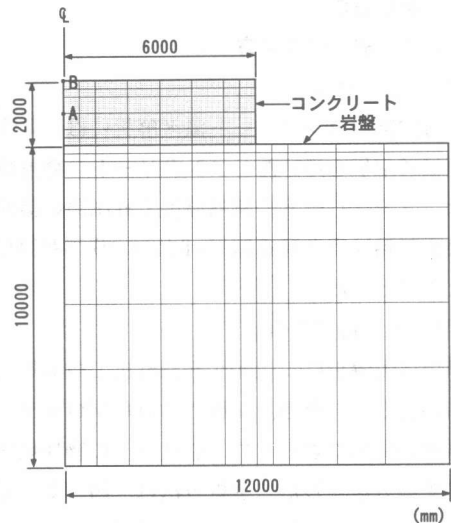


図-1 解析モデル

*1 大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員 工修(正会員)

*2 大林組技術研究所 土木第三研究室 副主任研究員 工博(正会員)

*3 大林組技術研究所 土木第三研究室 室長 工博(正会員)

*4 大林組技術研究所 建築第二研究室 室長 工博(正会員)

表-1 コンクリートの配合および物性値

粉体種類	記号	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP *1 (C×%)	AE助剤 (C×%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング率 (%)	凝結時間	
				W	C	S	G						始発 (h:m)	終結 (h:m)
普通	NP	41.3	45.0	165	400	769	986	1.70	0.005	14.5	4.5	2.66	7-00	9-00
中庸熱	MP					771	988	0.70	0.004	15.0	4.2	2.16	6-35	10-05
高炉B	BB					764	977	1.55	0.003	16.5	4.2	1.77	6-45	9-10
低熱	LP					774	991	0.60	0.003	16.0	5.0	2.62	5-40	10-00

*1: 高性能AE減水剤

設されたスラブ状マスコンクリートとした。スラブコンクリートは、幅12m、高さ2mとし、岩盤は、幅24m、深さ10m、長さ12mとした。FEMモデルは、対称性を考慮して1/2モデルとした。

2.2 配合

コンクリートの配合および諸物性を表-1に示す。コンクリートは、W/C=41.3%、単位セメント量400kg/m³、セメントに普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種および低熱ポルトランドセメントの4種類を用いた場合について検討を行うこととした。

3. 解析方法

3.1 解析の考え方

(1) 温度解析

部材内部のコンクリート温度解析には、非定常熱伝導解析を用いた。コンクリートの発熱特性は、コンクリートの断熱温度上昇試験の実測結果を断熱温度上昇式 $Q(t) = K(1 - e^{-at})$ で曲線化したものとした。

(2) 温度応力解析

温度応力解析は二次元FEM解析で検討を行うものとした。今回、解析に用いたプログラムは、有効材齢によってコンクリートの物性値を把握する方法とした。解析方法は、図-2に示すような応力の重ね合わせ法を適用した。この方法では、時間区分内に新たに生じた温度変化分と自己収縮ひずみの増分を荷重(初期ひずみ)として与え時間区分ごとに増分応力を求め、それ以前からの増分応力を足し合わせて解析対象時点での応力を評価するものである。表-2に

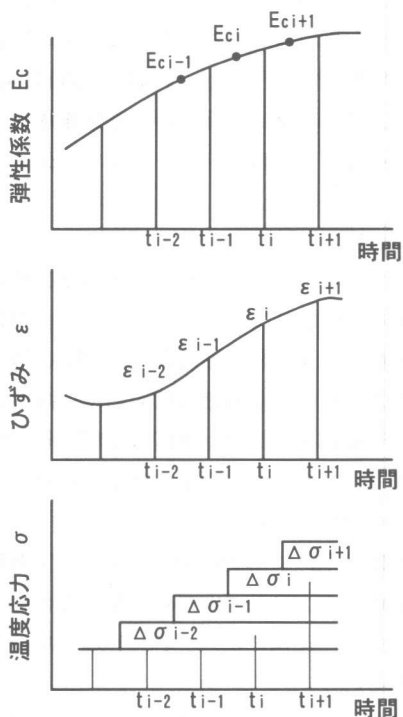


図-2 重ね合わせ法

自己収縮を考慮した温度応力解析の算定方法を示す。

温度応力解析においては次の仮定が成り立つとした。

- ①温度ひずみの増分を $\Delta \epsilon_{Ti}$ 、自己収縮ひずみの増分 $\Delta \epsilon_{ai}$ 、クリープひずみの増分を $\Delta \epsilon_{ci}$ とすると、応力増分は $\Delta \sigma_i$ で表せられる。
- ②時間区分内 Δt_i 内でコンクリートの弾性係数は一定であるとする。その間に発生する温度応力の増分 $\Delta \sigma_i$ は時間区分 Δt_i の中間時点でステップ関数状に作用する。

表-2 温度応力の算定式

応力とひずみの関係式	$\Delta\sigma_i = E_i \cdot (\Delta\varepsilon_i - (\Delta\varepsilon_{Ti} + \Delta\varepsilon_{ai} + \Delta\varepsilon_{ci}))$	(1)
	$\sigma_i = \sum_{j=1}^i \Delta\sigma_j$	(2)
温度ひずみ	$\Delta\varepsilon_{Ti} = \alpha \cdot (T_i - T_{i-1})$	(3)
クリープひずみ	$\Delta\varepsilon_{ci} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_j \cdot [U(\alpha'_j, t_i - t'_j) - U(\alpha'_j, t_{i-1} - t'_j)] + \Delta\sigma_i \cdot U(\alpha'_i, t_i - t'_i)$	(4)
自己収縮ひずみ	$\Delta\varepsilon_{ai} = \gamma \cdot \varepsilon_{co} \cdot \Delta\beta(t_i - t_{i-1})$	(5)
	$\beta(t_i) = 1 - \exp\{-a(t_i - t_0)^b\}$	(6)
ε_{c0} : 自己収縮ひずみの終局値 t_0 : 凝結の始発 γ, a, b : 係数		

③クリープひずみは、応力に比例するとする。

$U(\alpha'_i, t_i - t'_i)$ は、有効載荷材齢 α'_i で載荷された応力によって $(t_i - t'_i)$ 時間後に生じる単位応力あたりのクリープひずみである。そして、 $\Delta\sigma_i$ を算定するために、式(1)と式(4)との間で繰り返し計算を行い所定の精度を満たす $\Delta\sigma_i$ を求める。

④コンクリートの線膨張係数は材齢によらず一定とし、 $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とする。

⑤拘束体とする岩盤は、コンクリートとの境界面でのすべりや剥離は生じず、完全に一体化しているとする。

3.2 入力条件

(1) 熱特性

温度解析で用いた、岩盤、コンクリートの熱特性は、表-3に示すように仮定した。コンクリートの打込み温度、外気温は、 20°C 一定とした。

(2) 弾性係数・クリープ性状

温度応力を解析的に精度よく推定するためには、解析対象とするコンクリートの若材齢からの弾性係数の発現性状やクリープ性状を適切にモデル化する必要がある。ここでは、弾性係数の発現性状は以下のようにモデル化することとした。圧縮強度は、図-3に示すように片対数軸グラフ上で、折れ線状の発現を示すものとした。圧縮強度と弾性係数の関係式としては、実

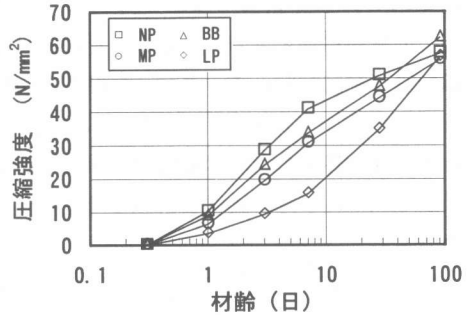


図-3 圧縮強度の発現性状

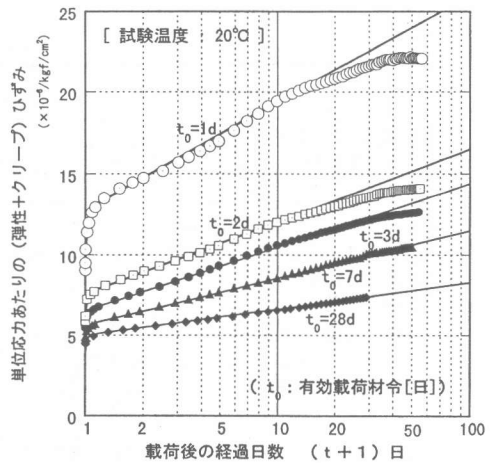


図-4 コンクリートのクリープ性状

験データに最小二乗法を適用して求めた式(表-3参照)を適用する。これにより、若材齢時からの任意の有効材齢に対して、弾性係数を求めることができる。

次に、クリープ性状の取扱いは以下のように行った。若材齢クリープ性状についての信頼性の高いデータはごく限られている。ここでは、文献4)のデータを基準とするコンクリートとした。基準とするコンクリートの若材齢クリープ性状は図-4に示す通りである。任意の配合のコンクリートへの一般化は次のように行った。つまり、任意のコンクリートの対して温度解析結果をもとに有効材齢を求め、その有効材齢から算定される弾性係数の値を求める。次に、その値と同じ弾性係数になる基準とするコンクリートの有効材齢を求め、その求められた有効材齢を等価有効材齢とするクリープひずみが生じるものとしてクリープを取り扱うこととした。これは、弾性係数の発現の遅いコンクリートほど、クリープひずみが大きいという考えに立つものである。

(3) 自己収縮

コンクリートの自己収縮の実測値に対するモデル化は、J C I 自己収縮委員会式を用いることとした。

自己収縮特性は、図-5に示す供試体を用い、

20℃封緘状態で無拘束状態におけるコンクリートのひずみを埋込み型ひずみ計により測定した。自己収縮ひずみは凝結始発時を基点とし、無拘束供試体のひずみから温度変化によるひずみを差し引いた値とした。温度変化によるひずみは、供試体の発熱あるいは供試体に与えた温度履歴

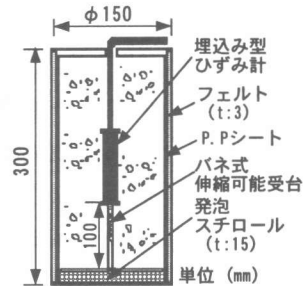


図-5 自己収縮測定用供試体

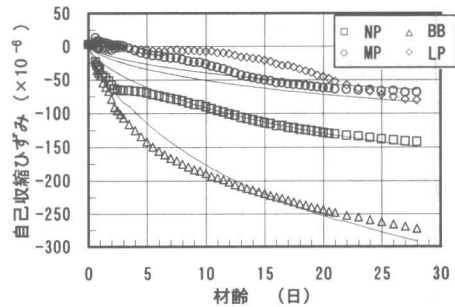


図-6 自己収縮ひずみの測定結果

表-3 解析条件

項目		条件			
セメント種類		NP	MP	BB	LP
外気温、打設温度、初期温度		20℃一定			
断熱温度上昇式 $Q(t)=K \times (1-e^{-\alpha t})$	K	64.0	55.9	65.4	47.7
	α	1.09	0.90	0.99	0.42
比熱 (kcal/kg·℃)		0.275			
熱伝導率 (kcal/m·hr·℃)		2.3			
熱伝達率 (kcal/m ² ·hr·℃)		コンクリート上部、側面(型枠側): 10			
熱膨張係数 (1/℃)		10×10^{-6}			
静弾性係数 (N/mm ²)	岩盤	$E_r=5000$			
	コンクリート	$E_c=0.17788 \times (f_c')^{0.4756}$			
単位クリープ曲線		図-4参照 表-1参照			
自己収縮に関する係数	t_0				
	ϵ_{c0}	145×10^{-6}	71×10^{-6}	275×10^{-6}	83×10^{-6}
	a	0.1	0.1	0.1	0.1
	b	0.7	0.7	0.7	0.7
	γ	1.60	1.41	1.67	1.55

に起因するものであり、ここでは、熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度補正を行った。

解析に用いた自己収縮ひずみを図-6に示す。ポイントは実測値で、曲線はJCI自己収縮委員会式(表-2参照)により近似させたものである。係数a, bは委員会で作案されている値を使用し、係数 γ は実測値を最も近似する値を同定することによって求めた。 ϵ_{c0} は、材齢28日における実測値を用いた。解析では、この近似曲線により各時間ステップの温度変化による温度ひずみ増分に自己収縮ひずみ増分を加えて増分応力を算定している。

4. 解析結果

4.1 温度解析結果

温度解析を行った結果を図-7に示す。解析結果は、スラブの中央部と表面部の2ヶ所の解析結果を示している。4種類の配合において、高炉セメントB種を用いた場合、コンクリートの温度が最も高くなり、低熱ポルトランドセメントを用いたものは発熱が最も小さい結果となった。また、低熱ポルトランドセメントは、他と比べて最高温度到達時間が遅いことが分かる。

4.2 温度応力解析結果

解析結果を図-8に示す。解析結果には、スラブの中央部と表面部の2ヶ所の解析結果および自己収縮を考慮しないで解析した結果も同時に示している。表-4に各材齢の応力の解析結果を示す。

高炉セメントB種を用いたコンクリートの自己収縮による影響は、他の3種類と比較すると、最も大きく算定されている。材齢2日までの温度上昇時においては、中心部の圧縮応力は、自己収縮による引張応力が大きいことから、他に比べ圧縮応力の減少幅が大きく算定されており、材齢30日の引張応力は、自己収縮を考慮しないものに比べて表面部では約 $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ 、中央部では約 $1.4\text{N}/\text{mm}^2$ 大きく算定されている。高炉セメ

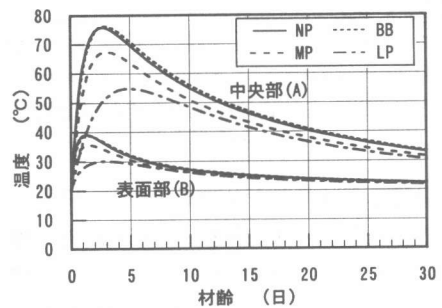
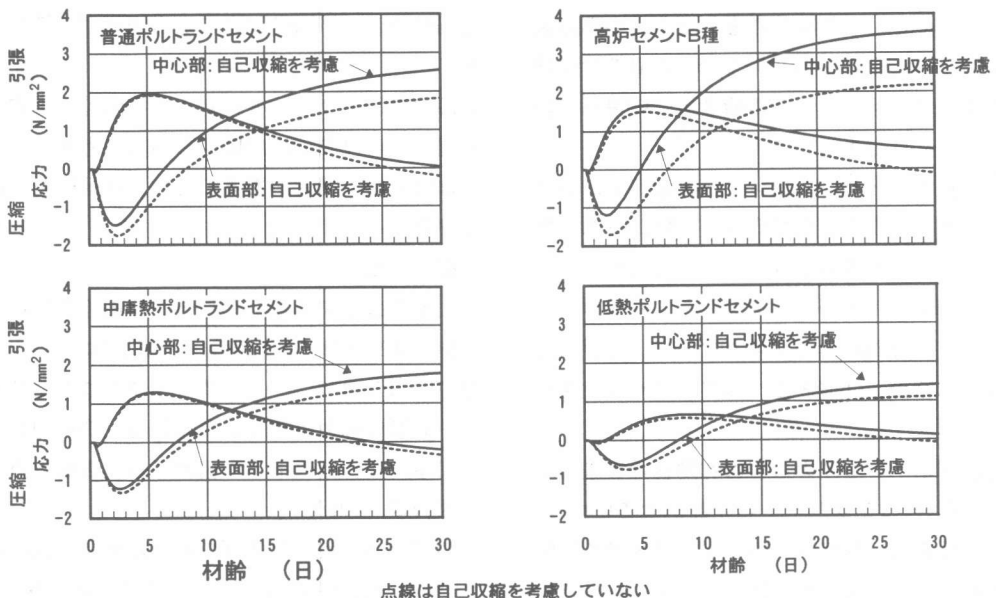


図-7 温度解析結果



点線は自己収縮を考慮していない

図-8 温度応力解析結果

表-4 自己収縮の考慮・無考慮による
応力解析結果

配合種類	最高温度材齢 NP, MP, BB: 2日 LP: 4日				材齢30日			
	表面部		中央部		表面部		中央部	
	無考慮	考慮	無考慮	考慮	無考慮	考慮	無考慮	考慮
	NP	1.06	1.12	-1.71	-1.48	-0.22	0.04	1.82
MP	0.57	0.60	-1.25	-1.17	-0.35	-0.21	1.49	1.78
BB	0.76	0.91	-1.65	-1.21	-0.12	0.51	2.17	3.55
LP	0.32	0.39	-0.77	-0.64	-0.08	0.12	1.11	1.42

マイナス符号は圧縮応力、プラスは引張応力

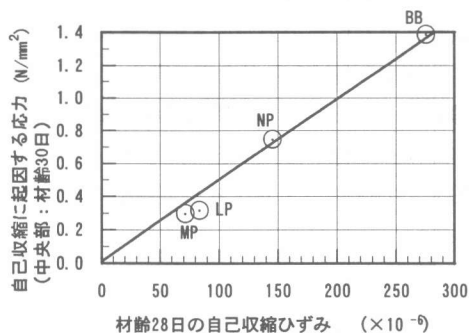


図-9 自己収縮ひずみと自己収縮に
起因する応力の関係

ントB種と普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートは、発熱性状と自己収縮を考慮しない場合の応力の経時変化は、どちらも同様な傾向を示している。高炉セメントB種の場合、自己収縮を考慮することにより、自己収縮を考慮しないものと自己収縮を考慮したものの応力値の増加分は、材齢30日の時点で、表面部では普通ポルトランドセメントの約3倍、中央部で約2倍大きく算定されている。

中庸熱ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントを用いた場合は、発熱が少ないため引張応力自体の発生は小さい。自己収縮による応力増加は、表面部、中央部どちらにおいても0.2～0.3N/mm²程度の増加であり、自己収縮による影響は、NP、BBに比べて小さく算定された。

自己収縮への温度の影響は有効材齢を適用しているため、コンクリートの発熱が大きい場合、材齢初期の自己収縮によるひずみは大きく算定される。これによる傾向は、応力解析結果に示されており、解析の妥当性が示されていると思

われる。また、材齢30日において自己収縮が100×10⁻⁶～300×10⁻⁶程度発生するコンクリートについて、水和熱に起因する応力と自己収縮に起因する応力について試算した結果、自己収縮に起因する応力は0.2～1.4N/mm²程度発生することが試算された。

自己収縮ひずみと自己収縮に起因する応力の関係を図-9に示す。自己収縮ひずみと自己収縮に起因する応力の間には相関関係がみられる。自己収縮に起因する自己収縮応力を定量的に評価することができた。

5. まとめ

自己収縮を考慮した応力解析を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 自己収縮ひずみが温度依存性があると仮定して自己収縮に起因する応力を算定した結果、自己収縮ひずみと自己収縮に起因する応力の関係は線形関係となることが明らかとなった。
- (2) 自己収縮ひずみが材齢30日で約300×10⁻⁶発生する高炉セメントB種を用いたコンクリートは、自己収縮を考慮しない場合に比べて、今回行った解析条件においては、引張応力が約1.4N/mm²大きく計算された。また、自己収縮が100×10⁻⁶の低熱ポルトランドセメントを用いた場合は、0.2N/mm²程度の応力増加が計算された。
- (3) マスコンクリートに発生する応力を推定する場合、自己収縮に起因する応力を考慮しなければならない場合があることが、定量的に評価できた。

参考文献

- 1) 土木学会：マスコンクリート技術の現状と動向、コンクリート技術シリーズ、No. 1994. 10
- 2) 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、1985. 11
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書、1996. 11
- 4) 川口 徹：実大マスブロックに生ずる温度応力の計測と解析、コンクリート工学論文集、Vol. 10. 1999. 1