

論文 RFID センサーを活用した構造体コンクリートのせき板存置期間の管理方法に関する研究

井出 朋孝*1・金子 樹*1・菰田 夏樹*2・道坂 岳央*2

要旨: コンクリートの温度履歴によるせき板の存置期間の管理について、温度の測定機能を有する RFID センサーを開発し、室内実験および実部材における検証を行った。室内実験では開発した RFID センサーの測定値の信頼性を確認した。また、実部材における検証では、RFID センサーを用いて壁部材で安定した温度データの取得ができた。これにより、RFID センサーによる測定温度を基に等価材齢換算法によって圧縮強度を推定し、せき板の取外し時期を判断可能であることが確認された。

キーワード: RFID, 温度, 構造体コンクリート, せき板存置期間, 圧縮強度, 等価材齢換算法

1. はじめに

建築工事における型枠については、建築基準法施行令第 76 条(型わく及び支柱の除去) 第 2 項により取外しに関する基準が定められている。また、これに基づき建設省告示第 110 号(型わく及び支柱の取り外しに関する基準を定める件)では、せき板および支柱の取外しまでの存置期間が定められている。また、日本建築学会 建築工事標準仕様書 同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(以下、JASS 5)においては、「9 節 型枠」にせき板および支保工といった型枠の存置期間が定められている。(以下、型わくおよび型枠は「型枠」、支柱および支保工は「支保工」と JASS 5 に合わせた用語表記とする。)

上記の告示および JASS 5 では、型枠におけるせき板の存置期間として表-1 に抜粋を示すように、存置日数(コンクリートの材齢)による方法、構造体コンクリートの圧縮強度による方法、および等価材齢換算法による方法(等価材齢換算法)で求めることとされている。このうち等価材齢換算法は、告示第 110 号の平成 28 年 3 月の改正により、平成 26 年度国土交通省建築基準整備促進事業 S14(以下、基整促 S14 とする)「コンクリートの強度管理基準に関する検討」に基づき追加された。ここでは、有効材齢を用いた関係式から求められるコンクリートの強度が所定の圧縮強度以上であることを確認し、せき板の取外しの判断を行うこととしており、その方法として「せき板の取り外しに係わる積算温度を用いた管理要領(案)¹⁾」が示されている。

このように近年では、現場施工管理の省力化を目的として、構造体コンクリートの品質管理におけるせき板の存置期間の確認にコンクリート温度からの推定強度を用いる方法が実用化されている。温度の測定方法としては、静電容量センサー付きの小型集積回路を型枠に設置し、センサー部分をコンクリート表面に接触させて計測する

方法²⁾や、コンクリート内部に温度センサーを埋込み、無線通信により温度データを取得する方法³⁾などがある。一方で、前者のように型枠合板に測定装置を設置する場合は、せき板の加工手間や型枠の転用面に課題が生じてしまう。また、後者は小型電池付きの高価なセンサーが使い切りになってしまうため、コストの面から大量使用には適さない。これらの理由により、建築分野においては、コンクリート実部材の温度を測定し、せき板の存置期間を管理する手法の導入が進んでいない。

そこで、せき板存置期間の管理の省力化を目的に、本研究ではコンクリートの温度をより簡易的に測定する方法として、無線通信技術である RFID に温度センサーを組み込んだ RFID センサーに着目した。このセンサーを用いて打込み後の構造体コンクリートの表面温度を測定し、その温度データを基に構造体コンクリートのせき板存置期間を管理する手法について検討を行った。

表-1 せき板の存置期間に関する規定

部 位	セメント / 結合 材の 種類	建設省告示 第 110 号 - 2016			JASS 5 - 2022					
		存置日数 (日)			圧縮 強度 *1	存置日数*2 (日)		圧縮強度*1		
		存置期間中の 平均気温 (°C)				平均気温 (°C)		計画供用 期間の級		
		15 ≤	5 ≤ < 15	< 5		20 ≤	10 ≤ < 20	短期 標準	長期 超長期	
基礎、 梁側、 柱、壁	N	3	5	8	5 N/mm ²	4	6	5 N/mm ²	10 N/mm ²	
	BA	4	5	9		7	9			
	BB	5	7	10		5	8			
スラブ 下、 梁下	N	6	10	16	設計 基準 強度 の 50%	支保工を 取外した後			計算で安全 を確認した 圧縮強度で 12N/mm ² 以上	
	BA									
	M									
	BB	8	12	18						

*1 現場水中養生、現場封かん養生またはこれらに類する養生を行った供試体による圧縮強度試験または等価材齢換算法による。
*2 計画供用期間の級が短期および標準の場合による。

*1 株式会社長谷工コーポレーション 技術研究所 (正会員)

*2 TOPPAN エッジ株式会社 イノベーションセンター

2. RFID センサーの概要

構造体コンクリート温度の測定にあたり、前述した既存技術の課題を踏まえ、表-2 および図-1 に示す RFID センサーによって図-2 のような品質管理システムを開発した。RFID (Radio Frequency IDentification) は無線により非接触でアンテナと読取り機との間で電波や情報を交換する仕組みであり、一般的に倉庫での在庫管理や無人レジでの商品識別に活用されている。

本研究に使用する RFID センサーは、温度センサーが内蔵された IC チップとアンテナで構成されておりシール状であり、読取り機からの電波をエネルギー元として動作するパッシブ型である。そのため、RFID センサーはせき板の内側 (コンクリートの打込み側) に貼付し、せき板を介して外側に取付ける読取り機がセットとなる。測定したデータは、読取り機から LPWA 通信を利用してクラウドへ送られ、PC やスマートフォン、タブレットなどの通信機器があれば、遠隔からデータを確認することが可能である。また、RFID センサーは薄型であり、図-3 のようにせき板の取外し後のコンクリート表面は、わずかに痕跡が見える程度となっており、表面処理や手直し、仕上げ材の施工への影響は生じない。

周波数帯	UHF 帯 : 800~960MHz
寸法	幅 30mm×長さ 75mm
形態	ラベル(シール状)
温度範囲	-40~+85°C (測定精度±0.5~2.0°C)

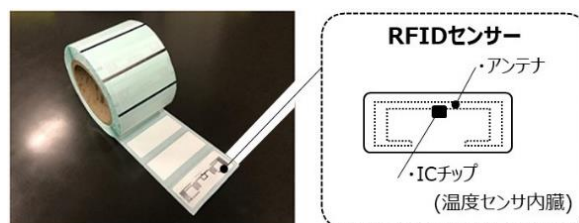


図-1 RFID センサーの外観

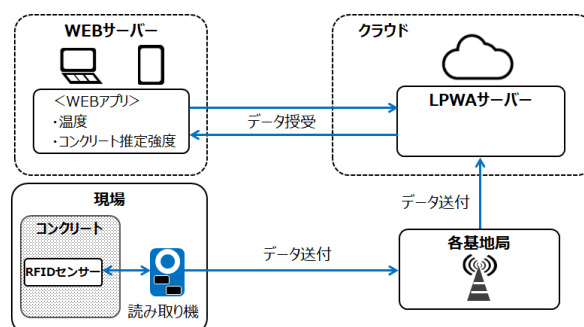


図-2 RFID センサーシステムの構成

3. 室内実験による測定温度の精度検証

3.1 実験の目的

等価材齢換算法による構造体コンクリートの品質管理について、管理要領 (案)¹⁾ では、JIS C 1602 (熱電対) に定めるクラス 1 の T 型 (温度範囲-40~125°C, 許容差±0.5°C) と同等以上の性能をもつ熱電対、もしくは 0~80°C の測定範囲の目量が 0.5°C 以下の性能をもつ接触方式のデジタル温度計と示されている。RFID センサーはこのうちの後者にあたる位置づけ、温度範囲が-40~+85°C, 測定精度は±0.5~2.0°C が公称値の IC チップを選定している。ここで IC チップの特性として、温度域に応じて測定精度が変動するということが事前に明らかであったため、各温度域での測定精度を把握することを目的に、室内実験において熱電対との比較検証を行った。

3.2 実験概要

表-3 に室内実験の概要を示す。室内実験は、図-4 のように恒温槽内に設置したシリコンオイルに RFID センサーおよび JIS C 1602 (熱電対) に定めるクラス 2 に相当する T 型熱電対を浸漬させ、風量の影響を排除した環境で温度の測定を実施した。環境温度は 0~80°C の内、20°C 刻みの 5 段階の温度とし、RFID センサーによる測定値の読取りおよび記録は、読取り機を 0~40°C では槽内に、60 および 80°C では読取り機への負担を考慮して恒温槽の開口部の一部を塗装合板 (t=12mm) で覆い、これを介して外側から行った。また、測定は各温度で約

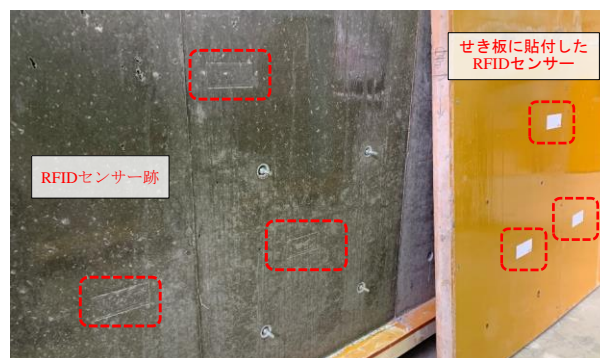


図-3 コンクリート表面の RFID センサーの痕跡

15 時間を 15 分毎で行い、環境温度が安定してからの 10 時間の平均値を各 RFID センサーの測定値とした。なお、試験には No.1~20 の 20 体の RFID センサーを用いた。

3.3 実験結果

表-4 に RFID センサーと熱電対の測定温度、図-5 に RFID センサーと熱電対の測定温度の関係を示す。測定温度は、環境温度 20°C の場合は熱電対と RFID センサーで同程度の結果となった。一方で、図-5 に示すように両者の測定値の関係は直線的であるものの、 $y=x$ に対して約 20°C を交点として、RFID センサーの温度が熱電対に比べて低温域では大きく、高温域では小さくなり、事前の想定どおり温度域によって測定精度が変動することが確認された。

図-6 に RFID センサーの測定温度と熱電対との温度差の関係を示す。20 体の RFID センサーのうち、各環境

温度における温度差の最小値から最大値までの幅は約 2.5℃と環境温度によらず同程度であった。

この環境温度と熱電対との温度差の関係について、図-6 の回帰式を基として温度差が小さくなるように、各 RFID センサーの測定温度の補正を行った。表-5 および 図-7 に各環境温度での補正後の温度差を示す。補正によりいずれの環境温度でも平均値は概ね熱電対と同等となった。また、各環境温度での補正後の標準偏差 σ は 0.68 ~ 0.78℃である。これより、各環境温度の熱電対と RFID センサーとの温度差を 1.0℃以下とすると $1.48\sigma \sim 1.28\sigma$ であり、その平均は 1.39σ となり、これは標準正規分布表から約 92%が該当することとなる。

一方で、RFID センサーの補正温度と熱電対との差が大きくなるものについて、図-8 に示す No.5 のようにマイナスからプラスまで広い範囲で温度差が変動するもの

表-3 室内実験の概要

項目	概要
環境温度	0, 20, 40, 60, 80℃
測定時間	各温度で約 15 時間
測定間隔	15 分毎
測定条件	シリコンオイル内
測定方法	RFID センサー, T 型熱電対 (クラス 1)
試験体数	20 体 (No.1~20)

表-4 RFID センサーと熱電対の測定温度 (℃)

環境温度	熱電対					RFID センサー				
	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
最小	0.1	15.5	39.2	58.9	77.3	0.4	15.5	37.6	56.0	73.8
最大	3.5	20.3	40.4	60.2	80.6	3.9	21.7	40.6	58.4	78.4
平均	0.5	19.9	40.0	59.4	79.1	1.8	20.2	39.2	57.3	76.2
標準偏差	0.74	1.04	0.30	0.34	0.92	0.87	1.29	0.83	0.75	1.31

表-5 補正前後の熱電対との温度差 (℃)

環境温度	RFID センサー：補正前					RFID センサー：補正後				
	0	20	40	60	80	0	20	40	60	80
最小	0.1	-0.9	-2.2	-3.2	-4.0	-1.3	-1.2	-1.3	-1.3	-1.0
最大	2.4	1.6	0.3	-0.5	-1.4	1.1	1.5	1.4	1.6	1.9
平均	1.3	0.3	-0.8	-2.1	-3.0	-0.1	0.1	0.2	-0.1	0.2
標準偏差	0.73	0.64	0.65	0.64	0.72	0.76	0.69	0.69	0.68	0.78

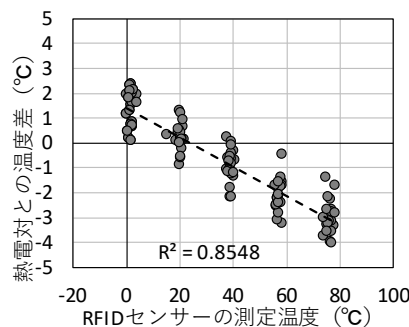


図-6 RFID センサーの測定温度と熱電対の温度差

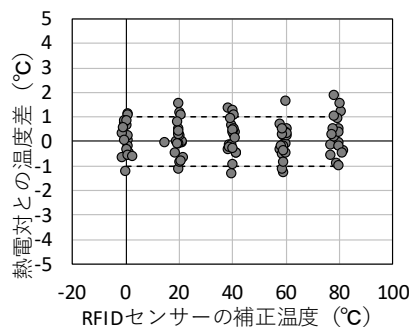


図-7 RFID センサーの補正温度と熱電対の温度差

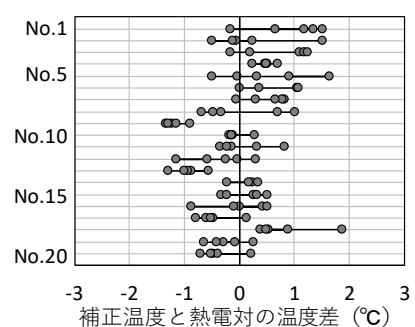


図-8 各 RFID センサーの補正温度と熱電対の温度差

や No.9 のようにいずれの環境温度でも測定値が小さくなるものなど、各個体による特徴の違いも見られる。等価材換算法に基づく、構造体コンクリートの温度による強度推定では、測定温度が過度に小さいまたは大きい場合に次工程への着手のタイミングが適切に管理できないことが懸念される。そのため、今後は製造時の検査などにより、安定的な測定値を得られる可能性が低い個体のスクリーニングなどについても検討が必要と考える。

4. 実部材における構造体コンクリートの温度測定

4.1 検証の目的

室内実験において RFID センサーの測定温度の信頼性を確認した。そこで、RFID センサーを用いた構造体コンクリートの温度履歴の測定および記録について、工事現場における実部材での検証を行った。



図-4 RFID センサーによる温度測定の様子

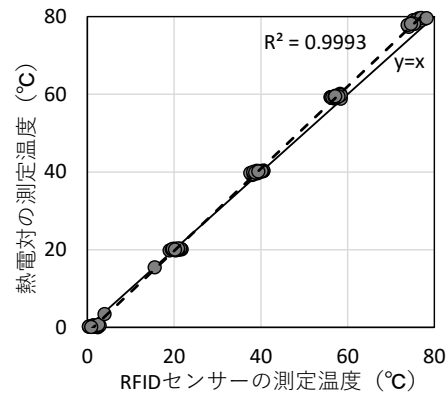


図-5 RFID センサーと熱電対の測定温度の関係

4.2 検証概要

検証を行った建築物および部材の概要を表-6に示す。構造体コンクリートの温度測定は、建設中の鉄筋コンクリート造の建築物について、2024年1月の冬期に行った。

表-7にコンクリートの計画調合、受入れ時の構造体コンクリートの試験結果および使用材料を示す。コンクリートは、設計基準強度36N/mm²(呼び強度42)で、普通ポルトランドセメント(記号:N)および高炉セメントB種(BB)を併用した高炉セメントA種に相当(BA+)する環境配慮型コンクリートであり、市中の生コン工場より製造、運搬した。なお、施工当日のコンクリート受入れ時の構造体コンクリートの試験は2ロットであった。

測定箇所は図-9に示すように壁で2箇所(W1, W2)および柱で1箇所(C)とし、いずれも高さ方向では概ね中央に、横方向には周辺の部材のコンクリートからの温度の影響がない程度に端部から距離を取った位置とした。

コンクリート温度は、RFIDセンサーおよび熱電対で測定を行った。熱電対は各部材の測定部がコンクリート表面からの距離が約50mmとなるように最外側の鉄筋に取付けた。また、RFIDセンサーはせき板の内面に貼付し、読取り機はせき板の外面に取付けた

4.3 検証結果

(1) データ取得率

構造体コンクリートの温度測定はコンクリートの打込み直後から開始し、4日後の朝までの約90時間について30分毎に行った。測定時のRFIDセンサーと読取り機の通信はフレッシュコンクリート中の自由水および鉄筋など周囲の鋼材の影響を受けやすい。そのため、データ保障の観点から30分毎の測定で複数回のデータを取得し、その中から5回分のデータの平均値を測定値とした。

各部材における電波出力の一覧を表-8に示す。壁部材の2か所ではRFIDセンサーにより測定期間中にわたりデータを欠損なく取得できた。一方で、柱部材では30分ごとの測定で5回のサンプリングができない場合も見られ、有効な測定データの取得率は66.1%となった。これは、柱部材では太径の主筋を含み鉄筋量が多いことから、壁部材よりも電波環境が不安定となりデータ取得率が低下したものと考える。また、各箇所の電波出力には差が生じていたが、この原因として周辺の鋼材や、RFIDセンサーと読取り機の相対位置によって、電波の反射の影響⁴⁾による電波環境の差が生じたものとする。

なお、本検証では、対象の壁および柱と上層階のスラブで同日にコンクリートの打込みを行った。そのため、測定箇所は四方がコンクリートなどに囲われるため、LPWA通信の障害となることが懸念されたが、読取り機からクラウドへのデータ送信には支障がないことを確認した。

表-6 建築物及び部材の概要

項目		概要
建築物	所在地	神奈川県横浜市
	構造規模	鉄筋コンクリート造、地上15階
	用途	共同住宅、店舗
部材	部位	2階 壁、柱
	寸法	壁：w 7,330×h 2,150×t 150mm 柱：□1,350×1,040×h 2,450mm
	配筋	壁：ダブル配筋、たて筋 D10@150mm、よこ筋 D10@200mm 柱：主筋 D38×34本、帯筋 D16@100mm
測定	箇所	壁：2か所 (h=1,150mm)、 柱：1か所 (h=1,200mm)
	方法	RFIDセンサー、熱電対
	位置	RFIDセンサー：せき板内面 (0mm) 熱電対：コンクリート表面から約50mm
	時間	打込みから30分間隔で90時間
実施日		2024年1月

表-7 施工したコンクリートの諸元

■コンクリートの計画調合									
スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	N	BB	S	G	
21	4.5	43.6	49.5	175	221	180	839	882	
■コンクリート試験結果									
スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度* (N/mm ²)						
20.5~22.5	3.4~4.5	11~13	54.6, 55.4						
■使用材料									
セメント：N 密度 3.16g/cm ³ , BB 密度 3.04g/cm ³ 細骨材：山砂+砕砂(石灰岩)+砕砂(砂岩), 表乾密度 2.61g/cm ³ 粗骨材：碎石(石灰岩)+碎石(砂岩), 最大寸法 20mm, 表乾密度 2.68g/cm ³ , 実積率 60.0% 水：上水道水, 化学混和剤：高性能 AE 減水剤 標準型 I 種									

*圧縮強度は標準養生での材齢28日の値を示す。

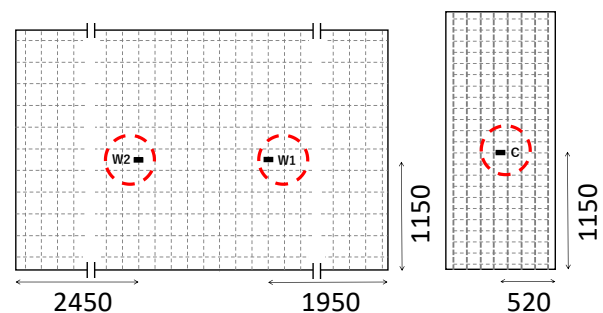


図-9 コンクリート温度の測定位置 (単位: mm)

表-8 各部材のデータ取得率および電波出力の一覧

部位		W1	W2	C
読み取り機 設置外観				
	データ取得率	100%	100%	66.1%
電波 出力	平均	0.35W	0.07W	0.50W
	最大	0.59W	0.10W	0.79W

(2) RFID センサーおよび熱電対による測定温度の比較

打込まれたコンクリートの温度および測定期間の外気温の推移を図-10に示す。RFID センサーによる温度は室内実験で検討した熱電対との関係式による補正を行っている。なお、図-10の経過時間(x軸)は最初のコンクリートを打込んだW1の打込み直後を0時間とし、せき板の取外し前までの約90時間で測定を行った。

図-10より、壁部材であるW1およびW2ではRFIDセンサーと熱電対の測定温度は時間の経過にともない同様に推移した。また、コンクリート温度は、経過時間30時間程度で最高となり、その後は外気温の変化に応じて低下していった。しかし、50時間あたりからRFIDセンサーの測定温度が熱電対よりも高くなる傾向が見られた。これは、コンクリートの水和反応による発熱が収まり、外気温が測定温度に影響を与えやすくなった時期に相当すると考えられ、RFIDセンサーがコンクリート表面であるのに対して、熱電対は表面から50mmのコンクリート内部であったために外気温の影響を受けにくく、温度に差が生じたものと考えられる。一方で、柱部材では、壁部材よりも測定温度は大きく、RFIDセンサーで測定できた温度ではいずれも熱電対よりも小さく、深さ方向の測定位置の差がより顕著に出たものと考えられる。

図-11に経過時間とRFIDセンサーと熱電対との測定温度の差を、表-9にその一覧をそれぞれ示す。W1およびW2では経過時間による熱電対との差は同程度であった。また、前述のとおり50時間程度から温度差は徐々に大きくなる傾向が見られた。なお、前述のとおり柱部材

は測定時にデータの欠損が見られたため、図-10および図-11についても断続的な推移を示している。

せき板の取外し時期はコンクリート打込みの翌日から翌々日の工程となることが多い。そのため、48時間以内の温度差でみると、壁部材における標準偏差は0.27~0.31℃と室内実験の約0.70℃よりも小さく、実構造物においても熱電対と大差ないコンクリート温度が測定できることを確認した。なお、柱部材の標準偏差は室内実験よりも小さいものの、温度差は平均-2.1℃と大きかった。

(3) 等価材齢換算法の適用性の検討

等価材齢換算法の適用にあたり、取得した温度データから、式(1)、(2)¹⁾より有効材齢と推定強度を算出した。

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

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

ただし、

t_e : 温度履歴より算出したコンクリートの有効材齢(日)

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回目の測定で得られたコンクリート温度(℃)

T_0' : 1(℃)

$f_{c_{te}}$: 温度履歴により推定される圧縮強度(N/mm²)

s : セメントの種類に応じた数値(Nと同じ0.31)

t_0 : 1(日)

$f_{c_{28}}$: 呼び強度の強度値(N/mm²)

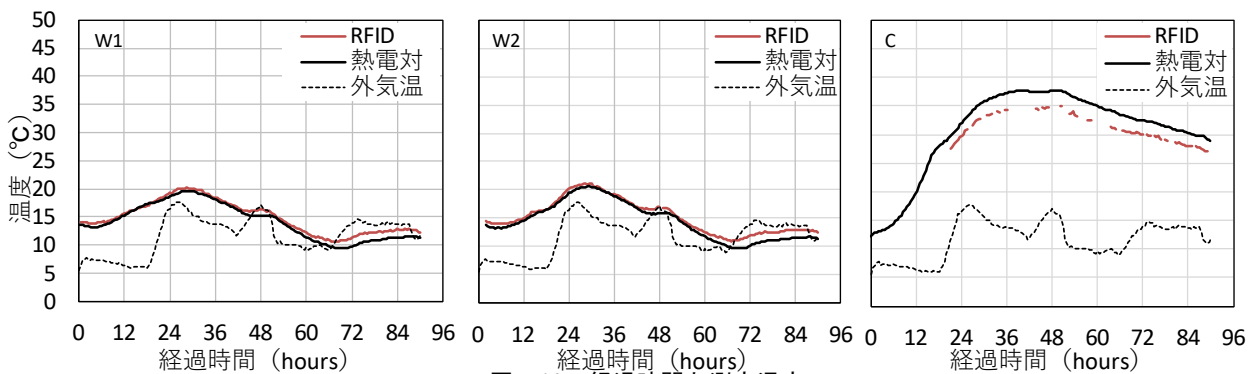


図-10 経過時間と測定温度

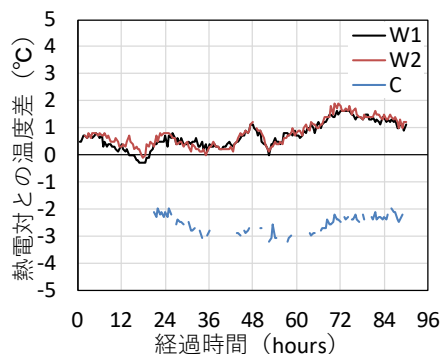


図-11 経過時間と熱電対との温度差

表-9 熱電対との温度差の一覧

範囲	48時間以内			90時間以内		
	W1	W2	C	W1	W2	C
測定部材	W1	W2	C	W1	W2	C
最小	-0.7	-0.6	-2.6	-0.7	-0.6	-2.7
最大	0.6	0.8	-1.6	0.9	1.2	-1.6
平均	0.0	0.1	-2.1	0.2	0.3	-2.2
標準偏差	0.31	0.27	0.22	0.38	0.39	0.24

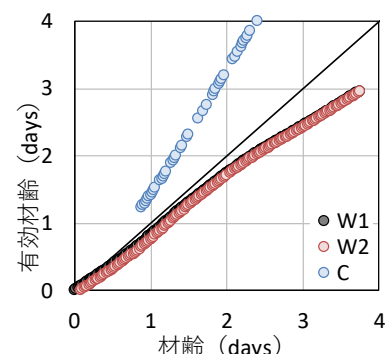


図-12 材齢と有効材齢の関係

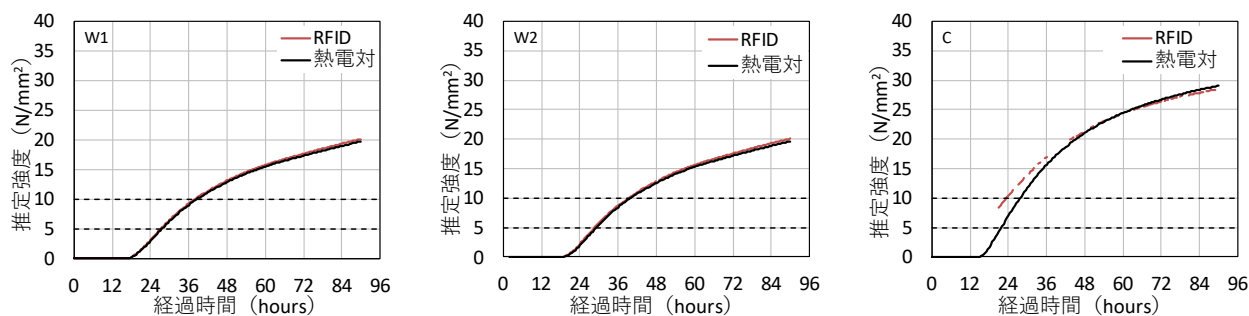


図-13 経過時間と推定強度

算出した有効材齢と実材齢の関係を図-12に示す。壁部材の有効材齢はW1およびW2で同様であり、冬期であることから実材齢よりも小さく算出された。また、図-13に示すように有効材齢より求める推定強度は、RFIDセンサーと熱電対では同等となり、W1、W2ともに約27時間で5N/mm²、約38時間で10N/mm²と所要強度が得られる経過時間は同程度であった。なお、推定強度の算出にあたりBA+のセメントの種類に応じた係数sは、Nと同じ0.31⁵⁾としている。

柱部材では、部材断面積の影響により、冬期でも有効材齢が実材齢よりも大きくなった。そのため、壁部材と比べて推定強度が大きくなり、所要強度が得られる経過時間が早くなった。一方で、実運用を想定した場合、各部材ごとに温度を測定する手間を考慮すると、壁部材のように発熱が小さい部材の温度履歴に基づき推定強度を算出する方が、合理的かつ安全側の評価であると言える。

5. まとめ

本報ではRFIDセンサーにより打込み後のコンクリート温度を測定し、せき板の取外し時期を判断することを目的として、室内実験による温度の測定精度の確認および実部材における検証を行った。

- (1)室内実験では、各個体の温度測定精度にばらつきが見られたが、測定値の補正により約92%の個体が温度差1.0℃以内の範囲に収まることが分かった。
- (2)実部材における検証では、壁部材で安定した温度データを取得することが可能であった。
- (3)実部材の測定温度をもとに等価材齢換算法によって強度を推定した結果、5N/mm²あるいは10N/mm²以上となる時期が確認でき、RFIDセンサーによってせき板の取外し時期を判断可能であることが示された。

6. おわりに

建築分野におけるコンクリート工事では、せき板の存在が湿潤養生を兼ねるとして、湿潤養生期間の終了のタイミングでせき板を取外すことがある。また、JASS5においては表-10に抜粋を示すとおり、所定の圧縮強度を

表-10 JASS 5における湿潤養生期間に関する規定

結合剤種類	湿潤養生の期間(日)		圧縮強度*(N/mm ²)	
	短期/標準	長期/超長期	短期/標準	長期/超長期
N, BA	5以上	7以上	10以上	15以上
M, BB	7以上	10以上		

*現場水中養生、現場封かん養生またはこれらに類する養生を行った供試体による圧縮強度試験または、その他の信頼できる構造体コンクリートの強度推定の方法による。

確認したのちに、湿潤養生を打ち切る方法もある。従来、この圧縮強度は現場で養生した供試体により確認しているが、信頼できる構造体コンクリートの強度推定の方法によることも有効とされている。したがって、本技術の応用により、RFIDセンサーによる測定温度を基に等価材齢換算法から強度を推定し、湿潤養生打切り(=せき板の取外し)時期を判断する管理手法は、労務省力化や廃棄物削減等の観点からも非常に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 棚野博之ほか: 型枠の取り外しに関する管理基準の検討 第II編せき板の取り外しに係わる積算温度を用いた管理要領(案), 建築研究資料No.168, pp.234~238, 2016.3
- 2) 西島茂行ほか: 小型集積回路によるスマートセンサ型枠システムを利用したコンクリートの養生・品質管理システムの開発 その1~その2, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), pp.653~656, 2012.9
- 3) 江里口玲ほか: 温度センサ付きRFIDタグを用いたコンクリート内部温度の非接触計測および養生状況の評価, 日本建築学会学術講演梗概集(北海道), pp.309~310, 2022.9
- 4) 道坂岳央ほか: センサRFIDを用いたコンクリート内部の無線センシング技術の検討 その5 鉄筋コンクリート取り付けでの通信距離への影響, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.953~95, 2020.9
- 5) 金子樹ほか: 普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の混合使用により高炉セメントA種相当としたコンクリートに関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第86巻 第783号, pp.674~685, 2021.5