

# 論文 ニオイセンサにより評価したコンクリートの養生効果と長期強度の関係

城門 義嗣\*1・加賀谷 誠\*2・布施 陽介\*3・齋藤 憲寿\*4

**要旨:** 普通コンクリートと高炉スラグ微粉末(比表面積 6000cm<sup>2</sup>/g)を 50%使用したコンクリートについて、湿潤養生期間を変えた後恒温恒湿室や屋外に設置した場合のニオイ強度、乾燥収縮ひずみおよび圧縮強度の測定を行った。得られた結果から、標準養生と養生条件を変えた場合の同材齢でのニオイ強度の差をニオイ強度差と定義した。そして材齢 14 日のニオイ強度差と乾燥収縮ひずみおよび屋外設置した場合の長期強度の関係に基づいて養生効果の評価について検討した。

**キーワード:** 高炉スラグ微粉末, 標準養生, 養生効果, ニオイセンサ, ニオイ強度, 圧縮強度, 乾燥収縮ひずみ

## 1. はじめに

コンクリートの養生効果は、初期水和反応の進行程度を示すと考えられている。また、構造物の湿潤養生期間は長くても 14 日間程度であり、この期間の養生作業の成否が構造物の長期的な品質を大きく左右すると考えられている。しかしながら、初期材齢におけるコンクリートの養生効果を簡易評価した指標と長期材齢の品質を関連付けた研究結果は少ないように思われる。

本研究では、普通コンクリートと高炉スラグ微粉末(比表面積 6000cm<sup>2</sup>/g)を 50%使用したコンクリートについて、湿潤養生期間を変えた後恒温恒湿室や屋外に設置した場合のニオイ強度、乾燥収縮ひずみおよび圧縮強度の測定を行った。得られた結果から、標準養生と養生条件を変えた場合の同材齢でのニオイ強度の差をニオイ強度差と定義した。そして材齢 14 日のニオイ強度差と乾燥収縮ひずみおよび屋外設置した場合の長期強度の関係に基づいて養生効果の評価について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

普通ポルトランドセメント;C(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>), 高炉スラグ微粉末;BFP(密度 2.91 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 6150cm<sup>2</sup>/g), 細骨材として混合砂;S(表乾密度 2.57 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 3.24%, 粗粒率 2.74), 粗骨材として碎石;G(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.34%), 天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を使用して普通コンクリート N および普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 50%置換した高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート B を製造した。表-1 にコンクリートの配合を示す。

### 2.2 供試体の製造

碎石, 混合砂, セメント(+高炉スラグ微粉末), 水;W および AE 剤の順に容量 50 リットルのパン型強制練りミキサーに投入して 90 秒間練混ぜを行った後, JIS A 1101 および JIS A 1128 に準じてスランプおよび空気量を測定した。直径 100mm, 深さ 200mm の鋼製型枠を使用して圧縮強度試験用の供試体を製造したが, 高さ 150mm としたニオイ強度および内部温湿度測定用の供試体も製造した。型枠の半分程度の容積となるように 1 層目の試料を投入し, 棒形内部振動機を用いて締めを行った。同様に 2 層目の試料を投入して締めを行った。材齢 1 日まで実験室内(16~24°C, 40~80%)に静置し, 脱型後試験を開始した。

### 2.3 供試体の設置環境

表-1 のコンクリート N および B の供試体を用いて, 標準養生(20°C水中)および恒温恒湿室内(室温 20°C, 相対湿度 60%)に静置して試験を行った。後者については, 両コンクリートとも 1(型枠内養生のみ), 5 および 7 日間湿潤養生(標準養生)後, 恒温恒湿室内に設置して所定の材齢で供試体内部温湿度, 乾燥収縮ひずみ, 圧縮強度およびニオイ強度の測定を行った。また, 同様の養生後の供試体を用いて, 標準養生(20°C水中), 夏期(屋外設置後 28 日間 [2008/7/30~8/27] の平均気温 24.5°C, 平均湿度 74%) および冬期屋外設置(屋外設置後 28 日間 [2008/12/9~2009/1/6] の平均気温 3.2°C, 平均湿度 73%)を行った。湿潤養生(標準養生)期間の異なるコンクリートを日射や雨および雪がかりのない屋外屋根下に設置した。屋外設置開始を屋外環境の温湿度の変化による影響を一定に保つため同日とし, N の場合は脱型直後, 3(夏期のみ), 5(夏期のみ), 7, 9, 12 および 14 日間湿潤養生(標準養生)後

\*1 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

\*2 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻教授 工博 (正会員)

\*3 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻

\*4 秋田大学大学院 工学資源学研究科技術部

表-1 コンクリートの配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	BFP	S	G	AE
N	60.0	44.6	8.0	6.0±1.0	175	292	-	771	1000	0.18
B			12.0		175	146	146	766	994	0.18

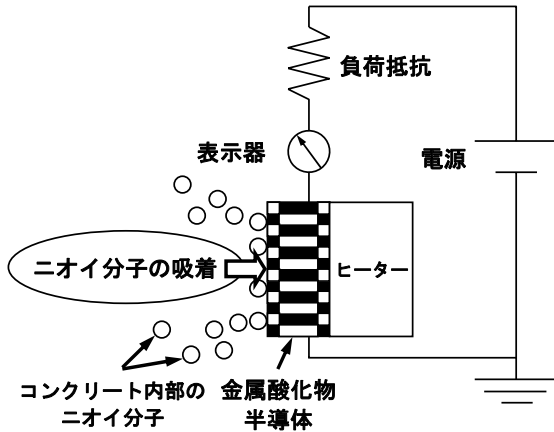


図-1 ニオイ計測センサ内部の概略図

夏期および冬期に屋外設置，B の場合は脱型直後，7，12 および 14 日間湿潤養生(標準養生)後冬期屋外に設置した後，1，3，5，7，14，28 日経過後に供試体内部温湿度，圧縮強度およびニオイ強度の測定を行った。圧縮強度およびニオイ強度は材齢 180 日でも測定を行った。なお，脱型までの日数(1 日)も湿潤養生期間に加算した。全ての供試体は，脱型するまで水分の蒸発を防ぐため，打設面を硬質プラスチック板で蓋をして，衝撃や振動のない実験室内(室内環境：16～24℃，40～80%)に静置した。

#### 2.4 乾燥収縮試験，圧縮強度試験および供試体内部湿度の測定

所定の材齢まで湿潤養生を行い，供試体の基長を測定した後，室温 20℃，相対湿度 60%の恒温恒湿室に静置し，JIS A 1129-2 のコンタクトゲージ方法に準じて乾燥収縮試験を行った。乾燥期間 1，3，7，14，28 日における長さ変化と質量を測定し，乾燥収縮ひずみを測定した。同時に質量減少率も測定した。

圧縮強度試験を JIS A 1108 に準じて行った。圧縮強度測定と同材齢で供試体内部の温湿度を測定した。コンクリート打設直後に打設面中心部の深さ 70mm まで温湿度変換プローブを挿入するためのプラスチックスリーブを埋設した。測定前に予め温湿度変換プローブをスリーブに挿入して，コンクリートの深さ 70mm の位置における供試体内部の温湿度を測定した。標準養生の場合は，水温 20℃±2℃の養生槽内に供試体を浸漬させてこれを行った。

#### 2.5 ニオイセンサによる供試体内部のニオイ強度の測定

コンクリート供試体内部のニオイ強度の測定にはニオイ測定器を用いた。図-1 にニオイ計測センサ内部の概

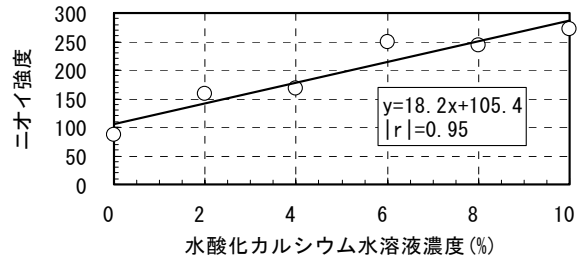


図-2 水酸化カルシウム水溶液濃度とニオイ強度の関係

略図を示す。この機器は，重質系と軽質系の二種類のニオイ分子(例えば揮発性の小さい水酸化カルシウムと揮発性の大きいエチルアルコール)の酸化反応に対して高感度な二種類の金属酸化物半導体センサ(=ニオイセンサ)からなる。コンクリート内部のニオイ分子を含んだ空気を吸引し，これに含まれる重質系と軽質系のニオイ分子がニオイセンサ表面に吸着して酸化反応を起こす。このため生じる重質系ニオイセンサおよび軽質系ニオイセンサの抵抗値の変化を電圧で評価し，これとニオイが無い状態における電圧との差をニオイ強度として無次元で数値化している。

測定に際し，測定毎に打設面中心部にコンクリート用電動ドリルで直径 6mm，深さ 70mm の穿孔を行い，穿孔粉を除去した後，この孔に測定器のニオイ分子吸引ノズルを挿入してコンクリート内部のニオイ強度を測定した。ここで，コンクリート内部のニオイ強度は測定環境のニオイに大きく影響を受けるため，コンクリート内部のニオイ強度の測定値から測定環境の空気のニオイ強度の測定値を差し引くことで，相対的なコンクリート内部のニオイ強度として定義した。コンクリートのニオイ強度の測定結果では，重質系のニオイ強度が軽質系のニオイ強度よりも大きくなることが確認されている。

セメントの水和反応の進行に伴って水酸化カルシウムが生成されることから，これとニオイ強度の関連性を検討するため，濃度を変えた水酸化カルシウム水溶液のニオイ強度を測定した。図-2 に水酸化カルシウム水溶液濃度とニオイ強度の関係を示す。その結果，水溶液濃度の増加に伴うニオイ強度の増加傾向が認められる。したがって，コンクリートのニオイ強度の増減を測定することによってコンクリートの養生効果の優劣を評価できると考えた。

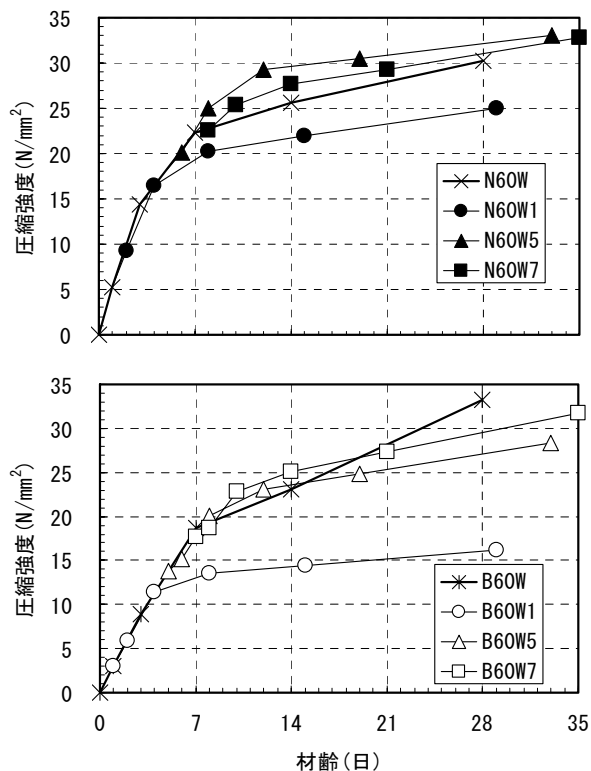


図-3 圧縮強度の経時変化

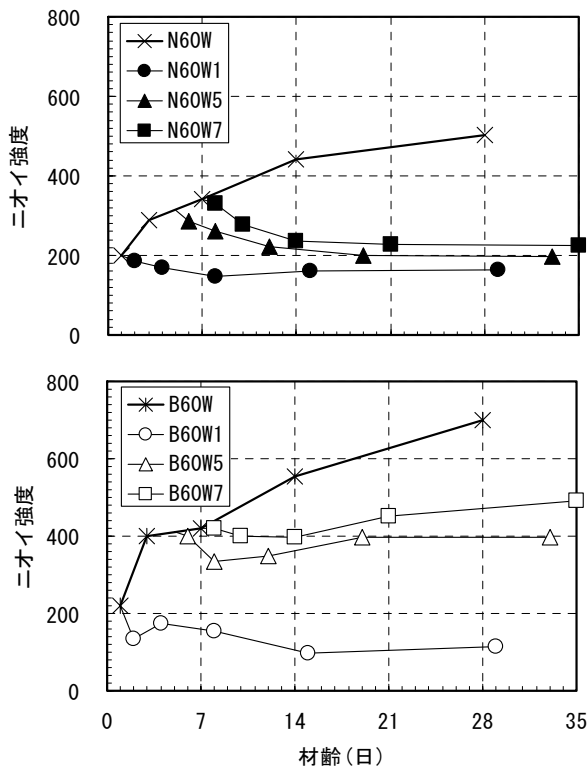


図-4 ニオイ強度の経時変化

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 恒温恒湿室内に設置したコンクリートの圧縮強度の変化

図-3に湿潤養生期間の異なるNおよびBの圧縮強度の経時変化を示す。図中の記号Wは湿潤養生(標準養生), Wの後の数字1~7は20°C, 60%恒温恒湿室設置前の湿潤養生期間(日)を示し, 数字無(N60WおよびB60W)は標準養生を示している。また, 記号NおよびBの後の60は水セメント比を示している。図より材齢の進行によって両コンクリートとも圧縮強度は増加するが, 湿潤養生期間が5および7日の場合, 材齢14日で標準養生よりもNは2~4N/mm<sup>2</sup>, Bは1~2N/mm<sup>2</sup>大きくなった。これに対して湿潤養生期間が1日(型枠内養生のみ)の場合, 材齢14日でNは4N/mm<sup>2</sup>, Bは9N/mm<sup>2</sup>程度低く, 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは湿潤養生を十分に行う必要があると考えられる。

標準養生よりもコンクリートの強度が増加したのは, 供試体の乾燥によると考えられる。湿潤養生後に乾燥環境に曝された場合, 若材齢において一時的な強度増加は生ずるが水分蒸発によりセメントの水和反応の進行が停滞するため, 強度増進は停滞して長期強度は標準養生を行った場合よりも低下することが既往の研究で明らかにされている<sup>1), 2)</sup>。供試体は表面積/容積の比が大きいため乾燥により, 一時的に圧縮強度が大きくなりやすい。

このため初期材齢における供試体が乾燥を受けた場合, 圧縮強度で養生効果を評価した場合, 長期強度の低下や乾燥収縮ひずみの増大などの耐久性低下を判断できないことになる。構造物の湿潤養生の効果の大部分は初期の養生に限られていることから<sup>3)</sup>, 初期にニオイセンサを用いたコンクリート内部のニオイ強度の測定を行った。そして養生効果の評価を, 乾燥収縮ひずみや長期強度との関係から検討した。

#### 3.2 恒温恒湿室内に設置したコンクリートのニオイ強度および乾燥収縮ひずみの変化

図-4に湿潤養生期間の異なるNおよびBのニオイ強度の経時変化を示す。図中の記号は前図と同じである。図よりニオイ強度は標準養生の場合, 両コンクリートとも材齢の進行に伴って増加傾向を示し, 高炉スラグの有するニオイ特性のため材齢28日でBがNより約1.7倍大きくなった。湿潤養生後に恒温恒湿室内に設置した場合, 両コンクリートとも材齢の進行に伴っておよそ減少した後一定値に漸近し, 設置前の湿潤養生期間が長いほどニオイ強度は大きくなる傾向を示した。また, 標準養生と湿潤養生期間の異なる養生を行った場合のニオイ強度の同材齢における差(ニオイ強度差)は, 材齢の進行に伴って増加する傾向が認められた。材齢28日で, 標準養生の場合のニオイ強度に対して各湿潤養生期間のニオイ強度は, Nの場合33~45%, Bの場合16~67%まで

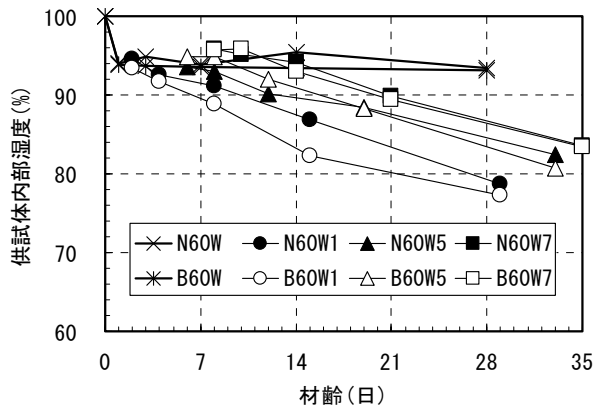


図-5 供試体内部湿度の経時変化

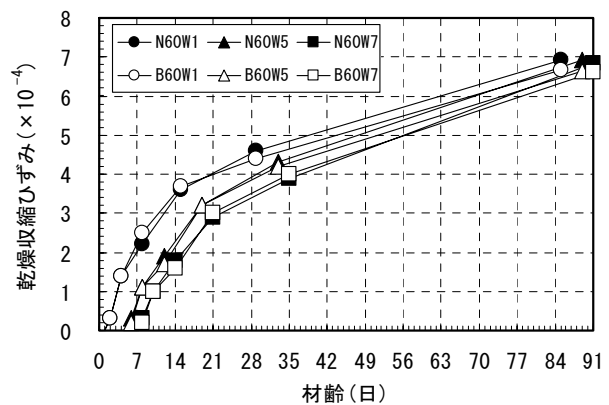


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

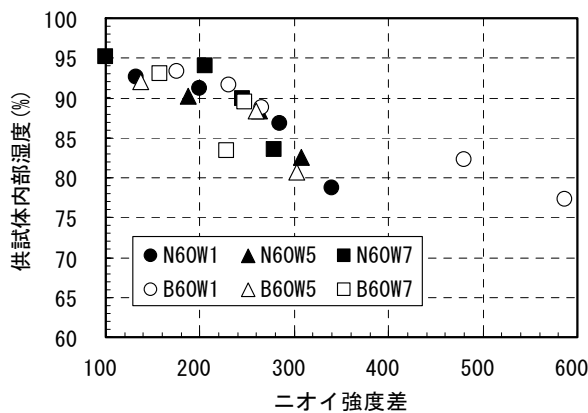


図-6 ニオイ強度差と供試体内部湿度の関係

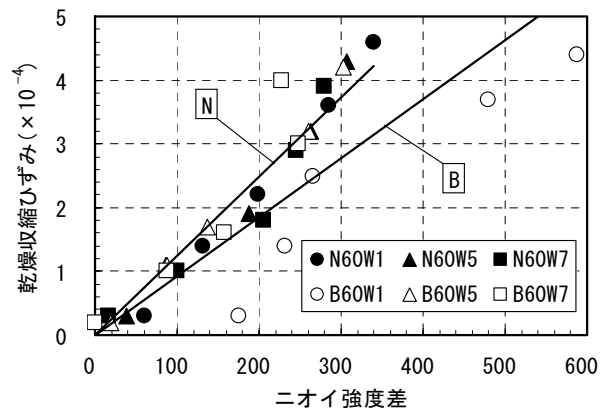


図-8 ニオイ強度差と乾燥収縮ひずみの関係

低下しており、特に、Bは湿潤養生期間が1日の場合ニオイ強度の低下が大きく、早期の乾燥に敏感で初期強度の発現が遅い高炉セメントコンクリートの性質と同様の傾向を示した。

図-5に湿潤養生期間の異なるNおよびBの供試体内部湿度の経時変化を示す。図より、標準養生を行った場合、供試体内部湿度は両コンクリートとも約93%と一定であった。湿潤養生後に恒温恒湿室内に設置した場合、両コンクリートとも低下する傾向を示し、設置前の湿潤養生期間が長いほど低下程度は小さく、湿潤養生期間が1日の場合Bの方がNよりも低くなる傾向にあった。また、同時に測定した供試体の質量減少率も同様の傾向を示した。

図-6に湿潤養生期間の異なるNおよびBのニオイ強度差と供試体内部湿度の関係を示す。ニオイ強度差は標準養生と所定湿潤養生後、恒温恒湿室に設置したNおよびBのニオイ強度との同材齢での差であり、これが増加するほど標準養生よりコンクリートの養生効果が低下していることを示している<sup>4)</sup>。図より両コンクリートとも、ニオイ強度差が増加し養生効果が低下するほど供試

体内部湿度は低下する傾向を示している。ニオイ強度差は湿度の変化と密接な関係があること<sup>5)</sup>から、ニオイ強度差の増加は乾燥による湿度の低下すなわち水和反応の停滞による養生効果の低下を示していると考えられる。

図-7に湿潤養生期間の異なるNおよびBの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。図より乾燥収縮ひずみはNとBで大きな差は認められず、材齢の進行と共に増加し、材齢28日では20℃、60%恒温恒湿室設置前の湿潤養生期間が1日の場合約 $4.5(\times 10^{-4})$ 、5日の場合約 $3.9(\times 10^{-4})$ 、7日の場合約 $3.5(\times 10^{-4})$ となった。また、湿潤養生期間が長いほど同材齢における乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向を示した。

図-8に湿潤養生期間の異なるNおよびBのニオイ強度差と乾燥収縮ひずみの関係を示す。図より両コンクリートともニオイ強度差と乾燥収縮ひずみの間には正の直線関係が認められる。ニオイ強度差の増加すなわち養生効果の低下は乾燥収縮ひずみの増加に伴うひび割れ発生の危険性を示唆していることがわかった。また、Bでは湿潤養生期間1日(型枠内養生のみ)の場合、同一収

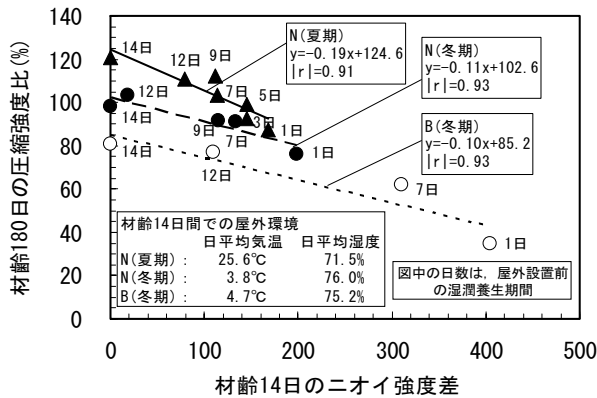


図-9 材齢14日のニオイ強度差と材齢180日の圧縮強度比の関係

縮ひずみに対応するニオイ強度差が増加した。これは前節図-3 で示したように強度発現が遅く、水和反応が乾燥など養生の影響を受けやすいことと関係があると思われる。これらの結果は、高炉スラグ微粉末を用いたモルタルでは、乾燥による質量減少率は普通モルタルより大きくなるが、乾燥収縮ひずみは同程度となるとの既往の研究結果<sup>6)</sup>と同じであった。

### 3.3 湿潤養生期間の異なるコンクリートのニオイ強度差と屋外設置における長期圧縮強度の関係

図-9 に両コンクリートとも最大14日間湿潤養生を行った場合の材齢14日のニオイ強度差と屋外設置した材齢180日における標準養生に対する圧縮強度比(材齢180日の標準養生に対する湿潤養生期間を変化させた場合の強度比)の関係を示す。図中の日数は、屋外設置前の湿潤養生期間を示す。設置開始時期は夏期および冬期であり、各コンクリート打込み後14日間での日平均気温および日平均湿度を図中左下に示した。図より材齢180日における圧縮強度比は材齢14日でのニオイ強度差の増加に伴って減少し、ニオイ強度差の大きいものは長期強度が低下している。また、両コンクリートとも湿潤養生期間が長いほどニオイ強度差は小さく長期強度が増加している。これは温湿度の影響による水和反応の進行の遅速を示し、初期材齢のニオイ強度差と屋外設置された長期強度の間に密接な関係が存在することを示している。したがって、ニオイ強度差の増加は養生効果の低下を示していると判断される。

コンクリート標準示方書〔施工編〕に示されている日平均気温による湿潤養生期間<sup>3)</sup>を目安とした場合、180日間水中養生した強度に対してN(夏:5日間湿潤養生、この期間の実測の日平均気温25.7°C、日平均湿度77.6%)およびN(冬:9日間湿潤養生、この期間の実測の日平均気温4.4°C、日平均湿度72.7%)は90%以上であり、材齢14日のニオイ強度差と材齢180日の圧縮強度比の間には、

負の傾きの直線関係が存在し、高度の相関が認められた。B(冬:12日間湿潤養生、この期間の実測の日平均気温5.0°C、日平均湿度73.8%)は、180日間水中養生した強度に対して80%程度得られ、Nと同様な関係が認められた。これらに対応する材齢14日のニオイ強度差はそれぞれ145、115および110であった。一方、湿潤養生期間が1日の場合(型枠内養生のみ)では、N(夏:型枠養生1日)は87%、N(冬:型枠養生1日)は76%、B(冬:型枠養生1日)は35%であり、ニオイ強度差はそれぞれ168、198および405であった。Nのニオイ強度差と圧縮強度比の関係について夏期と冬期で比較した場合、あるニオイ強度差での圧縮強度比は、夏期が冬期より大きい。夏期および冬期の打込み後14日間での日平均気温は25.6°Cおよび3.8°Cであり、夏期の方が日平均気温が高いため、同じニオイ強度差に対する圧縮強度比が大きくなったと考えられる。あるニオイ強度差における圧縮強度比の夏期と冬期での差は、平均して17%程度であった。Bの場合、Nと同じニオイ強度差でも圧縮強度比が小さく、一般的に知られている高炉セメントコンクリートの性質と一致した。冬期施工で強度や耐久性を確保するためには湿潤養生期間を確保することが必要であり、特に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、養生効果の低下が強度低下に及ぼす影響が顕著であることから、初期材齢での湿潤養生が極めて重要であることがわかる。

以上の結果から、初期材齢におけるニオイ強度差とそれ以降の材齢での圧縮強度(力学的性能)や乾燥収縮ひずみ(耐久性)の間には密接な関係が存在し、初期材齢のニオイ強度差で養生効果を評価可能と思われる。

## 4. 結論

普通コンクリートと高炉スラグ微粉末(比表面積6000g/cm<sup>2</sup>)を50%使用したコンクリートについて、湿潤養生期間を変えて20°C、60%の恒温恒湿室内で供試体内部温湿度、乾燥収縮ひずみ、ニオイ強度、圧縮強度を測定した。また、湿潤養生期間を変えて屋外設置した場合の供試体内部温湿度およびニオイ強度、長期圧縮強度を測定した。標準養生のニオイ強度との差をニオイ強度差と定義して、乾燥収縮ひずみや圧縮強度との関係に基づいて養生効果の評価について検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 湿潤養生期間を変えて恒温恒湿室に設置した両コンクリートでは、供試体の乾燥により標準養生よりも圧縮強度が一時的に増加する場合が認められた。初期に乾燥の影響を受けた場合、圧縮強度で養生効果、特に長期での品質変化を判断できない場合がある。
- (2) 恒温恒湿室設置前の湿潤養生期間が長いほど両コンクリートともニオイ強度は大きく、湿度の低下も小

さくなくなった。ニオイ強度差が増加するほど供試体内部湿度は低下する傾向を示し、乾燥による水和反応の停滞による養生効果の低下を示した。

- (3) ニオイ強度差と乾燥収縮ひずみの間には正の直線関係が存在し、ニオイ強度差の増加は乾燥収縮ひずみの増加によるひび割れ発生の危険性を示唆した。
- (4) 初期材齢におけるニオイ強度差と湿潤養生期間を変えて屋外設置した材齢 180 日の圧縮強度比の間には直線関係が存在し、N の場合、あるニオイ強度差での夏期と冬期の圧縮強度比は、温度差に依存すると考えられ 17%程度の差が認められた。
- (5) 4)の結果より、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比較して初期湿潤養生の多少が長期強度に大きく影響を及ぼすことが示された。

#### 謝辞

本研究に際し、新日鐵高炉セメント株式会社より協力を得た。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 米国開拓局編：CONCRETE MANUAL，オーム社，pp.18-24，1971.5
- 2) 城門義嗣，加賀谷誠，齋藤憲寿：湿潤期間の異なるコンクリートのニオイセンサによる養生効果の評価，コンクリート工学年次論文集(CD-ROM)，Vol.31，No.1，pp.1669-1674，2009.7
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.126-127，2007.3
- 4) 城門義嗣，常大偉，加賀谷誠：フライアッシュコンクリートのニオイセンサによる養生効果の評価，コンクリート工学年次論文集(CD-ROM)，Vol.30，No.2，pp.217-221，2008.7
- 5) 城門義嗣，常大偉，加賀谷誠：ニオイセンサによるコンクリートの養生効果の評価に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.61，pp.175-181，2008.2
- 6) 李長江，依田彰彦，横室隆：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.187-192，1998