

## [60] 高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する研究

正会員 ○橋 大 介 (清水建設技術研究所)  
 大 野 義 郎 (日本鋼管重工事業部)  
 黒 木 一 実 (五洋建設土木技術開発部)  
 正会員 岡 田 武 二 (清水建設技術研究所)

## 1. まえがき

最近、極寒地においても軽量コンクリートを使用することが必要とされており、耐凍結融解性の大きい軽量コンクリートをどのような材料配合で実現していくかを明らかにする必要がある。

一般に軽量コンクリートは骨材をプレウェッチングすることやコンクリート打設時に水を吸水することにより骨材中の空隙部が飽水状態となり凍結融解に対する抵抗性を著しく失う傾向が認められている。さらに、軽量コンクリートが乾燥された状態となれば抵抗性も良好となり、コンクリートが凍結融解作用を受ける時の養生条件によって評価が異なることも明らかとなってきた。しかし構造物が実際におかれる環境下での耐凍結融解性を判定する方法は未だ確立されておらず、現在のところASTM-C666のA法「急速水中凍結融解試験方法」かB法「急速気中凍結水中融解試験方法」のいずれかによっている。

本研究は水セメント比を大幅に低減した高強度軽量コンクリートを対象に、最も厳しい試験条件であると考えられるASTM-C666A法で試験を行っても優れた耐久性を有する軽量コンクリートを得る目的で、材料の組み合わせおよび配合を実験的に検討したものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料およびコンクリート配合

使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(比重3.16)である。粗骨材には膨張性頁岩を主成分とする造粒型軽量粗骨材Mと非造粒型軽量粗骨材Aの2種類を選択した。これら粗骨材の物理的性質は表1に示すとおりである。細骨材は、榑田川産および木曾川産の川砂を粒度調整(表乾比重2.57, 粗粒率2.69)して用いた。混和材は、フライアッシュ(比重2.28)とシリカフェーム(比重2.19)のいずれか一方を用いた。

また混和剤としては、天然樹脂酸塩を主成分とするAE剤、ホリアルキルアリルスルホン酸塩を主成分とする高性能減水剤および流動化剤を使用した。

コンクリートの配合に関しては、使用軽量粗骨材の種類、軽量粗骨材の練り混ぜ前の含水率、コンクリートの空気量および混和材の種類等を数種類に変えて表2に示す2.2配合とした。

使用した軽量粗骨材の含水率の調節は次のように行った。まず、プレウェッチングされた軽量粗骨材を乾燥炉に入れ、絶乾状態となるまで乾燥させ、空冷した後、吸水時間を調節することにより数種類の含水率を設定した。このようにして含水率を調節した軽量粗骨材を表乾状態とした後、直ちに練り混ぜに供した。

なお、含水率の大きいものに関しては、プレウェッチングされた状態のままのものを使用した。

## 2.2 実験方法

コンクリートの練り混ぜ方法は、実施工を想定して以下に示すとおり行った。

強制練りミキサによりベースコンクリートの練り混ぜを1分30秒行い、スランブ、空

表1. 使用した軽量粗骨材の性質

試験項目 種類	最大寸法 (mm)	絶乾比重	24時間吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	粗粒率	各フライに留まるものの重量百分率(%)				
						20	15	10	5	2.5
A骨材(非造粒型)	15	1.27	11.6	721	6.33	0	1	40	92	100
M骨材(造粒型)	15	1.28	5.7	771	6.46	0	0	53	93	100

気量試験を実施した  
後直ちに可傾式

表 2. コンクリート配合

ミキサ(回転数  
2.6 r.p.m.)に移し、  
流動化剤を添加し  
て15分間練り混  
ぜることにより流  
動化コンクリート  
とした。  
フレッシュコンク  
リートの諸物性試  
験としてスランブ、  
空気量および単位  
容積重量の測定を  
行い、供試体を製  
作した。  
次にコンクリ  
ートが所定の材令に

配合 No.	軽量粗骨材 の含水率 (%)	水セメント 比 W/C	細骨材率 S/a	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤(C+FA)または(C+SF)×W1%				
				水 (W)	セメント (C)	フライ アッシュ (FA)	シリカ フェーム (SF)	軽量 粗骨材 (G)	細骨材 (S)	A E 剤	高性能減水剤	流動化剤	
AF-1	0.0	0.311	0.42	162	520	52			440	655	0.030	1.8	2.0
AF-2	6.6	0.310	0.38	161					504	592	0.030	1.5	1.0
AF-3	12.3	0.310	0.34	161					573	530	0.030	1.5	0.8
AF-4	0.0	0.316	0.46	164					396	694	0.060	2.5	2.0
AF-5	6.6	0.310	0.43	161					448	648	0.045	1.5	1.0
AF-6	12.3	0.308	0.39	160					512	588	0.046	1.3	0.8
AF-7	30.1	0.308	0.30	160					664	448	0.0475	1.2	0.7
AF-8	6.6	0.274	0.37	164	600	60			471	530	0.053	2.2	2.0
AF-9	9.9	0.275	0.33	165					522	473	0.058	2.3	2.2
MF-1	3.8	0.310	0.38	161					502	592	0.040	1.5	1.0
MF-2	5.5	0.308	0.37	160	520	52			520	577	0.033	1.2	1.1
MF-3	0.0	0.311	0.46	162					405	694	0.047	1.7	1.2
MF-4	3.8	0.310	0.44	161					439	663	0.055	1.5	1.3
MF-5	5.5	0.308	0.42	160					463	633	0.0475	1.2	1.1
MF-6	22.6	0.308	0.32	160					626	482	0.045	1.3	0.8
MF-7	3.2	0.273	0.37	164					474	530	0.070	2.1	2.0
MF-8	6.9	0.273	0.36	164					489	516	0.063	2.0	2.2
MF-9	22.6	0.271	0.30	163	602	422	0.065	1.7	1.8				
MFG-1	5.6	0.308	0.40	160	520	52			493	603	0.045	1.2	1.1
MSF-1	5.2	0.309	0.35	161					529	534	0.060	1.4	0.7
MSF-2	3.0	0.309	0.43	161					432	634	0.090	1.4	0.8
MSF-3	5.2	0.309	0.37	161	520	60	78		513	565	0.080	1.4	0.7

達したならば、圧  
縮強度試験および

A S T M - C 666

A 法に準拠した急速水中凍結融解試験を行った。

凍結融解試験に用いた供試体は寸法10×10×40 cm のもので、試験開始材令14日まで標準水中養生を行い、以後乾燥させずに直ちに試験に供した。なお1サイクルの凍結融解時間は3~4時間であった。

また、硬化コンクリートの気泡組織の測定はA S T M - C 4 5 7  
リーフトラバース法で行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性状と圧縮強度

フレッシュコンクリートの物性と材令28日における圧縮強度の試験結果は、表3に示すとおりとなった。

混和材にフライアッシュを用いた場合のフレッシュコンクリートの性状は以下のとおりであった。施工時のスランブロス等への配慮から施工性を良好とするためスランブを23 cm程度となるまで流動化させたが材料分離は殆ど観察されなかった。また、含水率の小さい粗骨材を使用したコンクリートは、粗骨材が練り混ぜ水を吸水するため減水剤および流動化剤の添加量を増しても所定のスランブを得るのは難しかった。この傾向は吸水率の大きいA骨材において顕著であった。一方、シリカフェームを用いて同程度に流動化させた

コンクリートでも、材料分離は認められず、施工性に関してはフライアッシュに比較して良好であるように思われた。また所定の空気量を得るためには、A E 剤の使用量が増大する傾向を示したが、所定のスランブを得るた

表 3 フレッシュコンクリートの物性と圧縮強度

配合No.	フレッシュコンクリートの物性			材令28日における圧縮強度 MPa(kg/cm <sup>2</sup> )
	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	
AF-1	1.0	3.2	1932	50.6(516)
AF-2	16.1	5.2	1843	47.5(484)
AF-3	22.5	4.2	1823	49.3(503)
AF-4	19.4	8.9	1851	43.3(442)
AF-5	19.2	6.7	1834	46.8(477)
AF-6	20.4	6.1	1832	49.0(500)
AF-7	22.3	5.9	1867	47.7(486)
AF-8	15.1	4.9	1859	49.0(500)
AF-9	19.9	9.5	1761	41.8(426)
MF-1	21.4	6.2	1800	46.4(473)
MF-2	20.5	5.9	1825	48.2(492)
MF-3	14.5	6.7	1921	51.5(525)
MF-4	16.9	8.4	1845	43.0(438)
MF-5	20.9	8.0	1832	43.9(448)
MF-6	22.0	6.2	1816	45.4(463)
MF-7	17.4	9.2	1784	45.6(465)
MF-8	15.5	8.7	1784	45.5(464)
MF-9	15.7	6.7	1865	47.7(486)
MFG-1	18.5	7.7	1818	49.3(503)
MSF-1	19.7	5.1	1801	57.3(584)
MSF-2	16.9	6.8	1824	56.0(571)
MSF-3	20.3	6.1	1800	56.3(574)

注) 1 MPaは10.1972 kg/cm<sup>2</sup>である。

めの減水剤および流動化剤の添加量は殆ど変わらなかった。

次に材令 28 日における圧縮強度試験結果は以下に示すとおりであった。

フライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度は、粗骨材の種類にかかわらずほぼ同等の値となり平均で約 4.7 MPa (480 kg/cm<sup>2</sup>)であったが、シリカフェームを用いた場合は、約 5.7 MPa (580 kg/cm<sup>2</sup>)となり、混和材にシリカフェームを用いた方が約 1.0 MPa (100 kg/cm<sup>2</sup>)強度が大となった。

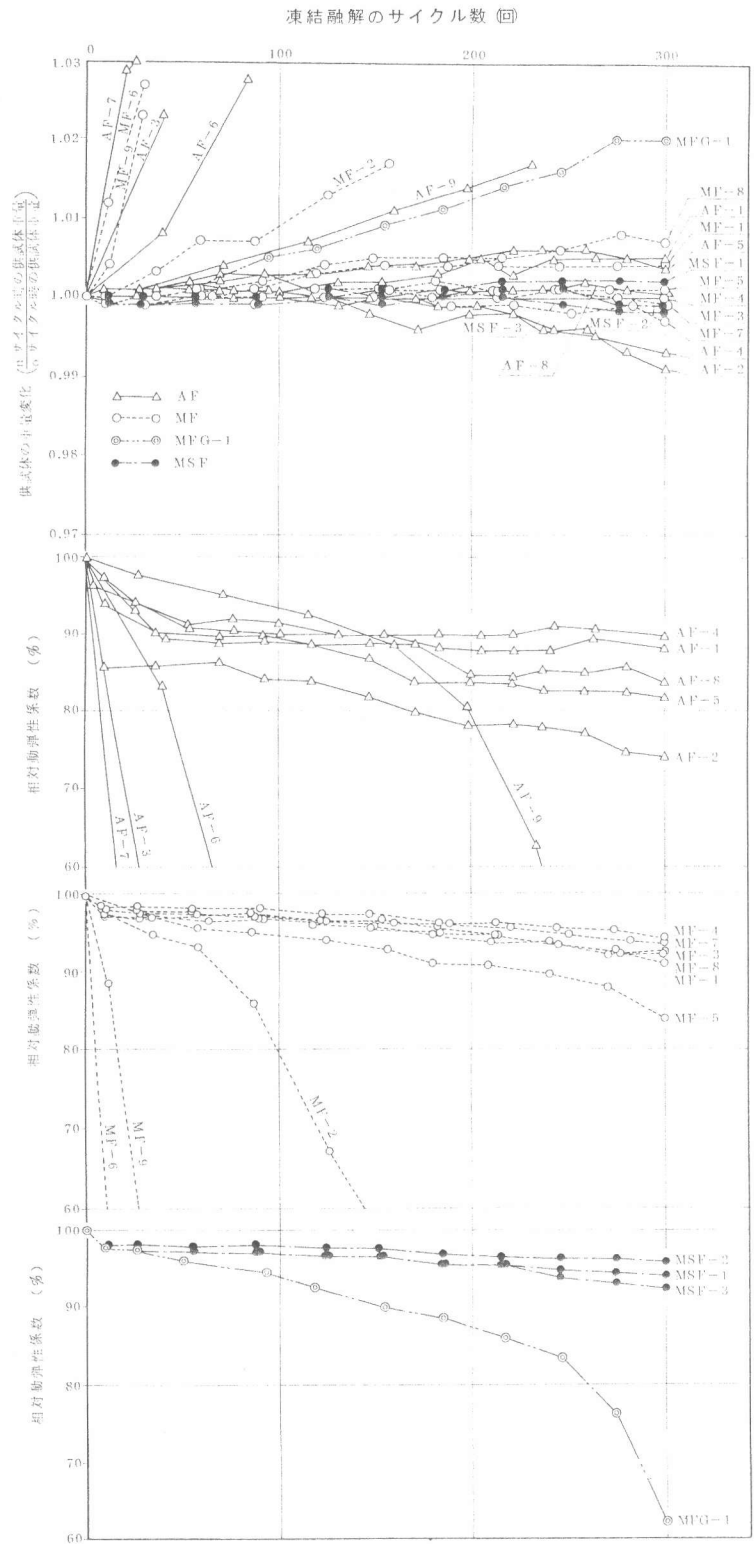
### 3.2 耐凍結融解性

一般に凍結融解作用下ではコンクリート重量はコンクリート表面の剝離によって減少するが、本実験の高强度軽量コンクリートの場合は、図 1 に示すように逆に重量が増加する傾向を示した。これは凍結融解作用によりコンクリート表面および内部に微細なひびわれが発生し、まわりの水の吸水を助長したためと思われる。特に耐久性の小さいコンクリートに関しては 1% 以上の重量増加を示した。

コンクリートの耐凍結融解性は共振装置を用いた、たわみ振動方法により測定算出される相対動弾性係数および耐久性指数で評価した。

使用する骨材の種類および混和材の種類の相違が耐凍結融解性にかなりの影響を与えたと考えられたが、本配合のような富配合な条件下では、図 1 に示すようにこれらの影響を殆ど受けず相対動弾性係数に大差はなかった。さらに流動化してスランプ 20 cm 以上とした場合、空気泡分布の偏りや材料分離の悪影響を受けて耐凍結融解性が低下することが危惧されたが、そのような傾向は殆ど認められなかった。

図 2 は粗骨材の練り混ぜ前の含水率と耐久性指数の関係を示したものである。同図によれば、両者の間にはかなりの相関性がみられる。すなわち、粗骨材の含水率が 0 ~ 5% 程度までは耐久性指数が



注) 各算定値は 2 本の供試体の平均値である。

図 1 凍結融解試験結果

90%程度でほぼ同等の値を示したのに対して、含水率5%を越えた時点で急激な耐久性指数の低下を示し、含水率12%以上となると耐久性指数は10%以下となった。これは粗骨材中の空隙が不連続的に存在することにより、粗骨材の含水率が5%を越えた場合、水の凍結による膨張圧を十分に緩和することができなくなったこと等によると思われる。

次に本配合の硬化コンクリートの気泡組織の測定結果は表4.に示すとおりであった。粗骨材の含水率が5%以下である場合、空気量3%、気泡間隔係数260 $\mu\text{m}$ 程度でも十分な耐凍結融解性を示したが、含水率5%を越えるものに関しては、空気量を増加させ気泡間隔係数を小さくしても必ずしも十分な耐久性を確保することはできなかった。

以上のことから、この種のコンクリートの耐凍結融解性に影響を与える支配的要因は粗骨材の含水率と考えられる。

なお、凍結融解試験を終了した供試体を切断してその断面を研磨後、顕微鏡によりひびわれ発生状況を観察した。それによると、耐久性指数90%以上の供試体においてもコンクリート表面部近傍の粗骨材とモルタルの境界面にひびわれが確認された。さらに耐久性の小さいコンクリートに関しては、上記ひびわれの数が増加するとともにモルタル部や粗骨材にもひびわれが発生していた。このことは凍結融解作用による劣化が粗骨材とモルタルの境界面に発生するひびわれが始点となることが多いという既往の報告と一致する結果となった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果は以下に示すとおりである。

- 1). 高強度軽量コンクリートの耐凍結融解性に影響を与える支配的要因は軽量粗骨材の含水率である。含水率5%程度以下の軽量粗骨材を用い、水セメント比32%以下、空気量3%以上の軽量コンクリートであればASTM-C666A法による急速水中凍結融解試験によっても、優れた耐久性を示すと言える。
- 2). 軽量粗骨材や混和材の種類による耐凍結融解性への影響は、今回使用した材料では殆どみられなかった。
- 3). スランブ20cm以上の流動化コンクリートとすることによる耐凍結融解性への悪影響は、認められなかった。
- 4). 高強度軽量コンクリートの製造において、混和材にフライアッシュよりもシリカフェームを使用する方が、より高強度なコンクリートを得ることが可能であるとともに施工性も良好になると思われる。

#### 参考文献

- 1) M. Kokubu and M. Kobayashi: "On Methods of Testing Durability of Concrete," RILEM International Symposium on Durability of Concrete, Sept. 1969. pp. B-177~B-194.

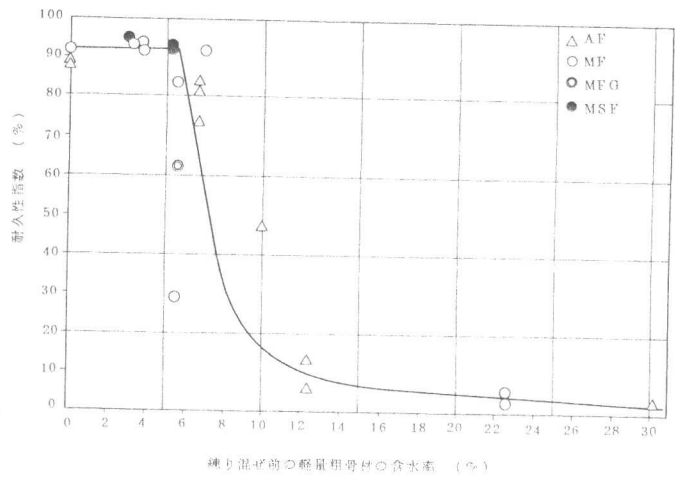


図2 軽量粗骨材の含水率と耐久性指数

表4 硬化コンクリートの気泡組織

配合No	硬化コンクリートの気泡組織		
	比表面積 $\alpha$ ( $\text{m}^2/\text{mm}^3$ )	空気量 $A$ (%)	気泡間隔係数 $L$ ( $\mu\text{m}$ )
AF-1	39.3	3.0	182
AF-2	30.6	5.1	177
AF-3	29.1	3.9	210
AF-4	25.2	7.2	183
AF-5	27.1	5.9	185
AF-6	28.4	6.0	175
AF-7	29.8	5.2	179
AF-8	25.6	3.9	256
AF-9	30.3	7.8	152
MF-1	31.4	6.1	158
MF-2	26.6	5.8	189
MF-3	29.4	5.6	176
MF-4	31.7	8.0	135
MF-5	25.4	8.2	167
MF-6	29.0	6.1	174
MF-7	33.4	9.3	122
MF-8	35.8	8.0	125
MF-9	33.4	6.2	157
MFG-1	26.7	7.3	170
MSF-1	32.3	5.0	173
MSF-2	32.2	6.6	151
MSF-3	32.6	6.3	153