

セメント・モルタルの硬化初期性状に関する研究 (圧縮応力-歪曲線についての一考察)

橋 本 敏 秀*, 大 岸 佐 吉**, 小 野 博 宣*

A Study on the Properties in Early Hardening of Cement Mortar -A Consideration on the Stress Strain Curves-

Toshihide HASHIMOTO*, Sakichi OHGISHI** and Hironobu ONO*

(Received September 20, 1968)

This paper describes the values obtained by the following two methods concerning the cement mortar at 10°C moist curing.

- (1) The Bingham yield stress σ_{Bi} and true yield stress σ_T are led by the flowing curves of $D(d^2\varepsilon/d\sigma^2)$ to σ_B , which are obtained from the analytical results for the distribution function of the plastic stress of the cement mortar.
- (2) The $\varepsilon/\sigma_T - \varepsilon$ curves are shown by changing the coordinate axes of the compressive stress strain curves from $\sigma - \varepsilon$ to $\varepsilon/\sigma_T - \varepsilon$, and the first bending point stress σ_1 and the second bending point stress σ_2 on the curves are pointed out.

It follows from the above results that the ratio σ_{Bi}/σ_B is about 0.8, σ_2/σ_B is about 0.9, and the ratio σ_T/σ_B or σ_1/σ_B increases at later ages.

1. 序

筆者らは、セメント・モルタルの硬化初期性状について、養生湿度、水セメント比、各々の変化に対する、強度、弾性係数（動的・静的）、粘性、塑性について研究を継続中であり、一部はすでに報告した。¹⁾²⁾ 一連の実験の中で静的圧縮破壊強度試験により得た応力-歪曲線について若干の考察を行うものである。硬化したコンクリートの応力-歪曲線に関連した研究は多くその中で、応力-歪（ $\sigma - \varepsilon$ ）の関係式についての理論解析の研究は多くみられ³⁾、他方応力度-歪度曲線と終局強度の研究⁴⁾等もみられる。さらに応力-歪曲線より、弾性領域（又は限）、弾塑性領域、塑性領域について解析する方法として、（Ⅰ）応力-歪の関係は、座標軸を変えてその上に投象する、そしてそのグラフの特性を調べる方法⁵⁾⁶⁾（Ⅱ）応力-歪線図は2回微分することにより塑性応力の分布函数 $\phi(S)$ を求めるコンクリートのレオロジー研究による方法⁷⁾とがある。

筆者は、すでに 20°C 養生における塑性降伏値については（Ⅱ）の方法で求めた。今回は 10°C 養生におけるセメントモルタルの応力-歪線図に関して（Ⅰ）と（Ⅱ）の方法（但し（Ⅰ）の文献3）の方法については割愛する）について行い両者より求めた値を比較検討した。

2. 実験方法

(1) 使用材料及び調合

○セメント：普通ポルトランドセメント

比 重	曲げ強度 kg/cm^2			圧縮強度 kg/cm^2		
	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
3.16	32.6	47.0	70.0	134	233	396

○砂：豊浦産標準砂

○調合

W/C (%)	重 量 比	実 フロー値	W/C (%)	重 量 比	実 フロー値
30	セメント：砂：水 1：2：0.3	10.2cm	60	セメント：砂：水 1：2：0.6	10.7cm
40	1：2：0.4	16.6cm	70	1：2：0.7	24.6cm
50	1：2：0.5	12.2cm	90	1：2：0.9	オーバー

*本学建築学科 (Department of Architecture)

**名古屋工業大学 (Nagoya Institute of Technology)

(2) 試験体寸法, 個数及び養生方法

○寸 法: $5\phi \times 10\text{cm}$, 個数: 各材令 3~4 個

(試験材令, 2hr, 4hr, 6hr, 8hr, 10hr, 12hr, 18hr, 1day, 3day, 7day, 28day, 但し W/C60% は 4hr 材令以降, 70% は 6hr 材令以降, 90% は 8hr 材令以降である。)

○養生方法

恒温恒湿槽に $10^\circ\text{C} \pm 2$, 湿度 80% で養生

(3) 試験方法

○使用試験機

10kg まで土質用一軸圧縮試験機を使用

(最大容量 100kg, 荷重読取ピラーピングリング式)

100kg 以上, 30 t 電子管式万能試験機を使用

(600kg, 1,500kg, 3 t, 6 t, 15 t, 30 t の 6 段切換)

○歪測定: 一軸試験—ダイヤルゲージ $\frac{1}{100}\text{mm}$

万能試験機—差動トランス $\frac{1}{250}\text{mm}$

○圧縮荷重の荷重速度

強度 $F \text{ kg}$	$\dot{\sigma} \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$	強度 $F \text{ kg}$	$\dot{\sigma} \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$
100kg まで	0.015~0.08	500~1,000kg	1.0~2.0
100~500kg	0.10~1.00	1,000kg 以上	2.0~4.0

○その他

材令 24hr まで試験体は, 試験直前に脱型した。2hr

~12hr 材令の試験体は特に注意を払った。

(4) 本論で使用する主な記号

F : 強度 kg

σ : 応力(圧縮) kg/cm^2

$\dot{\sigma}$: 荷重速度 $\text{kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$

σ_B : 破壊応力 kg/cm^2

σ_1 : 第一折点応力 kg/cm^2

σ_2 : " "

σ_γ : σ/σ_B = 相対応力度

σ_{Bi} : ビンガム降伏応力 kg/cm^2

σ_T : 真の降伏応力 kg/cm^2

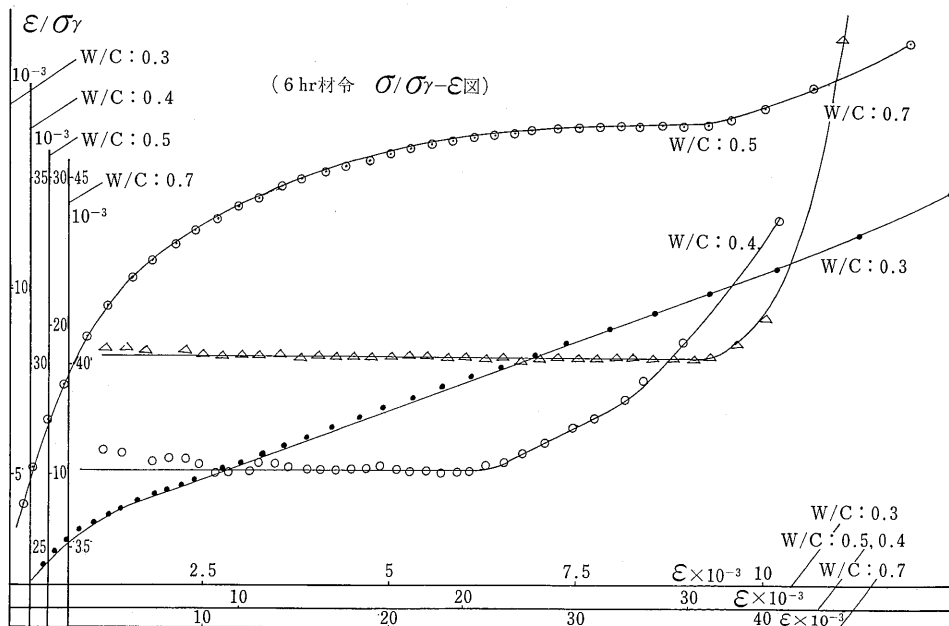
$\phi(s)$: 塑性応力分布函数

$\dot{\epsilon}(\sigma) : \frac{d\epsilon}{d\sigma} = \text{微分値}$

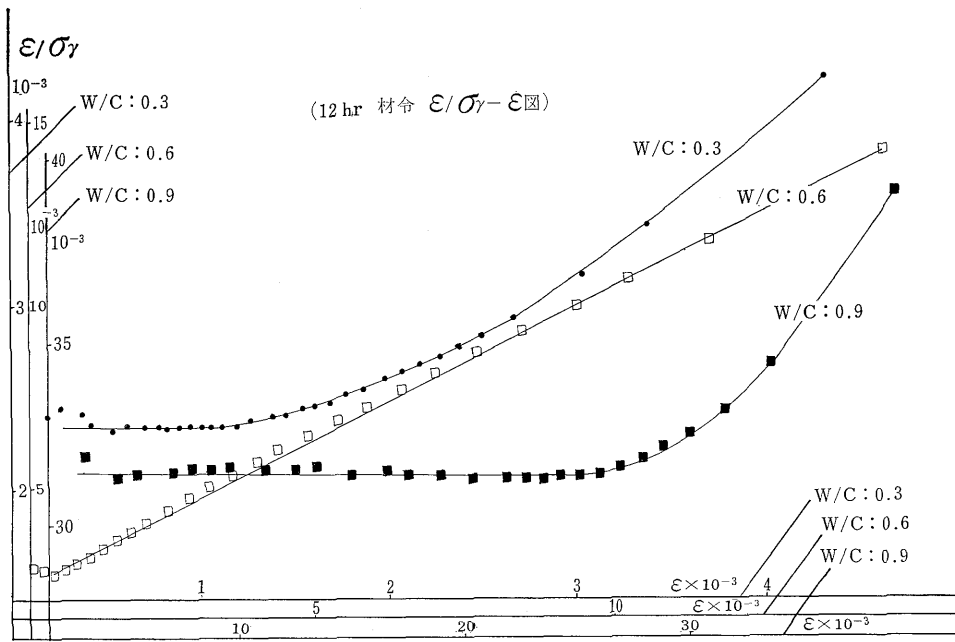
$\ddot{\epsilon}(\sigma) : \left(\frac{d\epsilon}{d\sigma}\right)^2 = \text{ " }$

3. 解析及び結果

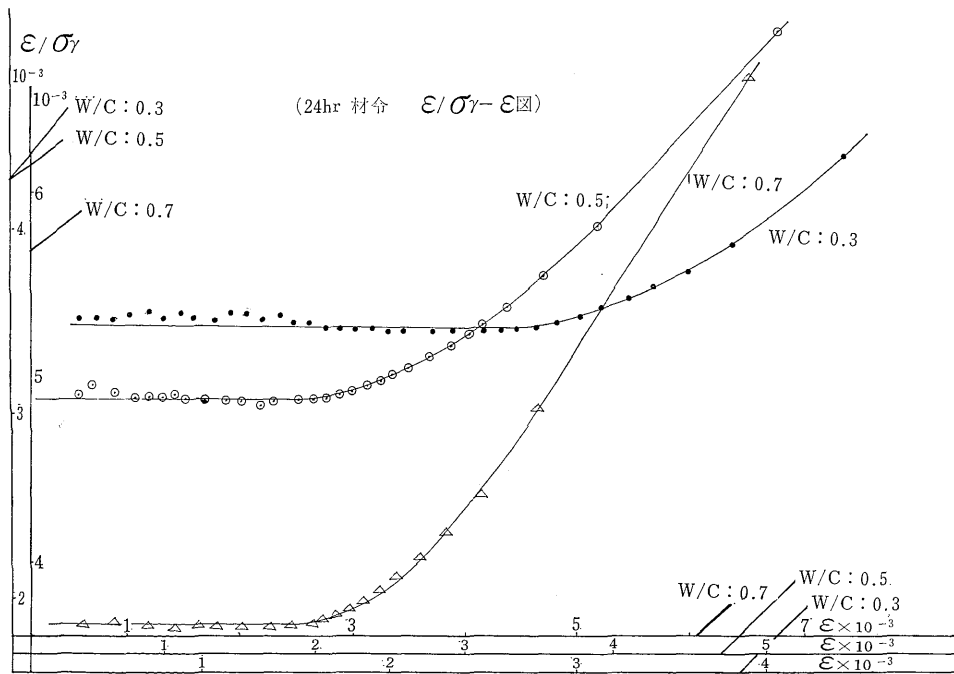
(I) の方法による応力—歪線図の解析は 各々の応力—歪曲線を ϵ_B について 40 等分しそれに対応する ϵ を求め, それを σ_γ で割り ϵ/σ_γ を求めた。そして ϵ/σ_γ と ϵ を座標軸として投象すると図 1~4 の如くとなる。



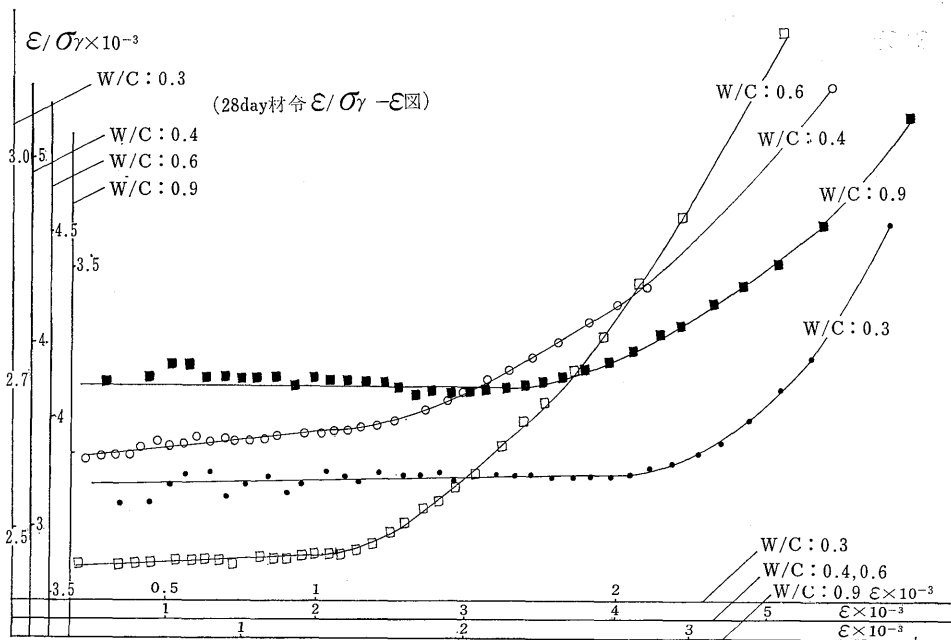
第 1 図



第2図



第3図



第4図

硬化したコンクリートについてみられたのと同様の傾向を若材令モルタルでも示す。特に強度約 $0.6\text{kg/cm}^2 \sim 3\text{kg/cm}^2$ の範囲において、なめらかな曲線、もしくは直線を描くことは注目に値する。約 0.6kg/cm^2 以前及び約 3kg/cm^2 以降の範囲では強度の70%~80%まで均一な性状を示し、そこから第一折点、第二折点と折曲がる個所がみられる。しかしはっきりとした折曲点のみみられる場合と、判断し難い場合とがある。(Ⅱ)の方法による応力-歪線の解析は(Ⅰ)により求めた σ_B の40等分点の各々についての微分係数を求め、かくして得られ $\dot{\epsilon}(\sigma) = \left(\frac{d\epsilon}{d\sigma}\right)$ を Curve fitting し更に同じ操作を繰り返して $\ddot{\epsilon} = \left(\frac{d\dot{\epsilon}}{d\sigma}\right)^2 = D$ を求めた。その値 D と σ_B とを座標軸として示される流動曲線をグラフに示したのが図5~図8である。20°Cの場合と同様、若材令よりほぼ硬化の進んだ材令まで同じように降伏値 σ_{Bi} , σ_T が求まった。

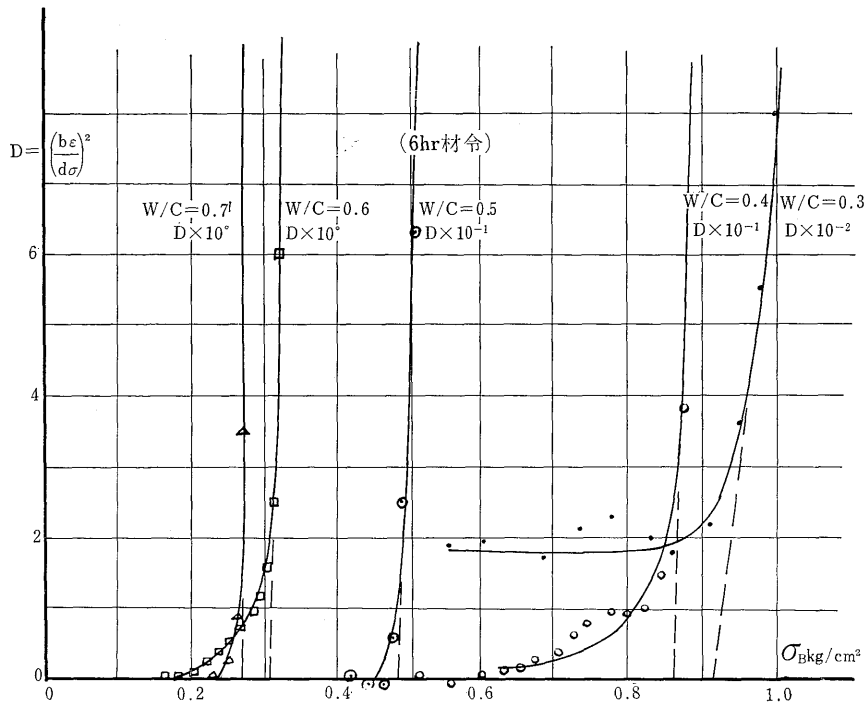
次に(Ⅰ)で求めた σ_1 , σ_2 と σ_B との関係をみると図9の如くであった。

これは強度と非常によく比例している。さらに σ_{Bi} と σ_B , σ_{BT} と σ_B の関係を示すと、これ又強度と同一

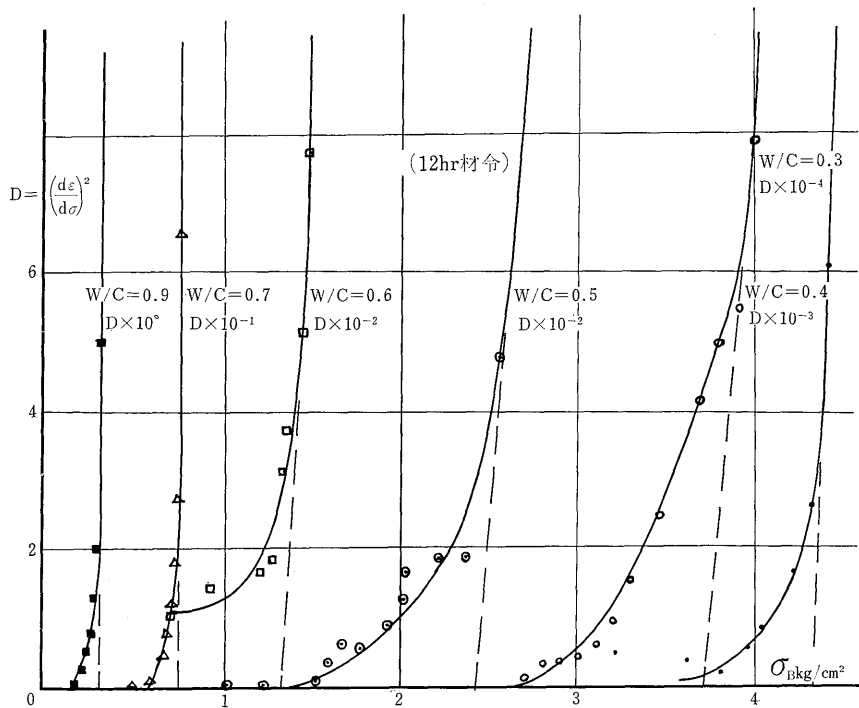
傾向を示している。さらに σ_1 と σ_2 , σ_{Bi} と σ_T の関係をみると強度大なるに従い接近した値をとる。

4. 考 察

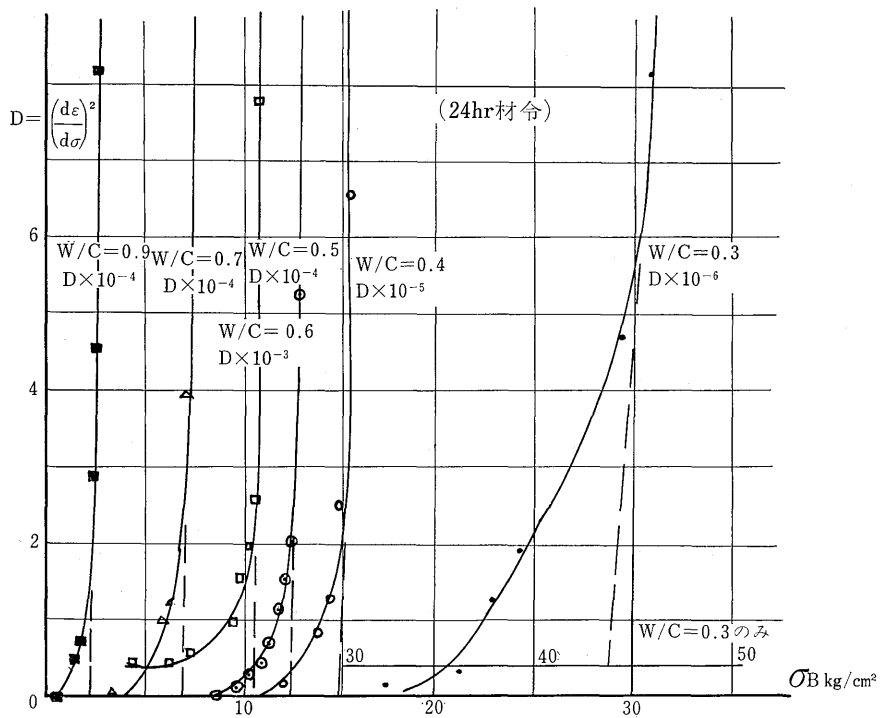
(1)の結果より $\sigma_B = 0.6 \sim 3\text{kg/cm}^2$ の範囲におけるセメント・モルタルは粘弾塑性物質として挙動すると考えられる。ところが $\sigma_B = 0.6\text{kg/cm}^2$ 未満の範囲及び 3kg/cm^2 以上の範囲ではほぼ弾塑性の挙動をすると思なすことが出来る。このことはモルタルの硬化途上で、まだセメントの化学反応が進まぬ材令では強度を支配するのは砂とセメントと水とで練られた状況でありその割合である、その後少しずつセメントの化学反応即ち硬化反応に破壊強度が支配されるように変化してゆく、そして最後にはセメントの水和反応が最も大きな強度決定上の支配力を持つと考えられる。 $\sigma_B = 0.6 \sim 3\text{kg/cm}^2$ の範囲はセメントの水和反応による支配力と、練り上げられた、水・セメント・砂の割合による支配力とが同じ程度であると考えられる。



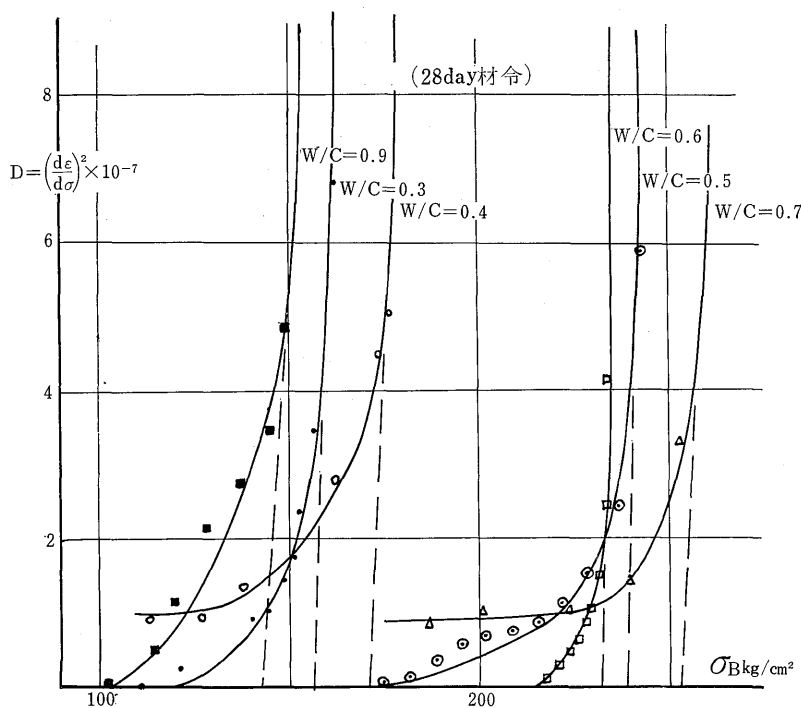
第5図



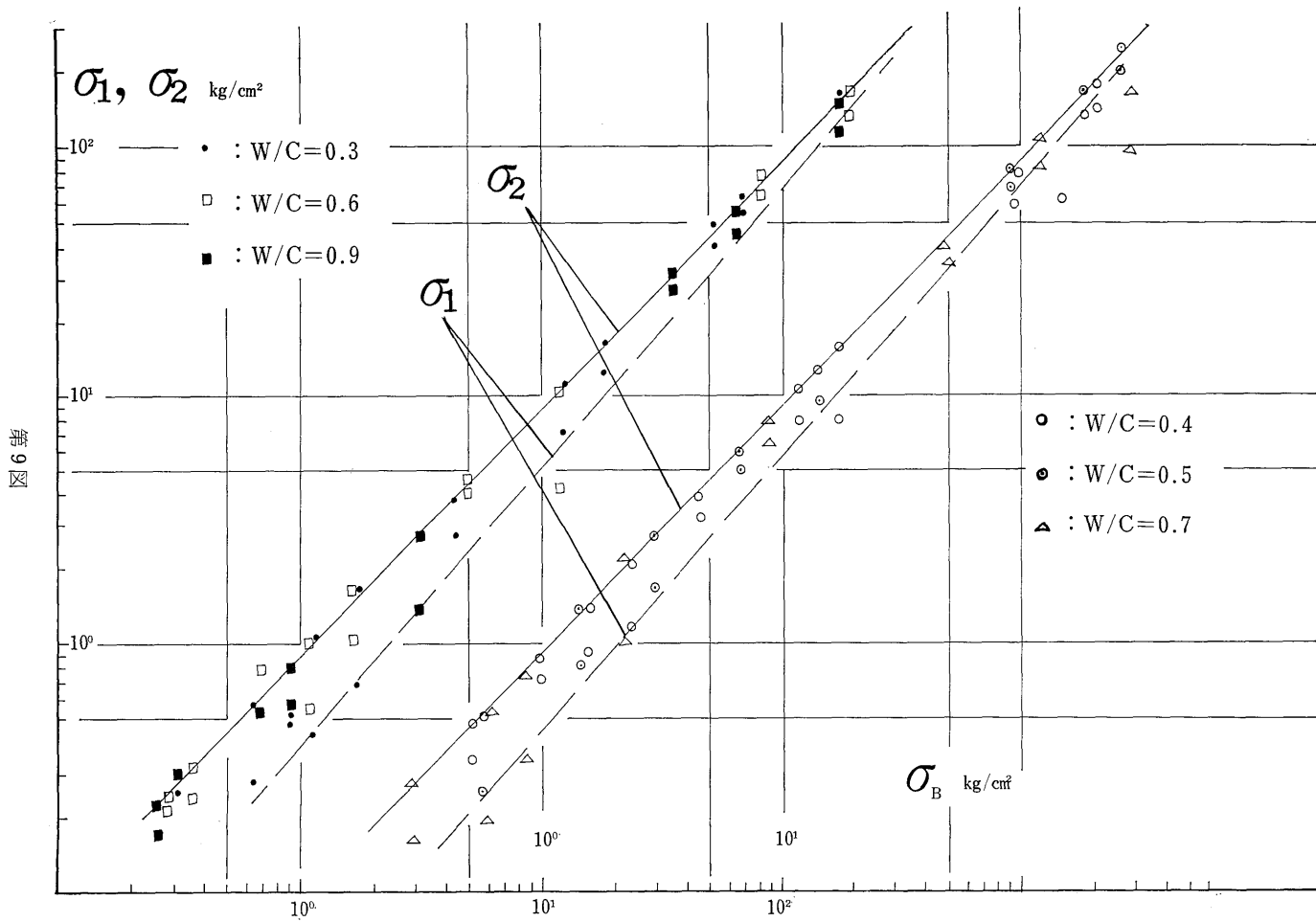
第6図

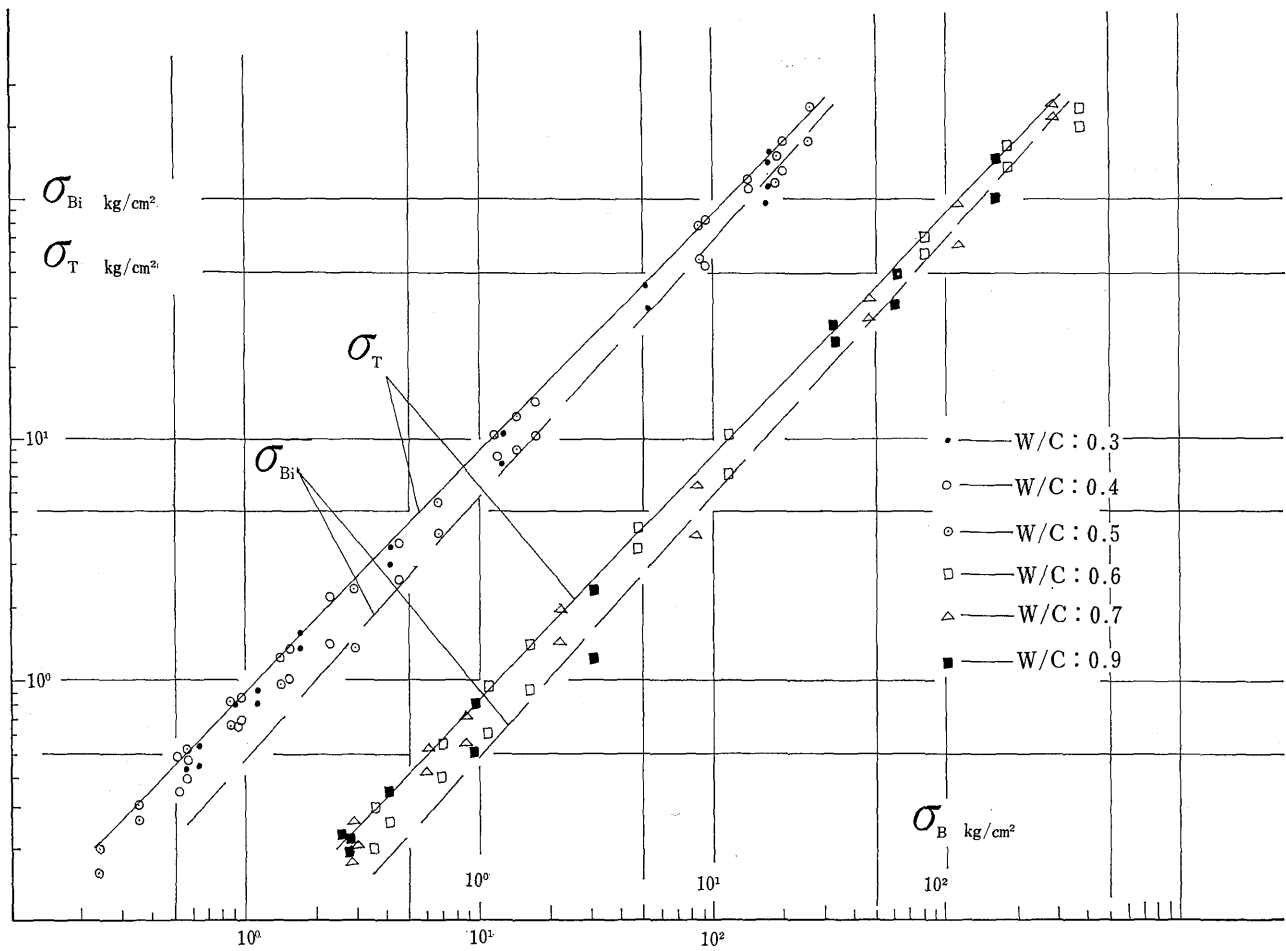


第7図

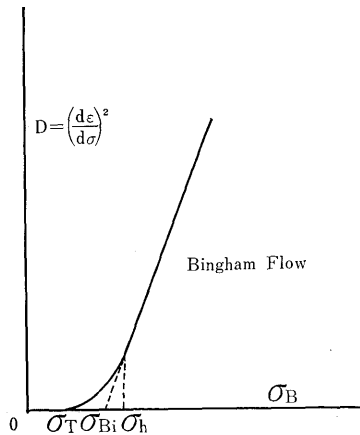


第8図





第10図



第11図

又他方ビンガム流動曲線が直線からいちじるしく離れる点を上限降伏値などと呼ぶ σ_h が第二折点即ち塑性限は、 $\sigma_2 > \sigma_{Bi}$ より流動曲線における σ_h を示すと考えられる。(図11参照) いづれにしてもさらに詳しく、正確に解析する為には、より一層正確な応力-歪線図を求めること、それには、若材令モルタル及びコンクリートの歪測定について研究を進める事が先決がある。(I)の方法はあくまでも、巨視的に、モルタル及びコンクリートの弾性限(領域)、弾塑性限、塑性限(領域)を確認する為にはよいと考える。

5. 結 び

この実験に関する限り、 10°C 養生におけるセメント・モルタルのビンガム降伏値は材令に関係なく σ_B の80

%前後であった。これは 20°C 養生の場合と同一の傾向である。(I)、(II)の方法で求めた σ_2 、 σ_{Bi} とも σ_B とはなはだよい対応を示した。(I)の方法で求めた σ_2 は σ_h と考える事が出来る。今後引続いて継続中の実験についても検討を加え、応力-歪の関係理論式への発展の糸口としたいと考えている。

おわりに、この実験に関して、試験機、実験室を使用させていただき、種々ご教示を受けた土木工学科河津教授をはじめ実験室の井口、愛知、牧の諸先生に感謝致します。又建築学科野末、伊佐治両氏、卒業研究の学生諸君の限りないご援助ご協力に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 大岸佐吉, 小野博宣「セメントモルタルの硬化初期性状に関する研究(1)」43年6月 東海支部研究報告
- 2) 同上 (2)
43年10月 学会 広島大会梗概集。
- 3) 小坂義夫「コンクリート非弾性挙動に関する基礎的研究」
建築学会論文集第67号
- 4) 坂, 奥島, 糸見「圧縮力を受けるコンクリート応力度-歪度曲線と終局強度に関する研究」建築学会論 No. 13, 昭和14年4月
- 5) 吉本 彰「コンクリートの変形に関する一実験」
土木学会誌40巻9号, PP.22~27, 昭和30年
- 6) 加賀美一二三「コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線の考察」
昭和33年 雑誌セメント・コンクリート
- 7) 大岸佐吉「コンクリートのレオロジーに関する研究(その3)」
建築学会論文集 第105号 昭和39年