

## 7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（基礎材料）

研究担当者：渡辺博志，森濱和正，中村英佑

### 【要旨】

本研究課題では、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドラインを提案することを目的として、国内 8 機関との共同研究を行っている。平成 25 年度は、暴露 20 ヶ月後の供試体の解体調査を行い、実環境下における低炭素型セメントを用いたコンクリートの耐久性と室内促進試験の適用性について検証した。また、低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度発現と自己収縮ひずみの温度依存性について検討するため、マスコンクリートを模擬して簡易断熱養生を行った供試体を製作して実験を行った。さらに、低炭素型セメントを用いたコンクリートのクリープ特性について、材齢 490 日までの実験結果をもとに考察を行った。

キーワード：低炭素型セメント，混和材，暴露試験，耐久性，強度発現，自己収縮，温度依存性，クリープ

### 1. はじめに

地球温暖化問題に対する世界的な関心の高まりを受けて、社会資本整備に伴って排出される二酸化炭素を削減するためのひとつの方法として、低炭素型セメントの利用が注目されている。低炭素型セメントは、コンクリートに使用するポルトランドセメントの一部を産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置換したものである。混和材の混合率を高めることにより水結合材比を増加させることなくポルトランドセメントの使用量を減少させ、コンクリート構造物の建設に伴って排出される二酸化炭素の相当量を削減できることが期待されている。しかしながら、低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性や耐久性の評価方法、構造計算に用いる設計用値、現場での施工方法などは必ずしも明確にされていない。また、二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価する方法が整備されていないことも、低炭素型セメントの積極利用を妨げる要因となっている。

これらのことを背景として、本研究課題では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を多量に混合した低炭素型セメントの利用方法と二酸化炭素排出削減効果の評価方法を規定した設計・施工ガイドラインを提案することを目的として、国内 8 機関（(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設(株)、前田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鐵鋼スラグ協会、電源開発(株)）との共同研究を平成 23 年度から行っている。

平成 25 年度は、低炭素型セメントを用いたコンクリ

ートの特性のうち、次の 4 項目に着目して実験により検討を行った。

#### 1) 暴露 20 ヶ月後の供試体の中性化と塩化物イオン浸透

低炭素型セメントを用いたコンクリートの耐久性で最も懸念されるのは、ポルトランドセメントの使用量とともにコンクリート中の水酸化カルシウムの含有量が減少し、中性化の進行が速まることである。また、コンクリート構造物の劣化要因として塩害は構造物の性能に最も深刻なダメージを与えるものである。このため、暴露 20 ヶ月後の低炭素型セメントを用いたコンクリート供試体の解体調査を行って、実環境下での中性化と塩化物イオン浸透に対する抵抗性について検討した。

#### 2) 強度発現の温度依存性

低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度発現はポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて打込み後の温度履歴の影響を受けやすいとされているため、打込み後の温度履歴が異なる供試体を製作して、強度発現の温度依存性について検討した。

#### 3) マスブロック供試体の水和発熱特性と自己収縮特性

コンクリートの水和発熱特性と自己収縮特性は、温度ひび割れの発生リスクを照査する際に不可欠な設計用値である。低炭素型セメントを用いたコンクリートの水和発熱特性と自己収縮特性は、ポルトランドセメント単味のコンクリートとは異なる傾向を示す可能性が高いため、マスコンクリートを模擬して簡易断熱を行ったマスブロック供試体を用いて、高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみについて検討した。

7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

表-1 コンクリート配合

配合 No.	W/B (%)	B (kg/m <sup>3</sup> )	B = OPC+HPC+BS4+BS6+FA 結合材の構成割合(%)					試験値	
			OPC	HPC	BS4	BS6	FA	Slump (cm)	Air (%)
H40	40	413	100					11.5	4.6
H40B430			70	30				10.5	3.8
H40B450			50	50				13.5	5.1
H40B630			70		30			13.5	4.7
H40B650			50		50			14.5	4.8
H40B670			30		70			13.0	4.9
H40F10			90				10	9.5	4.2
H40F20			80				20	14.0	4.5
H40F30			70				30	12.0	4.3
H40S			100					12.0	4.6
H40B430S			70	30				10.0	3.9
H40B650S			50		50			12.5	4.7
H40F20S			80				20	10.5	3.1
N35			35	471	100				
N35B50	50				50			14.5	4.3
N35B85	15				85			12.5	5.1
N35F20	80						20	12.0	3.5
N35F40	60						40	14.5	4.5
N50	50	330	100					14.0	5.2
N50B50			50		50			13.5	4.3
N50B70			30		70			12.5	4.5
N50B85			15		85			11.5	4.0
N50F20			80				20	11.5	4.4
N50F30			70				30	11.0	4.6
N50F40			60				40	14.5	4.0
N50B50F20			30		50		20	12.0	4.6

- 1) 単位水量(=165kg/m<sup>3</sup>)と単位粗骨材量(=968kg/m<sup>3</sup>)を全配合で統一
- 2) HPC：早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,490cm<sup>2</sup>/g)
- 3) OPC：普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>，比表面積=3,300cm<sup>2</sup>/g)
- 4) BS4：高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,400cm<sup>2</sup>/g)，BS6：高炉スラグ微粉末6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>，比表面積=5,950cm<sup>2</sup>/g)，SO<sub>2</sub>換算でBS4は2.0%，BS6は3.0%となるよう無水石膏を添加
- 5) FA：フライアッシュII種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g)
- 6) 細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm<sup>3</sup>，吸水率=2.23%)
- 7) 粗骨材：茨城県笠間産砕石6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>，吸水率=0.43%)と5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>，吸水率=0.46%)を均等に混合，最大寸法=20mm
- 8) 化学混和剤：スランプ12±2.5cmと空気量4.5±1.5%を目標値として使用量を調整
- 9) 温度：20℃の実験室内でコンクリートの練混ぜと供試体の製作を実施
- 10) 練混ぜ方法：水平二軸強制練ミキサーで，セメント，混和材，細骨材，粗骨材を30秒間空練りした後，水と混和剤を投入して90秒間練混ぜて排出
- 11) 養生方法：配合No.の末尾に「S」を付記していない供試体は打込み翌日に脱型して材齢28日まで20℃で水中養生。配合No.の末尾に「S」を付記した供試体は恒温恒湿槽を用いて模擬的な蒸気養生(20℃で3時間の前養生，50℃まで2時間で昇温，50℃を6時間維持，20℃まで5時間で降温)を行った後，脱型して材齢28日まで20℃で水中養生

4) 材齢490日までの持続載荷試験によるクリープ特性  
 コンクリートのクリープ係数はプレストレストコンクリート構造物のプレストレスの減少量や不静定構造物の不静定力の計算を行うために不可欠な設計用値であるが，低炭素型セメントを用いたコンクリートのクリープ特性は明確ではない。このため，H25年度に開始した持続載荷試験を継続して，低炭素型セメントを用いたコンクリートのクリープ特性について検討した。

2. 暴露20ヶ月後の供試体の中性化と塩化物イオン浸透

低炭素型セメントを用いたコンクリートの耐久性を実環境下で検証するため，H23年度から，つくば，新潟，

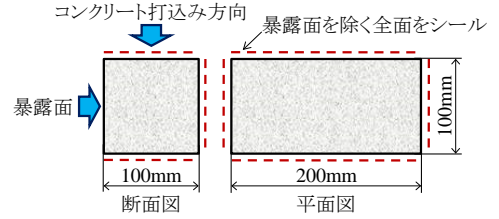


図-1 暴露供試体の形状



【つくば】

茨城県つくば市南原内陸部  
 平均気温：15.5℃  
 平均湿度：72.9%  
 降水量：2,580mm

【新潟】

新潟県上越市名立区沿岸部  
 平均気温：14.8℃  
 平均湿度：77.3%  
 降水量：4,830mm

【沖縄】

沖縄県国頭郡大宜味村沿岸部  
 平均気温：23.3℃  
 平均湿度：75.5%  
 降水量：4,085mm

図-2 供試体の暴露状況と気象データ<sup>2)</sup>

※ 気象データは暴露場の最寄りの気象観測地点(つくば館野，高田，名護)の値を引用<sup>2)</sup>

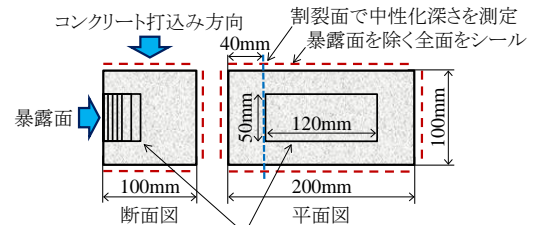


図-3 暴露供試体の解体調査の方法

沖縄の3ヶ所で暴露試験を行っている<sup>1)</sup>。平成25年度は，暴露開始から20ヶ月が経過した暴露供試体を回収して解体調査を行い，コンクリートの中性化深さと塩化物イオン濃度の測定を行った。また，暴露試験の開始時に実施した促進試験の結果との比較も行った。

2.1 暴露試験の概要

コンクリート配合を表-1に示す。配合は26種類である。セメントは普通ポルトランドセメント(OPC)と早強ポルトランドセメント(HPC)の2種類である。混和材は高炉スラグ微粉末4000(BS4)と高炉スラグ微粉末6000(BS6)，フライアッシュII種(FA)の3種類である。セメントと混和材の分量は，単位結合材量と各材料の混合

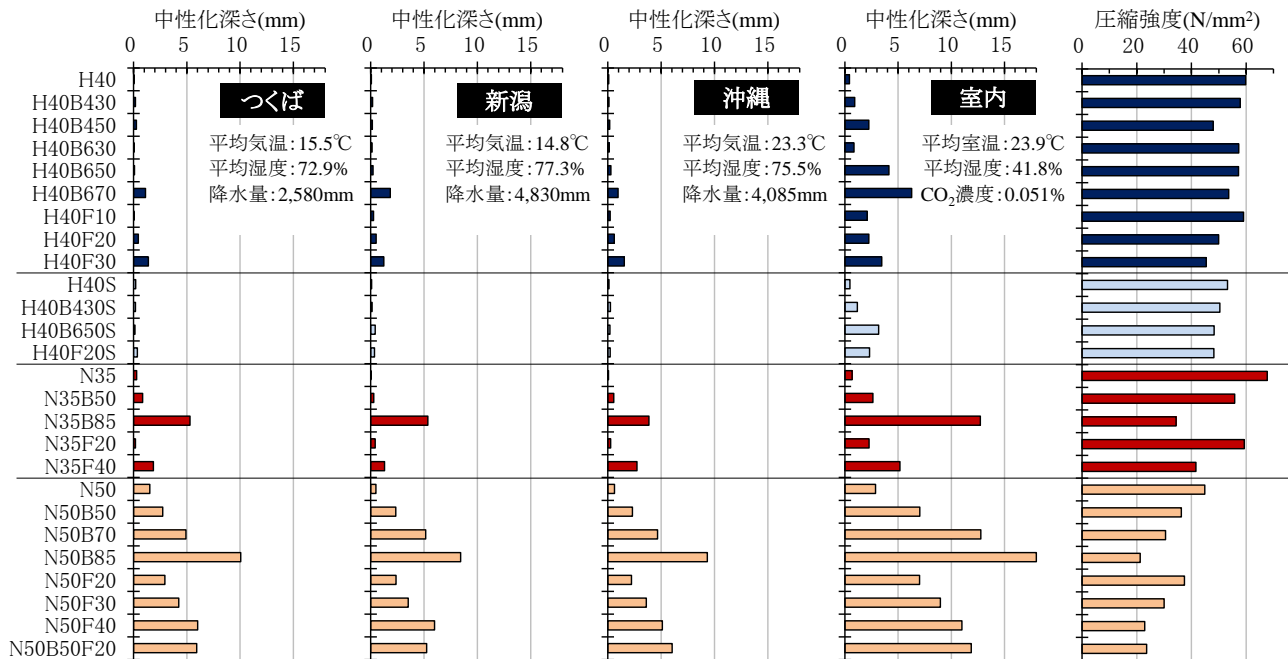


図-4 暴露20ヶ月後の供試体の中性化深さと材齢28日の圧縮強度

率から質量ベースで計算して決定した。

水結合材比(W/B)=40%の13配合の供試体は、プレストレストコンクリートへの適用を想定して早強ポルトランドセメントを用い、水中養生あるいは模擬的な蒸気養生を行った。また、W/B=35%と50%の13配合の供試体は、普通ポルトランドセメントを用い、各混和材の混合率を混合セメントのJISのC種相当以上としたものも含めた。いずれの供試体も材齢28日まで水中養生を行い、材齢44～69日で暴露を開始した。

暴露試験に用いた供試体の形状を図-1に示す。供試体は、100×100×200mmの角柱供試体である。実際のコンクリート構造物が置かれる状況を模擬するため、コンクリート打込み方向に対して側面を暴露面とし、この暴露面を側面とした状態で供試体を暴露した。また、暴露面を除く全面を塗装材料によりシールし、暴露面以外からの中性化の進行と塩化物イオンの浸透を防止した。

屋外暴露場における供試体の暴露状況と気象データ<sup>2)</sup>を図-2に示す。平成24年2月から平成25年10月までの約20ヶ月間、国内3ヶ所(茨城県つくば市南原、新潟県上越市名立区、沖縄県国頭郡大宜味村)の雨掛かりのある屋外の暴露場と独立行政法人土木研究所の事務室の4種類の環境に供試体を暴露した。

つくばの暴露場は内陸部に位置するため塩化物イオンの供給は無いが、新潟と沖縄の暴露場は海岸線近くの厳しい塩害環境下にある。新潟の暴露場は、海水が直接供試体に降りかかることは無いが、海中の消波ブロックや

波打ち際に生成された海水の飛沫によって飛来塩分が供給される環境である。沖縄の暴露場は、天候によっては海水が供試体に直接降りかかることもある環境である。また、各暴露場の最寄りの気象観測地点の気象データによると、気温は沖縄で高く、つくばと新潟で低い。湿度は全地点で概ね同程度であったが、降水量は新潟と沖縄で多く、つくばで少ない。このように、これらの暴露場は、飛来塩分量や気温、湿度、降水量などが様々に異なる環境条件であった。

## 2.2 解体調査の方法

暴露供試体の解体調査の方法を図-3に示す。中性化深さの測定は、供試体の端部から約40mmの位置を割裂し、JIS A 1152を参考に、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して行った。中性化深さは、供試体表面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に9点で測定し、これらの平均値とした。また、塩化物イオン濃度の測定は、供試体の中央部から厚さ5mmあるいは10mmで試料を切断して粉碎し、JIS A 1154の電位差滴定法に準拠して行った。

## 2.3 暴露供試体の中性化深さの測定結果

暴露20ヶ月後の供試体の中性化深さと材齢28日の圧縮強度を図-4に示す。つくば、新潟、沖縄の中性化深さの図には図-2に示した気象データ、室内の中性化深さの図には供試体の周囲で測定した室温と湿度、二酸化炭素濃度の平均値を併記した。いずれの暴露環境においても、W/Bが大きく、各混和材の混合率の高い供試体で、中性

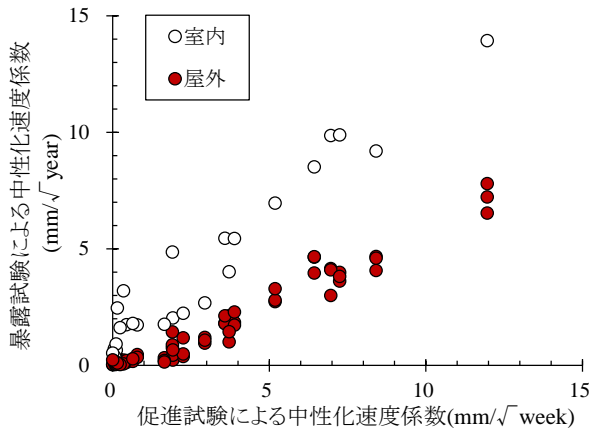


図-6 促進試験と暴露試験による中性化速度係数

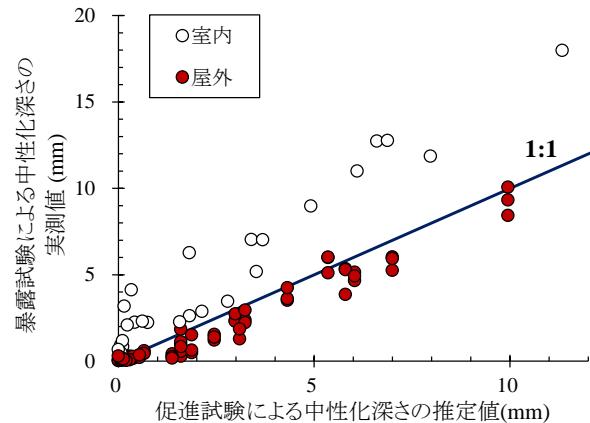


図-7 中性化深さの推定値と実測値

化深さが大きくなった。同一配合の供試体の中性化深さを比較すると、屋外3ヶ所に暴露した供試体の中性化深さは概ね同程度であったが、室内に暴露した供試体の中性化深さは大幅に大きくなった。屋外の各暴露場では飛来塩分量や気温、湿度、降水量などの環境条件が異なったが、これらの違いが中性化深さの差に与えた影響は屋外と室内の環境条件の違いほど明確ではなかったと考えられる。また、室内に暴露した供試体の中性化深さが大きくなった原因は、室内の二酸化炭素濃度(=0.051%)が大気中の二酸化炭素濃度(=0.03931%)より高かったこと、室内は雨掛かりがなく屋外より乾燥していることなどから、中性化が進行しやすい環境に供試体が置かれたためと考えられる。

材齢28日の圧縮強度は、W/Bやベースセメントの種類が同一であれば、各混和材の混合率が高い供試体で小さくなる傾向にあった。

材齢28日の圧縮強度と暴露供試体の中性化深さから計算した中性化速度係数の関係を図-5に示す。これ以降の図では、屋外3ヶ所に暴露した供試体の中性化深さが暴露環境の違いにかかわらず概ね同程度であったため、屋外3ヶ所に暴露した供試体の全データを「屋外」と称する。材齢28日の圧縮強度と中性化速度係数は概ね相関関係にあり、圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が低下する傾向にあった。過去の屋外暴露試験<sup>4)5)</sup>では、材齢28日の圧縮強度が同等であれば、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混合の有無にかかわらず中性化抵抗性が同程度になることが報告されており、今回の暴露試験の結果も同様の傾向にある。しかし、図-5では、屋外と室内のように環境条件が極端に異なる場合には、材齢28日の圧縮強度が同等でも中性化速度係数が異なった。このことを踏まえると、低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性を吟味する際には、圧縮強度に加

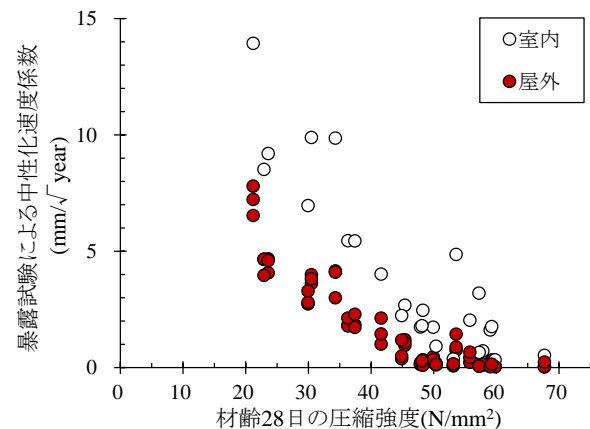


図-5 圧縮強度と暴露試験による中性化速度係数

えて、長期的な環境条件の影響も適切に考慮することが不可欠であると考えられる。

## 2.4 促進中性化試験の結果との比較

国内では、コンクリートの中性化抵抗性を評価する試験方法として、JIS A 1153に準拠した促進中性化試験が広く採用されている。しかしながら、促進中性化試験では試験時の二酸化炭素濃度(=5±0.2%)が大気中の二酸化炭素濃度(=0.03931%)より大幅に高く、混和材を用いたコンクリートでも適切な評価が可能か明確ではない。そこで、低炭素型セメントを用いたコンクリートへの促進中性化試験の適用性を検証するため、平成23年度の暴露供試体の製作時に促進中性化試験用の供試体を製作し<sup>1)</sup>、JIS A 1153に準拠して促進中性化試験を実施した<sup>6)</sup>。ここでは、促進中性化試験と暴露試験の結果を比較する。

促進中性化試験と暴露試験で得られた中性化速度係数の関係を図-6に示す。暴露試験で得られた中性化速度係数は、屋外と室内で差が生じていたものの、環境条件の違いにかかわらず、促進中性化試験で得られた中性化速度係数と概ね比例関係にあったことが分かる。

また、促進中性化試験の中性化速度係数から求めた中



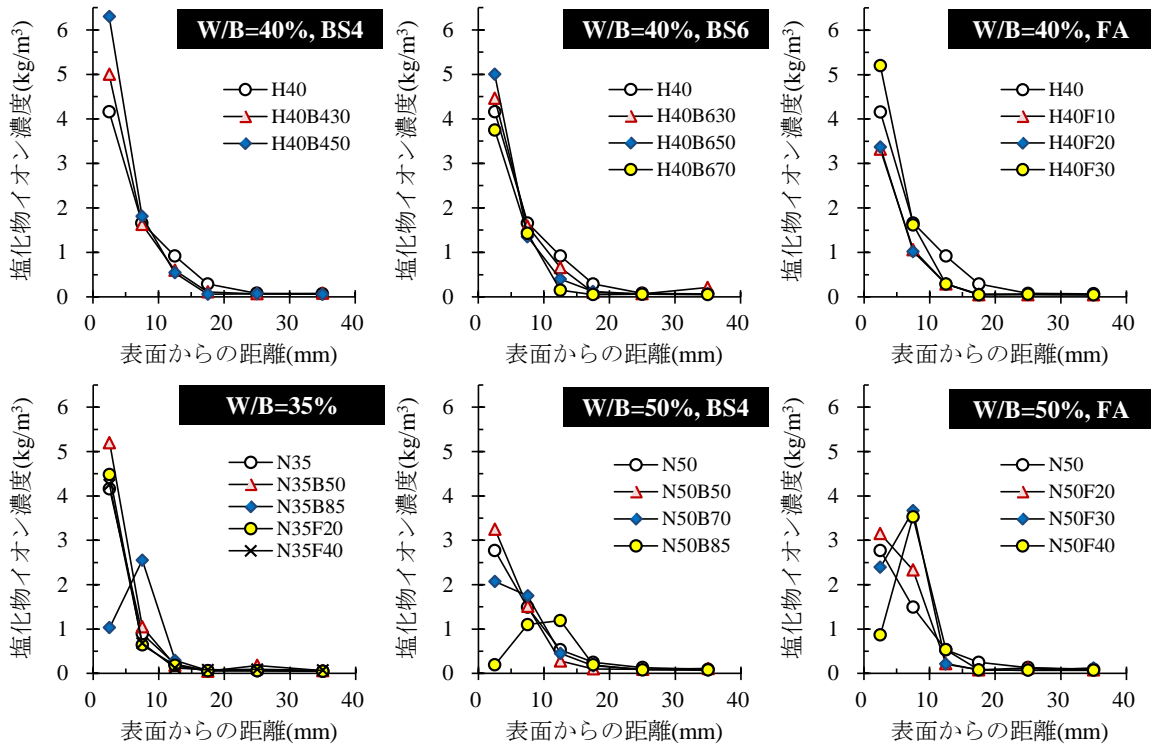


図-8 暴露 20 ヶ月後の供試体の塩化物イオン濃度分布：沖縄

性化深さの推定値と暴露試験による中性化深さの実測値の関係を図-7 に示す。暴露試験と促進中性化試験では様々な試験条件が異なるが、ここでは二酸化炭素濃度の差のみに着目して、式(1)<sup>7)</sup>を用いて促進中性化試験で得られた中性化速度係数から屋外と室内の暴露 20 ヶ月後の中性化深さを推定した。

$$C = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2ACT}} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、 $C$ ：暴露 20 ヶ月後の中性化深さの推定値(mm)， $A_{ACT}$ ：促進中性化試験の中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{week}}$ )， $CO_2$ ：各暴露環境の二酸化炭素濃度(屋外=0.03931%<sup>3)</sup>，室内=0.051%(図-4 に記した実測値))， $CO_{2ACT}$ ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%)， $t$ ：材齢(week)である。

促進中性化試験の中性化速度係数から求めた中性化深さの推定値と暴露試験による中性化深さの実測値を比較すると、若干のばらつきはあるが、推定値は屋外の供試体の実測値より大きく、室内の供試体の実測値より小さくなる傾向にあった。この原因を環境条件の違いのみに着目して考察すると、屋外の供試体は降雨により水分が供給される環境に暴露されたため、中性化が比較的進行しにくい環境に置かれたこと、室内の供試体は降雨の影響を受けず、促進中性化試験よりも室温が高く湿度が低い環境に暴露されたため、中性化が比較的進行しやすい環境に置かれたことなどが推察される。

図-7 によると、低炭素型セメントを用いたコンクリー

トを屋外で供用する土木構造物に適用する際、促進中性化試験から得られる中性化深さの推定値は実測値よりも大きくなる可能性が高い。しかし、中性化深さの推定値と実測値は概ね比例関係にあったこと、極端に過大な推定値は得られなかったことを踏まえると、低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性を安全側に評価するという観点からは、中性化深さを推定する際に促進中性化試験の結果を活用できると考えられる。ただし、室内のように二酸化炭素濃度が高く乾燥しやすい環境では、促進中性化試験による推定値より実測値が大きくなる可能性が高い点には注意が必要である。

なお、平成 25 年度は暴露 20 ヶ月の供試体の解体調査を行ったが、本研究課題の最終年度である平成 27 年度にも同様の解体調査を実施する予定である。また、地下構造物のように土中に埋設されるコンクリートの中性化抵抗性については供試体を別途製作して暴露試験を行っている。これらの結果をもとに多様な環境条件下での中性化の経時的な進行メカニズムを明らかにした上で、促進中性化試験の適用性について再度検証を行う予定である。

## 2. 5 塩化物イオン濃度の測定結果

暴露 20 ヶ月後の供試体の塩化物イオン濃度分布を図-8 に示す。ここでは、沖縄に暴露した供試体の測定結果をセメント単味の場合と各混和材を混合した場合で W/B ごとに比較して示す。W/B=40%の供試体では、表面からの距離が 20mm の位置まで外部からの塩化物イオ

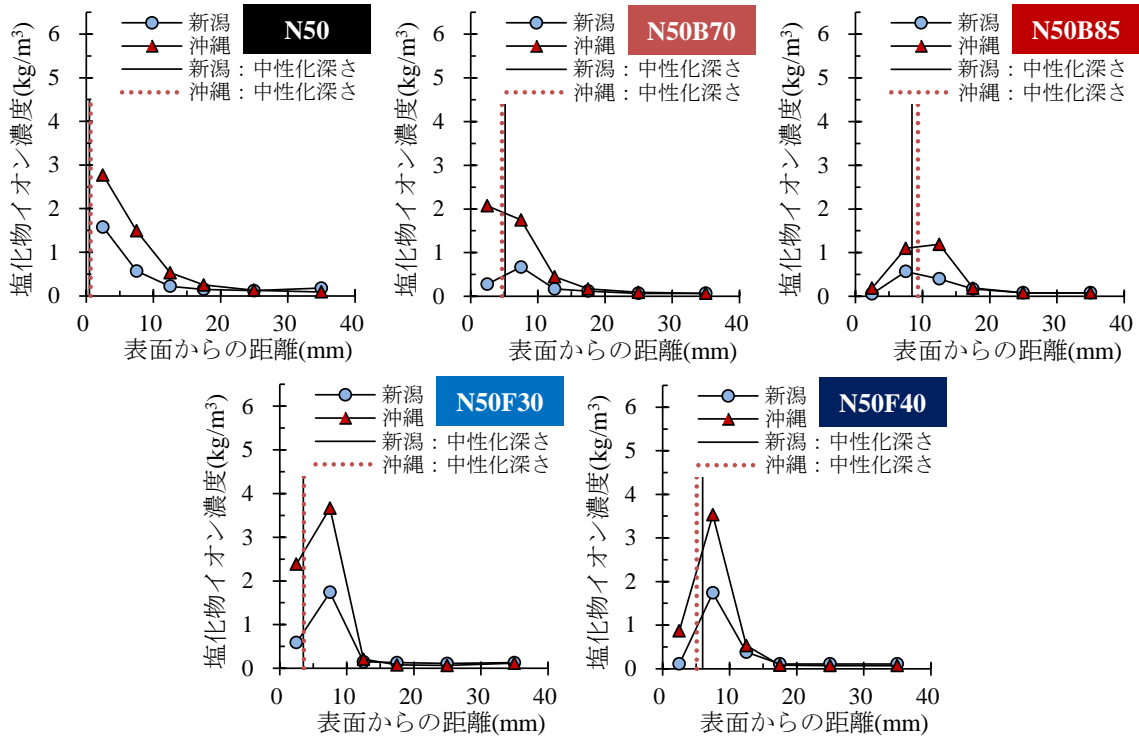


図-9 中性化深さと塩化物イオン濃度分布の関係：W/B=50%

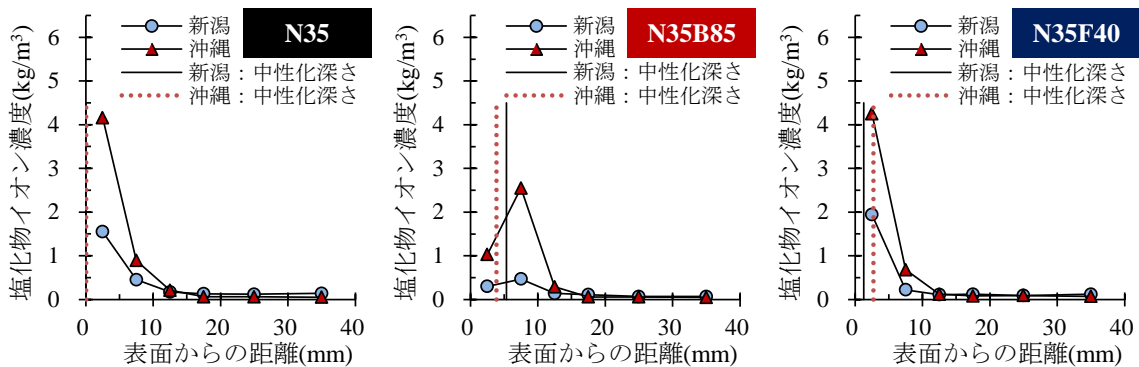


図-10 中性化深さと塩化物イオン濃度分布の関係：W/B=35%

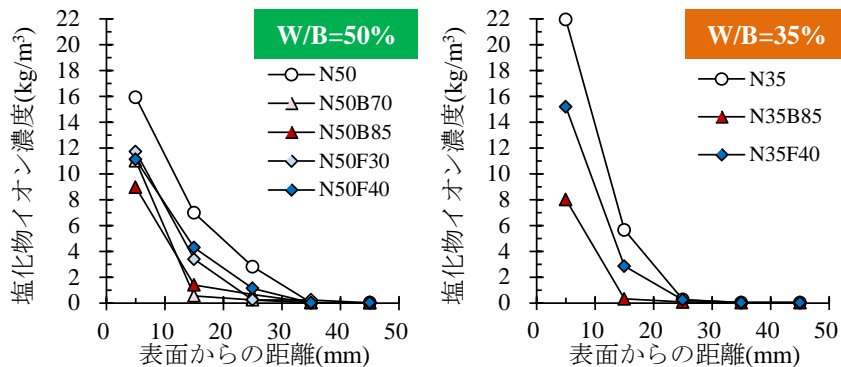


図-11 浸せき6ヶ月後の供試体の塩化物イオン濃度分布

ンの浸透が見られた。最も表層に近い表面からの距離が5mmの位置までの塩化物イオン濃度の大小と混和材の使用の有無の関係は必ずしも明確ではなかった。しかし、表面からの距離が10~20mmの位置では、早強ポルトラ

ンドセメント単味のH40より各混和材を使用した供試体で塩化物イオン濃度が小さくなった。混和材の使用により塩化物イオン浸透抵抗性が向上したためと考えられる。一方、W/B=35%、50%の供試体の塩化物イオン濃度分

表-2 基準類における養生期間中のコンクリート温度に関する規定

基準類	養生期間中のコンクリート温度に関する規定
土木学会 2012年制定 コンクリート標準示方書 〔施工編〕 <sup>8)</sup>	◆日平均気温が4°C以下になる場合には、寒中コンクリートとして扱う。 ・初期凍害を防止できる強度が得られるまで5°C以上に保ち、さらに2日間は0°C以上に保つ。 ・圧縮強度が4N/mm <sup>2</sup> 以上となれば、数回の凍結では凍害を受けることが比較的少ない。 ・構造物の温度を測定した場合には、試験結果をもとに積算温度から強度を推定することができる。 ◆日平均気温が25°Cを超える場合には、暑中コンクリートとして扱う。
土木学会 高炉スラグ微粉末を用いた コンクリートの施工指針 <sup>9)</sup>  土木学会 フライアッシュを用いた コンクリートの施工指針 (案) <sup>10)</sup>	◆養生期間中はコンクリート温度を10°C以上に保つ。 ・部材が薄い場合には、マスコンクリートでも7°C以上に保つ。 ◆日平均気温が4°C以下になる場合は寒中コンクリートとして施工を行う。 ・所定の圧縮強度が得られるまでコンクリート温度の最低値を下回らないように、また、所定の圧縮強度が得られても指定された温度で3日間以上、その後は0°C以上で2日間の養生を行う。 ・圧縮強度が5N/mm <sup>2</sup> 以上となれば数回の凍結では凍害を受けることが比較的少なく、10N/mm <sup>2</sup> 以上となれば厳しい気象作用を受けてもほとんど凍害を受けない。
日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009 <sup>11)</sup>	◆寒冷期には、コンクリートを寒気から保護し、打込み後5日間以上は2°C以上に保つ。 ・混合セメント使用時も5日間以上、早強ポルトランドセメント使用時は3日間以上とする。 ・2°Cであれば、通常のセメントで寒冷期の温度補正を行い、5日間で圧縮強度5N/mm <sup>2</sup> を確保できる。 ◆初期凍害を受けるおそれがある場合には、寒中コンクリートとしての施工を行う。 ・適用期間は、低温による初期凍害と強度発現の遅れを考慮し、打込み日を含む旬の日平均期間が4°C以下の期間及び、打込み後91日までの積算温度が840° D・Dを下回る期間とする。 ◆部材断面の中心部温度が外気より25°C以上高くなる場合にはマスコンクリートとしての対策を行う。
ACI 308R-01 Guide to Curing Concrete <sup>12)</sup>	◆初期凍害を防止するためには、圧縮強度が3.5N/mm <sup>2</sup> 以上となるまでコンクリートの凍結を防ぎ、追加的な水分を供給しないようにする。 ◆寒冷時には、湿潤状態にあるコンクリートは10°C以上に保つ。 ◆強度発現を推定する際には、ASTM C 1074のMaturity Methodを使用できる。
EN 13670:2009 Execution of concrete structures <sup>13)</sup>	◆コンクリート表面の温度は、コンクリート表面の圧縮強度が5N/mm <sup>2</sup> 以上となるまで0°Cを下回らないようにする。 ◆養生期間中の表層コンクリートの品質の経時的な向上は圧縮強度とMaturityの関係にもとづかなければならない。詳細な推定には、表面から10mmよりも浅い位置のコンクリート温度の測定値や日平均気温を用いたMaturityの計算値を用いてよい。

布は、W/B=40%の供試体とは傾向が異なった。高炉スラグ微粉末を85%混合したN35B85とN50B85やフライアッシュを30%あるいは40%混合したN50F30とN50F40では、表面からの距離が0~5mmの位置よりも5~10mmの位置で塩化物イオン濃度が大きくなった。特にN50B85においては、表面からの距離が10~15mmの位置で塩化物イオン濃度が最大となり、この位置の塩化物イオン濃度は普通ポルトランドセメント単味のN50よりも大きくなった。すなわち、混和材の混合率の高い供試体では、表層付近よりも供試体内部の塩化物イオン濃度が大きく、普通ポルトランドセメント単味のN35やN50よりも供試体内部の塩化物イオン濃度が大きくなる場合があった。

この原因を検証するため、W/B=50%の普通ポルトランドセメント単味のN50と各混和材の混合率を混合セメントのJIS規格のC種相当以上とした供試体の中性化深さと塩化物イオン濃度分布を図-9に示す。混和材を使用した供試体では中性化深さが普通ポルトランドセメント単味の供試体よりも大きく、中性化の進展位置よりも内部に塩化物イオンが浸透していた。コンクリートの中性化により外部から浸透した塩化物イオンが供試体内部に移動・濃縮し、この影響が各混和材の混合率の高い供試体で特に顕著に現れたためと考えられる。

同様に、W/B=35%の普通ポルトランドセメント単味のN35と各混和材の混合率を混合セメントのJIS規格のC種相当よりも高くした供試体の中性化深さと塩化物イオ

ン濃度分布を図-10 に示す。ここでも高炉スラグ微粉末を85%混合したN35B85では、普通ポルトランドセメント単味のN35よりも中性化深さが大きく、供試体内部の塩化物イオン濃度も大きくなった。ただし、W/B=50%の供試体の結果を示した図-9と比較すると、中性化深さと供試体内部の塩化物イオン濃度は小さくなる傾向にあった。W/Bの低減は、中性化とこれに伴う塩化物イオンのコンクリート内部への移動・濃縮の抑制に効果的であると考えられる。これらのことを踏まえると、混和材を用いたコンクリートで適切な中性化抵抗性を確保することは、中性化による鋼材腐食の防止に加えて、中性化に伴う塩化物イオンの供試体内部への移動・拡散の抑制にも不可欠と考えられる。

## 2.6 浸せき試験の結果との比較

国内では、コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を評価する試験方法として、JSCE-G 572に準拠した浸せき試験が採用されることが多い。しかしながら、使用する塩水の濃度(=10%)が、一般的な海水の濃度より高く、混和材を用いたコンクリートでも適切な評価が可能か明確ではない。そこで、低炭素型セメントを用いたコンクリートへの浸せき試験の適用性を検証するため、平成23年度の暴露供試体の製作時に浸せき試験用の円柱供試体を製作し、JSCE-G 572に準拠して浸せき試験を実施した<sup>9)</sup>。なお、浸せき試験の実施期間は6ヶ月間とした。

浸せき6ヶ月後の供試体の塩化物イオン濃度分布を図-11に示す。ここでは、W/B=35、50%の普通ポルトランドセメント単味のN35とN50に加えて、各混和材の混合率を混合セメントのJIS規格のC種相当以上とした供試体の結果を示す。いずれのW/Bの供試体においても、各混和材を使用した供試体の塩化物イオン浸透量は普通ポルトランドセメント単味の供試体よりも大幅に低下したことが分かる。図-9、10に示したように、混和材の混合率の高い暴露供試体では、中性化によって塩化物イオンが供試体内部へ移動・濃縮し、供試体内部の塩化物イオン濃度が普通ポルトランドセメント単味の供試体よりも大きくなるがあった。浸せき試験では塩水中に供試体を常時設置するため、このような現象は生じていない。このため、実環境で混和材の混合率が高く中性化の影響を受ける場合には、浸せき試験で示されるほどの混和材による塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果が得られない可能性があると考えられる。

なお、供試体表層が中性化した後の外部からの塩化物イオン浸透や中性化によって既に内部に移動・濃縮した塩化物イオンの経時的な濃度変化については今回の調査

結果の範囲内では明確ではなく、次回の平成27年度の解体調査で得られた結果を踏まえて検討を行う予定である。また、今回の浸せき試験では、一般的な海水よりも高い濃度の塩水(=10%)を使用したため、塩水の濃度の違いが浸せき試験の結果に与える影響については浸せき試験を別途行って検討を行っている。

## 2.7 まとめ

暴露20ヶ月後の供試体の中性化深さと塩化物イオン濃度の測定を行い、各種促進試験の結果と比較した。暴露供試体の中性化深さはW/Bが大きく混和材の混合率の高い供試体で大きく、雨掛かりのある屋外の暴露供試体では室内に保管した供試体よりも中性化深さが小さくなる傾向にあった。促進中性化試験から得られる中性化深さの推定値と暴露供試体の中性化深さの実測値は概ね比例関係にあり、屋外の暴露供試体の中性化深さの実測値は推定値よりも小さくなる傾向にあった。

一方、塩化物イオン浸透量は、中性化深さが小さい暴露供試体では、浸せき試験と同様に混和材の使用により少なくなった。しかし、混和材の混合率を混合セメントのJIS規格のC種相当以上とした暴露供試体では、中性化の影響を受けて塩化物イオン濃度が内部へ移動・濃縮しており、セメント単味の供試体よりも供試体内部の塩化物イオン濃度が高くなることもあった。こうした現象は供試体を塩水中に常時設置する浸せき試験では再現が困難であった。このため、混和材の使用による塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果を確保するためにも、中性化の進行を防止することが重要と考えられた。

なお、平成27年度に2回目の暴露供試体の解体調査を行い、中性化深さと塩化物イオン濃度の経時変化と各種促進試験の適用性について再検証する予定である。

## 3. 強度発現の温度依存性

一般に、コンクリートの強度発現は打込み後のコンクリートの温度履歴の影響を受けることが知られている。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュ等の混和材を用いたコンクリートは、セメント単味のコンクリートよりも打込み後の温度履歴の影響を受けやすく、例えば、冬季のような低温環境下では初期材齢の強度発現が大幅に遅れることが懸念される。一方、夏季のような高温環境下では、初期材齢の強度発現の遅れは見られないが、長期材齢において強度発現が滞る可能性がある。このため、初期材齢の温度ひび割れの発生リスクを照査する場合や、長期材齢の構造体コンクリートの圧縮強度を予測する場合には、温度履歴の影響を適切に考慮してコンク



表-3 コンクリート配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					s/a (%)	
		W	B = OPC + BS4 + FA			S		G
			OPC	BS4	FA			
N50	50	165	330			827	968	47.2
N50B50			165	165 (50%)		815		46.8
N50B70			99	231 (70%)		810		46.6
N35B70	35		141	330 (70%)		688		42.6
N50F20	50		264		66 (20%)	807		46.6
N50F30			231		99 (30%)	797		46.2
N35F30			35	330		141 (30%)		670

※ 単位水量と単位粗骨材量を全配合で統一

※ 混和材の単位量の()内の値は結合材に占める各混和材の分量の割合を表示

※ OPC：普通ポルトランドセメント(3.16g/cm<sup>3</sup>, 3340cm<sup>2</sup>/g), BS4：高炉スラグ微粉末 4000(2.89g/cm<sup>3</sup>, 4410cm<sup>2</sup>/g), FA：フライアッシュⅡ種(2.08g/cm<sup>3</sup>, 3810cm<sup>2</sup>/g)

※ 細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.23%)

※ 粗骨材：茨城県笠間産砕石 5号(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.43%), 砕石 6号(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.46%)を均等に混合

※ 化学混和剤：スランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%を目標値として使用量を調整。練上がり温度 30℃では遅延形、その他では標準形を使用。

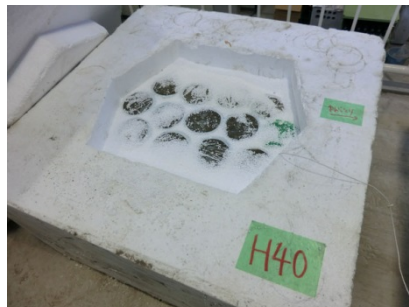
表-4 フレッシュ性状

配合	練上がり温度 30℃			練上がり温度 20℃			練上がり温度 10℃			練上がり温度 5℃		
	Slump (cm)	Air (%)	T (°C)	Slump (cm)	Air (%)	T (°C)	Slump (cm)	Air (%)	T (°C)	Slump (cm)	Air (%)	T (°C)
N50	12.5	5.7	32.4	12.5	4.9	19.6	14.0	4.4	10.3	14.0	5.1	4.5
N50B50	13.5	4.1	32.7	11.5	4.0	19.6	12.5	4.5	10.8	13.0	4.2	4.8
N50B70	13.0	4.5	32.9	12.5	4.2	19.6	11.5	4.3	10.7	11.0	4.0	5.0
N35B70	11.0	3.4	33.2	9.5	3.9	20.0	11.5	4.0	11.2	10.5	4.5	5.5
N50F20	12.5	5.3	33.1	12.5	4.7	20.2	13.5	4.0	11.2	13.5	4.7	5.9
N50F30	11.5	4.5	33.8	12.0	5.1	20.1	12.0	4.4	11.3	14.5	4.9	6.1
N35F30	13.0	3.1	34.5	14.0	3.8	20.6	11.0	5.2	11.5	13.0	3.7	6.6

※ Slump：スランプ(JIS A 1101), Air：空気量(JIS A 1128), T：練上がり直後のコンクリート温度



(A)温度一定の室内に保管した供試体



(B)発泡スチロール製の容器を用いて簡易断熱養生を行った供試体



写真-1 円柱供試体の養生状況

リートの強度発現を推定することが重要である。

平成 26 年度は、練上がり温度とその後の養生温度を変化させた円柱供試体の圧縮強度試験を行い、打込み後の温度履歴が低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度発現に与える影響を把握するとともに、有効材齢を用いた強度発現の推定精度を検証した。

### 3. 1 養生期間中のコンクリート温度に関する規定

日米欧の基規準類における養生期間中のコンクリート温度に関する規定を表-2 に示す。いずれの基規準類にお

いても、寒冷時には初期凍害を防止するため、コンクリート温度の最低値や初期強度の目標値、養生期間の目安などを規定している。また、一部では、Maturity の考え方にもとづく方法により、打込み後のコンクリートの温度履歴から強度発現を推定することができることを記載している。Maturity の考え方にもとづく代表的な強度発現の推定方法としては、コンクリートの温度履歴を用いて材齢を有効材齢あるいは積算温度に換算する方法がある。例えば、fib Model Code 2010<sup>4)</sup>は有効材齢の算出式と

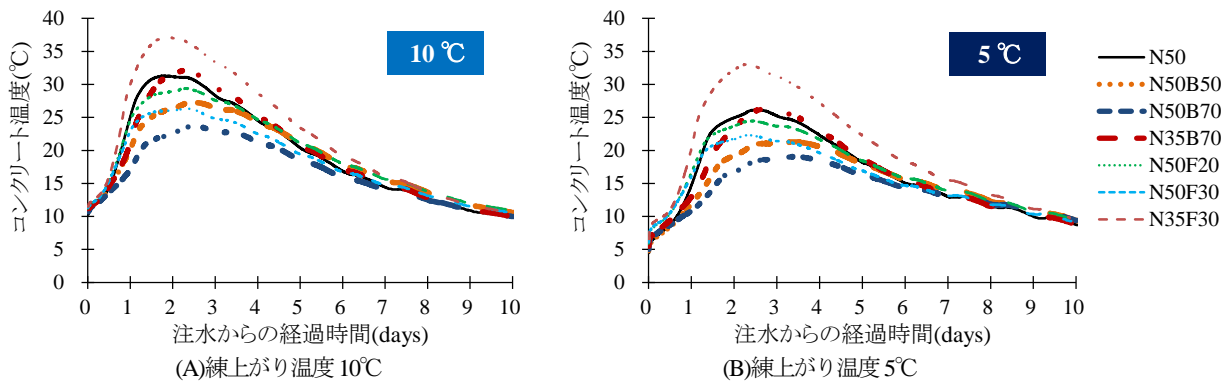


図-12 簡易断熱養生を行った供試体の温度履歴

して式(2)を採用しており、コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>15)</sup>やマスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>16)</sup>も同様の式を記載している。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (2)$$

ここで、 $t_e$ ：有効材齢、 $\Delta t_i$ ：ある一定のコンクリート温度が継続する期間、 $T(\Delta t_i)$ ： $\Delta t_i$ の間継続するコンクリート温度である。

ただし、fib Model Code 2010 では、式(2)がセメントの水和反応の活性化エネルギーを33kJ/molと仮定して導出されたことから、ポゾラン活性を示す混和材の混合率の高いセメントを使用する場合や設計時に温度の影響が重要となる場合には、関係式を実験により別途定めるべきと指摘している。なお、活性化エネルギーを実験から求める方法としてはASTMC 1074の方法がある。ここでは化学反応の進行速度の温度依存性を経験的に予測可能なアレニウス則にもとづき、異なる養生温度で製作した供試体の圧縮強度試験の結果から活性化エネルギーを算出する方法を提示している。

### 3.2 実験の概要

コンクリートの練上がり温度の目標値を30、20、10、5°Cとした円柱供試体(φ100×200mm)を製作し、所定の材齢で圧縮強度を測定した。コンクリート配合を表-3、フレッシュ性状を表-4に示す。

供試体は、コンクリート打込み直後から封緘状態として2種類の温度環境下に保管した。温度一定の恒温室に保管した場合、マスコンクリートで想定される水和発熱による温度履歴を再現するため簡易的な断熱処理を行った場合の2種類である。

温度一定の恒温室に保管した場合は、練上がり温度の目標値を30、20、10、5°Cとした全ケースにおいて、室温を練上がり温度の目標値と同一とした恒温室に供試体を保管した(写真-1(A))。配合ごとに温度測定用の円柱供試体(φ100×200mm)を1個ずつ準備し、中心部に熱電対

を埋設してコンクリート温度を測定した。圧縮強度試験は、材齢1、2、3、7、28、56、91日の7時点で行った。ただし、練上がり温度の目標値を5°Cとした場合には材齢1日での脱型が困難であったため、材齢2日以降で圧縮強度試験を行った。なお、封緘状態で供試体を保管したため、恒温室の湿度の管理は行っていない。

一方、マスコンクリートで想定される水和発熱による温度履歴を再現するために簡易的な断熱処理を行った場合は、特に低温環境下で、混和材を用いたコンクリートの強度発現の温度依存性を明らかにするため、練上がり温度の目標値を10、5°Cとしたケースにおいて、JASS 5 T-606<sup>11)</sup>を参考として、発泡スチロール製の容器(発泡率90倍、厚さ200mm以上)に供試体を保管し、水和発熱に起因する温度履歴を再現した(写真-1(B))。配合ごとに13個の供試体を容器内に保管し、1個をコンクリート温度の測定、残り12個を圧縮強度の測定に使用した。圧縮強度試験は、材齢3、7、28、91日の4時点で行った。

なお、本報告書では、練上がり温度の目標値を5°Cとしたケースについては材齢56日までの結果を示す。

### 3.3 コンクリートの温度履歴

温度一定の室内に保管した供試体の温度は、材齢1日までの期間において表-4の練上がり直後の温度から約3°Cほど増加したが、その後は恒温室の室温とほぼ同程度の温度で推移した。

次に、練上がり温度の目標値を10、5°Cとして簡易断熱養生を行った供試体の温度履歴を図-12に示す。W/B=50%の供試体の温度履歴を比較すると、ポルトランドセメント単味のN50よりも混和材を使用した供試体の温度が低くなり、各混和材の混合率を高めるほど最高温度が低下する傾向にあった。一方で、W/B=35%としたN35B70とN35F30は単位結合材量が多く、N50よりも最高温度が高くなった。特にN35F20はN50よりも大幅に温度が高くなったが、この原因はN35F30とN50の単位セメント量が等しく、さらにN35F30ではフライアッシュ

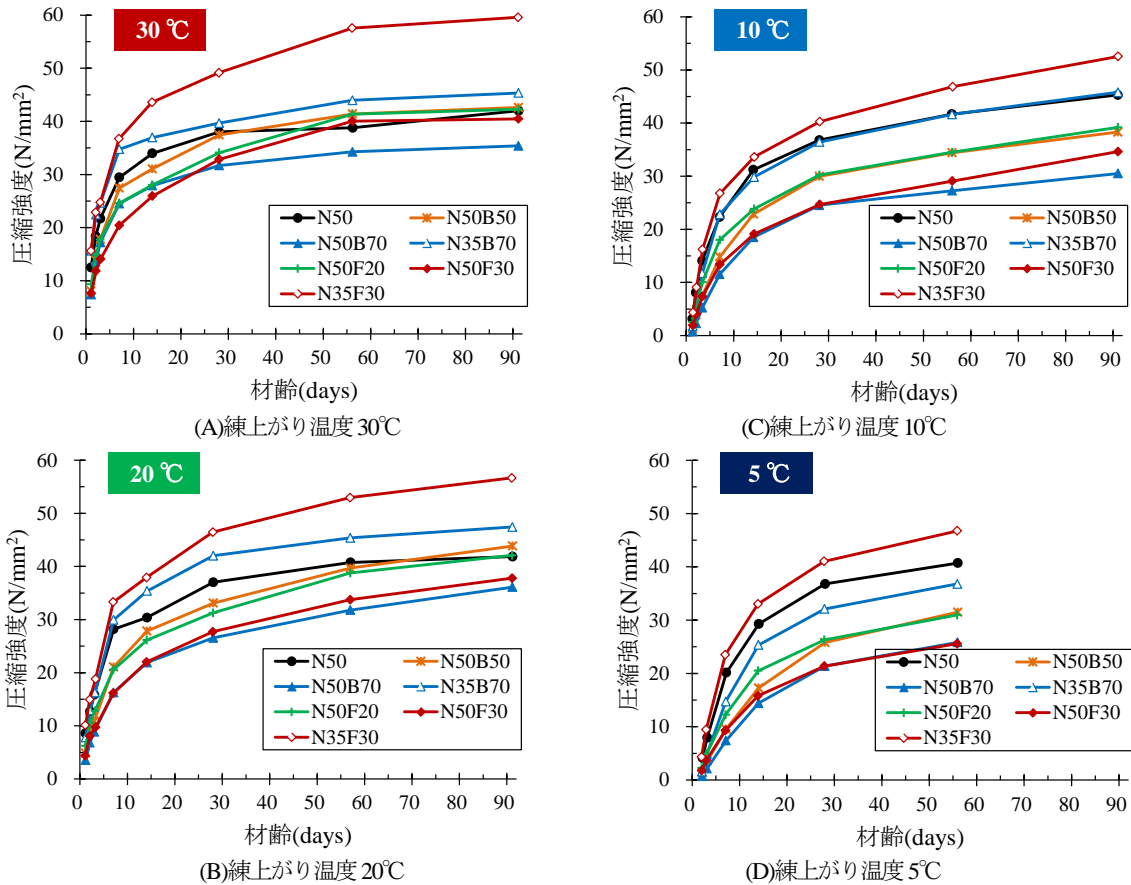


図-13 温度一定の室内に保管した供試体の圧縮強度

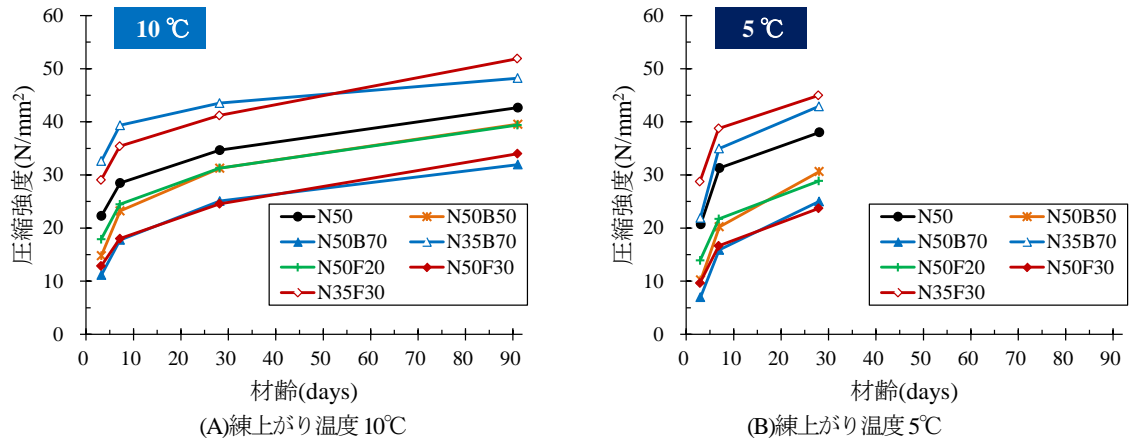


図-14 簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度

を使用し、単位結合材量が多かったためと考えられる。また、10°Cと5°Cの温度履歴を比較すると、10°Cよりも5°Cの場合に、最高温度が低く、また、最高温度に到達するまでの注水からの経過時間が長くなる傾向にあった。

**3. 4 圧縮強度の推移：温度一定の室内に保管の場合**

練上がり温度の目標値を 30, 20, 10, 5°Cとして、温度一定の室内に保管した供試体の圧縮強度の推移を図-13 に示す。いずれの配合においても、養生期間中の室温を高くした場合ほど、材齢 28 日までの圧縮強度の増加

が速くなったが、その後の圧縮強度の増加量は小さくなった。

W/B=50%の供試体同士の比較では、材齢 28 日までの圧縮強度は、各混和材の混合率の高い供試体ほど小さく、普通ポルトランドセメント単味の N50 との差は養生期間中の室温を低くした場合ほど大きくなる傾向にあった。その後、材齢 91 日の時点では、30°Cでは高炉スラグ微粉末を 70%混合した N50B70、20°Cでは N50B70 とフライアッシュを 30%混合した N50F30、10°Cでは N50B70 と

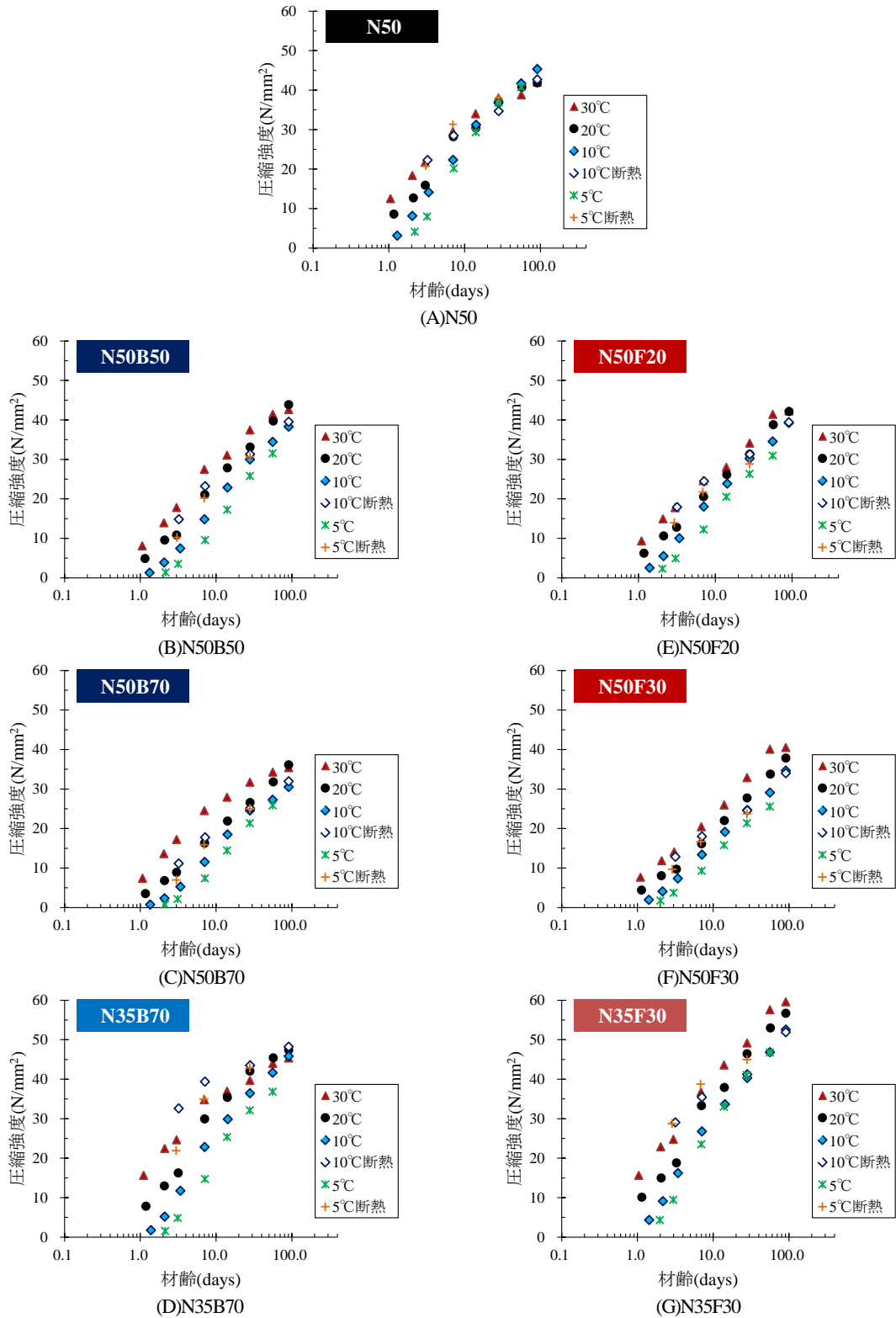


図-15 圧縮強度と材齢の関係

N50F30, 高炉スラグ微粉末を 50%混合した N50B50, フライアッシュを 20%混合した N50F20 において、普通ポルトランドセメント単味の N50 よりも圧縮強度が大幅に小さくなった。材齢 91 日の時点においても、養生期間中の室温が低いほど N50 より圧縮強度が小さい供試体が増

え、N50 との圧縮強度の差が各混和材の混合率の高い供試体で大きくなる傾向にあった。すなわち、W/B=50%の供試体同士の比較では、混和材を用いたコンクリートの強度発現は、普通ポルトランドセメント単味の供試体と比較して養生期間中の温度履歴の影響を受けやすく、低



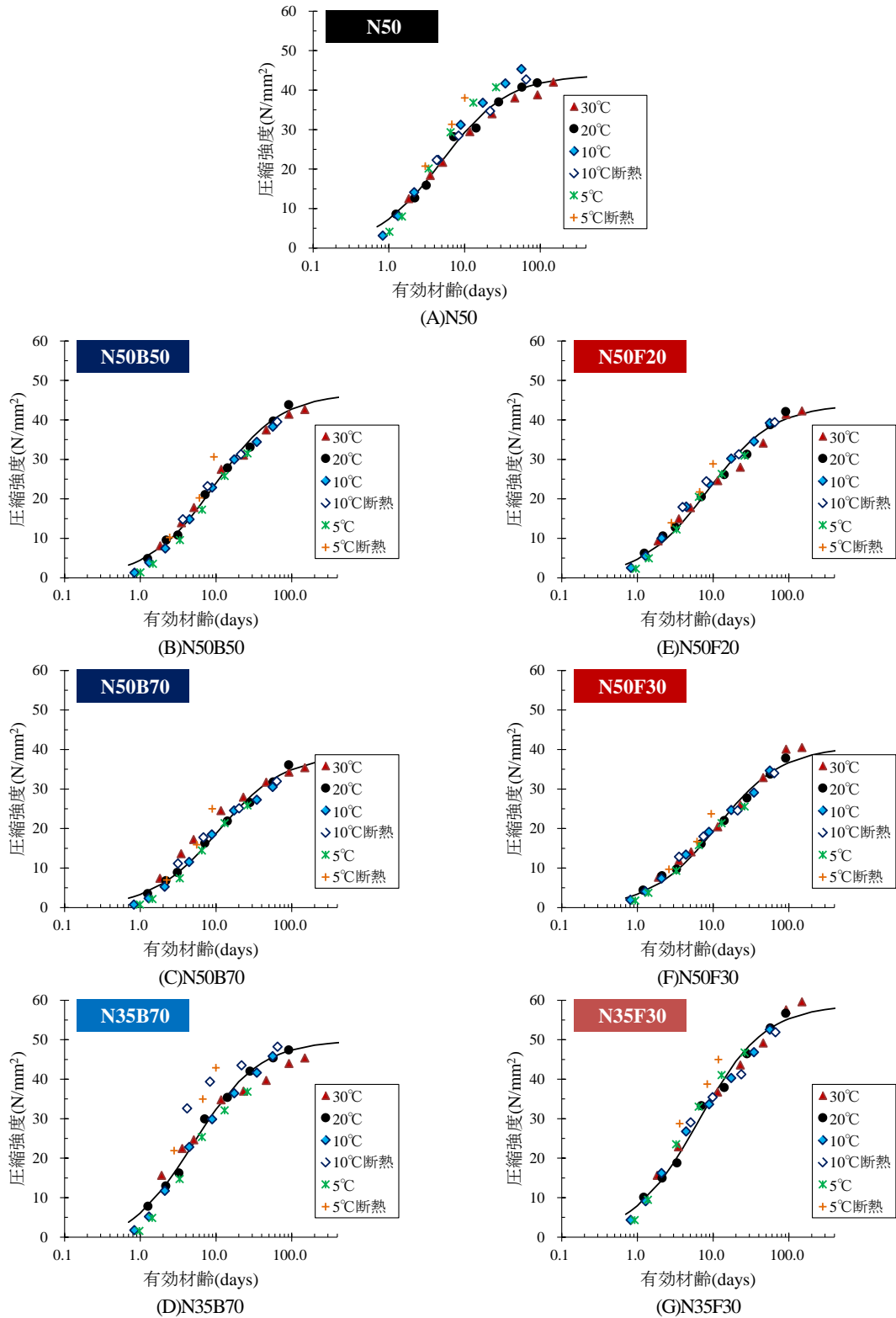


図-16 圧縮強度と有効材齢の関係

温時ほど強度発現が遅れると考えられる。

また、W/B=35%の供試体の圧縮強度は他のW/B=50%の供試体よりも大きくなる傾向にあったが、高炉スラグ微粉末を70%混合したN35B70では、養生期間中の室温を30°Cあるいは20°Cとした場合はN50より大きく、10°C

とした場合はN50と同程度に、5°Cとした場合はN50より小さくなった。混和材の混合率の高い配合で圧縮強度を確保する方法としてW/Bを低減することが考えられるが、N35B70では養生期間中の室温によって圧縮強度がN50より大きくなる場合と小さくなる場合があった。

一方で、フライアッシュを 30%混合した N35F30 の単位セメント量は N50 と同一であり、N35B70 ほど養生期間中の室温の影響を受けていない。このため、特に混和材の混合率を高めて単位セメント量が少ない供試体では、W/B の大小にかかわらず、養生期間中の温度履歴が強度発現に与える影響が大きくなると考えられる。

3. 5 圧縮強度の推移：簡易断熱養生の場合

練上がり温度の目標値を 10、5℃として、簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度の推移を図-14 に示す。図-13 の温度一定の室内に保管した供試体の結果と比較すると、簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度は、材齢 3、7 日の時点では温度一定の室内に保管した供試体よりも大幅に大きくなったが、材齢 28、91 日の時点ではこの差が小さくなった。簡易断熱養生を行った供試体では、図-13 に示したように練上がり後にコンクリート温度が上昇し、温度一定の室内に保管した供試体よりも初期材齢において圧縮強度の増加量が大きくなったためと考えられる。

3. 6 圧縮強度と材齢の関係

配合ごとの圧縮強度の推移を図-15 に示す。ここで、横軸の材齢は注水からの経過時間とした。いずれの配合においても、温度一定に管理した恒温室に保管した供試体の圧縮強度は、初期材齢では恒温室の温度が低いほど小さくなったが、その後の推移は混和材の使用有無や種類によって異なった。普通ポルトランドセメント単味の N50 の圧縮強度は、材齢 28 日の時点では練上がり温度やその後の保管方法にかかわらず概ね同程度となり、材齢 91 日の時点においては保管時の恒温室の温度が低い供試体が恒温室の温度の高い供試体を上回った。

一方、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた供試体の圧縮強度の発現は、特に低温時に N50 と比べて遅くなった。W/B=50%の N50B50、N50B70、N50F20、N50F30 の圧縮強度は、材齢 28 日の時点では保管時の恒温室の温度が低いほど小さく、材齢 91 日の時点においても保管時の恒温室の温度を 10℃とした場合に最も小さくなった。高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートの強度発現の温度依存性が普通ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも強く、低温時の強度発現の遅れが材齢 91 日の長期材齢でも生じたためと考えられる。

W/B=35%とした N35B70 の圧縮強度は、材齢 91 日の時点では保管時の恒温室の温度にかかわらず概ね同程度となったが、材齢 7 日までの低温時の強度発現は N50 よりも遅くなった。このため、特に混和材の混合率を高

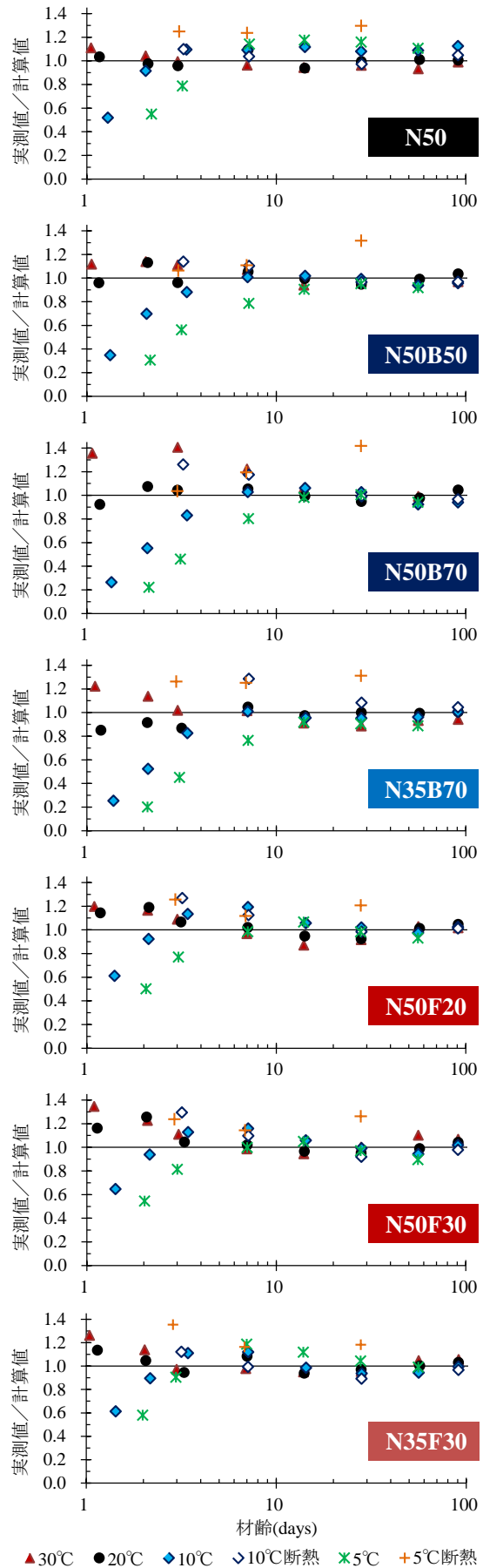


図-17 実測値と計算値の比較

て単位セメント量が少ない供試体では、W/Bを低減しても普通ポルトランドセメント単味の供試体と比較して低温時の初期材齢の強度発現が遅れる傾向にあると考えられる。N35F30はN50と同一の単位セメント量に加えてフライアッシュを使用しているため、前述したようにN50よりも圧縮強度が大きく、材齢91日においても強度発現が継続していた。長期材齢での強度発現にはフライアッシュのポズラン反応が寄与していた可能性も高い。

また、温度一定の恒温室に保管した供試体と簡易断熱養生を行った供試体を比較すると、初期材齢の場合ほど簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度が温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度よりも大きくなったが、長期材齢では両者の差が小さくなった。マスコンクリートのように水和発熱によって打込み後のコンクリートの温度が上昇する場合には、練上がり時の温度が低温であっても、初期材齢の強度発現が進むと考えられる。

### 3.7 圧縮強度と有効材齢の関係

配合ごとの圧縮強度と有効材齢の関係を図-16に示す。ここでは、式(2)を用いて有効材齢を計算し、20℃に管理した恒温室に保管した供試体の圧縮強度から式(3)を用いて求めた回帰線も併記した。

$$f'_{c, test}(t_e) = \frac{t_e - t_0}{a + b \cdot (t_e - t_0)} f'_{c, test}(91) \quad (3)$$

ここで、 $f'_{c, test}(t_e)$ : 20℃に管理した恒温室に保管した供試体の圧縮強度、 $t_e$ : 注水からの有効材齢、 $a$ ,  $b$ ,  $t_0$ : 回帰分析により求めたパラメータ、 $f'_{c, test}(91)$ : 20℃に管理した恒温室に保管した供試体の材齢91日の圧縮強度である。

いずれの配合においても、有効材齢で整理することにより、圧縮強度の実測値と回帰線の傾向が概ね一致した。ただし、実測値と回帰線の関係を厳密に比較すると、特に低温時において初期材齢の圧縮強度の実測値が回帰線を下回っていたこと、簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度の実測値の多くが回帰線を上回っていたこと、材齢91日の時点の圧縮強度が保管時の温度にかかわらず同等となった場合には高温時の実測値が回帰線を下回ったことなどが分かる。

次に、圧縮強度の実測値と式(3)による計算値の比を図-17に示す。10℃と5℃に管理した恒温室に供試体を保管した場合、材齢7日より前の時点で実測値/計算値が1より小さく、特に5℃に管理した恒温室に保管した場合に実測値/計算値が小さくなる傾向にあった。このため、打込み後も低温状態が継続するコンクリートでは、20℃一定で保管した供試体の試験結果から推定される圧縮強度の計算値よりも圧縮強度が小さくなる可能性が高いと

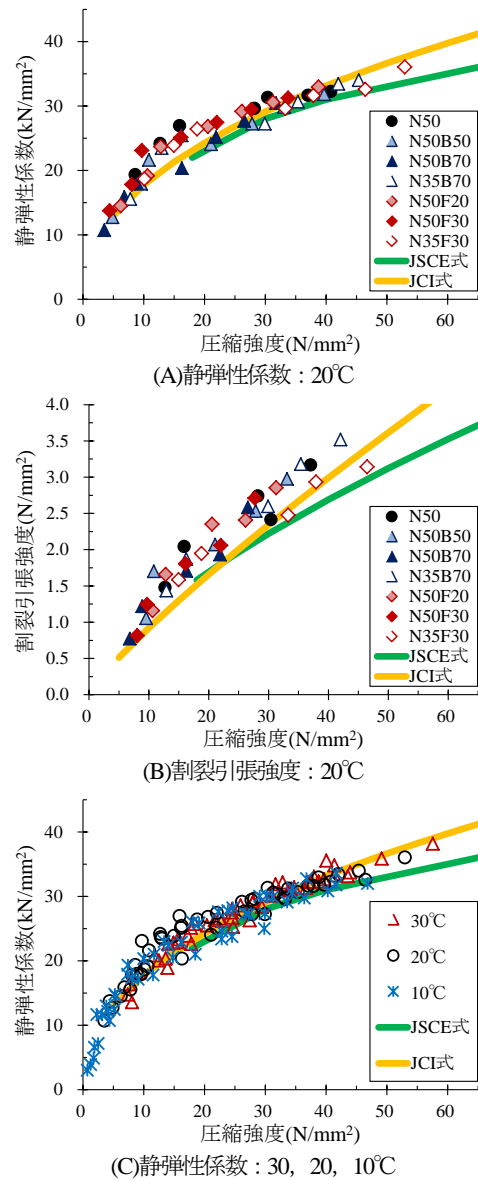


図-18 静弾性係数と割裂引張強度

考えられる。一方、練上がり温度を10℃と5℃として簡易断熱養生を行った場合には、実測値/計算値は1よりも大きくなった。打込み時の温度が低温であっても、その後の水和発熱によってコンクリート温度が上昇する場合には、20℃一定で保管した供試体の試験結果から推定される圧縮強度の計算値よりも圧縮強度が大きくなると考えられる。

### 3.8 静弾性係数と割裂引張強度

圧縮強度試験に加えて、静弾性係数と割裂引張強度の測定を行った結果を図-18に示す。同図には、コンクリート標準示方書〔設計編〕(図中でJSCE式と表示)<sup>15)</sup>やマスコンクリートのひび割れ制御指針(図中でJCI式と表示)<sup>16)</sup>に記載された圧縮強度と静弾性係数、割裂引張強度の関係式による計算値も併記した。静弾性係数の測定は、

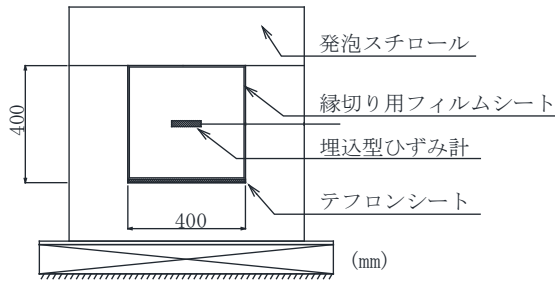


図-19 マスブロック供試体の形状

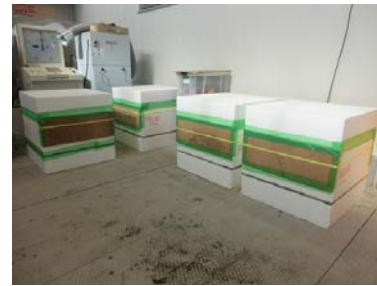


写真-2 マスブロック供試体の試験状況

表-5 コンクリート配合とフレッシュ性状

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							フレッシュ性状			凝結時間	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S	G	Slump (cm)	Air (%)	T (°C)	始発	終結
			HPC	BS4	BS6	FA							
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	15.5	5.7	20.1	5h49m	7h44m
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700		14.0	3.8	20.8	5h56m	7h52m
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695		12.0	4.5	21.0	4h38m	6h44m
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682		12.0	4.0	21.0	6h12m	8h42m

- ※ 単位水量と単位粗骨材量を全配合で統一
- ※ 混和材の単位量の( )内の値は結合材に占める各混和材の分量の割合を表示
- ※ HPC：早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,580cm<sup>2</sup>/g), BS4：高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,410cm<sup>2</sup>/g), BS6：高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=6,170cm<sup>2</sup>/g), FA：フライアッシュ II 種(密度=2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,810cm<sup>2</sup>/g)
- ※ 細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.23%)
- ※ 粗骨材：茨城県笠間産砕石 5 号(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.43%)と砕石 6 号(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.46%)を均等に混合
- ※ 化学混和剤：高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)と空気連行剤を使用
- ※ Slump：スランプ(JIS A 1101), Air：空気量(JIS A 1128), T：練上がり直後のコンクリート温度
- ※ 凝結時間：JIS A 1147 に準拠して測定

練上がり温度の目標値を 30, 20, 10°Cとして温度一定の恒温室に保管した円柱供試体(φ100×200mm)を用い、材齢 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 日で圧縮強度試験と同時に JIS A 1149 に準拠して実施した。割裂引張強度の測定は、練上がり温度の目標値を 20°Cとして温度一定の恒温室に保管した円柱供試体(φ100×200mm)を用い、材齢 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56 日で JIS A 1113 に準拠して実施した。

図-18(A)は20°Cの恒温室に保管した供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係、図-18(B)は同様に製作した供試体の圧縮強度と割裂引張強度の関係である。これらの結果によると、混和材の使用の有無にかかわらず、圧縮強度と静弾性係数、割裂引張強度の関係は、JSCE 式や JCI 式と同傾向であったことが分かる。また、図-18(C)は温度の異なる恒温室に保管した供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係である。この結果によると、保管中の恒温室の温度にかかわらず、圧縮強度と静弾性係数の傾向は概ね同様であり、JSCI 式や JCI 式と同傾向であることが読み取れる。各混和材を用いたコンクリートの圧縮強

度と静弾性係数、割裂引張強度の関係は、既存の関係式により概ね推定できると考えられる。

### 3.9 まとめ

練上がり温度や打込み後の温度履歴の異なる供試体を製作して、混和材を用いたコンクリートの強度発現の温度依存性について検討した。混和材を用いたコンクリートの強度発現は普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して温度依存性が高く、特に低温時に強度発現が遅れる傾向にあった。また、打込み後の温度履歴の異なる供試体の圧縮強度をコンクリートの温度履歴から計算した有効材齢を用いて整理すると、有効材齢を用いることにより強度発現を概ね再現することができたが、厳密には低温時の初期材齢で圧縮強度の実測値が小さくなる傾向にあった。このため、特に打込み後も低温状態が継続するような場合には、強度発現が遅れる可能性が高いと考えられる。ただし、打込み後の水和発熱による温度履歴を再現するために簡易断熱養生を行った供試体では、練上がり温度が低い場合においても強度発現の遅



れは見られなかった。また、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数、割裂引張強度の関係については、混和材の使用の有無にかかわらず、既存の関係式と概ね同傾向であることが分かった。

#### 4. マスブロック供試体の水和発熱特性と自己収縮特性

コンクリートの水和発熱特性と自己収縮特性は、温度ひび割れの発生リスクを照査する際に不可欠な設計用値である。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートの水和発熱特性と自己収縮特性は、ポルトランドセメント単味のコンクリートとは異なる傾向を示す可能性が高い。例えば、高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは打込み後の水和発熱によるコンクリートの温度履歴の影響を受けやすいことが知られている<sup>16)</sup>。このため、コンクリートの温度ひび割れを制御するためには、各混和材を用いたコンクリートの水和発熱特性と自己収縮特性を把握した上で、必要に応じて適切な対策を講じることが望まれる。平成25年度は、発泡スチロール製の型枠で簡易断熱を行った供試体の温度履歴と自己収縮ひずみの測定を行った。

##### 4.1 実験の概要

各混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみに打込み後の温度履歴が与える影響を把握することを目的として、発泡スチロール(厚さ200mm、発泡倍率90倍)で簡易断熱養生を行うことによりマスコンクリートを模擬したマスブロック供試体(400×400×400mm、**図-19**、**写真-2**)と、「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法<sup>17)</sup>」を参考とした小型供試体(100×100×400mm)において、コンクリート温度と自己収縮ひずみを測定した。マスブロック供試体は温湿度の管理のされていない実験室、小型供試体は温度20℃の実験室でコンクリートの打込み直後から封緘状態に保ち、各供試体の中心部に水平配置した埋込型ひずみ計で自己収縮ひずみを測定した。また、各供試体の中心部でコンクリート温度を測定した。

コンクリート配合とフレッシュ性状を表-5に示す。ここでは、材齢3日の圧縮強度を30N/mm<sup>2</sup>以上とするために、W/Bを早強ポルトランドセメント単味のH40で40%、各混和材を用いたH35B430、H35B650、H35F20で35%とした。始発および終結までの凝結時間は、H40と比較すると、H35B650で短く、H35F20で長くなる傾向にあった。

##### 4.2 実験の結果

マスブロック供試体の中心部で測定したコンクリート温度を**図-20**に示す。ここでは横軸の基点を凝結試験で

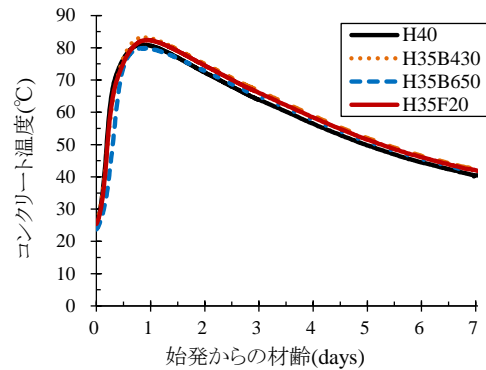
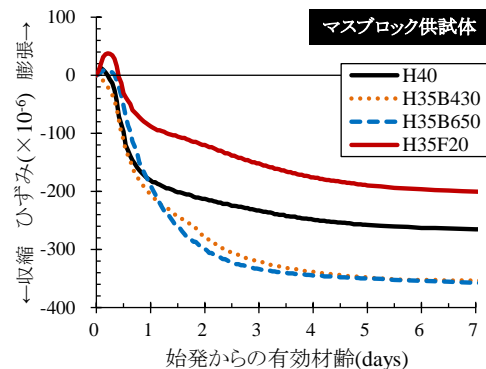
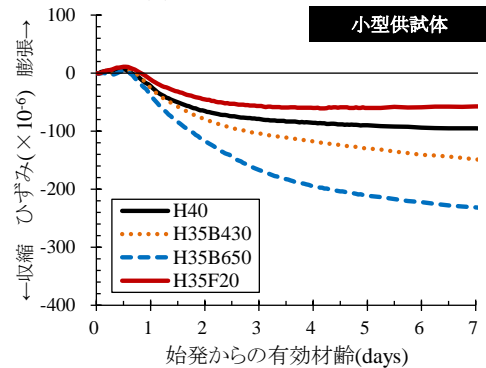


図-20 マスブロック供試体の中心部の温度



(A)マスブロック供試体



(B)小型供試体

図-21 自己収縮ひずみの推移

得られた始発時間として整理した。配合の違いにかかわらず、温度上昇曲線は概ね同一形状となり、供試体中心部のコンクリート温度は約80℃まで上昇した後に低下した。一般に混和材の使用は水和発熱の低減に寄与するとされているが、今回のように初期材齢の圧縮強度を確保するために混和材を用いた配合でW/Bを低下させた場合には、混和材の使用による水和発熱の低減効果は必ずしも明確には現れなかった。一方、小型供試体の中心部のコンクリート温度は25℃程度まで増加したが、その後は概ね20℃前後で推移した。両供試体に用いたコンクリートの容積が異なるため厳密な比較は困難だが、簡易断熱処理の有無によってコンクリートの温度履歴は大幅

表-6 コンクリート配合とフレッシュ性状

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュ性状			
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S	G	Slump (cm)	Air (%)	T (°C)
			HPC	BS4	BS6	FA					
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	12.0	3.8	22.1
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700		11.0	4.2	22.2
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695		10.5	3.7	21.9
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682		14.5	5.2	22.3

- ※ 単位水量と単位粗骨材量を全配合で統一
- ※ 混和材の単位量の()内の値は結合材に占める各混和材の分量の割合を表示
- ※ HPC：早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,570cm<sup>2</sup>/g), BS4：高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,460cm<sup>2</sup>/g), BS6：高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=6,020cm<sup>2</sup>/g), FA：フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g)
- ※ 細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.23%)
- ※ 粗骨材：茨城県笠間産砕石 5 号(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.43%)と砕石 6 号(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.46%)を均等に混合
- ※ 化学混和剤：高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)と空気連行剤を使用
- ※ Slump：スランプ(JISA 1101), Air：空気量(JISA 1128), T：練上がり直後のコンクリート温度

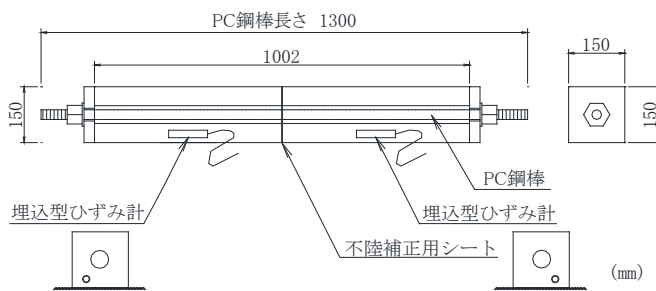


図-22 持続载荷試験の供試体形状

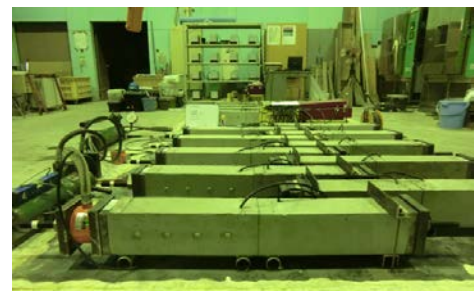
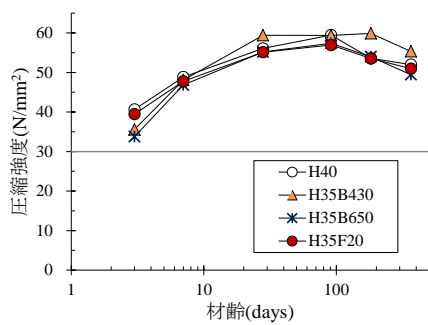
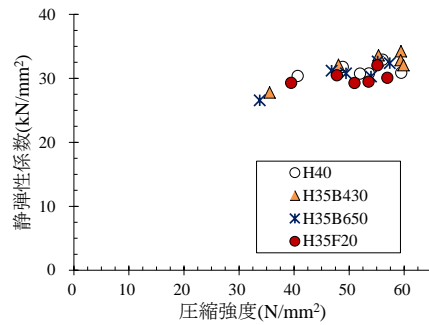


写真-3 持続载荷試験の実施状況



(A) 圧縮強度の推移



(B) 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-23 圧縮強度と静弾性係数

に異なった。

マスブロック供試体と小型供試体の自己収縮ひずみの測定結果を図-21 に示す。マスブロック供試体と小型供試体とで打込み後の温度履歴が大幅に異なったため、ここでは横軸を式(2)で求めた有効材齢で整理した。また、各供試体の自己収縮ひずみの増加が特に若材齢で顕著であったため、有効材齢で7日までの結果を示した。

早強ポルトランドセメント単味のH40と各混和材を用

いた供試体を比較すると、自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 で大きく、フライアッシュを用いた H35F20 で小さくなった。この傾向は、マスブロック供試体と小型供試体の両方で確認することができる。しかしながら、有効材齢7日までの両供試体の自己収縮ひずみの進行速度と収束値を比較すると、マスブロック供試体では自己収縮ひずみの進行速度と収束値が大幅に大きく、この傾向が特に高炉スラグ微粉末を

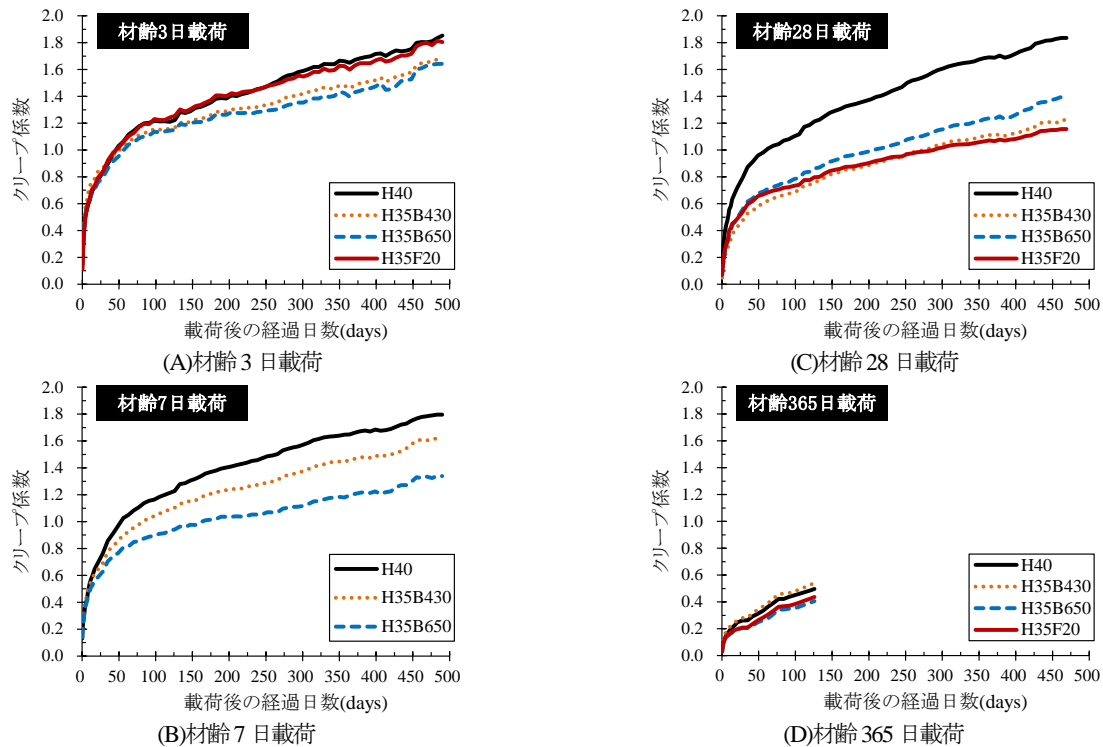


図-24 クリープ係数の推移

用いた供試体で明確に現れた。コンクリートの温度履歴を加味した有効材齢を用いても、最高温度が約 $80^{\circ}\text{C}$ の高温履歴を受けたマスブロック供試体と最高温度が $25^{\circ}\text{C}$ 程度に留まった小型供試体の自己収縮ひずみは傾向が異なった。このため、雰囲気温度を $20^{\circ}\text{C}$ 一定とした小型供試体の実験結果のみからでは、高温履歴を受けるコンクリートの任意材齢における自己収縮ひずみの推定が困難となる可能性が高い。マスコンクリートの温度ひび割れ発生リスクを評価する際には、混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみの特性を適切に把握することが重要と考えられる。

なお、実際のコンクリート構造物において初期ひび割れの発生リスクを適切に評価するためには、水和発熱特性や自己収縮特性に加えて、各混和材を使用した場合の強度発現や若材齢クリープによる応力緩和の影響などを適切に考慮することが必要であり、この点については今後検討を行う予定である。

## 5. 材齢490日までの持続載荷試験によるクリープ特性

コンクリートのクリープ係数は、プレストレストコンクリート構造物のプレストレスの減少量や不静定構造物の不静定力の計算を行うために不可欠な設計用値である。しかしながら、各混和材を用いたコンクリートのクリープ特性は明確ではなく、特に道路橋の上部構造では混和材の積極使用を妨げるひとつの課題となっていた。この

ため、本研究課題では平成24年度から早強セメントの一部を各混和材で置換したコンクリートの持続載荷試験を開始した<sup>18)</sup>、<sup>19)</sup>。平成25年度は、材齢365日の時点で新たな供試体に圧縮力を負荷するとともに、持続載荷試験を材齢490日まで継続し、混和材を用いたコンクリートのクリープ特性について考察を加えた。

### 5.1 実験の概要

コンクリート配合とフレッシュ性状を表-6に示す。ここでも、W/Bは、早強ポルトランドセメント単味のH40で40%、各混和材を用いたH35B430、H35B650、H35F20で35%とした。一般的な現場打ちのプレストレストコンクリート構造物での湿潤養生日数やプレストレス力の導入材齢を踏まえ、材齢3日まで養生マットを用いて湿潤養生を行った直後に $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度を確保でき、さらには配合間のW/Bの差が過大とならないように、圧縮強度の発現を事前に確認して決定した。

持続載荷試験は、2体の角柱供試体( $150 \times 150 \times 500\text{mm}$ , 断面中央に $\phi 48\text{mm}$ の円形孔あり)をPC鋼棒で連結し、このPC鋼棒を緊張することにより所定の圧縮応力度を供試体に負荷して行った(図-22, 写真-3)。載荷開始後は、PC鋼棒を定期的に再緊張することにより、PC鋼棒の緊張力を目標値の $\pm 3\%$ の範囲内で管理し、供試体に負荷した圧縮応力度が概ね一定となるようにした。圧縮応力度は、同時に製作した円柱供試体( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ )の圧縮強度試験の結果をもとに、材齢3日に載荷を開始した供試

体で圧縮強度の20%、材齢7, 28, 365日に载荷を開始した供試体で圧縮強度の30%とした。また、圧縮力を負荷した供試体のコンクリートひずみの測定値からクリープひずみを抽出するため、これと同一形状の圧縮力を負荷しない供試体も製作してコンクリートひずみを測定した。なお、連結した2体の供試体は同一配合のものであり、埋込型ひずみ計で測定したコンクリートひずみの平均値を用いて検討を行った。

供試体の養生方法は、材齢3日まで20°Cの室内で養生マットを用いた湿潤養生を行い、その後は温湿度の管理のされていない実験室内で気中養生を行った。平成25年度は、材齢365日の時点で新たな供試体に圧縮力を負荷するとともに、材齢490日まで持続载荷試験を継続した。この期間における実験室の温度の平均値は18.8°C、湿度の平均値は53.5%であった。

## 5.2 実験の結果

圧縮強度試験の結果を図-23に示す。圧縮強度試験は、材齢3, 7, 28, 91, 182, 365日で行った。図-23(A)によると、圧縮強度は、全配合において、材齢3日で目標値の30N/mm<sup>2</sup>を超えた。その後は、若干のばらつきがあるが、材齢91日まで増加し、材齢182日から材齢365日にかけて若干減少した。圧縮強度が若干減少した原因としては、長期材齢では圧縮強度の増加量自体が少ないことに加えて、供試体の実験室内で長期にわたって乾燥状態に置かれたことが挙げられる。配合間の比較では、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650の圧縮強度が材齢3日では他の配合より若干小さいが、その後は同程度か若干大きくなった。また、図-23(B)によると、円柱供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係は、混和材の使用の有無にかかわらず、概ね同様の関係にあった。

材齢3, 7, 28, 365日から载荷を開始した供試体のクリープ係数の推移を図-24に示す。材齢7日から载荷を開始したH35F20は、計測器の不良により試験継続が不能となったため記載していない。クリープ係数は式(4)を用いて計算した。

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{\varepsilon_{cc}(t-t_0)}{\sigma_c} \cdot E_c \\ &= \frac{\varepsilon(t-t_0) - \{\varepsilon_{sh}(t) - \varepsilon_{sh}(t_0)\} - \varepsilon_{ci}(t_0)}{\sigma_c} \cdot E_c \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 $\varphi$ ：クリープ係数、 $\varepsilon_{cc}/\sigma_c$ ：単位応力当たりのクリープひずみ、 $\varepsilon_{cc}$ ：クリープひずみ、 $\sigma_c$ ：圧縮応力度、 $E_c$ ：材齢28日まで水中養生した円柱供試体の静弾性係数、 $\varepsilon$ ：圧縮力を負荷した供試体のひずみの測定値、 $\varepsilon_{sh}$ ：圧縮力を負荷していない供試体のひずみの測定値、

$\varepsilon_{ci}$ ：载荷時の弾性ひずみの測定値、 $t$ ：測定時の材齢、 $t_0$ ：载荷開始時の材齢である。

配合間でクリープ係数を比較すると、载荷開始材齢にかかわらず、混和材を用いたH35B430、H35B650、H35F20のクリープ係数は、早強ポルトランドセメント単味のH40と同程度かこれよりも小さくなる傾向にあった。

また、配合ごとに载荷開始材齢の影響を比較すると、材齢28日までに载荷を開始した供試体のクリープ係数は、H40では载荷開始材齢にかかわらず概ね同程度であったが、H35B430、H35B650、H35F20では载荷開始材齢が遅いほど小さくなり、载荷開始材齢の影響が現れた。载荷開始材齢が材齢28日までの範囲内では、混和材を用いた供試体のクリープ係数は、早強ポルトランドセメント単味の供試体よりも载荷開始材齢の影響を受けやすいと考えられる。一方、材齢365日に载荷を開始した供試体のクリープ係数は、混和材の使用の有無による差が小さく、いずれの配合においても材齢28日までに载荷を開始した供試体よりも大幅に小さくなった。材齢365日のような比較的長期の材齢で载荷を開始した供試体では、载荷時の圧縮強度が同程度であれば、混和材の使用の有無がクリープ係数に与える影響は小さいと考えられる。

なお、本稿では材齢490日までの実験結果を報告したが、その後も持続载荷試験を継続しているため、今後も実験データを蓄積して長期材齢のクリープ特性について検討する予定である。

## 6. まとめ

本研究課題では、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計・施工マニュアルを提案することを目的として検討を行っている。平成25年度の検討結果を以下にまとめる。

- (1) 暴露20ヶ月後の供試体の中性化深さと塩化物イオン濃度を測定し、低炭素型セメントを用いたコンクリートの耐久性について検討した。屋外に暴露した供試体の中性化深さの実測値は、促進中性化試験から得られた推定値と概ね比例関係にあったが、推定値より小さくなる傾向にあった。また、低炭素型セメントの使用により塩化物イオン浸透抵抗性が向上する傾向にあったが、水結合材比と混和材の混合率が高い供試体では中性化により塩化物イオンが供試体内部に移動・濃縮したものが多くあった。
- (2) 練上がり温度と打込み後の温度履歴の異なる供試体を用いて、低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度発現の温度依存性について検討した。低炭素



型セメントを用いたコンクリートは普通ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも温度依存性が高く、特に低温時の強度発現の遅れが顕著であった。このため、低温時の施工方法、特に養生方法に対する検討が重要であると考えられた。

- (3) マスコンクリートで想定される水和発熱を模擬するために簡易断熱養生を行ったマスブロック供試体を用い、低炭素型セメントを用いたコンクリートの温度履歴と自己収縮ひずみについて検討した。高温履歴を受けるコンクリートでは自己収縮ひずみの進行速度と収束値が大幅に大きくなり、この傾向は特に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートで明確に現れた。このため、低炭素型セメントを用いたコンクリートでは、初期ひび割れの発生を防止するために自己収縮ひずみの把握が重要と考えられた。
- (4) 材齢490日までの持続荷重試験の結果をもとに、低炭素型セメントを用いたコンクリートのクリープ特性について検討した。低炭素型セメントを用いたコンクリートのクリープ係数は、荷重開始材齢の違いにかかわらず、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同程度かこれよりも小さくなる傾向にあった。

#### 参考文献

- 1) 渡辺博志, 森濱和正, 中村英佑: 低炭素型セメントの利用技術の開発、独立行政法人土木研究所平成23年度報告書, 2012
- 2) 気象庁ホームページ: 気象統計情報,  
<http://www.data.kishou.go.jp/menu/report.html>
- 3) 気象庁ホームページ: 二酸化炭素濃度の経年変化,  
[http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)
- 4) 依田彰彦: 40年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果, セメントコンクリート論文集, Vol.56, pp.449-454, 2002
- 5) 土木学会: フライアッシュを混和したコンクリートの中性

化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告), コンクリートライブラリー第64号, 1988

- 6) Eisuke Nakamura, Satoshi Suzuki, Kazumasa Morihama, Hiroshi Watanabe: Collaborative Research Project on Effective Use of Low-Carbon Cements, First International Conference on Concrete Sustainability, pp.453-458, 2013
- 7) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991
- 8) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2013
- 9) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー86, 1996
- 10) 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー94, 1999
- 11) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5, 鉄筋コンクリート工事, 2009
- 12) ACI Committee 308: Guide to Curing Concrete, ACI 308R-01, 2001
- 13) CEN: Execution of concrete structures, BS EN 19670:2009, 2009
- 14) fib: Model Code 2010, Final draft, Volume 1, fib bulletin Vol.65, 2012
- 15) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2013
- 16) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2008, 2008
- 17) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.209-210, 1994
- 18) 渡辺博志, 森濱和正, 中村英佑: 低炭素型セメントの利用技術の開発、独立行政法人土木研究所平成24年度報告書, 2013
- 19) 中村英佑, 鈴木聡, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートの収縮とクリープに関する実験的研究, 第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.503-508, 2013

## DEVELOPMENT OF UTILIZATION TECHNIQUES FOR LOW-CARBON CEMENTS

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Materials and Resources Research Group  
(Concrete and Metallic Materials  
Research Team)

**Author** : WATANABE Hiroshi

MORIHAMA Kazumasa

NAKAMURA Eisuke

**Abstract** : The objective of this collaborative research project with eight organizations is to develop guidelines for design and construction of reinforced and prestressed concrete structures utilizing low-carbon cements. In this fiscal year, concrete specimens that were exposed at three different test sites were collected and used to measure carbonation depth and chloride profile after 20-month-outdoor exposure. This measurement results were subsequently utilized to study differences in test results derived from laboratory accelerated and outdoor exposure tests. Additionally, temperature-dependent properties, such as strength development and autogenous shrinkage, of concrete made with low-carbon cements were investigated using concrete specimens that were cured in semi-adiabatic form works. Moreover, creep behavior of concrete specimens fabricated with low-carbon cements was studied on the basis of results of the long-term creep test that was started in the last fiscal year.

**Keywords** : low-carbon cements, supplementary cementitious materials, exposure test, durability, strength development, autogenous shrinkage, temperature-dependent properties, creep