

# [77] 高強度軽量コンクリートの練混ぜ方法と凍結融解抵抗性に関する研究

正会員 渡辺 明 (九州工業大学工学部)

正会員 ○高山俊一 (九州工業大学工学部)

藤田秀夫 (三菱重工業広島研究所)

田村一美 (三菱重工業広島研究所)

## 1. まえがき

人工軽量粗骨材を用いたコンクリートでも高性能減水剤の使用によって、ワーカブルで4週圧縮強度500kgf/cm<sup>2</sup>以上の高強度が比較的容易に得られるようになった。人工軽量骨材をコンクリートの粗骨材として使用する場合の大きな問題点は、含水率が大きいために軽量コンクリートの耐凍結融解性が劣ることである<sup>1)2)</sup>。最近、寒冷地帯においても、人工軽量骨材を使用可能とするために、高強度軽量コンクリートの研究が各方面で開始された。これらの研究は、高強度コンクリートに混和材としてフライアッシュおよびシリカフュームを混入し、耐久性を改善しようとするものである。他方、セメント量の軽減およびコンクリートの水密性の向上のために、水を分割添加するダブルミキシング工法<sup>3)4)</sup>が提案された。そこで筆者らは水のみでなく、セメントも分割して練り混ぜる方法を考案し、しかも混和材の長所も合わせて利用し高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性を検討してみた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は山砂および粗骨材は非造粒型人工軽量骨材(最大寸法15mm)をそれぞれ使用した。骨材の物理的性質を表-1に示す。混和材はフライアッシュ(比重2.28,比表面積3347cm<sup>2</sup>/g)とシリカフューム(国産製,比重2.22,比表面積134000cm<sup>2</sup>/g(N<sub>2</sub>吸着法による測定))を用いた。

混和材は高性能減水剤(主成分・・・β-ナフタリンスルホン酸ホルマリン縮合物)とAE剤(主成分・・・天然樹脂酸塩)を使用した。コンクリートの配合は表-2に示す16種類とした。各配合はスランブ12±2cm、空気量7%を目標とした。空気量は通常のAEコンクリートより2~3%多い7%とした。高強度コンクリートとするために水セメント比は30%と小さくし、コンシステンシーは高性能減水剤の添加量によって調節した。

### 2.2 実験方法

軽量骨材の含水率は耐凍結融解性に大きく影響するので、練り混ぜ前の軽量骨材の含水率を0, 3, 5, 7および9%と変化させた(表-2)。コンクリートの練り混ぜ方法が耐久性に与える影響を

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	含水率 (%) (*)	練混ぜ法	W/C s/a ***	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (cwt%) ***									
					水	セメント	細骨材	軽量粗骨材	混和材	高性能減水剤	AE剤								
AF-0	0	A	W/C 30%	7	156	520	505	495	52	フライアッシュ	1.8	0.233							
BF-0		B			78	260					78		260	1.4	1.4				
AF-3	3.9	A			156	520		514			52		1.7						
BF-3		B			78	260							78	260	1.3	1.3			
AF-5	5.7	A			156	520		523			52		1.7						
BF-5		B			78	260							78	260	1.2	1.2			
AF-7	7.8	A			156	520		534			52		1.3						
BF-7		B			78	260							78	260	0.9	0.9			
AF-9	9.1	A			156	520		540			52		1.3						
BF-9		B			78	260							78	260	0.9	0.9			
AS-5	5.8	A			W/C 30%	7		156			520		503	524	52	シリカフューム	1.5	0.254	
BS-5		B						78			260						78		260
AS-7	7.3	A						156			520			531			52		1.8
BS-7		B						78			260								78
AS-9	9.8	A						156			520			545			52		1.7
BS-9		B						78			260								78

表-1 骨材の物理的性質

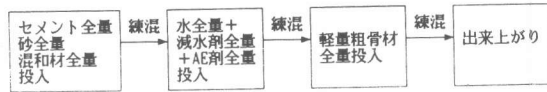
骨材	比 重		吸 水 率 (%)				粗 粒 率
	絶乾	表乾	0.5h <sup>(*)</sup>	1h <sup>(*)</sup>	24h <sup>(*)</sup>		
細骨材	2.49	2.54	-	-	2.13	2.75	
軽量骨材	1.29	1.40	1.27	3.75	8.81	6.37	

(\*) 浸水時間

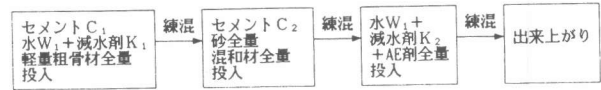
(\*) 軽量粗骨材の混練前の含水率  
 (\*\*\*) 軽量粗骨材は絶乾状態で計算した値  
 (\*\*\*) B法の減水剤は、上下段それぞれ一次添加セメント量、二次添加セメント量に対する重量%で示す。

調べるため、図-1に示す2種類の方法によって練り混ぜを行なった。B法<sup>5)</sup>は既往の研究<sup>3,4)</sup>の分割添加法に比べ、水のみでなくセメントも分割して練り混ぜを行なうことに特徴がある。凍結融解試験は軽量コンクリートには極めて厳しいASTM-C666A法に準拠した急速水中凍結融解法(1サイクル4~5時間)によって行ない、30サイクル毎にたわみ振動数および供試体の重量を測定した。硬化コンクリートの気泡および細孔分布を修正ポイントカウント法(ASTM-C457に準拠)および水銀圧入ポロシメータによって調べた。

1) 従来の方法(A方法)



2) 分割練り混ぜ法(B法)



ただし、 $C_1=0.5C$   $W_1=0.3C_1$   $K_1=0.5K$   
 $C$ :セメント全量、 $w$ :水全量、 $k$ :減水剤全量

図-1 練り混ぜ方法

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 まだ固まらないコンクリートの物理的性質および圧縮強度

表-3には、まだ固まらないコンクリートの物理的性質と圧縮強度を示す。スランブ $12 \pm 2$ cmを目標としたが、粗骨材の含水率が変化していることもあり、スランブにかなりばらつきがみられた。B法での高性能減水剤の添加量は、A法でのその量より0.4~0.5% (単位セメント量に対する量) 小さいにもかかわらず、スランブはA法のそれに比べて若干大きくなっている。したがって同一コンシステンシーを得ようとするれば、B法の場合は単位セメント量をかなり減少できることがわかる。シリカフュームを混入したコンクリートは、AE剤を若干多く添加したが、各コンクリートの空気量は6~8%であった。コンクリートの気乾単位重量は軽量骨材の含水率の大きいものほど増大している。B法による単位重量はA法のそれより若干小さくなる傾向がみられた。圧縮強度は材令7日で $460 \text{ kgf/cm}^2$ 以上、材令28日で $510 \text{ kgf/cm}^2$ 以上であった。シリカフュームを混入したコンクリートの圧縮強度<sup>6)</sup>は、ほとんど $600 \text{ kgf/cm}^2$ を示し、最も大きなものは $684 \text{ kgf/cm}^2$ にも達し、碎石使用の高強度コンクリート比べても遜色ないものと考えられる。

#### 3.2 凍結融解抵抗性

図-2には相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係を示す。同図によると、A法(従来の練り混ぜ法)によるコンクリートの相対動弾性係数は凍結融解サイクル数約150回以降より減少をはじめ、回を重ねる毎にB法による相対動弾性係数との差が大きくなっている。相対動弾性係数の減少は、軽量骨

表-3 まだ固まらないコンクリートの物理的性質および圧縮強度

コンクリートの種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	気乾単位重量 ( $\text{kg/m}^3$ )	4週圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )
AF-0	14.9	8.2	1826	571
BF-0	20.3	7.1	1808	522
AF-3	10.3	7.2	1808	551
BF-3	14.3	7.4	1816	534
AF-5	12.7	7.6	1849	519
BF-5	12.7	7.5	1816	539
AF-7	8.3	6.4	1833	547
BF-7	9.0	7.2	1825	548
AF-9	14.8	8.4	1872	563
BF-9	15.4	8.0	1868	559
AS-5	20.7	7.6	1889	592
BS-5	20.6	8.4	1872	673
AS-7	18.9	7.2	1893	632
BS-7	17.7	7.2	1881	684
AS-9	17.0	7.0	1856	621
BS-9	18.4	6.2	1889	623

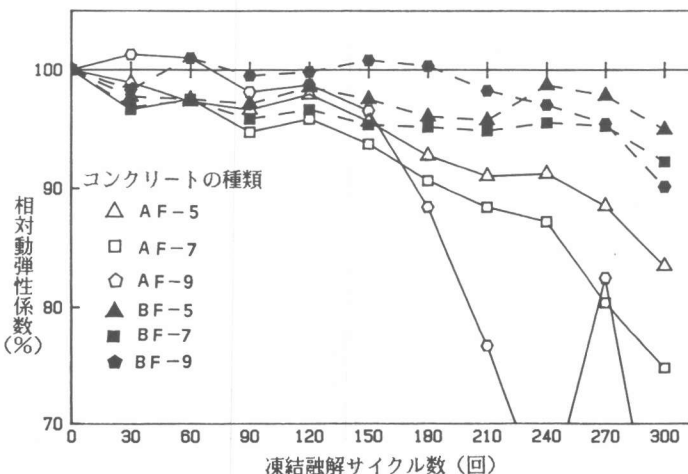


図-2 相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係

材の含水率が大きいほど著しくなっている。特に、A法のAF-9配合で300サイクルの相対動弾性係数は55.4%と極めて小さくなっているが、同一含水率でB法、BF-9配合のそれは90.1%であり、耐久性に充分優れているといえる。シリカフェームを混入したコンクリートの相対動弾性係数は、サイクル数が300回に達しても軽量骨材の含水率が最大のAS-9配合でさえも97.6%に過ぎなかった。したがって、シリカフェーム混入コンクリートは耐久性に極めて優れているといえる。

重量変化と凍結融解サイクル数の関係を図-3に示す。凍結融解抵抗性に劣るコンクリートは、一般に凍結融解サイクル数の増加にしたがってコンクリート表面にスケーリング現象を生じて重量が減少する。しかしながら、高強度コンクリート<sup>7)</sup>ではスケーリング現象はほとんど観察されず、逆にサイクル数の増加にしたがって重量の増大がみられるものもある。本研究においても、図-3にみられる様に、重量減少はわずかであり、逆に重量増加の傾向を示している。この原因として、モルタル部分の強度が大きいためにスケーリング現象を生じにくい、コンクリート表面に発生した微細なひびわれ、および骨材が水を吸収したことなどが考えられる。同様な傾向は橋<sup>9)</sup>らの研究でもみられる。重量増加の傾向は軽量骨材の含水率が大きいほど、B法よりA法において多くみられた。シリカフェームを混入したAS、BSシリーズの重量変化は軽量骨材の含水率9.8%の場合を除き、重量の減少がわずかにみられたにすぎない。AS-9配合の重量変化は、図-3のAF-5とほぼ同様な傾向を示している。BS-9配合の重量変化は、サイクル数240回以後増加側に变化している。このことより、軽量骨材の含水率が9~10%と極めて大きい場合には、凍結融解サイクル数の増加によって、骨材自体および骨材から水を吸収した骨材周辺のモルタルが耐久性を失ったものと考えられる。

図-4は耐久性指数と練り混ぜ前の粗骨材の含水率の関係である。同図によると、シリカフェーム混入コンクリートでは軽量骨材の含水率が9.8%と大きい場合でも、その耐久性指数はA法が97.6%、B法が99.7%と非常に高く、耐凍結融解性に極めて優れているといえる。他方、フライアッシュ混入コンクリートの場合は、軽量骨材の含水率が大きくなるにしたがって耐久性指数が低下している。同図によると、軽量骨材の含水率が5.7%より大きくなるとB法での耐久性指数に比べ、A法でのその低下が著しい。特に、軽量骨材の含水率9.1%のB法での耐久性指数は90.1%であるが、同一含水率におけるA法でのそれはわずか55.4%に過ぎない。したがって、B法での水およびセメントを分割して練り混ぜる方法は十分効果的な方法であると言える。

供試体の重量変化と練り混ぜ前の軽量骨材の含水率との関係を図-5に示す。軽量骨材の含水率が大きくなるほど重量が増加している。軽量骨材の含水率が8%を越えて9.1%と9.8%になると、全シリーズとも重量が増加している。軽量骨材の含水率が9.8%のシリカフェーム

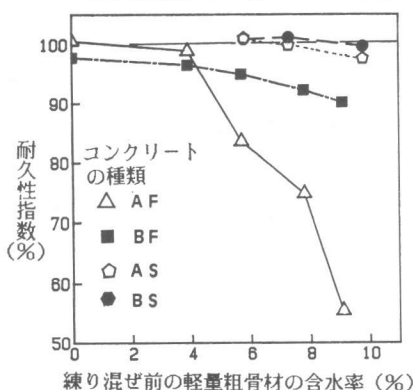


図-4 耐久性指数と練り混ぜ前の軽量粗骨材の含水率の関係

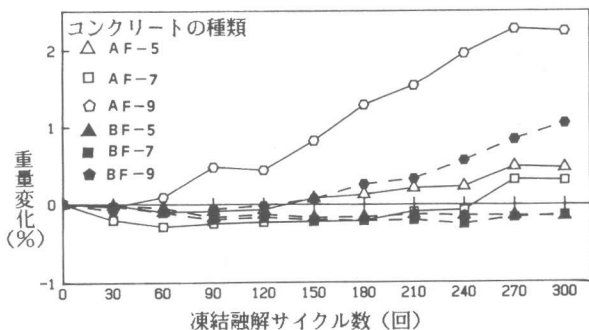


図-3 重量変化と凍結融解サイクル数の関係

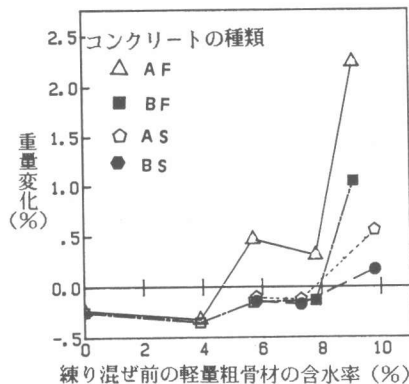


図-5 重量変化と練り混ぜ前の軽量粗骨材の含水率の関係

混入コンクリートでの耐久性指数の場合、耐久性の低下はほとんど認められなかったが、重量変化の場合には、わずかであるがその兆候を示しているものと考えられる。

表-4は硬化コンクリートの空気量、総細孔容積を示す。同表には比較のために、まだ固まらないコンクリートの空気量も示す。硬化コンクリートの空気量は、まだ固まらないコンクリートの空気量に比べてばらつきが大きいようである。AF-5配合での両者の空気量の違いは、他の配合の場合に比べて最も大きくなっている。図-4、図-5でAF-5配合のコンクリートの耐久性は若干低下した結果を示しているが、この原因として、同表のように硬化コンクリートの空気量が小さいことから、凍結融解試験供試体中にはまだ固まらないコンクリートで測定した空気量7.6%よりかなり小さな空気しか混入されていなかったことが考えられる。総細孔容積は0.019~0.027cm<sup>3</sup>/gと配合によって大きな違いはみられなかったが、硬化コンクリートの空気量に比例し、BF-0配合では総細孔容積は0.0266cm<sup>3</sup>/gと最大を、AF-5配合の総細孔容積は0.0192cm<sup>3</sup>/gと最小をそれぞれ示した。

### 5. 結論

本研究から得られたことをまとめて挙げる。

(1) 水、セメントを分割して練り混ぜる方法では、従来の同一練り混ぜ方法に比べてコンシステンシーが増大し、空気量も若干大きくなったものもみられた。

(2) シリカフェーム混入コンクリートの圧縮強度は684kgf/cm<sup>2</sup>に達するものもあり、軽量骨材の質の向上をおこなえばさらに高強度が得られるものと考ええる。

(3) 練り混ぜ前の軽量骨材の含水率と凍結融解抵抗性は密接な関係がみられた。空気量7~8%、フライアッシュ混入高強度軽量コンクリートでは軽量骨材の含水率8%以下が望ましい。シリカフェーム混入の場合、軽量骨材の含水率が10%でも耐凍結融解性は十分確保されるものと考えられる。

(4) 水およびセメントの分割練り混ぜ方法は、従来の同一練り混ぜ方法に比べて耐凍結融解性を増大させる有効な手段であると考ええる。シリカフェーム混入高強度軽量コンクリートは耐凍結融解性にとくに優れていることが認められた。高強度軽量コンクリートの耐久性向上のため、通常のAEコンクリートより空気量2~3%程度大きくすることは十分効果あるものと考ええる。

(5) 凍結融解抵抗性を判定する指標として耐久性指数と同様、供試体の重量変化が耐久性の指標となり得るものと判断する。

### 参考文献

- 1) 土木学会；構造用軽量骨材シンポジウム，コンクリートライブラリー第10号，1964年5月
- 2) 土木学会；第2回構造用軽量骨材シンポジウム，コンクリートライブラリー第24号，1969年10月
- 3) 魚本健人，星野富夫；コンクリートの分割練り混ぜ方法に関する基礎的研究，第4回コンクリート工学年次講演会論文集，1982年，pp. 117~120
- 4) 田沢栄一，松岡康訓，金子誠二，伊藤靖郎；ダブルミキシングで作製したセメントペーストの諸性質について，第4回コンクリート工学年次講演会論文集，1982年，pp. 125~128
- 5) 藤田秀夫，田村一美；コンクリートの分割混練法に関する基礎的研究，土木学会中・四国支部研究発表会，昭和61年5月
- 6) 田沢雄二郎，信田佳延，石井明俊；シリカフェームを用いた高強度人工軽量骨材コンクリートの基本特性，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，1984年，pp. 121~124
- 7) 出光隆，高山俊一，江本幸雄；高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの諸性質について，セメント技術年報，第31巻，昭和52年，pp. 203~206
- 8) 橋大介，大野義郎，黒木一実，岡田武二；高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，1984年，pp. 237~240

表-4 硬化コンクリートの空気量・総細孔容積

コンクリートの種類	まだ固まらないコンクリートの空気量	硬化コンクリートの気泡組織		総細孔容積 (cm <sup>3</sup> /g)	
		空気量	気泡間隔係数		
A 法	AF-0	8.2 (%)	6.9 (%)	587 (μm)	0.0240
	AF-3	7.2	8.3	213	----
	AF-5	7.6	4.5	581	0.0192
	AF-7	6.4	6.9	531	0.0229
B 法	BF-0	7.1	9.0	222	0.0266
	BF-3	7.4	7.8	451	----
	BF-5	7.5	6.3	605	0.0222
	BF-7	7.2	7.3	574	0.0228