

# 高温条件下のコンクリートの力学的性質 に及ぼす微視的溫度応力の影響

## EFFECT OF MICROSCOPIC THERMAL STRESS ON MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE

南 和孝\*・田澤栄一\*\*・寺西修治\*\*\*

By Kazutaka MINAMI, Ei-ichi TAZAWA and Shuji TERANISHI

The AE signals were detected in concrete specimen by means of Acoustic Emission Method during heating or cooling of concrete. The temperature when the first AE signal is detected, is lower than that when the dehydration of moisture in concrete takes place. This result suggests that the reason for the change of property of concrete subjected to high temperature cannot be explained only by the dehydration of moisture in concrete. It is the purpose of this paper to point out that the microscopic cracks are developed by the microscopic thermal stress due to the difference between the thermal expansion coefficient of mortar and coarse aggregate. From the experimental results, it was proved that the mechanical properties of concrete subjected to the high temperature are influenced by the generation of microscopic stress and the formation of crack.

*Keywords: microscopic thermal stress, microscopic crack, mechanical properties, high temperature, aggregate, acoustic emission*

### 1. ま え が き

高温で使用されるコンクリートは、常温でセメントが硬化しコンクリートの構造が形成されたときと異なった温度になるため、各複合素材が個々に異なった収縮あるいは膨張を示し、コンクリートの熱的ならびに力学的性質を変化させる<sup>1)</sup>。

著者らは、コンクリート供試体を高温条件下で加熱あるいは冷却する過程でアコースティック・エミッション法<sup>2)</sup>を利用して微小ひびわれの形成状況を観測<sup>3)</sup>した。その結果、コンクリート中の水分の急激な脱水が開始する以前の温度段階から微震音（アコースティック・エミッション、以下AEとよぶ）が計測され、温度降下時には累積AEカウンターの値が急増することが確認された。

コンクリートはセメントペースト、細骨材および粗骨材から構成される複合材料である。高温の影響を受けるコンクリートの内部では、コンクリートを構成する複合素材がそれぞれ固有の熱膨張挙動を示し、モルタル相と

粗骨材相との間に熱膨張量の相違が生じる。各相が連続性を保持するためには、相間に自己応力、すなわち微視的溫度応力が発生することになる。著者らは、この微視的溫度応力がコンクリート内部の微小ひびわれを形成<sup>3)</sup>し、高温条件下のコンクリートの性質を変化させる重要な要因であると考えた。この種の応力は、コンクリートの複合素材の物理的な性質に影響される<sup>4),5)</sup>ことから、コンクリートに使用される細骨材および粗骨材の岩種によって変化し、コンクリート内部の微小ひびわれの発生状況は岩種によって異なる。このことから、コンクリートを構成する複合素材の力学的性質ならびに熱膨張量が微視的溫度応力と力学的性質に及ぼす影響を明らかにすることは、高温条件下でコンクリートを使用するときの変形特性や強度を検討するうえで重要な要因である。

### 2. 本研究の概要

本研究では、細骨材および粗骨材に熱的および力学的性質が異なる骨材を用いてコンクリートを製造し、温度上昇および温度降下過程に温度の加熱・冷却のみで形成される微小ひびわれを観測し、使用骨材の種類の影響を調査した。ついで、コンクリートを構成するモルタルおよび砕石母岩の高温条件下の熱的および力学的性質を測定し、測定結果を用いて微視的溫度応力の算定を行った。

\* 正会員 防衛大学校助手 土木工学教室  
(〒160 横須賀市走水1-10-20)

\*\* 正会員 工博 広島大学教授 工学部第4類  
(〒724 東広島市西条町大字下見)

\*\*\* 学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (同上)

さらに、高温条件下におけるコンクリートの熱変形特性および力学的特性を測定し、これらの測定結果に基づいてこの種のコンクリートの熱的および力学的特性に及ぼす微視的溫度応力の影響について検討を行った。

### 3. 実験概要

#### (1) 使用材料および配合

本実験には普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材には泥質岩起源熱変成岩（ホルンフェルス）および石灰岩の砕砂を使用し、粗骨材にはホルンフェルスおよび石灰岩の碎石（ともに最大寸法 25 mm）を使用した。ホルンフェルスおよび石灰岩は、広島県地方で使用される碎石母岩のうち、熱膨張係数に関しそれぞれ最大と最小なものである。これらの細骨材および粗骨材は土木学会の標準粒度になるように調整し、骨材の種類に関係なく同一粒度分布とした。これらの骨材を用いて表-1 に示すモルタルおよびコンクリート供試体を製造し、同時にセメントペースト供試体も製造した。セメントペーストの配合は  $W/C=50\%$ 、モルタルの配合は  $W/C=50\%$ 、 $S/C=2.45$ 、フロー値 180 であり、コンクリートの配合は  $W/C=50\%$ 、 $s/a=60\%$ 、スランブ 8 cm とした。なお、供試体はセメントペーストおよびモルタルの場合  $\phi 5 \times 10$  cm、コンクリートの場合  $\phi 10 \times 20$  cm の円柱供試体である。また、コンクリートの内部温度計測用として、供試体中心部に熱電対を埋め込んだものを作製した。供試体は 2 週水中養生（水温  $20^\circ\text{C}$ ）の後、1 週気温  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 50 % の室内で気乾養生し所定の試験を行った。

#### (2) 実験方法

##### a) 熱膨張特性の測定

所定の養生を終了した供試体の表面の長軸方向に一对の高温用ストレングージ（ゲージ長：25 mm、使用温度範囲： $-20 \sim +300^\circ\text{C}$ ）を貼付け、高温槽内の温度上昇速度および降下速度を毎時  $20^\circ\text{C}$  とし、温度変化に伴うひずみ量を測定する。また、同時に供試体と同等直径を有する石英ガラスの円柱に同様なタイプのストレングージを貼付けることによって、供試体の熱膨張係数 ( $\alpha$ ) は次のようにして求めることができる。

表-1 供試体の種類

	記号	細骨材岩種	粗骨材岩種
モルタル	H	ホルンフェルス	-
	L	石灰岩	-
コンクリート	HH	ホルンフェルス	ホルンフェルス
	HL	ホルンフェルス	石灰岩
	LH	石灰岩	ホルンフェルス
	LL	石灰岩	石灰岩

供試体の見掛けの熱膨張ひずみ ( $\epsilon_s$ ) はゲージ自体の熱膨張係数 ( $\alpha_g$ ) とゲージの温度変化  $\Delta T$  による定数  $K$  を用いて、

$$\epsilon_s = [K + (\alpha - \alpha_g)] \cdot \Delta T \dots\dots\dots (1)$$

と表わされる。

一方、石英ガラスの熱膨張ひずみ ( $\epsilon_q$ ) は石英ガラスの熱膨張係数 ( $\alpha_q$ ) より、

$$\epsilon_q = [K + (\alpha_q - \alpha_g)] \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

となる。

式 (1)、(2) よりゲージの特性は差し引かれ、

$$\epsilon_s - \epsilon_q = (\alpha - \alpha_q) \cdot \Delta T \dots\dots\dots (3)$$

となる。

上式を変形して

$$\alpha - \alpha_q = (\epsilon_s - \epsilon_q) / \Delta T \dots\dots\dots (4)$$

となる。

この式で  $\alpha_q$  は非常に小さいので無視することによって、供試体の熱膨張係数 ( $\alpha$ ) は

$$\alpha = (\epsilon_s - \epsilon_q) / \Delta T \dots\dots\dots (5)$$

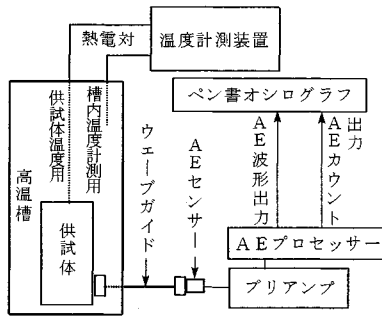
により計算される。

##### b) 供試体の力学的性質の測定

セメントペースト、碎石母岩、モルタルおよびコンクリートの圧縮強度、弾性係数およびポアソン比の測定は常温下、さらに加熱あるいは冷却時の温度速度の制御が可能な高温槽を利用して、温度上昇過程の最高温度に到達した時点（高温下）あるいは温度上昇および降下過程を経た場合（高温履歴）の 2 種の場合について行った。各試験の温度条件は、高温下の場合、コンクリートの中心部の温度が約  $200^\circ\text{C}$  に到達後、約 1 時間後に載荷装置に設置した温度制御型の高温槽内に載荷試験を行った。高温履歴の場合、約  $200^\circ\text{C}$  の定温を 2 時間維持し、その後常温まで冷却させ、供試体の内部温度が平衡状態に達するまで 5 時間放置した後常温にて試験を行った。温度上昇および降下速度は毎時  $20^\circ\text{C}$  である。なお、弾性係数およびポアソン比は供試体の長軸方向およびそれと直角に貼付けた一对の高温用ストレングージにより測定し、石英ガラスに同様なタイプのストレングージを貼付け、ダミーゲージとして用いた。

##### c) 温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれ発生状況の観測

微視的溫度応力の発生に伴うコンクリート内部の微小ひびわれの形成状況をアコースティック・エミッション (AE) 法により観測した。試験装置は図-1 に示すとおりであり、恒温槽内に設置した供試体にウェーブガイドを取り付け、その先端部には AE センサー（共振周波数 175 kHz、耐熱温度  $-150 \sim +250^\circ\text{C}$ 、寸法  $\phi 2.04 \times 2.85$  cm）が接着され、AE センサーで検出された AE 信号はプリアンプにより増幅し、AE プロセッサー

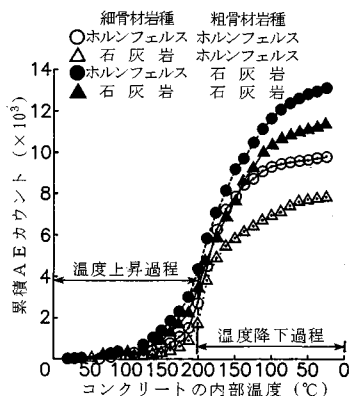


図一 AE計測システム概要図

(総増幅率：100 dB) に伝達される。AE 信号に関する情報は AE プロセッサーから出力される AE 波形および AE カウントである。

#### 4. 温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれの発生

図二は温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれの発生状況を AE によって測定した結果であり、累積 AE カウントとコンクリートの内部温度との関係を示している。温度の上昇に伴い AE 信号が検出され始めるが、コンクリートの内部温度が約 100°C 以上になると AE カウントは比較的大きな増加を示し始める。コンクリートの含水量がコンクリートの内部温度が 100~180°C において急激に減少することを考慮すると、この AE カウントの急増は、脱水に伴うコンクリートの内部構造の変化によって引き起こされたものと考えられる。しかしながら、コンクリートの含水量の変化はすべてのコンクリートに関して同程度であるのに対して、コンクリートの内部温度が 100~180°C の範囲における AE カウントの増加傾向が使用する岩種の組合せによって異なることから、温度上昇に伴うコンクリート内部の微小ひびわれの発生状況は、コンクリートを構成する骨材岩種の組合せの影響を受けることがわか



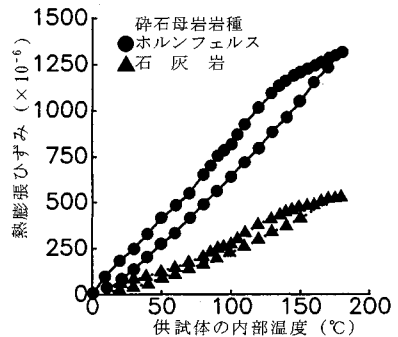
図二 温度上昇・降下過程の AE 計測結果

る。一方、温度降下過程における微小ひびわれの発生状況は、コンクリートに使用した骨材の岩種の組合せにより著しく異なり、最終的な累積 AE カウントに影響を与える。また、温度降下時において、コンクリートの内部温度が約 100°C 付近になると AE カウントの増加率は低下する。これは、コンクリートの複合素材の熱膨張挙動に影響されるものと考えられる。

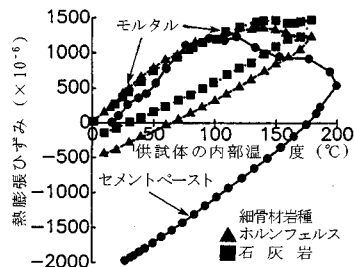
#### 5. コンクリート内部に発生する微視的温度応力

##### (1) 高温条件下におけるコンクリート構成材料の熱膨張特性

砕石母岩、セメントペーストおよびモルタルの熱膨張曲線を図三および四に示す。図三より砕石母岩の熱膨張ひずみは温度の上昇に伴いだいに増加し、その傾向は約 200°C に至るまでほぼ線形であり、温度降下過程における熱膨張ひずみの変化の傾向も温度上昇時と同様に線形であり、同一温度における熱膨張ひずみは温度上昇時とほぼ同程度である。また、供試体の内部温度が常温に到達した際の永久変形はほとんど生じていないことがわかる。一方、図四に示すようにセメントペーストの熱膨張ひずみは温度上昇時には約 100°C まではほぼ線形に増加するが、その後温度の上昇に伴いだいに収縮する。これはセメントペースト中のキャピラリー水およびゲル水の脱水に起因するものと考えられる。また、温度降下時の供試体の収縮率は 100°C までの昇温時の



図三 砕石母岩の熱膨張曲線



図四 セメントペースト・モルタルの熱膨張曲線

熱膨張係数に等しく、その変化の傾向はほぼ線形であるが、常温到達時には加熱前と比較し著しい永久変形を生じていることがわかる。これに対して、モルタルの場合には、温度上昇時の熱膨張ひずみはセメントペーストの場合と同様に約 100°C までほぼ線形に増加し、その後セメントペースト中のゲル水およびモルタル中のキャピラリー水の脱水により幾分の収縮を生じ、非線形な挙動を示しながら最大ひずみに到達する。これはモルタル内部で細骨材とセメントペースト相との熱膨張変形が微視的温度応力や内部ひびわれの発生などによりバランスした結果を示すものと考えられる。温度降下時には、供試体はほぼ線形に収縮するが、常温到達時の永久ひずみは比較的大きくなる。しかしながら、永久変形量はモルタルに用いた細骨材の岩種によって異なる。これはセメントペースト相と細骨材相の間の変形に対するバランスの仕方が相違し、骨材界面近傍の内部構造の変化状況が異なるためと考えられる。

(2) 微視的温度応力算定式

高温の影響を受けるコンクリートでは供試体内部のセメントペーストと細骨材、あるいはモルタルと粗骨材との熱膨張量の差によって、骨材界面に熱応力が発生する。本研究では高温の影響を受ける場合にこの応力を算定するため、粗骨材をインクルージョン、モルタルをマトリックスとするモデルを用いた。この理由は粗骨材周辺にはブリージングなどによる寸法の大きい欠陥が存在し、応力集中の原因となっていることが知られており、マイクロクラックについてもこの影響があることを考慮した。

複合材料においてマトリックスとインクルージョンとの間に生ずる熱応力に関し、J. Selsing<sup>6)</sup>は無限度のマトリックス中に1個の球状のインクルージョンが存在する場合を仮定し、弾性理論における応力関数<sup>7)</sup>を用い、インクルージョンの中心から  $r$  の距離でマトリックスに発生する応力を次のように求めた。この式は多くのインクルージョンを有するコンクリートについて厳密には正しくないが、十分に硬化の進行したコンクリートについては非弾性の影響は少ないと考えられること、セラミックの分野でも使用されている<sup>8),9)</sup>ことを考慮し、マイクロクラックに係るインクルージョン近傍の応力分布を近似的に示し得るものと考えた。

$$\text{半径方向応力 } \sigma_r = P \cdot (R/r)^3 \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{接線方向応力 } \sigma_t = -P \cdot (R/r)^3 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $R$  はインクルージョンの半径であり、 $r$  はインクルージョンの中心からの距離である。また、 $P$  は以下の式で表わすことができる。

$$P = \frac{(\alpha_m - \alpha_p) \cdot \Delta T}{[(1 + \nu_m)/2 E_m] + [(1 - 2\nu_p)/E_p]} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $E$  および  $\nu$  はそれぞれ熱膨張係数、弾性係

表—2 モルタルの弾性定数に関する温度関数の係数

係数	細骨材岩種	
	ホルンフェルス	石灰岩
<b>A</b>	$3.30 \times 10^6$ ( $3.10 \times 10^6$ ) **	$3.55 \times 10^6$ ( $3.00 \times 10^6$ )
<b>B</b>	$-1.10 \times 10^2$ ( $-2.61 \times 10^2$ )	$-3.06 \times 10^2$ ( $-2.67 \times 10^2$ )
<b>C</b>	0.181 (0.225)	0.243 (0.265)
<b>D</b>	$2.50 \times 10^{-4}$ ( $9.44 \times 10^{-5}$ )	$1.39 \times 10^{-4}$ ( $2.61 \times 10^{-4}$ )

\* 上段は温度上昇時 (常温→200°C)  
\*\* 下段は温度降下時 (200°C→常温)

表—3 砕石母岩の弾性定数に関する温度関数の係数

係数	砕石母岩岩種	
	ホルンフェルス	石灰岩
<b>A</b>	$7.14 \times 10^6$ ( $5.92 \times 10^6$ ) **	$8.67 \times 10^6$ ( $4.32 \times 10^6$ )
<b>B</b>	$2.22 \times 10^2$ ( $-3.89 \times 10^2$ )	$1.44 \times 10^2$ ( $-8.89 \times 10^2$ )
<b>C</b>	0.218 (0.254)	0.315 (0.352)
<b>D</b>	$-8.33 \times 10^{-6}$ ( $9.44 \times 10^{-6}$ )	$-7.78 \times 10^{-6}$ ( $1.17 \times 10^{-4}$ )

\* 上段は温度上昇時 (常温→200°C)  
\*\* 下段は温度降下時 (200°C→常温)

数およびポアソン比を表わし、添字  $m$  および  $p$  はそれぞれマトリックスおよびインクルージョンを示している。また、 $\Delta T$  は温度差を示す。上式における  $\alpha$ 、 $E$  および  $\nu$  は温度に依存せず一定値であると仮定されているが、本実験の結果からマトリックスに相当するモルタルおよびインクルージョンに相当する砕石母岩の  $\alpha$ 、 $E$  および  $\nu$  は温度依存性を有している。そこで本研究ではマトリックスにおける  $E$  および  $\nu$  を実験結果に基づいて以下のように温度  $T$  の関数として、モルタルに使用される細骨材の岩種による影響を係数  $A$  および  $B$  を用いて1次関数で表わす。なお、それぞれの係数の値は表—2に示すとおりである。

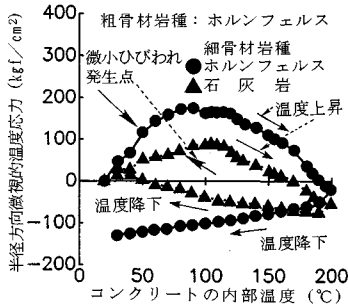
$$E = A - B \cdot T \dots\dots\dots (9)$$

$$\nu = C - D \cdot T \dots\dots\dots (10)$$

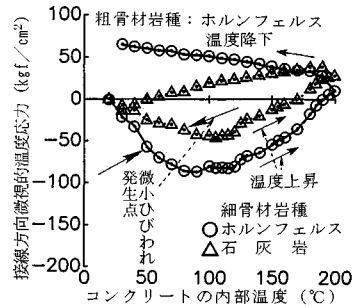
砕石母岩の  $E$  および  $\nu$  の温度依存性は、モルタルの場合と同様に式 (9) および (10) を用いて表わす。それぞれの係数の値は表—3に示すとおりである。また、 $(\alpha_m - \alpha_p) \cdot \Delta T$  に関しては、モルタルマトリックスの熱膨張曲線が非線形であり、熱膨張係数  $\alpha$  を一義的に定めることができないため、熱膨張ひずみ曲線における各温度段階でのモルタルと砕石母岩との熱膨張ひずみの差、すなわち  $(\epsilon_{mt} - \epsilon_{pt})$  に置き換えて、温度変化 1°C ごとの差分として計算を行った。

(3) コンクリート内部の微視的温度応力発生性状

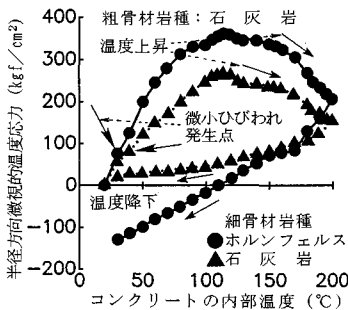
上式を用いて計算した結果を図—5~8に示す。これらの図はコンクリートの内部温度と半径および接線方向でインクルージョンとマトリックスとの界面近傍に発生する微視的温度応力との関係を示している。温度の増加に伴い骨材粒子の半径方向には引張応力、接線方向には



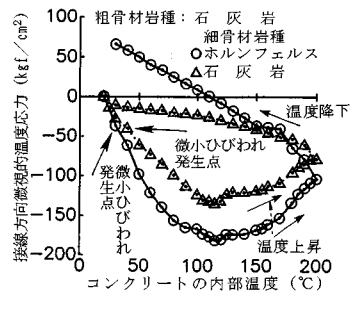
図—5 半径方向微視的温度応力の発生状況



図—7 接線方向微視的温度応力の発生状況



図—6 半径方向微視的温度応力の発生状況



図—8 接線方向微視的温度応力の発生状況

圧縮応力が発生する。この応力は約 100°C まで増加し、その後モルタルの収縮に伴い減少し、終局時には圧縮に転ずる場合がある。この半径方向の微視的温度応力はモルタルと骨材との付着強度に比較すると非常に大きいので、コンクリート内部では骨材界面に付着ひびわれを生じさせるものと思われる。また、使用した骨材の岩種により微視的温度応力の大きさは変化しコンクリート内部の微小ひびわれの発生状況は異なる。

図中の矢印で示されているポイントは AE の発生開始点 (AE 発生量 1 カウント/100 cm<sup>3</sup> で AE カウント累積曲線から読み取ることができる最小値である) から求めた微小ひびわれ発生開始点である。微小ひびわれ発生時の半径方向微視的温度応力の値は、引張で 80~120 kgf/cm<sup>2</sup> である。一方、接線方向の値は圧縮応力で 40~60 kgf/cm<sup>2</sup> である。これに対して微小ひびわれ発生時のコンクリートの内部温度は 40~90°C の範囲で、微視的温度応力の範囲より広くばらついている。また、コンクリート中からの脱水が始まる以前から微小ひびわれが発生しており、コンクリートの種類によって発生温度は異なる。したがって、コンクリート内部の初期微小ひびわれ発生開始点は、発生温度よりも微視的温度応力を考えることにより、より狭い範囲で規定できる。前述のように接線方向は圧縮応力でこの応力によってペースト部分にひびわれが発生するとは考えにくい。一方、半径方向の引張応力の計算値は通常のペーストの引張強度、またはペーストと骨材との付着強度をはるかに越えてい

る。微小ひびわれの発生が微小ひびわれ発生点付近の引張応力場のみによって生じるものとは必ずしも判定しがたいが、上記の結果より微小ひびわれの発生は図—5, 6 に示す半径方向微視的温度応力の発生と相関が強いと推察される。図—7 において細骨材に石灰岩を用いた場合には、温度上昇中の 180°C 以上の区間においても接線方向微視的温度応力が引張を示し始める。このとき、図—2 に示す AE カウントは急増を生じ、微小ひびわれの増加過程では引張側の微視的温度応力の発生が重要な要因であることがわかる。

## 6. 高温条件下のコンクリートの力学的性質に及ぼす微視的温度応力の影響

### (1) 高温条件下のコンクリートの圧縮強度に及ぼす微視的温度応力の影響

図—9 は表—1 に示すコンクリートの高温下ならびに高温履歴を受ける場合の圧縮強度比とモルタルと粗骨材との界面の半径方向に生じる最大微視的温度応力との関係を示している。ここで、圧縮強度比は、各温度条件下における圧縮強度の値の常温の圧縮強度に対する比である。また、最大微視的温度応力は図—5 および 6 において算定された微視的温度応力であり、温度上昇時において最大値を示す際の応力である。半径方向微視的温度応力の増加に伴う圧縮強度比の変化は、高温下の場合および高温履歴を受ける場合、半径方向微視的温度応力の増加に伴い減少する傾向にある。図—2 における

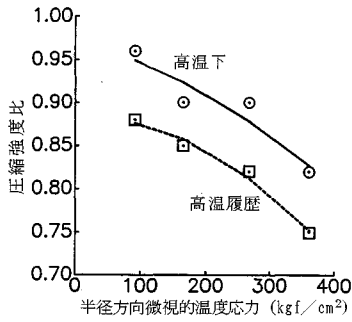


図-9 圧縮強度比と微視的温度応力との関係

AE の観測結果より、コンクリートの加熱および冷却に伴い比較的低い温度から微小ひびわれが発生していることが確認されている。上記の圧縮強度の低下はこの結果に起因しており、高温下でのコンクリートの載荷試験が行われる時点では比較的多量の微小ひびわれが形成されている。また、微小ひびわれは微視的温度応力がある一定値に達すると発生し、それ以降の微小ひびわれの形成量はひびわれによりいったん解放された微視的温度応力の再増加、すなわち図-5, 6 の曲線の勾配に関係すると考えられ、コンクリートに使用する骨材の組合せによって異なってくる。温度降下時にはコンクリート内部に発生する微小ひびわれが急増する。この理由は図-5, 6 で引張応力が減少することと矛盾するようにみえるが、図-4 から想定できるようにセメントペーストの永久変形によって、モルタルマトリックス中の細骨材界面では接線方向に大きな引張応力が発生することが考えられ、粗骨材周辺の付着ひびわれとは異なり、細骨材粒子の半径方向に微小ひびわれが発生することが想定される。本実験における AE の検出結果はこのひびわれを包含したものと考えられる。最大微視的温度応力の値は、碎石母岩とモルタルの熱膨張量の差によって決定するので、高温の影響を受けるコンクリートの圧縮強度の低下率は、コンクリートに使用する骨材の組合せによって定まる。

(2) 高温条件下のコンクリートの弾性係数に及ぼす微視的温度応力の影響

図-10 はコンクリートの高温下ならびに高温履歴を

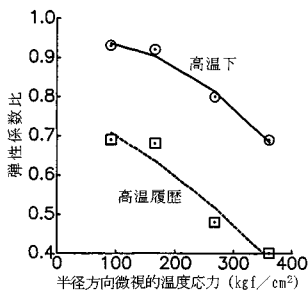


図-10 弾性係数比と微視的温度応力との関係

受ける場合の弾性係数比とモルタルと粗骨材との界面の半径方向に生じる最大微視的温度応力との関係を示している。弾性係数比の変化の傾向は圧縮強度の場合に比較すると、高温下の低下率が同程度であるのに対して、高温履歴を受ける場合には著しい低下を示し、半径方向応力の増加に伴いその傾向は増大する。このことより、微視的温度応力の発生に伴う微小ひびわれの形成が圧縮載荷時の供試体のひずみの増大をもたらす、コンクリートの圧縮変形の増加を生じさせていることがわかる。特に、図-2 に示すように温度降下過程では微小ひびわれが急増し、高温履歴を受けるコンクリートの弾性係数の低下に微視的温度応力の発生に伴う微小ひびわれの形成が影響していることがわかる。

(3) 高温条件下のコンクリートの力学的性質に及ぼす微小ひびわれ形成の影響

温度上昇および降下時にコンクリート内部に発生している微小ひびわれの圧縮載荷過程における影響は、圧縮載荷試験時に同時に行った AE 試験の結果より明らかにすることができる。図-11 は常温の場合と高温履歴を受ける場合の応力比と体積ひずみならびに応力比と累積 AE カウントの関係を示している。常温の場合の AE カウントの急増する応力比は約 0.9 であるのに対して、高温履歴を受ける場合には約 0.75 付近から急増し、その値も非常に大きいことが認められる。すなわち、高温履歴を受ける場合には、温度上昇および降下時において微視的温度応力の発生に伴いコンクリート内部に微小ひびわれが形成されるため、比較的低応力比からエネルギーの大きい AE 信号が検出され、比較的大きな微小ひびわれの形成、あるいは伝播が行われていることがわかる。このことは微視的温度応力によるひびわれが荷重によるマイクロクラックとは異なる位置または形状に入っており、後の載荷時に応力集中の原因になっていることが考えられる。このことから先に述べた高温履歴を受ける場合の弾性係数の著しい低下の理由がわかる。また、体積ひずみ曲線においても AE カウント急増時の

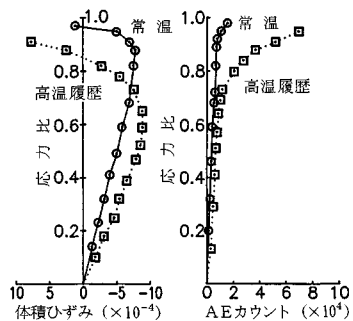


図-11 圧縮載荷時の累積 AE カウントおよび体積ひずみに及ぼす温度履歴の影響

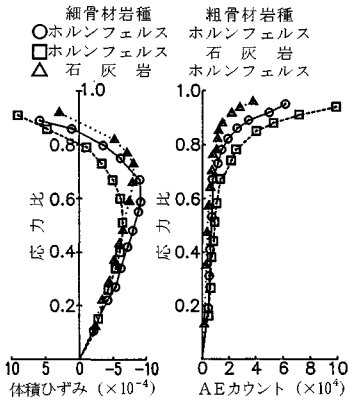


図-12 圧縮載荷時の累積 AE カウントおよび体積ひずみに及ぼす骨材種類の影響

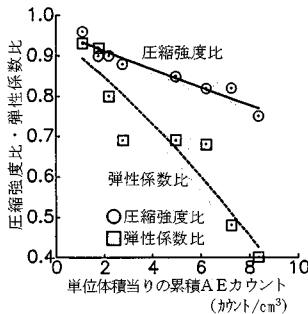


図-13 コンクリートの圧縮強度・弾性係数に及ぼす AE 発生率の影響

応力比付近に臨界応力点が存在し、コンクリートの内部構造の著しい変化が推察される。高温履歴を受ける場合には、比較的低い応力比から体積ひずみ曲線は著しい非線形性を示す。常温の場合の臨界応力点は約 0.9 であるのに対して、高温履歴を受ける場合には載荷以前の微小ひびわれの形成によって臨界応力が著しく低下する。

図-12 は体積ひずみ曲線ならびに応力比と累積 AE カウントとの関係を骨材種類の影響について示したものである。コンクリートに使用された骨材の種類の組合せにより体積ひずみ曲線および累積 AE カウント曲線は異なる。図-2 に示すようにコンクリートは温度上昇および降下という温度履歴を受けることによって、コンクリート内部には微小ひびわれが形成される。コンクリートが温度履歴を経て常温に到達した際には、コンクリートに使用した骨材の組合せによって累積 AE カウントは異なり、コンクリート内部の微小ひびわれの発生状況は相違する。したがって、高温履歴を受けるコンクリートの圧縮載荷時の変形特性はコンクリートに使用した骨材岩種の影響を受ける。

図-13 は図-9, 10 で示した高温下ならびに高温履歴を受ける全コンクリート供試体の圧縮強度比および弾性

係数比を単位体積当たりの累積 AE カウントだけで表わしたものである。この図から明らかなように、単位体積当たりの AE カウント数の増加、すなわちコンクリート内部の微小ひびわれの形成量の増加に伴い、圧縮強度比および弾性係数比はともに低下することがわかる。この傾向は弾性係数の場合に著しく、微小ひびわれの発生がコンクリートの弾性係数に大きな影響を与えていることがわかる。また、コンクリートが高温に保持されている場合には、単位体積当たりの AE カウント数は約 3 カウント/cm<sup>3</sup> 以下で、この範囲では圧縮強度比の差はさほど大きくないが、弾性係数比の場合には 3 カウント/cm<sup>3</sup> 以下のカウント差でも大きな差が認められる。図-9, 10 で 2 本の曲線で表わされたデータは、累積 AE カウントを横軸にとることによって、それぞれ 2 本の単一の曲線となった。すなわち AE カウントがより直接的な指標になることを示している。

7. まとめ

高温の影響を受けることによってコンクリート内部に生じる微視的温度応力が、高温条件下のコンクリートの力学的性質に及ぼす影響をコンクリート内部に発生する微小ひびわれの形成状況をもとに実験的に検討した。

その結果を要約すると次のようである。

(1) コンクリートの加熱時の AE 試験の結果から次のようなことが明らかとなった。コンクリートの内部温度が比較的低い時点から AE 信号が検出され始め、コンクリート中の水分が脱水する約 100°C 付近から累積 AE カウントは急増を開始する。さらに、100°C 以上の温度範囲では、累積 AE カウント量はコンクリートに使用した骨材の岩種によって異なり、コンクリートを構成する複合素材の熱膨張特性および力学的特性の影響を受ける。

(2) 加熱を受けることによってモルタルと粗骨材との間には熱膨張量の差が生じる。そのため、この熱膨張量の差に伴ってモルタルと粗骨材との界面近傍に微視的温度応力が発生する。微視的温度応力はモルタルをマトリックス、粗骨材をインクルージョンと仮定することによって算定することができる。

(3) 球状骨材の界面における半径方向の微視的温度応力は温度の上昇に伴い引張応力となり、一方、接線方向の微視的温度応力は圧縮応力となる。これらの応力は約 100°C まで増加し、その後モルタルの収縮に伴い減少し、温度降下時には応力の向きが逆転する場合もある。また、コンクリートに使用した骨材の組合せにより微視的温度応力の大きさは異なる。

(4) AE の発生開始、すなわち初期微小ひびわれ発生時の半径方向微視的温度応力の計算値は、コンクリー

トに使用した骨材の種類によらずすべて80~120 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲内となった。一方、初期微小ひびわれの発生する温度は骨材の組合せにより40~90°Cの範囲に広く分布している。このためAE観測によって検出される初期微小ひびわれ発生開始点は、微視的温度応力を考えることにより、より狭い範囲で規定できる。

(5) 高温の影響を受けるコンクリートの圧縮強度の常温時の強度に対する低下率は、半径方向微視的温度応力の増加に伴いだいに大きくなる。また、高温履歴を受ける場合には、同一微視的温度応力における低下率が高温下の場合よりも大きい。

(6) 高温の影響を受けるコンクリートの弾性係数の常温の場合に対する低下率は、圧縮強度の場合と同様に半径方向微視的温度応力の増加に伴いだいに大きくなり、その低下の傾向は圧縮強度の場合よりもかなり大きい。特に、高温履歴を受ける場合には半径方向微視的温度応力の増加に伴い著しい低下を示す。このことより、微視的温度応力によって発生する微小ひびわれは、圧縮変形量の増大を引き起こすことがわかる。

(7) 高温の影響を受けるコンクリートの圧縮載荷時のAE発生状況は、温度上昇および降下過程において微小ひびわれが形成されるため、それらの伝播および拡大によって比較的応力比から高い出力を示すAE信号が検出され、累積AEカウントも常温の場合に比較するとはるかに大きい。したがって、体積ひずみ曲線における臨界応力も低下する。また、コンクリートに使用する骨材の組合せにより、累積AEカウント曲線および体積ひずみ曲線は異なる。

(8) 高温の影響を受けるコンクリートの圧縮強度および弾性係数の常温の場合に対する低下率は、単位体積当たりのAE発生率が高いほど大きくなる。このこと

より、温度上昇および降下過程において微視的温度応力によって引き起こされる微小ひびわれは、コンクリートの力学的性質を低下させる重要な要因であることがわかる。

#### 参 考 文 献

- 1) 田澤栄一・南 和孝・影山 智・渡辺恭史：高温の影響を受けるコンクリートの力学的性質に及ぼす骨材種類の影響，コンクリート工学年次論文報告集，第9巻-1，pp.13~17，1987.
- 2) Minami, K. and Kato, K. : Application of Acoustic Emission Method to Evaluation of Crack in Concrete, The 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, The International Association for Structural Safety and Reliability, Vol. 3, pp.724~728, 1985.
- 3) 田澤栄一・南 和孝・中本 勝・寺西修治：微視的温度応力によるコンクリートのマイクロクラックとその影響，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.129~130，1986.
- 4) 田澤栄一・南 和孝：高温の影響を受けるコンクリートの複合特性，セメント技術年報，第40巻，pp.166~169，1986.
- 5) 田澤栄一・南 和孝・渡辺恭史：高温・低温の影響を受けるコンクリートの複合特性，セメント技術年報，第41巻，pp.311~314，1987.
- 6) Selsing, J. : Internal Stress in Ceramics, Journal of The American Ceramic Society, 44, pp.419, 1961.
- 7) 中原一郎：応用弾性学，実教出版，1978.
- 8) Davidge, R.W. and Green, T.J. : The Strength of Two-Phase Ceramic/Glass Materials, Journal of Materials Sciences, 3, pp.629~634, 1968.
- 9) Miyata, N. and Jinno, H. : Strength and Fracture Surface Energy of Phase-Separated Glasses, Journal of Materials Sciences, 16, pp.2205~2217, 1981.

(1989.12.12・受付)