報告　実構造物を対象とした有効材齢によるコンクリート強度の推定

劉　翠平[*1]・松嵜　達弘[*2]・下村　匠[*3]・牛島　栄[*4]

要旨：国土交通省では社会全体の生産性向上につながる取り組みの一環として，履歴温度に基づく有効材齢を用いた強度推定方法をせき板の取外しに関する判定に使用する旨が告示に追加された。本報告では，実構造物に適用する際の知見およびデータの蓄積を図り，施工時期が標準期および夏期となる RC 構造物を対象とし，有効材齢を用いたコンクリート強度の推定方法の精度を検討することとした。コンクリートの温度履歴と周囲温湿度を計測し，有効材齢を用いた方法とコンクリートの圧縮試験結果との比較を行い，既存の強度推定式の精度を確認した。さらに，本報告で実施した強度確認の流れおよびその応用方法を例示した。

キーワード：コンクリート，圧縮強度，温度履歴，有効材齢，実工事，品質管理

1. はじめに

我が国では建設労働人口の縮小が危ぶまれる現状にあるため，国土交通省では社会全体の生産性向上につながるストック効果の高い社会資本の整備・活用や，関連産業の生産性向上，新市場を開拓するための下支え等に対する加速化に総力を挙げて取り組んでいる。その中に，コンクリートの生産性向上に向けた取り組みとして，2016 年 1 月 16 日に公表されたコンクリートの圧縮強度に関する告示案と型枠や支柱の取外しに関する告示案が挙げられる [1)]。現場打ちコンクリートの型枠および支柱の取外しに関しては，一定の存置日数以上経過するまでに取り外さないことと，日本工業規格 A1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）によって構造体コンクリート強度が一定の圧縮強度以上になるまで取り外さないことに加え, 次の式によってコンクリートの圧縮強度 f_{cte} を計算する方法（以下，有効材齢を用いた方法）が追加された。すなわち，圧縮強度試験法と同様に，有効材齢を用いた方法で算出した圧縮強度により型枠および支柱の取外し時期が管理できることとなる。

$$f_{cte} = \exp\left\{ s\left[1 - \sqrt{\frac{28}{(T_e - 0.5)/T_0}} \right] \right\} f_{c28} \tag{1}$$

ここに，f_{c28} は日本工業規格 A5308（レディーミクストコンクリート）-2014 に規定する呼び強度（N/mm^2），s はセメントの種類に応じて決まる数値，T_e はコンクリートの温度履歴によって計算した有効材齢, T_0 は 1 日である。

これまでに，コンクリートの圧縮強度と有効材齢との間に相関関係があることは，多くの文献に示されている [2),3), 4)]。周知の通り，コンクリート工事におけるせき板の取り外す時期はセメントの種類や気温などによる影響があるため，多様な条件下への対応を目的とした調査および実験的研究が行われ [5)]，履歴温度に基づく積算温度および有効材齢を用いた推定法の，型枠および支柱の取外しの判定への適用が試みられた。また，建築施工では，品質管理の向上や工期短縮を目的する工法が求められるようになったが，依然としてコンクリートの打設からせき板の取外しや部材の取り付けまでの時間を一定とする工程管理が多いため，有効材齢を用いた方法の適用が望まれている。これらの背景により，著者らは，建築物の地上構造部のコンクリート工事を対象とし，測定した履歴温度に基づく有効材齢を用いた方法を適用する際の流れの作成および，技術的な支援を行うための知見とデータの蓄積を図ることとした。

本報告では，施工時期が標準期および夏期となる鉄筋コンクリート造マンション新築工事（**図－1～2**）を計測対象として選定し，有効材齢を用いた方法の精度を検討した。まず，熱電対および小型温度・湿度データロガーを用いてコンクリートの温度履歴と周囲温湿度を計測した。そして，有効材齢を用いた方法と，構造体コンクリートの強度管理および型枠や支柱の取外し時期の決定用供試体による試験結果との比較を行い，施工現場の周囲環境において既存の強度推定式の精度を確認した。さらに，有効材齢を用いた方法を汎用的に応用するためにはどうすればよいか，強度推定の流れの例を提示した。最後に，本報告で実施した強度確認の流れおよびその応用方法を例示した。

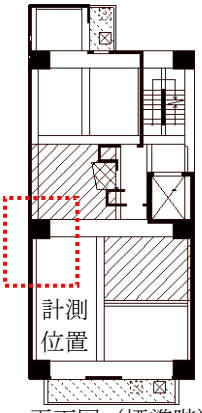
2.測定概要

2.1 対象建物

建設現場は屋外であるため現場打ちコンクリートとなり，その品質は気象条件による影響を受けやすい。外

*1 青木あすなろ建設（株）　技術研究所構造研究部建築構造研究室担当課長　博士(工)　(正会員)
*2 髙松建設（株）　技術研究所研究員
*3 長岡技術科学大学　工学研究科環境社会基盤工学専攻教授　博士(工)　(正会員)
*4 青木あすなろ建設（株）執行役員　技術研究所長　博士(工)　(フェロー会員)

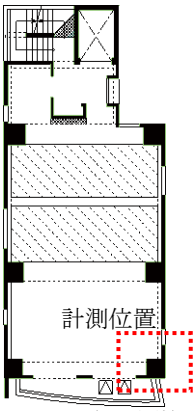
工事概要
建築場所：大阪市西区
主要用途：共同住宅と店舗
構造種別：RC 造
規模：地上 10 階
建築面積：164.57 m^2
施工床面積：1603.52 m^2
計測対象階高：2,850mm
(8F～10F)



平面図（標準階）

図－1　計測対象（建物 A）

工事概要
建築場所：東京都千代田区
主要用途：共同住宅
構造種別：RC 造
規模：地上 9 階
建築面積：115.59 m^2
施工床面積：1040.21 m^2
計測対象階高：2,810mm(5F)
2,760mm(6F～7F)



平面図（標準階）

図－2　計測対象（建物 B）

気温が 4℃～25℃の環境で打設することが標準とされ，夏期，冬期の施工管理に工夫が必要である [6]。冬期施工には外気温の変化による影響があるため，躯体の表面温度で管理すると安全側の評価となる場合もある。そのため，**図－1～図－2** に示す施工時期が標準期および夏期となる現場打ちコンクリート構造物を計測対象とし，測定した温度履歴によって有効材齢を用いた方法の精度を検討することとした。

計測対象階の打設日および気象庁に公表されている建築場所に近い観測点の外気温を**表－1** に示す。計測対象階の打設時期および**表－1** に示す過去の外気温より，施工計画では建物 A および建物 B はそれぞれ標準期および夏期として施工管理を行う [6]。設計図書に使用する型枠について特別の記載がない場合には，市販の合板型枠（以下，合板）を用いて湿潤養生を行い，所要の圧縮強度に達した後，合板を取り外す [6,7]。

計測対象のコンクリート打設は片押し打ちによる方法である。建物 A および建物 B の計測対象階の打設量はそれぞれ 86.0m^3 および 62.0m^3 であり，打設開始から終了まで約 3 時間であった。また，上下階のコンクリート打設は約 2 週間程度をあけるため，先行打設の下階が上階の温度上昇に与える影響はほぼないと考えられる。

表－1　コンクリートの打設環境（外気温）

計測対象階		打設日	月ごとの外気温（℃）*		
			日平均	日最高	日最低
建物 A	8F	2016/4/4	15.9	20.3	11.8
	9F	2016/4/19			
	10F	2016/5/12	21.5	27.0	16.9
建物 B	5F	2016/7/12	26.2	30.1	17.6
	6F	2016/7/25			
	7F	2016/8/5	26.7	30.5	17.9

* 打設日を含む 2015 年気象庁に公表されている月ごとの外気温である。

2.2 使用材料

各計測対象階についてコンクリートの配合，使用材料，設計基準強度および配合強度などを**表－2～表－5** にそれぞれまとめた。

セメントの種類が普通ポルトランドセメント，水セメント比 W/C が 40%, 45%および 50%程度の 3 水準であった。粗骨材の最大寸法を 20mm とし，建物 A に兵庫県相生産，建物 B に栃木県佐野産の砕石を用いた。設計基準強度は 27～39N/mm^2，構造体強度補正などのため呼び強度は 30～47N/mm^2 であった。建物 B の 5 階およびその他の

表－2　コンクリートの配合

計測対象階		W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
				W	C	S	G	混和剤*
建物 A	8F;9F	47.0	50.0	180	383	850	857	2.99
	10F	50.0	50.8	180	360	874	852	2.92
建物 B	5F	40.7	50.6	170	418	887	891	4.18
	6F	39.0	48.4	174	446	813	891	4.01
	7F	40.0	46.5	179	448	764	919	4.48

* 高性能 AE 減水剤である。

表－3　使用材料（建物 A）

使用材料	種類	表乾比重 (g/cm^3)
セメント C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	3.16*1)
細骨材 S	混合砕砂：赤穂：津久見 7:3（質量比）混合品	2.60
粗骨材 G*2)	砕石：兵庫県相生市	2.62
混和剤	高性能 AE 減水剤	
水	水道水	

注：*1) 密度を表す。　*2) 最大寸法は 20mm である。

表－4　使用材料（建物 B）

(a) 建物 B（5F～6F）

使用材料	種類	表乾比重 (g/cm³)
セメント C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	3.16*1)
細骨材 S	陸砂：千葉県君津市市宿 砕砂：栃木県佐野市	2.56 2.65
粗骨材 G*2)	砕石：栃木県佐野市	2.70
混和剤	高性能 AE 減水剤	
水	水道水	

注：*1) 密度を表す。

(b) 建物 B（7F）

使用材料	種類	表乾比重 (g/cm³)
セメント C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	3.16 *1)
細骨材 S	山砂：千葉県君津市吉野	2.59
粗骨材 G*2)	砕石：栃木県佐野市仙波町	2.71
混和剤	高性能 AE 減水剤	
水	水道水	

*2) 最大寸法は 20mm である。

表－5　設計基準強度およびスランプなど

階		設計基準強度 (N/mm²)	呼び強度 (N/mm²)	配合強度 (N/mm²)	スランプ (cm)	空気量 (%)
建物 A	8F	30	33	39.1	16.0	4.1
	9F	27	30	36.4	16.0	4.6
	10F				16.0	4.5
建物 B	5F	39	47	57.2	23.0	2.8
	6F	36	42	52.0	23.0	4.8
	7F			49.8	23.0	5.3

注：スランプおよび空気量は実測値である。

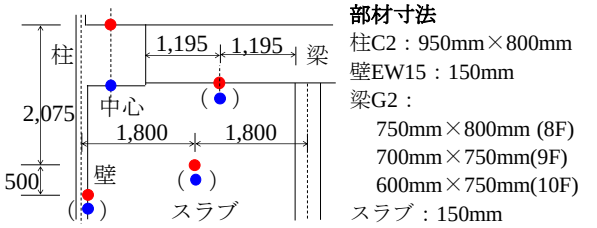
計測階の目標空気量はそれぞれ 3.0%および 4.5%である。スランプは日本建築学会 JASS 5 に定められる標準の 18cm，呼び強度 33N/mm² 以上で 21cm とし，流動性をスランプで管理した。以上，一般的な RC 構造物を作り上げるために使用するコンクリート（建物 A）と建築分野において設計基準強度 36N/mm² を上回る高強度コンクリート（建物 B）を含めて，有効材齢を用いた方法でコンクリートの強度を推定することとした。

2.3 計測点および計測方法

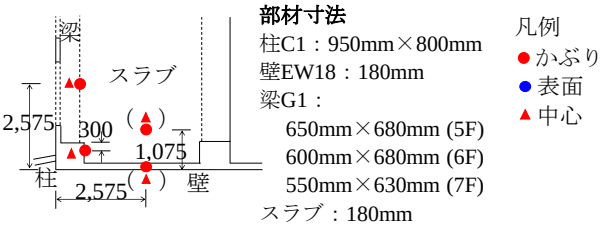
温度計測点の設置図を**図－3** に示す。柱・壁，スラブおよび梁の断面寸法や脱型時期が異なるため，柱・壁，スラブおよび梁にそれぞれ計測点を設け，温度履歴を計測することとした。建物 A および建物 B の計測対象階におけるスラブの寸法はそれぞれ 150mm および 180mm，壁の寸法はそれぞれ 150mm および 180mm である。

表面温度はコンクリート表面において直接測定することが望ましいが，施工の便宜上，鉄筋かぶり位置に設置する場合が多い。そこで，建物 A に**写真－1**(a)に示す合板の内側（以下，表面温度）およびコンクリート表面からかぶり厚 50mm に一番近い鉄筋位置（以下，かぶり位置の温度）にそれぞれ計測点を設置し，表面位置とかぶり位置に生じた温度差を把握することとした。また，夏期における外気温の影響を確認するため，建物 B に柱・壁，スラブおよび梁の鉄筋かぶりおよび中心部（以下，中心温度）にそれぞれ計測点を設置した。なお，建物 A および建物 B の鉄筋かぶりは 50mm である。

本報告では，熱電対および小型温度・湿度データロガーは測定機器として，コンクリートの温度履歴および環境温湿度の測定を行った。熱電対は，T 種類，素線径 0.65mm の熱電対を用いて温度の検出部をコンクリートあるいは鉄筋に接触させ，**写真－1**(b)に示すように 60 秒ピッチで測定する。また，小型温度・湿度データロガーを用いて施工環境における環境温湿度（以下，周囲温度および周囲湿度）を測定した。

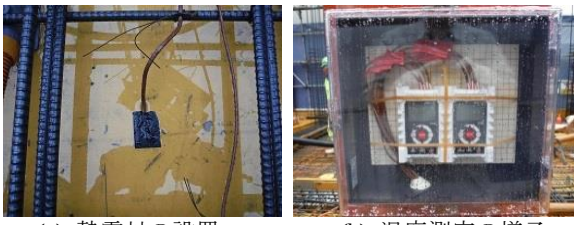


(a) 建物 A



(b) 建物 B

図－3　計測点の設置図



(a) 熱電対の設置　　(b) 温度測定の様子

写真－1　熱電対の設置および温度測定の様子

3. 測定結果および考察

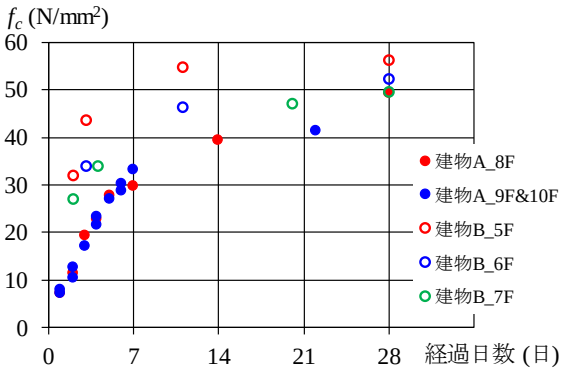
3.1 養生供試体を用いる方法

構造体のコンクリートは養生方法によって強度発現

が異なるので，計測対象のコンクリートの供試体は構造体コンクリートの強度および型枠脱型強度の確認を行うために脱型後現場水中養生を行った。なお，養生水槽は日陰に設置していた。

3 本の供試体の圧縮強度の平均値 f_c と経過日数との関係曲線を**図－4** に示す。材齢が 28 日の供試体の圧縮強度の平均値が設計基準強度の数値以上であることを確認した。

建物 A の計測対象階は，材齢 7 日以内までは圧縮強度のバラツキはあるものの，配合に関わらず強度発現の傾向は同じようであった。一方，建物 B の計測対象階では初期に強度の発現が大きい。6 階および 7 階のコンクリート強度発現の傾向は建物 A と概ね似ているが，5 階はそれらからはやや乖離していた。この原因は，工事現場での管理用供試体の現場養生温度と標準養生の違いによるものと考える。



図－4　コンクリートの圧縮試験結果

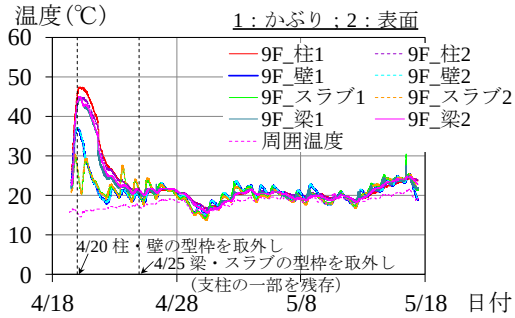
3.2 有効材齢を用いた方法

(1) 計測した温度履歴

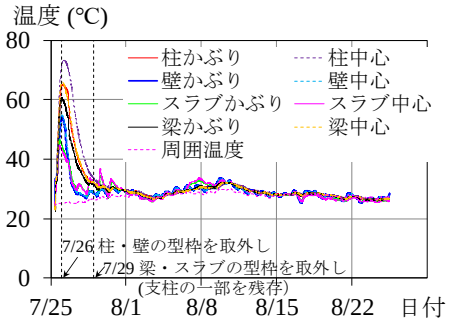
建物 A の 9 階および建物 B の 6 階を例として，計測したコンクリートの温度履歴曲線を**図－5** に示す。なお，小型温度・湿度データロガーを用いて測定した周囲温度も同図に重ねて示す。

図－5(a)に示す計測対象階において，型枠取外し時に壁およびスラブのかぶり位置の温度履歴と表面の温度履歴には大きな差は見られず，その温度差の最大値はそれぞれ 0.6℃および 1.5℃で小さかった。すなわち，圧縮強度の推定には，かぶり位置の温度を測定すればよいと考えられる。

いずれの計測対象階においても柱，梁，壁およびスラブは異なる温度履歴となり，測定した最高温度は柱＞梁＞壁＞スラブの順で低くなった。これは，断面形状や部材厚が異なることが主な原因の一つと一般的に考えられている。柱および梁の断面は比較的厚いので，温度履歴の最高温度は高くなっている。また，スラブの上面全ては外気に接しているため，最高温度が最も低く，**図－5**(b)に示すように，建物 B においてはスラブの中心および表面温度はほぼ同程度であったことが確認された。



(a) 建物 A（9F；かぶり位置の温度と表面温度）



(b) 建物 B（6F；かぶり位置の温度と中心温度（参考））

図－5　温度履歴

(2) 推定強度

かぶり位置の温度から算定した有効材齢を用いた方法で推定したコンクリートの強度 f_{cte}（以下，推定強度）と構造体コンクリートの強度管理および型枠取外し時期の決定を目的とした試験結果との比較を行った。

1) 推定強度の評価式

推定強度 f_{cte} は，式(1)を用いて算出する。なお，普通ポルトランドセメントを使用するため，s は 0.31 である。

Arrhenius 式を応用して基準温度の材齢に対する有効材齢 T_e を次のように算定する。

$$T_e = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp\left\{-\frac{E}{R}\cdot\left(\frac{1}{T_a}-\frac{1}{T_s}\right)\right\} \qquad (2)$$

ここに，i は測定回数，n は最大測定回数，Δt_i は i-1 回目の測定から i 回目の測定までの時間（h_r または日），活性化エネルギーE は反応速度の実測から決定される実験定数（kJ/mol），R は気体定数（=8.314 J/mol），T_a は養生温度（K），T_s は基準温度（293K）である。

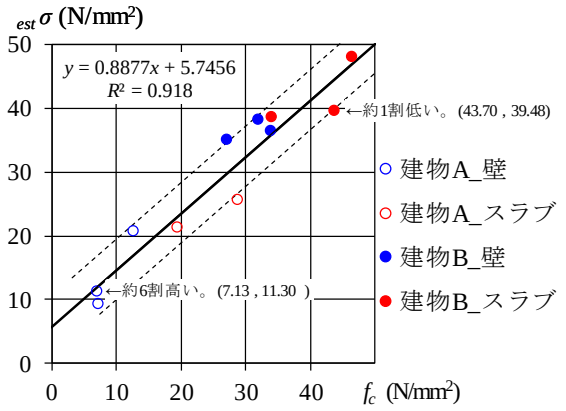
2) 推定強度と供試体の圧縮強度との比較

各計測対象階の型枠取外し時期の決定を目的とした供試体の圧縮強度 f_c と推定強度 f_{cte} との比較を**図－6** に示す。建物 A および建物 B の計測対象階に使用したコンクリートに対する強度推定式の精度について考察する。

図－6 に示すように，壁の推定強度は試験結果より約 6 割高く，スラブの方は試験結果より約 1 割低いケースがあった。これは，構造部材と供試体間の形状の相違と，

柱・壁の場合のせき板の存置期間が短く材齢初期の水和熱による履歴温度の相違が大きくなるためと考えられる。このバラツキは既往の参考文献および圧縮強度推定式の基準データに示す範囲内にあることが分かった[2), 4), 8)]。

有効材齢とコンクリート強度発現との関係は，使用する材料，配合，乾燥湿潤の程度によって一律ではないので，あらかじめ建築物の設計断面を抽出した実大スケールの模擬部材における試験を実験場所に行って確かめておくのが望ましい。ただし，計測した履歴温度を用いて，式(1)で算出したコンクリートの推定強度に，標準養生時の強度が得られるような適切な安全係数（例えば，柱・壁および梁に 0.6，スラブに 0.9）を設定すれば，強度の発現を安全側に見積もることも可能となり，型枠脱型の時期の判定に適用でき，工程計画に応用することができる。ちなみに，2.1 および 2.2 に想定した断面寸法や施工条件などと大きく異なる場合に，信頼できる資料によって安全係数を決めること，または必要に応じて模擬部材の施工試験を行うこととなる。

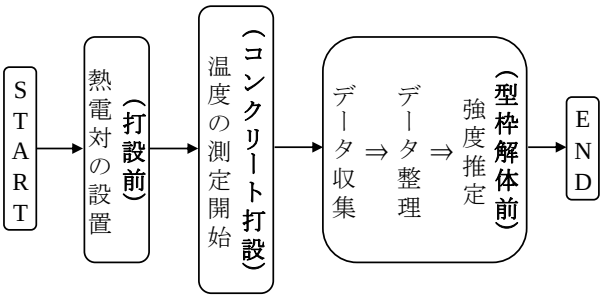


図－6　推定強度と圧縮強度の関係

4. 応用例

4.1 有効材齢による強度推定の流れ

本報告で実施した有効材齢を用いた方法の流れの例を**図－7** に示す。まず，スラブ，梁および壁の代表的な箇所に熱電対を設置する。次に，コンクリート打設前に測定開始する。そして，収集データより強度の推定を行い，コンクリートの強度発現を把握し，現場において型枠の取外しができるかどうかを判断する。



図－7　有効材齢を用いた方法の流れの例

4.2 強度推定の例

圧縮強度の平均値 f_c と推定強度 f_{cte} との比較を**表－6** に示し，建物 A へ適用した結果をまとめた。推定強度と圧縮強度の平均値との比 f_c /f_{cte} の値と判定結果も同表に示す。推定強度 f_{cte} は壁，梁およびスラブに計測したそれぞれの温度履歴を用いて脱型や支柱解体の時期を推定し，各部材の強度発現に追随しているものである。

表－6 に示すように，推定強度および圧縮強度の平均値はどちらも必要強度以上となったため，有効材齢を用いた方法で算出した推定強度は圧縮強度の平均値と同様に型枠取外しの時期を判定できることを確認した。ただし，3.2 (2) で述べたとおり，柱・壁・梁およびスラブに

表－6　推定強度の応用例

階	材齢（日）	型枠（支柱）取外し	圧縮強度の平均値 f_c (N/mm²)	必要強度*1) prov σ (N/mm²)	推定強度 f_{cte} (N/mm²)	f_c /f_{cte}	判定*2)
8F	1	柱・壁	7.13	5.0	11.30	0.63	YES
	3	梁	19.40	16.0	25.65	0.76	YES
		スラブ		16.0	21.21	0.91	YES
9F	1	柱・壁	7.30	5.0	9.30	0.78	YES
	6	梁	28.70	16.0	30.58	0.94	YES
		スラブ		16.0	25.59	1.12	YES
10F	2	柱・壁	12.70	5.0	20.62	0.62	YES
	5	梁	26.90	16.0	30.26	0.89	YES

注：*1) 規準値あるいは採用した型枠・支保工解体工法によって実施した型枠取外しの必要強度である。コンクリート強度は柱・壁の型枠取外し時に 5.0N/mm² 以上[6)]，梁下およびスラブ下の型枠取外し時に 16.0N/mm² 以上（設計基準強度の 50%以上[6)]）である。

*2) 推定強度≧必要強度なら，脱型できると判断し，「YES」で表す。

それぞれ適切な安全係数を見込んで, 取り外すかどうか, 決定する必要がある。

5. まとめ

コンクリートの圧縮強度に関する告示案と型枠や支保工の取外しに関する告示案が公表され，有効材齢を用いた方法が追加された背景を踏まえ，本報告では，施工時期が標準期および夏期となる鉄筋コンクリート造の実構造物を対象とし，型枠や支保工の取外し時期を決定するため，有効材齢を用いた方法の精度を検討した。得られた知見を下記にまとめた。

(1) 施工時期が標準期となる建物 A において代表的な部材のかぶり位置および表面位置の温度履歴を測定した結果，型枠取外し時に壁およびスラブのかぶりと表面の温度履歴には大きな差は見られず，その温度差の最大値はそれぞれ 0.6℃および 1.5℃で小さかったので，圧縮強度の推定には，かぶり位置の温度を測定すればよい。

(2) 建物Aおよび建物Bの各計測対象階において柱, 梁, 壁およびスラブは異なる温度履歴となり，測定した最高温度は柱＞梁＞壁＞スラブの順で低くなった。これは，断面形状や部材厚が異なることが主な原因の一つであった。

(3) 積算温度を用いた方法と，供試体の圧縮強度の平均値との比較を行い, 壁の推定強度が試験結果より約 6 割高く，スラブは試験結果より約 1 割低いケースがあったが，適切な安全係数（例えば，柱・壁および梁に 0.6，スラブに 0.9）を設定すれば，強度の発現を安全側に見積もることが可能であった。

(4) 有効材齢を用いた方法を現場において応用するため, 強度推定の流れの例を提示した。

(5) 本報告で実施した強度確認の流れおよびその応用方法を例示した。

コンクリート強度の発現は材料，配合および養生の乾燥湿潤の程度によって一様ではないため，今後さらにデータの蓄積を図りたい。

参考文献

1) 国土交通省住宅局建築指導課・建築技術研究会：基本建築基準法関係法令集 2018 年版，2017.11.18
2) 友澤史紀，牛島　栄：最近の積算温度方式の発展とその応用, セメント･コンクリート, No.527, pp.66-74, 1991.1
3) 社団法人日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説， 2008.6.25（第 2 刷）
4) 公益社団法人日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2012.6.15（第 1 版 3 刷）
5) 国立研究開発法人　建築研究所：型わくの取り外しに関する管理基準の検討，建築研究資料，No.168, 2016.3
6) 社団法人日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説　JASS5　鉄筋コンクリート工事 2015，2015.7.25
7) 日本建築学会：型枠の設計・施工指針（第 2 版第 1 刷），2011.2.15
8) 牛島　栄 : 強度推定, コンクリート工学, Vol.39, No.5, 2001