

低温期に打込まれるコンクリートの温度変化と 強度性状に関する研究 (その2)

——コンクリートの凝結硬化過程における凍結が
強度性状に及ぼす影響について——

高橋久雄 長尾覚博

Study on Temperature Change and Strength Property of Concrete Placed in Low-Temperature Period (Part 2)

——Early Freezing of Air-Entrained Concrete——

Hisao Takahashi Kakuhiko Nagao

Abstract

The strength of concrete placed during the low-temperature season is impaired because of retardation of the rate of hydration and freezing at the initial stage of hardening. Accordingly, in placing concrete in cold weather, special care is usually required in mixing and curing concrete. For the purpose of economical placement of concrete, it is necessary for the strength gain of concrete to be accurately grasped. It is with such a background that this paper reports on the study by laboratory tests of the influence of freezing at an early period after placement. As a result, it was clarified that the temperature history and curing time have great effects on strength decline due to freezing.

概 要

低温期に打込まれるコンクリートは、水和速度の遅延、硬化初期の凍結などによって強度発現が低下する。このため低温期におけるコンクリートの施工にあたっては、調合、養生などに特別な配慮を要する場合が多い。経済的な施工を行なうためには、低温期におけるコンクリート強度の発現性状を適確に把握する必要があり、本報告はこのような背景にもとづき、打込後硬化初期の凍結が強度低下におよぼす影響を室内実験により検討した。その結果、凍結までの温度履歴、経過時間が凍結による強度低下に大きな影響をおよぼすことを明らかにした。

1. はじめに

コンクリート打込後、初期の外気温が $-5\sim+10^{\circ}\text{C}$ の範囲の軽微な寒冷期(以下低温期と呼ぶ)では、コンクリート強度は、低温の影響により温暖な時期に比べて強度低下する傾向にあるが適正な初期養生を行なえば改善できると思われる。本実験はこの方法を求めるために行なっているものである。

低温期におけるコンクリート強度低下の原因としては

- (1) 打込後初期の凝結硬化過程中凍結を受けて生ずるコンクリート組織の変化。
- (2) 打込後初期の凝結硬化過程中での低温による水和速度の遅延。

- (3) 打込後低温を伴う外気温の周期的変動による、水和生成状態の変化、などが原因と考えられる。

本報告では、上記項目のうち(1)について室内実験により検討した結果について報告する。

実験は、2シリーズにわたって実施し、実験Iでは凝結硬化過程における凍結が強度発現に及ぼす影響因子の傾向を把握するために、コンクリート打込後凍結を受けるまでの温度(以下温度履歴と略す)を 20°C 一定とし、W/C、温和剤の種類、打込後凍結を受けるまでの経過時間(以下経過時間と略す)、凍結時のコンクリート温度(以下凍結温度と略す)、凍結が持続している時間(以下凍結継続時間と略す)を要因とし、これらとコンクリート圧縮強度との関係を検討した。その結果、経過時間が

凍結後の強度発現に大きな影響を及ぼす傾向が認められ、実験Ⅱではこの点をさらに詳細に検討するために、温度履歴および経過時間を種々変化させて実験を行なった。その結果、凍結までの温度履歴および経過時間が凍結後の強度発現に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

2. 実験概要

実験ⅠはW/C、混和剤の種類、凍結までの経過時間、凍結温度を要因とし、実験Ⅱは凍結までの温度履歴、経過時間、凍結継続時間を要因として実施した。

2.1. 使用材料

実験ⅠおよびⅡで使用した材料は、以下に示す通りである。

- セメント：普通ポルトランドセメント
- 骨材：細骨材—富士川産川砂，表乾比重2.58，吸水率3.15(o/wt)，粗粒率2.76，粗骨材—富士川産川砂利，表乾比重2.67，吸水率1.20(o/wt)，粗粒率6.53
- 混和剤：実験Ⅰ—AE剤，AE減水剤，実験Ⅱ—AE剤。

2.2. コンクリートの調合

2.2.1. 調合条件 実験Ⅰのコンクリートの調合条件は以下に示す通りで、試し練りによって表-1に示す調合を決定した。

- スランプ：18.0±2.5 cm
- W/C：AE剤使用，41，46，51%，AE減水剤使用，43，47，52%
- 空気量：4±1°/vol

コンクリートの種類		[kg/m ³]						
記号	W/C [%]	S/a [%]	単位水量	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤	
AE剤使用	VN-1	41	43.3	184	444	983	725	0.133
	VN-2	46	45.2	179	391	983	782	0.117
	VN-3	51	46.4	177	350	983	823	0.105
AE減水剤使用	Po-1	43	41.3	170	400	1039	707	1.00
	Po-2	47	43.2	166	353	1033	761	0.833
	Po-3	52	44.4	163	315	1036	797	0.788

表-1 実験Ⅰで用いたコンクリートの調合表

実験Ⅱのコンクリートの調合条件は以下に示す通りで、試し練りによって表-2に示す調合を決定した。

- スランプ：18±2.5 cm
- W/C：設計基準強度210(kg/cm²)，温度補正值T=60(kg/cm)，標準偏差σ=25(kg/cm²)から，調合強度F≥F_c+T+σ=295(kg/cm²)とし，この値からW/Cを50.6%に決定した。

[kg/m ³]						
W/C [%]	S/a [%]	単位水量	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
50.6	45.2	177	350	972	760	0.105

表-2 実験Ⅱで用いたコンクリートの調合表

- 空気量：4±1°/vol

2.3. 供試体の寸法形状

φ10×20 cm 円柱供試体を使用した。

2.4. 実験計画

2.4.1. 実験Ⅰ 実験Ⅰでは、凍結までの温度履歴を20°C一定とし、要因として、W/C、混和剤の種類、凍結までの経過時間、凍結温度を要因とし、凍結終了後は20°C水中養生とし、凝結硬化過程の凍結による強度発現を検討した。以下に実験の要因と水準を示す。

(1)練り上り時のコンクリート温度：15±3°C，(2)凍結温度：-10，-5，0°C，(3)凍結継続時間：24時間，(4)凍結までの経過時間：練り上り後0，1，3，4，5，6，24，72時間，(5)凍結までの温度履歴：20°C，(6)凍結後の養生水温：20°C，これら(1)~(6)の要因の組み合わせは表-3に示す通りである。

記号	経過時間	凍結終了時間	20°C80%RH (凍結温度, 0, -5, -10°C)		凍結		20°C水中	
			6	12	18	24	48	72
A 1	0	24	■	■	■	■	■	■
" 2	1	25	■	■	■	■	■	■
" 3	2	26	■	■	■	■	■	■
" 4	3	27	■	■	■	■	■	■
" 5	4	28	■	■	■	■	■	■
" 6	5	29	■	■	■	■	■	■
" 7	6	30	■	■	■	■	■	■
" 8	24	48	■	■	■	■	■	■
" 9	72	96	■	■	■	■	■	■

表-3 実験Ⅰの要因の組み合わせと調合条件

2.4.2. 実験Ⅱ 実験Ⅱでは、凍結までの温度履歴、経過時間、凍結継続時間を要因とし、凍結前の養生条件と凍結時間が強度発現に及ぼす影響を検討した。以下に実験の要因と水準を示す。

凍結までの温度履歴(°C)	凍結までの経過時間(時間)	凍結継続時間(時間)	コンクリート打込後の経過時間(時間)				
			12	24	36	48	60
1, 5, 10, 20,	6	6	■	■	■	■	■
		12	■	■	■	■	■
		24	■	■	■	■	■
	9	6	■	■	■	■	■
		12	■	■	■	■	■
		24	■	■	■	■	■
	12	6	■	■	■	■	■
		12	■	■	■	■	■
		24	■	■	■	■	■
15	6	■	■	■	■	■	
	12	■	■	■	■	■	
	24	■	■	■	■	■	
24	6	■	■	■	■	■	
	12	■	■	■	■	■	
	24	■	■	■	■	■	

(注) ■ 凍結までの温度履歴，■ 凍結 20°C，80%RH，→20°C水中

表-4 実験Ⅱの要因の組み合わせと養生条件

(1)練り上り時のコンクリート温度: 15±3℃, (2)凍結温度: -5℃, (3)凍結継続時間: 6, 12, 24時間, (4)凍結までの経過時間: 0, 6, 9, 12, 15, 24時間, (5)凍結までの温度履歴: 1, 5, 10, 20℃, (6)凍結終了後の養生水温: 20℃, これら(1)~(6)の要因の組み合わせは, 表-4に示す通りである。

3. 実験結果

3.1. 実験 I の結果と考察

3.1.1. コンクリートの混練り コンクリートの混練りは, すべての実験条件を実施するために数十バッチに及んだが, スランブは18±1.5 cm, 空気量は4±1%/vol, 練り上り温度はほぼ12~15℃の範囲に納っており, 当初の計画に合った条件で, 実験を行なうことがほぼできた。

3.1.2. 供試体の温度変化 10φシリンダー供試体の中心部の温度変化は図-1に示す通りで, 供試体の温度が凍結温度に達するまでの時間は, 打込時のコンクリート温度, あるいは凍結温度により変るものと思われるが今回の実験では約12時間程度を要し, 融解後の温度上昇には, 各凍結温度とも6時間程度を要している。さらに凍結時のコンクリート温度は, -1℃付近で数時間一定温度を保ってから降下することから, コンクリートが凍

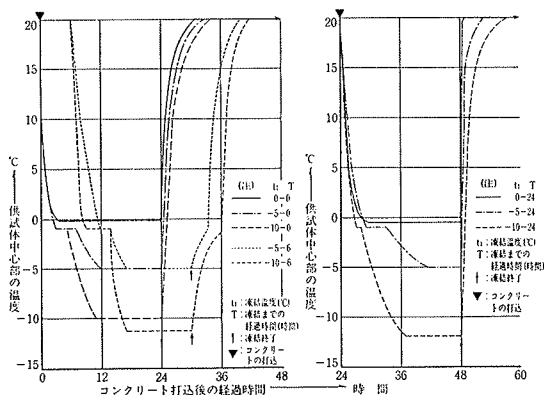


図-1 コンクリートの温度変化(実験 I)

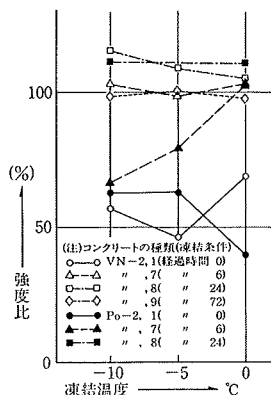


図-2 凍結温度の影響

結し始める温度は, -1℃付近であることが推察される。
3.1.3. 凍結後の強度発現に及ぼす要因の検討 標準水中養生供試体の強度との比率(強度比)によって検討を行ない, 以下に示す。

(1) 凍結温度の影響

凍結温度の影響は図-2に示す通りである。

図-2によると, 0℃の凍結温度に対して, 経過時間72時間については, すべての調査とも強度発現には差が認められず, むしろ標準水中養生よりも大となる場合もあった。しかし経過時間0時間については, AE剤使用コンクリートでは-5℃よりも0℃で凍結の場合の強度比が大となり, AE減水剤使用コンクリートでは逆の傾向を示す結果となっている。さらにAE減水剤使用コンクリートでは, 経過時間6時間の場合, 他の経過時間の場合よりも凍結温度が低い程強度低下の割合がかなり大きい結果となり, これらの点については今後再検討を要する。なお, -10℃の凍結温度の場合は, -5℃の場合とほぼ大差ない結果となっている。

(2) W/Cの影響

各凍結温度および経過時間に対する, W/Cと強度比との関係を図-3に示した。この実験条件の範囲では, どの場合とも, W/Cによる強度比の差は顕著に認められなかった。

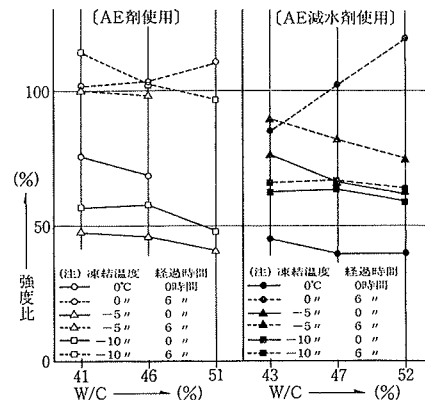


図-3 W/Cの影響

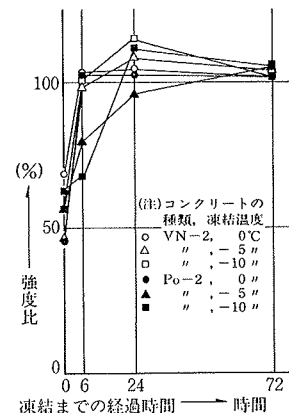


図-4 凍結までの経過時間の影響

(3)凍結までの経過時間の影響

経過時間と強度比との関係は、図-4に示した。これによると経過時間0時間の場合には、すべての調査とも標準水中養生の50%程度の強度低下である。

経過時間6時間では、AE剤使用コンクリートの場合各凍結温度とも強度低下がほとんど認められなかったが本実験の範囲では、AE減水剤使用の場合凍結温度-10℃のときに、20~30%の強度低下となった。

経過時間、24、72時間の場合には、各凍結温度について、AE剤、AE減水剤使用の各調査ともほとんど強度低下が認められず、むしろ標準水中養生の場合よりも強度が大きくなる傾向が認められた。

AE剤使用コンクリートの場合、経過時間が6時間以上になると強度低下がほとんど認められないという結果が得られたが、この点を詳細に検討するため、経過時間を0~6時間まで1時間ピッチで変化させた場合(凍結温度-5℃)の結果を図-5に示した。これによると

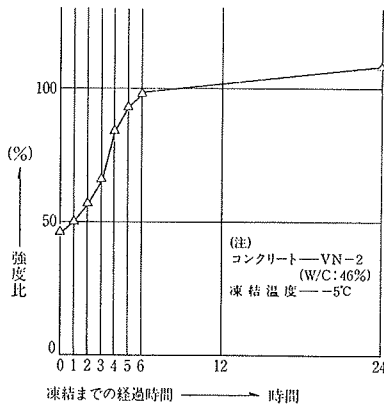


図-5 凍結までの経過時間の影響

経過時間が増すごとに強度低下の割合も減少し、6時間で凍結の影響がほとんどなくなることがわかる。すなわち凍結による強度低下の割合は、凍結までの養生条件により大きな影響を受けることが推察され、この点をさらに定量的に検討するために以下に示す実験IIを実施した。

3.2. 実験 II の結果と考察

3.2.1. コンクリートの混練り すべての実験条件を実施するために、コンクリートの混練りは計数+バッチに及んだが、平均スランプは17.3cm、平均空気量は3.4%/vol、コンクリート温度の範囲は13~17℃、平均14.7℃で、当初の計画に沿った条件で実験を行なうことができた。

3.2.2. 供試体の温度変化 10φシリンダー供試体の中心部の温度変化を図-6に示した。

これによると凍結時の供試体中心部の温度は-4~-5℃であった。

また、供試体が凍結温度に達するまでの時間は凍結までの温度履歴が1℃および5℃の場合には約9時間、10℃

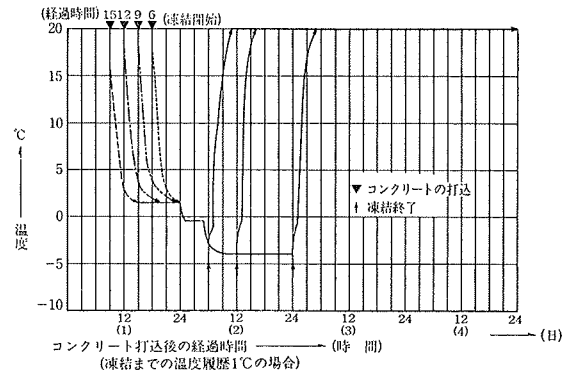


図-6 供試体の温度変化

の場合には約9~12時間であった。さらに、実験Iの場合と同様、供試体温度が0~-1℃の範囲で一定温度を保った後に降下しており、この付近でコンクリートの凍結が開始され、徐々に供試体内部へと進行することが推察される。

3.2.3. 凍結後の強度発現に及ぼす要因の検討 標準水中養生供試体強度の比率(強度比)によって検討を行ない以下に示す。

(1) 凍結までの温度履歴の影響

凍結までの温度履歴の影響は図-7に示した通りで、同一経過時間の場合温度履歴が高くなるに従い、凍結による強度低下の割合は小となる傾向があるが、経過時間が短い程温度履歴の影響が顕著で、経過時間が長くなるに従い温度履歴の影響が小となっている。例えば経過時間9時間では温度履歴が高くなるに従い、強度低下が小となっているが、経過時間24時間では多少差が認められるものの大差なく、いずれの温度履歴の場合とも強度低下はかなり小となっている。

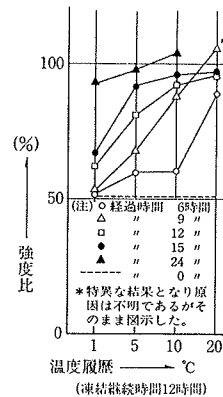


図-7 凍結までの温度履歴の影響

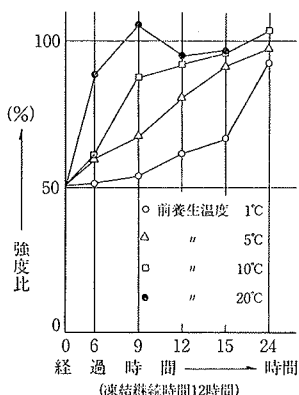
(2) 凍結までの経過時間の影響

図-8に示したように、温度履歴が1~5℃では、経過時間が長くなるに従い、強度低下の割合が少なくなり、温度履歴が10~20℃では、経過時間6~9時間の範囲で経過時間が長くなるに従い、強度低下の割合が少なくな

る傾向が認められた。

すなわち、凍結による強度低下の影響がほとんど認められなくなる経過時間の限界は、温度履歴 1℃では 24時間、5℃では 12~15 時間、10℃では 9~12 時間、20℃では 6~7 時間で、これらの温度履歴について各々の凍結までの限界経過時間を確保すれば、凍結による強度低下の割合をかなり軽減することができると思われる。

今凍結による強度低下がほとんど認められなくなる凍結までの温度履歴、経過時間との関係から、笠井氏の積算温度 $T^{\circ}T$ を (3・1) 式で求めてみると表一五 となりいづれの場合もほぼ $140 T^{\circ}T$ に等しい結果となった。



図一八 凍結までの経過時間の影響

$$\text{積算温度 } (T^{\circ}T) = T \cdot (\bar{t} + \alpha) \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 1)$$

(T : 経過時間 (hr), \bar{t} : 平均温度 (°C))
 $\alpha = |\bar{t} - 20| / m, 0 \leq \bar{t} < 20$ のとき $m = 5$)

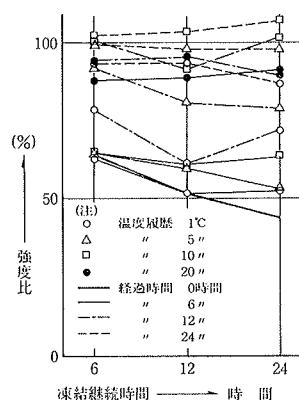
凍結までの温度履歴 (°C)	凍結による強度低下が10%未満となる場合の経過時間	積算温度 ($T^{\circ}T$) の計算値	
		仮想養生温度 (°C)	$T^{\circ}T$
1	24	4.8	137
5	15	8.0	141
10	11	12.0	149
20	7	20.0	133

表一五 凍結の影響が認められなくなる場合の凍結までの積算温度 ($T^{\circ}T$)

積算温度 $140 T^{\circ}T$ は、コンクリートの凝結が終了するときの $T^{\circ}T$ にほぼ等しく、凝結硬化過程の凍結による影響をかなり軽減するためには、凍結までの養生条件を $140 T^{\circ}T$ 以上とすればよいと推察されるが、今後さらに周期的な温度変化を受ける場合あるいはコンクリートの凝結性状との関連、連行される空気量との関係などについて詳細な検討を行ない、凝結硬化過程の凍結による強度低下を防止する限界条件を明らかにする必要がある。

(3) 凍結継続時間の影響

凍結継続時間の影響を示したのが図一九であるが、凍結までの温度履歴が 1~5℃で、経過時間が短く、凍結継



図一九 凍結継続時間の影響

続時間が長くなる程、強度低下の割合が大きくなる傾向があり、特に経過時間が 0 時間の場合には、凍結継続時間の影響が顕著である。すなわち、凍結までの養生条件が十分でない場合には、凍結継続時間が強度発現に影響すると推察されるが、12 時間以上の凍結継続時間では、凍結までの養生条件による差はほとんどないと思われる。

4. 結果のまとめ

実験 I および II の結果を要約すると以下のことが言える。

- (1) 凍結までの経過時間 0 時間の場合には、凍結による低下が著しく、標準養生の 40~60% 程度にまで強度が低下する。
- (2) 今回の実験条件の範囲では、凍結による強度低下に及ぼす W/C の影響は顕著ではなかった。
- (3) 凍結までの温度履歴、経過時間が凍結による強度低下に及ぼす影響は大きく、凍結までの温度履歴が高く経過時間が長いほど、凍結による強度低下の割合は少ない。
- (4) 凍結までに、 $140 T^{\circ}T$ 以上の養生を与えることによって、凍結による強度低下をかなり軽減させることが可能と思われるが今後さらに詳細な検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) D. C. McNeese: Early Freezing of Non-Air Entrained Concrete, J. of American Concrete Institute, Vol. 24, No. 4, (Dec. 1952), pp. 293~297
- 2) C. J. Bernhardt: Damage Due to Freezing of Fresh Concrete, J. of American Concrete Institute, Vol. 27, No. 5, (Jan. 1956), pp. 573~580
- 3) 日本建築学会編: 寒中コンクリート施工指針案・同解説, (1978), pp. 336~353
- 4) 長島 弘: 寒中コンクリートの調合計画, 施工, (1976, 11), pp. 43~55