

# 高温下におけるコンクリートおよび鉄筋の物性

金津 努

正会員 工修 (財) 電力中央研究所 材料構造部 上席研究員 (〒270-1194 我孫子市我孫子 1646)

定常的に高温条件に曝される鉄筋コンクリート施設として、原子力発電所の原子炉格納容器、原子炉・冷却水配管の支持構造、放射性返還廃棄物、使用済み燃料等の高レベル廃棄物貯蔵施設などがある。これらの構造物では、鉄筋とコンクリートの物性の高温特性が外荷重に対する応答に影響すること、鉄筋とコンクリートの熱膨張特性に起因して内部応力が発生することなど、高温下特有の挙動を示す。後者は、既報においてその特性を評価した。本論文は、常温から最高 500℃までの温度領域における鉄筋とコンクリートの物理的性質の温度依存性について、実験結果を中心として取りまとめたものである。

**Key Words:** high temperature, physical property, concrete, reinforcement

## 1. はじめに

著者は、原子力発電所の格納容器、原子炉冷却水配管の支持構造、放射性返還廃棄物、使用済み燃料等の高レベル廃棄物貯蔵施設など、高温下に曝されることを想定して設計が行われる鉄筋コンクリート構造物の設計の合理化を目的として、高温下における鉄筋コンクリートの基本特性を把握するための研究を実施している。高温下では、鉄筋とコンクリートの熱膨張係数の相違が鉄筋コンクリートの変形性状に大きく影響することを指摘し、先の論文で、小型鉄筋コンクリート棒部材を対象とし、これらの影響を明らかにし、評価方法を提案した<sup>1)</sup>。

鉄筋とコンクリートの熱膨張係数の相違の問題に加えて、他の重要な検討事項は、コンクリートと鉄筋それぞれの物理的性質の温度依存性を明らかにすることである。コンクリート中の水分の移動(逸散)とコンクリートの強度・変形性状とは、常温下においても密接な関係があることが知られているが<sup>2)</sup>、100℃を越える温度条件では、移動(逸散)現象が一層著しくなるため、これがコンクリートの物性、ひいては鉄筋コンクリート構造の挙動に影響することが推測できる。

一方、鉄筋はコンクリートほどの影響を受けることはないが、高温に対する抵抗性に優れた材料ではなく、応力-ひずみ関係の降伏点および降伏以降の領域で、温度の影響を受けることが指摘されている。しかし、高温下の鉄筋コンクリート構造の変形性能の評価に用いるとの観点から、鉄筋の機械的性質を取りまとめた成果は、これまであまり報告されていない。

本論文は、既往の文献調査および著者の実施した常温から 500℃までの温度条件での実験結果から、以下の項

目について検討を行い、コンクリートおよび鉄筋の高温領域の温度依存特性を明らかにしたものである。

- ① コンクリートの強度、弾性的性質の温度依存性
  - a. コンクリートの強度・ヤング係数
  - b. 付着強度
  - c. コンクリートの圧縮ひずみ能力
  - d. 昇温時の圧縮応力の存在が強度、弾性的性質に与える影響
  - e. 高温環境下への長期間暴露の影響
- ② 鉄筋の機械的性質および熱膨張係数

## 2. 既往の実験データに基づく強度・ヤング係数の温度依存性の評価

これまでに報告されている実験データに基づいて、履歴温度とコンクリートの強度(圧縮、曲げ、引張、付着)、ヤング係数の残存比(加熱前・後の物性値の比率)との関係を整理した。図-1～図-5に、履歴温度とそれぞれ圧縮強度、引張強度(割裂、直接)、曲げ強度、ヤング係数および付着強度残存比との関係を示した。また、圧縮強度、ヤング係数および引張強度(割裂、直接)を得た実験条件を表-1に示した。

これらの表から分かるように、使用材料、配合、賦与した温度条件等の内容を見ると、既往の実験条件は、普通に用いられるコンクリートの条件(使用材料、配合)、想定される温度賦与条件(温度、賦与速度、期間)を網羅しているものと考えられる。実験データは大きくばらついてはいるが、強度、ヤング係数の温度依存の傾向がある程度見いだすことができる。データは、参考文献<sup>2)</sup>

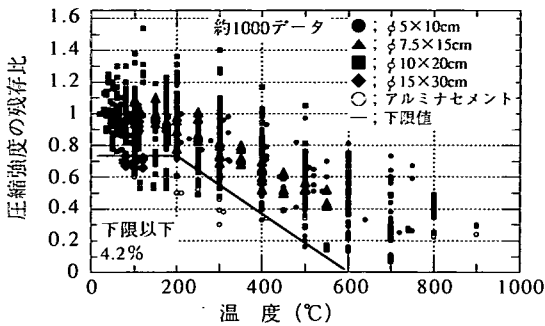


図-1 圧縮強度の残存比の温度依存性

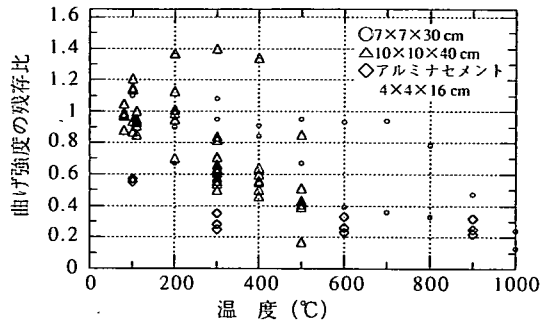


図-3 曲げ強度の残存比の温度依存性

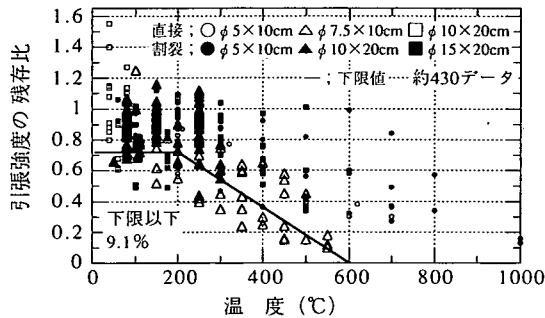


図-2 引張強度の残存比の温度依存性

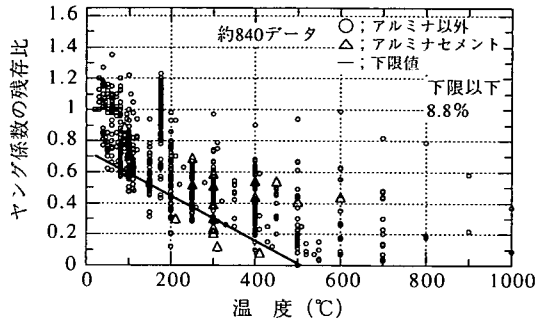


図-4 ヤング係数の残存比の温度依存性

～46) のものである。

### (1) 圧縮強度

収集したデータ数は 1000 個強 (既往の研究論文 36 編および著者の実験データ) である。これらのデータから定性的な傾向を判断し、残存率の下限を設定した。圧縮強度は、200℃までは強度低下が比較的小さく、残存率の下限値は約 0.7 である。しかし、200℃を越えると強度低下は著しく、残存率が 200℃で 0.7 から 600℃で零となる直線が下限値と判断できる。設定した下限に対して、200℃以下の領域、200℃以上の領域で下回るデータはそれぞれ 5.1%および 3.1%であって、全体で 4.2%であった。設定した下限値以下のデータは、高炉セメント (B, C) を使用し、加熱時材齢が 4 週程度と比較的短い場合、大型試験体からコア抜きした試験体の場合、およびアルミナセメントを用いた場合であった。下限以下の全データの 30%はアルミナセメントで、1000℃を越える温度領域で耐熱性を示すアルミナセメントは、500℃以下の範囲では耐熱性を示さないようである。

また、試験体寸法別に結果を整理したが、強度残存率に与える影響は、認められなかった。

温度上昇に伴う水和物の分解、骨材とセメントペーストの境界における微細ひびわれの発達、このような強度低下を引き起こすものと考えられる。また、既往の研究から、450℃付近で水酸化カルシウムが分解すること、570℃で骨材中の石英が膨張性の変態を生じること等、

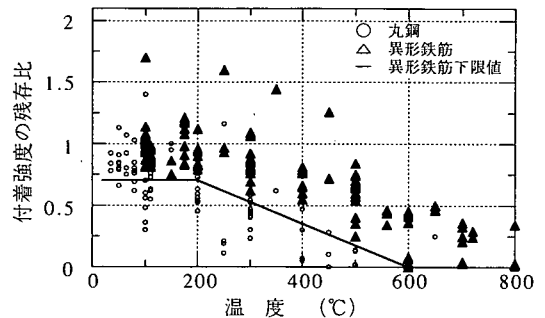


図-5 付着強度の残存比の温度依存性

強度低下を引き起こす現象が明らかにされている<sup>47) 48)</sup>。

### (2) 引張強度

圧縮強度に比較すると得られているデータの数は少なく、約 430 個 (既往の研究論文 16 編および著者の実験データ) である。引張強度の残存率の低下性状は、定性的、定量的に圧縮強度の場合とほとんど同じで、下限値は 200℃までは約 0.7、200℃以上では 200℃で 0.7、600℃で零となる直線と与えられる。200℃以下の領域、200℃以上の領域で下限値を下回るデータは、それぞれ 8.7%および 9.8%であって、全体で 9.1%であった。

試験は、割裂引張と直接引張の 2 方法で実施されており、試験体寸法は、直接引張では φ5×10cm, φ7.5×15cm, φ10×20cm, 割裂引張では φ5×10cm, φ10×20cm, φ15×20cm である。残存比としては、直接引張の方がやや小さい傾向にあるが、試験体寸法の影響は認められ

表-1 圧縮強度・ヤング係数・引張強度データの実験条件

要因	圧縮強度, ヤング係数	引張強度 (直接, 割裂)
セメントの種類	普通, 早強アルミナ, 高炉, 中府熱, 777777, CSA. 普通が多い.	普通, 高炉, 777777, CSA
骨材	砂岩, 硬質砂岩, 安山岩, 玄武岩, 膨張頁岩, 石灰岩, 鉱炉滓, 花崗岩, 輝緑岩, 蛇灰岩, 蛇紋岩(+777777), 軽石(自然, 人工), シリカ質骨材, シェット(耐火レンガ), ホルフェルス	砂岩, 硬質砂岩, 安山岩, 鉱炉滓, 石灰岩 +777777, 軽石(自然, 人工), 蛇紋岩
水セメント比	26%~70%. ほとんど40%~60%である.	45%~70%. 50%前後が多い.
セメント量	250~460kg/m <sup>3</sup> , 350 kg/m <sup>3</sup> 前後が多い. 800,900 kg/m <sup>3</sup> の場合もある.	270~390kg/m <sup>3</sup> . 350 kg/m <sup>3</sup> 前後が多い.
暴露条件	ほとんど777777条件. シェット条件はせいぜい175℃まで. 繰り返し加熱.	ほとんど777777条件. 繰り返し加熱.
暴露時材齢	1週~1年, 2年, 4年, 13, 21週が多い.	4週~半年が多い. 1, 2, 3年.
暴露時間	20分, 1.2, 3時間, 1.3日, 1週, 4週, 9週, 13週までが多い. 半年, 1年, 2年の場合もある.	1時間~13週までが多い. 1年.
昇温速度	4℃/hr.~120℃/hr.. ほとんど60℃/hr.以下である.	10℃/hr.~75℃/hr.
降温速度	10℃/hr.が多い. 120℃/hr.の場合もある.	10℃/hr.
強度試験時温度	ほとんど常温下である. 高温下の場合もある.	ほとんど常温下. 高温下の場合もある.
試験体寸法	φ5×10cm, φ7.5×15cm, φ10×20cm	直接: φ5×10cm, φ7.5×15cm, φ10×20cm 割裂: φ5×10cm, φ10×20cm, φ15×20cm

ない。材料面からは、高炉セメント (C) を使用した場合に、残存強度が小さいことが明確に認められた。

その他、骨材が石灰岩、川砂利の場合に小さな残存率となっているが、これらの骨材でも大きな残存率を示すデータがある。

### (3) 曲げ強度

曲げ強度については、既往の研究報告例 (図-3 は、既往の研究論文 4 編および著者の実験データ) が殆どないため、明確には残存率の低下性状の評価はできない。傾向は、引張強度と同様の低下性状を示すようである。

### (4) ヤング係数

ヤング係数は昇温に対する低下が敏感で、温度の上昇にともなって残存率は直線的に低下する。実験データは30℃以上の温度に対して得られており、全部で約 840 個 (既往の研究論文 31 編および著者の実験のデータ) である。残存率の下限値は、20℃で 0.7、500℃で零となる直線と与えられると判断できる。この下限を下回るデータは、全体で 8.8% である。常温下でも長期間空气中に暴露すると残存率は 20% 程度低下する場合がある<sup>49)</sup>。下限値よりも小さくなるのは、高炉セメント (B, C) を使用し、加熱時材齢が 4 週程度と比較的短い場合およびアルミナセメントを用いた場合であった。

### (5) 付着強度

付着強度については、丸鋼と異形鉄筋で温度依存性が異なる。異形筋による付着抵抗のない丸鋼では、昇温とともに急速に強度低下を生じるのに対して、異形鉄筋では圧縮強度の温度依存性と類似の挙動を示す。すなわち、200℃までは強度低下が比較的緩やかで残存率約 0.7、200℃を超えると急速に強度が低下する。付着強度は、コンクリートの圧縮・引張強度特性に依存する物性であることを示す挙動である。高温下の付着強度データも比較的少なく、図-5 は、既往の文献による丸鋼約 90 個、異形鉄筋約 120 個のデータである。

表-2 鉄筋の機械的性質

種類	降伏点強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 ×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
D16	421	600	2.07

## 3. 実験概要

2. で示した短期間の高温条件下における物性の温度依存性以外に、①コンクリートの圧縮ひずみ能力、②昇温時の圧縮応力の存在が強度、弾性的性質に与える影響、③高温環境下への長期間暴露の影響などがある。特に重要と考えられる高温下の特性を調べるために、これらの実験を行った。その概要を以下に示す。

### (1) 使用材料と配合

- ① セメント; 密度 3.15g/cm<sup>3</sup> の普通ポルトランドセメント.
- ② 細骨材; 密度 2.64~2.76g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.0%, 粗粒率 2.58~2.64 の茨城県鹿島利根川産の川砂.
- ③ 粗骨材; 栃木県葛生産または田沼産 (13-20mm) と埼玉県秩父産 (5-13mm) の混合砕石で、密度 2.76~2.84g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.63~0.72%, 粗粒率 6.64~6.74.
- ④ 高炉スラグ微粉末; JIS A 6206 の 4000 クラス (ブレン値 4500cm<sup>2</sup>/g, 密度 2.89 g/cm<sup>3</sup>) と 8000 クラス (ブレン値 8000cm<sup>2</sup>/g, 密度 2.90 g/cm<sup>3</sup>).
- ⑤ 混和剤; AE 減水剤
- ⑥ 鉄筋; SD345 規格の D16mm

鉄筋の機械的性質を表-2 に示す。実験に用いたコンクリートの配合を表-3 に示す。

### (2) 実験方法

- a) コンクリートの圧縮ひずみ能力の温度依存性
  - 4 週間湿潤養生した φ10cm×20cm の強度試験体に、所定温度 (最高 500℃) までの温度履歴 (昇温時 60℃/hr. 以下, 降温時 12℃/hr. 以下, 高温保持期間; 10 日, 30 日

表3 コンクリートの配合

配合	f <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) 28日	スランプ (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 Adm	混和剤 WRA
1	40	8±2	3±1	43.2	43.1	160	370	789	1103	0	0.925
2	24	10±2	3±1	64.8	47.0	162	250	908	1082	0	0.625
3	40	---	3±1	43.2	43.1	160	167	789	1103	203	0.416
4	40	---	3±1	43.2	43.1	160	167	789	1103	203	0.416

ただし、配合(3)はブレン8000クラス、配合(4)はブレン4000クラスの高炉スラグ微粉末を置換率55%で使用

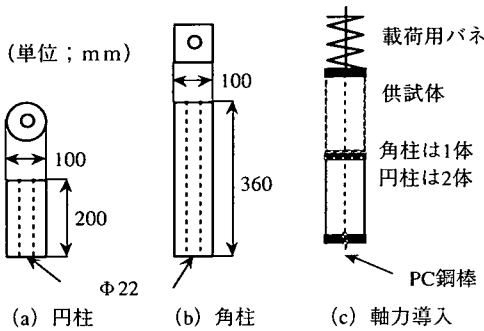


図-6 圧縮応力の存在が物性に与える影響把握試験

(昇降温は1回のみ)、または温度繰り返し; 1回, 10回, 15回, 30回, 各回で所定高温を半日保持を与え、常温下で強度試験を行った。ヤング係数評価のためのひずみは、試験体表面に貼付したひずみゲージにより測定した。別途実施した熱間状態の試験(所定温度保持期間; 1日)では、熱間試験用に作製したひずみ計により測定した。繰り返し15回の試験体の配合が表-3に示す配合(2)である以外は、すべて配合(1)である。

実験では軟化領域のひずみデータを測定していないため、最大圧縮応力時点での圧縮ひずみ値に基づいて圧縮ひずみ能力の温度依存性を推測した。

b) 圧縮応力の存在が強度、弾性的性質に与える影響

試験体は、材齢28日に達するまで湿潤養生を行い、その後、昇温開始時まで約2ヶ月間気乾養生(温度20±3℃, 相対湿度60%の恒温恒湿実験室)を行った。図-6に示すように、中央部に穴をあけた強度試験体(φ10cm×20cm, 10cm×10cm×40cm)に、クリープ試験用の载荷バネを介して圧縮応力を導入し、その状態のまま昇降温させた。降温後圧縮応力を除荷し、通常の圧縮強度試験と曲げ強度試験を行った。コンクリートひずみはひずみゲージにより測定した。

昇温範囲は常温から280℃, 昇温速度は10℃/hr., 降温時は高温槽内での自然冷却とした。所定高温保持時間は2日間であった。

用いたコンクリートは配合(1)および配合(2)で、導入応力は、応力強度比の範囲で配合(1)が0~0.25, 配合(2)が0~0.35, それぞれ5水準とした。

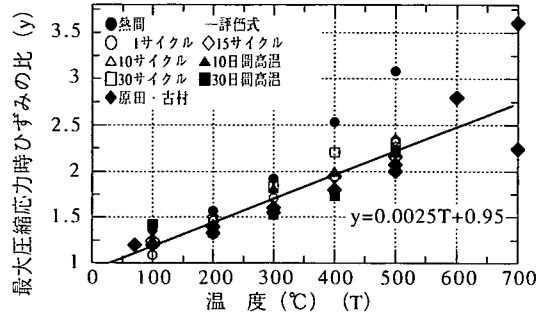


図-7 最大圧縮応力時のひずみの比の温度依存性

c) 高温環境下への長期間暴露の影響

常温, 65℃, 85℃, 110℃の4段階の温度条件にコンクリート試験体を長期間暴露した。試験体からの水分の逸散は自由である。昇温前養生は、b.の試験に同じである。暴露開始後1, 3, 6ヶ月, 1, 1.5, 2, 3および8年時点で試験を行い、コンクリートの強度、ヤング係数(φ10×20cm), 割裂引張強度(φ15×30cm)および質量の高温下の経年変化を測定した。また、8年経過後の試験体では、水和物(C-S-H)の分析を行った。試験に用いたコンクリートは、表-3の配合(1)~(4)である。コンクリートひずみは、ひずみゲージにより測定した。

4. コンクリートの圧縮ひずみ能力の温度依存性

図-7は、圧縮強度試験における賦与温度と最大応力時の圧縮ひずみの比(常温時のひずみに対する高温時のひずみの比)の関係を示した。最大圧縮応力時の圧縮ひずみの比は、温度履歴に係わらず、ほぼ賦与温度の上昇とともに直線的に増加した。特に、繰り返し加熱条件(10回, 30回)においても、圧縮ひずみ比の増加傾向はほとんど変わらないことが分かる。図中の直線は、熱間条件を除き、回帰して求めたものである(熱間条件はひずみ計測方法が異なること、および信頼性の点でやや劣るので、ここでは参考データとして扱った)。最大応力時の圧縮ひずみは、常温時で約1800×10<sup>6</sup>, 500℃で約4000×10<sup>6</sup>となり、500℃では、設計で考慮される常温下の終局ひずみ値3500×10<sup>6</sup>を越えている。つまり、終局ひずみも温度上昇とともに増加する事が推測できる。

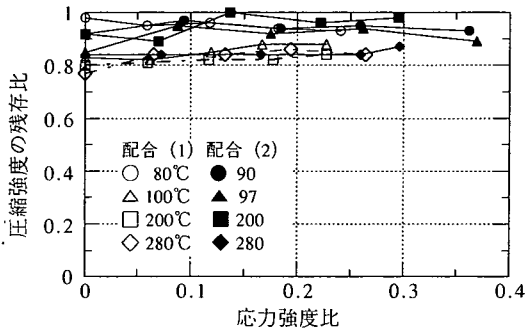


図-8 圧縮応力の存在が圧縮強度の残存比に与える影響

高温下での最大圧縮応力時以降のひずみの挙動については、原田、古村<sup>5), 39), 46)</sup>が、常温~700℃の温度範囲において1%程度まで測定し、高温下でのひずみ能力が常温下に比較して大きくなっていることを確認している。

この最大応力時のひずみの温度依存性を図-7に併せて示した<sup>5), 39), 46)</sup>。著者の結果は、原田・古村の実験結果と良好に対応している。

最大圧縮応力時点と終局ひずみの関係の一つの拠り所である、コンクリート標準示方書の最大応力時ひずみ $2000 \times 10^6$ 、終局時ひずみ $3500 \times 10^6$ の関係を参考として、図-7に示す最大圧縮応力時ひずみの温度依存性を終局ひずみに対して適用すると、500℃での終局ひずみは約0.7% ( $4000 \times 10^6$ の1.75倍)となり、原田・古村の終局時ひずみデータ<sup>5), 39), 46)</sup>とはほぼ一致している。したがって、500℃までの温度範囲における終局ひずみの温度依存性も、実験で得られた最大圧縮応力時ひずみと同じように、温度に対して増加する温度依存特性を考慮しても良いと推察される。ただし、500℃を越えるとばらつきが大きくなるようである。

## 5. 昇温時の圧縮応力の存在が強度、弾性的性質に与える影響

### (1) 圧縮強度に与える影響

図-8には、応力強度比 $\gamma$ ；導入圧縮応力を各温度におけるコンクリートの圧縮強度（軸圧縮力無しの場合）で除したものと加熱前後の圧縮強度比（試験体は降温し軸力を解除した後を試験した）との関係を示した。図から明らかなように、本実験条件である温度が80℃~280℃、応力強度比が0~約0.3までの範囲において、圧縮強度は昇温時の圧縮応力の存在の影響は受けないと判断される。したがって温度のみによる強度低下の程度を判断すればよい。

山田、中山<sup>50)</sup>は、引張応力が作用して引張クリープを生じた部分の圧縮強度を調べ、持続応力による影響は

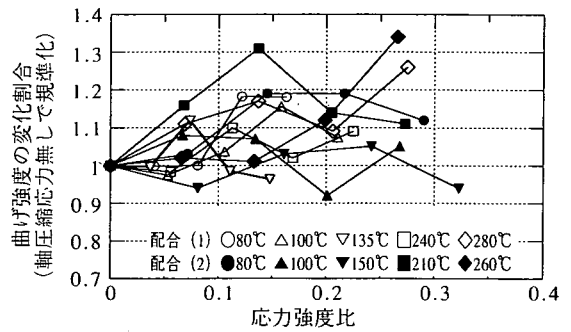


図-9 圧縮応力の存在が曲げ強度に与える影響

明確には現れないことを報告している。本実験とは応力の作用方向が異なるものの、圧縮強度は持続軸応力の存在によって影響されることはないことを示す例である。また、H.L.Malhotra<sup>51)</sup>は、圧縮応力がある場合には無い場合に比較して、温度による強度の低下がやや小さいことを実験結果から明らかにしている。これらは、本研究の結果とほぼ対応する実験結果である。

### (2) 曲げ強度に与える影響

図-9は、応力強度比と曲げ強度の変化率（各温度条件で圧縮応力のない状態で昇降温した時の曲げ強度に対する、圧縮応力が存在する場合の曲げ強度の比）を示した。データはかなりばらついているが、曲げ強度は、応力強度比の増加に対して変化しないかやや大きくなる傾向を示している。

神山<sup>52)</sup>は、持続圧縮力（載荷時材齢7日、応力強度比0.10~0.64）を与えた若材齢コンクリートの除荷後（載荷期間；28日、60日、90日）の直接引張強度試験を行い、引張強度は持続圧縮力を与えていないものに比較して10~15%低下することを示した。これは、クリープを含むコンクリートの塑性変形は、コンクリートの粘性性質と組織の局部的微小破損に起因するもので、微小破損により直接引張強度が低下したものと考えられている。

本実験は材齢の大きなコンクリートに圧縮応力を与えた後に昇温していることの違いはあるが、圧縮応力に起因する局部的微小破損による塑性変形は生じていることが推測される。しかし、本実験で曲げ強度が低下しない結果となったのは、強度低下に大きな影響を与える昇温に伴う骨材とペースト境界部分の損傷が、圧縮応力の存在により、圧縮応力がない場合より抑制されたためと考えられる。圧縮強度のように明確ではないが、結果として、昇温時に圧縮応力が存在することで、少なくとも曲げ強度が低下することはないと判断できる。

### (3) 弾性的性質<sup>53)</sup>に与える影響

ヤング係数は、次のように測定したものである。

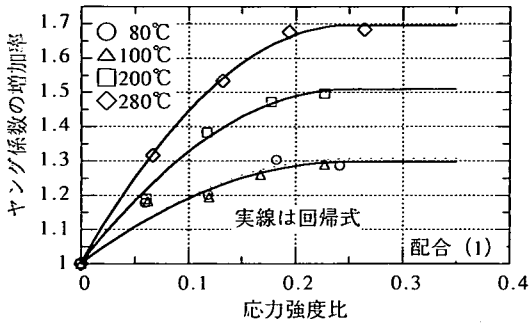


図-10 圧縮応力がヤング係数に与える影響；配合1

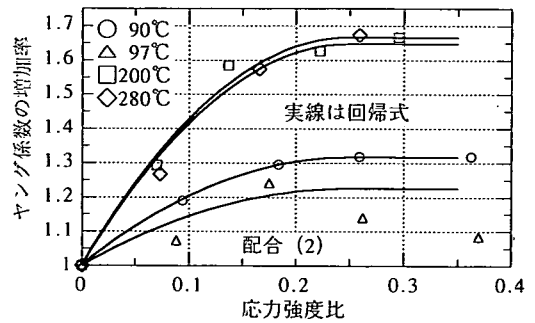


図-11 圧縮応力がヤング係数に与える影響；配合2

- ①常温下で試験体に所定の圧縮応力度を導入する。
- ②所定の温度履歴を付与する。
- ③試験体の圧縮応力を解除する。
- ④ひずみゲージを貼付し、通常のヤング係数試験を実施する。
- ⑤応力-ひずみ曲線から、1/3割線係数を求める。

検討したヤング係数は、温度、応力の履歴を受けた後のヤング係数であり、通常のヤング係数と異なる。しかし、実際の構造物では応力作用状態で高温履歴を受けるため、このような構造物が荷重作用を受ける場合の応答変形を評価するには、ここで示すヤング係数が有用と考えられる。

上記の手順で求めた、温度・応力の履歴を受けた後のヤング係数は、温度条件、圧縮応力のレベルによって大きく変化した。つまり、温度・応力履歴を受けた後のヤング係数は、圧縮応力のない場合よりもかなり大きくなるという結果が得られた。

高温下でのヤング係数の著しい低下は、主として骨材とセメントペーストの熱膨張係数の差により、両者の間に生じる微細なひびわれに起因するものと考え、圧縮応力の存在によりセメントペースト部がクリープして微細ひびわれの発生が抑制され、これがヤング係数の低下を抑制したものと推測される。

図-10 および図-11 には、すべての試験体について応力強度比と温度・応力履歴を受けた後のヤング係数の増加率（各温度条件で圧縮応力のない場合のヤング係数を1とした時の、温度・応力履歴を受けた後のヤング係数の増加割合）を示した。ヤング係数に与える圧縮応力の影響が明確に現れており、温度条件が高いほど、また応力強度比が大きいほど増加率が大きくなっている。

実験結果からは、温度・応力履歴を受けた後のヤング係数は応力強度比に対して放物線状に増加し、応力強度比が0.25程度で増加がほぼ頭打ちとなっていることが判る。このような挙動特性を評価するために、以下に示す式を提案した。

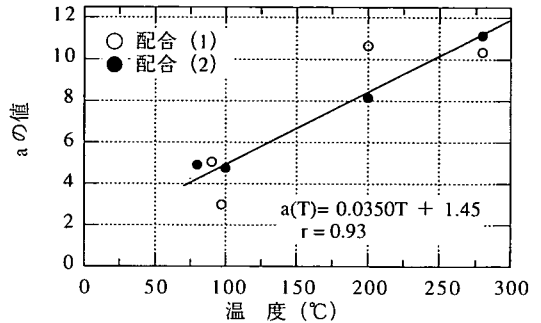


図-12 付与温度とa(T)の関係

$$\beta_c = -a(T)\gamma^2 + \frac{1}{2}a(T)\gamma + 1.0 \quad 0 \leq \gamma \leq 0.25 \quad (1a)$$

$$= \frac{1}{16}a(T) + 1.0 \quad 0.25 < \gamma \quad (1b)$$

ここで、 $\beta_c$ ；ある温度で圧縮応力零の場合のコンクリートのヤング係数に対する、同じ温度で圧縮応力がある場合のヤング係数の比  $a(T)$ ；温度条件に依存する係数  $\gamma$ ；応力強度比  $\{\sigma_{pc}/f_c(T)\}$   $\sigma_{pc}$ ；導入圧縮応力度  $f_c(T)$ ；温度  $T$  における圧縮強度

図-10、図-11 には、式 (1) で実験値を回帰した曲線を併せて示した。また、図-12 には式 (1) の係数  $a(T)$  と温度との関係を示した。限られた数のデータによる判断ではあるが、 $a(T)$  は温度とともに直線的に増加する傾向がある。実験データに基づく  $a(T)$  の回帰式は、図中に示した通りである。本実験を行った  $80^\circ\text{C} \sim 280^\circ\text{C}$  の温度範囲で適用可能と考えられる。 $80^\circ\text{C}$  以下でも適用は可能と考えられるが、昇温によるヤング係数の低下と圧縮応力の存在下で昇温した場合のヤング係数の増加が等しい場合、つまり昇温してもヤング係数が変化しない温度・圧縮応力の状態が理屈上存在する。この時が評価式の適用の限界と考えられる。配合 (1)、配合 (2) について実験データから評価すると、 $70^\circ\text{C}$  で応力強度比が 0.25 の場合に、ヤング係数は常温下の場合とほぼ等しくなる。

対象のコンクリートが限られたものであるため、定量

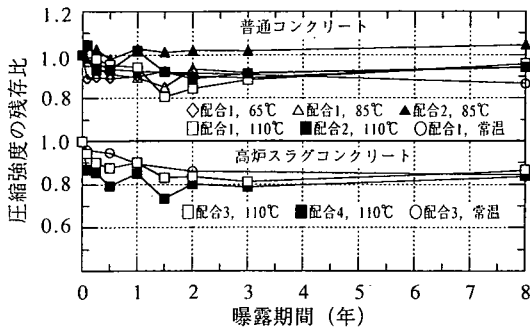


図-13 圧縮強度の残存比の経時変化

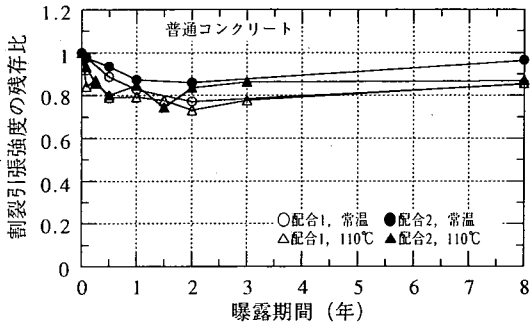


図-14 割裂引張強度の残存比の経時変化

的には一般性に欠けることになるが、定性的には一般にこのような高温特性があると考えられる。

## 6. 高温環境下への長期間暴露の影響

### (1) 圧縮強度、割裂引張強度およびヤング係数の残存比の経時変化

圧縮強度、割裂引張強度およびヤング係数の残存比の経時変化を、それぞれ図-13、図-14 および図-15 に示した。残存比の分母は、暴露開始時（材齢 3 ヶ月）の物性値である。

図から明らかなように、長期間高温下に暴露した試験体の物性値は経時的にやや低下するものの、暴露後 1~1.5 年の残存比は暴露後 8 年の残存比とほとんど差がなく、わずかな低下は、3 ヶ月~1.5 年間に生じているものと判断された。

配合 (1)、配合 (2) のコンクリート物性の残存比は、常温から 110°C の範囲では低下は小さいが、高炉スラグを用いた配合 (3)、配合 (4) は低下がやや大きい。この傾向は、ヤング係数比の場合に顕著である。このように、高炉スラグ使用の場合に残存比がやや小さくなる結果は、2. 既往の研究結果で述べた知見と一致するものである。

また、図-1、図-2 および図-4 に示した残存比（短期間の暴露実験データに基づく温度依存性）の下限値との

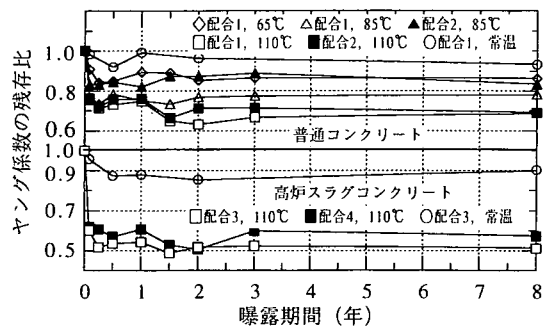


図-15 ヤング係数の残存比の経時変化

表-4 CaO/SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> の分析結果

項目	単位	配合 (1)		配合 (4)	
		常温	110°C	常温	110°C
CaO/SiO <sub>2</sub> :CSH	モル比	1.8	1.7	0.9	0.9
H <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> :CSH	モル比	3.5	2.5	3.4	2.2

比較で見ると、8 年間の長期間暴露のデータもほぼこれらの下限式以上の値となっており、短期間のデータから導いた残存比の下限式は、長期間暴露の場合にも適用可能であることが示された。

これまでに、長期間にわたりセメント・コンクリートに高温加熱試験を実施した研究として依田の研究<sup>54)</sup>がある。この研究ではモルタルを対象として 10 年間 110°C の高温下に暴露している。長期暴露の問題は、高温による強度低下が長期的に継続するかどうかの評価である。著者の実験では、高温暴露後 1~1.5 年以降は、強度が低下しないことを示した。また、重量変化や CSH の分析（後述）からも、このことを裏付けている。依田の研究では、暴露材齢 7 年から 10 年の傾向をみると、強度が僅かではあるが低下していることを示している。しかし、10 年時点の強度残存率も殆どが 0.9 以上であり<sup>54)</sup>、低下が終息する傾向も認められるため、先に示した強度残存率の下限値（110°C では 0.7）は満足するものと推測される。

### (2) CSH の分析

CSH の分析は、配合 (1)、配合 (4) の常温と 110°C の条件のもの 4 種類について行い、結果を表-4 に示した。通常、普通コンクリートで C<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S の水和により生じる水和物では、CaO/SiO<sub>2</sub> モル比が比較的早期の材齢で 2.0 近くあり、徐々に低下していく事が言われている<sup>55)</sup>。分析結果は、常温下の試験体で 1.8、110°C に 8 年間暴露した試験体で 1.7 と、ほぼ同じ値を有している。この結果から、ゲルの CaO、SiO<sub>2</sub> の総量は 110°C 程度までの高温領域ではほとんど影響されず、化学的には安定しているものと推察された。

高炉スラグ微粉末を混入した配合 (4) は、硬化体の

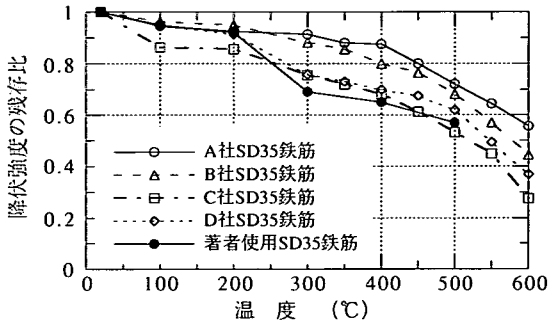


図-16 鉄筋の降伏強度の温度依存性

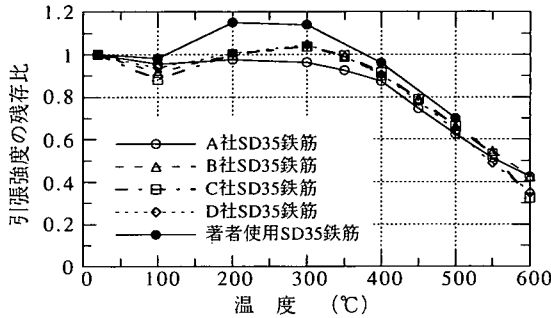


図-17 鉄筋の引張強度の温度依存性

組成が普通コンクリートと異なるので  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  モル比は常温で 0.9 と小さいが、8 年間 110°C に暴露したものと同じ値を示しており、この温度範囲による影響がないことが判断できる。

一方、 $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  モル比は、高炉スラグの混入の有無には関係ないが、常温よりも 110°C で暴露した供試体の方が 30% 程度小さく、高温により水分が逸散したことを示している。CSH の結合水量が高温によって常温とは変化したので、硬化体の質の変化を招いたことが推測される。高温下の圧縮強度が常温と比較してやや小さめになったことと対応するものと考えられる。ただし、水分の逸散は暴露材齢 1 年以降 8 年時点まで生じていないので、CSH ゲルはこの間で安定していたことが推察された。

## 7. 鉄筋の機械的・熱的性質の温度依存性

本研究では SD345 規格の D16 を用いている。ここでは、鉄筋の物性の温度依存性を、既往の研究結果および本研究での実験結果から評価した。

### (1) 降伏強度および引張強度

図-16 および図-17 には、D16 鉄筋から加工した試験片による、常温から 500°C までの温度における降伏強度と引張強度の残存比の試験結果<sup>59)</sup>を既往の実験データ<sup>57)</sup>

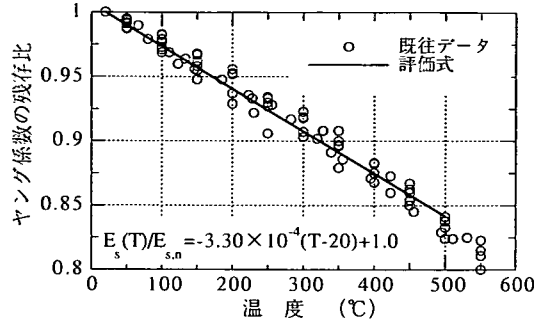


図-18 鉄筋のヤング係数の温度依存性

と併せて示した。既往の研究結果によれば、降伏強度と引張強度について、以下のような温度依存性のある事が明らかにされている<sup>57), 58)</sup>。

鉄筋の降伏強度は、一般的には温度上昇とともに単調に低下する。ただし、時効性鋼と非時効性鋼ではやや形状が異なり、時効性鋼では 200°C 付近でピークが現れることがあり、100°C よりも 200°C の方が降伏強度が大きくなる。時効性の小さい鋼では降伏強度のピークは現れない。

引張強度についても降伏強度と同じように、時効性鋼と非時効性鋼で温度依存性に差がある。一般的には、青熱脆性が生じる付近の温度 (200~300°C 付近) で常温下の引張強度を越える強度ピークをもち、それ以上の温度で急速に低下してゆく。ピーク強度は、非時効性鋼で常温引張強度の 100~110%、時効性鋼で 120% 程度である。

図に示すように、本実験に使用した鉄筋 (D16) の降伏強度、引張強度の温度依存性は、既往の研究結果が示す傾向と同じである事がわかる。ただし、製造メーカー、製造上の処理過程の相違でデータがかなりばらついているので、これらの結果から汎用的な定量評価式を示す事は出来なかった。

### (2) ヤング係数

ヤング係数については、既往の研究結果から低炭素鋼、軟鋼に関する実験データ<sup>59)</sup>を集めて整理し、温度依存性を評価した。図-18 は、20°C を基準にして各温度でのヤング係数の残存率を示したものである。データには殆どばらつきがなく、ヤング係数は 500~600°C までほぼ直線的ないしは緩やかな上に凸状に低下することが分かる。このため、500°C までの実験結果を直線帰帰し、ヤング係数の温度依存性を常温 (20°C) を基準にした残存率として以下のように評価した。ばらつきの小さい事を考慮すると、次式は鉄筋のヤング係数の温度依存性評価式として、一般的に使用しても実用上の問題はないものと考えられる。



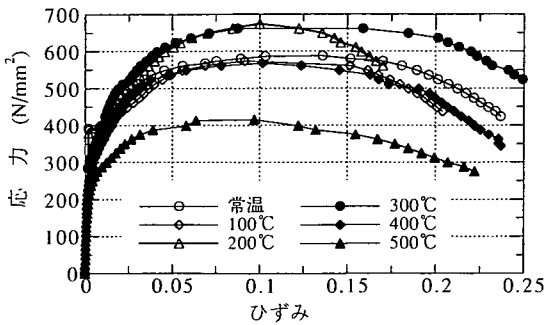


図-19 高温下における鉄筋の応力-ひずみ曲線

$$\frac{E_s(T)}{E_{s,n}} = -3.30 \times 10^{-4}(T-20) + 1.0 \quad \text{常温} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \quad (2)$$

ここで、 $E_{s,n}$ 、 $E_s(T)$ ；常温および温度  $T$  におけるヤング係数

### (3) 応力ひずみ関係

鉄筋の降伏強度、引張強度およびヤング係数が温度依存性を示す事から容易に推測されるように、鉄筋の応力-ひずみ関係も温度によりかなり異なる<sup>56)</sup>。図-19には、本実験に用いた SD345 規格の DI6 鉄筋の応力-ひずみ関係を示した。図から分かるように、応力-ひずみ関係の高温下の特徴は、昇温に伴って降伏強度が低下すること、300°C以上で降伏棚が消滅すること、200°C程度まで引張強度が増加すること、および200°C付近で伸びがやや小さくなること等である。

鉄筋降伏以降の鉄筋コンクリートの大変形域の耐力・変形を精度よく評価するには、塑性変形域の応力-ひずみ関係が必要になる。応力-ひずみ関係についても、降伏強度、引張強度と同じように定性的な特徴を把握できたが、温度依存性を考慮した汎用評価式を導く事は出来なかった。

### (4) 熱膨張係数

図-20には、本実験に用いた鉄筋の熱膨張係数の実験結果と、既往の各種炭素鋼の熱膨張係数のデータ<sup>60)</sup>を示した。ここで熱膨張係数は、常温下から各温度までの鉄筋の伸びひずみを温度変化量で除した平均的な値を採っている。炭素鋼毎にデータにはばらつきが認められるが、それぞれの熱膨張係数は温度の上昇とともにほぼ直線的に増加している。温度に対する熱膨張係数の平均的な増加割合はほぼ一定である。常温での鉄筋の熱膨張係数が既知であれば、上記の温度に対する増加割合を用いて、任意温度の熱膨張係数を以下の式により評価できる。

$$\alpha_s(T) = \alpha_{s,T0} + \{6.25 \times 10^{-3}(T-T_0)\} \times 10^{-6} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad \text{常温} \leq T \leq 500^\circ\text{C} \quad (3)$$

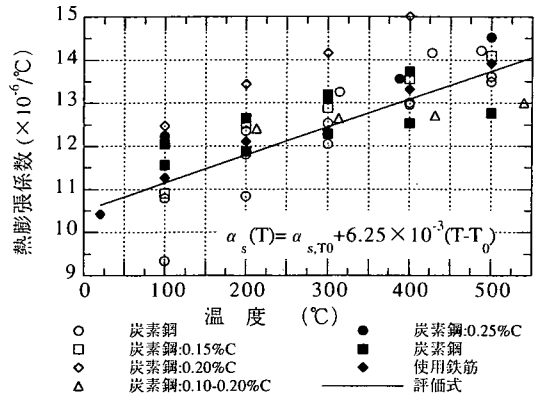


図-20 鉄筋の熱膨張係数の温度依存性

ここで、 $\alpha_s(T)$ ；温度  $T$  における鉄筋の熱膨張係数  
 $\alpha_{s,T0}$ ；温度  $T_0$  における鉄筋の熱膨張係数  
 本研究では、 $\alpha_{s,T0}$  は  $10.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  とした。

## 8. まとめ

本論文では、コンクリートおよび鉄筋の高温下での基本的な物理的性質の温度依存性を明らかにした。得られた結果を示せば以下の通りである。

### (1) コンクリートの強度、ヤング係数の温度依存性

既往研究のデータに基づいて強度およびヤング係数の温度依存性を把握するとともに、任意温度条件での残存率（常温下の値に対する比率）の下限値を明らかにした。これによれば、コンクリートの強度およびヤング係数は、温度上昇にともなって低下する傾向にある。圧縮強度、引張強度および付着強度の残存率の下限値は、100°C以上200°Cまでの温度領域では0.7、200°Cを越える領域では、200°Cで0.7、600°Cで零となる直線により表される。また、ヤング係数の残存率の下限値は、20°Cで0.7、500°Cで零となる直線により表される。ただし、高炉セメントを使用し、養生材齢が4週程度と比較的短い場合、およびアルミナセメントを用いた場合には、残存率の下限値を下回る場合が多い。

### (2) コンクリートの圧縮ひずみ能力の温度依存性

コンクリートの最大圧縮応力時のひずみ値は、温度上昇にともなって直線的に増加し、500°Cでは常温下の約2.2倍の値となる。既往の研究成果と併せて考えると、終局ひずみも同じような温度依存性を有していると推察される。

### (3) 圧縮応力が高温下のコンクリートの圧縮強度、弾性的性質に与える影響

高温下では、圧縮応力が作用することにより、無応力の場合より圧縮強度の低下がやや小さくなる傾向があるが、実質的には温度のみに影響を受けると考えてよい。一方、温度・応力履歴を受けた後のヤング係数は、温度上昇に伴って低下はするが、圧縮応力が作用する場合には無応力の場合よりも残存比は大きくなる。その割合は、温度が高く、圧縮応力度が大きいほど大きくなる。これは、骨材とセメントペースト間の微細ひびわれの発生が、圧縮応力により抑制されるためと推察された。また、温度・応力履歴を受けた後のヤング係数を評価する式を提案した。

### (4) 高温環境下への長期間暴露の影響

65℃、85℃および110℃間での高温条件で8年間の暴露試験を行い、強度、水分状態、硬化体の状態を検討した結果、圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数は暴露材齢1~1.5年以降8年まで変化せず、高温に起因するこれらの経時的な低下はほぼ終息しているものと判断された。また、これらの残存率は、(1)で結論した温度依存性の下限値を満足することを確認した。ただし、高炉セメント混入コンクリートの一部において、ヤング係数がこの下限値を満足しない場合があった。

### (5) 鉄筋の降伏・引張強度と応力-ひずみ関係

鉄筋の降伏強度は、一般に温度上昇とともに単調に減少する。引張強度は、青熱脆性付近温度で最も大きくなるが、その後低下する。両強度とも時効性鋼と非時効性鋼で挙動が異なる。また、応力-ひずみ関係では、昇温に伴って降伏強度が低下する、300℃以上で降伏棚が消滅する、200℃程度で引張強度が最大となる等の特徴がある。したがって、大変形域の鉄筋コンクリートの変形を精度よく評価するには、この特徴を考慮する必要がある。降伏・引張強度、応力-ひずみ関係ともに鉄筋ごとに特徴があり、汎用的な評価式を得ることはできない。

### (6) 鉄筋のヤング係数

低炭素鋼、軟鋼に関する既往の研究結果に基づいて、常温から500℃の温度範囲における鉄筋のヤング係数の温度依存性を評価する式を提案した。評価式は、温度上昇に伴ってヤング係数が直線的に低下する性状を示す1次式で表わされる。

### (7) 鉄筋の熱膨張係数

本実験結果と既往の各種炭素鋼の熱膨張係数のデータに基づいて、常温から500℃の温度範囲における熱膨張係数の温度依存性を評価する式を提示した。評価式は、

熱膨張係数が温度の上昇とともにほぼ直線的に増加する性状を示す1次式で表わされる。

### 参考文献

- 1) 金津努：鉄筋とコンクリートの熱膨張係数差に起因する内部応力の評価，土木学会論文集，No.585/V-38，pp.113-125，1998年2月。
- 2) 野尻陽一，田沢雄二郎，山下茂：高温時におけるコンクリートの力学的性質に関する実験—海水淡水化装置用コンクリート躯体の開発研究，セメント・コンクリート，No.307，pp.345-351，1972年9月。
- 3) 磯康彦，宮坂駿一：蛇紋岩を用いた中性子遮蔽用耐熱コンクリートの研究，セメント・コンクリート，No.276，pp.18-25，1970年2月。
- 4) 長瀧重義，長藤哲夫，長崎守男：セメント・コンクリートの耐熱性向上へのアプローチ，セメント・コンクリート，No.813，pp.2-8，1978年3月。
- 5) 古村福次郎：コンクリートの高温加熱中における応力歪曲線について，日本建築学会年次大会概要集，pp.293-294，1968年10月。
- 6) 安藤淳平，平岡源造：7ルミセメントの耐大性，コンクリート・ジャーナル，Vol.6，No.12，pp.25-30，1968年。
- 7) 木村恵雄：コンクリートの耐熱強さと熱せられたコンクリートの再水和について，セメント技術年報，No.5，pp.372-378，1951年。
- 8) 木村恵雄：石灰岩コンクリートの耐熱強さについて，セメント・コンクリート，No.49，pp.28-33，1951年3月。
- 9) 原田有：高熱をうけたコンクリートの強度と弾性的変化，日本建築学会論文報告集，No.47，pp.11-18，1953年10月；No.48，pp.1-9，1954年3月；No.56，pp.1-7，1957年6月。
- 10) 原田有：骨材の岩質を異にするコンクリートの耐火性について，セメント技術年報，No.12，pp.311-317，1958年。
- 11) 川瀬清孝，赤石博：高温下（80℃～250℃）におけるコンクリートの強度性状について，日本建築学会年次大会概要集，pp.477-478，1977年10月；pp.463-464，1978年9月；pp.113-114，1980年9月；pp.75-76，1981年9月。
- 12) 原田有：高熱を受けた軽石（浅間産）コンクリートの強度と弾性的変化，日本建築学会論文報告集，No.63，pp.181-184，1959年10月。
- 13) 原田有，五十嵐泉：加熱されたコンクリートの強度と弾性的変化，日本建築学会年次大会概要集，pp.49-50，1975年10月。
- 14) 岩沢二郎，嵩英雄，佐久田昌二，佐藤忠博：高温にさらされた蛇紋岩コンクリートの諸性質，日本建築学会年次大会概要集，pp.461-462，1977年10月。
- 15) 奥山治也，奥野亨，佐藤忠博，嵩英雄：コンクリートの耐熱性に及ぼす骨材の影響に関する研究，日本建築学会年次大会概要集その1，pp.217-218，その2，pp.219-220，1973年10月。
- 16) 嵩英雄，岸谷孝二，奥野亨：高温にさらされたコンクリートの性状の変化に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1，pp.25-28，1979年。
- 17) 山根昭，嵩英雄：石灰岩コンクリートの強度・弾性に及ぼす100～400℃の高温加熱の影響について，日本建築学会年次大

- 会概要集, pp.159-160, 1971年11月.
- 18) 山崎敏敏, 柿崎忠義, 阿部保彦, 依田彰彦: 長期間熱を受けるコンクリートの諸性質に関する研究, 鹿島建設技術研究所年報, 第24号, pp.213-218, 1976年.
  - 19) 植松邦彦, 山村勤: 高速増殖炉における遮蔽コンクリートの実験研究, コンクリートジャーナル, Vol.12, pp.58-67, 1974年6月.
  - 20) 山根昭, 嵩英雄, 谷出直義: 高温加熱されたコンクリートの諸性質に関する研究, 竹中工務店技術研究所報告, 第5号, pp.101-106, 1970年12月.
  - 21) 高橋久雄, 川口徹: 高温(175°C)を受けたコンクリートの強度性状, 第10回セメント・コンクリート研究討論会概要集, pp.33-38, 1983年.
  - 22) 川瀬清孝, 中野正雪: 高温下(80~250°C)におけるコンクリートの強度性状について, 第10回セメント・コンクリート研究討論会概要集, pp.39-44, 1983年.
  - 23) 立川博之, 竹田仁一: 40°C~80°Cで長期間養生されたコンクリートの強度的性質, コンクリートジャーナル, Vol.9 No.9, pp.10-19, 1971年9月.
  - 24) 大和竹史, 坂田義明: 高温にさらされるコンクリートの強度変化について, セメント技術年報, No.26, pp.341-344, 1972年.
  - 25) 原田有, 五十嵐泉: 加熱された各種コンクリートの強度と弾性的変化, セメント技術年報, No.28, pp.283-285, 1974年.
  - 26) 原田有, 五十嵐泉: 加熱された各種骨材コンクリートの強度性状, セメント技術年報, No.30, pp.230-233, 1976年.
  - 27) 原田有, 五十嵐泉: 加熱された高炉セメント(C種)コンクリートの強度性状について, 日本建築学会年次大会概要集, pp.431-432, 1976年10月.
  - 28) 木村恵雄: コンクリートの耐熱強度に及ぼす加熱材令の影響, セメント技術年報, No.5, pp.336-340, 1951年.
  - 29) 中沢好夫, 松岡進, 高野好弘, 中村卓史: 110°C~250°Cの高温で連続加熱したコンクリートの力学的性質, コンクリート工学講演会論文集, Vol.6, pp.289-292, 1984年.
  - 30) 長瀬公一, 服部高重, 山本康弘, 外村憲太郎: コンクリートの高温加熱実験 その1 圧縮および割裂試験, 日本建築学会年次大会概要集, pp.199-200, 1984年9月.
  - 31) 服部高重, 長瀬公一, 山本康弘, 外村憲太郎: コンクリートの高温加熱実験 その2 引き抜き付着試験, 日本建築学会年次大会概要集, pp.201-202, 1984年9月.
  - 32) 岸谷孝一, 嵩英雄: 高温にさらされたコンクリートの性状の変化に関する研究(セメントおよび調合の影響について), 日本建築学会年次大会概要集, pp.267-268, 1980年9月.
  - 33) 金津努, 青柳征夫, 中野毅弘, 遠藤達巳, 栗山武雄: 100°Cを超える高温下におけるコンクリートの強度性状—その2 熱間および加熱後の強度変形性状—, 電力中央研究所報告研究報告, No.384022, 1985年1月.
  - 34) 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特性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, Vol.9-1, pp.13-18, 1987年.
  - 35) 丸田誠, 山崎敏敏: 長期間高温加熱を受けたコンクリート部材の強度性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11-1, pp.523-528, 1989年.
  - 36) 桜本文敏, 山崎敏敏, 丸田誠: 長期間加熱を受けた大型コンクリート部材の強度性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12-1, pp.203-208, 1990年.
  - 37) 横室隆, 依田彰彦: 熱を受けたコンクリートと鉄筋との付着強度, 圧縮強度, ヤング係数, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9-1, pp.169-174, 1987年.
  - 38) 谷出直義, 嵩英雄, 山根昭: 高温加熱されたコンクリートの諸性質に関する研究 第2報, 日本建築学会年次大会概要集, pp.163-164, 1971年11月.
  - 39) 古村福次郎: 高温度におけるコンクリートの力学的性質に関する研究(その1~その3), 日本建築学会論文報告集, No.172, pp.11-18, 1970年6月; No.173, pp.17-24, 1970年7月; No.174, pp.1-7, 1970年8月.
  - 40) 木村恵雄: 加熱されたコンクリートの各種強度, 弾性係数の低下および回復について, セメント技術年報, No. 14, pp.401-407, 1960年.
  - 41) 久保慶三郎: 付着強度と加熱温度との関係, 土木技術, 第5巻, 第7号, pp.6-10, 1950年7月.
  - 42) Morley, P.D. and Royles, R.: The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete, Fire Safety Journal, Vol.2, No.4, July 1980.
  - 43) Morley, P.D. and Royles, R.: Response of the bond in reinforced concrete to high temperatures, Magazine of Concrete Research, vol.35, No.123, pp.67-74, June 1983.
  - 44) Morley, P.D. and Royles, R.: Further response of the bond in reinforced concrete to high temperatures, Magazine of Concrete Research, vol.35, pp.157-163, No.124, pp.157-163, September 1983.
  - 45) Hertz, K.: The Anchorage capacity of reinforced bars at normal and high temperatures, Magazine of Concrete Research, vol.34, No.121, pp.213-219, December 1982.
  - 46) 原田有, 古村福次郎: コンクリートの高温加熱中における力学的性質に関する研究, セメント技術年報, No.23, pp.284-288, 1969年.
  - 47) 森永繁, 山崎庸行, 林章二訳: シュナイター コンクリートの熱的性質, pp.17-20, 技報堂, 1983年.
  - 48) 原田有: 建築耐火構法, pp.47-61, 工業調査会, 1973年.
  - 49) 金津努, 松村卓郎, 西内達雄: 高温下に長期間暴露したコンクリートの力学的性質の変化, 電力中央研究所研究報告, No.U95037, pp.13-14, 1996年3月.
  - 50) 山田順治, 中山紀男: 引張クランプを起こしたコンクリートの圧縮強度, セメント・コンクリート, No.187, pp.19-22, 1962年9月.
  - 51) Malhotra, H.L.: The effect of temperature on the compressive strength of concrete, Magazine of Concrete Research, pp.85-94, August 1956.

- 52) 神山一：持続圧縮力を与えたコンクリートの直接引張りに対する性質，セメント・コンクリート，No.211，pp.24-26，1964年9月。
- 53) 金津努，石田博彰，遠藤達巳：軸圧縮力の影響を考慮した高温下のRCはり部材の変形評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9-2，pp.229-234，1987年。
- 54) 依田彰彦：10年間110℃の熱を受けたモルタルの強度および重量変化，セメント技術年報，No.37，pp.370-373，1983年5月。
- 55) 小林一輔編集，鈴木一孝，野尻陽一，松岡康訓：コンクリートの組織構造の診断，pp.51-54，森北出版，1993年。
- 56) 金津努：100℃を越える高温下におけるコンクリートの強度性状－圧縮強度特性と鉄筋の機械的性質－，電力中央研究所報告研究報告，No.383027，pp.13-18，1984年1月。
- 57) 日本鋼構造協会技術委員会：鉄筋コンクリート用棒鋼およびPC棒鋼・鋼線の高熱時ならびに加熱後の機械的性質，JSSC，VOL.5 No.45，pp.8-9，1969年。
- 58) 日本鋼構造協会技術委員会：構造用鋼材の高熱時ならびに加熱後の機械的性質，JSSC，VOL.4 No.33，pp.39-44，1968年。
- 59) 日本機械学会：金属材料の弾性係数，pp.74-75，明善印刷，1980年10月。
- 60) 電力中央研究所 狛江研究所 内部資料：鋼材の熱膨張ひずみデータ（未発表）。

(2000.10.17 受付)

## A STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETE AND REINFORCEMENT AT ELEVATED TEMPERATURES

Tsutomu KANAZU

Reinforced concrete structures such as a containment vessel, a support structure of the reactor, piping systems and facilities for storing high level radioactive waste in a nuclear power plant are exposed to a high temperature condition. Changes of physical properties of concrete and reinforcement caused by high temperature influence on mechanical behavior of these structures and internal stresses are induced by difference of thermal coefficients between concrete and reinforcement that was reported in the previous paper by the author. These are the special features in high temperature conditions. Temperature dependence of physical properties of concrete and reinforcement are summarized in the paper based on the experimental results