

論文 寒中コンクリートの養生温度条件が強度発現性と表層品質に及ぼす影響

音道 薫^{*1}・子田 康弘^{*2}・川村 英弘^{*3}・飯土井 剛^{*4}

要旨: 寒中コンクリートの施工で、養生温度は品質に大きく影響を与える。一方で、世界的に脱炭素社会は急務な課題であり、給熱養生にかかる燃料を抑制するなど養生方法の見直しが必要と考える。本研究では、寒中コンクリートにおける養生期間の短縮の可能性を実験的に検討した。室内試験を始め、冬期屋外にて実物大供試体を用い、給熱養生時間を変えてコンクリート品質の評価を行った。その結果、マスコンクリートであれば 5~10℃程度の給熱養生を 24 時間保てばその直後より -4℃環境に晒しても、セメントの水和熱の影響により強度発現性や表層品質に異常は認められず、給熱養生期間の短縮が可能である知見を得た。

キーワード: 寒中コンクリート, 初期凍害, 養生温度, 強度発現性, 表層品質, 脱炭素

1. はじめに

初期凍害とは、フレッシュ時から硬化初期にかけてコンクリート中の水分が凍結することにより、強度発現の停滞などを引き起こす被害であり、一般に、十分に硬化したコンクリートが凍結融解の繰返し作用を受けて劣化する凍害とは区別される。また、本論文では強度発現が不十分な材齢初期（7 日程度）に、凍結融解を受けることを初期材齢の凍結融解作用という。初期凍害を防ぐには、土木分野では、初期凍害に対する抵抗性は条件によって異なるが、圧縮強度で 3~5N/mm² 以上になれば数回の凍結では凍害を受けることが比較的少ないとされている¹⁾。建築分野では、所定の空気量が含まれていれば、圧縮強度が 5N/mm² に達すると、凍結しても強度回復が不可能なほどのダメージ（初期凍害）を受けるおそれなくなるとされている²⁾。

この初期凍害の程度は、ほかの条件が同一であれば、コンクリートが初めて凍結した時の強度（初凍結時強度）によって決まるとされている³⁾。また、凍害に与える影響として、最低温度や凍結速度が考えられる。既往の研究では、最低温度が低いほど劣化の進行が顕著であることが指摘されている⁴⁾。これは、最低温度が低くなるとコンクリート中の凍結水量が多くなるためである。

この初期凍害や凍害を防ぐために、寒中コンクリートの養生では、雪寒仮囲いを施し、昼夜を通してジェットヒータなどによる給熱養生とその温度管理が行われている。この、熱効率の悪い雪寒仮囲い内部を暖めることはエネルギー多消費型であり、昨今の脱炭素社会の実現という観点からも、これに代わる養生技術や管理手法の開発が課題である。

そのため、本研究では寒中コンクリートにおける養生温度条件が強度発現性とコンクリートの表層品質に及ぼす影響を実験的に評価した。室内試験および実機試験における具体的な養生条件や試験内容は次節以降に示す。

なお、著者らがこの研究で想定する寒中コンクリートの対象地域は、東北地方のような本州の積雪寒冷地域であり、冬期間を通して氷点下環境とはならず、日中 0℃以上の気温に達する日が数日以上はある地域である。

2. 室内試験による寒暖繰返しが強度発現性と表層品質に及ぼす影響

2.1 室内試験の概要

本実験のコンクリートの配（調）合を表-1に示す。この配（調）合は、実際の現場を想定し一般的に購入できるレディーミクストコンクリート工場（宮城県仙台市）の JIS 規格配（調）合である。本検討では、高炉セメント B 種を使用し、混和剤は汎用の AE 減水剤を使用した。コンクリートは、呼び強度 24（配合強度 29N/mm²）水セメント比 55%以下、フレッシュ性状は目標スランプ 12 ± 2.5cm、目標空気量 4.5 ± 1.5%とし、打込み時のコンクリート温度は 32℃であった。骨材の吸水率は、粗骨材① 0.62%、粗骨材② 0.65%、細骨材① 2.21%、細骨材② 1.62%といずれも低い吸水率であった。

本実験の養生条件は、3 パターンである。CASE-1 では、コンクリート標準示方書に示されている「寒中コンクリートの温度制御養生期間」に倣い、打込み後 12 日間 10℃程度を保った。CASE-2 は、初期凍害を防ぐため、打込み後 24 時間 10℃程度を保った。CASE-3 は、初期凍害が発生する条件とし、打込み直後から +5℃と -5℃の寒暖繰返

*1 上北建設(株) 土木部 (正会員)

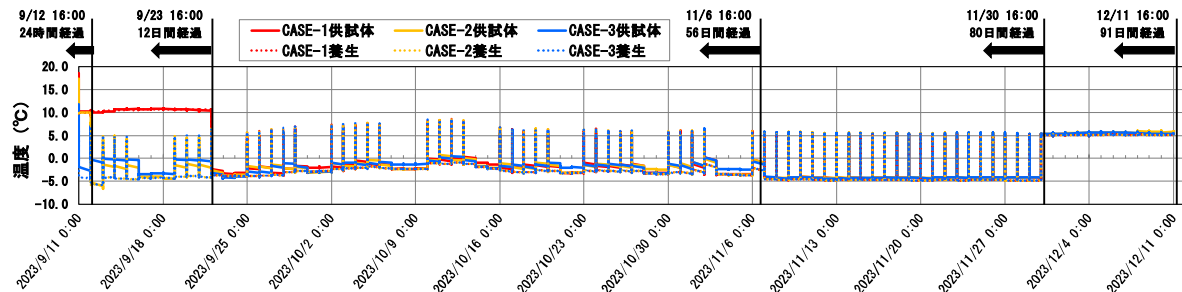
*2 日本大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 国土交通省 東北地方整備局

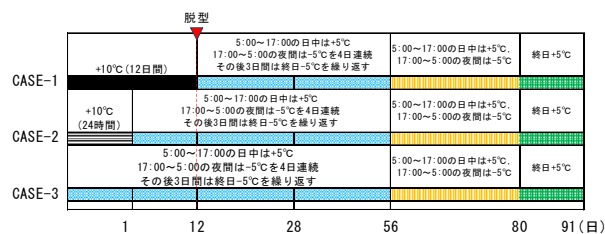
*4 (株)復建技術コンサルタント 工博

表－１ コンクリートの配（調）合

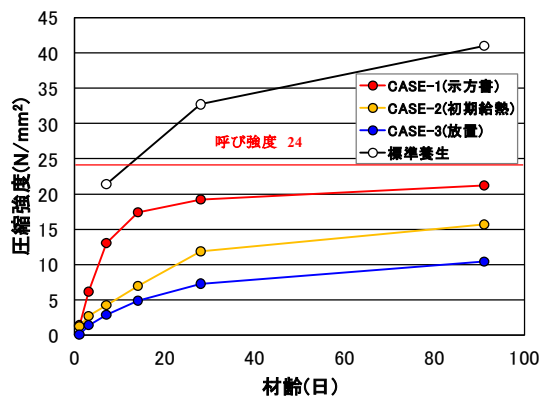
セメントの種類	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)
						W	C	S	G	AE減水剤標準形
BB	20	12.0	51.0	4.5	42.5	166	325	751	1062	1.00%



図－１ 室内試験の温度計測結果



図－２ 室内試験の養生条件



図－３ 強度発現性

しを４日連続行い、その後３日連続-5℃を５６日目まで繰り返した。CASE-1・2は給熱養生終了後、５６日目まで同様に寒暖繰返しを行った。５７日目から８０日目までは、+5℃を１２時間、-5℃を１２時間繰り返した。８１日目から９１日目まで終日+5℃とした。いずれの条件も、寒暖繰返しは自然環境をイメージし、+5℃は５時～１７時、-5℃は１７時～５時となるよう設定を行い、恒温恒湿室内にて気中養生とし、１３日目に脱型を行った。

本実験では初期凍害の有無の判断を、目視確認と凍結融解試験結果から判断することとした。図－１に、養生温度と供試体内部温度の計測結果を示す。図－２に、養生温度模式図を示す。

試験項目は、強度発現性を評価するための圧縮強度試験（材齢１日、３日、７日、１４日、２８日、９１日）に直径１００mm×高さ２００mmの供試体を用い、凍結融解試験には、幅１００mm×高さ１００mm×長さ４００mmの供試体を用いた。また、表層品質を評価するための供試体は、２００mm角柱供試体を用いた。なお、圧縮強度試験と凍結融解試験の供試体型枠は鋼製を使用し、表層透気試験は木製を使用した。

2.2 圧縮強度（JIS A 1108）

図－３に、CASE1～3の材齢９１日までの強度発現性を示す。試験結果から、給熱養生を行った供試体ほど圧縮強度が高い傾向を示した。しかし、いずれのCASEも材齢９１日時点において、呼び強度２４は発現しなかった。これは、高炉セメントほど温度に依存するため⁵⁾、８０日間寒暖繰返しを行ったことが影響している。さらに、今回の養生条件として１日の１２時間が-5℃となる厳しい条件であり、東北地方の冬期間を模倣している。この結果から、東北地方などの寒冷地において、小断面のコンクリート部材ではセメントの水和熱は期待できず、給熱養生を行ったとしても、打ち切った段階で強度増進は緩慢となる。そのため、日平均気温が０℃を下回る環境が数ヶ月におよぶような地域では、コンクリート標準示方書で示されている給熱養生期間では、所定の強度発現は得られないことが示唆された。

2.3 凍結融解試験（JIS A 1148）

図－４に、凍結融解試験における相対動弾性係数の結果を示す。図より、CASE-3のみ１２０サイクル時点で計測不可となった。この供試体は、打込み翌日に目視観察を行った際、コンクリート表面が白色縞模様を呈しており、表面水が凍結した結晶跡が確認された。試験結果と合わせ、明らかに初期凍害を生じている。また、３００サイクル時点の相対動弾性係数は標準養生で８５.８%に対し、

CASE-1, CASE-2 は 90%を超えており、優れた耐凍害性を有している結果となった。この結果から、耐凍害に対する抵抗性は強度依存性が小さいことが分かる。

図-5 に、凍結融解試験における質量減少率の結果を示す。上述したように、CASE-3 は、初期凍害を受けており、150 サイクル時点で計測不可となった。なお、300 サイクル時点での質量減少率は、CASE-1 で 7.6%、CASE-2 で 7.2%、標準養生は 10.2%であった。注目すべきは、数値に大差はないが、最も養生条件の良いとされる標準養生で、最も質量減少率が大きくなったことである。これは、相対動弾性係数と同じ傾向であり、長期に渡って寒暖繰返しによる、低温環境に晒された養生条件では耐凍害性が優位な結果となった。この 2 つの試験結果から、打込み初日に初期凍害を防ぐことができれば、2 日目以降は低温環境下(5℃程度)で、緩速に水和反応を進行させる方が、耐凍害性に優れる組織となることが示唆される結果となった。

2.4 表層透気試験 (Torrent 法)

コンクリートの耐久性は表層品質の影響を受けるため、表層透気試験を材齢 91 日で行った。結果を、図-6 に示す。200mm 角柱供試体の 6 面全てで試験を行った結果、CASE-3 は型枠のない上面と側面 3 において、測定不可となった。この供試体も CASE-3 の上面は、白色縞模様を呈しており、表面水が凍結した結晶跡が確認された。側面 3 は型枠との界面近傍を上昇するブリーディング水の影響⁶⁾を他の面より強く受けたことにより、表層品質が低下⁷⁾したと考えられる。また、全ての CASE で底面のみが 1 グレード良質な結果となった。さらに、CASE-3 の初期凍害やブリーディング水の影響を受けていないと考えられる面では、CASE-1・2 と同程度の値が得られている。これは、給熱養生時間の長短に関係なく、保温性の高い木製型枠などによって封緘された条件では、品質に大きな影響を与えないことを示唆している。

3. 実機試験による寒中コンクリートの養生条件が強度発現性と表層品質に及ぼす影響の検証

3.1 実機試験の概要

実機試験は、山形県新庄市にて令和 6 年 1 月 16 日にコンクリートを打込んだ。この年の冬は全国的にも暖冬で、新庄市もその影響を受け、例年より日平均気温で 3℃程度高かった。打込み時の外気温は-3℃、その後 24 時間経過までの最低気温も変わらず-3℃であった。打込みから 12 日間経過までの日平均気温は 1℃程度であり、最高気温は 8℃、最低気温は-4℃であった。

供試体は、セメントの水和熱が品質に与える影響を確認するため、マスコンクリートを模擬し、高さ 1,000mm × 幅 900mm × 長さ 900mm の無筋とし、木製型枠を使用

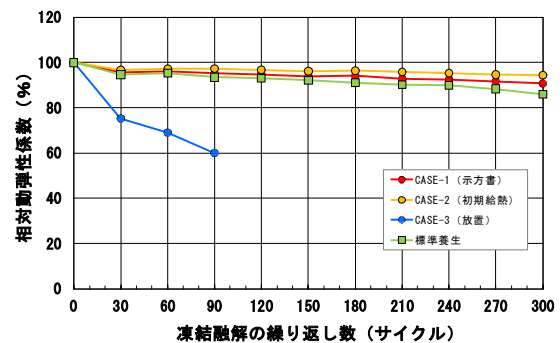


図-4 凍結融解試験による相対動弾性係数

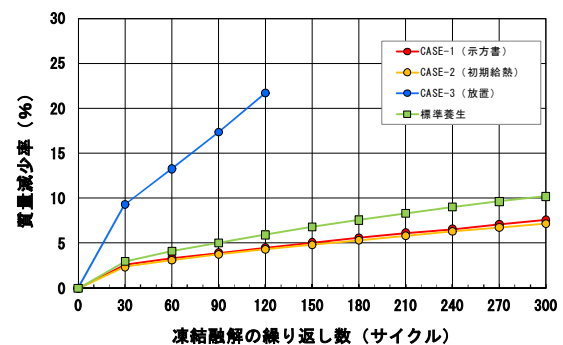


図-5 凍結融解試験による質量減少率

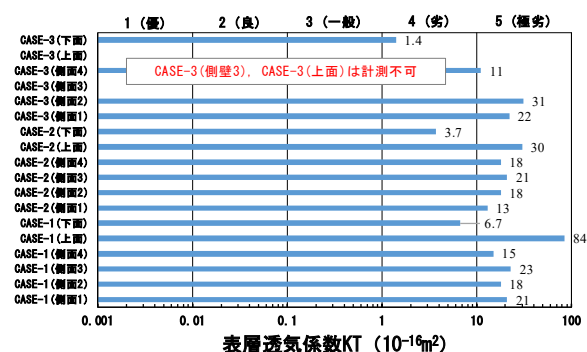


図-6 室内供試体による表層透気試験

した。供試体中には、養生期間中の温度変化を計測するため、熱電対を躯体中心部と躯体天端から 500mm 下がり側面表層から 30mm の位置の 2 点に設置した。

表-2 に、コンクリートの配(調)合を示す。室内試験同様に、一般的に購入できるレディーミクストコンクリート工場(山形県新庄市)の JIS 規格配(調)合を使用した。本検討では、高炉セメント B 種と、混和剤は汎用の AE 減水剤を使用した。コンクリートは、呼び強度 24 (配合強度 29N/mm²) 水セメント比 55%以下、フレッシュ性状は目標スランプ 12±2.5cm、目標空気量 4.5±1.5%とし、指定購入した。また、練混ぜ水は温水を使用し、現地荷下ろし時点でのコンクリート温度は 12℃であった。骨材の吸水率は、粗骨材で 2.80%、細骨材① 2.64%、細骨材② 3.29%といずれも高い吸水率であった。

表－２ コンクリートの配（調）合

セメントの 種類	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)
						W	C	S	G	AE減水剤標準形
BB	25	12.0	49.5	4.5	43.0	156	316	766	1025	1.00%

表－３ 実機試験の養生条件

打設箇所	CASE-1 (示方書)	CASE-2 (初期だけ給熱)	CASE-3 (放置)
打設日	令和 6年 1月16日		
給熱方法	ヒーターと練炭	ヒーターと練炭	給熱なし
給熱養生温度	5℃以上	5～10℃	-4～8℃ (自然温度)
給熱養生期間	12日間	24時間	給熱なし
脱型時期	打設後12日目		
仮囲い撤去時期	打設後12日目		

表－３に、実機試験の養生条件を示す。CASE-1は、コンクリート標準示方書に示されている「寒中コンクリートの温度制御養生期間」に基づき、打込み後12日間5℃以上で給熱養生を行った。CASE-2では、初期凍害を防ぐため、打込み後24時間のみ5～10℃で給熱養生を行った。CASE-3は、初期凍害の発生も視野に入れ、給熱養生は行わず、外気温がそのまま反映される条件とした。いずれの条件も、雪寒仮囲いを施し湿潤養生は行わず、型枠脱型と雪寒仮囲いの撤去は打込み後12日目に行った。実機供試体とテストピースは気中に晒した状態で静置した。

試験項目は、強度発現性を評価するための圧縮強度試験（現場養生：材齢3日、7日、14日、28日、91日、）と、表層品質を評価するため実機供試体で表層透気試験を実施した。さらに、実機供試体から直径100mm×高さ200mmのコア供試体を採取し、圧縮強度試験（材齢28日）を行い、幅100mm×高さ100mm×長さ400mmの供試体を切り出し、凍結融解試験を行った。

3.2 実寒冷環境において養生温度の違いが強度発現性および表層品質に与える影響

(1) 計測期間中の温度履歴

図－７に、コンクリート温度、養生温度、外気温の計測結果を示す。図より、いずれの条件においても打込み後4日間は、コンクリート表面温度で10℃程度をキープしていることが分かる。給熱養生を行っていない、CASE-3では養生温度が0℃前後を推移しているが、打設翌日にはコンクリート中心温度で約16℃、表面で約13℃に達し、12日経過した段階においても、木製型枠の保温効果と雪寒仮囲いによる冷気の遮断効果により、どちらもプラス側を推移している。また、中心部と表面のコンクリート温度は打設後6日後にほぼ同じ温度の約7℃となった。CASE-2は、初期給熱養生によるセメントの水和熱の上昇量が影響し、CASE-3より約2℃高いコンクリート温度となったが、打設後4日後にはCASE-3のコンクリ

ート温度と同程度になり、以降は同様な温度降下を示している。CASE-1のコンクリート中心温度は、打設後36時間後に最高温度の約21℃となり、打設後9日後には中心・表面・養生温度は同程度の約8℃となった。その後も、給熱養生温度の影響を受け同程度の温度を推移している。この結果から、雪寒仮囲いを施したマスコンクリートの場合、外気温が-4℃程度であれば給熱養生を行わなくても初期凍害を生じないことが明らかとなった。また、東北のように厳しい寒冷環境では、外気温との温度差が大きく給熱養生温度を確保するには、膨大な熱エネルギーの供給が必要になる。そのため、養生温度で管理するのではなく、コンクリート温度で管理の方が合理的といえる。

(2) 圧縮強度（JIS A 1108）

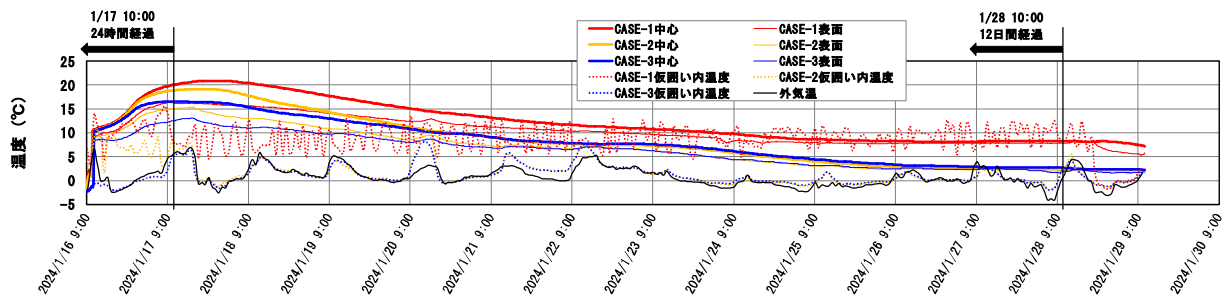
図－８に、雪寒仮囲い内に材齢12日まで静置し、以後、気中に晒したテストピース（以下、TP）の強度発現性を示す。図より、材齢12日まで給熱養生を行ったCASE-1が最も高い強度発現性を示しているが、材齢28日ではいずれのCASEも同程度の強度発現を示し、呼び強度24を超えた。材齢91日では、給熱養生を行わなかったCASE-3が最も高い強度発現を示した。この結果から、給熱養生を行っている期間は積算温度が加算され初期強度は高くなるが、給熱養生を打ち切った低温環境では材齢28日において大きな差がないことが分かった。

図－９に、材齢28日のTPと実機供試体から採取したコアによる強度発現性を示す。どちらも、呼び強度を超える強度発現は得られたが、どちらも、配合強度を超えなかった。また、TPのいずれのCASEにおいても、強度発現性に大きな差はなかった。抜き取りコアも同様であった。両者を比較すると、マスコンクリート自体のセメントの水和熱が影響し、抜き取りコアの方が約10%増の強度増進を示した。

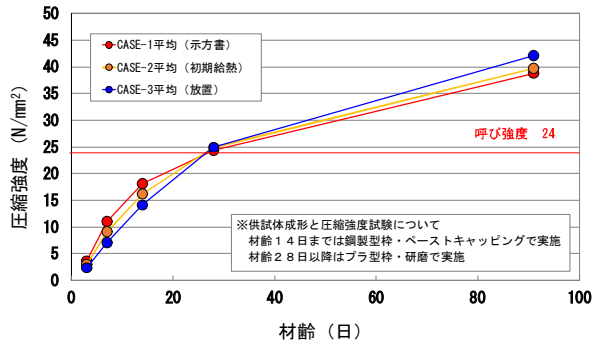
以上の結果から、日平均気温0℃程度の環境下では、初期強度の発現には給熱養生は寄与するが、長期強度では給熱養生の影響は小さく、セメントの水和熱を利用した方が高い強度発現が得られることが分かった。

(3) 表層透気試験（Torrent 法）

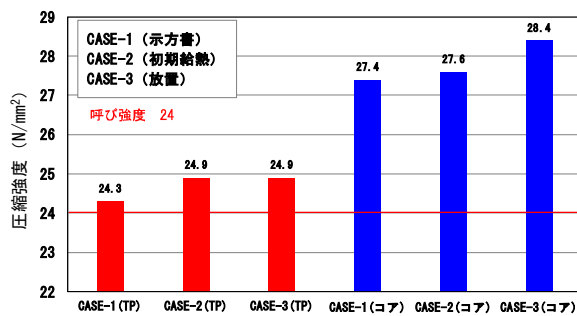
コンクリートの耐久性に影響する物質透過性を把握するため、表層透気試験を材齢199日で実施した。その結果を図－１０に示す。測定箇所は、実機供試体の側面を縦3分割、横3分割とし計9箇所を測定した。測定結果



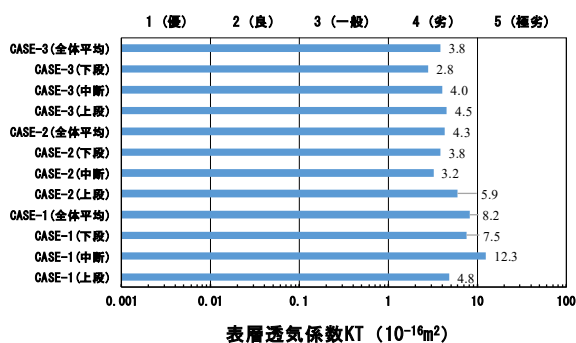
図－7 実機試験の温度計測結果



図－8 強度発現性（現場養生テストピース）



図－9 テストピースとコアの強度発現性（現場養生）



図－10 実機供試体による表層透気試験

の評価は、縦3分割（上・中・下）の3点平均とCASE別の全体平均とした。図から、全体平均の透気係数を見ると、いずれもグレードは4（劣）であった。また、CASE-3<CASE-2<CASE-1 となっており、給熱養生を全く行わなかったCASE-3で最も透気係数が低い値となった。縦

3分割した結果を見ると、いずれも大きな違いはないが、上から下に向かって若干だが透気係数が低くなる傾向である。これは、コンクリート自重による圧密効果によるものと考えられる。

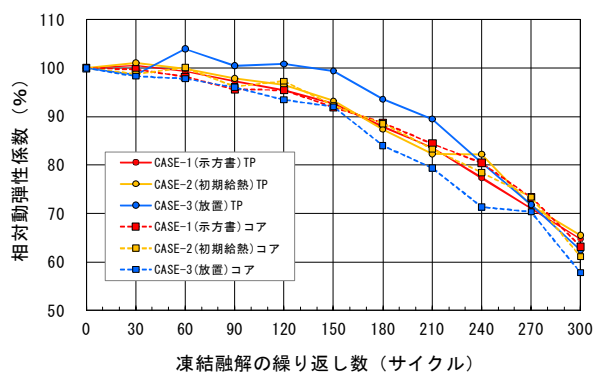
この結果から、低温養生によりゆっくり水和反応させた方が表層品質は向上する傾向にある。また、外気温-4℃程度では雪寒仮囲いを施せば、給熱養生を行わなくても、セメントの水和熱によって初期凍害を防げ、かつ物質透過性が低減することが示唆される結果となった。これは、強度発現性と同様な結果であり、コンクリート標準示方書に示されている給熱養生温度の低減と養生期間を短縮できる可能性が示された。

(4) 凍結融解試験（JIS A 1148）

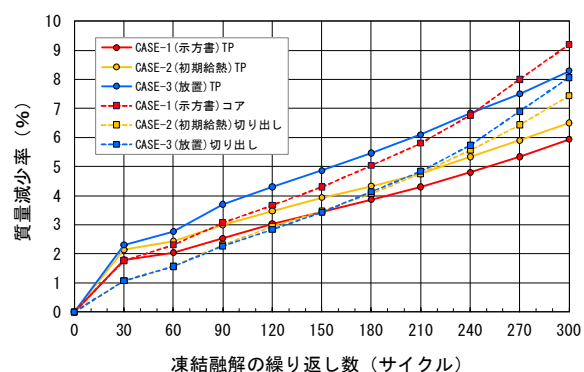
図－11に、凍結融解試験における相対動弾性係数の結果を示す。図より、いずれのTPとコアは300サイクル時点で70%以下まで低下しており、凍害に対する抵抗性は低い結果となった。いずれのCASEも試験結果には大きな差はなく、CASE-3のみ若干のバラツキが見られる。これは、給熱養生を行わなかったことにより硬化過程で水和反応に不均一な部分が生じた可能性がある。

図－12に、凍結融解試験における質量減少率の結果を示す。図より、300サイクル時点での結果には、大きな差はなく、5.9～9.2%の減少率で最大3.3%の開きである。最も質量減少率が小さかったのはCASE-1のTPで、最も大きかったのはCASE-1のコアである。CASE-1のコアは給熱養生温度を5℃以上としたため、10℃を超える時間帯もしばしばみられ、コンクリート表面水が他のCASEよりも早く乾燥したことが原因と考えられる。逆に、給熱養生時間を短くし、低温で養生するとコンクリート表面水の蒸発が抑制されると考えられる。

以上の結果から、相対動弾性係数は顕著に低下しているが、質量減少率は相対動弾性係数ほど大きな減少を示しておらず、これはスケーリングが生じる前に、内部組織の膨張劣化が進行したと考えられる。このように、必ずしも相対動弾性係数と質量減少率が連動しないことは、既往の研究でも確認されており、こうした現象は、骨材の吸水率が高い場合に発生することが知られている⁸⁾。



図ー 1 1 凍結融解試験による相対動弾性係数



図ー 1 2 凍結融解試験による質量減少率

当コンクリートに使用された骨材の吸水率は、規格値上限に近い高いものであった。さらに、圧縮強度や表層透気試験結果は、室内試験よりも実機試験の方が良好な結果を示している。しかし、室内試験に比べ実機試験の相対動弾性係数が大きく低下している。この要因も、室内試験に使用した骨材の吸水率より、実機試験に使用した骨材の吸水率が高いことが影響したといえる。

よって、コンクリートの積算温度による強度発現性に関わらず、骨材の吸水率が高いと耐凍害性を低下させることが示された。

4. まとめ

本研究では、寒中コンクリートにおける養生温度条件が強度発現性とコンクリートの表層品質に及ぼす影響を実験的に評価した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 室内試験結果から、小断面のコンクリート部材の場合、日平均気温が 0℃を下回る環境が数ヶ月におよぶような地域では、コンクリート標準示方書で示されている給熱養生期間では、所定の強度発現は得られないことが示唆された。
- (2) 室内試験の範囲内において、打込み初日に初期凍害を防ぐことができれば、2 日目以降は低温環境下（5℃程度）で、緩速に水和反応を進行させる方が、

耐凍害性に優れる組織となる。また、耐凍害に対する抵抗性は強度依存性が小さいことが分かった。

- (3) 実機試験結果から、マスコンクリートの場合、雪寒仮囲いを施せば給熱養生を行わなくても、外気温が -4℃程度であれば初期凍害は生じない。また、最低気温 -4℃程度であれば、給熱養生を行わない方が、強度発現や表層品質が向上する傾向となった。よって、給熱養生期間を短縮できる可能性が示された。
- (4) マスコンクリートでは、初期給熱養生を 5～10℃程度で 24 時間保てば、以降は 0℃程度の保温養生に切り替えることで、エネルギー多消費型を低減できる。そのため、養生温度管理ではなく、コンクリート温度で管理した方が合理的である。
- (5) コンクリートの積算温度や強度発現性に関わらず、骨材の吸水率が高いと耐凍害性を低下させる。

謝 辞：本研究を遂行するに当たり、国土交通省 東北地方整備局 東北技術事務所 小梁川修司氏および（株）パスク 西谷尚也氏より多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：2023 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.142-144，2023
- 2) 日本建築学会：建築工事標準示方書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp. 470-472，2022
- 3) 笠井芳夫：コンクリートの初期性状，コンクリート・ジャーナル，Vol.11,No.10,pp. 1-15，1973
- 4) 村上祐治,山下英俊，喜多達夫，吉川弘道：最低温度の違いによるコンクリートの変形挙動と AE 特性，土木学会年次学術講演概要集，pp. 438-439，1992
- 5) 久我龍一郎，千葉裕人，久田真，岩城一郎：高炉セメントコンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 1，pp. 437-442，2006
- 6) 権代由範，月永洋一，庄谷征美，阿波稔：コンクリート部材の断面厚さの相違が表層部脆弱層の形成に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No. 64，pp. 391-397，2010
- 7) 三田勝也，加藤佳孝：ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，pp. 1385-1390，2011. 7
- 8) 長谷川拓哉，千歩修：凍結融解作用によるコンクリートの質量変化に関する文献的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，pp. 933-938，2008