

マスコンクリートの基礎的物性に関する研究

STUDIES ON THE FUNDAMENTAL PROPERTIES OF MASS CONCRETE

竹下 治之*

By Haruyuki TAKESHITA

It is important that we fully understand physical properties of concrete in thermal stress analysis of mass concrete. The purpose of this paper is to investigate such properties of mass concrete. I used two kinds of aggregates and several sorts of mix proportions of concrete in this investigation, and obtained compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio, flexural strength and coefficient of thermal expansion.

Also I compared splitting strength with tensile strength obtained by pure tension test.

In order to understand quantitatively and qualitatively these properties of mass concrete, I related them to maturity and curing ages. I moreover refer to the method of estimation of these properties from compressive strength obtained by the specimens in water curing at 20°C.

1. ま え が き

近年、土木および建築分野におけるコンクリート構造物の大型化に伴い、いわゆるマスコンクリートのひびわれの発生が問題となってきている。すなわち、このようなひびわれは、構造物の安全性、耐久性、遮水性などを損なうため、可能な限りその発生を防止するか、あるいは許容ひびわれ幅以内に制限することが要求される。

一般に、コンクリート構造物で、ひびわれ発生の原因としては、乾燥収縮、実荷重、温度応力によるひびわれ等があるが、マッシブなコンクリート構造物では、セメントの水和熱による熱膨張および収縮過程の体積変化に基づく温度応力が主要因であることが多い。

しかし、マスコンクリートの温度ひびわれの検討においては、以下のような未解明な点も多く、その温度応力を正確に推定することは、現状では比較的難しい。

- a) マスコンクリートの若材令における諸物性
- b) 内部および外部拘束応力の発生メカニズム、およびこれらの経時変化
- c) マスコンクリートのひびわれ発生条件

このように、マッシブなコンクリート構造物の温度応

力解析においては、種々の問題点が現存するが、まず、的確なマスコンクリートの諸物性値の把握が重要な問題となってくる。

岡田ら¹⁾は、種々の温度履歴下におけるマスコンクリートの基礎的特性について考察しているが、この物性値に関して定性的かつ定量的に取り扱った研究は少ないように思われる。

このような現状に対し、本研究では、マスコンクリートの硬化過程における諸物性を明らかにすることを目的として、骨材および配合を変え基礎的試験を行った。対象とした物性値は、圧縮強度、引張強度、弾性係数、ポアソン比、曲げ強度および熱膨張係数であり、特に、温度応力解析において重要と考えられる引張強度に関しては、割裂引張試験のほか、純引張試験も併せて行い、両者を比較検討した。

また、これらの物性値は、その特性を定量かつ定性的に把握するため、時間依存因子として、積算温度および有効材令と関連づけるとともに、これらの諸物性値を一般的な標準水中養生供試体の圧縮強度をもとに推定する方法を示した。

2. 実験概要

(1) 使用材料

* 正会員 工修 日本国土開発(株)技術研究所
(〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1)

セメントは小野田社製の普通ポルトランドセメントを、混和剤は日曹マスタービルダーズ社の遅延型 AE 減水剤ボゾリス No.8 を用いた。使用骨材を表一に示す。

(2) 配合

配合は骨材の相違による物性値の差異を検討することを目的として、表一に示す K, T シリーズを主体とし、基準強度を 3 種類とした。また、F, S シリーズは熱膨張係数測定試験のみに使用した。

(3) 供試体

圧縮および割裂試験用供試体は、いずれも 10φ×20 cm の円柱供試体を、曲げ試験用供試体は 10×10×40 cm の直方体供試体を用いた。純引張および熱膨張係数測定用供試体を、それぞれ図一および図二に示す。

(4) 養生方法

岡田ら¹⁾によれば、マスコンクリートの物性値は、温度履歴によらず、ほぼ積算温度 $M = \sum(10 + T) \Delta t$ (ここに、 T : 養生温度(°C), Δt : 経過時間(h)) をパラメー

ターとして整理できることが示されているので、熱膨張係数測定用供試体以外のすべての供試体は、材令 1 日で脱型後、マスコンクリートの状態と近似させる目的で、ビニールシートで覆って水分の移動を防ぎ、30±1°C, 90±5% RH 恒温恒湿室で気中養生を行った。また、同時に作成した圧縮および割裂試験用供試体については、マスコンクリートの物性値と比較検討する目的で、20±1°C の恒温水槽でも標準水中養生を行った。

(5) 試験方法

a) 圧縮および割裂引張強度試験

試験は表一2の $K_1, K_2, K_3, T_1, T_2, T_3$ の 6 配合について、20°C 水中養生および 30°C 気中養生とも、材令 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28 日で行い、圧縮強度 σ_c 、割裂引張強度 σ_{st} を測定した。同時に、圧縮試験では破壊までの縦および横ひずみを測定して、破壊荷重の 1/3 点での割線弾性係数およびポアソン比を求めた。また、 K_1, K_3 については、24 時間以内のごく若材令における圧縮強度および弾性係数も測定した。

b) 純引張強度試験

試験には K_1, K_3, T_1, T_3 の 4 配合を用いた。供試体は図一に示すように、引張用治具としてねじ穴を設けた 125φ×20 mm の鋼板を両端に配し、鋼板とコンクリートの接着をよくする目的で、図のような定着部の補強を行い、材令に合わせてエポキシ樹脂系接着剤を用いて接着した。供試体中央部に 2 枚のひずみゲージを貼付し破壊まで荷重とひずみを XY レコーダーで記録し、純引張強度 σ_{pt} 、極限引張ひずみ ϵ_{tu} および引張弾性係数 E_t (応力とひずみ関係がほぼ直線となるため、破壊の 3/4 点の割線弾性係数を用いた) を測定した。なお、載荷速度は約 0.1~0.2 kgf/cm² で行った。

c) 曲げ試験

試験は K_1, K_3 の配合について、スパン 10 cm の 3 等分載荷とし、JIS A 1106 に準じて曲げ強度 σ_b を求めた。

d) 熱膨張係数測定試験

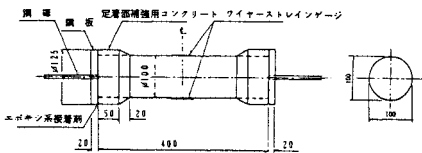
試験は K_1, K_2, K_3, T_3, F, S について行った。図二に示す位置に埋込み型ひずみ計および熱電対を埋設し、コンクリートのひずみと温度を計測した。供試体は、マスコンクリートの熱拡散および水分移動状態と同様にするため、図に示すように、周囲を硬質ウレタンフォームおよびビニールシートで覆い、膨張・収縮が自由にできるよう、コンクリート打設 3~4 時間後に凝結が始まり、コンクリートが自立する状態で周辺の縁切板の引抜きを行った後、20±1°C, 90±5% RH 恒温恒湿室に静置した。試験は、コンクリート打設後の温度上昇時および下降時について行うとともに、 K_2 については、温度が定常状態に降下した後、温床線により供試体温度を強制的に変化させた場合についても行った。

表一 使用骨材

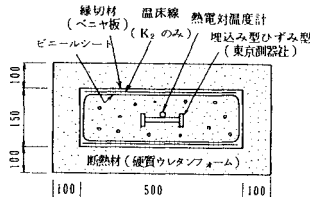
シリーズ名	粗骨材			細骨材			備考	
	名称	FM 最大径 (mm)	比重	名称	FM 比重			
K	鹿島産川砂利	6.5 4	2.5	2.5 9	鹿島産川砂	2.6 7	2.6 0	圧縮, 引張, 曲げ試験
T	津久井産砕石	6.4 8	2.5	2.6 1	津久井産砕砂	3.1 3	2.5 9	熱膨張係数測定試験
F	富士川産砂利	6.5 6	2.5	2.6 0	富士川産川砂	2.9 7	2.5 9	
S	人工軽集骨材 (セライト)	6.1 5	2.0	1.3 2	鹿島産川砂	2.6 7	2.6 0	熱膨張係数測定試験

表二 配合

配合 No.	基準強度 σ_c (kgf/cm ²)	使用骨材	スパン (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (W/C)	細骨材率		単位量 (kg/m ³)				
						s/a (%)	w	セメント	粗骨材	水和剤	ボゾリス No.8	
K_1	2.5 0	K	8 ± 1	4 ± 1	6.4 5	4.1 0	1.4 5	2.2 5	7.9 3	11.3 7	0.5 6 3	
K_2	3.5 0				4.9 4	4.0 3	1.4 6	2.9 6	7.5 7	11.1 4	0.7 4 0	
K_3	4.5 0				4.0 3	3.9 7	1.3 8	3.4 2	7.3 6	11.1 6	0.8 5 5	
T_1	2.5 0	T			6.4 9	4.6 3	1.6 9	2.6 0	8.5 0	9.9 3	0.6 5 0	
T_2	3.5 0				5.0 6	4.4 3	1.6 3	3.2 2	7.9 8	10.1 0	0.8 0 5	
T_3	4.5 0				4.1 5	4.2 3	1.6 7	4.0 2	7.3 0	10.0 2	1.0 0 5	
F	3.5 0	F	4.0 8	4.1 5	1.5 3	3.7 5	7.4 0	10.4 5	0.9 3 8			
S	3.5 0		S	4.2 0	4.2 7	1.7 2	4.1 0	7.3 1	4.9 8	1.0 2 5		



図一 純引張試験用供試体



図二 熱膨張測定試験装置

3. 結果および考察

(1) 圧縮強度および割裂引張強度試験

a) 圧縮強度

圧縮強度と積算温度および有効材令の関係を図-3に示す。ここに、有効材令とは、リュッシュ¹¹⁾によって提示された次に示す式で求められる材令であり、20°C一定の条件下で養生された場合の材令に対応する(以下、これを単に材令と称す)。

$$t_e = K \cdot \sum [\Delta t (T + 10) / 30] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

t_e : 有効材令 (日)

K : セメントの硬化速度の影響を示す係数 (普通セメント $K=1$)

T : コンクリートの温度 (°C)

Δt : コンクリートの温度が $T^\circ\text{C}$ である日数 (日)

図-3より、 K, T シリーズとも、各配合に対し $M \leq 10^4 \text{C} \cdot \text{h}$ の範囲においては、 σ_c と M の間にほぼ直線関係が認められる。ただし、水中養生と気中養生では、強度発現の程度が異なる。

いま、各配合の強度を図中の細線のように直線近似し、その近似式を $\sigma_c = A \log M - B$ とすると、定数 A, B は図-4に示すように、 C/W の一次式で示すことができる。したがって、 $M \leq 10^4 \text{C} \cdot \text{h}$ の範囲において、圧縮強度は次式で与えられる。

(K シリーズ)

水中: $\sigma_c = (101 C/W + 53) \log M - (215 C/W + 229) \dots\dots\dots (2)$

気中: $\sigma_c = (16 C/W + 169) \log M - (-58 C/W + 593) \dots\dots\dots (3)$

(T シリーズ)

水中: $\sigma_c = (149 C/W - 35) \log M - (338 C/W - 2) \dots\dots\dots (4)$

気中: $\sigma_c = (79 C/W + 55) \log M - (130 C/W + 252) \dots\dots\dots (5)$

これらの式における定数 A, B は、骨材特有の値と考えられる。このように、圧縮強度は、ある骨材に対して C/W をパラメーターとして、一般形 $\sigma_c = A \log M - B$ で近似されるものと推定される。

図-5に、圧縮強度変化率 ((水中養生強度-気中養生強度) × 100 / 水中養生強度) β と積算温度 M の関係を示す。各配合について変化率を図中の細線のように近似し、一般形を $\beta = a \log M - b$ と仮定すると、定数 a, b は表-3のようになる。これらの定数と C/W の間にも、圧縮強度の場合と同様、図-4と同じような直線関係が確認され、これらを整理すると、気中養生による圧縮強度変化率は次式により示される。

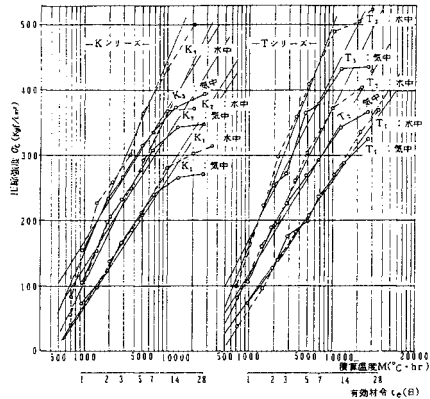


図-3 圧縮強度と積算温度および有効材令との関係

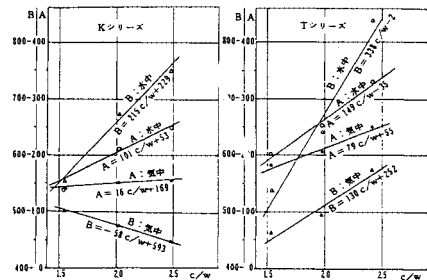


図-4 C/W と係数 A, B の関係

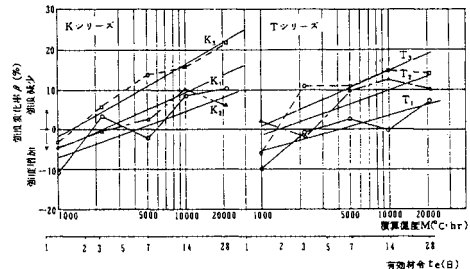


図-5 強度変化率と積算温度および有効材令との関係

K シリーズ: $\beta = (6.1 C/W + 2.4) \log M - (13.3 C/W + 21.3) (\%) \dots\dots (6)$

T シリーズ: $\beta = (5.9 C/W + 0.1) \log M - (19.1 C/W - 3.0) (\%) \dots\dots (7)$

図-5に示されるように、圧縮強度はほぼ $M \leq 1500 \text{C} \cdot \text{h}$ においては、水中養生の場合に比較して気中養生の方が増加し、逆に M がそれ以上になると気中養生の方が減少する。しかも、その減少率は高配合のコンクリートほど大きくなる傾向にある。このような現象は、一般的に、マスコンクリートの強度発現は早い、長期の強度の伸びが悪いことを示している。この実験の範囲では、材令 28 日において、養生方法の相違による強度低下率は約 5~20% であった。この強度低下率は、骨

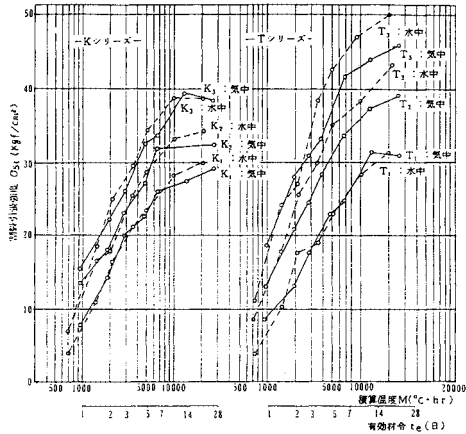


図-7 割裂引張強度と積算温度および有効材令との関係

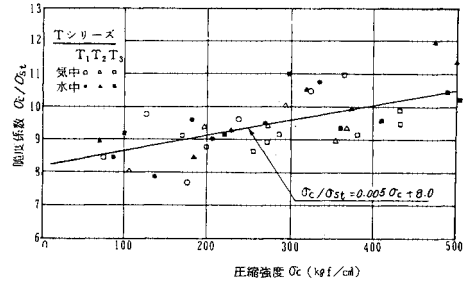
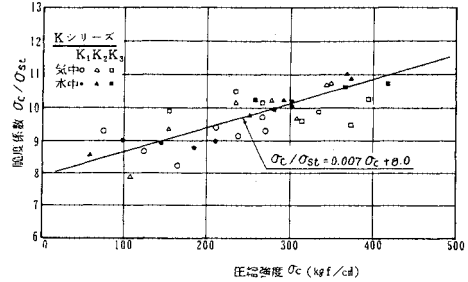


図-8 脆度係数と圧縮強度の関係

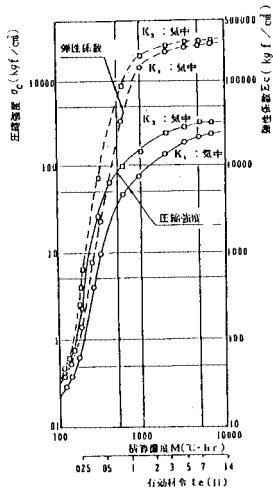


図-6 ごく若材令における圧縮強度および弾性係数と積算温度との関係

表-3 定数 a, b

	K ₁	K ₂	K ₃
a	11.5	14.5	17.6
b	41.5	48.5	53.9

	T ₁	T ₂	T ₃
a	9.2	11.5	14.3
b	25.3	36.0	42.0

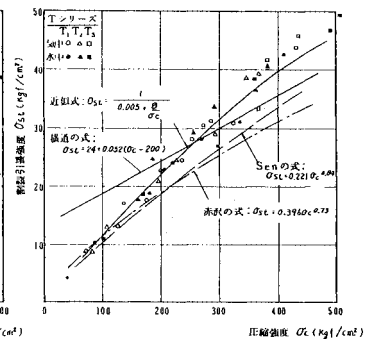
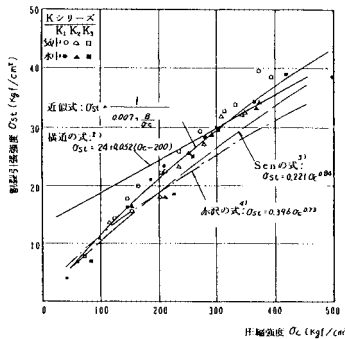


図-9 割裂引張強度と圧縮強度の関係

材あるいは温度履歴により異なるとも考えられるが、ここに示した配合ごとの低下率は一応の目安になるものと思われる。

また、ごく若材令を含む圧縮強度と弾性係数の発現状況を図-6に示す。圧縮強度は積算温度が約500°C・h、弾性係数は約1000°C・hまでの増加が非常に顕著であり、しかも、それらの増加傾向はほぼ等しくなっている。このように、両者とも有効材令約1日までの増加がきわめて大きいことが特徴である。

b) 割裂引張強度

図-7に割裂引張強度と積算温度および材令の関係を示すが、両者の間には圧縮強度の場合と同様な関係がみられる。また、脆度係数と圧縮強度、および割裂引張強

度と圧縮強度の関係をそれぞれ図-8および図-9に示す。

図-8において、脆度係数と圧縮強度の関係を直線に近似すると、次式のように与えられる。

$$K \text{ シリーズ} : \sigma_c / \sigma_{st} = 0.007 \sigma_c + 8.0 \dots \dots \dots (8)$$

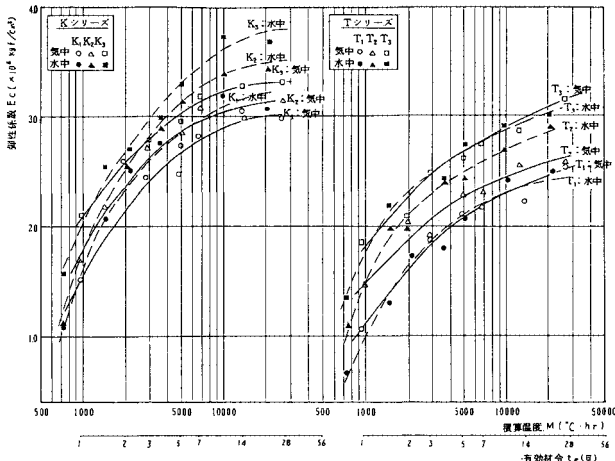
$$T \text{ シリーズ} : \sigma_c / \sigma_{st} = 0.005 \sigma_c + 8.0 \dots \dots \dots (9)$$

上式から、割裂引張強度と圧縮強度の関係は次のように表わすことができる。

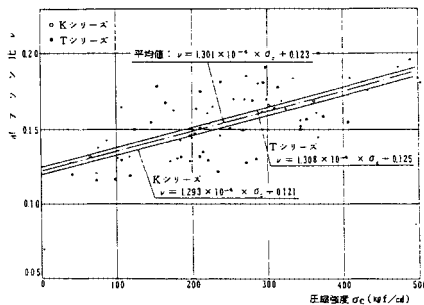
$$K \text{ シリーズ} : \sigma_{st} = 1 / (0.007 + 8 / \sigma_c) \dots \dots \dots (10)$$

$$T \text{ シリーズ} : \sigma_{st} = 1 / (0.005 + 8 / \sigma_c) \dots \dots \dots (11)$$

上の2式を図-9に示すが、比較的よい近似を与える。また、図-8から、脆度係数は養生方法の影響をあまり受けないと考えられる。



図一10 圧縮弾性係数と積算温度および有効材令との関係



図一12 ポアソン比と圧縮強度の関係

このような結果から、マスコンクリートの割裂引張強度は、まず、標準水中養生された供試体の圧縮強度を、前述した気中養生（マスコンクリートの養生に対応）による強度変化率により補正し、その補正した圧縮強度をもとに、図一9の $\sigma_c \sim \sigma_{st}$ の関係から推定することができる。

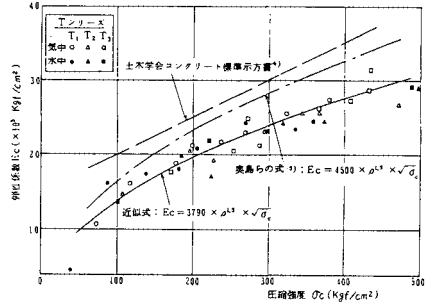
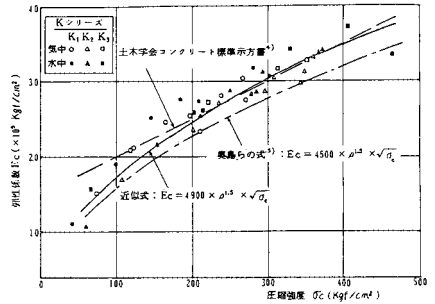
c) 圧縮弾性係数

図一10に圧縮弾性係数と積算温度および材令の関係を示す。弾性係数の増加は若材令において顕著であり、材令1日で28日の約1/2に達する。また、弾性係数も圧縮強度の発現と同様に、一般的に、積算温度が約1500°C・h以下の若材令においては、気中養生されたものの方が水中養生されたものよりも大きくなるが、その後は水中養生されたものの方が大きくなる。

また、圧縮強度と弾性係数の関係を図一11に示す。K、Tシリーズともに、両者間の関係を $E_c = C \cdot \rho^{1.5} \cdot \sigma_c^{0.5}$ (C:定数, ρ :比重) と仮定し近似式を求めると、次のようになる。

$$K \text{ シリーズ: } E_c = 4900 \rho^{1.5} \sigma_c^{0.5} \dots\dots\dots(12)$$

$$T \text{ シリーズ: } E_c = 3790 \rho^{1.5} \sigma_c^{0.5} \dots\dots\dots(13)$$



図一11 弾性係数と圧縮強度の関係

式(12)は従来の実験式^{4),5)}と比較してあまり差異は認められないが、式(13)はかなり小さめの値を与えている。これは、主に粗骨材の弾性係数の違いによるものと考えられる。このことは、コンクリートが骨材と母材モルタルからなる二相複合材料であり、コンクリートの弾性係数が骨材と母材モルタルの弾性係数によって顕著な影響を受けることを示していると考えられる。

d) ポアソン比

図一12にポアソン比と圧縮強度の関係を示す。かなりばらつきはあるが、ポアソン比は圧縮強度とともに増加する傾向にあり、ポアソン比の値は0.12~0.20の範囲にある。また、同図から、骨材および配合の相違による影響はほとんどないと考えられ、ポアソン比と圧縮強度の関係は、平均的に次式により与えられる。

$$\nu = 1.301 \times 10^{-4} \sigma_c + 0.123 \dots\dots\dots(14)$$

ここに、

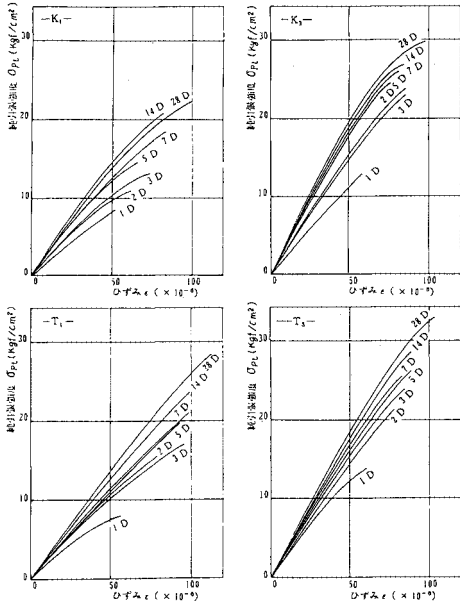
ν : ポアソン比

σ_c : 圧縮強度 (kgf/cm²)

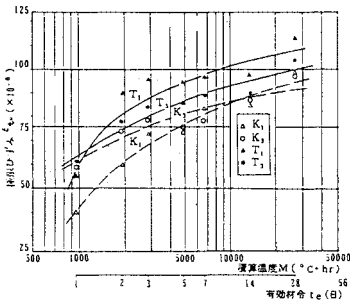
(2) 純引張強度試験

a) 純引張強度

配合別に各材令ごとの応力とひずみ関係を図一13に、極限引張ひずみと積算温度および材令の関係を図一14に示す。両図から、極限引張ひずみは材令とともに漸増し、材令28日では、Kシリーズで約100×10⁻⁶、Tシリーズで約110×10⁻⁶に達する。この差は、文献⁸⁾にもあるように、主に骨材の影響と考えられる。また、図一14



図一13 純引張強度と引張ひずみとの関係

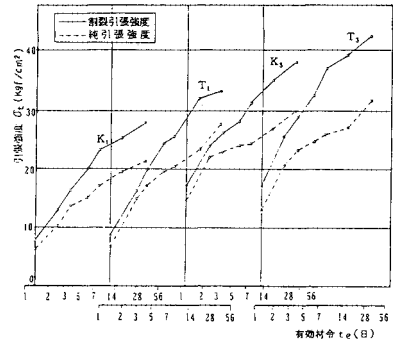


図一14 極限ひずみと積算温度および有効材令との関係

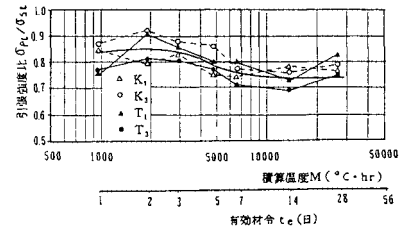
から W/C が大きくなると、若材令時の極限引張ひずみが小さくなる傾向にあることがわかる。

図一15に割裂引張強度および純引張強度と材令の関係を、図一16に引張強度比 σ_{pt}/σ_{st} と積算温度および材令の関係を、さらに、図一17に純引張強度と割裂引張強度の関係を示す。

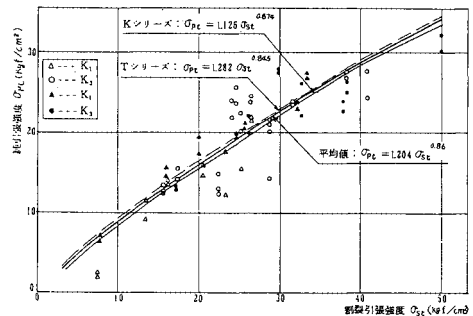
これらの図から、一般的に、純引張強度は割裂引張強度より小さく、その差は引張強度の増加、すなわち、積算温度の増加につれて漸増する傾向にある。これは、純引張強度の伸び率が、割裂引張強度のそれに比べて小さいことを示している。また、図一16から、材令28日において純引張強度は、割裂引張強度に比べ20~30%低くなる。これは既往の実験結果⁶⁾と同様な結果となった。図一17から、純引張強度と割裂引張強度との関係式を求めると、次のように与えられる。



図一15 引張強度と有効材令の関係



図一16 引張強度比と積算温度および有効材令との関係



図一17 純引張強度と割裂引張強度との関係

$$K \text{ シリーズ: } \sigma_{pt} = 1.126 \sigma_{st}^{0.874} \dots\dots\dots (15)$$

$$T \text{ シリーズ: } \sigma_{pt} = 1.282 \sigma_{st}^{0.845} \dots\dots\dots (16)$$

両式は比較的近似しているため、この2式の平均値をとると次式によって示される。

$$\sigma_{pt} = 1.204 \sigma_{st}^{0.86} \dots\dots\dots (17)$$

いま、割裂引張強度に対する純引張強度の低下率を β' とすると、

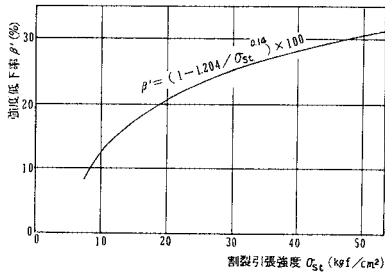
$$\beta' = (\sigma_{st} - \sigma_{pt}) \times 100 / \sigma_{st} \text{ (\%)} \dots\dots\dots (18)$$

で表わされる。したがって、式 (17) を代入して整理すると、

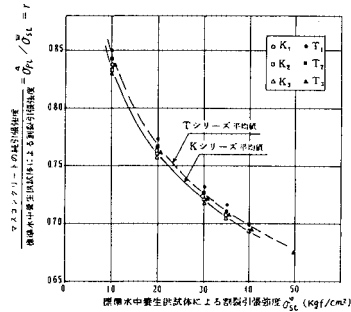
$$\beta' = (1 - 1.204 / \sigma_{st}^{0.14}) \times 100 \text{ (\%)} \dots\dots\dots (19)$$

となる。この関係を図一18に示す。なお、本試験では割裂引張強度 σ_{st} は約 7.5 kgf/cm² 以上であり、式 (17)、(19) はこの範囲で有効である。

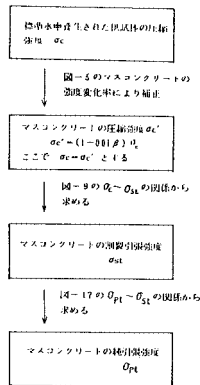
また、図一19に従い標準水中養生供試体の割裂引張



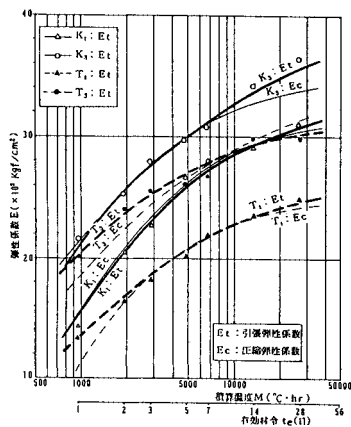
図一18 割裂引張強度に対する純引張強度の低下率と割裂引張強度の関係



図一20 標準水中養生供試体の割裂引張強度に対するマスコンクリートの純引張強度の比



図一19 マスコンクリートの純引張強度の推定フロー図



図一21 弾性係数と積算温度および有効材令との関係

強度から、マスコンクリートの純引張強度を推定する算定式を求めると以下のようなものである。すなわち、式(2)、(4)、(6)、(7)、(8)、(9)および(17)から、各シリーズに対し、標準水中養生供試体の割裂引張強度に対するマスコンクリートの純引張強度の比 γ を求めると、次のように与えられる。

$$\gamma = \sigma_{st}^w / \sigma_{st}^w = 1.204 (\sigma_{st}^w)^{0.86} / \sigma_{st}^w \dots \dots \dots (20)$$

ここに、Kシリーズに対し、

$$\sigma_c^w = 8 \sigma_{st}^w / (1 - 0.007 \sigma_{st}^w)$$

$$\log M = (\sigma_c^w + 215 C/W + 229) / (101 C/W + 53)$$

$$\beta = (6.1 C/W + 2.4) \log M - (13.3 C/W + 21.3)$$

$$\sigma_c^a = (1 - 0.01 \beta) \sigma_c^w$$

$$\sigma_{st}^a = 1 / (0.007 + 8 / \sigma_c^a)$$

Tシリーズに対し、

$$\sigma_c^w = 8 \sigma_{st}^w / (1 - 0.005 \sigma_{st}^w)$$

$$\log M = (\sigma_c^w + 338 C/W - 2) / (149 C/W - 35)$$

$$\beta = (5.9 C/W + 0.1) \log M - (19.1 C/W - 3.0)$$

$$\sigma_c^a = (1 - 0.01 \beta) \sigma_c^w$$

$$\sigma_{st}^a = 1 / (0.005 + 8 / \sigma_c^a)$$

ここに、添字 w および a は、それぞれ水中養生および気中養生(マスコンクリートに対応)を示す。

図一20は、式(20)から両シリーズの γ を求めて、

割裂引張強度 σ_{st}^w と関連づけたものである。図から、 γ は両シリーズともに割裂引張強度の増加、すなわち、材令の増加とともに減少傾向にあることがわかる。実用の範囲では、その減少率は約15~30%程度である。

このように、ある材令における標準水中養生供試体の割裂引張強度から、実際のマスコンクリートの純引張強度を推定する場合、材料あるいは配合により相違するとも考えられるが、図一20に示す γ により補正を行い算定するのが一方法と考えられる。

b) 引張弾性係数

図一21に、引張弾性係数と積算温度および材令の関係を示す。図中に細線で前述の圧縮弾性係数も示すが、KシリーズとTシリーズを比較すると、若材令において、引張および圧縮弾性係数とも、その伸び率はTシリーズの方が小さくなる傾向にあることがわかる。

若材令時の弾性係数発現は、複合材料としてのセメントペーストの特性の影響が顕著で、特に、このセメントペーストと骨材の付着強度の大小に関係があると思われる。したがって、この付着強度の大きなTシリーズの方が、この時期の弾性係数の発現割合が大きくなり、そ

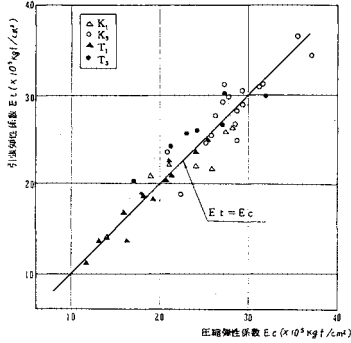


図-22 引張弾性係数と圧縮弾性係数の関係

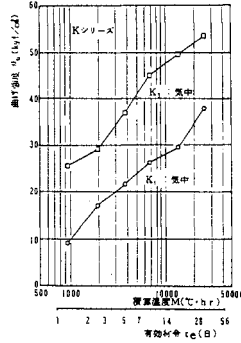


図-23 曲げ強度と積算温度および有効材令との関係

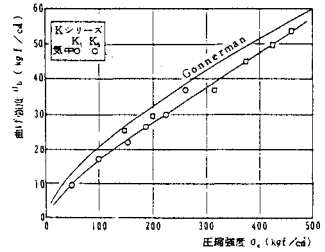


図-24 曲げ強度と圧縮強度の関係

の伸び率としては小さくなったものと考えられる。

また、引張弾性係数 E_t と圧縮弾性係数 E_c の関係を図-22 に示す。従来の文献⁽⁷⁾は、引張弾性係数は圧縮弾性係数に比べて小さいとするものが多いが、本研究では、ほぼ同様となり次の関係式が得られた。

$$E_t = E_c \dots\dots\dots (21)$$

(3) 曲げ強度試験

図-23 に曲げ強度と積算温度および材令の関係を示す。同図から、圧縮および引張強度の場合と同様、両者の間にはほぼ直線関係が認められるが、比較的長期における強度の伸びは、これらの強度の場合とは異なり、ほとんど鈍化する傾向がないことがわかる。

また、図-24 は曲げ強度と圧縮強度の関係を示す。同図に、Gonnerman¹⁰⁾の実験結果も示すが、本試験の結果は、これとはほぼ類似している。また、配合による差はほとんどみられない。

(4) 熱膨張係数測定試験

図-25 に、各種骨材を用いたコンクリートの硬化過程における自由膨張時、および収縮時の温度とひずみの関係を示す。図に示されるように、いずれのシリーズの場合も、温度上昇過程においては、凝結前後に曲線の勾配が大きく変化している。これは、凝結前の熱膨張係数がかなり大きいことを示している。すなわち、セメントペーストの熱膨張係数は $(10\sim 20) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 程度であり、骨材のそれは $(6\sim 12) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 程度⁹⁾であるから、凝結前の温度変化量約 5°C 以下 ($M \leq \text{約 } 300^\circ\text{C}\cdot\text{h}$) のごく若材令時のコンクリートの熱膨張機構は、セメントペーストに大きく依存していると考えられる。また、同図にみられるように、各種コンクリートのひずみと温度の関係は、近似的に3本の直線により示され、しかも、温度安定時の収縮ひずみは、骨材の種類によって大きく異なることがわかる。このような結果から、実際のマスコンクリート構造物においては、同一の温度変化に対しても、使用骨材により温度安定時の収縮ひずみが大きく

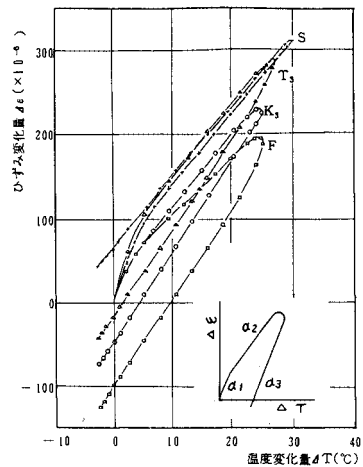


図-25 各種骨材を用いたコンクリートの硬化過程における温度とひずみの関係

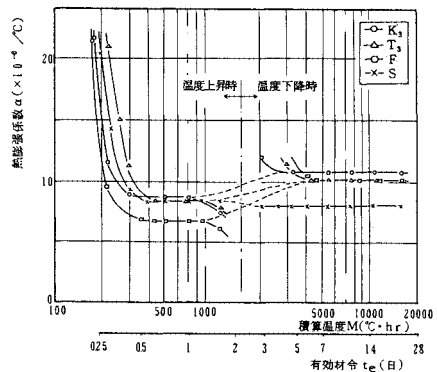


図-26 各種骨材を用いたコンクリートの熱膨張係数の経時変化

異なることが予想される。

図-25 で、各曲線の種々の材令における接線として求めた熱膨張係数の経時変化を図-26 に示す。同図に

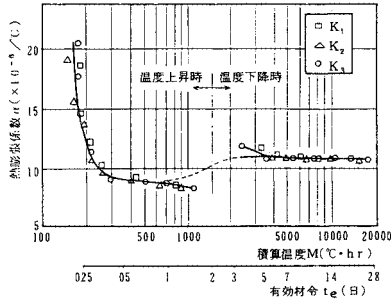


図-27 K シリーズの熱膨張係数の経時変化

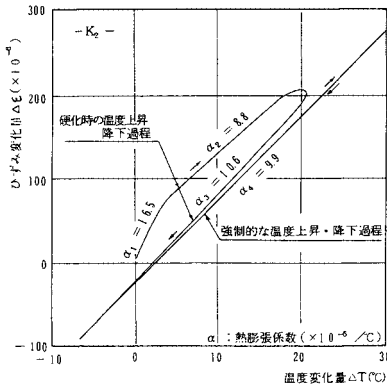


図-28 硬化時および強制的な温度変化時における温度とひずみの関係

みられるように、熱膨張係数は凝結前後で大きく変化し、最高温度到達前にある一定値に達した後、温度降下過程に入り、人工軽量骨材の場合を除き、これより幾分大きな一定値をとる。なお、同図の破線の区間は、図-25において温度が上昇から下降に変化し、 $\Delta\epsilon \sim \Delta t$ の関係がループとなる区間である。骨材により、このようなループ形状はかなり異なっており、このような現象がコンクリートのいかなる特性により生じるか不明であり、今後の研究課題と考えられる。

図-27は、K シリーズの熱膨張係数の経時変化を示す。一般に、熱膨張係数は単位セメント量を増すと大きくなる³⁾といわれているが、本研究の範囲 ($C=225 \sim 342 \text{ kg/m}^3$) では、ほぼ同等とみなしてよいと考えられ、温度上昇時で $(20 \sim 8.8) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、下降時で約 $10.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ となった。

図-28は、K₂において温度が降下し安定した後、温床線により加熱し、コンクリート温度を再度上昇・降下させた場合のひずみと温度の関係を示す。再温度履歴時の熱膨張係数は、上昇および下降時ともほぼ同様で、その値は初期温度下降時の値より幾分小さくなった。

4. まとめ

本研究は、マスコンクリートの諸物性を明確にする目的で行ったものであり、今回の研究で得られた結果を要約すると、以下のようである。

(1) 一般に、マスコンクリートの圧縮および割裂引張強度は、標準水中養生されたそれらの値に比べ、有効材令約1.5日程度のごく若材令においては大きく、逆に、それ以後においては小さくなる。この強度変化率は、富配合のコンクリートほど、すなわち、 W/C の小さなほど、材令の増加とともに大きくなる傾向にある。

(2) 標準水中養生およびマスコンクリートの圧縮強度は、 C/W をパラメーターとして一般形 $\sigma_c = A \log M - B$ で、割裂引張強度は、圧縮強度をパラメーターとして一般形 $\sigma_{st} = 1/(C + D/\sigma_c)$ で近似されるものと推定される。

(3) 純引張強度は割裂引張強度に比べ小さく、両者の関係は $\sigma_{pt} = 1.204 \sigma_{st}^{0.86}$ によって示すことができる。また、その低下率は材令の増加とともに大きくなり、材令28日で約20~30%程度となる。0.1~0.2 kgf/cm²/sの漸増引張過程におけるマスコンクリートの極限引張ひずみは、材令の増加とともに大きくなり、材令28日で $(100 \sim 110) \times 10^{-6}$ 程度であった。

(4) マスコンクリートの弾性係数も、一般のコンクリートと同様、圧縮強度と関係づけることができるが、この圧縮強度は、マスコンクリートの影響による強度変化率を導入し補正する必要がある。また、引張弾性係数と圧縮弾性係数はほぼ同等であった。

(5) 圧縮過程におけるポアソン比は、ばらつきは大きいですが、圧縮強度との間にはほぼ直線関係が認められ、 $\nu = 1.301 \times 10^{-4} \sigma_c + 0.123$ によって示すことができる。

(6) 各種骨材を用いたマスコンクリートの硬化過程における熱膨張係数は、材令の経過とともにかなり大きく変化するが、近似的には3種の値で表示することができる。これらの値は、一般的に、温度上昇時の凝結前後で大きく変化した後、最高温度到達までにある一定値をとり、その後、温度下降過程に入ると、これより幾分大きな値となる。

(7) 川砂利使用の場合に比べ、砕石を使用した場合脆化係数が小さくなり、しかも、極限ひずみが増大する。すなわち、砕石使用により、引張強度および引張ひずみ能力ともに向上する傾向がある。また、弾性係数においては、骨材の影響が顕著にみられたが、これは主に、骨材自身の弾性係数の差に基づくものと考えられる。

(8) 以上の事項をもとに、マスコンクリートの諸物性を求める方法を、以下のように提案した。

a) 圧縮強度 σ_c 、割裂引張強度 σ_{st} および純引張強

度 σ_{pt}

これらは、図—19のフロー図に従い求めることができる。

b) 極限引張ひずみ ϵ_{tu}

図—14の $\epsilon_{tu} \sim M$ の関係から求めることができる。

c) 圧縮弾性係数 E_c および引張弾性係数 E_t

骨材により相違することが考えられるため、実験により求めるのが好ましいが近似的には図—11より求めることができる。また、 $E_c = E_t$ としてよい。

d) ポアソン比 ν

図—12の $\nu \sim \sigma_c$ の関係から求めることができる。

e) 熱膨張係数 α

骨材により相違することが考えられるため、実験あるいは他の実験結果より求めるのが好ましいが、その経時変化は図—26 のようである。

謝 辞：本研究を行うにあたり、日本国土開発（株）近藤時夫博士から貴重な助言とご指導を受けた。また、同技術研究所の浅沼 潔および横田季彦氏に、実験ならびにデータのまとめに関し多大のご協力をいただいた。これらの皆様に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 岡田 清・小林和夫・宮川豊章・村本吉弘：マスコンクリートの基本的特性に関する一考察，セメント技術年報，

第34号，pp.230～233，1980。

- 2) 横道英雄・藤田嘉夫：鉄筋コンクリート工学，pp.25，共立出版，1978。
- 3) 岡田 清・六車 熙：コンクリート工学ハンドブック，pp.398，朝倉書店，1981。
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.23，1980。
- 5) 奥島正一・小坂義夫：人工軽量骨材コンクリートの力学的性質，材料，Vol.15，No.157，pp.691～698，1966。
- 6) 児島孝之・矢村 潔：コンクリートの引張特性に関する2，3の実験，セメント技術年報，第25号，pp.249～253，1971。
- 7) 児島孝之・矢村 潔・浦沢義彦：引張応力下におけるコンクリートの力学的特性について，セメント技術年報，第24号，pp.290～295，1970。
- 8) Houghton, D.L. : Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Vol.73, No.12, pp.691～700, Dec. 1976.
- 9) Neville, A.M. (後藤幸正・尾坂芳夫訳)：コンクリートの特性，pp.370～374，技報堂出版，1979。
- 10) 近藤泰夫・坂 静雄：コンクリート工学ハンドブック，pp.307～312，朝倉書店，1965。
- 11) Rüschi, H. (百島祐信訳)：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，pp.31～34，鹿島出版会，1976。
- 12) 竹下治之・浅沼 潔・横田季彦：マスコンクリート物性の基礎的特性について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.27～34，日本コンクリート工学協会，1982。

(1984. 2. 2・受理)