

論 文

[1117] 高炉スラグ微粉末を混入した水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性

正会員○福留和人（間組技術研究所）

正会員 喜多達夫（間組技術研究所）

正会員 宮野一也（間組技術研究所）

1. まえがき

高炉スラグ微粉末は、硫酸塩に対する抵抗性の改善あるいはアルカリ骨材反応の抑制効果を有し、従来から高炉セメントとして広く利用されている。また、近年の粉砕技術の向上に伴ない、比表面積で $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のものも生産可能となり、初期強度の改善また高強度コンクリートへの適用等、その利用に関する研究も行なわれている。それらの研究の中で、比表面積の大きい高炉スラグ微粉末は、凍結融解抵抗性の改善効果を有することが明かとなっている¹⁾。

一方、水溶性のポリマーを主成分とした混和剤を添加した水中不分離性コンクリートは、品質の高い水中コンクリートの施工が可能であることから、関西国際空港や明石海峡大橋等の大型海洋構造物へも適用され、近年その施工実績は増大している。しかしながら、セルロース系の混和剤を用いた水中不分離性コンクリートは、一般に凍結融解抵抗性に劣ると言われ、寒冷地への適用性に問題がある。著者らは、ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を混和したドライモルタルを用いることによってセルロース系の混和剤を用いた水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性を改善できることを報告した²⁾。

本研究では、高炉スラグ微粉末の最適粉末度および置換率を検討するために凍結融解試験を実施した。また、気泡組織および細孔径分布の測定を行って、高炉スラグ微粉末による凍結融解抵抗性の改善メカニズムについて検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用材料の一覧を表-1に示す。ここで、高炉スラグ微粉末は、粉末度の異なる2種類（比表面積 $5,000$ および $7,000\text{cm}^2/\text{g}$ ）を用いた。高炉スラグ微粉末の物理的性質および化学成分を表-2に示す。

2. 2 実験条件

実験要因および水準を表-3にコンクリートの配合を表-4に示す。全ての配合で水結材比 $W/(C+Sg)$ は 55% とした。A Eコンクリートの空気量の目標値は、 $5 \pm 1\%$ とした。コンクリートの練りませには、容量 50L のパン型強制練りミキサーを用いた。練りませ方法は、普通コンクリートは一括練り（2分間練りませ）、水中不分離性コンクリート

表-1 使用材料

	種 類	仕 様
セメント	普通ポルトランド (OPC)	比重:3.16, 比表面積: $3380\text{cm}^2/\text{g}$
	高炉セメントB種 (BB)	比重:3.04, 比表面積: $3770\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材S	川砂	比重:2.60, FM:2.78, 吸水率:1.56%
粗骨材G	碎石 ($G_{\max}: 20\text{mm}$)	比重:2.70, FM:6.60, 吸水率:0.75%
混和材 (Sg)	高炉スラグ微粉末 (S5)	比重:2.91, 比表面積: $4850\text{cm}^2/\text{g}$
	高炉スラグ微粉末 (S7)	比重:2.91, 比表面積: $6810\text{cm}^2/\text{g}$
混和剤	A E減水剤	リグニンスルホン酸ナトリウム複合体
	A E助剤	アルキルベンゼン酸化合物系界面活性剤
	水中不分離性混和剤	セルロース系
	高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物

表-2 高炉スラグ微粉末の物理的性質および化学成分

種類	比重	比表面積 (cm^2/g)	強熱減量 (%)	塩基度	化 学 成 分 (%)				
					CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO
S5	2.91	4850	0.19	1.97	41.9	32.1	15.4	2.8	6.2
S7	2.91	6810	0.35	2.02	42.4	31.1	14.5	4.5	5.9

表-3 実験条件

実 験 要 因		実 験 水 準		
セメントの種類	普通ポルトランド	高炉セメントB種		
	高炉スラグ	比表面積 (cm^2/g)	5000程度	7000程度
コンクリートの種類	置換率 $Sg/(C+Sg)$ (%)	0	30	50
	① 普通コンクリート	水中不分離性		
	② A Eコンクリート	Non-A Eコンクリート		

は空練りを行った後注水して練りませを行う分割練り（空練り：30秒、注水後：3分）とした。

表-4 コンクリートの配合

配合 No	コンクリートの種類		セメントの種類	スラグの種類		水結材 配合比 W/(C+Sg) (%)	細骨材率 S/a (%)	スラン プ(70- 10-)の 範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	単 位 量 (kg/m³)						単位量 (g/m³)				
	①	②		種 類	置 換 率 (%)					水 W	セメント C	スラグ Sg	細骨材 S	粗骨材 G	水中不 分離 和剤	AE減水 剤	AE助剤 (10 ⁻³)	高性能減水 剤		
1	普通	AE	OPC	—	5.5	4.5	15±2.5	5±1	165	300	—	807	1025	—	0.75	3.8	—			
2			BB	—							0	802	1019			22.5				
3			N-AE	OPC							S7	50	150			150		803	1019	37.5
4											—	0	327			—		869	978	—
5		S5				30	229	98	866	974										
6		50				164	164	863	971											
7		S7	30	229		98	866	974	—	—	—									
8		50	164	164		863	971													
9	水中不 分離性	AE	OPC	—	4.0	50±2.5	5±1	215				391	—	636	990	2.3	0.98	14.7	11.7	
10			BB	—									0	631	982			19.6		
11			OPC	S5					30	274	117		632	985	19.6					
12				50					196	196	630		981	19.6						
13				30					274	117	632		982	19.6						
14				S7					50	196	196		630	981	19.6					

2. 3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-5に示す。

凍結融解試験の開始材令は14日とし、気泡組織および細孔径分布の測定は凍結融解試験開始時に実施した。試験までのコンクリートの養生は20±2℃の水中養生とした。

3. 実験結果および考察

試験結果の一覧を表-6に示す。耐久性指数の算出は、300サイクル、相対動弾性係数60%を基準とした。

なお、以下供試体名を図-1のように略記する。

3. 1 圧縮強度試験結果

図-2および3は、それぞれのコンクリートで、普通ポルトランドセメント単味に対する圧縮強度比を示したものである。

普通コンクリートの場合高

炉スラグ微粉末を混入した方が若材令時の強度発現が遅れ、材令7および14日では、普通ポルトランドセメント単味の圧縮強度を下回っている。しかしながら、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど若材令時の強度発現は良好となっている。また、高炉スラグ微粉末の置換率による違いをみると、材令28日までは、いずれの比表面積においても

表-5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランブ試験	JIS A 1101による。
スランブフロー試験	水中不分離性コンクリートマニュアルによる。
空気量試験	JIS A 1118による。
圧縮強度試験	JIS A 1108による。(材令：7, 14, 28および91日)
凍結融解試験	ASTM C 666 (A法) による。
気泡組織の測定	ASTM C 457による(リコトラブス法)。
細孔径分布測定	水銀圧入式*ロメータによる。

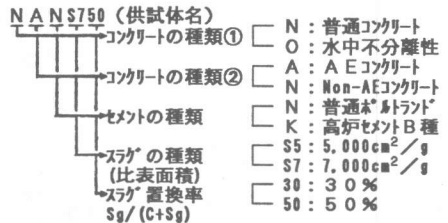


図-1 供試体名の略記方法

表-6 試験結果一覧

配合 No	供試体名	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート					
		練上 温度 (℃)	スラン プ(フ ロー) (c m)	空 気量 (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)				耐久 性指 数 (%)	気泡 間隔 係数 (μ m)
					7日	14日	28日	91日		
1	NAN	22.0	15.5	4.0	352	403	430	478	87	235
2	NAK	22.5	17.0	5.0	194	293	395	473	94	234
3	NANS750	23.0	13.0	4.8	312	410	477	530	103	215
4	NNN	22.5	11.0	1.5	358	438	458	515	17	1510
5	NNNS530	23.0	10.0	1.6	299	400	451	534	25	996
6	NNNS550	23.5	11.5	1.5	264	381	445	532	22	992
7	NNNS730	24.0	10.0	1.6	342	451	490	527	20	1214
8	NNNS750	23.5	6.5	1.5	316	411	474	534	57	1198
9	OAN	19.0	50.5	4.4	267	317	369	393	3	623
10	OAK	19.0	51.0	4.9	209	309	396	462	4	577
11	OANS530	19.0	51.0	5.0	231	301	374	388	15	611
12	OANS550	19.5	52.0	5.1	218	326	415	473	38	567
13	OANS730	19.0	52.5	4.8	282	365	404	428	27	502
14	OANS750	19.0	51.0	5.1	301	410	493	515	47	530

置換率の高い方が強度発現が遅れる傾向にある。

水中不分離性コンクリートの場合、普通コンクリートと若干傾向が異なり、比表面積 $7,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合は、材令7日で普通ポルトランドセメント単味の圧縮強度を上回っている。また、比表面積 $5,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の場合も材令14日で普通ポルトランドセメント単味の場合と同等となっている。さらに、置換率50%の方が30%に比べて全体的に圧縮強度が高くなっている。このように、水中不分離性コンクリートと高炉スラグ微粉末の相性は非常に良いと言える。これらの結果は、水中不分離性コンクリートの場合、高炉スラグ微粉末の置換率を高くしても強度の低下が小さいという従来の研究結果³⁾と同様な理由によるものであり、特殊混和剤が何等かの形で高炉スラグ微粉末の硬化反応を促進しているためであると考えられる。

3. 2 凍結融解試験結果

図-4, 5に普通コンクリートおよび水中不分離性コンクリートの凍結融解回数と相対動弾性係数の関係を示す。

水中不分離性コンクリートの場合、普通ポルトランドセメント単味では、AEコンクリートであるにもかかわらず、凍結融解抵抗性は著しく劣り、普通コンクリートのNon-AEコンクリートを下回っている。しかしながら、高炉スラグ微粉末を混入することによって凍結融解性は改善されている。高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど、置換率が高いほど良好な結果となっている。普通コンクリートの場合も同様に高炉スラグ微粉末の混入によって凍結融解抵抗性は改善されている。特に、比表面積 $7,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のものを50%置換した場合は、Non-AEコンクリートであってもかなりの凍結融解抵抗性を有している。また、AEコンクリートでは、相対動弾性係数の低下は見られない。これらの結果は、山本らの研究報告¹⁾と同様な結果となっている。図-6, 7に凍結融解数と重量減少率の関係を示すが、重量減少率も高炉スラグ微粉末の混入によって大幅に低減している。

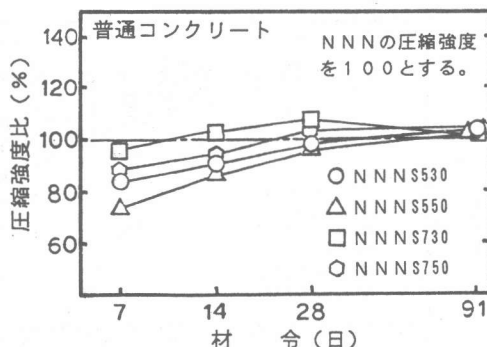


図-2 圧縮強度試験結果 (普通Non-AE)

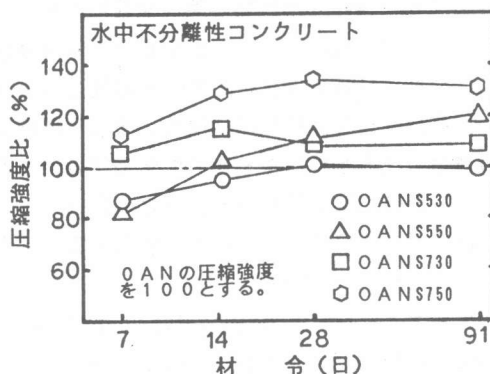


図-3 圧縮強度試験結果 (水中不分離性)

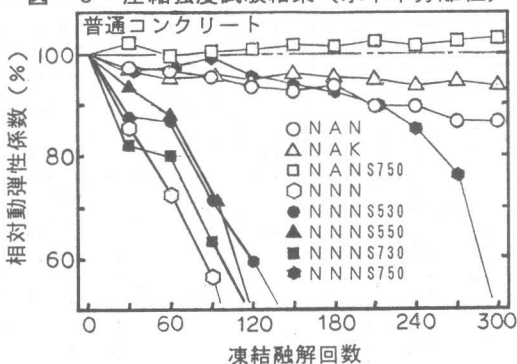


図-4 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

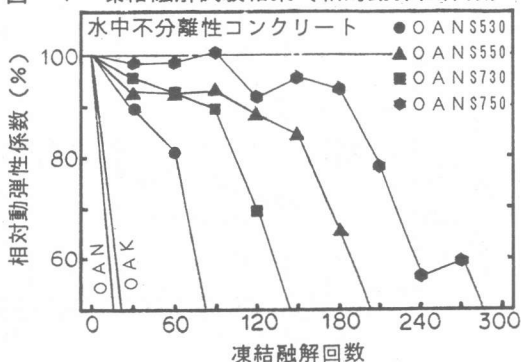


図-5 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

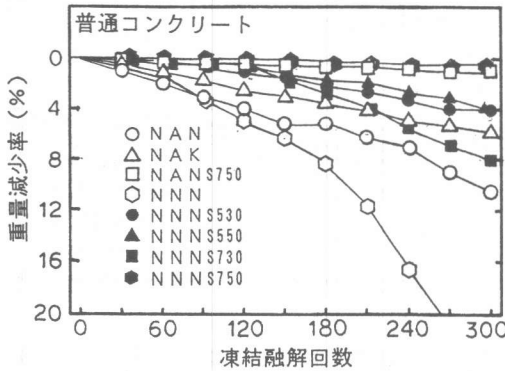


図-6 凍結融解試験結果（重量減少）

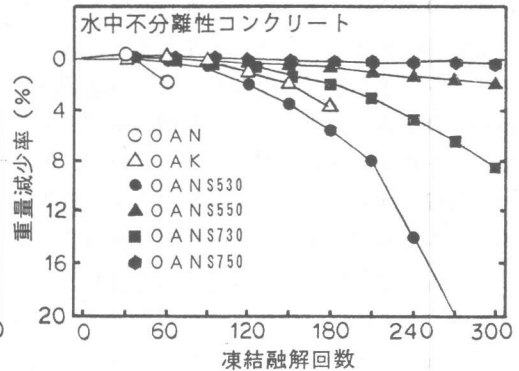


図-7 凍結融解試験結果（重量減少）

3. 3 気泡組織および細孔組織と凍結融解抵抗性の関係

凍結融解試験の結果、水中不分離性コンクリートは、著しく凍結融解抵抗性に劣ること、また、高炉スラグ微粉末は、優れた凍結融解抵抗性改善効果を有することが確認された。これらの結果の原因を検討するために気泡組織の測定および細孔径分布の測定を行った。

(1) 気泡組織と凍結融解抵抗性の関係

図-8にAEコンクリートの気泡分布の測定結果を示す。ここで、気泡数は、1トラバース長(400cm)当りの測定値を示す。

普通コンクリートの場合、100 μm 以下のエントレインドエアが数多く連行され、気泡間隔係数も215~235 μm と小さくなっている。一方、水中不分離性コンクリートの場合、AEコンクリートとしたにもかかわらず100 μm 以下のエントレインドエアは、ほとんど連行されておらず、数100 μm 程度のエントラップトエアに近い気泡がかなり連行されている。気泡間隔係数も全て500 μm 以上となっている。これは、水中不分離性コンクリートの高い粘性のために、エントラップトエアを連行しやすいためであると考えられる。このように、水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性が劣る大きな原因の一つは、気泡の粗大化にあると考えられる。

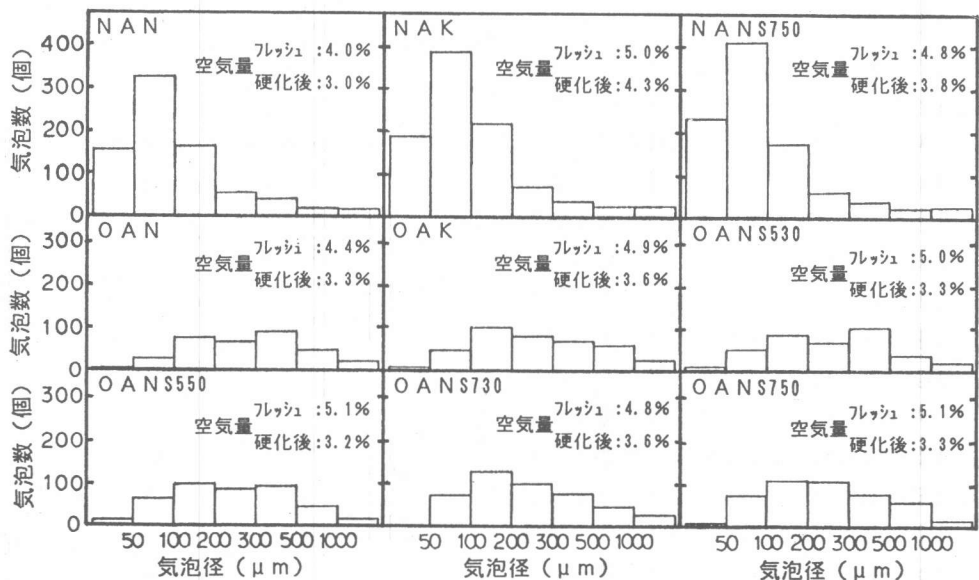


図-8 気泡分布

しかしながら、水中不分離性コンクリートの気泡間隔係数は、同一配合条件のNon-AEコンクリートに比べてかなり小さくなっているにもかかわらず、凍結融解抵抗性は、劣っているという結果となっている。したがって、水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性の低下原因は、上記の気泡の粗大化以外にもあると考えられる。

一方、高炉スラグ微粉末混入による気泡組織の変化は、凍結融解抵抗性が改善されるほど顕著ではない。図-9に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。この図からもわかるように、

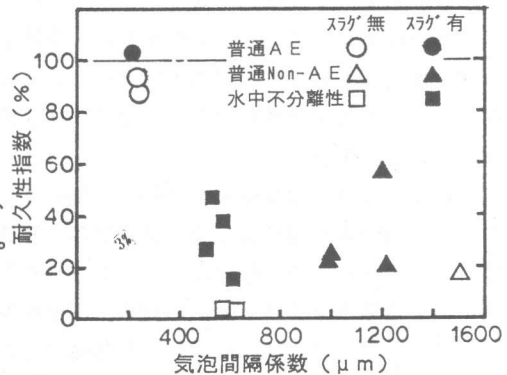


図-9 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートと無混入の場合で気泡間隔係数と耐久性指数の関係が異なった傾向にある。したがって、高炉スラグ微粉末混入による凍結融解抵抗性の改善の原因は、気泡組織の変化以外にあると考えるのが妥当である。

(2) 細孔組織と凍結融解抵抗性の関係

図-10, 11に普通コンクリートおよび水中不分離性コンクリートの細孔径分布の測定結果を示す。

高炉スラグ微粉末の混入によって細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量が減少し、 $10^2 \text{ \AA}$ 以下の細孔量が増加している。この傾向は、高炉スラグの比表面積が大きいほど置換率が大きいほど顕著であり、高炉スラグ微粉末の混入によって細孔組織が緻密化していることがわかる。そこで、細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量に注目して、凍結融解

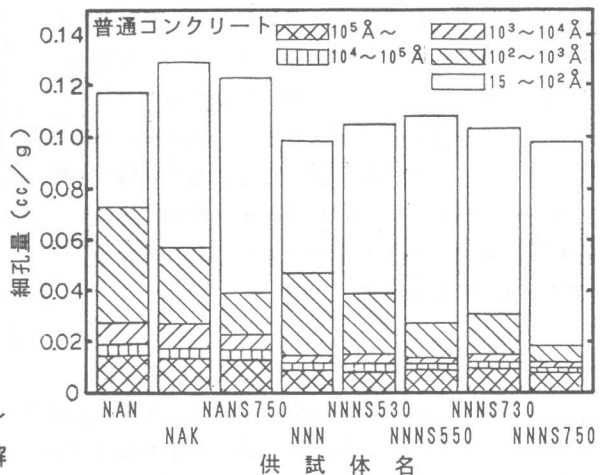


図-10 細孔径分布 (普通コンクリート)

試験結果との比較を行った。図-12に細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量と耐久性指数の関係を、図-13に重量減少速度(相対動弾性係数60%までを直線回帰し、直線の勾配を求めた。)との関係を示す。図からわかるように細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量と耐久性指数および重量減少速度の間には明確な相関がみられる。

既往の研究において、細孔中の水の凍結温度と細孔半径には相関があり、細孔組織と凍結融解抵抗性は密接な関係があることが示されている⁴⁾。すなわち、細孔半径 $10^2 \text{ \AA}$ 以上の細孔中に存在する水は、凍結融解試験の最低温度 -18°C において凍結する可能性があり、凍結融解抵抗性に大きく関与する。以上のことから、高炉スラグ微

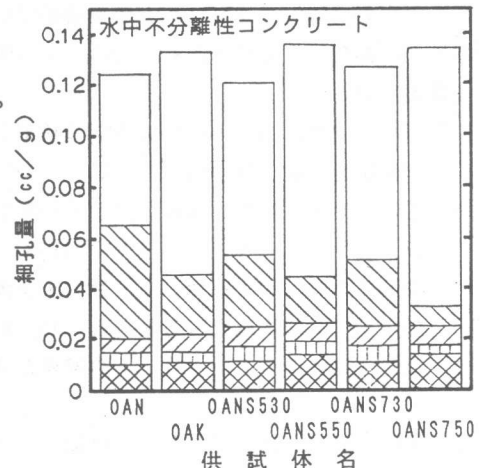


図-11 細孔径分布 (水中不分離性)

粉末の混入によって細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量が減少したこと、言い換えれば、凍結する可能性のある水量の絶対量が減少したことによって凍結融解抵抗性が改善された可能性は極めて高いといえる。

さらに、今回の試験結果において、細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量と重量減少速度の関係は、コンクリートの種類（AEまたはNon-AEあるいは普通コンクリートまたは水中不分離性コンクリート）にかかわらず一つの曲線で示されることは非常に興味深い。

一方、水中不分離性コンクリートと普通コンクリートでは、全細孔量および細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量の差はみられず、水中不分離性混和剤は、細孔組織にほとんど影響を与えていないと考えられる。以上の気泡組織、細孔径分布の測定結果および凍融解試験結果の測定結果を総合して考えると、水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性が劣るのは、大野らが指摘⁵⁾しているように細孔中に存在するセルローズ（一般に高pH中で安定である）が細孔水凍結時の静水圧を大きくしていることも大きな原因であると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 高炉スラグを添加することによって水中不分離性コンクリートの圧縮強度は改善される。
- 2) 比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を添加することによって凍結融解抵抗性は、著しく改善される。これは、高炉スラグ微粉末が細孔組織を緻密化させるためであると考えられる。
- 3) 水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性の低下原因の一つは、気泡の粗大化にあるが、細孔中に存在すると思われるセルローズの影響も大きいと考えられる。

【参考文献】

- 1) 近松、山本、長合：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐凍害性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、No. 1、1989、pp. 355～360
- 2) 宮野、喜多、高見、木村：高炉微粉末を混入した特殊水中コンクリートの耐凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9、No. 1、1987、pp. 111～114
- 3) 田沢、大友、平：高炉スラグ微粉末を大量添加した特殊水中コンクリートの特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10、No. 2、1988、pp. 19～24
- 4) たとえば鎌田：コンクリートの凍害と細孔構造、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10、No. 1、1988、pp. 51～60
- 5) 大野、田沢：水溶性高分子を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性、第44回土木学会年次学術講演会概要集、第5部、1989、pp. 624～625

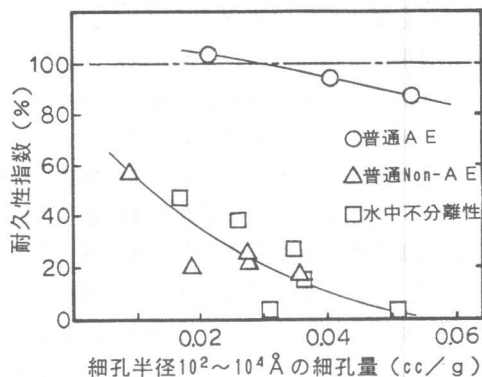


図-12 細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量と耐久性指数の関係

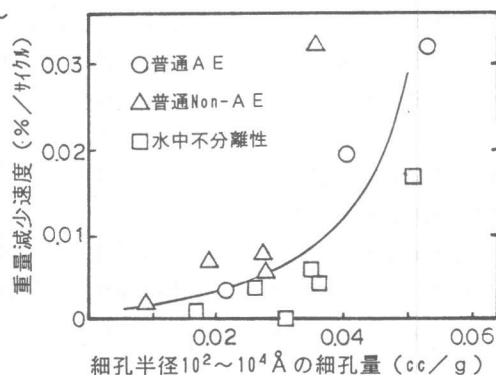


図-13 細孔半径 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔量と重量減少速度の関係