

構造体コンクリートの氷点下の強度増進

正会員 ○谷口 円^{*1}
同 桂 修^{*2}
同 濱 幸雄^{*3}

1.材料施工-2.モルタル・コンクリートの物性
強度増進、氷点下、積算温度、寒中コンクリート

1. はじめに

コンクリートの強度増進は温度と時間に依存するが、適切な温度時間関数で表すことで、温度履歴の異なる強度増進予測が可能となる。我が国では積算温度方式¹⁾がよく用いられる。一方、凍結により強度発現が停滞することが知られている。筆者ら²⁾は水の化学ポテンシャル低下と反応速度に着目した強度増進実験での検討を行った。その結果、氷点下での強度増進遅れを記述し0°C以上の積算温度と圧縮強度の関係と同様に表すことができる積算温度式を提案することができた。提案した氷点下の積算温度式は、寒冷期の温度変化を伴う屋外で養生された封緘試験体の強度増進実験でその有用性が確認されている。

本研究では、提案した氷点下の積算温度式の有用性についてスラブを模した模擬構造体での寒中施工実験により確認・検討を行うものである。

2. 実験概要

(1) 実験計画

表1に実験計画表を示す。模擬構造体は旭川市の屋外で作製した。コンクリート打設日は2008年11月25日とした。試験材齢は水中養生は7,28,91日、その他を7,28,56,91日とした。養生上屋内で養生する試験体は、模擬構造体(コア)、模擬構造体にφ10×20cmの強化プラスチック型枠ごと埋め込んだ埋込試験体(以下埋込)およびφ10×20cmの簡易鋼製型枠に打設し、上面をポリエ

チレンフィルムで封緘した封緘試験体の3種類とした。写真1に埋込試験体とコア試験体の採取状況を示す。簡易断熱養生試験体はJASS5T-705-2005に準じた簡易断熱養生箱を屋外に置き、ブルーシートで覆った中での養生とした。標準条件は20°C水中養生試験体を作製した。コンクリート温度は、養生条件ごとに試験体中心部にTC熱電対を埋め込み測定間隔15分で測定記録した。また、外気温および養生上屋内雰囲気温度も同時に測定した。

所定の養生終了後、型枠を脱型し、または模擬構造体から切り取ったコアにより、JIS A 1108に準じて圧縮強度を測定した。屋外で養生した試験体は、内部の氷を融解するため約30分間20°Cの水中に浸漬した後測定した。

(2) 使用材料および調合

使用したコンクリートは呼び強度33N/mm²のレディーミクストコンクリート(33-18-25-N)とした。セメントは普通ポルトランドセメントで、細骨材は比布産陸砂(表乾密度2.59g/cm³)、粗骨材は比布産陸砂利(表乾密度2.61g/cm³)であった。

表1 実験計画

養生条件	試験体条件	養生温度	測定材齢
養生上屋内	模擬構造体	材齢7日まで10°C 以降屋外成り行き	7, 28, 56, 91
	コア埋込		
簡易断熱	封緘	屋外成り行き	7, 28, 91
	水中		

表2 コンクリート調合表およびフレッシュ性状

水セメント比 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)			質量 (kg/m ³)			混和剤の使用量 (G×%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
				セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材				
43.2	25	41.7	172	126	274	383	398	710	1000	0.80	17.0	3.6	9.5

Strength Development of Concrete in Structure under Sub-zero Temperature

TANIGUCHI Madoka et al.

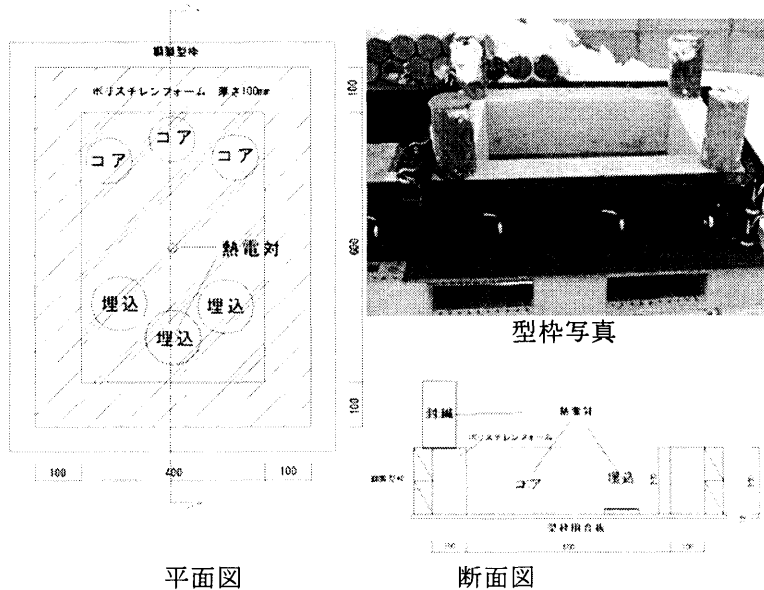


図1 模擬構造体の概要



写真1 試験体状況

調査と荷卸し時のフレッシュ性状を表2に示す。スランプ、空気量は到着後直ちに測定した。

(3) 製造、打ち込みおよび養生

コンクリートは旭川市内の工場で練り混ぜ、トラックアジテータで運搬し、時間はおおよそ30分であった。到着したコンクリートはフレッシュ性状の測定を行い、φ10×20cmの試験体を採取した。その後、図1に示す模擬構造体の型枠に打ち込んだ。模擬構造体は4体用意され、材齢ごとに1体ずつ室内に運搬し、コア抜き等を行った。寒中コンクリート工事のため、模擬構造体4体を覆う上屋をかけた。写真2に模擬構造体養生状況を示す。上屋内の温度設定は材齢7日まで10℃を目標に採暖を行い、以降は外気の成り行きとした。

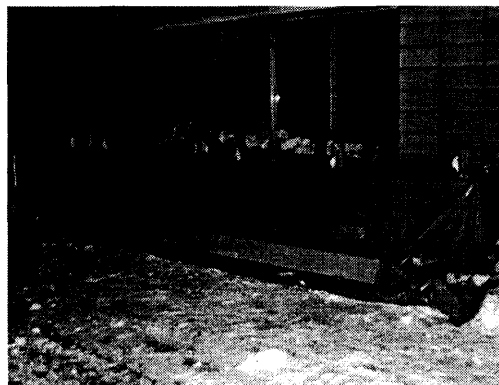


写真2 模擬構造体養生状況

3. 結果及び考察

(1) 結果と氷点下の積算温度式の適合性

図2に試験体および外気、養生上屋内雰囲気温度の履歴を示す。図3に得られた温度データのそれぞれの関係を示す。模擬構造体の温度履歴と埋込試験体の温度履歴はほぼ同じとなり、その差は±0.9℃の範囲であった。埋込試験体とすることで、コア抜きを必要とせずに構造体と同じ温度履歴の試験体を得られるものと考えられる。封緘試験体の温度履歴は、内部雰囲気温度と大差なく、その温度の差は±2.8℃であった。封緘試験体と模擬構造体温度で比較すると、その差は大きくなり±4.4℃となった。また、外気温と上屋内雰囲気温度では、採暖養生中止以降の外気温が氷点下となる範囲では、雰囲気温度の方が高かった。

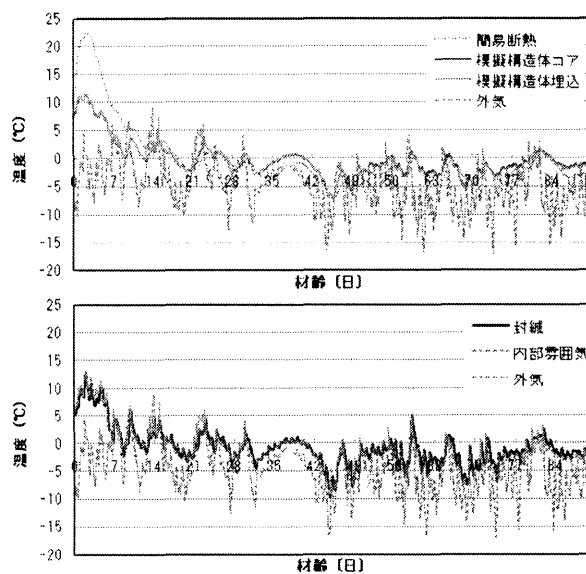


図2 温度測定結果

図4に圧縮強度の測定結果を示す。材齢7日では、簡易断熱が最も高かった。その後28日では模擬構造体コアと簡易断熱が同程度となり、56日以降では封緘、模擬構造体コア、簡易断熱の強度は同程度となった。封緘試験体の圧縮強度はすべての材齢で模擬構造体コアの圧縮強度より小さくなった。寒中においては封緘試験体は雰囲気温度に対応した温度履歴を示す。これは構造体との熱容量の差によるもので、内部の水分条件よりも温度履歴の影響が卓越し構造体以上の強度が得られることがないと考えられる。また、模擬構造体コアと埋込では履歴温度がほとんど同じであるにもかかわらず、圧縮強度に差が認められた。この原因については、明らかではなく、今後検討を行う予定である。

図5に筆者らの提案した氷点下の積算温度と圧縮強度の関係を示す。氷点下の積算温度式は以下に示すとおりである²⁾。

$$M = \sum_0^t (\theta + 10) \Delta t \quad \theta \geq 0$$

$$M = \sum_0^t 10 \exp(-0.6(-\theta)^{0.74}) \Delta t \quad \theta < 0 \quad (1)$$

ここに、M:積算温度、 θ : Δt 時間中の温度(°C)、 Δt :時間(日)

なお、図中の点線は強度増進の標準曲線であり、本会「寒中コンクリート施工指針・同解説(以下寒中施工指針と略す)」¹⁾資料6の標準曲線を用い、水中28日強度を使って表した。埋込試験体の結果をのぞけば、(1)式で得られた積算温度は標準曲線として得られている積算温度と圧縮強度の関係とほぼ一致していた。これより、(1)式により氷点下の強度増進を表せることが確認された。

(2) 寒中施工指針での管理手法に関する検討

現行の寒中施工指針¹⁾の中では氷点下のコンクリートの強度増進における温度時間関数に関して明確な取り扱いが記載されていない。凍結状態にあるコンクリートの強度増進が積算温度から想定されるものよりかなり遅れることに配慮する必要があるとされるが、計画例の中では従来の積算温度式により計画が行われている(式(1)の $\theta \geq 0$ の式)。向寒期にコンクリートを打設し初期養生の後工事休止し、再開時までに必要な強度(支保工解体に必要な設計基準強度など)を確保する場合等は危険側の算定が行われることになる。図6に従来式および(1)式で算出した各温度で一日養生した場合に得られる積算温度を示す。0°C以下では

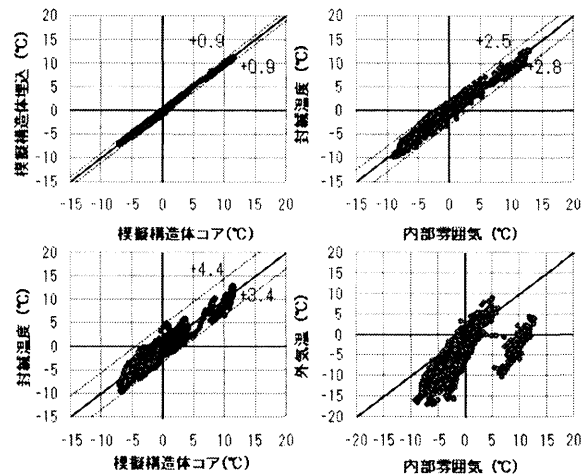


図3 温度測定部位による関係

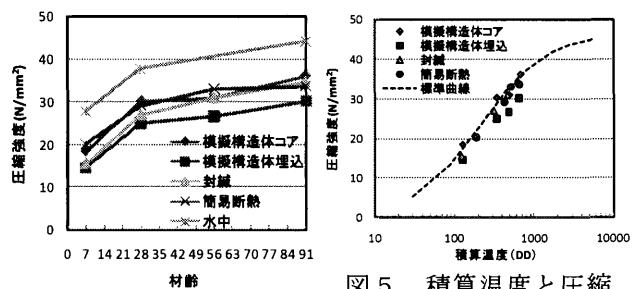


図4 圧縮強度試験結果

図5 積算温度と圧縮強度

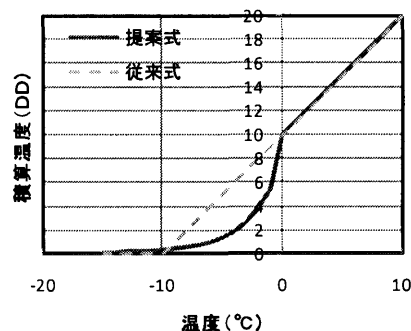


図6 積算温度式の関係

従来の積算温度式は直線式であり、(1)式と比較して計算値が大きくなるのがわかる。特に、-1~-5°Cの範囲で、従来式と(1)式の差が大きく、履歴温度がこの範囲の場合には総計となる積算温度が大きく異なることが予想される。ここでは本研究での模擬構造体での実験結果を用いて、強度増進の標準曲線による管理において従来の積算温度式を利用した場合と(1)式を利用する場合について比較検討を行う。

図7に1時間ごとの模擬構造体温度履歴から算出した(1)式と従来式による積算温度と材齢の関係を示す。材齢20日程度迄はどちらの式でもほぼ同じ程度の値となっていた。これは、この材齢までは構造体温度がほぼ0°C以上であったためであ

る。それ以降は従来式と(1)式の積算温度値は徐々に差が大きくなっていった。これは、日変動のある氷点下の環境下に長くさらされるほどその差が大きくなることを意味する。ここで、強度補正值に対応した構造体での設計基準強度確保に必要な積算温度は390DDとなる。従来式による管理では、約30日で390DDに達したと判断される。しかし、実際には約37日で390DDを満たすため、従来式による管理では強度割れとなる可能性がある。

図8に従来式で計算した積算温度と圧縮強度の関係を示す。標準曲線は図5と同様の曲線である。材齢の経過に伴い積算温度が大きく算定され、標準曲線から乖離することが認められた。

寒中コンクリート工事では、内部雰囲気温度の測定が比較的容易であるため、内部雰囲気温度での温度管理が最も多い。そのため、図9に内部雰囲気温度での(1)式と従来式による積算温度を構造体の積算温度とあわせて示す。ここでも積算温度の従来式と(1)式による差は、構造体温度と同様の傾向となり、材齢の経過とともにその差が大きくなった。また、構造体で得られる積算温度と比較すると、内部雰囲気温度の従来式による積算温度では、構造体の積算温度よりも同材齢で大きく算定されていた。内部雰囲気温度の(1)式による積算温度は、構造体よりも少なく算定されていた。

氷点下を含めた温度変動のある構造体コンクリートでは、従来の積算温度式では実際に得られる値より大きく算定されていることとなる。同時に、内部雰囲気温度による管理でも、従来式では同様の結果となる。強度増進の標準曲線を用い、強度管理を厳密に行う場合には、構造体の温度による管理とし、氷点下範囲では(1)式による算定が望ましい。構造体温度での管理が困難な場合は内部雰囲気温度とし、この場合も氷点下では(1)式による算定が望ましい。ただし、計画時にはコンクリート温度の正確な予測が困難であり、氷点下の積算温度式((1)式)を利用した強度発現予測には技術的有用性はないと考える。

4. まとめ

本研究の結果は以下に要約される。

・氷点下の積算温度式により、寒冷期に施工された模擬構造体の氷点下の強度増進を表すことがで

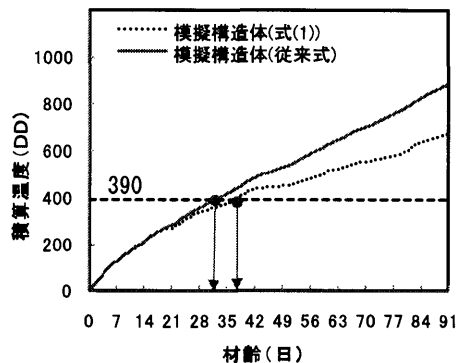


図7 構造体の(1)式と従来式による積算温度

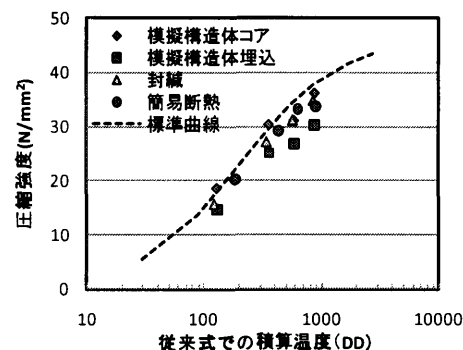


図8 従来式での積算温度と圧縮強度の関係

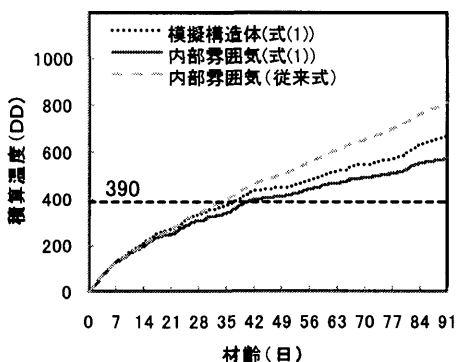


図9 内部雰囲気温度での(1)式と従来式による積算温度

きた

・従来の積算温度式での管理では、積算温度が実際よりも大きく算定されるため、厳密なコンクリートの強度増進予測には、(1)式の適用が望ましい
謝辞 本実験を行うにあたり旭川宇部協同生コン㈱にご協力頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1)寒中コンクリート施工指針・同解説, 日本建築学会, 1998
- 2)谷口円, 桂修, 濱幸雄: 氷点下のコンクリート強度増進と温度時間関数, 日本建築学会構造系論文集, 第640号, 2009.6

*1 北海道立北方建築総合研究所

Hokkaido Northern Regional Building Research Ins.

*2 北海道立北方建築総合研究所 博士(工学)

Hokkaido Northern Regional Building Research Ins., Dr. Eng.

*3 室蘭工業大学工学部 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Muroran Ins. of Technology, Dr. Eng.