

マイクロフィルム用資料

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3656号

土木研究所資料

超貧配合コンクリートの力学特性に関する調査

平成11年7月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1999) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

超貧配合コンクリートの力学特性に関する調査

ダ ム 部 部 長 上阪 恒雄
ダム構造研究室 室 長 永山 功
(前) 主任研究員 渡辺 和夫
研 究 員 西澤賢太郎

要 旨

近年、コスト縮減、環境負荷の低減、省資源などの社会的要請から、ダム建設の一層の合理化が望まれている。このような背景のもと、ダム構造研究室では、RCD工法をさらに発展させた超貧配合コンクリートを用いたダムの施工方法についての研究を進めている。

本報告書は、単位セメント量の多寡が超貧配合コンクリートの力学的性状に及ぼす影響を求めるために実施した各種実験結果についてとりまとめたものである。

キーワード：超貧配合コンクリート、単位セメント量、VC値、圧縮強度、三軸圧縮試験

はじめに

重力式コンクリートダムは堤体の自重と基礎岩盤のせん断抵抗を利用して作用外力に抵抗する構造物であり、特別に大規模なダムを除けば、堤体コンクリートの強度に対する要求はそれほど大きなものではない。そこで、重力式コンクリートダムの設計、施工においては、外部コンクリートで保護され、高い耐久性が要求されない内部コンクリートに RCD 用コンクリートのような単位セメント量を減じたコンクリートを使用することによって、温度応力などの問題を緩和し、また、ダム建設の経済化を図っている。

現在、RCD 用コンクリートの単位セメント量は一般に混和材を含めて 120 kg/m^3 程度に設定されている。しかし、RCD 用コンクリートの単位セメント量をどこまで減じることができるかについては、これまであまり体系的な研究がなされていない。そこで、RCD 用コンクリートの単位セメント量をさらに減じることができれば、コンクリートダム建設の経済性をさらに高めることができると考えられる。また、建設資材の中でも CO_2 の主要な発生源となっているセメントの使用量を抑制していくことは、環境に及ぼす負荷を軽減する上でも極めて効果的であると考えられる。

一方、近年、CSG (Cemented Sand & Gravel) と呼ばれるコンクリートとフィル材料の中間的な材料が、土質材料からのアプローチにより開発され、ダム建設工事においては仮設構造物の築造に利用され始めている。CSG は、比較的低い応力レベルから非弾性的な挙動を示すといわれており、単位セメント量の多寡がコンクリートの力学特性に及ぼす影響を把握することは、CSG などの超貧配合コンクリートを用いた構造物の設計体系を確立する上で極めて重要なことであると考えられる。

このような背景から、筆者らは、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートの力学的性質を求める実験を行い、コンクリートとして取り扱える配合の限界についての研究を行っている。本報告書は、現調査段階における検討結果をとりまとめたものである。

目 次

1	調査目的	1
2	調査の概要	2
2.1	単位セメント量が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響調査	2
2.2	単位セメント量の低減方法が超貧配合コンクリートの強度特性に及ぼす影響調査	2
2.3	大きな変形領域における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性に関する調査	2
3	単位セメント量が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響調査	3
3.1	調査方法	3
3.1.1	コンクリートの配合	3
3.1.2	使用材料	3
3.1.3	供試体作製方法	3
3.1.4	試験項目	4
3.2	調査結果	8
3.2.1	VC 値が 20 秒となるコンクリートの配合	8
3.2.2	一軸圧縮試験	8
3.2.3	割裂引張試験	12
3.2.4	三軸圧縮試験	14
	(1) 試験結果	14
	(2) 強度特性	14
	(3) 応力～ひずみ特性	25
4	単位セメント量の低減方法が超貧配合コンクリートの強度特性に及ぼす影響調査	33
4.1	調査方法	33
4.1.1	コンクリートの配合	33
4.1.2	使用材料	37
4.1.3	供試体作製方法	37
4.1.4	試験項目	37
4.2	調査結果	38
4.2.1	相対締固め密度	38
4.2.2	単位容積質量	38
4.2.3	圧縮強度	51
4.2.4	弾性係数	67
5	大きな変形領域における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性に関する調査	78

5.1	調査方法	78
5.1.1	コンクリートの配合および使用材料	78
5.1.2	供試体作製方法	79
5.1.3	試験項目	79
5.2	調査結果	80
6	まとめ	89

1 調査目的

重力式コンクリートダム設計・施工のさらなる合理化を検討するため、単位セメント量を極端に抑えた超貧配合コンクリートの力学的性状を把握することを目的として実験的検討を行った。まず2章では、本調査の概要を述べ、3章では、一軸圧縮試験、割裂引張試験、三軸圧縮試験の結果から、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートの力学特性について検討を加えた。次に4章では、単位セメント量の低減方法が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響について検討し、さらに5章では、大きな変形領域における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性について検討を加えた。

2 調査の概要

本調査試験では、超貧配合コンクリートの力学的性質について、大きく分けて以下の3種類の検討を行った。以下、それぞれの調査項目についての概要を示す。

2.1 単位セメント量が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響調査

本調査では、一軸圧縮試験、割裂引張試験、三軸圧縮試験を用いて、単位セメント量が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響について検討を行った。

2.2 単位セメント量の低減方法が超貧配合コンクリートの強度特性に及ぼす影響調査

本調査では、施工性を重視してコンシステンシーを一定として単位セメント量を変化させた場合と、セメントペーストの性状を重視して水セメント比を一定として単位セメント量を変化させた場合の2種類の方法で設定した配合の超貧配合コンクリートの強度特性について比較検討を行った。

2.3 大きな変形領域における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性に関する調査

本調査では、軸ひずみ 10%というコンクリートとしてはかなり大きな変形領域まで三軸圧縮試験を実施して、側方拘束圧下における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性について検討を行った。

3 単位セメント量が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響調査

本章では、単位セメント量の多寡が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響を求めるために実施した一軸圧縮試験、割裂引張試験、三軸圧縮試験の結果について報告する。

3.1 調査方法

3.1.1 コンクリートの配合

超貧配合コンクリートは、単位ペースト量が少ないため、超硬練りコンクリートとなることから、その締固めは RCD 用コンクリートの締固めと同様に振動ローラーによるものと考えられる。そこで、本調査においては、振動ローラー転圧を行う RCD 用コンクリートの締固め方法を基本として試験を実施した。

試験にあたっては、粗骨材最大寸法 150mm、単位セメント量 120kg/m^3 の代表的な RCD 用コンクリートの配合を 40mm でウェットスクリーニングした配合を基準として、単位セメント量を徐々に減じながら、20 秒の VC 値を確保するように単位水量を調整した。試験に用いたコンクリートの配合を表-3.1 に示す。ここで VC 値を 20 秒としたのは、ジャンカのない密実なコンクリートを得るためである。その結果、最も貧配合とした単位セメント量 70kg/m^3 ($G_{\max 150\text{mm}}$ の配合に換算した場合、単位セメント量 50kg/m^3 に相当) の配合では、水セメント比は 186 %となった。

表-3.1 コンクリートの配合

配合名	Gmax (mm)	目標VC値 (秒)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
						W	C+F	S	G
C175	40	20 ± 10	2.2 ± 1.4	67.4	44	118	175	938	1203
C140	40	20 ± 10	2.2 ± 1.4	87.9	44	123	140	945	1212
C105	40	20 ± 10	2.2 ± 1.4	120.0	44	126	105	955	1225
C70	40	20 ± 10	2.2 ± 1.4	185.7	44	130	70	963	1235

3.1.2 使用材料

試験に用いた材料を表-3.2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、粗骨材には砂岩の碎石、細骨材には砂岩の砕砂を用いた。

3.1.3 供試体作製方法

試験に用いた供試体は直径 15cm、高さ 30cm の標準供試体とし、供試体の作製には RCD 用コンクリ

表-3.2 使用材料の物性値

材料	種類	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント	比重:3.16、比表面積:3320cm ² /g
細骨材	砂岩砕砂	比重:2.65、吸水率:1.0%、粗粒率:3.04
粗骨材	砂岩碎石	比重:2.67、吸水率:0.45%、粗粒率:7.26

ートの締固め試験に広く利用されている RCD 用コンクリート標準供試体作製装置（以下、標準供試体作製装置という）を用いた。なお、供試体は 3 層に分けて締め固め、1 層あたりの締固め時間は 40 秒とした。なお、供試体は各配合毎につき 8 本作製し、一軸圧縮試験に 2 本、割裂引張試験に 2 本、三軸圧縮試験に 4 本使用した。また、作製した供試体は試験材齢の 91 日まで 20℃の水中標準養生を行った。

3.1.4 試験項目

試験は一軸圧縮試験、割裂引張試験、三軸圧縮試験の 3 種類とし、一軸圧縮試験は JIS A 1108、割裂引張試験は JIS A 1113 に準拠した（ただし、割裂引張試験に用いた供試体は一軸圧縮試験と同じ寸法の供試体とした）。なお、一軸圧縮試験では、供試体表面にひずみゲージを貼り付け、圧縮時の静弾性係数を測定した（JSCE-G 502-1988）。また、三軸圧縮試験では、拘束圧を 0.5、1.0、1.5、2.0 N/mm² の 4 種類に設定し、軸ひずみ速度を 0.05 %/min とした変位制御方式によって载荷を行った。軸ひずみは軸荷重载荷用油圧シリンダーに取り付けた変位計で測定した。また、拘束圧はゴムスリーブを介して水圧によって作用させた。なお、拘束圧については、試験機の载荷能力の範囲内でなるべく大きな圧力とすることを目標に予備試験を行ったが、あまり大きな圧力ではゴムスリーブがコンクリート表面の気泡にめり込んで破れてしまうことがわかり、今回の試験ではゴムスリーブが破れないように、最大圧力を 2.0 N/mm² と設定した。

なお、三軸圧縮試験に使用したコンクリート力学試験装置の全景を写真-3.1 に、供試体設置状況を写真-3.2 に示す。また、試験装置の仕様を表-3.3 に示す。

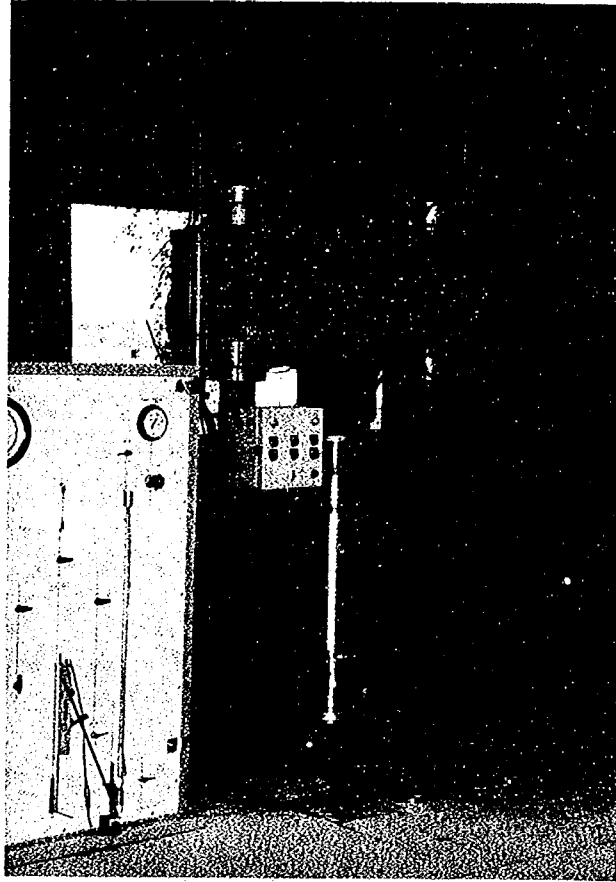


写真-3.1 コンクリート力学試験装置

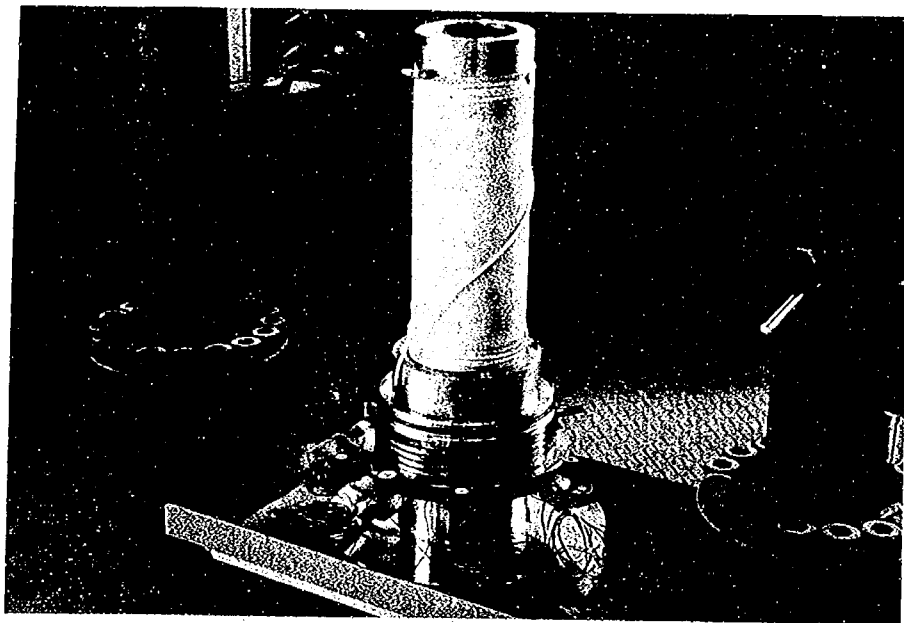


写真-3.2 供試体設置状況

表-3.3 コンクリート力学試験装置の仕様

装置	規格
軸載荷装置	制御方式:電気油圧サーボ
	・静的最大圧縮荷重:1,900kN
	・シリンダーストローク:50mm以上
側圧載荷装置	制御方式:電気油圧サーボ(水圧変換)
	・最大圧力:5N/mm ²
	・スピンドル貫入体積補償付
計測制御装置	計測装置
	・軸荷重計:ひずみゲージ式
	・軸変位計:差動トランス式
	・側圧計:ひずみゲージ式
	制御装置(サーボ増幅器)
	・荷重制御:0.005~360N/mm ² /min
	・変位制御:0.001~90mm/min
データ記録	データロガー
	・サンプリングタイム:10sec

3.2 調査結果

3.2.1 VC 値が 20 秒となるコンクリートの配合

図-3.1 は単位セメント量と VC 値が 20 秒となるコンクリートの容積配合の関係を示したものである。図によれば、コンクリートが貧配合になるほど（単位セメント量が少ないほど）、単位ペースト容積（セメントと水の絶対容積）が減じ、コンクリート中の骨材の実積率が増加していることがわかる。これは、水セメント比が大きくなると、セメントペーストの粘性が減じ、骨材間の摩擦抵抗が小さくなるため、実積率が増加することによるものと考えられる。なお、図によれば、コンクリート中の各材料（セメント、水、細骨材、粗骨材）の単位容積は単位セメント量と概ね線形の関係をもって変化している。

なお、各配合のコンクリートに対する VC 値、空気量、相対締固め密度の測定結果を表-3.4 に示す。VC 値および空気量の測定結果は目標値を満足している。また、相対締固め密度は 97% 程度確保されており、十分な締固めがなされたといえる。

3.2.2 一軸圧縮試験

各配合における一軸圧縮試験結果を表-3.5 に示す。また、図-3.2 にセメント水比と一軸圧縮強度の関係を示す。図によれば、単位セメント量を 70kg/m^3 まで落とした超貧配合コンクリートにおいても、セメント水比と一軸圧縮強度の間には線形の関係があり、セメント水比の法則に従って一軸圧縮強度が定まることがわかる。なお、図から一軸圧縮強度が 0 となるセメント水比を求めると $C/W=0.35$ となり、この時の単位セメント量を試験結果から外挿すると、おおよそ 50kg/m^3 となる。したがって、粗骨材最大寸法を 40mm とした場合、結合材としての効果が期待できる最小の単位セメント量は 50kg/m^3 程度と推定される。

次に、図-3.3 は、一軸圧縮試験時に供試体に貼り付けたひずみゲージより求めた静弾性係数および一次共鳴振動数より求めた動弾性係数をセメント水比との関係で示したものである。なお、静弾性係数は次式より求めた。

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \quad (3.1)$$

ここに、

E ：静弾性係数

σ_1 ：一軸圧縮強度の 1/3 の応力

σ_0 ：50 μ のひずみ時の応力

ε_1 ： σ_1 時のひずみ

ε_0 ：50 μ のひずみ

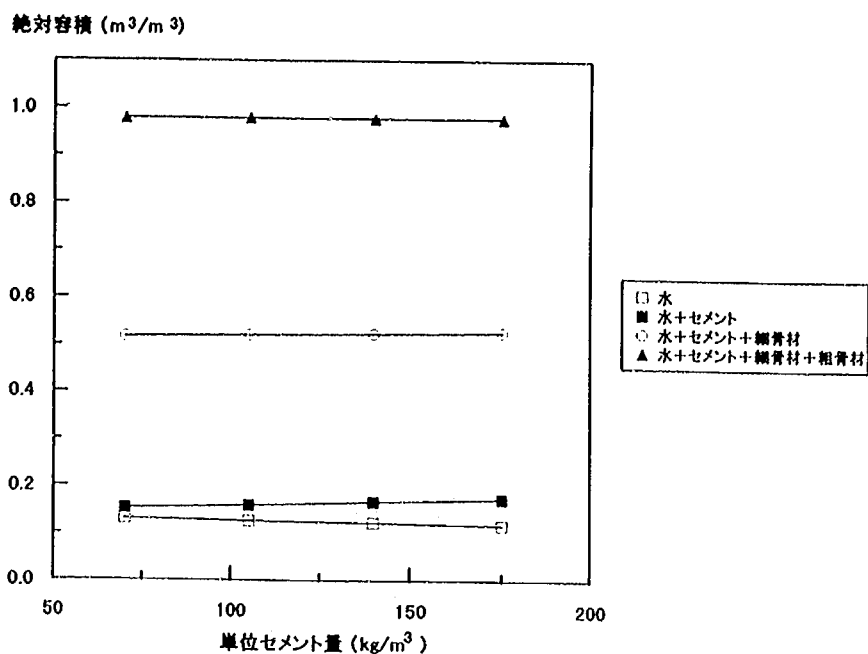


図-3.1 VC 値 20 秒となるコンクリートの容積配合

表-3.4 フレッシュコンクリートの性状

配合名	目標値		実測値		
	VC値 (秒)	空気量 (%)	VC値 (秒)	空気量 (%)	相対締固め密度※ (%)
C175	20±10	2.2±1.4	18.8	1.5	97.1
C140	20±10	2.2±1.4	18.0	1.0	97.5
C105	20±10	2.2±1.4	21.3	1.2	97.1
C70	20±10	2.2±1.4	18.7	1.6	96.8

※ VC試験容器内の実測密度を配合上の0空隙密度で除したものである。

表-3.5 一軸圧縮試験結果

配合名		C175	C140	C105	C70
圧縮強度 (N/mm ²)	供試体-1	21.01	16.59	7.92	2.98
	供試体-2	21.43	16.12	9.78	3.00
	平均	21.22	16.35	8.85	2.99
動弾性係数 (kN/mm ²)	供試体-1	37.91	39.08	31.32	17.62
	供試体-2	36.17	39.08	32.68	15.40
	平均	37.04	39.08	32.00	16.51
静弾性係数 (kN/mm ²)	供試体-1	29.06	29.67	10.45	4.18
	供試体-2	27.33	27.98	18.70	3.97
	平均	28.19	28.82	14.57	4.08

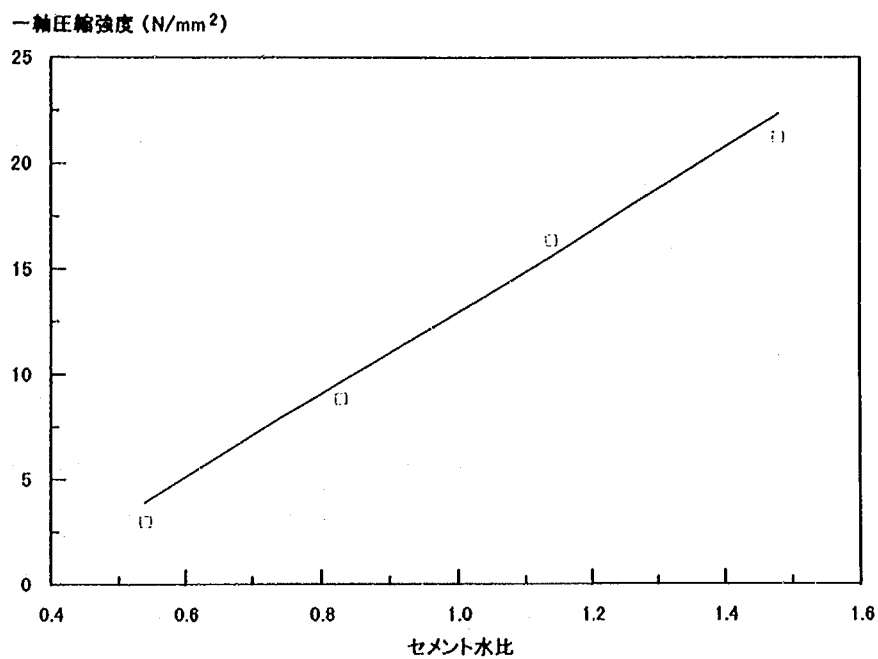


図-3.2 セメント水比と一軸圧縮強度の関係

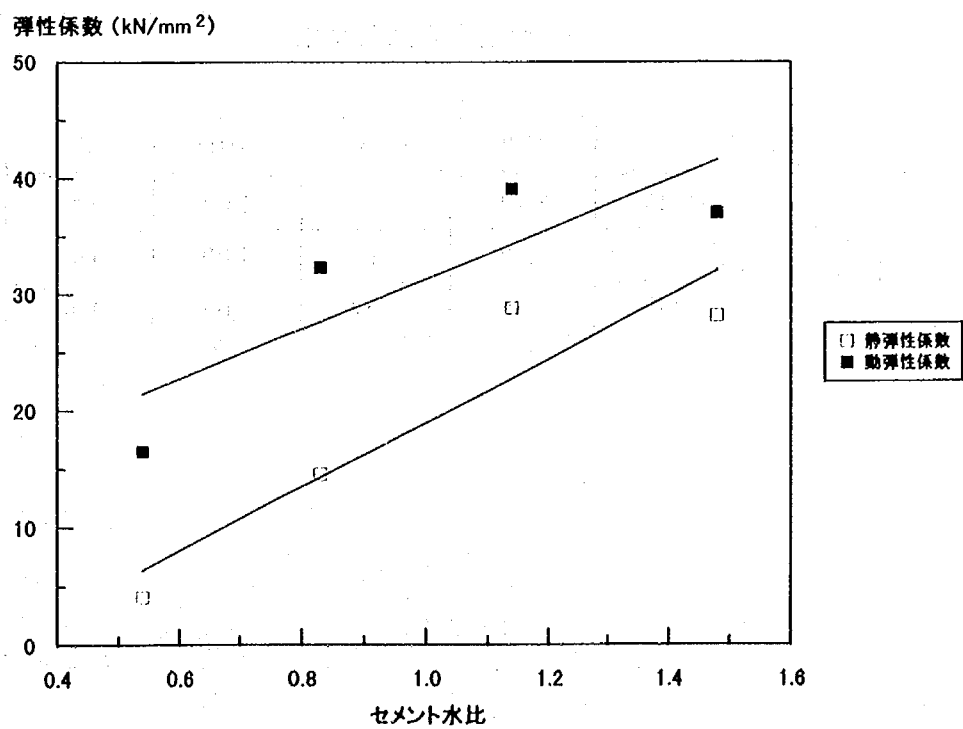


図-3.3 セメント水比と弾性係数の関係

である。図によれば、静弾性係数および動弾性係数はセメント水比の増加に伴い、ともに増加する傾向にあり、今回実施したセメント水比の範囲で見ると概ねセメント水比と線形関係にあるといえる。なお、静弾性係数は動弾性係数よりも小さいが、セメント水比が小さくなるほどその傾向はより顕著になっている。

以上の結果より、単位セメント量を極端に減らした超貧配合コンクリートにおいても、VC 値を 20 秒程度に設定して十分な締固めを行えば、その圧縮強度および弾性係数の値は従来コンクリートの延長線上にあり、従来コンクリートと同様に取り扱うことができることがわかった。

3.2.3 割裂引張試験

各配合における割裂引張試験結果を表-3.6 に示す。また、図-3.4 はセメント水比と割裂引張強度の関係を示したものである。図によれば、割裂引張強度もセメント水比と線形関係にあることがわかる。また、図-3.5 は一軸圧縮強度と割裂引張強度の関係を示したものであるが、その比は概ね 10 : 1 となっている。

これより、単位セメント量を極端に減らした超貧配合コンクリートにおいても、VC 値を 20 秒程度に設定して十分な締固めを行えば、割裂引張強度および割裂引張強度と圧縮強度の比は従来コンクリートの延長線上にあり、従来コンクリートと同様に取り扱うことができることがわかった。

表-3.6 割裂引張試験結果

配合名		C175	C140	C105	C70
引張強度 (N/mm ²)	供試体-1	2.79	1.85	1.07	0.44
	供試体-2	2.32	2.10	1.00	0.47
	平均	2.55	1.97	1.04	0.46

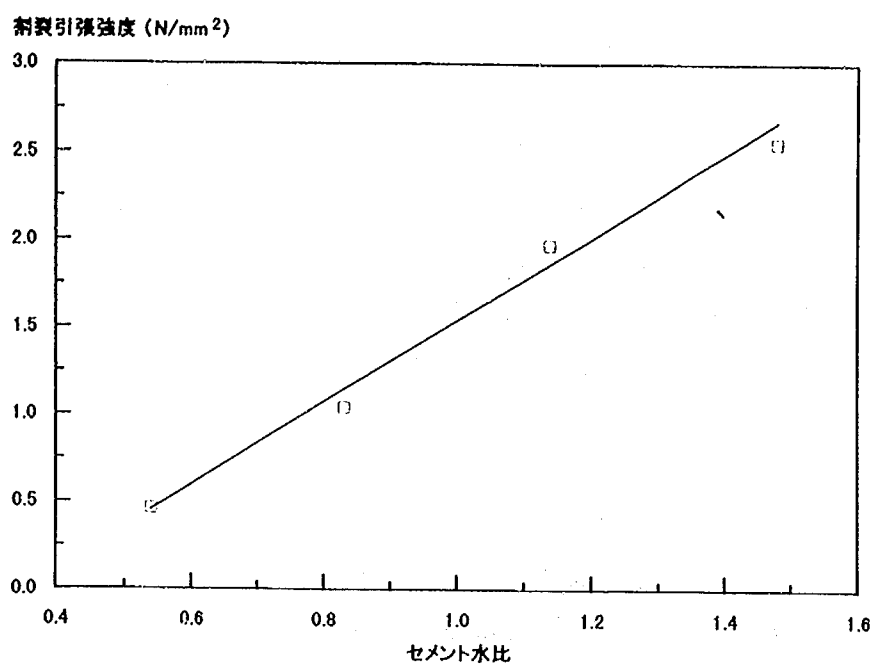


図-3.4 セメント水比と割裂引張強度の関係

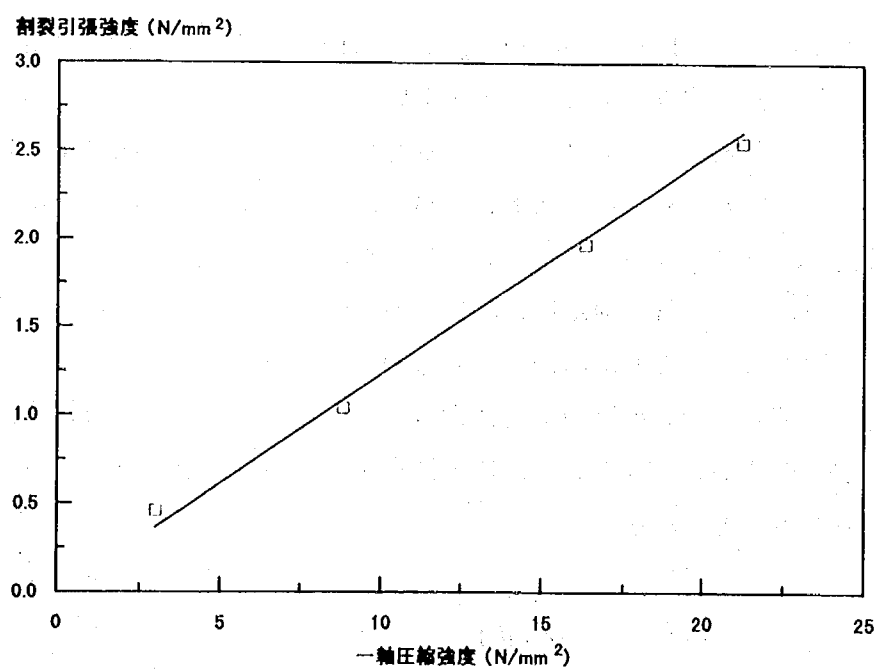


図-3.5 一軸圧縮強度と割裂引張強度の関係

3.2.4 三軸圧縮試験

(1) 試験結果

単位セメント量が 175、140、105、70 kg/m³ の各配合に対して、拘束圧を 0.5、1.0、1.5、2.0 N/mm² の 4 種類に設定した三軸圧縮試験より得られた軸ひずみ～主応力差曲線、軸ひずみ～体積ひずみ曲線をそれぞれ図-3.6、3.7 にとりまとめて示す。ここで、主応力差とは軸応力 σ_1 と拘束圧 σ_3 の差 $\sigma_1 - \sigma_3$ を表している。図によれば、単位セメント量が多い配合ほど主応力差のピークが明瞭となっている。また、拘束圧が大きい場合ほど残留強度は大きな値を示している。また、体積ひずみについて見ると、全ての供試体において、主応力差の増加に伴って供試体の体積が減少し、主応力差が最大となる直前付近から供試体の体積が増加に転じている。また、同一単位セメント量における最終的な体積ひずみは拘束圧が小さいほど大きく現れている。

一方、図-3.8、3.9 は、単位セメント量をパラメータとして、同一拘束圧の軸ひずみ～主応力差曲線、軸ひずみ～体積ひずみ曲線をそれぞれ同じ図上にとりまとめたものである。図によれば、単位セメント量が多い配合ほど主応力差のピーク値（最大主応力差）が大きく現れているが、残留強度は単位セメント量の多寡に関わらず、概ね一定値に収束するようである。また、体積ひずみについて見ると、同一拘束圧における体積ひずみは、単位セメント量の大きな配合ほど大きくなっている。

これらの図より、いずれの配合とも応力～ひずみ関係は塑性的であり、CSG のような超貧配合コンクリートだけでなく、RCD 用コンクリートも三軸圧縮応力下では塑性的な性質を示すことがわかる。なお、この点の詳細については後の項で考察する。

(2) 強度特性

次に、単位セメント量が 175、140、105、70 kg/m³ の各配合について、拘束圧 σ_3 と最大主応力差 $f_T - \sigma_3$ ($\sigma_1 - \sigma_3$ の最大値。側方拘束圧下における圧縮強度を表す) の関係を求めると図-3.10 のようになる。なお、図には一軸圧縮試験の結果 ($\sigma_3 = 0$ の状態) も含めてある。図によれば、いずれの配合とも、拘束圧の増加とともに最大主応力差が増加し、両者は線形の関係にあることがわかる。

一方、図-3.11 は拘束圧をパラメータとしてセメント水比 C/W と最大主応力差 $f_T - \sigma_3$ の関係を示したものである。図によれば、いずれの拘束圧においても、セメント水比の増加とともに最大主応力差が増加し、両者は線形の関係にあることがわかる。すなわち、側方拘束圧下においてもコンクリートの圧縮強度（最大主応力差）はセメント水比の法則に従って変化していることがわかる。

なお、図-3.10、3.11 の結果を総合すると、側方拘束圧下におけるコンクリートの圧縮強度（最大主応力差）は次式で表されることになる。

$$\begin{aligned} f_T - \sigma_3 &= (a\sigma_3 + b)(cC/W + d) \\ &= ac\sigma_3 C/W + ad\sigma_3 + bcC/W + bd \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここに、

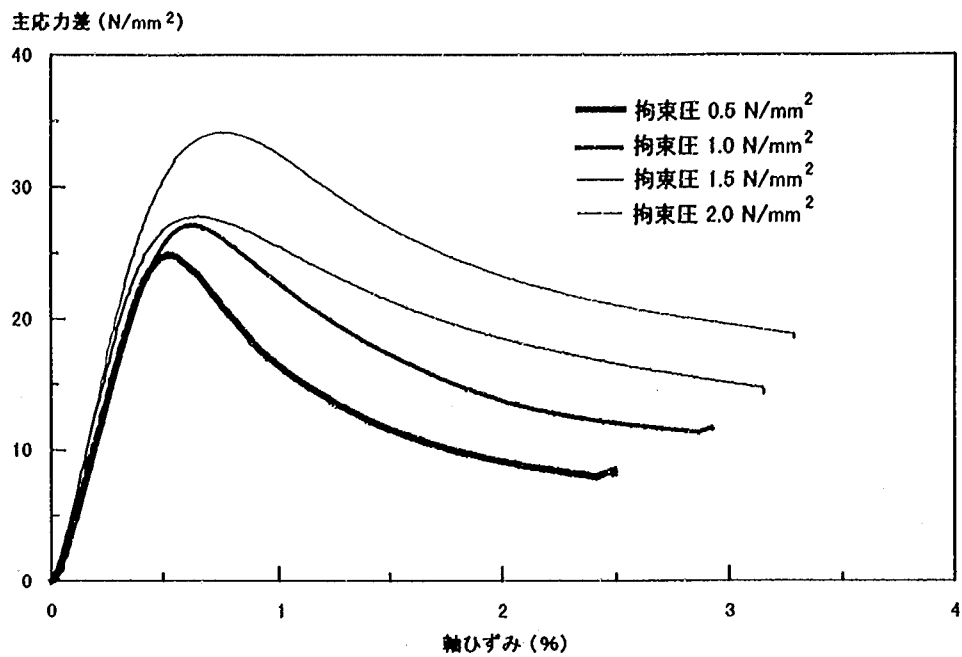


図-3.6(1) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 175kg/m^3)

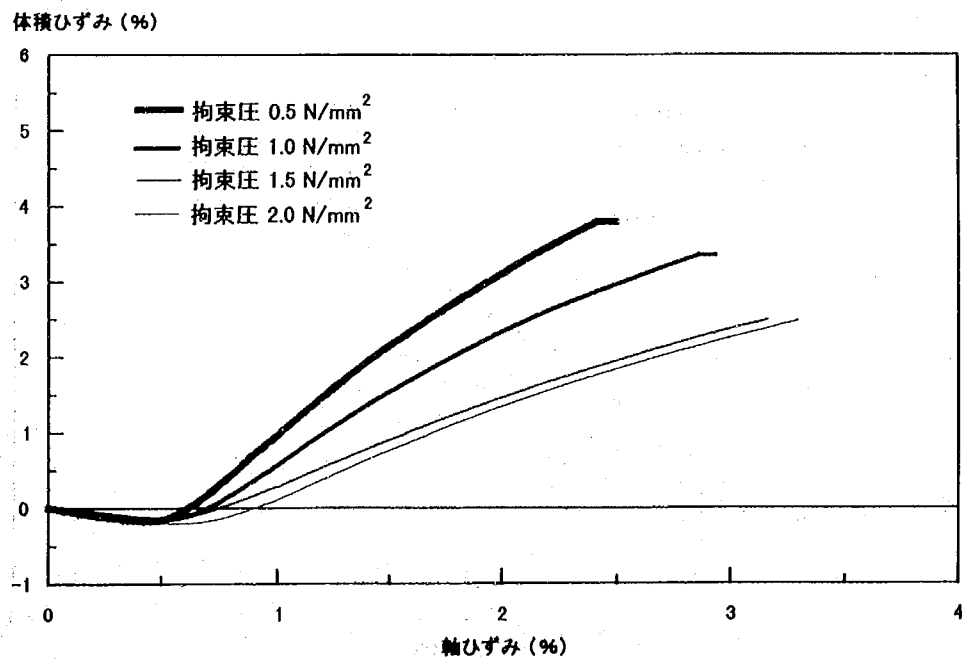


図-3.7(1) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (単位セメント量 175kg/m^3)

主応力差 (N/mm^2)

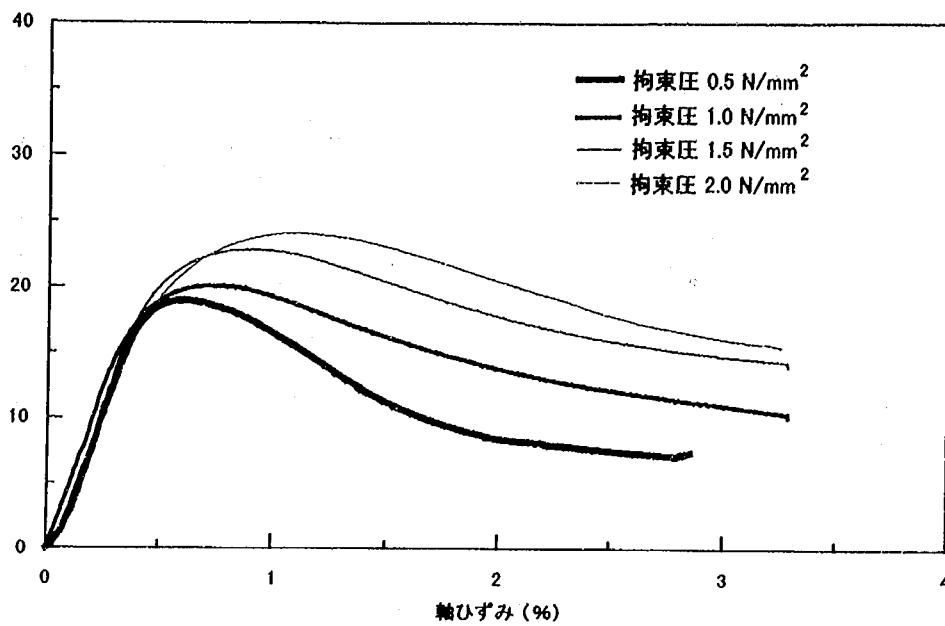


図-3.6(2) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 140kg/m^3)

体積ひずみ (%)

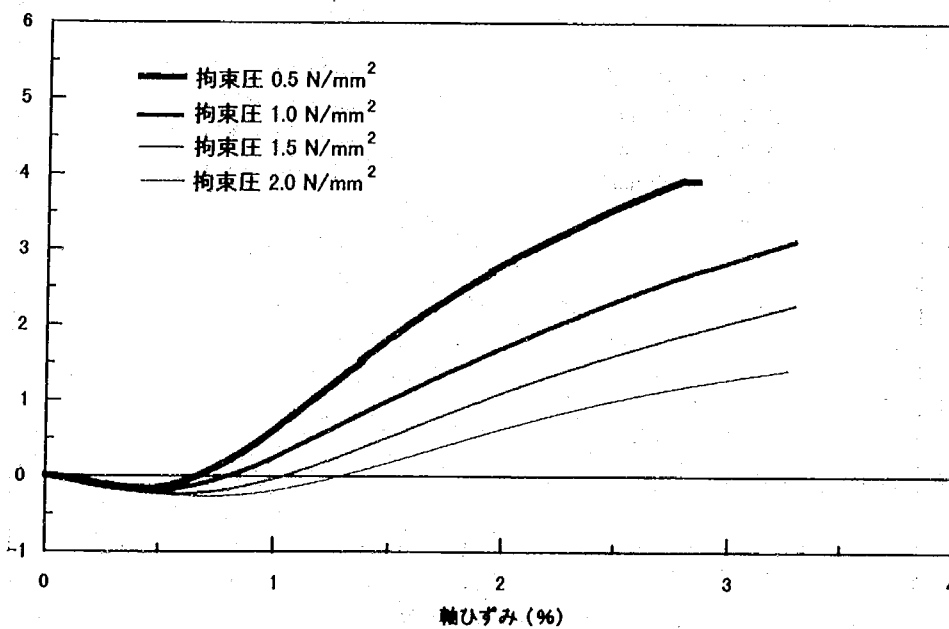


図-3.7(2) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (単位セメント量 140kg/m^3)

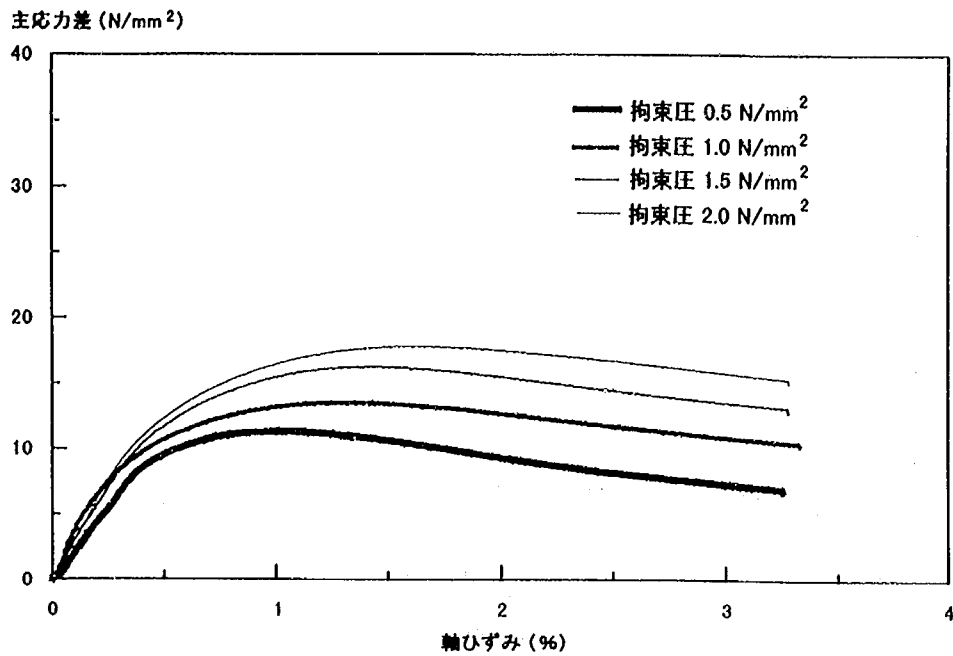


図-3.6(3) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 105kg/m^3)

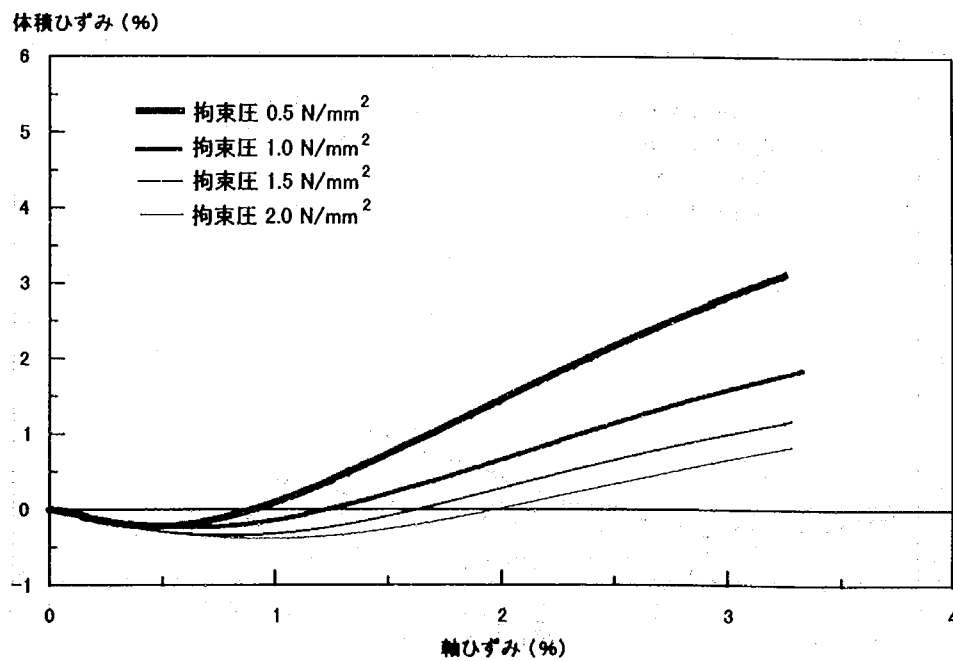


図-3.7(3) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (単位セメント量 105kg/m^3)

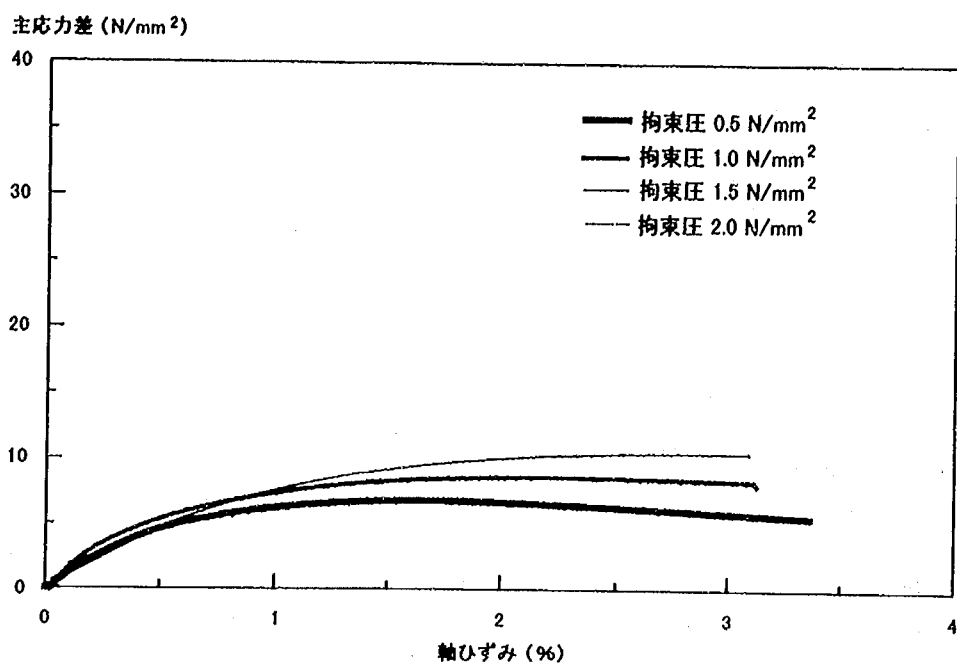


図-3.6(4) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 70kg/m^3)

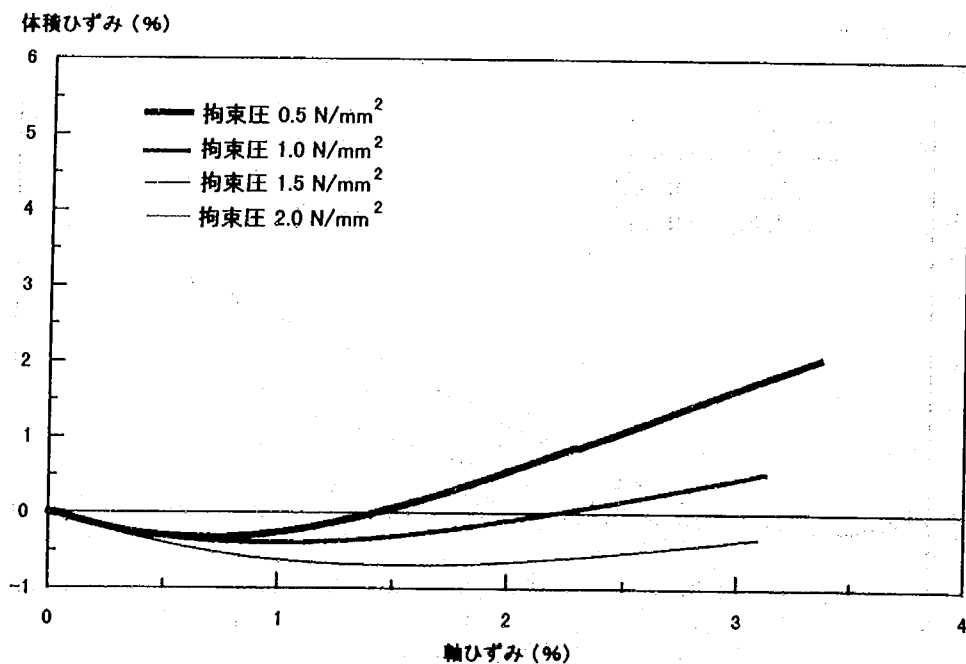


図-3.7(4) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (単位セメント量 70kg/m^3)

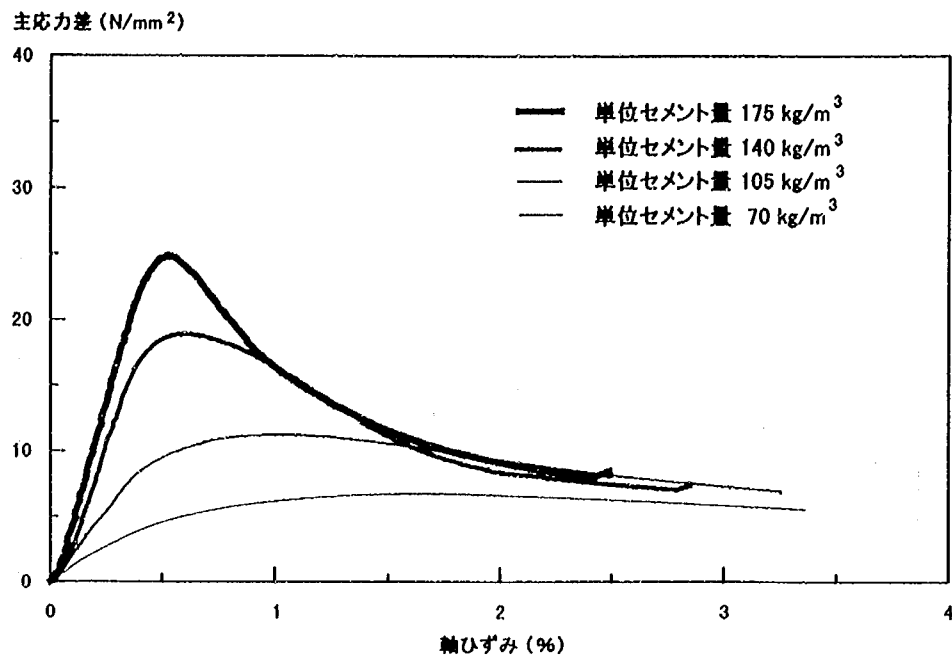


図-3.8(1) 軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧 0.5N/mm^2)

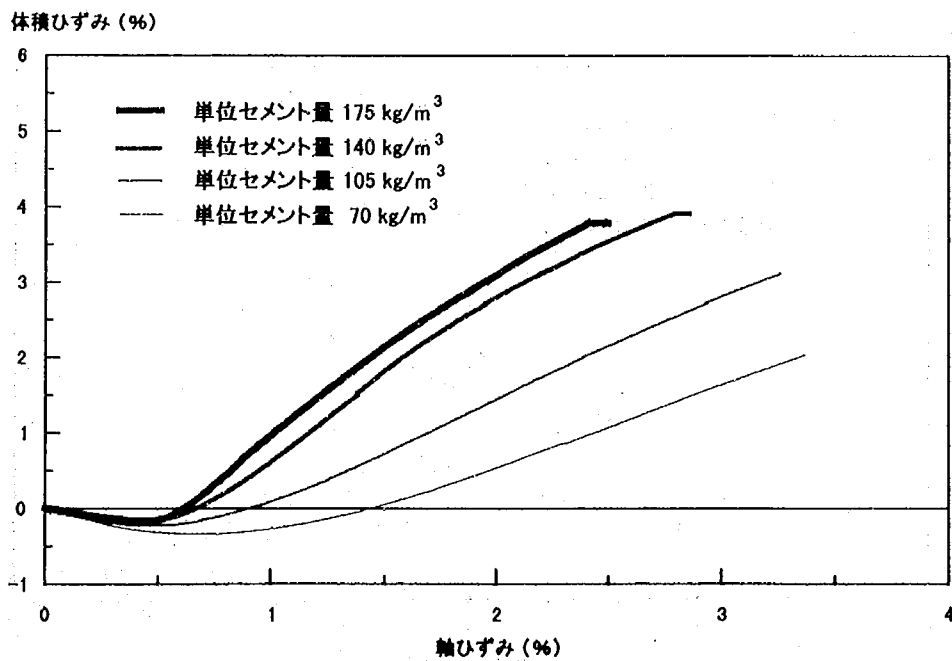


図-3.9(1) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (拘束圧 0.5N/mm^2)

主応力差 (N/mm²)

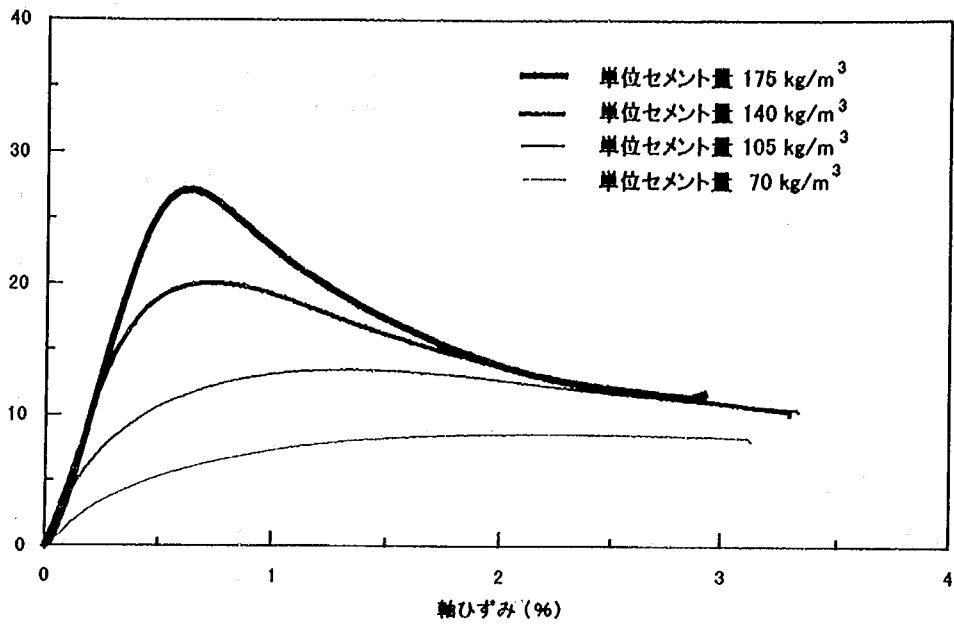


図-3.8(2) 軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧 1.0N/mm²)

体積ひずみ (%)

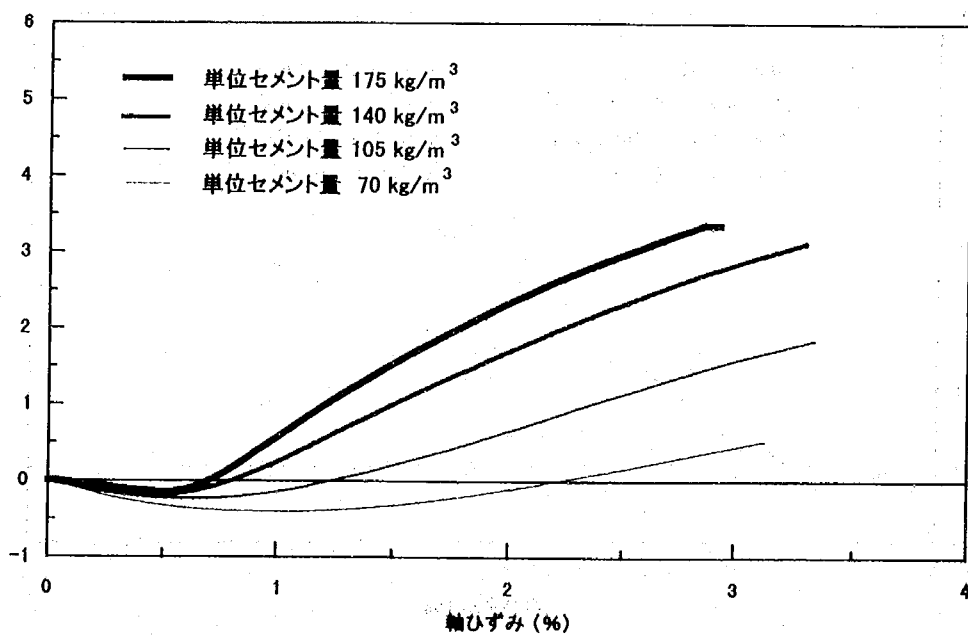


図-3.9(2) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (拘束圧 1.0N/mm²)

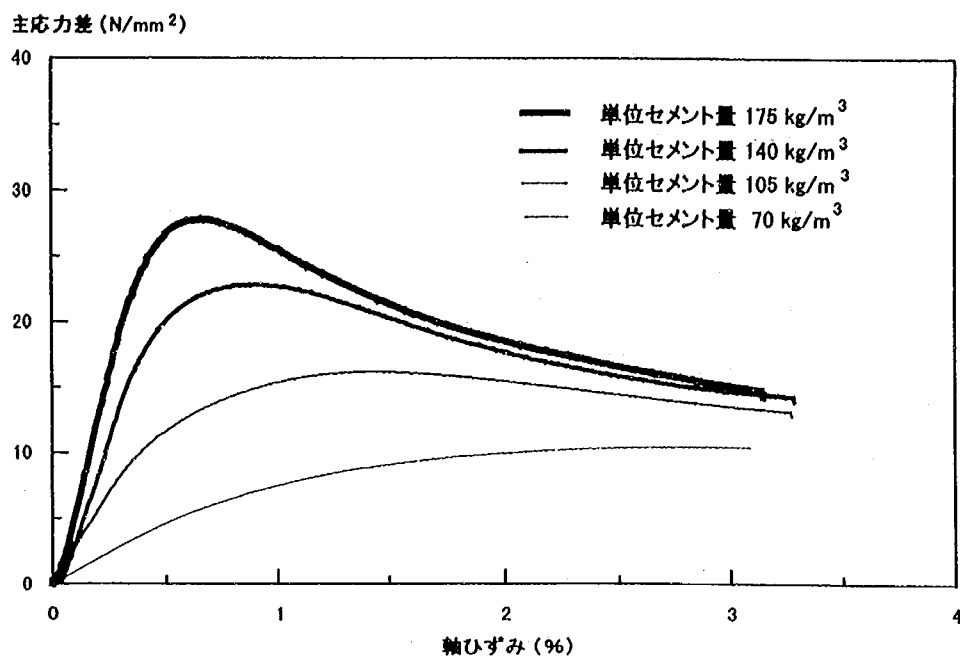


図-3.8(3) 軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧 1.5N/mm²)

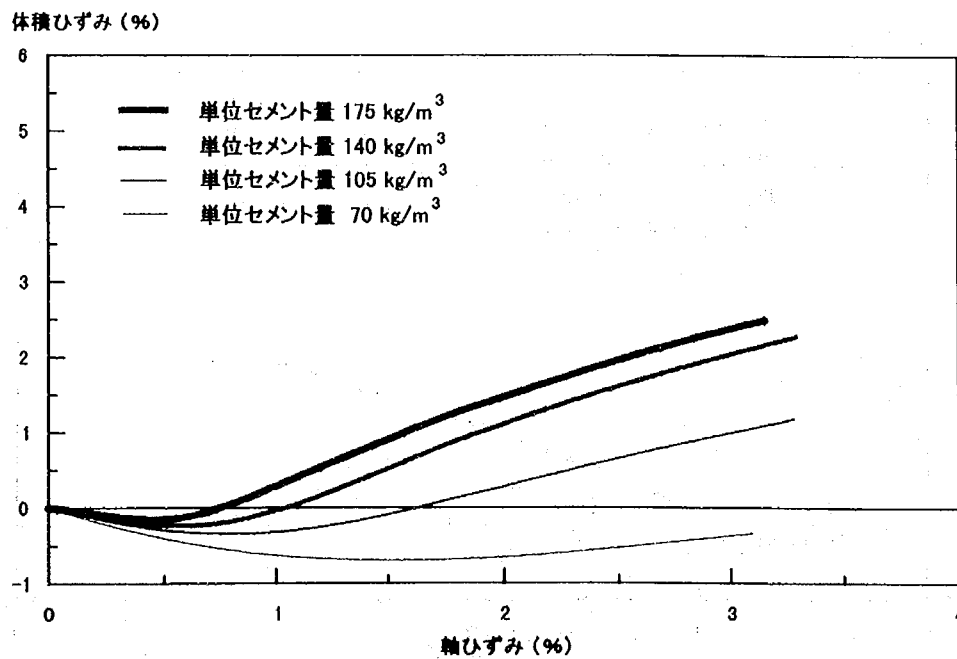


図-3.9(3) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (拘束圧 1.5N/mm²)

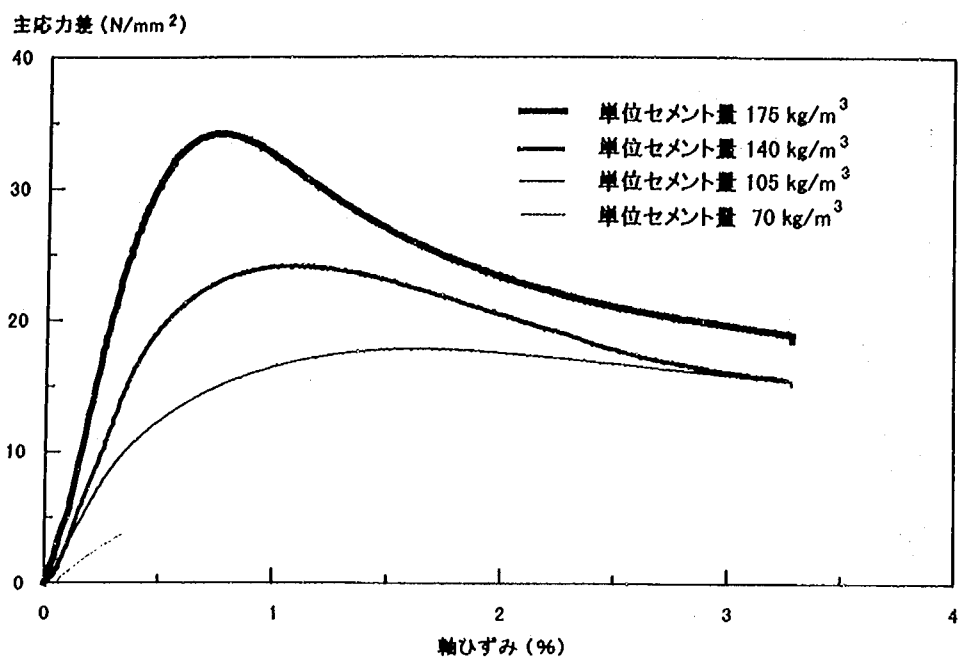


図-3.8(4) 軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧 2.0 N/mm^2)

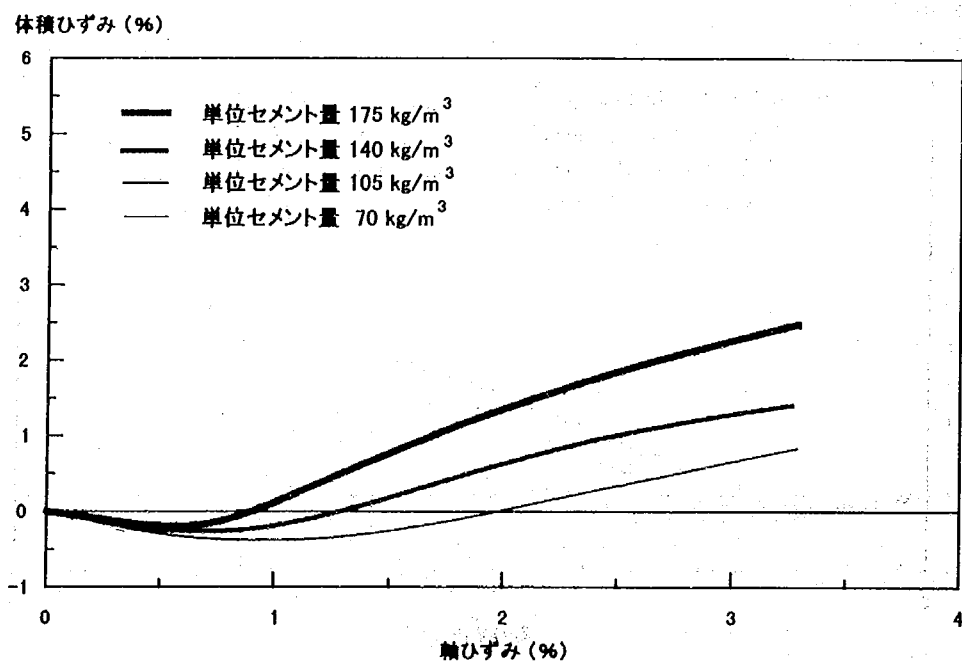


図-3.9(4) 軸ひずみ～体積ひずみ曲線 (拘束圧 2.0 N/mm^2)

最大主応力差 (N/mm²)

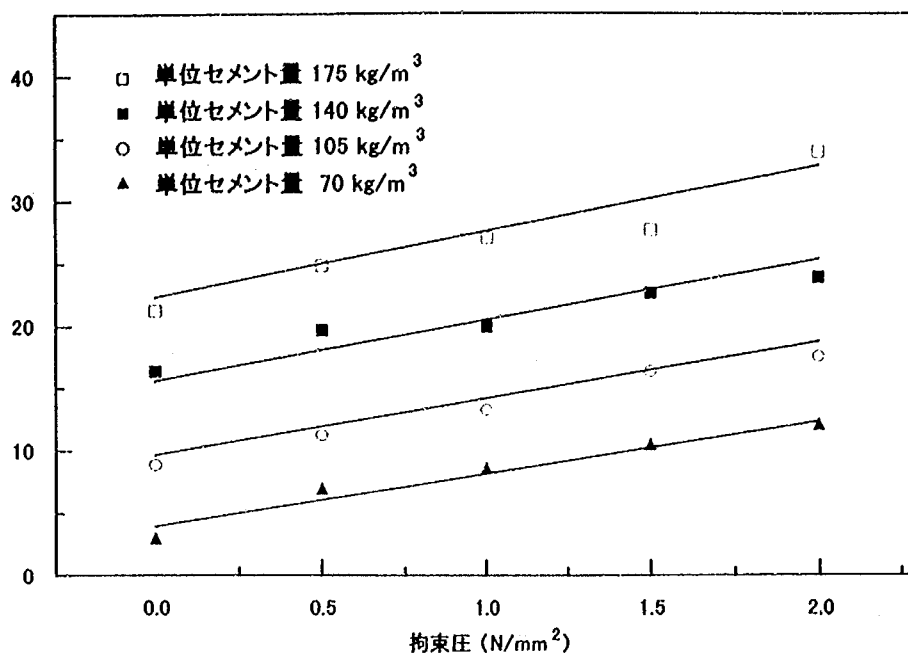


図-3.10 拘束圧と最大主応力差の関係

最大主応力差 (N/mm²)

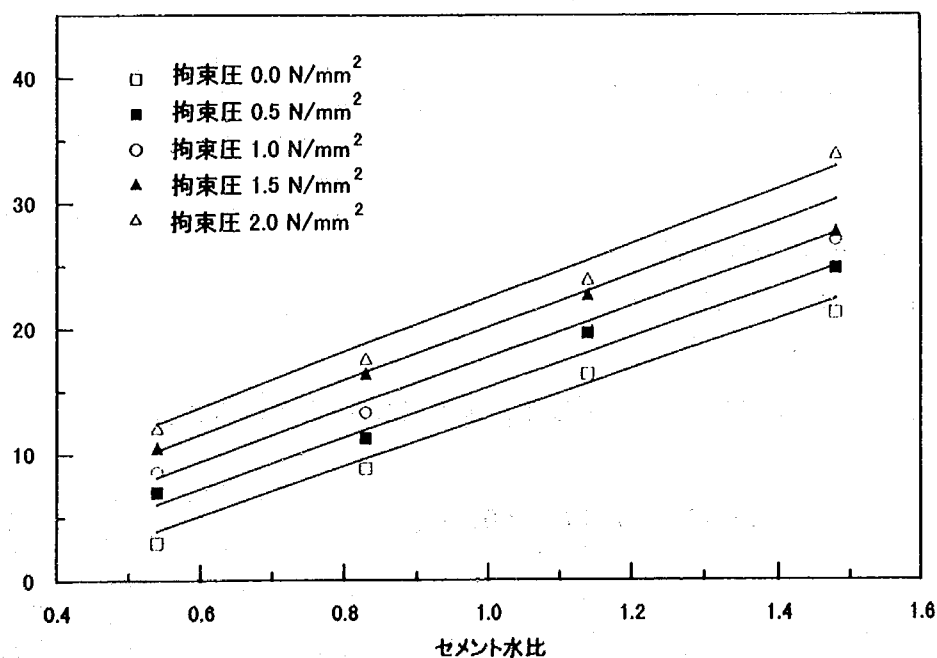


図-3.11 セメント水比と最大主応力差の関係

$f_T - \sigma_3$: 最大主応力差

C/W : セメント水比

σ_3 : 拘束圧

a、b、c、d : 係数

(3.2) 式の係数を重回帰分析によって求めると、 $f_T - \sigma_3$ を N/mm^2 単位、 C/W を % 単位で表示して次式が得られる。

$$f_T - \sigma_3 = 0.01115 \sigma_3 C/W + 3.643 \sigma_3 + 0.1945 C/W - 6.522 \quad (3.3)$$

ここに、

$f_T - \sigma_3$: 最大主応力差 (N/mm^2)

C/W : セメント水比 (%)

σ_3 : 拘束圧 (N/mm^2)

この (3.3) 式は CSG のような超貧配合コンクリートから従来コンクリートと同様な特性をもつ RCD 用コンクリートまで共通して適用可能な式であり、また、その式が線形性を有していることから、これらのコンクリートの強度特性には材料的な特性の差がないということができる。

なお、一軸圧縮強度 f_c は (3.3) 式で $\sigma_3 = 0$ とした時の値であるから、 f_c を N/mm^2 単位で表示して次式で表される。

$$f_c = 0.1945 C/W - 6.522 \quad (3.4)$$

ここに、

f_c : 一軸圧縮強度 (N/mm^2)

C/W : セメント水比 (%)

そこで、(3.3)、(3.4) 式より C/W を消去すると、次の (3.5) 式が得られる。

$$f_T - \sigma_3 = 0.0573 \sigma_3 f_c + f_c + 4.016 \sigma_3 \quad (3.5)$$

ここに、

$f_T - \sigma_3$: 最大主応力差 (N/mm^2)

f_c : 一軸圧縮強度 (N/mm^2)

σ_3 : 拘束圧 (N/mm^2)

この(3.5)式を試験結果とともに図示したものが図-3.12である。図より、各拘束圧下における圧縮強度(最大主応力差)は一軸圧縮強度と線形の関係にあることがわかる。

次に、最大主応力差、拘束圧を一軸圧縮強度で除し、図-3.10を無次元化して表示すると図-3.13のようになる。図によれば、単位セメント量の大小に関わらず、無次元化した拘束圧 σ_3/f_c と無次元化した最大主応力差 $(f_T - \sigma_3)/f_c$ の関係はほぼ一本の直線で表されることがわかる。このことは、単位セメント量を大きく減じた超貧配合コンクリートにおいても、その強度特性は従来コンクリートのそれと同等であることを示している。なお、無次元化した拘束圧 σ_3/f_c と無次元化した最大主応力差 $(f_T - \sigma_3)/f_c$ の関係はほぼ一本の直線で表されるのは、(3.5)式において σ_3/f_c の係数0.0573が十分小さいことによっている。

(3) 応力～ひずみ特性

次に、図-3.6の三軸圧縮試験結果より、単位セメント量をパラメータとして、最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみとの関係を表-3.7、図-3.14に示す。図より、各単位セメント量において最大主応力差が大きくなるほど最大主応力差の生じる軸ひずみは大きくなっており、両者の間には直線関係が見られる。続いて、図-3.15に単位セメント量をパラメータとして、各単位セメント量における一軸圧縮強度で除して無次元化した最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみの関係を示す。図では、単位セメント量に関わらず、無次元化した最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみはほぼ一本の直線で表されている。これより、無次元化した最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみレベルの関係は、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートにおいてもRCD用コンクリートのような従来コンクリートと同様であることがわかる。

また、図-3.8の応力～ひずみ曲線から、単位セメント量が大きいほど、最大主応力差(主応力差のピーク値)が大きくなっているのに対して、残留主応力差(主応力差の残留値)は単位セメント量によらず拘束圧によって定まる一定値に収束することがわかった。そこで今度は、図-3.13に示した回帰線上のほぼ同一点に落ちる2つの三軸試験結果、すなわち、拘束圧と一軸圧縮強度の比が互いにほぼ等しい2つの三軸圧縮試験結果に対して、その軸ひずみ～主応力差曲線を正規化して(最大主応力差が生じる時点での軸ひずみと主応力差をそれぞれ1として)比較してみると図-3.16のようになる。図によれば、拘束圧と一軸圧縮強度の比が同一であれば、正規化した軸ひずみ～主応力差曲線はほぼ同一の形状を有していることがわかる。したがって、最大主応力差と残留主応力差の関係は、コンクリートの一軸圧縮強度と拘束圧の関係から定まることになる。

なお、コンクリートの一軸圧縮強度が0になると、最大主応力差と残留主応力差は等しくなると考えられる。すなわち、(3.5)式において $f_c=0$ とした次式の $f_T - \sigma_3$ が各拘束圧における最終的な残留主応力差を表すものと考えられる。

$$f_T - \sigma_3 = 4.016 \sigma_3 \quad (3.6)$$

ここに、

最大主応力差 (N/mm²)

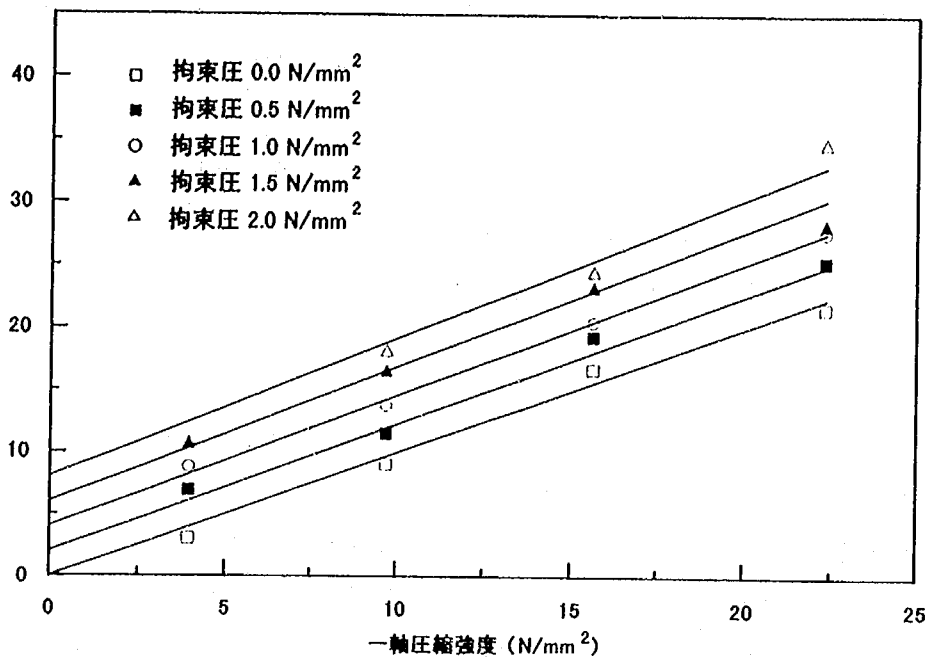


図-3.12 一軸圧縮強度と最大主応力差の関係

最大主応力差 / 一軸圧縮強度

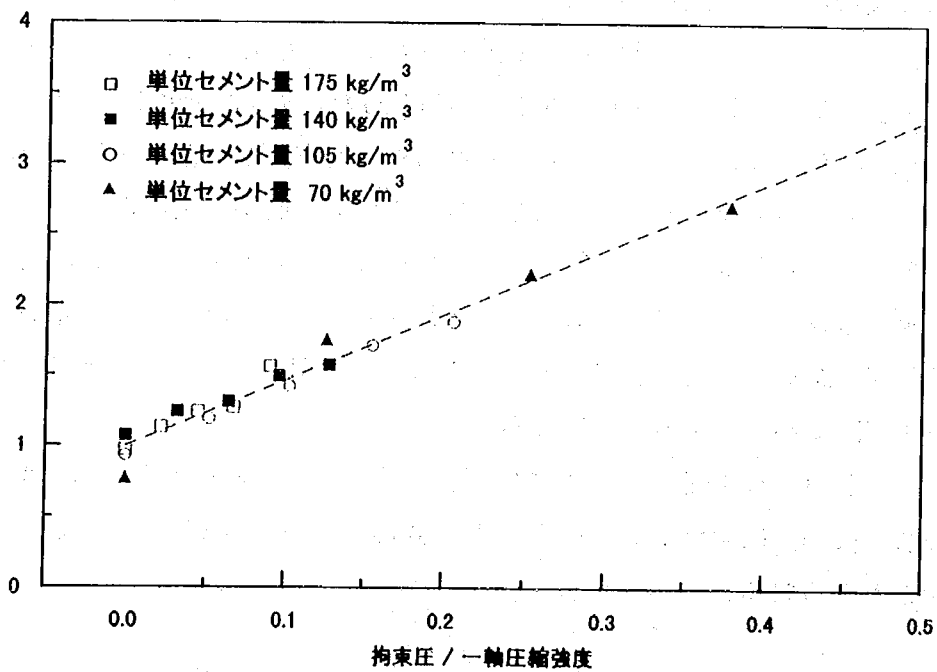


図-3.13 セメント水比と最大主応力差の関係

表-3.7 三軸圧縮試験結果

配合名		C175	C140	C105	C70
側圧0.5N/mm ²	最大主応力差 (N/mm ²)	24.78	19.62	11.23	6.97
	最大主応力差時の軸ひずみ(%)	0.54	0.62	1.01	1.56
側圧1.0N/mm ²	最大主応力差 (N/mm ²)	27.03	19.95	13.29	8.62
	最大主応力差時の軸ひずみ(%)	0.62	0.72	1.31	2.20
側圧1.5N/mm ²	最大主応力差 (N/mm ²)	27.70	22.68	16.40	10.54
	最大主応力差時の軸ひずみ(%)	0.66	0.90	1.43	2.87
側圧2.0N/mm ²	最大主応力差 (N/mm ²)	33.96	23.93	17.61	12.18
	最大主応力差時の軸ひずみ(%)	0.77	1.11	1.65	---

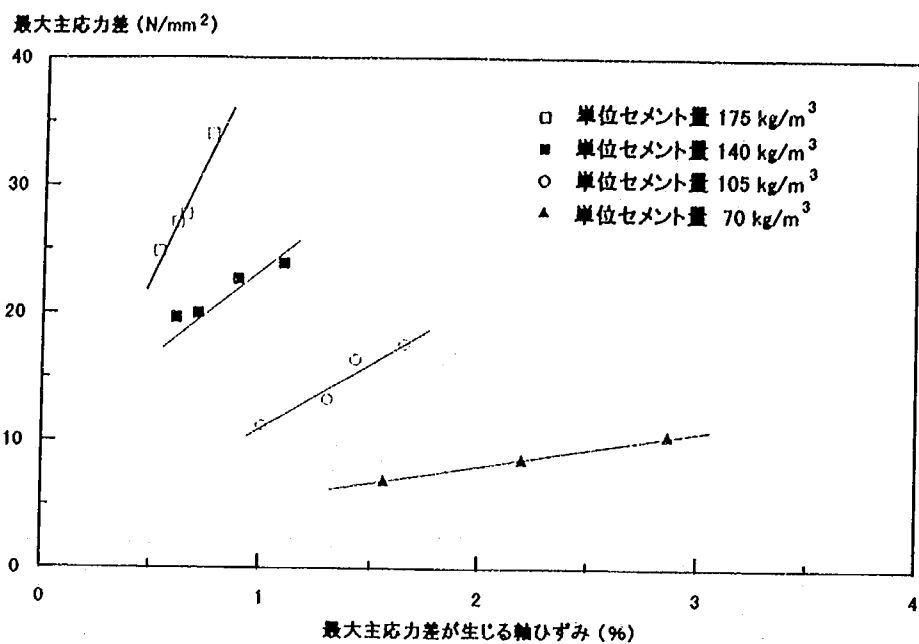


図-3.14 最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみの関係

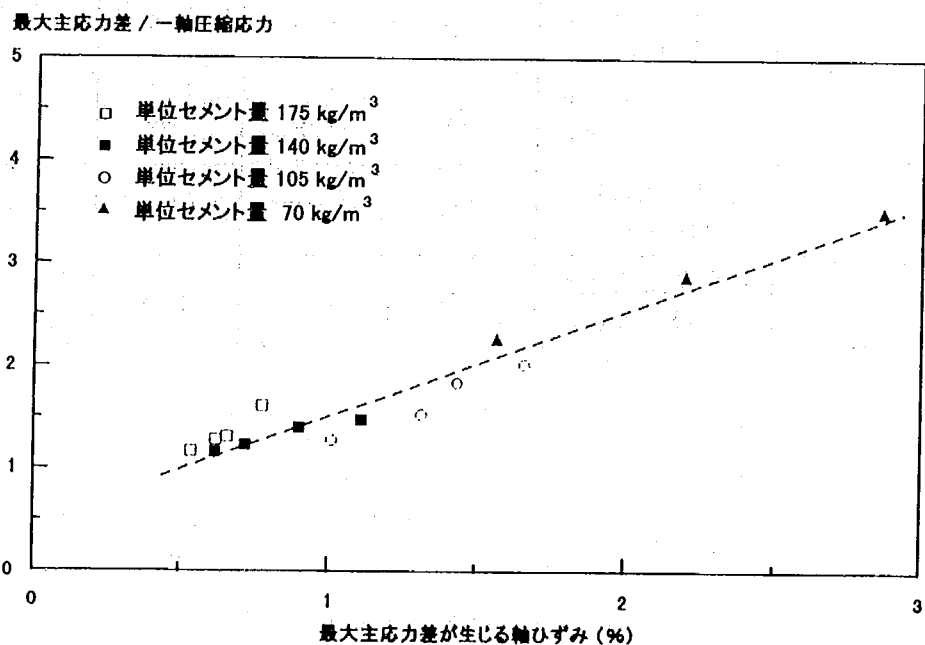


図-3.15 無次元化した最大主応力差と最大主応力差の生じる軸ひずみの関係

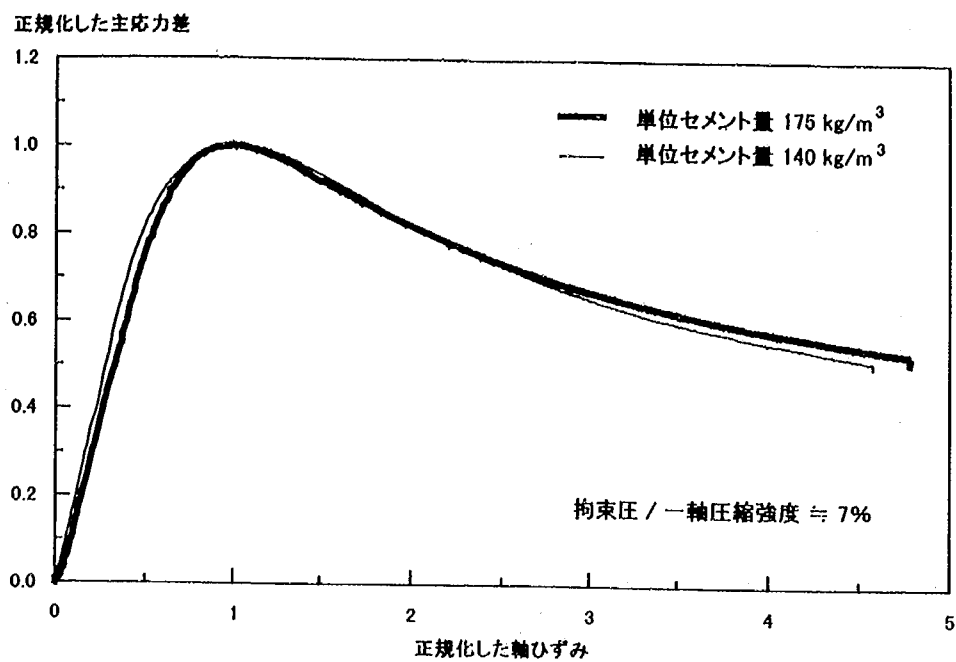


図-3.16(1) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線（拘束圧/一軸圧縮強度 $\approx 7\%$ ）

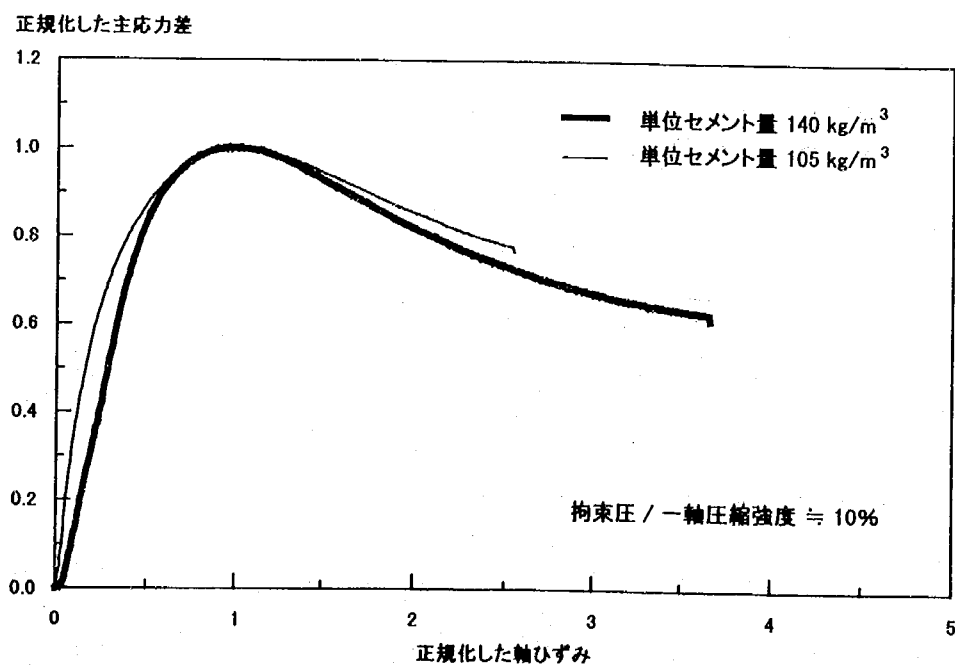


図-3.16(2) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線（拘束圧/一軸圧縮強度 $\approx 10\%$ ）

正規化した主応力差

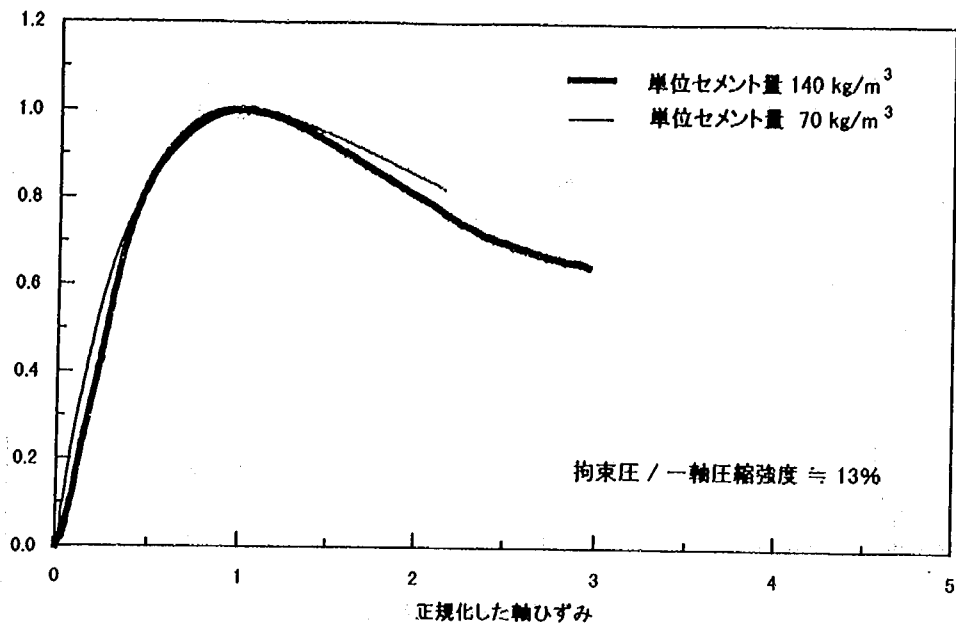


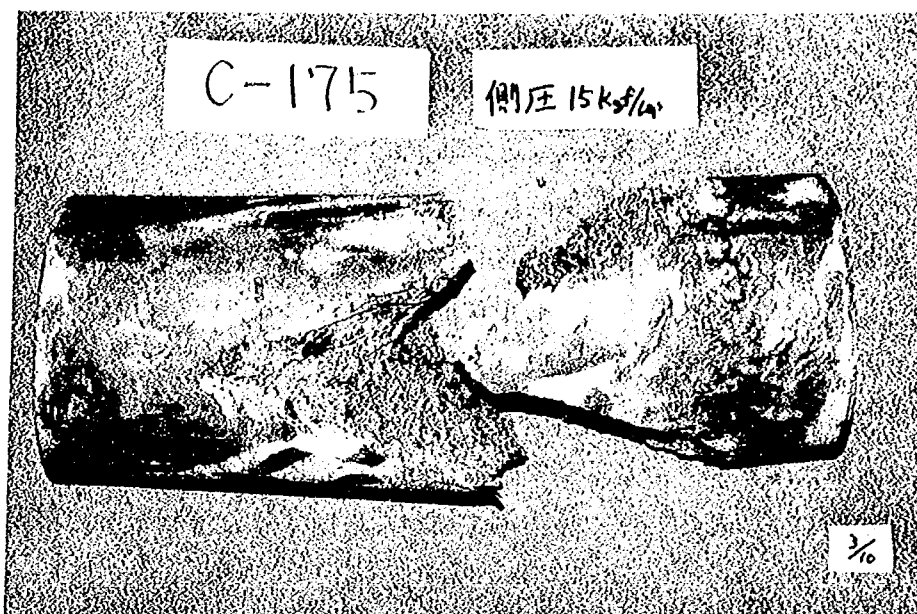
図-3.16(3) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧/一軸圧縮強度≒13%)

$f_T - \sigma_3$: 最大主応力差 (N/mm²)

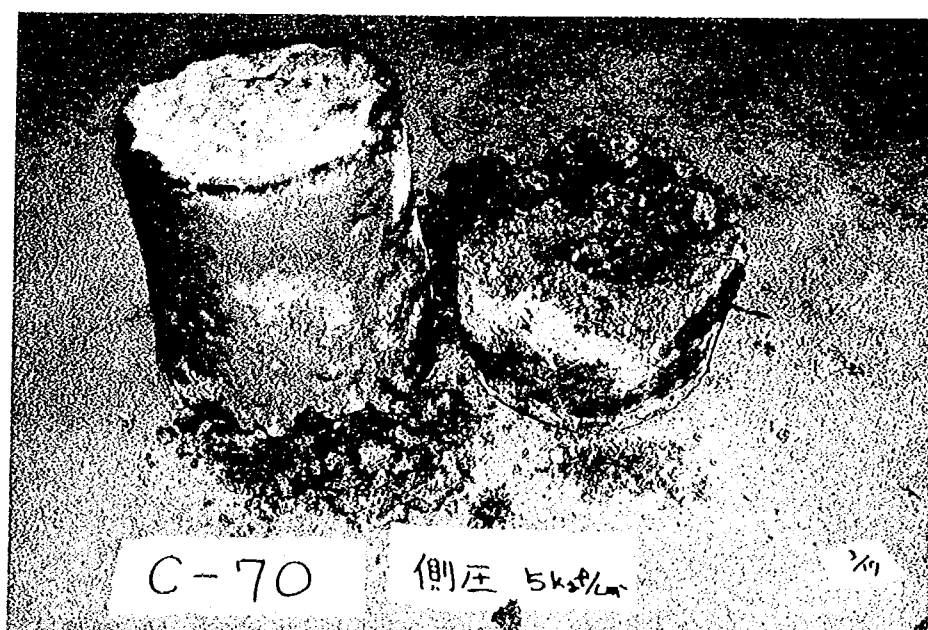
σ_3 : 拘束圧 (N/mm²)

これらの結果から、最大主応力差および残留主応力差によって代表される三軸圧縮試験の応力～ひずみ特性は、単位セメント量のみによって定まるのではなく、その一軸圧縮強度と拘束圧の関係から定まるといえる。

なお、三軸圧縮試験後のコンクリート供試体を強制的に割ってみた状態を写真-3.3 に示す。単位セメント量が 175kg/m³ の場合は、供試体はせん断面に沿って割れ、単位セメント量が 70kg/m³ の場合は、供試体は中央部で上下半分に割れて内部のモルタルは砂状になっていた。しかし、この破壊形態の違いは単位セメント量の多寡によって生じたというよりは、むしろ、上述した一軸圧縮強度と拘束圧の関係で整理されるべきである。すなわち、拘束圧と一軸圧縮強度の比が十分小さいときには、供試体の破壊形態は典型的なせん断破壊形態を示し、拘束圧と一軸圧縮強度の比が相対的に大きくなると、供試体には明確なせん断面が現れず、その結果、中央部で細かく破断すると解釈するのが妥当であると考えられる。



(a) 単位セメント量 175kg/m^3 、拘束圧 1.5N/mm^2



(b) 単位セメント量 70kg/m^3 、拘束圧 0.5N/mm^2

写真-3.3 三軸圧縮試験後の供試体状況

4 単位セメント量の低減方法が超貧配合コンクリートの強度特性に及ぼす影響調査

3 章では、20 秒の VC 値を維持して単位セメント量を徐々に減じたコンクリートの力学的性質について検討を行った結果、十分な締固めを行えば、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートも RCD 用コンクリートのような従来コンクリートと同様に扱えることがわかった。

本章では、超貧配合コンクリートにおける単位セメント量の低減方法について検討した結果を述べる。すなわち、施工性を重視してコンシステンシーを一定として単位セメント量を変化させた場合と、セメントペーストの性状を重視して水セメント比を一定として単位セメント量を変化させた場合の 2 種類の方法で配合を決定した超貧配合コンクリートの強度特性について比較検討を行った。

4.1 調査方法

4.1.1 コンクリートの配合

3 章同様、超貧配合コンクリートを超硬練コンクリートとして扱い、振動ローラーで転圧を行う RCD 用コンクリートの締固め方法を基本として試験を実施した。

試験にあたっては、粗骨材最大寸法 150mm、単位セメント量 120kg/m^3 の代表的な RCD 用コンクリートを 40mm でウェットスクリーニングした配合（単位セメント量 175kg/m^3 ）を基準として、単位セメント量を 35kg/m^3 ずつ減じ、175、140、105、70、 35kg/m^3 の 5 種類の単位セメント量を設定した（3 章で用いた配合における最少の単位セメント量からさらに 35kg/m^3 減じた）。さらに、設定した 5 種類の単位セメント量について、上述した 2 つの方法、すなわち基準配合から「①VC 値を一定として単位セメント量を低減する」、「②水セメント比を一定として単位セメント量を低減する」方法に基づいて試験配合を選定した。なお、細骨材率は一定に保った。試験に用いたコンクリートの配合を表-4.1、図-4.1 に示す。表中の網掛け部の配合が VC 値を一定に保った配合（目標 VC 値 20 ± 5 秒）である。配合決定にあたっては、まず、各単位セメント量における単位水量と VC 値の関係を求め（図-4.2）、VC 値 20 秒に対応する単位水量を設定した。また、図-4.3 に示すように単位セメント量と設定した単位水量の関係を求め、VC 値 20 ± 3 秒の範囲内に単位セメント量と単位水量の回帰式が収まることを確認した。なお、これらの配合決定時には、単位セメント量 50kg/m^3 のデータも参考値として使用した（図-4.2、4.3）。

VC 値を一定に保った配合について、その配合状態図を図-4.4 に示す。図によれば、単位セメント量を減じていくと、単位水量が増加するが、単位ペースト容積は減少し、結果として骨材の絶対容積が増加している。

表-4.1 コンクリートの配合

配合名	Gmax (mm)	目標VC値 (秒)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
						W	C	S	G
C175-50	40			50	44	88	175	969	1248
C175-62	40	20±5	2.2±1.4	62	44	108	175	946	1218
C175-79	40			79	44	139	175	910	1172
C175-111	40			111	44	193	175	846	1090
C140-50	40			50	44	70	140	1003	1291
C140-62	40			62	44	86	140	983	1266
C140-79	40	20±5	2.2±1.4	79	44	111	140	955	1230
C140-111	40			111	44	155	140	904	1164
C140-173	40			173	44	242	140	803	1034
C105-50	40			50	44	53	105	1036	1334
C105-62	40			62	44	65	105	1021	1315
C105-79	40			79	44	83	105	1000	1288
C105-111	40	20±5	2.2±1.4	111	44	116	105	962	1239
C105-173	40			173	44	182	105	886	1141
C105-380	40			380	44	399	105	633	816
C70-50	40			50	44	35	70	1069	1376
C70-62	40			62	44	43	70	1059	1364
C70-79	40			79	44	56	70	1045	1346
C70-111	40			111	44	77	70	1020	1313
C70-173	40	20±5	2.2±1.4	173	44	121	70	969	1248
C70-380	40			380	44	266	70	801	1031
C35-50	40			50	44	18	35	1102	1419
C35-62	40			62	44	22	35	1097	1413
C35-79	40			79	44	28	35	1090	1404
C35-111	40			111	44	39	35	1077	1387
C35-173	40			173	44	61	35	1052	1355
C35-380	40	20±5	2.2±1.4	380	44	133	35	968	1246
C35-500	40			500	44	175	35	919	1184

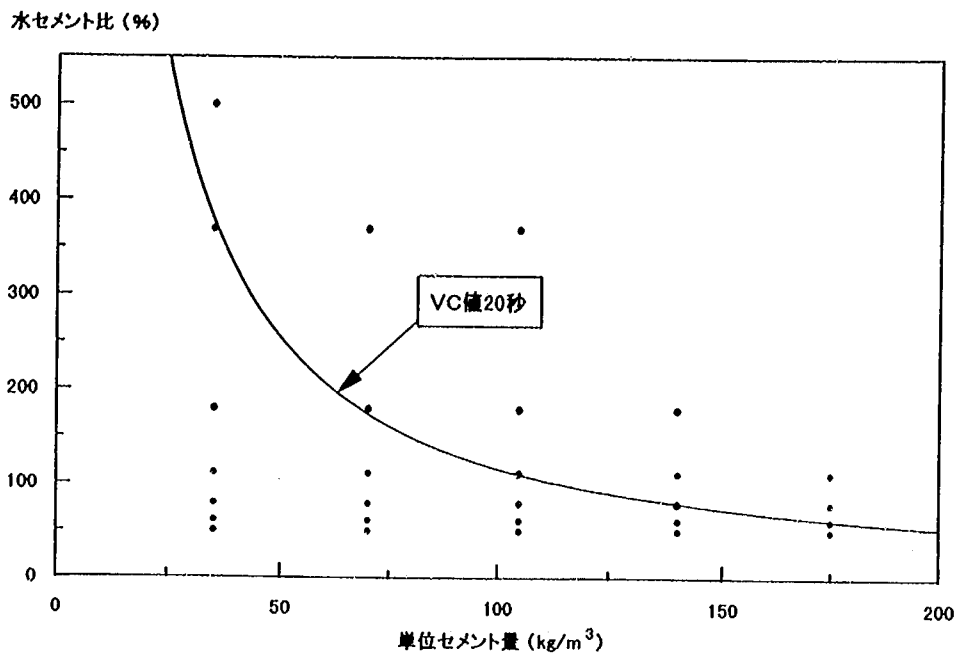


図-4.1 コンクリートの配合(単位セメント量と水セメント比の関係)

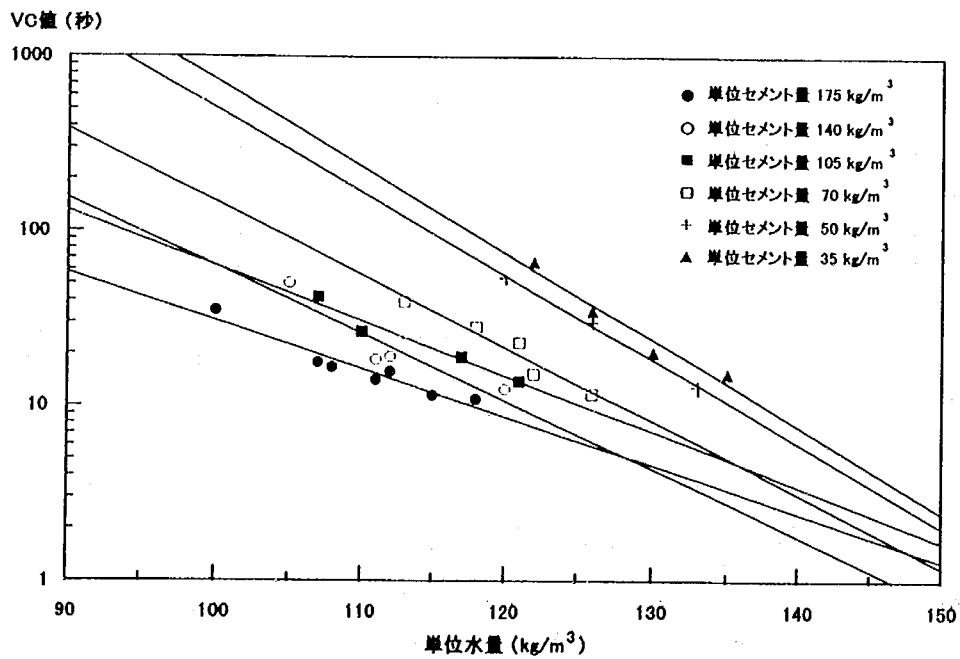


図-4.2 単位水量とVC値の関係

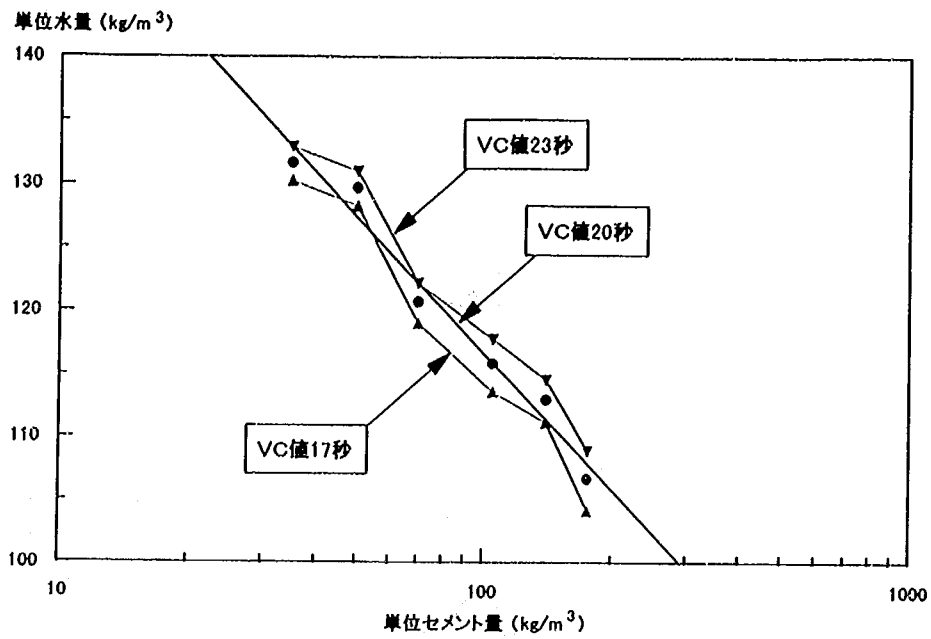


図-4.3 単位セメント量と単位水量の関係

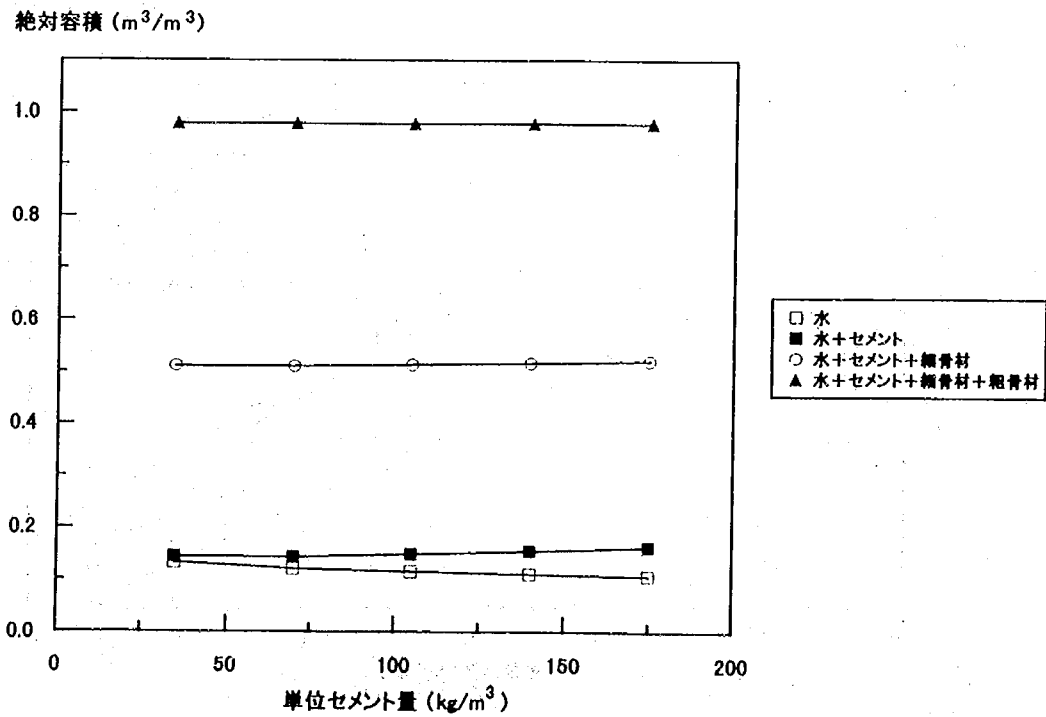


図-4.4 VC 値 20 秒のコンクリートの配合状態図

4.1.2 使用材料

試験に用いた材料を表-4.2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、粗骨材には砂岩の碎石、細骨材には砂岩の砕砂をそれぞれ用いた。

表-4.2 使用材料の物性値

材料	種類	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント	比重:3.16、比表面積:3360cm ² /g
細骨材	砂岩砕砂	比重:2.64、吸水率:1.1% 粗粒率:2.80、実積率:63.0%
粗骨材	砂岩碎石	比重:2.67、吸水率:0.46% 粗粒率:7.19、実積率:62.8%

4.1.3 供試体作製方法

試験に用いた供試体は直径 15cm、高さ 30cm の標準供試体とし、供試体の作製には標準供試体作製装置を用いた。供試体は3層に分けて締め固め、1層あたりの締め固め時間は、30秒、60秒、120秒、240秒の4種類とし、締め固めエネルギーが供試体の締め固め密度と圧縮強度に及ぼす影響についても検討することとした。なお、供試体は試験材齢の91日まで20℃の標準水中養生を行った。

4.1.4 試験項目

試験項目としては、練混ぜ直後のフレッシュコンクリートに対してはVC試験、空気量試験を行い、硬化コンクリートに対してはJIS A 1108に準拠した一軸圧縮強度試験を行った。なお、一軸圧縮強度試験時にはひずみゲージを用いて静弾性係数も測定した(JSCE-G 502-1988)。

4.2 調査結果

4.2.1 相対締固め密度

VC 試験より求めた各配合の VC 値、単位容積質量および相対締固め密度（空気量を 0 とした最大理論密度に対する締固め密度の比率）と、空気量測定試験より求めた各配合の空気量を整理して表-4.3 に示す。表中、VC 値が 360 秒より大きい場合は「>360」、空気量が 15%より大きい場合は「>15」と表示している。また、相対締固め密度が 100%以上のものもあるが、これは、骨材よりも相対的に比重の小さいペースト分が VC 試験中に飛び散ってしまい、結果的に実測値が理論密度よりも大きくなったためと思われる。

次に、標準供試体作製装置により作製した供試体の相対締固め密度を表-4.4 に示す。また、標準供試体作製装置による締固め時間と作製した供試体の相対締固め密度の関係を単位セメント量毎に整理して図-4.5 に示す。図中、太線で示したものは VC 値が 20 秒となる配合であり、相対締固め密度は 100%に近い値となっている。これらの図より、締固め時間が大きくなるほど、すなわち、締固めエネルギーが大きくなるほど相対締固め密度は大きくなり、ある値に収束する傾向が現れている。また、同一単位セメント量では、水セメント比が大きいほどペーストの濃度が薄くなって骨材間の摩擦が小さくなるため、短時間で締固め密度が増大し、その後、締固め時間の増加による相対締固め密度の増加は小さい。逆に、単位セメント量が 70kg/m^3 や 35kg/m^3 の場合、水セメント比が小さいと単位ペーストの絶対量が不足するため、いくら締固め時間を増加しても相対締固め密度が増加しないものも見受けられる。このようなケースは、振動台を用いた細骨材と粗骨材の合成骨材の実積率試験を行っているのと近い状況と考えられる。

また、水セメント比毎に整理した締固め時間と相対締固め密度の関係を図-4.6 に示す。図より、水セメント比が小さい場合、相対締固め密度は締固め時間の増加とともに増加するが、水セメント比が大きい場合、短時間で締固め密度が増大するため、その後、締固め時間の増加に対する相対締固め密度の増加分は小さい。また、同一水セメント比においては、単位セメント量が大きくなるほど、すなわち単位水量および単位ペースト量が大きくなるほど、相対締固め密度は大きくなっている。

次に、単位セメント量をパラメータとして、単位水量と相対締固め密度の関係を図-4.7 に示す。図によれば、単位水量の増加に伴い相対締固め密度は増加する。これらの図より、相対締固め密度に及ぼす単位セメント量の影響は小さく、相対締固め密度は単位水量によってほぼ一義的に定まるようである。図-4.8 には相対締固め密度 100%以下のデータにおける、単位水量と相対締固め密度の関係を示す。図より、単位水量が 0 の場合の相対締固め密度は、細骨材と粗骨材の合成骨材の実積率とほぼ同等な値（約 78%）であることがわかる。

4.2.2 単位容積質量

次に、標準供試体作製装置により作製した供試体の相対締固め密度を表-4.5 に示す。また、標準供試体作製装置による締固め時間と作製した供試体の単位容積質量の関係を単位セメント量毎に整理して

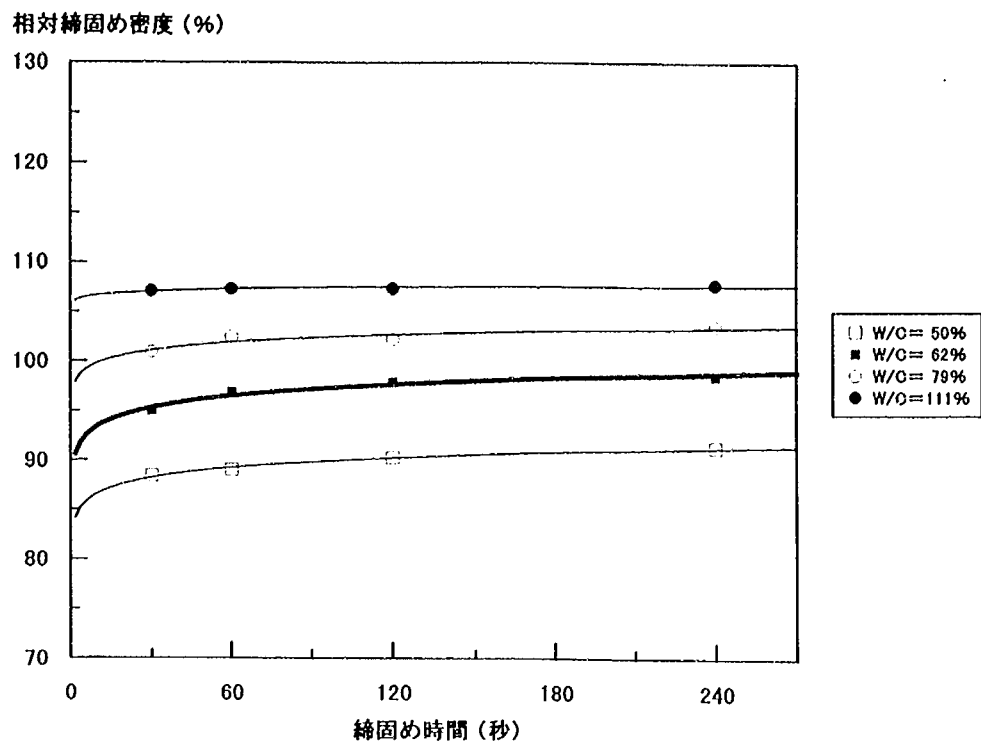
表-4.3 フレッシュコンクリートの性状

配合名	目標値		実測値			
	VC値 (秒)	空気量 (%)	VC値 (秒)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)	相対締固め密度※ (%)
C175-50			177.5	8.9	2.42	95.9
C175-62	20±5	2.2±1.4	24.3	2.5	2.38	95.8
C175-79			2.7	2.7	2.42	99.3
C175-111			0.4	1.3	2.49	106.4
C140-50			>360	6.2	2.24	88.0
C140-62			>360	10.5	2.37	93.9
C140-79	20±5	2.2±1.4	20.5	3.1	2.41	97.0
C140-111			2.0	2.2	2.40	99.8
C140-173			0.3	0.8	2.52	111.6
C105-50			>360	>15	2.18	84.6
C105-62			>360	13.0	2.20	86.2
C105-79			>360	9.1	2.37	93.7
C105-111	20±5	2.2±1.4	20.2	2.2	2.38	96.5
C105-173			0.7	1.6	2.45	103.7
C105-380			---	0.4	---	---
C70-50			>360	>15	2.16	82.7
C70-62			>360	>15	2.18	84.1
C70-79			>360	7.4	2.19	85.1
C70-111			>360	11.0	2.25	88.7
C70-173	20±5	2.2±1.4	23.9	2.0	2.39	97.1
C70-380			---	0.9	---	---
C35-50			>360	>15	2.12	80.3
C35-62			>360	>15	2.15	81.5
C35-79			>360	>15	2.19	83.6
C35-111			>360	>15	2.16	82.9
C35-173			>360	14.0	2.16	84.0
C35-380	20±5	2.2±1.4	22.5	3.1	2.37	96.9
C35-500			3.1	2.5	2.37	99.9

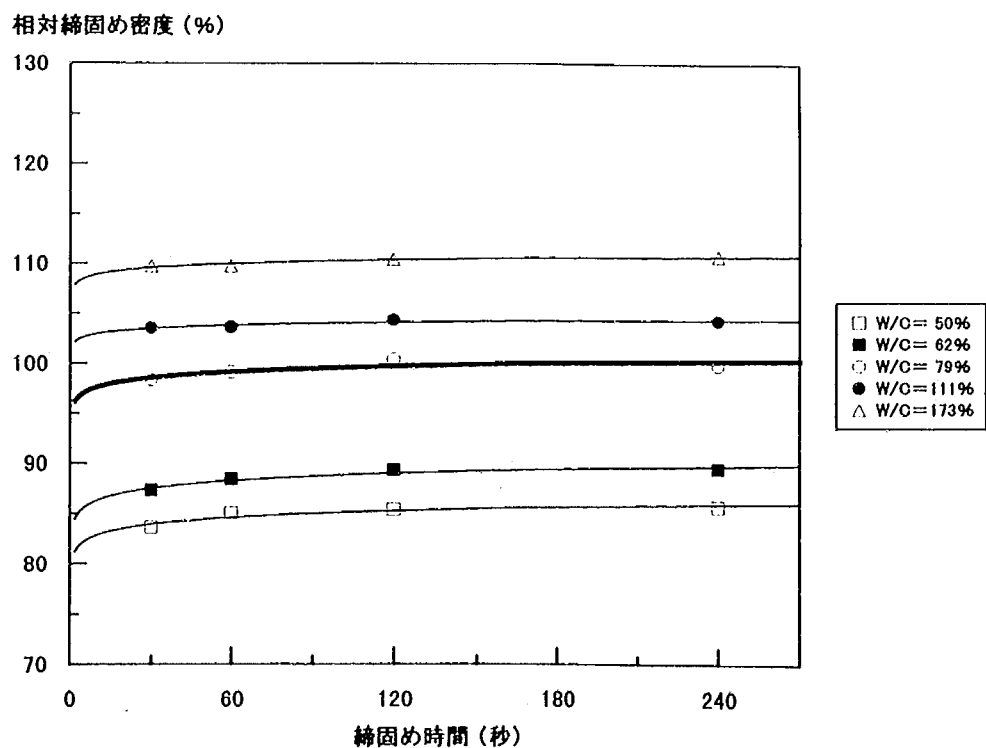
※ VC試験容器内の実測密度を配合上の空隙密度で除したものである。

表-4.4 相対締固め密度

配合名	締固め時間30秒						締固め時間60秒						締固め時間120秒						締固め時間240秒					
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	1 (%)	2 (%)	3 (%)	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	1 (%)	2 (%)	3 (%)	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	1 (%)	2 (%)	3 (%)	平均値 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)
C175-50	88.2	88.5	88.5	88.4	0.173	0.20	88.9	89.6	88.6	89.0	0.513	0.58	90.5	90.6	89.8	90.3	0.436	0.48	91.7	91.3	91.3	91.4	0.231	0.25
C175-62	94.5	94.6	95.9	95.0	0.781	0.82	96.4	97.7	96.3	96.8	0.781	0.81	98.0	98.1	97.7	97.9	0.208	0.21	98.8	98.8	98.3	98.6	0.289	0.29
C175-79	100.8	100.8	101.1	100.9	0.173	0.17	102.3	102.7	102.3	102.4	0.231	0.23	102.3	101.0	103.2	102.2	1.106	1.08	104.0	104.0	102.7	103.6	0.751	0.72
C175-111	107.3	106.8	107.1	107.1	0.252	0.24	107.2	107.3	107.2	107.2	0.058	0.05	107.2	107.3	107.3	107.3	0.058	0.05	108.0	108.0	107.5	107.8	0.289	0.27
C140-50	83.8	83.1	83.8	83.6	0.404	0.48	85.2	84.9	84.8	85.0	0.208	0.24	85.0	85.3	85.9	85.4	0.458	0.54	85.8	85.3	85.9	85.7	0.321	0.38
C140-62	87.1	86.6	88.2	87.3	0.819	0.94	87.6	89.0	88.5	88.4	0.709	0.80	89.4	88.9	89.6	89.3	0.361	0.40	89.5	89.5	89.5	89.5	0.000	0.00
C140-79	98.6	97.8	98.2	98.3	0.503	0.51	99.7	97.4	100.1	99.1	1.457	1.47	100.5	100.3	100.3	100.4	0.115	0.12	100.3	100.3	98.9	99.8	0.808	0.81
C140-111	103.6	103.9	103.0	103.5	0.458	0.44	104.0	102.8	103.9	103.6	0.666	0.64	104.4	---	104.2	104.3	0.141	0.14	105.0	105.0	103.0	104.3	1.155	1.11
C140-173	109.6	109.6	109.9	109.7	0.173	0.16	109.7	110.0	109.3	109.7	0.351	0.32	110.6	109.8	110.7	110.4	0.493	0.45	110.4	110.4	111.5	110.8	0.635	0.57
C105-50	81.8	81.5	80.5	81.3	0.681	0.84	81.1	81.8	81.4	81.4	0.351	0.43	82.6	81.2	81.7	81.8	0.709	0.87	81.9	81.9	82.1	82.0	0.115	0.14
C105-62	82.4	82.9	82.3	82.5	0.321	0.39	83.1	83.7	83.1	83.3	0.346	0.42	82.3	83.4	83.7	83.1	0.737	0.89	84.5	84.5	84.6	84.5	0.058	0.07
C105-79	87.5	86.8	87.8	87.4	0.513	0.59	88.6	88.1	87.5	88.1	0.551	0.63	90.3	89.9	89.3	89.8	0.503	0.56	88.7	88.7	90.5	89.3	1.039	1.16
C105-111	97.7	97.9	97.4	97.7	0.252	0.26	97.4	98.7	99.0	98.4	0.850	0.86	100.6	99.8	100.1	100.2	0.404	0.40	100.0	100.0	100.1	100.0	0.058	0.06
C105-173	105.9	105.3	105.2	105.5	0.379	0.36	106.4	105.6	106.6	106.2	0.529	0.50	106.1	106.3	106.1	106.2	0.115	0.11	106.3	106.3	106.0	106.2	0.173	0.16
C105-380	122.9	123.6	125.9	124.1	1.570	1.26	123.8	123.7	125.9	124.5	1.242	1.00	123.9	123.3	---	123.6	0.424	0.34	125.0	125.0	---	125.0	0.000	0.00
C70-50	80.1	79.2	79.9	79.7	0.473	0.59	79.9	81.1	80.6	80.5	0.603	0.75	81.2	80.4	80.4	80.7	0.462	0.57	79.3	79.6	80.5	79.8	0.624	0.78
C70-62	80.7	79.6	79.6	80.0	0.635	0.79	80.9	80.4	80.7	80.7	0.252	0.31	81.4	80.9	81.0	81.1	0.265	0.33	82.7	81.8	81.8	82.1	0.520	0.63
C70-79	81.6	80.9	81.9	81.5	0.513	0.63	83.6	81.8	82.9	82.8	0.907	1.10	81.5	84.2	83.7	83.1	1.436	1.73	84.2	84.2	83.7	84.0	0.289	0.34
C70-111	84.9	85.7	86.8	85.8	0.954	1.11	85.3	85.9	86.4	85.9	0.551	0.64	86.0	86.3	87.4	86.6	0.737	0.85	85.8	85.8	86.9	86.2	0.635	0.74
C70-173	98.0	98.3	97.8	98.0	0.252	0.26	98.3	98.5	98.7	98.5	0.200	0.20	99.4	99.3	100.8	99.8	0.839	0.84	99.2	99.2	99.2	99.2	0.000	0.00
C70-380	110.5	111.4	111.0	111.0	0.451	0.41	111.6	111.2	111.2	111.3	0.231	0.21	112.9	111.8	111.4	112.0	0.777	0.69	112.5	112.5	112.8	112.6	0.173	0.15
C35-50	78.4	78.5	77.4	78.1	0.608	0.78	79.7	79.4	78.5	79.2	0.624	0.79	79.7	79.5	79.6	79.6	0.100	0.13	79.4	78.3	78.2	78.6	0.666	0.85
C35-62	79.1	79.0	77.8	78.6	0.723	0.92	78.4	78.7	79.5	78.9	0.569	0.72	78.5	80.2	78.2	79.0	1.079	1.37	79.8	80.1	79.8	79.9	0.173	0.22
C35-79	80.2	80.6	79.6	80.1	0.503	0.63	80.8	81.9	81.3	81.3	0.551	0.68	81.2	81.4	82.3	81.6	0.586	0.72	80.2	80.2	79.8	80.1	0.231	0.29
C35-111	79.2	79.4	80.0	79.5	0.416	0.52	81.9	81.8	80.1	81.3	1.012	1.24	81.0	81.4	80.7	81.0	0.351	0.43	80.1	80.1	80.0	80.1	0.058	0.07
C35-173	82.1	80.6	81.9	81.5	0.814	1.00	82.0	83.0	82.1	82.4	0.551	0.67	83.2	84.1	83.1	83.5	0.551	0.66	81.9	81.9	82.1	82.0	0.115	0.14
C35-380	98.9	97.8	---	98.4	0.778	0.79	99.6	99.6	99.5	99.6	0.058	0.06	98.1	98.9	99.4	98.8	0.656	0.66	98.5	98.5	99.0	98.7	0.289	0.29
C35-500	105.1	103.0	102.8	103.6	1.274	1.23	104.1	103.5	104.5	104.0	0.503	0.48	104.8	104.5	104.4	104.6	0.208	0.20	103.7	103.8	104.3	103.9	0.321	0.31



図－4.5(1) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (単位セメント量 175kg/m³)



図－4.5(2) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (単位セメント量 140kg/m³)

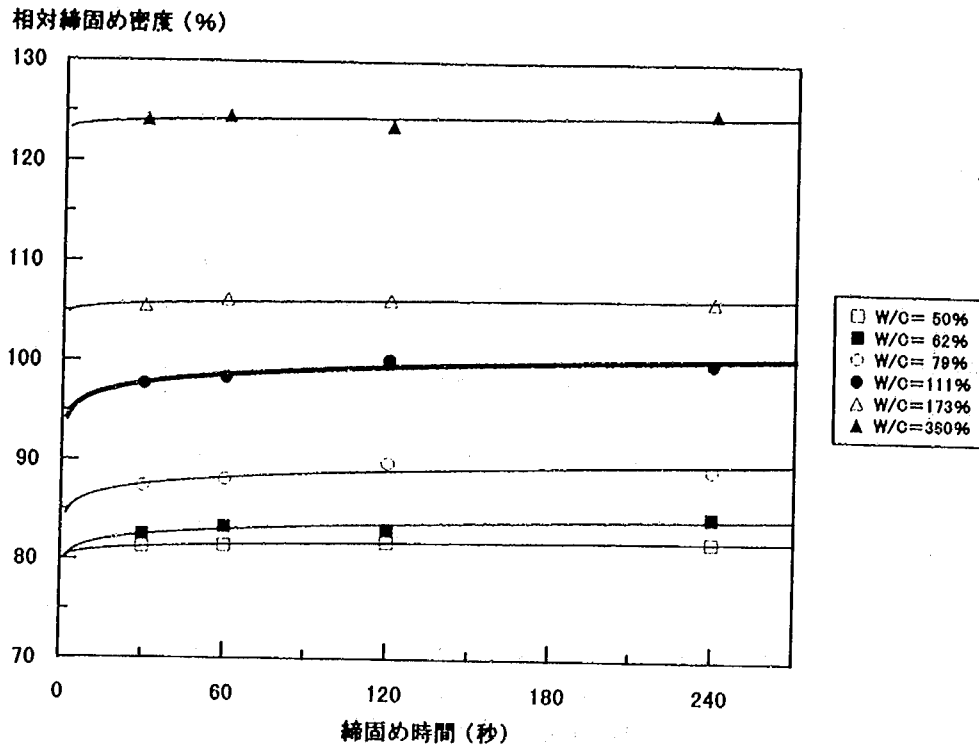


図-4.5(3) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (単位セメント量 105kg/m³)

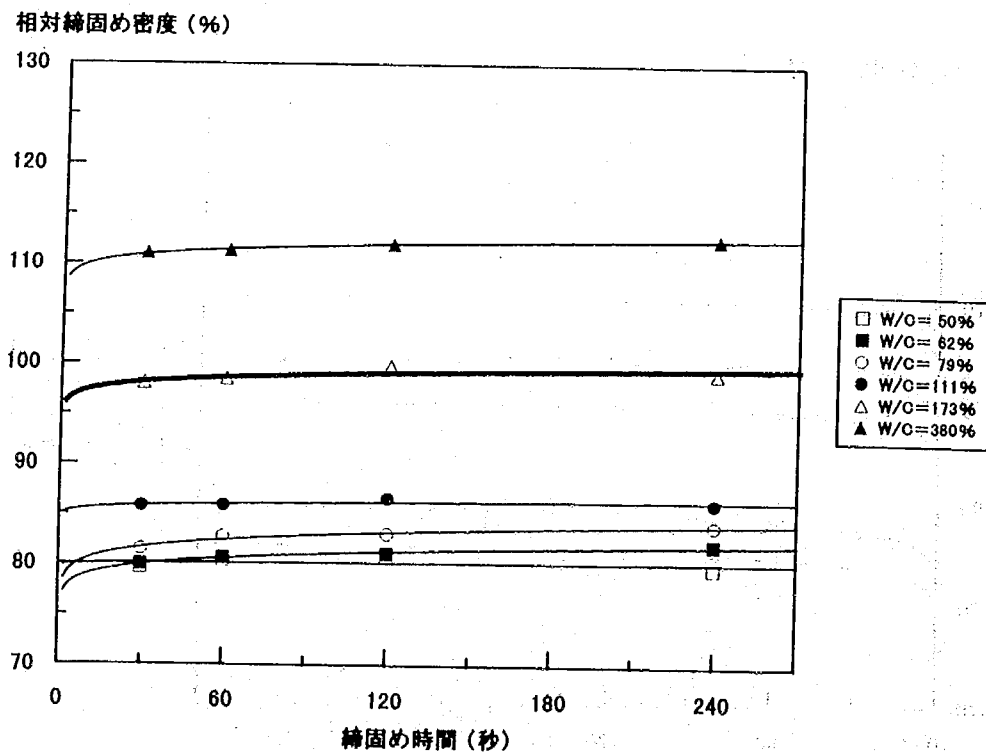


図-4.5(4) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (単位セメント量 70kg/m³)

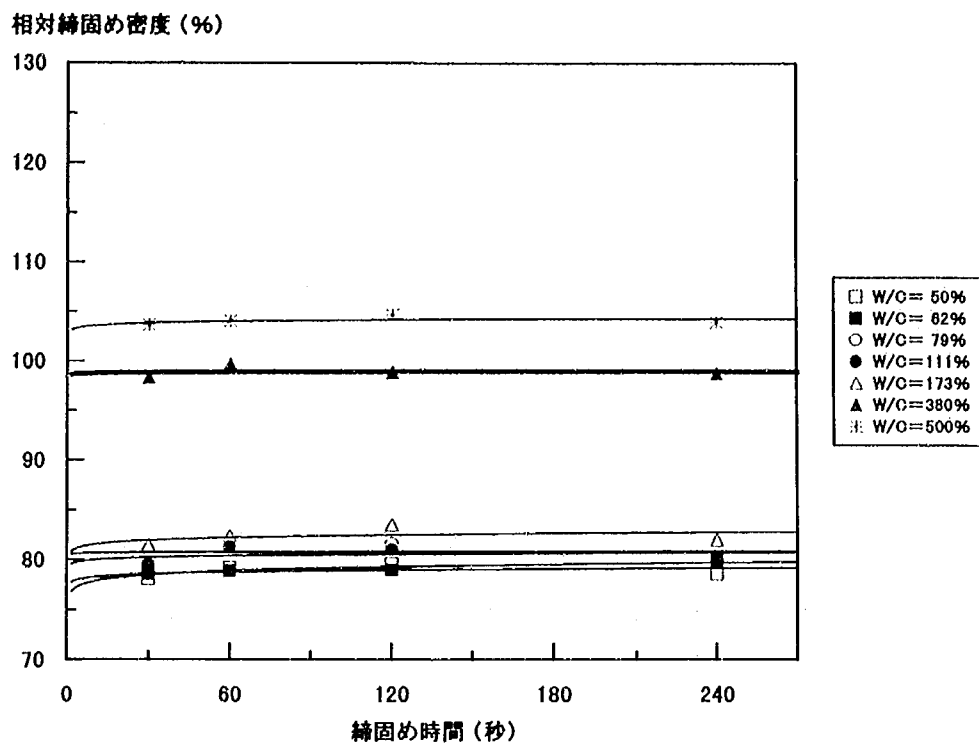


図-4.5(5) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (単位セメント量 35kg/m³)

相対締固め密度 (%)

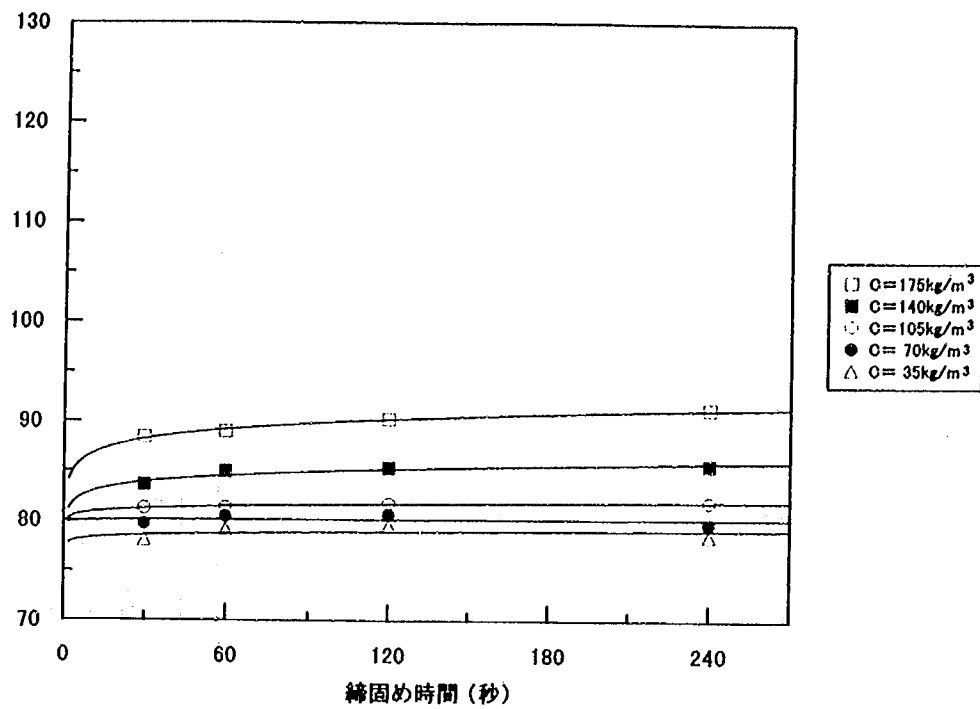


図-4.6(1) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (水セメント比 50%)

相対締固め密度 (%)

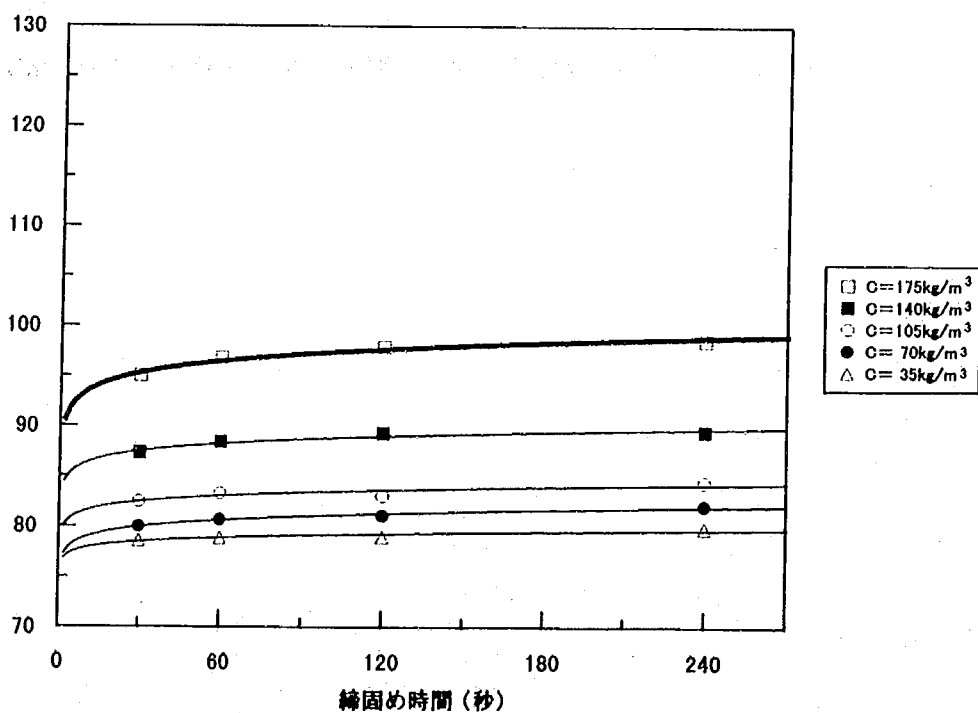


図-4.6(2) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (水セメント比 62%)

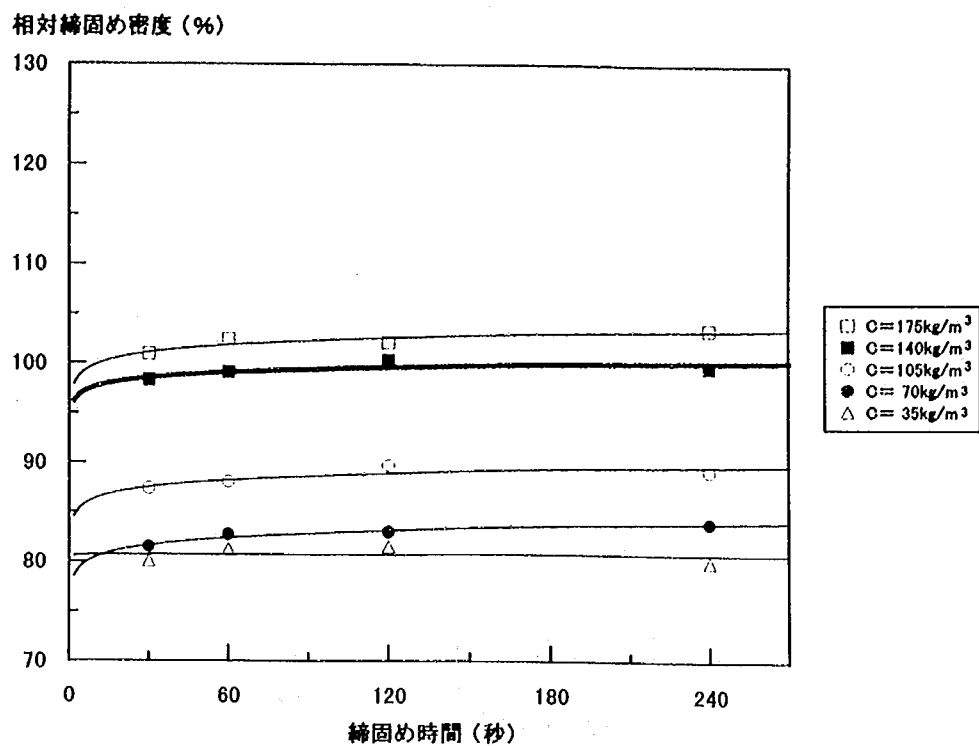


図-4.6(3) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (水セメント比 79%)

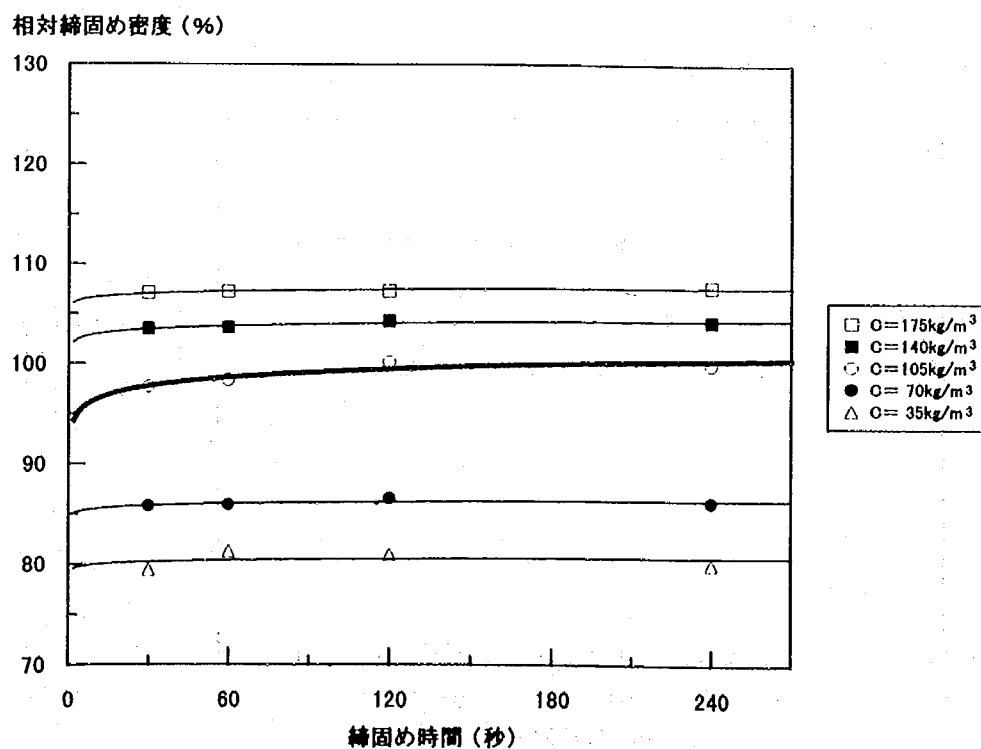


図-4.6(4) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (水セメント比 111%)

相対締固め密度 (%)

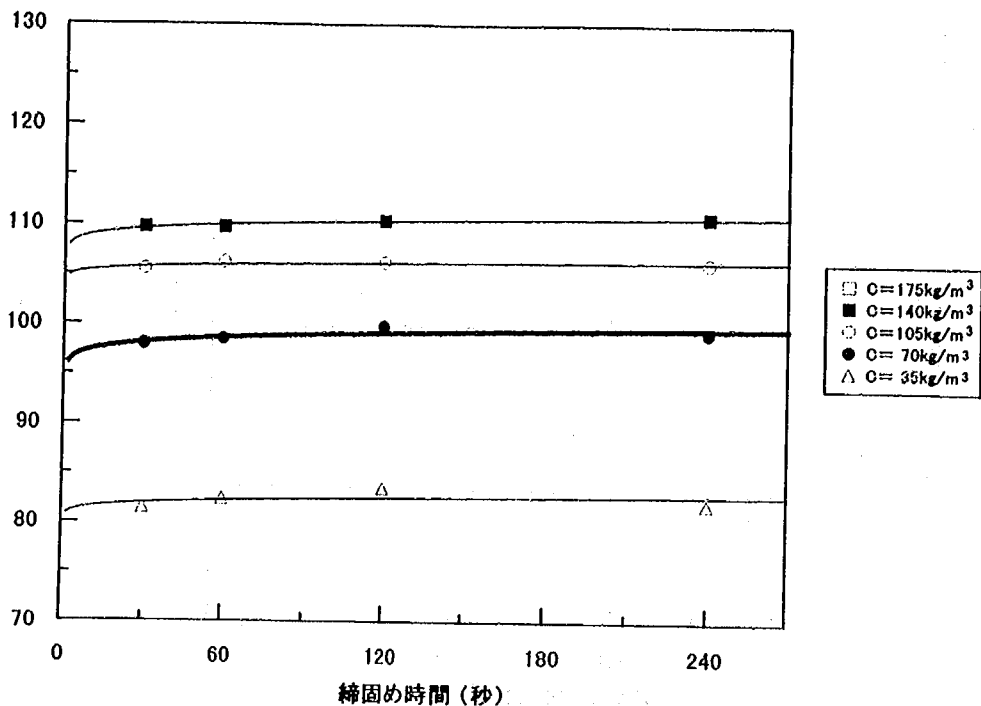


図-4.6(5) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (水セメント比 173%)

相対締固め密度 (%)

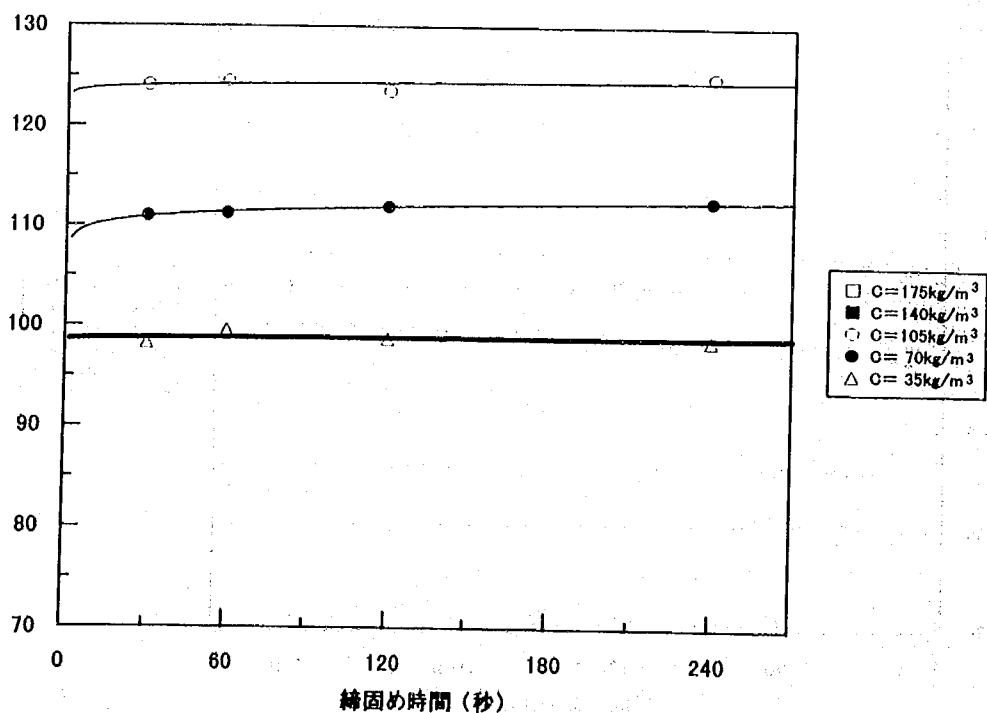


図-4.6(6) 締固め時間と相対締固め密度の関係 (水セメント比 380%)

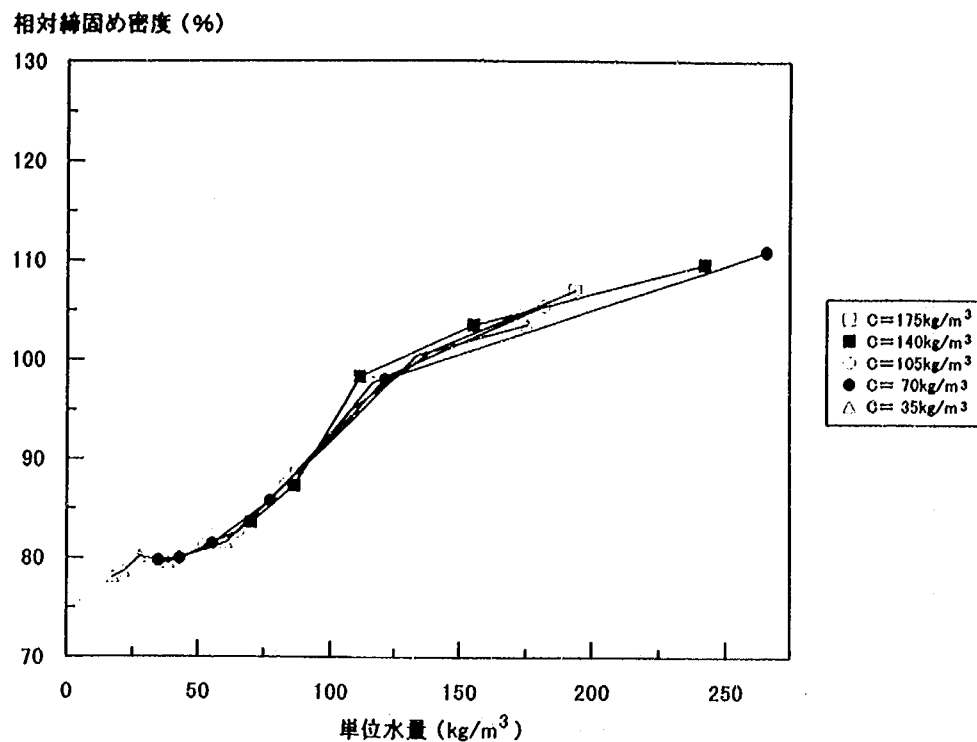


図-4.7(1) 単位水量と相対締固め密度の関係 (締固め時間 30 秒)

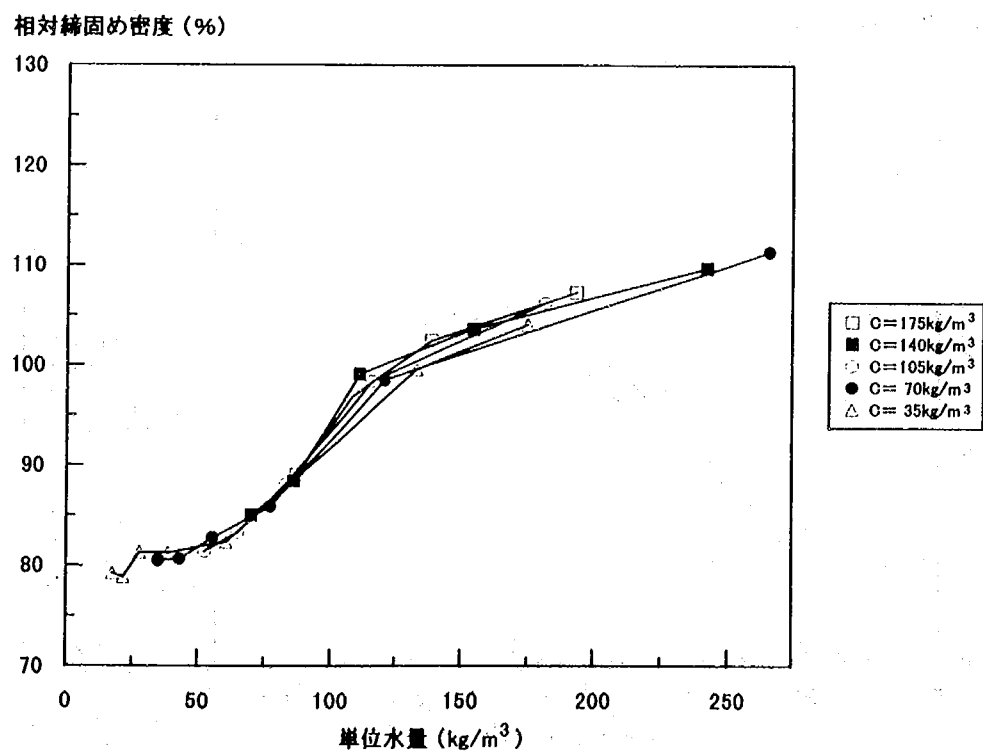


図-4.7(2) 単位水量と相対締固め密度の関係 (締固め時間 60 秒)

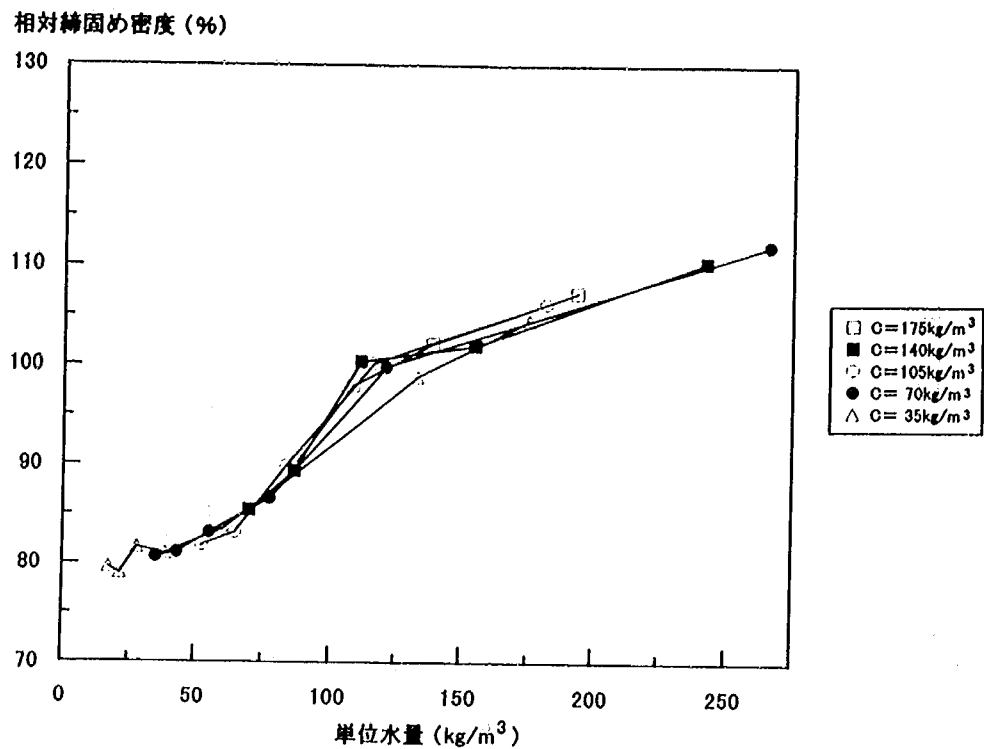


図-4.7(3) 単位水量と相対締固め密度の関係 (締固め時間 120 秒)

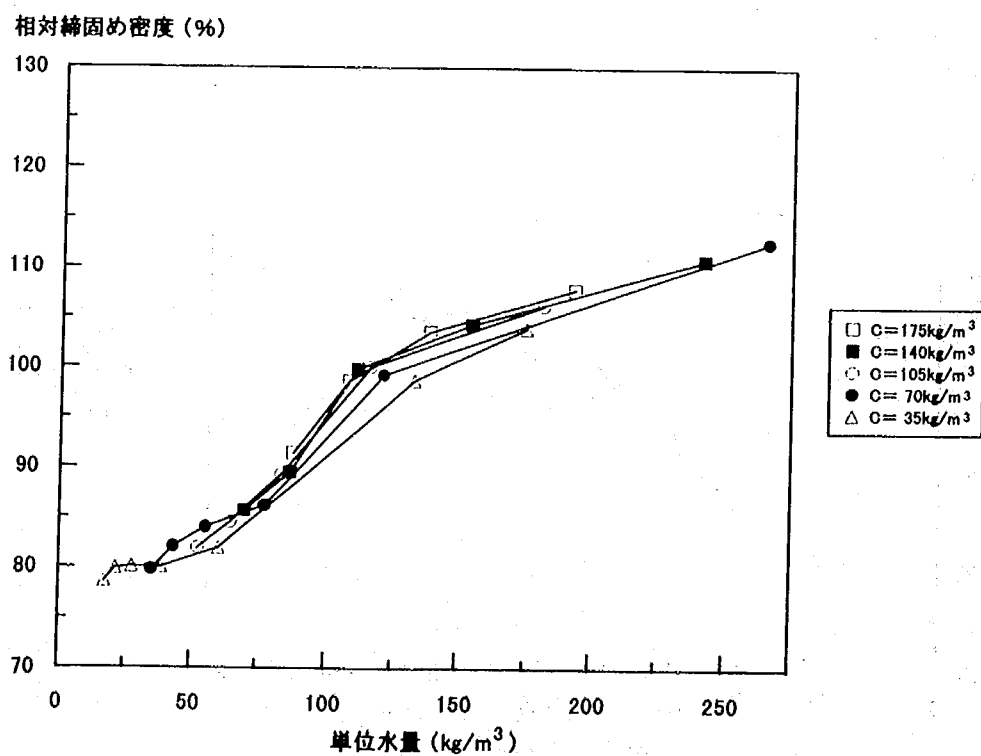


図-4.7(4) 単位水量と相対締固め密度の関係 (締固め時間 240 秒)

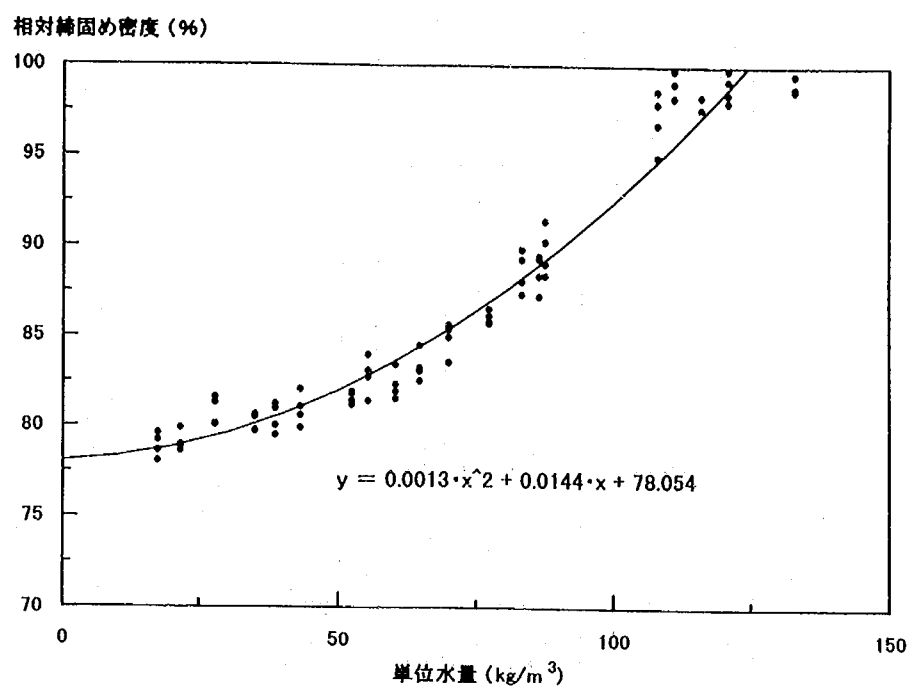


図-4.8 単位水量と相対締固め密度の関係 (締固め時間 240 秒)

表-4.5 単位容積質量

配合名	締固め時間30秒						締固め時間60秒						締固め時間120秒						締固め時間240秒					
	1 (t/m ³)	2 (t/m ³)	3 (t/m ³)	平均値 (t/m ³)	標準偏差 (t/m ³)	変動係数 (%)	1 (t/m ³)	2 (t/m ³)	3 (t/m ³)	平均値 (t/m ³)	標準偏差 (t/m ³)	変動係数 (%)	1 (t/m ³)	2 (t/m ³)	3 (t/m ³)	平均値 (t/m ³)	標準偏差 (t/m ³)	変動係数 (%)	1 (t/m ³)	2 (t/m ³)	3 (t/m ³)	平均値 (t/m ³)	標準偏差 (t/m ³)	変動係数 (%)
C175-50	2.238	2.243	2.245	2.242	0.004	0.16	2.255	2.272	2.248	2.2583	0.012	0.55	2.294	2.297	2.278	2.2897	0.010	0.45	2.325	2.315	2.316	2.3187	0.006	0.24
C175-62	2.363	2.366	2.398	2.376	0.019	0.82	2.411	2.443	2.408	2.421	0.019	0.80	2.450	2.454	2.444	2.449	0.005	0.21	2.471	2.471	2.459	2.467	0.007	0.28
C175-79	2.467	2.468	2.477	2.471	0.006	0.22	2.505	2.514	2.505	2.508	0.005	0.21	2.504	2.474	2.527	2.502	0.027	1.06	2.547	2.547	2.516	2.537	0.018	0.71
C175-111	2.529	2.516	2.523	2.523	0.007	0.26	2.527	2.530	2.527	2.528	0.002	0.07	2.526	2.530	2.529	2.528	0.002	0.08	2.546	2.546	2.533	2.542	0.008	0.30
C140-50	2.146	2.127	2.145	2.139	0.011	0.50	2.182	2.174	2.171	2.176	0.006	0.26	2.175	2.182	2.200	2.186	0.013	0.59	2.197	2.184	2.199	2.193	0.008	0.37
C140-62	2.206	2.192	2.232	2.210	0.020	0.92	2.219	2.254	2.242	2.238	0.018	0.79	2.264	2.252	2.269	2.262	0.009	0.39	2.265	2.265	2.267	2.266	0.001	0.05
C140-79	2.461	2.437	2.445	2.448	0.012	0.50	2.482	2.425	2.494	2.467	0.037	1.49	2.502	2.497	2.498	2.499	0.003	0.11	2.497	2.497	2.463	2.486	0.020	0.79
C140-111	2.504	2.511	2.490	2.502	0.011	0.43	2.514	2.483	2.512	2.503	0.017	0.69	2.524	—	2.517	2.521	0.005	0.20	2.536	2.536	2.489	2.520	0.027	1.08
C140-173	2.486	2.487	2.493	2.489	0.004	0.15	2.489	2.496	2.480	2.488	0.008	0.32	2.508	2.491	2.511	2.503	0.011	0.43	2.505	2.505	2.531	2.514	0.015	0.60
C105-50	2.113	2.105	2.079	2.099	0.018	0.85	2.096	2.113	2.104	2.104	0.009	0.40	2.134	2.099	2.110	2.114	0.018	0.85	2.116	2.115	2.122	2.118	0.004	0.18
C105-62	2.112	2.126	2.110	2.116	0.009	0.41	2.130	2.144	2.129	2.134	0.008	0.39	2.109	2.136	2.144	2.130	0.018	0.86	2.165	2.165	2.168	2.166	0.002	0.08
C105-79	2.216	2.198	2.222	2.212	0.012	0.56	2.244	2.230	2.215	2.230	0.015	0.65	2.287	2.276	2.261	2.275	0.013	0.57	2.246	2.246	2.291	2.261	0.026	1.15
C105-111	2.418	2.425	2.411	2.418	0.007	0.29	2.411	2.443	2.452	2.435	0.022	0.88	2.491	2.472	2.479	2.481	0.010	0.39	2.476	2.476	2.478	2.477	0.001	0.05
C105-173	2.505	2.492	2.488	2.495	0.009	0.36	2.516	2.498	2.521	2.512	0.012	0.48	2.510	2.515	2.510	2.512	0.003	0.11	2.515	2.515	2.507	2.512	0.005	0.18
C105-380	2.455	2.469	2.515	2.480	0.031	1.27	2.473	2.471	2.514	2.486	0.024	0.98	2.474	2.463	—	2.469	0.008	0.32	2.496	2.496	—	2.496	0.000	0.00
C70-50	2.088	2.066	2.084	2.079	0.012	0.56	2.084	2.115	2.103	2.101	0.016	0.74	2.116	2.097	2.097	2.103	0.011	0.52	2.068	2.076	2.098	2.081	0.016	0.75
C70-62	2.094	2.063	2.064	2.074	0.018	0.85	2.097	2.084	2.093	2.091	0.007	0.32	2.112	2.098	2.101	2.104	0.007	0.35	2.144	2.120	2.123	2.129	0.013	0.61
C70-79	2.099	2.082	2.106	2.096	0.012	0.59	2.151	2.105	2.133	2.130	0.023	1.09	2.097	2.167	2.152	2.139	0.037	1.72	2.166	2.166	2.154	2.162	0.007	0.32
C70-111	2.152	2.173	2.201	2.175	0.025	1.13	2.163	2.179	2.190	2.177	0.014	0.62	2.181	2.188	2.217	2.195	0.019	0.87	2.176	2.176	2.203	2.185	0.016	0.71
C70-173	2.412	2.421	2.408	2.414	0.007	0.28	2.420	2.426	2.429	2.425	0.005	0.19	2.448	2.445	2.481	2.458	0.020	0.81	2.443	2.443	2.442	2.443	0.001	0.02
C70-380	2.450	2.470	2.461	2.460	0.010	0.41	2.473	2.465	2.465	2.468	0.005	0.19	2.503	2.479	2.470	2.484	0.017	0.69	2.494	2.494	2.501	2.496	0.004	0.16
C35-50	2.062	2.066	2.036	2.055	0.016	0.79	2.098	2.091	2.066	2.085	0.017	0.81	2.097	2.093	2.096	2.095	0.002	0.10	2.089	2.061	2.058	2.069	0.017	0.83
C35-62	2.075	2.074	2.042	2.064	0.019	0.91	2.056	2.067	2.088	2.070	0.016	0.79	2.061	2.106	2.054	2.074	0.028	1.36	2.094	2.103	2.095	2.097	0.005	0.24
C35-79	2.096	2.106	2.082	2.095	0.012	0.58	2.111	2.141	2.125	2.126	0.015	0.71	2.122	2.127	2.152	2.134	0.016	0.75	2.098	2.098	2.086	2.094	0.007	0.33
C35-111	2.056	2.060	2.076	2.064	0.011	0.51	2.126	2.123	2.078	2.109	0.027	1.27	2.102	2.112	2.094	2.103	0.009	0.43	2.079	2.079	2.076	2.078	0.002	0.08
C35-173	2.102	2.063	2.096	2.087	0.021	1.01	2.098	2.123	2.100	2.107	0.014	0.66	2.129	2.152	2.125	2.135	0.015	0.68	2.096	2.096	2.101	2.098	0.003	0.14
C35-380	2.410	2.381	—	2.396	0.021	0.86	2.426	2.426	2.423	2.425	0.002	0.07	2.391	2.410	2.422	2.408	0.016	0.65	2.400	2.400	2.413	2.404	0.008	0.31
C35-500	2.486	2.435	2.431	2.451	0.031	1.25	2.461	2.449	2.472	2.461	0.012	0.47	2.478	2.472	2.468	2.473	0.005	0.20	2.453	2.455	2.467	2.458	0.008	0.31

図-4.9 に示す。図中、太線で示したものは VC 値が 20 秒となる配合である。これらの図より、締固め時間が大きくなるほど、すなわち、締固めエネルギーが大きくなるほど、単位容積質量は大きくなり、ある値に収束する傾向が見られる。また、同一単位セメント量において水セメント比を大きくしていくと、最終的な単位容積質量は大きくなるが、VC 値 20 秒の配合より大きな水セメント比では、その増加の度合いは小さい。

また、水セメント比毎に整理した締固め時間と単位容積質量の関係を図-4.10 に示す。図より、水セメント比が小さい場合、締固め時間の増加による単位容積質量の増加が大きいが、水セメント比が大きい場合、短時間で締固め密度が増大するため、その後、締固め時間の増加による単位容積質量の増加は小さい。

次に、図-4.11 は、水セメント比をパラメータとして、単位セメント量と単位容積質量の関係を示したものである。図より、単位セメント量が大きくなるほど単位容積質量は大きくなるが、VC 値が 20 秒の配合を境に単位容積質量の増加は一定値に収束する傾向にある。

また、図-4.12 は、単位セメント量をパラメータとして、単位水量と単位容積質量の関係を示したものである。図によれば、単位水量が大きくなるほど単位容積質量は大きくなるが、VC 値が 20 秒の配合を境に単位容積質量の増加は収束する傾向にある。

以上のことから、超貧配合コンクリートにおいて十分な締固め密度を得るためには、いずれの単位セメント量の場合においても、20 秒程度の VC 値を確保することが必要なことがわかる。

4.2.3 圧縮強度

各配合、各締固め時間における圧縮強度を表-4.6 に示す。3 章では、結合材としての効果が期待できるのは単位セメント量 50 kg/m^3 程度までとしたが、単位セメント量 35 kg/m^3 においてもわずかながら圧縮強度が発現した。しかし、値のバラツキは大きくなっている。

水セメント比をパラメータとして、単位セメント量と圧縮強度の関係を図-4.13 に示す。図中の点線は、VC 値 20 秒の配合における圧縮強度を結んだ線である。図によれば、同一水セメント比において、単位セメント量が大きくなるほど圧縮強度は大きくなるが、VC 値 20 秒の配合を境に圧縮強度の増加は緩慢になる傾向にある。なお、同一単位セメント量においては、水セメント比に関わらず、VC 値 20 秒の配合が最も圧縮強度が大きい。これらの図において、例えば、単位セメント量 175 kg/m^3 、 $W/C=62\%$ の基準配合から単位セメント量を低減させる場合、水セメント比を一定とする（実線に沿う）よりも、VC 値 20 秒一定を確保する（点線に沿う）方が、より高い圧縮強度が得られることがわかった。

次に、図-4.13 の圧縮強度を、同一水セメント比における VC 値 20 秒の配合の圧縮強度でそれぞれ除して無次元化した場合の単位セメント量と圧縮強度の関係を図-4.14 に示す。図より、単位セメント量が大きくなるほど、圧縮強度は大きくなり、VC 値 20 秒の配合を境に圧縮強度の増加が緩慢になる傾向がよくわかる。また、単位セメント量の増加に対する圧縮強度の増加の傾向は、異なる水セメント比においても同様であることがわかる。逆に見ると、VC 値 20 秒の配合から水セメント比を一定として単位セメント量を低減する場合、もともとの単位セメント量の多寡によって圧縮強度の低下率はそれ

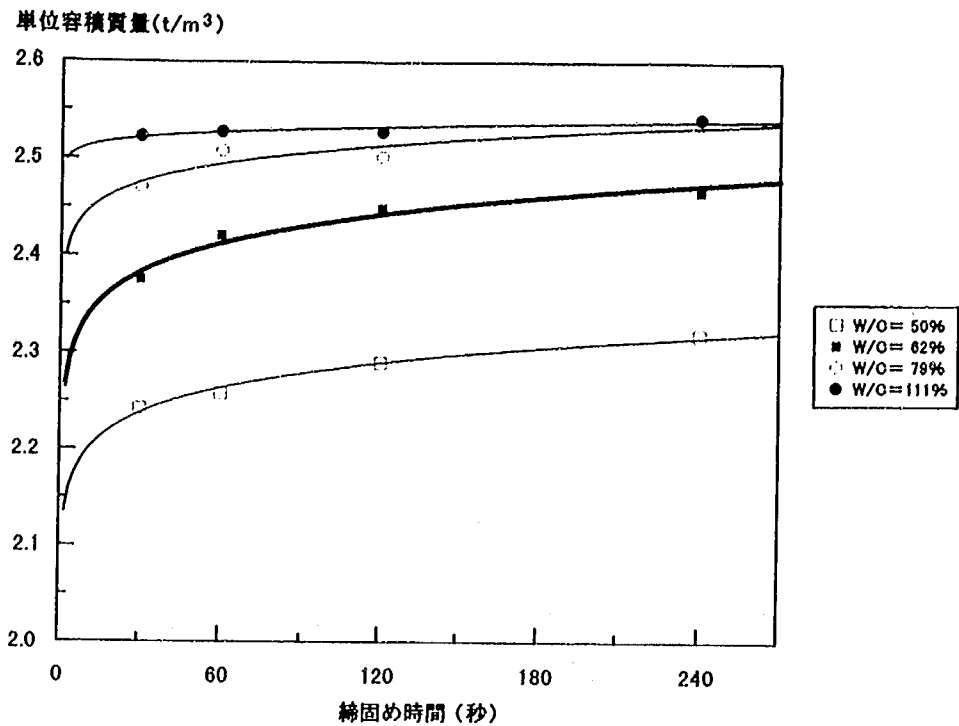


図-4.9(1) 締固め時間と単位容積質量の関係 (単位セメント量 175kg/m^3)

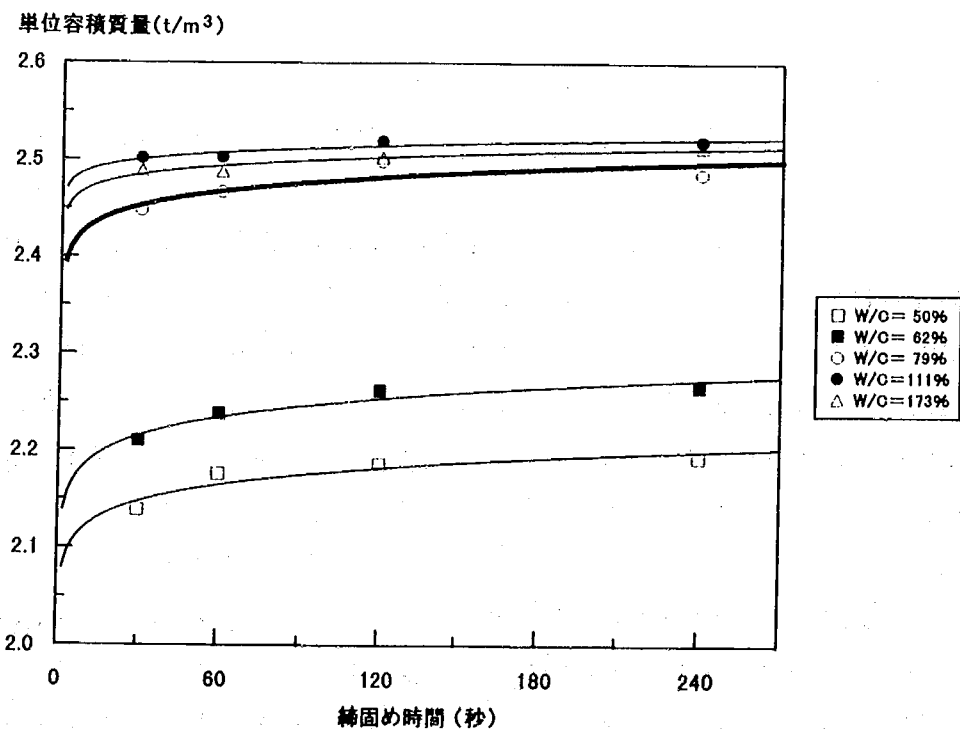


図-4.9(2) 締固め時間と単位容積質量の関係 (単位セメント量 140kg/m^3)

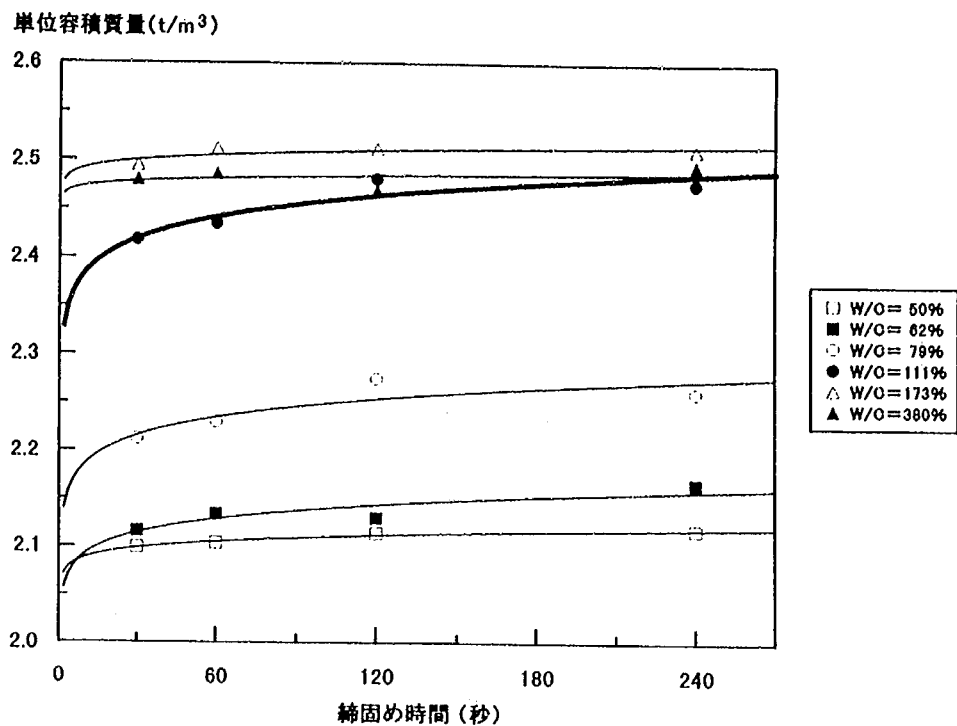


図-4.9(3) 締固め時間と単位容積質量の関係 (単位セメント量 105kg/m^3)

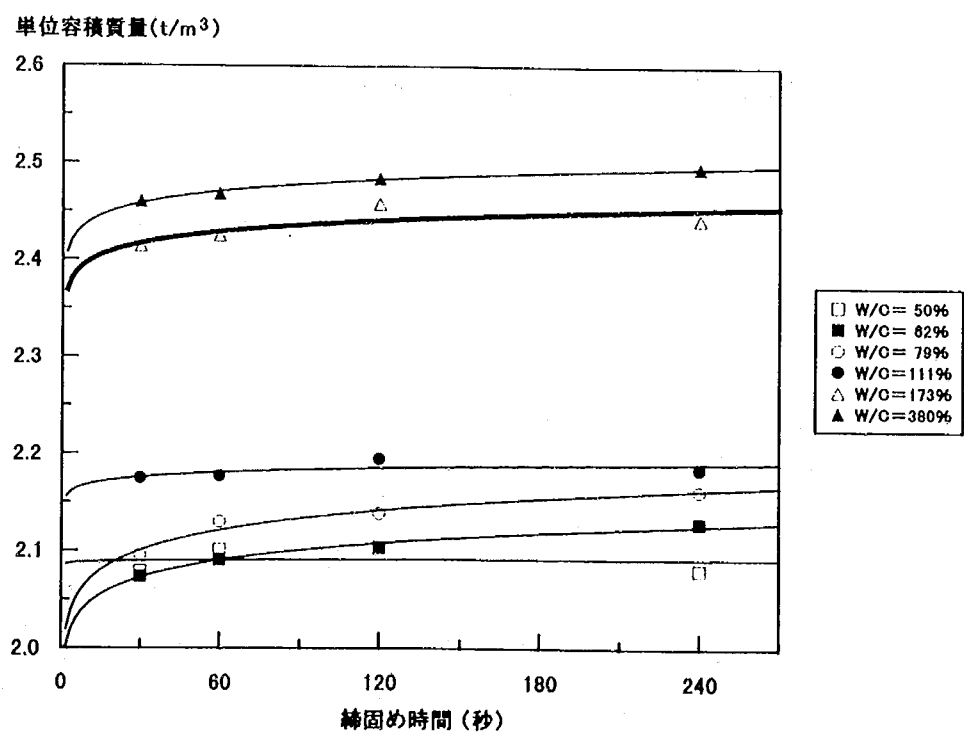


図-4.9(4) 締固め時間と単位容積質量の関係 (単位セメント量 70kg/m^3)

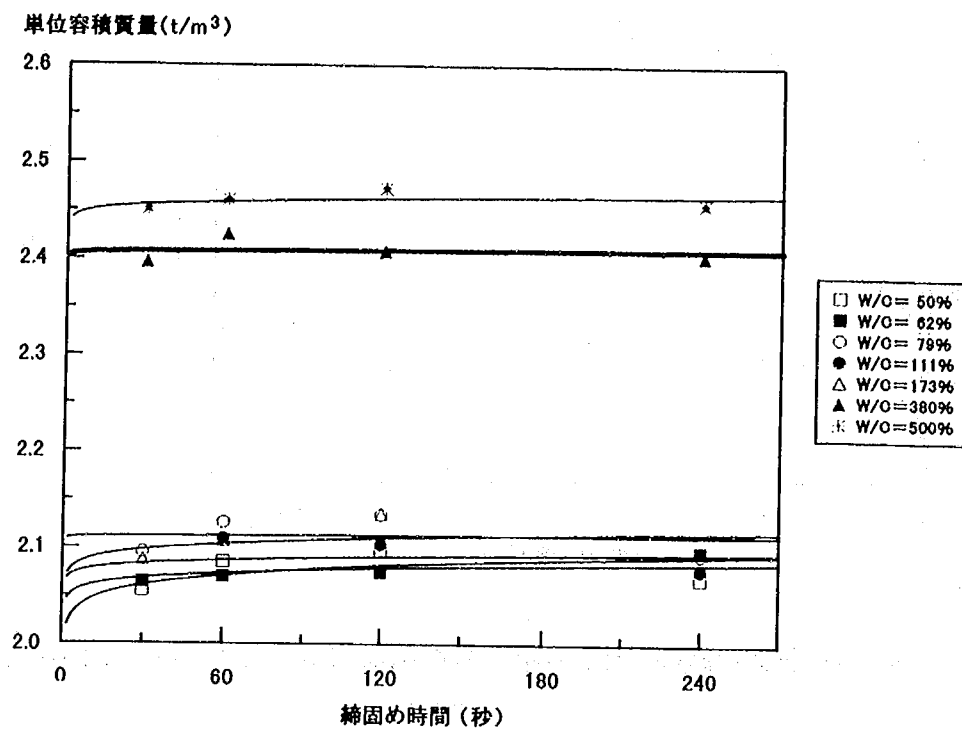


図-4.9(5) 締固め時間と単位容積質量の関係 (単位セメント量 $35kg/m^3$)

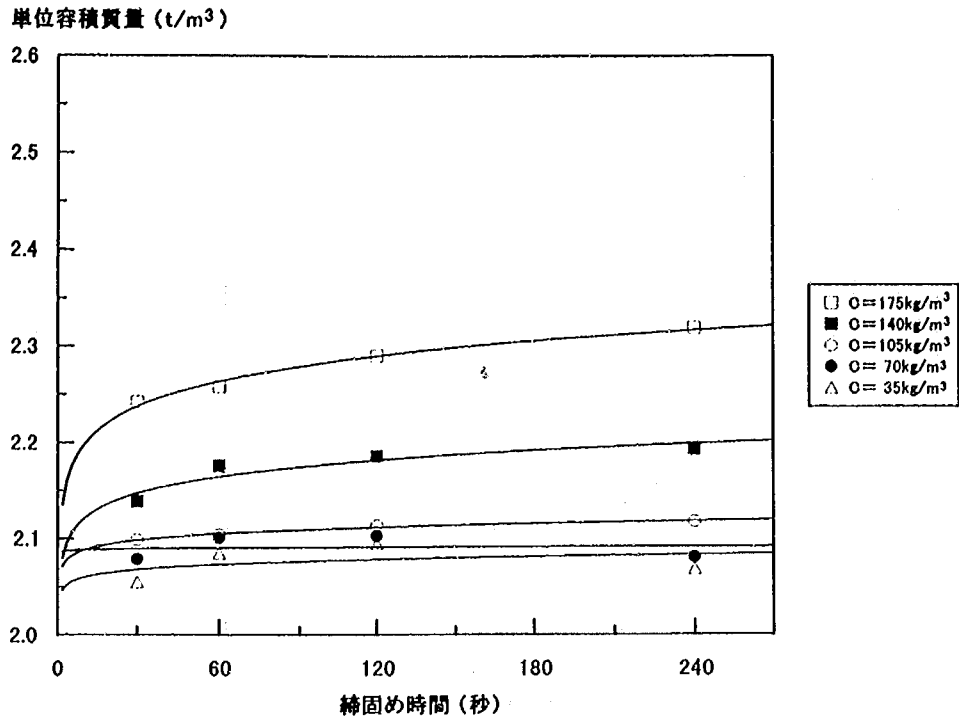


図-4.10(1) 締固め時間と単位容積質量の関係 (水セメント比 50%)

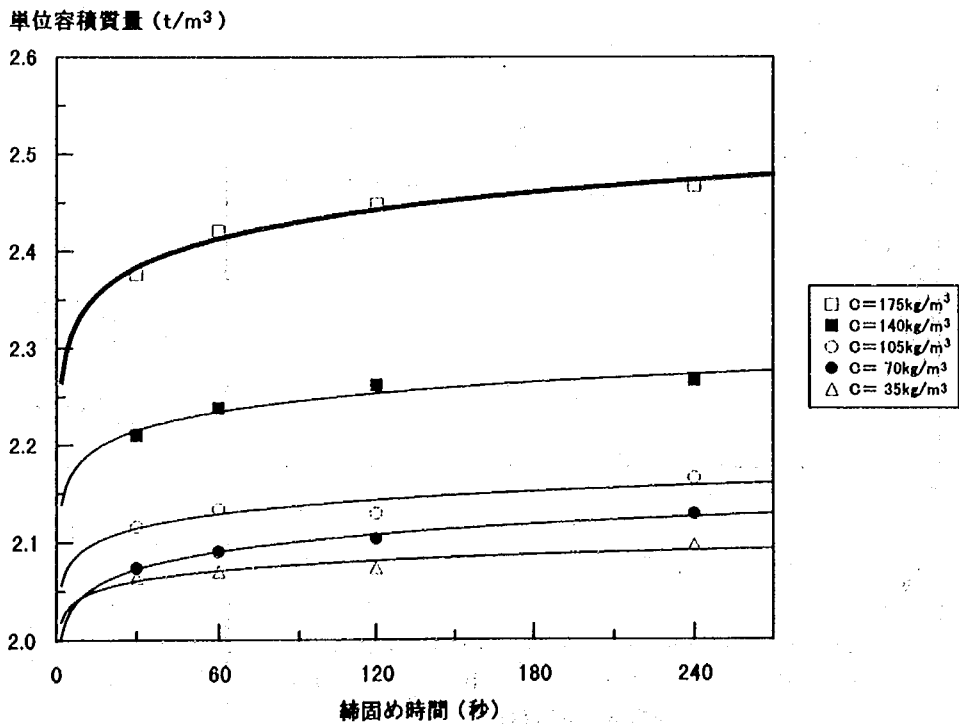


図-4.10(2) 締固め時間と単位容積質量の関係 (水セメント比 62%)

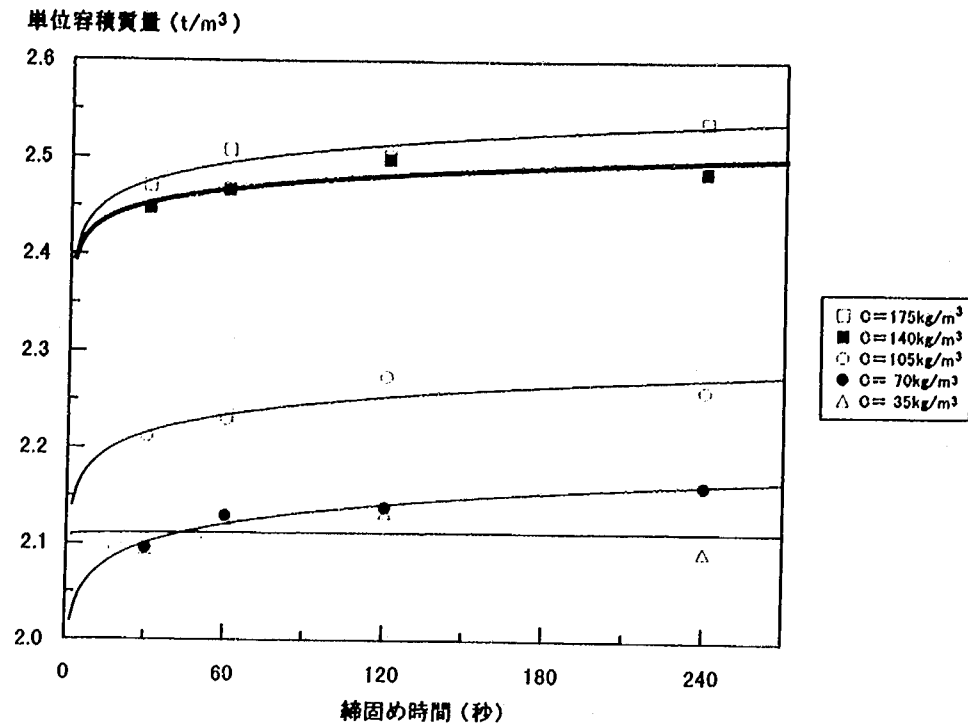


図-4.10(3) 締固め時間と単位容積質量の関係 (水セメント比 79%)

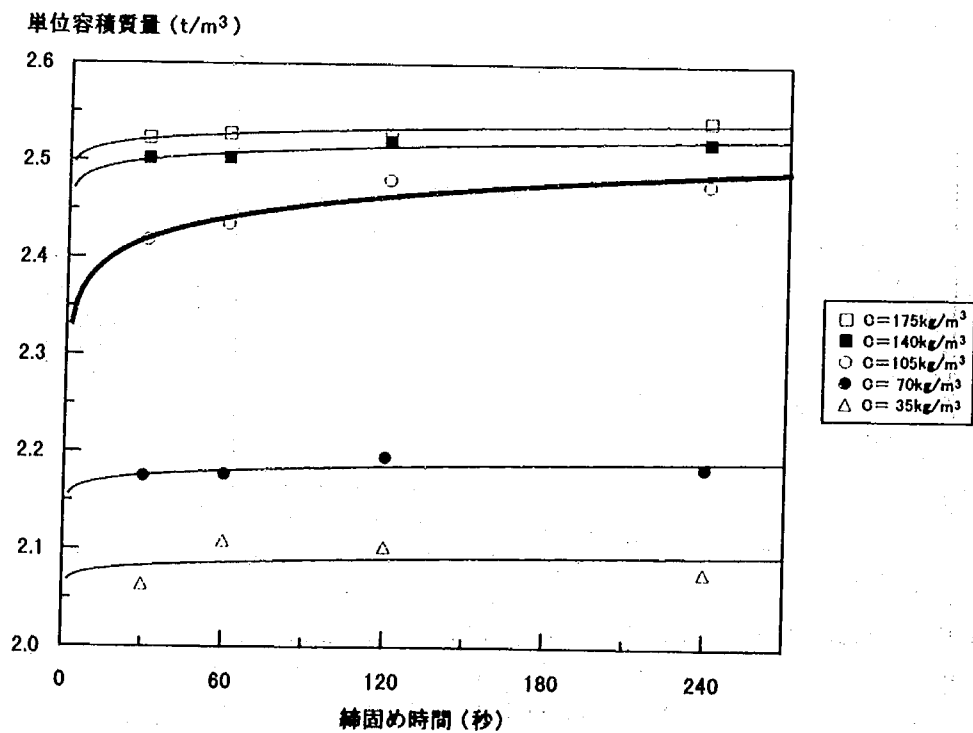


図-4.10(4) 締固め時間と単位容積質量の関係 (水セメント比 111%)

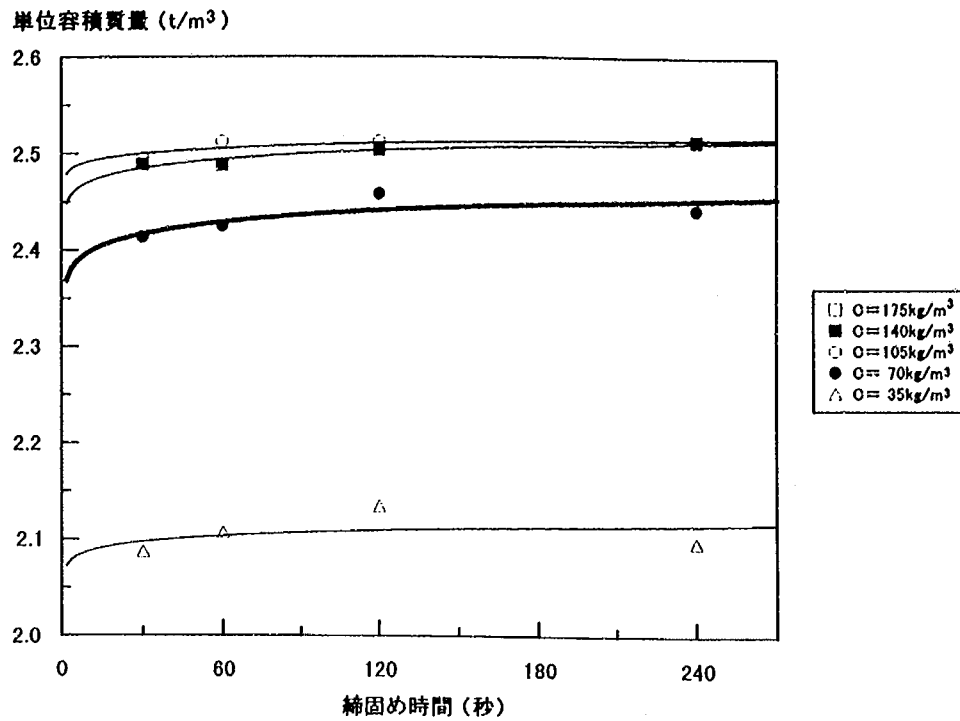


図-4.10(5) 締固め時間と単位容積質量の関係 (水セメント比 173%)

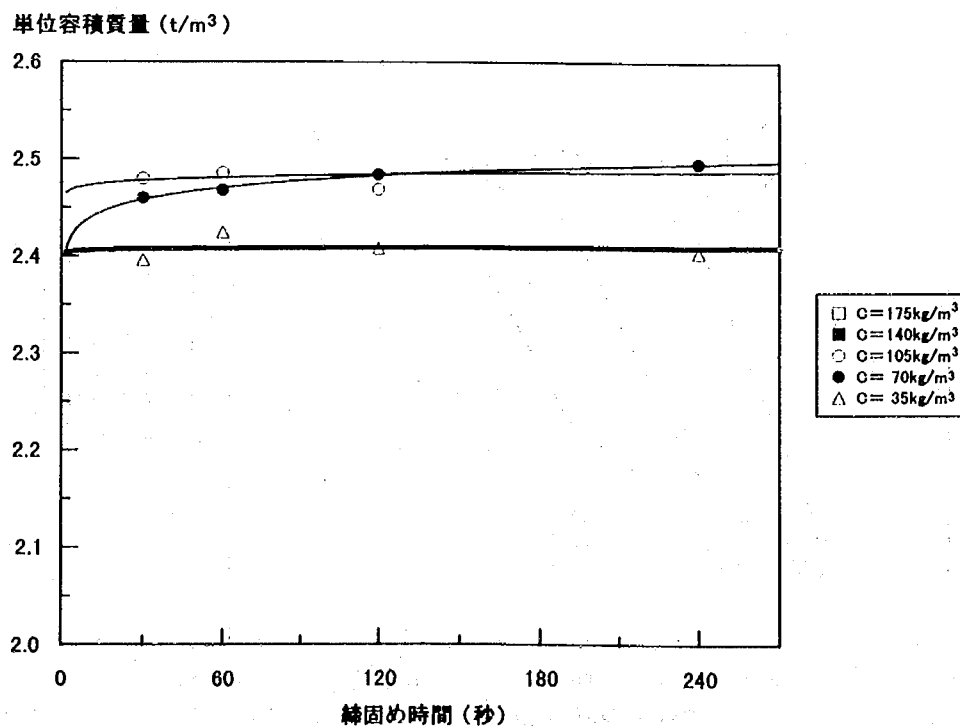


図-4.10(6) 締固め時間と単位容積質量の関係 (水セメント比 380%)

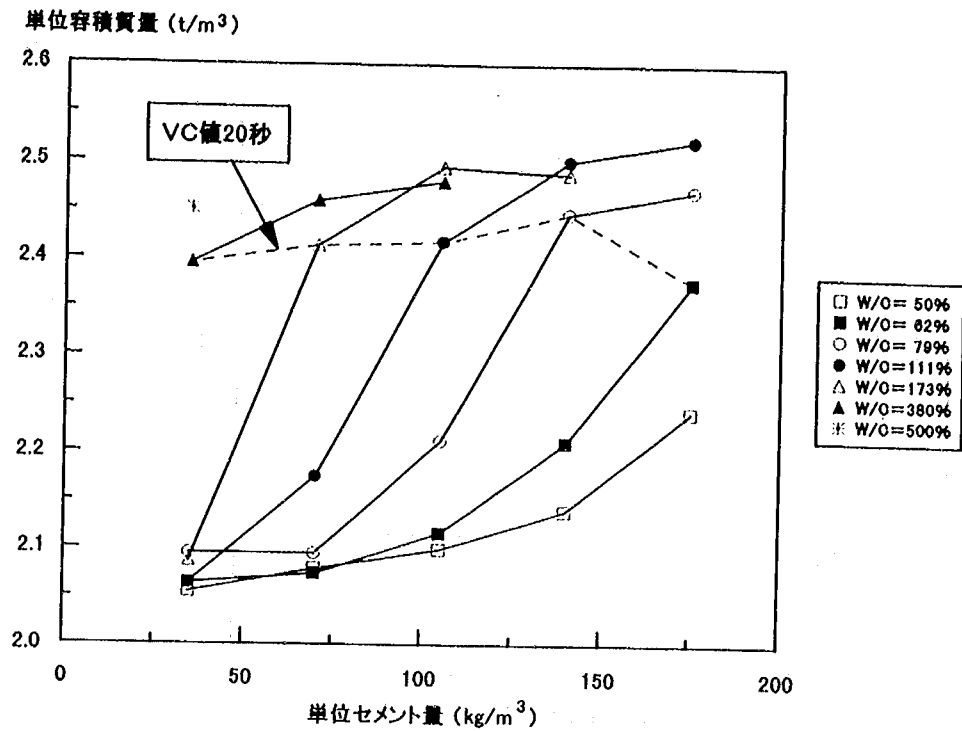


図-4.11(1) 単位セメント量と単位容積質量の関係 (締固め時間 30 秒)

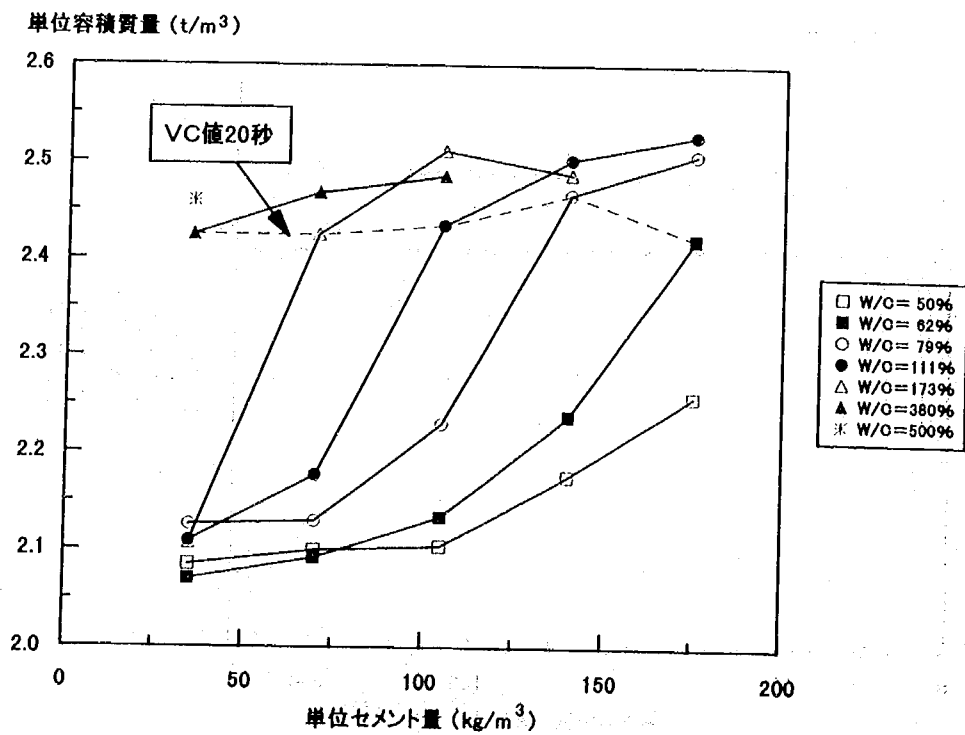


図-4.11(2) 単位セメント量と単位容積質量の関係 (締固め時間 60 秒)

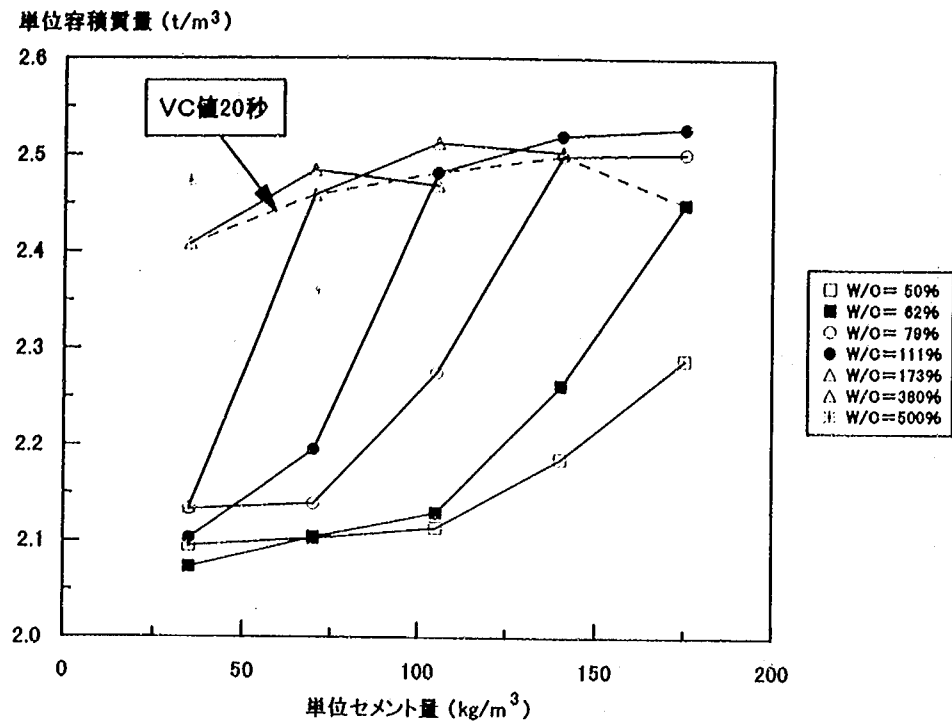


図-4.11(3) 単位セメント量と単位容積質量の関係 (締固め時間 120 秒)

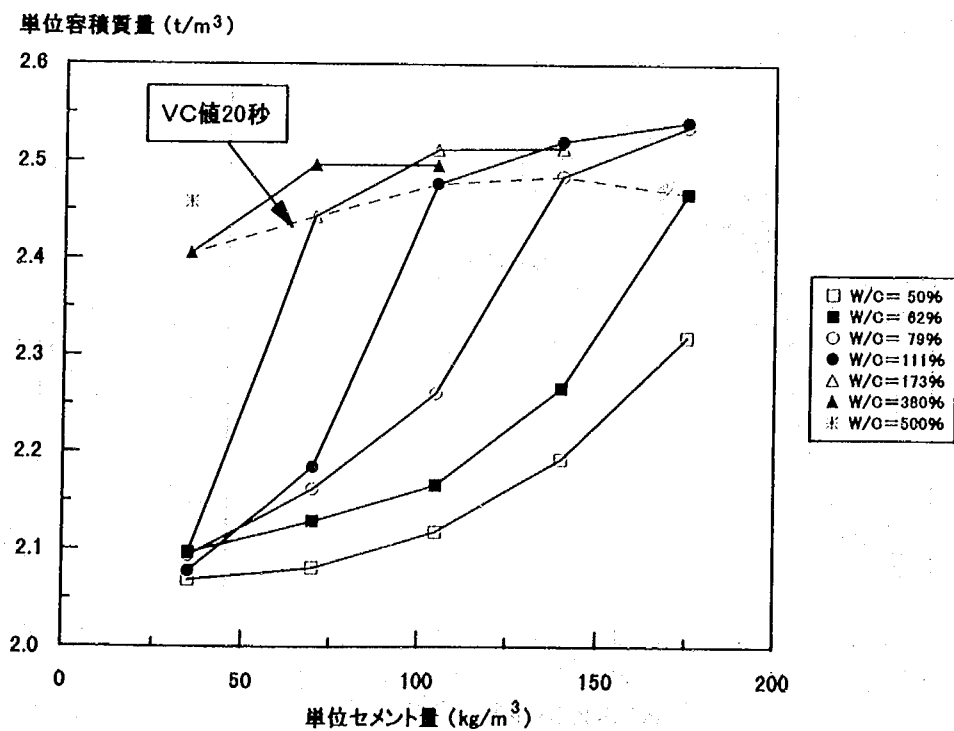


図-4.11(4) 単位セメント量と単位容積質量の関係 (締固め時間 240 秒)

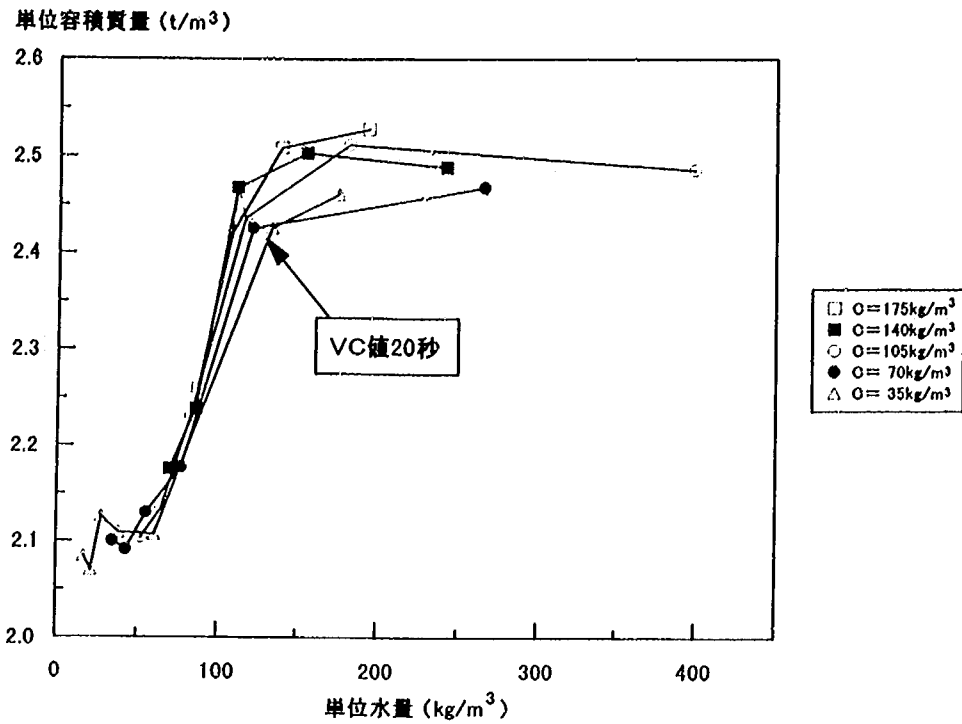


図-4.12(1) 単位水量と単位容積質量の関係 (締固め時間 30 秒)

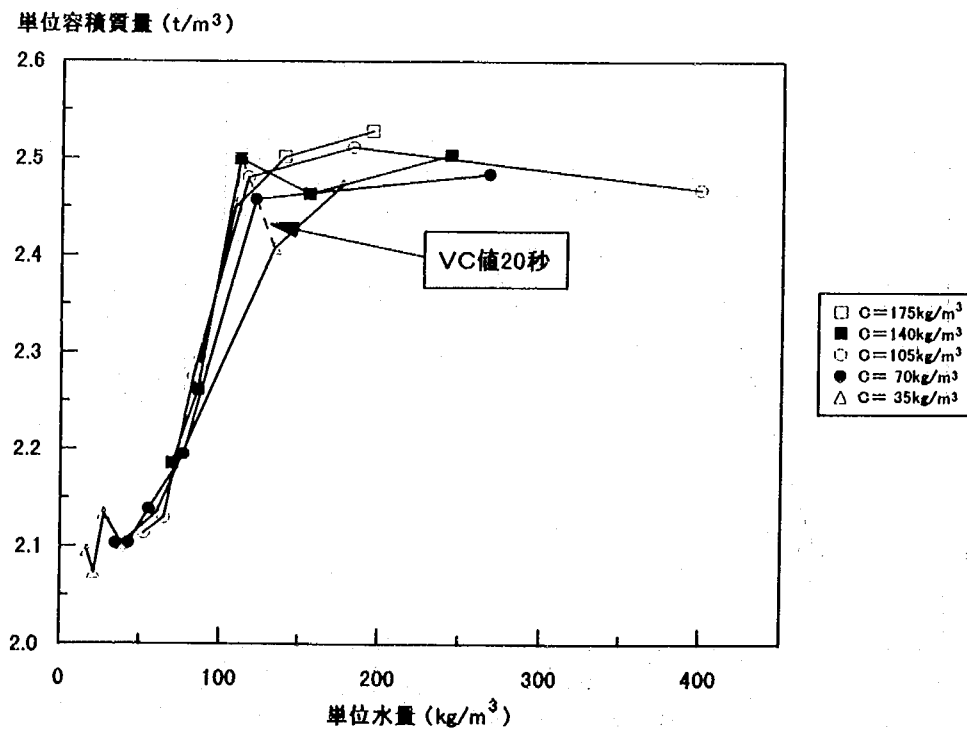


図-4.12(2) 単位水量と単位容積質量の関係 (締固め時間 60 秒)

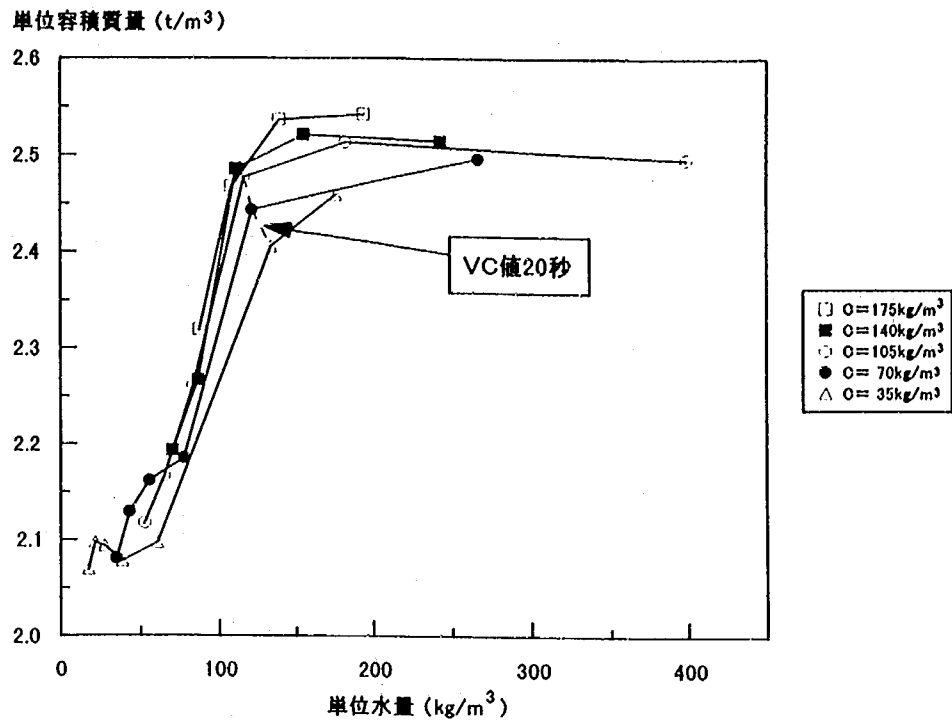


図-4.12(3) 単位水量と単位容積質量の関係 (締固め時間 120 秒)

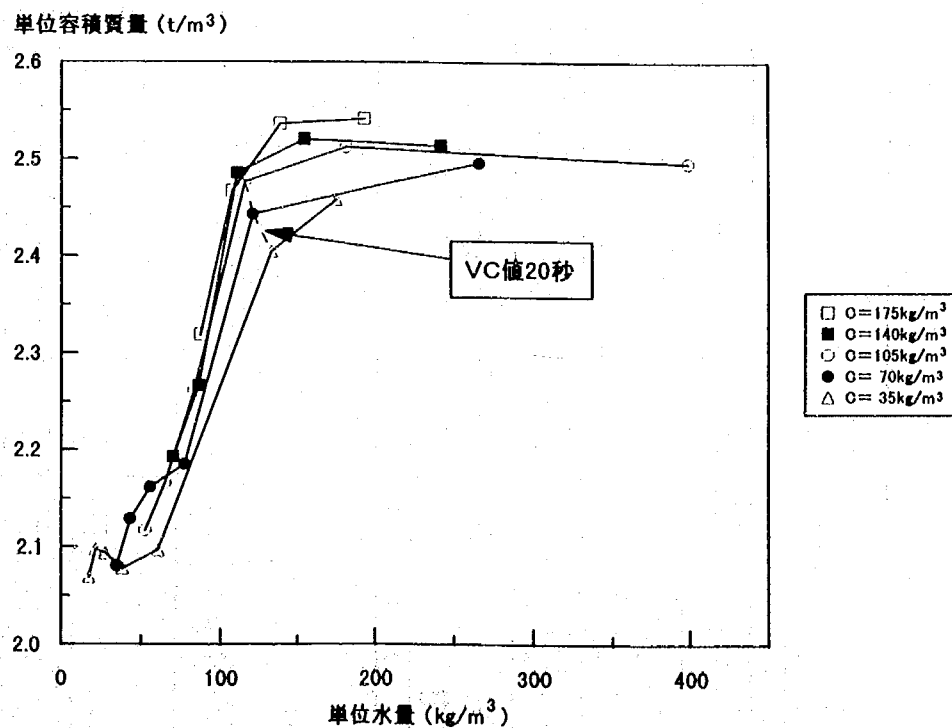


図-4.12(4) 単位水量と単位容積質量の関係 (締固め時間 240 秒)

表-4.6 圧縮強度

配合名	締固め時間30秒						締固め時間60秒						締固め時間120秒						締固め時間240秒					
	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
C175-50	15.98	15.57	15.25	15.60	0.366	2.35	17.09	14.87	15.63	15.86	1.130	7.12	19.82	22.22	19.90	20.65	1.362	6.60	24.12	19.96	21.07	21.72	2.154	9.92
C175-62	25.34	25.47	24.03	24.95	0.792	3.18	26.35	22.68	26.93	25.32	2.304	9.10	28.04	28.17	27.21	27.81	0.519	1.87	29.48	28.36	28.80	28.88	0.568	1.97
C175-79	17.13	18.36	17.41	17.63	0.642	3.64	19.50	19.34	20.41	19.75	0.579	2.93	19.63	21.29	20.56	20.49	0.834	4.07	21.44	22.56	21.20	21.73	0.722	3.32
C175-111	14.45	13.70	14.50	14.22	0.450	3.17	14.58	14.32	14.49	14.46	0.130	0.90	16.09	15.23	14.65	15.33	0.726	4.74	16.71	16.22	18.47	17.13	1.182	6.90
C140-50	7.45	7.57	7.51	7.51	0.061	0.81	8.78	9.56	9.50	9.28	0.433	4.66	10.01	9.59	10.89	10.16	0.667	6.56	10.67	11.00	10.56	10.74	0.230	2.14
C140-62	9.43	8.07	9.97	9.15	0.976	10.66	10.55	11.26	10.51	10.77	0.422	3.91	12.86	12.64	14.02	13.17	0.741	5.62	8.89	15.24	14.86	13.00	3.564	27.42
C140-79	18.52	17.33	17.70	17.85	0.609	3.41	18.36	19.40	20.15	19.30	0.897	4.65	19.09	19.73	19.75	19.52	0.374	1.92	20.13	19.52	18.92	19.52	0.601	3.08
C140-111	12.16	13.06	12.52	12.58	0.450	3.57	12.55	14.01	12.10	12.89	1.000	7.76	13.28	12.90	13.65	13.27	0.378	2.85	14.11	15.03	13.89	14.35	0.606	4.23
C140-173	5.94	6.91	5.64	6.16	0.664	10.77	7.02	5.78	6.94	6.58	0.691	10.50	8.59	9.30	9.80	9.23	0.607	6.57	7.98	8.54	8.14	8.22	0.292	3.55
C105-50	4.09	3.14	2.62	3.28	0.744	22.66	4.29	3.79	4.54	4.21	0.380	9.02	4.91	4.41	3.53	4.28	0.697	16.27	5.02	5.41	5.67	5.37	0.327	6.10
C105-62	4.34	3.95	4.49	4.26	0.276	6.49	5.07	5.06	5.13	5.09	0.034	0.68	5.02	5.13	6.22	5.46	0.661	12.11	6.23	5.67	6.00	5.96	0.283	4.74
C105-79	7.57	7.77	8.11	7.82	0.273	3.49	8.08	7.41	7.81	7.77	0.336	4.32	8.63	8.55	7.21	8.13	0.798	9.82	8.43	8.72	10.11	9.09	0.896	9.87
C105-111	9.87	10.12	9.80	9.91	0.183	1.85	9.24	10.92	10.65	10.27	0.902	8.78	11.02	11.19	11.30	11.17	0.138	1.23	12.38	11.59	12.64	12.20	0.549	4.50
C105-173	6.88	6.39	6.75	6.67	0.257	3.86	7.50	7.31	7.69	7.50	0.190	2.53	7.43	6.97	8.51	7.64	0.792	10.37	8.18	8.31	8.11	8.20	0.103	1.25
C105-380	1.66	2.68	4.99	3.11	1.704	54.79	—	3.24	4.11	3.67	0.614	16.72	3.59	3.67	—	3.63	0.053	1.46	6.36	4.69	—	5.52	1.182	21.39
C70-50	1.89	2.15	2.33	2.12	0.218	10.28	1.86	2.11	2.01	1.99	0.126	6.32	2.19	2.31	2.06	2.19	0.125	5.70	2.32	2.44	2.76	2.51	0.228	9.08
C70-62	2.16	2.16	2.46	2.26	0.172	7.59	2.80	2.39	2.63	2.61	0.211	8.08	2.83	3.30	2.66	2.93	0.329	11.23	2.64	2.45	2.82	2.64	0.184	6.97
C70-79	2.50	2.45	2.61	2.52	0.081	3.23	3.14	2.76	2.97	2.96	0.192	6.51	2.27	3.46	3.28	3.00	0.639	21.27	3.28	3.74	4.17	3.73	0.448	11.99
C70-111	2.55	3.32	3.44	3.11	0.482	15.51	4.08	3.74	3.89	3.90	0.169	4.34	4.38	3.98	3.76	4.04	0.312	7.72	4.20	3.35	4.09	3.88	0.461	11.87
C70-173	4.85	4.72	4.97	4.85	0.128	2.65	5.14	5.36	5.75	5.42	0.307	5.66	5.98	5.65	5.92	5.85	0.176	3.00	6.29	5.68	6.04	6.01	0.306	5.10
C70-380	—	—	2.10	2.10	—	—	2.75	—	—	2.75	—	—	3.26	—	—	3.26	—	—	4.04	4.14	3.96	4.05	0.091	2.24
C35-50	0.41	—	—	0.41	—	—	0.61	—	—	0.61	—	—	0.83	0.55	—	0.69	0.195	28.19	1.10	1.00	—	1.05	0.071	6.74
C35-62	—	—	—	—	—	—	0.56	0.77	—	0.66	0.155	23.32	0.78	0.91	0.67	0.79	0.124	15.81	—	0.83	—	0.83	—	—
C35-79	1.19	1.06	1.26	1.17	0.106	9.03	1.28	1.25	0.75	1.09	0.295	26.92	1.41	1.34	1.33	1.36	0.039	2.89	1.29	1.36	1.16	1.27	0.102	7.99
C35-111	0.95	0.85	0.83	0.87	0.063	7.20	0.69	0.49	0.84	0.67	0.178	26.42	1.11	0.82	0.61	0.85	0.248	29.34	1.00	—	1.25	1.13	0.176	15.65
C35-173	0.88	0.73	0.77	0.79	0.076	9.62	1.05	0.84	0.94	0.95	0.105	11.07	—	1.32	1.07	1.19	0.179	14.97	1.16	0.95	1.10	1.07	0.109	10.19
C35-380	1.44	1.16	1.49	1.36	0.177	12.95	1.63	1.39	1.49	1.50	0.123	8.17	1.65	1.90	1.79	1.78	0.124	6.99	1.83	1.91	2.00	1.92	0.082	4.31
C35-500	1.43	1.32	1.24	1.33	0.097	7.25	—	1.47	1.16	1.31	0.215	16.40	1.71	—	1.31	1.51	0.286	18.95	1.47	2.09	2.19	1.91	0.391	20.45

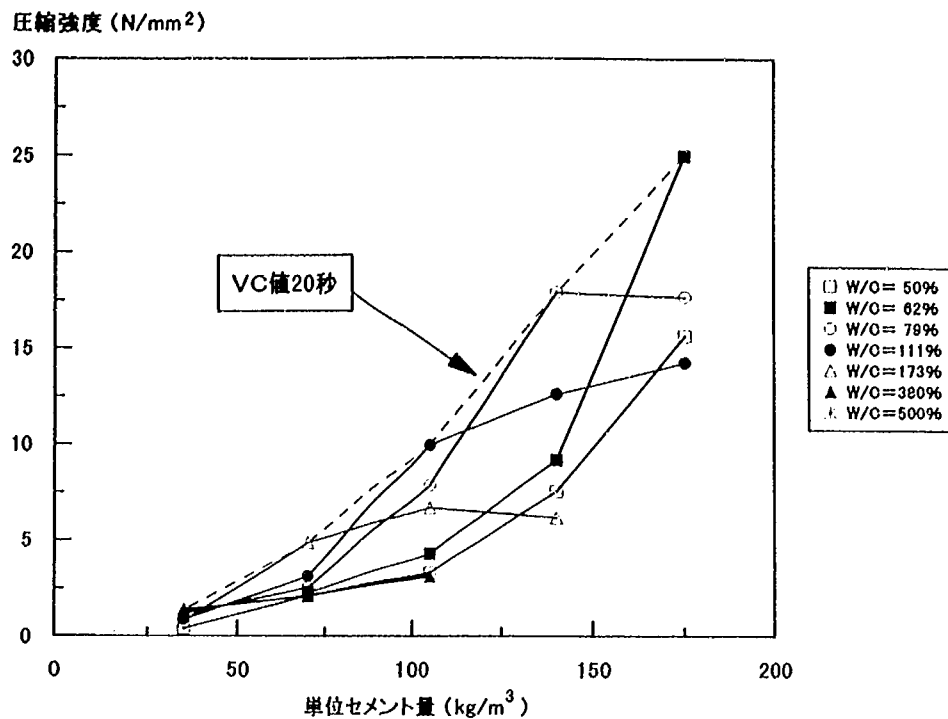


図-4.13(1) 単位セメント量と圧縮強度の関係 (締固め時間 30 秒)

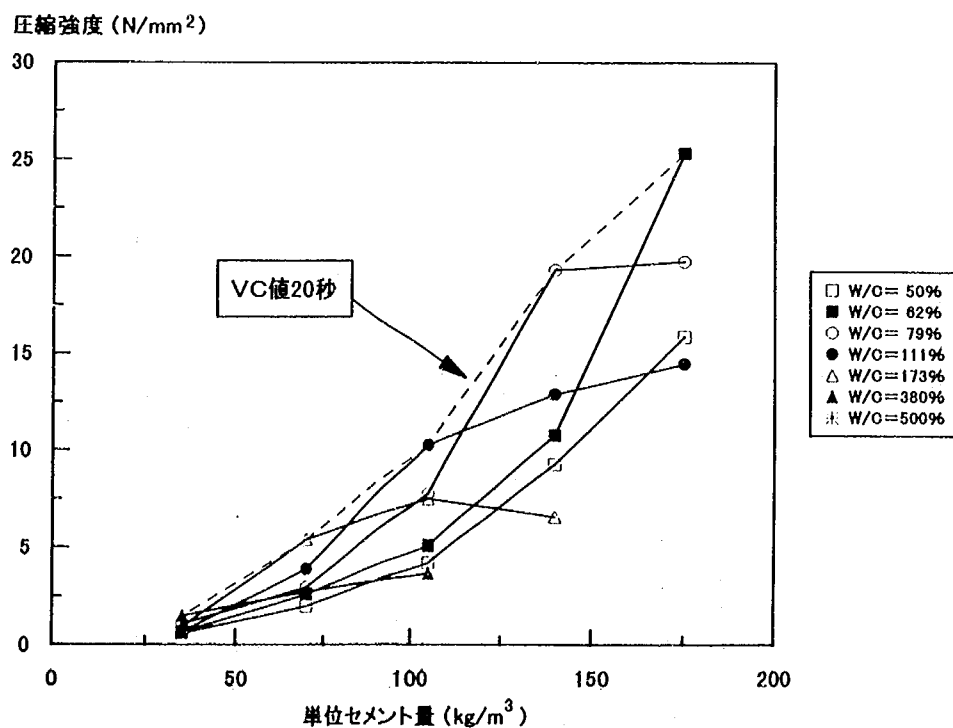


図-4.13(2) 単位セメント量と圧縮強度の関係 (締固め時間 60 秒)

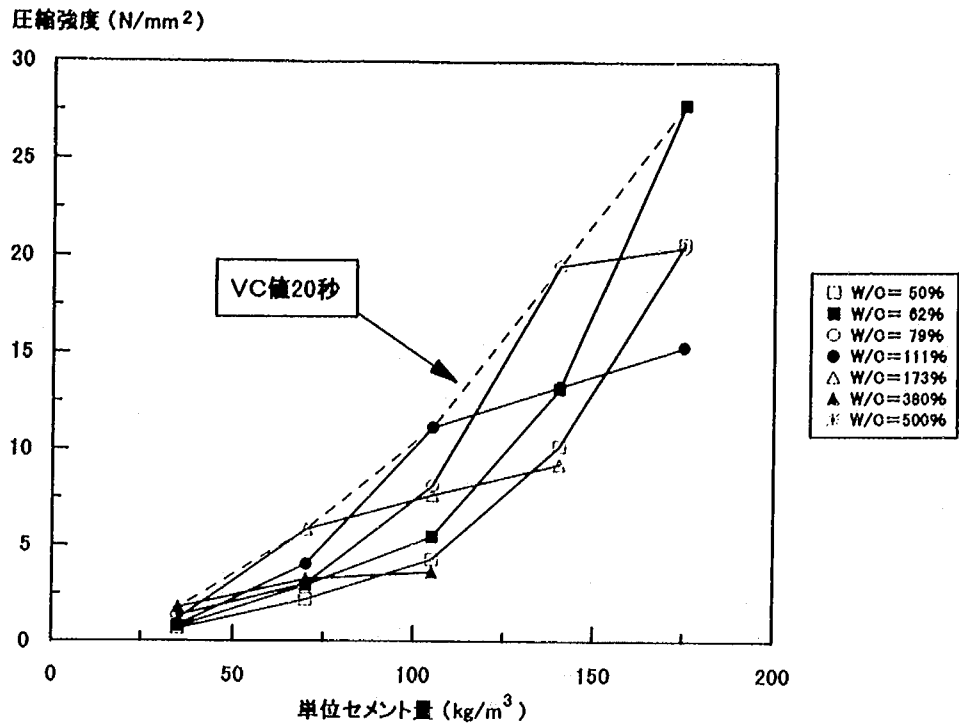


図-4.13(3) 単位セメント量と圧縮強度の関係 (締固め時間 120 秒)

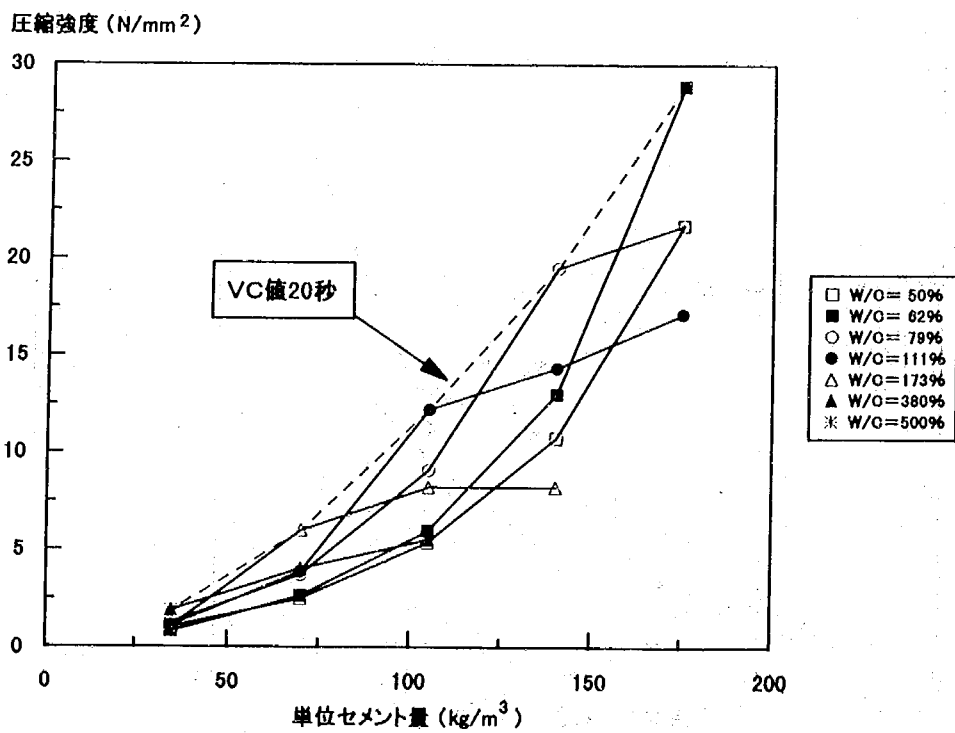


図-4.13(4) 単位セメント量と圧縮強度の関係 (締固め時間 240 秒)

圧縮強度 / 同一W/CのVC値20秒配合の圧縮強度

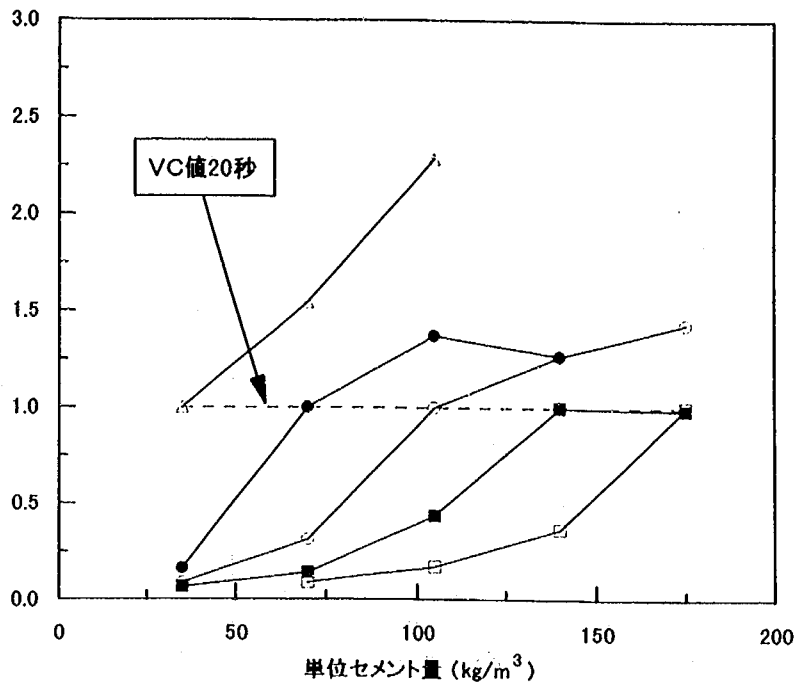


図-4.14(1) 単位セメント量と無次元化した圧縮強度の関係 (締固め時間 30 秒)

圧縮強度 / 同一W/CのVC値20秒配合の圧縮強度

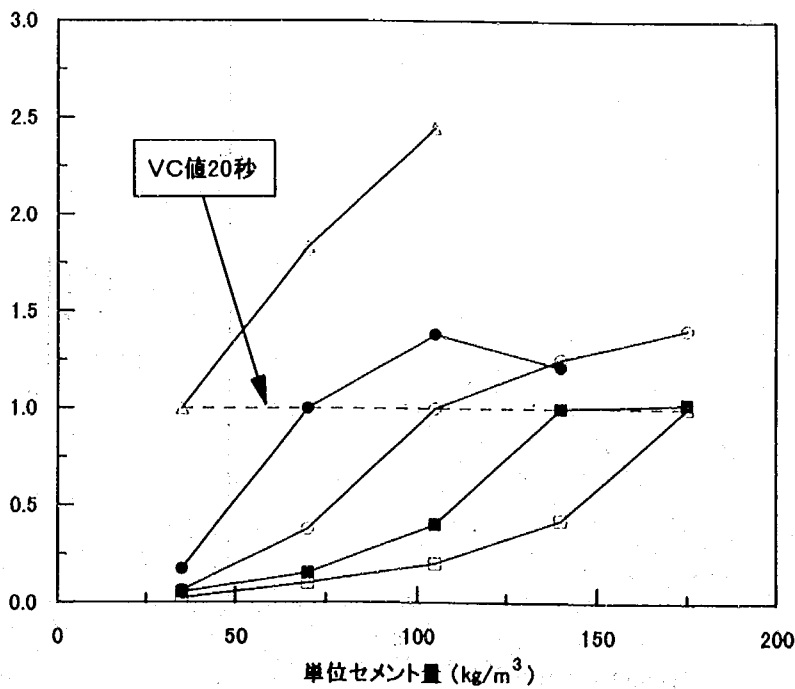


図-4.14(2) 単位セメント量と無次元化した圧縮強度の関係 (締固め時間 60 秒)

圧縮強度 / 同一W/CのVC値20秒配合の圧縮強度

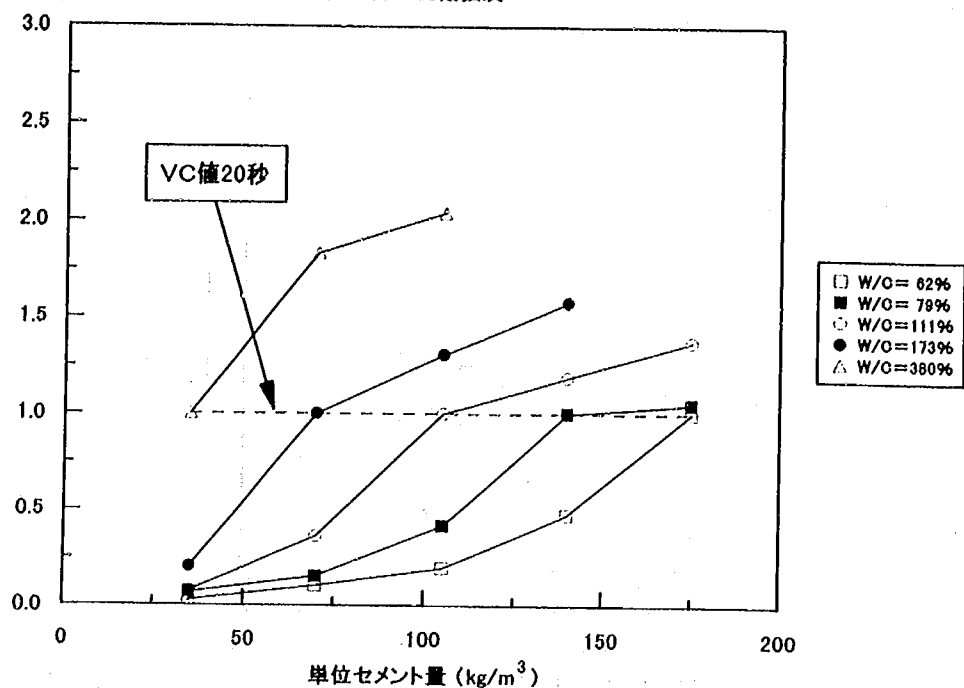


図-4.14(3) 単位セメント量と無次元化した圧縮強度の関係 (締固め時間 120 秒)

圧縮強度 / 同一W/CのVC値20秒配合の圧縮強度

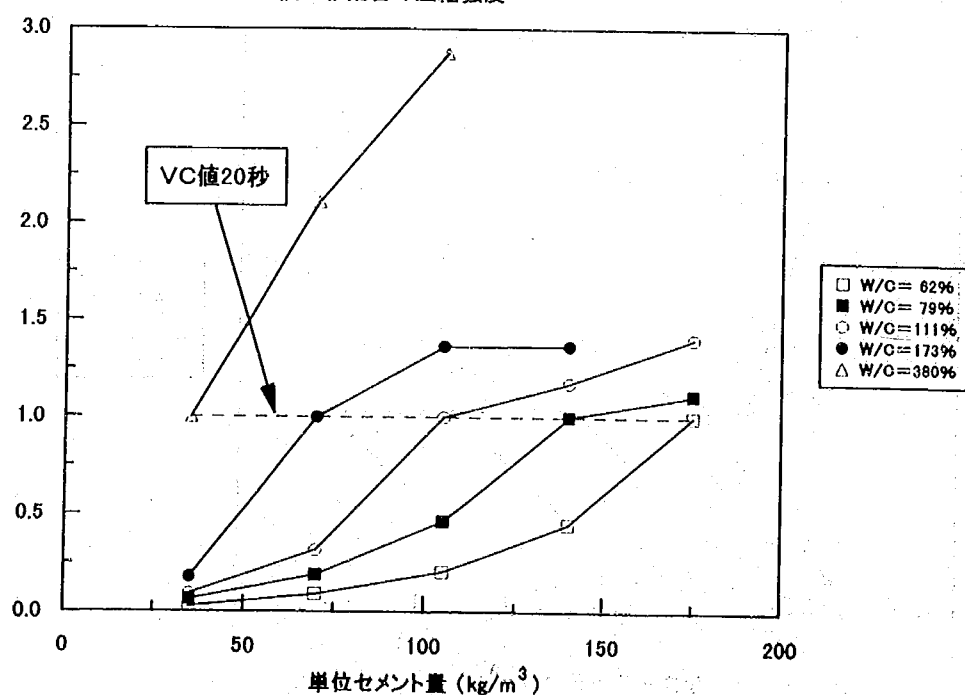


図-4.14(4) 単位セメント量と無次元化した圧縮強度の関係 (締固め時間 240 秒)

ほど変わらないといえる。

また、図-4.15 は、単位セメント量をパラメータとして、単位水量と圧縮強度の関係を示したものである。図によれば、単位水量を増すと圧縮強度は大きくなるが、VC 値 20 秒の配合を境に圧縮強度は低下する傾向にある。したがって、超貧配合コンクリートにおいて十分な圧縮強度を得るためには 20 秒程度の VC 値を得るために必要な単位水量を確保することが必要であるといえる。

さらに、図-4.16 は、単位セメント量をパラメータとして、セメント水比と圧縮強度の関係を示したものである。図によれば、単位セメント量を一定としてセメント水比を変化させた場合、VC 値 20 秒となるセメント水比のときに圧縮強度が最大になっている。この最大の点よりも左側にある点の配合は、VC 値が 20 秒より小さくなる配合であり、このような領域では、コンクリートの圧縮強度は、単位セメント量に関わらずセメント水比の法則に従って一義的に定まっている。一方、圧縮強度が最大となる点より右側にある点の配合は、VC 値が 20 秒より大きくなる配合であり、このような領域では、コンクリートの圧縮強度はコンクリートの締固めの程度によって定まると考えられる。

図-4.16 において、VC 値 20 秒（点線）の配合より右側の領域では、コンクリートの圧縮強度はセメント水比の法則によらず、コンクリートの締固めの程度に影響されることがわかった。そこで、水セメント比をパラメータとして、相対締固め密度と圧縮強度の関係を図-4.17 に示す。図によれば、水セメント比が一定ならば、相対締固め密度と圧縮強度には強い相関があることがわかる。なお、この図中の回帰線から読みとった相対締固め密度 90%、95%、100%におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図-4.18 に示す。図より、相対締固め密度を一定とした場合、圧縮強度はセメント水比に従うことがわかる。

次に、単位セメント量 175 kg/m^3 、 $W/C=62\%$ の基準配合から 2 種類の方法で単位セメント量を減じた場合の圧縮強度変化を図-4.19 に示す。図中の実線は、基準配合と同じ VC 値 20 秒を維持した場合を表し、点線は、基準配合と同じ水セメント比 $W/C=62\%$ を維持した配合を表す。図より、施工性を重視してコンシステンシーを一定として単位セメント量を変化させた場合の方が、セメントペーストの性状を重視して水セメント比を一定として単位セメント量を変化させた場合よりも、圧縮強度の低下が小さいことがわかる。

4.2.4 弾性係数

次に、各配合、各締固め時間における動弾性係数、静弾性係数を表-4.7、4.8 にそれぞれ示す。動弾性係数は供試体の一次共鳴振動数より、また、静弾性係数は一軸圧縮試験時に供試体に貼り付けたひずみゲージより (3.1) 式を用いて、それぞれ求めた。特に静弾性係数については、単位ペースト量の極端に小さい配合の場合、供試体表面が滑らかでないためにひずみゲージの貼付が困難であり、結果的に欠測が多くなった。図-4.20、4.21 に締固め時間をパラメータとした圧縮強度と動弾性係数の関係、圧縮強度と静弾性係数の関係をそれぞれ示す。図によれば、単位セメント量、単位水量、締固め時間（締固めエネルギー）、相対締固め密度の大小に関わらず、圧縮強度と動弾性係数、圧縮強度と静弾性係数との間には高い相関性が見られる。

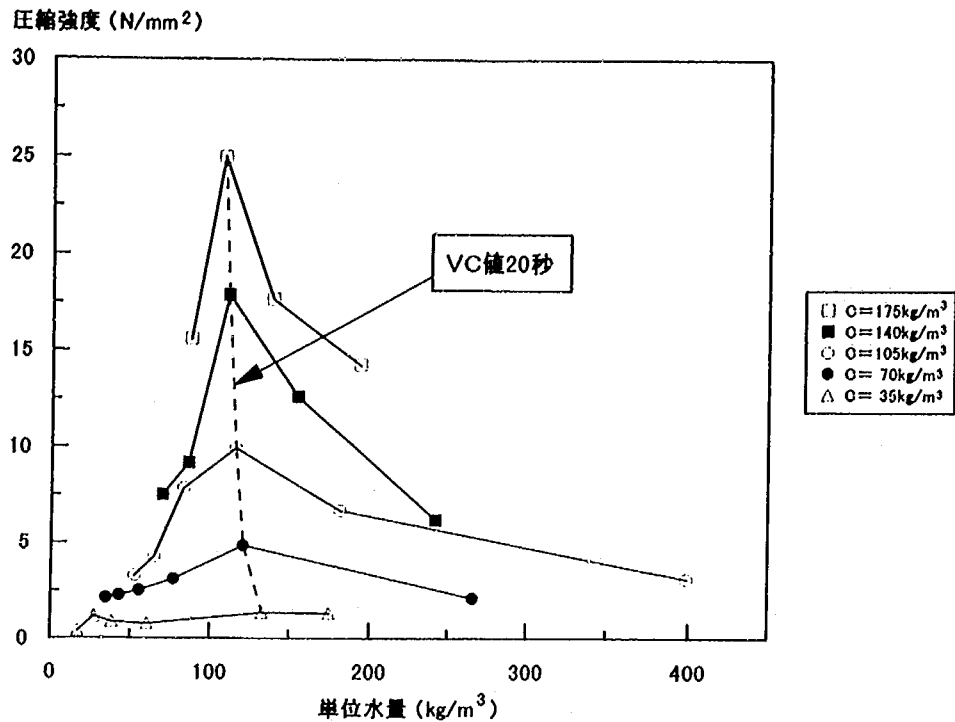


図-4.15(1) 単位水量と圧縮強度の関係 (締固め時間 30 秒)

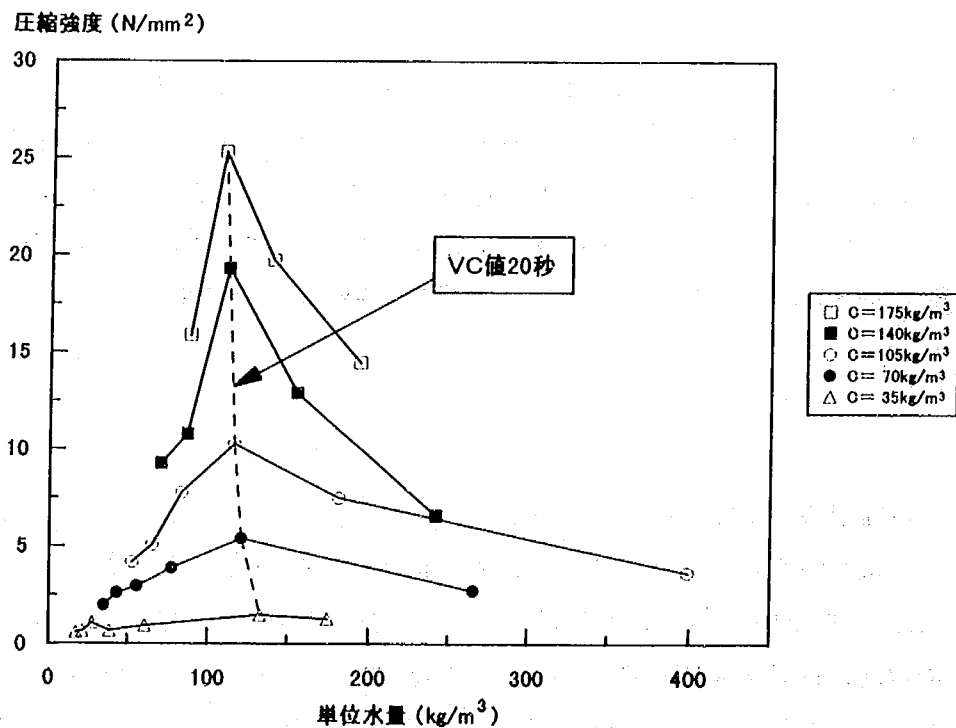


図-4.15(2) 単位水量と圧縮強度の関係 (締固め時間 60 秒)

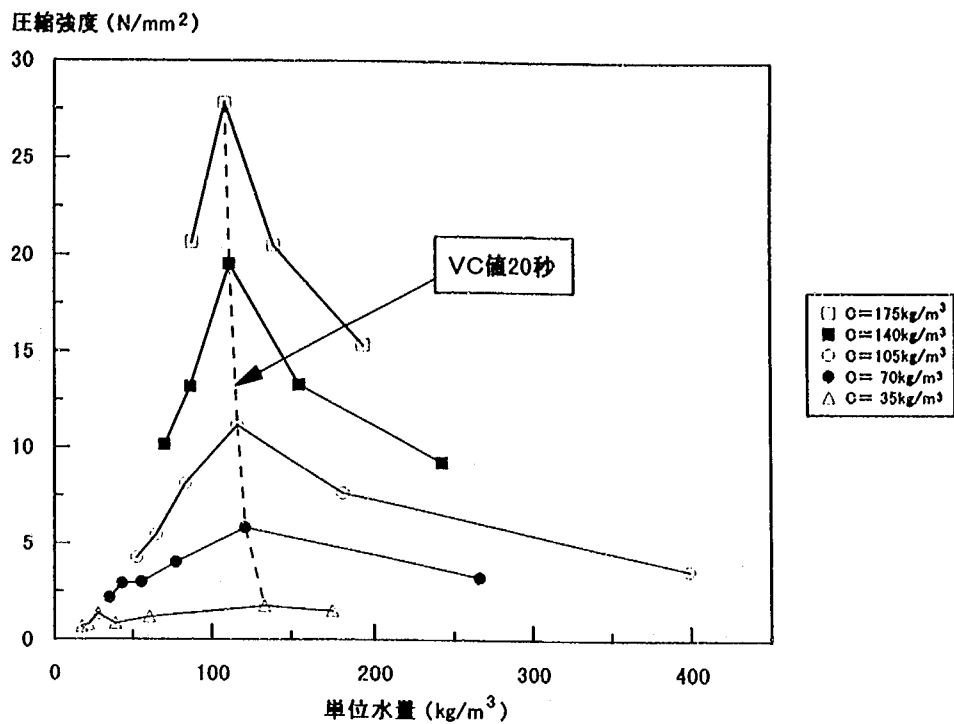


図-4.15(3) 単位水量と圧縮強度の関係 (締固め時間 120 秒)

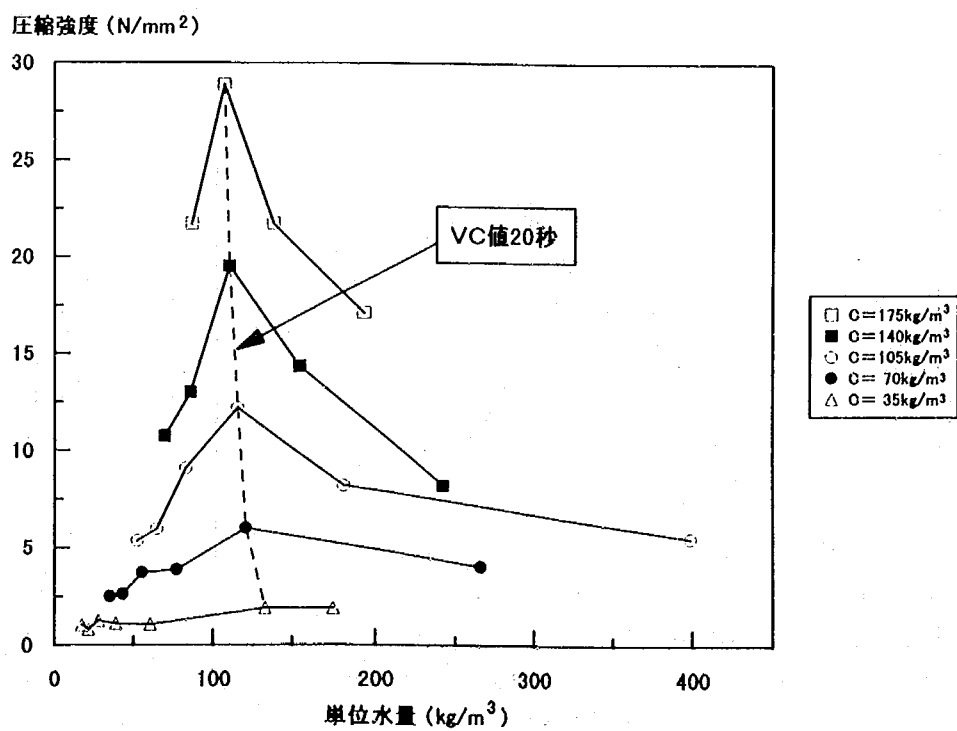


図-4.15(4) 単位水量と圧縮強度の関係 (締固め時間 240 秒)

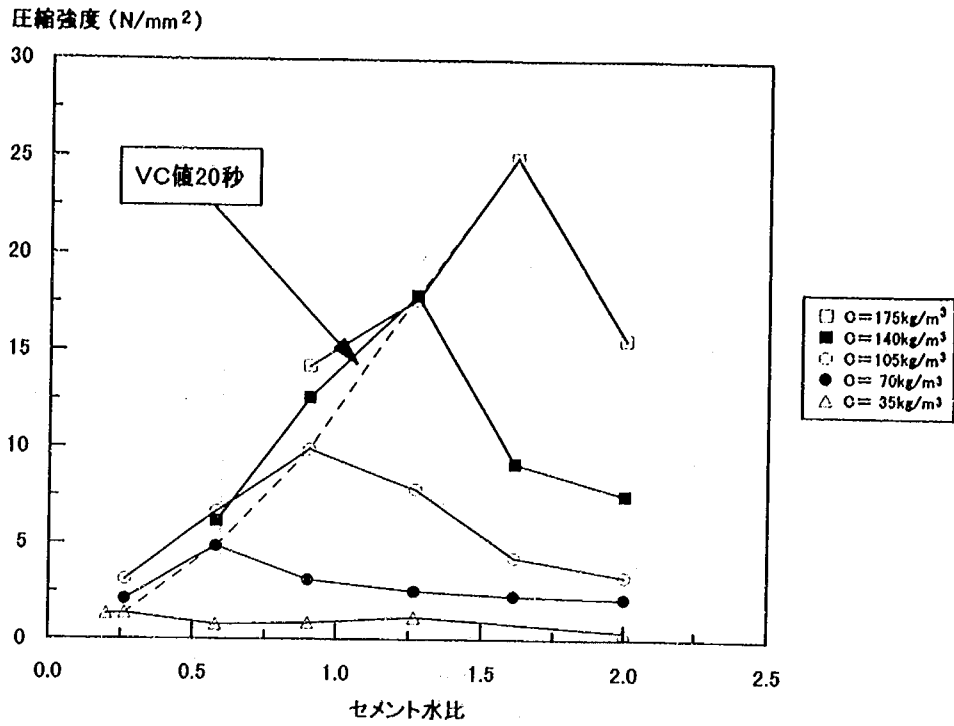


図-4.16(1) セメント水比と圧縮強度の関係 (締固め時間 30 秒)

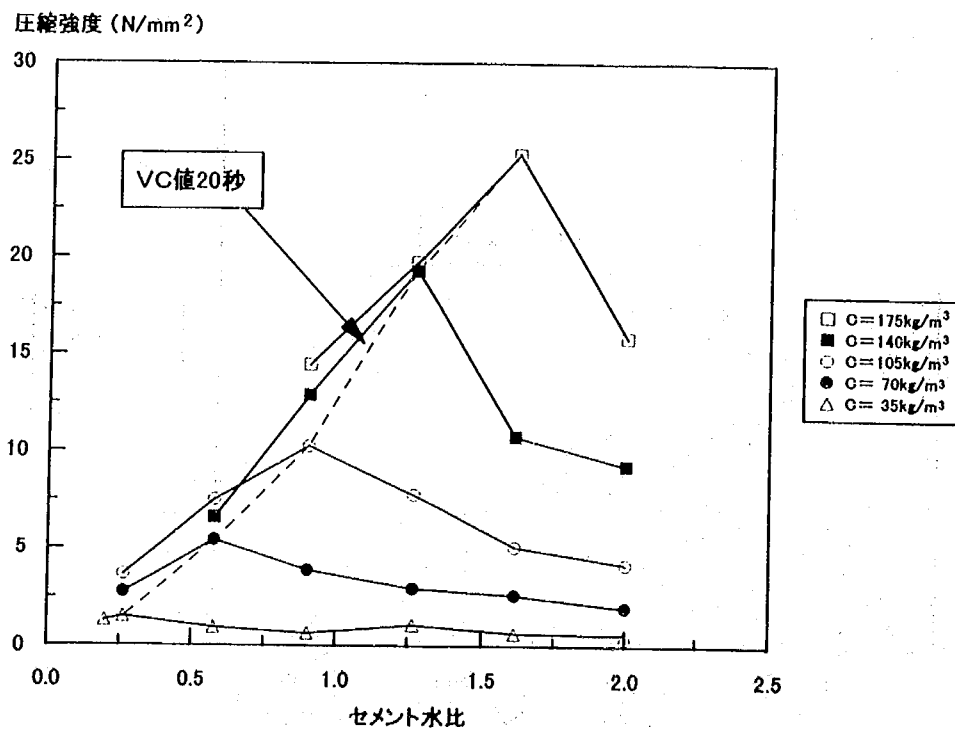


図-4.16(2) セメント水比と圧縮強度の関係 (締固め時間 60 秒)

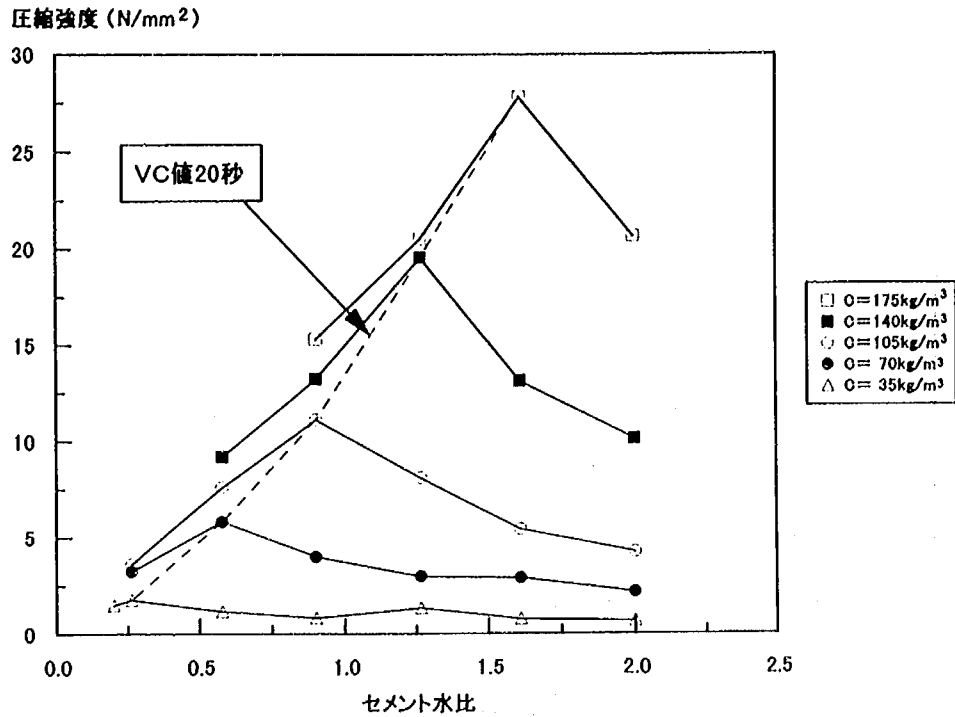


図-4.16(3) セメント水比と圧縮強度の関係 (締固め時間 120 秒)

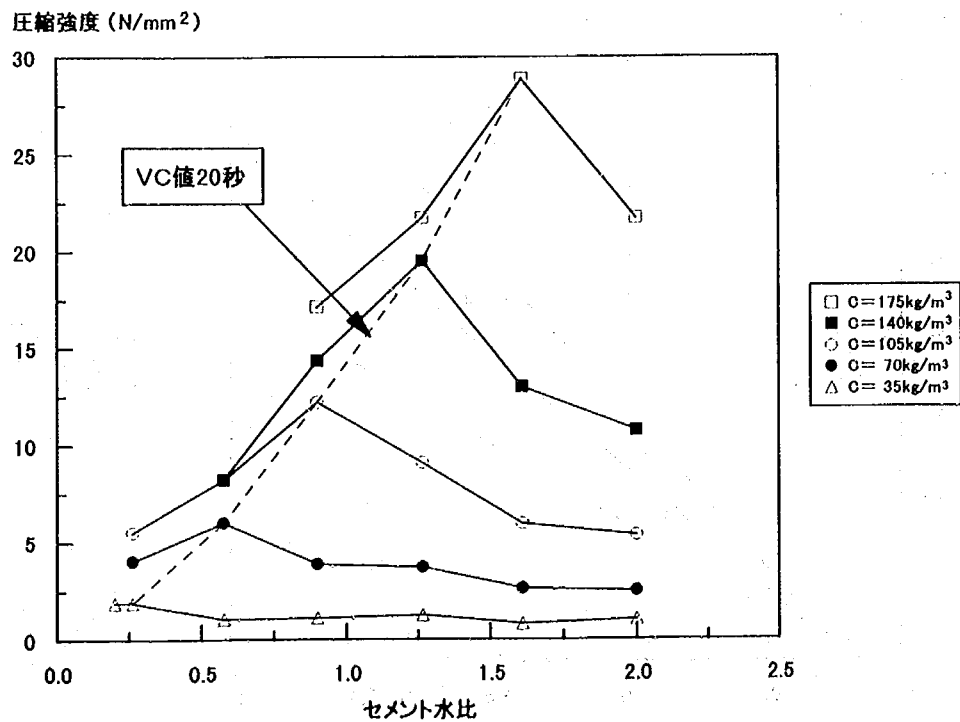


図-4.16(4) セメント水比と圧縮強度の関係 (締固め時間 240 秒)

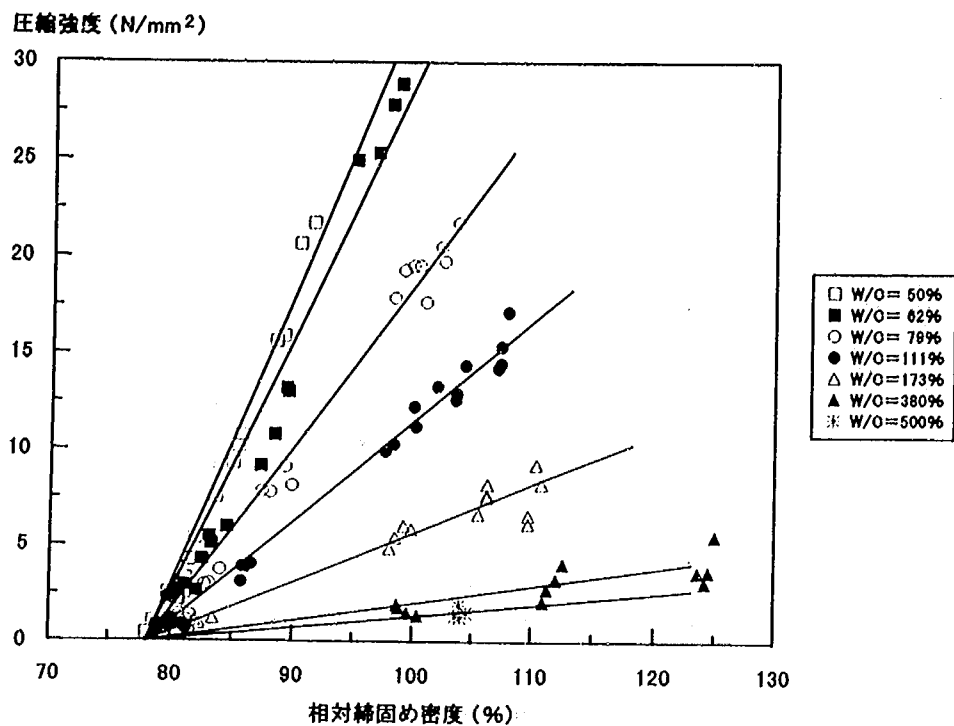


図-4.17 相対締固め密度と圧縮強度の関係

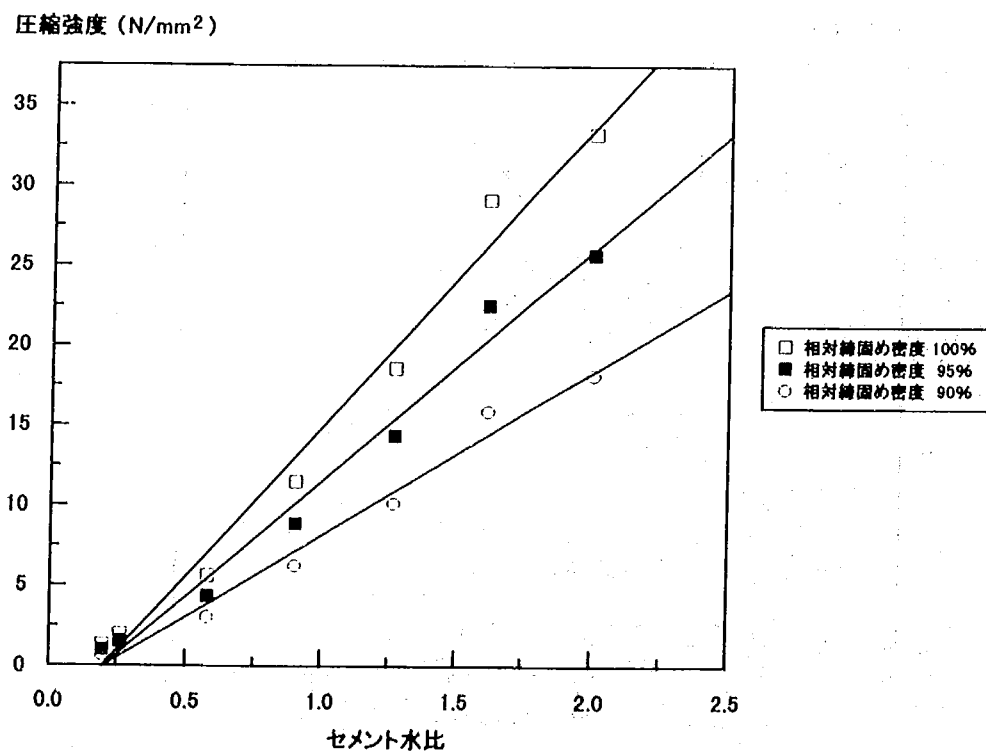


図-4.18 相対締固め密度 90%、95%、100%における
セメント水比と圧縮強度の関係

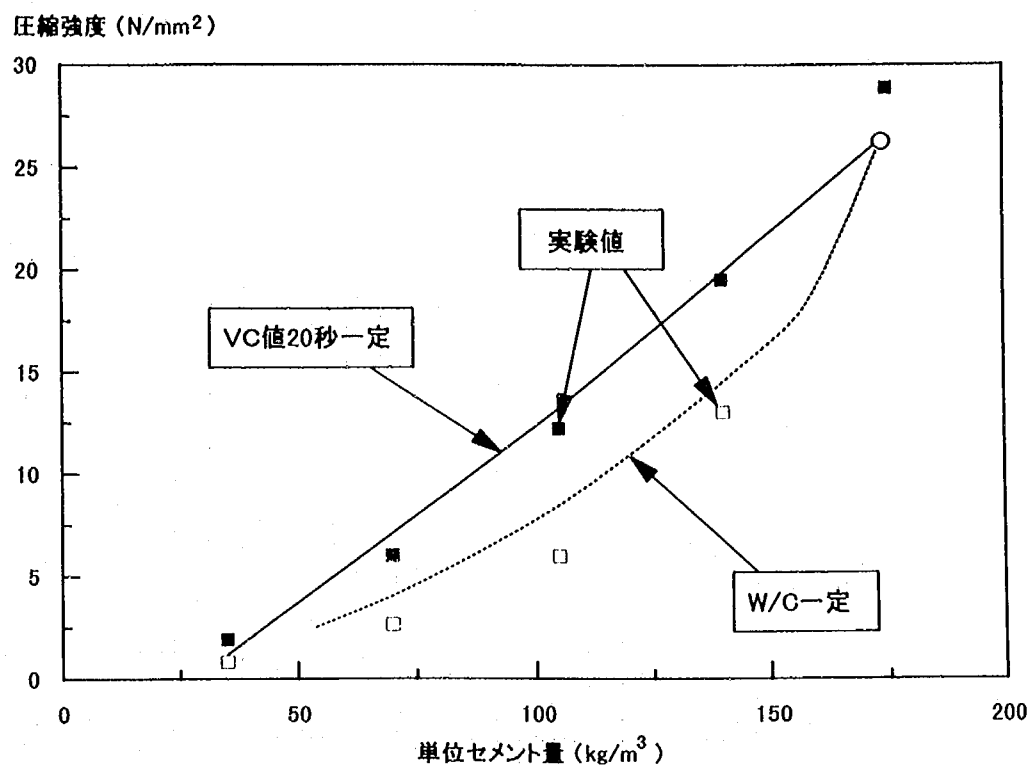


図-4.19 2種類の方法で単位セメント量を減じた場合の圧縮強度変化

表-4.7 動弾性係数

配合名	締固め時間30秒						締固め時間60秒						締固め時間120秒						締固め時間240秒					
	1 (kN/mm ²)	2 (kN/mm ²)	3 (kN/mm ²)	平均値 (kN/mm ²)	標準偏差 (kN/mm ²)	変動係数 (%)	1 (kN/mm ²)	2 (kN/mm ²)	3 (kN/mm ²)	平均値 (kN/mm ²)	標準偏差 (kN/mm ²)	変動係数 (%)	1 (kN/mm ²)	2 (kN/mm ²)	3 (kN/mm ²)	平均値 (kN/mm ²)	標準偏差 (kN/mm ²)	変動係数 (%)	1 (kN/mm ²)	2 (kN/mm ²)	3 (kN/mm ²)	平均値 (kN/mm ²)	標準偏差 (kN/mm ²)	変動係数 (%)
C175-50	30.22	28.96	30.41	29.86	0.79	2.64	31.28	34.84	35.37	33.83	2.22	6.57	33.76	35.85	33.20	34.27	1.39	4.07	35.60	34.01	34.61	34.74	0.80	2.32
C175-62	38.50	40.27	42.14	40.31	1.82	4.51	42.99	43.06	43.63	43.23	0.35	0.82	43.62	43.75	44.13	43.83	0.27	0.61	42.46	42.94	42.82	42.74	0.25	0.58
C175-79	41.17	39.71	42.36	41.08	1.33	3.24	43.23	43.57	43.41	43.40	0.17	0.39	43.79	44.00	46.91	44.90	1.74	3.88	47.29	43.01	43.91	44.74	2.25	5.04
C175-111	39.01	37.07	37.29	37.79	1.06	2.81	39.85	38.86	39.11	39.27	0.52	1.32	41.39	38.00	38.96	39.45	1.75	4.43	43.95	44.78	44.54	44.42	0.43	0.96
C140-50	21.61	20.69	20.79	21.03	0.51	2.41	21.99	24.44	22.76	23.06	1.25	5.43	24.61	23.45	26.20	24.75	1.38	5.58	26.29	24.46	23.57	24.77	1.39	5.61
C140-62	24.59	22.78	28.22	25.20	2.77	10.99	24.24	24.96	26.99	25.40	1.42	5.60	28.70	28.73	27.61	28.35	0.64	2.24	29.32	32.14	29.36	30.28	1.62	5.35
C140-79	40.01	38.54	42.10	40.22	1.79	4.45	43.60	40.54	43.27	42.47	1.68	3.96	43.34	42.93	42.73	43.00	0.31	0.72	42.24	38.54	41.86	40.88	2.04	4.98
C140-111	37.55	36.00	36.61	36.72	0.78	2.13	39.75	38.95	37.76	38.82	1.00	2.57	38.10	39.96	39.07	39.04	0.93	2.38	36.50	40.03	36.07	37.53	2.17	5.78
C140-173	24.31	28.97	25.19	26.16	2.47	9.46	23.87	19.96	22.57	22.13	1.99	8.99	29.51	33.20	34.39	32.37	2.55	7.87	27.26	25.57	28.59	27.14	1.51	5.58
C105-50	17.15	15.82	11.54	14.84	2.93	19.76	16.84	16.71	16.16	16.57	0.36	2.17	17.71	16.08	16.52	16.77	0.84	5.04	16.13	17.61	17.84	17.19	0.92	5.37
C105-62	—	—	—	—	—	—	17.66	16.44	16.97	17.02	0.61	3.60	17.46	14.72	17.84	16.67	1.70	10.22	—	19.63	19.21	19.42	0.30	1.54
C105-79	25.26	24.18	25.61	25.02	0.75	2.98	26.13	25.40	25.13	25.55	0.52	2.02	26.96	26.23	24.08	25.76	1.50	5.82	24.81	26.44	26.99	26.08	1.14	4.36
C105-111	33.64	34.81	33.69	34.05	0.66	1.95	32.18	34.12	36.18	34.16	2.00	5.86	36.97	33.62	35.05	35.22	1.68	4.77	34.60	33.13	34.60	34.11	0.85	2.50
C105-173	27.98	24.09	25.22	25.76	2.00	7.78	26.22	26.10	27.00	26.44	0.49	1.85	24.86	29.03	25.95	26.61	2.16	8.13	25.07	24.23	27.03	25.44	1.43	5.64
C105-380	5.80	12.40	20.11	12.77	7.16	56.06	—	10.70	13.05	11.87	1.66	14.00	8.21	10.32	—	9.26	1.50	16.14	11.90	7.30	—	9.60	3.25	33.87
C70-50	10.48	11.75	10.10	10.78	0.86	7.98	9.62	10.91	5.91	8.81	2.60	29.46	10.29	10.67	11.00	10.65	0.36	3.35	5.94	11.79	11.42	9.72	3.28	33.75
C70-62	10.70	9.93	11.60	10.74	0.84	7.79	13.97	13.13	13.04	13.38	0.51	3.83	14.35	13.95	12.41	13.57	1.03	7.56	13.47	10.72	15.87	13.35	2.58	19.33
C70-79	13.17	12.43	12.56	12.72	0.40	3.13	11.46	11.68	12.96	12.04	0.81	6.73	10.36	14.99	12.03	12.46	2.34	18.80	15.44	15.75	16.14	15.78	0.35	2.23
C70-111	16.45	16.50	16.62	16.52	0.09	0.52	16.68	17.69	17.61	17.33	0.56	3.22	14.93	16.43	17.40	16.25	1.24	7.66	16.70	14.66	17.35	16.23	1.40	8.65
C70-173	23.47	24.09	24.94	24.15	0.77	3.18	24.30	22.96	26.00	24.42	1.52	6.25	26.10	25.89	27.03	26.34	0.61	2.31	26.29	23.71	25.02	25.01	1.29	5.16
C70-380	—	—	6.56	6.56	—	—	5.61	—	—	5.61	—	—	6.85	—	—	6.85	—	—	9.32	6.63	9.91	8.62	1.75	20.32
C35-50	5.79	—	8.82	7.30	2.14	29.32	5.84	5.58	—	5.71	0.18	3.18	5.90	3.55	—	4.72	1.66	35.22	10.05	7.99	—	9.02	1.46	16.15
C35-62	—	—	—	—	—	—	7.83	7.41	—	7.62	0.29	3.84	3.67	3.30	5.90	4.29	1.40	32.76	—	5.96	—	5.96	—	—
C35-79	16.91	12.30	10.92	13.38	3.14	23.46	8.86	8.02	7.17	8.02	0.85	10.59	5.71	9.49	13.32	9.51	3.81	40.01	8.01	8.54	10.51	9.02	1.32	14.58
C35-111	6.79	5.01	7.19	6.33	1.16	18.30	5.06	15.34	16.86	12.42	6.42	51.67	11.54	8.09	7.42	9.02	2.21	24.50	5.74	—	5.74	5.74	0.00	0.04
C35-173	5.55	6.27	6.79	6.20	0.62	9.99	8.08	7.02	7.76	7.62	0.54	7.11	—	8.55	6.46	7.50	1.48	19.72	6.28	6.15	7.23	6.55	0.59	8.98
C35-380	6.25	10.26	6.14	7.55	2.35	31.06	6.69	5.61	5.94	6.08	0.55	9.12	7.13	7.28	6.03	6.82	0.68	10.01	7.70	5.78	6.81	6.76	0.96	14.24
C35-500	4.30	4.16	2.67	3.71	0.90	24.34	6.91	4.23	4.03	5.06	1.60	31.74	4.54	—	2.82	3.68	1.22	33.08	3.64	6.18	4.57	4.79	1.29	26.86

表-4.8 静弾性係数

配合名	締固め時間30秒						締固め時間60秒						締固め時間120秒						締固め時間240秒					
	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数	1	2	3	平均値	標準偏差	変動係数
	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(%)
C175-50	30.12	25.20	22.48	25.93	3.87	14.94	22.12	26.87	26.69	25.23	2.70	10.68	25.63	25.96	24.38	25.32	0.83	3.29	26.48	28.21	24.85	26.51	1.68	6.34
C175-62	28.90	32.25	31.29	31.15	1.19	3.79	28.50	33.95	32.35	31.57	2.76	8.75	32.56	34.41	33.33	33.44	0.92	2.76	31.09	31.72	30.07	30.96	0.83	2.68
C175-79	27.52	22.74	28.11	26.12	2.95	11.28	25.63	26.27	26.58	26.16	0.49	1.86	25.06	25.86	28.52	26.48	1.81	6.84	23.55	23.27	27.02	24.61	2.09	8.49
C175-111	18.53	13.82	21.00	17.78	3.65	20.52	22.31	20.43	22.02	21.59	1.01	4.68	25.07	16.72	19.30	20.36	4.27	20.99	27.69	27.13	27.53	27.45	0.29	1.05
C140-50	13.82	13.21	9.12	12.05	2.56	21.21	19.95	17.13	14.05	17.05	2.95	17.32	18.88	13.82	16.82	16.51	2.54	15.41	18.09	14.73	15.13	15.98	1.83	11.47
C140-62	20.57	16.27	22.76	19.87	3.30	16.61	20.02	18.12	19.88	19.34	1.06	5.48	21.70	17.11	19.17	19.32	2.30	11.89	22.38	22.08	21.80	22.09	0.29	1.32
C140-79	30.06	20.75	24.70	25.17	4.68	18.58	29.34	25.25	27.62	27.40	2.05	7.49	26.01	26.77	22.74	25.17	2.14	8.50	26.91	23.65	23.66	24.74	1.88	7.61
C140-111	19.92	16.83	17.46	18.07	1.63	9.04	21.99	17.76	17.81	19.19	2.43	12.67	21.40	20.03	18.88	20.10	1.26	6.27	21.98	19.89	18.06	19.98	1.96	9.81
C140-173	4.79	8.31	5.55	6.22	1.85	29.75	5.56	4.16	3.20	4.31	1.19	27.61	9.35	11.95	9.30	10.20	1.52	14.87	7.38	3.92	9.06	6.78	2.62	38.62
C105-50	7.75	7.25	5.93	6.98	0.94	13.51	7.20	10.01	5.65	7.62	2.21	28.99	9.25	10.13	9.21	9.53	0.52	5.45	7.21	11.40	15.11	11.24	3.95	35.13
C105-62	9.84	13.68	12.45	11.99	1.96	16.38	13.65	15.91	11.65	13.74	2.13	15.53	16.26	10.06	9.50	11.94	3.75	31.40	12.34	12.15	10.69	11.73	0.90	7.69
C105-79	19.41	14.13	23.63	19.06	4.76	24.99	20.86	13.09	12.25	15.40	4.75	30.82	16.55	14.12	12.58	14.42	2.00	13.88	16.63	16.48	15.77	16.29	0.46	2.82
C105-111	20.02	20.04	15.52	18.53	2.61	14.06	15.42	15.90	21.34	17.55	3.29	18.72	18.13	17.74	18.87	18.25	0.58	3.16	16.75	17.95	20.72	18.47	2.04	11.02
C105-173	9.38	6.28	7.23	7.63	1.59	20.81	6.77	8.23	7.05	7.35	0.77	10.52	5.45	8.09	7.33	6.96	1.36	19.59	8.04	10.12	8.93	9.03	1.05	11.58
C105-380	1.87	2.21	4.30	2.79	1.31	47.00	—	2.64	2.78	2.71	0.10	3.74	2.76	3.02	—	2.89	0.18	6.22	5.02	2.52	—	3.77	1.77	46.89
C70-50	5.94	5.65	4.50	5.36	0.76	14.25	7.71	4.93	4.42	5.69	1.77	31.13	5.09	7.94	8.27	7.10	1.75	24.62	5.43	6.48	9.76	7.22	2.25	31.21
C70-62	3.60	5.24	4.11	4.31	0.84	19.51	5.44	5.12	7.08	5.88	1.05	17.90	7.56	7.30	6.18	7.01	0.74	10.49	6.29	6.57	6.88	6.58	0.29	4.45
C70-79	2.68	4.46	8.58	5.24	3.03	57.77	12.13	5.92	8.15	8.73	3.15	36.03	10.44	7.64	7.22	8.44	1.75	20.76	9.42	7.44	8.40	8.42	0.99	11.74
C70-111	6.28	6.22	8.57	7.02	1.34	19.08	5.79	6.21	5.77	5.92	0.25	4.20	6.65	8.35	6.77	7.26	0.95	13.08	7.09	5.25	7.48	6.61	1.19	18.08
C70-173	8.24	6.79	6.67	7.23	0.87	12.08	8.52	8.11	8.79	8.47	0.34	4.02	5.45	8.82	10.89	8.39	2.74	32.73	9.36	9.29	8.81	9.15	0.30	3.24
C70-380	—	—	1.34	1.34	—	—	2.74	—	—	2.74	—	—	1.62	—	—	1.62	—	—	2.48	3.90	3.63	3.34	0.75	22.57
C35-50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.74	13.63	—	11.19	3.46	30.93
C35-62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.30	—	7.30	—	—	—	—	—	—	—	—
C35-79	2.62	2.23	2.41	2.42	0.20	8.22	2.52	2.46	4.08	3.02	0.92	30.45	2.18	3.64	1.91	2.58	0.93	35.97	3.30	3.51	3.56	3.46	0.14	4.00
C35-111	1.67	3.12	1.47	2.09	0.90	43.27	5.35	—	2.08	3.72	2.31	62.14	2.41	2.93	1.53	2.29	0.71	30.87	2.03	—	3.48	2.76	1.03	37.27
C35-173	2.46	1.91	2.93	2.43	0.51	20.80	2.44	1.37	0.70	1.50	0.88	58.31	—	2.03	1.55	1.79	0.34	18.96	2.53	1.67	1.93	2.04	0.44	21.53
C35-380	0.69	0.76	1.41	0.96	0.40	41.37	1.29	1.32	1.58	1.40	0.16	11.39	2.39	1.93	1.46	1.93	0.47	24.36	2.29	1.84	3.23	2.45	0.71	28.93
C35-500	0.74	0.75	0.66	0.72	0.05	7.13	—	1.04	0.74	0.89	0.21	23.77	1.20	—	1.13	1.16	0.05	4.43	1.35	1.27	1.61	1.41	0.18	12.74

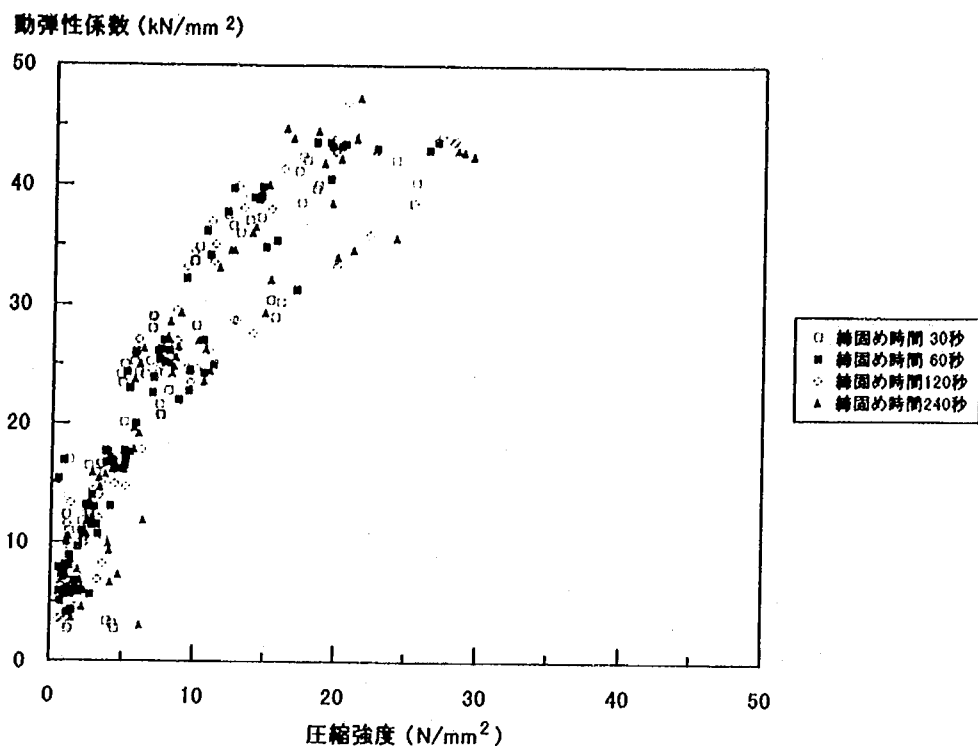


図-4.20 圧縮強度と動弾性係数の関係

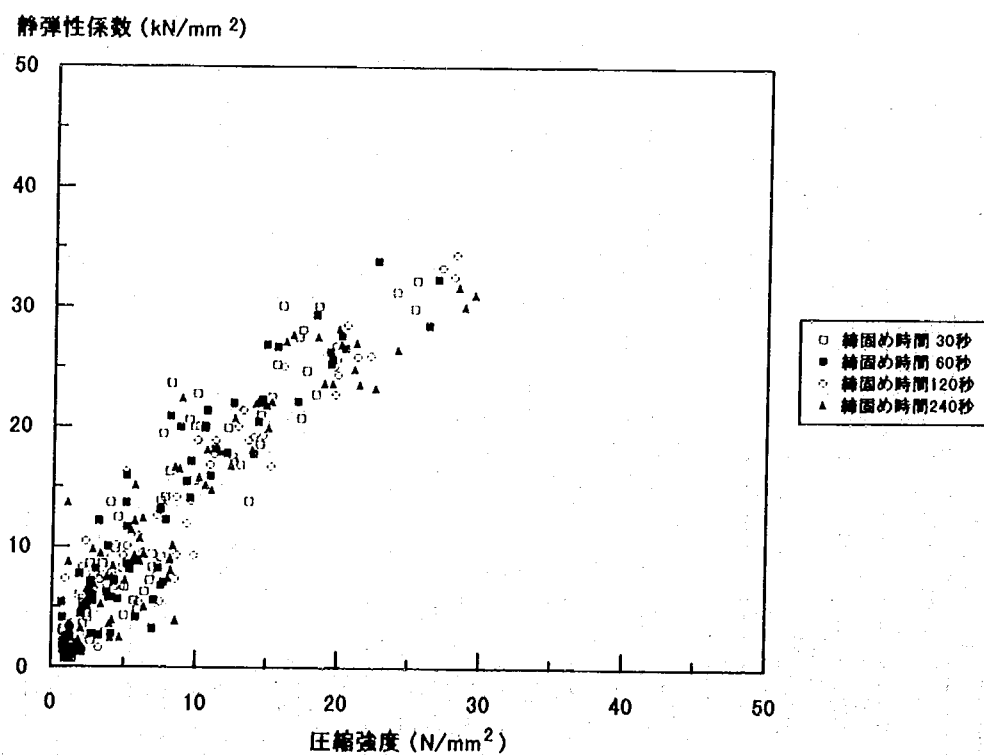


図-4.21 圧縮強度と静弾性係数の関係

さらに、図-4.22 に締固め時間をパラメータとした動弾性係数と静弾性係数の関係を示す。図より、両者には、締固め時間によらず、直線的な高い相関が認められる。図によれば、静弾性係数の値は動弾性係数の値の 60% 程度である。

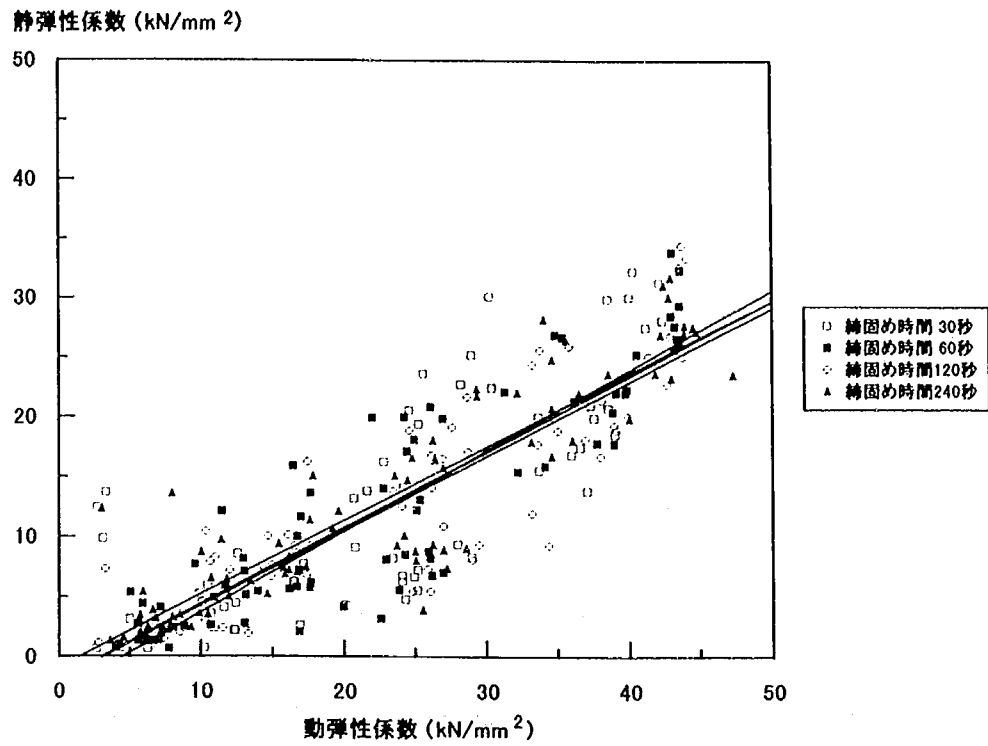


図-4.22 動弾性係数と静弾性係数の関係

5 大きな変形領域における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性に関する調査

3章における三軸圧縮試験結果より、20秒のVC値を維持して十分な締固めを行えば、単位セメント量を大幅に減じた超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性は、RCD用コンクリートのような従来コンクリートの場合と同様に、一軸圧縮強度と拘束圧の関係によって決まることがわかった。しかし、単位セメント量を極端に減じた配合については、残留応力が明確となるひずみレベルまで測定できなかった。

そこで、本章では、軸ひずみ10%程度までの大きな変形領域における超貧配合コンクリートの三軸圧縮試験を行い、その応力～ひずみ特性について検討を行った。

5.1 調査方法

5.1.1 コンクリートの配合および使用材料

コンクリートの配合は、4章で用いた配合のうち、VC値20秒の5配合とした。試験に用いた配合を表-5.1に示す。

使用材料も全て4章で用いた材料とした。材料の物性値を表-5.2に再掲する。

表-5.1 コンクリートの配合

配合名	Gmax (mm)	目標VC値 (秒)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
						W	C	S	G
C175	40	20±5	2.2±1.4	62	44	108	175	946	1218
C140	40	20±5	2.2±1.4	79	44	111	140	955	1230
C105	40	20±5	2.2±1.4	111	44	116	105	962	1239
C70	40	20±5	2.2±1.4	173	44	121	70	969	1248
C35	40	20±5	2.2±1.4	380	44	133	35	968	1246

表-5.2 使用材料の物性値

材料	種類	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント	比重:3.16、比表面積:3360cm ² /g
細骨材	砂岩砕砂	比重:2.64、吸水率:1.1% 粗粒率:2.80、実積率:63.0%
粗骨材	砂岩碎石	比重:2.67、吸水率:0.46% 粗粒率:7.19、実積率:62.8%

5.1.2 供試体作製方法

3 章同様、試験に用いた供試体は直径 15cm、高さ 30cm の標準供試体とし、供試体の作製には標準供試体作製装置を用いた。供試体は 3 層に分けて締め固め、1 層あたりの締め固め時間は 60 秒とした。なお、供試体は試験材齢の 91 日まで 20℃の標準水中養生を行った。

5.1.3 試験項目

試験項目としては、練混ぜ直後のフレッシュコンクリートに対しては VC 試験と空気量試験を行い、硬化コンクリートに対しては JIS A 1108 に準拠した一軸圧縮強度試験および三軸圧縮強度試験を行った。三軸圧縮試験における拘束圧は、1.0、2.0 N/mm² の 2 種類は全配合で共通とし、その他に配合毎に 2～3 種類、合計 4～5 種類の拘束圧を設定した。配合毎に設定した拘束圧は、各配合における一軸圧縮強度が求まった後、拘束圧と一軸圧縮強度の比が配合間で一致するように、拘束圧の値をそれぞれ 2～3 種類設定した（後述の表－5.5 参照）。

5.2 調査結果

VC 試験より求めた各配合の VC 値、単位容積質量および相対締固め密度と空気量測定試験より求めた各配合の空気量を表-5.3 に示す。VC 値、空気量は目標範囲内であった。

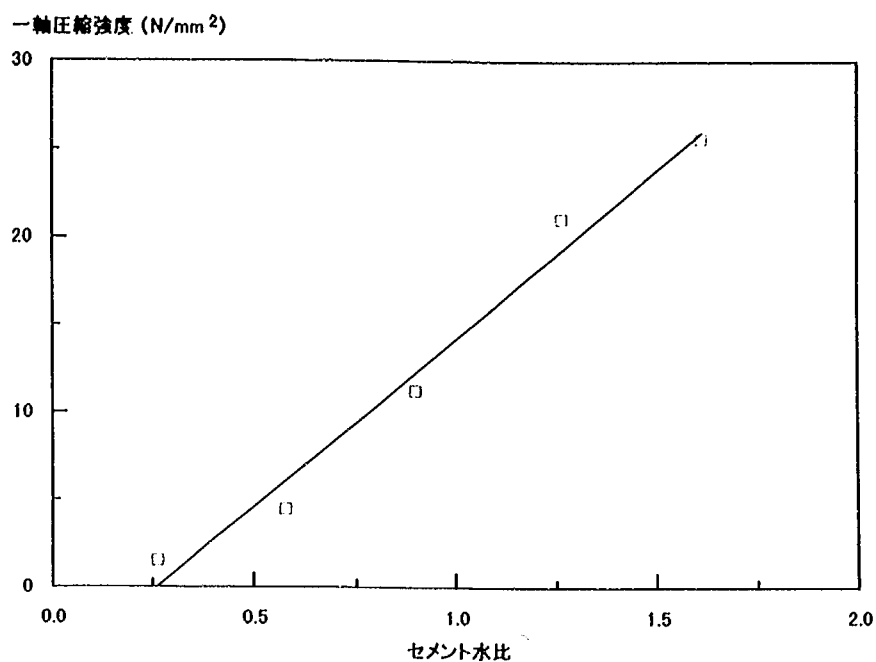
表-5.3 フレッシュコンクリートの性状

配合名	目標値		実測値			
	VC値 (秒)	空気量 (%)	VC値 (秒)	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)	相対締固め密度 (%)
C175	20±5	2.2±1.4	23.0	2.4	2.37	95.4
C140	20±5	2.2±1.4	20.9	2.2	2.42	97.7
C105	20±5	2.2±1.4	22.9	3.1	2.38	96.2
C70	20±5	2.2±1.4	22.5	3.2	2.36	95.7
C35	20±5	2.2±1.4	22.6	3.4	2.36	96.7

次に、表-5.4、図-5.1 に一軸圧縮試験結果を示す。3 章、4 章と同様に、一軸圧縮強度はセメント水比の法則に従っており、それらの値も 4 章における VC 値 20 秒、一層当り締固め時間 60 秒で作製した供試体の一軸圧縮強度とほぼ同じ値となった。また、一軸圧縮強度が求まった後、三軸圧縮試験に用いる配合毎の拘束圧を、拘束圧と一軸圧縮強度の比が 2%、7%、14%、21%程度となるように設定した。拘束圧の設定値を表-5.5 に示す。

表-5.4 一軸圧縮強度

配合名	C175	C140	C105	C70	C35
供試体-1	25.78	21.73	10.58	4.65	1.66
供試体-2	25.87	21.37	11.59	4.49	1.49
供試体-3	25.25	20.12	11.58	4.25	1.44
平均 (N/mm ²)	25.63	21.07	11.25	4.46	1.53
標準偏差 (N/mm ²)	0.34	0.84	0.58	0.20	0.12
変動係数 (%)	1.31	4.00	5.12	4.44	7.61



図ー5.1 セメント水比と一軸圧縮強度の関係

表ー5.5 拘束圧の設定値

配合名	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	拘束圧 / 一軸圧縮強度の設定値(%)				共通の設定値 (N/mm ²)		合計
		2	7	14	21			
		配合毎の拘束圧の設定値(N/mm ²)						
C175	25.6	0.5	1.8	3.6	---	1.0	2.0	5種類
C140	21.1	0.4	1.5	3.0	---	1.0	2.0	5種類
C105	11.2	---	0.8	1.6	---	1.0	2.0	4種類
C70	4.5	---	0.3	0.6	1.0	1.0	2.0	4種類
C35	1.5	---	0.1	---	0.3	1.0	2.0	4種類

※ 配合C70では、配合毎の設定値1.0と共通の設定値1.0は両者共通。

次に、拘束圧をパラメータとして、単位セメント量毎に整理した三軸圧縮試験における軸ひずみ～主応力差曲線を図-5.2 に示す。単位セメント量が大きい配合では、主応力差のピークが明瞭であるのに対し、単位セメント量が小さい配合では、最大主応力差と残留主応力差の値が小さくなる。配合、拘束圧のいずれの組み合わせにおいても、軸ひずみ 10%程度における主応力差はほぼ一定値に収束している。なお、単位セメント量 175、140 kg/m³の配合では、ピーク後の軸ひずみの増加によって低下してきた主応力差が再びわずかに増加する傾向が見られた。

次に、単位セメント量をパラメータとして、拘束圧 1.0、2.0 N/mm²の場合の軸ひずみ～主応力差曲線を図-5.3 に示す。単位セメント量の多寡に関わらず、軸ひずみ 10%程度における主応力差は拘束圧によって支配される一定値に収束している。

最後に、3 章の図-3.16 と同様に、拘束圧と一軸圧縮強度の比が 2%、7%、14%、21%について、最大主応力差が生じる時点での軸ひずみと主応力差をそれぞれ 1 とした、正規化した軸ひずみ～主応力差曲線を図-5.4 に示す。図によれば、拘束圧と一軸圧縮強度の比が同一であれば、正規化した軸ひずみ～主応力差曲線はほぼ同一の形状を有していることがわかる。特に、拘束圧と一軸圧縮強度の比が 2%、7%においては、かなり大きなひずみレベルにおいても、正規化した主応力差・軸ひずみ曲線が一致している。したがって、最大主応力差と残留主応力差の関係は、コンクリートの一軸圧縮強度と拘束圧の関係から定まることが改めて確認された。

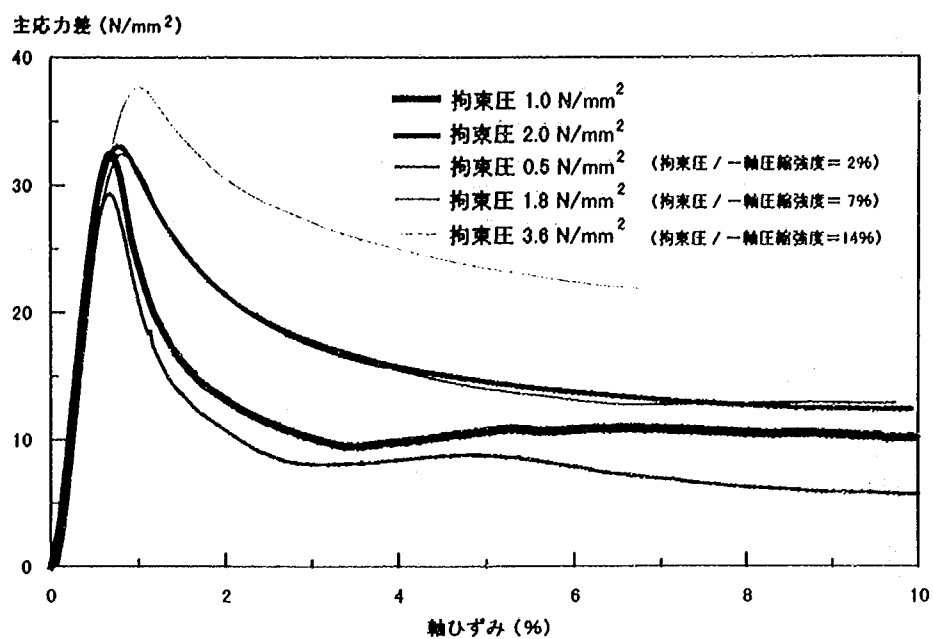


図-5.2(1) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 175 kg/m^3)

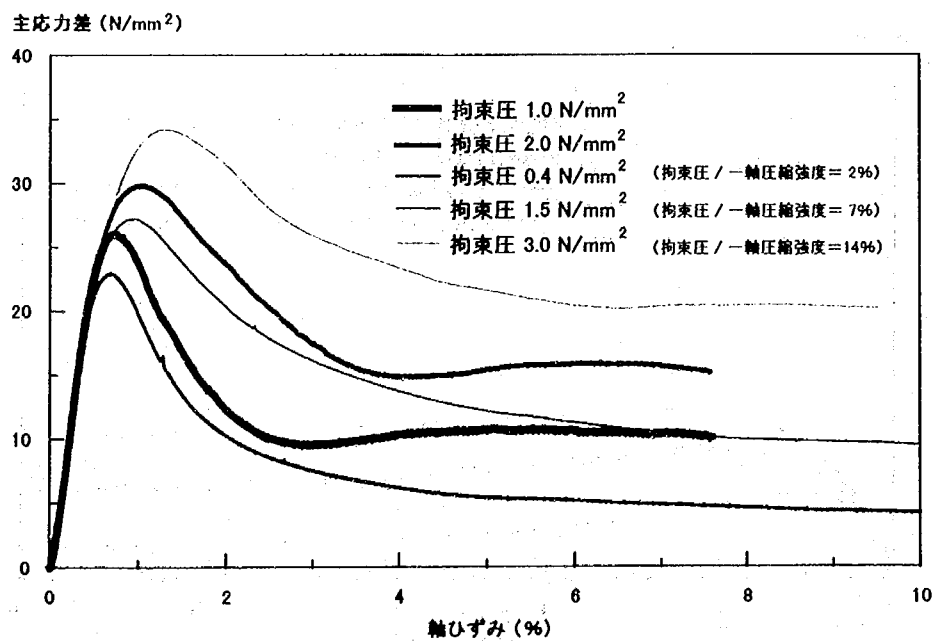


図-5.2(2) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 140 kg/m^3)

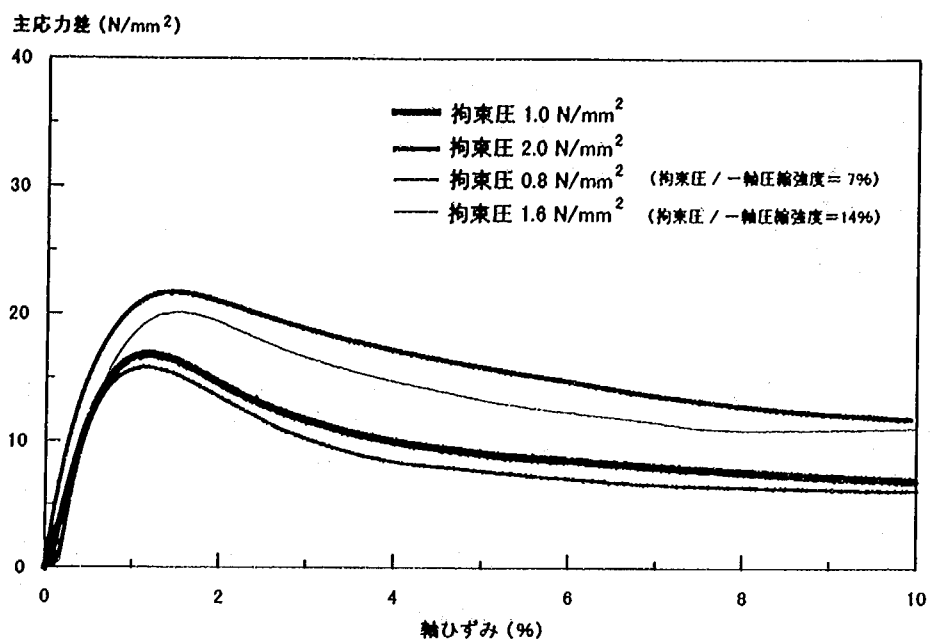


図-5.2(3) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 105 kg/m^3)

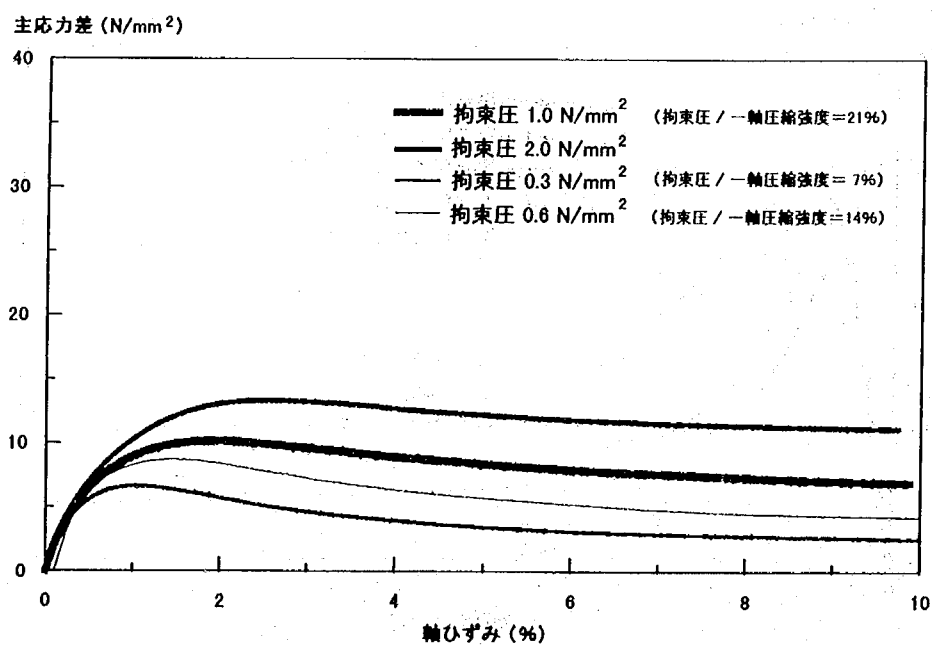
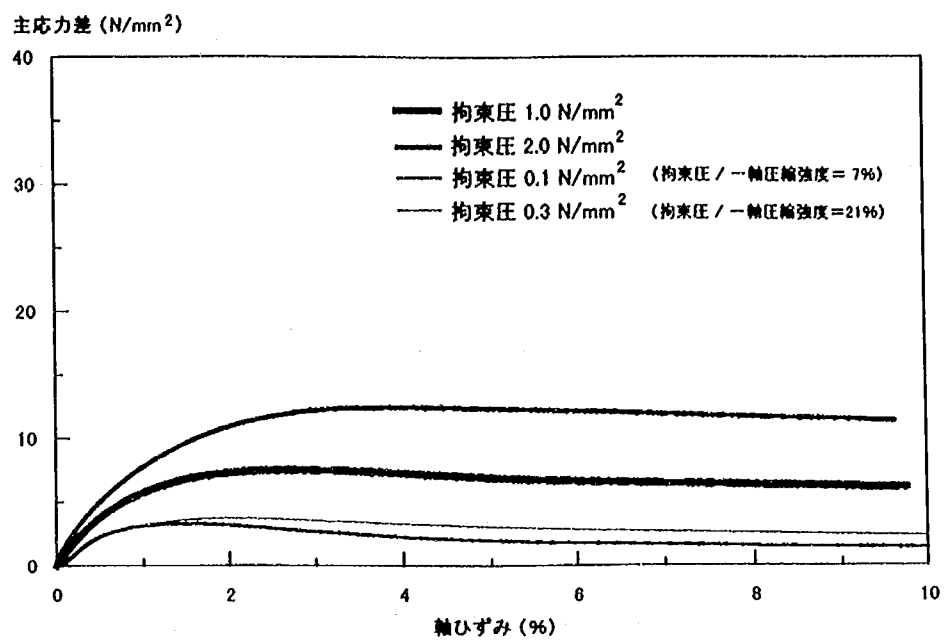


図-5.2(4) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 70 kg/m^3)



図一5.2(5) 軸ひずみ～主応力差曲線 (単位セメント量 35kg/m³)

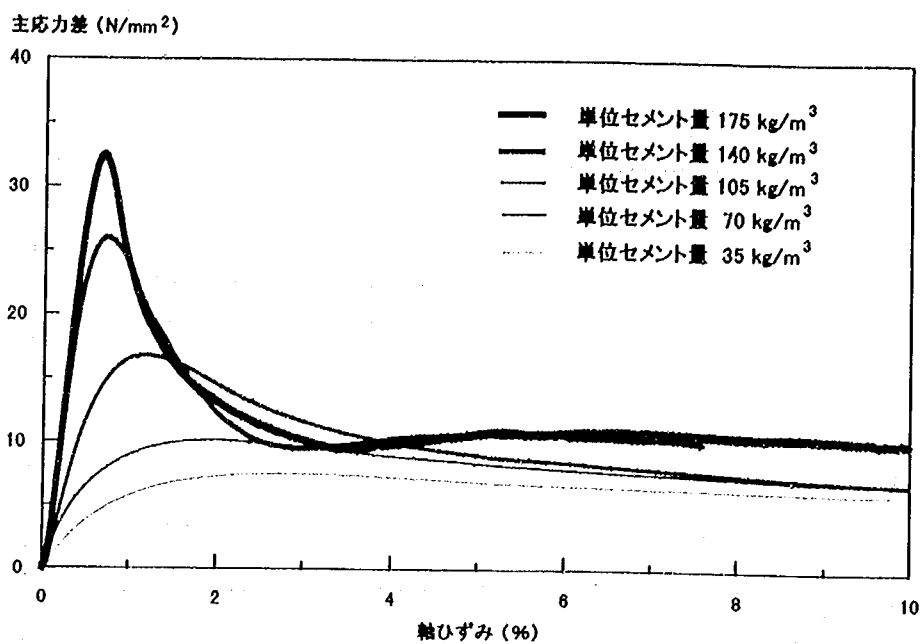


図-5.3(1) 軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧 1.0N/mm²)

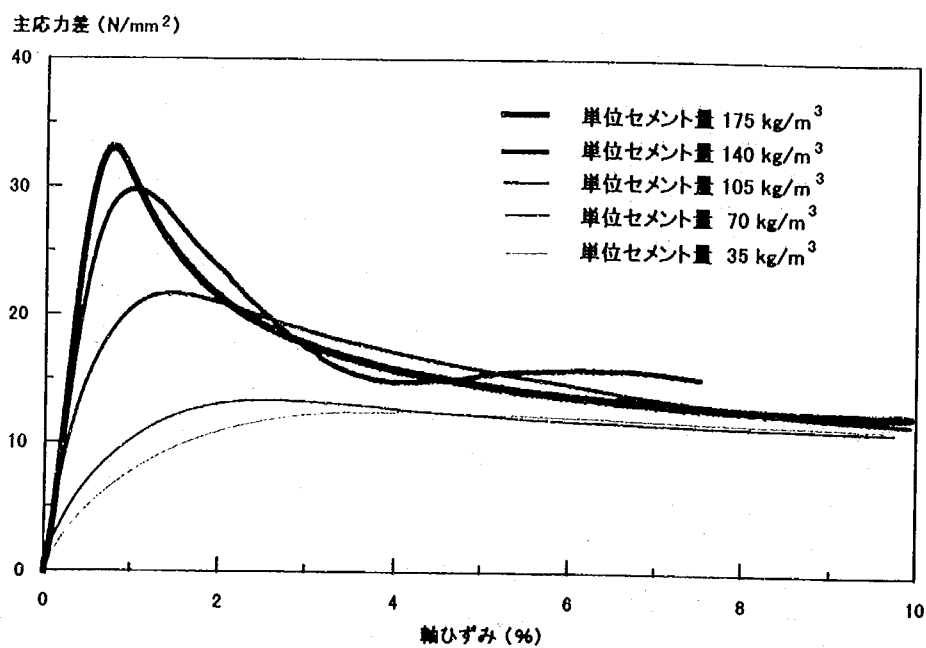
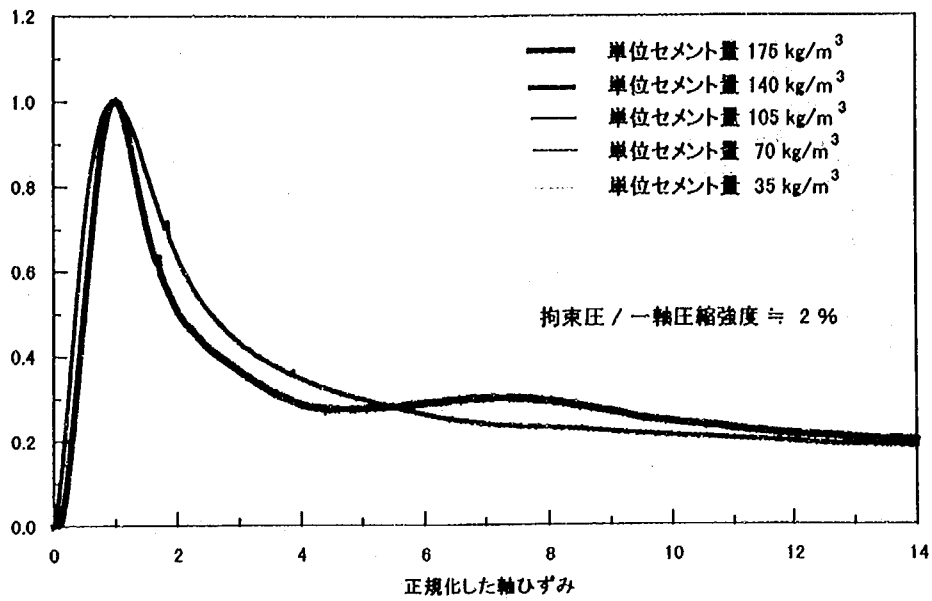


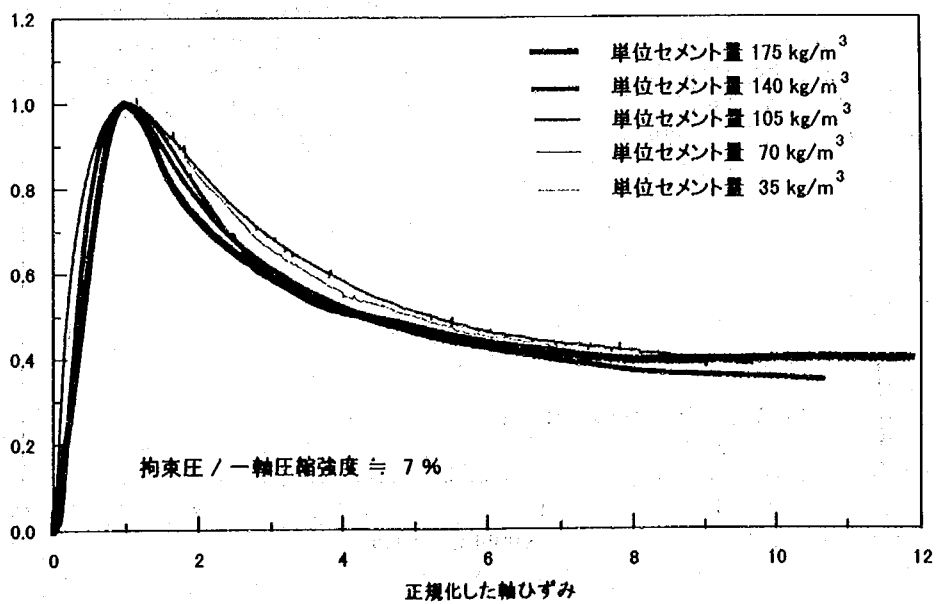
図-5.3(2) 軸ひずみ～主応力差曲線 (拘束圧 2.0N/mm²)

正規化した主応力差



図一5.4(1) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線（拘束圧/一軸圧縮強度 $\approx 2\%$ ）

正規化した主応力差



図一5.4(2) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線（拘束圧/一軸圧縮強度 $\approx 7\%$ ）

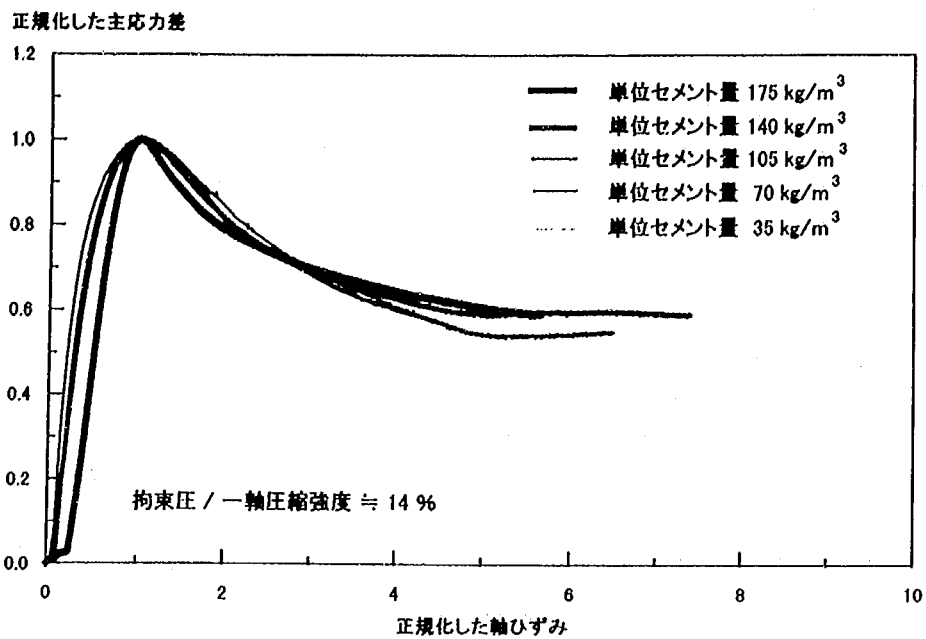


図-5.4(3) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線（拘束圧/一軸圧縮強度≒14%）

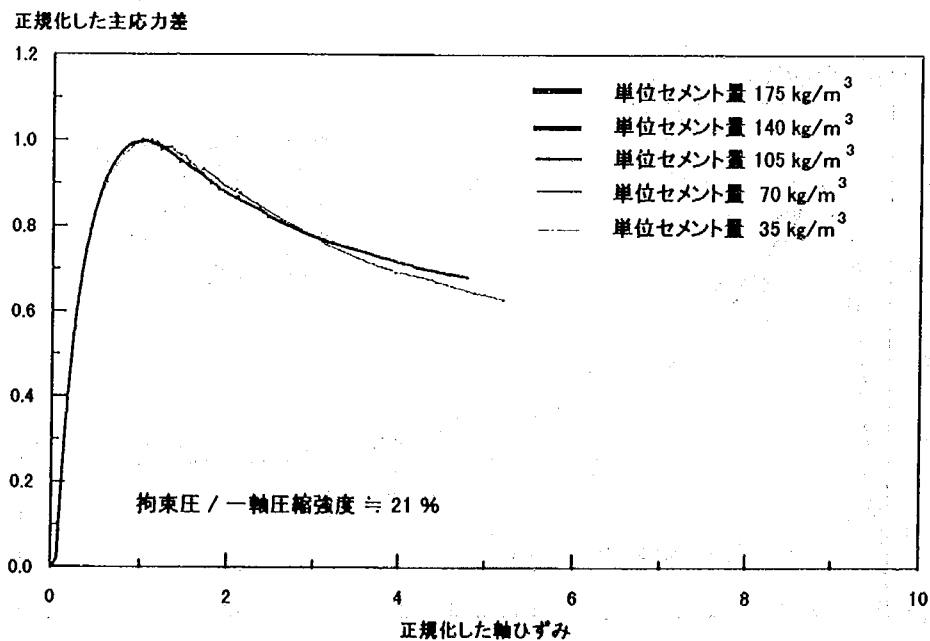


図-5.4(4) 正規化した軸ひずみ～主応力差曲線（拘束圧/一軸圧縮強度≒21%）

6 まとめ

単位セメント量を大幅に抑えた超貧配合コンクリートをダムに適用するにあたり、その力学特性を求めるための調査試験を行った。その結果を整理すると、以下のとおりである。

【単位セメント量が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響】

- ① 単位セメント量を大幅に減じた超貧配合コンクリートにおいても、VC 値 20 秒程度に設定して十分な締固めを行えば、セメント水比の法則によって一軸圧縮強度が定まる。
- ② このような配合において、弾性係数、割裂引張強度は一軸圧縮強度と同様にセメント水比と線形の関係性を有する。
- ③ 拘束圧が一定の三軸圧縮試験においても、最大主応力差はセメント水比と線形の関係にある。
- ④ 拘束圧、最大主応力差を一軸圧縮強度で除して無次元化すれば、単位セメント量に関わらず、無次元化した拘束圧と最大主応力差の関係は一義的に表される。
- ⑤ 三軸圧縮試験における応力～ひずみ特性は、単位セメント量の値によって定まるものではなく、拘束圧と最大主応力差の関係から定まる。
- ⑥ これらの結果より、単位セメント量を極端に減じた超貧配合コンクリートにおいても、VC 値 20 秒程度に設定して、十分な締固めを行えば、その力学的性質は従来コンクリートの延長線として取り扱うことができるといえる。

【単位セメント量の低減方法が超貧配合コンクリートの強度特性に及ぼす影響】

- ⑦ セメントペーストの性状を重視して、空隙を許容した配合よりも、セメントペーストの性状は犠牲にしても、空隙を充填して密実なコンクリートを得る施工性重視の配合の方が高い圧縮強度が得られる。
- ⑧ 相対締固め密度は、単位セメント量よりも単位水量の影響を大きく受ける。
- ⑨ 超貧配合コンクリートの圧縮強度は、相対締固め密度の影響を大きく受けるが、相対締固め密度を一定とした場合、圧縮強度はセメント水比の法則に従う。
- ⑩ コンクリートの配合や締固め時間によらず、圧縮強度と弾性係数の間には高い相関性がある。したがって、所定の圧縮強度を確保することによって弾性係数を高めることができる。

【大きな変形領域における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性】

- ⑪ 三軸圧縮試験における超貧配合コンクリートの応力～ひずみ特性は、大変形領域においても、単位セメント量の値によって定まるものではなく、拘束圧と最大主応力差の関係から定まる。

今後、超貧配合コンクリートを実際の現場で活用していくにあたっては、以上の結果を踏まえた上で、配合設計の考え方を整理していく必要がある。また、粒度分布や練混ぜ方法等の条件が超貧配合コンクリートの力学特性に及ぼす影響、また超貧配合コンクリートの耐久性に関する検討などにも取り組む必要がある。