

論文

[1077] 超高強度コンクリートの調合に関する一考察

正会員○寺西 浩司 (前田建設工業技術研究所)

正会員 岸谷 孝一 (日本大学建築学科)

正会員 江口 清 (前田建設工業技術研究所)

正会員 中込 昭 (前田建設工業技術研究所)

1. まえがき

通常のコンクリートの調合設計においては、細骨材率は所要の品質が得られる範囲でできるだけ小さくするとされている。細骨材率は材料分離との関係によって検討する必要があるが、分離しているかどうかの判断はコンクリートの練上がり状態の目視など感覚的な判断に頼っている。超高強度、高強度域のコンクリートは、粘性が高い、高流動状態で用いられる等の特徴から、材料分離を通常のコンクリートと同様に経験的・感覚的に判断することは難しい。本研究では、超高強度コンクリートにおいて、適切な細骨材率を設定するための基礎的な資料を得ることを目的として、コンクリートの材料分離現象をモデル化した簡単な試験方法により定量的な分離性状の把握を試み、この試験により得られる分離指数 $v_s$ との関連をはじめとして、種々の細骨材率の検討を行った。

また、超高強度コンクリート特有の混和材料として、強度を増す目的でシリカフュームが用いられることが多いが、このシリカフュームの置換量がコンクリートのフレッシュ性状、硬化性状にどの程度影響を及ぼすかは未だ十分には明らかにされていないため、シリカフュームの効果的な置換量についても合わせて検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 実験条件

実験に使用したコンクリートの調合表を表-1に示す。また、使用した材料を表-2に示す。実験は水結合材比、シリカフューム置換率および細骨材率を要因として実施した。水結合材比は19~35%, シリカフューム置換率は0~15%, 細骨材率

表-1 調合表

name	W/C*	CSF/b	S/a	W	C	S	G	CSF
W35C0S32	35	0	32	160	457	549	1226	0
W35C0S37			37			635	1136	
W35C0S42			42			721	1046	
W35C0S47			47			807	932	
W35C10S32	35	10	32	160	411	530	1196	46
W35C10S37			37			612	1108	
W35C10S42			42			695	1020	
W35C10S47			47			778	932	
W30C0S30	30	0	30	160	533	496	1216	0
W30C0S35			35			579	1130	
W30C0S40			40			662	1043	
W30C0S45			45			744	956	
W30C5S28	30	5	28	160	507	468	1263	27
W30C5S34			34			568	1158	
W30C5S40			40			668	1053	
W30C5S46			46			769	948	
W30C10S28	30	10	28	160	480	465	1256	53
W30C10S34			34			565	1152	
W30C10S40			40			664	1047	
W30C10S46			46			764	942	
W30C15S28	30	15	28	160	453	462	1249	80
W30C15S34			34			562	1145	
W30C15S40			40			661	1041	
W30C15S46			46			760	937	
W25C5S26	25	5	26	160	608	406	1229	32
W25C5S33			33			516	1113	
W25C5S40			40			625	997	
W25C5S47			47			735	881	
W25C10S26	25	10	26	160	576	404	1221	64
W25C10S33			33			512	1105	
W25C10S40			40			620	990	
W25C10S47			47			729	874	
W25C15S26	25	15	26	160	544	400	1212	96
W25C15S33			33			508	1097	
W25C15S40			40			616	982	
W25C15S47			47			724	868	
W19C5S26	19	5	26	160	800	367	1098	42
W19C5S33			33			466	994	
W19C5S40			40			565	891	
W19C5S47			47			664	787	
W19C10S26	19	10	26	160	758	364	1087	84
W19C10S33			33			461	984	
W19C10S40			40			559	881	
W19C10S47			47			657	778	
W19C15S26	19	15	26	160	716	360	1075	126
W19C15S33			33			456	973	
W19C15S40			40			553	872	
W19C15S47			47			650	770	

W/C\*:水結合材比(%) CSF/b:シリカフューム置換率(%)  
S/a:細骨材率(%) W,C,S,G,CSF:単位重量(kg/m<sup>3</sup>)

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重: 3.16)
細骨材	大井川産川砂 (比重: 2.55)
粗骨材	秩父産碎石 (最大寸法20mm, 比重: 2.71)
混和材	シリカフューム (粉末状, 比重: 2.20)
混和剤	高性能A E減水剤 (アミノスルホン酸系)

は26~47%の範囲でそれぞれ4水準に変化させた。また、単位水量は160kg/m<sup>3</sup>とし、スランプフロー値が550±50mmとなるように、高性能AE減水剤の添加量により調整した。

### 2.2 測定項目および方法

フレッシュコンクリートの流動性を評価するために、スランプ試験によるスランプ値とスランプフロー値、Lフロー試験によるLフロー値とLフロー速度（流動開始から流動停止までの平均フロー速度）、筆者らの提案するメッシュ透過試験[1]による降伏値T<sub>y</sub>、および粘性Iを測定した（図-1および図-2参照）。また、粗骨材とモルタルの分離状態を定量的に測定する目的で考案した模擬骨材沈下試験を実施し、合わせて、観察者5人による材料分離の目視判定を行った。

図-3に模擬骨材沈下試験装置を示す。ウェットスクリーニングにより抽出したモルタルを容器に入れ、粗骨材を模したアルミ球（以下、模擬骨材という）の15秒間の沈下量をアルミ球に接着した測定用棒の移動量により測定した。一部、模擬骨材が15秒以内に容器の底に達してしまう試料については底に着くまでの時間を測定し、それぞれ模擬骨材の平均沈下速度を算出した。その際、バイブレーターによる振動を想定して振動台により加振した。模擬骨材は直径30mmとし、材質は比重が粗骨材に近いことからアルミ（ρ=2.67g/cm<sup>3</sup>）を選定した。

### 3. 分離指数v<sub>s</sub> および分離抵抗係数K<sub>s</sub>の提案

二相材料としてのコンクリートにおいて、材料分離をマトリックスモルタルとサスペンションである粗骨材の相対的な動きやすさであると定義する。モルタル中での粗骨材の沈下は、図-4に示すように物体が粘性流体中をゆっくりと落下する現象と考えられるので、運動方程式は以下ようになる。

$$ma = (\rho_s - \rho_m) V_s g - kv \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

m : 粗骨材重量      ρ<sub>s</sub>, ρ<sub>m</sub> : 粗骨材, モルタルの比重

V<sub>s</sub> : 粗骨材体積      v : 粗骨材の沈下速度

a : 粗骨材の加速度      k : 粘性抵抗      g : 重力加速度

また、粘性抵抗との釣り合いにより等速度に達した時点（a=0）での粗骨材の終速度v<sub>0</sub>は、

$$v_0 = \frac{(\rho_s - \rho_m) V_s g}{k} \quad \dots\dots\dots (2)$$

モルタル中で粗骨材が移動しようとする時、それに抵抗する要因としては粗骨材の形状、モルタルのレオロジー性質に起因するせん断力や、粗骨材の表面形状、モルタルの付着力に起因するすべり抵抗力などが考えられるが、粘性抵抗kはこれらが集約された係数であり、モルタルと粗

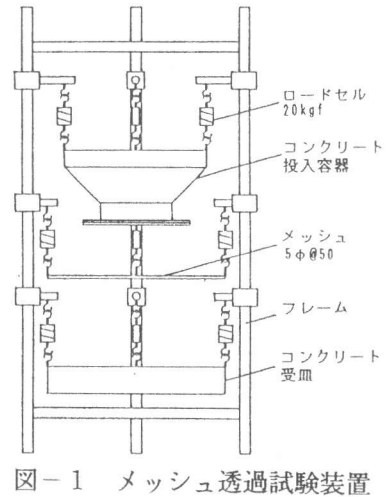


図-1 メッシュ透過試験装置

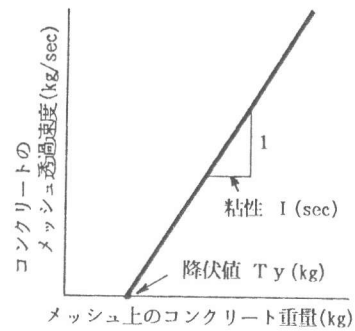


図-2 降伏値T<sub>y</sub>と粘性I

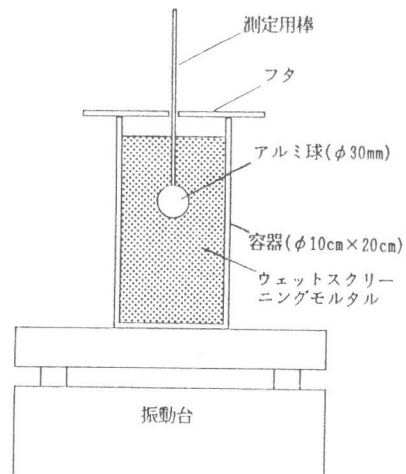


図-3 模擬骨材沈下試験装置

骨材の組み合わせがもつ分離抵抗特性を示す係数と考えられる。また、終速度 $v_s$ は粗骨材の動きやすさを表し、ここでの材料分離の定義を考え合わせると、コンクリートがどの程度分離しているかを示す分離状態の指標として考えられる。本研究では、粘性抵抗 $k$ を分離抵抗係数 $K_s$ （値が大きいほど分離しにくい）、粗骨材の終速度 $v_s$ を分離指数 $v_s$ （値が大きいほど材料分離が生じている）と呼ぶ。模擬骨材沈下試験では、粗骨材が終速度に至るまでの加速時間は短いと思われるため無視することとし、試験によって得られる平均沈下速度が分離指数 $v_s$ であるとして、考察に用いる。

なお、式(2)によると粗骨材とモルタルの間に比重差がある限り、粗骨材は常にある終速度を持ってモルタル中を沈下することになるが、健全なコンクリートにおいて骨材が沈下することはない。これはマトリックスモルタルが降伏値を持つビンガム流体であるためであり、粗骨材が移動するための限界の力を $F_y$ （ここでは移動限界力と呼ぶ）とすると、式(2)は以下のように表すのが適当であろうと思われる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_s - \rho_m < F_y / V_s g \text{ のとき } v_s &= 0 \\ \rho_s - \rho_m \geq F_y / V_s g \text{ のとき } v_s &= \frac{(\rho_s - \rho_m) V_s g - F_y}{K_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

また、コンクリートはバイブレーター等により加振されながら打設されるため、材料分離も振動との関連によって議論されるべきである。コンクリートに振動が加えられると材料分離が生じやすくなるという現象は、振動によって移動限界力 $F_y$ が小さくなるためと説明できる。したがって、 $v_s$ はある特定の振動状態での値ということになる。

分離指数 $v_s$ によってコンクリートの材料分離を判断するためには、工学的な基準値（ここでは分離限界値と呼ぶ）を設ける必要がある。観察者5人が、実験を実施した全試料について分離が生じていないかどうかの判定を行ったが、図-5は模擬骨材沈下試験により得られた分離指数 $v_s$ と目視により分離していないと判断した人数の関係を示したものである。分離の判定は注目すべき点により判断も変わってくる、分離の判断が無振動時であるのに対し $v_s$ は加振時のものである等の理由により同図においてバラツキは大きい、目視による分離判定と分離指数 $v_s$ の間にはある程度の相関がみられ、仮に材料分離が生じていないと判断した人数が4人以上の場合に健全なコンクリートであるとする、分離指数の分離限界値は $v_s = 1.9 \text{ cm/sec}$ となった。

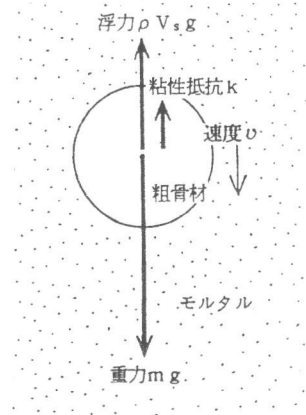


図-4 粗骨材沈下時に働く力

#### 4. 実験結果および考察

表-3に実験結果を示す。

##### 4.1 硬化性状

図-6に28日圧縮強度と細骨材率の関係を示す。また、図-7に弾性係数(28日)と細骨材率の関係を示す。圧縮強度は細骨材率に影響されることがなく、弾性係数は細骨材率が大きくなるにつれて小さくなるという傾向は通常のコンクリートと変わらない。図-8に各水結合材比における圧

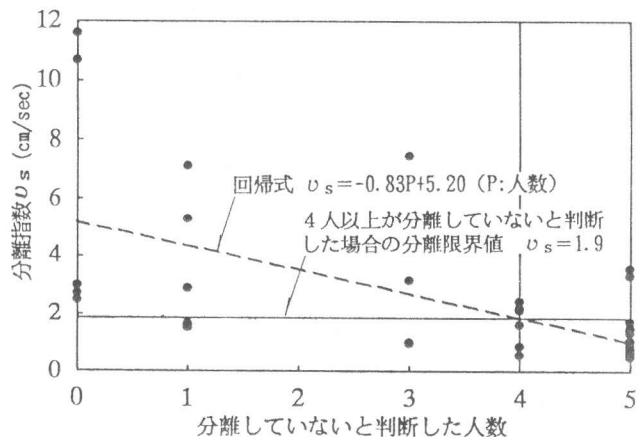


図-5 分離指数 $v_s$ と分離状態の目視判定の関係

表-3 実験結果

name	SL	S-FL	L-FL	L-V	Ty	I	$\nu_s$	Fc	Ec	name	SL	S-FL	L-FL	L-V	Ty	I	$\nu_s$	Fc	Ec
W35C0S32	21.9	602	55.0	0.50	0.18	0.19	7.14	560	3.68	W25C5S26	24.3	577	40.0	0.39	5.38	9.42	1.00	1080	4.21
W35C0S37	24.0	600	72.0	0.62	1.75	5.61	7.48	550	3.55	W25C5S33	24.6	582	51.0	0.91	3.32	9.52	0.93	1055	4.13
W35C0S42	24.1	591	62.0	0.81	0.92	5.18	2.43	663	3.60	W25C5S40	23.4	500	38.0	1.16	8.34	5.93	0.69	1077	4.06
W35C0S47	23.5	551	71.5	0.78	-	-	2.18	678	3.76	W25C5S47	25.9	535	46.5	1.12	3.56	7.28	0.60	1064	3.97
W35C10S32	22.8	546	48.5	1.27	1.36	0.67	10.67	745	3.71	W25C10S26	22.8	582	55.0	0.79	0.61	6.23	1.50	1128	4.22
W35C10S37	23.1	531	53.8	1.69	-0.29	2.96	11.59	790	3.60	W25C10S33	24.1	537	55.0	1.02	5.59	8.56	0.60	1079	4.22
W35C10S42	23.1	509	39.0	1.69	1.94	1.08	2.14	782	3.68	W25C10S40	24.4	594	64.0	1.08	5.88	4.38	0.67	1077	4.10
W35C10S47	23.9	521	52.0	2.76	3.56	1.84	3.16	755	3.71	W25C10S47	26.2	584	60.0	1.12	1.38	5.07	0.73	1087	3.88
W30C0S30	24.1	595	68.0	0.39	1.90	4.30	5.28	720	3.82	W25C15S26	23.0	552	51.3	0.98	0.35	0.14	1.07	1184	4.33
W30C0S35	24.7	597	65.0	0.47	2.38	19.40	3.32	721	3.68	W25C15S33	23.8	543	50.0	1.07	2.29	2.97	0.87	1218	4.21
W30C0S40	24.1	575	57.0	0.60	3.93	18.15	3.56	754	3.54	W25C15S40	24.1	510	49.0	2.23	-	-	0.53	1106	3.92
W30C0S45	24.9	598	65.0	0.68	2.52	17.31	1.45	744	3.70	W25C15S47	24.7	507	49.5	1.93	3.02	1.87	0.89	1140	4.15
W30C5S28	23.7	572	47.0	-	0.04	0.38	1.59	840	4.15	W19C5S26	25.7	597	31.0	0.24	15.81	34.14	0.57	1128	4.26
W30C5S34	24.2	597	72.0	0.81	0.00	1.84	2.47	869	4.05	W19C5S33	26.3	600	45.0	0.28	6.67	35.99	0.90	1217	4.42
W30C5S40	24.1	575	57.0	0.60	1.51	3.11	0.93	831	4.04	W19C5S40	25.7	555	38.5	0.27	8.77	37.66	0.49	1177	4.24
W30C5S46	24.2	575	58.5	1.69	1.79	2.98	1.72	905	3.92	W19C5S47	26.0	549	33.0	0.40	5.17	35.64	0.50	1141	4.13
W30C10S28	22.0	502	41.0	1.14	0.32	0.46	1.65	1026	4.16	W19C10S26	25.0	585	67.5	0.54	4.20	12.58	0.97	1273	4.55
W30C10S34	25.1	598	64.0	1.12	1.07	1.45	2.99	1029	4.19	W19C10S33	25.9	570	64.5	0.63	1.30	11.82	0.82	1199	4.36
W30C10S40	23.3	583	49.0	1.50	1.51	3.11	1.62	971	3.93	W19C10S40	26.2	578	63.0	0.66	0.54	6.30	0.93	1282	4.32
W30C10S46	23.6	540	57.0	1.61	0.83	2.16	0.98	958	3.88	W19C10S47	27.0	586	69.0	0.68	-	-	0.78	1199	4.35
W30C15S28	23.8	512	36.0	1.06	0.03	0.82	2.88	1014	4.27	W19C15S26	26.1	604	72.0	0.66	1.40	6.45	1.51	1219	4.48
W30C15S34	23.8	586	51.0	1.36	0.32	0.14	2.70	998	4.11	W19C15S33	25.6	571	65.0	0.80	1.17	6.81	1.02	1261	4.29
W30C15S40	23.7	552	55.0	1.69	-0.63	2.94	1.33	1021	4.06	W19C15S40	26.0	572	63.5	0.96	0.59	3.18	0.71	1255	4.35
W30C15S46	23.8	500	45.5	2.07	1.29	2.24	0.81	1019	4.31	W19C15S47	25.7	523	63.0	1.07	0.00	3.45	0.59	1234	4.24

SL:スランブ値(cm) S-FL:スランブフロー値(mm) L-FL:Lフロー値(cm) L-V:Lフロー速度(cm/sec) Ty:降伏値(kg) I:粘性(sec)  
 $\nu_s$ :分離指数(沈下速度)(cm/sec) Fc:圧縮強度-4W(kgf/cm<sup>2</sup>) Ec:弾性係数-4W(kgf/cm<sup>2</sup>)

縮強度の平均値とシリカフェーム置換率の関係を示す。シリカフェーム置換率が大きくなるにつれて圧縮強度が増していくが、その増加率は徐々に頭打ちになり、シリカフェーム置換率10%以上で大きくは増加してない。

#### 4.2 フレッシュコンクリートの流動性状

図-9にメッシュ透過試験による粘性Iと細骨材率の関係を示す。粘性Iは細骨材率が変化してもあまり変わらないが、シリカフェーム置換率が大きくなるにつれて小さくなっている。図-

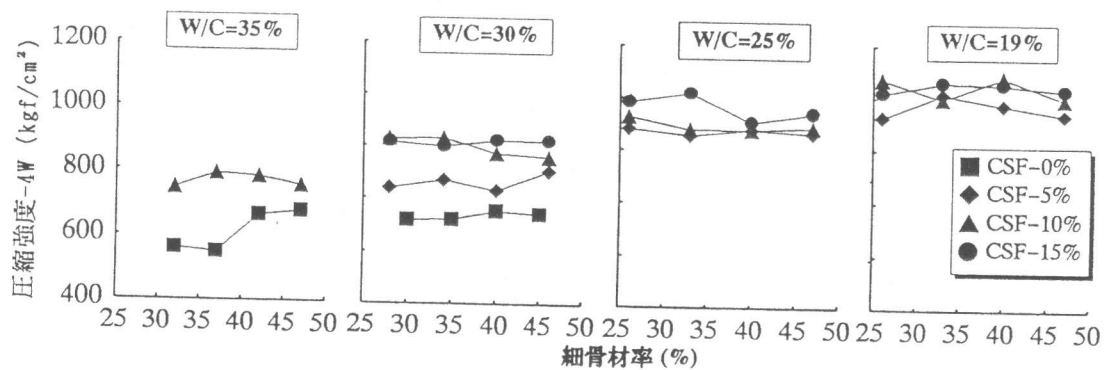


図-6 圧縮強度と細骨材率の関係

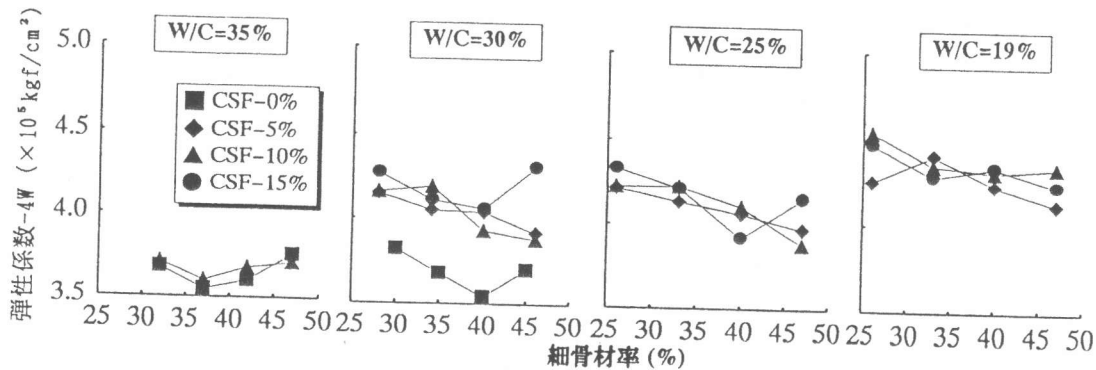


図-7 弾性係数と細骨材率の関係

10に粘性Iと細骨材率40%（水結合材比35%では42%）におけるシリカフューム置換率の関係を示す。同図によれば水結合材比19%ではシリカフューム置換率10%以上で、水結合材比25%および30%では置換率5%以上で急激に粘性が小さくなっている。また、水結合材比35%ではシリカフュームを混入しなくても粘性は小さい。水結合材比30%以下の超高強度コンクリートで粘性を抑えるためには、シリカフューム等の混和材を用いることが不

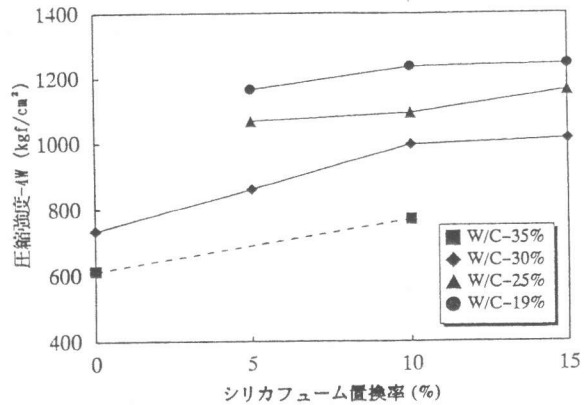


図-8 シリカフューム置換率と圧縮強度の関係

可欠であり、しかも、水結合材比が低くなるほどシリカフューム置換率を大きくする必要がある。

図-11は圧縮強度と粘性Iの関係をシリカフューム置換率によって示したものである。シリカフュームが圧縮強度と粘性の両方に効果的に作用する転換点が適切なシリカフューム置換率であるといえる。

#### 4.3 分離性状

図-12に模擬骨材沈下試験による分離指数 $v_s$ （沈下速度）と細骨材率の関係を示す。図中の点線は図-5により求めた分離限界値を示している。また、図-13に $v_s$ より算出した分離抵抗係数 $K_s$ （移動限界力 $F_y$ は考慮していない）と細骨材率の関係を示す。19%、25%の低水結合材比では分離指数 $v_s$ は小さく細骨材率の変化による影響も小さい。高水結合材比では細骨材率が小さくなるにつれて分離指数 $v_s$ が大きくなっており、水結合材比が高いほど細骨材率が材料分離性状に著しい影響を与えることを示している。

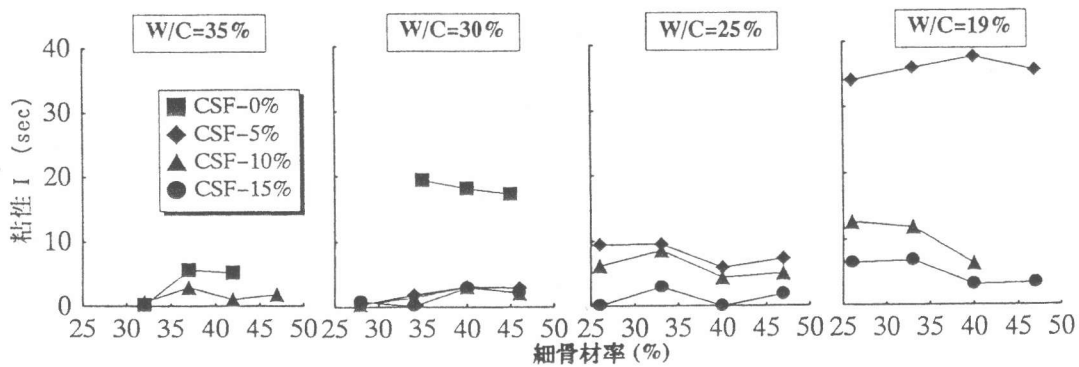


図-9 粘性Iと細骨材率の関係

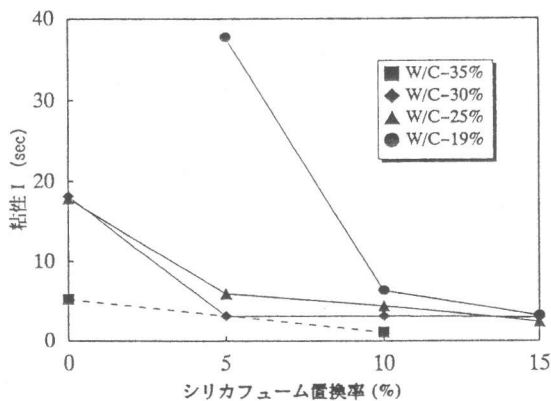


図-10 粘性Iとシリカフューム置換率の関係

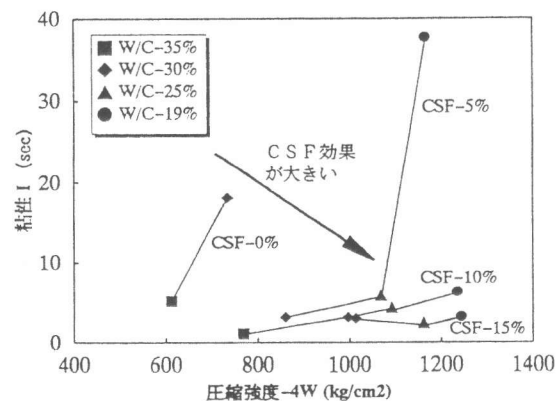


図-11 シリカフューム置換率が粘性Iおよび圧縮強度に及ぼす影響

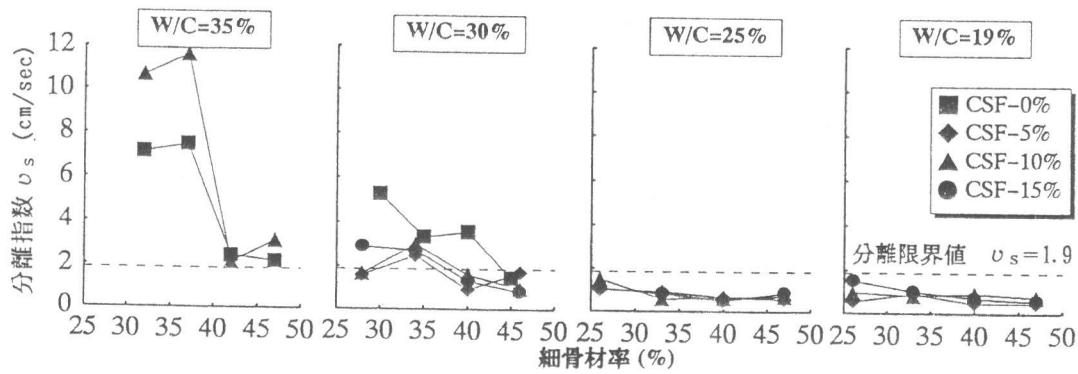


図-12 分離指数 $v_s$ と細骨材率の関係

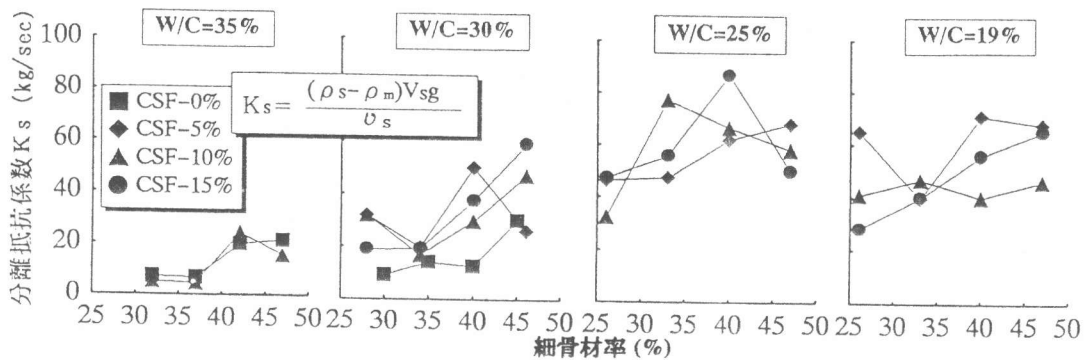


図-13 分離抵抗係数 $K_s$ と細骨材率の関係

シリカフューム置換率に対しては、明確な傾向はみられないものの粘性 $I$ とは逆にシリカフューム置換率が増すほど、分離抵抗係数 $K_s$ が大きくなる傾向がみられる。これはシリカフュームが混入されることによりモルタルの付着力が増すことが原因であると予想される。

## 5. まとめ

本研究では、材料分離を定量的に把握するための模擬骨材沈下試験を試行し、超高強度コンクリートにおける適切な細骨材率とシリカフューム置換率の設定を目的として実験を実施した。本実験によって得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 材料分離性状は、本研究で提案する模擬骨材沈下試験により定量的に測定でき、分離指数 $v_s$ は材料分離の程度を表す指標として、分離抵抗係数 $K_s$ はモルタルと粗骨材の組み合わせのもつ分離特性値として有効である。
- 2) 低水結合材比の超高強度コンクリートの範囲では細骨材率と材料分離の相関は低いが、水結合材比が高くなるほど細骨材率が材料分離に与える影響が大きくなる。すなわち、高水結合材比では、細骨材率が小さくなるにつれて材料分離が生じやすくなる。
- 3) 水結合材比30%以下の超高強度コンクリートにおいて粘性を抑えるためには、シリカフュームを5~10%程度混入することが有効であり、必要なシリカフュームの置換率は水結合材比が低くなるほど大きくなる。
- 4) 圧縮強度はシリカフュームを10%以上置換しても大きくは増加しないことも考え合わせ、シリカフュームが圧縮強度と粘性に効果的に作用する置換率を選定する必要がある。

## [参考文献]

- [1] 寺西浩司, 谷川恭雄, 森博嗣, 江口清: 超高強度コンクリートのワーカビリチー評価手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp131-136, 1991