

V-10 耐寒剤を用いたコンクリートの強度・耐凍害性について

北海道開発局土木試験所 正員 渡辺 宏
正員 大橋 猛
斉藤 敦志

1. まえがき

コンクリートは温度の低下とともに強度発現が緩慢になり初期凍害を受けると硬化コンクリートの諸性質に対する悪影響が将来にわたって残る。一般に施工されている寒中コンクリートは、凍害を受けない強度に達するまで保温養生・給熱養生などの養生を実施しているが、養生の最低限度、養生条件確保に必要な仮設工作物など、設備と保温費、適切な熱管理の程度など問題点も少なくない。また、硬化促進剤を使用して養生期間を短縮する方法も行われているが、その主成分が塩化物であるものが多く、長期強度・耐久性の低下、鉄筋を腐食させるなどの弊害があり、最近ではほとんど使用されなくなった。

一方、無塩化形で低温時にもコンクリートの強度発現を可能とする混和剤（耐寒剤）が日曹マスタービルダーズ(株)（以下日曹と略称）により開発され、当研究室では昭和60年度より同社と「耐寒剤を利用した寒中コンクリートの合理化に関する研究」と題する共同研究を実施しているが、 -5°C の低温下においても所定の強度・耐凍害性を確保できることなどが明らかとなった。¹⁾

本研究は、耐寒剤を用いたコンクリートの強度特性・耐凍害性などに関する試験結果のまとめとあわせて耐寒剤の使用基準について検討したものであり、現場への適用を図ることを目的としたものである。

2. 試験の概要

2.1 試験計画

強度・耐凍害性に関する試験を表-1に示す計画に従って実施した。

2.2 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（日本セメント(株)製、以下、日本セメントと略す）、高炉B種セメント（日鉄セメント(株)製、以下、高炉セメントと略す）を使用した。

細骨材は苫小牧市錦岡産の海岸砂（比重 2.71、吸水率 0.93%、粗粒率 2.84）、粗骨材は函館市莪朗産の砕石（比重 2.70、吸水率 0.46%、最大寸法 25mm）を使用した。

混和剤は、耐寒剤としてノンフリーズ（以下、NFと略す）を使用し、比較のためAE減水剤標準形P（以下、AE減水剤と略す）を用いた。また、あわせて特殊コンクリート用空気量調節剤PAE（以下、PAEと略す）を使用した。

2.3 試験方法

コンクリートの練り混ぜは50ℓの強制練りミキサを用い、全材料投入後 1.5分間練り混ぜた後供試体作成を行った。

供試体の -5°C 養生は、 $+5^{\circ}\text{C}$ の恒温室に 6時間前養生しその後 -5°C の低温室で材令28日まで保存し、それ以上の材令91日について28日以降 $+5^{\circ}\text{C}$ とした。

各種試験は、関連JISあるいはASTM規格に従って実施したが、凍結融解試験ではあわせて、供試体の残留膨張を測定して凍伸度を求めた。供試体の残留膨張の測定は、供試体の両端に真ちゅう製のボルトを埋め込みこれを標点としてダイヤルゲージ方法の長さ変化測定器によった。

表-1 試験計画

セメントの種類	水セメント比 (%)	NF使用量 (ℓ/100kg)	養生温度 (°C)	圧縮強度	凍結融解	細孔分布
普通高炉	40	0	20	○		○
			20	○		○
		3	-5	○	○	○
			20	○		○
		5	-5	○	○	○
			20	○		○
	45	0	20	○		○
			20	○		○
		3	-5	○	○	○
			20	○		○
		5	-5	○	○	○
			20	○		○
	50	0	20	○		○
			20	○		○
		3	-5	○	○	○
			20	○		○
		5	-5	○	○	○
			20	○		○

凍伸度は次式で表わした。

$$\text{凍伸度 (DEFn)} = (\text{Ln} - \text{Lo})$$

$$\text{／Lo}$$

ここで、Lo …凍結融解試験開始前の供試体の長さ

Ln …凍結融解試験開始nサイクル後の供試体の長さ

また、細孔分布測定は、圧縮強度試験終了直後の供試体よりモルタルをはつとり、アセトン中で洗浄し、D-dry法で乾燥後、水銀圧入式ポロシメーター 220型（カルロ・エルバ社）を用い、細孔半径38～100,000Åの測定をした。

3. 試験結果

3.1 配合試験

コンクリートの配合は表-2 に示すとおりスランプ 8±2.5cm・空気量 5±1 %を目標として決定した。単位水量は、NF使用量が多くなると減少する傾向にあり、普通セメントに比べ高炉セメントの方が減水効果が大きかった。しかし、所定の空気量を得るために必要なPAEの量はNF使用量とともに増加し、NFをセメント 100kg当り 3～5 ℓ使用した場合、AE減水剤に対し普通セメントで 2.0～4.7 倍、高炉セメントで 3.0～8.6 倍であった。

3.2 圧縮強度

3.2.1 材令と圧縮強度の関係

-5℃養生における材令とNF 0 ℓ・+20℃養生に対する圧縮強度比の関係を図-1に示す。材令が増加すると、また、NF使用量が増し、水セメント比が小さくなると強度比は大きくなり、普通セメントでは、NF使用量 5 ℓ・材令 28日で強度比は80%以上となり、

材令91日において、すべての配合でほぼ 100%（対材令28日）以上となった。同様に、高炉セメントでも、強度比は増大したが、その値は普通セメントより小さかった。しかし、材令91日で水セメント比が50%・NF使用量が 3 ℓである一部の配合を除いて、ほぼ 100%（対材令28日）に近いそれ以上となった。

3.2.2 積算温度と圧縮強度の関係

土木学会の標準示方書では、寒中コンクリートの養生管理を行う場合、積算温度と圧縮強度とは養生温度

表-2 コンクリートの配合表

セメントの種類	水セメント比 w/c (%)	NF使用量 ℓ/c =100kg	細骨材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤量 (ℓ)	
				W	C	S	G	NF	PAE
普通	40	0	41	151	378	754	1,082	(250) * 0.945	(20) 0.076
		3		147	368	763	1,094	11.04	(80) 0.294
		5		134	335	789	1,131	16.75	(80) 0.268
	45	0	42	145	322	800	1,101	* 0.805	(15) 0.048
		3		140	311	810	1,115	9.33	(60) 0.187
		5		135	300	820	1,128	15.0	(70) 0.210
	50	0	43	142	284	837	1,105	(250) * 0.710	(15) 0.043
		3		140	280	840	1,110	8.40	(30) 0.084
		5		133	266	854	1,128	13.30	(50) 0.133
高炉	40	0	41	150	375	752	1,078	* 0.938	(35) 0.131
		3		142	355	769	1,102	10.65	(130) 0.462
		5		130	325	792	1,136	16.25	(300) 0.975
	45	0	42	147	327	792	1,090	* 0.818	(25) 0.082
		3		141	313	804	1,106	9.39	(75) 0.235
		5		130	289	825	1,135	14.45	(140) 0.405
	50	0	43	145	290	827	1,093	(250) * 0.725	(17) 0.049
		3		135	270	846	1,117	8.10	(70) 0.189
		5		129	258	858	1,133	12.90	(85) 0.219

注 1) * AE 減水剤 2) () の単位は ℓ/c = 100kg

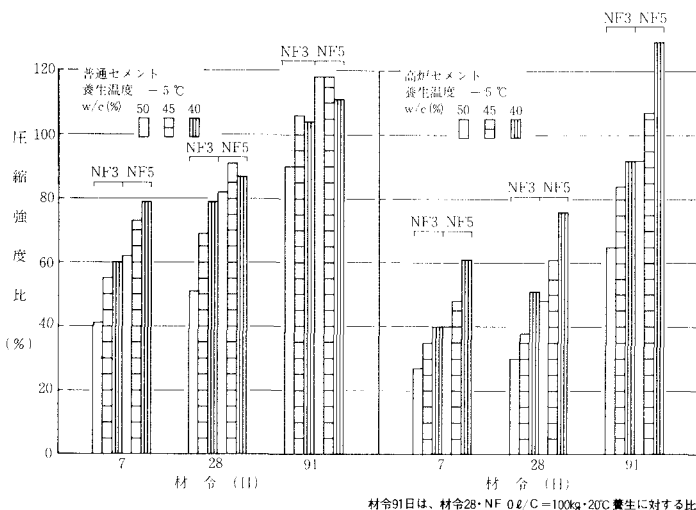


図-1 材令と圧縮強度比 (対NF 0 ℓ / c = 100kg・20℃養生) の関係

が異なってもよい相関を示すことが認められているとして、積算温度より強度を推定してもよいとしている。この手法がNFを用いたコンクリートを氷点下で養生した場合に適用可であるか検討した。図-2 は基準温度を -10°C とした積算温度と圧縮強度の関係の一例として示したが、水セメント比50%・NF使用量3 ℓ である一部の配合において養生温度が -5°C と $+20^{\circ}\text{C}$ で曲線が異なり同一積算温度で強度差があるものの、全体としては類似した。図-3 に単位水量当りのNF使用量と $+20^{\circ}\text{C}$ 養生に対する圧縮強度比（積算温度90 $^{\circ}\text{DD}$ ・840 $^{\circ}\text{DD}$ ）の関係を示したが、NF使用量が増加すると圧縮強度比も増大する傾向にあり、普通セメントでは、6.7 ℓ / $w=100\text{kg}$ (NF3 ℓ / $c=100\text{kg}$ ・ $w/c=45\%$)で強度比は100%程度となった。高炉セメントでは、普通セメントより強度比は小さく12.5 ℓ / $w=100\text{kg}$ (NF5 ℓ / $c=100\text{kg}$ ・ $w/c=40\%$)で強度比は100%となった。これらのことから、養生温度 -5°C において、積算温度から強度を推定する手法を用いることは、普通セメントでは、NF使用量が少ない水セメント比が大きいのもの以外は問題がないと思われるが、高炉セメントでは、逆にNF使用量が多い水セメント比が小さいもの以外について適用する場合は求めた値の補正などを行う必要があると考えられる。

3.2 耐凍害性

3.2.1 凍結融解

水セメント比および試験開始時の強度と耐久性指数の関係については4.2の検討で行うこととし、ここでは凍結融解によって発生した残留膨張より求めた凍伸度と耐久性指数の関係について述べる。図-4 は凍結融解の回数と凍伸度、相対動弾性係数の関係の一例として示したもので、水セメント比50%において、NF使用量3 ℓ では凍結融解の回数100回程度で相対動弾性係数が60%以下となったが、NF使用量5 ℓ では凍結融解の回数300回で相対動弾性係数が80%以上となった。同様に、凍伸度もNF使用量3 ℓ では凍結融解回数100回程度で $1,000 \times 10^{-6}$ 以上、NF使用量5 ℓ で凍結融解回

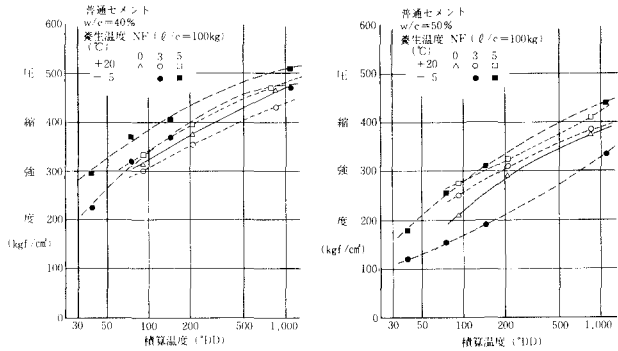


図-2 積算温度と圧縮強度の関係

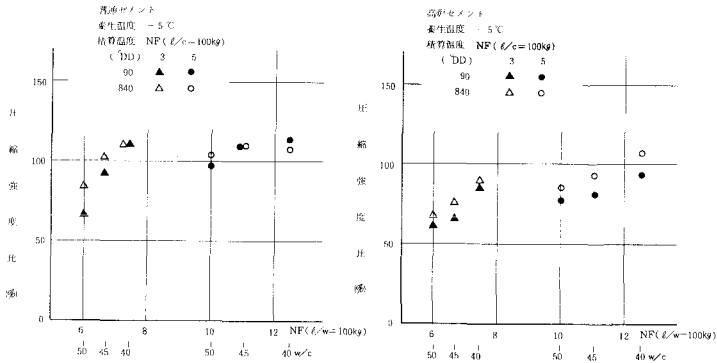


図-3 NF使用量と圧縮強度比（同一積算温度における対 20°C 養生）の関係

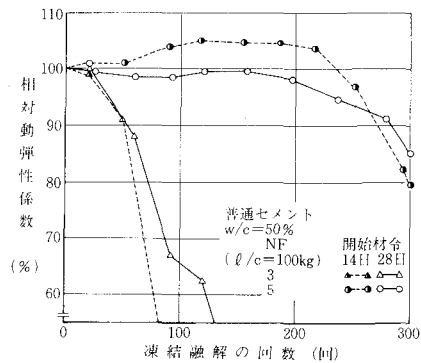
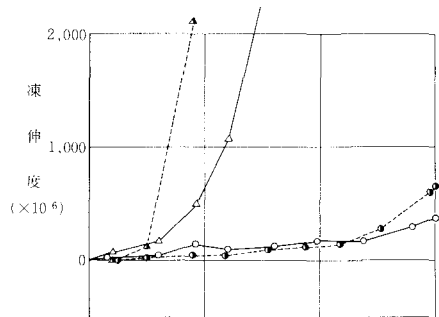


図-4 凍結融解の回数と凍伸度 相対動弾性係数の関係

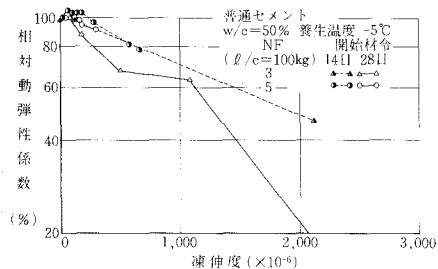


図-5 凍伸度と相対動弾性係数の関係

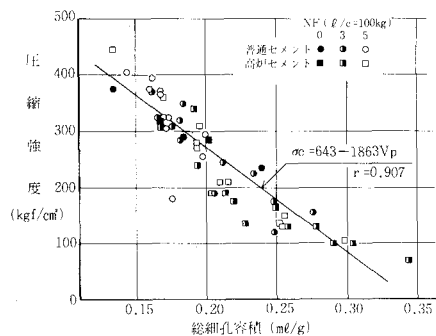


図-7 総細孔容積と圧縮強度の関係

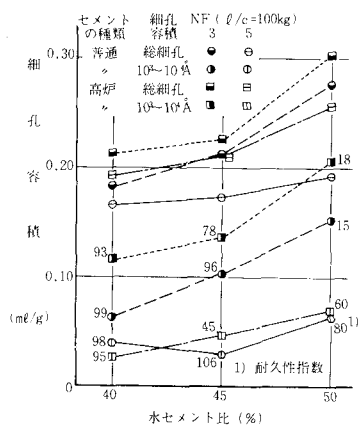


図-9 水セメント比と細孔容積の関係

数 300回

で $375 \sim 652 \times 10^{-6}$ となり、両関係とも同様な傾向となった。この関係を相対動弾性係数を対数とし、図-5 に示す。鎌田・洪²⁾はコンクリートの破壊の目安として $1,000 \times 10^{-6}$ の凍伸度を提案しており、この段階で相対動弾性係数は60%程度になると述べている。本試験においては、相対動弾性係数が60%となる凍伸度は $1,200 \sim 1,400 \times 10^{-6}$ となった。また、300サイクルの凍伸度と耐久性指数の関係を図-6 に示す。両者に直線関係が認められるが、凍伸度 $1,000 \times 10^{-6}$ で耐久

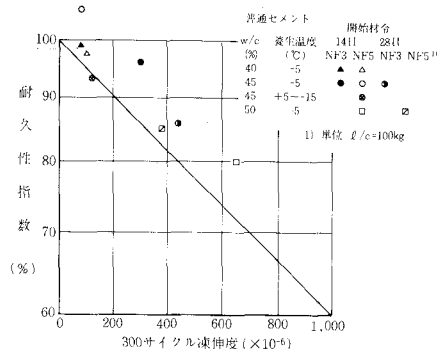


図-6 300サイクルの凍伸度と耐久性指数の関係

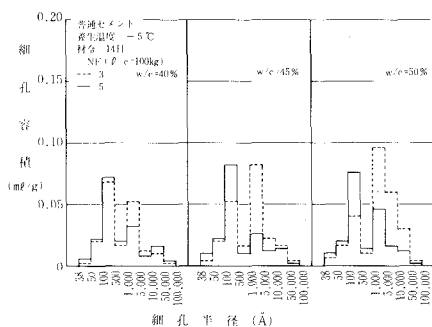


図-8 細孔分布(水セメント比・NF使用量)

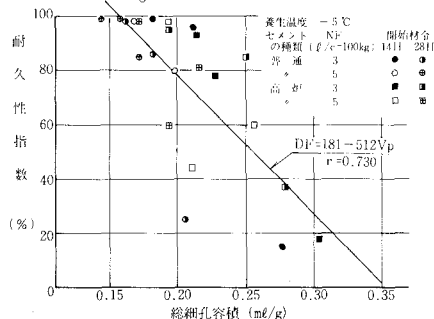
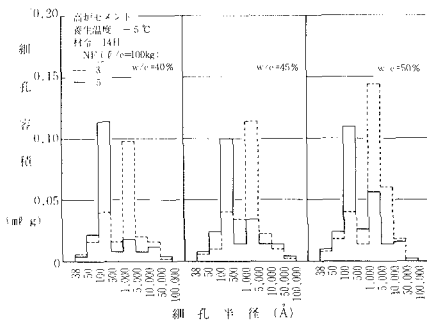


図-10 総細孔容積と耐久性指数の関係

性指数が 60%になる直線よりやや上に片寄ったものとなった。

3.3.2 細孔分布

細孔容積はセメントペーストの細孔量とし、総細孔容積と圧縮強度の関係を図-7 に示す。両者の関係を直線式で表わしたが異なった配合にかかわらず直線関係が認められ、圧縮強度 200kgf/cm²の総細孔容積は0.24ml/gであった。図-8 に養生温度-5℃、材令14日における細孔分布を示す。NF使用量を 3ℓ から 5ℓ にすると細孔半径のピークが 1,000~5,000Åから 100~500Åになり総細孔容積および凍害に悪影響あるとされている 1,000~10,000Åの細孔容積も減少した。図-9 に示すように、水セメント比が小さくなるとこれらの細孔容積は減少した。また、NF使用量を 3ℓ から 5ℓ に増すと細孔容積は減少し、水セメント比が50%と大きくなるとこの傾向は顕著となった。この傾向は図-4 に示すように凍結融解試験結果とも符合した。総細孔容積と耐久性指数の関係を図-10に示すが細孔容積が増加すると耐久性指数も低下し、耐久性指数60%の総細孔容積は0.23ml/g前後であった。

4. NF使用基準の検討

昭和60年度より実施した共同研究の試験結果をもとに NF の使用基準について検討した。

4.1 強度からの検討

NFを使用しない (NF0 ℓ) +20℃養生のものと、同一積算温度で同一の強度発現を得ることを目安として、各低温養生における必要NF使用量と水セメント比を検討した。図-11は NF使用量と 840^{DD} (+20℃養生・材令28日) における圧縮強度比 (同一積算温度における対NF0 ℓ ・ +20℃養生) の関係を示す。同一積算温度で20℃養生と同じ強度を得るためには、普通セメントの場合、養生温度が+5~-10℃ (日内温度サイクル)、-5℃ではNF使用量を 3ℓ ・水セメント比 45%以上もしくはNF 5ℓ とする必要がある、+2~-15℃ではNF 5ℓ でも強度比は80%程度となった。高炉セメントの場合、+5~-10℃ではNF 3ℓ ・水セメント比

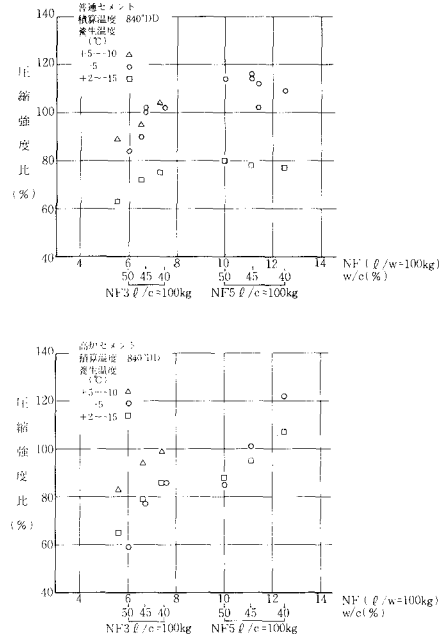


図-11 NF使用量と圧縮強度比 (同一積算温度におけるNF0ℓ・20℃養生) の関係

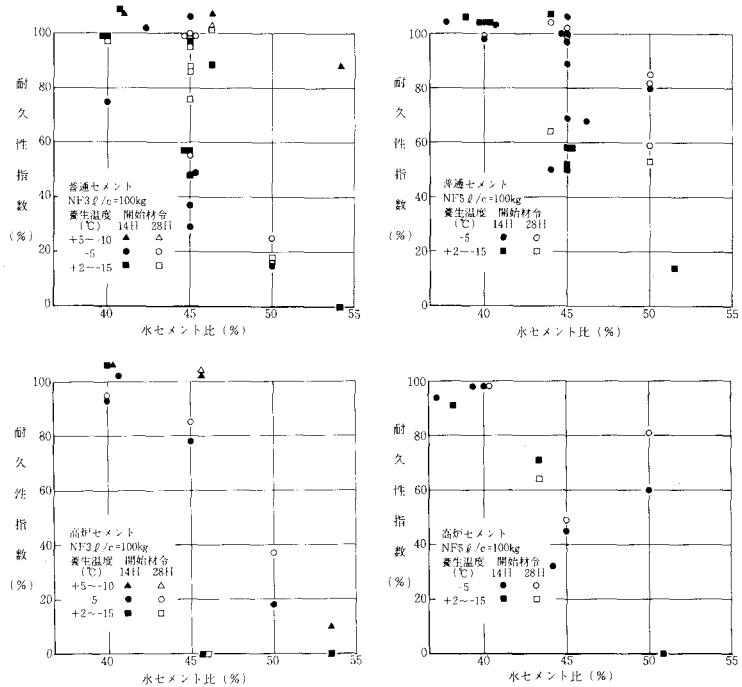


図-12 水セメント比と耐久性指数の関係

40%で得られたが、 $-5^{\circ}\text{C}+2\sim-15^{\circ}\text{C}$ ではNF 5ℓ・水セメント比45%以上とする必要が認められた。

4.2 耐凍害性からの検討

凍結融解試験より求めた耐久性指数60%を判定の目安とする考え方が一般的であり、図-12に示す水セメント比と耐久性指数の関係より検討を行った。普通セメントでNF使用量 3ℓの場合、養生温度 $+5\sim-10^{\circ}\text{C}$ では水セメント比が54.2%でも耐久性指数が88%となり、 -5°C 、 $+2\sim-15^{\circ}\text{C}$ でも水セメント比45%とすれば大概耐久性指数60%以上が得られている。なお、開始材令14日において耐久性指数が60%以下のものがあるが、それらは、凍結融解開始時の圧縮強度が 159～178kgf/cm²と低かった。NF 5ℓの場合、材令14日で水セメント比45%における耐久性指数は -5°C では平均で85%、 $+2\sim-15^{\circ}\text{C}$ では60%程度となった。高炉セメントの場合、NF 3ℓで $+5\sim-10^{\circ}\text{C}$ では水セメント比46%で耐久性指数が 100%であり、 -5°C では水セメント比45%における耐久性指数は80%程度となった。これに対しNF 5ℓでは逆に耐久性指数が 3ℓの場合より小さくなった。

このことから高炉セメントに対する使用基準を定めることは現状では困難と判断し今後さらに検討することとした。

凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係は図-13に示すとおりで、NF使用量、養生温度などの要因の相違によりある幅は認められるが、耐久性指数60%を得る圧縮強度は普通・高炉セメントとも 200kgf/cm²程度以上必要である。

4.3 NF使用基準（案）

耐凍害性確保の観点から検討したNF使用基準（案）を表-3 に示す。なお、本基準は、基礎資料の多くを室内試験に依存しており、今後、実構造物での施工結果も考慮しながらさらに検討する必要があると考えられる。

あとがき

以上、耐寒剤を用いたコンクリートの諸試験の結果から、所定のNF使用量と水セメント比で常温の普通コンクリートと同程度の施工性・強度・耐凍害性を確保できることが明らかとなった。今後、さらに現場施工実験も実施し、構造物の設計・施工条件、気象条件に適合した使用法に関して検討する考えである。

最後に、日曹マスタービルダーズ(株)中央研究所の各位に対し、深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 渡辺宏、大橋猛、今井益隆；耐寒剤を利用した寒中コンクリートの合理化に関する研究、土木試験所月報 No 400、pp. 27-36、1986.9.
- 2) 鎌田、洪；耐凍害性指標としての長さの適用性、セメント技術年報、X X V、昭和46

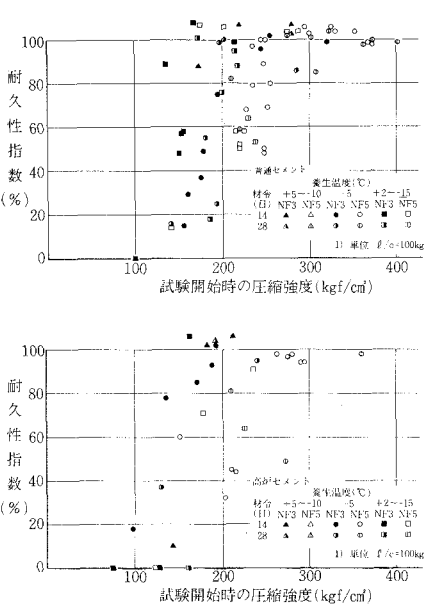


図-13 凍結融解開始時の圧縮強度と耐久性指数の関係

表-3 耐寒剤(NF)使用基準（案）

使用セメント	普通ポルトランドセメントが望ましい。
標準使用量 ¹⁾	平均気温 ²⁾ -3°C まで 3ℓ/c=100kg
	平均気温 $-3\sim-7^{\circ}\text{C}$ 、水セメント比45%、3ℓ/c=100kg または水セメント比50%、5ℓ/c=100kg
コンクリートを水の影響下に置く時に確保しなければならない圧縮強度	200kgf/cm ² 以上となるまで、受けない状態を保つ。

注) 1) 耐凍害性を確保し、同一積算温度において標準養生と同程度の圧縮強度を得るための必要量。

2) 平均気温は、コンクリート打込みより7日間または28日間の日平均気温の平均値の低い方とし、既存の気象資料により算出する。