論文 各種セメントの自己収縮ひずみ予測式の一提案

中里 剛^{*1}·鳴瀬 浩康^{*2}

要旨:マスコンクリートの温度応力解析を精度良く行うためには部材内部の温度変化を考慮した自己収縮を予測し、温度応力解析に取り込む必要がある。そこで、各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇試験と同時に自己収縮ひずみを測定し、有効材齢と自己収縮ひずみの関係から任意の単位セメント量および材齢における自己収縮の予測式を提案した。また、同提案式を適用したマスコンクリートの温度応力解析を実施した結果、自己収縮を考慮することでひび割れ指数が低下すること、その傾向はセメント種類によって異なることが明らかになった。

キーワード:自己収縮,断熱温度上昇,予測式,温度応力解析,ひび割れ指数

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書が性能照査 型に改訂され、マスコンクリートの温度応力解 析に関しては、自己収縮を考慮した解析方法に よる照査が提案されている。この自己収縮に関 しては既往の研究も多く, 最近では, 土木学会 コンクリート標準示方書「構造性能照査編」1) に、日本コンクリート工学協会自己収縮研究委 員会により纏められた予測式(以下 JCI 予測式と 呼ぶ)²⁾が示されている。自己収縮に影響する要 因には、セメントの種類、量や温度などがあり、 特にマスコンクリートの温度応力解析において は、温度変化をともなう場合の自己収縮の予測 が重要である。しかし、部材内部の温度変化を 考慮した研究報告例 3)が少なく, 温度変化をとも なう場合の自己収縮ひずみを精度良く推定でき ないのが現状である。

そこで本研究では、各種セメントを用いたコンクリートについて、温度変化をともなう場合の自己収縮ひずみを測定し、その挙動を評価できる自己収縮の予測方法を見出すことを目的とした。また、スラブを想定したモデルによる温度応力解析を実施し、セメント種類の違いおよび自己収縮の影響について比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および示方配合

セメントは普通ポルトランドセメント(N), 高 炉セメント B 種(BB), 中庸熱ポルトランドセメ ント(M), 低熱ポルトランドセメント(L)および低 熱高炉セメント (LB) について検討した。細骨 材は千葉県君津産山砂 (表乾密度 2.61g/cm³, 吸 水率 1.50%, FM2.67), 粗骨材は埼玉県両神産 砕石 2005 (表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 0.49%, 実積率 61.9%), 混和剤は市販のリグニンスルホ ン酸系 AE 減水剤およびポリカルボン酸系高性 能 AE 減水剤を使用した。コンクリートの示方配 合を表ー1 に示す。

表-1 コンクリートの示方配合

	水セメント	細骨材率 単位量		(kg/m^3)
記号	是 比 (%)		セメント	水
C28	56.1	42.6	280	157
C36	44.4	41.9	360	160
C42	38.1	48.1	420	160

*C28: AE 減水剤, C36,C42: 高性能 AE 減水剤 *練上がり温度: 20℃

2.2 試験方法

断熱温度上昇は、東京理工社製空気循環式断 熱温度上昇試験機を使用した。断熱状態での自

^{*1 (}株) 宇部三菱セメント研究所 埼玉センター コンクリートグループ (正会員)

^{*2 (}株) 宇部三菱セメント研究所 埼玉センター コンクリートグループ 主席研究員 (非会員)

己収縮ひずみ測定方法を図-1に示す。

断熱状態での自己収縮ひずみは, 断熱温度上 昇測定用試験体の内部中心に φ 100×200mm の 無応力容器(内部にテフロンシートを貼付)と 埋め込みゲージを設置し, 断熱温度上昇と同時 に測定した。断熱温度上昇量が一定値に収束し た後は、自然冷却により温度が 20℃になるまで 測定した(以下断熱状態と呼ぶ)。また,温度に よる影響を明確にするため 20℃一定条件下での 自己収縮ひずみも同時に測定した(以下 20℃ー 定状態と呼ぶ)。自己収縮ひずみの値は、測定さ れる総ひずみから,温度変化量に熱膨張係数10.5 $\times 10^{-6}$ / \mathbb{C} を乗じた温度変化にともなうひずみ量 を差し引いて求めた。また、断熱状態における 自己収縮ひずみの起点は、20℃での凝結試験結 果として求めた凝結始発時間と有効材齢が同じ になるように求めた時点とした。

3. 結果

3.1 断熱温度上昇

表-2 に各種セメントの断熱温度上昇定数を示す。終局断熱温度上昇定数 Q は、いずれのセメントにおいても単位セメント量が多いほど大きくなる。また、セメント種類別では BB および N が大きく、LB が最も小さくなる。

断熱温度上昇の速度定数 γ も同様に単位セメント量が多いほど大きくなり、セメント種類別ではNが最も大きくなる。これらのことから BBはNよりも断熱温度上昇速度はゆっくり進行するものの、断熱温度上昇量の終局値は大きくなることが判る。低熱系のセメントでは、LBはスラグの混入により L よりも断熱温度上昇量は低減されるが、断熱温度上昇速度は速くなる。

3.2 自己収縮ひずみ

(1) 温度変化量と総ひずみ

図-2 に断熱状態における温度変化量と総ひずみの関係を示す。いずれのセメントにおいても、温度上昇量に対する総ひずみの増加量は初期で大きく、温度上昇量が 10~20℃で変曲点が認められ、その増加量が鈍化する。その傾向は

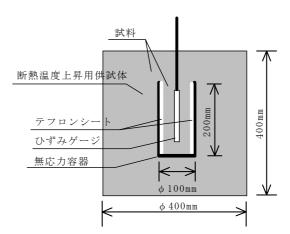
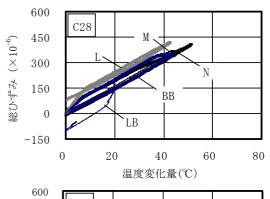


図-1 断熱状態での自己収縮ひずみ測定方法

表-2 断熱温度上昇定数

配合種別	$Q(t)=Q(1-\exp^{-\gamma t})$ または、 $Q(t)=Q(1-\exp^{-\gamma t^{\delta}})$			
作里力リ	Q	γ	δ	
N-C28	47.6	0.8312	_	
N-C36	55.7	0.9861	_	
N-C42	61.0	1.3071	_	
BB-C28	50.4	0.6110	_	
BB-C36	59.2	0.7762	_	
BB-C42	65.5	0.8922	_	
M-C28	40.4	0.4471	_	
M-C36	47.9	0.6617	_	
M-C42	55.8	0.7911		
L-C28	44.7	0.3258	0.5943	
L-C36	49.1	0.4362	0.6741	
L-C42	50.0	0.5075	0.8024	
LB-C28	25.9	0.5818	0.8707	
LB-C36	29.2	0.7673	0.9232	
LB-C42	33.8	0.8135	0.9155	



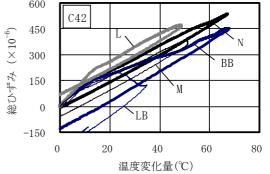


図-2 温度変化量と総ひずみの関係

C42 で顕著となる。これは、硬化にともなって 熱膨張係数が変化していることが原因と推察される⁴⁾。また、BB-C42 および LB では、温度 上昇過程において更に総ひずみの増加量が鈍化 する。これは、熱膨張に対して自己収縮が無視 できないほど大きくなっていることを示してお り、高温履歴を受けた場合にスラグが活性化し た影響と推察される⁵⁾⁶⁾。

(2) 断熱状態での自己収縮ひずみの推移

図-3 に自己収縮ひずみの推移を示す。自己収縮ひずみは、いずれの場合においても硬化初期に若干膨張側、それ以降は収縮側に推移している。これは、硬化初期の熱膨張係数が 10.5×10^6 / \mathbb{C} より大きいため、補正量を小さく算定していることなどの影響によると考えられる 4778 。 しかし、本研究では温度応力解析に用いる熱膨張係数を 10.5×10^6 / \mathbb{C} 一定とし、測定される総ひずみから温度変化にともなうひずみ量を差し引いて求めた値を断熱状態での自己収縮ひずみとして採用した。

断熱状態における自己収縮ひずみの終局値は、単位セメント量が多い配合ほど大きくなる。また、セメント種類別では BB、LB が大きく、L が最も小さくなる。このことから、自己収縮ひずみに及ぼすスラグの影響は大きいと考えられる。

(3) JCI 予測式との比較

JCI 自己収縮研究委員会では、自己収縮の予測式を提案しており、同予測式から求めた値(以下 JCI 予測値と呼ぶ)と断熱状態での実測値との比較を行った。図-4に、Nを用いた場合の自己収縮ひずみの JCI 予測値と断熱状態での実測値の比較を示す。

自己収縮ひずみの終局値は、いずれの単位セメント量においても JCI 予測値よりも実測値の方が大きく、自己収縮ひずみの進行速度も大きくなる。また、断熱状態における自己収縮ひずみは、有効材齢 10 日程度までに急激に大きくなり、20℃一定状態の場合に比べて有効材齢初期における乖離が大きくなる。

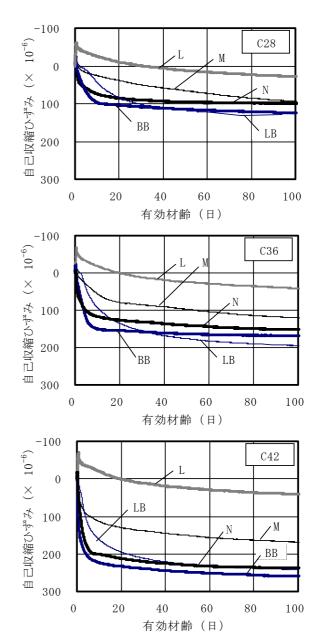


図-3 自己収縮ひずみの推移

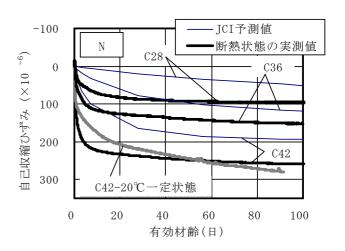


図-4 JCI 予測値と断熱状態での実測値 との比較 (Nの場合)

(4) 温度変化をともなう場合の自己収縮予測 式の提案

断熱状態における自己収縮ひずみは JCI 予測値と一致しないため、本研究での結果を基に、セメントの種類および単位セメント量を考慮した温度変化をともなう場合の自己収縮の予測式として式(1)を提案する。なお、有効材齢 t は式(2)を用いた。

$$\varepsilon_{C0}(t) = \varepsilon_{C0\infty} \cdot \beta(t) = \varepsilon_{C0\infty}(1 - \exp^{-at})$$
 (1)

$$t = \sum \Delta t_i \cdot \exp\left(13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right) \quad (2)$$

ここに,

 $\epsilon_{CO}(t)$: 有効材齢 t 日における断熱状態での自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), $\epsilon_{CO\infty}$: 断熱状態での自己収縮の終局値($\times 10^{-6}$), $\beta(t)$: 自己収縮の進行を表す関数,a および b: 近似式から求まる定数, Δt_i : 温度が $T(^{\infty})$ である期間の日数, $T_0=1^{\infty}$

式(1)によって求められた自己収縮ひずみの終局値 $\epsilon_{C0\infty}$, 自己収縮ひずみの進行を表す定数

a および b と単位セメント量 Cem の関係を図-5 に示す。これらの関係は,セメントの種類別の式(3) \sim (5)に示す指数関数によって近似でき, $\mathbf{表}-\mathbf{3}$ に示す定数により自己収縮ひずみの終局値 $\epsilon_{C0\infty}$ および自己収縮ひずみの進行を表す関数 β (t)を求めることができる。

$$\epsilon_{C0\infty} = A \exp (B \cdot Cem)$$
 (3)

$$a = C \exp (D \cdot Cem)$$
 (4)

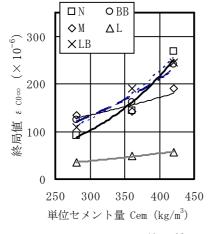
$$b = E \exp (F \cdot Cem)$$
 (5)

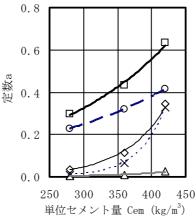
ここに,

 $\epsilon_{C0\infty}$: セメント種類および単位セメント量から求まる自己収縮ひずみの終局値($\times 10^{-6}$),Cem: 単位セメント量(kg/m^3),a および b: セメント種類および単位セメント量から求まる進行を表す関数 β (t)の定数,A,B,C,D,E,F: セメント種類,単位セメント量 Cem から $\epsilon_{C0\infty}$,a お

本提案式を用いることで、セメント種類およ び単位セメント量が異なる条件下での温度変化 をともなう場合の自己収縮ひずみを予測できる。

よびbを求めるための定数





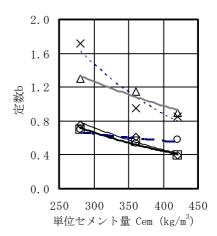


図-5 終局値 $\epsilon_{00\infty}$, 定数 a および b と単位セメント量 cont on 関係

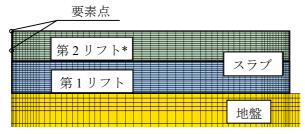
表-3 断熱状態での自己収縮ひずみを求める式(3)~(5)の定数

セメント	$\varepsilon_{C0\infty} = A \exp (B \cdot Cem)$		$a=C \exp (D \cdot Cem)$		$b=E \exp (F \cdot Cem)$	
の種類	A	B $(\times 10^{-3})$	$C (\times 10^{-3})$	D $(\times 10^{-3})$	Е	$F (\times 10^{-3})$
N	10.8	7.5	64.7	5.4	2.2	-4.0
BB	33.1	4.8	69.6	4.2	1.0	-1.4
M	65.2	2.4	0.4	16.1	2.8	-4.5
L	13.6	3.4	0.2	11.3	2.7	-2.6
LB	21.3	5.9	0.007	25.5	6.8	-5.1

4. 温度応力解析

4.1 温度応力解析条件

2 リフトのスラブモデルについて、市販の解析 ソフト (ASTEA-MACS) にて 2 次元 FEM によ る温度応力解析を行った。解析モデルを図-6 に、 解析条件を表-4 に示す。なお、各セメントの断 熱温度上昇定数は表-2 により、自己収縮ひずみ は式(1)および表-3 より求めた。また、セメン トは N、 BB, L O 3 種類とした。



*解析モデル寸法 $X-Y:20\times3m$ (1.5 $m\times2$ リフト) *第 2 リフトは、第 1 リフト打設後 7 日後に打設

図-6 解析モデル

表-4 解析条件

項目			条件			
セメント種類			N	BB	L	
設計基準強度			30N/mm² (材齢 28 日)			
水セメン	水セメント比 (%)			55.0	44.1	
セメント	量	(kg/m^3)	311	300	374	
断熱温月	WC #h › P rbs		50.0	49.3	49.3	
上昇定数		γ	0.9919	0.6970	0.4535	
上升足列	X	δ			0.7047	
熱伝達率	(W	//m • °C)	Con: 2.67, 地盤: 3.49			
比熱	(k.	J/kg⋅°C)	Con : 1.	Con: 1.17,地盤: 0.795		
単位容積	近星	$r(1_{r\alpha}/m^3)$	2331	2317	2349	
半世分似	貝里	k(kg/III)	地盤:2650			
劫に法索 (W/m ² ℃)		型枠存置打設~3 日:8.0				
然因建平	熱伝達率 (W/m ² ℃)		3 日~ :12.0			
熱膨張係	数	(/℃)	10.5×10^{-6}			
		30°D•D	10.8	2.1	3.2	
圧縮	90°D·D 210°D·D		19.1	13.3	10.0	
強度			25.5	21.9	15.2	
σс	840°D·D		36.0	36.0	36.0	
(N/mm^2)	1680°D•D		41.1	43.1	54.6	
	27	′30°D•D	44.7	48.0	65.4	
引張強度 σ t(N/mm²)		$\sigma t = 0.122 \sigma c^{0.877}$				
弹性係数 Ec(N/mm²)		$Ec = 0.580 \times 10^4 \text{ s c}^{0.491}$				
		地盤:4903				
自己収縮ひ € co∞		111.3	139.7	48.5		
	ずみを求め		0.35	0.25	0.01	
る定数・係数 b		0.63	0.66	1.02		

4.2 温度応力解析結果

解析結果を表-5, 図-7 および図-8 に示す。

第2リフト中心では、BBのひび割れ指数が最 も低く, 次いで N となる。L は温度上昇が小さ いため発生する応力が小さく、NやBBに比較し てひび割れ指数は高くなる。自己収縮を考慮し た場合, N および BB では約 1.3N/mm², L では 約 0.3N/mm² 引張側の発生応力が増大する。この ため、いずれのセメントにおいてもひび割れ指 数は低下し、特に、N および BB で顕著となる。 一方で,Lは単位セメント量が多いにも関わらず, N および BB よりも自己収縮により増加する応 力が小さいため, ひび割れ指数の低下は小さく なる。リフト表面部では、材齢初期に引張側の 温度応力が発生する。自己収縮を考慮した場合 には、引張強度が未だ小さい材齢で引張応力が 増大するため、中心部よりひび割れ指数の低下 が大きくなる。

表-5 温度応力解析結果

セメ	自己	第2リフト中心		第2リフト表面	
ント 種類	口縮 考慮	ひび 割れ 指数	経過 日数* (日)	ひび 割れ 指数	経過 日数* (日)
N	無	1.31	35	2.02	15
	有	0.82	31	1.04	15
BB	無	0.87	31	1.86	15
	有	0.62	29	1.04	16
L	無	1.84	37	2.45	15
	有	1.59	35	2.42	15

*第1リフト打設からの経過日数

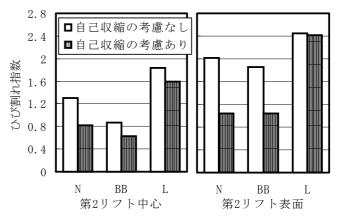
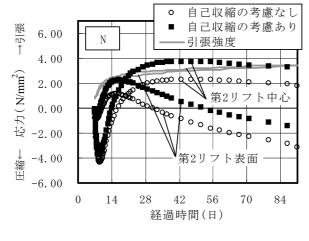
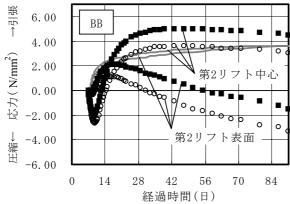


図-7 自己収縮の考慮の有無による 応力解析結果(ひび割れ指数)





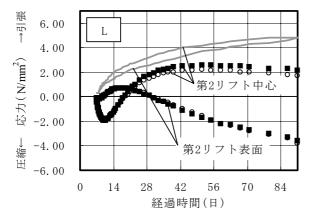


図-8 各セメントの温度応力および引張強度

5. まとめ

本研究では、断熱状態での自己収縮ひずみを 断熱温度上昇試験と同時に測定し、温度変化を ともなう場合の自己収縮を予測する方法を見出 すことを目的とした。また、温度応力解析を実 施し、セメント種類の違いおよび自己収縮の影 響について比較検討した。得られた結果は以下 のとおりである。

- 1) 断熱状態での自己収縮ひずみの終局値は、単位セメント量が多いほど大きくなる。
- 2) 断熱状態での自己収縮ひずみは、有効材齢初

期での進行速度が大きくなる。また、JCI 予測 式から求めた値とは一致しない。

- 3) 本結果を基に、セメント種類および単位セメ ント量をパラメータとした温度変化をともな う場合の自己収縮予測式を提案した。
- 4) N あるいは BB では, 温度応力解析に自己収縮 を考慮すると, ひび割れ指数が顕著に低下した。一方, L では自己収縮が小さいため, ひび 割れ指数の低下はわずかであった。

本試験方法および本提案式を温度応力解析に 採用することで、従来よりも実構造物に近い条件下での解析が可能となった。また、本提案式 の適用は今回実施した試験条件での範囲に限ら れるため、更なるデータ蓄積を行う必要がある。

参考文献

- 土木学会、コンクリート標準示方書(2002 年制定) [構造性能照査編], 2002
- 2) 日本コンクリート工学協会,自己収縮研究委員会報告書,pp.114-121, 1996.11
- 3) 筋野晃司ほか:マスコンクリートのひび割れ 発生に及ぼす自己収縮の影響,コンクリート 工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.561-566, 1992
- 4) 丁海文ほか: 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
- 5) 原田克己ほか: 水和熱を考慮した高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみ特性, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.1, pp.23-33, 2003
- 6) 大友健ほか:各種セメントを使用したコンク リートの異なる温度条件下での自己収縮特 性,第 57 回セメント技術大会講演要旨, pp.176-177,2003
- 7) 日本コンクリート工学協会,品質評価試験方 法研究委員会報告書,pp.74-77,1998.12
- 8) 日本コンクリート工学協会,自己収縮研究委員会報告書,pp149-151, 2002.9