

氷点下のコンクリート強度増進と温度時間関数

A PROPOSAL OF TEMPERATURE-TIME FUNCTION ON THE STRENGTH DEVELOPMENT
OF CONCRETE UNDER SUB-ZERO TEMPERATURE

谷口 円*, 桂 修**, 濱 幸雄***

Madoka TANIGUCHI, Osamu KATSURA and Yukio HAMA

Compressive strength development of concrete is essential for cold weather concreting. It is well known that strength development of concrete under the freezing point is much delayed. But the evaluation method has not been shown clearly yet. Therefore when average outside air temperature is under the freezing point planning method of cold weather concreting is not clear. We focus on the concept of equivalent maturity method proposed by Sudo, attempted to propose a time-temperature function representing the strength development of concrete under sub-zero temperature. As a result, we have proposed a function to calculate the maturity under sub-zero temperature. The proposed function could explain the strength development of the concrete exposure in winter.

Keywords: Strength Development, Cold Weather Concreting, Under Sub-zero Temperature, Maturity

強度増進性状, 寒中コンクリート, 氷点下, 積算温度

1. はじめに

コンクリートの強度増進は、セメントの水和反応に依存し、温度の影響を強く受ける。温度履歴の異なるコンクリートの強度増進は、温度と時間の複合的な影響を関数として表し、計算値が同じ値となる場合には、履歴にかかわらず同じ強度が得られるとする温度時間関数により記述される。これにより、温度履歴測定による部材の圧縮強度推定等が可能となっている¹⁾。わが国では、積算温度が広く用いられ、日本建築学会「寒中コンクリート工事施工指針・同解説」では、気象条件とあわせて体系化されている²⁾。1998年版には積算温度による強度増進の標準曲線が示され、0℃以上の寒中コンクリート工事でのコンクリートの強度増進予測手法が普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種について示されている。しかしながらこの手法については、調査計画時に算定されるコンクリート強度と実測値との乖離がみられる点、氷点下の積算温度の算出方法が明確に示されていない点等の問題点が指摘されている³⁾。

氷点下の温度で養生されたコンクリートでは、0℃以上の温度での圧縮強度増進性状とは異なり、強度増進が著しく遅れることが知られている。積算温度は、0℃以上の温度範囲のデータをもとに提案さ

れたものである。そのため、氷点下でのコンクリートの強度増進を表すことは補外にあたる。しかしながら、近年では、初期養生終了後採暖を行わずに、材齢を延長し強度管理を行う工程が組まれる場合が増えてきている。この場合は、的確な強度発現予測による工程管理ができず、氷点下温度範囲でも0℃以上の積算温度と同等に扱える温度時間関数の提案が望まれている。

既往の研究において、氷点下の強度増進を表現する温度・時間関数としてはNykanenによる積算温度が提案されている。積算温度の基準温度は-10℃であるのに対しNykanenの積算温度では基準温度を-15℃とし、その0.2倍を積算温度とすることで実験結果がうまく整理されるとしている。しかし、この手法では0℃を境に不連続な積算温度が得られ、-15℃以下の積算温度は算定できない。また、基準温度を-10℃とする積算温度をそのまま用い、算出値に氷点下での低減係数 α を乗じて氷点下の積算温度をあらわす式が三森ら⁴⁾⁵⁾⁶⁾により示されている。しかし、この式は適用範囲が-10℃以上に限られる上、低減係数 α は水セメント比ごとに異なる値であり、汎用性を持った実用式としての利用は難しい。

須藤ら⁷⁾は乾燥及び凍結を受ける条件下での硬化セメントペーストの結合水率の変化から見かけの反応率を求めた実験から、乾燥、

* 北海道立北方建築総合研究所生産技術部技術材料開発科
研究職員・工修
(室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻
博士後期課程)

** 北海道立北方建築総合研究所
居住科学部主任研究員・博士(工学)

*** 室蘭工業大学大学院くらし環境系領域
准教授・博士(工学)

Researcher, Materials and Properties Section, Production Engineering Dept., Hokkaido Northern Regional Building Research Ins., M. Eng.
(Graduate Student, Graduate School of Eng., Muroran Institute of Technology)

Senior Researcher, Residential Planning Dept., Hokkaido Northern Regional Building Research Ins., Dr. Eng.
Assoc. Prof., College of Environmental Technology, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

凍結による反応水の化学ポテンシャル変化に着目し、Arrhenius 則で記述した反応速度定数の見かけの活性化エネルギーが変化するものとして等価材齢を算定し、これを積算温度に換算した等価積算温度を提案している。

ここでは、須藤らの研究に基礎を置き、氷点下の強度増進における温度時間影響を一義的に表現することのできる氷点下の積算温度算出式を得ることを目的とし、実験検討を行った。はじめに、普通ポルトランドセメント、及びフライアッシュセメント B 種を使用した水セメント比 30～60%のコンクリートの強度増進性状について、氷点下を含む広い範囲の一定温度での実験室実験を行い、氷点下の積算温度式提案を行った。さらに、実験室実験とはメーカーの異なるセメントを使ったレディミクストコンクリートを用いて北海道旭川市の寒中コンクリート期間に屋外暴露養生を行ったコンクリートでの圧縮強度増進実験を行い、提案式の適合性について検討を行ったものである。

2. 氷点下を含む一定温度での圧縮強度増進

2.1 実験計画

実験計画を表 1 に示す。実験は養生温度を 0℃以上で 3 水準の一定温度としたシリーズⅠと養生温度を氷点下とするシリーズⅡに分けて行った。使用するセメントは表 1 に示す 2 種類とした。水セメント比は高強度コンクリートを含めた 30%から 60%の 10%きざみの 4 水準とした。

寒中コンクリートの練り上がり温度は 10 から 20℃の範囲とされ、温水を使用する時期のコンクリート練り上がり温度は 15℃程度であるため、目標練り上がり温度を 15℃とした。

打設後のコンクリートは成形後直ちにシリーズⅠでは設定養生温度 5℃、20℃、35℃の温度に調整した恒温室内で所定の材齢まで封緘養生した。一方、寒中コンクリート工事では初期凍害防止のため、打設直後からコンクリートが氷点下にさらされることを避けている。よって、シリーズⅡの氷点下温度での養生は、初期養生相当の前養生終了後に受けることとした。コンクリートは前養生として、10℃に調整した恒温室で 5～10N/mm²の圧縮強度になるまで養生し、強度発現を確認した後、氷点下温度 (-1, -5, -10℃) に調整した恒温室に移動し封緘状態で所定の材齢まで養生を継続した。なお、-1℃養生は、10℃で前養生したコンクリートをそのまま移動すると、コンクリート内部の細孔中に存在する水分が凍結しないと考えられる。

そのため事前検討の結果から、10℃の前養生の後、-5℃の恒温室で 1 日置き、中心温度を-5℃まで低下させた後、-1℃の恒温室に移動することとした。実際の実験時は、埋め込んだ熱電対により温度測定を行い、中心温度が-1℃で安定したことを確認した後前養生終了 2 日後の圧縮強度を測定した。この前養生終了 2 日後の圧縮強度の測定は、氷点下の温度条件すべてで行い、氷点下での強度増進の起点として扱った。その後所定の材齢まで養生を行った。

封緘養生供試体の圧縮強度試験材齢は表 1 に示す材齢とした。

2.2 使用材料及び調合

セメントは、普通ポルトランドセメント、フライアッシュセメント B 種の 2 種類とした。シリーズⅠ、Ⅱで使用した普通ポルトランドセメントの物理性状と Bogue 式による鉱物組成を表 2 に示す。フライアッシュセメント B 種は、練り混ぜ時に別途計量したセメントとフライアッシュを混合したものであり、フライアッシュの混合比

表 1 実験計画

実験 種別	セメント	W/C(%)	練上温度 (℃)	養生条件			簡易断熱養生 材 齢 (日)
				封緘養生		水中養生 材 齢 (日)	
				養生温度(℃)	材 齢 (日)		
シ リ ー ズ Ⅰ	普通ポルトラ ンドセメント	60	15	5 20 35	1or2*	3, 7, 28	7, 28, 91
		50			3		
		40			7		
		30			14		
	フライアッ シュセメントB 種	60			28		
		50			56		
		40			91		
		30			(119)**		
					182		

*普通ポルトランドセメントは1日、フライアッシュセメントB種は2日

**養生温度35℃のみ

実験 種別	セメント	W/C(%)	練上温度 (℃)	養生温度 (℃)	養生条件	測定材齢 (日)
シ リ ー ズ Ⅱ	普通ポルトラ ンドセメント	60	15	20	水中	7, 28, 91
		50		10→→10	封緘	3, 7, 28, 56, 91
		40			封緘	前養生終了2日 後
		30				
	フライアッ シュセメントB 種	60		10→→5		
		50				10→→5→→1
		40				
		30				

表 2 セメントの物理性状と鉱物組成

実験シリーズ	密度 (g/m ³)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (Bogue式) (%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
I	3.17	3450	59.6	15.6	8.5	9.1
II	3.16	3460	59.3	15.1	9.6	8.6

表 3 フライアッシュの品質

	強熱減量 (%)	二酸化ケイ素 (%)	湿分 (%)	密度 (g/m ³)	ブレン比表面積 (cm ² /g)
フライアッシュ	1.7	68.6	0.15	2.11	3890

表 4 コンクリート調合および練り上がり性状

実験 種別	セメント種類	水セメ ント比	粗骨材 の最大 寸法	細骨材率	単位水量	絶対容積 (1/m ³)			質量 (kg/m ³)			化学混和剤の使用量 (C×%)		温度 (℃)	スランプ (スランプ フロー)	空気量 (%)
		(%)	mm	(%)	(kg/m ³)	セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	AE剤		(cm)	
シ リ ー ズ Ⅰ	普通ポルトラ ンドセメント	60	20	45.9	176	93	315	372	293	812	1070	1.00	0.004	13.5	15.5	3.3
		50	20	44.4	176	111	296	372	352	764	1070	1.00	0.004	14.0	18.0	3.9
		40	20	42.9	170	134	279	372	425	720	1070	0.70	0.004	14.0	17.0	4.4
		30	20	48.0	175	184	286	310	583	737	892	1.60	0.010	15.0	645*635	5.5
	フライアッ シュセメントB 種	60	20	45.9	172	96	315	372	287	812	1070	0.87	0.060	12.5	16.0	4.9
		50	20	44.3	172	116	296	372	344	763	1070	0.87	0.056	12.5	15.5	4.9
		40	20	42.8	166	140	278	372	415	717	1070	0.87	0.017	13.0	17.5	5.5
		30	20	47.7	171	192	283	310	570	729	892	1.67	0.009	15.0	510*480	5.0
シ リ ー ズ Ⅱ	普通ポルトラ ンドセメント	60	20	45.5	179	94	310	372	298	800	1070	1.00	0.005	14.0	19.0	4.1
		50	20	43.9	179	113	291	372	358	751	1070	1.00	0.006	15.0	18.5	5.1
		40	20	42.9	170	134	279	372	425	720	1070	0.80	0.004	15.5	19.0	5.1
		30	20	48.0	175	184	286	310	583	737	892	2.13	0.009	16.5	525*505	3.9
	フライアッ シュセメントB 種	60	20	45.4	176	99	309	372	293	796	1070	1.00	0.072	15.0	18.0	4.6
		50	20	43.7	176	118	289	372	352	745	1070	1.00	0.072	16.5	17.0	4.6
		40	20	42.8	166	140	278	372	415	717	1070	0.90	0.012	17.5	20.0	5.4
		30	20	47.7	171	192	283	310	570	729	892	2.00	0.012	17.5	585*610	5.0

率は、セメントの内割りで 15%とした。使用したフライアッシュはシリーズ I、II とも同じもので JIS II 種灰とした。フライアッシュの品質を表 3 に示す。水セメント比 30%と 40%の割合ではポリカルボン酸系高性能減水剤を、水セメント比 50%と 60%の割合ではリグニンスルホン酸塩オキシカルボン酸塩系減水剤を使用した。細骨材は当麻産川砂（表乾密度 2.58g/cm^3 ，吸水率 2.50%），粗骨材は当麻産碎石（表乾密度 2.88g/cm^3 ，吸水率 1.88%）を用いた。

コンクリートの割合は日本建築学会「コンクリートの割合設計指針・同解説」により、試し練りを行って決定した。空気量は 4.5%，スランプは水セメント比 60～40%では 18cm，水セメント比 30%ではスランプフロー60cmを目標とした。表 4 にコンクリートの決定割合と練り上がり性状の結果をあわせて示す。

2.3 実験方法

コンクリートの練り混ぜは、100 リットル強制二軸型ミキサーを用いて行った。水セメント比 60～40%のものは一括投入とし練り時間は 3 分とした。水セメント比 30%のものは、モルタルを 3 分間先練りし、粗骨材投入後 1 分 30 秒練り混ぜた後 5 分静置し、さらに 30 秒練り混ぜ排出した。混練後直ちにスランプ若しくはフロー値、圧力法による空気量の測定を行い、 $10\phi \times 20\text{cm}$ の型枠に打設した。

打設後の試験体は、上面をポリエチレンフィルムで封緘した後直ちに所定の材齢まで所定の温度に調整した恒温室内で養生を継続した。水中養生試験体は材齢 1 日で脱型し、直ちに 20°C 水中で所定の材齢まで養生した。

各コンクリートの養生温度ごとに試験体中心部に TC 熱電対を埋め込み、10 分ごとに試験体温度を測定し記録した。

養生終了後の試験体は端面を研磨した後 JIS A 1108 に準じて圧縮強度の測定を行った。なお、氷点下の温度で養生した試験体は、内部の水を融解するため実験室内で脱型後約 30 分間 20°C 水中に浸漬した後測定した。

2.4 実験結果および考察

2.4.1 実験結果

図 1～図 4 に各コンクリートの材齢と圧縮強度の関係を示す。図 1、図 3 に示した普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでは、 -10°C で養生されたコンクリートでも、長期間においては強度増進が認められ、温度が高くなるにつれ強度増進が速くなる傾向が認められていた。図 2、図 4 に示したフライアッシュセメント B 種の場合でも、同様な傾向が認められ、 -10°C で養生されたコンクリートの強度増進が確認され、温度が高くなるにつれ強度増進が速く

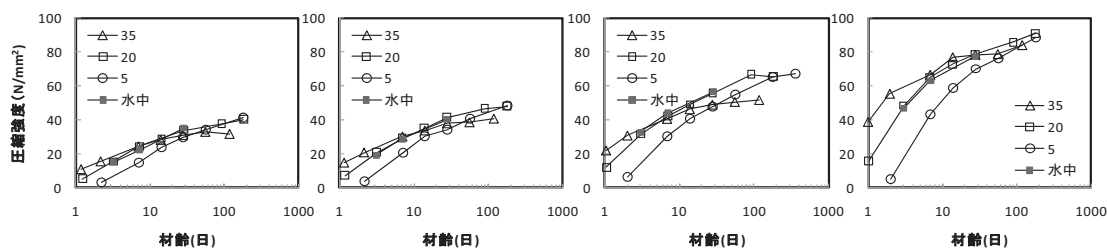


図 1 材齢と圧縮強度の関係（シリーズ I 普通ポルトランドセメント）

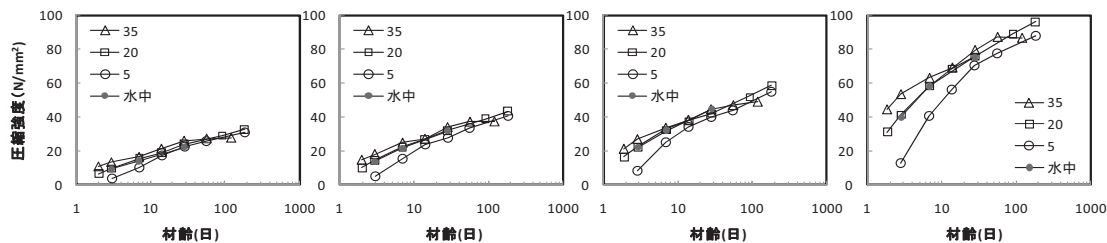


図 2 材齢と圧縮強度の関係（シリーズ I フライアッシュセメント B 種）

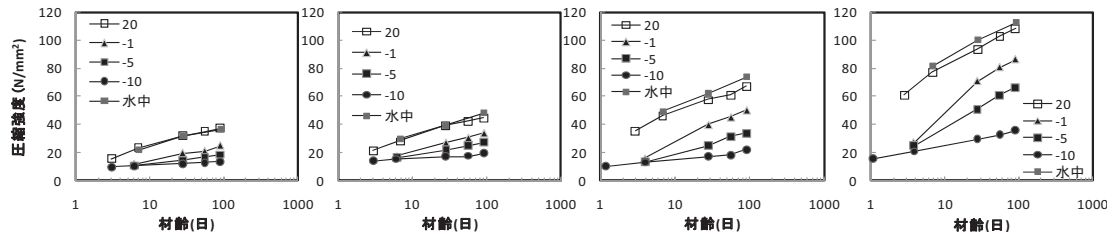


図 3 材齢と圧縮強度の関係（シリーズ II 普通ポルトランドセメント）

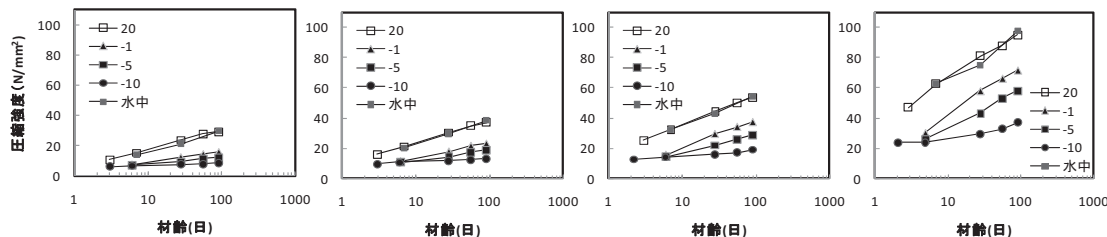


図 4 材齢と圧縮強度の関係（シリーズ II フライアッシュセメント B 種）

なっていた。また、いずれのセメントを用いた場合にも、20℃封緘養生と 20℃水中養生のコンクリートではほぼ同様の強度発現を示していることが確認された。

2.4.2 強度発現の温度依存性

須藤ら⁷⁾は、セメントペーストでの結合水率による見かけの水和率測定の結果から、セメントの水和を単純にモデル化し、反応速度を検討した。その結果、乾燥あるいは凍結環境下のセメント硬化体ではセメントと反応する水の化学ポテンシャルが低下し、反応速度が遅くなるとして、Arrhenius 式に化学ポテンシャル低下の影響を加えた以下の式で反応速度定数を記述した。

$$k_T = A \exp\left(\frac{-E + \beta\mu}{RT}\right) \quad (1)$$

ここに、 k_T ：温度 $T(K)$ での反応速度定数

A, β ：実験定数

E ：見かけの活性化エネルギー(J/mol)

μ ：水の化学ポテンシャル(J/mol)

R ：気体定数(J/mol K)

T ：温度 (K)

コンクリートの強度増進を表す温度時間関数である等価材齢は Arrhenius 式による反応速度定数を用い、以下のように表わされる。

$$T_e = \left(\frac{k_T}{k_{T_e}}\right) \times \Delta t \quad (2)$$

ここに、 T_e ：等価材齢(日)

k_{T_e} ：基準温度での反応速度定数

Δt ：時間間隔

(1)式による反応速度定数の算出には、見かけの活性化エネルギー(E)の値が必要となる。Wirquin らによれば、コンクリートの強度発現における見かけの活性化エネルギーの値は、CEM I 42.5R 普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートで混和剤使用の有無により若干異なるものの 35~40KJ/mol であると報告されている⁸⁾。我が国のセメントを使ったコンクリートの強度発現におけるセメントの見かけの活性化エネルギーの値は、伊藤らにより水セメント比 50%のコンクリートで 34.31KJ/mol であったとの報告がある⁹⁾。セメントは 4 つの主要鉱物からなり、活性化エネルギーの値を得るには、鉱物それぞれの水和反応の活性化エネルギーを明らかにしていく必要がある。しかし、本研究は、コンクリートの強度増進の温度時間依存性を記述するものであり、セメント鉱物ごとの算出は当研究の範囲を超える。ここではゴンペルツ曲線で近似した強度増進と、実際の実験結果が適合するように式(1)(2)の中の見かけの活性化エネルギーの値を求めることとした。なお、ここでは氷点下の強度増進を 0℃以上の範囲と連続して表すため、式(2)の基準温度を 0℃ (273.15K) として算出した。

シリーズ I の実験は、封緘状態の試験体によるため、厳密には水和による内部湿度変化としての水の化学ポテンシャル低下の影響が考えられる。しかしながら、前述の通り 20℃水中養生と 20℃封緘養生のものの強度増進に相違がほとんど認められず、その影響は小さく無視できるものとした。そこで、式(1)の水の化学ポテンシャル項を除外した以下の式による k_T により等価材齢を計算することとした。

$$k_T = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (1')$$

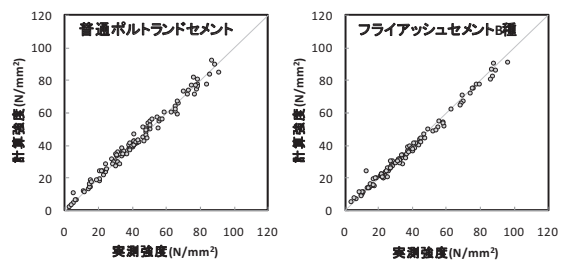


図5 シリーズ I での実測強度と計算強度の関係

コンクリートの強度増進は、温度時間関数を使った関数式によってあらわされている¹⁾。積算温度を用いた場合にはロジスティック曲線による近似とゴンペルツ曲線による近似が示されている²⁾¹⁰⁾。本研究では、等価材齢式(1') (2)の関数として、強度増進を以下のようゴンペルツ曲線による近似で表わした。

$$F = F_{inf} \cdot \exp(a \cdot T_e^b) \quad (3)$$

ここに、 F_{inf} ：コンクリートの最終到達強度 (N/mm²)

a, b ：定数

この式をシリーズ I の実験結果に適用し、非線形最小二乗法により、 E をセメント種類ごとに、 a, b をコンクリートごとに求めた。 F_{inf} は、初期材齢に履歴する温度条件により異なることが予測されたため¹¹⁾、それぞれのコンクリートで養生温度ごとに決まるものとした。得られた見かけの活性化エネルギーの値は、普通ポルトランドセメントでは 44,350J/mol、フライアッシュセメント B 種では 40,319J/mol となった。

図5に普通ポルトランドセメントコンクリート、フライアッシュセメント B 種コンクリートでの実測強度と式(3)による計算強度の関係を示す。どちらのセメントでも、実測強度と計算強度は良い対応を示し、相関係数も 0.99 以上となり、得られた実験式は強度増進を良くあらわすものと考えられる。

これより、以降の検討には各セメントの見かけの活性化エネルギーの値として、ここで得られた値を用いることとする。

2.4.3 強度発現への凍結の影響

Defay らは大気圧下での凍結点降下度と細孔半径の関係を示し、その中で凍結時の氷の潜熱と水の化学ポテンシャル低下量の関係が次式で与えられている¹²⁾。

$$\mu = \Delta H \ln\left(\frac{T}{273.16}\right) \quad (4)$$

ここに、 μ ：凍結による水の化学ポテンシャル変化量 (J/mol)

ΔH ：潜熱(J/mol)

T ：凍結温度(K)

ここで、潜熱 ΔH には、Bulk の水の 0℃の値をそのまま用いる式(5)、固相と液相の温度と熱エネルギーの関係から温度ごとに求める Radjy¹³⁾の式(6)がある。また、Katsura ら¹⁴⁾は、交流 2 電極法により得られた凍結融解作用下での -70℃からの融解側の実験結果から化学ポテンシャルの低下を記述する実験式(7)を示している。それぞれの式を以下に示す。

$$\mu = 6013.4 \ln\left(\frac{T}{273.16}\right) \quad (5)$$

$$\mu = (6015.9 + 40.71T_c) \ln\left(\frac{T}{273.16}\right) \quad (6)$$

$$\mu = \left(6661.4 + 1.51 \times 10^{24} \exp\left(\frac{-12406.7}{T}\right) \right) \ln\left(\frac{T}{273.16}\right) \quad (7)$$

ここに、 T : 凍結温度(K)

T_c : 凍結温度 (°C)

前述の式(1)に化学ポテンシャル μ の式を適用すると、凍結による水の化学ポテンシャル低下を考慮した反応速度定数の式となり、等価材齢が式(2)によって計算される。

式(1)中の実験定数 β は、水セメント比ごとに0°C以上の実験結果を用いて求めたゴンペルツ曲線近似による強度増進曲線と、氷点下での実験結果から、非線形最小二乗法により最適値として求めた。なお、ここでも厳密には水の化学ポテンシャルは、水の凍結の影響以外に水和によるコンクリート内部の湿度低下によっても低下する。しかしながら、前述の通り20°C水中養生と20°C封緘養生のものの強度増進に相違が認められなかったため、水和による内部湿度変化の影響は小さいものとして無視した。式(5)~(7)に示した化学ポテンシャル算出式それぞれを用いて各セメントについて、 β を決定した。

表5に β の値を示す。

図6~8に各セメントの凍結による水の化学ポテンシャル低下を考慮した等価材齢と圧縮強度の関係を式(5)(6)(7)に示した水の化学ポテンシャル算出式別に示す。なお、図中●で示した結果は10°Cでの前養生終了時の結果と20°C封緘養生の結果である。表6にそれぞれの水の化学ポテンシャル算出式による氷点下の等価材齢から計算した圧縮強度と実測強度の相関係数と残差の統計値を示す。Radjy式およびBulkの潜熱の値を用いた式による等価材齢では、普通ポルトランドセメントではほぼ一義的に表すことができたが、水セメント比60%-1、-5°C養生のもので、等価材齢を多く見積もる傾向が認められた。フライアッシュセメントB種では、水セメント比30、40%は一義的に表すことができた。50、60%では、氷点下の等価材齢が多く見積もられる傾向が認められた。Katsuraの式では、いずれ

表5 係数 β の値

セメント種類	化学ポテンシャル低下式		
	Bulk	Radjy	katsura
普通ポルトランドセメント	24.9	26.3	10.0
フライアッシュセメントB種	23.9	23.8	9.1

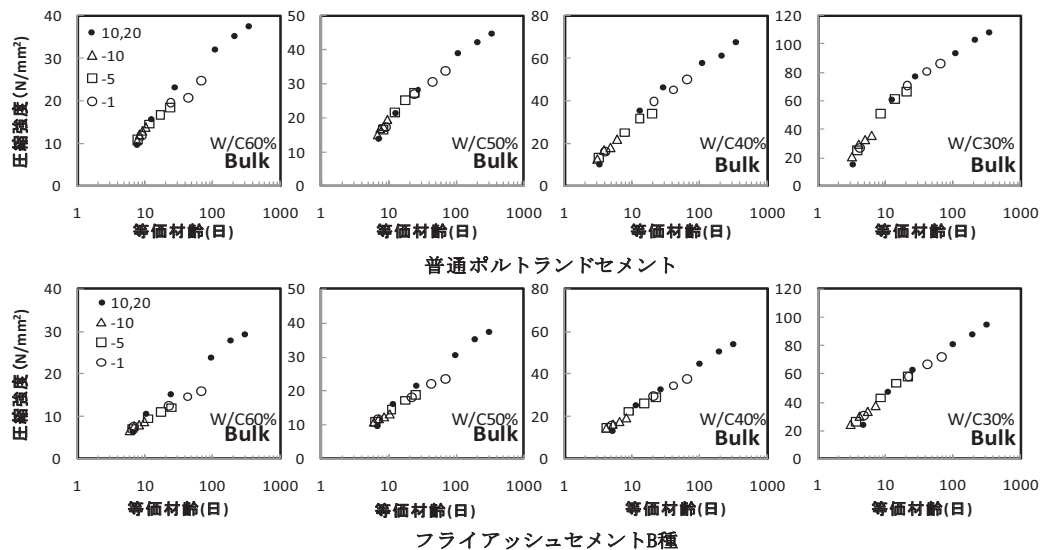


図6 水の化学ポテンシャル低下を考慮した等価材齢と圧縮強度の関係 (潜熱の値はBulkの値)

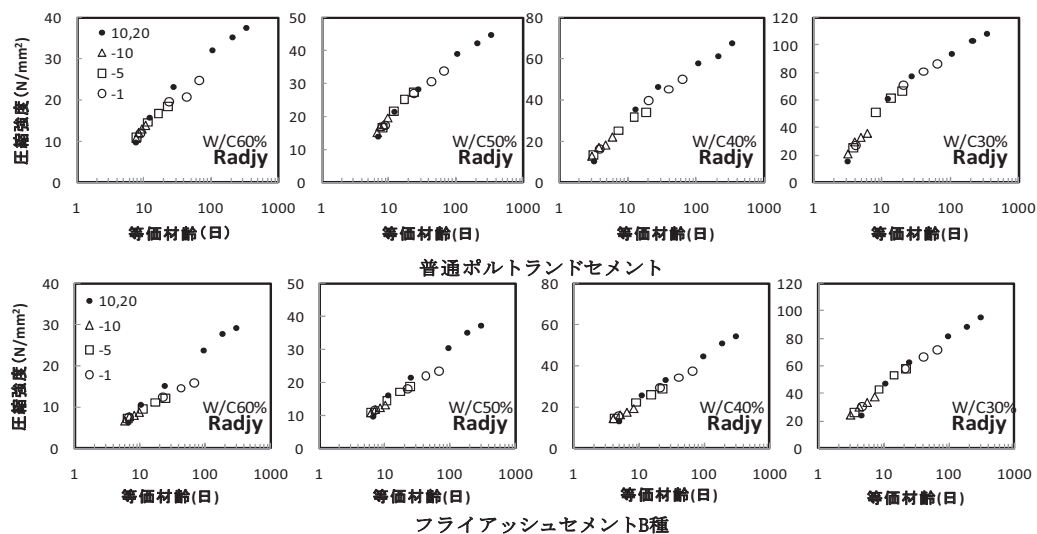


図7 水の化学ポテンシャル低下を考慮した等価材齢と圧縮強度の関係 (潜熱の値はRadjy式)

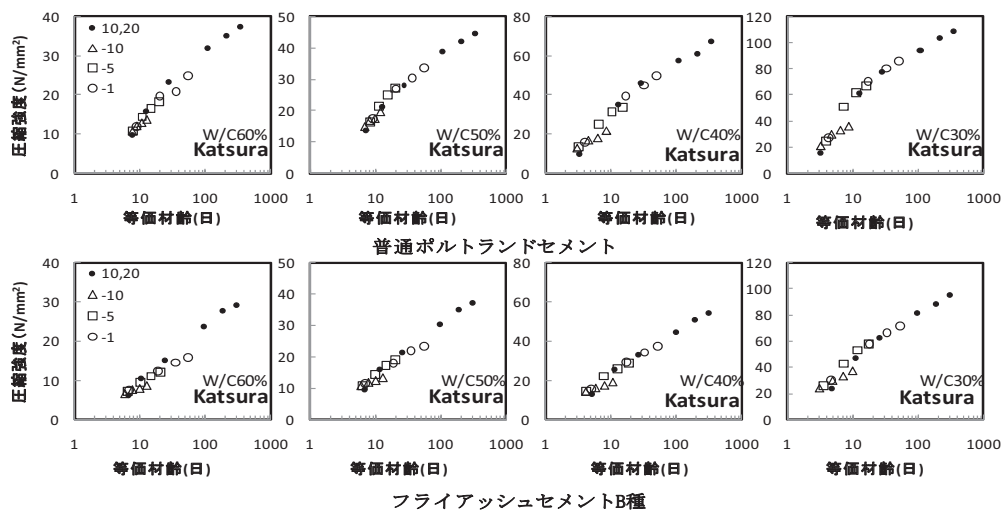


図8 水の化学ポテンシャル低下を考慮した等価材齢と圧縮強度の関係 (Katsura 式)

のセメントでも、-1、-5℃の結果は0℃以上の等価材齢と圧縮強度の関係とほぼ一義的に表されるが、-10℃の結果では等価材齢が過大に算出される傾向となった。氷点下の実測圧縮強度と計算強度の統計値から見ると相関係数は Katsura 式の場合が若干低く、残差の標準偏差も Katsura 式が最も大きくなる結果であった。既往の水の化学ポテンシャルの低下式を反応速度式に適用した等価材齢は、それぞれのセメントの氷点下での強度増進を表すことはできている。しかしながら、使用する水の化学ポテンシャル低下式により、その適合性が高い温度範囲が異なる傾向が認められた。

ここで、式(5)(6)(7)をそれぞれ式(1)に代入し、さらにそれを式(2)に代入して等価材齢を算出すると、等価材齢は温度の関数として表せることがわかる。そこで、本研究で得られた結果から、図9にそれぞれの水の化学ポテンシャル低下式を用いて計算した氷点下での等価材齢の対数値と温度の関係を示す。Radjiy 式と Bulk 式では温度と等価材齢の対数値はほぼ直線的な関係であり、Katsura 式では0℃から急激に低下し、-7℃程度以下では Radjiy, Bulk 式よりも大きな値となる曲線となった。以下にその理由を考察する。氷点下のコンクリートの強度増進の遅れは温度低下によってコンクリート中の水分が凍結することにより水和反応が遅くなることに起因する。これは水の化学ポテンシャルが低下することによるものである。一方で、コンクリート中の水分の凍結挙動は、水が存在する細孔径に依存して融点降下が起き、過冷却現象も生じることが知られている。今回適用した水の化学ポテンシャル低下式の中で、Bulk の水の潜熱の値は0℃での一定値となり、Radjiy 式は潜熱の温度依存性を考慮した式となる。これらは本来バルクの水や小さな液滴に適用されるものであり、コンクリート中の水には厳密には対応していない値をあえて用いたこととなる。一方、Katsura 式ではその導出過程から、細孔径に依存した融点降下の影響を含めた算出式であるといえる。ただし、-60℃以下の温度からの融解過程で得られた式であり、過冷却水の存在による影響を含まない。これらの既往の式は、コンクリート中の細孔内に存在する水の化学ポテンシャル低下を厳密に記述するものではない。

そこで、ここでは実験で得られた氷点下の強度増進を記述する温度時間関数を検討する。図9での温度と等価材齢の関係を図6～8

表6 相関係数と残差の統計値

セメント種類	統計値	潜熱式の種類		
		bulk	radjiy	katsura
普通ポルトランドセメント	相関係数	0.995	0.995	0.986
	残差の平均	0.01	-0.03	-0.56
	残差の標準偏差	2.07	2.08	3.61
フライアッシュセメントB種	相関係数	0.993	0.993	0.985
	残差の平均	0.52	0.54	0.21
	残差の標準偏差	2.87	2.86	3.52

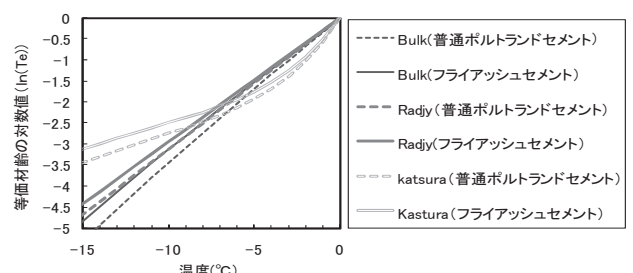


図9 温度と等価材齢の対数値の関係

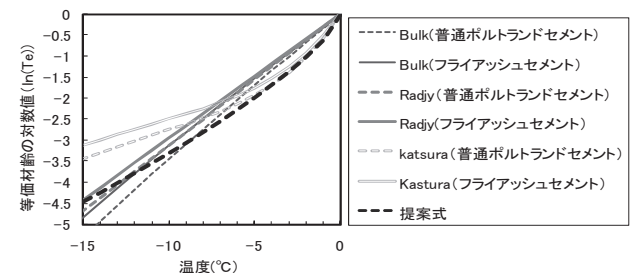


図10 温度と等価材齢の対数値の関係 (提案式を含む)

の結果と比較してみると、-1～-5℃の範囲では Katsura 式による温度と等価材齢の関係の適合性が高く、-10℃以下では Radjiy 式、Bulk 式による等価材齢の適合性が高い結果であった。そのため、図9に示す結果において、-1～-5℃の範囲では Katsura 式による値、それ以下は Radjiy 式、Bulk 式による値を結ぶような形状の曲線が得られれば氷点下の強度増進をうまく説明する温度時間関数になると考えられる。そこで、強度発現における温度と等価材齢対数値の関係を以下の式で表されるものと仮定し、検討した。

$$\ln(T_e) = c \times (-T)^d \quad (8)$$

ここに、 c, d : 実験定数

この式を実験結果にあてはめ実験定数を決定することで氷点下の等価材齢の算出のための実験式となる。しかしながら、寒中コンク

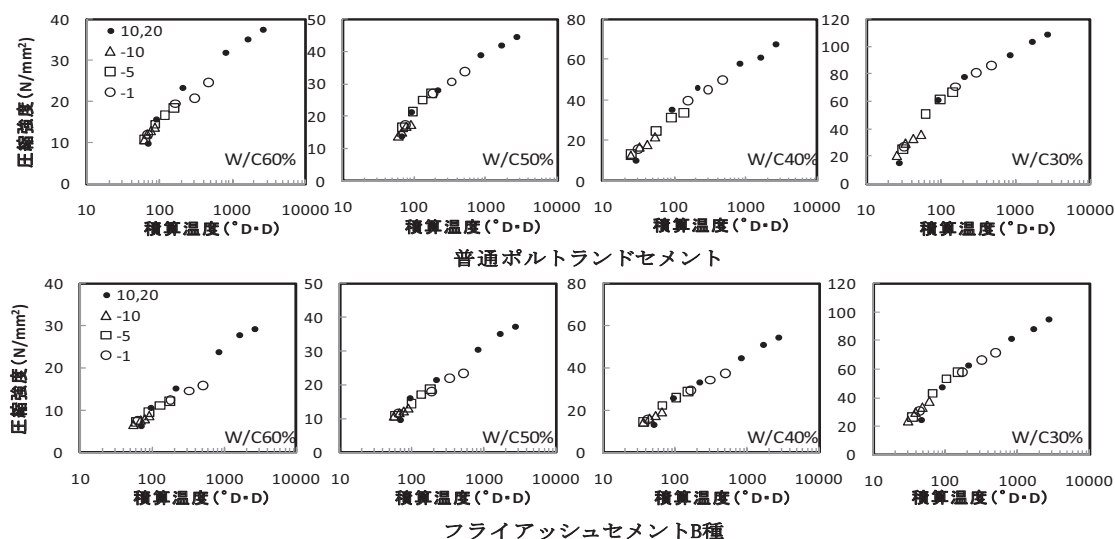


図 1-1 式(10)による積算温度と圧縮強度の関係

リート工事における 0℃以上の温度時間関数は積算温度が一般的に利用されており、このままでは連続的に取り扱うことが難しい。そこで、0℃の1日養生が 10° D・D の積算温度となるように式(8)を変形することで 0℃以上の積算温度と連続的に扱うことが可能となる。これより、氷点下の積算温度を以下の式で表されるものとし、実験結果との対応を検討した。

$$M_{uf} = \sum 10 \times \exp(c \times (-T)^d) \Delta t \quad (9)$$

ここに、 M_{uf} : 温度 T 養生一日で得られる積算温度 (° D・D)

係数 c, d の値は、強度と式(9)から計算した氷点下の積算温度の関係が実験値と適合するよう非線形最小二乗法によって決定した。なお、セメント種類による影響は図 9 のそれぞれの水の化学ポテンシャル低下式での算出結果を比較して大きな違いはないと判断し、セメント種類を問わず同じ値として算出した。これにより、氷点下の温度範囲での積算温度式として、以下の式が得られた。

$$M_{uf} = \sum 10 \times \exp(-0.60 \times (-T)^{0.74}) \Delta t \quad (10)$$

図 1-10 に、得られた結果を換算し図 9 の結果とあわせてプロットしたものを示す。得られた関数が、想定した通り -1～-5℃の範囲では Katsura 式による値、それ以下は Radjy 式、Bulk 式による値をほぼ結ぶ形状となっている。

図 1-11 に式(10)により算出した積算温度と圧縮強度の関係を示す。若干ばらつきは認められるものの、すべてのコンクリートの氷点下の養生温度範囲にわたって、ほぼ一義的に強度増進を表すことができていることが確認された。

3. 寒冷期の屋外で養生されたコンクリートの強度増進性状

前章で提案した氷点下の積算温度算出式を実際の冬期に屋外で養生されるレディミクストコンクリートに適用し、その適合性について検討する。

3.1 実験計画および方法

旭川市内での寒冷期の屋外暴露によるコンクリート強度増進の検討を行った。実験計画を表 7 に示す。暴露開始は 11 月下旬とした。

表 7 実験計画

養生温度 (条件)	試験材齢 (日)
水中養生	28, 91
20℃封緘	2, 4, 7, 14, 28, 56, 91
5℃封緘	14, 28, 56, 91
-2, -5, -10℃封緘	28, 56, 91, 182
屋外暴露封緘	14, 28, 56, 91

表 8 調合表とフレッシュ性状

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)	絶対容積 (l/m³)			質量 (kg/m³)			フレッシュ性状	
			セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	スランプ (cm)	空気量 (%)
50	44.0	168	106	300	381	336	777	991	18.5	4.8

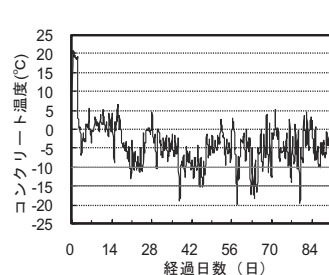


図 1-2 暴露試験体温度測定結果

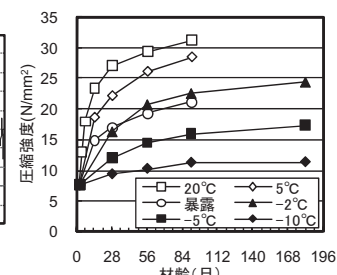


図 1-3 圧縮強度測定結果

同時に養生温度を 20, 5, -2, -5, -10℃の一定とした強度増進の検討も行った。

使用したコンクリートは呼び強度 24N/mm² のレディミクストコンクリートとした。セメントは普通ポルトランドセメントである。細骨材は当麻産砂 (表乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 2.66%), 粗骨材は当麻産陸砂利 (表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.94%) である。調合と荷卸し時のフレッシュ性状を表 8 に示す。コンクリートは到着後直ちにスランプ、空気量を測定し、φ10×20cm のサミットモールド型枠に打設した。打設後の試験体はすぐに上面をポリエチレンフィルムで封緘し 20℃に調整した恒温室内で 2 日間養生した後、所定の温度に調整した恒温室および屋外において所定の材齢まで封緘状態のまま養生を継続した。コンクリートの温度は、養生条件ごとに試験体中心部に TC 熱電対を埋め込み測定間隔 15 分で所定の材齢まで測定記録した。

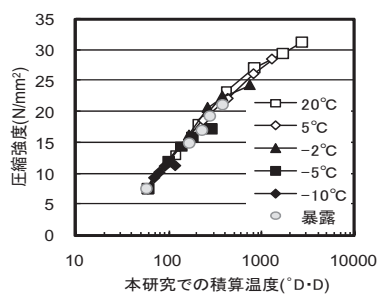


図 14 提案式による積算温度と圧縮強度の関係

所定の養生終了後、JIS A 1108 に準じて圧縮強度を測定した。なお、氷点下の温度で養生した試験体は、内部の水を融解するため実験室内で約 1 時間 20℃ の水中に浸漬した後測定した。

3.2 実験結果および考察

図 1 2 に暴露試験体の温度測定結果を示す。図 1 3 に材齢と圧縮強度の関係を示す。氷点下の一定温度、および温度変動のある暴露条件においても強度増進が認められた。一定温度養生では、養生温度により強度発現の速さが異なり、温度の低いものほど遅くなる傾向が認められた。

図 1 4 に本研究で提案した氷点下の積算温度式により計算した積算温度と圧縮強度の関係を示す。一定温度の氷点下養生のコンクリート、屋外暴露コンクリートの両方において、ほぼ 0℃ 以上での積算温度と圧縮強度の関係を一義的に表すことができていた。このことから、本研究の積算温度提案式はセメントの異なるレディミクストコンクリートにおいても適用できるものであり、温度時間変動のある場合においてもその強度増進を一義的に表すことが可能となる温度時間関数であるといえる。

一方、寒中コンクリート工事でのコンクリート温度による強度管理を想定すると、特に採暖を行わなくなった材齢延長の期間中は、気温の日内変動があり、それに伴いコンクリート温度の変動が想定される。しかし、強度管理を行う場合のコンクリートの温度データをどの程度の間隔で記録し、強度予測を行うか等についての明確なガイドラインが示されていない。本研究の暴露試験体のコンクリート温度測定記録を使って、強度管理のための温度測定のインターバルについて検討を行うこととした。本研究の測定結果から 15 分、1 時間、2 時間、4 時間、6 時間間隔、日平均温度、旬平均温度の各データを用いて計算される積算温度がどの程度異なるかを算出した。

インターバルごとに算定された積算温度を図 1 5 に示す。測定間隔を 15 分から 6 時間とした場合は、得られた積算温度に大差は認められなかった。しかし、日平均温度を用いると積算温度の値は間隔を 6 時間までとした場合に比べ約 15% 減少し、旬平均温度を用いると約 35% の減少となった。0℃ をはさんでコンクリートの温度が日内変動する場合、0℃ 以下の温度になると得られる積算温度の値が急激に減少するため、日内変動が明確とならない程測定間隔が広い場合には平均温度が常に 0℃ 以下となり、0℃ 以上の温度が積算温度として算定されなくなる場合がある。一方、測定間隔を短くし日内変動が明確となると、0℃ 以上の温度で経過する時間が算定されることとなり、このことから温度測定インターバルによる積算温度の値に差が生じるものと考えられる。よって、6 時間を上限として、できるだけ測定間隔を短くした温度データによる管理が適切と考え

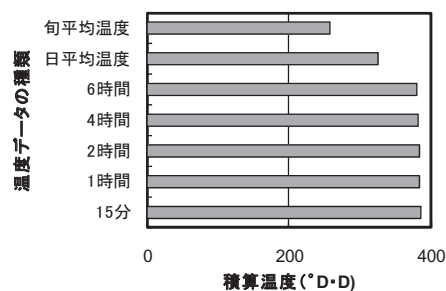


図 1 5 温度測定間隔と計算される積算温度の関係

られる。

本研究での氷点下の温度域での積算温度算定式は、普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメント B 種のコンクリートの実験結果によるもので、普通ポルトランドセメントのレディミクストコンクリートによる実証実験で、その有用性が確認された。他の種類のセメントについては、実証されたものではないが、積算温度を温度時間関数として利用できるセメントでは氷点下の強度発現の遅れる範囲において大差なく利用できるものと推察している。しかしながら、他のセメントのコンクリートでの検証は必要なものであり、今後の課題と考える。

4. まとめ

本研究の結果は以下に要約される。

1) 氷点下のコンクリートの強度発現を 0℃ 以上の積算温度と圧縮強度の関係を一義的に表すことが可能となる以下の氷点下の積算温度計算式を示した。

$$M_{uf} = \sum 10 \times \exp(-0.60 \times (-T)^{0.74}) \Delta t$$

ここに、 M_{uf} : 氷点下の積算温度 (° D · D)

T : Δt のコンクリート温度 (°C)

Δt : 温度測定間隔 (日)

2) 実際の温度変化を伴う環境条件で養生されたレディミクストコンクリートの強度増進試験により、提案した氷点下の積算温度式の適合を検証し、その有用性を示した。

3) 寒中コンクリート工事における強度発現予測手法としてのコンクリートの温度測定においてはデータの測定間隔を 6 時間以下で可能な範囲で短くする必要がある。

謝辞

本実験の実施にあたり、日鐵セメント株式会社、株式会社フローリックより材料の提供・実験への多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”, ASTM C 1074-98
- 2) 寒中コンクリート工事施工指針・同解説、日本建築学会、1998
- 3) 深瀬孝之、千歩修、濱幸雄、桂修、田中宏和：コンクリートの調査設計研究委員会報告：寒中コンクリート施工支援システムの開発、日本建築学会北海道支部研究報告集、No.75, pp.335-339, 2002.6
- 4) 三森敏司、大塚隆男、濱幸雄、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報告集、Vol. 22, No. 2, pp. 553-558, 2000
- 5) 三森敏司、大塚隆男、濱幸雄、桂修：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、コン

クリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 421-426, 2001

- 6) 三森敏司, 大楽隆男, 濱幸雄, 千歩修, 友澤史紀: 凍結条件下におけるコンクリート強度増進の等価積算温度による検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(A-1) (北陸), pp. 795-796, 2002.8
- 7) 須藤由美子, 桂修, 吉野利幸, 三森敏司, 濱幸雄: 凍結および乾燥を受けたセメント硬化体の水和反応速度と強度増進, 日本建築学会構造系論文集, 第 542 号, pp.17-22, 2001.4
- 8) E. Wirquin, , M. Broda and B. Duthoit : Determination of the apparent activation energy of one concrete by calorimetric and mechanical means Influence of a superplasticizer, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 8, pp. 1207-1213, 2002.8
- 9) 伊藤憲雄, 三橋博三, 桐越一紀: 養生過程で温度履歴を受けるコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢, コンクリート工学論文集, 第 15 巻第 1 号, pp.103-111, 2004
- 10) 桂修, 鎌田英治, 洪悦郎: 高強度コンクリートの低温強度増進特性について, 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. 41-48, 1993.5
- 11) 杉山央, 榎田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, 第 515 号, pp. 23-30, 1999
- 12) Defay R., Prigogine I., Bellemans A., Everett D. H.: Surface tension and adsorption, Longmans, pp. 243-255, 1966
- 13) Radjy F.: Thermodynamic parameters for sorption of water by hardened cement Paper N 6 presented at the Seventy-Seventh Annual Meeting of the American Ceramic Society, Cements Division, Washington D. C., Vol.10, 1975
- 14) 桂修, 吉野利幸, 鎌田英治: 過冷却水の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構, コンクリート工学論文集, 第 10 巻第 2 号, pp.51-63, 1999

(2009年1月9日原稿受理, 2009年2月26日採用決定)