

論文 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

城門 義嗣*¹・常 大偉*²・加賀谷 誠*³

要旨: 冬期に製造した普通コンクリートと夏期に製造したフライアッシュコンクリートを屋外設置した場合の圧縮強度, 供試体内部温湿度およびニオイセンサにより供試体内部のニオイ強度を測定し, 所要の強度を得る養生日数を比較した。その結果, 供試体内部のニオイ強度は, 温湿度の影響を受けて変化すること, ニオイ強度は初期養生期間の材齢ごとの強度と直線関係を示し, ニオイ強度差は養生効果を示す指標になり得ること, ニオイ強度差を用いて湿潤養生日数を試算した結果, 夏期に製造したフライアッシュコンクリートは冬期に製造した普通コンクリートより養生日数が長くなることを明らかにした。

キーワード: 養生日数, ニオイ強度, 内部温湿度, フライアッシュコンクリート, 標準養生, 圧縮強度

1. はじめに

資源の有効利用のためにフライアッシュのコンクリートへの利用を図ることは重要であるが, 積雪寒冷地においてフライアッシュセメントを用いる場合, コンクリートの強度発現が遅いため構造物の耐久性を確保することを目的とした養生に時間を要するのが一般的である。このため, 低温時期は普通コンクリートを使用し, 温暖な時期にフライアッシュを用いたコンクリート(以下フライアッシュコンクリート)を使用する傾向にある。しかしながら, このような使い方をする場合の両コンクリートの養生期間やこれらを定める方法が十分に明らかにされていないため, 夏期に現場養生期間を短くする場合も見受けられる。

筆者らは, ニオイセンサを用いてコンクリートのニオイ強度を測定することによって養生効果を評価できる可能性があることを指摘した¹⁾。本研究は, ニオイ強度が場所打ちコンクリートの養生効果を評価する指標となり得るか否か検討し, 冬期製造の普通コンクリートと夏期製造のフライアッシュコンクリートの所要の強度を得るための養生日数を試算して比較したものである。

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), フライアッシュセメント B 種(密度 2.97g/cm³), 混合砂(表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 3.16%, 粗粒率 2.73), 砕石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.34%)を使用した。また, 混和剤として天然樹脂酸塩を主成分とする AE 剤を使用した。表-1 に普通コンクリート(N)およびフライアッシュコンクリート(F)の示方配合を示す。水セメント比を 60%, 目標スランブを 8cm, 目標空気量を 6%の配

合とした。

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に粗骨材, 細骨材, セメント, 水と混和剤の順に投入し 90 秒間練混ぜを行った。練混ぜ後, JISA1101「コンクリートのスランブ試験方法」および JISA1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法)」に準じて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 の円柱供試体, 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。鋼製型枠内に試料を二層に分けて詰め, 棒形振動機により各層で締固めを行った。

2.3 供試体の設置環境

材齢 1 日で脱型後, 普通およびフライアッシュコンクリートの供試体について材齢 3, 7, 14, 28 および 91 日まで, 標準養生(20±3℃の水中), 屋外設置[夏期(フライアッシュコンクリート): 圧縮強度測定時の温湿度 7.2~28.9℃, 40~67%, 2007/8/27~11/26 および冬期(普通コンクリート): 圧縮強度測定時の温湿度 4.6~12.5℃, 41~95%, 2006/11/20~2007/2/19 の雨がかりのない屋外屋根下]を行った。また, 恒温恒湿室内(温度 20 および 40℃に対して, それぞれ相対湿度 60 および 100%の一定とした環境)に普通コンクリートを材齢 1 日で脱型後設置した。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, 衝撃や振動のない室内(20±4℃, 60±20%の実験室内)に設置した。

2.4 圧縮強度試験および供試体内部温湿度の測定

各材齢において, JISA1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて圧縮強度試験を実施した。また, 各設置環境で材齢ごとに供試体内部の温湿度を測定した。

*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 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻

*3 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合

種別	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	A E
N	60.0	44.6	8.0	6.0	175	292	771	1000	0.18
F					173	288	771	996	0.29

測定方法として、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、打設後 12 時間で温湿度変換プローブをスリーブに挿入し、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、20℃恒温恒湿室内の水槽内に供試体高さまで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

各設置環境で材齢ごとにコンクリート供試体内部のニオイ強度を測定した。本研究で使用したニオイ測定器のニオイ計測センサは、ニオイ分子に対して高感度な金属酸化物半導体から成り、ニオイ分子の酸化還元反応に伴う半導体への吸着による電圧の差をセンシングし、これに補正値を掛け無次元として数値化したものをニオイ強度としている。なお、コンクリートから発生しているニオイは主に分子量が比較的大きい重質系のニオイ分子である。

測定方法として、各設置環境下において材齢ごとに、打設面中心部に電動ドリルを用いて直径 6mm、深さ 70mm の穿孔を行い、穿孔粉を除去した後、コンクリート内部のニオイ強度をニオイ測定器の吸引ノズルを孔口に挿入して測定した。ここで、コンクリート内部のニオイ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を差し引き、得られた値をコンクリート内部のニオイ強度と定義した。また、ニオイ強度が強い臭気環境で測定を行った場合、ニオイセンサ表面でのニオイ分子の吸着能力が低下しニオイ強度の測定値に影響を及ぼすことから、ニオイ強度の測定ごとに標準空気ではセンサを十分に洗浄し、ニオイ強度の測定値の精度を向上させた。

3. 実験結果および考察

3.1 設置環境の異なるコンクリートの圧縮強度発現結果

図-1 に、標準養生および屋外設置したときの普通およびフライアッシュコンクリート供試体の圧縮強度発現状況を示す。コンクリート種別毎に製造時期は異なり、普通コンクリートの場合は冬期、フライアッシュコンクリートの場合は夏期で、設置期間を通じて前者は温度 4.6～12.5℃(湿度 41～95%、2006/11/20～2007/2/19)、後者は

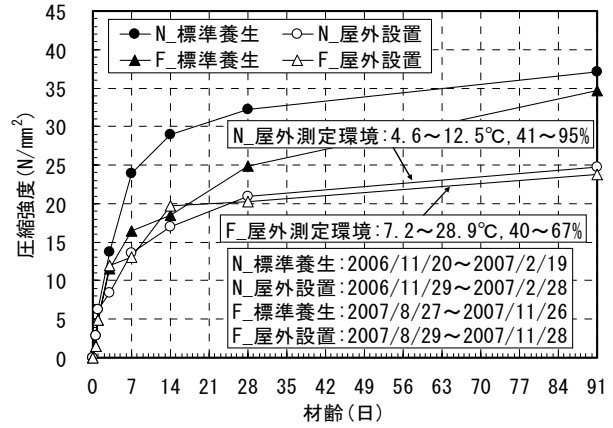


図-1 材齢と圧縮強度の関係

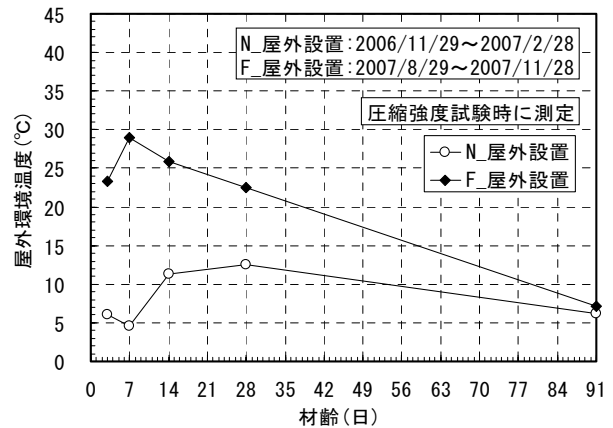


図-2 材齢と屋外環境温度の関係

温度 7.2～28.9℃(湿度 40～67%、2007/8/27～11/26)の環境下に設置された。図より、標準養生の場合、材齢 28 日までは普通コンクリートの方がフライアッシュコンクリートより強度発現速度が早い、それ以降は後者の方がポゾラン反応に起因して早くなっており、材齢 91 日では、両者の差が約 3N/mm² となった。

一方、製造時期の異なる両コンクリートを雨がかりのない屋根下に屋外設置した場合、両者の強度発現はほぼ等しく、材齢 91 日の強度もおおよそ等しく、標準養生の約 68% となった。このような強度発現の違いは、材齢初期において冬期の低温と夏期の低湿度環境がセメントの水和反応の遅延を生じさせたためであり、初期養生において温湿度を保つことの重要性を示している。参考までに、図-2 に、各材齢の圧縮強度測定時に測定した屋外の温度の変化傾向を示した。

3.2 設置環境の異なるコンクリートの供試体内部温湿度とニオイ強度の変化

図-3 および 4 に、普通およびフライアッシュコンクリートの材齢と供試体内部温湿度の関係を示す。なお、材齢 0 日での内部温度はコンクリートの練り上がり温度とし、内部湿度は 100%とした。図より、内部温度は両コンクリートとも標準養生の場合の設置環境の温度に近い 15~20℃と変動が少ないのに対して、屋外設置の場合は、材齢 28 日まで冬期製造の普通コンクリートが 10℃以下、夏期製造のフライアッシュコンクリートが 20℃以上を示し、その後材齢 91 日まで両コンクリートとも 6.5℃程度まで低下していることがわかる。

内部湿度は、標準養生の場合、94~98%で変化が少なかったのに対して、屋外設置の場合は材齢とともに湿度は低下し、夏期製造のフライアッシュコンクリートの方が冬期製造の普通コンクリートよりも低下が著しく、材齢 91 日において、普通コンクリートの場合 85%、フライアッシュコンクリートの場合 74%まで低下した。これは、雨がかりがないためコンクリート内部から外側へ水分が蒸発したことによると考えられる。このように、設置環境の温湿度がコンクリート内の温湿度の変化とこれに伴う強度発現に大きく影響しており、コンクリート中の温湿度の変化を簡易に評価するためニオイセンサを用いたニオイ強度の測定を試みた。

温湿度の異なる環境下における供試体内部のニオイ強度を比較するため、図-5 に材齢 7 日において恒温恒湿室(温度 20 および 40℃に対してそれぞれ相対湿度 60 および 100%の一定とした環境)に普通コンクリートを設置してニオイ強度を測定した結果を示す。図より、温度を 20 あるいは 40℃の一定とした場合、湿度が高い方(湿度 100%)が供試体内部ニオイ強度は大きくなること、湿度を 60 あるいは 100%の一定とした場合、温度が高い方(温度 40℃)が供試体内部ニオイ強度は大きくなることが示された。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%)では、湿度の高い方(湿度 100%)がニオイ強度は大きくなることがわかった。

次に、材齢と設置条件の異なる場合のコンクリート内部のニオイ強度の変化について検討を行うため、図-6 に、普通およびフライアッシュコンクリートにおける材齢と供試体内部のニオイ強度の関係を示す。図より、ニオイ強度は標準養生の場合、材齢の進行に伴い増加の後一定値に漸近する傾向が認められる。また、屋外設置の場合、減少傾向を示し一定値に漸近することがわかる。屋外設置の場合、普通コンクリートの方がフライアッシュコンクリートよりニオイ強度が大きくなっているのは、

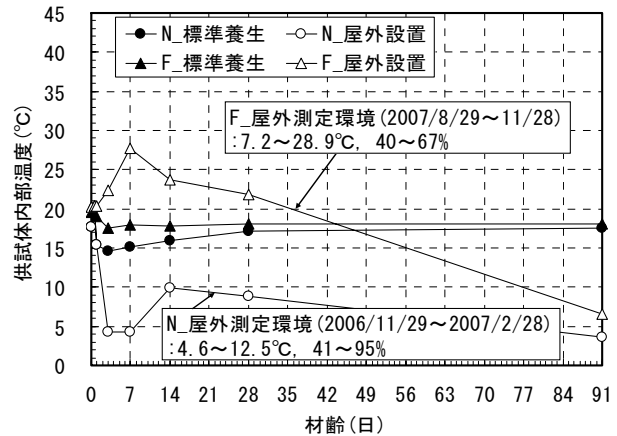


図-3 材齢と供試体内部温度の関係

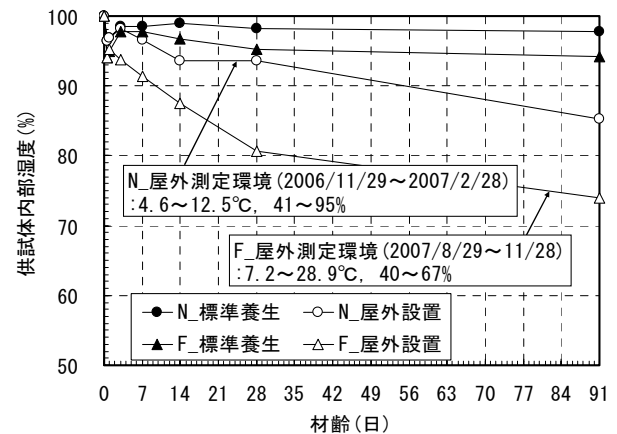


図-4 材齢と供試体内部湿度の関係

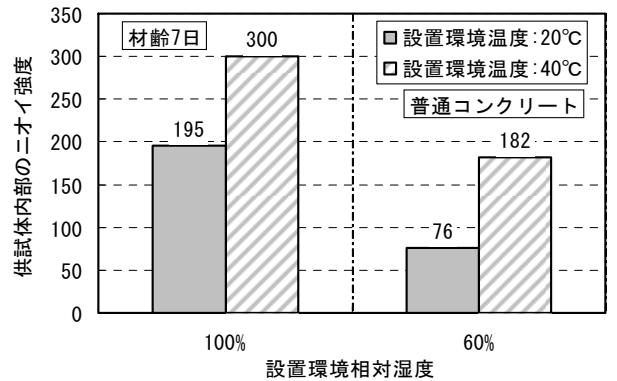


図-5 設置環境温度を一定としたときの供試体内部のニオイ強度の比較

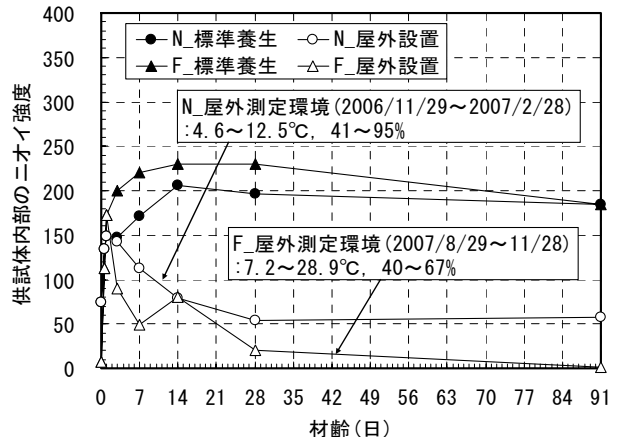


図-6 材齢と供試体内部のニオイ強度の関係

図-3 および 4 で示したように、普通コンクリートはフライアッシュコンクリートより供試体内部温度は低いが湿度が高いことから前述のように湿度の影響を大きく受けたと思われる。また、図-4 において、普通コンクリート供試体内部の湿度が材齢 28 日まで標準養生と屋外設置で大きな差がないにもかかわらず、図-6 においてニオイ強度に大きな差が生じたのは、図-3 に示されるように供試体内部の温度差が大きいことによると考えられる。

3.3 供試体内部のニオイ強度の測定によるフライアッシュコンクリートの養生効果の評価

図-7 に、普通およびフライアッシュコンクリートのニオイ強度と圧縮強度の関係を材齢 1~14 日まで標準養生および屋外設置した結果について示す。図中矢印は、材齢の進行方向を示す。図より、コンクリート種別や設置環境ごとに、両者の間には、直線関係が認められ、ニオイ強度は、初期養生期間の材齢の進行に伴う強度発現をおよそ推定できる指標であることがわかる。また、コンクリートのニオイ強度は、コンクリート中の温湿度と密接な関係があることを既に示したが、図中に示された結果は、そのことも示していると考えられる。これらの結果に基づき、標準養生と屋外設置におけるニオイ強度の差をニオイ強度差として養生効果の指標とした。

図-8 および 9 に、屋外設置した普通およびフライアッシュコンクリートにおける材齢とニオイ強度差の関係を示す。図より、両者の関係は材齢の進行とともにニオイ強度差が増加傾向を示す双曲線関数で近似できるのである、ある材齢での養生効果をおよそ推定できる。また、測定結果より、普通およびフライアッシュコンクリートの材齢 91 日のニオイ強度差は、それぞれ 126 および 183 となった。ニオイ強度差が小さいほど標準養生に近い養生効果が得られていることを示すことから、設置した季節が異なるものの、屋外設置した場合、フライアッシュコンクリートは普通コンクリートよりも、養生効果が小さくなる傾向にあると考えられる。

図-10 および 11 に、普通およびフライアッシュコンクリートの材齢 7 日でのニオイ強度差と材齢 91 日での圧縮強度の関係を示す。なお図中には、室内設置(20±4℃, 60±20%の実験室内)した測定結果も示した。ニオイ強度差が 0 に対応する材齢 91 日での圧縮強度は標準養生における圧縮強度を示し、材齢 7 日までの養生効果からある設置環境における材齢 91 日の圧縮強度を推定しようとした。材齢 7 日としたのは、標準的な湿潤養生日数の目安²⁾の平均的な値としたことによる。設置環境の種類(養生の種類)は少ないが、両者の間には直線関係が認められ、材齢 7 日までのニオイ強度差が大きい(養生効果が低い)ほど、材齢 91 日の圧縮強度が低下し、湿潤養生をせずに

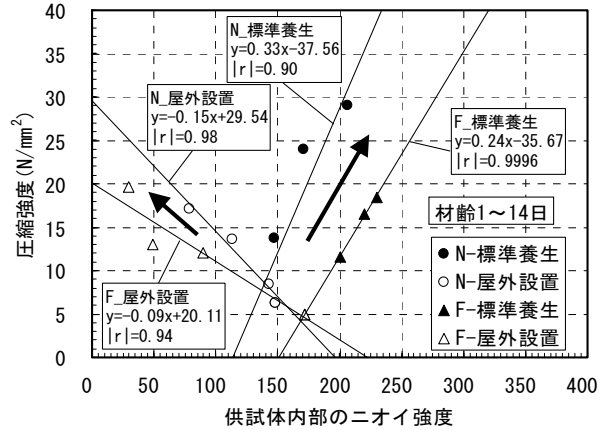


図-7 供試体内部のニオイ強度と圧縮強度の関係

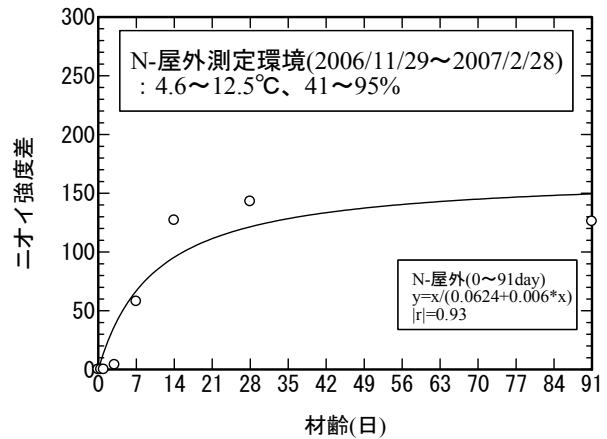


図-8 材齢とニオイ強度差の関係

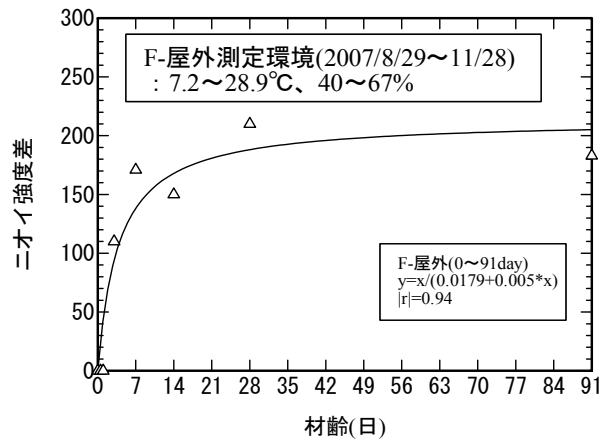


図-9 材齢とニオイ強度差の関係

屋外設置した場合、材齢 91 日で標準養生の 68%程度まで低下することがわかる。

養生の目的は、コンクリートの耐久性を保つことであるから、屋外設置における材齢 91 日での目標強度を定め、材齢 7 日までの湿潤養生日数を普通およびフライアッシュコンクリートについて求めることとした。割増し係数を 1.2 とした場合、標準養生を行った材齢 91 日の圧縮強度を割増し係数で割った値を目標強度とし、それぞれ 30.8 および 29.2N/mm² とすることができる。これらの値

を用いて材齢7日までの標準養生日数を試算した。図-10 および 11 で得られた材齢7日のニオイ強度差と材齢91日の圧縮強度の関係より、それぞれのコンクリートの材齢91日での目標強度を用いて材齢7日でのニオイ強度差を算定した結果、それぞれ 32.6 および 79.3 となった。材齢7日において、これらのニオイ強度差(養生効果)が得られるためのコンクリート製造後の標準養生日数を図-8 および 9 に示した双曲線関数を用いて試算することを試みた。

図-8 および 9 において、コンクリート製造後、屋外設置までのある期間標準養生を行ったとすると、その期間はニオイ強度差は0であり、その後、屋外設置を開始してニオイ強度差が発生する。このニオイ強度差の材齢に伴う進行は、図-8 および 9 で得られた双曲線関数を屋外設置するまでの標準養生日数だけ平行移動した形の関数で示されると仮定して試算した。

普通コンクリートの場合、屋外設置前に必要な標準養生日数を A とすると、材齢 A 日から屋外設置を開始した場合、ニオイ強度差が発生し、材齢 $X=(7-A)$ 日でニオイ強度差が 32.6 となれば、材齢 91 日で 30.8N/mm^2 の目標強度が得られることになる。このようにして普通およびフライアッシュコンクリートについて屋外設置前の標準養生日数を求めた結果、冬期製造の普通コンクリートで 4 日、夏期製造のフライアッシュコンクリートで 5 日と算定され、フライアッシュセメントを用いたコンクリートでは養生期間を長くしなければならないとする一般的な考え方と同じ結果が得られた。

今後さらに、各種養生パターンにおける材齢とニオイ強度差の関係を蓄積する必要があるが、ニオイ強度差により養生日数を求めることができる可能性があると思われる。

4. 結論

冬期に製造した普通コンクリートと夏期に製造したフライアッシュコンクリートを標準養生および屋外設置したときの圧縮強度、供試体内部温湿度およびニオイセンサによるニオイ強度の測定結果から、湿潤養生日数の比較を試みた結果、以下の結論が得られた。

- (1) 材齢の増加に伴うコンクリートのニオイ強度の変化傾向は、標準養生の場合増加後に一定値に漸近する傾向、また、屋外設置の場合減少後一定値に漸近する傾向が認められた。
- (2) コンクリートのニオイ強度は、コンクリート中の温度が高いほど、また、湿度が高いほど大きく、温湿度の影響を受けて変化する。
- (3) 材齢14日までのニオイ強度と圧縮強度の間には直線関係が認められ、ニオイ強度は初期養生期間の材齢

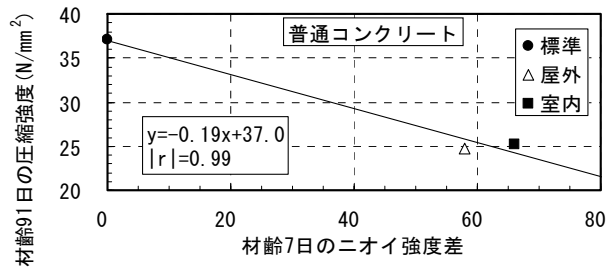


図-10 材齢7日のニオイ強度差と材齢91日の圧縮強度の関係

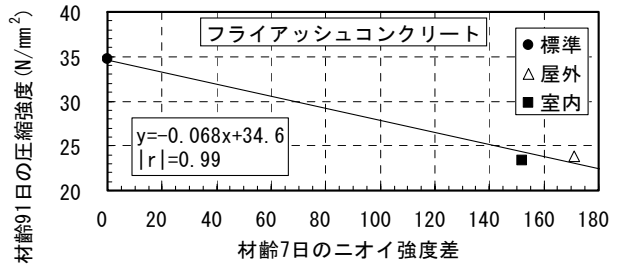


図-11 材齢7日のニオイ強度差と材齢91日の圧縮強度の関係

の進行に伴う強度発現をおよそ推定できる指標であることから、標準養生と屋外設置したコンクリートのニオイ強度差は養生効果を示す指標となり得る。

- (4) 材齢の進行とともにニオイ強度差は増加傾向を示す双曲線関数で近似でき、同じ材齢では普通コンクリートよりもフライアッシュコンクリートの方がニオイ強度差は大きく、養生効果が小さくなる傾向が認められた。また、材齢7日までのニオイ強度差が大きいほど材齢91日の圧縮強度が低下する傾向が認められた。
- (5) (4)の結果を用いて冬期に製造した普通コンクリートと夏期に製造したフライアッシュコンクリートの湿潤養生日数を試算した結果、前者より後者の養生日数が多く、十分な養生が必要となることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、平成18～19年度日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(スタートアップ))、課題番号18860014)により行われた。ここに記して謝意を表します。

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) 土木学会:【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編], 社団法人土木学会, p.123, 2002.3

