

RFID タグにより取得したコンクリート温度を用いた強度推定の精度

維持管理工学研究室 古澤 大地

1. 背景と研究目的

温度センサ付き RFID (Radio Frequency Identification) タグ (以下、温度タグ) はコンクリート中に埋設することで養生中のコンクリートの温度をワイヤレスで計測でき、熱電対等を用いる従来手法よりも簡便な測温が可能である。温度タグを用いた測温技術は、脱型時期や初期凍害の判断などの養生温度によるコンクリートの施工管理を対象に、従来手法に替わる DX 関連技術としての活躍が期待できる。

また、温度タグにより取得した温度データを、タブレット用アプリにより読み出し、その材齢までの温度データから積算温度や有効材齢といった指標を算出し、複数の材齢における実測強度データ (3 点以上) との関係から、フィッティングにより強度推定式を求めることができる。その際、限られた材齢の実測強度データからフィッティングにより強度推定式を求めるため、実測した材齢から離れた材齢の強度推定については、推定精度が低下する傾向にある。

そこで、本研究では、最適な強度推定式を示すことができるよう、標準的な強度試験実施材齢と初期材齢の強度実測データから強度推定式を算出し、その式から推定される任意の材齢における圧縮強度の推定精度を確認することを目的とした。

2. 強度推定の方法

2.1 強度推定式の作成

一般的なコンクリートの強度推定式である建築基準法施工令第 76 条第 2 項の規定に基づく建築省告示第 110 号リにおける、せき板および支柱の取り外しの基準の一つである有効材齢を用いた強度推定方法 (以下、有効材齢方式) および、従来から実工事に利用されてきた積算温度を用いた強度推定方法²⁾ (以下、積算温度方式) によって強度を推定する。これらの方法では、あらかじめ測定した何点かの実測データにおける圧縮強度と有効材齢または積算温度との関係から、フィッティングにより定数を求めることにより、有効材齢または積算温度と強度の関係式を定め、これらの式を用いて任意の有効材齢または積算温度における強度を推定する。

本論文では、この強度推定式がどの程度の精度で強度を推定可能か確認するため、以下のパターンで強度推定式を作成した場合の、各材齢における圧縮強度の推定精度を確認する。

- ① 標準的な材齢における実測データからの推定
- ② 初期材齢における実測データからの推定

- ③ 20℃恒温環境における強度推定式から屋外養生のコンクリート強度推定

2.2 強度推定式の作成方法

有効材齢方式では、式 (1) および (2) を使って推定強度の計算を行った。

$$F_c = F_{c_{28d}} \times \left\{ s \times \left(1 - \sqrt{\frac{28}{X-0.5}} \right) \right\} \quad (1)$$

F_c : 推定強度 (N/mm²)、 $F_{c_{28d}}$: 推定強度の計算における定数 (N/mm²)、 s : 推定強度の計算における定数、 X : 有効材齢 (日)

$$X = \sum \exp \left(\alpha - \frac{\beta}{T_i - T_0} \right) \times (t_i - t_{i-1}) \quad (2)$$

α : 有効材齢の計算における定数、=13.65、 β : 有効材齢の計算における定数、=4,000 (°C)、 T_i : i 番目のデータの温度 (°C)、 T_0 : 有効材齢の計算における定数、= -273 (°C)、 t_i : i 番目のデータが記録された時刻 (日単位)

積算温度方式では、式 (3) および (4) を使って推定強度の計算を行った。

$$F_c = A \times \log_{10} X + B \quad (3)$$

F_c : 推定強度 (N/mm²)、 A 、 B : 定数 (N/mm²)、 X : 積算温度 (°C・d または °C・h)

$$X = \sum (T_i - T_0) \times (t_i - t_{i-1}) \quad (4)$$

T_i : i 番目のデータの温度 (°C)、 T_0 : 基準温度、= -10 (°C)、 t_i : i 番目のデータが記録された時刻 (日単位)

式 (1) では $F_{c_{28d}}$ および s 、式 (3) では A および B という定数があり、これらはコンクリートによって異なる。これら定数を、推定強度と実測強度の誤差の総和が最小となるよう求めた。ここでは、Microsoft Excel のソルバーを用い、「GRG 非線形」を使用した。

推定精度の検証のため、推定強度と実測強度の差分を実測強度で除した百分率を、実測強度に対する推定強度の誤差として検討に用いた。

$$\text{誤差率 (\%)} = \frac{\text{推定強度} - \text{実測強度}}{\text{実測強度}} \times 100 \quad (5)$$

3. 実験概要

3.1 温度タグの概要

使用した温度タグ (写真-1) は市販の物流分野向けタグであり、大きさは 86×54×1mm、温度計測範囲は -30℃~65℃で、記録可能点数は 4,800 点 (計測間隔 15 分の場合 50 日間の記録が可能) である。内部に 0.25℃単位での測温が可能なサーミスタと、時間を計測する RTC モジュール、測温結果を記録するメモリ、ロギング動作などを行うた

めの小型電池、RFID（UHF 帯）で無線通信を行うためのアンテナを内蔵する。

温度タグは、リーダライタと呼ばれる機器により制御され、一定間隔で温度を自動計測する。温度は自動でメモリに蓄積され、リーダライタによって任意のタイミングでまとめて読み取りを行う。

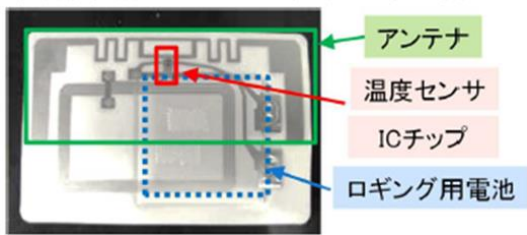


写真-1 温度タグ

3.2 養生の種類

a.20℃恒温、b.屋外養生の2種類の養生条件に置かれたコンクリートの圧縮強度と温度データを取得した。いずれも封緘養生とした。

3.3 コンクリート配合と圧縮試験の実施材齢

それぞれ表-1 に示す配合でφ10×20cmの試験体を作製した。試験体中央に温度タグを埋め込んだ温度計測用の試験体も別途、同様に作製し、強度試験用供試体と全く同一の環境に置いた。温度計測間隔を15分と30分の2種類とし、打設直前にロギングを開始した。圧縮強度試験は0.75, 1, 2, 3, 4, 7, 14, 21, 28, 56, 91dで実施した。なお、材齢2d以前の圧縮強度試験は石膏キャッピング、材齢3d以降は端面研磨により実施した。

表-1 コンクリート配合

養生条件	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				空気量
			W	C	S	G	
a	50	45	160	320	812	1015	5.5%
b							

3.4 温度データと圧縮強度

養生条件 b の供試体から温度タグによって取得したコンクリート温度を図-1 に示す。養生期間中におけるコンクリート温度は、4~36℃の間であった。養生条件 a については、養生温度とほぼ同じ20℃のままであった。また、圧縮強度の結果を図-2 に示す。圧縮強度はそれぞれの材齢で3本の供試体の平均値を使用した。

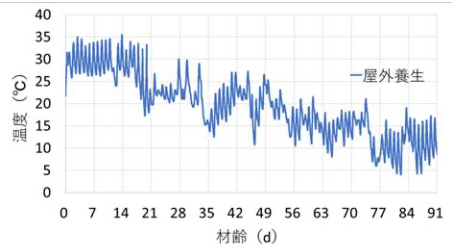


図-1 養生条件 b の供試体のコンクリート温度

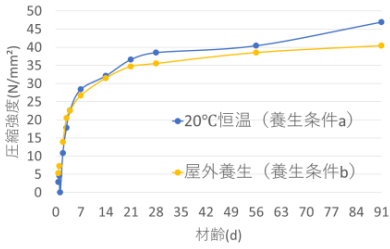


図-2 圧縮強度

4. 推定式による強度推定精度

4.1 推定式の算出

表-2 に、コンクリート強度の推定を行う際に必要となる式(1)中の定数 FC_{28d} および s 、および、式(3)中の定数 A および B 、を求めた結果をまとめて示す。なお、これら定数を算出する際には、1)標準的な材齢(7, 14, 28d。以下、「標準材齢」)、2)初期材齢(0.75, 1, 2d。以下、「初期材齢」)において取得した実測圧縮強度とコンクリート温度、の2通りのデータ群を用いて、それぞれ強度推定式を導いた。

表-2 強度推定式内の定数

養生条件	使用データ	有効材齢方式		積算温度方式	
		FC_{28d}	s	A	B
a 20℃	標準	+37.88	+0.29	+16.82	-11.18
	初期	+25.73	+0.27	+19.45	-24.07
b 屋外	標準	+33.58	+0.36	+15.33	-10.62
	初期	+27.27	+0.29	+20.20	-24.25

4.2 同じ養生条件のデータによる強度推定

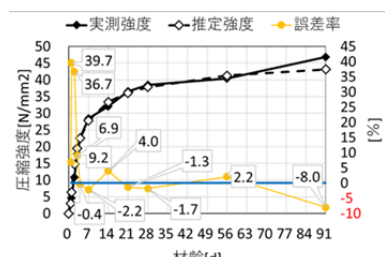
養生条件 a で、実測圧縮強度とコンクリート温度より強度推定式を求め、それにより算出した推定強度を実測強度と併せて図-3 に示す。

図-3 より標準的な材齢で取得したデータにより強度推定式を構築し、強度推定をした結果、初期材齢では推定式の種類により推定結果が大きく異なった。積算温度方式では、材齢初期に誤差率が顕著に大きくなり、最大で実測強度の+318.8% (+9.02N/mm²) と非常に大きい推定強度を示した。有効材齢方式でも材齢初期に誤差率が大きくなっ

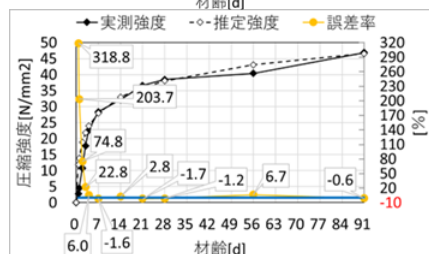
たが、積算温度方式よりは誤差率が小さかった。しかし、両方式とも材齢 4d 以降は誤差率が小さくなるため、脱型からある程度時間が経過した後の強度の推定には適していると考える。

また、初期材齢のデータにより強度推定をした場合、初期強度の推定誤差は減少し、両方式ともに全体的に安全側（推定強度＜実測強度）の推定が多かった。一方、材齢が進むにつれ誤差率が大きくなる傾向があるため、脱型からある程度時間が経過した後の強度の推定には適さないと考える。一方、実測圧縮強度 5.0N/mm^2 以上という、柱や壁などの型枠および支保工の取り外し判定³⁾に使用することを想定すると、実測強度が 5.0N/mm^2 を上回るのは材齢 2d に達した時点 (10.8N/mm^2) であり、この時点で初期材齢データを用いた両方式の推定強度も材齢 2d では 10.7N/mm^2 であった。したがって、初期材齢のデータによって強度推定式を構築しておくことによって、型枠および支保工の取り外し判定を概ね適切に実施できると考える。

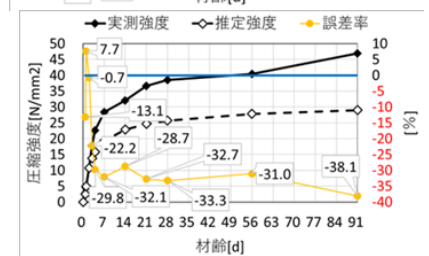
標準材齢
【有効】



標準材齢
【積算】



初期材齢
【有効】



初期材齢
【積算】

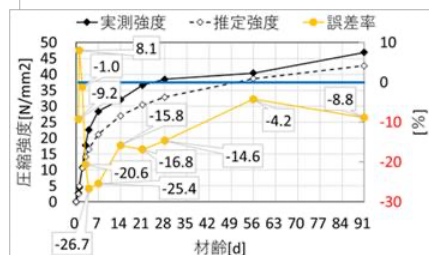
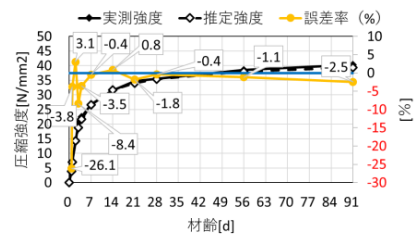


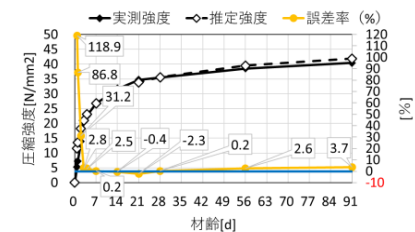
図-3 20℃恒温の強度推定結果

養生条件 b の結果も、養生条件 a と同様の傾向を示した。一部で危険側（推定強度＞実測強度）の強度推定結果となっている部分もあるが、その差は極めて小さい値に収まった。しかし、初期材齢のデータを用いて積算温度方式で強度推定をする場合のみ、材齢 28d 以降は、材齢が進むにつれ、危険側（推定強度＞実測強度）の推定となった。したがって、標準的な材齢に対する強度推定を実施する場合には、やはり標準材齢で取得したデータを用いるのが良い。

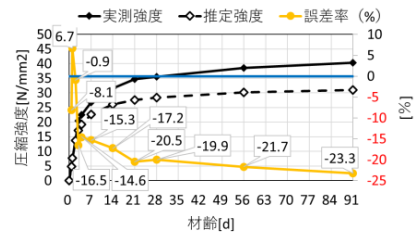
標準材齢
【有効】



標準材齢
【積算】



初期材齢
【有効】



初期材齢
【積算】

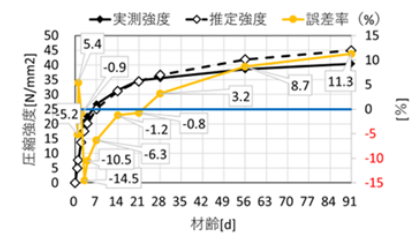


図-4 屋外養生の強度推定結果

4.3 20℃恒温データで構築した強度推定式の屋外養生の強度推定への適用

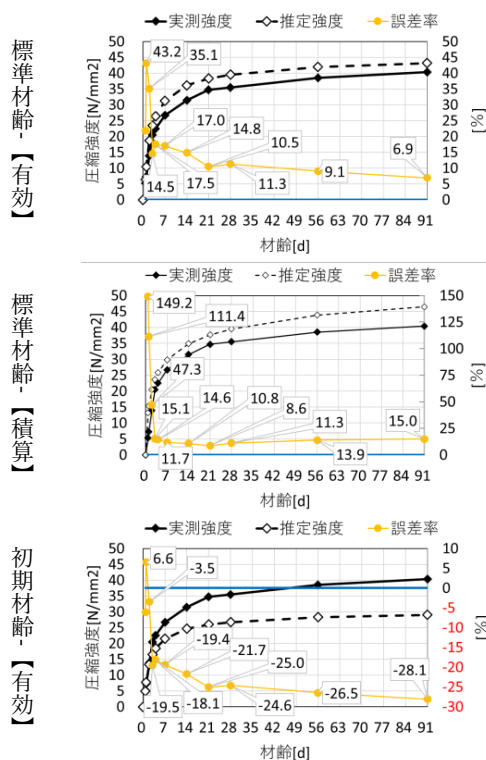
ここまで、各種環境において取得したデータを用いて、それぞれの環境における強度の推定式を構築し、その検証を行なった。一方、実構造物が置かれる環境は様々であるのに対し、そのコンクリートの強度発現を同じ環境にて事前にシミュレーションして強度推定式を構築しておくことは、非現実的である。そこで 20℃恒温環境の温度および実測強度データから導いた強度推定式を用いて、

屋外養生におけるコンクリートの強度を推定した。

養生条件 a の実測圧縮強度と温度データから強度推定式を算出し、得られた推定強度と屋外養生の実測強度を比べ誤差率を算出した結果を図-5 に示す。

図-4 と比べると、20℃恒温養生の標準材齢の実測強度を使用した強度推定では、初期材齢の強度、標準材齢の強度ともに、その推定精度が低下した。屋外養生の初期にはコンクリート温度が 25℃～35℃と比較的高かったが、図-2 にも示すように、一般に初期に温度が高いコンクリートは、その後の強度の伸びが小さい。ここで推定強度>実測強度となっているのは、そのことを反映していると考えられる。

一方、材齢 0.75d での実測強度は 5.29N/mm²であり、柱や壁などの型枠および支保工の取り外し判定の目安³⁾である 5.0N/mm²をこの時点で上回るが、初期材齢での実測データから構築した強度推定式を用いて推定した強度がこの値を上回るのは、有効材齢方式、積算温度方式のいずれによっても材齢 1d に達した時点（1d で有効材齢方式：7.76N/mm²、積算温度方式：6.66N/mm²）であり、若干安全側の推定となったが、ほぼ精度良く型枠取り外しの判定が可能であった。



初期材齢
【積算】

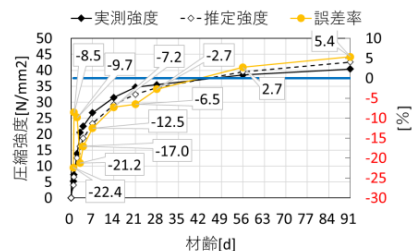


図-5 20℃恒温データから構築した強度推定式による屋外養生強度の推定

以上より、屋外養生、すなわち実環境下における強度は、20℃恒温養生を実施して標準的な材齢で実施した強度試験のデータを用いれば、構造物に温度タグを埋設して温度履歴による施工管理を行うことにより、概ね精度よく推定できる可能性がある。一方、強度をさらに精度よく推定するためには、ある程度温度を考慮した試験、例えば 5℃一定や 30℃一定など、により強度推定式を構築しておき、それらを適宜使い分ける必要もあると考えられる。今後、低温の屋外環境下での強度試験も実施して検証をする必要がある。

5. まとめ

温度タグをコンクリートに埋設することにより、コンクリート温度を取得し、コンクリート強度を推定することを試みた。本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 温度タグをコンクリート中に埋設して得られた温度データと標準材齢の実測強度を使用して強度推定を行うと、脱型から長期の材齢推定に適用可能である。
- 2) 温度タグにより計測した温度データと初期材齢の実測強度を使用し強度推定を行った結果、柱や壁などの型枠および支保工の取り外し判定（5.0N/mm²以上）を行える精度の強度推定が可能である。
- 3) ただし屋外環境における強度をさらに精度よく推定するためには、ある程度その環境を考慮した温度を用いて強度推定式を構築しておく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：建築基準法施工令第七十六条第二項の規定に基づく現場打コンクリートの型枠及び支柱の取りはずしに関する基準、国土交通省告示第五〇三号、2016
- 2) 友澤史紀、牛島栄：最近の積算温度方式の発展とその要用、セメント・コンクリート、No.527、p.66-74、1991.1
- 3) コンクリート標準示方書 [施工編]、2023