

# 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1)

——現場における実態調査結果——

高橋久雄 長尾寛博

## Study on Temperature Change and Strength Property of Concrete Placed in Low-temperature Period (Part 1)

——Results of Investigation into Field Conditions——

Hisao Takahashi Kakuhiro Nagao

### Abstract

The situation today in concrete construction is that there is excessive placement of concrete when outside air temperatures in the range of  $-5^{\circ}\text{C}$  to  $+10^{\circ}\text{C}$  (hereafter called low-temperature period) will be recorded so that mix proportions and curing methods will be costlier to result in poor economy. It is necessary, therefore, to establish reasonable and economical mix proportions, methods of curing and control of concrete works.

In view of this background, this report indicates the trends found in the results of investigations into actual conditions in the field concerning temperature changes and strength properties of concrete in low-temperature periods, and lists problems necessary to be examined in the future.

### 概 要

コンクリート打込後、材令28日までの外気温が約 $-5^{\circ}\text{C}$ ～ $+10^{\circ}\text{C}$ の範囲（以下低温期と呼ぶ）に施工されるコンクリートの調合の選択、養生などの方法が過大となり、不経済な調合を用いているのが現状である。このため温度変化と強度性状との関係を明らかにすることにより、合理的かつ経済的な調合、養生方法を究明し、早急に現場における管理方法を定める必要がある。

本報告はこのような背景にもとずき、まず実際の工事現場において、低温期に施工されたコンクリートの温度変化および強度発現性状の調査を行ない、これらの実態をとりまとめ、傾向を把握するとともに、今後検討すべき問題点を抽出したものである。

## 1. はじめに

コンクリート打込後、材令28日までの外気温が約 $-5^{\circ}\text{C}$ ～ $+10^{\circ}\text{C}$ の範囲（例えば、関東、京阪地域の冬期、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、気候の温暖な時期に比べて強度が低下する。このような時期にコンクリートを打込む場合、日本建築学会標準仕要書（JASS5）に示されているような温度補正、並びに保温養生を施すことは実情に比し過大気味であるとともに経済的な施工とは言い難い面があり、早急に、低温期に施工するコンクリートの合理的かつ経済的な施工方法を確立することが必要である。

本報告は、このような背景にもとずき、まず実際の工事現場において、低温期に施工されるコンクリートの温度変化および強度発現性状の調査を行ない、これらの実態をとりまとめ、傾向を把握するとともに、今後検討すべき問題点を抽出したものである。

## 2. 調査概要

### 2.1. 調査条件

外気温の設定範囲—— $-5^{\circ}\text{C}$ ～ $+5^{\circ}\text{C}$ とする。

構造——RCまたはSRC造

コンクリートの種類——川砂・川砂利使用の普通コンクリートとし、以下の仕様をもつものとする。

所要スランプ: 18~21 cm, 調合強度: 270 kg/cm<sup>2</sup> (設計基準強度 210 kg/cm<sup>2</sup> + 温度補正值 60 kg/cm<sup>2</sup>, あるいは設計基準強度 225 kg/cm<sup>2</sup> + 温度補正值 45 kg/cm<sup>2</sup>), 空気量: 4%/vol とする。

2.2. 温度測定の方法

温度測定は, C-C 熱異対を用い外気温度, 各部材, 各種養生供試体について, 各建物の南, 北, 中央について行なった。

各部材内部の温度測点は, 外気側表層部, 中心部, 室内側表層部の3点とし, 図-1 に示す要領で打込後材令28日まで測定する。

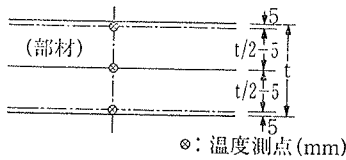


図-1 部材内部の温度測点

2.3. 強度試験の概要

強度試験は, 10φシリンダー供試体と15角立方体供試体による各種養生および, 壁・スラブを対象とした模凝部材より, エア供試体を採取し, 材令28日で強度試験を行なった (図-2 参照)。

10φシリンダー供試体の養生条件は, 現場気中養生, 現場水中養生, 標準水中養生の3種類とし15角立方体供試体の養生条件は, 現場気中養生とした。また強度試験

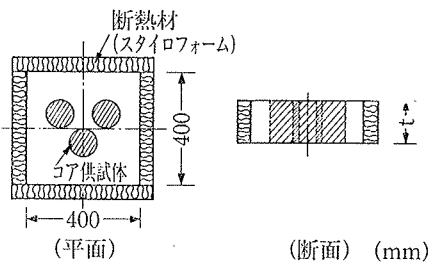


図-2 壁・スラブ模凝部材の形状寸法

調査現場	所在地	調査期間
A	札幌	1978.11.10~1978.12.20
B-1	東京	1978.12.14~1979.1.11
B-2	"	1979.2.21~1979.3.21
C-1	"	1979.1.13~1979.2.20
C-2	"	1979.1.17~1979.2.12
D	箱根	1979.4.3~1979.5.1

表-1 調査現場の所在地と調査期間

調査現場	A	B-1	B-2	C-1	C-2	D
構造・規模	RC, 5F	SRC, B2, 9F	"	RC, B1, 3F	"	SRC, B1, 2F
養生方法	折込断熱シート	折込断熱シート	"	なし	"	"
調査階	一般階	"	"	最上階	"	"
セメント	当利産川砂利	大井川産川砂利	大井川産川砂利	青梅産川砂利	"	谷津口産川砂利
使用材料	粗骨材 MAX: 25m/m FM: 6.83	MAX: 25m/m FM: 6.86	MAX: 25m/m FM: 6.79	MAX: 20m/m FM: 6.66	"	MAX: 25m/m FM: 6.91
	赤土産川砂 MAX: 5m/m FM: 2.88	小笠産川砂 MAX: 5m/m FM: 3.07	小糸川産川砂 MAX: 5m/m FM: 2.74	上野原・木更津 混合川砂 MAX: 5m/m FM: 1.97, 3.27	"	谷津口産川砂利 MAX: 25m/m FM: 2.80
混和剤	AE減水剤 プラスチック系	AE剤 フェノール系	AE減水剤 (フェノール系EX)	AE減水剤 (ポリスNo.3)	"	AE減水剤 (フェノール系EX)
スランプ (cm)	18	21	20	20	"	18
fc (kg/cm <sup>2</sup> )	210	225	225	210	"	210
T (kg/cm <sup>2</sup> )	60	45	45	60	"	60
空気量 (%)	4	"	"	"	"	"
W/C (%)	50	51	48	53.2	"	48.5
S/A (%)	46	43.6	44	47.6	"	42.6
水 (kg/m <sup>3</sup> )	167	188	179	195	"	178
セメント (kg/m <sup>3</sup> )	334	369	373	367	"	367
粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	991	916	992	884	"	1013
細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	873	756	778	804	"	751
混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )	0.670	0.148	0.373	0.918	"	0.367
強度上のW/C (%)	51.5	52.6	49.5	54.8	"	50.0

(注) MAX: 骨材の最大寸法 T: 温度補正值 FM: 粗粒率 FC: 設計基準強度

表-2 各調査現場における建物の概要

の材令は, 打込後1日, 3日, 7日, 28日とした。

2.4. 調査現場の概要

調査した現場は, 札幌, 東京および箱根の4現場とし, 調査回数は合計6回とした。調査現場の所在地および調査期間は表-1に示した。

また, 各調査現場における, 建物の構造・規模・調査

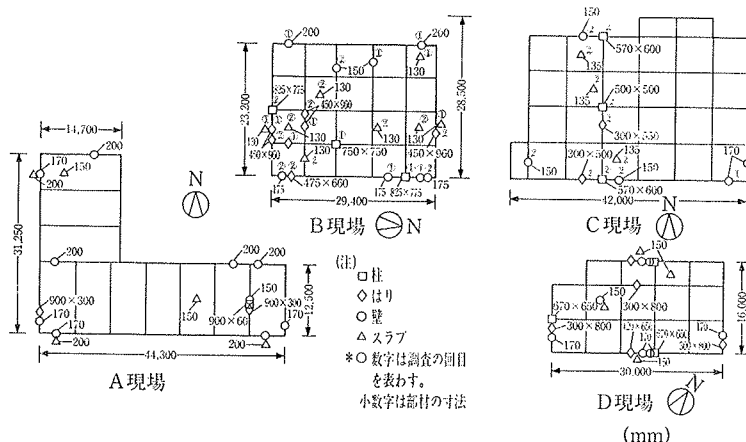


図-3 各調査現場における温度測定部材の位置

時の養生条件, 調査階コンクリートの使用材料, 調査条件を表-2に示した。

さらに, 各現場における各部材(柱・はり・壁・スラブ)の温度測定箇所は, 図-3に示す通りである。

### 3. 調査の経過

#### 3.1. 供試体作成時のコンクリートの性質

各調査現場における, 供試体作成時のコンクリートの性質は表-3に示す通りで, 各現場とも所定の品質のコンクリートが得られた。

#### 3.2. 温度測定の間

温度の測定は, 各現場ともにコンクリート打込直後から, 材令28日まで継続して行なった。なお, 測定データに一部欠測部分が認められたため, 欠測前後の測定値を用い, 直線補間によってデータを補充した。

調査現場	供試体の作成位置	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/l)	コンクリート温度 (°C)
A	1	17.8	4.4	—	17.0
	2	18.7	4.1	—	16.0
B-1	1	20.0	4.2	2.33	16.7
	2	18.7	4.2	2.33	16.6
	3	19.0	4.1	2.36	16.8
B-2	4	20.6	3.4	2.90	18.0
	5	19.3	4.2	2.33	20.0
	1	18.0	3.9	2.18	20.0
C-1	2	21.8	2.9	2.17	17.0
	1	22.5	2.8	2.15	10.0
C-2	2	21.2	3.7	2.16	10.0
	1	18.8	3.7	2.18	11.5
D	2	20.7	2.3	2.19	14.0
	3	19.6	3.0	2.35	12.1
	1	18.8	3.9	—	17.0
	2	18.6	4.1	—	19.0

表-3 打込時のコンクリートの性状

## 4. 調査結果と考察

### 4.1. 調査期間中の外気温度

各調査現場における, 打込時から, 材令28日までの日

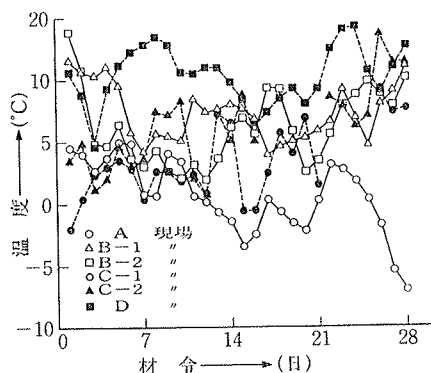


図-4 調査期間中の外気温度の範囲

平均温度の変化を図-4に示した。これによると, 当初の調査条件である,  $-5^{\circ}\text{C} \sim +5^{\circ}\text{C}$ の温度範囲に入っていたのは, A, およびC-1, C-2の現場の場合で, 他の現場の場合には, 材令28日までの日平均温度の範囲が $5^{\circ}\text{C}$ を越え, 全調査現場を含めた外気温度の範囲は $-5^{\circ}\text{C} \sim +10^{\circ}\text{C}$ であった。

### 4.2. 各部材の温度変化と外気温度との関係

4.2.1. 各部材の温度変化の一般的傾向の考察 各部材の打込時からの温度変化の測定結果は, 図-5に示すように, 柱・はり・壁部材については打込後, 水和熱によって温度上昇し, 材令24~30時間で, 最高温度に達した後徐々に下降し, 材令7日程度で外気温度と近似した温度変化を示している。スラブについては, 打込時の外気温度が比較的高い場合には, 若干水和熱による温度上昇が認められるが, その大半は, 打込直後より, 外気温度と同様の温度変化を示している。

すなわち, 低温期に打込まれる各部材の初期の温度条件はスラブが最も不利となり, スラブの温度変化を改善することが, 低温期に打込まれるコンクリートの施工方法を考慮する際のポイントとなる。

また, スラブについては, 一般階と最上階では, 打込

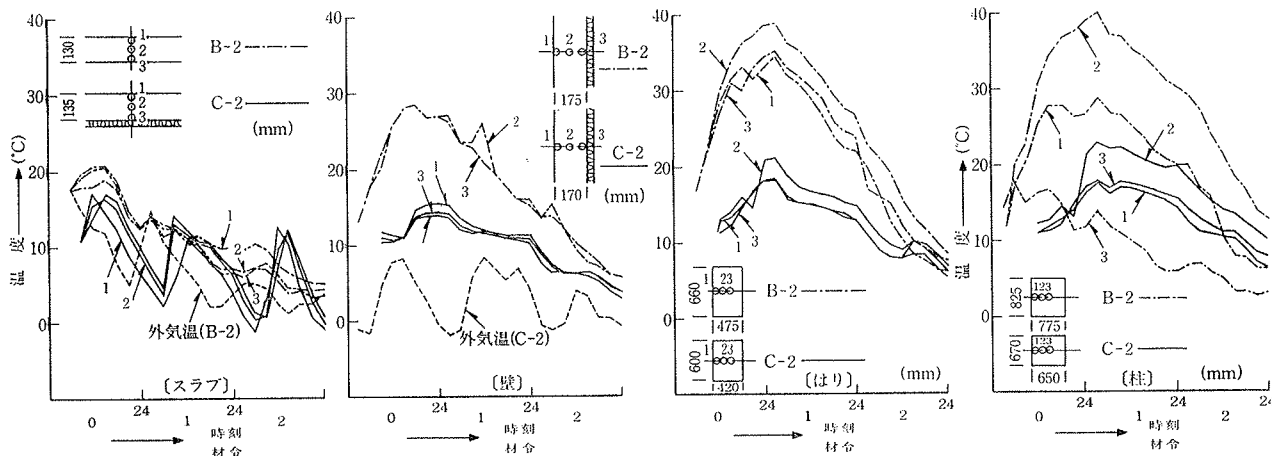


図-5 各部材の初期材令における温度変化の測定例 (B-2, C-2 現場の場合)

直後の温度変化は両者ともほぼ外気温に近似した傾向を示すが、材令7～10日以降は、一般階のスラブの場合には上階ができるため、直達日射量および夜間の輻射冷却が減少し、温度の振幅は図-6に示すように、最上階の場合よりも小となる。しかし材令28日までのスラブと外気の積算温度(°DD)との比を比較すると一般階および最上階とも、ほぼ同一値となり、大差のない結果となっている。

4.2.2. 各部材の温度変化のパターン化の試み 各部材の温度変化の傾向をどのように考慮すればよいかを目安づけるために、各部材の温度変化パターン化を試みた。

前述のように、打込後の各部材の温度変化は、打込時の条件、各部材によって差が認められ、柱で約30°C、はりで約25°C、壁で20°Cの最高温度を示した後下降し、材令7日で外気温に近似した傾向を示す。さらに材令7日以降の変化は、日間の振幅を繰り返しながら、7～10日周期の大振幅を2～3回繰り返す。日間の部材平均温度の振幅は、柱、はりで約3.0°C、壁で約4.0°C、スラブで約4.0°C(一般階)、10.0°C(最上階)であり、7～10日周期の大振幅は、各部材とも日平均温度で4～8°Cであった。

なお、外気温は、気象資料<sup>1)</sup>によっても±4°Cの範囲内で、大振幅を繰り返しており、今回の調査結果の傾向と一致している。

すなわち、各部材の温度変化の傾向と、気象の統計資

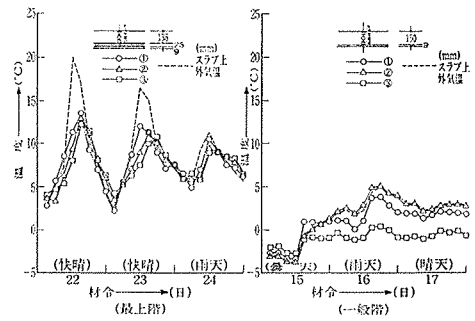


図-6 一般階および最上階のスラブの温度変化

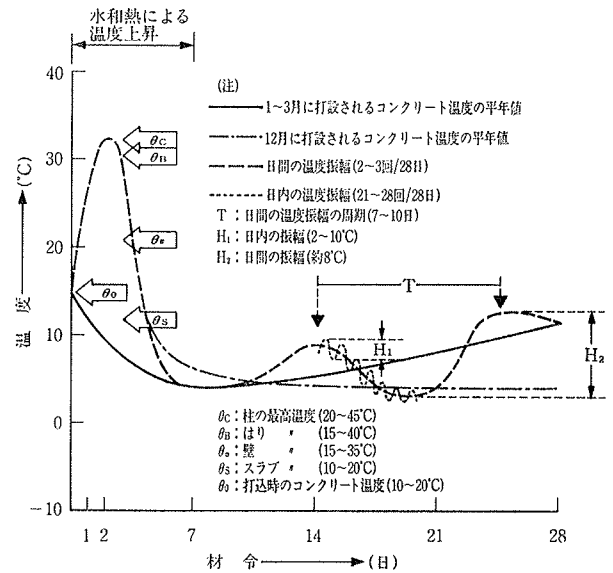


図-7 各部材の温度変化のパターン化

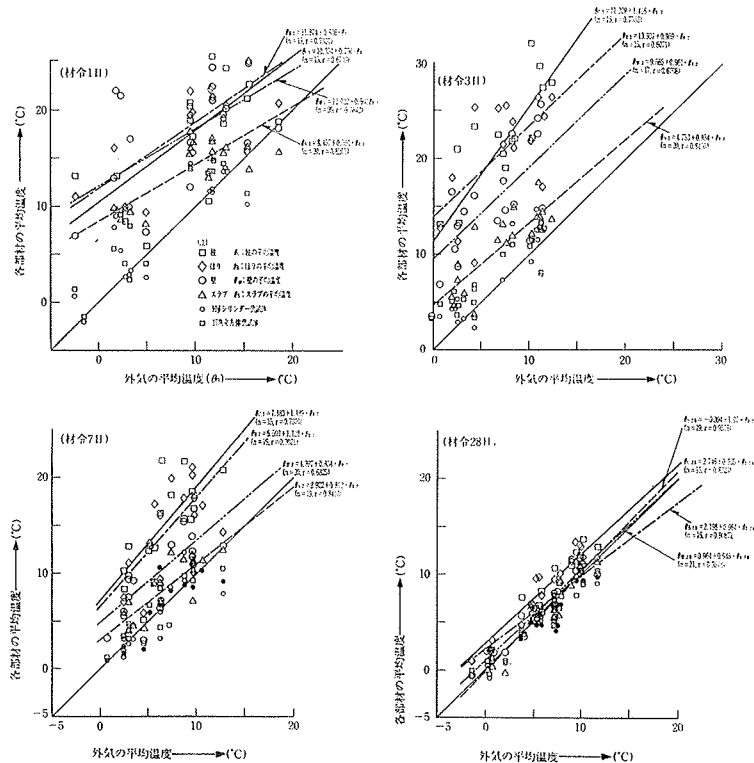


図-8 各部材の平均温度と外気の平均温度との関係

料との関係をふまえながらまとめると、各部材の温度変化は、図-7に示すパターン化が可能と考えられる。

4.2.3. 各部材の平均温度と外気温の関係 各強度試験材令(1, 3, 7, 28日)と外気温の関係を図-8に示す。この結果によれば、材令1日までのについては、外気の平均温度が-3~19℃の範囲内にあり、スラブの一部と強度試験用供試体を除いた他の部材温度が全般に外気温より高めで、とくに、外気温5℃以下の場合には、柱・はり・壁の各部材温度と外気温との差が顕著である。材令3日までのについては、外気の平均温度-1~13℃の範囲で、外気温の高低には関係なく、ほぼ一定値の割合で、外気温よりも高目となっている。すなわち、スラブでは3~4℃、壁では9~10℃、柱・はりでは11~14℃程度、外気温よりも高く、水和熱による温度上昇の影響が認められる。材令7日までのについては、外気の平均温度0~13℃の範囲でスラブはほぼ外気温に一致し、壁は外気温の大小に関係なく、4~5℃程度外気温よりも高くなっている。柱・はりでは外気温が高くなるに従い、外気温よりも7~10℃の範囲で漸次高くなる傾向が認められる。材令28日までのについては、外気の平均温度-2~12℃の範囲で、柱の部材温度がやや高目である他は、ほぼ外気温に一致している。

4.2.4. 各部材の凍結について 図-9は、材令28日までの各部材の凍結の回数と、外気温が0℃以下となる回数を比較したものであるが、スラブと外気温の凍結の回数は等しいが、他の部材の凍結の回数は、外気温が0℃以下となる回数より少ないことを示している。

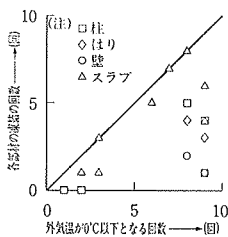


図-9 各部材の凍結の回数と外気温が0℃以下となる回数の比較

従って、スラブの場合には、外気温の条件によって容易に凍結する可能性があることがわかる。

以下に、スラブが凍結する場合の外気温の条件と、凍結時のスラブ内の温度分布の状態を示す。

図-10は、材令3日までの間に凍結を生じたスラブの温度変化の実測例であるが、この結果から、打込時のコンクリート温度が15℃前後であれば、打込後から翌日までの間の外気温度が-3℃程度まで低下しても、ごく表層部分が凍結を生ずる程度で、スラブ自体には凍結による影響はないものと推察される。また図-11は凍結の状

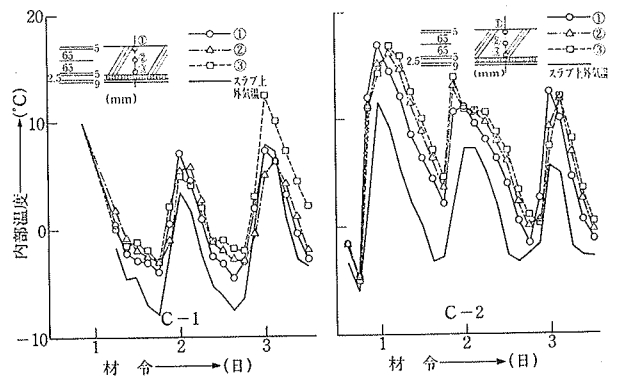


図-10 初期材令に凍結したスラブの温度変化例

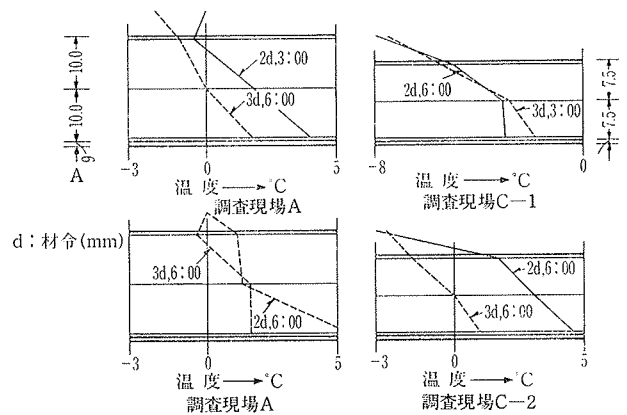


図-11 凍結時のスラブ内部温度分布

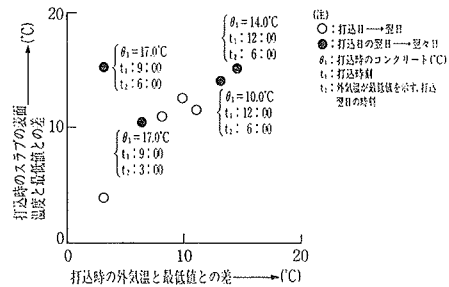


図-12 打込時の外気およびスラブ表面温度とそれぞれの最低値との差の比較

況を断面的に図示したものであるが、これからも前述のことが裏づけられる。

今回の調査結果にもとづき打込時のスラブの凍結と外気温との関係を図示すると図-12となる。

これより、打込後予想される外気温の最大値-最小値 =  $\Delta t_1$  とすれば、スラブ表面の凍結の有無は(4.1)式で表わされ、特に初期養生を施さない場合には、この条件を満足する打込温度とすれば凍結は防止できるものと考えられる。

$$\theta_1 > \Delta t_1 + t \dots \dots \dots (4.1)$$

$\theta_1$ : 打込時のコンクリート温度 (℃)

$a_1$ : 打込直後の外気温の降下 (°C)

$t$ : スラブ表面温度降下の増分 (°C)

(図-12の結果を参考値とすれば約3.5°C)

他部材の凍結については、実測結果より外気温が-3~-5°C程度にまで低下しても凍結は生ずることがない結果となっている。これは、他部材の場合、スラブよりも寸法が大きいことと、型枠による保温効果の大きいためと考えられる。

4.3. 強度試験結果

4.3.1. 硬化初期の凍結が強度発現に与える影響 打込後、硬化初期にスラブと各種養生供試体に凍結を生じたのは、A、C-1およびC-2の現場であった。表-4は、C-1、C-2の現場における各種養生供試体の結果であるが、W/C=50%程度のコンクリートの標準水中養生供試体強度は330~370kg/cm<sup>2</sup>程度と考えられるので、これより推測すると、打込後凍結まで平均外気温度が約3.0°Cで、打込後12時間以内に凍結を生じた場合には、若干強度低下があったと推測されるが明らかではない。また凍結時のコンクリート強度を積算温度(T°T)から推測すると、1kg/cm<sup>2</sup>に満たないことが予想されるが、T°Tと強度の関係をどのように凍結防止に結びつけるかは今後の検討課題であろう。

調査現場	位置	供試体の種類					
		標準水中	現場水中	現場気中	15角立方体 現場気中	スラブ 模擬部材	壁・スラブ 模擬部材
C-1	1	324*2	293*2	172*2	251*2		269*3
	2	292*3	255*3		249*3	219*1	238
C-2	1	333*1	279*1	221*1	278*1	265	269*1
	2	359*1	302*1	188*1	278*2	263*1	301
	3	329*1	289*1		279*0		302*1
	4	342*0	293*0	150*0	272*0		

(注) \*0: 材令2日(48時間)~材令3日(72時間)までの間に凍結  
 \*1: " 1" (24") ~ " 2" (48") "  
 \*2: " 0.5" (12") ~ " 1" (24") "  
 \*3: " 0" (0") ~ " 0.5" (12") "

表-4 硬化初期に凍結を生じた各種供試体の強度

4.3.2. 積算温度と強度との関係

(1) T°T<sup>2)</sup>と強度との関係 各調査現場における、打込後材令1日までの積算温度T°Tと、各種養生供試体強度との関係を、図-13に示したが、これより実測値は、笠井氏により提案されているT°Tと圧縮強度百分率との関係<sup>2)</sup>に、全体としての傾向は類似しており、今回の調査条件の範囲では、提案されている直線によってかなり安全側に初期強度を予測できることが推察される。

(2) °DD<sup>3)</sup>と強度との関係 積算温度°DDと強度比との関係を検討するために、各種養生供試体別に、両対数で表示したのが図-14であるが、いずれの場合も材令1~7日までの積算温度については相関が高く、材令1~28日までの積算温度については10φシリンダー供試体の現場気中養生および15角立方体供試体の現場気中養生については、比較的相関が認められたが10φシリンダー供試体の現場水中養生供試体の場合には、相関が顕著に低下する傾向が認められた。

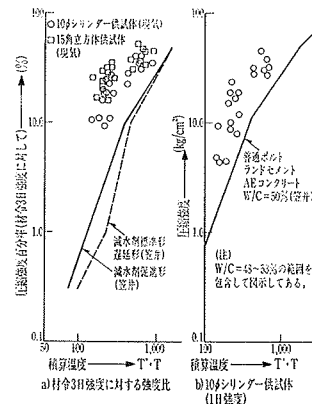


図-13 積算温度(T°T)と強度との関係

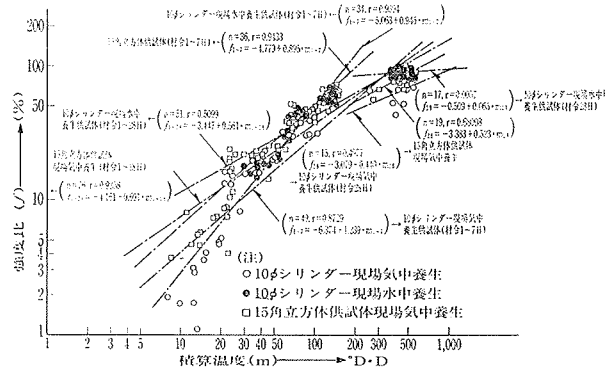
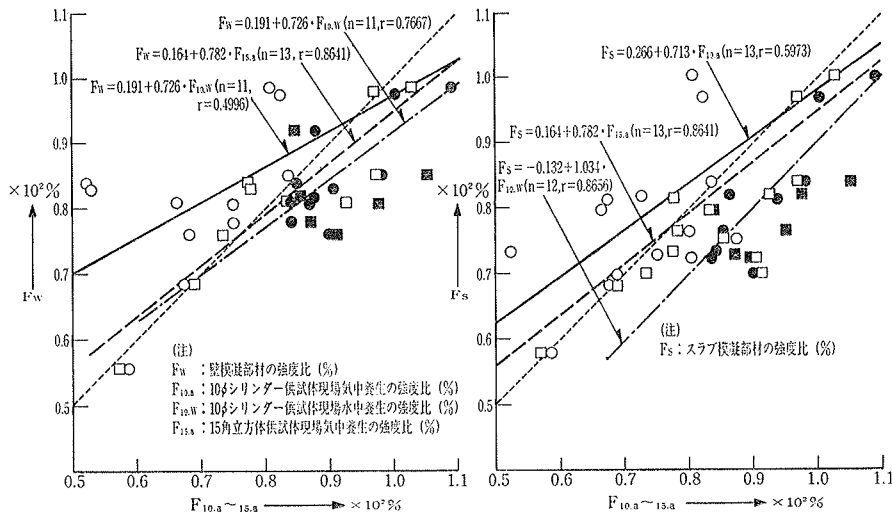


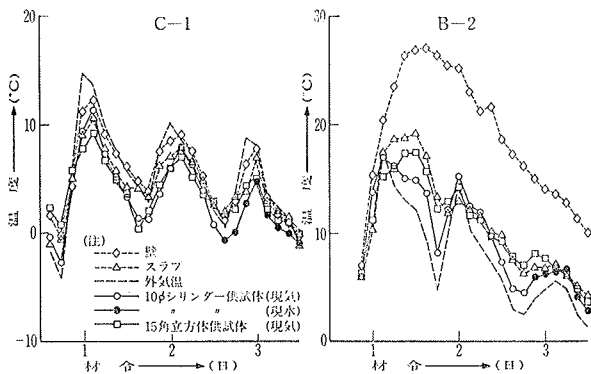
図-14 積算温度(D°D)と強度比との関係

(3) 各種養生供試体と壁・スラブ模擬部材強度との関係 図-15に、材令28日における、10φシリンダーの現場気中養生、現場水中および15角立方体の現場気中養生供試体と、壁・スラブ模擬部材のコア供試体強度との関係を、標準水中養生強度に対する強度比で示した。これによると、今回の調査条件の範囲(材令28日までの平均外気温度が0~10°C程度)では、壁・スラブの模擬部材の強度比は、各種養生供試体のうち、10φシリンダー供試体の現場気中より大となり、同現場水中より小となる傾向が認められたが、15角立方体供試体の現場気中養生とは比較的よく一致する結果となっている。なお、材令初期の壁・スラブ部材の強度については、各種養生供試体と、壁・スラブ模擬部材の、打込直後からの温度変化



図一15 各種養生供試体と模凝部材の強度比の比較

の比較から（図一16参照），15角立方体供試体の温度変化が，外気温度の高低にかかわらず，スラブと近似し，外気温度が近い場合には壁ともよく近似する傾向が認められるので，15角立方体供試体の強度によって，壁・スラブの強度を判定するのが合理的と考えられる。



図一16 初期材令における各種養生供試体と模凝部材の温度変化の比較

### 5. まとめ

今回の調査によって得られた結果および今後の検討課題を整理すると以下の通りとなる。

- (1) 低温期に打込まれる各部材のコンクリート温度の傾向を明らかにし，パターン化が可能であることを確認した。
- (2) 凍結の危険性はスラブが最も大きいことを明らかにし，表面の凍結防止条件を，打込時のコンクリート温度，外気温度の変化との関係において提案した。
- (3) 打込後，材令24時間以内の硬化初期に凍結を生じても強度低下のあまり認められない場合があり，今後，この点に関する定量的な検討が必要である。
- (4) 積算温度 D°D と強度との関係は，材令7日までの初期材令については比較的よく適合するが，材令28日については，適合しにくいので今後強度と対応づけが可能な温度変化の定量化を検討する必要がある。
- (5) 壁・スラブの初期・長期強度の推定には，15角立方体供試体が最も都合のよいことを明らかにした。

### 参考文献

- 1) 気象協会編：気象年鑑
- 2) 日本建築学会編：コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説，（昭和51. 2）
- 3) 日本建築学会編：寒中コンクリート施工指針案・同解説，（昭和53. 2）