

# マスコンクリートの初期特性に関する研究

新開 千弘 芳賀 孝成  
十河 茂幸

## Study on Properties of Mass Concrete at Early Ages

Chihiro Shinkai Takashige Haga  
Shigeyuki Sogo

### Abstract

In order to analyze thermal stresses in massive concrete structures, it is necessary to correctly grasp the successively changing properties of concrete at early age. However, it is difficult to do so because structural concrete is cured under variable temperature conditions affected by heat of hydration, while it is subjected to thermal stresses at early ages from immediately after start of hardening. For this reason, the authors conducted experiments to study two problems: one, the deformation characteristics of concrete at early ages from immediately after beginning to harden, the other, the relation between curing temperature and strength. The results were as follows: (1) The young's modulus used in analysis needs to correspond with the stress level of concrete strength because of the plastic deformation character of concrete at early age. (2) In calculation of cumulative temperature, corrections must be made considering curing temperature because the relation between strength and cumulative temperature will be changed when temperature hysteresis differs. A method of making the abovementioned corrections is proposed by the authors.

### 概 要

マッシブなコンクリート構造物の温度応力を予測計算するには、逐次変化する初期材令コンクリートの物性を正確に知る必要がある。しかし、構造体コンクリートは、養生温度が水和熱により変化することや、硬化開始直後の初期材令から温度応力を受けるなどの問題から、正確な物性の推定は難しい。そこで、より正確な物性推定の資料を得るため、初期材令における変形特性や養生温度と強度の関係などについて、実験による検討を行なった。その結果、(1) 初期材令では、コンクリートがかなり塑性的な変形を示すため、部材が受ける応力度レベルに応じて補正した弾性係数を予測計算に用いる必要がある。(2) 温度履歴が異なると、コンクリートの強度と積算温度の関係が変化するため、積算温度の算出には、養生温度を考慮した補正が必要である、などが分かった。なお、これらの補正については、その一方法についての提案も試みた。

## 1. はじめに

マッシブなコンクリート構造物の温度応力を計測あるいは予測計算するには、コンクリートの力学的特性を正確に知る必要がある。特に、打設直後には温度の上昇並びに下降が大きく、大きなひずみ変化が生ずるために、応力計算には物性をより正確に把握する必要がある。しかし、現状ではコンクリートの硬化開始直後における初期材令の力学的特性変化に対する配慮や、逐次変化する温度条件下でのコンクリートの物性を標準養生供試体から推定する方法などに不十分な点があり、予測計算時の誤差の原因となっている。そこで、各種セメントを用い

たコンクリートについて、初期材令の強度および変形特性(シリーズⅠ)、ならびに養生温度が強度、変形特性に及ぼす影響(シリーズⅡ)に関する実験を行なった。

## 2. 初期材令の強度・変形特性(シリーズⅠ)

### 2.1. 実験概要

コンクリートの物性は、初期材令に大きく変化するが、予測計算にあたっては、この物性を正確に把握する必要がある。そこで、各種セメントを用いたコンクリートについて、凝結性状および硬化開始直後からの強度と変形特性を実験により調べ、初期材令の物性把握を試みた。

2.1.1. 使用材料と配合 セメントは、普通ポルトラ

セメント	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	Ad.
N	25	12	4	55	46	160	291	847	1013	0.73
M					48	157	285	891	984	0.71
FB					46	157	285	846	1012	0.71
BB					47	155	282	871	1001	0.70

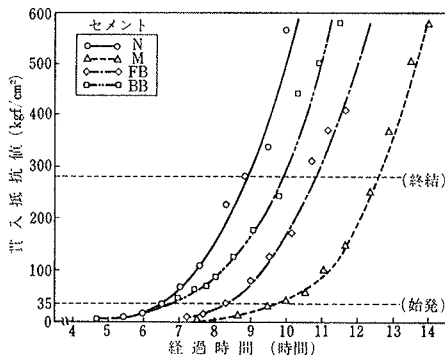
表一 コンクリートの配合 (シリーズ I)

ンドセメント (N と称す), 中庸熟ポルトランドセメント (同M), フライアッシュセメントB種 (同FB), 高炉セメントB種 (同BB) の4種類を使用した。骨材には, 木更津産山砂 ( $\rho=2.60, Q=1.60\%$ ) および青梅産碎石 ( $\rho=2.65, Q=0.62\%$ ) を使用した。配合は表一に示すとおりである。なお, 混和剤には AE 減水剤標準形を標準使用量用いた。

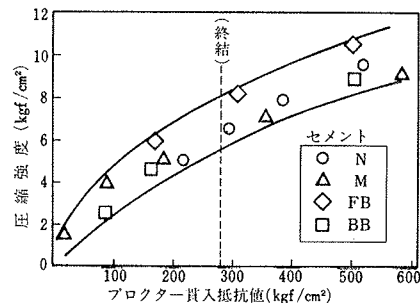
2.1.2. 実験方法 コンクリートの練上り温度は21℃~22℃とし, 材令1日までは型枠養生を, それ以降は水中養生を20±2℃で行なった。試験項目は, ウェットスクリーニングしたモルタルによる凝結試験と, 圧縮強度 ( $f'_c$ ), 割裂引張強度 ( $f'_t$ ) で, 圧縮試験時には応力とひずみの関係についても測定した。実験に用いた供試体の寸法は,  $\phi 150 \times 300$  mm ( $f'_c$ ) および  $\phi 150 \times 150$  mm ( $f'_t$ ) である。なお, 圧縮ひずみの測定は, 材令1日以前については供試体中心に埋込んだひずみ計 ( $l=100$  mm,  $E_s=400$  kgf/cm<sup>2</sup>) を用い, それ以降についてはコンプレッソメータを使用した。試験は, 8時間, 12時間, 18時間, 24時間, 48時間, 72時間 (3日), 168時間 (7日) の7材令とした。

2.2. 実験結果と考察

2.2.1. 強度 プロクター貫入抵抗値によるモルタルの凝結試験結果を図一に強度試験結果を表一に示す。また, プロクター貫入抵抗値と圧縮強度の関係を図二に示す。プロクター貫入抵抗値と圧縮強度の関係は, 終結前後において, 一定の範囲内にあり, この材令の圧縮強度



図一 凝結試験結果



図二 プロクター貫入抵抗値と圧縮強度の関係

セメント	普通ポルトランドセメント							中庸熟ポルトランドセメント							
	材令 (hr-min)	8-15	12-00	18-30	24-15	48-15	72-00	168-45	8-15	13-15	18-00	24-30	48-00	72-00	171-00
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		4.1	17.9	46.5	72.4	124.0	149.0	213.0	1.1	7.1	22.2	49.9	115.0	144.7	215.0
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		0.6	2.1	5.5	8.5	13.6	16.2	22.7	0.1	0.8	2.9	6.3	13.3	14.2	19.2

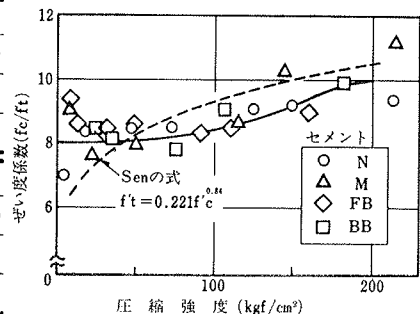
セメント	フライアッシュセメントB種							高炉セメントB種							
	材令 (hr-min)	10-00	12-45	18-15	23-30	48-00	72-00	168-45	7-45	12-15	18-00	24-15	48-00	72-00	169-00
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		5.9	12.3	31.4	48.4	91.2	112.0	160.0	2.6	11.5	23.9	35.1	74.8	106.0	181.0
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		0.6	1.4	3.7	5.6	10.9	13.1	17.8	0.2	2.2	2.8	4.3	9.5	11.7	18.2

表二 強度試験結果 (シリーズ I)

はプロクター貫入抵抗値によってある程度推定することができる。なお, 終結時におけるコンクリートの圧縮強度は, 今回の結果において6~8 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲であった。

図一3に圧縮強度とぜい度係数の関係を示す。圧縮強度が100 kgf/cm<sup>2</sup> 以下の場合では, ぜい度係数は8前後となり, 200 kgf/cm<sup>2</sup> に近付くと10前後となる。なお, 図中に示した破線は Sen の式<sup>1)</sup>により求めたぜい度係数と圧縮強度の関係である。Sen の式では, 圧縮強度50~100 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲で, 引張強度を過小に評価し, それ以下の範囲では過大に評価する傾向が認められる。

2.2.2. 変形特性 圧縮強度の1/3 載加時の割線弾性係数 ( $E_{sc}$ ) 測定結果を表一3に示す。  $E_{sc}$  の増加率は初期に大きく, 材令1日の  $E_{sc}$  は材令7日の約50%に達する。図一4にNおよびBBの応力とひずみの関係を示す。なお, 図中のひずみの終局値は圧縮強度の95%載荷時のものである。初期材令のひずみの終局値は, 2,000  $\mu$  以上とかなり大きく, また, 応力とひずみの関係は載荷初期からかなり曲線的である。一方, 強度が50 kgf/cm<sup>2</sup> 以上となる材令24~48時間以降のひずみの終局値は, 1,000  $\mu$  程度に減少し, また, 応力とひずみの関係は, 載荷初期において直線的である。従って, 初期材令時では, 応力度レベル (強度に対する載荷応力度の比,  $\sigma_c/f'_c$ ) に応じて接線弾性係数 ( $E_{tc}$ ) が大幅に変化すると



図三 圧縮強度と引張強度の関係

	材令 (hr-min)	8-15	12-00	18-30	24-15	48-15	72-00	168-45
N	材令 (hr-min)	8-15	12-00	18-30	24-15	48-15	72-00	168-45
	1/3割線弾性係数 ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	9.7	62	124	153	237	261	303
M	材令 (hr-min)	8-15	13-15	18-00	24-30	48-00	72-00	171-00
	1/3割線弾性係数 ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	0.8	26	78	125	236	263	294
FB	材令 (hr-min)	10-00	12-45	18-15	23-30	48-00	72-00	168-00
	1/3割線弾性係数 ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	20	52	100	136	221	255	287
BB	材令 (hr-min)	7-45	12-15	18-00	24-15	48-00	72-00	169-00
	1/3割線弾性係数 ( $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ )	2.8	45	89	110	185	231	254

表-3 割線弾性係数測定結果

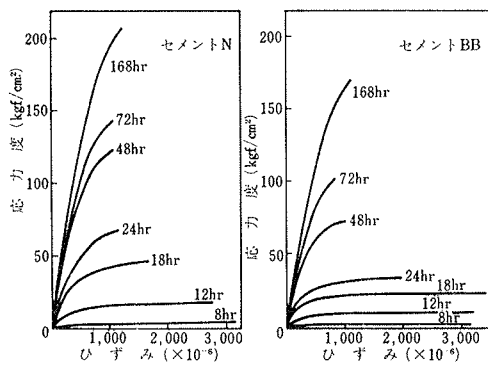


図-4 応力～ひずみの関係例

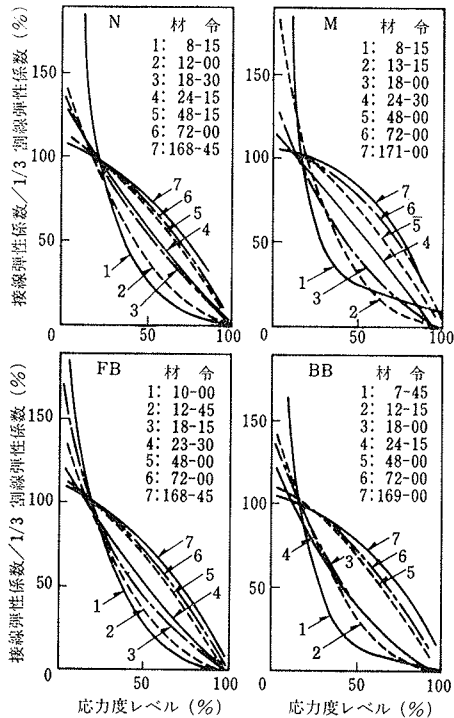


図-5 応力度レベルと接線弾性係数比

ともに、応力度レベルの上昇によって著しくひずみが増加する特性が認められる。図-5に各種セメントについて、応力度レベルと接線弾性係数の割線弾性係数に対する比を材令ごとに示す。初期材令では、曲線は下方に凸

な関係を示し、低い応力度レベルにおいても接線弾性係数の変化が著しい。このことは、温度応力を予測する場合、変形特性を一律に割線弾性係数とすると大きな誤差を招くことになる。従って、初期材令では、応力度レベルに応じた弾性係数を用いる必要がある。図-6に各応力度レベルにおける弾性係数の割線弾性係数に対する補正係数(R)と圧縮強度の関係を示す。各応力度レベルごとに、圧縮強度と補正係数には直線関係があり、この関係から補正係数を求めて弾性係数を設定することにより、予測計算の精度を向上することができるものと思われる。

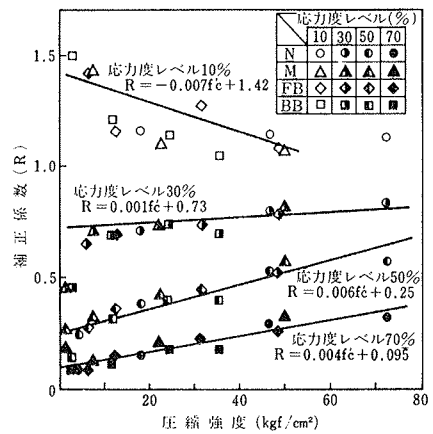


図-6 補正係数と圧縮強度の関係

### 3. 養生温度と強度・変形特性 (シリーズII)

#### 3.1. 実験概要

コンクリートの物性に及ぼす養生温度の影響を評価するため、一般には養生温度と時間の積である積算温度  $\{M = \Delta(T + T_1) \cdot t$  ( $T$ : 温度,  $T_1$ : 養生温度の仮想原点, 一般に  $T_1 = -10^\circ\text{C}$ ) $\}^{2)}$  が用いられる。しかし、標準養生コンクリートの強度から温度履歴を受けたコンクリートの強度を推定した場合、この方法では実際の強度と一致しないことが多い。また、セメントの種類によってもその関係に違いがある。そこで、各種セメントを用いたコンクリートについて、恒温恒湿槽を用い、6種類の温度条件による養生を行なった場合の、圧縮強度および割線弾性係数を調べた。

3.1.1. 使用材料と配合 実験には N, M, FB, BB の4種のセメントを使用した。骨材には木更津産山砂 ( $\rho = 2.62, Q = 1.70\%$ ) および青梅産碎石 ( $\rho = 2.62, Q = 0.71\%$ ) を使用した。配合は表-4に示すとおりである。また、混和剤には AE 減水剤標準形を使用した。

3.1.2. 実験方法 実験を行なった養生条件は、 $5^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  の一定温度と、図-7に示す仮想温度履歴2ケースの6種類で、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$  でコンクリートを練

セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	Ad.
N	25	12	4	55	46	160	291	850	1002	0.73
M					48	157	285	849	1000	0.71
FB					46	157	285	894	973	0.71
BB					47	155	282	874	989	0.71

表-4 コンクリートの配合 (シリーズII)

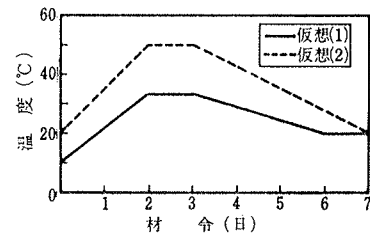


図-7 仮想温度履歴

上げた直後から積算温度が 5,040°C・hr まで各条件で養生を行ない、それ以降は20°C水中養生とした。また、恒温恒湿槽内では、試料の乾燥を防ぐため湿度を90%以上に保つとともに、型枠のまま上面に常時濡れウエスを掛けた。試験を行なった材令は、積算温度による有効材令(720°C・hr = 1日)が 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28 日となる 8 材令とした。

3.2. 実験結果と考察

3.2.1. 圧縮強度 図-8に、N, BB について20°C一定温度および仮想温度履歴で養生を行なったコンクリートの積算温度と強度の関係を示す。図中に示した直線は、20°Cの試験結果を対数式で近似したものである。Nの場合には近似結果にそれほどの問題はないが、BBの場合この近似は誤差が大きいことが分かる。また、20°C養生と仮想温度履歴養生の場合、同一積算温度の強度はかなり異なっており、養生温度の強度発現に対する効果(温度効果と称す)を考慮する必要がある。

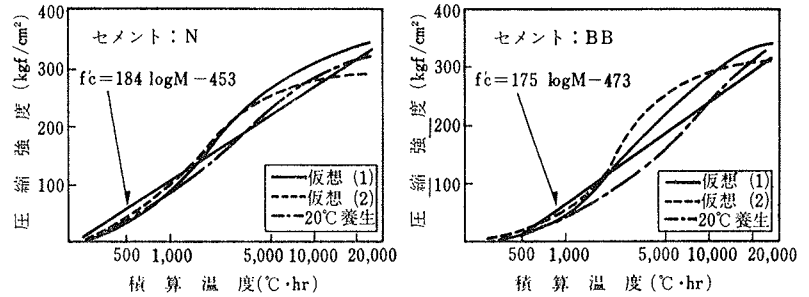


図-8 仮想温度履歴における積算温度と強度の関係

図-9に、各セメントについて一定温度養生の場合の積算温度と圧縮強度の関係を示す。各養生温度における積算温度と圧縮強度の関係は、それぞれ異なっている。全体として、有効材令5日までの強度発現は、20°C養生に比べて温度が低い場合には遅く、高い場合には早い傾向にある。また、5°C~40°Cの範囲では温度効果の変化が大きい、40°C~60°Cの範囲では小さい。特に、この傾向はNとFBにおいて顕著である。一方、長期材令では養生温度が高いほど強度の伸びが早く鈍化し、養生温度が低いものほど長期強度が大きくなる。

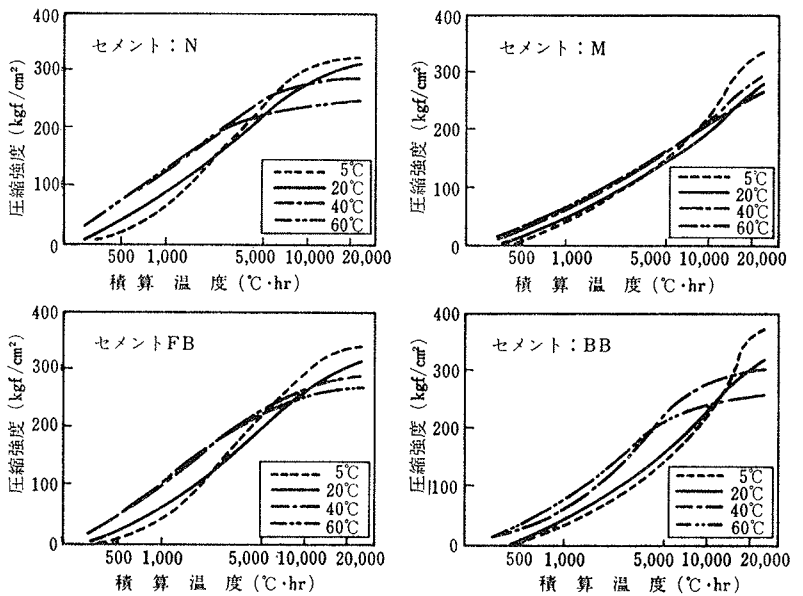


図-9 各養生温度における積算温度と圧縮強度の関係

有効材令9日までを対象とし、この様な温度効果の補正方法を、積算温度算出時の仮想原点を変化させることにより検討する。各養生温度の強度と積算温度の関係を一致させるために、用いるべき積算温度の仮想原点の範囲を図-10に示す。仮想原点と養生温度の関係は2本の直線式である程度近似できる。この式を用いて、20°C一

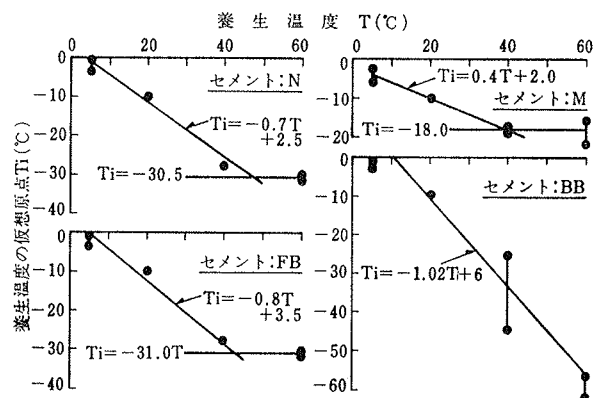


図-10 養生温度の仮想原点

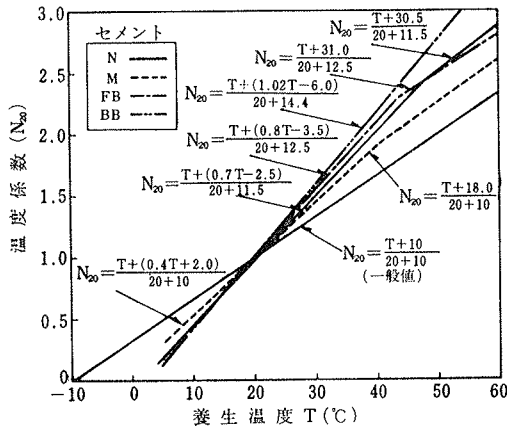


図-11 養生温度と温度係数の関係

定温度養生を基準とし、異なる養生温度での温度効果の補正值（温度係数  $N_{20}$ ）と養生温度の関係を図-11に示す。いずれのセメントにおいても、従来の関係式に比べてかなり異なり、養生温度による温度係数の変化が大きいの。この温度効果の補正を仮想温度履歴養生に適用した例を図-12に示す。いずれも、積算温度の補正により、20℃一定温度養生の結果に近い値が得られる。しかし、この方法では、簡素化のために1次近を用いていることおよび、温度履歴を受ける時期が考慮されていないため、より正確な強度推定を行なうためには、これらの考慮が必要となる。

3.2.2. 弾性係数 図-13に割線弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中に示した曲線は、実験結果を最小二乗法で  $E_{sc} = Af_c^{0.491}$  に近似した結果である。全体として近似式の適合性は良く、また、養生温度の違いによる差も少ないことから、圧縮強度からの割線弾性係数の推定は容易に行なえる。

4. まとめ

今回の実験結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) プロクター貫入抵抗値と圧縮強度には相関性があり、セメントの種類にかかわらず、プロクター貫入抵抗値から圧縮強度をある程度推定できる。
- (2) 初期材令の応力とひずみの関係は、載荷初期からかなり曲線的であり、弾性係数の変化が著しいため、解析時に用いる弾性係数には、応力度レベルに応じた補正が必要である。
- (3) 強度発現に及ぼす養生温度の影響の度合は、各セメントごとに異なり、いずれも-10℃を養生温度の原点として求めた積算温度に比べて大きい。そのため、温度履歴を受けるコンクリートの強度を標準養生供試体の強

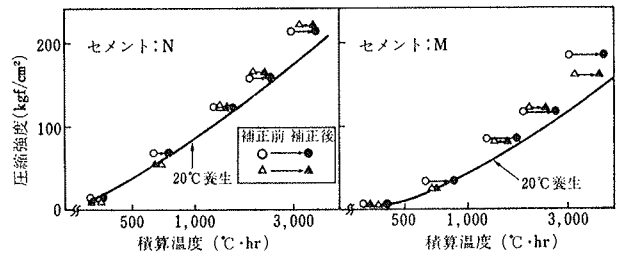


図-12 積算温度の補正值と圧縮強度の関係

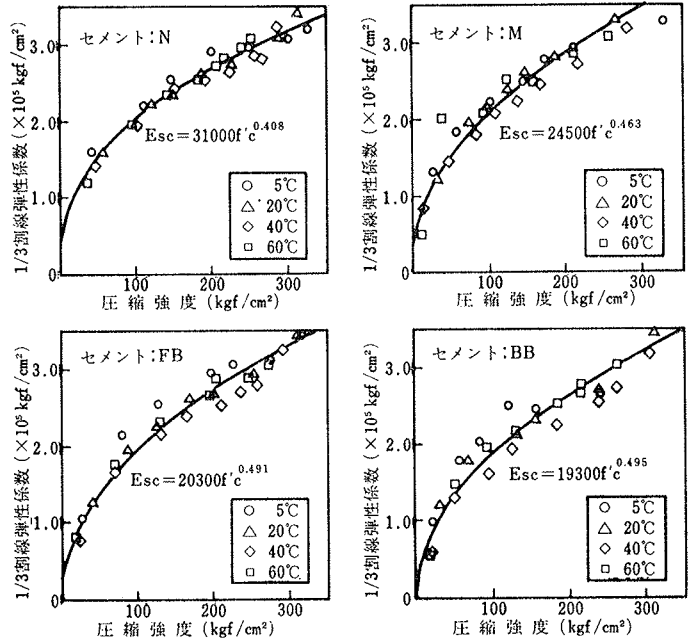


図-13 圧縮強度と割線弾性係数の関係

度から推定するには、この積算温度を補正したパラメータを用いる必要がある。

(4) 圧縮強度と割線弾性係数の関係は、養生温度にかかわらず一定で、強度から割線弾性係数を推定することは容易である。

なお、初期材令の弾性係数の補正および、養生温度による積算温度の補正については、その一方法についての提案も行なった。しかし、この方法については、限られた実験により得られたものであり、今後さらに適用性の検討をする必要がある。

参考文献

- 1) B. R. Sen & A. L. Bharara: New Indirect Tensile test for Concrete, Indian Concrete Journal 35-3, (1961.5)
- 2) S. G. Bergström: Curing Temperature, Age and Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 5, No. 14, (1953.12), pp. 61~66
- 3) 笠井: 先に提案したコンクリートの初期圧縮強度推定方法の適用性について, 日本建築学会論文報告集, No. 163, (昭和44.9), pp. 9~17