

タイトル	定温養生による寒中コンクリートの強度管理方法に関する基礎的研究
著者	桑原，隆司；劉，宏涛
引用	北海学園大学工学部研究報告，33：53-65
発行日	2006-02-20

定温養生による寒中コンクリートの強度管理方法に関する基礎的研究

桑 原 隆 司*・ 劉 宏 涛**

Study on Strength Control Method for Cold Weather Concreting Using Specimens Cured at Constant Temperature

Takashi KUWAHARA* and Koto RYU**

要 旨

寒中コンクリートでは、低温による強度増進の停滞が生じるため、その温度強度特性を適切に把握して、初期凍害の防止や、的確な型枠の取外しなどを行わなければ、欠陥コンクリート構造物や強度不足の構造物ができる。このような問題を防止し、健全なコンクリート構造物を作るための寒中コンクリート施工時の品質管理方法として、旧来から使用されているコンクリート供試体の現場封かん養生や、筆者らが研究・開発を行いアメリカ・コンクリート学会などでも高い評価を得ている温度追随（構造物温度）養生や、簡易断熱養生などに基づく方法がある。

しかし、これらの品質管理方法は、それぞれ優れた点を有しているが、一方精度や、コストなどの問題を保有しており、今後将来に向けて的確かつ低コストで合理的な管理方法が求められている。

そこで、本研究では、これまでのこれらの研究・開発成果や、近年のコンピュータ・テクノロジーの発展などを利用した寒中コンクリートの新管理方法を提案し、検討してゆくこととした。具体的には、寒中コンクリートを管理するための標準養生・現場封かん養生供試体に加えて、構造物強度管理用に構造物予想積算温度と同程度以下で、かつ現場封かん養生供試体温度を上回る定温養生供試体を加えることにより、コンピュータ画面上で積算温度と強度発現の関係を利用して寒中施工構造物コンクリートの強度を適切に管理する方法を提案し、その可能性・妥当性を実験的に検証した。

その結果、提案するシステムの寒中コンクリートへの適用が、十分に可能であることが確認された。なお、実用化のための検討は、今後の課題となる。

* 北海学園大学工学部建築学科

* Department of Architecture and Building Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

** (株)ポピュラーソフト

** Popular Soft Corporation

1. はじめに

寒中コンクリートでは、低温による強度増進の停滞が生じるため、その温度強度特性を適切に把握して、初期凍害の防止や、的確な型枠の取外しなどを行わなければ、欠陥コンクリート構造物や強度不足の構造物ができる¹⁾²⁾。このような問題を防止し、健全なコンクリート構造物を作るための寒中コンクリート施工時の品質管理方法として、旧来から使用されているコンクリート供試体の現場封かん養生や、筆者らが研究・開発を行いアメリカ・コンクリート学会 (American Concrete Institute) などでも高い評価を得ている温度追随 (構造体温度) 養生^{3)~7)}や、簡易断熱養生^{8)~10)}などに基づく方法がある。

しかし、これらの品質管理方法は、それぞれ優れた点も有しているが、一方それぞれ精度や、コストなどの問題も保有しており、今後将来に向けて的確かつ低コストで合理的な管理方法が求められている。

そこで、本研究では、これまでのこれらの研究・開発成果や近年のコンピュータ・テクノロジーの発展などを利用した寒中コンクリートの新管理方法を提案し、検討してゆくこととした。具体的には、寒中コンクリートを管理するための標準養生、現場封かん養生供試体に加えて、構造体強度管理用に構造体予想積算温度と同程度以下で、かつ現場封かん養生供試体温度を上回る一定温度で養生する供試体 (以下、定温養生供試体と略称する) を加えることにより、コンピュータ画面上で積算温度と強度発現の関係を利用して寒中施工構造体コンクリートの強度を適切に管理する方法を提案し、その可能性・妥当性を実験的に検証することとした。

なお、本研究の要旨は、平成17年度日本建築学会大会でも報告した。¹¹⁾¹²⁾

2. 定温養生システムの概要

一般に、打込まれたコンクリートは水和反応によって温度が上昇し、これに伴いコンクリートの強度発現も次第に進行する。寒中コンクリートでは、この温度と強度の関係は積算温度によって、的確に表現できる。諸外国では積算温度をMaturity (成熟度) などと称しており、一般に積算温度が同等で同一調合のコンクリートの強度発現は、ほぼ同等になるとされている。

そこで、構造体温度と同程度以下の温度の水中で養生した定温養生供試体と、標準養生した供試体の積算温度と強度試験結果から、積算温度と強度発現の関係を利用して、両者の中間的な積算温度を持つ構造体強度を内挿法で的確に予測できないだろうかというのが、このシステムの基本的考えである。システム概要を図-1に示す。

具体的には、パソコン上で、定温養生および標準水中養生した供試体の強度試験結果と積算温度との関係の近似曲線を作成し、構造体コンクリートの強度を確認したい時に構造体の積算

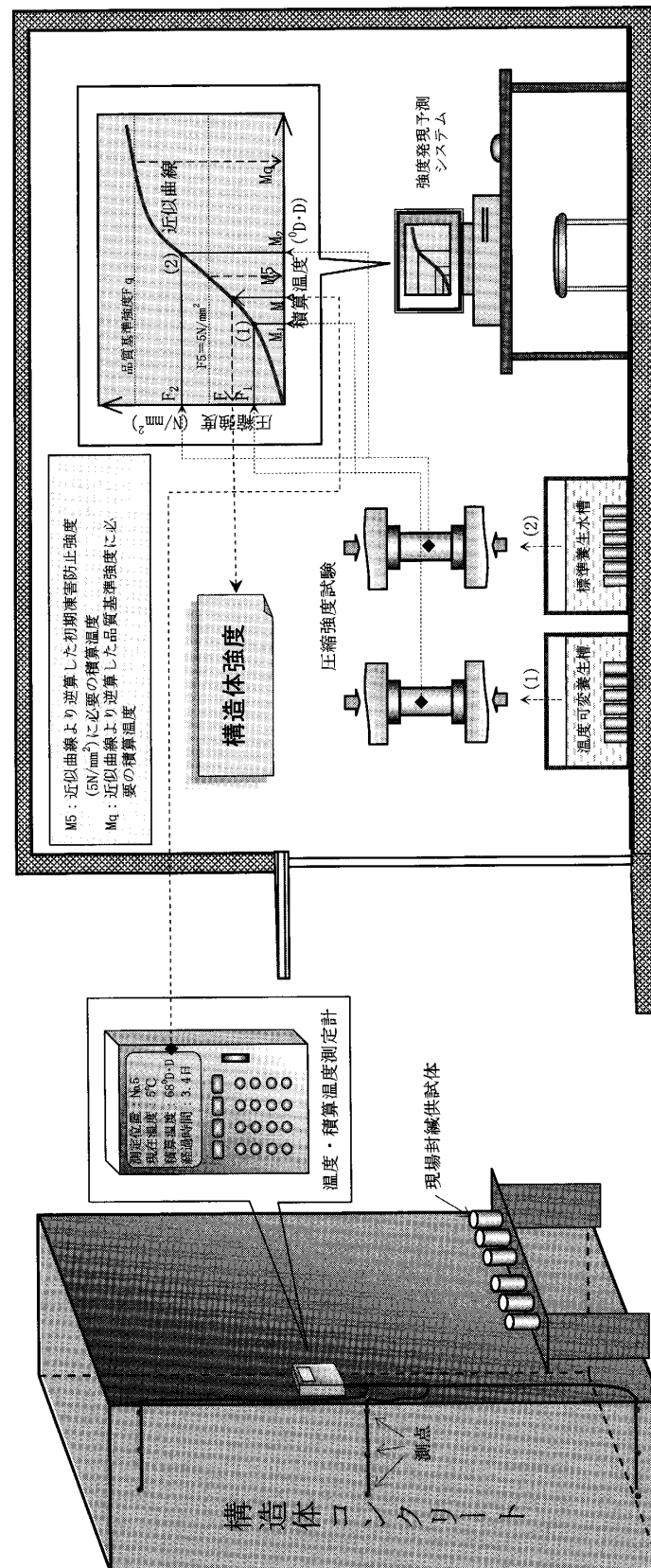


図1 定温養生強度管理システムの概念

温度メータなどから読取った積算温度に対応する強度を近似曲線から読み取り、寒中コンクリートの初期凍害防止のための強度確認や型枠取外しのための強度確認などを行う。

3. 実験の概要

3.1 実験計画

本研究で提案するシステムの可能性と妥当性を検証するため、普通コンクリートを作成して、本システムを用いた構造体コンクリート圧縮強度を推定し、また、管理用供試体と構造体（模擬試験体）から採取したコア供試体の圧縮強度と積算温度の関係を比較検討した。

実験の概要を表－1に、使用材料および調合を表－2、表－3に示す。

コンクリートは、水セメント比50%とし、セメントは寒中コンクリートで一般的に使用される普通ポルトランドセメントと、参考用としてエコセメントも使用したが、本報告では、エコセメントについては、記述しない。

3.2 模擬試験体の作製

寒中コンクリートにおける壁部材の施工を想定して、図－2に示す模擬試験体を作製した。コンクリートの両側面は合板型枠とし、それ以外の4面は、壁部材の熱的連続性を想定して厚手の断熱材とし、試験体全体をシートで覆った。模擬試験体寸法は $600 \times 600 \times 200 \text{mm}$ で、これを温度可変の大型低温室に置き、低温室の温度を -2.5°C に設定した。

著者が考案し、日本、アメリカなどに特許を保有する温度追従養生機能付き大型低温試験室の外観を写真－1に、コンクリート打込み前の模擬試験体型枠の状態を写真－2に示す。

試験体はコンクリート打込み時には水平に置き、打込み後上面型枠とシートをセットし、翌日試験体を鉛直に立てて、材齢1週間後に型枠を取外した。コンクリート打込み翌日、鉛直に立てた状態の模擬試験体を写真－3に、シート養生中の模擬試験体の状態を写真－4に示す。

積算温度の測定は、図－2に示す位置に熱電対を埋設し、積算温度測定計を想定したパソコンによって行った。

コア供試体の採取は、図－2に示す位置で、著者らが考案した方法によって行った。即ち、コア供試体採取位置に、約3mm厚の弾性シートで外側を囲った直径10cmのコア供試体用型枠を設置し、試験体コンクリート打込み時にこの供試体型枠内にもコンクリートを打込む。試験材齢時に、この試験体の型枠を外して木槌などでコア供試体を軽く叩いて抜き出し、強度試験に供した。これは、低温下で養生したまだ十分強度が出ていないコンクリートからドリルでコアを採取することが極めて困難な事などから考案した方法で、模擬試験体コンクリート温度と、約3mm厚の弾性シートで外側を囲った供試体型枠内温度が近似的に同一になることは、事前に確認した。

表1 実験の概要

コンクリート条件	壁試験体および養生条件	強度管理供試体の養生方法	測定項目
セメント種類： 普通ポルトランド 水セメント比：50% 空気量：4.5% スランプ：18cm 打込み温度：15℃	厚さ：200mm 型枠： 12mm合板 +シート (図-2参照) 養生温度：-2.5℃	定温養生 現場封緘養生 標準水中養生 コア抜き (検証用)	試験体・供試体の代表的 位置の温度履歴・積算 温度 養生温度 管理用供試体・検証用 コア供試体の初期材齢 の圧縮強度(3日, 7 日)

表2 使用材料

種類	物性・成分
普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3350cm ² /g
静内産陸砂	最大寸法：5mm，絶乾密度：2.74g/cm ³ ，吸水率：1.60%
静内産砂利	最大寸法：25mm，絶乾密度：2.76g/cm ³ ，吸水率：1.32%
A E減水剤	密度：1.06g/cm ³ ，PH：11.8

表3 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	質量 (kg/m ³)			化学混和剤 の使用量 (cc/m ³)
			セメント	細骨材	粗骨材	
50	40	163	327	735	1135	84

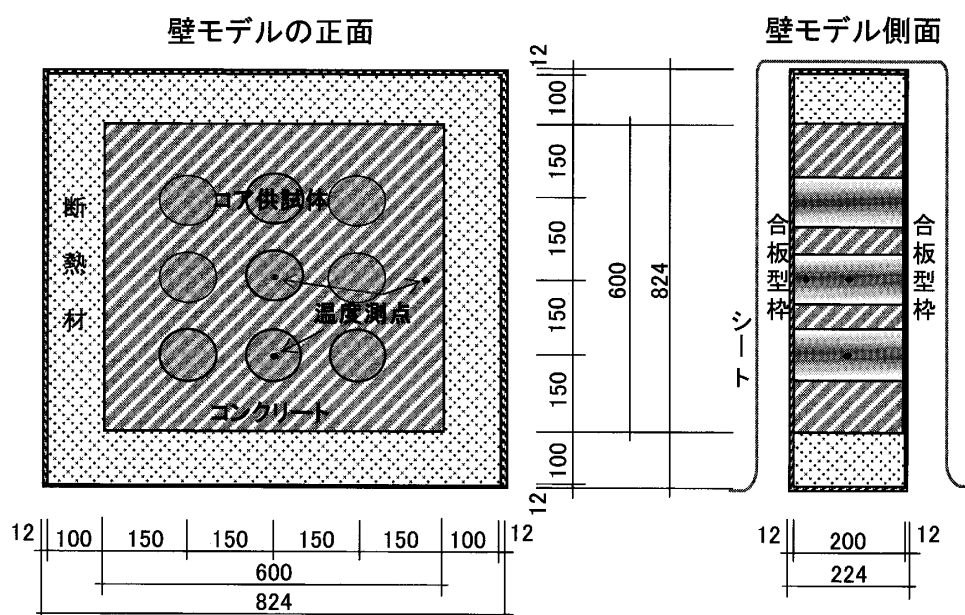


図2 模擬試験体の概要

著者らが考案した方法によるコア供試体採取状況を、写真－5に示す。

3.3 管理用供試体の養生方法

管理用供試体の養生方法は、標準水中、現場封かんの他に、定温養生も行った。なお、定温養生温度は、構造体の積算温度を挟むように計画し、材齢3日までは5℃に設定したが、3日以降は微調整のため3℃とした。

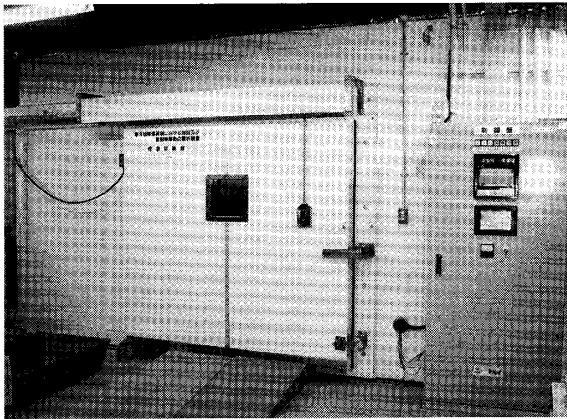
コンクリート供試体を、定温養生装置で養生中の状態を、写真－6に示す。

3.4 圧縮強度試験・温度測定

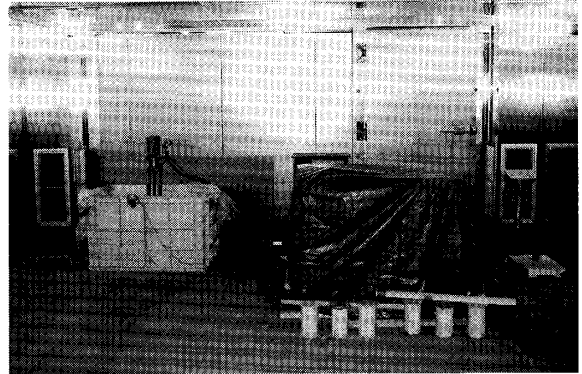
管理用供試体およびコア供試体の圧縮強度試験は、JIS A1107に準じ、コンクリート打込み後材齢3，7日で行った。温度の測定は機器間の誤差を生じないように、すべての温度を同一温度スキャナーで測定記録した。

4. 実験結果

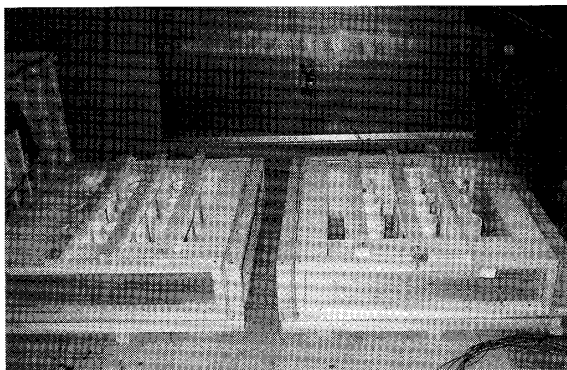
寒中コンクリート工事を想定した検証実験の結果を図－3に示す。これによると、 -2.5°C の養生条件下において、模擬試験体コンクリート温度は材齢7日までプラス温度となっており、また、最高温度は材齢約1日で $+14^{\circ}\text{C}$ 近くまで上昇した。これに伴い、模擬試験体コンクリートコア強度も材齢3日で凍結作用期における初期凍害防止の目安とされている 5 N/mm^2 に達した。一方、現場封かん供試体では、コンクリートが打ち込まれた直後から温度降下が始まり、材齢1日以後ではほぼ養生温度と同等の温度となった。これに伴い、現場封かん供試体の強度発現も小さくなり、材齢3日強度で 1 N/mm^2 と、模擬試験体コア強度よりも 4 N/mm^2 小さく



写真一 温度追従機能付きの大型低温試験室



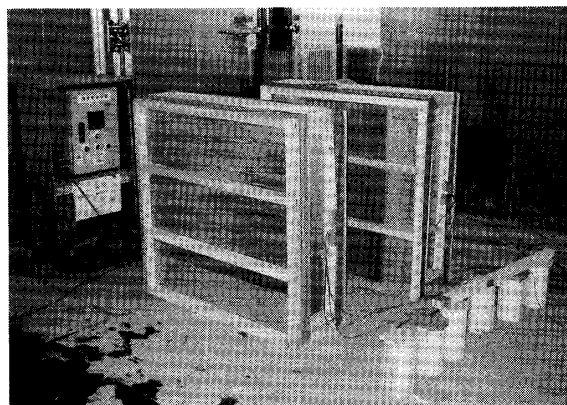
写真一四 寒中条件下でシート養生中の模擬試験体



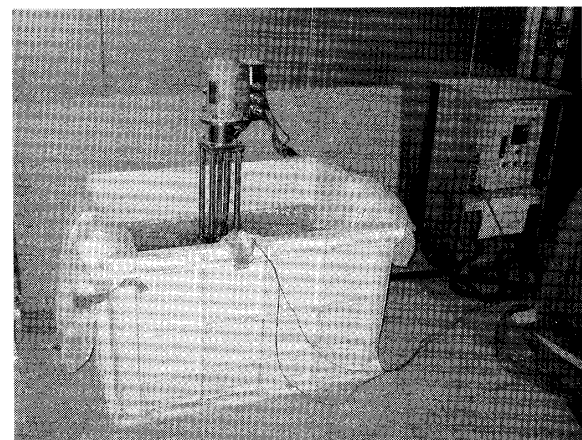
写真一 二 コンクリート打込み前の模擬試験体
型枠



写真一五 考案した方法によるコア供試体採取
状況



写真一 三 コンクリート打込み後の模擬試験体
型枠



写真一 六 コンクリート供試体を定温養生装置
で養生中

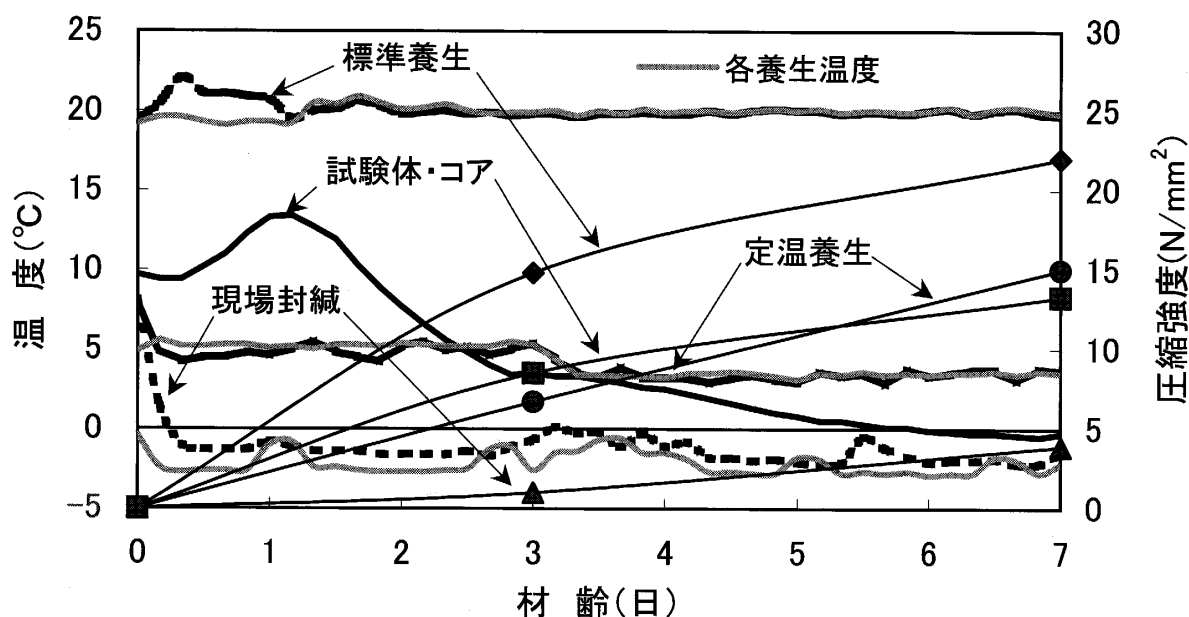


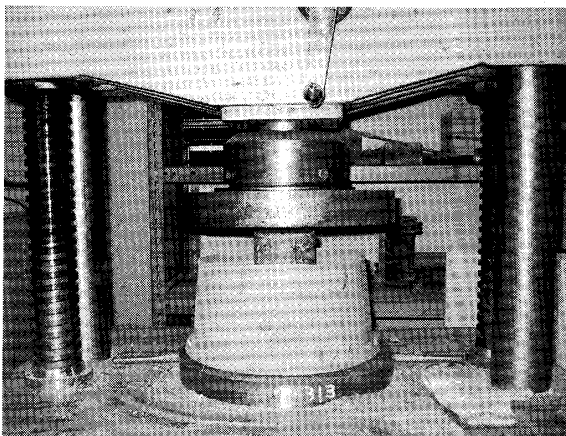
図3 コンクリートの温度履歴と強度増進

なった。このことから、封かん養生供試体を用いて構造体コンクリートの強度を的確に管理することは、極めて困難であることが判断できる。

低温のため低強度で試験体端面を研磨できず、石膏キャッピングを行っている状態を、写真一7に示す。また、標準水中養生などで、高強度になった試験体の圧縮強度試験の状態を、写真一8に示す。なお、写真中、青色のカバーは供試体破壊時の飛散防止カバーである。



写真一7 低温・低強度の試験体の石膏キャッピング



写真一8 高強度を有する供試体の圧縮強度試験 (破壊時の供試体飛散防止カバー付)

5. 実験結果に基づく検討・考察

本研究で提示した定温養生システムの考え方にに基づき、定温、標準と現場封かん養生を行った供試体の積算温度計測結果と圧縮強度試験結果から模擬試験体の圧縮強度推定用近似曲線を作成した。また、その曲線に基づく推定値と、模擬試験体コンクリートの積算温度計測値およびコア供試体強度試験結果の値（検証値）を比較することにより、システムの妥当性・有効性

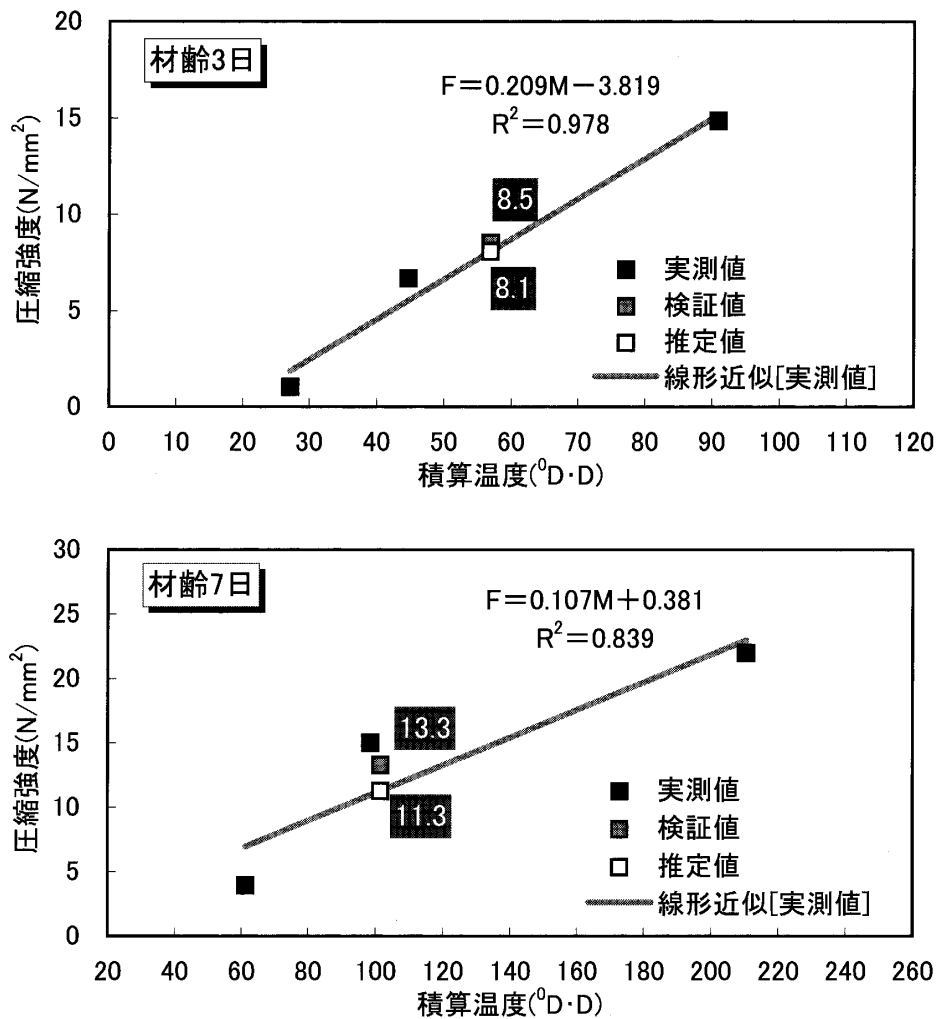


図4 直線関数の近似による検証

を検証することとした。なお、圧縮強度推定用近似曲線の作成に当たっては、線形近似、対数近似および著者らが以前提案した「コンクリート工事施工支援システム」による方法¹³⁾¹⁴⁾の三つの方法について比較・検討し、その中から最適のものを選択することとした。

5.1 線形近似による検証

定温、現場封かんおよび標準養生した供試体の材齢3日と7日の圧縮強度の実測値を用いて、積算温度と強度の直線関係を回帰分析で求めた。また、その回帰直線式に基づく模擬試験体強度の推定値と試験体から抜き取ったコア供試体の圧縮強度試験結果（検証値）とを比較した結果を図-4に示す。これによると、試験結果（検証値）に対する推定値の誤差は、材齢3日で4.71%、材齢7日で15.04%であった。また、近似曲線の精度を示す決定係数（ R^2 ）は、それぞれ0.978と0.839であった。

5.2 対数近似による検証

3.1と同様に、積算温度の対数と強度の関係を回帰分析で求め、近似曲線に基づく圧縮強度

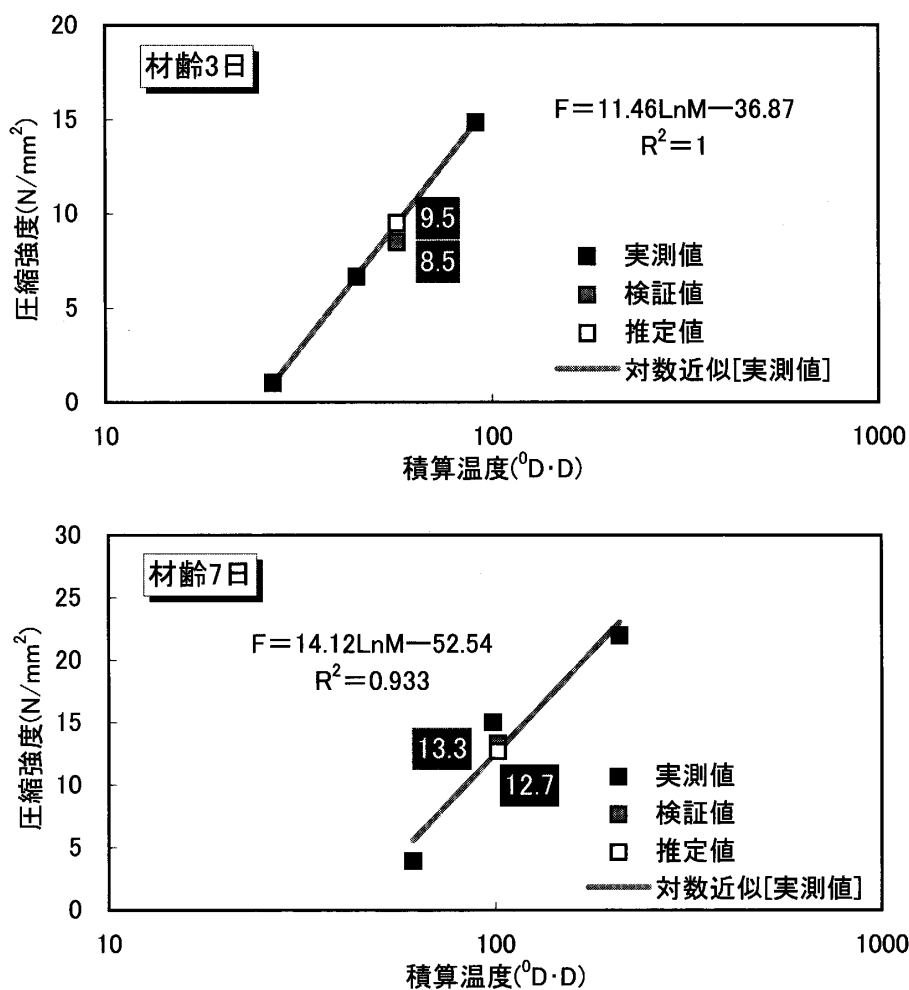


図5 対数関数の近似による検証

の推定値と模擬試験体の試験結果に基づく検証値を比較した。その結果を、図-5に示す。同図によると、検証値に対する推定値の誤差は、材齢3日で11.76%、材齢7日で4.51%であった。なお、曲線の決定係数 (R^2) は、それぞれ1と0.933であった。

5.3 「施工支援システム」の方法による検証

寒中コンクリートの強度を積算温度方式に基づき予測する方法の一つに、強度増進を成長曲線の一種であるロジスティック曲線で近似する方法がある。この方法は、前記の3.1や3.2の方法に比べて計算式は複雑になるがよりの確な強度予測が可能となるもので、近年のパソコンの普及により容易に取り扱うことが可能になり、「コンクリート工事施工支援システム」の中にも組み込まれている。ここで、この支援システムを使用して、積算温度と強度の回帰曲線を求め、近似曲線に基づく圧縮強度の推定値と模擬試験体の試験結果に基づく検証値を比較・検討した。その結果を図-6と、下記(1)と(2)に示す。

- (1) 単純に定温、標準と現場封かん養生を行った供試体の試験結果に基づき求めた近似曲線(図-6中のロジ近似[単純])による推定値は、精度がかなり悪くなり、積算温度の増

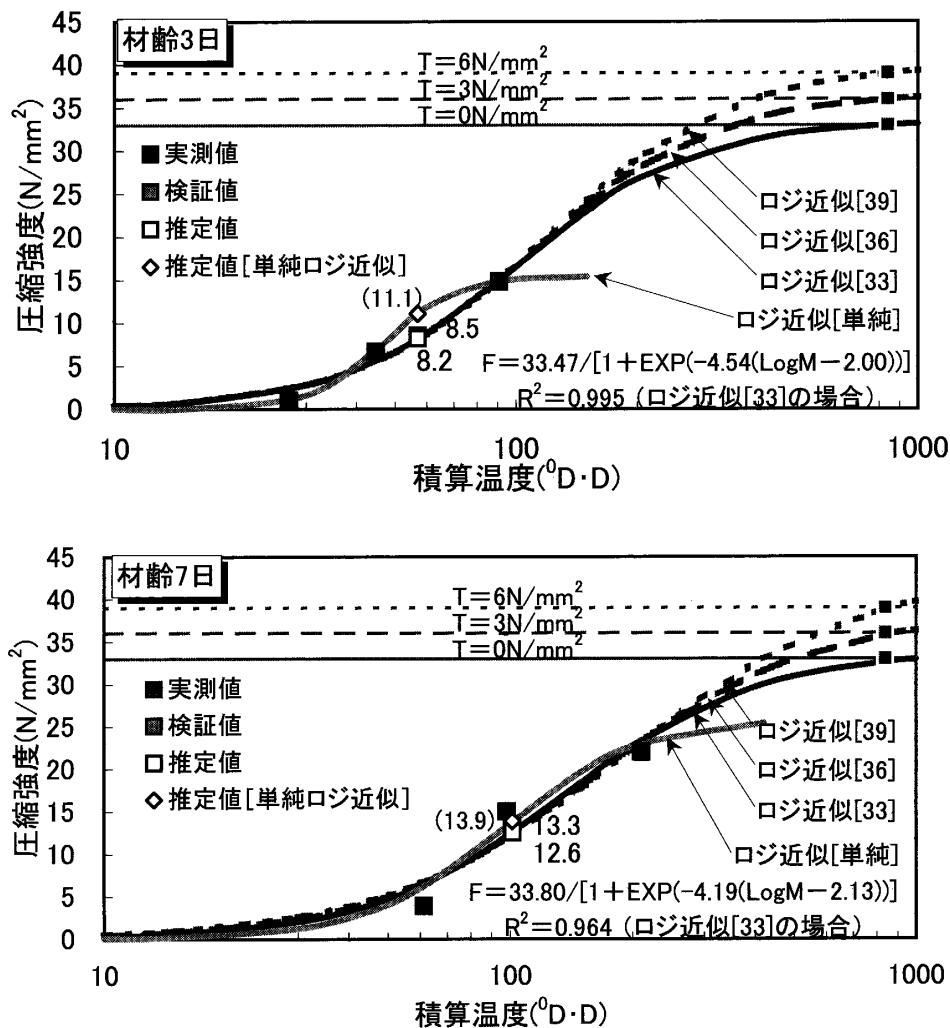


図6 対数関数（コンクリート工事施工支援システム）の近似による検証

大に伴う長期強度が停滞する曲線となった。

- (2) このため、強度管理材齢28日の場合を想定して、構造体コンクリートの強度は品質基準強度 (F_q) 以上、または供試体の養生を標準水中養生とした場合は、($F_q + T$ (強度補正值)) 以上で設計することを考慮して、積算温度 $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ ($28\text{日} \times 20^\circ\text{C}$) の時の強度値を $F_q + T(0)$, $F_q + T(3)$, $F_q + T(6)$ の三つのケースの回帰曲線式を求めた。その結果、ロジスティック曲線の長期材齢部分（図の後半部分）では三曲線に差があるが、初期材齢部分（前半部分）ではあまり差がなく、かつその推定曲線の平均値と供試体強度および模擬試験体の検証値が非常に精度良く適合することが判明した。 $F_q + T(0)$ の場合の、検証値に対する推定値の誤差は、材齢3日で3.53%，材齢7日で5.26%であり、材齢3日と7日の両材齢共に的確に推定している。なお、曲線の決定係数 (R^2) は、それぞれ0.995と0.964であった。

6. まとめ

寒中コンクリートにおける適切な初期凍害防止や、的確な型わく取外しなど、合理的で的確な温度強度管理を目的として、「定温養生システム」を提案した。

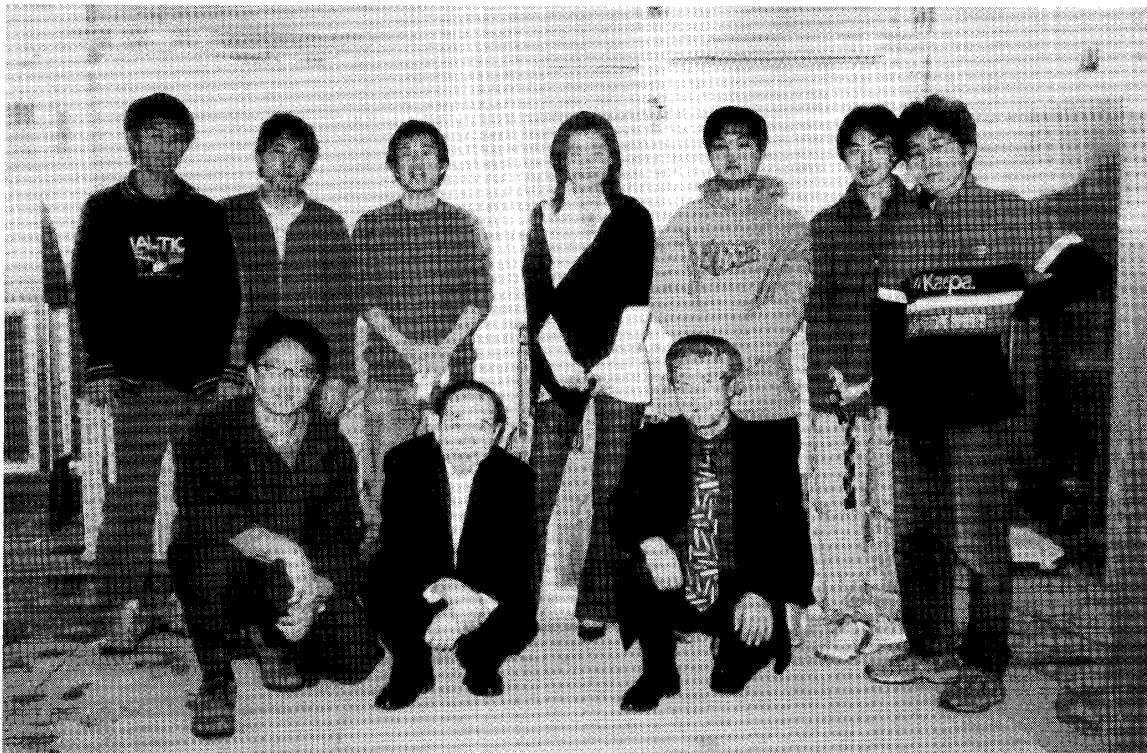
また、提案したシステムの可能性と妥当性を、実験的に検討・考察した。実験結果によると、本研究で提案した定温養生システムを寒中コンクリートの強度管理に適用することは十分可能であり、本システムの使用により、初期凍害防止のための強度確認や的確な型枠外す時期の決定などが行えるものと判断された。

なお、今回実施した実験は、提案したシステムの可能性と妥当性の検討を目的としたものであるため、今後更に実験データなどを蓄積する必要がある。

謝 辞

本システムの可能性と妥当性を検討するための実験の一部は、平成16年度桑原卒研の一部として行った。本卒業実験に参加した、藤澤浩士、麓 喬仁、正木直也、五十嵐隼人の各氏に謝意を表します。平成16年度桑原卒研集合写真を、写真—9に示す。

また、卒業実験の実施に際して、実験室の運営・管理と各種試験機の安全操作などについて



写真—9 平成16年度桑原卒研集合写真（大型低温試験室前）

実験担当職員の菊地 守 氏に多くのご指導・ご教示を頂いた。深くお礼申し上げます。

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，1999.10
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説（JASS 5），2003.6
- 3) 桑原隆司，洪 悦郎：Computerized Thermal & Strength Control System for Concrete Structures, ACI Materials Journal, ACI, 1995. 3 - 4
- 4) 桑原隆司，洪 悦郎：A Computerized Quality Control System for Concrete Structures, 15th Conference on Our World in Concrete & Structures, ACI et al., 1990.8
- 5) 桑原隆司，森永 繁：マスコンクリートの強度管理方法について（セメント協会論文賞受賞論文），セメント技術年報，セメント協会，1984.12
- 6) 桑原隆司，西田 朗，金森洋史，手塚武仁：高強度コンクリートの品質管理方法の研究（その1）～（その3），日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会，1989.10
- 7) 桑原隆司，黒田泰弘，西田 朗：高強度コンクリートの品質管理方法の研究（その4），（その5），日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会，1991.9
- 8) 劉 宏涛，桑原隆司，浜 幸雄：寒冷期に施工するマスコンクリートの強度管理方法の基礎的検討，日本建築学会構造系論文報告集，日本建築学会，2001.3
- 9) 劉 宏涛，浜 幸雄，友澤史紀，桑原隆司：構造体コンクリートの温度履歴に対応した簡易断熱養生条件の検討，日本建築学会構造系論文報告集，日本建築学会，2002.1
- 10) 劉 宏涛：コンクリートの発熱特性を利用した寒中コンクリートの施工方法及び品質管理方法に関する研究，学位論文，2002.4
- 11) 桑原隆司，劉 宏涛：定温養生による寒中コンクリートの強度管理方法に関する基礎的検討（その1）定温養生システムの概要および実験計画，日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会，2005.9
- 12) 劉 宏涛，桑原隆司：定温養生による寒中コンクリートの強度管理方法に関する基礎的検討（その2）定温養生システムの実験による検証，日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会，2005.9
- 13) 洪・鎌田・桑原・西田・桂・岡田：コンクリート工事施工支援システム，清水建設，1994.1
- 14) 西田・洪・鎌田・桂・岡田・桑原：自然条件におけるコンクリートの強度発現を考慮した施工支援システムの提案，自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，1993.5