

# 論文 氷点下でのコンクリートの強度増進性状と積算温度関数式に関する検討

三森 敏司\*1・大楽 隆男\*2・浜 幸雄\*3・桂 修\*4

**要旨：**本研究では、氷点下におけるコンクリートの強度増進性状とコンクリート中の水分凍結挙動に関する実験を行い、氷点下での強度増進に及ぼす不凍結水率の影響と積算温度関数式の見直しを行なった。その結果、氷点下では現行の積算温度と強度増進の関係が成立しないが、凍結時の積算温度を係数 $\alpha$ を用いた  $M = \Sigma \alpha (\theta + 10)$  により算出することにより、積算温度と強度増進の関係を補正することができた。また、この補正係数 $\alpha$ は、コンクリート中の不凍結水率に応じて変化し、不凍結水率が少ないほど補正係数 $\alpha$ は小さくなることを明らかにした。

**キーワード：**寒中コンクリート、強度増進、積算温度、不凍結水率

## 1. はじめに

寒中コンクリート工事では、保温養生を打ち切ったり型枠を取り外すために、構造体コンクリートの強度発現の状況を知ることが極めて重要であり、コンクリート強度を推定する必要がある調合計画、強度管理に積算温度関数式が幅広く利用されている<sup>1)</sup>。しかし、0℃以下の凍結条件下では、コンクリートの強度増進は大幅に遅延し、現行の積算温度方式はあてはまらないことが指摘されている<sup>2)</sup>。

本研究では、氷点下におけるコンクリートの強度増進性状を明らかにし、積算温度関数式の適用性について検討することを目的として、耐寒促進剤を用いることによりコンクリート中の水分の凍結挙動の異なる供試体を作製し、氷点下での強度増進に及ぼす不凍結水率の影響と積算温度関数式の見直しを行なった。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨

材は厚岸尾幌産碎石、細骨材はコイトイ産陸砂を用いた。AE減水剤はリグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を主成分とするものを用い、耐寒促進剤はポリグリコールエステル誘導体および無機質窒素化合物を主成分とする無塩化・無アルカリ型のもので耐寒成分とAE減水成分が併用されたタイプIとし、必要に応じて空気量調整用AE助剤を用いた。セメントおよび骨材の物理試験結果を表-1および

表-1 セメントの物理試験結果

普通ポルトランドセメント	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結時間 (h・m)		圧縮強さ (N/mm <sup>2</sup> )		
			始発	終結	3日	7日	28日
	3.16	3,390	2-17	3-27	30.5	44.7	61.3

表-2 骨材の物理試験結果

骨材種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	粗粒率
コイトイ産陸砂	2.59	1.71	1.75	68.7	2.76
尾幌産碎石	2.67	1.53	1.56	59.3	6.61

\*1 釧路工業高等専門学校助教授 建築学科 (正会員)

\*2 釧路工業高等専門学校教授 建築学科 (正会員)

\*3 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 博士 (工学) (正会員)

\*4 北海道立寒地住宅都市研究所 生産技術部材料開発科科长 博士 (工学) (正会員)

表-2に示す。

## 2.2 コンクリートの調合

試験に用いたコンクリートは、通常のAEコンクリートと耐寒促進剤の使用量をセメント100kgあたり3ℓ、5ℓの2水準とした合計3種類とした。耐寒促進剤を用いたのは、凍結条件でのコンクリート中の不凍結水率の違いが強度増進に及ぼす影響を把握するためである。コンクリートの調合は、水セメント比50%、スランプ18cm、空気量3.5%、練り上がり温度20℃とした試し練りにより決定した。表-3にコンクリートの調合および練り上がり性状を示す。コンクリートの練り混ぜは、水平2軸型強制練りミキサ（公称容量100ℓ）を用い、練り量を105ℓとして材料を一括投入して製造した。

## 2.3 凝結性状に関する実験

試験は、JIS A 6204附属書1に準拠して行った。ミキサによって練り混ぜられた約20℃のフレッシュコンクリートを呼び寸法5mmのふるいでふるって粗骨材を除去したモルタルをプラスチック製容器（内径145mm×内高163mm）に入れ、防湿フィルムで覆い、直ちに20℃の養生室へ移動した。試験は、ブリーディング水を取り除いた後、プロクター貫入試験機を用いて、1cm<sup>2</sup>の断面積を持つ貫入針を試料に鉛直な方向に約10秒間に25mm貫入させる時の貫入抵抗値が3.5N/mm<sup>2</sup>になるまでの経過時間を始発、それ以降は0.25cm<sup>2</sup>の断面積を持つ針を使用して28.0

N/mm<sup>2</sup>になるまでの経過時間を終結とし、この間に6回以上の貫入試験を繰り返した。

## 2.4 水分の凍結挙動の測定

コンクリート中の水分の凍結挙動を把握するために、交流二電極法<sup>3)</sup>により、コンクリートの凍結過程における温度と電気抵抗の変化を測定した。実験に用いた供試体はφ10×20cmの円柱とし、中心に電気抵抗測定用の電極と温度測定用の熱電対を埋め込み、打設後直ちに封かん状態とした。温度および電気抵抗の測定用電極の形状は、図-1に示す。電極はあらかじめ

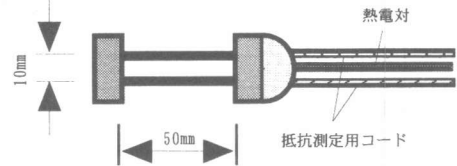


図-1 電極の形状

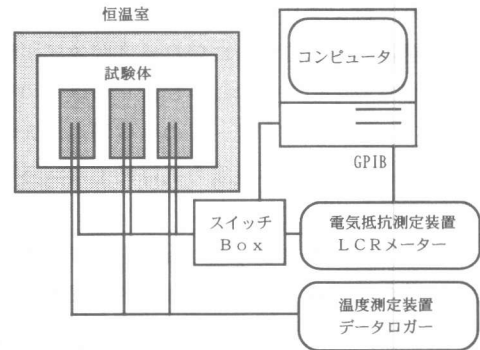


図-2 電気抵抗測定システム

表-3 コンクリートの調合および練り上がり性状

コンクリート種類	混和剤使用量 (ℓ/m)	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m)	絶対容積 (ℓ/m)			練り上がり性状			凍結温度 (℃)	
					セメント	細骨材	粗骨材	No.	温度 (℃)	スランプ (cm)		空気量 (%)
P	AE減水剤 0.86 (250mℓ/C=100kg)	50	46.9	172	109	321	363	1	21.8	20.9	4.0	0.0
								2	20.5	19.4	2.6	
								3	20.5	20.6	4.5	
AS3	耐寒剤 10.0 (3ℓ/C=100kg)	50	48.5	168	106	335	356	1	18.0	21.7	2.6	-1.1
								2	18.0	20.4	3.2	
								3	18.8	20.6	2.9	
AS5	耐寒剤 15.5 (5ℓ/C=100kg)	50	48.5	155	98	345	367	1	21.6	20.1	3.0	-2.7
								2	20.0	20.6	3.4	
								3	19.8	20.6	3.5	

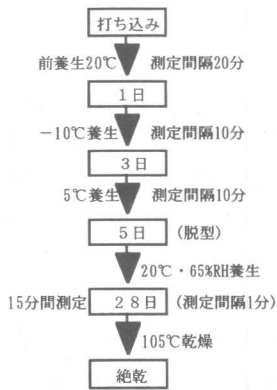


図-3 電気抵抗測定のプロロー

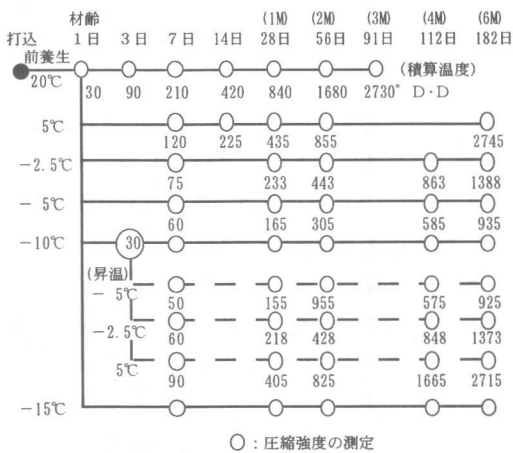


図-4 コンクリートの養生条件

0.01規定のKCl溶液でキャリブレーションを行い、各電極の形状係数を求めた。図-2に測定に用いたシステムを示す。電気抵抗をスイッチボックスおよびLCRメーターを用い、コンピューター制御により自動測定すると同時に、データロガーにより温度を記録した。図-3に電気抵抗測定のプロローを示す。なお、測定された供試体の温度履歴と比抵抗の変化から、比抵抗が急激に変化する温度を凍結温度として読み取った。また、電気抵抗測定後の供試体は、質量測定後、105℃の乾燥器内で恒量となるまで乾燥し、質量変化から含水率を算出した。

### 2.5 強度増進性状に関する実験

圧縮強度用供試体はφ10×20cmの円柱とし、打ち込み後20℃で前養生を24時間行った後、所

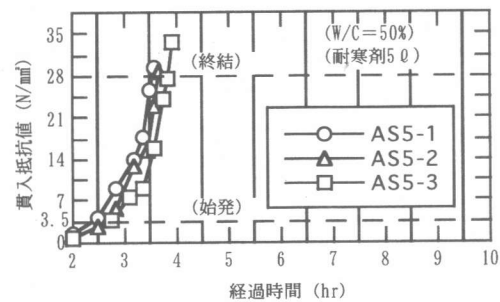
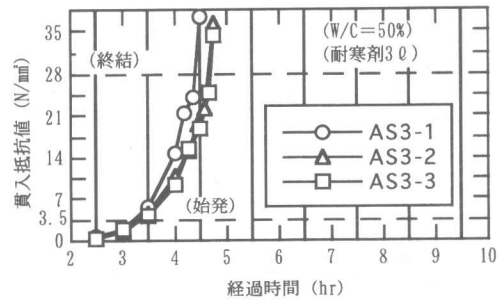
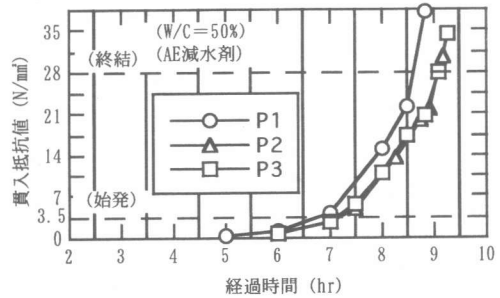


図-5 プロクター貫入抵抗値による凝結性状

定の条件で養生を開始した。圧縮強度の測定は、それぞれの養生温度ごとに定めた初期材齢から長期材齢までの5~7材齢で行った。図-4に養生条件と測定材齢を示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 コンクリートの凝結性状と比抵抗の関係

図-5に養生温度20℃のプロクター貫入抵抗値による凝結試験結果を示す。P1~P3の凝結は、始発6時間45分~7時間10分、終結8時間37分~9時間5分であった。耐寒促進剤を使用したコンクリートの凝結は、AS3の始発が約3時間15分、終結が4時間23分~4時間42分であるのに対して、AS5では始発2時間25分~2時間40分、終結3時間33分~3時間50分と使用量の増加により、凝結促進効果が顕

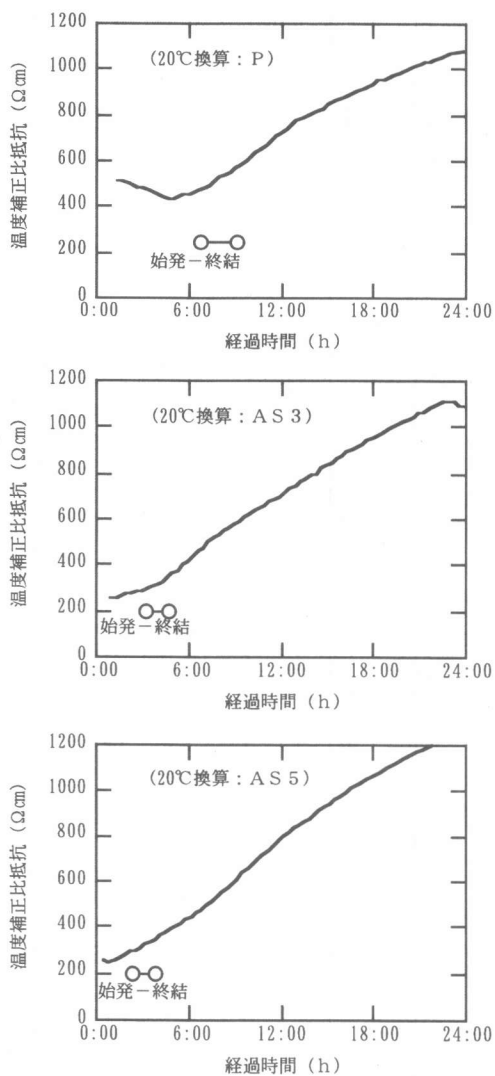


図-6 練上がり直後から材齢24時間までの各コンクリートの比抵抗の変化と凝結時間

著に認められた。

練上がり直後から材齢24時間までの各コンクリートの比抵抗の変化と凝結時間をあわせて図-6に示す。コンクリートの比抵抗は、コンクリートの温度、含水率およびイオン濃度により変化するが、ここでは温度の影響を除去するために20℃での比抵抗に換算した値を用い、含水率とイオン濃度の変化に対応する比抵抗の変化を示している。普通AEコンクリート(P)では、凝結の始発直前に比抵抗が最小値となって

いるが、耐寒促進剤を用いたコンクリート(AS3およびAS5)では練上がり直後から比抵抗は増加している。この時の比抵抗の変化は、セメントからの電解質の溶出によるイオン濃度の上昇とセメントの水和による水の消費に起因するものと考えられる。Pでは、練上がり直後から始発直前まではイオン濃度が急激に上昇するために比抵抗が低下し、始発以降は水和による水の消費の影響が卓越して比抵抗が増加しているものと考えられ、練上がり直後からの比抵抗の変化から凝結挙動をとらえられる可能性がある。一方、AS3およびAS5では、耐寒促進剤の影響で練上がり時から比抵抗が小さく、イオン濃度の変化よりも水和による含水率の変化の影響が大きいことから、Pと異なる挙動を示しているものと思われる。

### 3.2 氷点下におけるコンクリートの強度増進性状と不凍結水率の変化

図-7に現行方式による積算温度と圧縮強度の関係を示す。普通AEコンクリート(P)の場合、マイナスの養生温度では強度増進が大幅に遅延し、プラス温度での積算温度と強度増進の関係が成立していない。一方、耐寒促進剤を用いたコンクリートでも-5℃養生ではPと同様にプラス温度での積算温度と強度増進の関係が成立していないが、-2.5℃養生の場合にはプラス温度の強度増進と対応している。また、一定温度で養生したものと-10℃で一旦凍結後に温度を変えたものの強度増進の差は認められない。なお、積算温度算出の基準温度である-10℃以下の温度においてもわずかに強度発現が認められた。

RILEMの寒中コンクリート施工指針<sup>4)</sup>では、0℃以下の温度範囲ではニケネンの提案した式(1)が採用されている。

$$M = \sum 0.2 (\theta + 15) \quad (-15 \leq \theta \leq 0) \quad (1)$$

図-8にRILEM指針による積算温度と強度の関係を示す。しかし、積算温度の基準温度を変化させることは、現行の積算温度方式における地域の寒冷度を表わす尺度としての実務的

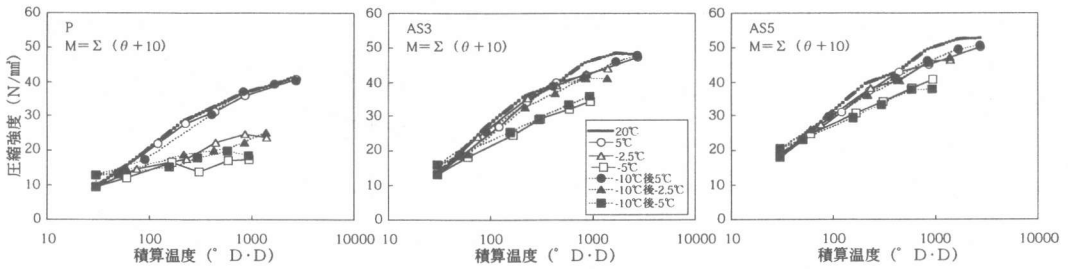


図-7 現行方式による積算温度と強度の関係

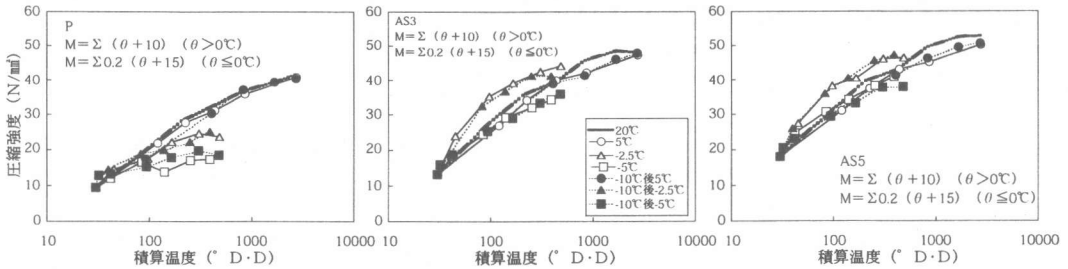


図-8 RILEM指針による積算温度と強度の関係

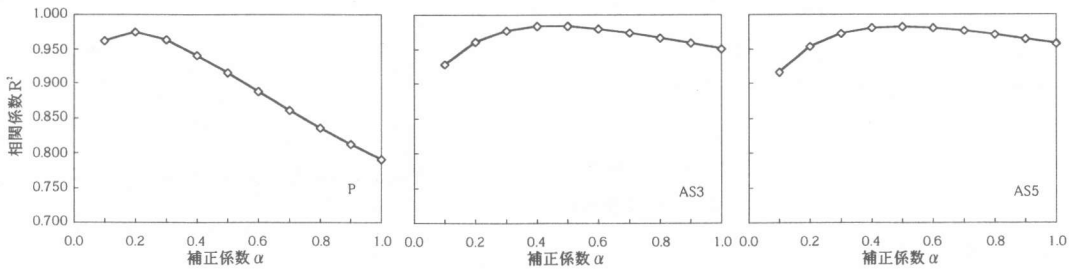


図-9 ロジスティック曲線による推定値と実験値の相関性の変化

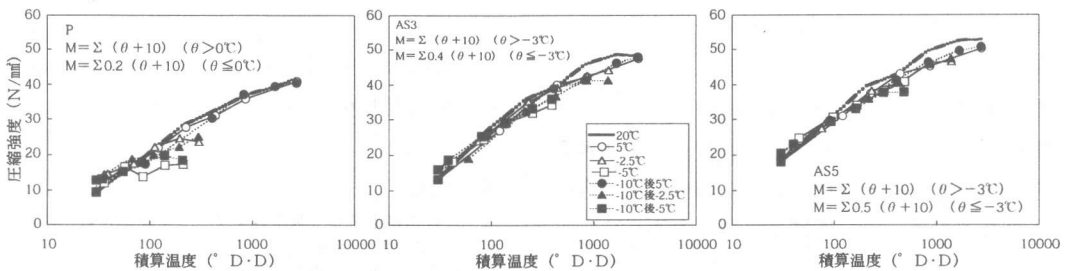


図-10 補正係数α導入による積算温度と強度の関係

な有用性を損なうことになる。そこで、それぞれのコンクリートについて、20℃および5℃養生での積算温度と圧縮強度の関係をロジスティック曲線で近似し、凍結時の積算温度を式(2)式として、αを0.1～1.0まで変化させて算出した場合のロジスティック曲線による推定

値と実験値の相関性の変化を図-9に示す。

$$M = \Sigma \alpha (\theta + 10) \quad (2)$$

この結果、Pではα=0.2、AS3ではα=0.4、AS5ではα=0.5の時に最も相関が高くなっている。なお、式(2)の適用範囲は、図-7において基準となるプラス温度での積算温

度と強度増進の関係が成立していない温度範囲とし、Pで0℃以下、AS3およびAS5で-3℃以下とした。ここで得られた $\alpha$ を用いて算出した積算温度と強度の関係を図-10に示す。現行の積算温度を用いた場合に見られる凍結時の強度のかたよりが補正されることがわかる。

コンクリートの含水率は温度と比抵抗から式(3)により求まり<sup>3)</sup>、凍結過程のある温度における見かけの含水率 $M$ の凍結前の含水率 $M_0$ に対する割合が不凍結水率 $W_n$ として式(4)で算出される。

$$M = (\ln \rho - a_2 - c_2/T) / b_2 \quad (3)$$

ここに、 $M$ : コンクリートの含水率 (%)

$a_2, b_2, c_2$ : 定数

$$W_n = M / M_0 \quad (4)$$

図-11にコンクリートの氷点下の不凍結水率の変化を示す。不凍結水率は温度の低下とともに減少している。また、耐寒促進剤の使用量が多いほど、凍結温度は低下し、不凍結水率も増加していることがわかる。

図-12は不凍結水率と補正係数 $\alpha$ の関係を示したものである。なお、ここでは強度試験用供試体の養生温度である-2.5、-5および-10℃での不凍結水率の平均値を用いている。補正係数 $\alpha$ はコンクリート中の不凍結水率に対応して変化しており、不凍結水率が少ないほど補正係数 $\alpha$ は小さくなっている。また、コンクリートの水セメント比、凍結開始材齢によっても不凍結水率および補正係数 $\alpha$ が異なることが考えられるため、実用的な補正方法の確立には今後より多くのデータの蓄積が必要である。

#### 4. まとめ

- (1) 普通コンクリートでは、練り上がり直後からの比抵抗の変化から凝結挙動をとらえられる可能性がある。
- (2) 氷点下では現行の積算温度と強度増進の関係が成立しないが、凍結時の積算温度を係数 $\alpha$ を用いた式(2)により算出することにより、積算温度と強度増進の関係を補正することができ

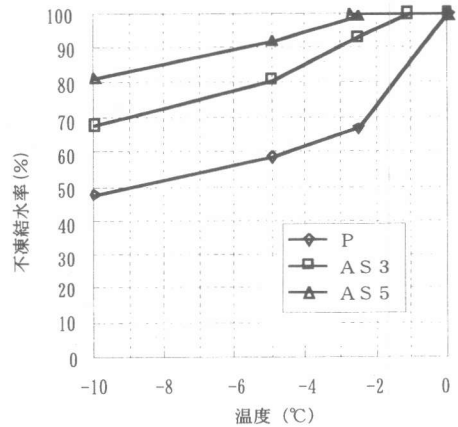


図-11 コンクリートの不凍結水率の変化

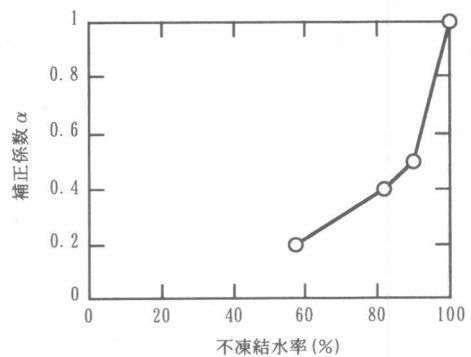


図-12 不凍結水率と補正係数 $\alpha$ の関係

る。

(3) 補正係数 $\alpha$ は、コンクリート中の不凍結水率に応じて変化する。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説(第4版)、1998
- 2) 浜 幸雄・鎌田英治：耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結環境下における強度増進性状と水分凍結、コンクリート工学論文集 Vol. 8, No. 2, pp. 73~80, 1997. 7
- 3) 桂 修・吉野利幸・鎌田英治：交流二電極法によるセメント硬化体中の凍結水量測定と水分凍結の細孔構造依存性、コンクリート工学論文集 Vol. 7, No. 1, pp. 57~66, 1996. 1
- 4) 洪 悦郎：RILEMの寒中コンクリート施工指針、セメント・コンクリート No. 214, pp. 21~32, 1964. 12