

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研究

中 村 博 之 竹 田 宣 典
十 河 茂 幸 川 口 徹

**Analytical Study on Thermal Stress Analysis of Mass Concrete
in consideration of the Autogenous Shrinkage**

Hiroyuki Nakamura Nobufumi Takeda
Shigeyuki Sogo Toru Kawaguchi

Abstract

In this study, a thermal stress analysis program is developed for mass concrete that takes autogenous shrinkage into account. The resulting thermal stresses are compared with those that don't consider autogenous shrinkage. The results are found to be different. For particular materials and mix proportions a tensile stress of 1.4N/mm^2 is obtained, resulting from autogenous shrinkage. Therefore, it is clear that, when autogenous shrinkage is large, it is necessary to take stress due to the autogenous shrinkage into consideration.

概 要

本研究では、自己収縮を考慮したマスコンクリートの温度応力解析プログラムを作成し、自己収縮の大きさが異なるコンクリートについて、自己収縮を考慮した温度応力と自己収縮を考慮しない温度応力とを比較し、マスコンクリートの発生応力に及ぼす自己収縮の影響を定量的に評価した。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が 1.4N/mm^2 となる場合があることが判った。したがって、自己収縮が大きくなる場合には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。

1. はじめに

これまで、マスコンクリートのひび割れ予測解析プログラムが、学協会においても開発されている¹⁾²⁾が、解析結果と実際の構造物のひび割れ状況が異なる場合があった。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ことがある。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の各種の入力条件が正確に解明されていないためと考えられる。また、最近は大流動コンクリートや高強度コンクリートの適用が増えているが、これらのコンクリートは、新たな収縮要因である自己収縮の影響を考慮する必要があると考えられている。³⁾この様な状況の中、コンクリート構造物の高品質化を指向する社会的要請が強くなり、今までにも増して構造物のひび割れを少なくするために、より高精度なひび割れの予測解析を行う必要がある。

本論文では、自己収縮を考慮できるマスコンクリートの温度応力解析プログラムを作成し、マスコンクリート

の発生応力に及ぼす自己収縮の影響について検討した。

2. 自己収縮を考慮した温度応力解析の概要**2.1 解析方法**

マスコンクリートの温度応力の解析による推定方法に関しては、日本コンクリート工学協会のマスコンクリート温度応力研究委員会が提案したCL法、CP法などがあり、簡易的な温度応力の評価方法として広く用いられている。しかし、この方法では、自己収縮を考慮できるものとはなっていない。また、有限要素法を用いた温度応力解析も行われているが、現在のところ自己収縮などの新たな収縮要因を考慮した解析検討はなされていない。

本研究では、自己収縮を考慮した解析を二次元FEM解析で検討を行うものとし、解析におけるコンクリートの物性値は、有効材齢によって把握する方法とした。解析上の特徴としては、若材齢コンクリートのクリープ性状の影響を考慮できるようになっていることである。これにより、若材齢時から生じる自己収縮に対して発生する温度応力を適切に評価することが出来ることとなる。

Table 1 温度応力の算定式
Formula of Thermal Stress Analysis

釣り合い式	$\Delta\sigma_i = E_i \cdot (\Delta\varepsilon_i - (\Delta\varepsilon_{Ti} + \Delta\varepsilon_{ai} + \Delta\varepsilon_{ci}))$ (1)
	$\Delta\sigma_i = \sum_{j=1}^i \Delta\sigma_j$ (2)
温度ひずみ	$\Delta\varepsilon_{Ti} = \alpha \cdot (T_i - T_{i-1})$ (3)
クリープひずみ	$\Delta\varepsilon_{ci} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\sigma_j \cdot [U(\sigma'_j, t_i - t'_j) - U(\sigma'_j, t_{i-1} - t'_j)] + \Delta\sigma_i \cdot U(\sigma'_i, t_i - t'_i)$ (4)
自己収縮ひずみ	$\Delta\varepsilon_{ai} = \gamma \cdot \varepsilon_{c0} \cdot \Delta\beta(t_i)$ (5)
	$\beta(t_i) = 1 - \exp\left\{-a(t_i - t_0)^b\right\}$ (6)
ε_{c0} : 自己収縮ひずみの終局値 γ, a, b : 係数	

解析方法は、Fig. 1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。Table 1に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 $\Delta\varepsilon_{Ti}$ 、自己収縮ひずみの増分を $\Delta\varepsilon_{ai}$ 、クリープひずみの増分を $\Delta\varepsilon_{ci}$ とすると、応力増分は $\Delta\sigma_i$ 表せられる。ここで、 $\Delta\varepsilon_i$ は釣り合い後のひずみ増分である。
- 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。
- 3) クリープひずみは、応力に比例するとする。
 $U(\sigma'_i, t_i - t'_i)$ は、有効載荷材齢 σ'_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) コンクリートの熱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。

2.2 コンクリートの若材齢性状

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、圧縮強度は、Fig. 2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

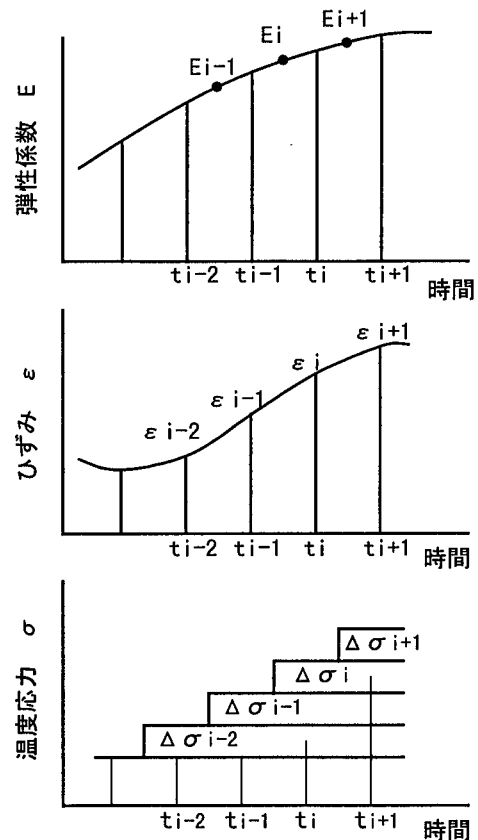


Fig. 1 温度応力算定のための時間区分重ね合わせ法

Time-interval and Superposed Method for Evaluating Thermal Stress of Concrete

性係数の関係式としては、実験データに最小二乗法を適用して求めた式 (Table 3参照) を適用する。これにより、

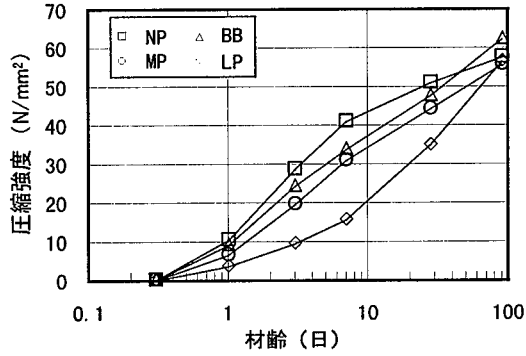


Fig. 2 圧縮強度の発現性状
Development of Compressive Strength

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出来る。

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おり、今回の解析対象としているコンクリートに関する詳細な試験データはない。そこで、文献4)のデータを基準とするコンクリートによってクリープ性状を取扱うこととした。基準とするコンクリートの若材齢クリープ性状はFig. 3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に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。

自己収縮性状については、自己収縮が温度による影響を受けるという考えに基づき、JCI自己収縮委員会で提案されている自己収縮ひずみの予測式を用いるとした。本研究では、コンクリートの自己収縮を測定して、この実測値をJCI自己収縮委員会提案式で近似させ、自己収縮ひずみの経時変化を定式化した。自己収縮特性は、Fig. 4に示す供試体を用い、20°C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。

3. 解析例

3.1 解析モデル

解析モデルは、Fig. 5に示すような岩盤上に打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

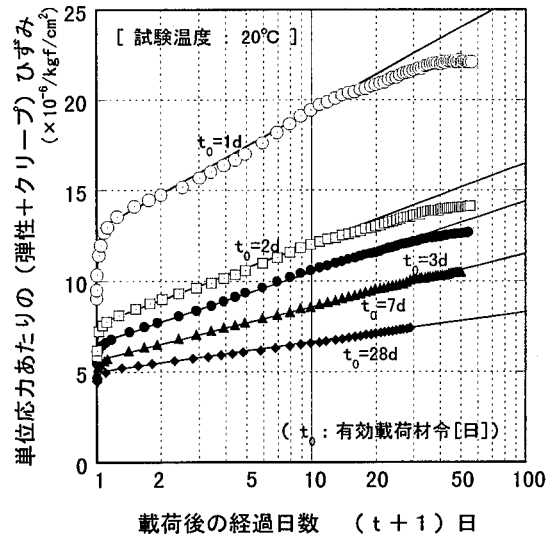


Fig. 3 コンクリートのクリープ性状
Creep Behavior of Concrete

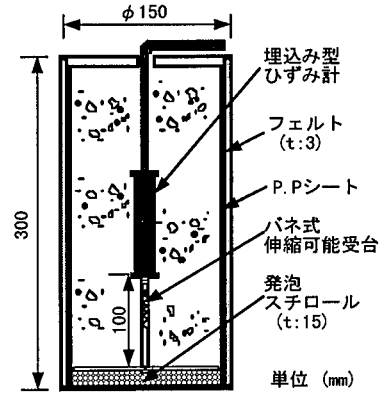


Fig. 4 自己収縮測定供試体
Specimen for Autogenous Shrinkage

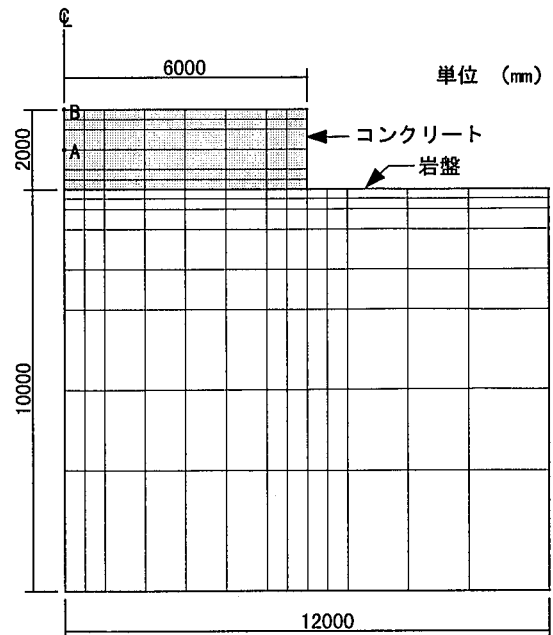


Fig. 5 解析モデル
Model of Mass Concrete

Table 2 コンクリートの配合および物性値
Properties and Mix Proportion of Concrete

粉体種類	記号	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP* (P×%)	AE助剤 (P×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	フリーティング率 (%)	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

* 高性能AE減水剤

Table 3 解析に用いた物性値
Properties Used in FEM Analysis

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°C一定			
断熱温度上昇量 Q (°C)	k	64.0	55.9	65.4	47.7
	α	-1.09	-0.90	-0.99	-0.42
比熱 (kcal/kg・°C)	岩盤	0.275			
	コンクリート	0.275			
単位体積重量 (kg/m ³)	岩盤	1.70	1.70	1.70	1.70
	コンクリート	2.32	2.32	2.31	2.33
熱伝導率 (kcal/m・hr・°C)	岩盤	2.3			
	コンクリート	2.3			
熱伝達率 (kcal/m ² ・hr・°C)		コンクリート上部, 側面 (型枠側) : 10			
熱膨張係数 (1/°C)		10×10 ⁻⁶			
圧縮強度 fc (N/mm ²)	1日	10.2	6.4	8.9	3.5
	3日	28.5	19.4	24.1	9.3
	7日	40.8	30.7	33.6	15.5
	28日	50.7	44.0	47.4	34.7
	91日	57.4	55.5	62.1	56.4
	182日	58.0	59.4	66.1	63.5
静弾性係数 (N/mm ²)	岩盤	Er=5000			
	コンクリート	E _c =0.17788 × (fc ^{0.4756})			
単位クリープ曲線		Fig.3 参照			
自己収縮に関する係数	算定式	Table 1 参照			
	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

は、幅12m、高さ2mとし、岩盤は、幅24m、深さ10mとした。FEMモデルは、対称性を考慮して1/2モデルとした。

3.2 配合

コンクリートの配合および諸物性をTable 2に示す。セメントの種類が自己収縮へ及ぼす影響については、中庸熱ポルトランドセメント、高ビーライトセメント系セメントを用いた場合、自己収縮が小さくなり、高炉セメントB種を用いた場合は、材齢とともに収縮が増大し、長期の収縮が大きくなるとされている。このことから、コンクリートの配合条件は、W/C=41.3%、単位セメント量400kg/m³、s/a=45.0%を同一条件とし、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

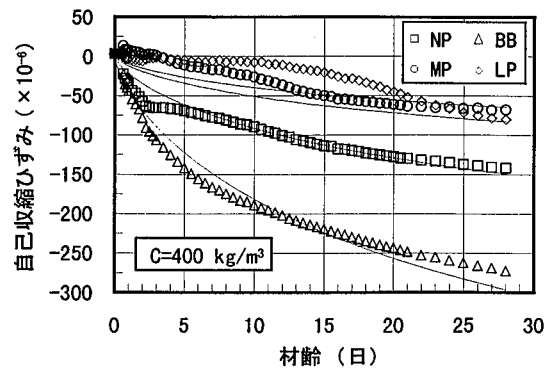


Fig. 6 コンクリートの自己収縮ひずみ
Autogenous Shrinkage of Concrete

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。

3.3 入力条件

温度解析, 温度応力解析に用いた物性値をTable 3に示す。温度解析においては, 発熱体をコンクリートとし, 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。断熱温度上昇試験の結果, コンクリートの最終断熱温度上昇量は, 高炉セメントB種の場合は65.4℃, 低熱ポルトランドセメントの場合は47.7℃であった。

温度応力解析に用いた自己収縮ひずみをFig. 6に示す。ポイントは実測値で, 曲線はJ C I 自己収縮委員会式 (Table 1参照) により近似させたものである。測定結果より, 材齢28日の自己収縮ひずみは, セメントに高炉セメントB種を用いた場合は約 275×10^{-6} となり, 低熱ポルトランドセメントを用いた場合は約 83×10^{-6} であった。係数 a, b は水セメント比によって決まる定数であり, 委員会で提案されている値を用いた。自己収縮ひずみの終局値 ϵ_{∞} は, 材齢28日における自己収縮ひずみの実測値とした。係数 γ は, 近似曲線が実測値を最も近似するように値を定めることによって求めたものである。

3.4 解析結果

3.4.1 温度解析 非定常熱伝導解析による温度解析結果をFig. 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。

3.4.2 温度応力解析 解析結果をFig. 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。Table 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

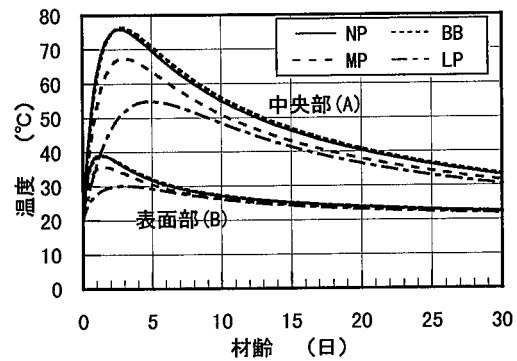
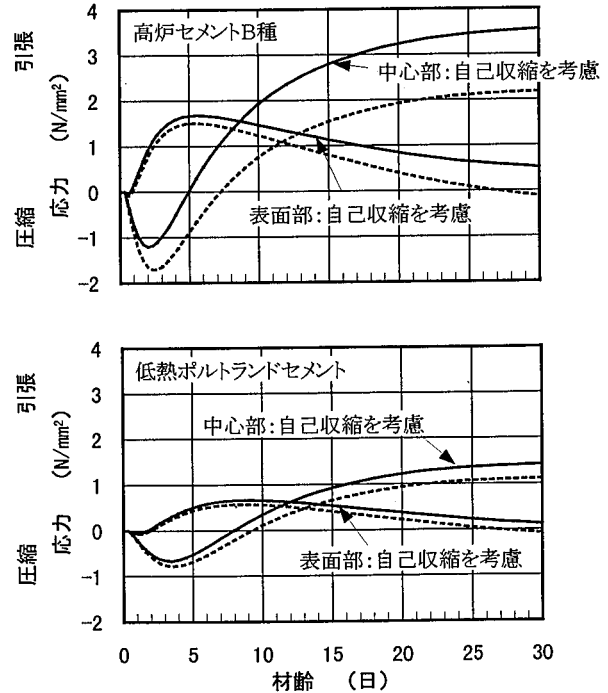
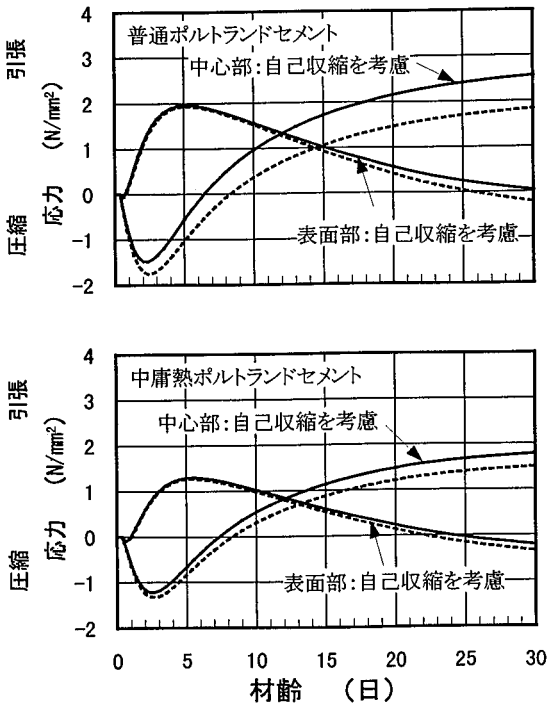


Fig. 7 温度解析結果
Result of Concrete Temperature Analysis



点線は自己収縮を考慮していない

Fig. 8 温度応力解析結果
Results of Thermal Stress Analysis

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0.6N/mm²、中央部では約1.4N/mm²大きく算定されている。高炉セメント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では、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 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 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Fig. 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。

4. 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) 自己収縮ひずみが 100×10^{-6} より大きくなるコンクリートは、自己収縮に起因する応力を無視するには大きすぎる値であるので、自己収縮を考慮する必要がある。

Table 4 自己収縮の考慮・無考慮による応力解析結果

Results of Thermal stress analysis

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	2.56
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

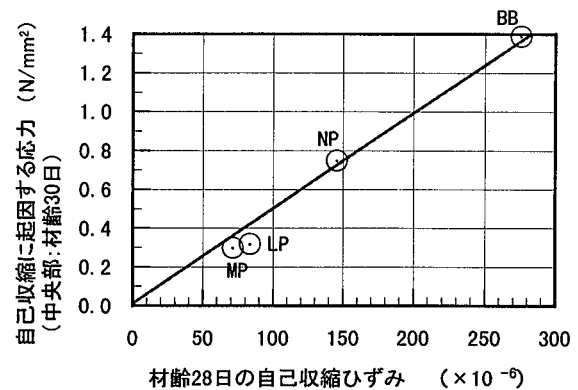


Fig. 9 自己収縮ひずみと自己収縮に起因する応力の関係

Relationship Between Stress and Strain of Autogenous Shrinkage

今後、実構造物における計測と解析結果の検証が必要と考えられるが、自己収縮を考慮できるマスコンクリートの解析プログラムを用いることにより、より精度の良いマスコンクリートのひび割れ予測が可能となると考えられる。

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. 8，(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, No. 1, pp. 133-142, (1999)