

論文 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

城門 義嗣*1・加賀谷 誠*2・齋藤 憲寿*3

要旨: 温湿度一定環境下および夏期と冬期に湿潤期間を変えて屋外設置した普通コンクリートの供試体内部温湿度および圧縮強度, ニオイセンサによるニオイ強度の測定結果から, コンクリートの養生効果について検討を加えた。その結果, コンクリート供試体が設置された環境ごとに材齢 14 日までの供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の間には直線関係が存在することを示した。また, 湿潤養生(=標準養生)と湿潤期間を変えて屋外設置した供試体内部のニオイ強度の差をニオイ強度差とした場合, 湿潤養生期間が長いほどニオイ強度差は直線的に減少し, 養生効果が標準養生の場合に近づくことを示した。

キーワード: 標準養生, 屋外設置, 温湿度, 湿潤養生期間, ニオイ強度, 圧縮強度

1. はじめに

コンクリート構造物の養生期間は, 長くても 14 日間程度であり, この間の養生の優劣が耐久性を左右する最も重要な要因の一つである。したがって, 養生効果すなわち水和反応の進行程度を簡易に評価するための手法の検討は重要な課題であると考えられる。

本研究では, コンクリート構造物の耐久性を左右すると考えられるかぶり部のコンクリートの養生効果の評価することを想定して, 供試体表面から約 70mm の部分の温湿度, ニオイセンサによるニオイ強度および供試体の圧縮強度を測定した。供試体の設置環境としては, 温湿度一定の室内と夏期および冬期の屋外とした。屋外設置においては, 湿潤期間を最大 14 日まで変えた各種養生パターンと標準養生の場合を比較してニオイセンサを用いた養生効果の評価を試みた。

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(密度 3.16g/cm³), 混合砂(表乾密度 2.57 g/cm³, 吸水率 3.15%, 粗粒率 2.73), 砕石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.68 g/cm³, 吸水率 1.34%), 天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を使用した。用いた配合は, 水セメント比を 60%, 目標スランブを 8cm, 目標空気量を 6%, 単位水量を 175kg/m³とした。

2.2 供試体の製造

容量 50 リットルのパン型強制練りミキサを用いて練混ぜを行った後, スランブおよび空気量を測定した。

圧縮強度試験用として直径 100mm, 高さ 200mm, ニオイ強度および内部温湿度測定用として直径 100mm, 高

さ 150mm の円柱供試体を製造した。

2.3 供試体の設置環境

温湿度一定環境下の場合, 脱型後, 恒温恒湿室内(温度 20℃および 40℃に対して, 相対湿度 60%および 100%の一定環境)に静置した。

図-1 に養生パターンの模式図を示す。夏期(2008/7/30 ~ 8/27, 屋外環境:19.1~34.2℃, 32~99%)および冬期(2008/12/9~2009/1/6, 屋外環境:-5.1~13.3℃, 37~97%)とも, 供試体は材齢 1 日で脱型後, 日射や雨および雪がかりのない屋外屋根下に同一日より設置した。なお, 材齢 1 日まで水分の蒸発を防ぐため, 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:20±4℃, 60±20%)に静置した。脱型までの日数(1 日)も湿潤養生日数に加算した。養生パターンは, a 湿潤養生(=標準養生: 20±3℃水中)を基準とし, b 湿潤養生 1 日後に屋外設置, c 湿潤養生 3 日後に屋外設置, d 湿潤養生 7 日後に屋外設置, e 湿潤養生 9 日後に屋外設置, f 湿潤養生 12 日後に屋外設置, g 湿潤養生 14 日後に屋外設置の計 7 パターンとした。なお, 養生パターン c は夏期のみ実施した。

ニオイ強度などの測定日は養生パターン a~g で材齢に関係なく同一日とした。屋外設置日数が 28 日目の時点における測定日の材齢は, 屋外設置前に実施した湿潤養生日数と屋外設置日数の和となり, 例えば, 養生パターン b の場合は 1 日+28 日で材齢 29 日, 養生パターン d の場合は 7 日+28 日で材齢 35 日, 養生パターン a の場合も同様に 14 日+28 日で材齢 42 日であった。このように屋外設置を同時に開始し, 測定日を同一日とすることで, 屋外環境温湿度の変化が湿潤養生期間の異なるコンク

*1 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

*3 秋田大学 工学資源学部技術職員

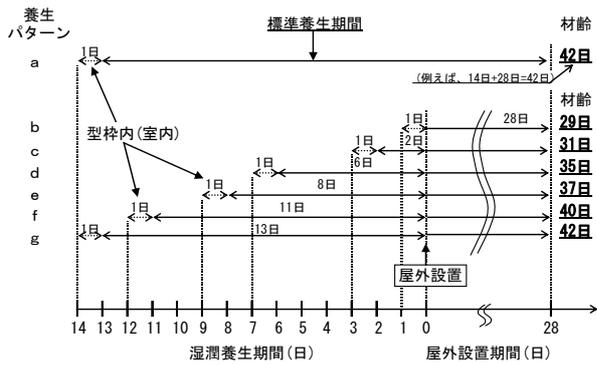


図-1 養生パターンの模式図

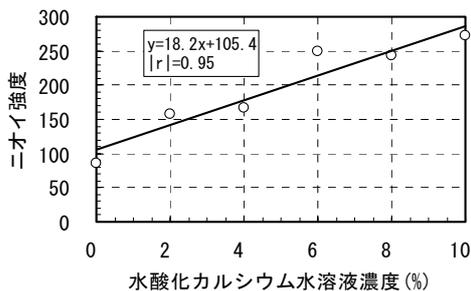


図-2 水酸化カルシウム水溶液濃度とニオイ強度の関係

リート供試体に与える影響を一様になるようにした。

2.4 供試体内部温湿度の測定

圧縮強度の測定と同一日に供試体内部の温湿度を測定した。供試体内部温湿度の測定方法は、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ておき、打設後 24 時間程度で温湿度変換プローブをスリーブに挿入し、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記録計により測定した。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測定を行った。

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

セメントの水和反応の進行に伴って、水酸化カルシウムの結晶が生成されること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。濃度の増加に伴うニオイ強度の増加傾向と良好な直線関係が認められる。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養生効果の優劣を評価できると考えた。なお、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。この測定器は、軽質系と重質系の二種類のニオイ分子(例えば揮発性の大きいエチルアルコールと揮発性の小さい水酸化カルシウム)に対する酸化反応に高感度な二種類の金属酸化物半導体センサ(=ニオ

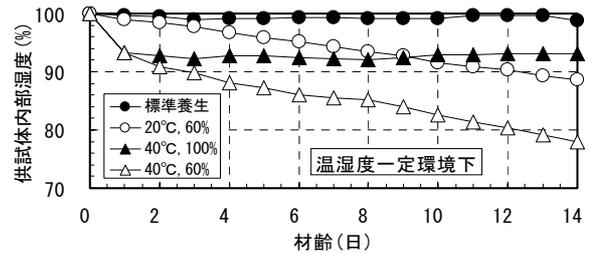


図-3 供試体内部湿度の経時変化

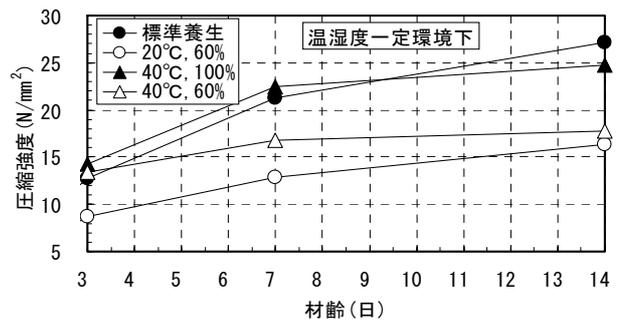


図-4 圧縮強度の経時変化

イセンサ)からなり、吸引したコンクリート内部のニオイ分子がこのニオイセンサ表面において酸化反応を起こすことで生じる軽質系ニオイセンサおよび重質系ニオイセンサの抵抗値の低下を電圧でとらえ、これとニオイが無い状態における電圧との差をニオイセンサ出力値=ニオイ強度として無次元で数値化している。コンクリートのニオイ強度の測定結果では、重質系のそれが軽質系より大きくなることが確認された。

測定方法は、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中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。

3. 実験結果および考察

3.1 温湿度一定環境下におけるコンクリートの圧縮強度およびニオイ強度の変化

図-3 に供試体内部湿度の経時変化を示す。同一湿度環境下では、供試体内部湿度は温度が高い方が低く、湿度 60% の環境では材齢の進行とともに低下し、温度 40℃ の場合が 20℃ の場合より 9~11% 低く、材齢 14 日では 40℃ が 79%、20℃ が 89% となった。なお、供試体内部の温度は設置環境の温度と同程度であった。

図-4 に圧縮強度の経時変化を示す。図より材齢の進行

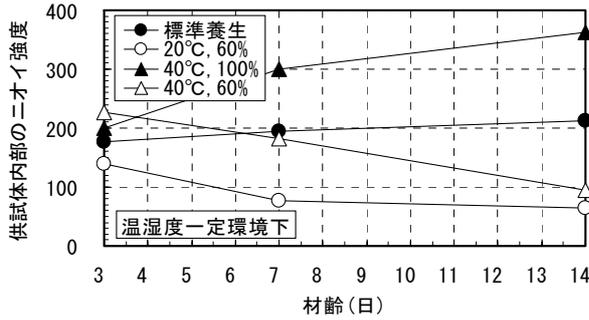


図-5 供試体内部のニオイ強度の経時変化

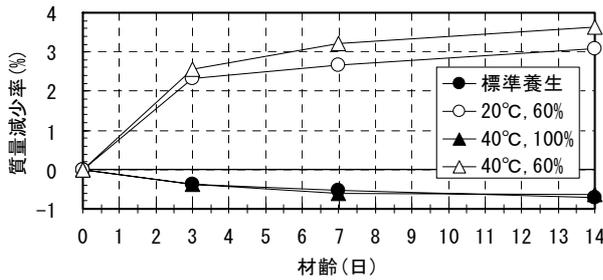


図-6 質量減少率の経時変化

によって圧縮強度は増加するが、同一湿度環境下では、材齢 7 日までは温度 40℃に設置した場合が 20℃に設置した場合より強度は大きい。しかし、材齢 7~14 日では強度増加程度は小さく、20℃に設置した方のこれが大きくなった。また、湿度 60%の環境では、湿度 100%の場合より強度が小さく、その差は材齢の進行に伴って増加し、20℃に設置した場合、材齢 14 日における両者の差は 12N/mm²となった。初期乾燥による強度発現への影響が認められたことから、ニオイ強度との関連性を検討することとした。

図-5 に供試体内部のニオイ強度の経時変化を示す。同一湿度環境下では、ニオイ強度は温度が高い方が大きく、湿度 60%の環境では材齢の進行とともに減少し、材齢 14 日では温度 40℃が 90、20℃が 70 となった。これは温湿度が低い方がニオイ強度も小さいことが明らかにされており¹⁾、図-3 で示したように、温度 20℃あるいは 40℃で湿度が 60%の場合、湿度 100%の場合よりも内部湿度が大きく低下していることから、乾燥によりニオイ強度が低下したと考えられる。

図-6 に質量減少率の経時変化を示す。湿度が 60%の場合は材齢の進行により質量が減少する傾向を示し、温度が 40℃の場合が 20℃の場合よりも減少しており材齢の進行に伴い乾燥していることを示している。これは、図-3 に示した供試体内部湿度の経時変化や、図-5 に示したニオイ強度の経時変化における 40℃、60%のニオイ強度の減少程度が最も大きいことと対応していると思われる。湿度が 100%の場合は養生期間が長いほど質量は

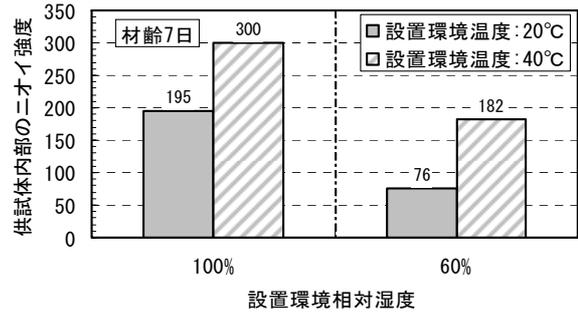


図-7 設置環境温湿度を一定としたときの供試体内部のニオイ強度の比較

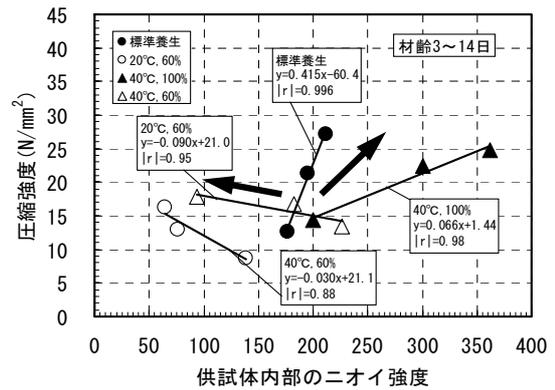


図-8 供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の関係

増加し、温度による差は小さいことがわかる。

図-7 に材齢 7 日における温湿度一定環境下での供試体内部のニオイ強度を比較した結果を示す。図より、温度を 20℃および 40℃の一定とした場合、湿度が高い場合(100%)がニオイ強度は大きくなること、湿度を 60%および 100%の一定とした場合、温度が高い場合(40℃)がニオイ強度は大きくなることがわかる。また、温度が低くて湿度が高い場合(20℃、100%)と温度が高くて湿度が低い場合(40℃、60%)、および温度が高くて湿度が高い場合(40℃、100%)と温度が低くて湿度が低い場合(20℃、60%)をそれぞれ比較すると、どちらも湿度の高い場合(100%)のニオイ強度は大きくなることから、ニオイ強度の大小には湿度が大きく影響するものと思われる。

図-8 に材齢 3~14 日までの供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の関係を示す。図中の矢印は材齢の進行方向を示す。図より、設置環境ごとに両者の間には高度の相関係数を有する直線関係が認められ、湿度が 100%の場合は正の傾き、湿度が 60%の場合は負の傾きを持つ一次関数で近似された。したがって、設置環境の温湿度の異なる場合における初期養生期間でのニオイ強度の変化は強度発現と関係を有すると考えられるが、乾燥や高温による一時的な強度増加を示す場合があることに注意を要する。

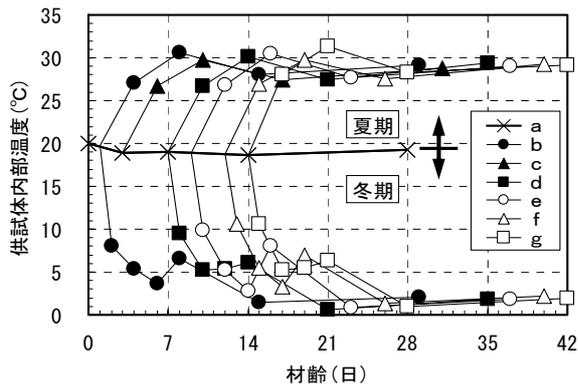


図-9 供試体内部温度の経時変化

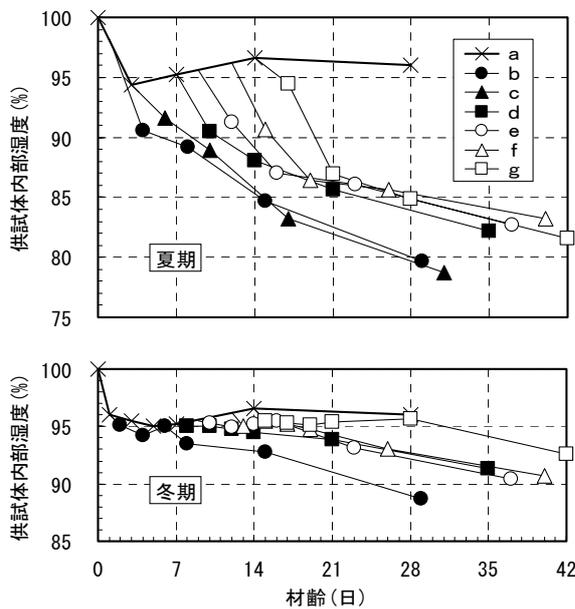


図-10 供試体内部湿度の経時変化

3.2 夏期および冬期に屋外設置したコンクリートの圧縮強度およびニオイ強度の変化

屋外設置後 14 日間の設置環境の温湿度は、夏期の場合、屋外気温が 19.1~34.2°C で最高気温が 30°C を超える日が多く、屋外湿度は 32~99% で 60% 以下の低湿度の日が多い環境であった。冬期の場合、屋外気温が -5.1~13.3°C で 5°C 以下の低温の日が多く、屋外湿度は 37~97% で夏期より高い湿度の日が多い環境であった。

図-9 および 10 に夏期(2008/7/30~8/27)および冬期(2008/12/9~2009/1/6)それぞれ同日に屋外設置したコンクリートの供試体内部の温度と湿度の経時変化を示す。図中の凡例中の記号は養生パターンを示す。供試体内部の温度は夏期の場合は材齢の進行とともに上昇し、冬期の場合は低下すること、材齢 28 日で夏期の場合 28~29°C、冬期で 1~2°C であった。供試体内部の湿度は夏期および冬期とも材齢の進行とともに低下し、湿潤養生期間が長いものほど供試体内部の湿度の低下は小さく、湿度の低

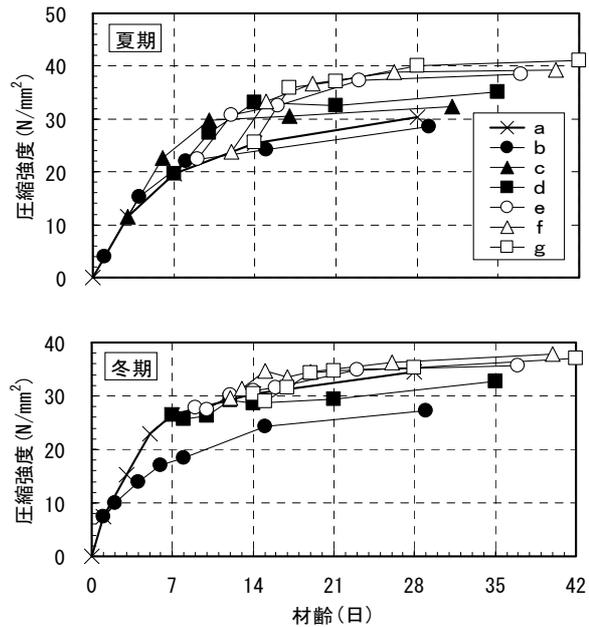


図-11 圧縮強度の経時変化

い日の多かった夏期の方が供試体内部の湿度の低下は大きく、セメントの水和反応が停止するとされる 80%²⁾程度まで低下した。

図-11 に夏期および冬期それぞれ同日に屋外設置したコンクリートの圧縮強度の経時変化を示す。図中の凡例中の記号は養生パターンを示す。図より、夏期および冬期とも湿潤養生期間の長かったものほど圧縮強度は大きくなる傾向を示しており、材齢 28 日で標準養生よりも夏期で 2~10N/mm²、冬期で 1~2N/mm² 大きくなる場合があった。これに対して湿潤養生期間のない b は標準養生よりも夏期で 2N/mm²、冬期で 7N/mm² 程度強度が低くなった。また強度発現程度は材齢の進行に伴い標準養生の場合は漸増しているのに対して、湿潤養生後屋外に設置したコンクリートは材齢の進行に伴って小さくなる傾向を示した。

夏期において標準養生よりも湿潤養生後屋外に設置した場合のコンクリートの強度が増加したのは、屋外設置したことによる乾燥および設置環境の温度が高かったことによると考えられる。なお、標準養生の場合の供試体内部湿度は夏期および冬期とも 20±2°C、96±1% とほぼ一定であった。

湿潤養生後に屋外へ設置した場合、一時的な強度増加は生ずるが、長期強度は標準養生を行った場合よりも低下する。特に湿潤期間が短期で屋外設置した場合は大きく低下することが明らかにされている³⁾。実構造物と同じ環境に設置した供試体をそのまま用いてコンクリートの養生効果を評価する場合、表面積/容積の比が大きい供試体は乾燥しやすいため、一時的に圧縮強度が大きくなる場合があることから、養生効果を初期材齢の圧縮強

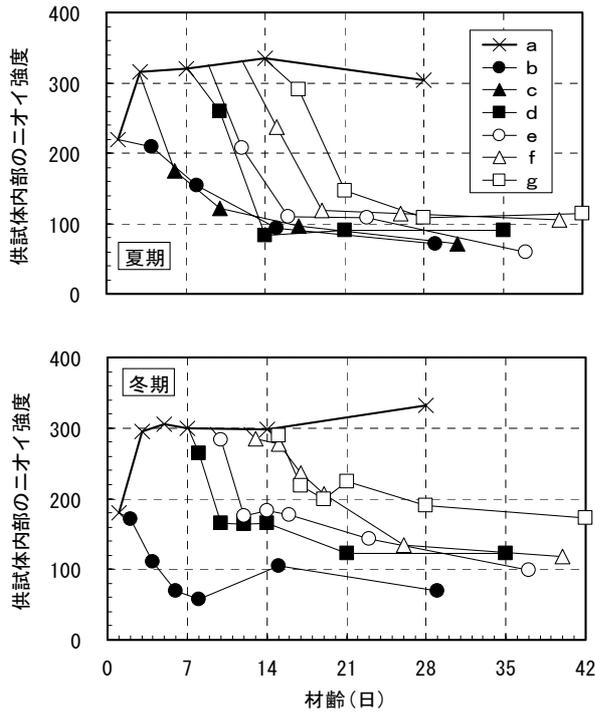


図-12 供試体内部のニオイ強度の経時変化

度で評価することは長期強度や耐久性の判断を誤る可能性がある。構造物の湿潤養生の効果の大部分は初期の養生期に限られていることから、ニオイ強度で初期材齢におけるコンクリートの養生効果の評価ができるか検討を行った。

図-12 に供試体内部のニオイ強度の経時変化を示す。図より、ニオイ強度は標準養生の場合、増加後に一定値に漸近する傾向を示すこと、湿潤養生後に屋外設置した場合、材齢の進行に伴って急激に減少した後一定値に漸減し、湿潤養生期間が長いものほど漸減後のニオイ強度は大きくなる傾向を示した。夏期および冬期で比較した場合、ニオイ強度は材齢 28 日において夏期よりも冬期の方が大きく、図-10 で示したように供試体内部湿度が冬期よりも夏期の方が低かったことにより、ニオイ強度が低下したと考えられる。湿潤養生を行わない養生パターン b においては、冬期の方が全体にニオイ強度が小さくなっているが、これは低温による水和の遅延に起因すると考えられる。3.1 で示したようにニオイ強度は温湿度が高い場合上昇し、低い場合低下するが、冬期の気温が 5℃以下の低温の日が多かったにもかかわらず、c～g の養生パターンにおいて夏期よりもニオイ強度が大きくなったことから、適切な温度と湿度をある期間保持した後、屋外設置した場合、ニオイ強度の大小には湿度の影響が大きいと考えられる。

図-13 に質量減少率の経時変化を示す。夏期および冬期とも標準養生の場合、質量は増加し一定値に漸近すること、湿潤養生後に屋外設置した場合、質量は減少し、

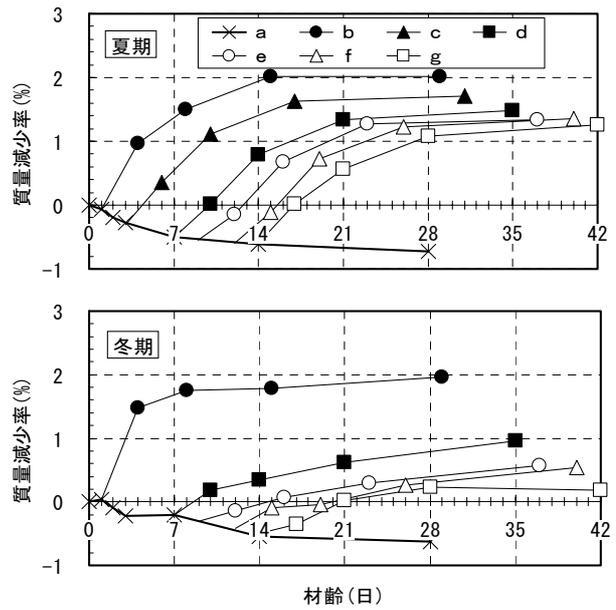


図-13 質量減少率の経時変化

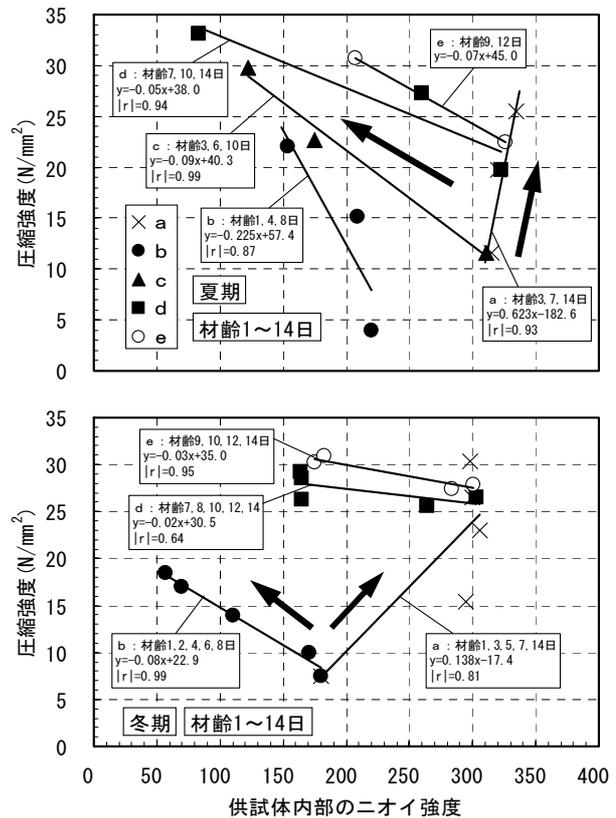


図-14 供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の関係

脱型後ただちに屋外設置した b は材齢 28 日で 2%と同程度であるが、その他の養生パターンでは夏期の方が冬期よりも質量減少率は 0.8%程度大きく、乾燥による質量の低下が大きいことがわかる。これは夏期の屋外環境の湿度が低かったことによるものと考えられ、供試体内部湿度が低下していることと一致する結果となった。

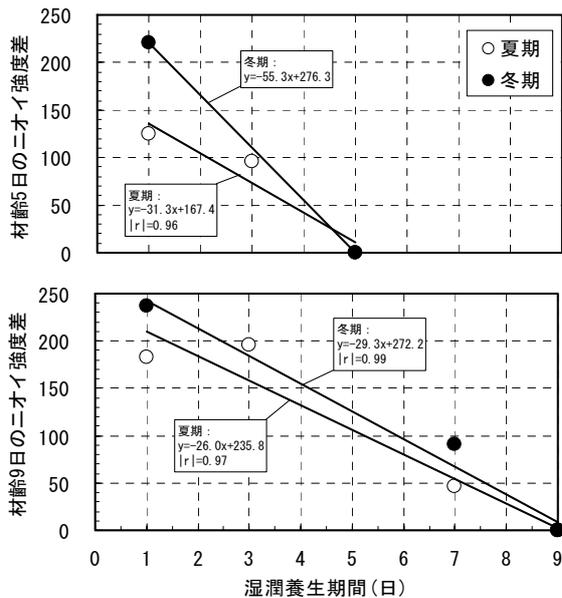


図-15 湿潤養生期間と材齢5日および9日のニオイ強度差の関係

3.3 湿潤養生期間とニオイ強度差の関係

図-14 に材齢 1～14 日までの供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の関係を養生パターンごとに示す。図中の矢印は材齢の進行方向を示す。図より、夏期および冬期とも湿潤養生期間ごとに両者の間には高度の相関が認められ、一次関数で近似できた。これは図-8 で示した温湿度一定環境における結果と同様な結果であって、屋外環境下においても圧縮強度発現およびニオイ強度ともに温度・湿度の影響を受けるものであることから、温度・湿度が特定の条件であれば、圧縮強度発現とニオイ強度はある関係性をもって整理できると考えられる。

次に、標準養生と屋外設置における供試体内部のニオイ強度の差をニオイ強度差とした場合、ニオイ強度差が小さいほど標準養生に近い養生状態であってこれによって養生効果を評価し得る⁴⁾ことから、普通コンクリートの湿潤養生期間の目安である 15℃以上で 5 日間、5℃以上で 9 日間⁵⁾を参考にして、この期間における湿潤養生期間とニオイ強度差の関係について検討を行った。

図-15 に湿潤養生期間と材齢 5 日および 9 日のニオイ強度差の関係を示す。湿潤養生期間を増加するとニオイ強度差は減少する傾向にある。一般に、湿潤養生期間の増加は養生効果が上がっていることを示すから、これに伴うニオイ強度差の減少は養生効果が上がっていることを示していると考えられる。また、同じ湿潤養生期間であれば夏期の方が冬期よりもニオイ強度差が小さいことから温度の高い夏期の方が養生効果が上がっていると思われる。今後、屋外設置における長期材齢の圧縮強度と初期材齢のニオイ強度差の関係について検討す

る必要がある。

4. 結論

温湿度一定環境下および夏期および冬期に湿潤期間を変えて屋外設置したコンクリートの供試体内部温湿度および圧縮強度、ニオイセンサによるニオイ強度の測定結果から、コンクリートの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) コンクリート供試体内部のニオイ強度は、一定湿度であれば温度が高い方が、また一定温度であれば湿度が高い方が大きくなる。温度 20℃、湿度 100%の場合と温度 40℃、湿度 60%の場合における供試体内部湿度およびニオイ強度を比較した結果、前者の場合の方が湿度およびニオイ強度が大きくなったことから、ニオイ強度の変化は、コンクリート内の湿度の変化に大きく影響を受ける。
- (2) 夏期および冬期に屋外設置した供試体内部の湿度およびニオイ強度は、屋外設置前の湿潤養生期間が長い場合ほど大きく、また、湿度の低い夏期においてニオイ強度が冬期より小さくなった。
- (3) コンクリート供試体が設置された環境ごとに、材齢 14 日までの供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の間には直線関係が認められた。
- (4) 標準養生と湿潤期間を変えて屋外設置した供試体内部のニオイ強度の差をニオイ強度差とした場合、湿潤養生期間が長いほどニオイ強度差は減少し、養生効果が標準養生の場合に近づくこと、ある養生効果を得るには、夏期よりも冬期の方が湿潤期間を長くする必要がありことが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 住学, 桂修, 鎌田英治: 普通ポルトランドセメントの水和反応の進行程度に及ぼす相対湿度の影響, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.843-844, 1995.8
- 3) 米国開拓局編: CONCRETE MANUAL, オーム社, pp.18-24, 1971.5
- 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) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編], pp.126-127, 2007.3