

## 論文 高温下における高強度コンクリートの品質変化

高野 智宏<sup>\*1</sup>・市橋 哲之<sup>\*2</sup>・堀口 敬<sup>\*3</sup>・佐伯 昇<sup>\*4</sup>

**要旨：**高温下における高強度コンクリートの挙動は普通強度のコンクリートとは異なり爆裂などの特異な現象が起こることが指摘されており<sup>1)</sup>メカニズムの解明が必要とされている。本報告では高温下における高強度コンクリートの性状を把握するため、高温暴露後における残存特性として残存圧縮強度と残存弾性係数について検討した。併せてコンクリート内部の微視的構造や各種水和物の変化について検討を行った。試験結果から 200℃までの加熱では残存圧縮強度比が増加する傾向を示したが、X線回折の結果からは大きな変化は認められなかった。400℃から残存圧縮強度と残存弾性係数は低下する傾向を示し、これに対して400℃からC-S-H系が、600℃からCa(OH)<sub>2</sub>に変化が見られた。

**キーワード：** 高温, 高強度コンクリート, X線回折, 残存強度

## 1. はじめに

高温下のコンクリートの劣化現象にはクラック, ポップアウト, スポーリングなどがあり古くから多くの研究実績がある。しかし、これらの研究は主として普通強度のコンクリートによる研究であり高強度コンクリートについての研究は少なく、配合や骨材の種類など異なる因子が多いため普通強度の研究実績をそのまま適用できないことが指摘されている<sup>1)</sup>。

高強度と普通強度コンクリートの劣化挙動の相違点として爆裂があげられる。火災時の高強度コンクリートは爆裂を起こしやすく、急激な部材の性能低下をもたらすことが報告されている<sup>2)</sup>。通常、コンクリート中の水分が水蒸気になるとき高い気化熱を必要として熱が奪われるため、コンクリート中の蒸発性の水分がなくなるまでコンクリートの内部温度はそれほど急激に上昇しない。ところが高強度コンクリートを急に加熱するとコンクリート内部に急激な高水蒸気圧や表層部に大きな熱

応力、それらの複合作用が発生し、高強度に伴う内部の高密度化の影響もあり、爆裂が起こると考えられている<sup>1)</sup>。

コンクリート内部の水は一般に温度が約100℃でセメントペースト中の自由水が蒸気になり始める。約300℃に達するまでにC-S-Hの層間水、C-S-H、およびサルフォアルミネート水和物の化学的結合水も一部なくなる。さらに約500℃で水酸化カルシウムが分解し始めると言われている<sup>3,4)</sup>。よって、微視的構造の変化や各種水和物の変化による強度低下が考えられ、これらのことから高温下における高強度コンクリートの特異挙動のメカニズムの解明が必要とされている。

本報告は高温下における高強度コンクリートの性状を把握するため、温度上昇ごとに残存圧縮強度比、残存弾性係数比を測定し検討を行った。またそれに伴うコンクリート内部の微視的構造や各種水和物の変化についてX線回折を用いて検討した。

\*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 工修 (正会員)

\*2 北海道大学工学部 社会基盤工学専攻

\*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学 工博 (正会員)

\*4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学 工博 (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の配合

使用した供試体の配合を表-1に示す。配合は単位水量  $W=170\text{kg/m}^3$ ，単位セメント量  $C=680\text{kg/m}^3$ ，水セメント比  $W/C=0.25$ ，細骨材率  $s/a=40\%$ である。この配合は以前の研究結果<sup>5)</sup>で爆裂頻度の高い供試体のそれであった。供試体は打設後 1 日湿潤養生を行い、その後 28 日水中養生（養生温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）を行った。よって飽和度 100%、含水率は重量%で平均 5.9%であった。供試体は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を用いた。

表-1 供試体の配合

単位セメント量 C (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 s/a (%)	水セメント比 W/C	含水率 (重量%)	空気量 (%)
680	170	40	0.25	5.9	0.9

### 2.2 供試体の高温暴露条件

供試体を加熱する熱源は 図-1 に示すような電気炉を使用し、電気炉内部の温度を制御し実験を行った。

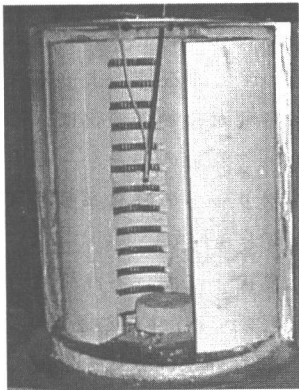


図-1 電気炉

図-2のように実験では供試体を加熱する最高温度を① 200、② 400、③ 600℃に設定した。温度上昇は  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  で、最高加熱温度に達すると 2 時間保持し、その後に冷却するように炉内の温度を制御した。急激な冷却は熱応力を発生し熱収縮によるクラックが発生するため時

間をかけゆっくりと冷却し冷却中に起こる強度低下を防止することに努めた。

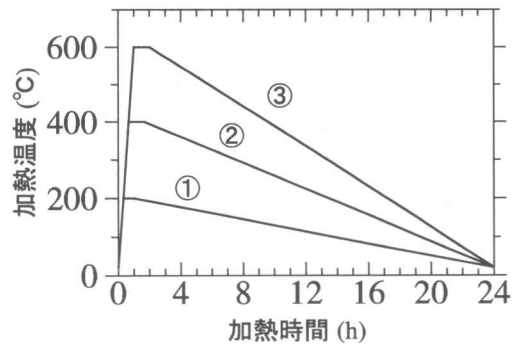


図-2 周辺温度履歴

### 2.3 残存特性

残存特性として本研究では残存圧縮強度比と残存弾性係数比をとりあげた。残存圧縮強度比 ( $Z$ ) は最高温度ごとに加熱前、加熱後の各 3 本で圧縮試験を行い平均圧縮強度を算出し式 (1) を用いて算定した。

$$Z = \sigma_a / \sigma_b \quad \dots (1)$$

$Z$  : 残存圧縮強度比

$\sigma_a$  : 加熱後圧縮強度 (MPa)

$\sigma_b$  : 加熱前圧縮強度 (MPa)

また、残存弾性係数比 ( $F$ ) は圧縮試験と同時に計測した変形量から加熱前後の弾性係数を算出し平均した値から式 (2) を用いて算定した。

$$F = E_a / E_b \quad \dots (2)$$

$F$  : 残存弾性係数比

$E_a$  : 加熱後残存弾性係数 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$E_b$  : 加熱前残存弾性係数 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

### 2.4 X線回折

X線回折に用いた試料は円柱供試体側面部中央から中心に向かって 25mm 部を採取し、骨材成分を極力除去したセメントペースト部を粉体としたものを使用した。測定は粉末 X 線

回折装置を用い、対陰極 Cu、管電圧 40kV、管電流 60mA でステップスキャン法で 0.005° まで行った。ここでは水酸化カルシウム、C-S-H 系とエトリンガイトに着目し X 線回折した。水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>)、C-S-H 系が分解、そして炭酸化し生成される物質にカルサイト (CaCO<sub>3</sub>)、パテライト (CaCO<sub>3</sub>) が、また水酸化カルシウムが熱により変化した結晶で CaO が挙げられ、最高温度ごとにおけるこれら結晶の状況についても検討した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 残存強度特性結果

表-2 に高温暴露前と後の圧縮強度と弾性係数を示す。これによると、加熱前の圧縮強度においてすべての供試体で 60MPa を越える超高

強度コンクリートであることが示される。また、加熱前の弾性係数もまた、普通強度コンクリートより高い傾向を示した。

図-3、4 に加熱温度の違いによる残存圧縮強度と残存弾性係数を示す。図-3 に示す残存圧縮強度比は加熱温度を上げるにつれ 200°C を最高に低下していく傾向を示した。200°C においては残存圧縮強度比が 100% を超える値を示した。図-4 に示した残存弾性係数比で未加熱と 200°C で加熱した供試体に大きな差は見られなかった。400、600°C で加熱した供試体の残存圧縮強度、残存弾性係数は未加熱の供試体より低下する傾向を示した。既往の研究からも同様な傾向が示され 200°C 付近の残存圧縮強度比が向上することが報告されている<sup>9)</sup>。

表-2 実験結果

加熱温度 (°C)	圧縮強度				弾性係数			
	加熱前 $\sigma_b$		加熱後 $\sigma_a$		加熱前 $E_b$		加熱後 $E_a$	
	(MPa)	平均 (MPa)	(MPa)	平均 (MPa)	(kN/mm <sup>2</sup> )	平均 (kN/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	平均 (kN/mm <sup>2</sup> )
未加熱	93.8	102.4	/	/	65.3	64.5	/	/
	102.8							
	110.5							
200°C	96.5	108.2	118.2	116.8	67.2	62.4	62.5	59.9
	118.0							
	110.2							
400°C	116.2	115.0	98.8	103.7	52.5	50.0	35.6	24.3
	116.3							
	112.5							
600°C	94.3	100.7	59.9	66.0	76.5	70.1	11.7	19.9
	109.1							
	98.6							

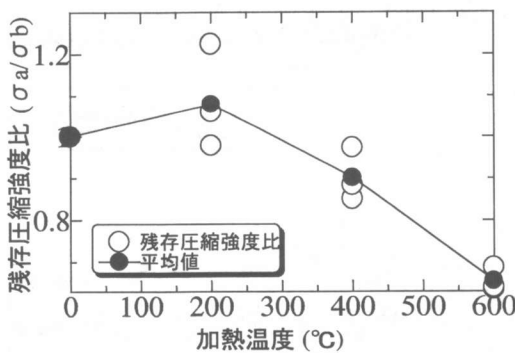


図-3 残存圧縮強度比

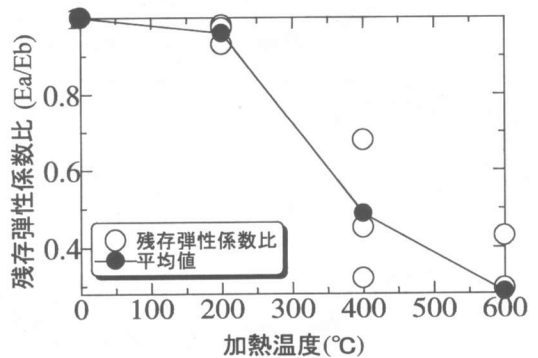


図-4 残存弾性係数比

### 3.2 X線回折結果

#### 3.2.1 200°Cで加熱したX線回折結果と考察

図-5は高温暴露試験前(未加熱と呼ぶ)と200°Cに加熱した後の供試体を用いた粉末X線回折の結果を示したものである。図から全体的な回折ピークは同様な傾向を示しているのがわかる。すなわち、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の回折ピーク(図中の◇印)である $18.1^\circ, 28.6^\circ, 34.1^\circ$ および $36.6^\circ$ の両者の差異をみると、ほぼ同程度であり $25^\circ \sim 34^\circ$ 近傍に見られるC-S-H系の回折ハローに関しては若干低下する傾向が見られる。400°Cの加熱状態ではC-S-H系の層間水の脱水がすでに完了していると言われている<sup>6)</sup>。結晶は400°Cから分解が始まるため微少な変化が伺える。CaO(図中の■印)、カルサイト(図中□印)に関しては $32.5^\circ$ のピークで大きくなる傾向を示した。その他のカルサイト(図中の□印)、バテライト(図中の×印)のそれぞれの回折ピークに関しても顕著な変化は見られない。エトリンガイト(図中●印)は $9.1^\circ$ で明瞭な消失が見られその他のピーク位置でも若干消失が認められた。

#### 3.2.2 400°Cで加熱したX線回折結果と考察

図-6は未加熱と400°Cに加熱した後の供試体を用いた粉末X線回折の結果を示したものである。図から、全体的な回折ピークは両者とも同様な傾向を示している。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の回折ピーク(図中◇印)である $18.1^\circ, 34.1^\circ$ および $36.6^\circ$ の両者の差異をみると、ほぼ同程度である。 $25^\circ \sim 34^\circ$ 近傍に見られるC-S-H系の回折ハローに関しては若干低下する傾向が見られる。400°Cの加熱状態ではC-S-H系の層間水の脱水がすでに完了していると言われている<sup>6)</sup>。結晶は400°Cから分解が始まるため微少な変化が伺える。CaO(図中の■印)、カルサイト(図中□印)に関しては顕著な変化は見られない。バテライトの回折ピーク(図中×印)である $27.0^\circ, 32.8^\circ$ の両者の差異をみると $27.0^\circ$ はほぼ同程度であるが、 $32.8^\circ$ は400°CのX線回折結果で若干大きくなる傾向を示し、また新たな一致するピークも示された。エトリンガイト(図中●印)は消失が見られピーク個数が減る傾向を示した。

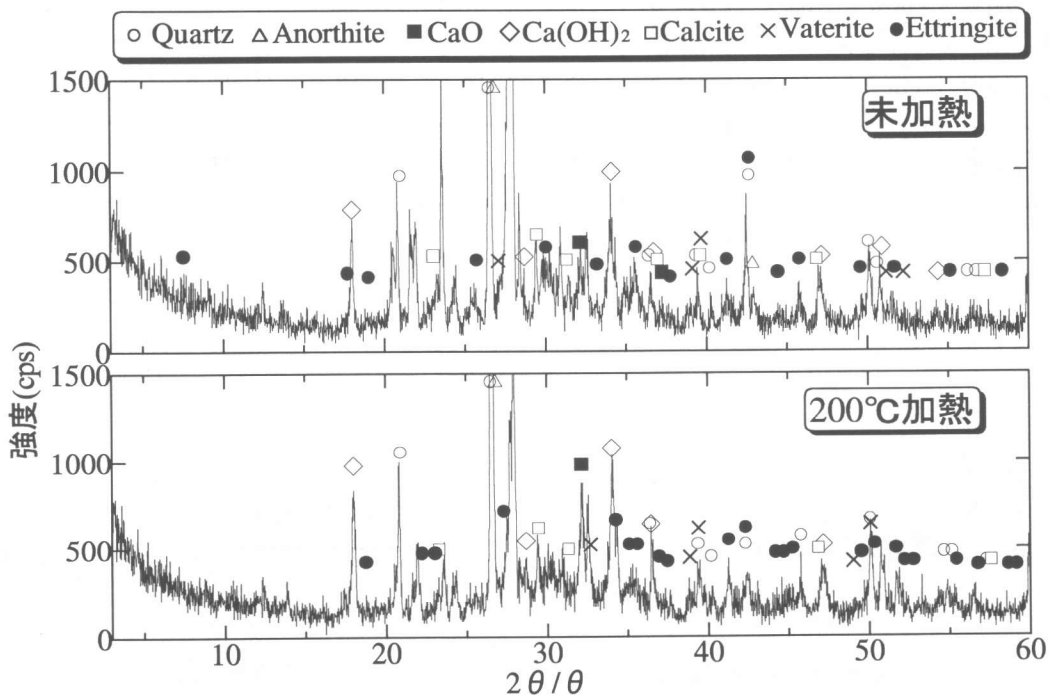


図-5 200°Cで加熱したX線回折結果

### 3.2.3 600°Cで加熱したX線回折結果と考察

図-7は未加熱と600°Cに加熱した後の供試体を用いた粉末X線回折の結果を示したものである。図から全体的な回折ピークは600°C

に加熱することでピークの間隔が多くなる傾向を示していることが分かる。Ca(OH)<sub>2</sub>の回折ピーク(図中◇印)である18.1°, 34.1°の両者の差異をみると、600°Cに加熱した後の供試体

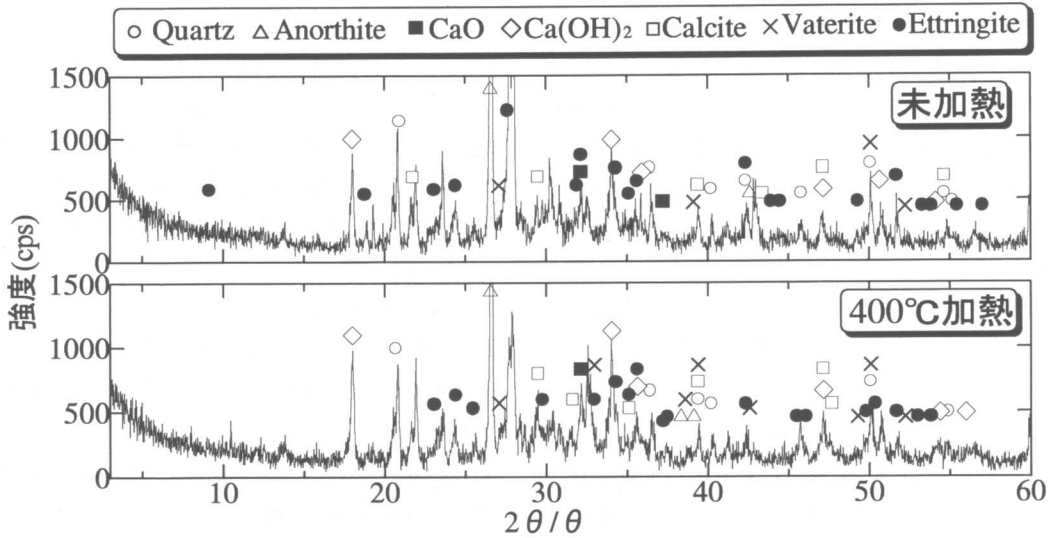


図-6 400°Cで加熱したX線回折結果

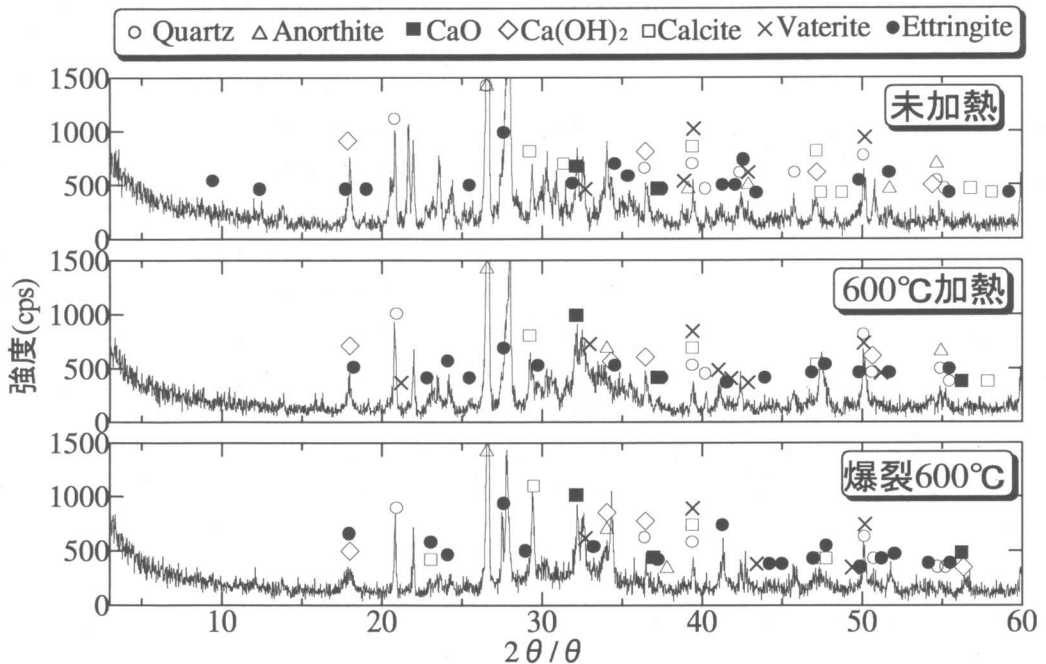


図-7 600°Cで加熱したX線回折結果

や爆裂破壊を発生した供試体で若干の低下が見られた。25°～34°近傍に見られる C-S-H 系の回折ハローに関しては 600°C に加熱した後の供試体や爆裂破壊を発生した供試体で低下する傾向が見られる。特に爆裂破壊を発生した供試体は 600°C で加熱した供試体より低下する傾向が見られた。600°C の加熱状態では C-S-H 系の層間水の脱水がすでに完了し結晶は 400°C から分解が始まるため顕著な変化が伺える。CaO (図中の■印) に関しては 32.5°, 37.7°, 56.3° に回折ピークが示される。加熱、未加熱で両者の差異をみると 32.5° ので加熱されると大きくなる傾向をしめした。カルサイト (図中□印) に関しては顕著な変化は見られない。バテライトの回折ピーク (図中×印) である 27.0°, 32.8° の両者の差異をみると 27.0° はほぼ同程度であるが 32.8° は 600°C で加熱した供試体や爆裂破壊を発生した供試体で大きくなる傾向を示した。600°C で加熱した供試体ではバテライトのピーク本数が増える傾向を示したが、爆裂した供試体ではピーク本数に大きな変化はあまり見られなかった。エトリンガイト (図中●印) に関しては未加熱と 600°C を比較するとピークの消失が多数見られた。爆裂した供試体においても同様の傾向を示した。600°C で加熱した供試体と爆裂した供試体の比較では爆裂した供試体でエトリンガイトのピーク個数が若干多く見られた。

#### 4. 結論

残存圧縮強度比は 200°C で 10% 程度の増加を示し、その後温度上昇とともに減少し 400°C, 600°C ではそれぞれ 10%, 30% 程度の低下を示す傾向であった。温度上昇に伴う残存弾性係数比は 200°C 以上になると急激に低下する傾向を示した。

200°C までの加熱では X 線回折で顕著な水和生成物の違いは見られなかった。400°C までの加熱では若干 C-S-H 系の回折ハローに低下が見られ、バテライトのピーク強度の増加が若

干見られた。600°C まで加熱すると C-S-H 系の回折ハローに低下が見られた。Ca(OH)<sub>2</sub> のピーク強度にも低下が見られ、またバテライトの増加も見られた。

#### 参考文献

- 1) 山崎 康行, 西田 朗: 耐爆裂性コンクリート, コンクリート工学, vol.36, No.1, pp.44-47, 1998.1
- 2) 井上 明人, 飛坂 基夫, 榊田 佳寛: 高強度コンクリートの耐火性能の評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.531-532, 1990.10
- 3) P.Kumar Mehta, Paulo J.M.Monteiro 共著 田澤 榮一, 佐伯 昇 監訳: コンクリート工学 微視構造と材料特性, 技報堂出版, pp.140-143, 1998.10
- 4) T.T.Lie, T.J.Rowe, and T.D.Lin, 'Residual Strength of Fire-Exposed Reinforced Concrete Columns', Evaluation and Repair of Fire Damage to Concrete, ACI SP92-9, 1987, pp.153-174
- 5) T.TAKANO, K.SHIMURA, T.HORIGUCHI and N.SAEKI, 'Deformation and Deterioration Behavior of High Strength Concrete Under Elevated Temperature', TRANSACTIONS OF THE JCI, vol.22, pp.105-112, 2000
- 6) P.J.E.Sullivan and G.A.Khoury, 'Fire Performance of Various Concretes Deduced from Strain Measurements During First Heating', Evaluation and Repair of Fire Damage to Concrete, ACI SP.92-10, 1986, pp.175-196

#### 謝辞

本研究に際し、ご協力をえた厂原洋介君, 小林貴人君 (北海道工業大学土木工学科) に感謝します。