

[1003] 高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性 に及ぼす骨材種類の影響

正会員 田澤 栄一（広島大学工学部）

正会員 ○南 和孝（防衛大学校土木工学教室）

影山 智（広島大学工学部）

渡辺 恭史（復建調査設計）

1. まえがき

コンクリートが複合時と異なる温度、すなわち極高温で使用される構造物においては、コンクリート中の毛管水およびゲル水の脱水、さらにセメントペーストと骨材あるいはモルタルと粗骨材との熱膨張係数の相違によって各相に生じる自己応力（本研究では微視的温度応力と称する。）による骨材界面における微小ひびわれの形成等のコンクリートの内部構造の変化に伴い、コンクリートの熱的および力学的性質は常温で使用される場合とは著しく異なる。

マスコンクリートのひびわれ制御指針¹⁾によるとコンクリート中のマイクロクラックの発生の制御に関し、熱膨張係数の小さい骨材を使用することが望ましいとされているが、このことは骨材の界面における微小欠陥の増加につながりコンクリートの力学的性質の低下を引き起こすものと推察される。また、天然骨材資源の枯渇により碎石および砕砂の使用が増大している今日ではこれらの骨材の熱的および力学的性質を十分に把握し、この種のコンクリートにおいてより有効に使用することが重要な課題である。したがって、高温下で使用されるコンクリート構造物の耐久性、安全性および信頼性を確保するためには、上記のような各種要因の影響を考慮したこの種のコンクリートの性質の解明が極めて重要である。

そこで、本研究は種々の岩種の骨材を使用したコンクリートの高温の影響を受ける場合の力学的性質を測定し、この種のコンクリートの力学的特性に及ぼす使用骨材の岩種の影響を検討すると共に、毛管水およびゲル水の脱水あるいは微視的温度応力の発生に伴う微小ひびわれの形成等のコンクリートの内部構造の変化の影響について合わせて検討した。

2. 実験概要

2. 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。細骨材にはホルンフェルスおよび石灰岩の砕砂、さらに風化花崗岩系山砂の3種を使用し、粗骨材にはホルンフェルスおよび石灰岩の碎石の2種を使用した。これらを用いて表-1に示すようなモルタルおよびコンクリートの供試体（それぞれ $\phi 5 \times 10\text{cm}$ および $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ）を製造した。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 $W/C=50\%$, $S/a=60\%$, $Slump=8\text{cm}$ とした。モルタルおよびコンクリートの供試体は1週水中養生の後2週気温20℃、湿度50%の室内で気乾養生し試験を行った。

2. 2 実験方法

2. 2. 1 モルタルおよびコンクリートの力学的性質の測定

モルタルおよびコンクリートの圧縮強度および弾性係数の測定は常温下、さらに図-1に示すように高温槽を利用して温度上昇過程の最高温度時（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。高温下の場合、コンクリートの中心部の

表-1 供試体の種類

	細骨材岩種	粗骨材岩種
モルタル	ホルンフェルス	—
	風化花崗岩系山砂	—
	石灰岩	—
コンクリート	ホルンフェルス	ホルンフェルス
	ホルンフェルス	石灰岩
	風化花崗岩系山砂	ホルンフェルス
	風化花崗岩系山砂	石灰岩
	石灰岩	ホルンフェルス
	石灰岩	石灰岩

温度が約200℃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て載荷試験を行った。高温履歴の場合、約200℃の定温を2時間維持し、その後常温まで冷却させ、常温にて試験を行った。なお、膨張ひずみおよび弾性係数は供試体の軸方向に貼付けした一対のストレインゲージにより測定し、膨張ひずみはダミーとして用いた石英ガラスの膨張ひずみを差し引くことにより求めた。

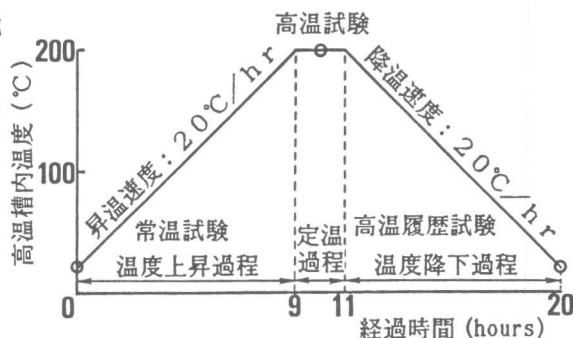


図-1 供試体の温度履歴過程および条件

2.2.2 高温の影響を受けるコンクリートの内部構造変化に起因する要因の分析

コンクリートを2週水中養生した後水上げ直後に、コンクリートの表面を銅板にてシールした供試体とシールしない供試体について、図-2に示すような2種類の温度履歴を与え、各温度段階における圧縮強度、重量変化、供試体温度およびコンクリート内の微小ひびわれの検出

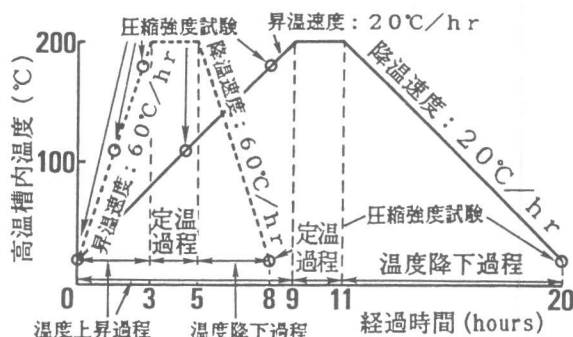


図-2 要因分析試験の温度履歴過程および条件

を行うためアコスティック・エミッションを利用した測定を行った。尚、供試体には、細骨材に風化花崗岩系山砂、粗骨材にホルンフェルスおよび石灰岩の2種を使用した。

3. コンクリートの内部に発生する微視的温度応力

高温の影響を受けるコンクリートでは供試体内部のモルタルと粗骨材との熱膨張量の差によって生ずるひずみにより、骨材界面に応力が発生する。本研究ではこの応力を算定し高温の影響を受ける場合のコンクリート内部の応力状態について検討を行った。

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する理論式が J. Selsing²⁾ によって提案された。以下にその式を示す。

弾性理論によりインクルージョンの中心から r の距離においてマトリックスに発生する応力は次のようになる。

$$\text{半径方向応力 } \sigma_r = P \cdot (R/r)^3 \quad (1)$$

$$\text{接線方向応力 } \sigma_t = -P \cdot (R/r)^3 \quad (2)$$

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 は以下の式で表すことができる。

$$P = \frac{(\alpha_m - \alpha_p) \cdot \Delta T}{\frac{1 + \nu_m}{E_m} + \frac{1 - 2 \cdot \nu_p}{E_p}} \quad (3)$$

ここで、 α 、 E および ν はそれぞれ熱膨張係数、弾性係数およびポアソン比を表し、添え字 m および p はそれぞれマトリックス



図-3 微視的温度応力 (接線方向応力)

スおよびインクルージョンを示している。また、 ΔT は温度差を示す。上式における α 、 E および ν は温度に依存せず一定値であると仮定されているが、本実験の結果からモルタルにおける α 、 E および ν 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 ν を以下のように温度差 ΔT の関数として表す。

$$E_m = 2.36 \times 10^5 - 4.65 \times 10^2 \times \Delta T \quad (4)$$

$$\nu_m = 1.43 - 1.35 \times 10^{-3} \times \Delta T \quad (5)$$

また、 α に関しては各温度差における熱膨張ひずみの差、すなわち $(\epsilon_{mt} - \epsilon_{pt})$ で表すことにした。上記のことを考慮して書き換えた式より計算した結果を図-3および4に示す。これらの図はコンクリートにおける半径および接線方向の微視的温度応力を示している。温度の増加に伴い骨材の半径方向には引張応力、接線方向には圧縮応力が発生する。この応力は約100℃まで増加し、その後モルタルの収縮に伴いしだいに減少し、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もので、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の程度は異なるものと思われる。

4. モルタルおよびコンクリートの熱膨張特性

砕石母岩、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの熱膨張曲線を図-5に示す。図より砕石母岩の熱膨張ひずみは温度の上昇に伴いしだいに増加し、その傾向は約200℃に至るまではほぼ線形である。また、セメントペーストの熱膨張ひずみは約100℃まではほぼ線形に増加するが、その後温度の上昇に伴いしだいに収縮する。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。これに対して、モルタルの場合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℃まで増加し、その後セメントペーストの熱膨張挙動の影響により収縮するが、約150℃付近から再び膨張し始める。これはモルタル内部の細骨材自体の熱膨張特性と共に微視的温度応力の発生に伴うモルタル内部の弛緩によるものと考えられる。一方、コンクリートの熱膨張ひずみはモルタルの挙動にほぼ類

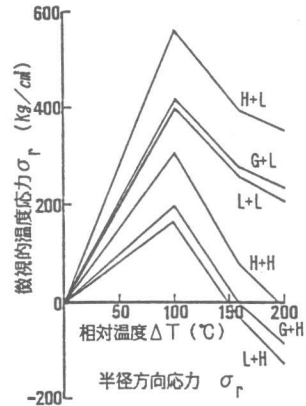


図-4 微視的温度応力 (半径方向応力)

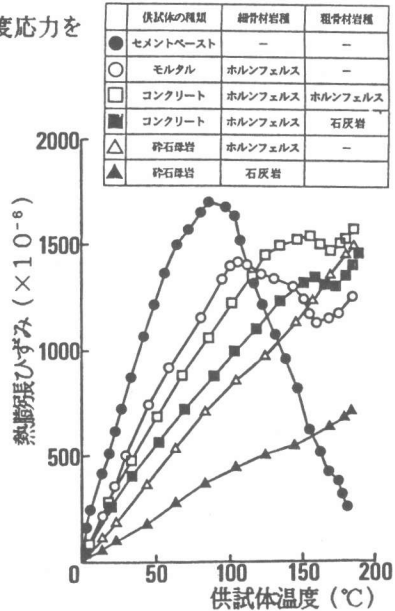


図-5 各種供試体の熱膨張曲線

表-2 各種供試体の熱膨張係数

	細骨材岩種	粗骨材岩種	熱膨張係数 (1/°C)
モルタル	ホルンフェルス	—	16.67×10^{-6}
	風化花崗岩系山砂	—	14.32×10^{-6}
	石灰岩	—	13.11×10^{-6}
コンクリート	ホルンフェルス	ホルンフェルス	12.09×10^{-6}
	ホルンフェルス	石灰岩	9.32×10^{-6}
	風化花崗岩系山砂	ホルンフェルス	12.20×10^{-6}
	風化花崗岩系山砂	石灰岩	9.33×10^{-6}
	石灰岩	ホルンフェルス	9.14×10^{-6}
	石灰岩	石灰岩	7.45×10^{-6}

(温度範囲: 20~100℃)

似しているが、コンクリート内の粗骨材の熱膨張特性の影響を受け、約150℃付近でわずかであるが収縮し、その後しだいに膨張する傾向にある。これらの熱膨張特性は細骨材および粗骨材の岩種により異なり、モルタルおよびコンクリートの熱膨張特性が細骨材および粗骨材の熱膨張特性およびこれに伴う供試体内部の構造変化に影響されることがわかる。表-2にモルタルおよびコンクリートの熱膨張係数を示す。この値は約100℃までの熱膨張曲線が比較的線形な範囲における熱膨張ひずみの平均値を用いて算出したものである。

5. 高温の影響を受けるコンクリートの力学的性質

5. 1 コンクリートの圧縮強度に及ぼす高温の影響

図-6は高温下および高温履歴を受けるコンクリートの圧縮強度比を使用した骨材の組合せ別に示している。ここで、圧縮強度比とは高温下あるいは高温履歴試験におけるコンクリートの圧縮強度と常温試験における場合との比である。高温下におけるコンクリートの圧縮強度は骨材の組合せにより異なるが、全般的に常温に比べ同程度か幾分低下する傾向にある。この理由としてはコンクリート内部の毛管水およびゲル水の脱水によるコンクリート内部の空隙の増加が考えられる。また、高温履歴を受けるコンクリートの圧縮強度は高温の場合よりも低下率は大きく、使用した細骨材および粗骨材の岩種によって低下の傾向は異なる。すなわち、モルタルと粗骨材との熱膨張係数が大きい場合ほど圧縮強度の低下率は大きい。このことから高温の影響を受けるコンクリートの強度の低下は、モルタルと粗骨材との熱膨張量の差に伴う微視的温度応力の発生による微小ひびわれの形成によって引き起こされるものと思われる。

5. 2 コンクリートの弾性係数に及ぼす高温の影響

図-7は各種骨材を用いた場合の高温下および高温履歴を受けるコンクリートの弾性係数比を示している。ここで、弾性係数比とは高温試験あるいは高温履歴試験におけるコンクリートの弾性係数と常温における場合との比を示している。高温下におけるコンクリートの弾性係数は常温に比較して全般的に低下しており、その傾向は圧縮強度の場合よりも大きい。この原因としては圧縮強度の場合と同様にコンクリート内部の毛管水およびゲル

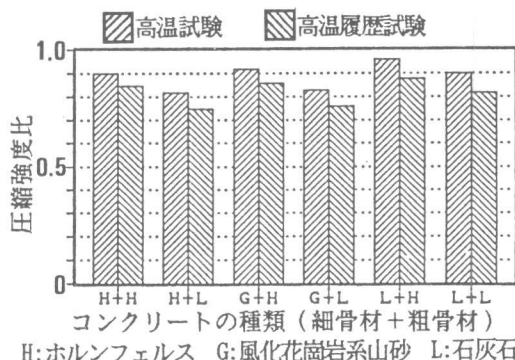


図-6 高温の影響を受けるコンクリートの圧縮強度

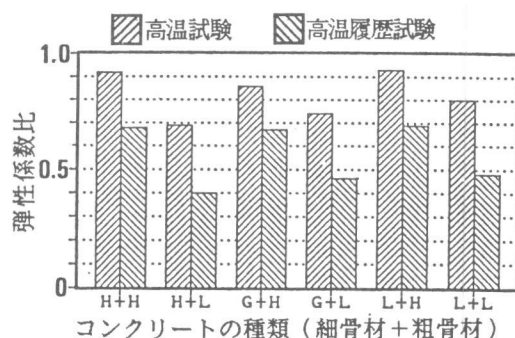


図-7 高温の影響を受けるコンクリートの弾性係数

水の脱水により生じる空隙、あるいは微視的温度応力によるコンクリートの内部構造の弛緩が考えられる。さらに、高温履歴を受けるコンクリートの場合には高温下における場合よりもさらにその低下は大きく、細骨材および粗骨材の岩種の組合せにより0.4～0.7まで低下している。すなわち、温度降下に伴う微視的温度応力の発生によってコンクリート内部の微小欠陥は増大するものと思われる。したがって、モルタルと粗骨材との熱膨張量の差が大きいコンクリートではコンクリート内部に発生する微視的温度応力も大きいいため微小欠陥の量も増加しているために弾

性係数の大幅な低下が生じているものと思われる。

6. 高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性に及ぼす諸要因の影響

6. 1 高温の影響を受けるコンクリートの圧縮強度に及ぼす含水率の影響

図-8および9は各温度段階において測定したコンクリートの圧縮強度と常温における圧縮強度との比を示したものである。また、図は昇温速度およびシールの有無の影響について示されている。全般的な傾向として、昇温速度が大きいほど圧縮強度の低下が大きくなっている。この理由として、昇温速度が大きいために供試体の中心部と表面部とに急激な温度差が生じ、供試体内部に温度応力が生じたためと考えられるが、実際には供試体寸法が小さいこと、また実験において測定した供試体中心部と表面部との温度差は昇温速度が大きい場合でも、15℃程度であり計算上からコンクリートの内部構造を変化させるほどの温度応力は生じない。また、両図を比較することによって使用した骨材の岩種によりその傾向は異なることがわかる。したがって、このような強度の低下はコンクリート内部の急激な水分の蒸発および微視的温度応力の発生に伴うコンクリートの内部構造変化による影響が大きいことが推察される。シールの有無の影響は図中より明らかなように、シールを行っていないコンクリートの場合の圧縮強度の低下が大きく、温度上昇に伴うコンクリート中の毛管水およびゲル水の脱水によるコンクリートの内部構造変化の影響が大きいことがわかる。

コンクリートの含水率と圧縮強度との関係を示したものが図-10であるが、各温度段階におけるコンクリートの圧縮強度と常温の場合との比と重量変化率との関係を示している。図よりコンクリートの重量の低下、すなわちコンクリート内部の水分の蒸発によって、圧縮強度は低下する傾向にある。しかしながら、同一重量変化率においても圧縮強度の変化は大きく異なっており、コンクリート強度の低下に関し含水率の変化が他の要因と複合的に影響していることを示している。

6. 2 高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性に及ぼす微小ひびわれ形成の影響

既に述べたように高温の影響を受けるコンクリートの力学的性質の変化にコンクリート内部の毛管水およびゲル水の脱水に伴う含水率の変化が大きく影響している。この含水率の影響は、約100℃の付近までの範囲で顕著であるが、シールしたコンクリートあるいは高温履歴を受ける

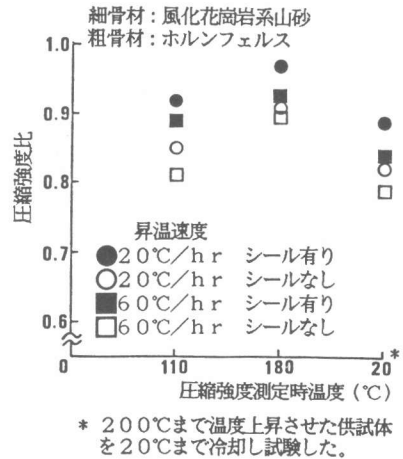


図-8 各種加熱条件におけるコンクリートの圧縮強度の変化

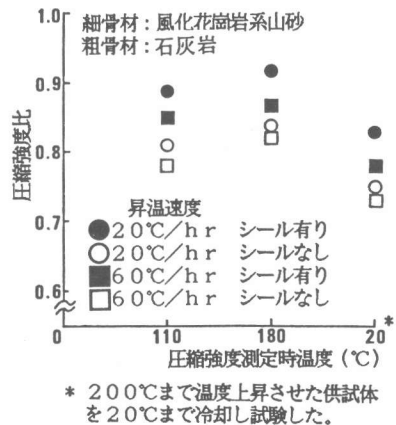


図-9 各種加熱条件におけるコンクリートの圧縮強度の変化

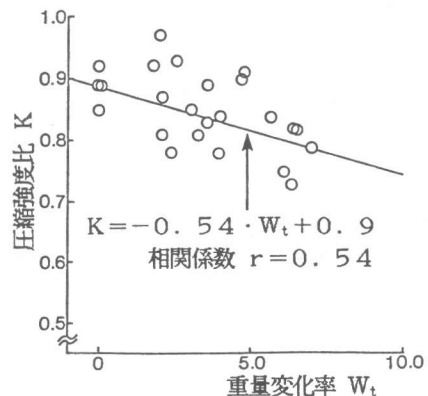


図-10 圧縮強度比と重量変化率との関係

コンクリートにおいても力学的性質の変化は認められ、この要因として、先に述べた微視的温度応力の発生に伴う骨材界面近傍における微小ひびわれの形成が他の要因と共に複合的に作用するものと思われる。図-11および12はアコースティック・エミッションを利用した温度上昇および降下過程における累積AEカウンターの測定結果を示している。両図

図-11 温度上昇及び降下過程におけるAEカウンターの測定結果

において温度の上昇に伴いAEカウンターの増加が開始されることが予測される。温度が最大点に到達し降下し始めるとAEカウンターの増加がさらに増加し、発生AE波のレベルも温度上昇時に比較するとかかなり大きくなる。すなわち、温度降下に伴う微視的温度応力の発生が骨材粒子の接線方向に非常に大きな引張応力を生じさせ、骨材界面における付着ひびわれの伝播あるいは連結を引き起こすものと考えられる。また、シー

ールをしていないコンクリートの場合、温度上昇時に約100℃までのAEカウンターの増加はシー

ールをした場合と同程度であるが、含水率の急激な変化に伴い急増することがわかる。一方、シー

ールをしたコンクリートにおいても各温度段階で検出されるAEカウンターの値は比較的大きく、これはコンクリート内部に発生する熱応力、すなわち微視的温度応力に起因することが推察される。このことは両図を比較することによっても明かで、粗骨材に石灰石を使用した場合、すなわちモルタルと粗骨材の熱膨張係数の差が大きい場合には、AEカウンターの値も非常に大きくなる。

7. 結論

高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性に及ぼす骨材の岩種の影響を力学的性質の測定、あるいは種々の要因の分析により検討を行ったがこの結果をまとめると以下のようである。

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は全般的に低下する傾向にある。特に、高温履歴を受ける場合にはその傾向は著しい。また、使用した骨材の岩種の組合せによりその傾向は相違する。これらの要因として、コンクリート内部の毛管水およびゲル水の脱水は重要であるが、これに加え本研究において示した微視的温度応力の発生に伴う微小ひびわれの形成も重要な要因であることが実験結果より明かとなった。この微視的温度応力の発生に伴う微小ひびわれの形成は高温の影響を受けるコンクリートの力学的性質の低下を引き起こす。さらにこの応力は使用骨材の岩種の組合せにより変化するため微小ひびわれの形成量も異なり、力学的性質の低下率は骨材の岩種の影響を受ける。以上のことから、高温の影響を受けるコンクリートに関して、コンクリート内部の微小欠陥の発生を抑止するにはコンクリートに使用する骨材の組合せは重要な問題であり、モルタルと粗骨材との熱膨張係数の差の低減が必要であると考えられる。

<参考文献>

- [1] マスコンクリートのひびわれ制御指針, 日本コンクリート工学協会, 1986, 305pp.
- [2] J. Selsing, J. of American Ceramic Society, Aug. 1961., pp. 419.