

論文

[1032] 微粉末系の高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性に関する研究

権 寧理*1・千歩 修*2・鎌田英治*3

1. はじめに

近年、高流動コンクリートの実用化に関する研究が活発に行なわれているが、これまでの研究はその製造方法とフレッシュコンクリートの特性に重点がおかれており、硬化コンクリートの耐久性、特に耐凍害性についてはほとんど明らかになっていないのが現状である。

水結合材比 30～35%程度の高流動コンクリートを構成する硬化セメントペースト部分の組織構造は緻密であると思われ、空気量の導入による凍結融解抵抗性の改善が必ずしも重要とされない可能性がある。既往の研究 [1] においても空気量を 2%以上にすれば、概ね耐凍害性は良好であるとの報告されている。一方、著者らは、高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの耐凍害性は養生方法、特に乾燥により顕著に低下し、通常の場合と同様に十分な耐凍害性を確保するためには、3.5%以上の空気量が必要であるということを経験的に報告した [2]。

本研究は、微粉末系の高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性について、結合材の種類・高性能AE減水剤の種類および養生条件などの影響を従来の普通コンクリートと比較・検討したものである。

2. 実験計画および方法

表 1 に実験計画を示す。実験に用いたコンクリートは結合材、高性能AE減水剤を変えた 5 種類の高流動コンクリートと比較用の普通コンクリートである。空気量は高流動コンクリートで 2 水準、普通コンクリートで 5 水準とし、凍結融解試験開始までの養生条件を 4 種類とした。

高流動コンクリートでは、セメントに普通ポルトランドセメントまたは高炉セメント B 種を用い、微粉末系の混和材として 6000 ブレーン級の

表 1. 実験計画

コンクリートの種類	記号	結合材	高性能AE減水剤	空気量 (%)	養生条件
高流動コンクリート	6P	OPC+6000級高炉スラグ微粉末	ポリカルボン酸	2.0	・2週水中 ・4週水中 ・4週気中 ・2週水中+2週乾湿
	6N		ナフタレン		
	6A		アミノスルホン酸		
	LB	高炉B種+石灰石粉末	ポリカルボン酸	4.5	
	SC	高炉B種	ポリカルボン酸		
普通コンクリート	OPC	OPC (普通ポルトランドセメント)のみ	—	2.0	
				3.0	
				4.0	
				5.0	
				6.0	

表 2. 使用材料

	種類	仕様
セメント	普通ポルトランド	比重: 3.16, 比表面積: 3320cm ² /g
	高炉セメントB種	比重: 3.05, 比表面積: 3760cm ² /g
細骨材	陸砂	比重: 2.68, FM: 2.43, 吸水率: 1.17%
粗骨材	碎石	比重: 2.64, FM: 6.69, 吸水率: 2.82%
混和材	高炉スラグ微粉末	比重: 2.90, 比表面積: 6080cm ² /g
	石灰石粉末	比重: 2.73, 比表面積: 5460cm ² /g
混和剤	高性能 (AE) 減水剤	ポリカルボン酸系
		アミノスルホン酸系
		ナフタレン系

* 1 北海道大学大学院 工学研究科建築工学専攻、工修 (正会員)

* 2 北海道大学助教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)

* 3 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)

高炉スラグ微粉末または石灰石粉末を用いた。高性能AE減水剤は、アミノスルホン酸系、ポリカルボン酸系、ナフタレン系の3種類を用いた。細骨材は鶴川産陸砂、粗骨材は常磐産碎石を使用した。使用材料の一覧を表2に示す。

混練は、強制攪拌型ミキサを用い、高流動コンクリートは、砂/2+結合材+砂/2 (15秒) → 水+混和剤 (3分45秒) → 砂利 (2分) の6分練り、普通コンクリートは、砂/2+セメント+砂/2 (30秒) → 水 (30秒) → 砂利 (2分) の3分練りとした。

高流動コンクリートの調合は、水結合材比を35%前後とし、(1) 混和剤が異なる場合：単位結合材量一定で単位水量変化 (2) AEとnon-AEの場合：単位水量を8kg/m³増、細骨材率 2.0%増 (3) 粉体が異なる場合：水結合材比一定、単位水量変化という調合の考え方でスランプフロー62~68cm, VF値20cm以上を目標とした試し練りにより決定した。また、比較用の普通コン



図1. 硬化コンクリートの空気量とフレッシュコンクリートの空気量との関係

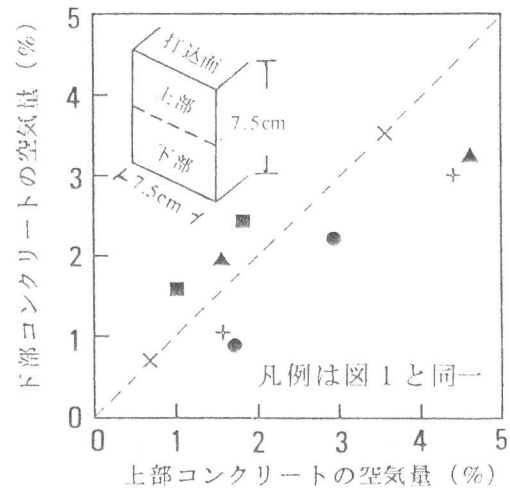


図2. 上部と下部コンクリートの空気量との関係

表3. コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの性状

種類	記号	目標空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)				高性能減水剤 (%)	AE剤 (%)	空気量 (%)	スランプフロー (cm)	スランプ (cm)	VF値 (cm)
						セメント	混和材	砂	砂利						
高流動コンクリート	6A-2	2.0	35.9	55.0	173	217	265	954	768	2.5	—	1.4	65.3	—	24.0
	6A-4	4.5	35.9	53.0	165	207	253	906	789	2.5	0.4	4.9	66.0	—	23.5
	6P-2	2.0	33.7	55.0	163	218	266	967	779	1.5	1.0*	2.1	64.3	—	23.0
	6P-4	4.5	33.7	53.0	155	207	253	919	803	1.5	0.5*	4.7	63.3	—	20.5
	6N-2	2.0	34.3	55.0	163	214	261	970	784	1.8	—	4.0	65.4	—	23.5
	6N-4	4.5	34.3	53.0	158	207	253	914	800	1.8	7.0	5.4	68.2	—	25.0
	SC-2	2.0	32.0	55.0	160	500	—	967	779	1.5	1.0	1.0	66.5	—	20.0
	SC-4	4.5	32.0	53.0	152	475	—	919	803	1.5	0.3	5.1	67.8	—	24.5
	LB-2	2.0	32.6	55.0	163	350	150	954	768	1.6	1.0	1.2	66.8	—	23.0
LB-4	4.5	32.6	53.0	155	332	143	909	792	1.5	0.4	4.7	65.8	—	23.0	
普通コンクリート	55-2	2.0	55.0	45.0	195	354	—	812	977	—	—	1.2	27.2	16.8	—
	55-3	3.0	55.0	44.7	191	347	—	801	977	—	1.0	3.2	29.8	17.6	—
	55-4	4.0	55.0	44.4	187	340	—	791	977	—	1.5	4.2	30.4	17.9	—
	55-5	5.0	55.0	44.1	183	333	—	783	977	—	2.0	4.9	29.2	17.6	—
	55-6	6.0	55.0	43.8	179	325	—	772	977	—	2.5	6.1	28.2	17.8	—

混和剤は結合材の重量に対する百分率であり、空気量調整剤は100倍希釈液である。* 消泡剤

クリートは水セメント比55%とし、目標スランプ 18cmおよび所定の空気量となるように試し練りにより決定した。コンクリートの調合と練り上がり性状を表3に示す。高流動コンクリートでは打込後48時間で、普通コンクリートでは打込後24時間で脱型し、所定の養生後試験を行った。硬化コンクリートの試験項目は、標準水中養生材令2週と4週の圧縮強度試験、ASTM C 666に準じた凍結融解試験およびASTM C 457リニアトラバース法による気泡組織の測定とした。

3. 実験結果および考察

3.1 高流動コンクリートの気泡組織

図1はリニアトラバース法による硬化コンクリートの空気量とフレッシュコンクリートの空気量をコンクリート種類ごとに比較したもので普通コンクリートではフレッシュ時の空気量と硬化後の空気量が同一な傾向であるが、高流動コンクリートでは、硬化コンクリートの空気量はフレッシュ時のコンクリートに比べて少なくなる傾向が認められた。

図2では、高流動コンクリートの場合、空気量の変動に対応して流動性の変化も普通コンクリートより顕著であり、さらに一部の高流動コンクリートではフレッシュ時の連行空気的不安定な動きが見られたため、気泡組織の測定を上部分と下部分にわけて行った結果を示す。高流動コンクリートの種類による程度の差はあるものの、高流動コンクリートでは気泡の分布が均一ではなく、空気の安定性に問題がある可能性が高いと思われる。また、図3は高流動コンクリートの気泡分布を普通コンクリートと比較して示したもので、高流動コンクリートの場合弦長0.1mm以下の微細な気泡の割合が普通コンクリートに比べて多くなる傾向が認められた。このような結果は、「高炉スラグ微粉末の混入がコンクリートの気泡組織に及ぼす影響は、水結合材比・置換率・粉末度による差はあるものの、水結合材比35%以下の高強度コンクリートの場合、0.03～0.1mm程度の細かい気泡の割合を増加させる傾向となった。」という高強度コンクリートの結果[2]と同一な傾向となり、高炉スラグ微粉末の混入により0.1mm以下の微細な気泡の割合が増加することは明らかになった。

図4は空気量と圧縮強度の関係を示したものである。空気量の増加に伴う圧縮強度の低下率は、空気量2%の強度を基準とすると、高流動コンクリートでは空気量1%で4～8%程度で、普通コンクリートでは3%程度であることから、高流動コンクリートは空気量の増大による圧

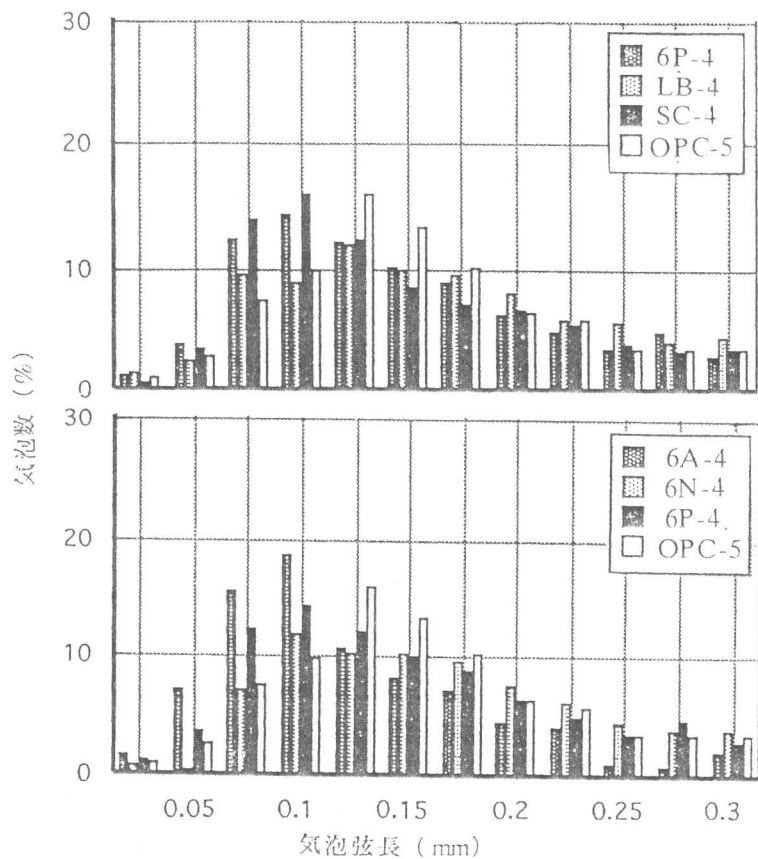


図3. 高流動コンクリートの気泡分布

縮強度の低下の割合が大き
いと思われる。

3.2 高流動コンクリ ートの耐凍害性

図5はコンクリート種類
ごとの相対動弾性係数と長
さ変化率の関係を示したも
のである。一般に相対動弾
性係数が60%になると長さ
変化率は1.0%程度にな
るとされているが[3]、本
実験の普通コンクリートで
はほぼ同様の結果が得られ
た。一方、高流動コンクリ
ートでは相対動弾性係数が
60%になる時の長さ変化率
は2.0%で普通コンクリ
ートと異なる傾向となった。
図6では本実験の範囲にお
ける高流動 non-AEコンク
リートの劣化をモデル化し
て示す。2週水中養生では、

初期には劣化が見られないが、あるサイクル以降急激な劣化が見られる。このような傾向は高強度コンクリートで見られたタイプであり[4]、高流動コンクリートでも同様な傾向が見られた。4週気中あるいは2週水中養生後、乾燥(35°C 40時間)と吸水(20°C 8時間)を7回繰り返した場合(以下乾湿養生と称する。)では凍結融解サイクルとともに劣化の程度が大きくなるが、いずれも普通non-AEコンクリートの劣化タイプあるいは程度とは異なる傾向となった。

図7は耐久性指数とフレッシュコンクリートの空気量との関係を示したものである。空気量が多いほど耐久性指数が増加する傾向が見られ、普通コンクリートの場合、耐久性指数60以上を得るためには、2週水中養生では4%、4週水中養生では3%、4週気中では6%以上、乾湿養生では3.5%程度の空気が必要であった。

一方、高流動コンクリートの場合、高性能 AE 減水剤の種類の影響は、6Aの場合、non-AE コンクリートでは4週水中養生のみ耐久性指数が60以上となった。空気量が増加すると耐久性指数は向上するが乾湿を行なった試験体における耐久性指数の増加は普通コンクリートと同様な水準であった。6Pは non-AEコンクリートの場合に4週気中と乾湿養生において若干の耐久性指数の低下が認められるが、空気量の増大に伴い耐久性指数は、すべて100以上となった。6Nは non-AEコンクリートの場合、4週気中と乾湿養生において耐久性指数が普通コンクリートよりも低下しており、AEコンクリートでも、乾湿養生の場合は普通コンクリートと同一水準となり、高流動コンクリートの耐凍害性に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響が大きいことがわかる。

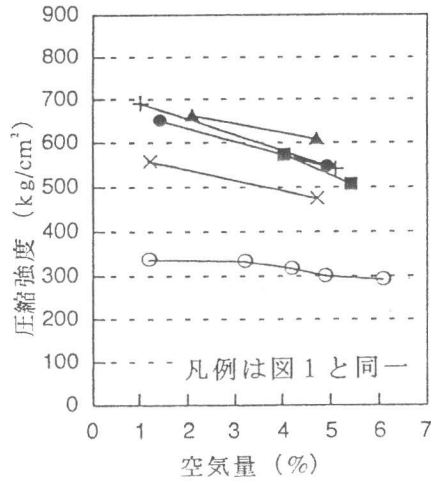


図4. 空気量と圧縮強度の関係

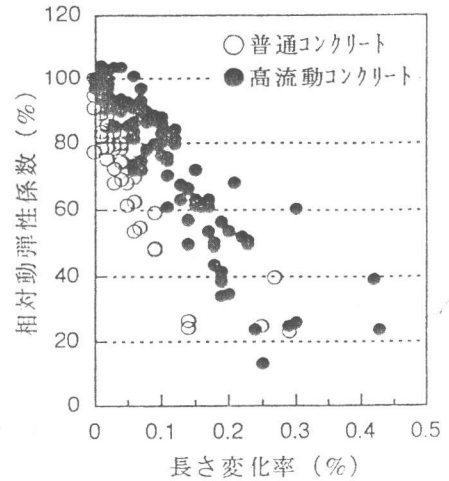


図5. 長さ変化率と相対動弾性係数の関係

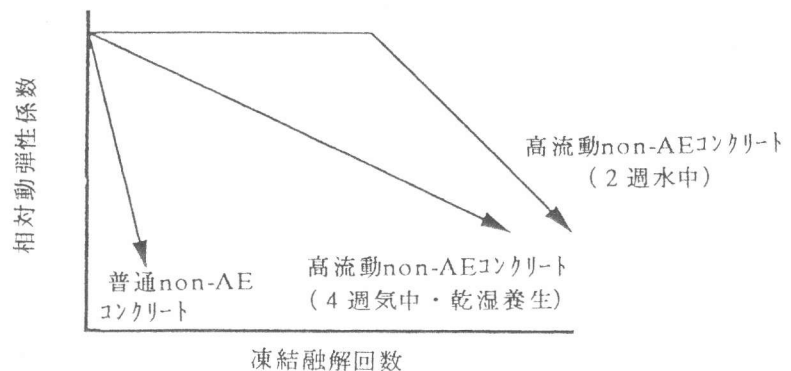


図6. 高流動non-AEコンクリートの凍結融解劣化モデル

また、LBはnon-AEコンクリートでは養生条件にかかわらず凍害劣化を受けていることが認められ、AEコンクリートでも特に4週気中養生では普通コンクリートより耐久性指数は低下した。SCはnon-AEコンクリートでは4週気中と乾湿養生において耐久性指数の低下が見られるが、空気量増大に伴い耐久性指数は向上した。このように、結合材の種類により高流動コンクリートの耐凍害性も異なる結果となった。

高流動コンクリートの耐凍害性を普通コンクリートと比較した場合、標準的な2週水中養生では同程度の空気量で高流動コンクリートの方が耐凍害性は良好であると思われる。しかしながら結合材・高性能AE減水剤の種類、養生条件の影響が大きく、乾湿による耐凍害性の低下が普通コンクリートよりも大きいことなどから標準条件である2週水中養生後の凍結融解試験において耐凍害性が優れていたとしても空気の連行が必要ではないと考えるべきではないと考えられる。

図8に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。一般に気泡間隔係数250 μ m以下で十分な耐凍害性が得られることが知ら

れている[3]。普通コンクリートの場合は4週気乾養生以外のすべての養生方法で気泡間隔係数300 μ m以下では耐久性指数60以上を示している。しかし、高流動コンクリートの耐凍害性の確保に必要な気泡間隔係数は結合材・高性能AE減水剤の種類により異なる結果となっているが、LBの気乾養生以外の高流動コンクリートでは気泡間隔係数400 μ m以下でも耐久性指数60以上を示していることから高流動コンクリートの耐凍害性の確保に必要な気泡間隔係数は通常の250 μ mよりやや大きめであると思われる。

4. まとめ

微粉末系の高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性について得られた結果は以下のようにまとめられる。

1) 高流動コンクリートでは気泡の分布が不均一で、その安定性に問題があり、高性能AE減水剤やAE助剤の使用法

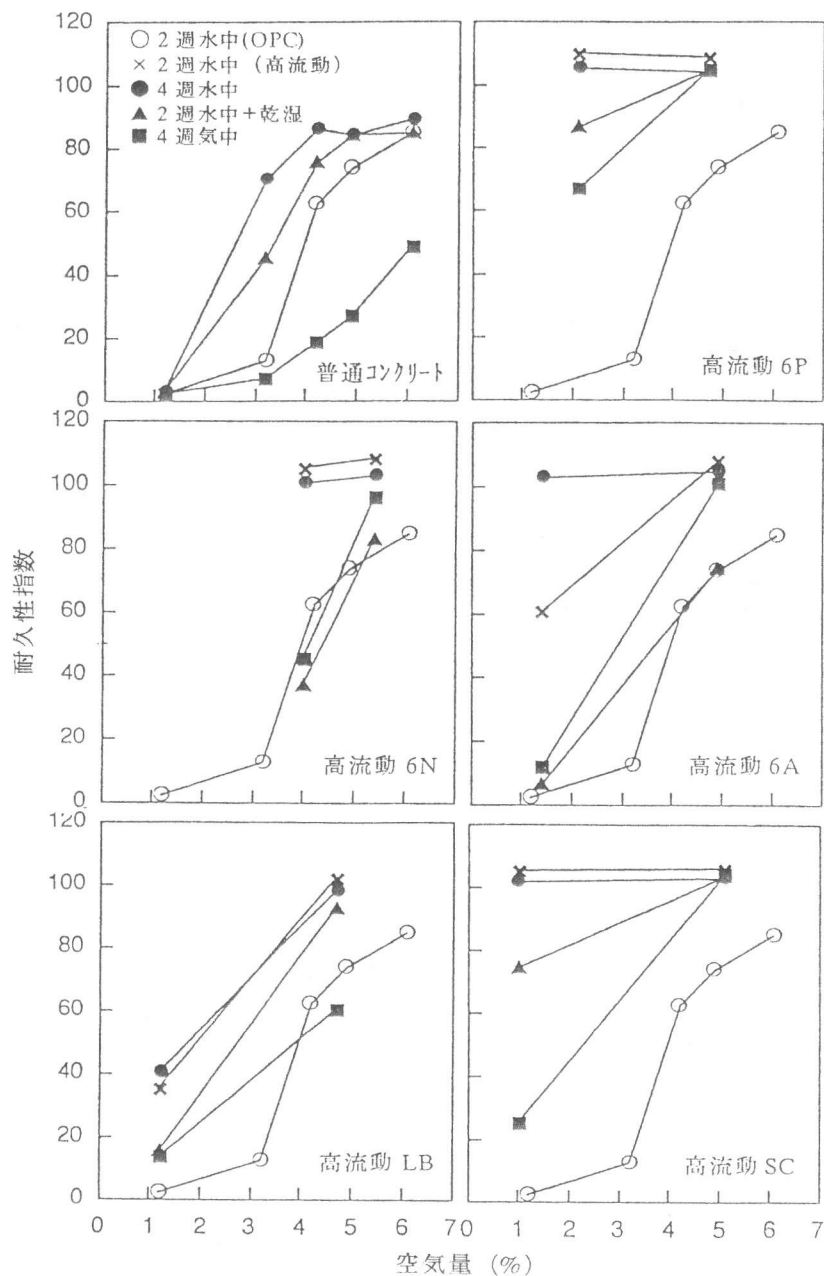


図7. フレッシュコンクリートの空気量と耐久性指数との関係

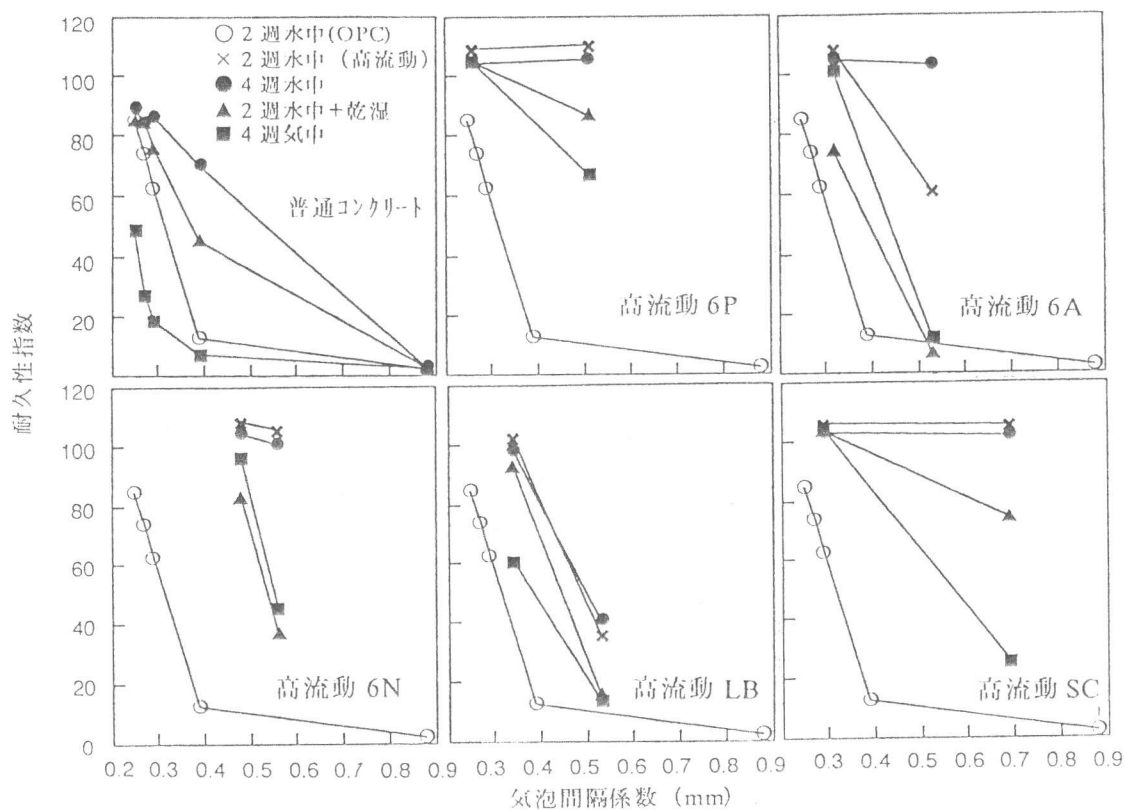


図 8. 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

に検討が必要である。

2) 高流動コンクリートの場合、普通コンクリートと比べ0.1mm以下の細かい気泡の割合が増加する傾向となり、凍害をうける限界の気泡間隔係数は、高流動コンクリートでは通常の250 μ mよりもやや大きめであった。

3) 高流動コンクリートの耐凍害性は、結合材・高性能AE減水剤の種類およびコンクリートの養生方法により大きく異なり、通常のコンクリートと同様に空気の導入が必要である。

4) 高流動コンクリートの場合、空気量1%の増加に対し、圧縮強度が4~8%程度低下するが、普通コンクリートでは3%程度で、空気量の増大による圧縮強度の低下率は普通コンクリートと異なる傾向となった。

[謝辞]

本研究は日本建築学会の高流動コンクリート委員会 寒中・凍害WGの一環として行ったものである。関係各位に感謝致します。

参考文献

[1] 日本コンクリート工学協会、超流動コンクリート研究委員会報告書、PP.187、1993.5
 [2] 権・浜・鎌田・金、高炉スラグ微粉末を混入した高強度コンクリートの気泡組織と耐凍害性、日本コンクリート工学協会・自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集、PP.77~84、1993.5
 [3] 鎌田英治、寒さとコンクリート、第2回北海道建築材料セミナー、PP.45~93、1993.8、
 [4] 柏野・鎌田・桂、高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、PP.691~696、1990