

簡易試験による HVFA コンクリートの断熱温度上昇量の推定

吉岡 慧* 吉田和隆** 吉武 勇***

浜田純夫*** 北原敦志****

Estimation of Adiabatic Temperature Rise of HVFA Concrete by Simplified Method

by

Satoshi YOSHIOKA*, Kazutaka YOSHIDA**, Isamu YOSHITAKE***,

Sumio HAMADA*** and Atsushi KITAHARA****

There is a large demand in consumption of fly ash due to current increase of coal power plants. Fly ash in concrete as admixture contributes to decrease heat of hydration. The larger amount of fly ash is in concrete, the lower heat of hydration is generated in the early age. This is caused by substitution of fly ash for cement, which implies that less cement is mixed in the concrete. Present paper describes adiabatic temperatures of the high volume fly ash concrete. The estimated adiabatic temperature in the concrete standard specification evaluates a little higher for amounts less than 200kg/m³ of cement in concrete, and an equation of adiabatic temperature for these amounts of cement is herein proposed.

Key words: Adiabatic Temperature Rise, Fly Ash, HVFA Concrete, Simplified Test, Early Age, Compressive Strength

1 緒 言

近年におけるコンクリート構造物の大型化・大量急速施工の増加に伴い、セメントの水和熱によって生じる温度応力が構造物にひび割れ（温度ひび割れ）を発生させる場合がある。このような現象はダムコンクリートなどのマスコンクリート構造物特有のものと考えられていたが、施工条件や使用材料によっては、比較的小さな構造物でも温度ひび割れが生じる事例も少なくない。一般にこのような温度ひび割れの対策・処置は、施工段階において特に検討されているが、施工段階のみでは対応できない場合もあり、その根本的な解決策が望まれている。

一方、石炭灰の発生量は年々増加の一途を示しており、2003年時点では電気事業において約750万トンに達している¹⁾。そのため、石炭灰の約9割を占めるフライアッシュをコンクリート混和材として有効利用することは社会的意義も大きく、増え続ける発生量対策にも繋がると考えられる。米国においても大量のフライアッシュが産出されており、産業廃棄物の有効利用が不可欠とされている。このためにフライアッシュを大量使用した（ハイボリュームフライアッシュ、以下 HVFA と称す）コンクリートの研究が近年活発に進められている。このような研究は、Naik ら²⁾、Malhotra ら³⁾が特に精力的に行っており、従来のフライアッシュセメントにおけるフライアッシュ量を超えた適用性を模索するためにシンポジウムも多く開催されている。

一般にフライアッシュにはポゾラン反応による長期

強度の増進が望めるため、セメントの一部代替材としてコンクリートの水和熱の抑制効果が見込まれる。しかしながら、フライアッシュを（大量）使用したコンクリートは、初期材齢時において、一般的なコンクリートに比べ、強度が小さいなど多くの検討項目も指摘されており、参考となる研究結果や施工実績が少ないため、その使用にあたっては上限値⁴⁾が規定されている。

そこで本研究では、フライアッシュをセメント質量に対して50%以上内割り置換したコンクリートを HVFA コンクリートと定義し、同コンクリートのマスコンクリートへの適用に関する基礎的データを取得するため、簡易断熱温度上昇試験（以下、簡易試験⁵⁾）を用いてフライアッシュ置換率に伴う断熱温度上昇特性を調べた。さらに懸案事項とされている HVFA コンクリートの初期強度発現性について、圧縮強度の材齢変化を調べるとともに、その一方策として早強ポルトランドセメント利用の有効性についても検討を試みた。

2 実験概要

2.1 断熱温度上昇量の測定方法

本研究では、コンクリートの断熱温度上昇量を測定するため、既往の研究⁵⁾で提案されている簡易試験を行った。この簡易試験では、Fig.1 に示すように、発泡スチロールで作製した断熱型枠（400×400×400mm）の中心に、200×200×200mm 状のコンクリートを打設する。そして熱電対（T-type）を用いてコンクリート供試体の中心温度（コンクリート温度 T_c ）の経時変化を測定するととも

+ 原稿受理 平成 年 月 日 Received

* 学生会員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 正会員 下松アサノコンクリート(株) 〒744-0011 下松市西豊井, Kudamatsu Asano Concrete Co.,Ltd., Nishitoyoi, Kudamatsu,744-0011

*** 正会員 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

**** 前田道路(株) 〒141-8665 品川区大崎, Maeda Road Construction Co.,Ltd., Sinagawa-ku, Tokyo,141-8665

に、Fig.2 に示すように、この断熱型枠の放熱特性に応じた（推定）温度損失量 T_l をコンクリート温度 T_C に随時加算することで、断熱温度 T_{ad} を推定するものである。ここで、温度損失量 T_l は、予め求めた断熱型枠の温度降下勾配式（温度差との1次関数）に、コンクリートと基準温度間の温度差を代入することで求めることができる。この簡易試験による断熱温度上昇量の推定に用いる基礎式を式（1）～（4）に示し、そのフローチャートをFig.3 に示す。

$$T_d = \overline{T_C}(t) - \overline{T_O}(t) \quad (1)$$

$$k_i(\overline{T_d}) = \alpha \cdot \overline{T_d} \quad (2)$$

$$T_l(t) = \int_0^t k_i(\overline{T_d}) dt \quad (3)$$

$$T_{ad}(t) = T_C(t) + T_l(t) \quad (4)$$

ここで、 T_C ：コンクリート温度、 T_O ：基準温度、 T_d ：温度差、 T_l ：温度損失量、 T_{ad} ：断熱温度、 t ：時間（材齢）、 k_i ：断熱型枠の温度降下勾配式、 α ：断熱型枠の放熱特性を示す係数（実験値）を表し、上添字 $\bar{\quad}$ は微小時間 dt 間の平均を意味する。

本研究では、以下のような手順で断熱型枠の温度降下勾配式を求めた。

- i) 簡易試験に用いたコンクリート供試体（材齢 7 日以降）を断熱型枠から取り出し、60℃に温度制御された恒温機内に 24 時間以上静置
- ii) 内部まで 60℃に均等に加熱されたコンクリートを、再び断熱型枠内に設置
- iii) 同断熱型枠を 20℃の恒温室内に静置し、コンクリート内部温度と恒温室内の温度（基準温度）を 15 分毎に計測
- iv) 単位時間あたりの温度低下量（℃/min）と温度差の関係を整理し、その 1 次回帰から温度降下勾配式を決定

2.2 使用材料

本研究で作製した HVFA コンクリートには、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント N）および早強ポルトランドセメント（以下、早強セメント H）を使用した。Table 1 に用いたセメントの物性値を示す。また、フライアッシュは JIS A 6201 の II 種規格を満足するものを使用した（Table 2）。

なお本研究で使用した細骨材および粗骨材は、それぞれ海砂（密度 2.60g/cm³、F.M.2.44、吸水率 0.74%）、安山岩系砕石（密度 2.70g/cm³、吸水率 0.61%、最大骨材寸法 20mm）である。さらに、フライアッシュを含まないコンクリートにはリグニンスルホン酸系の AE 減水剤とポリアルキレングリコール系の空気量調整剤を用い、フライアッシュ混入コンクリートには、アルキルカルボン酸系のフライアッシュ用 AE 剤を用いた。

2.3 配合

Table 3 にコンクリートの配合を示す。本研究では、呼び強度が 24 および 36N/mm²の山口県生コンクリート工

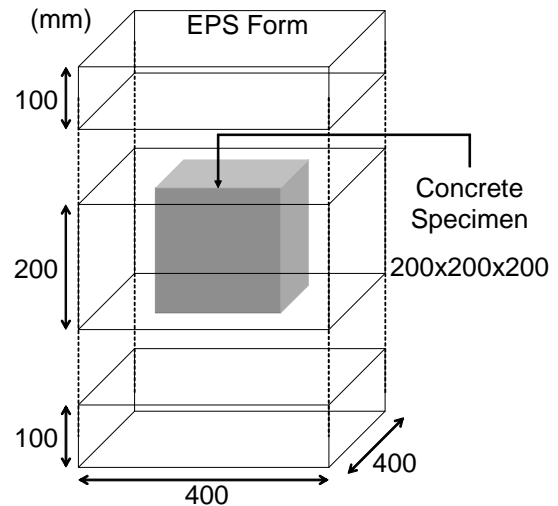


Fig. 1 Concrete specimen and EPS form

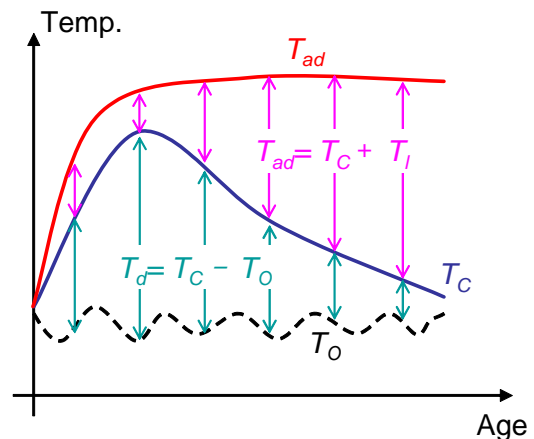


Fig. 2 Estimation of adiabatic temperature rise

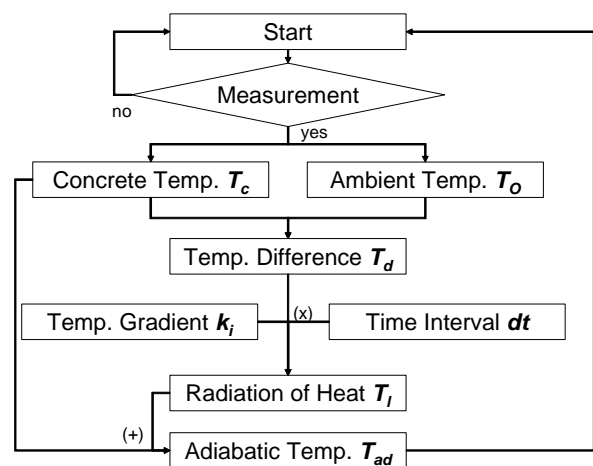


Fig. 3 Flowchart of the simplified method

業組合の標準配合を基に、フライアッシュを普通セメント N に対して容積比率で 0%、50%、60%および 70%置換したコンクリートを作製した（N シリーズ）。ここで容積比率を用いた理由は、単位結合材容積を一定とし、骨材の質量を一定にするためである。さらに、早強セメント H を用いた実験シリーズ（H シリーズ）では、N シ

Table 1 Characteristics of cement

Cement	Density (g/cm ³)	Specific surface (cm ² /g)	Heat of hydration (J/g)	
			7day	28day
N	3.16	3300	327	383
H	3.14	4520	—	—

Table 2 Characteristics of fly ash (FA)

	Standard value	Examination value
SiO ₂ (%)	45.0 Min	60.3
Moisture (%)	1.0 Max	0.1 Max
Loss of ignition (%)	5.0 Max	2.9
Density (g/cm ³)	1.95 Min	2.30
Specific surface area (cm ² /g)	2500 Min	4230
Compared with flow value (%)	95 Min	100
Strength Activity Index	28day	80 Min
	91day	82
		96

Table 3 Concrete mix proportion

No.	Unit weight (kg/m ³)				
	W	C	FA	S	G
N24-0	167	288	0	893	1008
N24-50		144	105		
N24-60		116	126		
N24-70		87	147		
N36-0	171	390	0	795	1013
N36-50		195	142		
N36-60		156	170		
N36-70		117	199		
H24-0	166	286	0	894	1010
H24-50		143	105		
H24-70		86	147		
H36-0	171	388	0	795	1013
H36-50		194	142		
H36-70		116	199		

リーズの配合を基に、フライアッシュ置換率を0%, 50%, 70%の3水準としたコンクリートを作製した。

表中の記号のうち、セメント種類を示すNやHに続く数字は、呼び強度を示し、末尾の数字はフライアッシュ置換率を表している。

本研究では、ポンプ圧送によるコンクリート打設を想定して、目標スランプを12±2.5cmとした。また一般的なコンクリートでは、目標空気量は4~5%程度とされることが多いが、フライアッシュを用いる場合、フライアッシュの未燃炭素分がAE剤を吸着し⁴⁾、空気量の確保が困難であったため、HVFAコンクリートでは、2.0±0.5%を目標空気量に設定した。なお、目標スランプおよび目標空気量を満足するように混和剤により調整を行い、最大練混ぜ量50リットルのパン型強制練りミキサーを使用してコンクリートの練混ぜを行った。

3 結果と考察

3.1 温度降下勾配

本研究では、2.1節に示した手順に基づいて、使用した断熱型枠の温度降下勾配を求めた。その代表的な例として、N36-0およびN36-70における温度差と温度降下勾配の関係を Fig.4 に示す。この結果よりフライアッシュ置換率が0%および70%と異なるものの、両者間の相違

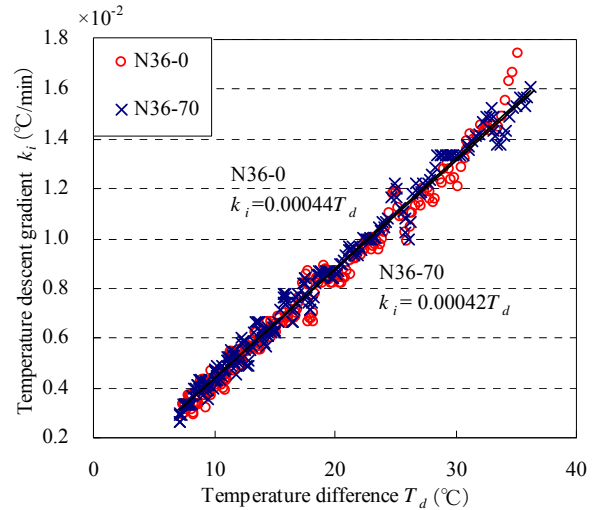


Fig. 4 Relationship between k_i and T_d

はほとんどみられないことから、温度降下勾配式に対するフライアッシュ置換率の影響は小さいと考えられる。

3.2 断熱温度上昇量試験

Fig. 5, 6にNシリーズ、Fig. 7, 8にHシリーズの断熱温度上昇量の材齢変化を示す。これらの結果は、打設温度が20~25°Cで行ったものである。また各図にはコンクリート標準示方書 [施工編]⁶⁾に示される断熱温度上昇予測式(5)~(7)より求めた推定値も併記している。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (5)$$

$$Q_{\infty} = aC + b \quad (6)$$

$$\gamma = gC + h \quad (7)$$

ここで、 $Q(t)$:材齢t日における断熱温度上昇量(°C)、 Q_{∞} :終局断熱温度上昇量(°C)、 γ :温度上昇速度に関する定数、 C :単位セメント量(kg/m³)、 t :材齢(日)、 a, b, g, h :セメント種類・打設温度による係数である。

さらに Table 4 には、材齢7日時点における断熱温度上昇量(終局断熱温度上昇量 Q_{∞} に相当)をまとめて示す。Fig.5~8 および Table 4 に示す結果より、フライアッシュ置換率の増加に伴い、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は低下していることがわかる。これはフライアッシュ置換率の増加に伴いセメント量が減少し、発生する水和熱が低くなったことによるものと考えられる。特に H36-70 を除いて、フライアッシュ置換率が70%のコンクリートでは、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は約16~20°Cとなった。Malhotra ら³⁾によると、温度ひび割れを防ぐためのコンクリートと外気温の最大温度差は20°C以下と述べており、これらの結果からもフライアッシュを70%程度置換することの有効性が窺える。

また、単位セメント量がほぼ等しい配合(例えば、N24-60とN36-70)において、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} が同程度となった。このことから終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は単位セメント量 C に比例し、単位フライアッシュ量 FA の影響はほとんどないものと考えられる。

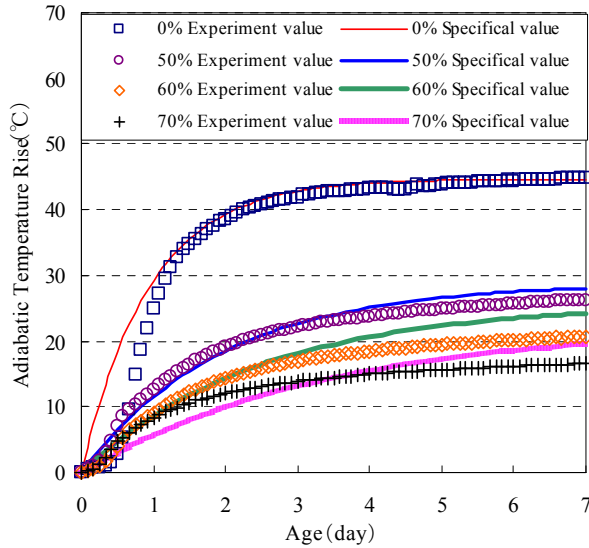


Fig. 5 Adiabatic temperature rise in N24 series

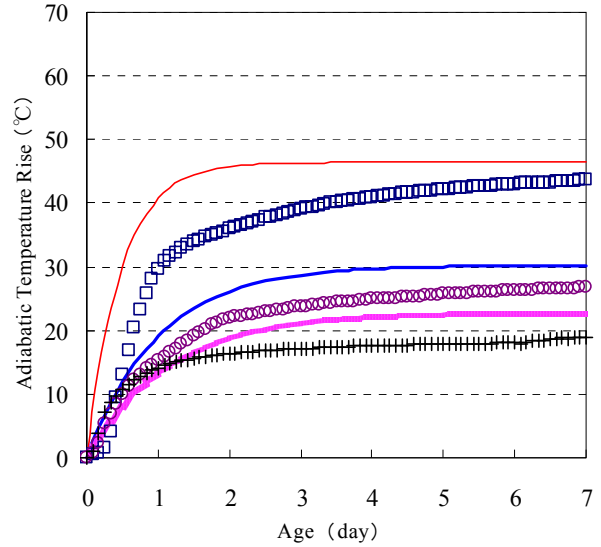


Fig. 7 Adiabatic temperature rise in H24 series

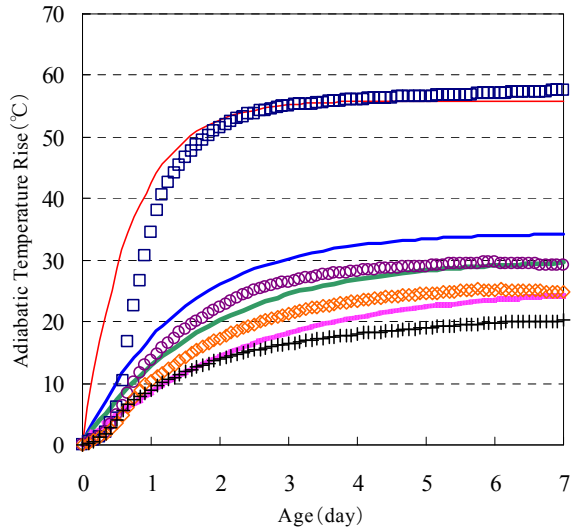


Fig. 6 Adiabatic temperature rise in N36 series

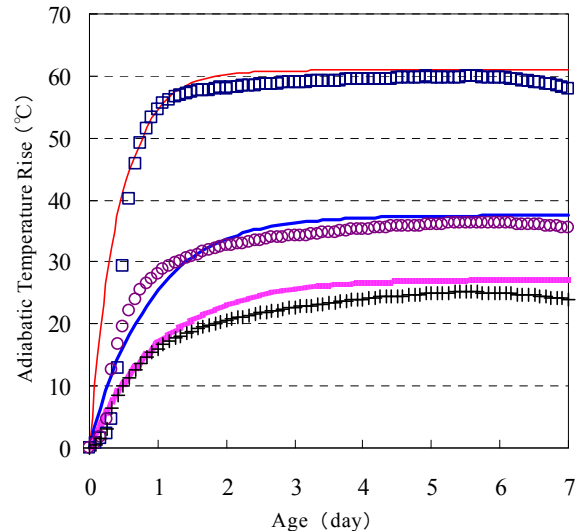


Fig. 8 Adiabatic temperature rise in H36 series

3.3 断熱温度上昇量の推定

本研究で行ったNシリーズの材齢7日における断熱温度上昇量、式(6)に示される終局断熱温度上昇量 Q_{∞} および Malhotra ら³⁾の終局断熱温度上昇量 Q_{∞} について単位セメント量 C を基に整理を行った (Fig.9, Table4). なお, Malhotra らの研究³⁾では, HVFA コンクリートを用いて巨大ブロック (3.05×3.05×3.05m) を打設し, その中心部の温度から断熱温度上昇量 Q_{∞} を求めている. そのため, ここに示す結果は, 完全断熱状態におけるものでなく, 他に比して低い終局断熱温度上昇量 Q_{∞} となっている.

Fig.9 に示す結果より, 単位セメント量 C が 250~400kg/m³ のコンクリートにおいては, 本実験値と示方書の推定値が概ね一致していることが分かる. しかしながら, セメント量 C の減少に伴い, 実験値が推定値よりも低くなる傾向がみられ, 200kg/m³ 以下のコンクリートに

Table 4 Ultimate adiabatic temperature rise

N-series	Q_{∞} °C	H-series	Q_{∞} °C
N24-0	44.8	H24-0	43.7
N24-50	26.3	H24-50	24.8
N24-60	20.7	----	----
N24-70	16.5	H24-70	19.3
N36-0	57.6	H36-0	53.4
N36-50	29.1	H36-50	35.5
N36-60	24.8	----	----
N36-70	20.2	H36-70	24.8

おいては, 両者間の乖離が 5°C程度となった. これは式(6)に示す示方書の推定式が単位セメント量 250~400kg/m³ の範囲から得られたものであり⁷⁾, 200kg/m³ 以下の配合には十分な精度を有していないためと考えられる.

ここで, 本実験で得られた終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と単位セメント量 C の関係式を式(5)に代入すると次式

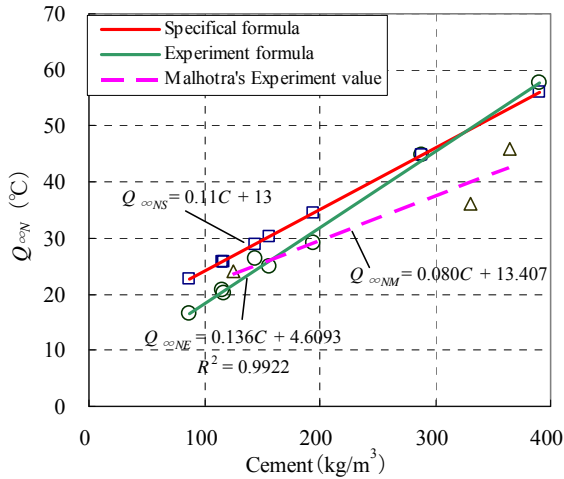


Fig. 9 Relationship between Q_{∞} and C (N series)

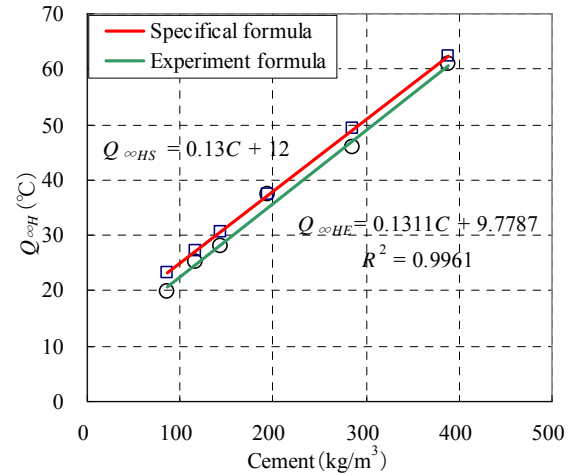


Fig. 10 Relationship between Q_{∞} and C (H series)

が得られる。

$$Q(t) = (0.136C + 4.61) \cdot [1 - \exp(-\gamma_N t)] \quad (8)$$

なお、 γ_N は普通セメント使用時の温度上昇速度に関する定数であり、コンクリート標準示方書 [施工編] によると、打設温度が 20°C の場合、単位セメント量 C の関数として式 (9) のように表される。

$$\gamma_N = 0.0038C - 0.036 \quad (9)$$

同様に、H シリーズにおいても、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と単位セメント量 C の関係式を整理し (Fig.10)、早強セメントを用いた HVFA コンクリートの断熱温度上昇予測式を求めたところ、以下に示す結果が得られた。

$$Q(t) = (0.131C + 9.78) \cdot [1 - \exp(-\gamma_H t)] \quad (10)$$

$$\gamma_H = 0.0025C + 0.650 \quad (11)$$

なお、 γ_H は早強セメント使用時の温度上昇速度に関する定数を表し、式(11)の係数は、打設温度 20°C の場合におけるコンクリート標準示方書 [施工編] の推奨値である。

上記に示した推定式による推定値と実験値の比較を、Fig.11 (N シリーズ) および Fig.12 (H シリーズ) にそれぞれ示す。これらに示す結果より、単位セメント量が 200kg/m³ 以下の HVFA コンクリートにおいても、推定値と実験値が ±10% 範囲内にあり、概ね一致している。

3・4 初期材齢時の圧縮強度

上記のように HVFA コンクリートでは、断熱温度上昇量を著しく小さくできることから、温度ひび割れ防止に有効と考えられるが、一方で初期材齢における強度発現性も懸念されている。そこで本研究では、HVFA コンクリートの強度発現性を調べる目的から、N シリーズでは材齢 7 日における圧縮強度を求めるとともに、H シリーズでは材齢 3 日・7 日の圧縮強度を求めた。実験結果を Fig.13 にまとめて示す。

Fig.13 よりフライアッシュ置換率の増加に伴い、同材齢における圧縮強度が低下している。一般的なコンクリートと比較して、フライアッシュを多量に置換したコンクリートは、セメント量が少なくなるため、圧縮強度は

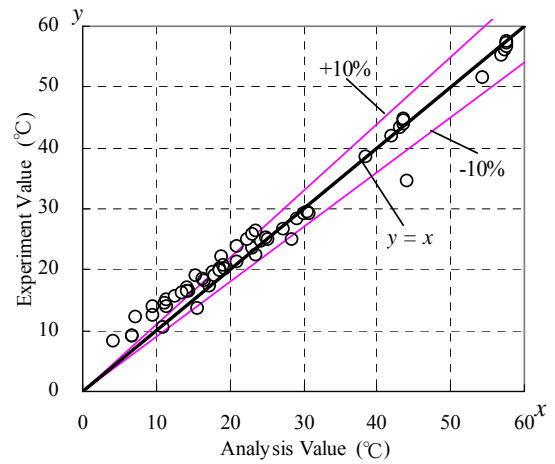


Fig. 11 Comparison of experimental value and analysis value (N series)

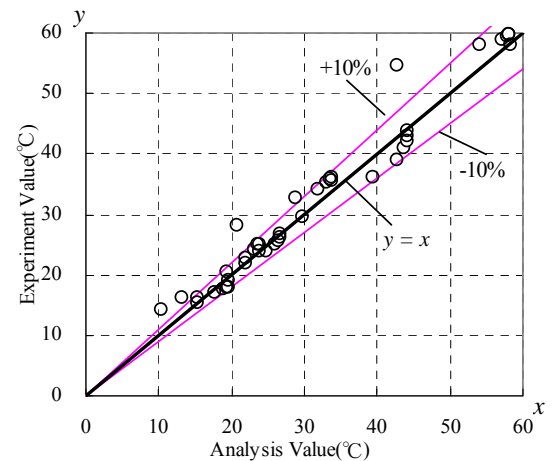


Fig. 12 Comparison of experimental value and analysis value (H series)

低下する。特にフライアッシュのポズラン反応は、このような初期材齢よりも、むしろ材齢 28 日以降において顕著となるため、同じ結合材量のコンクリートと比べて

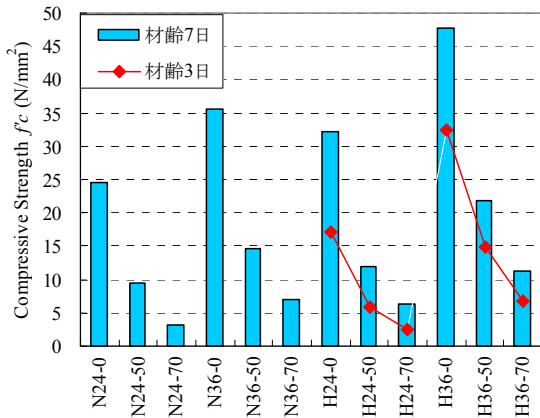


Fig. 13 Compressive strength of HVFA concrete in early age

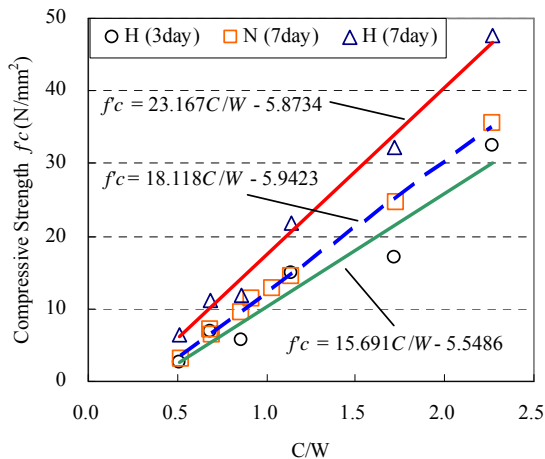


Fig. 14 Relationship between compressive strength and cement-water ratio

場合、初期材齢における強度低下は不可避の課題である。しかしながら、本研究で対象とした N24 シリーズの HVFA コンクリートにおいても、フライアッシュ 70%置換 (N24-70) を除いて、脱枠時の必要最低強度 5N/mm² をいずれも満足する結果となった。さらに、初期強度確保を目的とした H36 シリーズにおいては、フライアッシュ 70%置換 (H24-70) を除いて、材齢 3 日時点で 5N/mm² を満足できることがわかった。このことから早強セメントを用いることにより、フライアッシュ置換率の増加に伴う初期強度不足を補い、脱枠までの日数を短縮することができる。

次に各材齢におけるセメント水比と圧縮強度の関係を Fig 14 に示す。ここに示す結果より、材齢 7 日までの範囲内における HVFA コンクリートの圧縮強度は、概ねセメント水比に比例していることがわかる。すなわち、ここに示した結果を基に、所用する初期強度を満足できる HVFA コンクリートとすることで、断熱温度上昇量を小さくすることが、温度ひび割れの抑制手段として有効な方法のひとつになるものと考えられる。

4 結論

本研究では、増加の一途をたどる石炭灰について、その 9 割を占めるフライアッシュを、有効かつ安定的に大量使用するひとつの手段として HVFA コンクリートについて検討を試みた。特に、HVFA コンクリートの発熱量が小さいことに着目し、マスコンクリートへ適用するための基礎的実験として主に断熱温度上昇量を調べた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) HVFA コンクリートにおいても、断熱温度上昇量と単位セメント量は比例関係にあり、材齢 7 日までの断熱温度上昇量には、単位フライアッシュ量の影響はほとんどない。
- (2) コンクリート標準示方書の断熱温度上昇量の推定式は、単位セメント量 250~400kg/m³ にある HVFA コンクリートにも適用できるが、200kg/m³ 以下の HVFA コンクリートについては、過大評価する傾向にある。
- (3) 実験結果に基づいて、200kg/m³ 以下の低セメント量の HVFA コンクリートにも適用可能な断熱温度上昇量の推定式を提案した。
- (4) 早強セメントを用いることで、フライアッシュ置換率の増加に伴う初期強度不足を補い、脱枠までの日数を短縮することができる。

参考文献

- 1) Japan Environmental Technology Association and Nihon Furaiassyu kyokai, "Coal Ash Handbook", p. I-15 (2005)
- 2) T.R.Naik, B.W.Bruce and R.N.Kraus. "Performance of High-Volume Fly Ash Concrete Pavements Constructed Since 1984", The Indian Concrete Journal, Vol.78, No.3, pp. 137-143 (2004)
- 3) V.M.Malhotra and P.K.Mehta, "High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete "(2003) Marquardt Printing Ltd.
- 4) Japan Society of Civil Engineers, "Furaiassyu wo motiita konkurito no sekousisin-an", Concrete Library 94, pp.9-10 (1999)
- 5) I.Yoshitake, H.Nakamura, T.Tanimoto and S.Hamada, "A Development of Simplified Testing Method of Adiabatic Temperature Rise for the Use at Sites", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.606/V-41, pp.103-110 (1998).
- 6) Japan Society of Civil Engineers, "The standard specifications for concrete [Materials and Construction]", pp.46-47 (2002)
- 7) Japan Society of Civil Engineers, "saisin no masu konkuri-to gijutu", Concrete Engineering Series 14, p.2 (1996)