

寒 冷 期 に お け る

コンクリート工事の 新技術ガイド

Guide for Modified Winter Concreting

北海道立北方建築総合研究所

Hokkaido Northern Regional Building Research Institute

目 次

1. はじめに	1
2. 耐寒促進剤の品質標準および施工ガイド	
2.1 耐寒促進剤について	2
(1) 耐寒促進剤の種類	
(2) 耐寒促進剤の成分	
(3) 耐寒促進剤を用いたコンクリートの性質	
2.2 耐寒促進剤品質標準	10
2.3 耐寒促進剤を用いるコンクリートの施工ガイド	13
3. コンクリート温度による寒中コンクリートの計画	
3.1 圧縮強度増進の温度・時間依存性	19
3.2 コンクリートの温度履歴の予測	21
3.3 圧縮強度増進の標準曲線により強度を予測する方法	27
3.4 コンクリートの温度履歴をもとに計画した場合の品質管理・検査	30
3.5 コンクリートの温度履歴による寒中コンクリートの計画例	31



1. はじめに

寒中コンクリートは、寒冷地における建設工事の通年化の基本であり、関連設備の有効活用、労働者の恒常的な雇用など地域経済の活性化に対しても大きな意義がある。低温がもたらすコンクリートに関する問題は、初期凍害と強度発現の遅れであり、これらに対する技術的な対応が土木学会「RC示方書」¹⁾、建築学会「JASS5」²⁾ および「寒中コンクリート施工指針」³⁾ に示されている。

「初期凍害」は、硬化の初期段階のコンクリート中で水分が凍結することによって生じ、コンクリートの硬化後の強度や耐凍害性などの性状に悪影響をもたらすものである。この初期凍害の防止には、AE剤またはAE減水剤により所要の空気量を確保することと、打設後のコンクリートが所定の圧縮強度となるまで凍結させないように初期養生を行うことが基本である。通常の条件では土木・建築分野ともに初期凍害防止のために必要な圧縮強度が5N/mm²とされている。

一方、「低温による強度発現の遅れ」に対しては、温度による調合の補正および保温養生による対応がなされている。特に建築工事では、躯体工事後に仕上げ工事があり、計画された所定の材齢でせき板および支保工を解体する必要がある。このため、計画された材齢において所定の強度を得るために、予想される養生温度に対応した強度の不足分を上乗せした調合設計がなされている。

このように、寒中コンクリートに関する技術的課題は克服されているように思えるものの、強度補正などによるコンクリートコストの増加、養生のための上屋・加温、積雪対策などの付加的経費が必要となり、積極的な取り組みを阻害する要因になっている。

現在の寒中コンクリートの技術は、上屋を設けて内部を採暖する手法が主流である。しかし、熱効率の悪い空間を暖めるといったエネルギー消費型の従来の手法に代えて、省資源・省エネルギーおよび地球環境の保全をも視野に入れた多様な工法の開発が望まれている。

このような状況のもとで、寒冷期におけるコンクリート工事の新しい技術として、低温下での強度増進性状を改善するコンクリート用化学混和剤である耐寒促進剤の開発が行われ、その品質規定、施工ガイドが作られている⁴⁾⁵⁾。また、寒中コンクリートの計画に当たって、従来の外気温を用いた計画によらず打設されたコンクリート自体の温度変化を予測し、温度履歴と材齢からコンクリート強度を検討し計画する方法が提案されている。これらの新技術は、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」中にも資料として記載されている。本ガイドはこれらの新技術とその適用方法を計画例を交えて記述したものである。

寒中コンクリートの目標である、初期凍害の防止、所定の材齢における強度の確保、正常な品質の確保はもちろんのこと、これらの新技術が活用されることにより効率的で経済的な寒中施工が可能となるものと考えている。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書、土木学会、1991
- 2) 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS 5) 鉄筋コンクリート工事、日本建築学会、1990
- 3) 寒中コンクリート施工指針・同解説、日本建築学会、1989
- 4) 耐寒促進剤の品質標準および施工ガイド、(財)北海道建築指導センター・耐寒剤の利用技術調査研究委員会、1987.11
- 5) 寒冷期におけるコンクリート工事の新技術の開発、北海道立寒地住宅都市研究所・北海道大学共同研究調査研究報告書、No.89-J0、1999.3

2. 耐寒促進剤の品質標準および施工ガイド

2.1 耐寒促進剤について

(1) 耐寒促進剤の種類

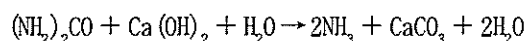
耐寒促進剤は、セメントの水和反応を促進し、厳寒期におけるコンクリート打設後の初期凍害を防止する目的で開発された混和剤であり、コンクリート中の水分の凍結温度を低下させることから、従来より防凍剤 (antifreezer) といわれていた系統に属する。この混和剤による初期凍害防止の効果は凍結点降下によるものだけでなく、コンクリートの硬化促進作用が重要であることが次第に明らかとなったことから、この混和剤の性質をよりの確に表現する”耐寒促進剤 (accelerator for freeze protection)” という名称を用いることとした。

耐寒促進剤は、その構成成分によりタイプⅠとタイプⅡの二つに分類される。耐寒促進剤タイプⅠは、耐寒促進成分に加えて減水成分、AE成分などで構成されたもので、凍結点降下、硬化促進作用だけでなく、空気連行作用、減水作用を有し、従来より”耐寒剤”と称されていたものである。耐寒促進剤タイプⅡは、耐寒促進成分のみで構成されたもので、その利用にあたってはJIS A 6204に適合するコンクリート用化学混和剤と併用して用いるものである。

(2) 耐寒促進剤の成分

コンクリートの凍結温度を低下させることのできる薬剤として、塩化カルシウム、塩化ナトリウム、塩化カリウム、硝酸ナトリウム、亜硝酸ナトリウム、硝酸カルシウム、亜硝酸カルシウム、尿素、さらし粉、エチルアルコール、エチレングリコールなどの物質がある。しかし、塩化カルシウムや塩化ナトリウムなどの塩化物は、後述のように、鋼材の腐食を助長する。また、ナトリウムなどのアルカリ塩はアルカリ骨材反応を助長し、さらし粉は塩素ガスの発生とコンクリートのこわばり、エチルアルコールやエチレングリコールはコンクリートの凝結遅延の恐れがあるといわれている。さらに、エチレングリコールや尿素などの防凍成分により骨材中のモンモリロナイトなどの粘土質鉱物が溶出し、セメントペーストと骨材界面の付着力を低下させ、ひいてはコンクリート強度の低下を招く恐れがあることが指摘されている。

尿素は無塩化・無アルカリであり、水によく溶け、融点降下が大きく、亜硝酸あるいは硝酸系の成分と混合することにより優れた硬化促進作用を示すが、高アルカリの硬化コンクリート中で加水分解によりコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化を促進させると同時に、アンモニアガスを発生させる。



アンモニアの発生は、塩化物やアルカリ成分による問題とは異なり、コンクリートとしての物性の変化が見られないことから、短期的な実験や施工段階では見逃される可能性がある。しかし、その影響は長期にわたり、対応のきわめて困難な深刻な問題となる。

防凍剤 (antifreezer) としては、塩化カルシウムや塩化ナトリウムを主成分とする混和剤が、従来用いられてきた。塩化物を主成分とするこれらの防凍剤、特に塩化カルシウムを主成分とするものは、凍結環境下においてもコンクリートの凍結を防ぎ、セメントの水和を促進させ、強度の発

表2.1 耐寒促進剤の銘柄、主成分、物性（カタログより抜粋）

種類	メーカー	銘柄	主成分	標準使用量 (/C=100kg)	比重 (20℃)	アルカリ量 (%)	塩化物イオン量 (%)
タイプ I	NMB	ノンフリーズ	ポリグリコールエステル誘導体 と無機窒素化合物	3~5 ℓ	1.38~1.42	0.20	0.01以下
	山宗化学	ヤマソーウイン	亜硝酸化合物と特殊界面活性剤	3~5 ℓ	1.30~1.34	0.01	0.01
	サンフロー	サンフローAFP	無機窒素化合物および特殊界面 活性剤	3~5 ℓ	1.37~1.43	0.20	0.1以下
タイプ II	NMB	ボステック99	無機窒素化合物	2~4 ℓ	1.42~1.44	0.03	0.001以下
	山宗化学	ヤマソーウインS	亜硝酸化合物	3~4 ℓ	1.31~1.35	0.0	0.01
	サンフロー	サンフローAFP	無機窒素化合物	3~5 ℓ	1.37~1.43	0.20	0.1以下
	藤沢薬品	バリックUF20	亜硝酸化合物	3~6kg	1.42~1.45	0.03	0.01以下

注) アルカリ量、塩化物イオン量は分析例を示している

現をもたらすうえで優れた作用をもつ。このため、旧ソ連などでは寒中コンクリート工事において、塩化カルシウムや塩化ナトリウムなどが防凍剤として多量に使用されている報告が数多く見られた。しかし、塩化物は長期強度の発現に懸念があり、また、鉄筋コンクリートの鋼材腐食を助長すると考えられている。このため、わが国では極めてわずかの塩化物量しかコンクリートに含まれることは許されておらず、事実上使用禁止に近い状態にある。このような背景のもとで、1980年代中頃に無塩化型のメラミンスルホン酸塩と含窒素化合物(硝酸-亜硝酸ナトリウム塩)を主成分とした耐寒剤がわが国で初めて開発された。しかし、この耐寒剤はナトリウムを含み、使用量が多くなるとアルカリ骨材反応の危険性が増すことから、JIS A 6204の規格に適合する無塩化・無アルカリ型に変更され、現在に至っている。

表2.1は混和剤メーカー4社が市販している無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤の種類と主成分、物性を示したものである。これらの防凍成分は、いずれも亜硝酸カルシウムや硝酸カルシウムの単独あるいは混合したものが主成分である。耐寒促進剤タイプIの減水成分としては、メラミンスルホン酸塩、ポリグリコールエステル誘導体などが使用されている。

本研究で対象とする耐寒促進剤は、硝酸カルシウム・亜硝酸カルシウムを主成分としており、耐寒促進剤タイプIIは他の混和剤と併用することが一般的となる。JIS A 6204の規格に適合する混和剤のうち、ロダゲン(チオシアン酸)塩を主成分とするAE減水剤促進剤は、酸化作用をもつ薬剤と混合するとシアンガスを発生する恐れがあるといわれており、併用することはできない。

(3) 耐寒促進剤を用いたコンクリートの性質

ここでは、水セメント比50%、空気量3.5%、スランプ18cmのコンクリートによる実験結果を中心に、耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結温度、不凍結水率、凝結・初期硬化、圧縮強度増進、耐久性の特徴と耐寒促進剤による初期凍害防止効果について述べる。なお、この実験では尿素系成分を含むものについても対象としているが、(2)で述べたように、尿素系成分を含むものは建築の一般部位には用いてはならない。表2.2に実験に用いたコンクリートの種類を示す。

1) 凍結温度

大気圧下では水は0℃で凍結する。しかし、コンクリート中の水分は水酸化カルシウムの過飽和溶液となっているため、塩類による融点降下作用により、その凍結温度はおよそ-1℃となる。耐寒促進剤では融点降下作用の大きな成分を耐寒成分として配合することにより、コンクリートがかなりの低温まで凍らなくなることを期待している。耐寒促進剤の水溶液の濃度が高いほど凍結温度は低下し、混和剤自体の凍結温度は-30~-40℃と非常に低い。しかし、コンクリート中での実

表2. 2 実験に用いたコンクリートおよび混和剤の種類

記号	調合	混和剤種類	耐寒促進剤の主成分	耐寒促進剤の使用量
P	W/C 50% 空気量 3.5% スランブ 18cm	AE剤	—	—
H		AE減水剤促進形	—	—
AS2		耐寒促進剤 タイプI	亜硝酸・硝酸系窒素化合物 (無塩化・無アルカリ型)	2ℓ /C=100kg
AS4				4ℓ /C=100kg
AS8				8ℓ /C=100kg
BS				6ℓ /C=100kg
CS		耐寒促進剤 タイプII	尿素系窒素化合物 (無塩化・無アルカリ型)	4ℓ /C=100kg
D				4ℓ /C=100kg
E				6ℓ /C=100kg

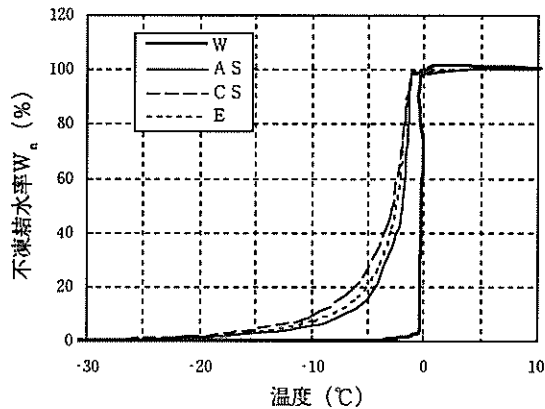


図2. 1 水および耐寒促進剤溶液の温度に対する不凍結水率の変化

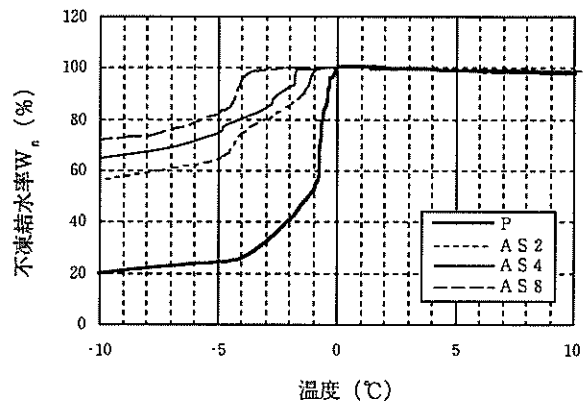


図2. 2 コンクリートの温度に対する不凍結水率の変化 (混和剤濃度による比較)

用上の濃度は10vol%程度で、その場合の凍結温度は $-2 \sim -4$ ℃程度であり、一般のコンクリートの凍結温度との差はそれほど大きくはなく、凍結温度の低下だけで初期凍害を防止するには限界がある。しかしながら、軽微な凍結条件では $1 \sim 3$ ℃程度のわずかな融点降下でも、コンクリートが凍結するまでの時間を大幅に延長することに役立つ、その間に所要の強度が得られる点で大きな意義がある。

2) 不凍結水率

耐寒促進剤の水溶液の凍結では、凍結開始温度より低い温度においてもかなりの量の未凍結の溶液が残り、シャーベット状の氷として成長する特徴がある。このことは、耐寒促進剤を用いることによって、コンクリート中で凍らない水が増えることを示唆している。図2. 1は温度低下にともなう耐寒促進剤溶液の不凍結水率の変化を示したものである。水の場合は 0 ℃でほとんどすべての水が凍結しているが、耐寒促進剤溶液では、 $-1 \sim -2$ ℃で凍結し始めるものの、 -5 ℃で20%、 -10 ℃で10%程度の凍結していない水(不凍結水)がある。図2. 2は、耐寒促進剤の使用量の異なるコンクリートを練り上がり直後に凍結させ、温度低下にともなう不凍結水率の変化を示したものである。普通AEコンクリート(P)でも、コンクリート中の水が電解質溶液であることとセメントや骨材表面の不凍水の影響により、 $-5 \sim -10$ ℃で20~25%程度の不凍結水が存在している。

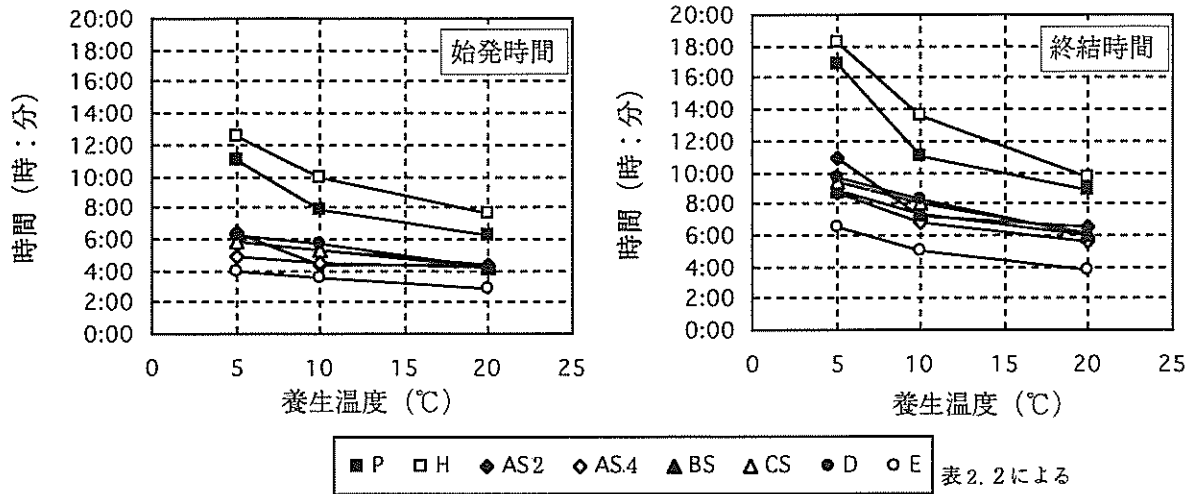


図2.3 養生温度の違いによる凝結時間の変化

一方、耐寒促進剤を用いたコンクリートでは、 -5 から -10°C の不凍結水率が60から80%の範囲にあり、混和剤使用量が多いほど不凍結水率は高くなっている。このような耐寒促進剤による不凍結水率の増加は、後に述べる凍結環境下での強度増進性状の改善に寄与している。

3) 凝結および初期硬化

コンクリートの凝結・硬化は、環境温度の影響を大きく受け、低温になるほど遅延する。一方、初期凍害は凝結過程あるいは終結後のまだ十分に強度が発現していない段階で、コンクリート中の水分が凍結することによって生じる。初期凍害を防止するためには、低温環境下においても大幅な凝結の遅延を起こすことなく、コンクリートが凍結する以前に所要の強度を得る必要がある。

図2.3に耐寒促進剤を用いたコンクリートの養生温度による凝結時間の変化を示す。耐寒促進剤を用いたコンクリートでは大幅な凝結促進効果がみられ、特に 5°C の低温環境下においても 20°C の普通AEコンクリートと同程度の凝結性状となっている。図2.4にそれぞれのコンクリートについて、初期凍害防止に必要とされる圧縮強度 5 N/mm^2 (50 kgf/cm^2)を得るまでの積算温度を示す。耐寒促進剤の種類および使用量により差があるが、耐寒促進剤を用いたコンクリートでは、普通AEコンクリートと比べてより早期に所要の強度が得られている。ここで示された低温での凝結、初期硬化を促進する作用が、初期凍害の防止に対する耐寒促進剤の最も重要な性能といえる。

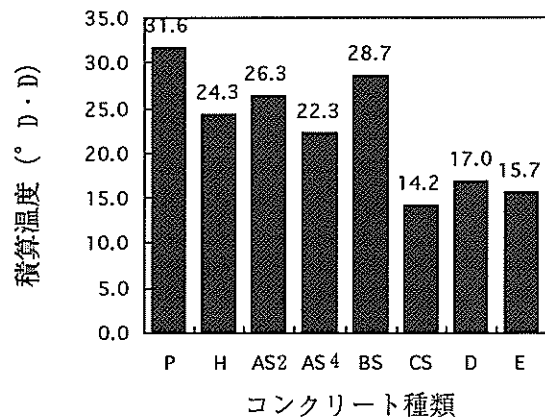


図2.4 圧縮強度 5 N/mm^2 (50 kgf/cm^2)を得る積算温度の比較

4) 圧縮強度増進

図2.5は耐寒促進剤のタイプごとの強度増進過程を普通AEコンクリートと比較して示したものである。タイプIの耐寒促進剤を用いたコンクリートでは、水セメント比が同じであるにもかかわらず、AE剤のみを用いた普通コンクリートと比較して大幅な早強性が認められ、 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時の強度も2割程度大きくなっている。一方、タイプIIの耐寒促進剤を用いたコンクリートでも早強

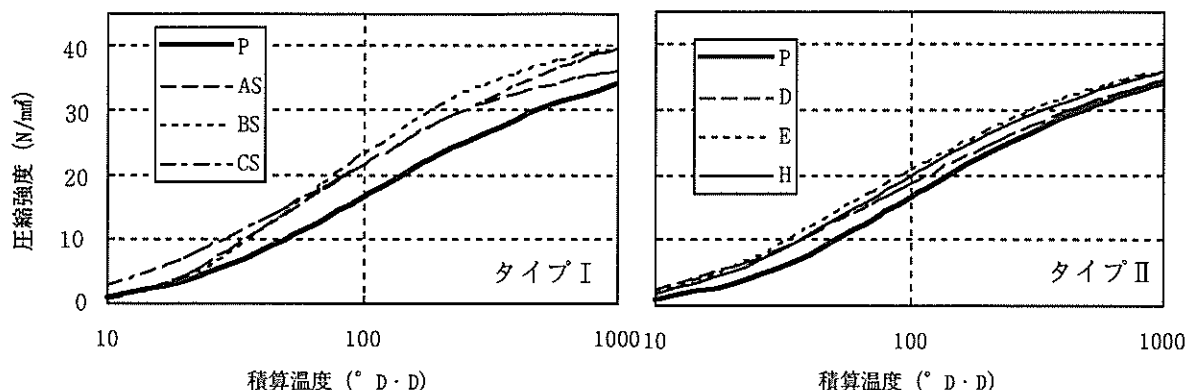


図2.5 耐寒促進剤を用いたコンクリートの強度増進傾向

性は認められるが、その程度はA E減水剤コンクリートと同程度である。このことは、タイプIの耐寒促進剤中の減水成分がコンクリートの早強性および強度増大に果たす役割が大きいことを示唆している。図2.6は耐寒促進剤の使用量による強度増進性状の変化を示したものであるが、耐寒促進剤の使用量が多いほど早強性の程度が大きいことがわかる。

次に、耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結環境下における強度増進性状をみてみる。図2.7にPとAS4の-5℃養生の強度増進傾向を20℃養生の場合と比較して示す。凍結環境下では耐寒促進剤を用いたAS4でもPと同様に強度増進が緩慢となり、常温下で成立する積算温度と圧縮強度の関係が成り立たないことが示されている。なお、材齢28日以降、凍結養生から20℃養生に戻した場合は、Pの強度回復が若干少ないものの、材齢56日の強度比はすべて90%以上を示していることから初期凍害を受けていないものと判断できる。

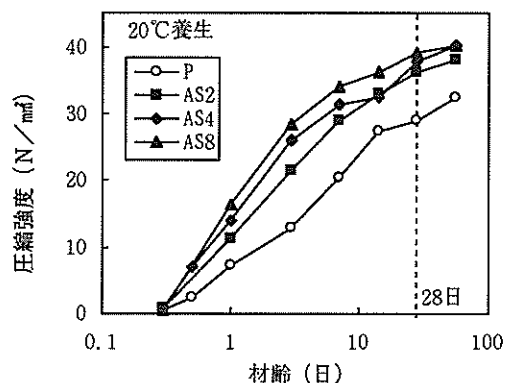


図2.6 20℃養生での材齢と圧縮強度の関係（使用量の影響）

図2.8(1)は20℃養生を行ったコンクリート強度に対する同一積算温度の-5℃養生の場合の強度を比の値として示したものである。AS2、AS4およびPでは、材齢の進行とともに同一積算温度の20℃養生強度に対する強度比が小さくなり、これらの間では凍結による強度発現の停滞傾向に大きな差が認められない。しかし、耐寒促進剤の使用量を標準の2倍としたAS8では強度比の低下が小さく、同一積算温度では20℃で養生したものとほぼ同等の強度が得られている。図2.8(2)は普通A Eコンクリート(P)の20℃養生の強度を基準として、同一積算温度におけるそれぞれのコンクリートの-5℃養生での強度を比の値として示したものである。耐寒促進剤を用いたコンクリートは早強性があり、さらに同一水セメント比においても強度が普通コンクリートを上回る傾向があることから、Pの強度を基準とした場合には、図2.8(1)に比べて強度比が大きくなり、耐寒促進剤の使用量を標準の半分としたAS2以外では、20℃養生のPと同等以上の強度が得られている。

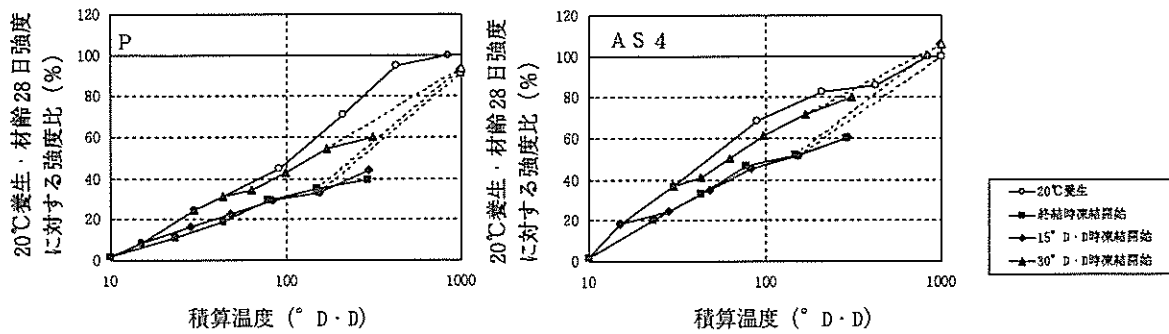
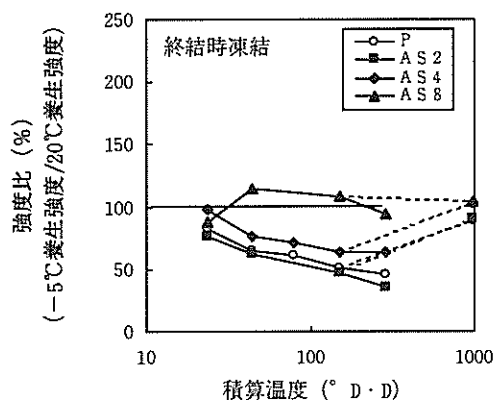
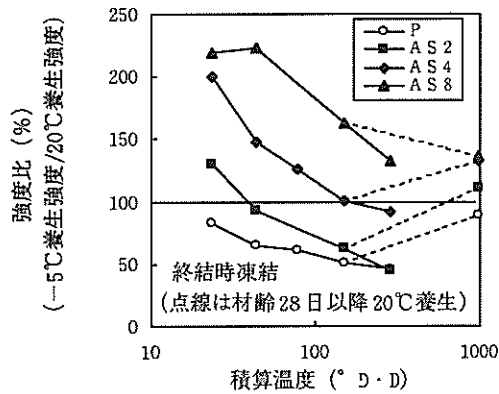


図2.7 凍結環境（-5℃）下で養生されたコンクリートの積算温度と圧縮強度増進の関係（点線は材齢28日以降20℃養生）



(1) 各々のコンクリートの20℃養生での強度を基準とした場合



(2) Pの20℃養生の強度を基準とした場合

図2.8 20℃養生のコンクリートと凍結養生（-5℃）を行ったコンクリートの同一積算温度での強度比

このように、耐寒促進剤を使用しても普通コンクリートの場合と同じようにコンクリートが凍結した状態では強度増進が緩慢となり、凍結環境下での強度発現を保証するものではないが、適切な使用量が確保されていれば、その早強性と強度増大の効果により、一般のコンクリートを上回る強度増進特性を示す。また、この凍結環境下における強度増進性状の改善効果は、前養生期間が長いほど、混和剤の使用量が多いほど顕著である。

同一積算温度の20℃養生強度に対する-5℃養生、材齢56日強度の強度比を求め、これと凍結養生開始段階のコンクリートの-5℃における不凍結水率との相関性を示したのが図2.9

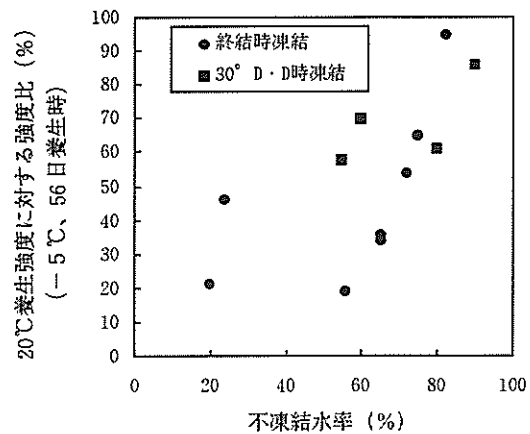


図2.9 不凍結水率と強度比の関係

である。凍結開始段階の不凍結水率が大きいほど長期材齢時の強度が20℃養生の場合に近づく傾向にあり、凍結環境下での強度増進特性の改善は、耐寒促進剤の使用によりコンクリート中の不凍結水率が増加することによっていることがわかる。

5) 耐久性

無塩化・無アルカリ形の耐寒促進剤では、塩化物による鋼材の腐食およびアルカリ骨材反応に対しては問題ないものとして取り扱うことができる。また、硬化コンクリートの耐凍害性については通常のコンクリートと同様の空気量とすることにより確保するものとする。

6) 初期凍害防止の効果

耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結温度の低下は普通コンクリートと比較してそれほど大きいものではない。一方、耐寒促進剤の使用により凝結が促進され、その結果として初期凍害防止に必要な圧縮強度が早期に得られる。したがって、耐寒促進剤による初期凍害の防止は、凍結温度の低下のみに期待するのではなく、これらの複合作用の効果としてとらえる必要がある。また、実際のコンクリート構造物において、その効果を発揮するには、コンクリートからの熱の発散の程度、つまり部材の形状や断面寸法が重要な要素となる。図2.10は耐寒促進剤による初期凍害の防止効果の概念を示したものである。部材寸法および養生方法に依存する「部材の熱容量による効果」に加えて、耐寒促進剤の効果としての混和剤の濃度に比例した「凍結温度の低下による効果」と「硬化促進による効果」の合計として許容外気温が決まることを示している。

打ち込まれたコンクリートが初期凍害を受けないために、凍結作用期ではそのコンクリートが冷却されて凍結するまでの間に圧縮強度5N/mm²を得る必要がある。部材寸法、養生方法、打設時のコ

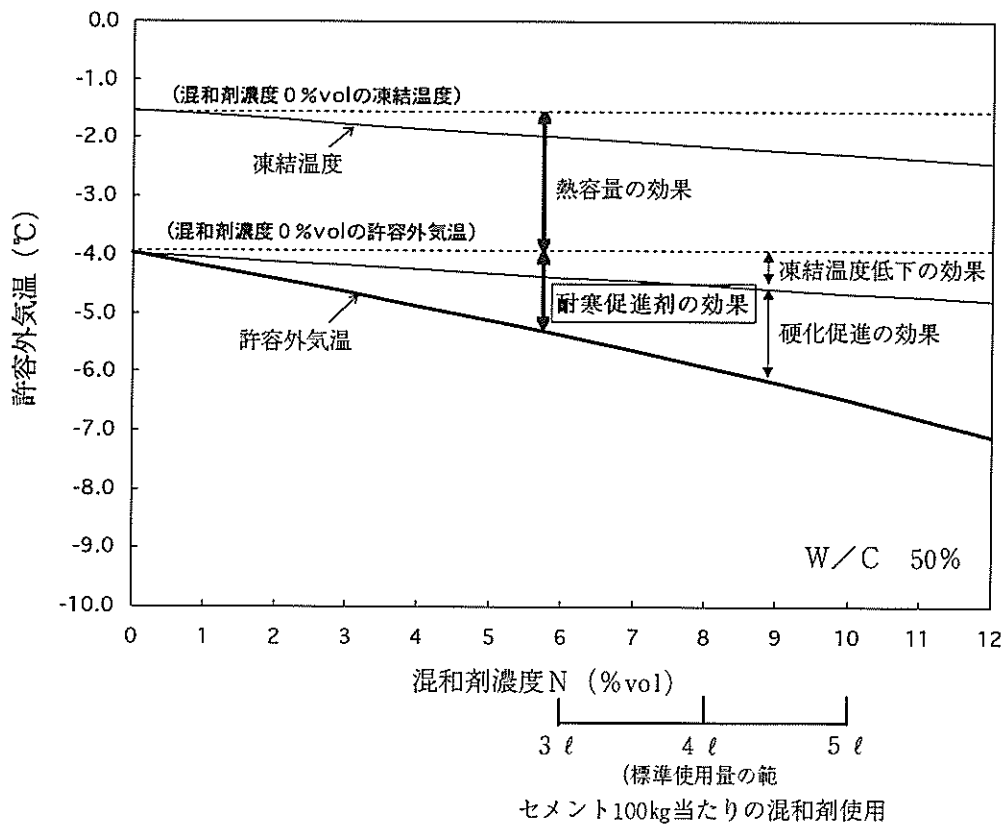


図2.10 耐寒促進剤の効果の概念図

表2.3 許容外気温算出式 [(1)式] の諸係数 (幅15cmの独立基礎でシート養生の場合)

[ATp=a log SD+b · FT+c]	
a	9.15
b	0.893
c	-16.3

表2.4 5N/mm²を得る積算温度 [(2)式] の諸係数

[SD=α · N+β] 注)		
W/C	α	β
40%	-0.8	23.8
50%	-1.4	33.5
60%	-2.1	45.5

表2.5 凍結温度 [(3)式] の諸係数

[FT=α' · N+β'] 注)	
α'	-0.075
β'	-1.5

注) 混和剤濃度Nは、セメント100kg当たりの混和剤使用量X (ℓ) と水セメント比W/C (%) の関係から下式により得られる。

$$N = X / (W/C) \times 100$$

ンクリート温度およびコンクリートの凍結温度によって決まるコンクリートの凍結までの積算温度と、水セメント比および耐寒促進剤の濃度によって決まる圧縮強度5N/mm²を得る積算温度の両者を比較することにより、初期凍害を受けるかどうかを判断することができる。図2.10に示した初期凍害防止のための許容外気温は、以下の式で算出される。

$$ATp \geq a \cdot \log SD + b \cdot FT + c \quad \dots (1)$$

ここに ATp: 許容外気温 (°C)

(FD ≥ SDとなる外気温の条件)

FD: コンクリートの打ち込みから凍結までに得られる積算温度 (°D · D)

SD: 初期凍害防止に必要な圧縮強度を得るために必要な積算温度 (°D · D)

FT: コンクリートの凍結温度 (°C)

a, b, c: 部材条件 (部材寸法、養生条件、打設温度) による定数

さらに、(1)式中のSDおよびFTはコンクリートの水セメント比ごとに耐寒促進剤の濃度の関数として表わされる。

$$SD = \alpha \cdot N + \beta \quad \dots (2)$$

$$FT = \alpha' \cdot N + \beta' \quad \dots (3)$$

ここで、N: 混和剤濃度 (vol%)

α, β, α', β': 定数 (ただし、α, βは水セメント比によって異なる)

建築分野においては、部材寸法が小さく打ち込み後のコンクリート温度の冷却に対して厳しい条件となる住宅用の独立基礎 (幅15cm) でシート養生を行う場合に耐寒促進剤が最も広く用いられている。この条件に対して、上記の計算による許容外気温は、-3.8~-8.0°C (水セメント比40~60%、耐寒促進剤使用量3~5ℓ/c=100kg) となる。

2.2 耐寒促進剤品質標準

耐寒促進剤の使用について検討した前節の結果から以下の耐寒促進剤品質標準を提案する。

(1)適用範囲

この規格は、寒冷期のコンクリート工事において強度増進を促進し、初期凍害を防止するために用いる耐寒促進剤について規定する。

(2)用語の定義

耐寒促進剤

コンクリートの凍結温度を低下させるとともに、低温環境下における凝結・硬化促進作用を有する化学混和剤

タイプⅠ：耐寒促進成分とA E・減水成分で構成されたもの

タイプⅡ：耐寒促進成分のみで構成されたもの

基準コンクリート

耐寒促進剤の品質を試験する場合に基準とする混和剤を用いないコンクリート

試験コンクリート

耐寒促進剤の品質を試験する場合に試験の対象とする混和剤を用いたコンクリート

(3)品質

1)性能

耐寒促進剤の性能は、基準使用量^{注)}の耐寒促進剤を用いたスランプ18cmのコンクリートについて、(4)により試験を行い、表6の規定に適合するものとする。タイプⅡの耐寒促進剤は、A E減水剤または高性能A E減水剤と併用して表6の性能を満足する場合に、タイプⅠと同様に取り扱うことができる。

注)コンクリート1 m³当たりの耐寒促進剤の使用量は、製造業者が指定する量とし、これを基準使用量とする。

2)成分

耐寒促進剤の成分は、硬化後のコンクリートの性状に悪影響を及ぼさないものでなければならない。また、JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤)のA E減水剤促進形 (Ⅰ種)の規定を満足するためには、その成分は以下でなければならない。

a)塩化物イオン量は、JIS A 6204 附属書3によって試験を行い、0.02 kg / m³以下。

b)全アルカリ量は、JIS A 6204 附属書4によって試験を行い、0.30 kg / m³以下。

(注1) 2) a) および b) の成分規定を満足する耐寒促進剤は、無塩化・無アルカリ型を標榜することができる。ただし、JIS A 6204のA E減水剤促進形を満足するための試験をスランプ8cmのコンクリートについても行わなければならない。

(注2) 1) の性能規定および2) a) および b) の成分規定を満足する耐寒促進剤は、JIS A 6204のA E減水剤促進形 (Ⅰ種)に適合するものとして取り扱うことができる。

(4)試験方法と計算

試験はJIS A 6204に規定する試験方法に準拠し、コンクリートの種類はスランプ18cmのみとする。ただし、凝結試験の試験方法と計算は次項による。

1)凝結試験の方法

凝結時間の試験は、JIS A 6204 附属書1による。試験は、1バッチのコンクリートについて1回行い、2バッチの平均値をその種類のコンクリートの凝結時間とする。ただし、養生温度は、基準コンクリートで20 ± 3℃、試験コンクリートでは20 ± 3℃および5 ± 3℃とする。

表 2.6 耐寒促進剤の性能

品質項目	耐寒促進剤 タイプ I	<参考> JIS A 6204 A E 減水剤 促進形	
減水率 (%)	8 以上	8 以上	
ブリーディング量の比 (%)	50 以下	70 以下	
凝結時間の差 (20℃) (min)	始発時間	+30 以下	
	終結時間	0 以下	
凝結時間の差 (5℃) (min)	始発時間	+180 以下	—
	終結時間	+300 以下	—
圧縮強度比 (%)	材齢 3 日	135 以上	125 以上
	材齢 7 日	120 以上	115 以上
	材齢 28 日	110 以上	110 以上
長さ変化比 (%)	120 以下		
凍結融解に対する抵抗性* 〔相対動弾性係数 (%)〕	80 以上		

* 凍結融解に対する抵抗性の規定値は、スランプ 8 cm または 18 cm のコンクリートの試験値とする。

2) 凝結時間の差の計算

凝結時間の差は、上記によって求めた始発時間および終結時間から次の式で計算し、整数で表わす。

$$T_{20} = T_{t20} - T_{c20}$$

$$T_5 = T_{t5} - T_{c20}$$

ここに、 T_{20} ：20℃養生での凝結時間の差 (min)

T_5 ：5℃養生での凝結時間の差 (min)

T_{t20} ：試験コンクリートの温度 20℃での始発時間または終結時間 (min)

T_{t5} ：試験コンクリートの温度 5℃での始発時間または終結時間 (min)

T_{c20} ：基準コンクリートの温度 20℃での始発時間または終結時間 (min)

<耐寒促進剤品質標準解説>

1. 適用範囲

本品質標準は、寒中コンクリートにおいて、初期凍害を防止するために使用する耐寒促進剤の品質を定めたものである。

2. 用語

本品質標準で対象とする混和剤は、これまで“防凍剤”、“耐寒剤”、“防凍性混和剤”などいろいろな名称で呼ばれてきた。そこで、用語を新しく定めるとともにその特徴を示した。

3. 品質

耐寒促進剤の品質は、JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) と同様に基準コンクリートと試験コンクリートを比較することによって判断することとし、(財) 北海道建築指導センター・耐寒剤の利用技術調査研究委員会において共通試験を行い、その結果を参考として定めたものである。

試験は、建築用のスランプ 18 cm のコンクリートについて、JIS A 6204 と同様に、混和剤を用いない基準コンクリートと耐寒促進剤を用いた試験コンクリートを練り混ぜ、減水率、ブリーディン

グ量の比、凝結時間の差、圧縮強度比および長さ変化比については、基準コンクリートと試験コンクリートの比較で判定し、凍結融解に対する抵抗性については試験コンクリートの測定結果で判定することとした。なお、JIS A 6204 では凍結融解試験はスランブ 8 cm のコンクリートを用いることになっているが、本品質標準ではスランブ 18 cm のコンクリートとしてもよいこととした。しかし、当然ではあるが、JIS A 6204 の A E 減水剤促進形の規定を満足するためには、JIS に規定された試験項目についてスランブ 8 cm のコンクリートによる試験が必要となる。

耐寒促進剤は、品質的に JIS A 6204 に規定される A E 減水剤促進形の品質を満足するものとし、低温性状がより優れたものとした。このため、成分規定が満足される無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤は、JIS A 6204 の A E 減水剤促進形（I 種）を満足する製品となる。

減水率は、JIS A 6204 の A E 減水剤促進形と同じ 8 % 以上である。

ブリーディング量の比については、JIS A 6204 の A E 減水剤促進形の場合 70 % 以下となっているが、耐寒促進剤を用いた場合にはブリーディング量が小さくなる特徴があり、共通試験の結果を参考に 50 % 以下と定めた。

長さ変化比および凍結融解に対する抵抗性は、それぞれ 120 % 以下、80 % 以上とした。これは、JIS A 6204 と同じ規定値である。

耐寒促進剤の性能として、低温での大幅な凝結遅延が起こらないことと早強性が重要であることから、低温環境下における凝結性状に関する項目を加え、圧縮強度比の基準値をより高い値に設定している。

凝結性状は、JIS A 6204 と同じ 20℃ における試験と、練り上がり後 5℃ で養生する条件の 2 種類の試験で評価する。試験コンクリートと基準コンクリートの 20℃ 養生における凝結時間の差は、始発時間で +30 分以下、終結時間で 0 分以下で A E 減水剤促進形と同じである。低温環境下における凝結時間の遅れは、基準コンクリートの 20℃ での凝結時間と試験コンクリートの 5℃ での凝結時間の差によって判定し、始発時間で 180 分以下、終結時間で 300 分以下とした。

圧縮強度比は、JIS A 6204 の A E 減水剤促進形に比べ、材齢 3 日で 10 %、材齢 7 日で 5 % 大きい値とし、材齢 28 日では A E 減水剤促進形と同じ 110 % とした。これは、A E 減水剤促進形と高性能 A E 減水剤の中間の性能である。

また、耐寒促進剤を構成する成分は、硬化後のコンクリートの性状に悪影響を及ぼさないものと規定している。これは、鉄筋の腐食やアルカリ骨材反応の原因となる塩化物やアルカリ成分のほか、アンモニアガスを発生させる尿素系成分、凝結性状や硬化後の性状に影響を及ぼすエチレングリコールなどの成分を混入しないものであることを意味している。無塩化・無アルカリ型の耐寒促進剤では、塩化物量は JIS A 6204 の I 種と同じ 0.02 kg / m³ 以下、全アルカリ量についても JIS A 6204 と同じ 0.30 kg / m³ 以下と定めた。

なお、減水成分を含まないタイプ II の耐寒促進剤は、ロダン塩系の A E 減水剤促進形を除く JIS A 6204 に適合した A E 減水剤または高性能 A E 減水剤を併用して表 6 に示す品質を満足する場合に、タイプ I と同様に取り扱うことができる。

この品質標準は、JIS A 6204 と同様に工事現場やレディミクストコンクリート工場における受入検査や日常の管理を目的としたものではなく、ここで対象とする耐寒促進剤であるか否かを判定するものであり、品質は公的機関などによる試験成績書など信頼できる資料をもとに確認する。

4. 試験

試験に用いる材料および調合は、JIS A 6204 と同じとした。ただし、凝結時間の試験については、試験コンクリートでは JIS A 6204 にある 20 ± 3℃ の条件に、5 ± 3℃ での養生を加えた。また、耐寒促進剤の使用量は、製造業者が指定する量とし、これを基準使用量とした。

2.3 耐寒促進剤を用いるコンクリートの施工ガイド

(1) 一般事項

- a. 本施工ガイドは、寒冷時期のコンクリート工事において耐寒促進剤を用いる場合に適用する。
- b. 耐寒促進剤は初期凍害の防止および施工の効率化を目的として用いるもので、コンクリートの調合および管理の方法はその目的に応じたものとする。

a. 寒中コンクリート工事では、初期凍害を防止するために所要の強度（軽微な凍結期では $3.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、凍結作用期では $5\text{N}/\text{mm}^2$ ）が得られるまで保温養生などの初期養生を行わなければならない。通常期のコンクリートに比べて養生設備や温度管理などに特別な配慮が必要である。耐寒促進剤は、低温下における強度増進を促進し、特別な保温養生を行わずにコンクリートの初期凍害を防止するために用いられるもので、この施工ガイドは、耐寒促進剤を用いて寒中コンクリートを施工する場合の注意事項を示したものである。なお、ここに示されていない事項は、日本建築学会建築工事標準仕様書・鉄筋コンクリート工事（JASS5-1997）および寒中コンクリート施工指針・同解説による。

b. 寒中コンクリートの期間では寒さに対してだけでなく、降雪に対する対策としての養生上屋が必要となる場合が多い。また、耐寒促進剤は他のコンクリート用化学混和剤と比べ、その使用量が多く、比較的高価な混和剤である。このため、耐寒促進剤の利用にあたっては、予想される外気温、降雪の状況をもとに施工効率、経済性など総合的な判断が必要となる。

耐寒促進剤を用いたコンクリートは以下に示す特徴をもつため、寒中コンクリートの課題である「初期凍害の防止」と「低温による強度増進の遅れの改善」が可能となる。

- ①コンクリート中の水分が -3°C 程度まで凍結しなくなる。
- ②低温環境下においても大幅な凝結遅延を起こすことなく硬化が進む。
- ③早強セメント並みの早強性を示す。
- ④凍結温度以下でもかなりの量の水分が未凍結のまま残るため、一般のコンクリートに比べて凍結状態での強度発現性状に優れる。

耐寒促進剤を使用する目的には、初期凍害防止と施工の効率化の二つが考えられ、その具体的な調合計画や管理の方法は目的に応じたものでなければならない。

(2) 材料

- a. 耐寒促進剤は、「耐寒促進剤品質標準」を満足するものを用いる。
- b. 耐寒促進剤タイプⅡでは、A E減水剤標準形または高性能A E減水剤標準形と併用することを標準とし、ロダン塩を主成分とするA E減水剤促進形と併用してはならない。
- c. セメントは、JIS R 5210（ポルトランドセメント）に適合する普通ポルトランドセメントを標準とする。

a. 本施工ガイドで対象とする耐寒促進剤は、硝酸・亜硝酸カルシウムを主成分とし、前章の耐寒促進剤品質標準を満足するものとする。他の成分を排除するわけではないが、尿素系のアンモニア発生は、長期にわたる対応の極めて困難な問題であり、建築構造物には使用禁止とする。また、耐寒促進剤はその構成成分によりタイプⅠ（耐寒促進成分+A E・減水成分）とタイプⅡ（耐寒促進成分）の二つのタイプに分けられる。タイプⅠの耐寒促進剤は単独で使用し、2.2に示す耐寒促進剤品質標準を満足するものとする。また、タイプⅡの耐寒促進剤をタイプⅠと同じ条件で使う場合には、A E

減水剤または高性能A E減水剤と併用した時の性能が耐寒促進剤品質標準を満足するものでなければならない。

b. 耐寒促進剤を用いる場合も、通常のコンクリートと同様に、耐凍害性を確保するためには所定の空気量が必要である。タイプIの耐寒促進剤にはA E成分が含まれているが、所定の空気量となるように専用のA E助剤で空気量を調整する必要がある。また、タイプIIの耐寒促進剤には減水性および空気連行性がないため、一般のA E減水剤または高性能A E減水剤と併用して所定の空気量を確保する必要がある。ただし、ここで対象とする耐寒促進剤は硝酸・亜硝酸塩を主成分としており、ロダゲン(チオシアン酸)塩を主成分とするA E減水剤促進剤と併用すると、シアンガスを発生させる恐れがあるため、これらを併用してはならない。

c. 耐寒促進剤は、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) の普通ポルトランドセメントに対して用いるのが性能面および経済性の面で最も効果的である。早強ポルトランドセメントに耐寒促進剤を用いた場合には、耐寒促進剤による凝結・硬化促進の効果が普通ポルトランドセメントの場合ほど顕著に現われず得策ではない。早強ポルトランドセメントは単独で十分な早強性を有するため、耐寒促進剤を用いずに使用するのが有効である。

(3) 初期凍害の防止を目的とする場合の使用方法

- a. 打込み時の気温の低下に対応させて、一般のコンクリートの低温性能を向上させる目的で使用する。
- b. 設計基準強度および品質基準強度が所定の材齢に得られるように定めた一般のコンクリートと同じ調合とし、単位水量の一部を耐寒促進剤と置き換える

a. 初期凍害の防止を目的とする場合には、打込み時の気温の低下に対応させて耐寒促進剤を使用し、一般のコンクリートの低温環境下における性能を向上させる。耐寒促進剤はその使用量が多いほど、コンクリートの凍結温度を低下させ、凝結・硬化を促進させる。しかし、過剰な使用は、コンクリートのこわばり、スランプロスの増大などの原因となり、作業性に支障をきたす恐れがある。耐寒促進剤により初期凍害を防止できる許容外気温は、部材寸法、養生条件、打設時のコンクリート温度、水セメント比、耐寒促進剤の使用量により異なるが、比較的厳しい条件として厚15cmでシート養生をした住宅用基礎を想定した場合の許容外気温を表7に示す。耐寒促進剤を用いた場合の許容外気温は、凍結作用期に相当する-4~-8℃程度である。この温度以下となる場合には、耐寒促進剤を用いても初期凍害防止のために保温養生あるいは断熱養生などによる初期養生が必要となる。

なお、タイプIの耐寒促進剤を用いて、得られた減水量に対応させて単位水量を減じ、セメント量をそのままとした場合には、コンクリートの水セメント比が低下することになり、許容外気温もそれに対応させて下げて考えることができる。

表2.7 初期凍害防止のための許容外気温
[住宅用基礎(厚さ15cm、シート養生)、コンクリート打設温度15℃の場合]

W/C	耐寒促進剤コンクリート			普通ポルトランドセメント
	3ℓ/c=100kg	4ℓ/c=100kg	5ℓ/c=100kg	
40	-6.7	-7.3	-8.0	-5.0
50	-5.2	-5.8	-6.5	-3.7
60	-3.8	-4.4	-5.0	-2.5

(注) 練り上がり温度および養生温度を5℃としたコンクリートによる試験結果をもとに算出

b. 初期凍害防止のための予防的措置として耐寒促進剤を用いる場合は、耐寒促進剤による強度の増大は安全率として見込むこととする。すなわち、この場合の調合計画は、耐寒促進剤を用いたコンクリートの強度増進性状を考慮した厳密なものではなく、設計基準強度および品質基準強度が所定の材齢に得られるように定めた一般のコンクリートと同じ調合とし、単位水量の一部を耐寒促進剤と置き換えるだけでよい。また、耐寒促進剤タイプⅡではプラントでの練り混ぜ時に耐寒促進剤の量だけ単位水量を減らしてコンクリートを製造し、現場において所定量の耐寒促進剤を添加とすることも可能である。なお、耐寒促進剤による強度の増大を見込んで施工の効率化を目的とする場合の調合計画は、(4)による。

(4) 耐寒促進剤の強度増進を考慮した調合計画

- a. 寒中コンクリートの計画段階から耐寒促進剤の利用を予定する。
- b. 耐寒促進剤の使用量は製造メーカーによる基準使用量とし、単位水量の一部と置き換えて使用する。
- c. コンクリートの調合は、構造体コンクリートの強度管理の材齢を91日以内とし、原則として材齢28日で設計基準強度を得るように定める。
- d. コンクリート強度の補正值 T_n は 0 N/mm^2 または 3 N/mm^2 とし、構造体コンクリートの強度管理の材齢までに得られる積算温度に応じて次のように定める。
 - ・管理材齢までに得られる積算温度が $840^\circ \text{ D} \cdot \text{D}$ 以上となる場合： $T_n = 0 \text{ N/mm}^2$
 - ・管理材齢までに得られる積算温度が $450^\circ \text{ D} \cdot \text{D}$ 以上となる場合： $T_n = 3 \text{ N/mm}^2$
- e. 材齢28日で設計基準強度が得られるかどうかを、強度補正值 T_n および品質基準強度と設計基準強度との強度差をもとに表8により確認する。

表2.8 材齢28日で設計基準強度が得られる養生温度の範囲

管理材齢までの積算温度 ($^\circ \text{ D} \cdot \text{D}$)	強度補正值 T_n (N/mm^2)	品質基準強度と設計基準強度との強度差 (N/mm^2)	
		3	6
840以上	0	5°C 以上	0°C 以上
450以上	3	0°C 以上	-3°C 以上

- f. 調合強度は下に示すそれぞれの式を満足するように定める。

$$F = F_q + T_n + 1.73 \sigma \quad (4)$$

$$F = 0.85 (F_q + T_n) + 3 \sigma \quad (5)$$

呼び強度の強度値は下式による。

$$F' = F_q + T_n \quad (6)$$

ここに、 F ：調合強度 (N/mm^2)

F' ：呼び強度の強度値 (N/mm^2)

F_q ：品質基準強度 (N/mm^2)

T_n ：強度補正值 (N/mm^2)

σ ：強度の標準偏差 (N/mm^2) (JASS5.5.2.cによる)

- g. f項で得られた調合強度のA E減水剤コンクリートの調合を基準とし、単位セメント量を同じとし、減水率に応じて単位水量を補正する。

- a. 施工の効率化を目的とする場合には、耐寒促進剤による早強性および低温性状の改善効果を生かすため、寒中コンクリートの計画段階から耐寒促進剤を利用することを予定し、厳密な調合計画を行

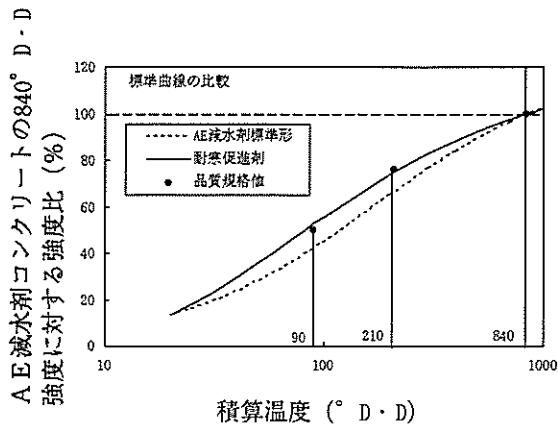


図2.11 AE減水剤コンクリートと耐寒促進剤コンクリートの標準曲線の比較

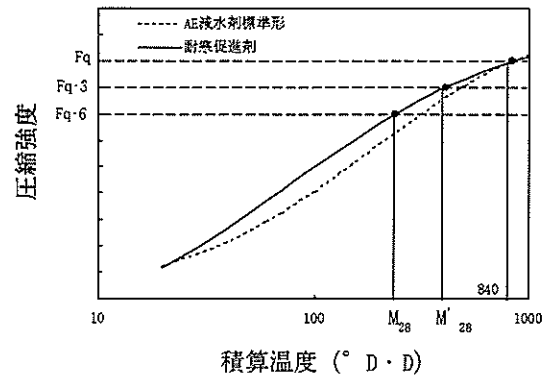


図2.12 強度補正值 $T_n=0\text{ N/mm}^2$ の場合の強度増進曲線と材齢28日強度の考え方

い、温度追従養生などの方法で管理をする必要がある。

b. 耐寒促進剤の使用量は、製造メーカーによる基準使用量とする。一般にはセメント100kg当たり4ℓである。なお、耐寒促進剤タイプI、タイプIIともに、単位水量の一部として置き換えて調合を補正する。

c. コンクリートの調合は、構造体コンクリートの品質基準強度の管理材齢を材齢91日以内の範囲で延長し、材齢28日で設計基準強度を得るように定めることを標準とする。なお、工事を中断する場合など、必ずしも材齢28日で設計基準強度を得る必要のない場合には、管理材齢までの積算温度で調合を定めることができる。

d. 現段階では耐寒促進剤を用いたコンクリートの水セメント比と強度の関係式を用意しているレディミクストコンクリート工場はほとんどない。したがって、ここではこれまでの実験結果をもとに、「耐寒促進剤品質標準」を満足する耐寒促進剤を用いたコンクリートの標準的な強度増進過程を求めた。図11に一般のAE減水剤コンクリートと耐寒促進剤を用いたコンクリートとの標準曲線を比較して示す。840° D·Dにおける強度には差がないものの、耐寒促進剤を用いたコンクリートには大幅な早強性がある。また、基準使用量の耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結温度が -3°C 程度であることと凍結環境下においても普通コンクリートなみの強度発現を示すことが確認されている。しかし、凍結環境下での強度増進は常温環境での性状と比べると緩慢であり、正常な強度発現を保證するものではないことに注意が必要である。

e. 耐寒促進剤を用いるコンクリートでは、打込みから構造体コンクリートの強度管理の材齢までの積算温度に応じて強度補正值 T_n を 0 N/mm^2 または 3 N/mm^2 に定め、材齢28日で設計基準強度が得られるかどうかを検討する。図12および図13に示すように、耐寒促進剤を用いたコンクリートでは設計基準強度をより小さな積算温度で得ることができ、材齢28日で設計基準強度を得るための温度範囲は、JASS5および寒中コンクリート施工指針に定められている普通ポルトランドセメントの値よ

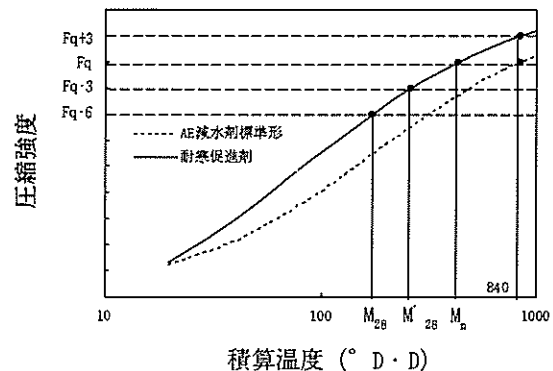


図2.13 強度補正值 $T_n=3\text{ N/mm}^2$ の場合の強度増進曲線と材齢28日強度の考え方

りも低温となる。表8は構造体コンクリートの管理材齢までに得られる積算温度に対応した強度補正值 T_n および品質基準強度と設計基準強度との強度差により、材齢28日で設計基準強度を得ることができる温度範囲を示したもので、低温性状を考慮して -3°C まで拡張した。

f. 表8から得られた強度補正值 T_c を、(4)式および(5)式に代入し、そのいずれか大きい方の値として調合強度が得られる。また、呼び強度の強度値は(6)式により定まる。

g. 耐寒促進剤タイプIの減水率は、一般に用いられているAE減水剤とほぼ同じであり、調合強度の同じAE減水剤コンクリートと同一調合とすることができる。また、耐寒促進剤の減水率がAE減水剤より大きい時は、AE減水剤コンクリートの調合と単位セメント量を同じとして、減水率に応じて単位水量を補正する必要がある。この場合の水セメント比はAE減水剤コンクリートよりも2~3%小さくなり、得られる強度は安全側となる。耐寒促進剤タイプIIの場合は減水成分が含まれていないため、その使用量による単位水量への影響はない。したがって、耐寒促進剤タイプIIを用いるコンクリートでは、調合強度の同じAE減水剤または高性能AE減水剤コンクリートと同一調合となる。

(5)打込みおよび養生

- a. 荷卸し時のコンクリート温度は $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ とする。
- b. 打込まれたコンクリートは、シートなどで被覆養生を行う。

a. 一般にコンクリートの打設温度が高いほど、その冷却には時間を要し、凍結までに得られる積算温度が大きくなる。低温環境では、暖かいコンクリートの冷却を防ぐのは比較的容易であるが、冷えたコンクリートの温度を上昇させるのは困難であり、コンクリートが凍結するまでの短い時間で初期凍害に対する抵抗性を確保しようとする耐寒促進剤では、一般のコンクリート以上に打込み時のコンクリート温度の管理が重要となる。

b. 打込まれたコンクリートがそのままの状態ですら長時間外気にさらされると、コンクリート温度は急激に低下し、十分な初期強度が得られる以前に凍結し、初期凍害を受ける恐れがある。したがって、コンクリートの表面を風による急激な冷却や降雪の影響から護り、凍結までの時間をできるだけ長くするために被覆養生が必要であり、ブルーシートまたはより保温性の高い断熱シートでの養生が望ましい。また、凍結作用期の工事では保温養生あるいは断熱養生による初期養生が必要となる場合がある。

(6)管理

コンクリートの強度管理用の供試体は、打込まれたコンクリート部材と同じ温度履歴となるような養生を行うことが望ましい。

強度管理用の供試体の養生を通常と同じ現場封緘養生とすると、対象とする部材と供試体の熱容量(断面)の相違から冷却速度が大幅に異なる。通常、断面寸法の小さな供試体は急速に冷却するのに対して、実際の部材では熱容量が大きいことにより、冷却速度は遅い。このため、寒中コンクリートで一般的な封かん養生とすると、供試体は構造体で得られている強度に対応しないばかりか、供試体が初期凍害を生じることすらある。耐寒促進剤を用いたコンクリートでは、打込み直後から凍結までの冷却過程の部材表面での温度履歴が特に重要となる。温度追従養生あるいは簡易断熱養生など、対象とする部材とできるだけ同じ温度履歴となるような養生方法とした供試体で強度管理を行うことが望ましい。なお、管理用供試体の養生を通常の封かん養生とした場合には、安全側の結果となるが、耐寒促進剤の長所を生かすことができない。

なお、本章で示した耐寒促進剤の品質標準および施工ガイドは、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」の資料として収録されている。

[参 考 文 献]

- 1) 北海道建築指導センター・耐寒剤の利用技術調査研究委員会：耐寒促進剤の品質標準および施工ガイド、(財)北海道建築指導センター、1997.11
- 2) 浜 幸雄、鎌田英治：無塩化・無アルカリ型防凍性混和剤による初期凍害の防止効果、コンクリート工学論文集、第7巻第1号、pp113-122、1996.1
- 3) 浜 幸雄、三森敏司、鎌田英治：防凍性混和剤を用いたコンクリートの強度増進性状、コンクリート工学論文集、第8巻第1号、pp161-170、1997.1
- 4) 浜 幸雄、鎌田英治：耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結環境下における強度増進性状と水分凍結、コンクリート工学論文集、第8巻第2号、pp73-80、1997.7
- 5) Ramachandran, V.S.:Concrete Admixture Hand-book, Noyes Publications, pp430-479, 1984
- 6) 大橋 猛：耐寒剤、コンクリート工学、Vol.26、No.3、pp61-64、1988
- 7) 笠井芳夫、小林正几：セメント・コンクリート用混和剤、pp453-458、技術書院、1993
- 8) 浜 幸雄、梅沢健一：防凍性混和剤を用いたコンクリートの寒中施工技術、高強度コンクリート・防凍性混和剤による寒中コンクリート技術ガイド、pp11-27、(財)北海道建築指導センター、1993
- 9) 永井彰一郎：無機化学ハンドブック、pp916-918、技報堂出版、1965

3. コンクリート温度による寒中コンクリートの計画

寒中コンクリートの新技術として、開発されたばかりで実績が少なく、未だに一般化されていない技術が日本建築学会寒中コンクリート施工指針・同解説の資料に記載されている。ここでは、これらの新しい技術を用いてコンクリートの温度履歴と圧縮強度増進を予測し寒中コンクリート工事を計画する方法を示す。

3.1 圧縮強度増進の温度・時間依存性

コンクリートの圧縮強度はセメントの水和反応の進行とともに増大する。セメントの水和反応の速さは温度に大きく依存し、温度が高いほど速くなる。従って図3.1に示すように同一材齢であっても、低温で養生されたものの圧縮強度は高温で養生されたものより低い結果となる。こうした、圧縮強度増進の温度・時間依存性を一義的に表す指標として、次の積算温度が用いられている。

$$M = \sum_{t=1}^z (\theta_t + 10)$$

ここに M : 積算温度 (° DD) z : 材齢 (日)

θ_t : 材齢 z 日における日平均気温または日平均コンクリート温度 (°C)

積算温度はコンクリートの強度増進の過程を温度と時間の関数として一義的に表すことを目的としたものであるが、多くの実験データをもとに誘導された実験式であることに注意が必要であり、プラスの温度条件であることが基本となる。図3.2は各コンクリートの強度増進を積算温度を用いて記述した例であり、強度増進の過程をほぼ一義的に記述可能なことが示されている。

寒中コンクリート工事が行われる地域では、継続養生終了後にコンクリート温度が0°C以下となる場合がある。図3.3は凍結状態で養生されたコンクリートの強度増進を20°Cで養生したものと対比して示したものである。凍結状態では強度増進が非常に遅くなり、その傾向は養生温度が低いものほど顕著である。しかし、-8°Cで養生されたコンクリートでもわずかな強度増進がみられる。これを積算温度で記述したのが図3.4である。凍結状態が持続された条件では同じ積算温度であっても圧縮強度はかなり小さく、凍結環境下では通常の積算温度方式を適用することはできない。これに対して0°C以下の温度範囲を対象とした積算温度式がニケネンにより提案されている。

$$M = \int_0^t 0.2(\theta + 15)dt$$

ここに M : 積算温度 (° DD) θ : Δt 時間中の温度 (°C) t : 硬化時間 (日)

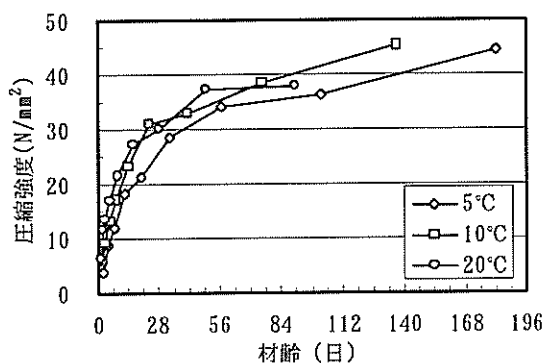


図3.1 強度増進の養生温度による変化

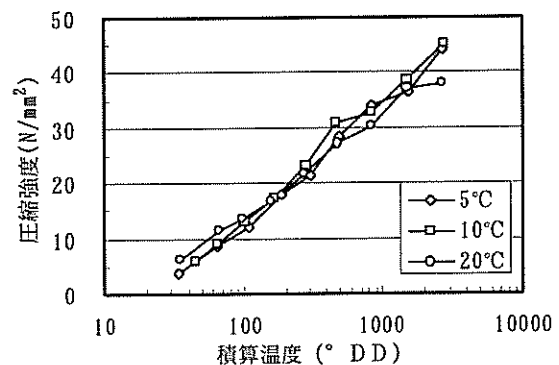


図3.2 圧縮強度と積算温度の関係

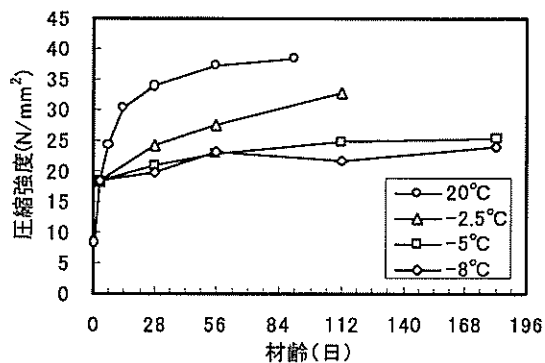


図 3.3 凍結したコンクリートの強度増進

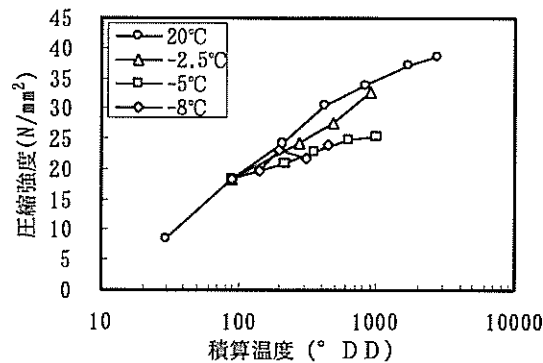


図 3.4 凍結したコンクリートの強度と積算温度

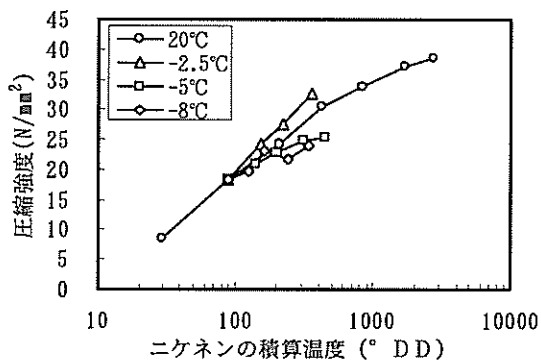


図 3.5 凍結したコンクリートの強度とニヶネンの積算温度

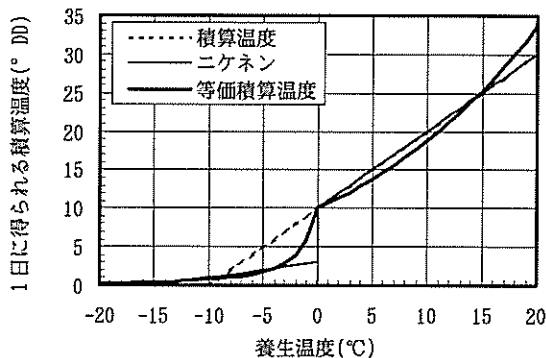


図 3.6 氷点下における各積算温度の比較

このニヶネンの積算温度を用いて強度増進過程を示したのが図 3.5 である。図 3.4 との比較では凍結の影響がやや解消されてはいるものの、凍結温度による差違が残されており、長期間凍結状態が続く場合には注意が必要である。

最近では、須藤ら²⁾がセメントの水和反応率の温度・時間依存性について反応速度定数に着目した実験を行い、凍結環境下の水和率が温度、時間以外に水の化学ポテンシャル変化による影響を受けることを報告している。さらに、水の凍結を考慮して反応速度定数を算定する方法を提案し、得られた反応速度定数から凍結温度に対応する等価積算温度を 20°C で 1 日に得られる積算温度を基準に算定し提案している。

この等価積算温度を 0°C 以下の温度範囲で用いることとし、0°C を基準に算定し直し、図 3.6、表 3.2 に示す。これは、温度、時間に依存してセメントの水和反応が進行し、それに伴い圧縮強度が増進することを前提としており、欧米で使用されている Equivalent Age (等価材齢) の考え方に水の凍結による影響を考慮した形となっている。-3~0°C の範囲ではニヶネんの式による値よりも大きな積算温度となっているが、-3°C 以下の温度範囲ではほぼ同等である。また、セメントの水和反応率の温度依存性をアレニウス則で記述し速度定数を誘導しているために、-15°C 以下も含む広い温度範囲に適用が可能であり、ニヶネんの式でみられる 0°C での不連続性も解消されている。

表 3.2 に示した等価積算温度を用いて 0°C 以下の範囲を含む各温度で養生されたコンクリートの強度増進を図 3.7 に示す。20~-8°C の範囲でよい適合が認められる。ただし、硬化セメントペーストの細孔径分布が水和反応の進行に伴い緻密化する過程を考慮し、現段階ではその適用範

表3.2 温度に対応した等価積算温度の値

温度(°C)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-	10.00	9.43	8.91	8.42	7.97	7.56	7.17	6.82	6.48	6.17
-1	5.89	5.62	5.37	5.13	4.91	4.71	4.52	4.34	4.17	4.01
-2	3.86	3.72	3.58	3.46	3.34	3.23	3.12	3.02	2.92	2.83
-3	2.75	2.67	2.59	2.51	2.44	2.38	2.31	2.25	2.19	2.14
-4	2.09	2.04	1.99	1.94	1.90	1.85	1.81	1.77	1.74	1.70
-5	1.66	1.63	1.60	1.57	1.54	1.51	1.48	1.45	1.43	1.40
-6	1.38	1.35	1.33	1.31	1.28	1.26	1.24	1.22	1.20	1.19
-7	1.17	1.15	1.13	1.12	1.10	1.08	1.07	1.05	1.04	1.02
-8	1.01	0.99	0.98	0.97	0.95	0.94	0.93	0.92	0.90	0.89
-9	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79
-10	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69
-11	0.68	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.63	0.62	0.61
-12	0.60	0.60	0.59	0.58	0.57	0.57	0.56	0.55	0.55	0.54
-13	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.49	0.49	0.48	0.47
-14	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.44	0.43	0.43	0.42	0.41
-15	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.38	0.37	0.37	0.36
-16	0.35	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.31
-17	0.31	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27
-18	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23
-19	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.19
-20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16

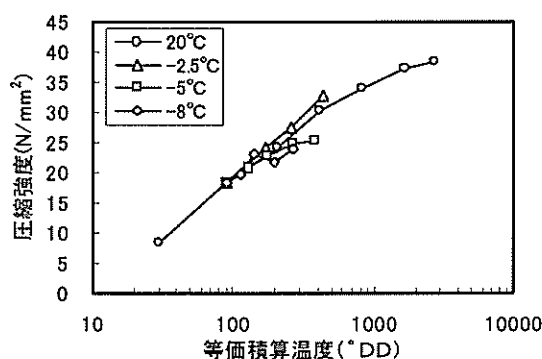


図3.7 圧縮強度と等価積算温度の関係

囲が積算温度で90° DD以降に凍結を受けた場合に限られるとされている²⁾。

3.2 コンクリートの温度履歴の予測

前述したようにコンクリートの圧縮強度は温度時間関数である積算温度によって一義的に記述することができる。計画時に積算温度を得るにはコンクリート温度の予測を行う必要がある。従来の寒中コンクリートの計画では初期養生期間中、継続養生期間中ともに養生雰囲気気温がコンクリート温度に相当するものとみなしたきわめて安全側の計画を行っていた。打設直後のコンクリートは水和反応による発熱のため養生雰囲気温度よりは高温となることが知られていたが、これを算定する簡便な方法が提供されていなかったことが主な理由であろう。最近のコンピュータ技術、解析技術の進歩に伴い、打設後のコンクリート温度の経時変化を瞬時に解析できるソフトウェアが開発、提供されている³⁾。これらを用いることで、的確な温度解析が可能となる。

一方で、長島は時間定数を用い水和熱の影響も考慮した温度解析を行い、温度履歴を簡易な図表から得る方法を提案しており、これによると断熱養生ばかりではなく寒中コンクリートの計画に必要なコンクリートの温度履歴を比較的容易に計算することが可能である。ここでは、長島による打設後に得られる積算温度から平均温度を算定する方法、打設後コンクリート表面が0°Cとなるまで

に得られる積算温度、コンクリート温度の低下についての算定方法を計算例とともに示す。

(1) 打設後各材齢の平均コンクリート温度の算定

・時間定数 τ の算定

時間定数 τ はニュートンの冷却式の指数部分で、物体の冷えにくさの指標として扱われ、この値が大きいくほど冷却しにくい結果となる。計算に当たっては、部材の全長または全面積について計算するよりも柱、梁は長さ1mについて、床、壁は1m²について計算する。隣接するコンクリートは同温度であることから隣接境界の熱移動はないものとして扱う。

$$\tau = 698 \cdot V / \Sigma(KS)$$

τ : 部材の時間定数(hr.)

698 : コンクリート1m³の熱容量(W/m³K)

V : 検討する部材のコンクリート容積(m³)

K : 部材表面の熱損失係数(W/m²K)

S : 熱損失係数Kの部材表面積(m²)

上式中の部材表面の熱損失係数Kの値は表3.3による。

・打設後1日で得られる積算温度

長島により提案された次項の図3.8を用いて時間定数 τ に対応する積算温度を得る。使用するセメントは普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントの2種類とし、外気温0℃、単位セメント量300kg/m³、打設時のコンクリート温度は10℃の場合について示している。ここで得られた各材齢の積算温度に、実際の外気温、単位セメント量、打設時のコンクリート温度による補正を加える。得られた積算温度から1日間のコンクリート温度の平均値を計算することができる。

時間定数は部材が大きい場合や保温性の高い型枠や養生材を用いた場合に高い値となり、セメントの水和熱を有効に利用でき、所定の材齢で得られる積算温度も高くなる。しかし、時間定数が低い場合には放熱量が多くなるため単位セメント量や打ち込み温度を変えることによる影響は小さくなることが示されている。

計算例1)

養生上屋内にある厚さ180mmの壁

両面とも合板型枠(湿潤)

単位セメント量330kg/m³(普通ポルトランドセメント使用)

打設時のコンクリート温度15℃

外気温-2℃

時間定数を計算する $\tau = 698 \cdot 0.18 / (7.5 + 7.5) = 8.376$

図3.8から読みとった積算温度は18° DD

表3.3 部材表面の熱損失係数の仮定値(日本建築学会寒中コンクリート施工指針・同解説)

保温のための材料	無風(自然対流)	養生上屋内(風速1m/s)	屋外(風速3m/s)
発泡スチロール樹脂板(50mm)	1.0	1.5	2.0
発泡ウレタンシート(10mm)	3.8	4.5	5.0
シート	5.8	6.0	7.0
合板型枠12mm(湿潤)	4.7	7.5	8.0
合板型枠12mm(乾燥)	3.7	6.5	7.0
鉄板 3mm	5.0	10.0	14.0
コンクリートまたは地盤	2.9	2.9	2.9
外気に露出	8.6	17.4	29.1

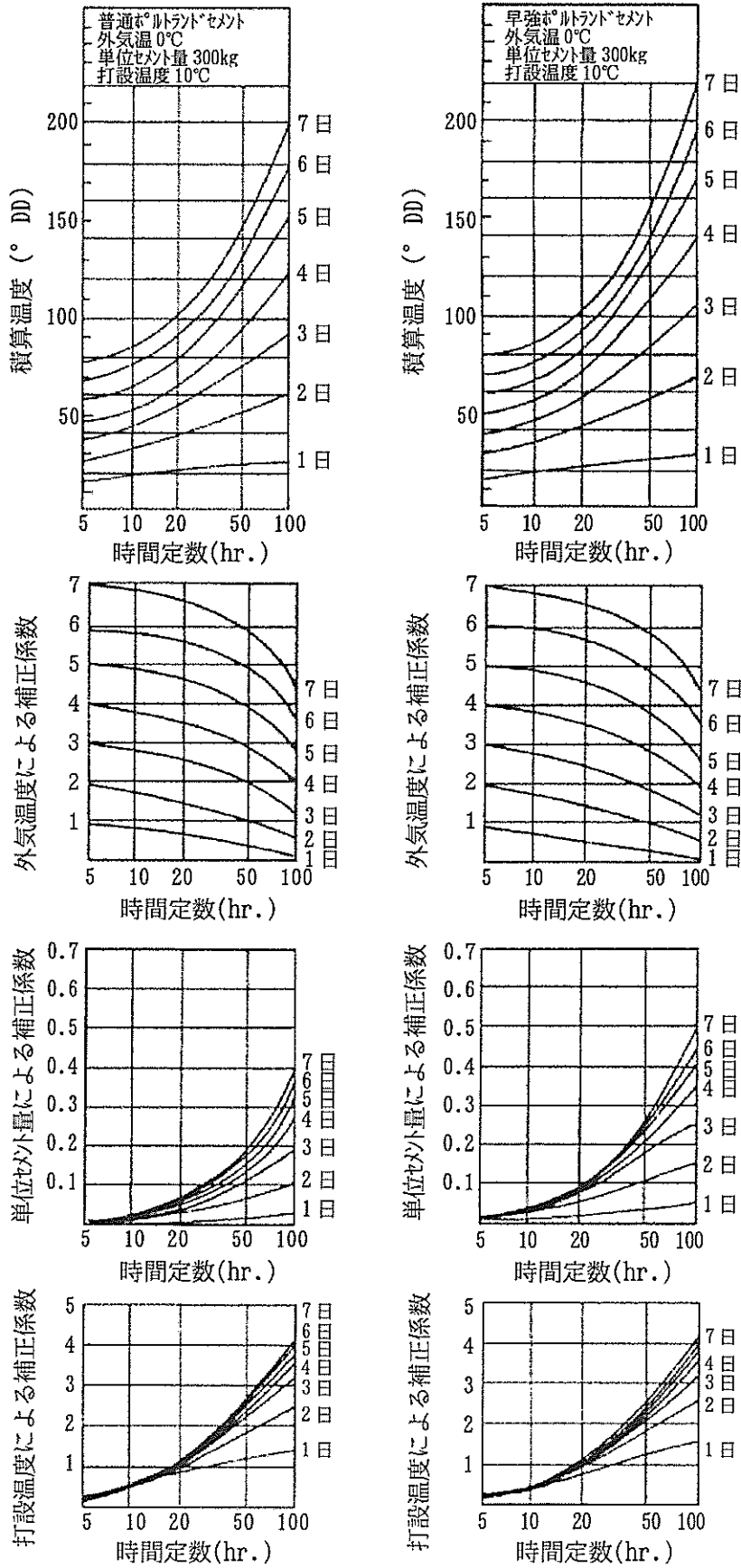


図 3.8 長島による水和発熱を考慮した積算温度算定図表⁴⁾

時間定数 8.376 に対応する補正係数は、単位外気温度あたりで 0.8、単位セメント量あたりは 0、単位打設温度あたり 0.4 となり、それぞれに基準とした値との差を乗じたものを累加し、1 日の積算温度とする。

$$\begin{aligned} \text{1 日で得られる積算温度} &= 18 + 0.8 \times (-2 - 0) + 0 \times (330 - 300) + 0.4 \times (15 - 10) \\ &= 18.4^\circ \text{ DD} \end{aligned}$$

$$\text{1 日間の平均コンクリート温度} = 18.4 / 1 - 10 = 8.4^\circ \text{C}$$

計算例 2)

養生上屋内にある厚さ 180mm の壁

両面とも断熱材 50mm + 合板型枠

単位セメント量 330kg/m³(普通ポルトランドセメント使用)

打設時のコンクリート温度 15°C

外気温 -2°C

$$\text{時間定数を計算する} \quad \tau = 698 \cdot 0.18 / (1.5 + 1.5) = 41.88$$

図 3. 8 から読みとった積算温度は 24° DD

時間定数 41.88 に対応する補正係数は、単位外気温度あたり 0.5、単位セメント量あたり 0.02、単位打設温度あたり 1.1 となり、それぞれに基準とした値との差を乗じたものを累加し、1 日の積算温度とする。

$$\begin{aligned} \text{1 日で得られる積算温度} &= 24 + 0.5 \times (-2 - 0) + 0.02 \times (330 - 300) + 1.1 \times (15 - 10) \\ &= 29.1^\circ \text{ DD} \end{aligned}$$

$$\text{1 日間の平均コンクリート温度} = 29.1 / 1 - 10 = 19.1^\circ \text{C}$$

(2) コンクリート打設後部材表面が 0°C となるまでに得られる積算温度

外気温の日内変動を 10°C としてコンクリートの冷却過程を計算して得られた時間定数と積算温度の関係の下限値を重回帰分析により得た長島の方法によりコンクリート打設後部材表面が 0°C となるまでに得られる積算温度 M_0 を算定する⁵⁾。

$$M_0 = A \tau + B$$

ここに M_0 : 打ち込み後のコンクリートが冷えて表面が 0°C になるまでの積算温度

A、B : 係数および定数

普通ポルトランドセメント

$$A = 0.0056X_1 + 0.052X_2 + 0.205X_3 + 1.42$$

$$B = 0.0180X_1 + 0.641X_2 + 1.495X_3 - 20.45$$

早強ポルトランドセメント

$$A = 0.0062X_1 + 0.034X_2 + 0.216X_3 + 1.74$$

$$B = -0.0140X_1 + 0.272X_2 + 0.151X_3 - 15.42$$

ここに X_1 : 単位セメント量 (280 ~ 370kg/m³)

X_2 : コンクリートの打ち込み温度 (3 ~ 22°C)

X_3 : 平均気温 (0 ~ -10°C)

計算例 3)

養生上屋内にある厚さ 180mm の壁

両面とも合板型枠 (湿潤)

普通ポルトランドセメント使用で、単位セメント量 $X_1=330\text{kg/m}^3$

打設時のコンクリート温度 $X_2=15^\circ\text{C}$

外気温 $X_3=-2^\circ\text{C}$

時間定数を計算する $\tau=698 \cdot 0.18 / (7.5+7.5)=8.376$

$$M_0=A \tau + B$$

ここに M_0 : 打ち込み後のコンクリートが冷えて表面が 0°C になるまでの積算温度

A、B: 係数および定数

普通ポルトランドセメント

$$A=0.0056X_1+0.052X_2+0.205X_3+1.42$$

$$=0.0056 \times 330+0.052 \times 15+0.205 \times -2+1.42=3.638$$

$$B=0.0180X_1+0.641X_2+1.495X_3-20.45$$

$$=0.0180 \times 330+0.641 \times 15+1.495 \times -2-20.45=-19.765$$

$$M_0=3.638 \times 8.376-19.765=10.71^\circ \text{ DD}$$

コンクリート表面が 0°C に冷えるまでに得られる積算温度は 10.71° DD となる。

計算例 4)

養生上屋内にある厚さ 180mm の壁

両面とも断熱材 50mm + 合板型枠

普通ポルトランドセメント使用で、単位セメント量 $X_1=330\text{kg/m}^3$

打設時のコンクリート温度 $X_2=15^\circ\text{C}$

外気温 $X_3=-2^\circ\text{C}$

時間定数を計算する $\tau=698 \cdot 0.18 / (1.5+1.5)=41.88$

$$M_0=A \tau + B$$

ここに M_0 : 打ち込み後のコンクリートが冷えて表面が 0°C になるまでの積算温度

A、B: 係数および定数

普通ポルトランドセメント

$$A=0.0056X_1+0.052X_2+0.205X_3+1.42$$

$$=0.0056 \times 330+0.052 \times 15+0.205 \times -2+1.42=3.638$$

$$B=0.0180X_1+0.641X_2+1.495X_3-20.45$$

$$=0.0180 \times 330+0.641 \times 15+1.495 \times -2-20.45=-19.765$$

$$M_0=3.638 \times 41.88-19.765=132.59^\circ \text{ DD}$$

コンクリート表面が 0°C に冷えるまでに得られる積算温度は 132.59° DD となる。

(3) 水和発熱を考慮しないコンクリートの冷却過程の計算

ニュートンの冷却式により物体と周囲温度が異なる場合に冷却開始からh時間後の物体の温度を算定する式が時間定数を用いて示されている⁶⁾。

$$T_2 = (T_1 - T_e) \exp(-h/\tau) + T_e$$

ここに T_1 : 物体の冷却前の温度 (°C)

T_2 : 物体の冷却開始からh時間後の温度 (°C)

T_e : 周囲温度 (°C)

h : 冷却開始からの経過時間 (hr.)

τ : 時間定数 (hr.)

物体の温度が T_1 から T_2 へ低下するのに要する時間は上式を変形して

$$h = -\tau \ln((T_2 - T_e)/(T_1 - T_e))$$

計算例) 初期養生終了後のコンクリート温度の推定

養生上屋内にある厚さ180mmのスラブ

下面合板型枠(乾燥) $K=6.5$

上面養生なし $K=17.4$

初期養生終了時のコンクリート温度 T_1 10°C

継続養生の計画温度 T_e 1°C

時間定数を計算する $\tau = 698 \cdot 0.18 / (6.5 + 17.4) = 5.26$

h時間経過後のコンクリート温度 T_2 を計算した結果が図3.9である。

$$T_2 = (10 - 1) \exp(-h/5.26) + 1$$

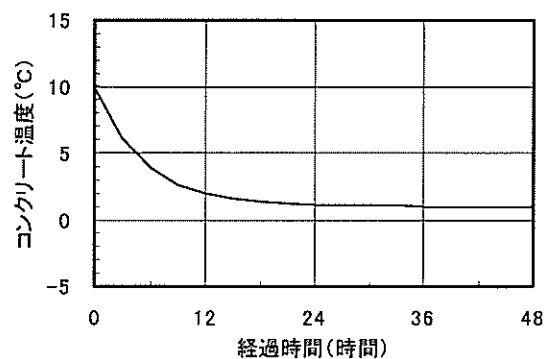


図3.9 コンクリートの冷却過程の算定結果

3.3 圧縮強度増進の標準曲線により強度を予測する方法

普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、フライアッシュセメントB種、高炉セメントB種を用いたコンクリートについて、積算温度と圧縮強度の関係を成長曲線の1つであるロジスティック曲線に近似した実験式として示し、これをコンクリートの強度増進過程の標準とすることにより、これらのコンクリートの強度の推定を行うものである。

標準曲線には初期材齢時および長期材齢時の養生温度による補正が加えられており、強度増進の全過程を示すものであるが、寒中コンクリートでは実用上840° D・D(20°Cで28日に相当する)までの範囲で利用することとする。

ロジスティック曲線は一般に次式で与えられるもので、a、cは正の定数、bは負の定数である。

$$F=a/(1+\exp(bx+c))$$

式中xは積算温度の常用対数値($\log_{10}M$)とし、積算温度Mに対応する強度はFで得られる。定数aは計算上、無限の長期材齢における強度を意味し、定数b、および、cは曲線の形状を決定する。練上り温度、若材齢のコンクリート温度が高い場合には同一積算温度であっても低温の場合より強度増進が大きな傾向を示す。しかし、初期材齢で高温下にあったコンクリートではその後の強度増進が緩慢となり、長期材齢の強度が標準養生された材齢28日の強度より低くなることもある。これらの影響を実験により確認し、若材齢では打込み後24時間までの温度が強度増進に影響するとして積算温度に補正を加え、また、長期材齢では式中aに補正を加えることで対応した。標準曲線の算定に用いたデータは混和剤を使用せず、封緘養生したコンクリート試験体によるものであるが、強度増進傾向はAEコンクリートにおいても差がないものと仮定し、標準曲線を通常のコンクリートに適用できるものと考えている。

標準曲線を求める際に、材齢28日のコンクリート強度を調合強度とした場合には積算温度と圧縮強度の平均的な関係が得られ、呼び強度とした場合には安全側の関係が得られる。

・圧縮強度増進の標準曲線を求めるために用いた強度データの概要1)

提供者 : 洪、鎌田、桂

セメント: 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

養生温度: 5、10、20°C

養生状態: 封緘養生

水セメント比: 45、55、65% (いずれもプレーンコンクリート)

材齢 : 積算温度で30~2700° D・Dの9材齢

a. 普通ポルトランドセメントを使用した場合

4社の普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートによる324データから誘導した。

$$F=F_{\infty}/(1+\exp(-2.4235\log_{10}(Mc) + 5.6271))$$

ここに F_{∞} : 構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度(N/mm²)

$$F_{\infty} = {}_{20}F_{\infty} (1 - 0.003726(T_{24} - 20))$$

${}_{20}F_{\infty}$: 標準養生を行ったコンクリートの最終強度(N/mm²)

$${}_{20}F_{\infty} = {}_{20}F_{28} (1 + \exp(-2.4235\log_{10}({}_{20}M_{28}) + 5.6271))$$

Mc : 構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度(° D・D)

$$Mc = M + 1.0394(T_{24} - 20)$$

${}_{20}F_{28}$: 標準水中養生を行った材齢28日における圧縮強度(N/mm²)

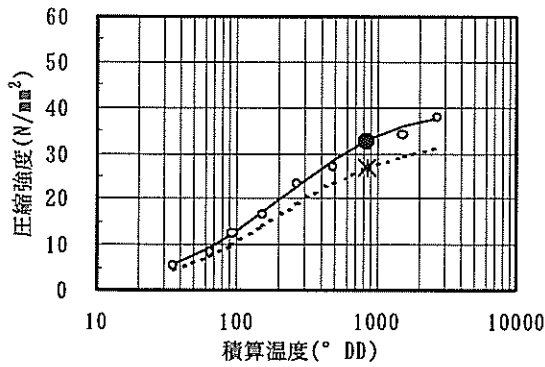


図3.10 圧縮強度の試験値と標準曲線の例

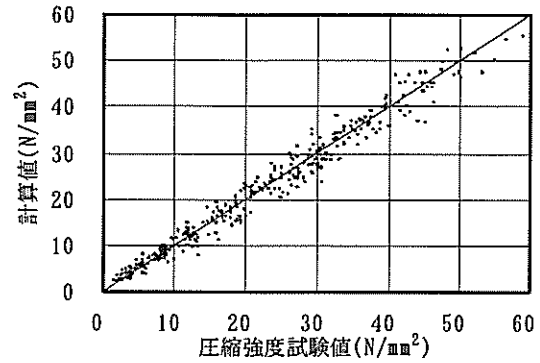


図3.11 標準曲線による計算値と試験値の対応

${}_{20}M_{28}$: 標準水中養生を行った材齢28日における積算温度(° D · D)

T_{24} : 打込み後24時間のコンクリートの平均温度(°C)

M : コンクリートの積算温度(° D · D)

推定値と実測値の相関係数 $R=0.983$

推定値と実測値の差の標準偏差

$F < 10\text{N/mm}^2$ の場合 $\sigma=1.06$ (N/mm²)

$F \geq 10\text{N/mm}^2$ の場合 $\sigma=2.68$ (N/mm²)

ここに示した強度増進曲線を用いて推定した圧縮強度と試験値との関係は図3.10に示すようによく一致している。図中、各材齢における圧縮強度の試験値を○で示した。ここで、図中●で示した試験値を標準水中養生を行った材齢28日における圧縮強度 ${}_{20}F_{28}$ とした場合(図中実線)には積算温度と圧縮強度の平均的な関係が得られ、 ${}_{20}F_{28}$ に呼び強度の値を用いた場合(図中破線)には安全側の関係が得られる。

実験結果による324データについて両者の比較を図3.11に示した。試験値と計算値は非常に高い相関を示している。

b. 早強ポルトランドセメントを使用した場合

3社の早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートによる120データから誘導した。

$$F = F_{\infty} / (1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(Mc) + 4.40625))$$

ここに F_{∞} : 構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度(N/mm²)

$$F_{\infty} = {}_{20}F_{\infty} (1 - 0.00583(T_{24} - 20))$$

${}_{20}F_{\infty}$: 標準養生を行ったコンクリートの最終強度(N/mm²)

$${}_{20}F_{\infty} = {}_{20}F_{28} (1 + \exp(-2.2335 \log_{10}({}_{20}M_{28}) + 4.40625))$$

Mc : 構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度(° D · D)

$$Mc = M + 1.2439(T_{24} - 20)$$

${}_{20}F_{28}$: 標準水中養生を行った材齢28日における圧縮強度(N/mm²)

${}_{20}M_{28}$: 標準水中養生を行った材齢28日における積算温度(° D · D)

T_{24} : コンクリート打設後24時間のコンクリート温度の平均値(°C)

M : コンクリートの積算温度(° D · D)

推定値と実測値の相関係数 $R=0.989$

推定値と実測値の差の標準偏差

$F < 10\text{N/mm}^2$ の場合 $\sigma=0.85$ N/mm²

$$F \geq 10\text{N/mm}^2 \text{ の場合} \quad \sigma = 1.69 \quad \text{N/mm}^2$$

c. フライアッシュセメント B 種を使用した場合

3社のフライアッシュセメント B 種を使用したコンクリートによる 108 データから誘導した。

$$F = F_{\infty} / (1 + \exp(-2.3290 \log_{10}(Mc) + 5.5781))$$

ここに F_{∞} : 構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度(N/mm²)

$$F_{\infty} = {}_{20}F_{\infty} (1 + 0.002855(T_{24} - 20))$$

${}_{20}F_{\infty}$: 標準養生を行ったコンクリートの最終強度(N/mm²)

$${}_{20}F_{\infty} = {}_{20}F_{28} (1 + \exp(-2.3290 \log_{10}({}_{20}M_{28}) + 5.5781))$$

Mc : 構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度(° D · D)

$$Mc = M + 1.1710(T_{24} - 20)$$

${}_{20}F_{28}$: 標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度(N/mm²)

${}_{20}M_{28}$: 標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度(° D · D)

T_{24} : コンクリート打設後 24 時間のコンクリート温度の平均値(°C)

M : コンクリートの積算温度(° D · D)

推定値と実測値の相関係数 R= 0.987

推定値と実測値の差の標準偏差

$$F < 10\text{N/mm}^2 \text{ の場合} \quad \sigma = 0.93 \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$F \geq 10\text{N/mm}^2 \text{ の場合} \quad \sigma = 2.05 \quad (\text{N/mm}^2)$$

d. 高炉セメント B 種を使用した場合

4社の高炉セメント B 種を使用したコンクリートによる 163 データから誘導した。

$$F = F_{\infty} / (1 + \exp(-2.0264 \log_{10}(Mc) + 5.6589))$$

ここに F_{∞} : 構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度(N/mm²)

$$F_{\infty} = {}_{20}F_{\infty} (1 + 0.01464(T_{24} - 20))$$

${}_{20}F_{\infty}$: 標準養生を行ったコンクリートの最終強度(N/mm²)

$${}_{20}F_{\infty} = {}_{20}F_{28} (1 + \exp(-2.0264 \log_{10}({}_{20}M_{28}) + 5.6589))$$

Mc : 構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度(° D · D)

$$Mc = M + 1.0514(T_{24} - 20)$$

${}_{20}F_{28}$: 標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度(N/mm²)

${}_{20}M_{28}$: 標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度(° D · D)

T_{24} : コンクリート打設後 24 時間のコンクリート温度の平均値(°C)

M : コンクリートの積算温度(° D · D)

推定値と実測値の相関係数 R= 0.981

推定値と実測値の差の標準偏差

$$F < 10\text{N/mm}^2 \text{ の場合} \quad \sigma = 1.04 \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$F \geq 10\text{N/mm}^2 \text{ の場合} \quad \sigma = 2.39 \quad (\text{N/mm}^2)$$

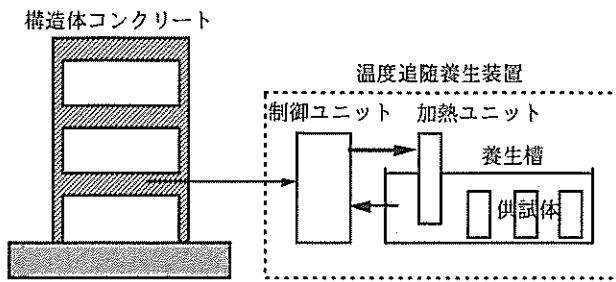


図 3.12 温度追従養生装置の概念

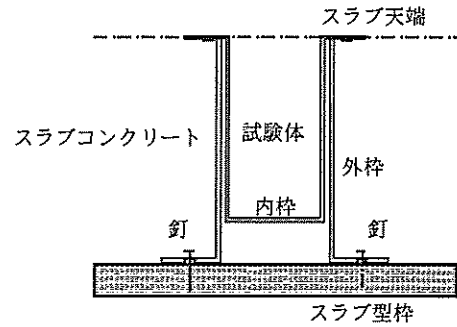


図 3.13 ASTM による打ち込み試験体⁸⁾

3.4 コンクリートの温度履歴をもとに計画した場合の品質管理・検査

型枠、保温材料の断熱性や、水和熱による部材の温度上昇を考慮してコンクリートの温度履歴を予測し、それにもとづいて調合計画を行った場合には、構造体コンクリートと同様な温度履歴を持つ構造体強度管理用圧縮強度試験用供試体で強度の管理、試験を行う必要がある。

そのひとつに温度追従養生がある。これは、図 3.12 に示すような装置（温度追従養生装置）を用いることで、測定した構造体コンクリート温度と同じ温度履歴を供試体に与える養生方法である。簡易な断熱箱の中に試験体を保存し、構造体コンクリートとほぼ同等の温度履歴を与える方法もある。

また、ASTM C873⁸⁾ では、2重にした鉄製の型枠をスラブ上に設置し、床コンクリートの打込みと同時に試験体を作成し、スラブのコンクリートと同じ条件で養生を行った試験体で強度を管理する方法も示されている。試験体を抜き取った後を補修する必要があるが、非常に簡易で、しかも確からしい方法である。

3.5 コンクリートの温度履歴による寒中コンクリートの計画例

寒中コンクリートで所定の材齢で得られる強度に影響するのは概ね以下の6項目である。

温度、材齢

部材の大きさ

打設するコンクリートの強度

セメント種類

打設時のコンクリート温度

部材表面の養生方法

コンクリートの調合は、低温による強度増進の遅れを考慮して決定される。打設後のコンクリートの養生については初期凍害を防止する事ができる 5 N/mm^2 （軽微な凍結期では 3.5 N/mm^2 ）以上の圧縮強度が得られたことを確認した後うち切ることとされている。従来、初期養生の方法として、養生上屋を架設して内部空間を加熱し、打ち込まれたコンクリートを所定の養生温度に保つ方法が主であった。しかし、部材が大きい場合や、コンクリート表面を保温材料で被覆養生することが可能な場合にはセメントの水和熱を有効に利用することで、打設時の気象条件によっては上屋を架設せずに所用の初期養生を行うことも可能である。ただし、所定の管理材齢で品質基準強度が確保されるような継続養生は行わなければならない。

ここでは、以下の3例を計画例として示す。

1. べた基礎の基礎スラブ（部材の大きな場合）で養生上屋を架設せずに表面を被覆養生するだけで初期凍害を防止する。
2. コンクリート打設後の厳寒期に施工を中断した場合で、工事再開後、および、管理材齢において得られる強度を検討する。
3. 基礎断熱とした住宅基礎で、基礎の両側に配置した断熱材を断熱型枠として用いる場合の検討

計画例 1) 部材が大きく水和発熱の利用が考えられる場合

建物概要 事務所ビル
 建設地 札幌市
 構造規模 RC造、地上8階、塔屋1階
 延べ面積 2770 m²

建物の概要を図3.14に、全体の工程を図3.15に示した。札幌市内の寒中コンクリート適用期間は11月1日から3月20日までなので、べた基礎ベースコンクリートから3階立ち上がり4階床コンクリート打設までの計画とする。

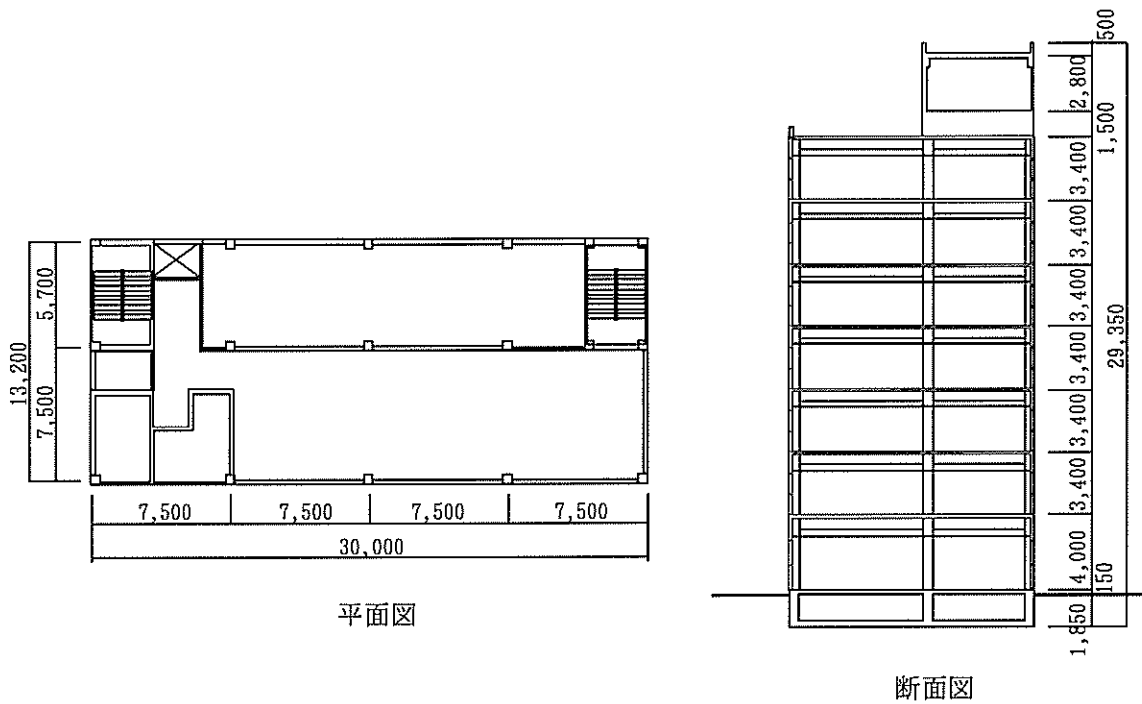


図3.14 建物の概要

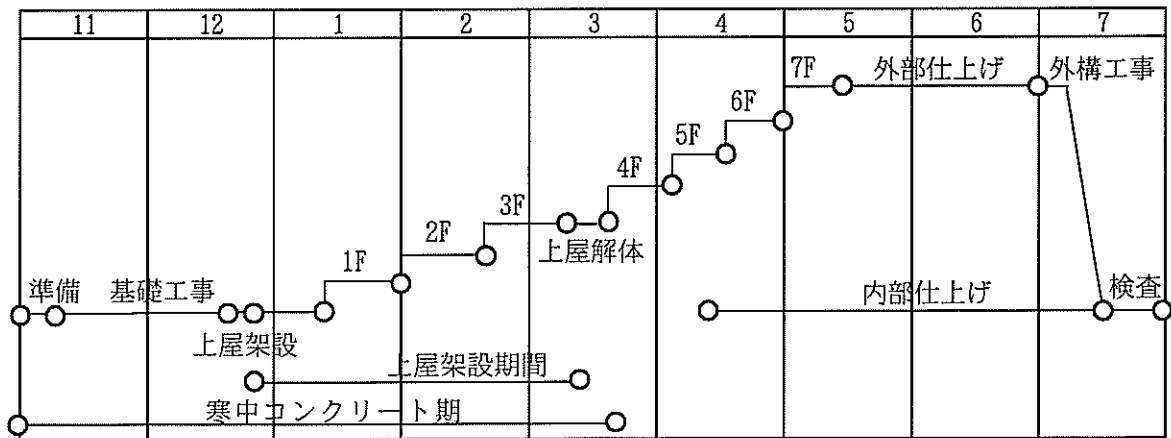


図3.15 全体の工程

養生の計画

- ・札幌市内の本格的な降雪は、12月中旬以降であることが多い。
- ・12月初旬から日最低気温が -3°C 以下となる凍結作用期にはいる。

以上のことを考慮して、3階コンクリートの初期養生まで養生上屋の架設が必要と考える。ベースコンクリートは部材厚が厚く、木ごと程度の仕上げのため被覆養生のみで無加熱養生とする可能性を検討する。

基礎立ち上がり1階床コンクリートは初期養生用として簡易な上屋を架け加熱養生をする。加熱はコンクリートを打ち込む前日から行い、コンクリート打ち込み後の計画養生温度は 5°C とし、3日間の初期養生を行う。

初期養生終了後外周部の型枠解体、埋め戻しを行い、3層分の養生上屋を架設する。加熱養生期間は12月下旬から3月中旬とし、上屋内の計画養生温度は 3°C とする。ただし、コンクリート打設後3日間は初期養生期間として上屋内を 5°C に保つ計画とする。

躯体工程と旬平均気温、旬最低気温、計画養生温度の関係を図3.16に示す。

各階の積算温度

各階のコンクリートの打込みから28日までの積算温度を計算する。

ベースコンクリート(12/4)

$$M_{28}=6 \times (0.4+10)+2 \times (-1.6+10)+4 \times (5+10)+4 \times (-1.6+10)+7 \times (-2.8+10)+5 \times (3+10)=288.2^{\circ}$$

DD

基礎コンクリート(12/13)

$$M_{28}=3 \times (5+10)+4 \times (-1.6+10)+7 \times (-2.8+10)+14 \times (3+10)=311^{\circ} \text{ DD}$$

1階立ち上がり2階床コンクリート(2/1)

$$M_{28}=3 \times (5+10)+25 \times (3+10)=370^{\circ} \text{ DD}$$

2階立ち上がり3階床コンクリート(2/20)

$$M_{28}=3 \times (5+10)+25 \times (3+10)=370^{\circ} \text{ DD}$$

3階立ち上がり4階床コンクリート(2/20)

$$M_{28}=3 \times (5+10)+7 \times (-0.2+10)+10 \times (1.5+10)+8 \times (4.2+10)=342.2^{\circ} \text{ DD}$$

コンクリートの調合

設計基準強度 21 N/mm^2 、耐久設計基準強度 24 N/mm^2 、品質基準強度 27 N/mm^2 のコンクリート

	12月		1月				2月			3月		4月			
ベースコンクリート	○	○													
基礎	○	○													
上屋架設・解体	○	○													
1階コンクリート							○								
2階								○							
3階									○						
上屋内加熱養生期間			○							○					
寒中コンクリート期間											○				
旬平均気温	0.4	-1.6	-2.8	-3.9	-4.4	-5.2	-4.3	-4.4	-3.2	-1.8	-0.2	1.5	4.2	6.5	8.7
旬最低気温	-3.0	-5.0	-6.4	-7.7	-8.4	-9.1	-8.2	-8.5	-7.3	-5.8	-4.0	-2.1	0.3	2.1	4.2
計画養生温度	0.4	-1.6	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	1.5	4.2	6.5	8.7

図3.16 コンクリート打設からの養生工程

である。呼び強度の強度値は日本建築学会寒中コンクリート施工指針・同解説の方法に従って決定する。

打込みから28日間の積算温度からその間の予想平均温度 θ を求める。

$$\theta = M_{28}/28 - 10$$

ベースコンクリート $\theta = 288.2/28 - 10 = 0.3$

基礎コンクリート $\theta = 311/28 - 10 = 1.1$

1階コンクリート $\theta = 370/28 - 10 = 3.2$

2階コンクリート $\theta = 370/28 - 10 = 3.2$

3階コンクリート $\theta = 342.2/28 - 10 = 2.2$

日本建築学会「寒中コンクリート施工指針」では「構造体コンクリートの強度管理の材齢を延長して調合強度を定める方法」を用いる場合の、打ち込みから28日までの期間の平均温度の下限値は1℃である。従って、平均温度が0.3℃であるベースコンクリートの場合は「信頼できる資料をもとに調合強度を求める方法」により決定することとする。

基礎コンクリートから3階コンクリートまでは寒中コンクリート施工指針・同解説の「構造体コンクリートの強度管理の材齢を延長して調合強度を定める方法」によることとする。

ベースコンクリートの検討

(1)無加熱養生による初期養生の検討

ベースの厚さは200mmであり、かつ地盤に接することから外気と接する表面を被覆養生し、無加熱で初期養生を行う可能性を断熱型枠を用いる場合と同様に検討をする。

- ・打込み時の外気温は安全のため旬最低気温の-3℃で検討する。
- ・単位セメント量は340 kg/m³、打込み時のコンクリート温度は15℃と仮定する。
- ・被覆養生に用いる材料はシート、発泡ウレタンシート(10mm)の両方で検討する。
- ・セメントは普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントの両方で検討する。

時間定数の算定

コンクリート表面をシート(K=7.0)で養生する場合

$$\text{時間定数 } \tau = 698 \times 0.2 / (7.0 + 2.9) = 14.1$$

コンクリート表面を発泡ウレタンシート(K=5.0)で養生する場合

$$\text{時間定数 } \tau = 698 \times 0.2 / (5.0 + 2.9) = 17.7$$

部材表面が0℃に冷えるまでに得られる積算温度 M_0 の算定

$$M_0 = A \times \tau + B$$

普通ポルトランドセメント使用

$$\begin{aligned} A &= 0.0056X_1 + 0.052X_2 + 0.205X_3 + 1.42 \\ &= 0.0056 \times 340 + 0.052 \times 15 + 0.205 \times -3 + 1.42 = 3.49 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= 0.0180X_1 + 0.641X_2 + 1.495X_3 - 20.45 \\ &= 0.0180 \times 340 + 0.641 \times 15 + 1.495 \times -3 - 20.45 = -21.44 \end{aligned}$$

早強セメント使用

$$\begin{aligned} A &= 0.0062X_1 + 0.034X_2 + 0.216X_3 + 1.74 \\ &= 0.0062 \times 340 + 0.034 \times 15 + 0.216 \times -3 + 1.74 = 3.71 \end{aligned}$$

$$B = -0.0140X_1 + 0.272X_2 + 0.151X_3 - 15.42$$

$$=-0.0140 \times 340 + 0.272 \times 15 + 0.151 \times -3 - 15.42 = -16.55$$

X_1 : 単位セメント量 (280 ~ 370 kg/m³)

X_2 : コンクリート打ち込み温度 (3 ~ 22 °C)

X_3 : 平均気温 (0 ~ -10 °C)

普通ポルトランドセメント使用

シート養生 $M = 3.49 \times 14.1 - 21.44 = 27.8$ ° DD

発泡ウレタンシート養生 $M_0 = 3.49 \times 17.7 - 21.44 = 40.3$ ° DD

早強ポルトランドセメント使用

シート養生 $M = 3.71 \times 14.1 - 16.55 = 35.8$ ° DD

発泡ウレタンシート養生 $M_0 = 3.71 \times 17.7 - 16.55 = 49.1$ ° DD

コンクリート打ち込み後24時間の平均温度

長島の図 (図3.8) から時間定数に対応する値を読みとり補正を加えて積算温度を計算する。

シート養生の材齢1日では

得られる積算温度 $M = 20 + 0.6 \times -3 + 0.01 \times 40 + 0.6 \times 5 = 21.6$ ° DD

平均温度 $\theta = 21.6 - 10 = 11.6$ °C

以下同様に計算する。図から読みとった数値と計算結果を表3.4に示した。

表3.4 打ち込み後24時間の平均コンクリート温度

	普通ポルトランドセメント		早強ポルトランドセメント	
	シート	断熱シート	シート	断熱シート
積算温度	20.0	21.0	20.0	21.0
外気温の補正係数	0.8	0.7	0.6	0.6
単位セメント量の補正係数	0.0	0.0	0.0	0.0
打ち込み温度の補正係数	0.7	0.8	0.6	0.7
予測した積算温度	21.1	22.9	21.6	23.5
予測した平均温度	11.1	12.9	11.6	13.5

初期凍害防止の検討

圧縮強度増進の標準曲線を利用して部材表面が0°Cに冷えるまでに得られる圧縮強度を予測し、初期凍害防止に必要なとされる強度に達しているか検討する。

普通ポルトランドセメント使用、シート養生の場合

0°Cに冷えるまでに得られる積算温度 $M = 27.8$ ° DD

打ち込み後24時間の平均コンクリート温度 $T_{24} = 11.1$ °C

標準水中養生を行った材齢28日における圧縮強度 $_{20}F_{28}$: 安全を考慮して呼び強度の強度値を用いる。

呼び強度は27、30、33とする。

標準水中養生を行った材齢28日における積算温度 $_{20}M_{28}$: 840 ° DD

呼び強度の強度値27 N/mm²の場合

標準養生を行ったコンクリートの最終強度 $_{20}F_{\infty}$

$$_{20}F_{\infty} = 27 \times (1 + \exp(-2.4235 \times \log(840) + 5.6271)) = 33.27$$

構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度 F_{∞}

$$F_{\infty} = 33.27 \times (1 - 0.003726 \times (11.1 - 20)) = 34.37$$

構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度 M_c

$$M_c = 27.8 + 1.0394 \times (11.1 - 20) = 18.5$$

推定強度 F

$$F = 34.37 / (1 + \exp(-2.4235 \times \log(18.5) + 5.6271)) = 2.5 \text{ N/mm}^2$$

同様に、呼び強度、セメント種類を変えて計算を行った結果を表 3. 5 に示した。

表 3.5 圧縮強度の試算結果

	普通ポルトランドセメント		早強ポルトランドセメント	
	シート	断熱シート	シート	断熱シート
24時間平均温度	11.1	12.9	11.6	13.5
0°Cに冷えるまでの積算温	27.8	40.3	35.8	49.1
圧縮強度(呼び強度27)	2.5	4.1	7.1	9.8
圧縮強度(呼び強度30)	2.8	4.5	7.9	10.9
圧縮強度(呼び強度33)	3.0	5.0	8.7	11.9

普通ポルトランドセメントを用いた試算結果では、発泡ウレタンシートを用いて養生した場合に軽微な凍結期の初期養生打ち切り強度 3. 5 N/mm² を越える強度が得られる。しかし、凍結作用期に入る直前であり、初期凍害対策として万全であるとはいえない。

早強ポルトランドセメントを用いた場合には、呼び強度を 27 としシート養生を行ったものでもコンクリート表面が 0°C となるまでに凍結作用期の初期養生打ち切り強度 5. 0 N/mm² を超える強度が得られる。

従って、早強ポルトランドセメントを使用した呼び強度 27 のコンクリートを打設し、表面をシートで被覆養生することで初期凍害を防止することが可能となる。

コンクリートの調査

コンクリートの温度履歴を予測し、各材齢で得られる積算温度を算定し、対応する圧縮強度の予測を行う。

- ・コンクリートの水和発熱を利用するため、早強セメントを使用し、単位セメント量は 340 kg/m³、打込み時のコンクリート温度は 15°C と仮定する。
- ・被覆養生に用いる材料はシートとする。
- ・打込み時の外気温は安全のため旬最低気温の -3°C で検討し、継続養生期間は旬平均気温での検討とする。
- ・継続養生期間で 0°C 以下となる場合には等価積算温度を用いる。

各材齢で得られる積算温度

$$\text{時間定数 } \tau = 698 \times 0.2 / (7.0 + 2.9) = 14.1$$

図 3. 8 から時間定数に対応する値を読みとり、外気温、単位セメント量、打ち込み時のコンクリート温度による補正を加え各材齢で得られる積算温度を予測する。

シート養生 ($\tau = 14.1$) の材齢 1 日では

$$\text{得られる積算温度 } M = 20 + 0.6 \times -3 + 0.01 \times 40 + 0.6 \times 5 = 21.6 \text{ } ^\circ \text{ DD}$$

$$\text{平均温度 } \theta = 21.6 - 10 = 11.6 \text{ } ^\circ \text{ C}$$

以下同様に計算する。読みとった数値と計算結果を表 3. 6 に示した

表 3.6 平均温度の計算値

シート(K=7.0)	1日	2日	3日	4日	5日
積算温度	20	38	50	61	71
外気温度	0.6	1.6	2.6	3.7	4.7
単位セメント量	0.01	0.04	0.05	0.05	0.05
コンクリート温度	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
予測した積算温度	21.6	37.8	47.2	54.9	61.9
予測した平均温度	11.6	6.2	-0.6	-2.3	-3

予測したコンクリートの平均温度が0°C以上である材齢2日までの積算温度に、計画養生温度から算定した積算温度を加え、材齢28、42、56日の積算温度を求める。

材齢28日

$$M=37.8+4 \times (0.4+10)+2 \times 4.52+4 \times (5+10)+4 \times 4.52+7 \times 2.92+5 \times (3+10)=252.0^{\circ} \text{ DD}$$

材齢42日 $M=252.0+14 \times (3+10)=434$

材齢56日 $M=252.0+28 \times (3+10)=616$

気温による温度補正の強度値

ここで、圧縮強度増進の標準曲線を用いて、標準養生した場合の強度増進を検討する。積算温度840° DDで品質基準強度を得る場合に、材齢28日(積算温度252° DD)、42日(積算温度434° DD)における圧縮強度の予測値はそれぞれ、21.8、24.6 N/mm²となる。従って、材齢28日を構造体コンクリートの強度管理材齢とした場合には、温度による強度の補正値は6 N/mm²、材齢42日、56日を構造体コンクリートの強度管理材齢とした場合には、温度による強度の補正値は3 N/mm²となる。

温度による強度の補正値を3 N/mm²とした場合、呼び強度は30となる。呼び強度30のコンク

表 3.7 標準曲線式による計算結果

積算温度(° DD)	30	90	210	252	434	840
圧縮強度(N/mm ²)	7.5	14.8	20.7	21.8	24.6	27.0

リートを使用した場合の強度増進曲線を前述の温度履歴から算定する。算定結果を表3.8、図3.17に示す。材齢28日(252° DD)では25.2 N/mm²の圧縮強度が得られ、設計基準強度、及び24 N/mm²を満足する。また、構造体コンクリートの管理材齢を42日とした場合には28.6 N/mm²が得られることが予測される。ここでは、圧縮強度増進曲線の利用に当たって、840° DDで得られる強度値に呼び強度の強度値を用いているため、安全側の検討が行われたことになる。

以上の結果、ベースコンクリートに用いるコンクリートの呼び強度は30、材齢2日までシート養生をする計画とする。

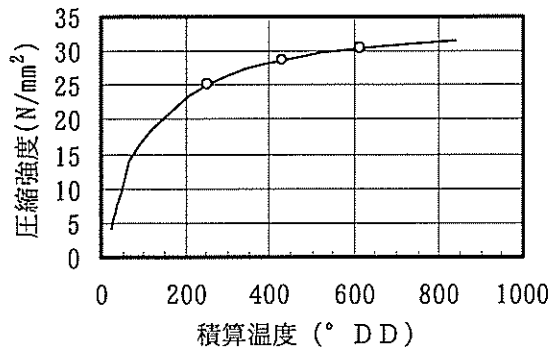


表 3.8 標準曲線式による計算結果

積算温度(° DD)	252	434	616	840
圧縮強度(N/mm ²)	25.2	28.6	30.3	31.4

図 3.17 コンクリートの圧縮強度増進曲線(呼び強度30)

検討例2) 冬期間施工を中断する場合

検討例1と同じ事務所ビルで、基礎コンクリート打設、外周型枠解体、埋め戻し終了後、コンクリート表面をシートで養生し年末から3月中旬まで工事を中断する。

検討例1と同様、ベースコンクリートはシート養生のみの無加熱養生、基礎コンクリートは簡易養生上屋による初期養生を行うこととする。1階床スラブの支保工は工事再開後取り外す計画とし、材齢28日で設計基準強度を満たす必要はない。管理材齢を91日とし、得られる圧縮強度の検討を行う。特に、ベースコンクリートは無加熱養生とするため、管理材齢で品質基準強度が得られない場合には、計画を見直す必要がある。

ベースコンクリートの検討

・材齢91日までに得られる積算温度

検討例1で2日までに積算温度37.8° DDが得られている。その後、12月11日までコンクリート温度は旬平均気温と等しく、12月12日から4日間は基礎コンクリートの初期養生に伴い5°C、初期養生終了後は再び外気温と等しいものとして算定する。旬平均気温が0°C以下の場合には、等価積算温度(表3.2)を用いて算定した。

$$M=37.8+4 \times (0.4+10)+2 \times 4.54+4 \times (5+10)+4 \times 4.52+11 \times 2.92+10 \times 2.14+10 \times 1.90 \\ +11 \times 1.60+10 \times 1.94+10 \times 1.90+8 \times 2.59+5 \times 4.17=336.65 \text{ } ^\circ \text{ DD}$$

・圧縮強度増進の標準曲線を用いた強度の予測

管理材齢91日までに得られる積算温度 $M=336.65 \text{ } ^\circ \text{ DD}$

打込み後24時間の平均コンクリート温度 $T_{24}=11.6^\circ\text{C}$

標準水中養生を行った材齢28日における圧縮強度 $_{20}F_{28}$:安全を考慮して呼び強度の強度値を用いる。呼び強度は30とする。

標準水中養生を行った材齢28日における積算温度 $_{20}M_{28}$:840° DD

呼び強度の強度値30 N/mm²の場合

標準養生を行ったコンクリートの最終強度 $_{20}F_{\infty}$

$$_{20}F_{\infty}=30 \times (1+\exp(-2.2335 \times \log(840)+4.40625))=33.58$$

構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度 F_{∞}

$$F_{\infty}=33.58 \times (1-0.00583 \times (11.6-20))=35.22$$

構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度 M_c

$$M_c=336.65+1.2439 \times (11.6-20)=326.20$$

推定強度 F

$$F=35.22/(1+\exp(-2.2335 \times \log(326.20)+4.40625))=27.1\text{N/mm}^2$$

以上の結果、標準水中養生した材齢28日のコンクリート強度に呼び強度の値を用いた安全側の検討でも、管理材齢91日で品質基準強度が得られると予測される。

基礎コンクリートの検討

材齢91日までに得られる積算温度を旬平均気温から算定し、平均気温を求める。

$$M=3 \times (5+10)+4 \times (-1.6+10)+11 \times (-2.8+10)+10 \times (-3.9+10)+10 \times (-4.4+10)+11 \times (-5.2+10)+10 \times (-4.3+10)+10 \times (-4.4+10)+8 \times (-3.2+10)+10 \times (-1.8+10)+4 \times (-0.2+10)=616.2 \text{ } ^\circ \text{ DD}$$

材齢91日までに得られる平均気温

$$\theta = 616.2/91 - 10 = -3.22^{\circ}\text{C}$$

材齢 9 1 日までに得られる平均温度は -3.2°C となり、検討例 1 のベースコンクリートと同様信頼できる資料に基づく調査計画となる。

養生条件でもっとも不利となるスラブコンクリートについて検討する。

スラブ厚さは 150mm とする。1 階床のためスラブ下には 50mm の断熱材 ($K=1.0$) が打ち込まれ、スラブ表面は上屋内にさらされる ($K=17.4$) のものとする。養生上屋内の気温は 5°C 、打ち込み時のコンクリート温度は 15°C とする。また、単位セメント量は 340 kg/m^3 と仮定する。使用するセメントは普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントの両方で検討する。

温度履歴の予測

長島の図 (図 3. 8) を用いてスラブコンクリートの水和発熱を考慮した温度履歴を予測する。

$$\text{時間定数 } \tau = 698 \times 0.15 / (17.4 + 1.0) = 5.69 \text{ hr.}$$

図から時間定数に対応した数値を読みとり、各材齢で得られる積算温度を計算する。普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを用いたそれぞれの場合について読みとった数値と予測した積算温度、コンクリートの平均温度を表に示した。

表 3.7 温度履歴の予測 (普通ポルトランドセメント使用)

普通ポルトランドセメント	1日	2日	3日	4日
積算温度	16	26	36	46
外気温度	0.9	1.9	2.9	3.9
単位セメント量	0	0	0	0
コンクリート温度	0.2	0.2	0.2	0.2
予測した積算温度	21.35	37.25	53.15	69.05
予測した平均温度	11.35	5.9	5.9	5.9

表 3.8 温度履歴の予測 (早強ポルトランドセメント使用)

早強ポルトランドセメント	1日	2日	3日	4日
積算温度	16	30	40	50
外気温度	0.8	1.9	2.9	3.9
単位セメント量	0.01	0.01	0.01	0.01
コンクリート温度	0.2	0.2	0.2	0.2
予測した積算温度	20.8401	41.4401	57.4401	73.4401
予測した平均温度	10.8401	10.6	6	6

管理材齢を 9 1 日として、得られる積算温度を計算する。 0°C 以下の温度範囲については表 3.2 の等価積算温度を用いて計算する。普通ポルトランドセメントについては 2 日目から、早強ポルトランドセメントについては 3 日目からの平均コンクリート温度は計画養生温度の 5°C になるものとした。

普通ポルトランドセメントを使用した場合

$$M = 51.35 + 4 \times 4.52 + 11 \times 2.92 + 10 \times 2.14 + 10 \times 1.90 + 11 \times 1.60 + 10 \times 1.94 + 10 \times 1.90 + 8 \times 2.59 + 10 \times 4.17 + 4 \times 8.91 = 296.01$$

早強ポルトランドセメントを使用した場合

$$M = 56.44 + 4 \times 4.52 + 11 \times 2.92 + 10 \times 2.14 + 10 \times 1.90 + 11 \times 1.60 + 10 \times 1.94 + 10 \times 1.90 + 8 \times 2.59 + 10 \times 4.17 + 4 \times 8.91 = 302.45$$

積算温度 840°DD で品質基準強度である 27 N/mm^2 を得る強度増進の標準曲線を用いて、普通ポルトランドセメントを使用した場合の 296.01°DD 、早強ポルトランドセメントを使用した場合の 302.45°DD における圧縮強度を求める。得られた標準曲線式と、各積算温度における圧縮強度

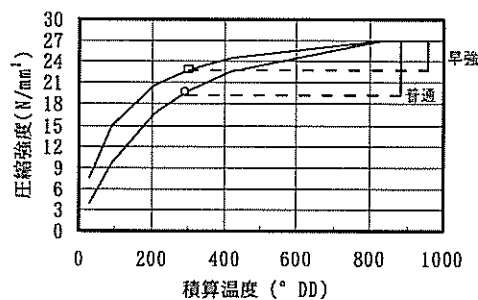


図 3.18 圧縮強度増進の標準曲線

を図 3.18 に示した。普通ポルトランドセメントを使用した場合には 19.6N/mm^2 、早強ポルトランドセメントを使用した場合には 22.9N/mm^2 が得られる。これより、温度による補正強度は普通ポルトランドセメントで 9、早強ポルトランドセメントで 6N/mm^2 となる。

従って、普通ポルトランドセメントを使用する場合の調合は呼び強度 36、早強ポルトランドセメントを使用する場合には 33 となる。検討例の計算は安全側となるよう呼び強度の強度値を用いて計算している。実際に行った試し練りの結果やレディミクストコンクリート工場工場の実績から、調合強度を用いて検討した場合には、温度による強度補正を低減することは可能となるが、管理材齢までの気温が平年より低めとなった場合には対応が困難となるので注意が必要である。

検討例3 基礎断熱を兼ねて断熱型枠を用いた住宅基礎の寒中施工

住宅基礎では、床下の結露防止による耐久性向上、地盤の熱容量を有効に利用する事による室内環境の安定、省エネルギー化等のメリットを持つ基礎断熱が増加しつつある。これは、住宅基礎の外側、あるいは両側で断熱を行うもので、断熱材が両側に配置されている場合には断熱型枠として利用することにより、無加熱で寒中コンクリート工事を行うことが可能となる。

図3. に示す一般的な木造住宅の基礎で検討を行う。

- ・建設地は札幌市、12月に基礎コンクリートの打設、埋め戻しを行い、3月中旬から上部躯体工事を再開する。
- ・ベース厚さは120mm、ベース幅450mm、凍結深度60cmに対応して基礎せいは930mm、基礎幅は120mmとする。
- ・両側に厚さ50mmの断熱型枠を用いた施工とする。
- ・基礎コンクリートの設計基準強度は18N/mm²である。計画供用期間の級は一般とし、耐久設計基準強度は18N/mm²である。
- ・構造体コンクリートの管理材齢は91日とする。
- ・早強セメントを使用し、単位セメント量は300kg/m³、打ち込み時のコンクリート温度は15℃と仮定する。

時間定数の計算（長さ1mあたりの計算とする）

ベースコンクリート

両側とコンクリート表面に断熱型枠を使用する

$$\tau = 698 \times (0.45 \times 0.12 \times 1.0) / (0.45 \times 2.0 + 0.45 \times 2.9 + 2 \times 0.12 \times 2.0) = 14.0$$

基礎コンクリート

両側断熱型枠、コンクリート表面は断熱シート養生

$$\tau = 698 \times (0.12 \times 0.93 \times 1.0) / (0.12 \times 5.0 + 0.12 \times 2.9 + 2 \times 0.93 \times 2.0) = 16.7$$

調査の検討

構造体コンクリートの強度管理の材齢である91日までに得られるコンクリートの積算温度を算定する。

打設直後のコンクリート中心温度は図3.8を用いて算定した。図から時間定数に対応する各数値を読みとり材齢4日までのコンクリート温度変化を予測する。ベースコン

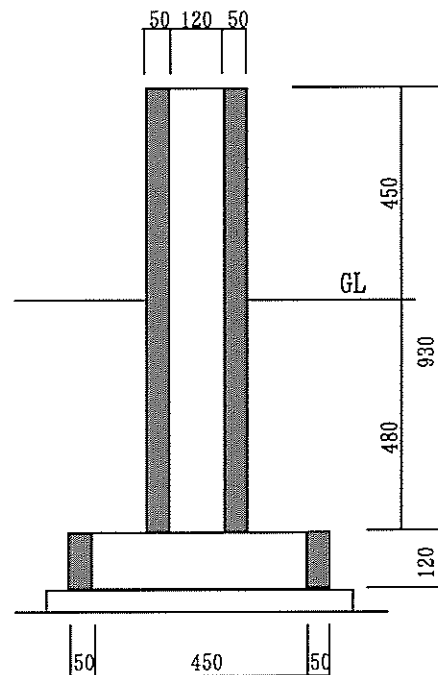


図3.19 断面図

	12月			1月			2月			3月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
ベースコンクリート	12/5											
基礎コンクリート		12/15										
埋め戻し			12/20									
旬平均気温 (°C)	0.4	-1.6	-2.8	-3.9	-4.4	-5.2	-4.3	-4.4	-3.2	-1.8	-0.2	1.5
旬最低気温 (°C)	-3.0	-5.0	-6.4	-7.7	-8.4	-9.1	-8.2	-8.5	-7.3	-5.8	-4.0	-2.1

図3.20 コンクリート打設からの養生工程

クリート、基礎コンクリートそれぞれについて、読みとった数値と得られる積算温度、各材齢におけるコンクリート温度の平均値を表に示した。

スラブコンクリート($\tau=14.0$)	1日	2日	3日	4日
積算温度	20	37	49	60
外気温度補正	0.7	1.6	2.6	3.7
単位セメント量補正	0.01	0.04	0.05	0.05
コンクリート温度補正	0.6	0.7	0.7	0.7
予測した積算温度	20.9	35.7	44.7	52.4
予測した平均温度	10.9	4.8	-1.0	-2.3

基礎コンクリート($\tau=16.7$)	1日	2日	3日	4日
積算温度	21	40	52	65
外気温度補正	0.6	1.5	2.5	3.6
単位セメント量補正	0.02	0.05	0.07	0.07
コンクリート温度補正	0.7	0.8	0.8	0.8
予測した積算温度	21.5	36.5	43.5	51.0
予測した平均温度	11.5	5.0	-3.0	-2.5

ベースコンクリートの調合

埋め戻し後、ベースコンクリートの地中での養生温度は0℃と低めに仮定し、積算温度を算定した。

$$M=35.7+(0.4+10) \times 3+4.52 \times 10+10 \times 76=872.1^{\circ} \text{ DD}$$

材齢91日で積算温度が840℃DDを越えるため、温度によるコンクリート強度の補正値は0とする。したがって、ベースコンクリートの呼び強度の強度値は品質基準強度に等しく21N/mm²とする。

基礎コンクリートの調合

コンクリート打設後埋め戻しを行うが、地上部分のコンクリート温度は打設後3日目から旬平均気温と等しいものと仮定して積算温度を算定する。0℃以下の温度範囲は等価積算温度を用いた。

$$M=36.5+4.52 \times 3+2.92 \times 11+2.14 \times 10+1.9 \times 10+1.6 \times 11+1.94 \times 10+1.9 \times 10+2.59 \times 8+4.17 \times 10+8.91 \times 6=294.46^{\circ} \text{ DD}$$

強度増進の標準曲線式を用いて温度によるコンクリート強度の補正値を求める。この場合、コンクリート打設後24時間のコンクリート温度による補正は行わない。

$$\text{コンクリートの積算温度 } M=294.46$$

$$\text{標準水中養生を行った材齢28日における積算温度 } {}_{20}M_{28}=840$$

$$\text{標準水中養生を行った材齢28日における圧縮強度 } {}_{20}F_{28}=21$$

構造体コンクリートの推定最終強度 F_{∞}

$$F_{\infty}=21 \times (1+\exp(-2.2335 \log(840)+4.40625))=23.5$$

294.46℃DDでの圧縮強度の推定値 F

$$F=23.5 / (1+\exp(-2.2335 \log(294.46)+4.40625))=17.7$$

品質基準強度との差は3.3N/mm²であるが、ここでは安全を見込んだ呼び強度の強度値を用いて検討を行っていることもあり、温度によるコンクリート強度の補正値を3N/mm²として、温度補正を加えた圧縮強度の推定値を試算する。

表3.11 計画養生温度

	12月			1月			2月			3月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
計画養生温度(℃)												
ベースコンクリート	0.4	-1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
基礎コンクリート	0.4	-1.6	-2.8	-3.9	-4.4	-5.2	-4.3	-4.4	-3.2	-1.8	-0.2	
旬平均気温(℃)	0.4	-1.6	-2.8	-3.9	-4.4	-5.2	-4.3	-4.4	-3.2	-1.8	-0.2	1.5
旬最低気温(℃)	-3.0	-5.0	-6.4	-7.7	-8.4	-9.1	-8.2	-8.5	-7.3	-5.8	-4.0	-2.1

温度補正を行った積算温度 M_c

$$M_c = 294.46 + 1.2439(11.5 - 20) = 283.9^\circ \text{ DD}$$

標準養生を行ったコンクリートの最終強度 F_∞

$$F_\infty = 24 \times (1 + \exp(-2.2335 \log(840) + 4.40625)) = 26.9$$

構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度

$$F_\infty = 26.9(1 - 0.00583(11.5 - 20)) = 28.2$$

294.46° DDでの圧縮強度の推定値 F

$$F = 28.2 / (1 + \exp(-2.2335 \log(283.9) + 4.40625)) = 21.0$$

構造体コンクリートの強度管理の材齢である91日で、品質基準強度が得られる。したがって、基礎コンクリートの呼び強度の強度値は24 N/mm²とする。

初期凍害の検討

コンクリート打設後、部材表面が0°Cとなるまでに得られる積算温度と、その時点の圧縮強度を算定し、初期凍害防止に必要とされる5 N/mm²に達しているかどうかを検討する。

単位セメント量300 kg/m³、コンクリートの打ち込み温度15°C、平均気温は旬最低気温を用い、ベースコンクリートでは-3°C、基礎コンクリートでは-5°Cとする。

コンクリート打設後部材表面が0°Cとなるまでに得られる積算温度

$$M_0 = A\tau + B$$

ここに M_0 : 打ち込み後のコンクリートが冷えて表面が0°Cになるまでの積算温度

A、B : 係数および定数

早強ポルトランドセメント

$$A = 0.0062X_1 + 0.034X_2 + 0.216X_3 + 1.74$$

$$B = -0.0140X_1 + 0.272X_2 + 0.151X_3 - 15.42$$

ここに X_1 : 単位セメント量 (280 ~ 370 kg/m³)

X_2 : コンクリートの打ち込み温度 (3 ~ 22°C)

X_3 : 平均気温 (0 ~ -10°C)

ベースコンクリート ($\tau = 14.0$ 、外気温 - 3°C)

$$A = 0.0062 \times 300 + 0.034 \times 15 + 0.216 \times (-3) + 1.74 = 3.46$$

$$B = -0.014 \times 300 + 0.272 \times 15 + 0.151 \times (-3) - 15.42 = -15.99$$

$$M_0 = 3.46\tau - 15.99 = 3.46 \times 14.0 - 15.99 = 32.45^\circ \text{ DD}$$

基礎コンクリート ($\tau = 16.7$ 、外気温 - 5°C)

$$A = 0.0062 \times 300 + 0.034 \times 15 + 0.216 \times (-5) + 1.74 = 3.03$$

$$B = -0.014 \times 300 + 0.272 \times 15 + 0.151 \times (-5) - 15.42 = -16.30$$

$$M_0 = 3.03\tau - 16.30 = 3.03 \times 16.7 - 16.30 = 34.30^\circ \text{ DD}$$

打設後のコンクリート部材表面が0°Cに冷えるまでに得られる圧縮強度

圧縮強度増進の標準曲線を用いる。

ベースコンクリート

コンクリートの積算温度 $M = 32.45^\circ \text{ DD}$

コンクリート打設後24時間のコンクリート温度の平均値 $T_{24} = 10.9^\circ \text{C}$

構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度 Mc

$$Mc = 32.45 + 1.2439(10.9 - 20) = 21.1(^{\circ} D \cdot D)$$

標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度 ${}_{20}F_{28} = 21(N/mm^2)$

標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度 ${}_{20}M_{28} = 840(^{\circ} D \cdot D)$

標準養生を行ったコンクリートの最終強度 ${}_{20}F_{\infty}$

$${}_{20}F_{\infty} = 21(1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(840) + 4.40625)) = 23.5(N/mm^2)$$

構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度 F_{∞}

$$F_{\infty} = 23.5(1 - 0.00583(10.9 - 20)) = 24.7(N/mm^2)$$

0°Cに冷えるまでに得られる圧縮強度 F

$$F = 24.7 / (1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(21.1) + 4.40625)) = 4.7(N/mm^2)$$

コンクリート表面が 0°C となるまでに得られる圧縮強度は 4.7N/mm²であり、初期凍害防止に必要な 5 N/mm²にわずかに不足する。

この場合、コンクリートの呼び強度を 24 とし、再度確認の計算を行う。

標準養生を行ったコンクリートの最終強度 ${}_{20}F_{\infty}$

$${}_{20}F_{\infty} = 24(1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(840) + 4.40625)) = 26.9(N/mm^2)$$

構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度 F_{∞}

$$F_{\infty} = 26.9(1 - 0.00583(10.9 - 20)) = 28.3(N/mm^2)$$

0°Cに冷えるまでに得られる圧縮強度 F

$$F = 28.3 / (1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(21.1) + 4.40625)) = 5.4(N/mm^2)$$

呼び強度を 24 とすることで初期凍害を防止することができる。

一方、ベースコンクリートの表面はすべて断熱型枠で覆われているため、部材の寸法を大きくすることでセメントの水和熱を有効に利用できる。設計ベース厚さは 120mm であるが、これを 150mm と 30mm 増し打ちして同様の計算を行うと、時間定数が 16.8 となり、温度による強度補正値を 0 とし、呼び強度 21 のコンクリートを用いた場合でも、0°C に冷えるまでに得られる圧縮強度は 6.6N/mm² となり、初期凍害を防止することができる。打設するコンクリートの数量、単価からの経済的な選択も検討可能となる。

基礎コンクリート

コンクリートの積算温度 $M = 34.3^{\circ} D \cdot D$

コンクリート打設後 24 時間のコンクリート温度の平均値 $T_{24} = 11.5^{\circ}C$

構造体コンクリートの温度補正を行った積算温度 Mc

$$Mc = 34.3 + 1.2439(11.5 - 20) = 23.7(^{\circ} D \cdot D)$$

標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度 ${}_{20}F_{28} = 24(N/mm^2)$

標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度 ${}_{20}M_{28} = 840(^{\circ} D \cdot D)$

標準養生を行ったコンクリートの最終強度 ${}_{20}F_{\infty}$

$${}_{20}F_{\infty} = 24(1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(840) + 4.40625)) = 26.9(N/mm^2)$$

構造体コンクリートの温度補正を行った推定最終強度 F_{∞}

$$F_{\infty} = 26.9(1 - 0.00583(11.5 - 20)) = 28.2(N/mm^2)$$

0°Cに冷えるまでに得られる圧縮強度 F

$$F = 28.2 / (1 + \exp(-2.2335 \log_{10}(23.7) + 4.40625)) = 5.9(N/mm^2)$$

基礎コンクリートでは、コンクリート表面が 0°C となるまでに得られる圧縮強度は 5.9N/mm² と初期凍害防止に必要な 5 N/mm² を上回り、初期凍害に対しては安全である。

参考文献

- 1) 日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」、1998.2
- 2) 須藤由美子、桂修、吉野利幸：氷点下におけるコンクリート強度増進に関する研究、北海道立寒地住宅都市研究所調査研究報告、No.101-0R、2000.3
- 3) 例えば：マスコンクリートの温度・応力計算用パソコン・プログラム、(社)日本コンクリート工学協会
- 4) 長島弘：コンクリート打ち込み後の温度変化に関する研究、日本建築学会論文報告集、第269号、pp31-38、1978.7
- 5) 日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」、旧版1989.1
- 6) ASTM C873-85; “Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds”

寒冷期におけるコンクリート工事の新技术ガイド

発行 財団法人 北海道建築指導センター

編集 北海道立寒地住宅都市研究所

執筆

北海道立寒地住宅都市研究所

生産技術部 主任研究員 博士（工学） 吉野 利幸

同上 材料開発科長 博士（工学） 桂 修

北海道大学大学院工学研究科

材料性能学分野 教授 工学博士 鎌田 英治（故人）

同上 助手 博士（工学） 浜 幸雄