

# 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3)

——スラブの凍結に及ぼす要因の検討——

高橋久雄 長尾覚博

### Study on Temperature Change and Strength Property of Concrete Placed in Low-temperature Period (Part 3)

——Investigation of Factors Influencing Freezing of Slab——

Hisao Takahashi Kakuhiko Nagao

#### Abstract

The strength of concrete placed when outside air temperatures are in the range of  $-5^{\circ}\text{C}$  to  $+10^{\circ}\text{C}$  is impaired because of retardation of the rate of hydration and freezing at the initial stage of hardening.

This report describes examinations and analyses for the purpose of obtaining a curing method capable of protecting concrete from freezing at the initial stage.

The examinations and analyses were carried out on slabs which are in most danger of freezing. This paper reports about the relation between outside air and slab temperatures, the effect of outside air temperature on freezing, and the extent of the effect of a handy curing method at the initial stage.

#### 概 要

コンクリート打込後の外気温が  $-5\sim+10^{\circ}\text{C}$  程度の範囲におけるコンクリート工事では、凝結硬化過程の凍結によるコンクリート組織の変化あるいは低温を伴う温度変化による水和速度の遅延などの組合せにより、強度が温暖な時期に比較して低下する傾向にある。

本報告はコンクリート打込後凝結硬化過程における凍結を防止し、強度低下を生じない合理的かつ経済的な初期養生の方法を得るために行なった実験結果および解析の結果をまとめたものである。

実験および解析は凍結の危険性の最も大きいスラブ部材を対象に行ない、外気温とスラブ内部温度変化との関係を明らかにすることにより、外気温が凍結に及ぼす影響、簡易な初期養生方法の効果の範囲について検討した。

#### 1. はじめに

コンクリート打込後の外気温が  $-5\sim+10^{\circ}\text{C}$  程度の範囲におけるコンクリート工事では、凝結硬化過程の凍結によるコンクリート組織の変化あるいは低温を伴う温度変化による水和速度の遅延などの組合せにより、強度発現が温暖な時期に比較して低下する傾向にある。

本報告は、強度低下の危険性の最も大きいスラブ部材の、コンクリート打込後凝結硬化過程中の凍結による強度低下を合理的かつ経済的に防止する方法を得るために行なった、実験および解析の結果をまとめたものである。

実験および解析では、打込温度、外気温などの各要因とスラブの温度変化との関係を明らかにし、凍結による強度低下を防止するための条件を、各要因との関係において整理した。

#### 2. 室内実験による検討

室内実験では、主に、種々のパターンの外気温と、模擬スラブの温度変化との関係を明らかにするとともに、強度発現性状を調査した。さらに、簡易な初期養生の効果についても検討した。

##### 2.1. 実験概要

実験の概要は以下に示す通りである。

2.1.1. 使用材料およびコンクリートの調合 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 (°/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 (°/wt)，粗粒率6.53
- 混和剤：AE 剤

コンクリートの調合条件および調合は以下に示す通りである。

コンクリートの調合条件：スランプ——18±2.5 cm，空気量——4±1°/vol，w/c——55%

実施調合は，試し練りにより表-1に示す調合を用いた。

(kg/m <sup>3</sup> )						
W/C(%)	S/a(%)	水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
55.0	40.0	191	347	958	752	0.087

表-1 コンクリートの調合

2.1.2. 供試体の形状寸法 模擬スラブの形状寸法は図-1に示す通りで，スラブの厚さは代表値として15 cmを採用した。

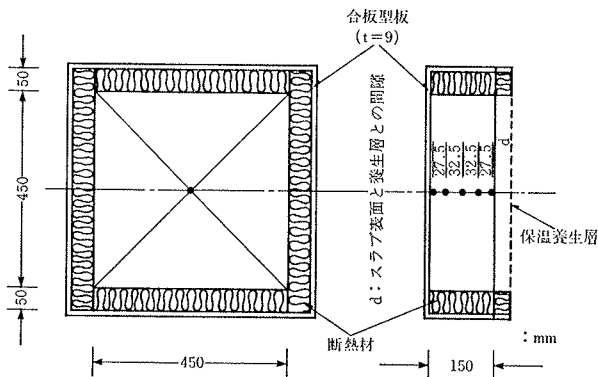


図-1 模擬スラブの形状寸法

2.1.3. 温度測定 温度測定にはC-C熱電対を用い，自記記録した。また模擬スラブ内の温度測点は図-1に併記した。

2.1.4. 外気温の設定 外気温は(2.1)式に示すsin曲線と仮定し，大型恒温恒湿養生槽内の雰囲気温度をプログラム制御することにより再現した。

$$\text{外気温}(\theta) = 5 \cdot \sin(\omega \cdot t + a) + b \quad \dots\dots(2.1)$$

ここに，

- t: 時間
- a: 打込時期を示す位相のずれ
- b: 最低温度を示す定数項
- ω: 角振動数

2.1.5. 実験の要因 実験の要因として取り上げた項目および水準については表-2に示す通りである。

実験要因	水準数
打込時刻	8:00, 14:00, 18:00……3水準
外気温の最低値	-1, -2, -3, -4, -9°C……5水準
簡易な養生	養生なし，シート1層(養生層とスラブ表面との間隔1cm,4cm)，シート2層，ウレタン(t=5mm)合板(t=9mm)……5水準
外気の振幅	10°C……1水準
打込時のコンクリート温度	13, 15, 18, 20°C……4水準

表-2 実験の要因と水準

2.1.6. 強度試験 スラブ模擬部材は，実験計画に示す外気温の変化を与えた後，材令28日でコア供試体を採取し，凍結の強度発現への影響を検討した。

2.1.7. 実験条件の組み合わせ 実験条件の組み合わせは表-3に示す通りである。

外気温度範囲(°C)	記号	養生の種類	a (hr)	b (°C)	T (°C)	外気温度範囲(°C)	記号	養生の種類	a (hr)	b (°C)	T (°C)
-1	A-1	-	0	4	15.0	-9	E-1	-	10	-4	13.0
-2	-2	-	6	4	15.0	-2	-2	シート1層(1)	10	-4	13.0
		-	10	4				シート1層(2)	10	-4	
+9	-3	-	10	4	15.0	+1	-4	シート2層	10	-4	13.0
-2	B-1	-	10	3		-9	F-1	-	10	-4	
		-2	シート1層(1)	10	3			-2	シート1層(1)	10	-4
+8	-3	ウレタンシート	10	3	15.0	-2	-2	シート1層(1)	10	-4	13.0
		-	10	3				-3	ウレタンシート	10	
-3	C-1	-	0	2	15.0	+1	-4	合板	10	-4	18.0
		-2	-	6				2	-2	-	
+7	-3	-	10	2	15.0	-2	-2	シート1層(1)	10	3	13.0
-4	D-1	-	0	1				+6	-3	-3	
		-2	-	6	1	-4	シート2層				10
+6	-3	-	10	1	15.0	+6	-4	シート2層	10	3	13.0

(注) a, b  $\theta = 5 \cdot \sin(\omega(t+a)) + b$   
T 打込時のコンクリート温度

表-3 実験条件の組み合わせ

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 練り上り時のコンクリートの性質

各シリーズの練り上り時のコンクリートの性質は，表-4に示す通りで，スランプ16.8~19.7 cm，空気量

記号	スランプ(cm)	空気量(%)	単位容積重量(kg/l)	コンクリート温度(°C)	記号	スランプ(cm)	空気量(%)	単位容積重量(kg/l)	コンクリート温度(°C)
A-1	17.7	3.9	2.32	14.3	E-1	19.0	3.9	2.30	13.0
-2	18.3	4.4	2.31	14.5	-2				
-3	19.7	4.6	2.31	14.5	-3				
B-1	-	-	-	14.5	-4				
-2	-	-	-	15.0	F-1	19.5	3.5	2.31	18.0
-3	-	-	-	15.0	-2				
-4	-	-	-	14.0	-3				
C-1	18.7	3.8	2.32	10.2	-4				
-2	18.1	4.0	2.32	14.0	G-1	16.8	3.7	2.34	17.1
-3	18.2	3.4	2.32	16.1	-2				
D-1	18.2	4.1	2.31	13.2	-3				
-2	18.1	4.0	2.32	15.0	-4				
-3	19.0	3.9	2.31	14.0					

表-4 練り上り時のコンクリートの性質

3.5~4.6%/vol, コンクリート温度13.0~18.0°Cではほぼ当初の計画通りであった。

### 3.2. 模擬スラブの温度変化

各シリーズにおける模擬スラブの温度変化の測定結果から、各要因および、簡易な初期養生を施した場合の凍結との関係を検討すると以下の通りとなる。

3.2.1. 打込時刻と凍結との関係 打込時刻とスラブの温度変化との関係を図-2に示した。これより、外気の最低温度が-1°C, および-2.5°Cで、打込時のコンクリート温度が約14°Cの場合は、材令24時間以内の凍結は認められなかった。しかし、最低温度が-4.5°Cの場合合には、8:00打込相当で、打込後15時間14:00打込相当で14時間, 18:00打込相当で11時間後にそれぞれスラブ表面が凍結した。すなわち打込時刻が遅いほど凍結の危険性が増大することがわかる。

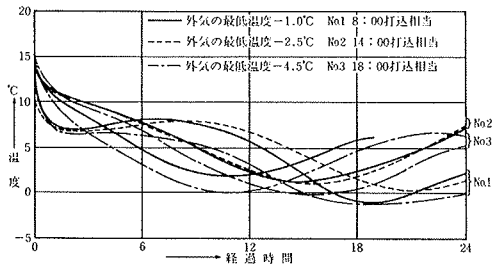


図-2 打込時刻および外気の最低温度とスラブ表面温度との関係 (A, C, D シリーズ)

3.2.2. 最低温度と凍結との関係 前述の図-2によると、打込時のコンクリート温度が13~15°Cの範囲で、外気の最低温度-2.5°Cでは、打込後24時間以内の凍結は認められず、-4.5°Cでは凍結が認められた。これより、ほぼ-4°C程度になると、打込後24時間以内の凍結の危険性が増大することが推察されるが、逆に打込時のコンクリート温度が15°C程度であれば、外気の最低温度が-3°C程度までは特に初期養生を考慮しなくても、凍結の危険性は少ないと考えられる。

3.2.3. 簡易な初期養生方法の効果 簡易な初期養生の凍結防止効果を、凍結の危険性の最も大きい18:00相当打込の場合について検討した。

最低温度-2.0°Cの場合 (Bシリーズ) は図-3に示した通りで、スラブ表面の最低温度は、養生なしの場合+1.2°C, シート1層養生の場合+6.0°C, ウレタンシートの場合+8°Cとなり、簡易な養生によって、相当の保温効果が期待できぬことがわかる。

簡易な養生によって、どの程度の外気温度の範囲まで凍結防止効果が期待できるかを、外気の最低温度-9°C, 打込時のコンクリート温度を16, 12°Cとし、18:00打込相当の場合について図-4に示した。

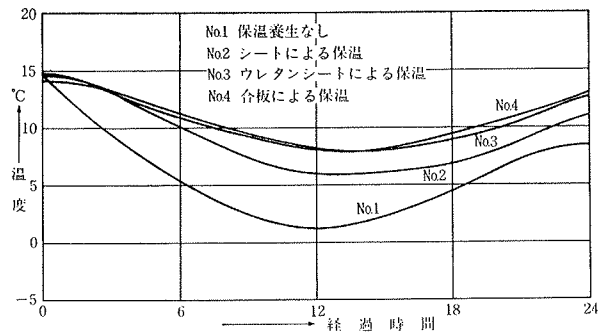


図-3 養生別スラブの表面温度履歴 (Bシリーズ)

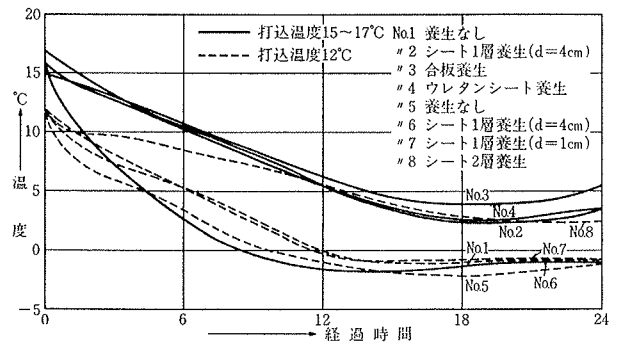


図-4 養生別スラブの表面温度履歴 (E, Gシリーズ)

図-4によると、打込時のコンクリート温度12°Cで養生なしの場合、打込後約9時間、シート1層の場合、打込後約12時間で凍結が認められた。シート2層養生では、表面の最低温度が2°Cで、打込後24時間以内の凍結は認められなかった。これよりシート養生においても2層とすることによってかなりの凍結防止効果の期待できることがわかる。なお、シートとコンクリート表面との間隙の程度によるスラブ表面温度履歴の差は認められなかった。

打込温度15~17°Cの場合には、シート1層養生でも、材令24時間以内の凍結は認められず、打込時のコンクリート温度を高くすることがきわめて凍結防止に有効なことがわかる。

また各養生間の比較については、合板の保温効果が最も大きく、ついでウレタンシート養生、シート養生の順であった。

### 3.3. 強度試験結果

打込後、材令24時間を経た後20°C標準養生とし、初期の温度変化が強度に与える影響を検討した。

各模擬スラブ供試体から採取したコア供試体の強度試験結果と標準水中養生供試体強度との割合 (強度比) によって、強度性状を検討した。

各スラブが凍結するまでに得られる積算温度 (T\*T) を求め、強度比との関係を示したものが図-5であるが、

凍結までに得られる積算温度が  $140 T^{\circ}T$  以下の場合には、強度低下の生ずる傾向があり、既に  $\phi 10 \times 20$  円筒供試体を用いた、室内実験によって得られている結果と符合している<sup>1)</sup>。

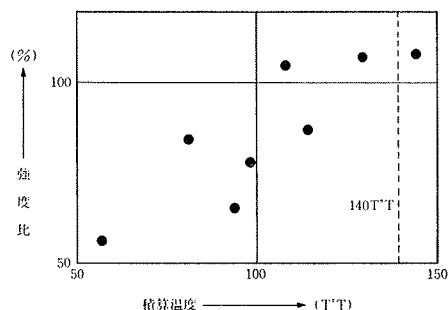


図-5 凍結までに得られた積算温度と強度比との関係

室内実験の結果、スラブの凍結に及ぼす、外気温の条件および打込時のコンクリート温度の影響が顕著なことを明らかにした。さらに簡易な初期養生が凍結防止にきわめて有効なことを確認したが、実験で十分検討しつくせないケースについて、解析により検討し、凍結の条件を各要因ごとに、より明らかにした。

#### 4. 解析による検討

##### 4.1. 解析概要

4.1.1. 解析モデル 解析は、凍結の危険性の最も高いスラブを対象にした。そのモデルは図-6 に示す通りである。

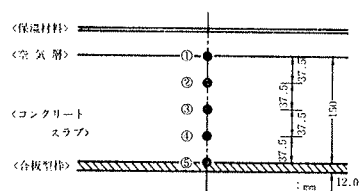


図-6 解析モデルスラブ

4.1.2. 解析方法 解析は、一次元の不定常階差方程式によった。

4.1.3. 解析に使用した定数 解析に使用した定数は表-4 に示す通りである。

4.1.4. 解析時に取り上げた要因 解析では、要因として、保温材料の種類 (A)、打込時期 (C)、外気の最低温度 (D)、打込時のコンクリート温度 (E)、外気温の振幅 (F) を取り上げこれらの要因を種々組み合わせて解析を行なった。各要因の水準数は表-5 に示す通りである。

コンクリートの熱伝導率 (kcal/m <sup>2</sup> ・hr <sup>2</sup> ・°C)	コンクリートの比熱と比重の積 (kcal/m <sup>3</sup> ・°C)	スラブ上面の熱伝達係数 (kcal/m <sup>2</sup> ・hr <sup>2</sup> ・°C)	スラブ下面の熱伝達係数 (kcal/m <sup>2</sup> ・hr <sup>2</sup> ・°C)
1.4	600	25(養生なし) 13.2(シート1層)	4.9

表-5 解析に使用した定数

要因	水準
スラブ表面の保温養生材を含んだ熱伝達係数 (A)	13.2, 25 (kcal/m <sup>2</sup> ・hr <sup>2</sup> ・°C)
スラブ表面の合板型枠を含んだ熱伝達係数 (B)	4.9 (kcal/m <sup>2</sup> ・hr <sup>2</sup> ・°C)
打込時刻 (C)	8:00, 14:00, 18:00
外気の最低温度 (D)	-5, -3, -1 (°C)
打込時のコンクリート温度 (E)	10, 15, 20 (°C)
外気温の振幅 (F)	0, ±3, ±5 (°C)

表-6 解析に使用したA~Fの水準

##### 4.2. 解析の結果と考察

4.2.1. 解析値と実測値との適合性 図-7 は前述の実測値と解析値との比較であるが、実測値と解析値とは比較的よく符合した結果となっている。特にコンクリートの水和熱を考慮しないで解析を行なったが、凍結と外気温の条件を検討するには、満足すべきものと考えられる。

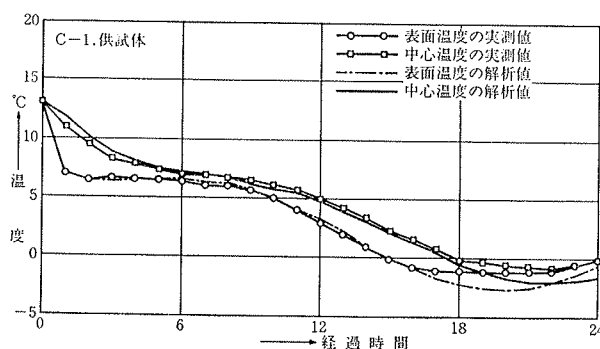


図-7 実測値と解析値との比較

4.2.2. 各要因とスラブの凍結との関係 スラブの凍結に大きな影響を及ぼしていると思われる要因と凍結との関係を凍結までに得られる積算温度 ( $T^{\circ}T$ ) との関係において以下に示す。

図-8, 9 はそれぞれ、初期養生のない場合、およびシート1層養生の場合について、打込時のコンクリート温度、打込時期、外気の最低温度、外気温の振幅を要因として、凍結までに得られる積算温度 ( $T^{\circ}T$ ) を求めたものであるが、各要因と、凍結との関係を整理すると以下の通りとなる。

###### (1) コンクリート打込時の温度と凍結との関係

打込時のコンクリート温度が高くなる程、凍結に至るまでの経過時間が長くなり、凍結までに得られる積算温度が大となり、その傾向は、外気の振幅が大きく、打込

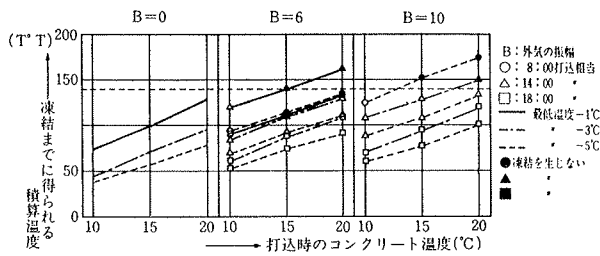


図-8 凍結までに得られる積算温度  
(初期養生のない場合)

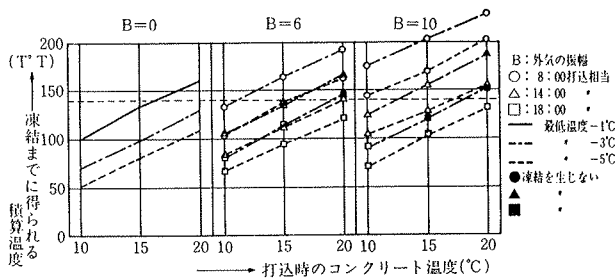


図-9 凍結までに得られる積算温度  
(シート1層養生の場合)

時刻が早いほど顕著である。

(2) 打込時刻と凍結との関係

打込時刻が遅いもの程、凍結に至るまでの経過時間が短く、凍結の危険性が增大し、凍結による強度低下の恐れのあることがわかる。従って、打込時刻が遅れる場合には、コンクリート温度を高くするなどの配慮が必要となる。

(3) 外気の最低温度と凍結との関係

スラブの凍結は、コンクリート打込後の外気の最低温度の影響を顕著に受ける。すなわち、外気の最低温度が低い程、凍結に至るまでの経過時間が短く、凍結の危険性が增大する。解析の結果では、特に外気の振幅が小さい程凍結の危険性が高く、打込時のコンクリート温度が低い程その危険性が助長される。ちなみに、打込時のコンクリート温度を15°Cとすれば、凍結までに得られる積算温度が140 T°T 以上となる条件は、初期養生のない場合下記となる。

外気の最低温度：-3°C以上

外気温の振幅：6°C以上

打込時刻：8：00以前

(4) 外気の温度振幅と凍結との関係

前述のように、外気の最低温度が同一の場合、振幅が増大すれば、凍結までに得られる積算温度が増大し、凍結による強度低下の危険性が少なくなる。従って打込後、加熱、保温などによって、温度上昇を計ることが、凍結防止のために有効な手段となることが考えられる。

(5) シート保温養生

凍結の危険性のある条件下で、コンクリート施工を実施せざるを得ない場合には、凍結の防止を、経済的考慮をもって計る必要がある。今回対象としている外気温の範囲は、最低温度が-5°Cであり、この程度の外気温の範囲では簡易なシートによる保温養生が相当の効果をもつことは、実験結果によっても明らかであり、一方解析においても、シートによる保温養生を施さない場合に比較して、凍結に至るまでに得られる積算温度が10~20%増大し、特に打込時のコンクリート温度が高い程その傾向は顕著である。従って、コンクリート温度を高めにし、さらにシート養生(1層)を施すことにより、凍結防止効果がより顕著に期待できるものと考えられる。

5. まとめ

実験および解析の結果を整理すると以下の通りとなる。

- (1) スラブの凍結は、打込時のコンクリート温度、外気の最低温度、外気の振幅、打込時刻の影響を顕著に受ける。またこれらの要因と凍結との関係を整理できたので実際の施工に役立てることが可能である。
- (2) 凍結までに得られる積算温度が140 T°T 以上あれば、凍結による強度低下は少ない。
- (3) 簡易初期養生としての、シート1層養生の効果は、養生なしの場合に比べ、かなり凍結防止に有効であり、特にコンクリート温度を高くすることによって、その効果がより顕著となる。

参考文献

1) 高橋, 長尾: 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), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 36~40