

RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その1)

久保田 昌 吾 中 根 淳
一 瀬 賢 一

Experimental Study on High-strength Concrete for High-rise Reinforced Concrete Building (Part 1)

Shogo Kubota Sunao Nakane
Ken-ichi Ichise

Abstract

The concrete for a high-rise building requires high strength in comparison with concrete generally used. This paper reports on the physical properties of high-strength concretes containing a superplasticizer, a fluidizing agent, or the high-strength admixture Silica Fume. The following results were obtained in experiments. (1) The cement-water ratio and compressive strength of a superplasticized concrete are proportional to each other. (2) Shrinkage of normal-weight concrete is about -0.07 percent and that of lightweight concrete about -0.05 percent. (3) Compressive strength of concrete containing Silica Fume replacing part of the cement shows a peak when the rate of substitution is 10 percent. (4) The air-cured strength of concrete with intermixture of Silica Fume is decreased by about 25 to 34 percent in comparison with standard curing in water.

概 要

RC超高層建物用コンクリートは、一般に用いられているコンクリートに比べて高強度のものが要求される。そこでこの研究では、高性能減水剤、流動化剤および高強度用混和材「シリカフューム」を用いた高強度コンクリートの物性について調査した。その結果概略以下のことが分かった。(1) 高性能減水剤を使用した普通コンクリートでは、セメント水比 ($W/C=30\sim 40\%$) と圧縮強度の関係は比例関係にある。(2) 乾燥収縮は、普通コンクリートで約 -0.07% 、軽量コンクリートで約 -0.05% 程度である。(3) シリカフュームを代替えたコンクリートの圧縮強度は代替え率 10% でピークに達し、その増大率は $10\sim 30\%$ である。(4) シリカフュームを混入したコンクリートの気中養生強度は、標準水中養生強度に比べて約 $25\sim 34\%$ 低減しており、打設後の養生が極めて重要である。

1. まえがき

近年、高層住宅として脚光を浴びている鉄筋コンクリート造高層建物（以下 RC 超高層建物と呼ぶ）は従来の鉄骨造に比べて居住性、コストなどの点で優れていると言われているが、その反面 RC 超高層建物では、低層部分の柱脚部にかかる軸力が大きくなるため、柱部材寸法の拡大により柱間が狭くなることと、太径鉄筋の増大などにより、コンクリートの充填性が悪くなるなどの問題も抱えている。そこで、これらの問題を解決する一案として高強度コンクリートの製造・施工法の開発が考えられている。

この報告は、施工性を重視した高強度コンクリートの開発を目標として、高性能減水剤を用いた高強度コンク

リート ($W/C=30\sim 40\%$) および高強度用混和材料として注目されているシリカフューム（以下 S.F と呼ぶ）を混和した高強度コンクリート ($W/C=30, 35\%$) の物性について調査・検討した結果をまとめたものである。

2. 実験概要

2.1. 実験条件

実験条件を表-1 に示す。実験はシリーズ1および2から成り、シリーズ1では、セメント（普通・早強ポルトランド）および粗骨材（硬質砂岩、人工軽量骨材）を各2水準、水セメント比を $30\sim 40\%$ の3水準とした合計12種類の高強度コンクリートの物性を、また、シリーズ2では、高強度混和材 S.F の代替え率 ($0\sim 15\%$) を4水準、水セメント比 ($30, 35\%$) 2水準の合計8種類の高

強度コンクリートの物性について調査した。

2.2. 使用材料および調査

使用した骨材の性質を表-2に、混和材 S.F の化学成分を表-3にそれぞれ示した。また、シリーズ1および2に用いたコンクリートの調査を表-5に示す。使用した混和剤は、減水剤としてリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を、高性能減水剤には高縮合芳香属

シリーズ	項目	適要	実験の種類	
			水準	合計
1	セメント	普通ポルトランド 早強ポルトランド	2	12
	骨材	硬質砂岩砕石+陸砂 人工軽量骨材+陸砂	2	
	水セメント比(%)	30, 35, 40	3	
2	水セメント比(%)	30, 35	2	8
	S.F代替率(%)	0, 5, 10, 15	4	

表-1 実験条件

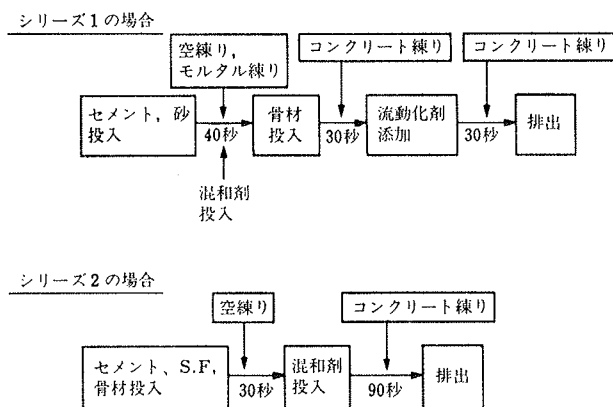


図-1 練り混ぜのフロー

スルホン酸化合物を併用した。混和材 S.F はセメントの一部と置き換えて(代替え)使用した。

2.3. 試験項目および試験方法

シリーズ1および2における試験項目と試験方法を表

シリーズ	骨材の種類		産地またはメーカー	最大寸法(%)	表乾比重	吸水率(%)
	細骨材	粗骨材				
1	陸砂		木更津	5	2.61	1.68
	砕石		青梅	20	2.62	0.74
		人工軽量骨材	住友金属鉱山	15	2.00	26.0
2	陸砂		木更津	5	2.66	1.46
	砕石		青梅	20	2.60	0.81

表-2 骨材の性質

産地	比重	成分	標準量(%)	成分	標準量(%)
アイスランド (メーカー: ICELANDIC ALLOYS LTD)	2.2 (かさ比重 約0.5)	SiO ₂	92.85	Na ₂ O	0.76
		Al ₂ O ₃	0.49	C	1.01
		Fe ₂ O ₃	0.92	P	0.05
		CaO	0.27	水分	0.82
		MgO	1.06	強熱減量	2.20
		K ₂ O	1.12		

表-3 シリカヒュームの産地および成分

フレッシュコンクリート		硬化コンクリート	
項目	試験方法	項目	試験方法
○スラブ	JISA1101	○圧縮強度	JISA1132, 1108
○スラブフロー		○静弾性係数	JIS原案
○空気量	JISA1128	○割裂引張強度 (シリーズ2)	JISA1113
○単位容積重量	JISA1116	○付着強度	JIS原案, JCI法案
○温度		○乾燥収縮	JISA1129
○ブリージング	JISA1123		

表-4 試験項目および試験方法

シリーズ	コンクリートの種類	目標スラブ(cm)	目標空気量(%)	No.	W/(C+S.F)(%)	S/A(%)	調合 (kg/m ³)					フレッシュコンクリートの性質											
							水	セメント	細骨材	粗骨材	S.F混入率(%)	混和剤	スラブ(cm)	空気量(%)	単位容重(kg/l)	温度(°C)	ブリージング率(%)						
1	普通セメント砂, 砕石	12 → 20	4 ± 1	1	30	40	162	540	655	985	—	i) A E 減水剤 = C × 0.25%	10.5 → 21.5	4.6	2.339	15.4							
				2	35	41	150	429	720	1043			15.5 → 21.0	4.7	2.331	15.3							
				3	40	42	142	355	775	1072			16.5 → 21.5	4.4	2.346	14.6							
	早強セメント砂, 砕石	12 → 20	4 ± 1	1	30	39	165	550	632	990			—	ii) 高性能減水剤 = C × 0.7%	12.0 → 21.5	3.8	2.357	16.3					
				2	35	40	155	443	694	1043					15.0 → 21.0	3.8	2.359	17.4					
				3	40	41	148	368	696	1077					15.0 → 21.0	3.5	2.374	16.8					
	普通セメント人工軽量骨材	12 → 20	4 ± 1	1	30	42	166	553	694	561					—	iii) 流動化剤 = 0.4 ~ 0.8% / C = 100kg	14.0 → 22.0	4.8	1.966	16.1			
				2	35	44	146	417	783	607							15.0 → 22.5	4.9	1.948	15.6			
				3	40	45	139	348	835	622							14.5 → 22.0	5.0	1.903	15.3			
	早強セメント人工軽量骨材	12 → 20	4 ± 1	1	30	42	170	567	668	561							—	[i, ii は併用, iii は後添加,]	13.0 → 22.5	4.9	1.967	17.5	
				2	35	43	150	429	754	611									14.5 → 23.0	4.5	1.949	17.5	
				3	40	44	145	363	804	622									17.5 → 22.0	4.7	1.940	16.9	
2	普通セメント + S.F 砂, 砕石	12	4 ± 1	1	30	38	167	557	605	983	—	i) A E 減水剤 = C × 0.25%							0	17.7	3.0	2.383	15.2
				5															18.5	3.3	2.372	13.7	
				10															13.3	3.6	2.348	14.8	
				15									8.5	3.0					2.354	15.7			
				2									15.0	4.3					2.354	15.0			
				5									15.9	4.3					2.348	16.5			
	普通セメント + S.F 砂, 砕石	12	4 ± 1	1	35	41	160	458	697	998		—	ii) 高性能減水剤 = C × 0.7%	0	13.0	2.7			2.383	17.6			
				5										10.2	2.6	2.370			18.0				
				10																			
				15																			
				2																			
				4																			

表-5 コンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの性質

ー4に示す。なお、引張強度についてはシリーズ2について、また乾燥収縮・重量変化については、シリーズ1および2のW/C=35%のみについて実施した。

2.4. コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは、パン型強制練りミキサー（容量100l）を使用し、図-1に示す要領で練り混ぜた。

3. 試験結果および考察

3.1. フレッシュコンクリート

シリーズ1および2におけるフレッシュコンクリートの品質試験結果を表-5に示す。シリーズ1の結果では、流動化剤によるスランプの増大量を10cm以上にした場合、粘性が増して施工性が悪くなる傾向が見られ、シリーズ2では、W/C+S.F=35%の場合、S.Fの代替え量が増すに従ってスランプは低下するとともに、空気量が低減している。これは、S.Fの比表面積が普通セメントの約60倍と大きく、粒子が極めて細かいことに起因しているものと思われる。なお、S.Fを15%代替えすることによる単位水量の増大量をW/C=30%のスランプ低減率から換算すると、おおよそ18kg/m³に相当する。一般の高強度コンクリートでは、減水率の高い混和剤を用いて単位水量を減じるため、コンクリートに粘性が見られるが、S.F使用の場合は、それとは若干異なる性状を示す。

3.2. 硬化コンクリートの性質

3.2.1. 圧縮強度 シリーズ1および2の実験結果から得られたセメント水比と圧縮強度の関係、材令と圧縮強度の関係、S.F代替え率と圧縮強度の関係をそれぞれ図-2~5に示す。高性能減水剤を使用した高強度コンクリートのセメント水比（水セメント比で30~40%）と圧縮強度の関係は、セメント・骨材の種類に

かかわらず、ほぼ直線関係にある。ただし、軽量コンクリートの材令4週から13週にかけての強度の伸びは緩やかとなり、人工軽量骨材使用による強度の頭打ち現象が見られる。一方、普通コンクリートの場合は、材令の経過に伴う強度の伸びが大きく、普通セメント使用の材令4週から13週までの強度の伸びは平均で約21%である。なお、早強セメント使用では、平均約10%で普通セメント使用に比べて小さい。

シリーズ2におけるS.F混入コンクリートでは、代替え率が増すに従って強度も増し、代替え率10%使用でピークとなり、以後徐々に低減の傾向にある。これは、S.Fを代替え使用していることに起因するものである。

標準養生の材令4週強度に対するS.F代替えコンク

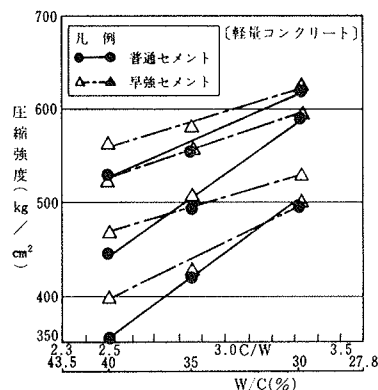


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係（シリーズ1）

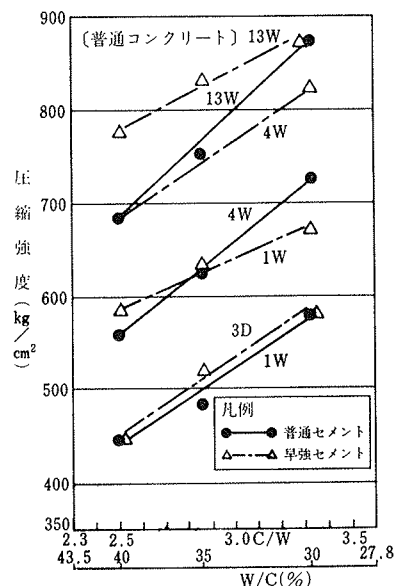


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係（シリーズ1）

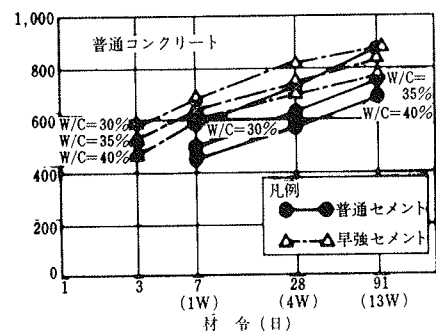


図-4 材令と圧縮強度の関係（シリーズ1）

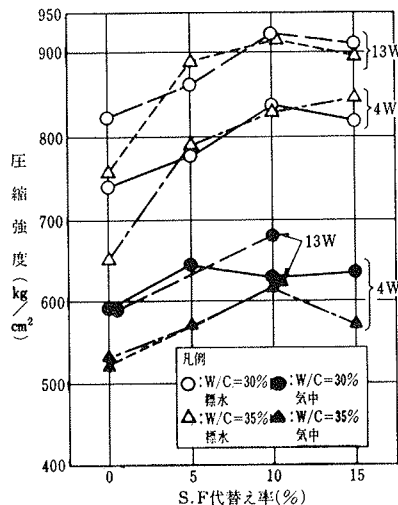


図-5 S.F代替え率と圧縮強度の関係（シリーズ2）

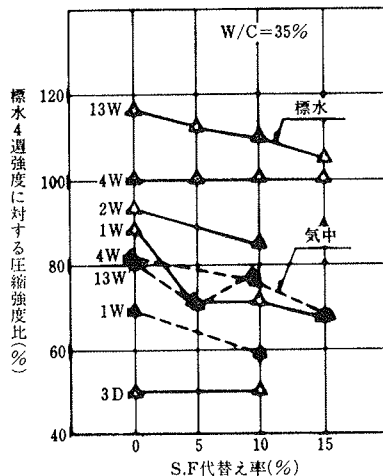


図-6 S.F代替え率と圧縮強度の関係（シリーズ2）

リートの強度比は、材令1週、W/C=35%で68~73%（無混入は87%）となり、S.Fを代替えたものの4週強度が高いため、材令1週強度が無混入より高いにもかかわらず強度比は低くなっている。しかし、材令1週から4週にかけての強度の伸びは無混入に比べて大きく、W/C=35%, S.F=10% 代替えで約17%の強度増が認められた。

気中養生、W/C=35%の圧縮強度は図-6に示すように、S.Fの混入率が増すに従って標準養生強度に対する割合が低減する傾向にあり、この種のコンクリートでは打設後の養生が極めて重要であることが分かる。

3.2.2. 引張強度 シリーズ2における引張強度と圧縮強度の関係を図-7に示す。材令4週における引張強度はW/C=30%で41.6~47.9 kg/cm²、W/C=35%では、39.3~43.7 kg/cm²で、圧縮強度と同様S.F代替え率が増すに従って若干の強度増が認められた。しかし、圧縮強度に対する強度比は約1/17~1/20の範囲でS.Fの代替え率が増すに従って低下している。この結果から、S.F混入による引張強度の増加は圧縮強度ほど期待はできないことが分かった。

3.2.3. 付着強度 シリーズ1および2における付着強度試験結果を、付着強度と圧縮強度の関係にまとめて図-8に示した。

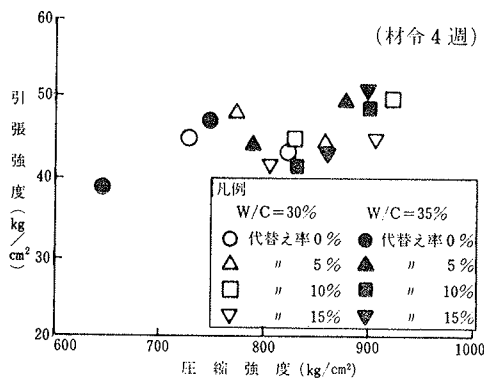


図-7 引張強度と圧縮強度の関係 (シリーズ2)

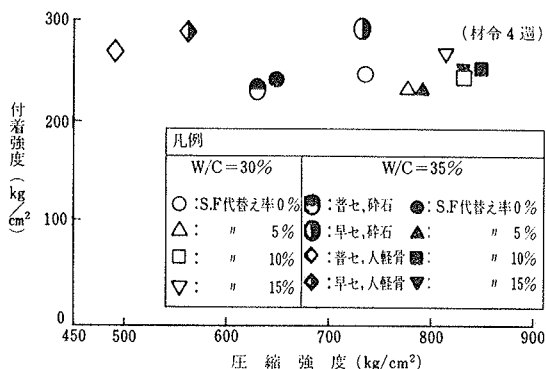


図-8 付着強度と圧縮強度の関係 (シリーズ1, 2)

シリーズ1では、普通コンクリートが圧縮強度の約37~39%、軽量コンクリートが52~54%で、軽量コンクリートの方が高い。

S.F混入コンクリートについては、W/C=30%で231~267 kg/cm²、W/C=35%で227~256 kg/cm²となり、S.F代替え率が増しても強度増はほとんど認められない。

3.2.4. 乾燥収縮および重量変化 シリーズ1および2におけるコンクリートの長さ変化測定結果を図-9~10に、また図-11にシリーズ1の重量変化を示した。

シリーズ1については、材令64週（約1年3箇月）までの結果は、普通コンクリートが約0.07%、軽量コンク

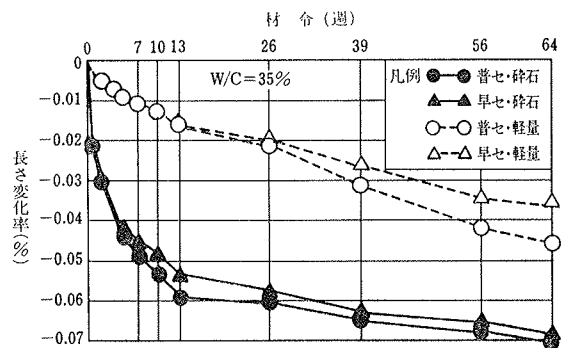


図-9 コンクリートの材令と長さ変化率の関係 (シリーズ1)

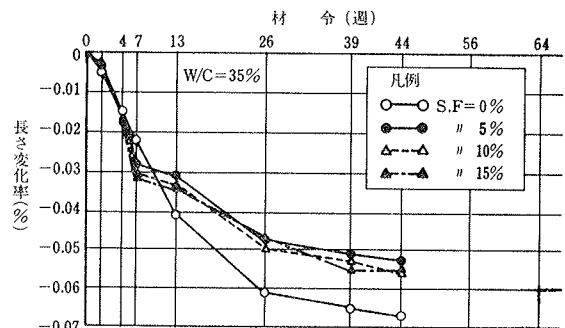


図-10 コンクリートの材令と長さ変化率の関係 (シリーズ2)

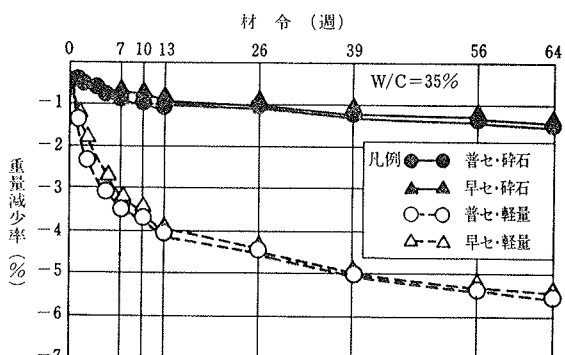


図-11 コンクリートの材令と重量減少率の関係 (シリーズ1)

リートが0.037~0.047%程収縮しており、軽量コンクリートの方が収縮率が小さい。一方、これを重量減少率で見ると、普通コンクリートが約1.5%、軽量コンクリートが約5.5%減少している。材令64週測定時点における普通コンクリートの測定値はおおむね安定しているが、軽量コンクリートでは長さ変化・重量変化とともに、なお進行している傾向が認められる。

SF混入コンクリートの材令44週における測定結果では、代替え率の大小にかかわらず、無混入のものに比べて約20%減となっている。

3.2.5. 静弾性係数 シリーズ1および2における静弾性係数測定結果と圧縮強度の関係を図-12に示す。

シリーズ1では、日本建築学会RC規準式に比べて、普通コンクリートでは若干高く、軽量コンクリートでは若干低めの値となった。

SF混入コンクリートのW/C=30~35%では、 $3.5 \sim 4.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ で先のRC規準式に比べてやや低めの値となった。また、気中養生の場合では $2.9 \sim 3.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ の範囲にあって、同一強度の標準水中養生のものに比べて20%程度低い値を示した。

4. まとめ

この実験結果から概略以下のことが明らかとなった。

(1) 高性能減水剤を用いた高強度コンクリート

- (a) 流動化剤使用の低水セメント比でスランブの増大量が10cmを上回る場合には、粘性を増して施工性に欠ける。
- (b) 水セメント比30~40%の範囲では、セメント水比と圧縮強度の関係は直線関係にある。
- (c) 乾燥収縮は、普通・早強セメントの種類にかかわらず普通コンクリートで約-0.07%、軽量コンクリートで約-0.05%程度である。

(2) S.F混入コンクリート

- (a) S.Fの代替え量が増すに従ってスランブは低下し、空気連行性も悪くなる。
- (b) S.F混入コンクリートは、ブリージングがほとんど見られない。

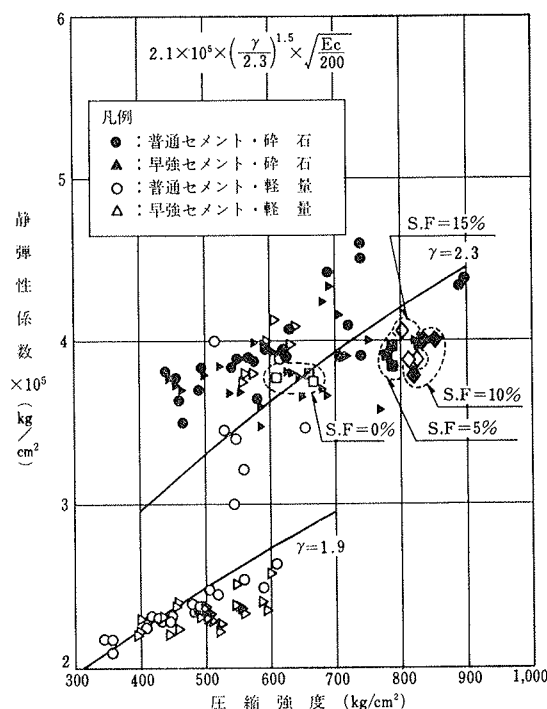


図-12 静弾性係数と圧縮強度の関係 (シリーズ1, 2)

- (c) S.Fを混入した場合、強度は増大する傾向にあり、W/C=35%、S.F代替え率10%で圧縮強度は、10~30%増大した。
- (d) S.Fをセメントの内割り使用した場合の圧縮強度は代替え率10%でピークに達し、これを超えた場合には強度低下が見られた。
- (e) 無混入のもの気中養生強度は、標準養生4週強度に比べて約20%程低減しているが、S.F混入コンクリートでは25~34%低減しており、打設後の養生が極めて重要であることが分かった。
- (f) S.F代替えコンクリートは、圧縮強度の増加ほど引張強度、付着強度の増加は期待できない。

参考文献

- 1) 海洋開発専門委員会報告, M-2, (社)セメント協会, (昭和61.3)