

報告 センサを活用した圧縮強度推定によるせき板および支柱の取外し管理の実現に向けた検討

國岡 潤*1・小島 正朗*2・黒川 裕介*3・兼松 学*4

要旨: 建設現場の ICT 活用の一環としてセンサを活用し、品質管理の合理化の検討を実構造部材にて実施した。その結果、簡易に設置可能な無線式センサにて、打ち込まれたコンクリートの温度を無線通信機能によりリアルタイムに測定できることを確認した。また、得られた温度履歴を基に有効材齢または積算温度を求め、供試体の圧縮強度との相関を事前に検討することで、平成 28 年国土交通省告示 503 号に規定される圧縮強度推定式より精度の高い圧縮強度推定が可能であることが示唆された。以上のことを踏まえ、無線式センサを活用したせき板および支柱の取外し時期の管理を、実施工に適用した。

キーワード: センサ, 有効材齢, 積算温度, 構造体コンクリート, 強度推定, 支柱の取外し

1. はじめに

近年、建設業の深刻な労働者不足や熟練技能者の不足から施工の合理化、省人化による生産性向上が求められている。省人化技術として国土交通省が推進する *i-Construction* をはじめ建設現場での ICT 活用が進んでいる。著者らはセンサ技術による省人化を目的とした新たな品質管理技術の検討¹⁾を行っている。最近では、型枠内に埋設した温度センサなどを用いて構造体コンクリートの温度履歴を測定し、それに基づいて構造体コンクリートの圧縮強度を推定する手法なども実用化^{2),3),4)}されており、平成 28 年 3 月国土交通省告示 503 号 (以下、告示 503 号) に有効材齢を用いた強度推定に関する基準が定められている。告示 503 号にはせき板の取外しについては有効材齢を用いた強度推定の方法が規定されているが、支柱の取外しについては同様の規定がなく、同告示第一の但し書き「特別な調査又は研究の結果に基づき、せき板及び支柱の存置期間を求めることができる場合は、当該存置期間によることができる」によるしかない。また、告示 503 号に規定される強度推定式(1) (以下、告示式) に用いる fc_{28} は呼び強度の強度値と規定されているため、現場水中養生供試体または現場封かん養生供試体を用いた圧縮強度試験による管理と比べ安全側に乖離する可能性が高い。

このような背景から温度履歴による圧縮強度推定が実際の工事で普及するには至っておらず、せき板および支柱の取外し時期は、現場水中養生供試体または現場封かん養生供試体の圧縮強度で確認している。この際、複数本採取して必要強度が発現することを確認するまで繰り返し強度試験を行う、もしくは試験回数を削減するた

めに余裕をみた材齢にて強度試験を実施することが一般的であり、合理的な品質管理方法とは言い難い。この課題を解決するため、本稿では簡易に設置可能な無線式センサを用いた温度測定より、せき板および支柱の取外し管理に必要な圧縮強度推定をリアルタイムに精度良く管理する手法を構築することを目的に実験および実施工への試行を行った。

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

fc_{te} : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

s : セメントの種類に関わる定数(N:0.31)

s_f : 硬化原点のための補正項(告示: $s_f=0.5$)

t_e : 式(2)により計算した有効材齢(日)

t_0 : 1 (日), fc_{28} : 呼び強度の強度値(N/mm²)

$$t_e = \frac{1}{24} \sum \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right] \quad (2)$$

Δt_i : 温度 T が継続する期間(時間)

T_i : Δt の間継続するコンクリート温度(°C)

T_0 : 1 (°C)

2. 室内実験

2.1 実験概要

実構造物での適用に先立ち、市中の生コン工場(N 工場)の室内にて有効材齢と圧縮強度の相関を確認する実験を行った。実験日は 2019 年 9 月 12 日、コンクリートの使用材料を表-1 に、調合を表-2 に示す。呼び強度は、実構造物の設計基準強度である 30N/mm² に S 値を考慮して 33 とした。供試体は全て $\Phi 100 \times 200$ の円柱とし、供試体の養生方法と圧縮強度試験材齢を表-3 に示す。

*1 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 構造材料グループ 研究主任 (正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 構造材料グループ グループ長 修士 (正会員)

*3 (株) 竹中工務店 東関東支店 作業所 課長

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料 (N工場)

種類	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm ³)
細骨材	S1	栃木県産砕砂 (表乾密度: 2.63g/cm ³ 、粗粒率: 3.20)
	S2	千葉県産陸砂 (表乾密度: 2.62g/cm ³ 、粗粒率: 1.80)
粗骨材	G	栃木県産砕石2005 (表乾密度: 2.70g/cm ³ 、実積率: 60.0%)
混和剤	Ad	高性能AE減水剤 標準形1種

表-2 調合 (N工場)

呼び強度 (cm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S1	S2	G	Ad
33	18	4.5	46.9	48.8	170	362	602	257	926	3.6

表-3 供試体養生方法と圧縮強度試験材齢

養生方法	圧縮強度試験材齢 (日)						
	1	3	7	14	28	56	91
標準水中	●		●		●		
現場封かん	●	●	●	●	●	●	●

供試体の温度は現場封かん養生供試体の中心に取り付けた熱電対にて測定した。

2.2 実験結果および考察

各材齢における供試体の強度試験結果を表-4に、現場封かん供試体および外気温の温度履歴を図-1に示す。現場封かん供試体の各材齢における圧縮強度と現場封かん供試体温度より算出した積算温度との関係を図-2に示す。なお、積算温度は、式(3)より算出した。

$$M = \sum_0^t (\theta + 10) \cdot \Delta t \quad (3)$$

M: 積算温度 (° D・D), Δt: 時間 (日)

θ: Δt時間中の温度 (°C)

現場封かん供試体と外気温の温度履歴は、材齢初期にコンクリートの温度上昇の影響で違いはあるが、積算温度の違いは材齢7日で1.5%程度と大きな差はない。現場封かん供試体の圧縮強度と積算温度は、初期材齢から91日材齢まで相関が認められた。従って、この調合において初期材齢から設計基準強度を保証する材齢に亘って積算温度による圧縮強度の推定が可能であると考えられる。

告示式における有効材齢と圧縮強度の関係に、現場封かん養生および標準養生した供試体の強度試験結果をプロットして図-3に示す。現場封かん供試体の圧縮強度は、いずれの材齢においても告示式より高い結果であった。設計基準強度に達する有効材齢を比較すると告示式の方が約8日遅く、初期材齢を除きかなり安全側の評価となった。告示式の基準強度である fc₂₈ をこの調合における実強度および調合強度に基づく値を用いて推定した圧縮強度(以下、推定式 A~D)を図-3に加えた結果を図-4に示す。Aは fc₂₈=標準水中供試体の28日圧縮強度、Bは fc₂₈ = 「標準水中供試体の28日圧縮強度 - 28S₉₁」、Cは fc₂₈=現場封かん供試体の28日圧縮強度、Dは fc₂₈=「調

表-4 圧縮強度試験結果

養生方法	各材齢における圧縮強度 (N/mm ²)						
	1日	3日	7日	14日	28日	56日	91日
標準水中	8.1	-	31.8	-	40.7	-	-
現場封かん	11.7	24.0	30.4	33.5	39.0	42.1	43.3

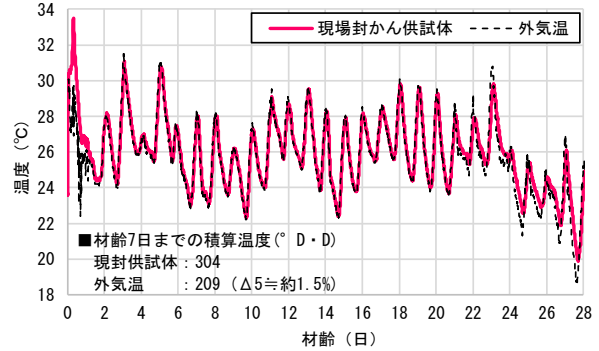


図-1 現場封かん供試体および外気温の温度履歴

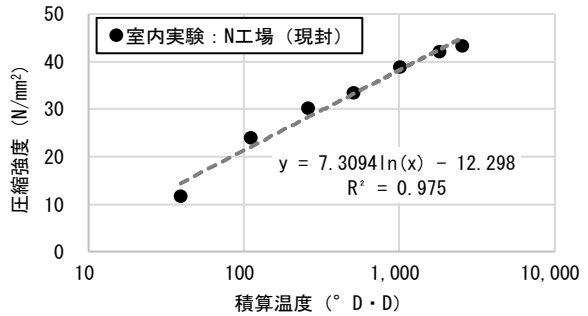


図-2 現場封かん供試体圧縮強度と積算温度の関係

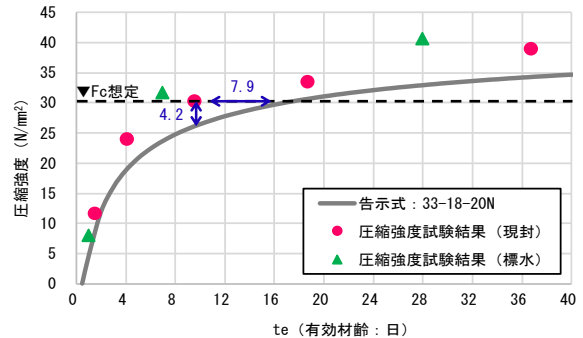


図-3 有効材齢と圧縮強度の関係 (告示式と実強度)

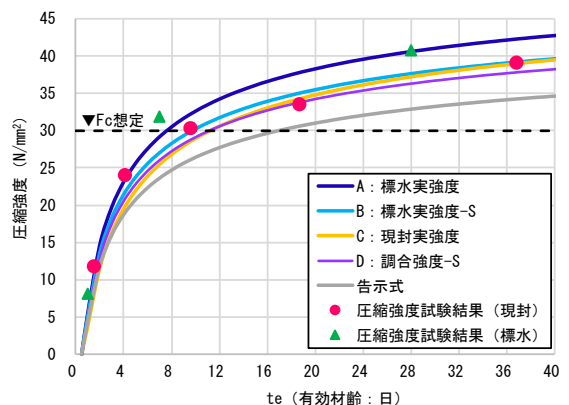


図-4 有効材齢と圧縮強度の関係 (推定式と実強度)

合強度 f_{c28} 」を用いた。なお、構造体強度補正值 f_{c28} は、実績値ではなく JASS5⁴⁾で標準値として示されている $3\text{N}/\text{mm}^2$ とした。また、C については(1)式の分子である28を現場封かん供試体の有効材齢とした。Aは現場封かん供試体強度に対して危険側の評価となるが、B~Dは現場封かん供試体強度に近い推定式となった。

告示式に対し、 f_{c28} (コンクリートの圧縮強度)の値を適切に設定すれば、初期材齢から設計基準強度を保証する材齢に亘って安全かつ告示式より精度の高い強度推定が可能と考えられる。

3. 実構造物における検討実験

3.1 実験概要

(1) 実験日時・場所および使用材料

実験は千葉県内の RC 造地上3階、耐力壁を有するラーメン構造建物にて実施した。対象工区は1階躯体a工区(1階柱・壁、2階スラブ)で、対象工区のコンクリート打設は2019年10月16日に行った。コンクリートは市中の生コン工場(K工場)のものとし、使用材料を表-5に、調合を表-6に示す。

(2) センサの概要

実験で使用したセンサの仕様を表-7に示す。センサ(無線)は、施工時に配線の引き回しが不要で結束バンドなどにより最外部の鉄筋に4点結束するだけで簡単に取付可能なセンサである。スマートフォンの専用アプリとBluetooth機能を用いてセンサから計測情報を取り込むことでリアルタイムにコンクリート温度を確認できる。

写真-1にセンサ(無線)の外観および計測時のスマートフォン画面を示す。センサ(有線)は、白金薄膜温度センサを使用した。センサ(無線)のキャリブレーションと柱の中心部の温度測定を目的としている。

(3) センサの設置箇所および数量

センサの設置箇所および数量を表-8に示す。1階a工区の建物形状とセンサ設置位置を図-5に示す。柱、壁、スラブとも南北で躯体形状、位置が対称に近い部位を選定した。また、2種類のセンサは同一部材に設置した。センサの詳細設置位置および躯体形状の代表的なも

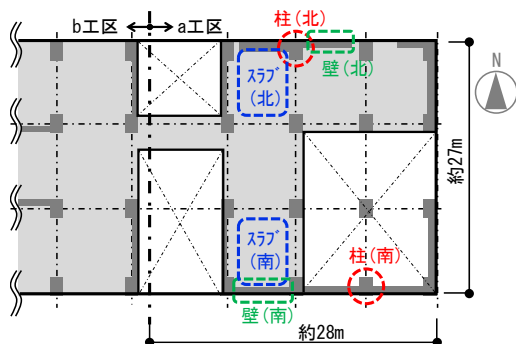


図-5 1階a工区の建物形状とセンサ設置位置

表-5 使用材料 (K工場)

種類	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度: $3.15\text{g}/\text{cm}^3$)
細骨材	S1	茨城県産陸砂(表乾密度: $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率: 2.20)
	S2	栃木県産砕砂(表乾密度: $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率: 3.20)
粗骨材	G	栃木県産砕石 2005(表乾密度: $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 、実積率: 60.0%)
混和剤	Ad	高性能AE減水剤 標準形I種

表-6 調合 (K工場)

呼び強度	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
					W	C	S1	S2	G	Ad
33	18	4.5	48.0	46.2	168	350	486	338	983	3.5

表-7 センサの仕様

測定タイプ	センサ(無線)	センサ(有線)
	測定範囲	無線式
測定精度	温度: $-30\sim 60^\circ\text{C}$	温度: $-25\sim 100^\circ\text{C}$
埋込み深さ	温度: $\pm 4^\circ\text{C}$	温度: $\pm (0.15+0.002t)^\circ\text{C}$
埋込み深さ	表面から15cm以内	-
本体寸法	約2年	-
バッテリー寿命	約2年	-
測定間隔	温度: 30分	温度: 15分



写真-1 センサ(無線)の外観および計測画面

表-8 センサの設置箇所および数量

位置	部材	躯体面からの埋込深さ (mm)	センサ設置数量		
			センサ(無線)	センサ(有線)	
北面	壁	表層	50	3	1
		中心	110	-	1
	柱	表層	60~80	3	1
		中心	320	-	1
スラブ	上面表層	50	3	-	
南面	壁	表層	50	3	1
		中心	110	-	1
	柱	表層	60~80	3	1
		中心	320	-	1
スラブ	上面表層	50	3	-	
計				18	8

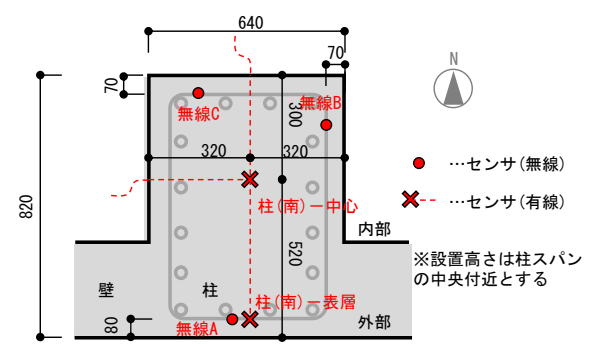


図-6 センサの詳細設置位置と躯体形状 (柱-南面)

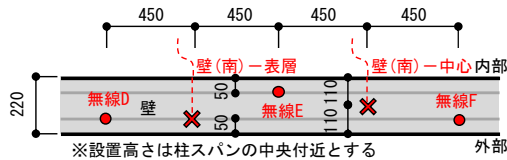


図-7 センサの詳細設置位置と躯体形状（壁-南面）

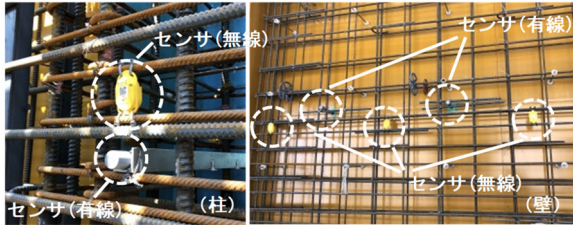


写真-2 センサの設置状況（柱・壁）

のを図-6, 7に示す。表層に設置するセンサはかぶり部分を除いて最も表層に近い位置(最外部の鉄筋と同面)に設置した。センサの設置状況を写真-2に示す。

3.2 実験結果および考察

(1) コンクリート温度の計測結果

センサ(有線)で測定した柱および壁部材における北面、南面のコンクリート温度履歴の比較を図-8に示す。なお、せき板の脱型は南北面とも材齢7日目に着手している。柱の表層部では南面に比べ北面の温度が最高温度で2度ほど低く、その後の温度も材齢7日で外気温程度に降下するまで北面の方が低い傾向が継続した。一方、柱の中心部や壁の温度は、南面と北面でほぼ同じであった。柱、壁ともに北側の温度上昇時間が早いのは、打設順序によるものである。

センサ(無線)とセンサ(有線)の測定結果の比較を図-9に示す。有線-表層と無線Aがほぼ同じ位置に設置しているセンサであり、この2つのセンサの測定値を比べると概ね同じ値である。図-9に示す部材以外についても同様の結果であり、センサ(無線)の測定精度に問題がないことを確認できた。無線Aと無線B, Cとではコンクリート温度が異なるが、北面の測定結果も併せて考えると、無線Aが南面外部に面していることに加え、両側に壁のある躯体形状が影響していると考えられる。

センサ(無線)で測定したスラブの温度履歴を図-10に示す。材齢3日目までは測定位置によらず同じ温度を示した。材齢3日目から10日目の間では、測定位置によって温度に違いが見られる。これは現場施工に伴う測定位置上部の資材の有無が影響している。材齢11日目以降は上部スラブの型枠施工に伴い日射の影響がなくなり、測定位置による温度の違いはほとんど見られない。

各部位の測定結果を比較すると最高温度は、柱>壁>スラブである。また、方角や施工条件による日射環境の違いにより温度差が生じたが、部材の強度発現に与える影響は小さいと考えられる。しかし、せき板の脱型時期な

ど初期材齢の躯体表層強度を温度履歴から推定する場合には、日射や部材形状、施工条件による温度の違いの影響で危険側の評価にならないよう考慮する必要がある。

(2) 圧縮強度と積算温度

コンクリート打設時に採取した現場封かん供試体の各材齢(1,3,7,28日)における圧縮強度と現場封かん供試体の積算温度との関係を室内実験の結果と併せて図-11に示す。積算温度は式(3)より算出した。圧縮強度と積算温度に相関が認められた。また、別工場のコンクリートで実施した室内実験に近い回帰式であり、使用材料の相

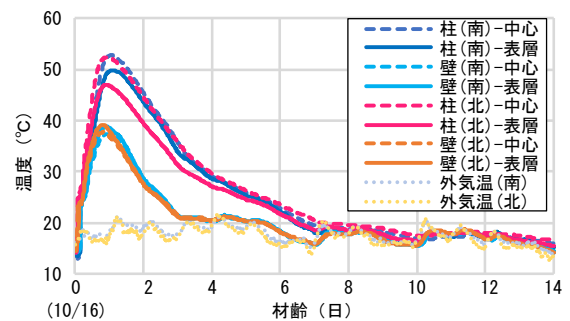


図-8 北面と南面の温度履歴の比較（有線式）

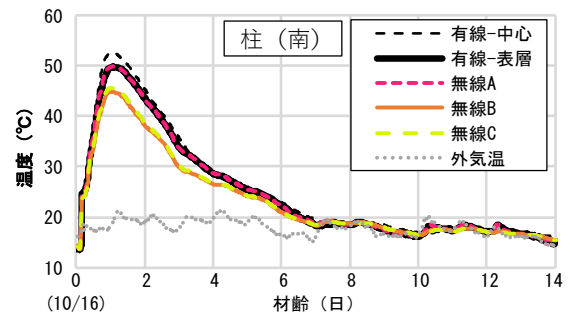


図-9 無線式と有線式センサの比較（柱-南面）

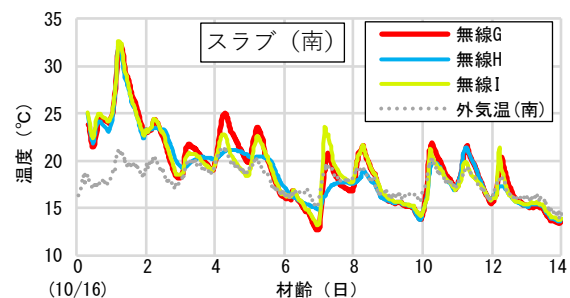


図-10 スラブの温度履歴（南面）

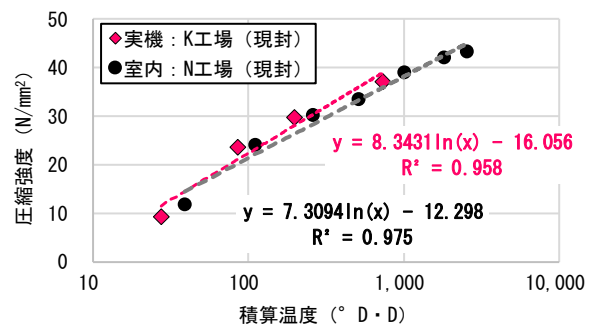


図-11 現場封かん供試体圧縮強度と積算温度の関係

違による回帰式の違いは見られなかった。事前に打設時期や調査毎に圧縮強度と積算温度の関係を求めておけば、積算温度によりせき板および支柱の取外し管理が可能と考えられる。

(3) 有効材齢を用いた圧縮強度の推定

有効材齢と圧縮強度の関係を図-12に示す。なお、推定式A~Dは「2.2 実験結果」で示した算出方法と同様である。強度推定式と現場封かん供試体の圧縮強度の関係は室内実験結果で示した図-4とほぼ同じであり、生コン工場の違いによる大きな差は見られなかった。

センサによって計測した温度を用いて告示式より圧縮強度を推定した結果を図-13に示す。現場封かん供試体と温度履歴が類似するスラブ表面や外気温を用いた強度推定値と現場封かん供試体強度を比べると初期材齢を除いてかなり安全側の評価となる。同じ温度履歴を用いて推定式Bにて圧縮強度を推定した結果を図-14に示す。スラブ表面や外気温を用いた強度推定値は、何れの材齢においても現場封かん供試体の強度より安全側であり図-13に示した告示式と比べ近い値を示した。

コンクリートの温度履歴を用いて告示式により圧縮強度を推定することで支柱の取外しの管理が安全に実施可能であると考えられる。また、推定式Bのように告示式の f_{c28} の値を見直した推定式を用いることで、精度の高い圧縮強度の推定が可能である。加えて、温度測定位置を目的に応じて適切に設定することで合理的なせき板および支柱の取外し管理が可能と考えられる。

4. せき板および支柱取外し管理の試行

実験よりセンサ(無線)のコンクリート温度の測定精度に問題がないことを確認した。また、実験により初期材齢から設計基準強度を保証する材齢に亘って積算温度および有効材齢と圧縮強度との関係に相関があることを確認した。既往の研究結果²⁾でも明らかにされているように調査や打設時期が同じであれば、積算温度および有効材齢と圧縮強度の関係を事前に求めることで精度良く圧縮強度の推定が可能であり、せき板および支柱の取外し管理に適用できると考えられる。

以上の検討結果を踏まえ、同建物の3階躯体のせき板および支柱の取外し管理に適用することとした。なお、実施工への適用に際しては事前に設計監理者および指定確認検査機関と協議して確認した。

4.1 事前検証

3階躯体は3工区割り施工で、全て同一配合同一工場の出荷であり、使用するコンクリート材料および調合が表-1、2と同じである。打設時期は2019年12月16,20,26日とほぼ同じ時期の施工条件である。ただし、実験とは実施時期や生コン工場が異なるため、改めて最

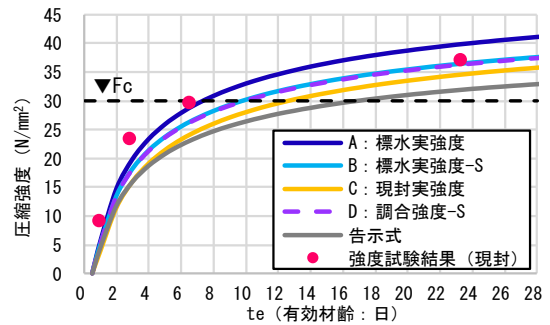


図-12 有効材齢と圧縮強度 (推定式と実強度)

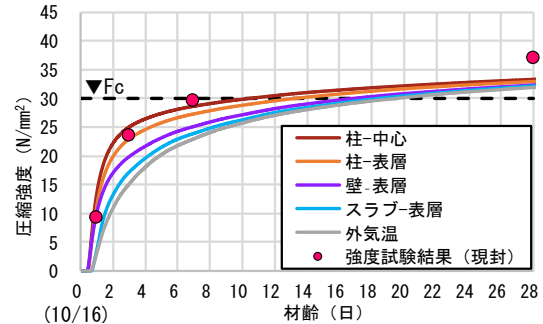


図-13 各測定温度による圧縮強度推定 (告示式)

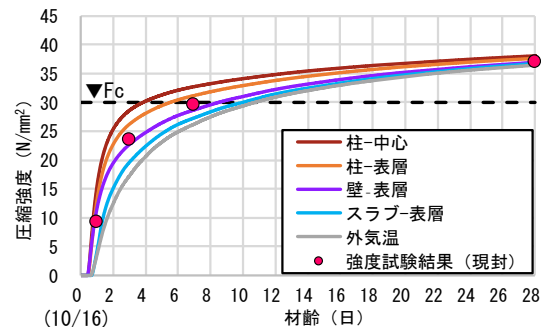


図-14 各測定温度による圧縮強度推定 (推定式B)

初に打設を行うa工区で積算温度および有効材齢と現場封かん供試体の圧縮強度の関係を検証した。なお、コンクリート温度の測定にはセンサ(無線)を用いた。供試体の強度試験による管理に対してコストメリットや利便性を持たせるためセンサの設置は1か所に限定した。今回、現場の施工条件で特に注目して評価すべき部材はないため、設置位置は全ての部材に対して安全側の評価となるスラブ表層とした。

コンクリート打設日に採取した現場封かん供試体の各材齢(1,3,7日)における圧縮強度と現場封かん供試体の積算温度との関係を2,3章の結果と併せて図-15に示す。室内実験と実機実験と同様に圧縮強度と積算温度に相関が認められたが、回帰式は異なる傾向を示した。このことから、季節ごとに定式化する必要があると言える。また、安全側に評価するには目標強度を割増して設定するか、式に安全率を乗じる必要があると考えられる。

告示式および推定式A~Dにおける有効材齢と圧縮強度の関係に、現場封かん供試体の強度試験結果をプロットしたものを図-16に示す。推定式A~Dは「2.2 実験

結果」で示した算出方法と同じであるが、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ を設計値である 6N/mm^2 、標準水中供試体の材齢28日圧縮強度を同一配合同一工場の実績の平均値を用いた。材齢1, 3日が推定式Bとほぼ同じ値であったのに対し、材齢7日の圧縮強度は推定式Bより高めの値となったが、安全側の評価である。

4.2 温度履歴に基づく強度判定

積算温度による強度推定では、事前検討による回帰式により精度の高い強度推定が可能と考えられるが、安全率をどのように定めるかの検討が不十分であったため、今回は有効材齢による強度推定式にて管理を行うこととした。事前検討より安全側かつ精度の高い推定が可能な推定式Bを採用して、3階b,c工区のせき板および支柱の取外し管理を実施した。現場ではスマートフォンのアプリにてセンサ(無線)からコンクリート温度の測定データを回収することでリアルタイムに圧縮強度の確認ができ、せき板および支柱の取外し時期の判定が可能であった。推定式Bを用いて圧縮強度の推定を行うことでb,c工区とも告示式による推定と比べ有効材齢で約5日、実材齢で約8日早く支柱の取外しが可能であった。

5. まとめ

簡易に設置可能な無線式センサを用い、温度履歴によりせき板および支柱の取外し管理に必要な圧縮強度推定がリアルタイムに精度良く実現できるか検討を行った。呼び強度33、普通ポルトランドセメントを使用した本実験条件によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 簡易に設置可能な無線式センサは、実構造部材のコンクリート打設環境においても全てのセンサで異常値を示すことなく測定できることを確認した。
- 2) 実構造物では方角や施工条件によりコンクリート温度に差が認められた。せき板の脱型時期など初期材齢の躯体表層強度を温度履歴から推定する場合には、一般部はスラブや外気温などを使用して安全側の評価を行うとよい。工程的にクリティカルな部材は、個別で温度測定を行えば、より合理的な管理ができると考えられる。
- 3) 初期材齢から設計基準強度を保証する材齢に亘って積算温度と現場封かん供試体の圧縮強度に相関が認められた。事前に打設時期や調合によって積算温度と圧縮強度の関係を求めておけば積算温度から圧縮強度を推定することが可能と考えられる。ただし、安全率の設定について検討が必要である。
- 4) コンクリートの温度履歴に基づく告示式により、支柱の取外しの管理が安全に実施可能であると考えられる。また、告示式に対し、 fc_{28} の値を事前検討など

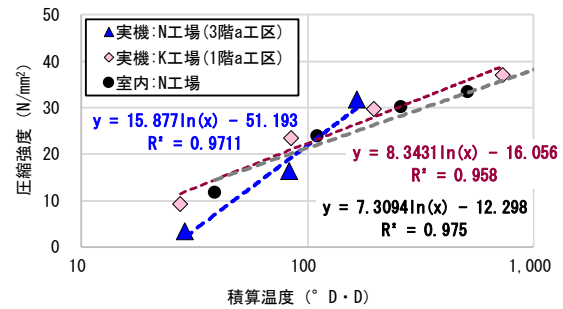


図-15 現場封かん供試体圧縮強度と積算温度の関係

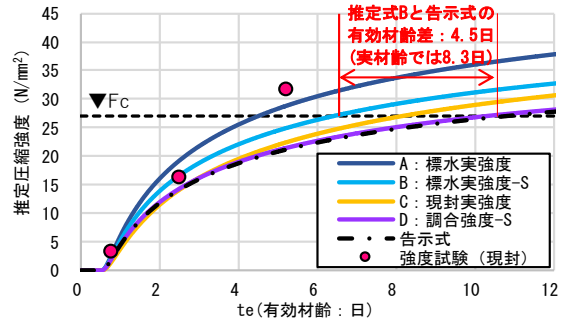


図-16 有効材齢と圧縮強度の関係 (3階a工区)

により適切に設定すれば、安全かつ告示式より精度の高い強度推定が可能と考えられる。

- 5) 事前検討で検証した温度履歴に基づく強度推定式を用いて、せき板および支柱の取外し管理を実施工に適用できた。リアルタイムかつ精度良く圧縮強度が推定でき、現場管理の合理化に有効である。

今後、各種調合や打設時期の温度履歴と圧縮強度の関係をデータとして収集すると同時に、測定部材の選定、センサ配置等の適切な定め方などのルール化を行い、汎用性のあるせき板および支柱の取外し管理システムを構築することが課題である。

参考文献

- 1) 松岡康友, 小島正朗, 松下哲郎, 小川亜希子: センサ技術を活用した建設現場におけるコンクリート品質管理手法の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1207-1208, 2019.9
- 2) 榊田佳寛, 中田善久, 大塚秀三, 野口貴文ほか: 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1~14), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.141-168, 2015.9
- 3) 山本秀之, 西島茂行, 野口貴文, 友寄篤: センサによる温度測定値に基づく加熱養生システムの開発, コンクリート工学年次論文集, vol. 41, No.1, pp.1349-1354, 2019.7
- 4) 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, 2018