

## 論文 高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響

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

要旨：本研究は，高温加熱（100～600℃）を受けた高強度コンクリートの力学的性状におよぼす粗骨材の影響を調べるため，耐火性の異なる硬質砂岩と石灰岩を粗骨材に使用した高強度コンクリートおよび高強度モルタルを採りあげ，実験的に検討・考察し，以下のことを明らかにした。

(1)石灰岩使用の高強度コンクリートは，硬質砂岩使用に比べ圧縮強度の低下が大きい。600℃加熱後の圧縮強度は，加熱前の約20%まで低下する。(2)また石灰岩使用の場合のヤング係数の低下も大きい。特に加熱温度400℃までの低下が大きい。

キーワード：高強度コンクリート，高温加熱，冷間試験，力学的性質，粗骨材

### 1. はじめに

近年，都心部を中心に30層を超える超高層鉄筋コンクリート造（超高層RC造）集合住宅の開発が進んでおり，設計基準強度（ $F_c$ ） $60\text{N}/\text{mm}^2 \sim 100\text{N}/\text{mm}^2$ の高強度コンクリートを適用する機会が増えてきている。高強度コンクリートは，これまでの研究により強度が高いほど，また含水率が高いほど火災時に爆裂が生じやすく<sup>1)</sup>，高温加熱時における水分移動が爆裂の発生に大きな影響を与えることが指摘されている<sup>2),3)</sup>。材料面においては，粗骨材の種類によって爆裂性状，力学的性質が異なることが指摘されている。また石灰岩や石英片岩を使用した高強度コンクリートでは，硬質砂岩や安山岩に比べて，著しい爆裂を生じることが報告されている<sup>1)</sup>。この数年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して筆者らを含め，データが集まりつつあるものの，爆裂が懸念される骨材に関するデータはほとんどない。特に石灰岩は，広い範囲で使用されており，高強度コンクリートにも使用されており，データの収集が必要と考えられる。

そこで本研究は，高温加熱（100～600℃）を

受けた高強度コンクリートの力学的性状におよぼす粗骨材の影響を調べるため，耐火性の異なる硬質砂岩と石灰岩を粗骨材に使用した高強度コンクリートおよび高強度モルタルを採りあげ，実験的に検討・考察を加えた。

### 2. 試験概要

#### 2.1 実験条件

実験条件は，粗骨材の種類3水準（石灰岩，硬質砂岩，なし），加熱温度7水準（常温20℃，100℃，200℃，300℃，400℃，500℃，600℃）とした。なお上限温度は，「建築構造部分の耐火試験方法（JIS A 1304）」で許容される鋼材の最高温度550℃を考慮し，600℃に設定した。また水セメント比（以下W/C比）は，すべて30%とした。

#### 2.2 使用材料および調査

使用材料は，セメント(C)として普通ポルトランドセメント，細骨材(S)として錦多峰産陸砂（砂岩S1），木更津産陸砂（砂岩S2），粗骨材(G)として上磯町峯朗産砕石（石灰岩G1），青梅産砕石（硬質砂岩G2）を使用した。各骨材の品質を表-1に示す。またS1とG1の組合わせを

\*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 主任研究員 工修(正会員)

\*2 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 室長 工博(正会員)

\*3 (株)大林組技術研究所 プロジェクト部 主席研究員 工博(正会員)

A 調合，S2 と G2 の組合わせを B 調合，そして S2 のみ使用したモルタルを M 調合とした。また混和剤は，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

各コンクリートおよびモルタルの調合条件は，目標スランプフローを A 調合では  $50 \pm 5\text{cm}$ ，B 調合では  $60 \pm 5\text{cm}$  とし，目標空気量は，共に  $3.5 \pm 1.0\%$  とした。またモルタルは，B 調合のコンクリートから粗骨材を除いた調合であり，高性能 AE 減水剤の使用量を調整して目標モルタルフロー  $25 \pm 5\text{cm}$  とした。目標空気量は，コンクリートに合わせ  $3.5 \pm 1.0\%$  とした。コンクリート・モルタルの各調合を表 - 2 に示す。

### 2.3 測定項目・測定方法

測定項目および測定方法の一覧を表 - 3 に示す。各測定は，JIS および土木学会規準等に準じて実施した。動弾性係数は，縦振動の一次共鳴振動数から求めた。ヤング係数は，コンプレッソメータによった。試験体の寸法は， $100 \times 200\text{mm}$  とした。試験体の本数は，各実験条件の組合せに対して 3 本とした。各調合から採取した試験体を A 試験体，B 試験体および M 試験体と称した。

### 2.4 試験体の製作および養生方法

コンクリートは，容量  $100\text{L}$  強制練りミキサを使用し，各調合について  $70\text{L}$  混練した。試験体は，軽量型枠を用いて製作し，打設後  $20 \pm 3$ ， $80 \pm 5\%RH$  の恒温恒湿室で湿潤養生とした。翌日封かん養生として実験開始材齢 91 日まで  $20 \pm 3$ ， $60 \pm 5\%RH$  の恒温恒湿室で養生した。

### 2.5 加熱条件

加熱は，プログラム調節器付き電気炉によった。加熱速度は，既往の加熱後載荷試験<sup>(4), (5)</sup>（以下冷間試験）を考慮し，試験体の内外温度差を小さく，また熱応力の影響をできるだけ小さくするため  $100 / \text{hr}$  に設定した。加熱パターンを図 - 1 に示す。また計画加熱温度到達後は，炉内温度を 24 時間保持した。降温は，炉内のファンを作動させながら自然冷却とし，炉

表 - 1 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 (%)
S1	錦多峰産陸砂	2.73	2.67	1.56
S2	木更津産陸砂	2.59	2.70	2.10
G1	義朗産碎石 (石灰岩)	2.71	6.73	0.60
G2	青梅産碎石 (硬質砂岩)	2.66	6.72	0.75

表 - 2 コンクリート・モルタルの調合

調合	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤対セメント (%)
		W	C	S	G	
A (S1+G1)	30	160	533	732	1000	C × 0.75 %
B (S2+G2)	30	175	583	707	886	C × 1.1 %
M (S2)	30	267	890	1080	0	C × 0.9 %

表 - 3 測定項目および測定方法

測定時期	種類	測定方法等
フレッシュ時	スランプフロー，モルタルフロー，空気量，単位容積質量，コンクリート温度	各 JIS 等による
	外観観察	目視による。ひび割れ幅は，クラックスケールで測定
加熱前後	動弾性係数	JIS A 1127 による
	圧縮強度	JIS A 1108 による
	ヤング係数	JSCE-G 502 による
	応力ひずみ関係	コンプレッソメータによる

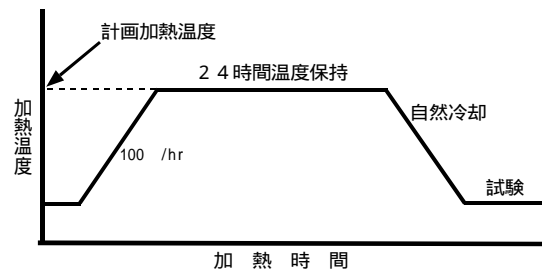


図 - 1 加熱パターン

表 - 4 フレッシュ性状

調合	スランプフロー (cm × cm)	モルタルフロー (cm × cm)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)	温度 (°C)
A	49.0 × 48.5		2402	3.1	25.0
B	64.0 × 62.0		2297	3.8	31.0
M		25.0 × 25.0	2277	3.0	27.5

内温度が  $50^\circ\text{C}$  以下に下がるまで放置し，その後各測定を実施した。加熱時の試験体は，加熱中に試験体からの水分逸散を認めるアンシール状態とした。

### 2.6 コンクリートの性状

コンクリートおよびモルタルのフレッシュ性

状を表 - 4 に示す。フレッシュ性状は、概ね目標としたスランプフロー、モルタルフロー、空気量を有するコンクリート、モルタルを得ることができた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 外観観察

加熱後の試験体は、1 体も爆裂を生じなかった。加熱温度 300 までは、外観上の変化を認められなかった。しかし加熱温度 400 以上では 0.05mm 程度のひび割れが試験体表面に目立ちはじめ、加熱温度 600 になると試験体全面にわたり亀甲状のひび割れが生じた。またひび割れ幅も加熱温度が高くなるほど大きくなり、加熱温度 600 では 0.2mm を越えるものも多数発生した。粗骨材の種類の違いおよびコンクリートとモルタルの違いは、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。また圧縮強度残存比(常温時の圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比)と加熱温度の関係を図 - 3 に示す。常温では、M 試験体の強度が高く、A 試験体と B 試験体は、ほぼ同程度の強度を示した。しかし加熱後においては、A 試験体の場合、加熱温度に比例して強度低下が認められ、常温時 72.0N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度が加熱温度 600 後では 15.4N/mm<sup>2</sup> (圧縮強度残存比でみると 0.21)まで低下した。一方 B 試験体と M 試験体は、加熱温度 200 において強度増加が認められ、加熱温度 200 を超えると強度低下を示した。加熱温度 300 で常温時の強度と同程度となり、加熱温度 300 以上では強度低下が進んだ。加熱温度 600 後の圧縮強度は、B 試験体 30.8N/mm<sup>2</sup> (圧縮強度残存比 0.43)、M 試験体 48.4N/mm<sup>2</sup> (圧縮強度残存比 0.56)とかなり高い残存強度を示した。加熱温度 200 程度までの強度増進は、未水和セメントの高温による水和の促進および乾燥による強度増進効果と高温による材料劣化および微視的

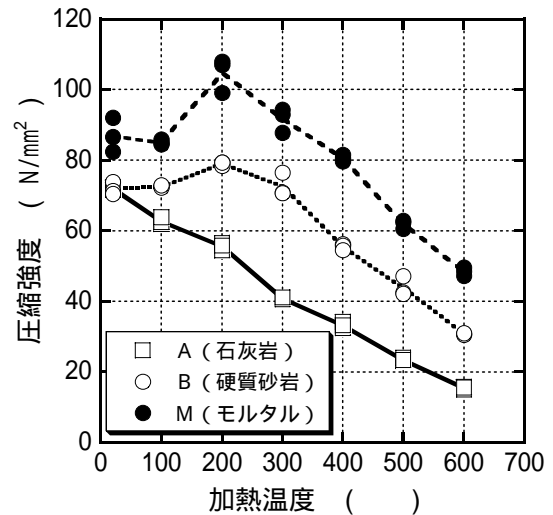


図 - 2 加熱温度と圧縮強度

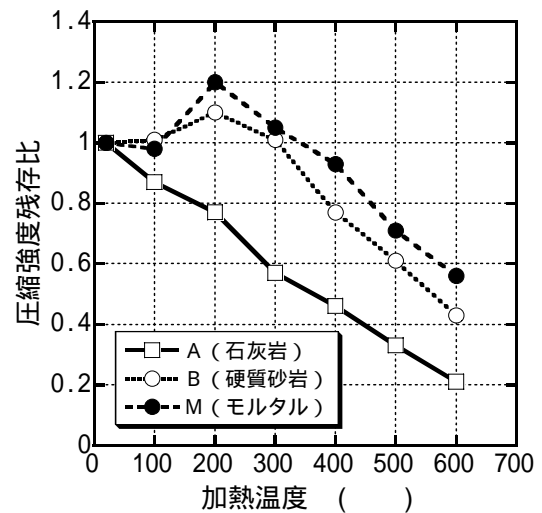


図 - 3 圧縮強度残存比

な熱応力による強度劣化とが競合し、コンクリートの性状として現われたものと推論する。よって M 試験体と B 試験体は、強度増進効果が卓越し、A 試験体では強度劣化の影響が卓越したものと考えられる。

#### 3.3 ヤング係数

加熱温度とヤング係数の関係を図 - 4 に示す。また加熱温度とヤング係数残存比(常温時のヤング係数に対する各加熱温度におけるヤング係数の比)の関係を図 - 5 に示す。常温時のヤング係数は、A 試験体がやや大きく、続いて M 試験体、B 試験体の順に小さな値を示した。加熱後のヤング係数は、総て加熱温度が高くな

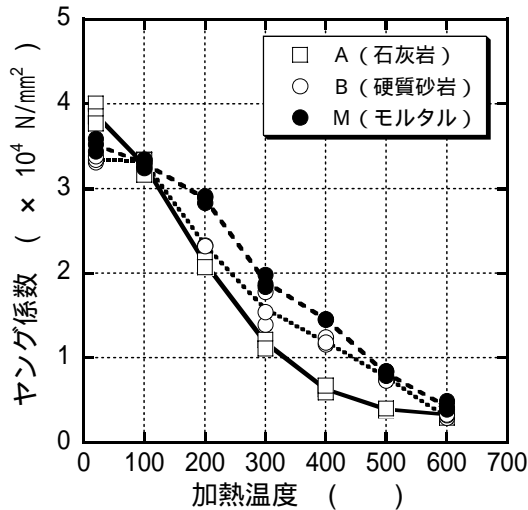


図 - 4 加熱温度とヤング係数

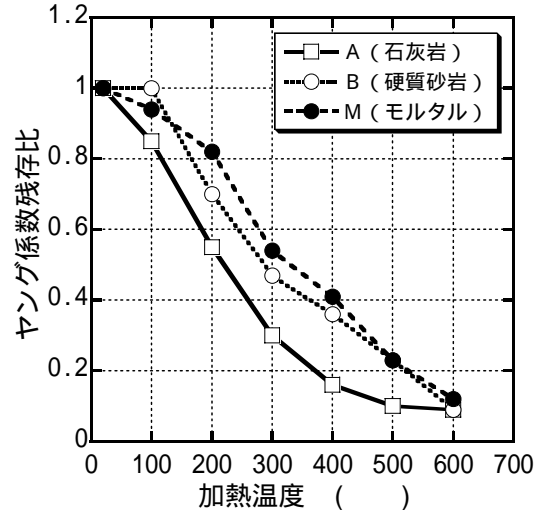


図 - 5 ヤング係数残存比

るほど低下し、圧縮強度よりも低下が大きい。特にA試験体は、加熱温度400 までのヤング係数の低下が著しい。この原因の1つとしては、石灰岩と硬質砂岩の熱膨張率が加熱温度400 程度までは、概ね同じであるものの、冷却時の収縮率が石灰岩の方が大きいため、モルタルとの界面に微細ひび割れが多く発生し、物性値に大きなダメージを与えたものと推察する<sup>6), 7)</sup>。

一方B試験体とM試験体のヤング係数は、加熱温度200 から400 において、M試験体の方が若干大きな値を示しているものの、概ね同様のヤング係数の低下を示した。これは、B試験体中の硬質砂岩とモルタル部分のヤング係数が比較的近い値にあることが推定される。加熱温度600 後におけるヤング係数は、3 調合ともほぼ同じ値を示しており、ヤング係数残存比として0.1まで大きく低下した。

### 3.4 動弾性係数

ヤング係数と動弾性係数の関係を図 - 6 に示す。この結果から、加熱の有無、加熱温度、骨材の種類に関わらずヤング係数と動弾性係数との相関性が高い(相関係数 $R=0.992$ )ことがわかる。このことから既往の研究<sup>4)</sup>と同様に、加熱後の強度試験を行わなくても、動弾性係数を測定することでヤング係数の推定ができる。

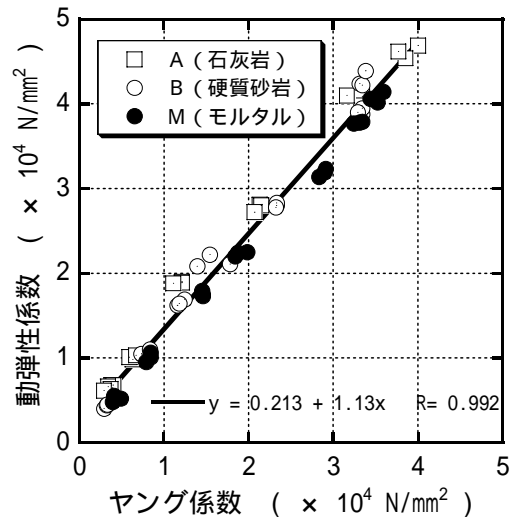


図 - 6 ヤング係数と動弾性係数

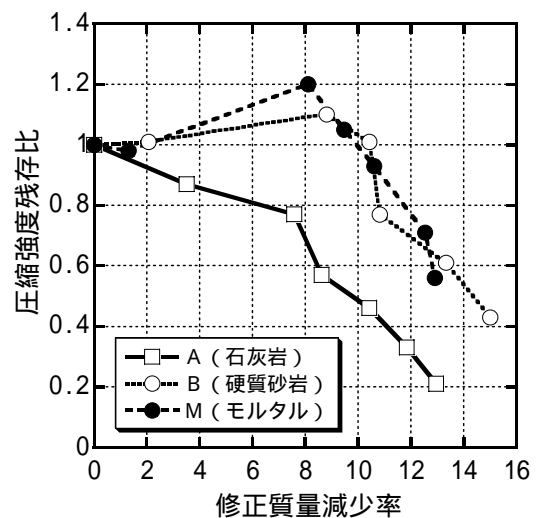


図 - 7 修正質量減少率と圧縮強度残存比

### 3.5 質量減少率

コンクリートの質量減少は、粗骨材の吸水や含水鉱物からの脱水を考慮しても、大部分はモルタル部で生じているものと考えられます。そこで主としてモルタル部に着目し、修正質量減少率[加熱前後の質量差 / (加熱前の試験体質量 - 試験体中の粗骨材の絶乾質量)]を求めた。この修正質量減少率と圧縮強度残存率、ヤング係数残存率の関係を図 - 7, 図 - 8 に示す。修正質量減少率で各残存比を評価するとB試験体とM試験体とは良く一致している。特に加熱温度200 以上(修正質量減少率8%以上)において良く一致している。一方A試験体は、B試験体、M試験体の結果と大きく異なっており、細骨材の違いを考慮しても、石灰岩がモルタル部分に大きなダメージを与えたものと推察する。

### 3.6 応力ひずみ関係

A, B試験体の応力ひずみ曲線を図 - 9 に示す。加熱温度が高くなるに従い、最大応力度(以下 max)におけるひずみ(以下 max)が大きくなることが認められた。

加熱温度と max の関係を図 - 10 に示す。各加熱温度における max は、M試験体が最も大きく、続いてB試験体、A試験体の順となった。また各試験体とも加熱温度100 以上になると max が大きくなり、特に加熱温度400 以上になると、 max が急増した。

### 3.7 ヤング係数の推定

日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」に定めるヤング係数規準式<sup>8)</sup>を基に、加熱温度を影響を考慮したヤング係数の推定式(1)を提案する。なお式(1)に含まれるK( )は、加熱温度補正係数とし、実験値より定めた。

$$E = K( ) \times 3.35 \times 10^4 \times ( / 2.4 )^2 \times ( / 60 )^{1/3} \quad (1)$$

E : 加熱後のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)  
 : 加熱後の単位容積質量(t/m<sup>3</sup>)

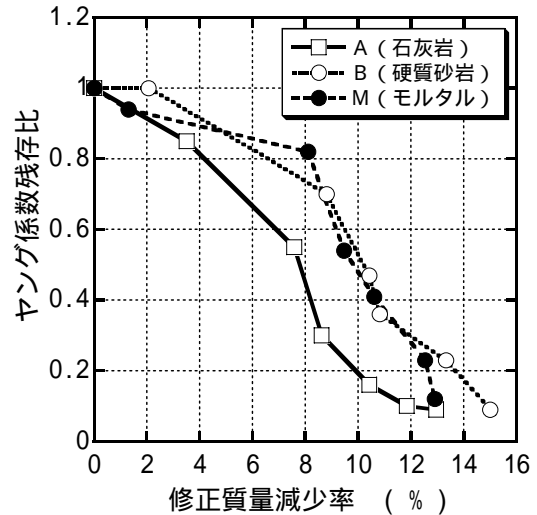


図 - 8 修正質量減少率とヤング係数残存比

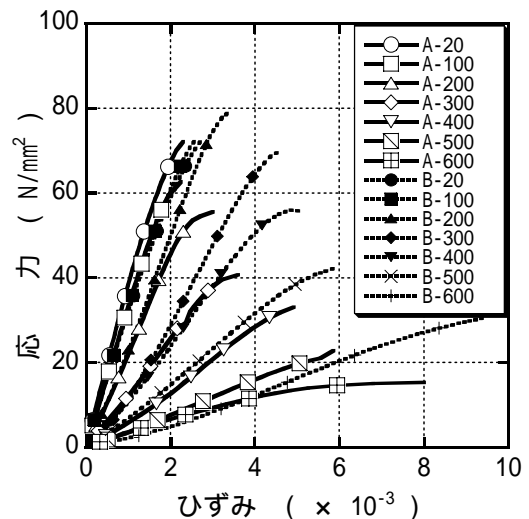


図 - 9 応力ひずみ曲線

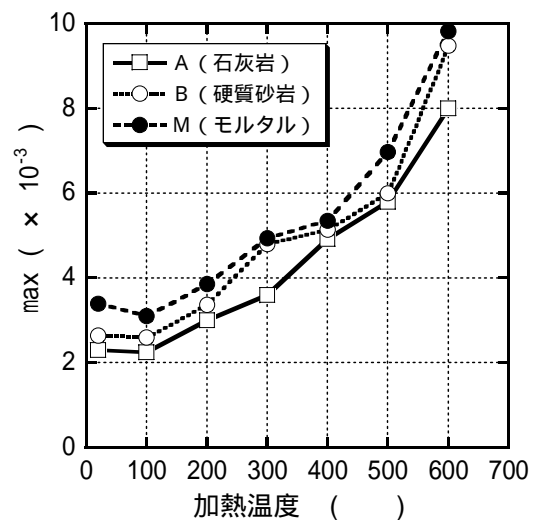


図 - 10 加熱温度と max

: 加熱後の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

K( ): 加熱温度補正係数

( K( ) = a × + b a, b は実験定数 )

ヤング係数の実験値と推定値の比較を図-11に示す。K( )を導入し,適切に定めることにより加熱後の単位容積質量と圧縮強度から加熱後のヤング係数を概ね推定できることがわかる。

#### 4. まとめ

粗骨材の異なる高強度コンクリートについて加熱後載荷試験を行い,以下のことが明らかとなった。

- (1)高温加熱を受けた石灰岩使用の高強度コンクリートは,硬質砂岩使用のものに比べ圧縮強度の低下が大きい。600 加熱後の圧縮強度は,加熱前の約20%まで低下する。
- (2)石灰岩使用の高強度コンクリートは,高温加熱後のヤング係数の低下も大きい。特に加熱温度400 までの低下が大きい。
- (3)ヤング係数と動弾性係数との相関性は,加熱の有無,加熱温度,骨材の種類に関わらず高い。
- (4)日本建築学会のヤング係数規準式を基に,加熱温度補正係数を導入することにより加熱後の単位容積質量と圧縮強度から加熱後のヤング係数を概ね推定できる。

#### 謝 辞

論文をまとめるにあたり,名古屋工業大学大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 河辺伸二助教授には貴重なご意見を頂きました。記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 井上明人他:高強度コンクリートの耐火性の評価に関する研究(第2報;骨材の岩質及び含水率の影響),日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)A, pp.739 ~ 740, 1991.9

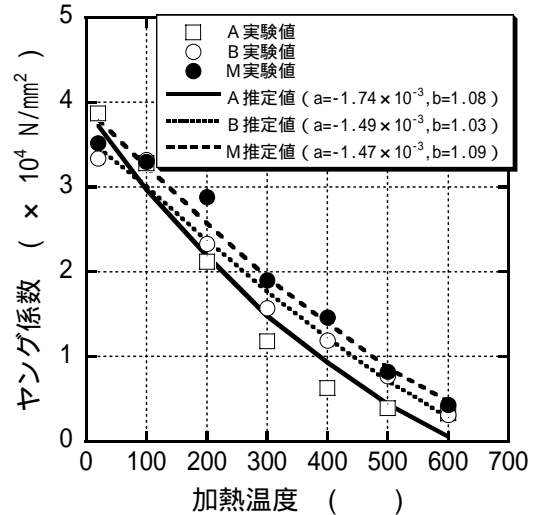


図 - 1 1 ヤング係数の推定

- 2) 長尾覚博他:高強度コンクリートの爆裂に関する一考察,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.18, No.1, pp.657 ~ 662, 1996
- 3) 長尾覚博他:高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.631 ~ 636, 1997
- 4) 一瀬賢一他: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, pp.23 ~ 30, 2001.3
- 5) Castillo, C.and Durrani, A.J.:Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete, ACI Materials Journal,vol.87,No.1,pp47-53,1990.1
- 6) U.Schneider : コンクリートの熱的性質, 技報堂, pp.42-48, 1983
- 7) 森 実:骨材の性質・性能 - 熱的性質・耐火性,コンクリート工学, Vol.16, No.9, pp.36-40, 1978.9
- 8) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 日本建築学会, pp.38-41, 1999.11