

超高強度コンクリートの物理的性状に関する実験研究

山 本 英 一*

Experimental Research on Strength of Ultra High Strength Concrete

Eiichi YAMAMOTO

The environment of structures situated in the open air is getting worse day by day: therefore they are exposed to the extremely harmful effects of weathering. In particular, large scale concrete structures such as expressway, tracks for use in the Shinkansen large span structures show a tendency to deteriorate. Besides, it is necessary to design them considering all possible items relating to earthquakes, wear, overloads, and polluted air. To facilitate the development of ultra high strength concrete, the author insists that a thorough investigation into the properties of the material should be carried out fundamentally. From that point of view, the properties of concrete are modified with silica fumes in a way that the said concrete can be produced. Thus a detailed study of its physical properties is performed. In this case, the fundamental characteristics of ultra high strength after the initial setting time are carefully discussed by paying special attention to the process by which the gain in strength has occurred in that concrete during experiments and to the results obtained from them.

[1] はじめに

近年構造物に対する環境は日増しに悪化し、過酷な条件を強いられている。とくに、高速道路、新幹線軌道、大スパン架構物、超高層ビル等々の大規模な構造物に於いては其の傾向が大となり、震動、摩耗、過負荷重、其の他大気汚染等の種々の悪条件を覚悟しなければならない。とくに、脆性的なコンクリートに於いては、不測の事態が生じることも有り得るのである。こうした点を克服する為には、根源的な意味からも素材上の問題点をクリアーしなければならないと考えられるのである。斯様な点から、今回、構造物の主要素材であるコンクリートの性能改善の必要性を痛感し、コンクリートの高性能化を図る一手段として、シリカヒュームの活用に着目したものである。このシリカヒューム及び高性能減水剤の混入から、 $800\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 1100\text{kgf}/\text{cm}^2$ の超高強度のコンクリートを得ることを目的として種々実験を行い、その過程と結果から物理的機械的性状に関して追究するものである。とくに本報告では硬化後の基本的特性に関して考察を加え言及するものである。

*建設工学科 建築学専攻

[2] 実験概要

(2-1) コンクリートの品質性能特性に関して考察を加えることを目的として、次に掲げる項目を主たる実験として行うものである。即ち、

- 1), 基本的物性に関するもの。(圧縮、引張、せん断、曲げ、弾性係数 etc)
- 2), 強度の発現性に関して。
- 3), コンクリートの耐久性の問題として、次の2点について実験を行う。
 - a, ---- 弾性限界内での繰返し載荷に於ける劣化、疲労度について。
 - b, ---- 凍結融解試験でのコンクリートの劣化に関して。

(2-2) 使用材

使用材は、表-1に示す通りであるが、シリカヒュームはN社製のパウダー状のものを、セメントはT社製の普通ポルトランドセメントを用いた。又、骨材は、福井県の九頭竜川産の天然骨材を使用した。

表-1

	品 質	
セメント(C)	T社製 普通ポルトランドセメント	比重3.16
シリカヒューム(SF)	N社製 粉末タイプ	比重2.20
細骨材 (S)	福井県九頭竜川産	比重2.63
粗骨材 (G)	福井県九頭竜川産	比重2.70
減水剤	ナフタリンスルホン酸系高性能減水剤	

(2-3) 調合

コンクリートの調合に関しては、表-2に示す通りであるが、シリカヒュームの置換率を10%とし、水結合材比を19%, 22%, 25%の3シリーズの供試体とした。単位水量は、 $160\text{L}/\text{m}^3$ 一定とし、細骨材率(s/a)を粗粒率、コンクリートのコンシステンシー等を考慮して38%とし、スランプの目標値を18cmに定めた。又、対比の為に水セメント比 $W/C=60\%$ の普通コンクリートを1シリーズとした。

コンクリート調合表

表-2

水結合材比 $W/C \cdot S$ (%)	S/A (%)	単位 水量 $W(L)$	絶対容積 (L/m^3)			重量 (kg/m^3)		
			C+SF	S	G	C+SF	S	G
19	38	160	278	198	327	842	522	875
22	38	160	240	213	347	727	560	937
25	38	160	211	224	365	640	589	986
W/C 55	45	190	109	297	364	$C=$ 345	781	982

(2-4) 供試体

本実験に使用する供試体は、次の通りとする。

a) 円柱形

a-1 径100mm×高200mm ---- 圧縮試験及び、一軸方向繰り返し載荷試験試験用

a-2 小径80mm×高650mm ---- 引張試験用

b) 長方形

b-1 100mm×100mm×400mm --- 凍結融解試験用、せん断試験用

b-2 150mm×150mm×450mm --- 曲げ試験用

以上4種類とした。

(2-5) 主たる実験と方法

a) 強度の発現性に関して。

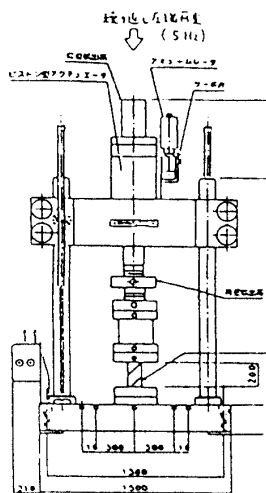
各シリーズ共、材令28日時での圧縮強度を100%とし、材令1日、3日、7日、

28日、それぞれの圧縮強度試験を行う。

b) 耐久性に関して。

(b-1) 1軸方向での繰り返し載荷試験

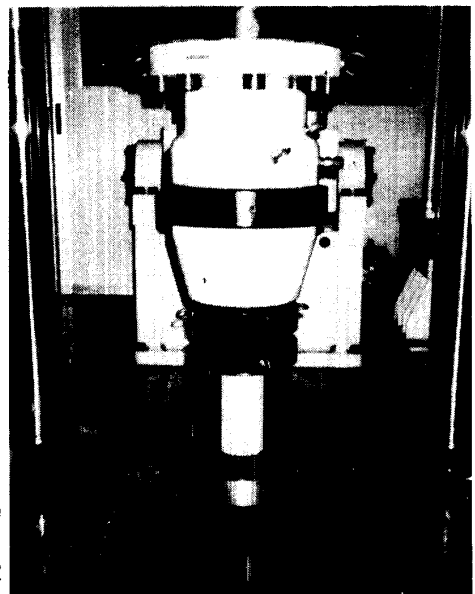
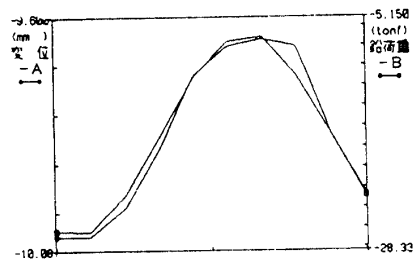
圧縮での破壊荷重の1/3以内の載荷、即ち弾性限界内に於ける応力状態での繰り返し載荷を、正弦波5HZのサイクルにて、上限下限の荷重の幅を20tとし、100万回～200万回程度を目標として行う。(図-1)(図-2)は、載荷試験装置と波形である。



50t油圧サーボ式構造物疲労
応用試験装置

(図-1)

(図-2)



試験装置は、鷺宮製作所製の50t油圧サーボ式構造物疲労

(b-2) 凍結融解試験

ASTM-C-666-77に基いて行う。即ち、供試体の中心温度が $-18^{\circ}\text{C} \sim \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ を、1サイクル210分にて100回行う。

凍結融解設定条件

試験装置は、圓井製作所製の1槽式凍結融解試験機(MIT-1682-1 16本)を使用し、方式はブラインによる水中凍結融解方式である。尚、凍結融解の設定条件とサイクルについては、(表-3、)

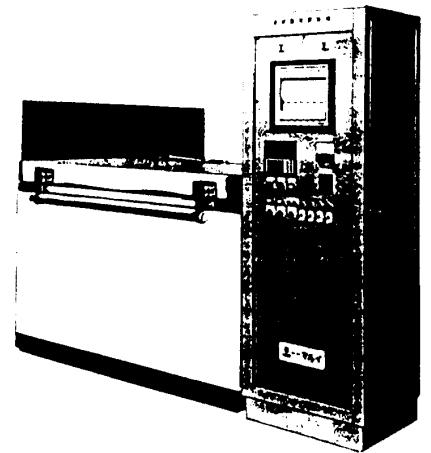
(図-3)に示す。

供試体 中心温度 (°C)	最高	+ 5±1.7
	最低	-18±1.7
サイクル 時間 (分)	1サイクル	約 210
	凍結時間	約 105
	融解時間	約 105

(表-3)

1 槽式凍結融解試験機

(図-3)



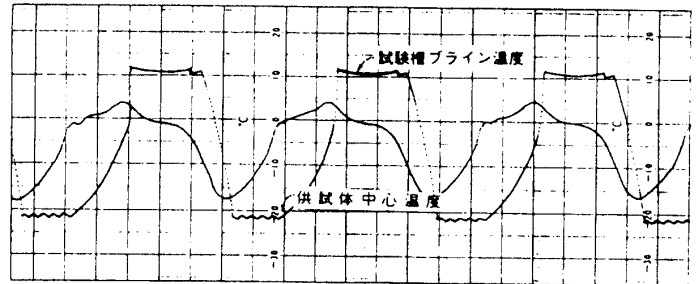
[3] 実験結果と考察

(3-1) 硬化時の発生温度と収縮

歪に関して

(図-4)に於いて、15cm×15cmの断面を持つ、長さ52cm供試体の中心部の温度と歪ついて、計測した結果を図示したものであるが、温度の上昇はコンクリートの打設より4時間経過後に発生し始

凍結融解のサイクル図



生し始、又、収縮はそれより2時間後から始まった。発生温度のピークは10時間前後で、急激な収縮の伸びはそれより4~5時間遅れ、温度が下降気味と共に減少した。温度が常温に戻ったのは、60時間経過後であった。しかし歪は、僅かながらも増加の傾向見せていた。特徴的な点は、水結合材比順に硬化温度、歪度も共に高くなるようだった。尚この実験は室内温度 26°C の条件下で行ったものである。

基本的性状に関する実験結果は、次の表-4に示す通りである。

(3-2) 圧縮強度

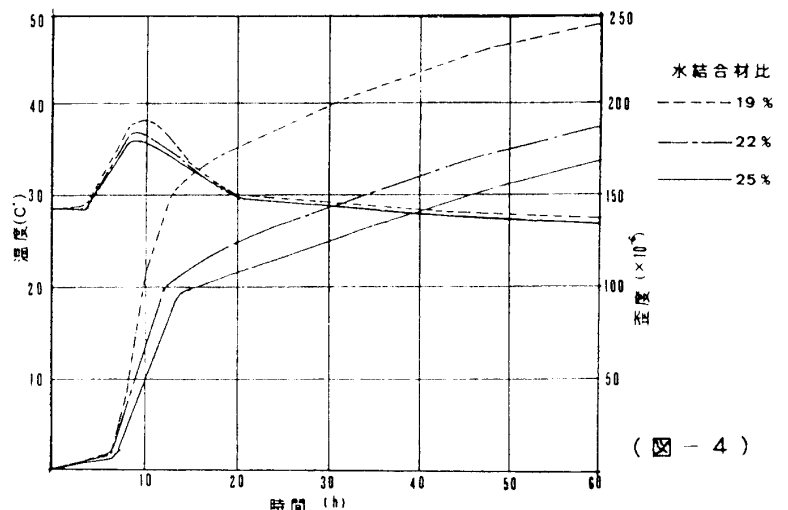
当初の目標値としての圧縮強度 $FC=1000 \text{ kgf/cm}^2$ については、 $900 \text{ kgf/cm}^2 \sim 1100 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で得られたことで置換率内割の10%は概ね可と言えよう。

(図-5)にて各シリーズの応力歪曲線を示したが、普通コンクリート

とは明らかに差異があり、硬度の大なる岩石に類似した性状が見られた。

(3-3) 弾性係数と密度

3シリーズ(19% 22% 25%)の水結合材比程度では顕著な差異は認められなかったが、水セメント比55%の普通コンクリートとの比較に於いては、1.0~0.9の差があり、普通コンクリートより密



(図-4)

基本的各試験結果表

表 - 4

水結合材比 W/C・S (%)	強度 (kgf/cm ²)			静弾性係数 × 10 ⁵ kg/cm ²	動弾性係数 × 10 ⁵ kg/cm ²	密度 ρ
	圧縮 FC	引張 cFt	せん断 τu			
19	1070	67.6	167.3	4.10	5.65	2.45
22	960	56.8	136.4	3.85	5.60	2.45
25	880	55.3	113.0	3.80	5.60	2.43
水セメント比 % W/C 55	372	35.0	82.3	3.07	4.81	2.37

実性に富み、素材的にも優れた点として特筆すべきである。動弾性係数に関しては、超音波速度法より求めたものであるが、水結合材比の上下幅が6%程度では、さしたる変化は見られなかった、ほぼ静弾性係数と同様な傾向であった。

(3-4)、せん断強度

せん断強度は、(図-6)に示す直接2面せん断試験法より得た数値であるが、一般に云われている圧縮強度の1/4~1/7よりは若干低めであった。恐らく曲げの影響が加味されたものと推測される。

(3-4)、せん断強度

せん断強度は、(図-6)に示す直接2面せん断試験法より得た数値であるが、一般に云われている圧縮強度の1/4~1/7よりは若干低めであった。恐らく曲げの影響が加味されたものと推測される。

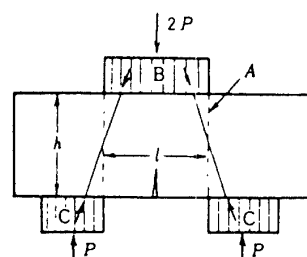
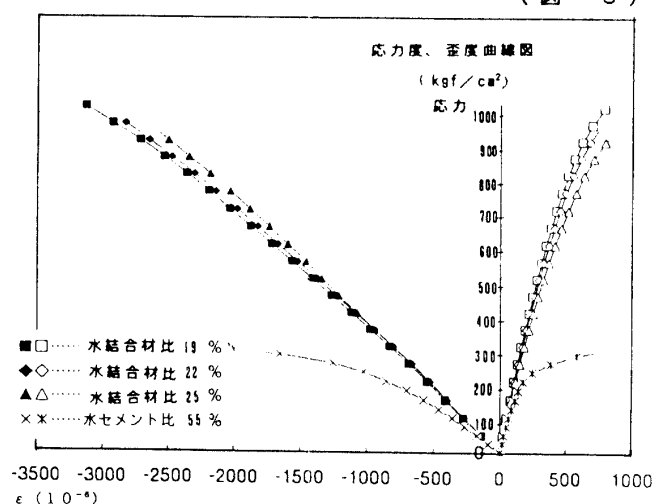
(3-5)、引張強度

引張強度は、(図-7)に示す供試体を用いて、直接引張試験方法より求めたものであるが、数値のバラツキはあったものの、水結合材比の変化に応じた値が得られた。

(3-6)、圧縮強度の発現性に関して

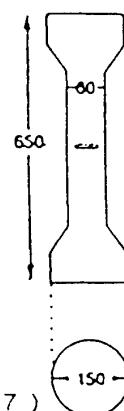
材令と圧縮強度の関係からコンクリートの強度の発現性能を検討する為に行った試験結果を(表-5)に示す。又各材令と圧縮強度との関係を(図-8)~(図-11)に於いて示した。尚、(図-8)(図-9)(図-10)各図より、指数回帰直線式にて説明すれば次の通りとなる。

(図-5)



直接二面せん断試験

(図-6)



(図-7)

圧縮強度の発現性

表 - 5

水結合材比 W/C・S (%)	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)			
	材令 1 日	材令 3 日	材令 7 日	材令 28 日
19	600.4 (56.1)	805.0 (75.2)	926.7 (86.6)	1070.0 (100)
22	536.3 (55.9)	795.5 (82.6)	887.5 (92.4)	960.0 (100)
25	413.0 (47.0)	674.3 (76.6)	777.7 (88.4)	880.0 (100)
水セメント比 55	63.8 (17.2)	155.7 (42.0)	258.6 (69.7)	371.0 (100)

水結合材比 単位
(kgf/cm²)

19 % の場合,

$$\sigma = 325 \log X + 600$$

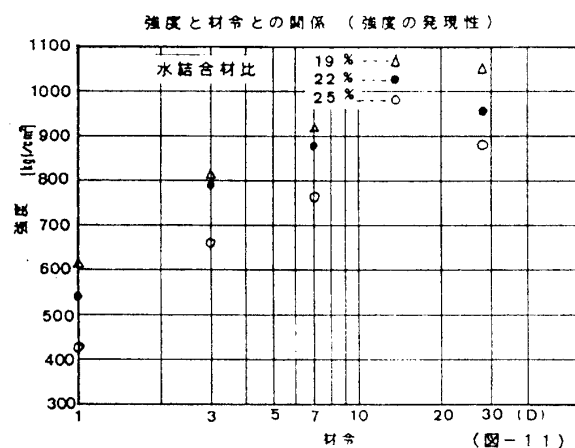
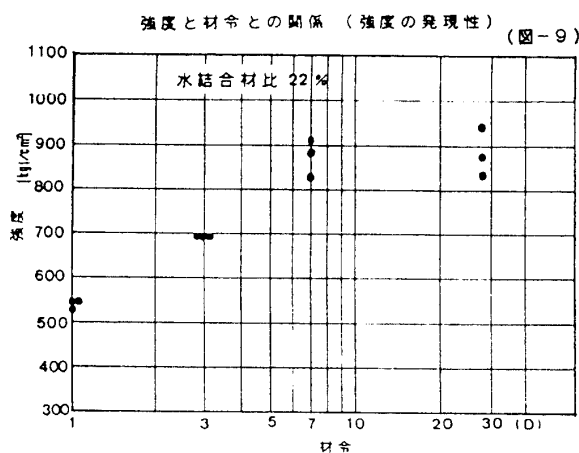
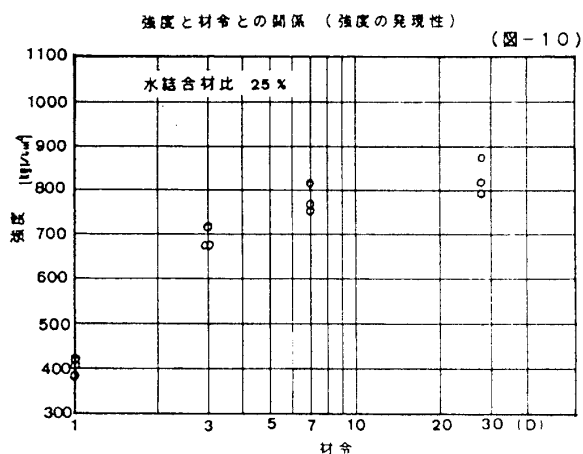
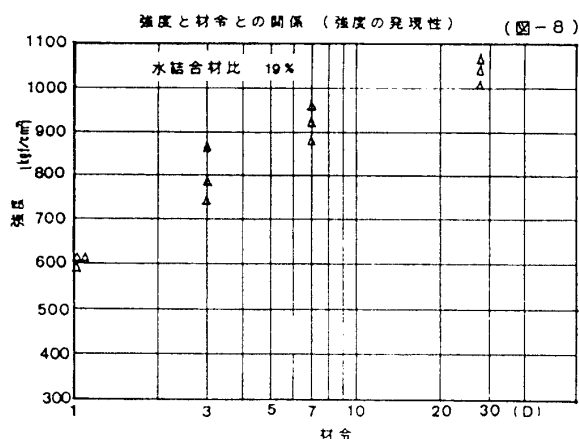
22 % の場合

$$\sigma = 297 \log X + 530$$

25 % の場合

$$\sigma = 324 \log X + 410$$

() 内の数値は材令 28 日の強度を 100 % とした時の材令に応じた強度比である。



以上の試験結果表各図より、若干数値のバラツキはあるにせよ、超高強度コンクリートの特性として、強度の発現性の早さを指摘出来る。其の端的な事実としては、普通コンクリートと比較に於いて明かに説明できる。即ち、材令 1 日目の強度に於てすら極端な差異が生じている、超高強度コンクリートの場合、50 % の発現に対して、普通コンクリートは 17 % 程度に留まり、材令 3 日に至っては、前者は 75 % 以上に対して、後者は 42 % と明らかに大きな差が生じている。この点より、超高強度コンクリートの初期強度の発現性が、極めて優れていると云える。

1 軸方向 繰返し載荷試験結果表 (200万回) 表 - 6

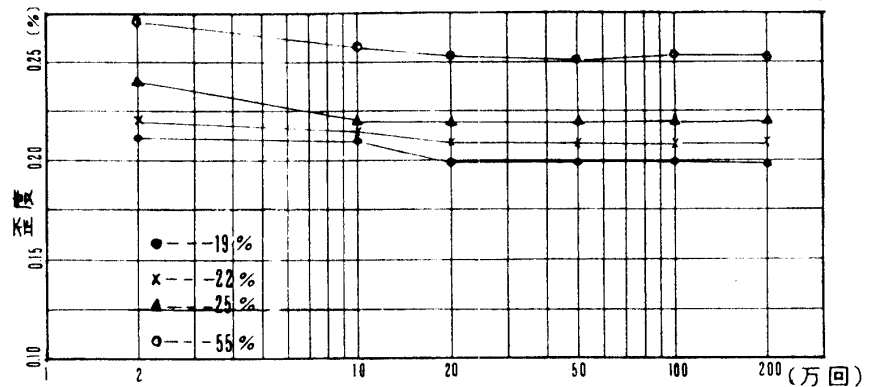
水結合材比 W/C・S (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		弾性係数 (× 10 ⁵ kg/cm ²)	
	繰返し前	繰返し後	繰返し前	繰返し後
19	1070	1178	4.10	4.44
22	960	1124	3.85	4.26
25	880	1078	3.74	4.08
水セメント比 55	371	437	3.07	3.22

(3-7), 1 軸方向繰返し載荷試験

弾性域での200万回の1軸方向繰返し載荷試験の結果を(表-6)に示す。試験結果から明かなことは、200万回程

度の繰返し載荷試験では劣化せず、逆に密度が高くなり、圧縮強度、弾性係数は共に増加した。(図-12)は、各シリーズ毎の応力比に応じた歪度の変化を示したものであるが、水結合材比が小さい供試体ほど歪度の変化は少なく、その幅も僅少であった。

繰返し載荷と歪度との関係 (図-12)



(3-8), 凍結融解試験

超高強度コンクリートの耐久性に関する問題として凍害があるが、今回、ASTM-C-666-77に基づいて凍結融解試験を行ない、試験終了後直ちに圧縮試験を行った。結果として表-5に示す如く、超高強度コンクリートは、圧縮強度も弾性係数も共に若干減少をみせた。圧縮強度において3シリーズとも

凍結融解後の圧縮試験結果表 表-5

10%弱の減少であり、弾性係数に於いても同様に、減少率は4%~12%弱であった。以上の点より、100回での繰返し試験の範囲では、

水結合材比 W/C・S (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		弾性係数 × 10 ⁵ kg/cm ²	
	試験前	試験後	試験前	試験後
19	1070	985.4	4.10	3.61
22	960	860.2	3.85	3.62
25	880	792.3	3.74	3.58
W/C 55	372	計測不可能	3.07	計測不可能

大きな劣化は認められず、更に試験回数を増加する必要があると考えられる。一方普通コンクリートの場合は、表面部から深さ3mm程度に剥離が生じ、超音波による計測も不可能となり、圧縮試験も実施し得なかった。従って、今回の試験での耐久性に関しては、量的に把握出来なかった。

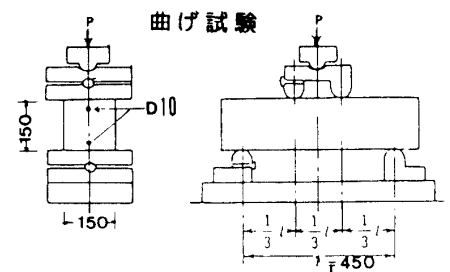
(3-9)、初期曲げ耐力

長方体(150×150×450)のRC梁に於いて、(図-13)の如く2点載荷による曲げ試験を行い、初期亀裂発生時での耐力を検討した。結果は(表-7)に示したが、初期の曲げ耐力は、普通コンクリートと比較した場合、3シリーズ共普通コンクリートの2倍強の強さを見せた。又、終局時に関しては、両者間に顕著な差は無かった。実験値は何れの場合も理論値を上回った。

曲げ試験結果表

表-7

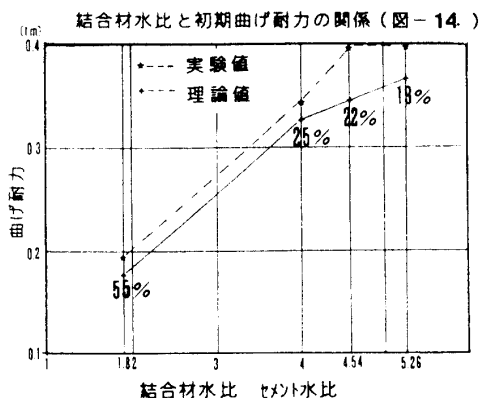
水結合材比 W/C・S %	曲げ耐力 (tm)			
	(理)初亀裂Mu	(理)終局Me	(実)eMu	(実)eMe
1.9	0.365	0.380	0.392	0.582
2.2	0.345	0.365	0.393	0.435
2.5	0.334	0.360	0.345	0.485
水セメント比55	0.177	0.322	0.195	0.433



(図-13)

[4]、まとめ

今回の実験結果から、超高強度コンクリートの優れた物性を見い出せた。即ち、繰り返し荷重下に於ける耐力の減衰率の低さ、凍結融解試験での抵抗性の大きさ(凍害が全く可視出来なかった)、初期の曲げに対する強さ、また強度の発現性の早さ、その他素材としての基本的物性の優秀さ等々種々列記し得る。問題点としては、硬化時の発生温度が普通コンクリートに比較して、高温になると云う点である、この問題点に関しては、次回の実験過程で更に究明するものである。



参考文献

関田徹志：水和熱に起因する高温履歴を受ける超高強度コンクリートの強度性状

1991年 学術講演梗概集 P1361

木皿 剛：シリカfumeを使用した高強度コンクリートに関する研究

1991年 学術講演梗概集 P1412

柿崎正義、枝広英俊：粗骨材の品質が超高強度コンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響

コンクリート工学論文集 Vol.1 NO.2 1993

(平成5年12月17日受理)