

# [1] 水和抑制型膨張材のマッシブなコンクリートへの適用

正会員 安藤 哲也 (電気化学工業(株)中央研究所)  
 正会員 ○五味 秀明 (同上)  
 宇田川 秀行 (同上)  
 玉木 俊之 (同上)

## 1. まえがき

コンクリート構造物は、その構造形態、周囲の環境条件により程度の差はあれ、体積変化を生じる。構造物や部材があらゆる方向に自由に体積変化を生ずることが可能であれば、均等な体積変化となり、ひびわれは発生しない。しかし、実際には、不均等な体積変化が内部的あるいは外部的に拘束されることにより、ひびわれが発生する。マッシブなコンクリート部材では、比較的早期にひびわれの発生の認められることがあるが、このひびわれの主原因は、セメントの水和熱による温度の上昇・降下に伴う熱伸縮ひずみが、既設コンクリートや岩盤等によって拘束されることにあるものと考えられる。

現在、コンクリート構造物のひびわれを防止し得る材料面での手段として、膨張材を混和した膨張コンクリートの利用がある。膨張コンクリートを使用した場合、膨張力を利用してコンクリートに圧縮圧力を導入し、乾燥収縮により生じる引張応力を補償することができ、また、膨張力を積極的に利用してケミカルプレストレスを導入し、コンクリートの引張強度を改善することができる。しかし、従来の膨張コンクリートをマッシブなコンクリートに用いた場合には、セメントの水和熱によって、その膨張発現の時期が早くなり、コンクリートが最高温度に達するまでに膨張反応がほとんど終わってしまう傾向にあること、また、温度上昇量も、普通コンクリートに比べて大きくなることが報告されており、膨張コンクリートの利用効果が軽減されている。

本報告は、マッシブなコンクリート用に開発された水和抑制型膨張材を用いたコンクリートの基礎物性について述べるるとともに、吉岡氏等<sup>1)</sup>が考案した断熱コンクリートの大型一軸拘束モデル実験により温度応力を直接測定し、その水和抑制効果を検討した結果を取りまとめたものである。

## 2. 水和抑制型膨張材について

水和抑制型膨張材(以下膨張材Rと呼ぶ)は、カルシウムサルフォアルミネート系膨張材(以下膨張材Nと呼ぶ)にセメント水和抑制用多分子有機化合物を添加したものである。

膨張材を混和したセメントの水和による発熱速度曲線を、カロリメーターにより測定した例を図-1に示す。カロ

リメーターは東京理工社製の双子差動型伝導熱量計を使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比(W/(C+E))は50%とし、測定温度は30℃で測定した。また、図-2に、膨張材単味の水和による発熱速度曲線を示す。図-1と同様の試験装置を用い、水膨張材比(W/E)は50%とし、測定温度30℃で測定した。膨張材をセメントに混和し、セメント硬化体を膨張させると、膨張材が水和発熱し、10数時間後に大きな膨張発現を示す。膨張材Nを混和したセメントの水和発熱速度は、普通セメントのみの場合の水和発熱速度に比べて若干早い。これに対して、膨張材R

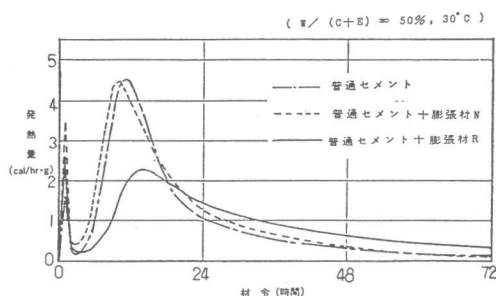


図-1 膨張材を混和したセメントの水和

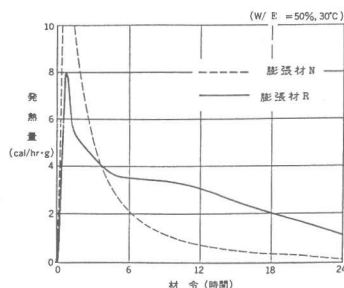


図-2. 膨張材の水和

を混和したセメントの場合は、水和発熱速度が抑えられる。また、膨張材 R 単味の水和発熱速度も抑制され、材令 1 日以後にも水和反応が続いている。

膨張材 R を混和したモルタルの温度上昇試験結果の例を、図-3 および表-1 に示す。温度測定は、図-4 に示す様な発泡スチロール (厚さ 10 cm) 製の簡易断熱容器を用い、熱電対により中心部の温度を自動記録計で測定したものである。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、モルタル配合は、セメント砂比 (C/S) を 50%、水セメント比 (W/(C+E)) を 42% とした。温度測定は、練り上り温度を 10℃、20℃、30℃ の 3 条件を目標とし、それぞれの目標練り上り温度に設定した恒温室内で測定した。環境温度 (目標練り上り温度) が 10℃、20℃、および 30℃ の場合とも、これまでの報告のように膨張材 N を混和したモルタルの温度上昇量は、普通モルタルのそれに比べて大きく、最高温度到達時間も早く膨張材 N の水和促進効果が確かめられた。膨張材 R を混和したモルタルの温度上昇量は、普通モルタルのそれに比べて小さく、最高温度到達時間も遅く、混和材 R の水和熱抑制効果が認められる。その効果は、環境温度が高いほど顕著である。

図-5、表-2 にコンクリートの温度上昇試験結果を示す。普通ポルトランドセメントを用い、骨材は相模川産の川砂、川砂利を使用した。コンクリート配合は、表-3 に示すものを用いた。温度測定は、モルタルの上昇温度試験と同様に、図-4 に示す発泡スチロール (厚さ 10 cm) 製の簡易断熱容器を用い、熱電対により中心部の温度を自動記録計で測定したものである。練り上り温度は 10℃、および 30℃ の 2 条件を目標とした。モルタルの場合と同様に、膨張材 N の水和促進および膨張材 R の水和抑制効果が認められるが、モルタルの場合に比べてセメント量が少ないために、これらの現象は緩和される。この場合でも、高温下における膨張材 R の水和抑制効果は大きい。

各種温度における凝結硬化試験結果を図-6 に示す。コンクリート配合は同じく、表-3 のものを用いた。図中の温度は、練り上り温度および養生中の室温を示す。試験方法は、ASTM C403 (プロクター貫入抵抗試験) に準じた。膨張材 R を

混和したコンクリートの凝結は、30℃において著しく遅れ、常温 (20℃) 時の普通コンクリートと同様の凝結硬化時間となった。この凝結硬化時間の遅れは、温度が低くなるにつれて小さくなった。

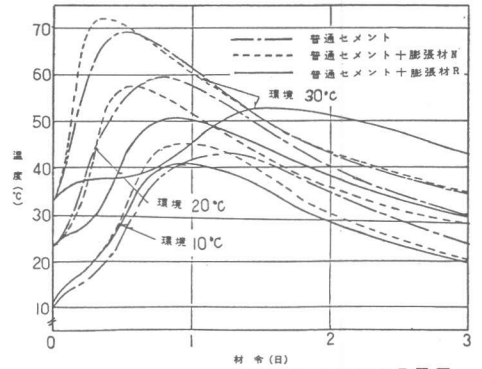


図-3. モルタルの簡易断熱温度上昇履歴

表-1. モルタルの簡易断熱温度上昇

セメント	膨張材	目標打設温度 (°C)	$\Delta T_{max}$ (°C)	最高温度到達時間 (hrs.)
100	0	30	36.6	12
95	5 膨張材 N		39.1	10
	5 膨張材 R		19.8	36
100	0	20	36.0	18
95	5 膨張材 N		34.5	14
	5 膨張材 R		27.9	22
100	0	10	33.9	30
95	5 膨張材 N		34.7	24
	5 膨張材 R		29.1	26

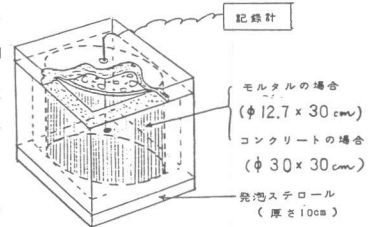


図-4. 簡易断熱試験装置

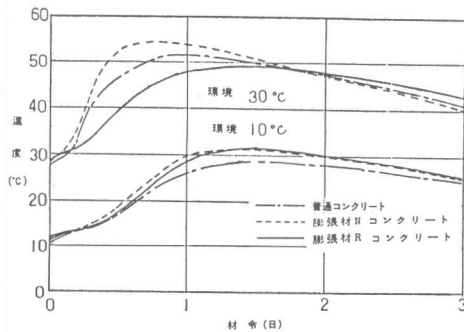


図-5. コンクリートの簡易断熱温度上昇履歴

表-2. コンクリートの簡易断熱温度上昇

セメント (kg/m³)	膨張材 (kg/m³)	目標打設温度 (°C)	$\Delta T_{max}$ (°C)	最高温度到達時間 (hrs.)
310	0	30	24.5	22
280	30 膨張材 N		26.2	18
	30 膨張材 R		20.5	36
310	0	10	18.0	38
280	30 膨張材 N		19.5	26
	30 膨張材 R		19.0	36

温度上昇試験結果と同様に、膨張材 R の凝結硬化時間の遅れは、コンクリート温度が高い程大きくなる。

### 3. 一軸拘束モデル実験

膨張材 R を混和したコンクリートをマッシュなコンクリート部材に用いた場合、膨張材 R の水和抑制効果が、いわゆる温度応力の抑制に対してどの程度有効であるかを確認するために、温度変化や膨張材の膨張によって生ずるコンクリートの体積変化を鋼材（H型鋼）によって外部から拘束する拘束実験装置を用いて測定した。拘束実験装置は図-7に示すように、コンクリート中心部（24 cm×24 cm）を発泡スチロール（厚さ 10 cm）製の断熱材で囲むことにより、水和熱の逸散を減少させ、マッシュなコンクリート部材に近い温度履歴を与え、この温度変化と膨張材の膨張によるコンクリート体積変化を鋼材で拘束するものである。鋼材にはワイヤストレインゲージを貼り付け、コンクリートの温度応力は、鋼材のひずみ測定値から力のつり合いにより求めた。鋼材とコンクリートとのすべりを防止するために、端部での断面積を大きくし、亜鉛状にするとともに、すべり止め筋を溶接した鉄板とコンクリート部とをボルトで緊着させた。拘束鋼材比（ $A_B / A_C$ ）は 10% とし、鋼材による  $K = 1 / (1 + E_C \cdot 28 A_C / E_S A_B)$  で定義される拘束度  $K$  は、標準養生材令 28 日のコンクリートのヤング率  $E_C$  を用いると、0.46 である。コンクリート配合は、表-3 に示すものとした。また、温度応力が一番問題となる夏季を想定して練り上り温度は 30℃ を目標とし、30℃ 一定の恒温室内で測定した。

図-8 に埋設した熱電対によって測定した被拘束部分のコンクリートおよび鋼材の温度履歴を示す。鋼材の温度は 30℃ 一定である。この図から、膨張材 N の水和促進および膨張材 R の水和抑制効果が認められる。図-9 に拘束応力の実測値を示す。普通コンクリートの場合、初期に温度が上昇し、コンクリートに圧縮応力が生ずるが、温度降下とともに大きな引張応力が作用するようになる。膨張材 N を混和したコンクリートの場合、初期に温度上昇による熱膨張と膨張材の膨張作用とが加わって大きな圧縮応力が作用するが、温度降下とともに普通コンクリートと同様の大きな引張応力が作用するようになる。最大圧縮応力から温度降下とともに作用する引張応力は、普通コンクリートの場合が約  $19 \text{ Kg/cm}^2$ 、膨張材 N を混和したコンクリートの場合が約  $20 \text{ Kg/cm}^2$  であり、温度降下時には温度降下量に見合った引張応力が作用することになる。すなわち、膨張材 N の膨張は、セメントの水和熱によってその膨張発現の時期が早くなり、コンクリートが最高温度に達する

表-3. コンクリートの配合

Dmax (mm)	スランダム (mm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (Kg/m³)					水灰比
					セメント	水	細骨材	粗骨材	膨張材	
25	15	4	53	44	310	165	781	1041	0	0.775
25	15	4	53	44	280	165	781	1041	30 膨張材 N	0.775
25	15	4	53	44	280	165	781	1041	30 膨張材 R	0.775

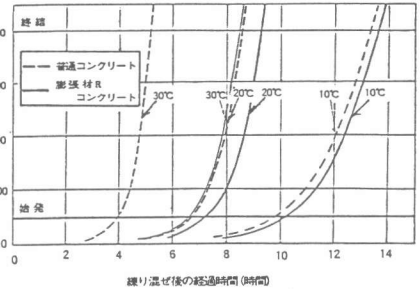


図-6 各種温度における硬化時間

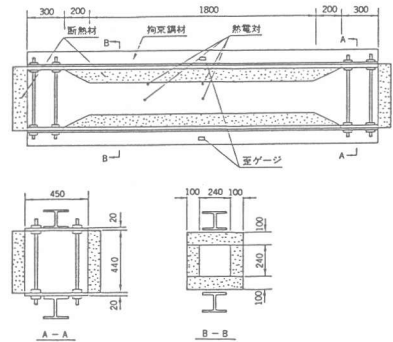


図-7. 拘束実験装置

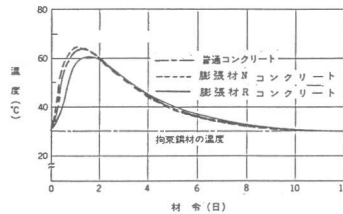


図-8. コンクリートの温度履歴

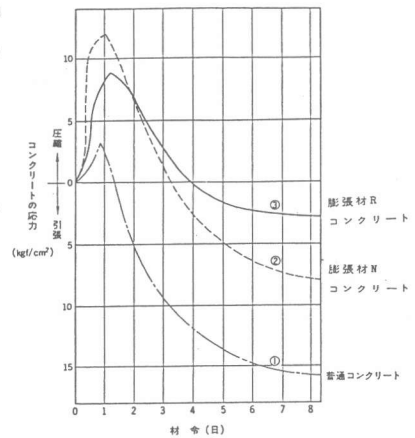


図-9. 拘束応力

までに膨張反応が終わってしまい、温度降下によるコンクリートの体積収縮が膨張材 N によって緩和されることなく、普通コンクリートの場合と同様の拘束引張応力が作用したことが認められる。膨張材 R を混和したコンクリートの場合は、膨張材 N と同様に、初期に大きな圧縮応力が作用して、温度降下とともに引張応力が作用するようになるが、膨張材 N に比べて、初期の最大圧縮応力も小さく、最大圧縮応力到達時間も遅れており、膨張材 R の水和抑制効果が認められる。また、温度降下とともに作用する引張応力の増大曲線が、普通コンクリートおよび膨張材 N を混和した場合に比べてゆるやかである。これは、温度降下時にも膨張の持続し、温度降下によるコンクリートの体積収縮を緩和するものと思われる。

#### 4. 膨張コンクリートのマッシュなコンクリートへの適用性について

マッシュなコンクリート部材が外的に拘束された場合に生じる引張応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_t = K \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E_c^2 \quad \dots\dots (1)$$

ここに K : 1.0 を 100 % 拘束として表わした拘束度、 $\alpha$  : コンクリートの熱膨張係数、 $\Delta T$  : 温度降下量、 $E_c$  : コンクリートのヤング係数である。温度応力の解析においては、コンクリートの極めて初期の材令から、ヤング率、クリープ、強度といった物性の経時的な変化を考慮した計算方法が必要となる。そのためここでは、微少時間ごとに温度変化  $\Delta T$  により作用する作用応力を求め、それらを積算するという方法を用いた。ヤング率、クリープ、強度は、温度履歴から積算温度を求め、その積算温度に応じた物性を用いた。微少時間  $t_{i-1}$  から  $t_i$  の間に、温度が  $T_{i-1}$  から  $T_i$  に変化した時、コンクリートの熱変形が完全に拘束されるものとして、作用応力を  $\sigma_{i,i}$  とすると、

$$\sigma_{i,i} = \alpha \cdot (T_i - T_{i-1}) \cdot E_i \quad \dots\dots (2)$$

となり、 $t_{i+1}$  でのクリープによる緩和分は、

$$\Delta \sigma_{i,i+1} = \sigma_{i,i} \cdot C_{r,i+1} \cdot E_{i+1} \quad \dots\dots (3)$$

となる。ここに、 $C_{r,i+1}$  : 載荷時  $t_i$  の微少時間  $t_i$  から  $t_{i+1}$  における単位応力度当りのクリープひずみ、であるから、作用応力  $\sigma_{i,i}$  は、 $t_{i+1}$  では  $\sigma_{i,i} \cdot (1 - C_{r,i+1} \cdot E_{i+1})$ 、 $t_{i+2}$  では  $\sigma_{i,i} \cdot (1 - C_{r,i+1} \cdot E_{i+1}) \cdot (1 - C_{r,i+2} \cdot E_{i+2})$  となる。したがって、材令  $j$  時における温度応力  $\sigma_j$  は、

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^j \sigma_{i,i} \cdot (1 - C_{r,i+1} \cdot E_{i+1}) \cdot (1 - C_{r,i+2} \cdot E_{i+2}) \cdot \dots \cdot (1 - C_{r,j} \cdot E_j) \quad \dots\dots (4)$$

となる。図-8の温度降下曲線から、上記の(4)式を用いて応力を求めると、普通コンクリートの場合が、 $-3.9.8 (-1.8.3) \text{ kg/cm}^2$ 、膨張材 N の場合が、 $-4.3.2 (-1.9.9) \text{ kg/cm}^2$ 、膨張材 R の場合が、 $-3.5.8 (-1.6.5) \text{ kg/cm}^2$  となった。( )内の数値は拘束度  $K = 0.46$  (厳密にはヤング率が変化しており拘束度も変化するが、最高温度時のヤング率が  $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  前後であるので、ここでは拘束度  $K = 0.46$  を用いた)での計算値である。図-9の最大応力からの作用引張応力と比べると普通コンクリートおよび膨張材 N の場合はほぼ計算値と一致している。しかし、膨張材 R の場合は、温度降下曲線から求めた計算値に対して、実測値は  $5 \text{ kg/cm}^2$  程度小さい。これは、温度降下時においても膨張材の水和が持続した効果と考えられる。

本研究を進めるにあたり終始熱心に御指導いただいた足利工大辻助教授、又、一軸拘束モデル実験の実施に当り御協力いただいた竹中技術研究所吉岡主任研究員に厚く御礼申し上げます。

#### <参考文献>

- 1) 吉岡、米沢、丹原「マッシュなコンクリート部材に生じる拘束応力とひびわれに関する研究」第1回コンクリート工学年次講演会、1979
- 2) ACI 207 Committee, Journal of ACI, July, 1973