

せき板の取り外しに係わる強度推定方法の検討

EXAMINATION OF STRENGTH ESTIMATION METHOD RELATED TO REMOVAL OF SHEATHING

深瀬孝之 — * 1 谷口 円 — * 2
開 洋介 — * 3 濱 幸雄 — * 4

Takayuki FUKASE — * 1 Madoka TANIGUCHI — * 2
Yousuke HIRAKI — * 3 Yukio HAMA — * 4

キーワード：
せき板の存置期間, 初期強度の発現性, 強度推定, 有効材齢, 積算温度

Keywords:
Removal Time of Sheathing, Early-Strength Development, Estimating Strength, Equivalent Age, Maturity

In this paper, equivalent age method and maturity method based on the temperature history of concrete were examined as strength estimation method for removal of sheathing. In strength development of two methods, it is relatively consistent in ordinary Portland cement, high-early-strength Portland cement. But there was a tendency that the difference was large in Portland blast-furnace slag cement (BB), Portland fly-ash cement (FB). Under the conditions of this report, the applicability of maturity method for FB was confirmed, but in application to estimating strength, it is necessary to consider the influence of kind of admixture and substitution rate.

1. はじめに

2016年3月に、建築基準法施行令第76条「型わく及び支柱の除去」の技術的基準となる「建設省告示第110号」(以下、告示第110号という)が改正された。この改正によって、せき板の取り外しに関する基準として、平均気温に応じた存置日数、および圧縮強度試験による方法に加えて、有効材齢を用いた強度推定方法(以下、有効材齢方式という)が記述された。また、有効材齢方式の具体的な運用に関して管理要領¹⁾が示された。

寒冷地において行われる寒中コンクリート工事では、従来から積算温度を用いた強度推定方法(以下、積算温度方式という)が利用され、初期養生の打ち切りや支保工の除去を判断するための強度試験の実施時期が検討されてきた。洪ら²⁾によって体系化された積算温度方式は、近年の研究成果^{3), 4)}を基に見直され、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」⁵⁾(以下、寒中指針という)における技術的根拠として取り纏められている。

実際のコンクリート工事では、現場養生した供試体の圧縮強度試験によってせき板の存置期間が決定されることが多い。しかし、コンクリート部材と供試体との温度履歴は部材寸法や供試体の保管環境などによって異なることから、圧縮強度試験では適切な判定ができない場合が生じる。特に寒中コンクリート工事では初期凍害防止や低温環境下での工程管理の観点から厳密な強度管理が要求される。

このような強度管理上の課題に対して、部材の温度履歴に基づいて強度を推定する方法は、コンクリート部材の強度発現性を合理的かつ適正に評価できる管理手法として実施工での活用が期待される。

本報では、有効材齢方式と積算温度方式との強度推定結果を比較するとともに、せき板の取り外しに関する強度管理手法としての適

用性について検討する。なお、告示110号では、有効材齢方式以外にも、せき板の取り外しに関する基準として適切な研究的裏付けのあるものは、適用することができるとされている。

2. 圧縮強度の推定方法

2.1 有効材齢方式

有効材齢方式は、コンクリートの温度履歴から式(1)によって有効材齢を求め、式(2)によって圧縮強度を算出する方法である。告示第110号ではせき板を取り外すために必要な圧縮強度の推定に用いることとし、その対象は「基礎、梁側、柱および壁」、「版下および梁下」に対して、それぞれ5N/mm²および設計基準強度の50%である。

$$t_e = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \times \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0'} \right] \quad (1)$$

ここで、 Δt_i : (i-1)回目の測定からi回目の測定までの期間(時間)、 T_i : i回目の測定により得られたコンクリートの温度(°C)、 T_0' : 1(無次元化のための係数)(°C)

$$f_{c_{te}} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - 0.5)/t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} \times f_{c_{28}} \quad (2)$$

ここで、 $f_{c_{te}}$: コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 s : セメントの種類に応じた数値(表1による)、 t_e : コンクリートの有効材齢(日)、 t_0 : 1(日)、 $f_{c_{28}}$: 次の①、②のいずれかによる。①JIS A 5308に適合するコンクリートにあつては発注した呼び強度の強度値、②建築基準法第37条第2号の国土交通大臣の認定を受けたコンクリートにあつては設計基準強度に当該認定において指定された構造体強度補正值を加えた値(N/mm²)

¹⁾ 伊藤組土建(株)建築部 担当部長(技術)・工修/室蘭工業大学大学院工学研究科 博士後期課程(〒060-8554 札幌市中央区北4条西4丁目)

²⁾ (地独)北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 建築研究部建築システムグループ 研究主幹・博士(工学)

³⁾ 北海道電力(株)火力部 主任

⁴⁾ 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

¹⁾ Manager, Itogumi Construction Co., Ltd., M. Eng. / Graduate Student, Muroran Institute of Technology

²⁾ Senior Research Manager, Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute, Dr. Eng.

³⁾ Chief, Hokkaido Electric Power Co., Inc.

⁴⁾ Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

2.2 積算温度方式

寒中指針における調査計画および強度管理では、式(4)～(8)に示される積算温度と圧縮強度との関係（積算温度方式）に基づいて、初期強度や設計基準強度などを確保するために必要な積算温度が決定されている。

$$M = \sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \quad (4)$$

$$F = F_\infty \times \exp(a \times M_c^b) \quad (5)$$

$$F_\infty = \frac{{}_{20}F_{28}}{\exp(a \times {}_{20}M_{28}^b)} \times (1 + C_f(T_{24} - 20)) \quad (6)$$

$$M_c = \left(\sum_0^t (T_c + 10) \Delta t \right) + C_M(T_{24} - 20) \quad (7)$$

$$a = a_1 \times {}_{20}F_{28} + a_2, \quad b = b_1 \times {}_{20}F_{28} + b_2 \quad (8)$$

ここで、 M : 積算温度 ($^{\circ}D \cdot D$)、 T_c : 期間 Δt のコンクリートの平均温度 ($^{\circ}C$)、 Δt : 時間間隔 (日)、 F : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 F_∞ : コンクリートの最終到達強度 (N/mm^2)、 ${}_{20}F_{28}$: 標準水中養生を行った材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm^2)、 ${}_{20}M_{28}$:

標準水中養生を行った材齢 28 日における積算温度 ($^{\circ}D \cdot D$)、 M_c : コンクリートの温度補正を行った積算温度 ($^{\circ}D \cdot D$)、 T_{24} : 打ち込みから 24 時間のコンクリートの平均温度 ($^{\circ}C$)、 $a_1, a_2, b_1, b_2, C_f, C_M$: セメントの種類による係数 (表 2 による)

2.3 有効材齢方式と積算温度方式における強度推定値の比較

図 1 に、有効材齢方式と積算温度方式を用いて算出した圧縮強度比率と材齢の関係を示す。積算温度方式では、セメント種類、呼び強度および打ち込みから 24 時間の平均温度によって強度発現性が異なることから、セメントの種類 (4 水準)、呼び強度 (3 水準) および養生温度 (3 水準) を変化させて比較することとした。

普通ポルトランドセメント (N) および早強ポルトランドセメント (H) に関して、有効材齢方式と積算温度方式との差異は比較的小さく、せき板の取り外しに必要な圧縮強度 $5N/mm^2$ が得られる日数差 (図 2) は、最大で 0.5 日程度である。

一方、フライアッシュセメント (FB) および高炉セメント (BB) の場合、初期材齢の段階から両者の方式における差異は大きい。特にフライアッシュセメント (FB) では、圧縮強度 $5N/mm^2$ が得られる

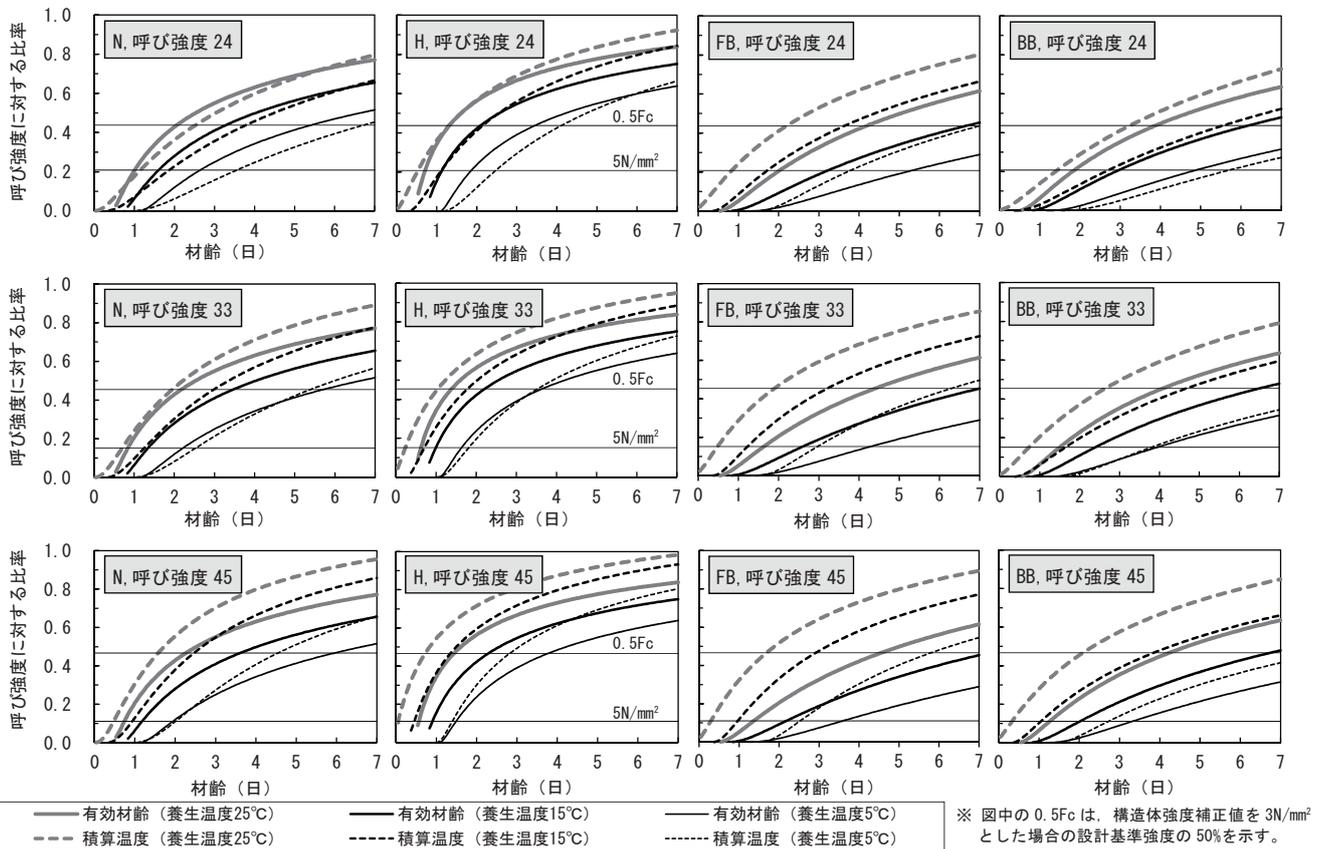


図 1 有効材齢方式と積算温度方式における強度推定値の比較 (N, H, FB, BB)

表 1 セメントの種類に応じた数値 s (告示第 110 号)

セメントの種類	s	セメントの種類	s
普通ポルトランドセメント	0.31	低熱ポルトランドセメント	1.06
早強ポルトランドセメント	0.21	高炉セメント B 種, C 種	0.54
中熱ポルトランドセメント	0.60	フライアッシュセメント B 種, C 種	0.58

表 2 セメントの種類による係数 (寒中指針⁵⁾)

セメントの種類	a_1	a_2	b_1	b_2	C_f	C_M
普通ポルトランドセメント	526.9	-37.8	13.34	-1.06	0.680	-0.0005
早強ポルトランドセメント	-439.0	1.1	-5.14	-0.46	0.975	-0.0027
高炉セメント B 種	-405.6	-3.6	-1.67	-0.44	1.355	0.0075
フライアッシュセメント B 種	97.4	-16.0	6.68	-0.72	1.376	0.00028

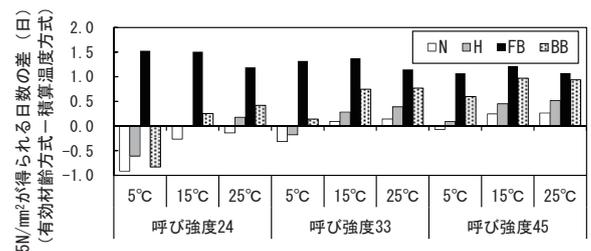


図 2 有効材齢方式と積算温度方式での $5N/mm^2$ が得られる日数差

日数として1.0~1.5日程度の差異が生じている。この要因としては、強度推定式を決定した際に用いた混和材の種類、置換率などの相違が考えられる。具体的には、有効材齢方式では高炉セメントB種およびC種相当（普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末4000を混合率45%、70%として混合する）、およびフライアッシュセメントB種およびC種相当（普通ポルトランドセメントにフライアッシュII種を混合率20%、30%として混合する）を対象としているのに対して、積算温度方式では市中数社の高炉セメントB種およびフライアッシュセメントB種を対象として強度推定式の諸係数が設定されていることがあげられる。

3. 実績データによる実測値と推定値の比較

フライアッシュセメントB種において、有効材齢方式と積算温度方式による強度推定値に大きな相違が確認された。そこで、レディミクストコンクリート工場1社（札幌市東区）が保有する圧縮強度試験の実績データを用いて、実測値と推定値を比較することとした。

表3に実績データの概要を示す。2015年度から2016年度の2年間に於いて寒中コンクリートの適用期間以外に出荷されたもので、高強度を除く呼び強度の範囲を対象とした。試験体は各出荷先で作製した強度試験用供試体（φ100×200mm、封かん養生）とし、試験材齢は4日以内とした。供試体の養生温度は、工場試験室での保管時間を考慮して、試験室の温度と札幌気象台（札幌市中央区）で観測された日平均気温を用いて温度履歴を決定した。

セメントの種類はフライアッシュセメントB種相当（普通ポルトランドセメントにフライアッシュII種を混合率20%として混合する）、および一般の工事で最も使用されている普通ポルトランドセメントの2種類とした。表4にメーカーの試験成績表によるフライアッシュの品質を示す。参考文献¹⁾で使用したフライアッシュに比べ、二酸化けい素の構成比率は高く、比表面積は低いことが確認できる。

図3に、圧縮強度の実測値と有効材齢方式および積算温度方式による推定値との関係を示す。普通ポルトランドセメントの場合には、両者方式ともに全体的にばらつきが大きい、ほとんどのケースで実測値は推定値を上回る傾向を示す。フライアッシュセメントB種では、普通ポルトランドセメントと比較して実測値と推定値との相関性は高いが、両者方式による差異が顕著に示される。これらを直線回帰式で比較すると、積算温度方式による推定値は有効材齢方式に比べ8N/mm²程度上回ることになる。

有効材齢方式ではフライアッシュセメントB種に比べ混合比率が高いC種に対しても同一の強度推定式を与えているため、B種のみを対象とした場合には強度推定値を小さく評価する可能性がある。また、フライアッシュセメントB種に関して、既往研究⁶⁾では式(2)中の $(te - 0.5)$ に含まれる補正項0.5を0と定めており、この相違が若材齢の推定値に影響を及ぼしているものと考えられる。

4. 強度管理手法としての適用性の検討

普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメントB種に関する強度推定の既往研究から、有効材齢方式および積算温度方式について、せき板の取り外しに係わる強度推定手法としての適用性を検証する。

表5に告示第110号または日本建築学会「建築工事標準仕様書・

表3 実績データの概要

セメントの種類	データ数	呼び強度	スランブ (cm)	試験材齢 (日)
普通ポルトランドセメント (N)	157	24~42	15, 18	1~4
フライアッシュ B種 (FB) 相当	119	27~40	15, 18	1~4

表4 フライアッシュの品質 (2016年4月~10月、メーカー成績表)

項目	平均	最小	最大	参考文献 ¹⁾	
二酸化けい素 (%)	64.5	63.3	66.8	54.0~59.6	
強熱減量 (%)	1.9	1.6	2.3	1.5~2.1	
密度 (g/cm ³)	2.30	2.28	2.31	2.31~2.33	
比表面積 (cm ² /g)	4037	3940	4100	4220~4440	
フロー値比 (%)	107	105	109	110~111	
活性度指数 (%)	材齢28日	90	86	96	84~87
	材齢91日	103	97	109	100~106

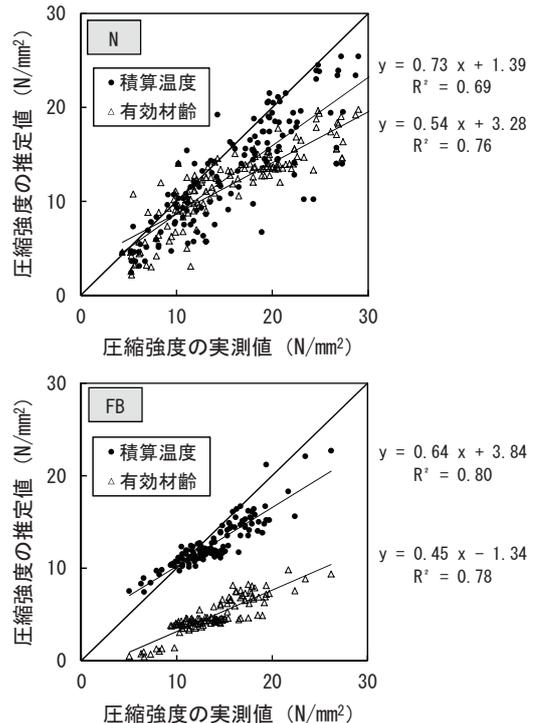


図3 圧縮強度の実測値と推定値との関係 (N, FB)

表5 基準などにおけるせき板の取り外しに係わる圧縮強度

建築物の部分	告示第110号	JASS 5	
		計画供用期間	せき板取外後の湿潤養生
基礎、梁側、柱および壁	5 N/mm ²	短期、標準	あり 5 N/mm ²
		長期、超長期	なし 10 N/mm ²
			あり 10 N/mm ²
		なし 15 N/mm ²	
版下および梁下	設計基準強度の50%	原則として支保工の取外し後とする	

表6 既往研究における実験概要⁸⁾

セメント	呼び強度	W/C (%)		スランブ (cm)	養生温度 (°C)	試験材齢 (日)
		N	FB			
N, FB	24	65.0	61.0	18	5, 20	1, 2, 3, 4,
	30	57.5	53.0			5, 7, 9, 14,
	39	48.5	44.0			28, 56, 91

同解説「JASS5 鉄筋コンクリート工事」⁷⁾ (以下、JASS5 という)に規定される、せき板の取り外しに係わる圧縮強度を示す。告示第110号では版下などのせき板の存置期間を含めた広範囲な強度域を対象としている。一方、実施工においては支保工の除去以前にせき板を取り外す工法を採用することは極めて少ない。したがって、強度推定手法の強度域については、5 N/mm²から15 N/mm²の範囲が重要であると考えられる。

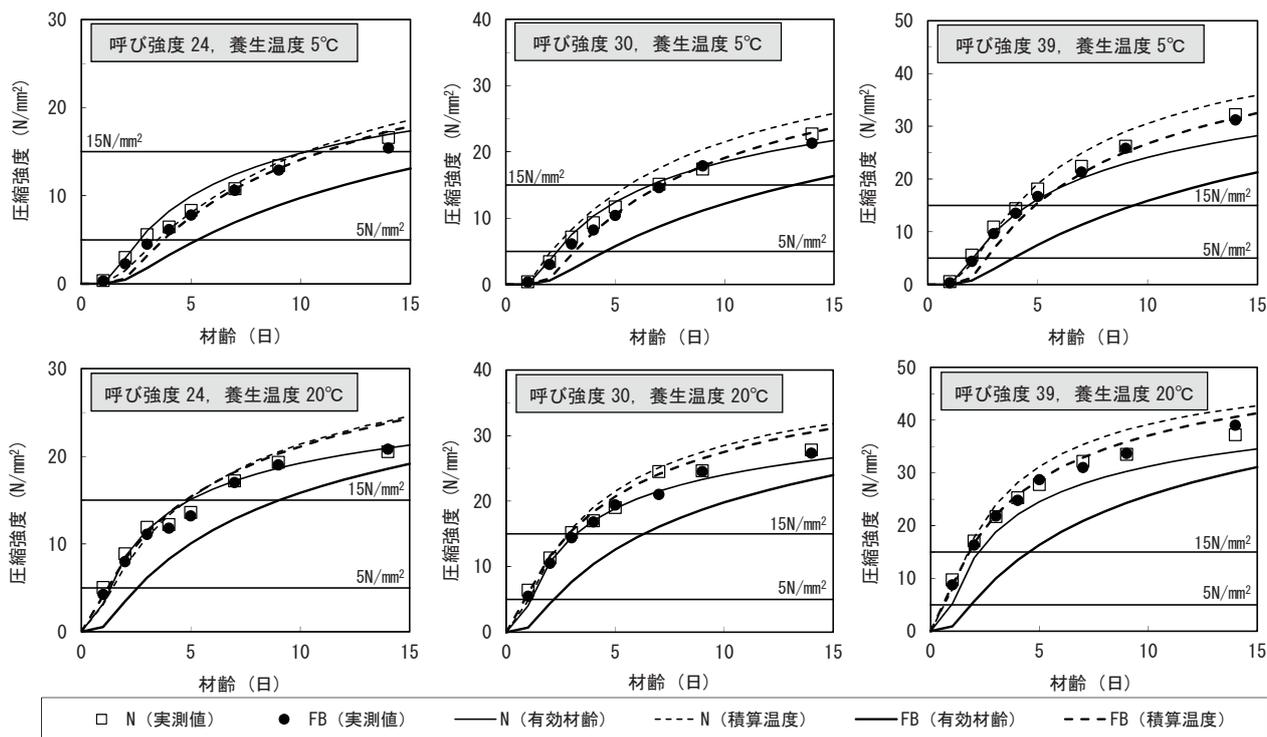


図4 既往研究⁸⁾における実測値と推定値 (N, FB)

既往研究⁸⁾における実験概要、材齢と実測強度の関係をそれぞれ表6および図4に示す。また、図4には有効材齢方式、積算温度方式による推定値を併記する。ここで、普通ポルトランドセメントとフライアッシュセメントB種相当(フライアッシュII種, 混合率15%, 密度 $2.33\text{cm}^3/\text{g}$, 二酸化けい素 60.8% , 比表面積 $3740\text{cm}^2/\text{g}$, 28日活性度 92% , 91日活性度 108%)を用いた調合の水セメント比は、それぞれの呼び強度を同一にするため、変動係数を 10% として調合強度を定め、材齢28日に調合強度が発現するように設定されている。

図4に示されるように、普通ポルトランドセメントの圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ から $15\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲において、推定値が実測値をわずかに超過するものが一部存在するものの、有効材齢方式および積算温度方式ともに実測値と推定値は概ね一致する。

フライアッシュセメントB種の場合、積算温度方式による推定値は圧縮強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ から $15\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲において実測値と概ね一致するが、圧縮強度 $15\text{N}/\text{mm}^2$ 以降では強度の増進に伴って実測値に比べ推定値が上回る方向に推移する。有効材齢方式に関しては推定値と実測値との差異は大きく、フライアッシュ置換率などの相違が強度発現性に影響を及ぼしていることが考えられる。

5. まとめ

告示第110号に規定される有効材齢方式、および寒中指針に示される積算温度方式に関して、それらの強度推定結果を比較するとともに、せき板の取り外しに係わる強度管理手法として検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 有効材齢方式と積算温度方式における強度推定結果は、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントでは比較的一致するが、フライアッシュセメントB種および高炉セメントB種では差異が大きい。
- 2) 上記の方式による強度推定値とコンクリート工場の実績値との関

係はばらつきが大きい結果となったが、フライアッシュセメントB種では有効材齢方式と積算温度方式による推定値と実績値との関係に大きな差異が認められる。

- 3) 普通ポルトランドセメントに関して、有効材齢方式と積算温度方式ともに強度管理手法としての適用性が高い。
- 4) 本報におけるフライアッシュセメントB種の比較対象の範囲では、積算温度方式による強度管理手法の適用性を確認できるが、有効材齢方式を含めた強度推定方法の適用に際しては混和材料の種類や置換率などによる影響を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人建築研究所：建築研究資料 No. 168 型わくの取り外しに関する管理基準の検討，2016. 3
- 2) 洪 悦郎：コンクリート強度推定実用法の提案とその応用，日本建築学会論文報告集，第63号，pp. 129～132，1959. 10
- 3) 小林和寛，深瀬孝之，濱幸雄：寒中コンクリートにおける強度増進標準曲線の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 407～408，2006. 7
- 4) 谷口円，桂修，濱幸雄，吉野利幸：水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案，日本建築学会大会構造系論文集，第74巻，第641号，pp. 1205～1210，2009. 7
- 5) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2011. 11
- 6) 崔亨吉，中田善久，樹田佳寛，佐藤幸恵，野口貴文，大塚秀三，安田正雪，高橋祐一，蓮尾孝一，吉岡昌洋，唐沢智之，河野政典，鹿毛忠継，棚野博之，土屋直子，宮田敦典，荒巻卓見：各種結合材を用いた構造体コンクリートの圧縮強度管理の基準に関する検討：その1 4 模擬部材表面の温度履歴に基づく圧縮強度の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 167～168，2015. 9
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015. 7
- 8) 開洋介，齋藤敏樹：フライアッシュコンクリートの強度発現性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 215～216，2015. 9

[2017年9月21日原稿受理 2017年12月6日採用決定]