

論文 凍結条件下におけるコンクリートの強度増進性状におよぼす水セメント比および凍結開始材齢の影響

三森 敏司*¹・大楽 隆男*²・浜 幸雄*³・桂 修*⁴

要旨: 本研究では、凍結開始材齢および水セメント比の異なるコンクリートの凍結時の強度増進と水分挙動に関する実験を行い、凍結条件下におけるコンクリートの強度増進性状を表わす積算温度関数式の補正方法について検討した。その結果、凍結材齢が異なる場合でも、 α を使うことによって強度のかたよりを補正することができる。この補正係数 α は水セメント比が大きいほど小さいが、凍結開始材齢による差は小さく、凍結開始材齢によらず一定の値としても、実用上十分な精度で補正することができる。また、補正係数 α は不凍結水率が少ないほど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, 補正係数 α , 不凍結水率

1. はじめに

寒中コンクリート工事では調合計画および強度管理に積算温度関数式が幅広く用いられている。しかし、積算温度と圧縮強度の関係は0℃以上の温度範囲での適合を基本としたものであり、0℃以下の条件では同じ積算温度でも圧縮強度はかなり小さくなる。実施工において管理材齢を延長し継続養生を行わない場合には、初期養生終了後にコンクリート温度が0℃以下となることがあり、その場合には通常の積算温度関数式を適用することはできない。このため、0℃以下の温度範囲で適用可能な積算温度関数式の検討を行う必要がある。著者らは、前報¹⁾において、凍結時の積算温度を補正係数 α を用いた $M = \sum \alpha (\theta + 10)$ により算出することによって積算温度と強度増進の関係を補正することができ、この補正係数 α はコンクリート中の不凍結水率が少ないほど小さくなることを明らかにした。

本研究では、凍結時の積算温度の補正係数

α に対する水セメント比および凍結開始材齢の影響について検討を行った。

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砕石、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

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 ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結時間 (h・m)		圧縮強さ (N/mm ²)		
			始発	終結	3日	7日	28日
	3.16	3,360	2-20	3-28	28.7	43.5	60.7

表-2 骨材の物理試験結果

骨材種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	粗粒率
コイト産陸砂	2.59	1.75	1.75	68.7	2.54
尾幌産砕石	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-3 コンクリートの調合および練り上がり性状

記号	混和剤 (ℓ/m^3)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m^3)	絶対容積 (ℓ/m^3)			質量 (kg/m^3)			練り上がり性状		
					セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	温度 ($^{\circ}C$)	スランプ (cm)	空気量 (%)
P40	AE減水剤 1.125 (250ml/C=100kg)	40	42.5	180	142	273	370	450	707	988	20.9	19.1	4.7
											20.4	19.4	4.7
											19.8	19.4	4.4
P50	AE減水剤 0.860 (250ml/C=100kg)	50	46.9	172	109	321	363	344	831	969	22.3	17.9	5.2
											21.2	19.3	5.3
											22.2	17.7	4.7
P60	AE減水剤 0.700 (250ml/C=100kg)	60	47.5	168	89	336	372	280	870	993	21.0	18.2	3.2
											19.5	18.4	3.2
											19.4	19.0	3.4
AS4	耐寒剤 12.880 (4 ℓ /C=100kg)	50	48.4	161	102	340	362	322	881	867	20.0	21.0	5.7
											20.1	21.7	5.9
											19.9	21.6	5.5

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空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AE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-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、水セメント比40、50、60%の通常のAEコンクリート3種類と耐寒促進剤の使用量をセメント100kgあたり4 ℓ とした合計4種類とした。コンクリートの調合は、スランプ18cm、空気量3.5%、練り上がり温度20 $^{\circ}C$ を目標とし、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を用い、練り量を92 ℓ として3バッチに分けて製造した。

2.3 強度増進性状に関する実験

図-1にコンクリートの養生条件と試験材齢を示す。圧縮強度用供試体は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱とし、打ち込み後材齢1、3、7日目までは20 $^{\circ}C$ で養生を行い、その後所定の条件(20 $^{\circ}C$ 、-2.5 $^{\circ}C$ 、-5 $^{\circ}C$ 、-8 $^{\circ}C$)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

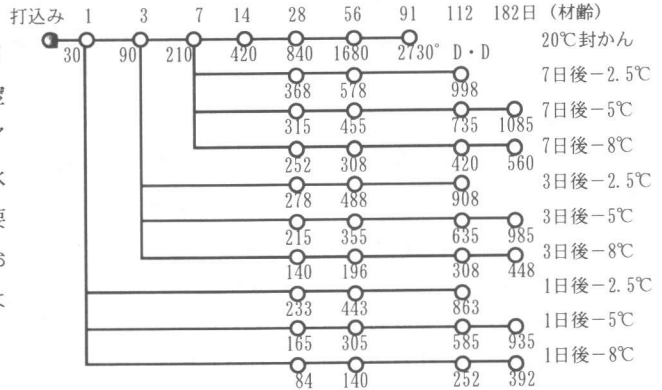


図-1 コンクリートの養生条件と試験材齢

定めた初期材齢から長期材齢までの3~7材齢で行った。

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²⁾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 $\phi 10 \times 20$ cm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-2に示す。電極はあらかじめ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-3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-4に電気抵抗測定のプロローを示す。なお、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。

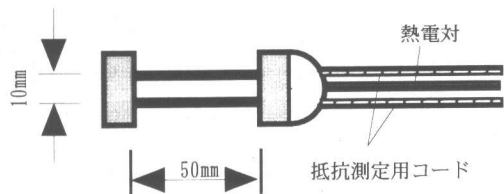


図-2 電極の形状

3. 実験結果および考察

3.1 凍結条件下での積算温度の補正

水セメント比、凍結開始材齢、耐寒促進剤の使用の有無によらず、凍結条件下におけるコンクリートの強度増進は、プラスの温度条件での積算温度と圧縮強度の関係との乖離が認められた。しかし、その程度はコンクリートの条件および養生条件により異なるものとなっている。

ここでは、まず20℃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、次に凍結条件下での積算温度を(1)式で算出することとし、補正係数 α を0.1~1.0まで変化させて得られた積算温度に対応するロジスティック曲線による圧縮強度の推定値と実験値の相関性から、それぞれの条件で最適な補正係数 α の値を求める。

$$M = \sum \alpha (\theta + 10) \quad (1)$$

コンクリート種類および凍結開始材齢ごとの補正係数 α に対する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-5に示す。この図から最も相関性が高くなった補正係数 α を求め、それぞれの凍結開始材齢に対する最適な補正係数 α をコンクリート種類ごとに図-6に示す。水セメント比が小さいほど補正係数 α は大きく、また耐寒促進剤を使用したコンクリートの補正係数 α は大きくなっている。しかし、凍結開始材齢による差はそれほど大きくない。また、図-7に補正なしの場合、凍結開始材齢ごとに最適な補正係数 α を用いた場合、三つの凍結開始材齢ごとの最適な補正係数 α の平均値を用いた場合について、コンクリート種類ごとにロジスティック曲線による推定値と実験値の相関性を比較して示す。補正係数 α を凍結開始材齢ごとに定めた場合と平均値を用いた場合とでその相関性に大きな差がない。

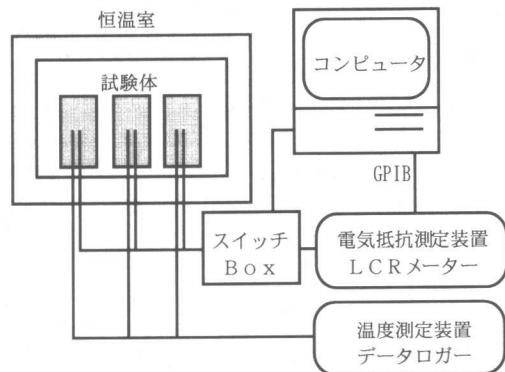


図-3 電気抵抗測定システム

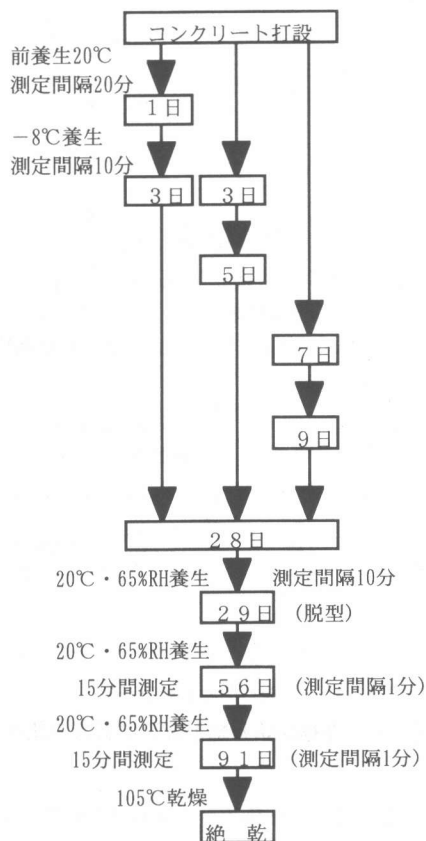


図-4 電気抵抗測定のプロロー

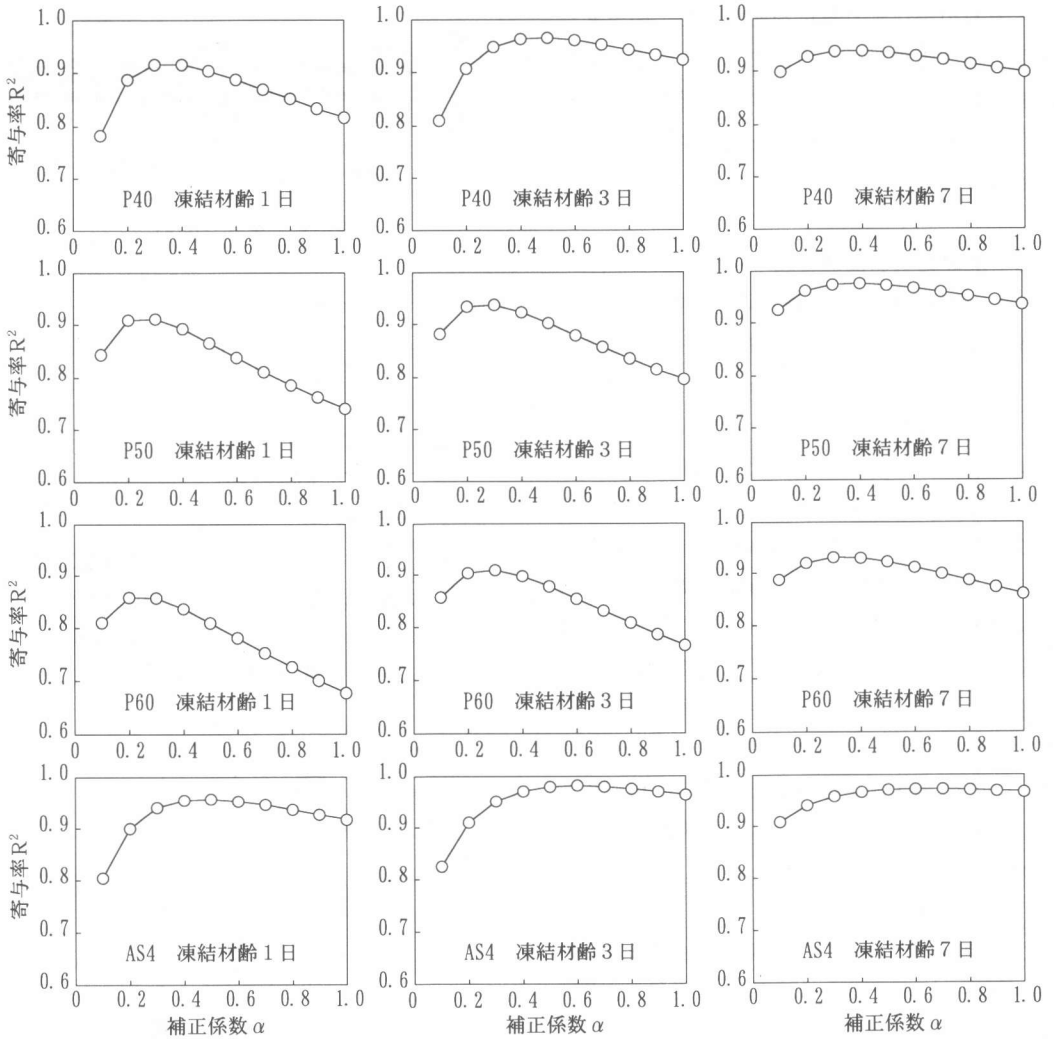


図-5 ロジスティック曲線による推定値と実験値の相関性の変化

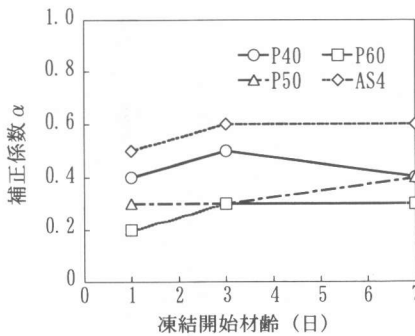


図-6 凍結開始材齢と補正係数 α の関係

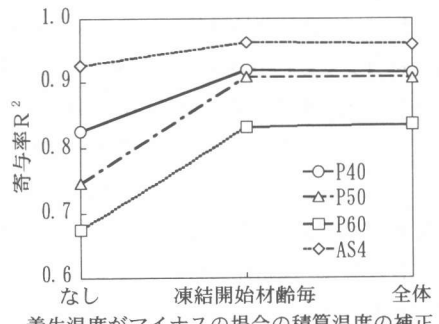


図-7 補正係数 α 導入による相関性

このことから、補正係数 α は凍結開始材齢によらず一定とし、コンクリート種類ごとに定めるとすると、P40では $\alpha = 0.4$ 、P50とP60では

$\alpha = 0.3$ 、耐寒促進剤を用いたAS4では $\alpha = 0.6$ となった。なお、(1)式の適用範囲は、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、普通AEコンクリートで0℃以下、耐寒促進剤を用いたAS4で-3℃以下とする。

現行の積算温度を用いた場合とここで得られた補正係数 α を用いて積算温度を算出した場合について、積算温度と圧縮強度の関係を図-8に示す。現行の積算温度の場合は、0℃以下の養生条件ではいずれも20℃養生の基準線と一致せず、温度が低いほどその差も大きい。一方、補正係数 α を用いた場合には、い

ずれの条件においてもほぼ20℃養生の基準線と一致している。しかし、材齢1日で、-5℃以下で養生したものについては、やや基準線を下回る結果となっており、その差は水セメント比が大きいほど大きい傾向にある。

3.2 不凍結水率と補正係数 α との関係

コンクリートの含水率は温度と比抵抗から求め、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 として算出される²⁾。

図-9に凍結開始材齢ごとに養生温度に対す

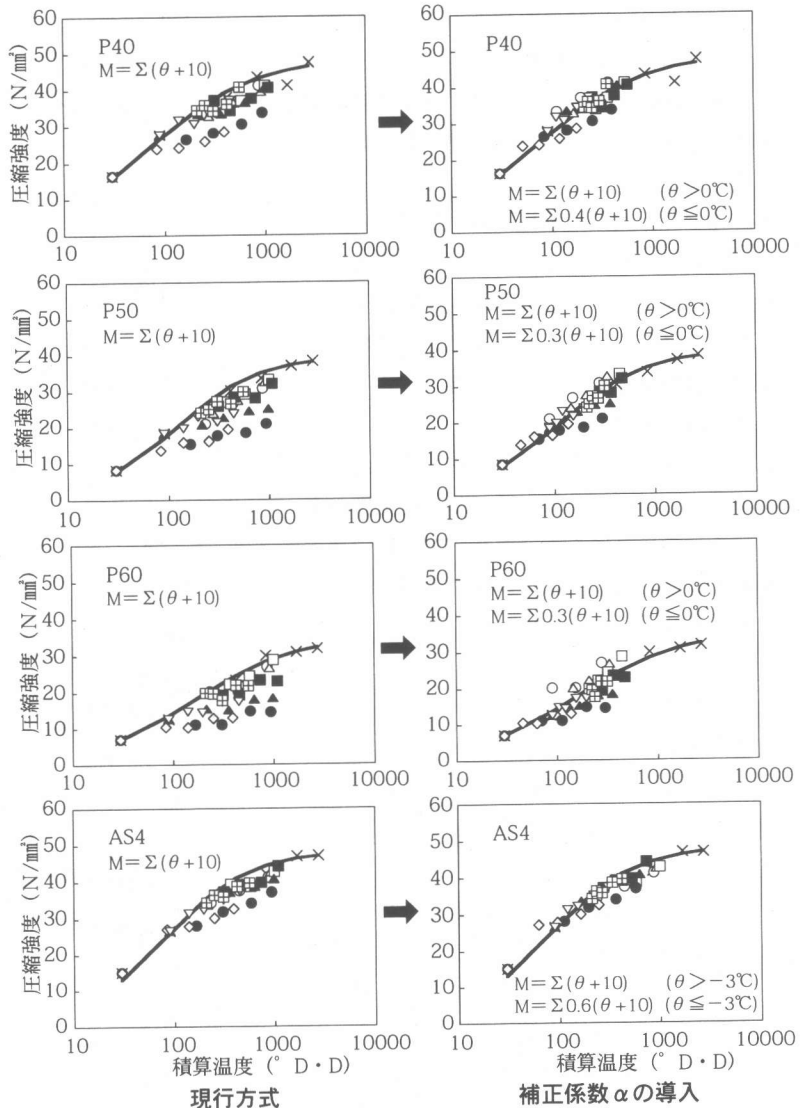


図-8 補正係数 α 導入による積算温度と圧縮強度の関係の変化

るコンクリート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、水セメント比が小さいほど、凍結までの前養生期間が長いほど不凍結水率は増加しており、耐寒促進剤を用いた場合にも不凍結水率が多くなっている。

図-10は不凍結水率と補正係数 α 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-8℃での不凍結水率の平均値を用いている。補正係数 α 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、凍結開始材齢1日では不凍結水率が少ないほど補正係数 α は小さくなっているが、凍結開始材齢3日と7日では不凍結水率が小さくなるにつれ補正係数 α の差が小さくなっている。

本研究では、凍結開始材齢および養生温度によらず水セメント比ごとに一定として補正係数 α を求め、凍結条件での積算温度を補正することにより、実用的には十分な精度で強度増進との関係を表現できることを示した。しかし、凍結条件での強度増進はコンクリート中の水分の状態（不凍結水率、化学ポテンシャルなど）に依存することは明らかであり、それは温度および材齢の影響を受けることから、厳密には補正係数 α も温度および材齢の影響を考慮すべきものと考えられる。

4. まとめ

凍結条件下におけるコンクリートの強度増進性状を表わす積算温度関数式 $[M = \sum \alpha (\theta + 10)]$ の補正係数 α について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 水セメント比が大きいほど小さい。
- (2) 凍結開始材齢による差は小さく、凍結開始材齢によらず一定の値としても、実用上十分な精度で補正することができる。
- (3) 不凍結水率が少ないほど小さくなる。

参考文献

- 1) 三森敏司, 大楽隆男, 浜 幸雄, 桂 修: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol. 22, No. 2, pp. 553 ~ 558, 2000. 6
- 2) 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
- 3) 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

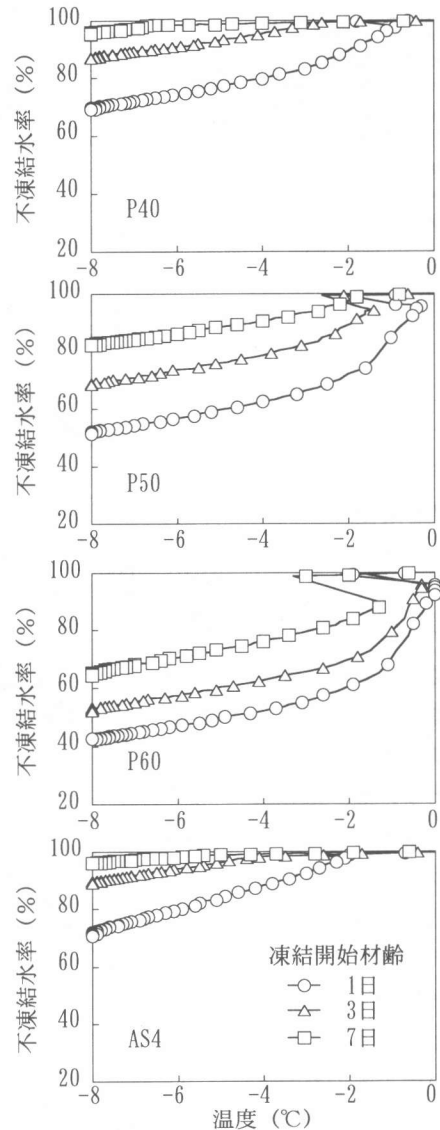


図-9 コンクリートの不凍結水率の変化

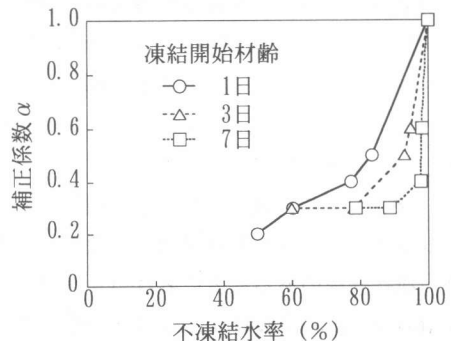


図-10 不凍結水率と補正係数 α の関係