

# 論文 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究

河辺 伸二<sup>\*1</sup>・一瀬 賢一<sup>\*2</sup>・川口 徹<sup>\*3</sup>・長尾 覚博<sup>\*4</sup>

要旨：火災を受けた超高層RC造の安全性を評価するための基礎データとして、高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性(圧縮強度,曲げ強度,引張強度)に関する実験を行ない,以下のことがわかった。(1)水セメント比25~50%のコンクリートの圧縮強度は,200以上では加熱温度が高くなるほど低下し,加熱温度600では常温強度の30~45%になる。(2)コンクリートの曲げ強度,引張強度も加熱温度が高くなるほど低下し,低下する割合は圧縮強度よりも大きい。(3)常温時の各種強度,ヤング係数に基づき,加熱後の各種強度,ヤング係数を概ね推定できる。

キーワード：高強度コンクリート,高温加熱,強度特性,強度推定,ヤング係数

## 1. はじめに

近年設計基準強度(以下 $F_c$ とする)60N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造(以下RC造)が多数設計・施工されてきている。RC造は,通常耐火構造として認められているが,高強度コンクリートを使用する場合,火災時の爆裂による耐力低下が懸念され,解析的検討を必要とする場合が生じる。このため高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質の把握は,解析精度を向上させる上できわめて重要である。しかし,高温加熱を受けた高強度コンクリートのデータは,この数年間で研究報告が増えてはいるものの,まだ十分とは言えない<sup>1)~3)</sup>。また圧縮強度以外の力学的性質については,ほとんど報告されていない。

そこで本研究では,火災を受けた超高層RC構造物の安全性を評価するための基礎データとして,高温加熱を受けた高強度コンクリートの各種の強度特性(圧縮強度,曲げ強度,引張強度),ヤング係数等を測定し,考察・検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験条件

実験条件は,表-1に示す水セメント比(W/C)4水準,加熱温度(20を含む)7水準とした。

### 2.2 使用材料と調合

使用材料は,普通ポルトランドセメント,細骨材に木更津産陸砂(密度:2.60g/cm<sup>3</sup>),粗骨材として青梅産砕石(硬質砂岩,密度:2.65g/cm<sup>3</sup>)を使用した。骨材の品質を表-2に示す。高温加熱を受けるコンクリートの強度に及ぼす骨材の影響は無視できないが, $F_c$ 100N/mm<sup>2</sup>級まで十分適用できる骨材を使用した。混和剤は,W/C=50%に対してオキシカルボン酸塩を主成分とするAE減水剤,W/C=25~40%に対してポリカルボン酸系高分子化合物を主成分とする高性能AE減水剤を使用した。

調合条件は,目標スランプをW/C=50%では21±2.5cm,W/C=25~40%については,目標スラ

表-1 実験条件

項目	摘要	水準数
水セメント比	25%, 30%, 40%, 50%	4
加熱温度	20 (常温), 100, 200, 300, 400, 500, 600	7

\*1 名古屋工業大学大学院助教授 工学研究科 工博(正会員)

\*2 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 主任研究員 工博(正会員)

\*3 同 室長 工博(正会員) \*4 同 プロジェクト部 主席研究員 工博(正会員)

ンプフロー値を  $55 \pm 10\text{cm}$  とした。目標空気量は、 $W/C=50\%$  では  $4.0 \pm 1.0\%$  ,  $W/C=25 \sim 40\%$  では  $2.5 \pm 1.0\%$  とした。各コンクリートの調合を表 - 3 に示す。

### 2.3 測定項目と測定方法

測定項目は、フレッシュ性状、外観観察、動弾性係数、各種の強度特性(圧縮、引張、曲げ)およびヤング係数等とした。各測定は、各JISに準じて実施した。また外観観察は、目視により行った。供試体は、圧縮強度用および引張強度用には  $100 \times 200\text{mm}$  , 曲げ強度用には  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  を用いた。供試体の本数は、各実験条件に対して3体とした。

### 2.4 コンクリートの打設と養生

コンクリートは、容量  $100 \ell$  強制練りミキサを使用し、各調合について  $80 \ell \times 3$  バッチずつ混練した。打設後は、 $20 \pm 3$  ,  $80 \pm 5\%R.H.$  の恒温恒湿室内で湿潤養生とし、翌日封かん養生とした後、材齢56日まで  $20 \pm 3$  ,  $60 \pm 5\%R.H.$  の恒温恒湿室内にて養生した。

なおコンクリートのフレッシュ性状は、表 - 4 に示すように概ね目標のスランプ、スランプフロー、空気量を有するコンクリートを得ることができた。

### 2.5 加熱方法

加熱は、プログラム調節器付き電気炉を使用した。加熱時の供試体は、加熱中に水分逸散を認めるアンシール状態とした。加熱実験は、材齢56日から実施した。加熱速度は、既往の加熱後載荷試験<sup>1)~3)</sup>(以下冷間試験)を参考とし、供試体の内外温度差と供試体内の温度分布の不均一を小さくし、熱応力の影響を小さくするため  $100 / \text{hr}$  とした。加熱パターンを図 - 1 に示す。計画加熱温度到達後は、供試体内部温度が均一となるように計画加熱温度を24時間保持させた。降温は、炉内のファンを作動させながら自然冷却とした。炉内の雰囲気温度が50以下になるまで供試体を炉内に放置した。各強度試験は、降温から5~12時間後、常温下で行った。

表 - 2 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率	吸水率 (%)
S	木更津産陸砂	2.60	2.82	1.53
G	青梅産碎石	2.65	6.80	0.81

表 - 3 コンクリートの調合

W/C (%)	記号	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤対セメント(%)
		W	C	S	G	
25	N-25	170	680	683	863	C × 2.0%
30	N-30	170	567	729	914	C × 1.4%
40	N-40	170	427	780	975	C × 1.0%
50	N-50	170	341	838	961	C × 0.25%*

\* : AE減水剤使用。他は、高性能AE減水剤使用

表 - 4 フレッシュ性状

記号	スランプ (cm)	スランプフロー (cm × cm)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)	温度 ( )
N-25		63.0 × 58.0	2411	1.6	25.0
N-30		59.0 × 58.0	2397	2.4	24.0
N-40		54.0 × 54.5	2338	3.4	23.0
N-50	20.5		2332	4.3	22.5

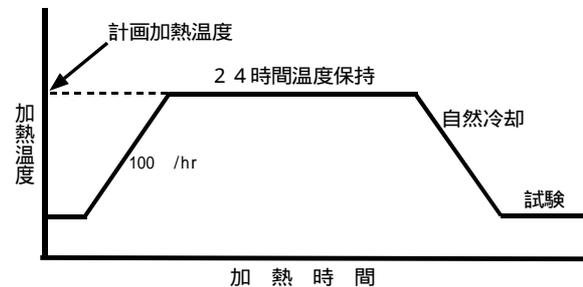


図 - 1 加熱パターン

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 外観観察

加熱後の供試体は、1体も爆裂を生じなかった。加熱温度300までは外観上の変化はほとんど認められなかった。しかし加熱温度400以上では供試体表面にひび割れが目立ちはじめ、加熱温度600では供試体の全面にわたり亀甲状のひび割れを確認した。また加熱温度が高いほどひび割れ幅も大きくなり、加熱温度600では0.2mmを超えるものも多数発生した。水セメント比の違いによる影響は、本実験の範

囲では認められなかった。

### 3.2 圧縮強度

加熱温度と圧縮強度の関係を図 - 2 に示す。加熱温度 100 , 200 では、水セメント比の小さいものほど常温よりも高い圧縮強度を示した。加熱温度 300 では常温時と同程度または若干低い強度を示し、300 を超えると強度低下を示した。また各加熱温度においても水セメント比の小さいほうが高い圧縮強度を示した。

各加熱温度におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図 - 3 に示す。常温だけでなく、各加熱温度を受けたコンクリートにおいてもセメント水比と圧縮強度は線形関係にあることがわかる。これは、文献4)とは加熱開始材齢が異なる(28日と56日)ものの同様の関係を示した。

加熱温度と圧縮強度残存比の関係を図 - 4 に示す。(ここで圧縮強度残存比は、常温時の強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比として表す。以下同様に、各残存比は常温時の値に対する比で表す。) 圧縮強度残存比は、加熱温度 100 , 200 では、1.0 ~ 1.2 を確保した。加熱温度 200 以上では、加熱温度の上昇に伴い低下した。高強度コンクリートは、普通強度のコンクリートと同等以上の圧縮強度残存比を残し、600 加熱後でも常温時の 30 ~ 45% の圧縮強度を残存できることがわかった。

また高温加熱後のコンクリートの圧縮強度は、図 - 3 と図 - 4 の関係を使って、以下に示す式(1)として表すことができる。

$$c(\ ) = c(20) \times r_{c(\ )} \quad (1)$$

$$c(20) = -24.7 + 29.2 \times (C/W) \quad (2)$$

$$r_{c(\ )} = 1.02 + 4.52 \times 10^{-4} \times C - 2.65 \times 10^{-6} \times C^2 \quad (3)$$

$c(\ )$ : 加熱後の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$c(20)$ : 20 における圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$r_{c(\ )}$ : 加熱後の圧縮強度残存比

この結果、実験式ではあるが、20 における圧縮強度( $c(20)$ )または水セメント比が既知であれば、加熱後の圧縮強度を概ね推定可能である。

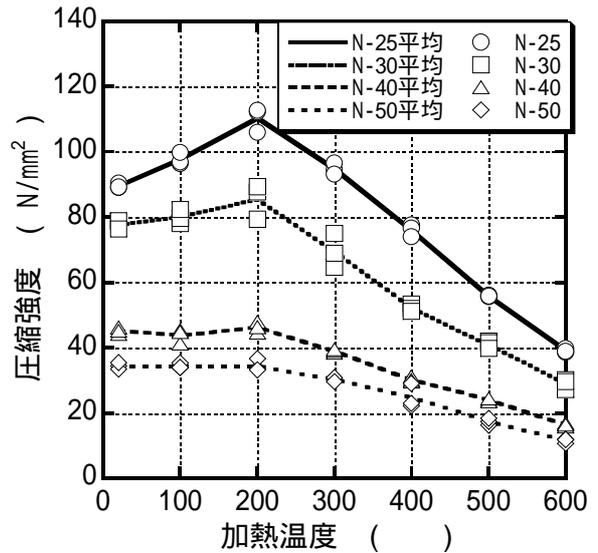


図 - 2 加熱温度と圧縮強度

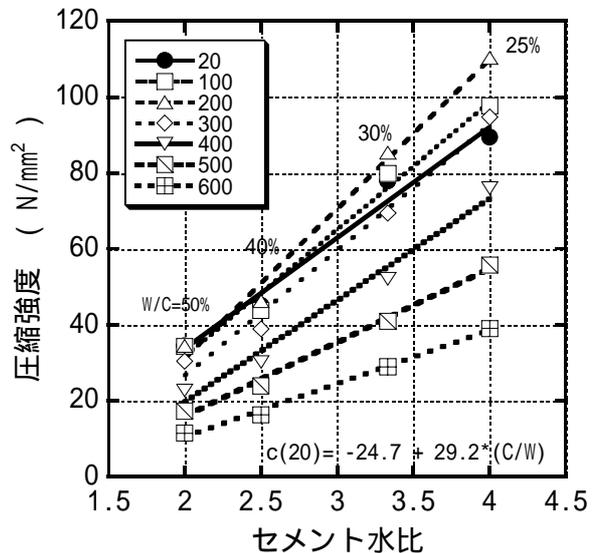


図 - 3 セメント水比と圧縮強度

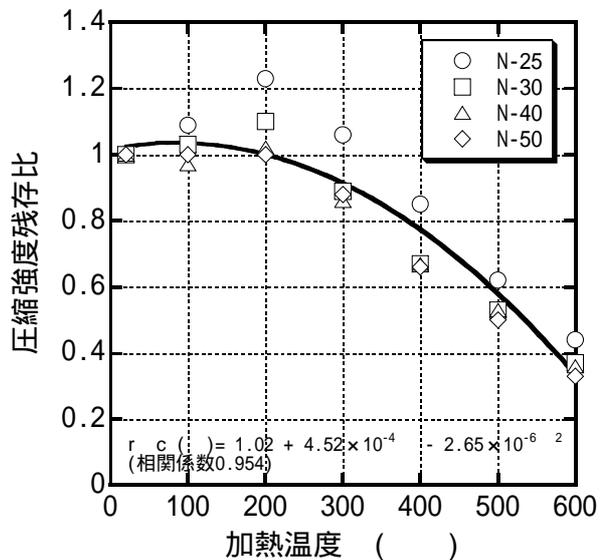


図 - 4 加熱温度と圧縮強度残存比

### 3.3 曲げ強度

加熱温度と曲げ強度の関係を図 - 5 に示す。曲げ強度は、加熱温度 100 において高強度コンクリート (N-25 供試体, N-30 供試体) の場合は低下し、普通強度のコンクリート (N-40 供試体, N-50 供試体) の場合は若干上昇し、挙動が大きく異なった。この原因は、本実験のみでは判断できないが、加熱による (1) コンクリート中の水分移動による不均一化, (2) 水和の進行による強度増加, また (3) 供試体の乾燥による微細ひび割れの発生などの影響が複雑に絡み合ったためによるものと推察する。加熱温度 600 では、圧縮強度の結果と同様、水セメント比の小さいものほど高い曲げ強度を残し、常温時の 15 ~ 30% の曲げ強度を残存することがわかった。

加熱温度と曲げ強度残存比の関係を図 - 6 に示す。また加熱温度と曲げ強度残存比の関係から、加熱後の曲げ強度は、以下に示す式として表すことができる。この結果から 20 における曲げ強度 (  $b(20)$  ) が既知であれば、高温加熱後の曲げ強度を概ね推定できる。

$$b(\ ) = b(20) \times r_b(\ ) \quad (4)$$

$$r_b(\ ) = 1.00 - 8.21 \times 10^{-7} \times \text{加熱温度} - 2.10 \times 10^{-6} \times \text{加熱温度}^2 \quad (5)$$

$b(\ )$ : 加熱後の曲げ強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$r_b(\ )$ : 加熱後の曲げ強度残存比

### 3.4 引張強度

加熱温度と引張強度の関係を図 - 7 に示す。引張強度も水セメント比の小さいものほど高い強度を示し、加熱温度の上昇に伴って低下することがわかった。また加熱温度 600 でも常温時の 25 ~ 35% の引張強度を残した。

加熱温度と引張強度残存比の関係を図 - 8 に示す。曲げ強度と同様に、加熱温度と引張強度残存比の関係から、加熱後の引張強度は、以下のように表すことができる。この結果から 20 における引張強度 (  $t(20)$  ) が既知であれば、高温加熱後の引張強度を概ね推定できる。

$$t(\ ) = t(20) \times r_t(\ ) \quad (6)$$

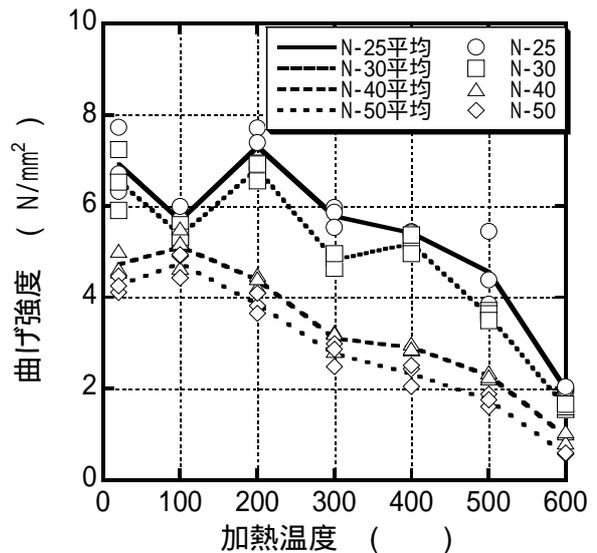


図 - 5 加熱温度と曲げ強度

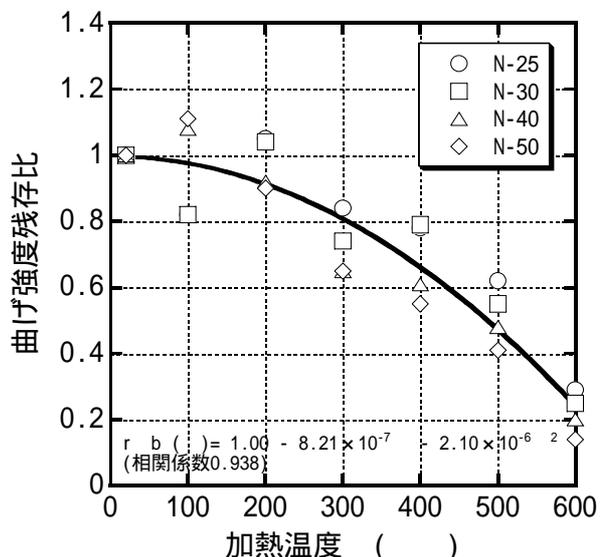


図 - 6 加熱温度と曲げ強度残存比

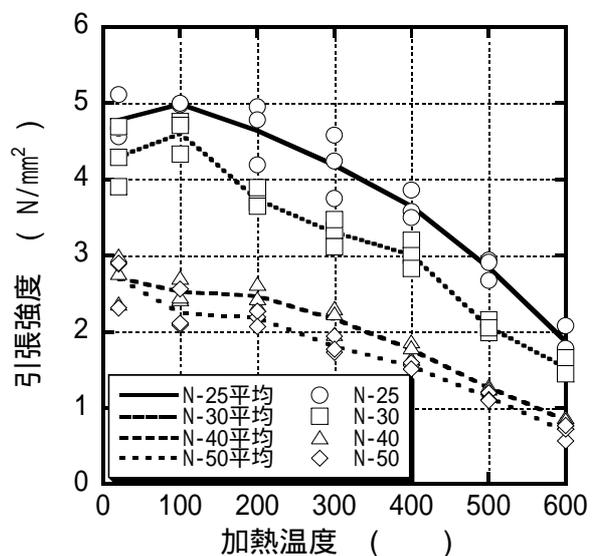


図 - 7 加熱温度と引張強度

$$r_t(t) = 1.01 - 3.48 \times 10^{-4} t - 1.33 \times 10^{-6} t^2 \quad (7)$$

$t$  ( ): 加熱後の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$r_t(t)$  : 加熱後の引張強度残存比  
3.5 ヤング係数

加熱温度とヤング係数, 加熱温度とヤング係数残存比の関係をそれぞれ図 - 9, 図 - 10 に示す。ヤング係数残存比は, 加熱温度に対し直線的に低下し, 水セメント比の小さい方が若干大きい傾向を示した。また 600 加熱後は, 水セメント比に関係なく常温時の10%まで低下した。加熱温度とヤング係数残存比の関係も以下のように表すことができ, 20 におけるヤング係数 (E(20)) がわかれば, 各加熱温度におけるヤング係数も概ね推定できる。

$$E(t) = E(20) \times rE(t) \quad (8)$$

$$rE(t) = 1.05 - 2.57 \times 10^{-3} t + 1.60 \times 10^{-6} t^2 \quad (9)$$

$E(t)$  : 加熱後のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$rE(t)$  : 加熱後の引張強度残存比

#### 4. 実験結果の評価

加熱後のコンクリートの圧縮強度 ( $c$ ) と曲げ強度 ( $b$ ), 圧縮強度と引張強度 ( $t$ ) との関係をそれぞれ図 - 11, 図 - 12 に示す。普通強度のコンクリートの圧縮強度に対する曲げ強度の比は 1/5 ~ 1/8, 引張強度の比は 1/10 ~ 1/13 と言われているが, 加熱後のそれぞれの強度比は, 更に小さいことがわかる。また ACI 式<sup>5)</sup>と比較しても実験値は小さい。これは, 加熱後の圧縮強度に比べ, 加熱後の曲げ強度, 引張強度の残存比が小さいことによる。圧縮強度と曲げ強度および引張強度との実験式は, 以下のように表せる。

$$b = 0.108 + 0.0596 c \quad (10)$$

$$t = 0.476 + 0.0435 c \quad (11)$$

加熱後においても各強度間の相関性があり, 圧縮強度から曲げ強度, 圧縮強度から引張強度を概ね推定できる。

加熱温度と各種強度残存比との相関性は, 図

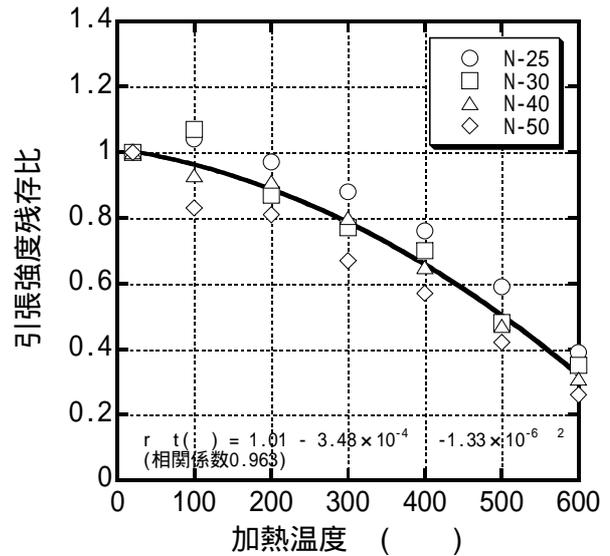


図 - 8 加熱温度と引張強度残存比

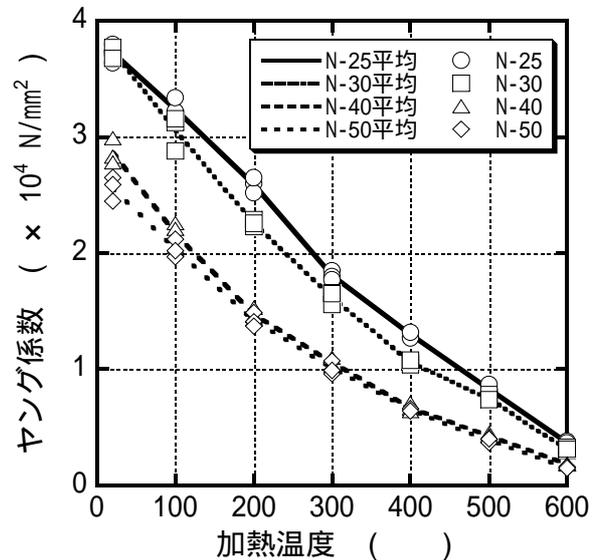


図 - 9 加熱温度とヤング係数

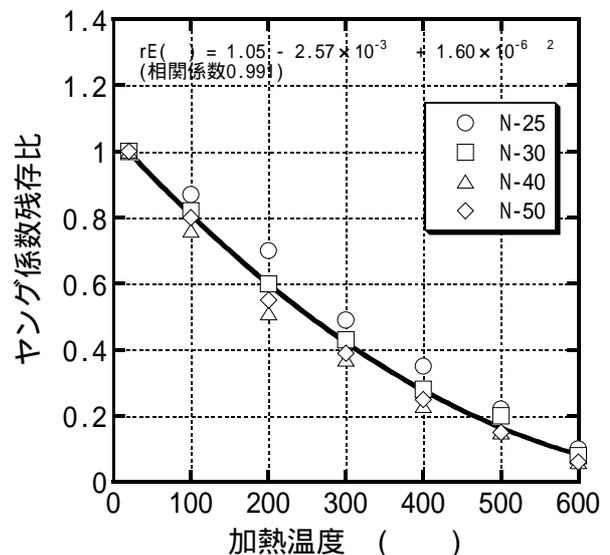


図 - 10 加熱温度とヤング係数残存比

- 4, 図 - 6 および図 - 8 に示すように高い。この常温時の各種強度を測定すれば,特に加熱試験を行わなくても加熱後の各種強度を概ね推定できる。また図 - 11, 図 - 12 の関係を併せると,常温時の圧縮強度から加熱後の曲げ強度, 引張強度の推定が可能である。

ヤング係数についても図 - 10 の関係を使用することにより,常温時のヤング係数から加熱後のヤング係数の推定が可能である。

### 5. まとめ

高温加熱を受けた高強度コンクリートの実験の結果, 以下のことがわかった。

- (1) 高温加熱を受けた水セメント比25~50%のコンクリートの圧縮強度は, 200 以上では加熱温度が高くなるほど低下し, 加熱温度 600 では常温強度の 30 ~ 45% になる。
- (2) 高温加熱を受けたコンクリートの曲げ強度, 引張強度も圧縮強度と同じように温度が高くなるほど低下する。低下する割合は, 圧縮強度の場合より大きい傾向が認められる。
- (3) 高温加熱を受けたコンクリートのヤング係数は, 加熱温度が高くなるほど低下する。600 加熱後では, 常温時の10%まで低下する。
- (4) 常温時の各種強度(圧縮強度, 曲げ強度, 引張強度), ヤング係数を測定すれば, 加熱後の各種強度, ヤング係数を推定できる。また常温時の圧縮強度から加熱後の曲げ強度, 引張強度の推定が可能である。

### 参考文献

- 1) 一瀬賢一, 長尾覚博: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第541号, p.23-30, 2001.3
- 2) 安部武雄ほか: 高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, p.163-168, 1999.1

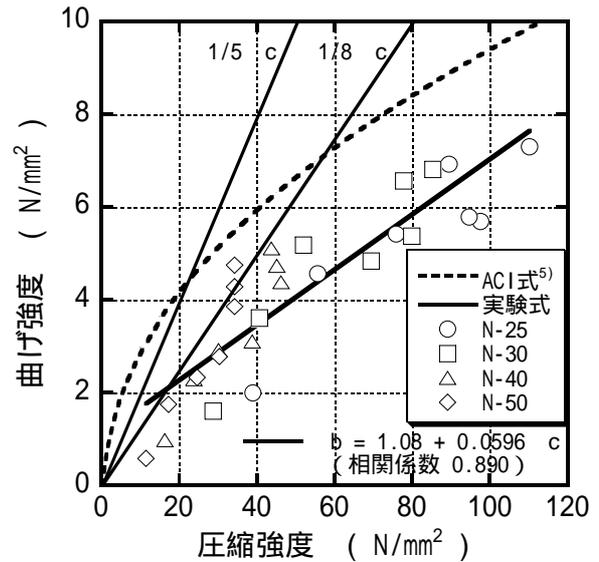


図 - 11 高温加熱後の圧縮強度と曲げ強度

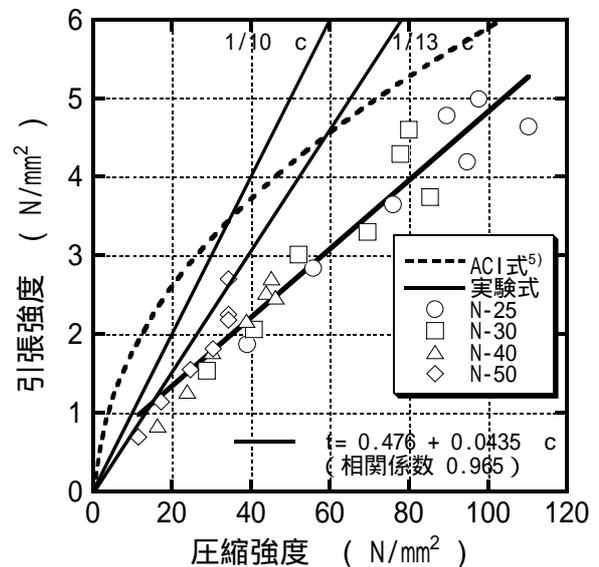


図 - 12 高温加熱後の圧縮強度と引張強度

- 3) Carlos Castillo, A. J. Durrani: Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol.87, No.1, pp.47-53, 1990.1
- 4) 一瀬賢一, 河辺伸二: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, p.17-21, 2002.11
- 5) ACI Committee 363: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, Manual of Concrete Practice, ACI, pp.363R1-363R55, 1993