

論文 北陸地方のフライアッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性に関する検討

田治 愛里*1・伊藤 始*2・参納 千夏男*3・宮里 心一*4

要旨: 北陸地方ではフライアッシュ混入量 15%のコンクリートが用いられている。今回は、北陸地方のフライアッシュを用いた断熱温度上昇特性の評価を目的とし、簡易断熱温度上昇試験と熱伝導解析を実施した。実際の試験条件を再現するために、まず熱伝達係数の算定を行い、次に熱伝導解析により断熱温度上昇特性を推定した。その結果、終局断熱温度上昇量の推定値は設計値に比べて、七尾大田火力発電所産フライアッシュで大きく、敦賀火力発電所産のもので小さくなった。上昇速度の推定値は設計値に比べていずれのケースも小さくなった。

キーワード: フライアッシュ, マスコンクリート, 断熱温度上昇特性, 熱伝達係数, 熱伝導解析

1. はじめに

日本において電力の安定供給に重要な役割を果たしている石炭火力発電所では、発電の際に副産物として大量のフライアッシュ（以下、FA と記す）が産出されている。FA をコンクリートに添加することで、温度ひび割れの抑制、施工性や耐久性の向上、セメントの代替によるCO₂削減などの様々な効果がある^{1), 2), 3)}。このようにコンクリートの性能が向上するだけでなく、地球環境保全の観点からもFAの活用は有効である。

北陸地方では、コンクリート構造物の維持管理においてアルカリシリカ反応と塩害が大きな問題となっている。FA をコンクリートに用いることで、この両方を抑制する効果が得られる。また、北陸地方には製鉄所がなく、石炭火力発電所のみが立地するため、地産地消や廃棄物削減の観点からもFAの有効活用が進んでいる。

本研究では、FAの効果のうちマスコンクリートにおける温度ひび割れの抑制に着目した。この効果はFAを用いたコンクリートが普通ポルトランドセメントや高炉セメントを用いたコンクリートに比べ水和発熱に伴う温度上昇量や温度上昇速度が小さいことに起因する。これらを総称する断熱温度上昇特性は、セメントの種類や配合など様々な要因によって変化する物性値であり、セメント種類、単位セメント量、および打込み温度を与えることで、土木学会や日本コンクリート工学会の提示する算定式により設計値 ($Q_{s, r}$) を推定することができる^{4), 5)}。しかしながら、この設計値のFAの混入量は18%であるのに対して、北陸地方でのFAの標準的な混入量は15%である。さらには、分級FAとして粉末度の高い高品質のFAが使用されている。このように、実際に使用

されているFAの品質と混入量が設計値の設定(粉末度: 3400cm²/g)と異なることから、北陸地方のFAコンクリートに使用できる断熱温度上昇特性を正確に求めることが必要である。

そこで、今回は北陸地方で実際に用いられているFA混入量15%のコンクリートを用いて、断熱温度上昇特性を評価し解析に用いる物性値を提案することを目的に、簡易断熱温度上昇試験（以下、簡易試験と記す）と熱伝導解析を実施した。実際の試験条件を再現するために、まず熱伝達係数の算定を行い、次に熱伝導解析により断熱温度上昇特性を推定した。推定した結果と設計値の断熱温度上昇特性を比較することで、北陸地方のFAを用いた断熱温度上昇特性を評価した。

2. 簡易断熱温度上昇試験

2.1 試験ケース

試験ケースと配合を表-1に示す。6種類の骨材産地（富山県の早月川産(H)と庄川産(S)、石川県の手取川産(T)と能登産(N)、福井県の九頭竜川産(K)、滋賀県の今津産(I)）と2種類の呼び強度(24, 27)からなる計12ケースとした。FAについては、石川県の七尾大田石炭火力発電所(NA:粉末度は、4870cm²/g)、福井県の敦賀石炭火力発電所(TSU:粉末度は、4740cm²/g)からそれぞれ産出されたものを使用した。ケース名はNA-S27のように「FA産地・骨材産地、呼び強度」の順で表した。練上がり直後のフレッシュ性状として、スランプが8.0±2.0cm、空気量が4.5±1.5%となるように混和剤量を調整した。セメント種類は普通ポルトランドセメントであり、FAは内割りで15%置換としている。

*1 富山県立大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 北陸電力株式会社 土木部 土木技術チーム 博士(工学) (正会員)

*4 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

2.2 試験方法

図-1 に簡易断熱温度上昇試験装置を示す。コンクリート寸法は 300mm×300mm×300mm である。この試験では約 23°C の試験室内で 7 日間、コンクリートの温度を計測した。保温材として発泡スチロール、硬質ウレタンフォームを使用して断熱に近い状態を模擬した。熱電対を用いて供試体の中心 T0、上面 T1、下面 T2、および側面 T3 の計 4 ヶ所におけるコンクリートの温度を 1 時間ごとに計測した。T1、T2、T3 は型枠面から 5mm 内側のコンクリート温度を示す。図-2 は実際の試験状況である。



図-2 簡易断熱温度上昇試験状況

2.3 試験結果

NA-S27 と TSU-K24 の簡易試験の温度履歴を図-3 に示す。コンクリートの上面 T1、下面 T2、および側面 T3 はほぼ同じ温度履歴を示した。全ケースにおいて、打込み温度は 20°C 前後であり、最高温度は材齢 2 日ほどで 40~50°C であった。中心と側面の温度差の最大値は NA-S27 で 0.8°C であり、TSU-K24 で 0.6°C であった。また、中心と側面の温度差の平均値は NA-S27 で 0.3°C であり、TSU-K24 で 0.2°C であった。コンクリートの中心と側面の距離は 150mm と近いこと、温度差が大きくならなかった。

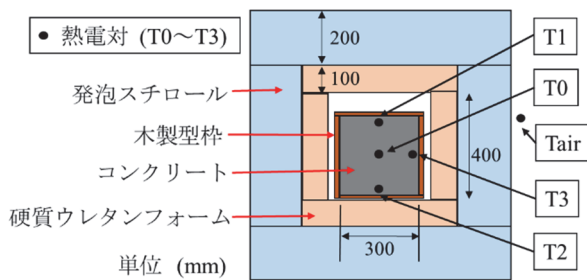
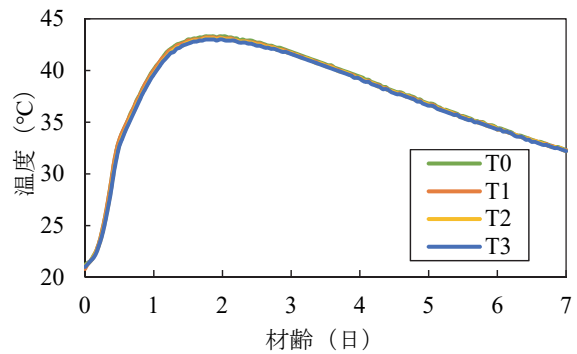
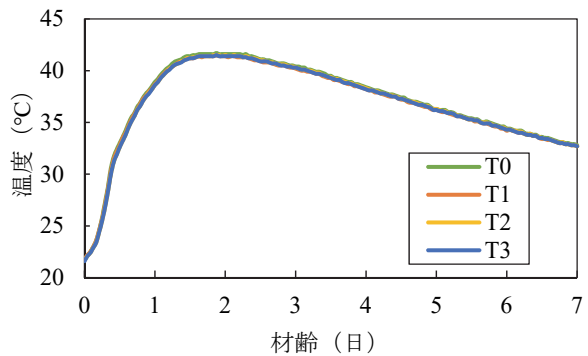


図-1 簡易断熱温度上昇試験装置



(a) NA-S27



(b) TSU-K24

図-3 簡易試験の温度履歴

表-1 試験ケース

ケース名	FA産地	骨材産地		呼び強度	水結合材比(%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)					打込み温度(°C)
							水 W	セメント C	混和材 FA	細骨材 S	粗骨材 G	
NA-H24	七尾大田火力発電所	富山県	早月川	24	58.5	45.5	158	229	41	850	1035	22.4
NA-H27				27	54.4	44.6	157	245	43	828	1044	23.5
NA-S24			庄川	24	55.4	44.7	149	229	40	828	1034	21.8
NA-S27				27	50.0	43.6	150	255	45	795	1038	21.6
NA-T24		石川県	手取川	24	57.0	46.0	146	218	38	858	1021	22.5
NA-T27				27	53.3	45.7	144	230	40	851	1021	23.9
NA-N24			能登	24	54.6	42.7	171	266	47	742	1024	24.7
NA-N27				27	51.2	42.1	171	284	50	725	1024	22.3
TSU-K24	敦賀火力発電所	福井県	九頭竜川	24	51.0	44.1	152	253	45	799	1039	22.1
TSU-K27				27	47.9	43.5	152	269	48	781	1041	22.2
TSU-I24		滋賀県	今津	24	51.9	43.2	165	270	48	791	1068	19.9
TSU-I27				27	50.0	42.2	165	292	52	762	1074	20.2

3. 熱伝達係数の算定

3.1 熱伝達係数の算定方法

図-4 にコンクリートの温度勾配モデルを示す。熱伝達係数はコンクリートから外気への伝達を対象として算定した。はじめに、 T_1 , T_2 , T_3 を式(1)に入力して型枠から5mm内側の平均温度 T_4 を算出した。次に、コンクリートの中心温度 T_0 と型枠内面の平均温度 T_4 に放物線を仮定し、コンクリートと型枠の境界面の温度 T_5 を推定した。推定した T_5 と外気の温度 T_{air} の関係は式(2)に示すような熱流束で与えられる。最後に、熱伝達係数 η ($W/m^2\text{C}$)は式(2)より、 T_4 と T_5 間の微小立方体における熱の収支を用いて求めた。

$$T_4 = (T_1 + T_2 + 4T_3) / 6 \quad (1)$$

$$q = \eta(T_5 - T_{air}) \quad (2)$$

3.2 熱伝達係数の算定結果

材齢7日までの計測データを用いて、2時間ごとに熱伝達係数を算定した。今回の試験では、コンクリート内部から外部への放熱を正の値としているため、外部から内部への熱伝達である材齢初期の負の値を除いて整理した。また、 $10W/m^2\text{C}$ 以上と値が大きく外れた場合に平均には含めなかった。

図-5(a)は NA-S27 と TSU-K24 の熱伝達係数の算定結果である。両ケースとも材齢約0.75日までは熱伝達係数の値が変化した。これは、材齢約0.75日までは温度変化が大きかったためである。

図-5(b)に全ケースの熱伝達係数を2時間ごとに平均した結果を示す。図-5(a)の2ケースと同様に材齢0.75日までは値が大きく変化した。これより、材齢0.75日の前後で熱伝達係数を変えて熱伝導解析に使用することとする。それぞれの区間において12ケースの熱伝達係数の平均を使用し、材齢0~0.75日は $2.11W/m^2\text{C}$ 、材齢0.75~7日は $0.46W/m^2\text{C}$ とした。

4. 熱伝導解析を用いた断熱温度上昇特性の推定

4.1 熱伝導解析

熱伝導解析を用いた逆解析により推定を行った。逆解析とは、計測データから未知の解析条件を推定する手法である。通常用いられる順解析は解析条件を入力し、結果として温度履歴を算出するものであり、コンクリートの打込み条件が順解析の仮定と必ずしも一致するとは限らない。そこで、逆解析を用いて解析条件を推定することで、熱伝導解析の精度が向上すると考えた。

今回の逆解析では、目的関数を最適化するように解を求める直接定式化法を用いた。この手法は、最適制御理論を応用したものであり、計測データとして与えられた温度と計算で得られた温度の誤差を最小化するように

未知変数を推定する手法である。

逆解析の入力値として簡易試験における温度の計測データを用い、結果として断熱温度上昇特性を導き出した。逆解析におけるパラメータを Q_∞ と r に絞るため、断熱温度上昇特性には時間遅れを考慮しない式(3)を用いた⁴⁾。

$$Q(t) = Q_\infty(1 - e^{-rt}) \quad (3)$$

ここで、 $Q(t)$ は材齢 t 日における断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$)、 Q_∞ は終局断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$)、 r は温度上昇速度に関する定数を表す。

4.2 推定方法

マスコンクリートの温度応力解析プログラム (ASTEAMACS) を用いて、簡易試験を模擬したモデルを作成した。解析モデルは図-6のような2次元1/4モデルであり、コンクリートのみを解析した。要素の寸法は1辺5mmとし、赤色の線は型枠面を示している。

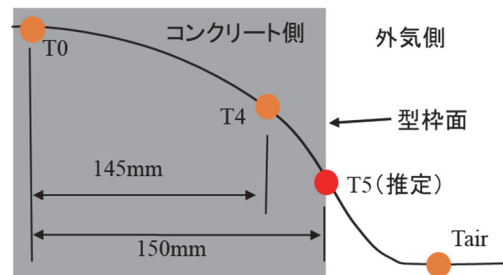
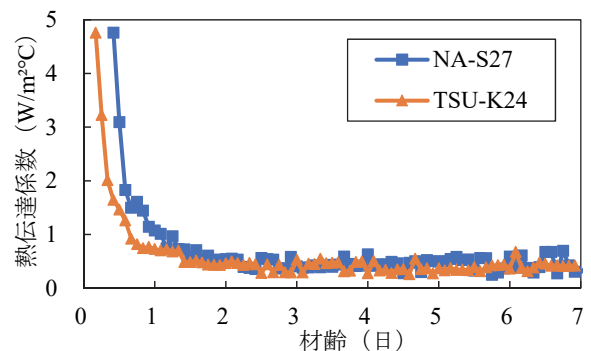
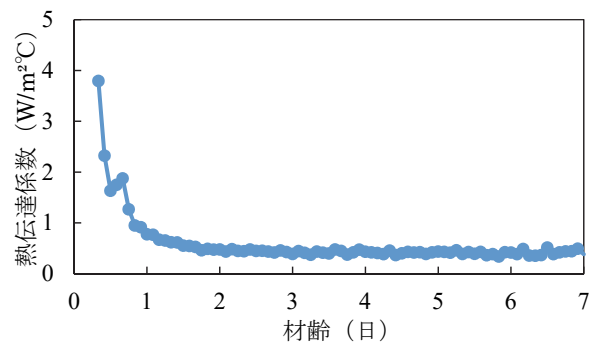


図-4 温度勾配モデル



(a) NA-S27, TSU-K24



(b) 全ケースの平均値

図-5 熱伝達係数の履歴

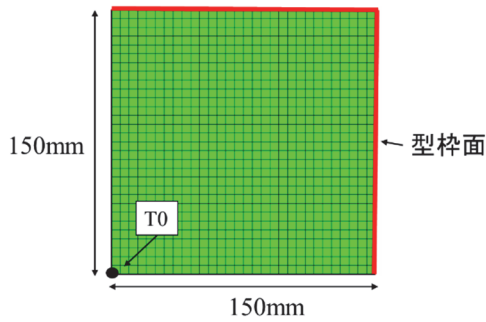


図-6 解析モデル

解析に用いた熱物性値と境界条件を表-2に示す。熱物性は示方書の標準的な値を用い、初期温度は表-1の打込み温度をケースごとに入力した。境界条件の熱伝達係数は3章で算定した12ケースの平均値を使用した。解析が2次元であるため、3次元から2次元への変換として熱伝導率と熱伝達係数をそれぞれ1.5倍とした。

断熱温度上昇特性の推定は材齢7日までを対象として、逆解析には計測データT0を1時間ごとに入力した。

4.3 断熱温度上昇特性の推定結果

図-7にNA-H27, NA-S27, TSU-K24の断熱温度上昇特性の温度履歴を示す。図中には土木学会の断熱温度上昇特性の設計値をFAと普通ポルトランドセメント(以下、Nと記す)について示した。設計値は Q_{∞} , r を各ケースの実際の単位粉体量から算定したものである。NはCのみ、FAは(C+FA)をセメント量として入力し、FAは18%置換の式を用いた。さらに、NA-H27のケースのみにおいて同一の配合で完全断熱温度上昇試験を実施しており、その結果も示した⁶⁾。

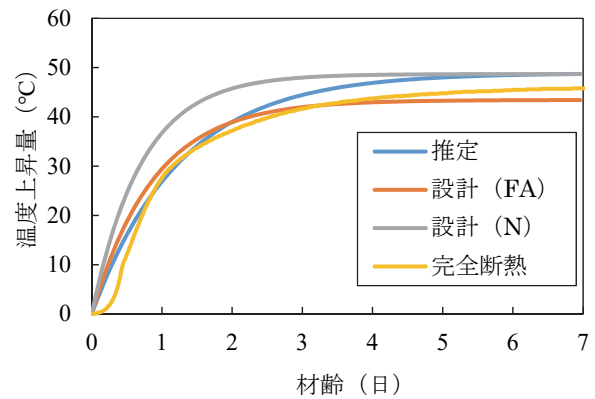
NA-H27の推定値は材齢2.5日程度で40°Cを超え、7日で約48°Cに到達した。推定値は材齢2日までの範囲でFAの設計値を下回り、7日でNの設計値に近い値になった。推定値は材齢1日付近で完全断熱と同程度の値になり、材齢7日の温度差は約3°Cほどであった。NA-S27の推定値は材齢7日までの範囲でFAの設計値を下回り、7日でFAの設計値に近い値になった。TSU-K24の推定値は全範囲でFAの設計値を下回った。

4.4 全ケースの比較

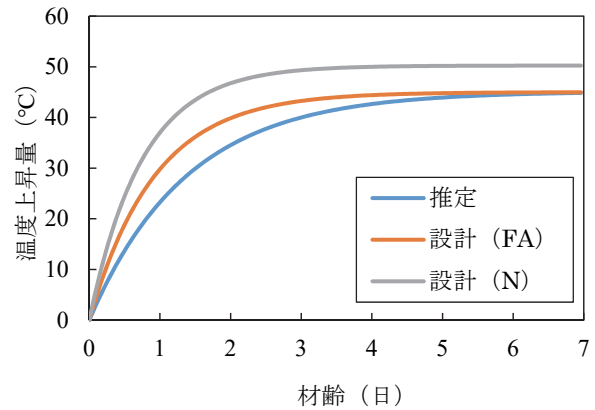
図-8に各ケースの配合における単位粉体量と推定した Q_{∞} および r の関係を示す。全12ケースにおける Q_{∞} の最小値は39.59°Cであり、最大値は52.97°Cであった。 r の最小値は0.667であり、最大値は0.969であった。 Q_{∞} は単位粉体量に対して増加傾向がみられ、 r の傾向は明確でなかった。七尾大田産-能登産のNA-Nシリーズにおいて、呼び強度27の終局断熱温度上昇量 Q_{∞} が24の値を下回ったが、その他のシリーズでは呼び強度27の値が呼び強度24の値を上回った。単位粉体量と推定した Q_{∞} と r の関係にFA産地ごとの相違は見られなかった。

表-2 解析に用いた物性値

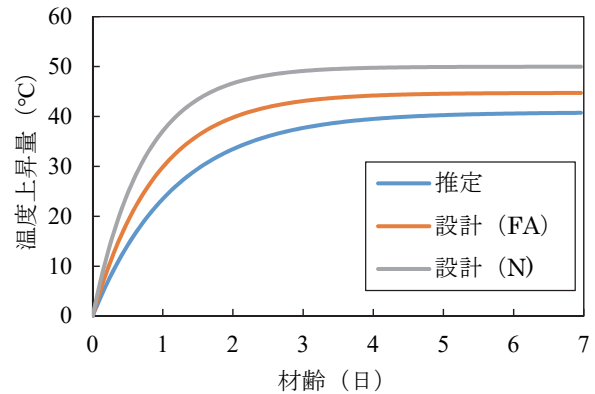
項目	単位	物性値	
熱物性	熱伝導率	W/m°C	4.05
	密度	kg/m ³	2400
	比熱	kJ/kg°C	1.15
	初期温度	°C	表-1 打込み温度
境界条件	熱伝達係数	W/m ² °C	材齢0~0.75日: 3.16 材齢0.75~7日: 0.69
	外気温	°C	23



(a) NA-H27



(b) NA-S27



(c) TSU-K24

図-7 断熱温度上昇特性の温度履歴

5. 断熱温度上昇特性の設計用値に関する検討

5.1 検討方法

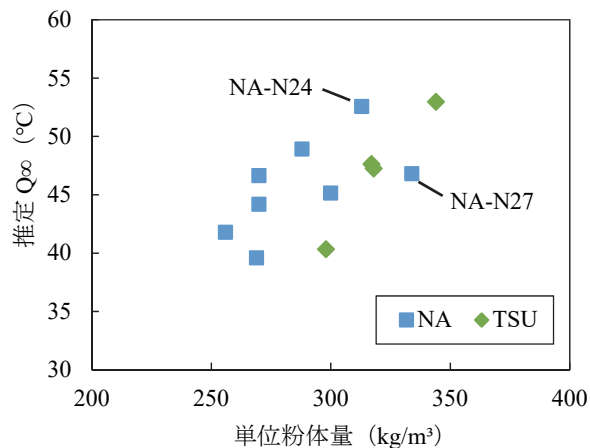
土木学会コンクリート標準示方書の算定式に基づき、今回の七尾大田火力発電所産 FA および敦賀火力発電所産 FA を使用した時の断熱温度上昇特性の設計用値を検討した。1 つ目の方法は、土木学会における終局断熱温度上昇量 Q_{∞} および断熱温度上昇速度 r と今回の Q_{∞} および r の差異を比較して、変化率を求めるものである。2 つ目の方法は、土木学会の Q_{∞} と r が単位セメント量と打込み温度から算定されることを利用して、今回推定した曲線に相当する単位セメント量（単位粉体量）を比較するものである。この方法では N と FA の Q_{∞} と r の各算定式の単位セメント量を変化させて、推定曲線に最も近似したときの単位セメント量を求めた。近似の範囲を材齢 0 日から 7 日までとして、近似法を最小二乗法とした。

5.2 Q_{∞} と r の変化率に関する比較

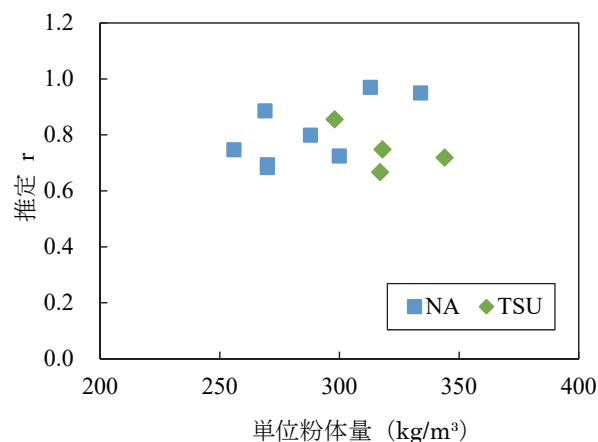
図-9 にそれぞれの FA の産地における断熱温度上昇特性 Q_{∞} , r の推定値と N および FA の設計値の比較を示す。また、表-3 に設計値に対する推定値の割合を示す。ここで、 R_1 , R_2 , R_3 は七尾大田産または敦賀産の FA を利用し、FA 置換率 15%程度の際に適用可能とする。設計値に対する近似は、推定値を直線で表すことで行った。七尾大田産 FA シリーズにおいて、推定 Q_{∞} は FA の設計 Q_{∞} よりも約 5%大きくなり、推定 r は FA の設計 r よりも 4 割ほど小さくなった。これは前述の NA-H27 ケースの断熱温度上昇曲線で見られたように、材齢初期で推定値が設計値より小さく、材齢 7 日で推定値が設計値より大きいことに一致する。一方、敦賀産 FA のシリーズにおいて、推定 Q_{∞} は FA の設計 Q_{∞} よりも約 1%小さくなり、推定 r は FA の設計 r よりも 3 割ほど小さくなった。これも TSU-K24 の曲線の傾向と一致する。今回の FA を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性は、土木学会の FA の算定式から得られた Q_{∞} と r に、表-3 中の R_1 と R_2 を乗じることで求められる。

5.3 単位粉体量に関する比較

図-10 にそれぞれの FA の産地における実際の配合上の単位粉体量と推定曲線を近似したときの単位セメント量の入力値の関係を示す。表-3 に単位粉体量に対する入力値の割合を示す。七尾大田産 FA において単位粉体量と入力値がほぼ一致し、敦賀産 FA において単位粉体量は入力値よりも約 8%小さくなった。今回の FA を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性は、配合上の単位粉体量に表中の R_3 を乗じた値を、土木学会の FA の算定式における単位セメント量に入力することで求められる。なお、表-3 から配合上の単位粉体量を、算定式の単位セメント量に入力することで安全側の評価になることがわかる。



(a) 推定 Q_{∞}



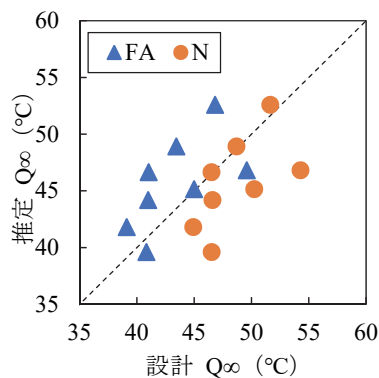
(b) 推定 r

図-8 単位粉体量と断熱温度上昇特性の関係

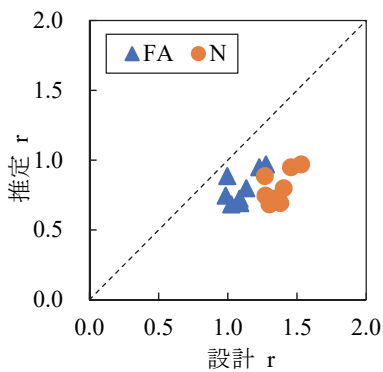
6. まとめ

簡易断熱温度上昇試験と熱伝導解析の実施により、北陸地方のフライアッシュを用いた場合の断熱温度上昇特性を評価し、解析に用いる設計値を提案することができた。本研究より得られたまとめを以下に示す。

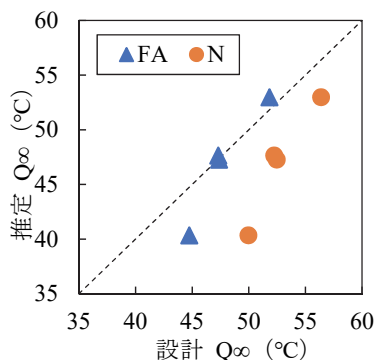
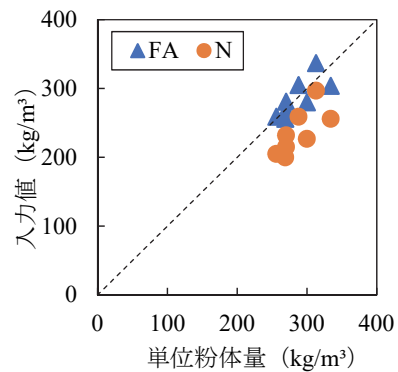
- (1) 本研究で使用した簡易断熱温度上昇試験の熱伝達係数は、温度変化が大きい材齢初期にはばらついたが、その後は安定した値となった。
- (2) 熱伝達係数の変化が大きい 0.75 日までの範囲と安定した 0.75 日以降の範囲で熱伝達係数を区分して断熱温度上昇特性の推定を行ったところ、土木学会設計値の曲線や完全断熱試験の曲線と類似した傾向を示した。
- (3) 終局断熱温度上昇量の推定値は設計値に比べて、七尾大田産 FA で大きく、敦賀産のもので小さくなった。上昇速度の推定値は設計値に比べていずれのケースも小さくなった。



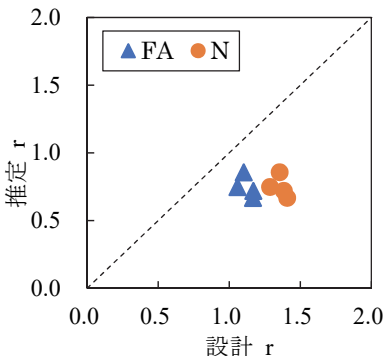
(a) 七尾大田産 FA



(a) 七尾大田産 FA



(b) 敦賀産 FA



(b) 敦賀産 FA

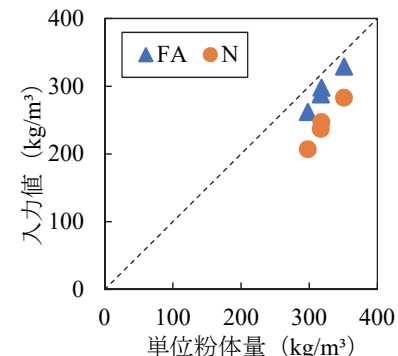


図-10 セメント量の比較

図-9 設計値との比較

表-3 設計値に対する推定値の割合および単位粉体量に対する入力値の割合

	設計 Q_{∞} に対する推定 Q_{∞} の割合	設計 r に対する推定 r の割合	単位粉体量に対する入力値の割合
	R_1	R_2	R_3
七尾大田	1.052	0.590	0.994
敦賀	0.986	0.662	0.918

参考文献

1) 加地貴, 石井光裕, 橋本紳一郎, 橋本親典: フライアッシュコンクリートの実規模施工試験による実用性の検討, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.713-727, 2006

2) 山本武志, 金津努: フライアッシュのポズラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.52-65, 2007
 3) 土木学会: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2009
 4) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.335-336, 2017
 5) 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, pp.47-50, 2008
 6) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用検討委員会: 報告書(富山・石川・福井版), pp.65-68, 2013