

# 構真柱用コンクリートの初期材齢圧縮強度の推定に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY OF EARLY AGE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USING TEMPORARY STEEL COLUMNS TO CAST-IN-PLACE CONCRETE PILE

右田 周平\*<sup>1</sup>, 梅本 宗宏\*<sup>1</sup>  
 Shuhei MIGITA and Munehiro UMEMOTO

In order to understand the compressive strength of concrete used for temporary steel columns to cast-in-place concrete piles at an early age, we used the cement manufactured by several manufacturers for Fc 42N/mm<sup>2</sup> concrete and the compressive strength test was performed from 12 hours to 24 hours after initial placement. The results are summarized by the accumulated temperature (T<sup>OT</sup>), and it was found that the early age compressive strength and the accumulated temperature have a uniform relationship regardless of the cement maker and the curing temperature. In addition, it is possible to estimate the initial age compressive strength of concrete using the integrated temperature (T<sup>OT</sup>), and to estimate with sufficient accuracy using strength management by changing the experimental constant. The method managing concrete strength using the accumulated temperature (T<sup>OT</sup>) was proposed.

**Keywords :** Compressive strength, Early age, Maturity, Strength estimation, Temporary steel column to cast-in-place concrete pile  
 圧縮強度, 初期材齢, 積算温度, 強度推定, 構真柱

### 1. はじめに

近年の建設工事では、生産性向上の観点から、コンクリート工事における施工速度の向上が求められており、コンクリートの打込みからせき板の取外し、部材の取付け等の一連の工事を所定の時間以内に行なうというタイムスケジュールが要求されることもある。その際、コンクリートの初期材齢圧縮強度が推定できれば、脱型時期や必要な圧縮耐力を得るのに要する材齢の決定等で合理的な計画や管理ができる。コンクリート強度については、型枠脱型後であれば非破壊や微破壊による推定が可能であるが、脱型前や、例えば構真柱用コンクリートのような地中にある構造物

については、直接推定することは困難であり、養生温度による管理が合理的である。コンクリート強度と養生温度の関係についてはこれまでに多くの研究がなされており、積算温度で概ね推定できるとされている<sup>(例えば1~4)</sup>。そこで本研究では、構真柱に用いる普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 42N/mm<sup>2</sup> のコンクリートについて、セメントメーカーや養生温度の違いを条件として、初期材齢の圧縮強度を測定し、更に、積算温度から架台の取り外しに必要な圧縮強度の推定を試みた。本報では、その実験結果と、初期材齢圧縮強度の推定方法、更に現場での強度管理方法の提案について報告する。

表 1 各工場の使用材料

工場名		A 工場	B 工場	C 工場	D 工場	E 工場
セメント	S	普通ポルトランドセメント A 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>	普通ポルトランドセメント B 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>	普通ポルトランドセメント C 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>	普通ポルトランドセメント D 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>	普通ポルトランドセメント E 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>
水	W	つくば市上水道水				
細骨材	S1	君津産陸砂 表乾密度 : 2.61 g/cm <sup>3</sup>	富津産陸砂 表乾密度 : 2.60 g/cm <sup>3</sup>	君津産陸砂 表乾密度 : 2.60 g/cm <sup>3</sup>	混合砂 表乾密度 : 2.64 g/cm <sup>3</sup> 富津産陸砂 (55%) 津久見産砕砂 (45%)	君津産陸砂 表乾密度 : 2.60 g/cm <sup>3</sup>
	S2	佐野産砕砂 表乾密度 : 2.63 g/cm <sup>3</sup>	八戸産砕砂 表乾密度 : 2.69 g/cm <sup>3</sup>	吾川産砕砂 表乾密度 : 2.66 g/cm <sup>3</sup>		佐野産砕砂 表乾密度 : 2.67 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	津久見産砕石 表乾密度 : 2.71 g/cm <sup>3</sup>	八戸産砕石 表乾密度 : 2.69 g/cm <sup>3</sup>	吾川産砕石 表乾密度 : 2.70 g/cm <sup>3</sup>	美称産砕石 表乾密度 : 2.70 g/cm <sup>3</sup>	峯産砕石 表乾密度 : 2.70 g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 標準形 A	高性能 AE 減水剤 標準形 A	高性能 AE 減水剤 標準形 A	高性能 AE 減水剤 標準形 B	高性能 AE 減水剤 標準形 A

\*1 戸田建設技術開発センター 修士 (工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

表2 コンクリートの品質目標値および調合

工場	品質目標			W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)			W	C	S1	S2	G1	SP
A	46	23	2.5	42.0	49.6	175	417	650	216	913	5.42
B	47	23	3.0	41.8	49.0	170	407	606	259	920	5.29
C	48	23	3.0	39.5	49.5	175	443	504	346	891	4.43
D	47	23	3.0	42.7	48.4	170	398	861		940	5.37
E	46	23	3.0	42.8	49.3	170	398	566	305	924	5.77

表3 圧縮強度試験条件

養生	経過時間 (h)						材齢(日)		試験方法
	12	14	16	18	20	24	7	28	
標準							○	○	JASS 5T-603 JASS 5T-606
封かん養生	○	○	○	○	○	○			
簡易断熱養生(A工場のみ)	○	○	○	○*					

\* : 10°Cのみ

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の要因と水準

実験は冬期および標準期を想定し、コンクリートの練混ぜおよび養生を、10°Cおよび20°Cの環境下の恒温室で実施した。各使用材料については、環境温度と同じになるように温度調整して使用した。また、セメントによるばらつきを想定し、製造者が異なる、5種類の普通ポルトランドセメントを使用した。

### 2.2 コンクリートの使用材料および調合

表1に各工場の使用材料を、表2に各工場の品質目標値および調合を示す。コンクリートは設計基準強度42N/mm<sup>2</sup>相当とし、実際に各工場が出荷しているコンクリートと同様のものとするため、調合の他、骨材や化学混和剤等の使用材料も含め、各工場が取得した大臣認定に従うこととした。

### 2.3 試験項目

表3に圧縮強度試験条件を、表4にフレッシュコンクリートの試験項目を示す。圧縮強度試験については、標準養生、封かん養生、簡易断熱養生供試体それぞれについて、所定の材齢毎に圧縮強度試験を実施した。簡易断熱養生には、発泡スチロール製の養生箱を使用した。供試体端面の仕上げは硫黄キャッピングとしたが、強度が十分出ていると判断されたものについては研磨仕上げとした。フレッシュコンクリートについては、練上がり直後にスランプ、スランプフロー、空気量、コンクリート温度の測定を行った。なお、経過時間の基点は注水時刻とし、簡易断熱養生についてはA工場でのみ実施した。

### 2.4 試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果および材齢7日、28日の圧縮強度試験結果を表5に、簡易断熱養生時の中心部コンクリート

表4 試験項目 (フレッシュコンクリート)

試験項目	試験方法
スランプ	JISA 1101
スランプフロー	JISA 1150
フロー時間 (50cm/停止)	
空気量	JISA 1128
コンクリート温度	JISA 1156

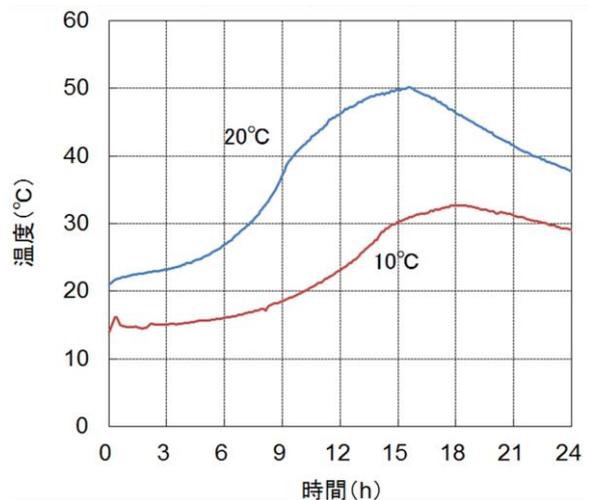


図1 簡易断熱養生の中心部温度履歴

温度の履歴を図1に、材齢24時間までの初期材齢での圧縮強度試験結果を図2に示す。フレッシュコンクリートの試験結果について、スランプは22.0~23.5cm、空気量は2.2~3.8%であり、と

表5 フレッシュコンクリートの試験結果および圧縮強度試験結果

環境温度	工場	スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
						7 日	28 日
20°C	A	22.0	39.2	3.3	21	47.4	58.2
	B	23.0	41.6	2.4	21	47.6	59.8
	C	23.0	41.6	2.6	21	50.8	64.0
	D	23.0	40.6	3.7	21	47.9	61.5
	E	22.5	40.4	3.0	21	50.3	63.5
10°C	A	23.5	41.3	2.7	14	50.0	64.9
	B	23.0	41.6	2.2	13	48.6	63.6
	C	23.5	44.6	3.7	12	48.8	62.3
	D	23.0	39.4	3.8	12	48.9	63.2
	E	23.0	39.9	2.6	11	51.5	65.6

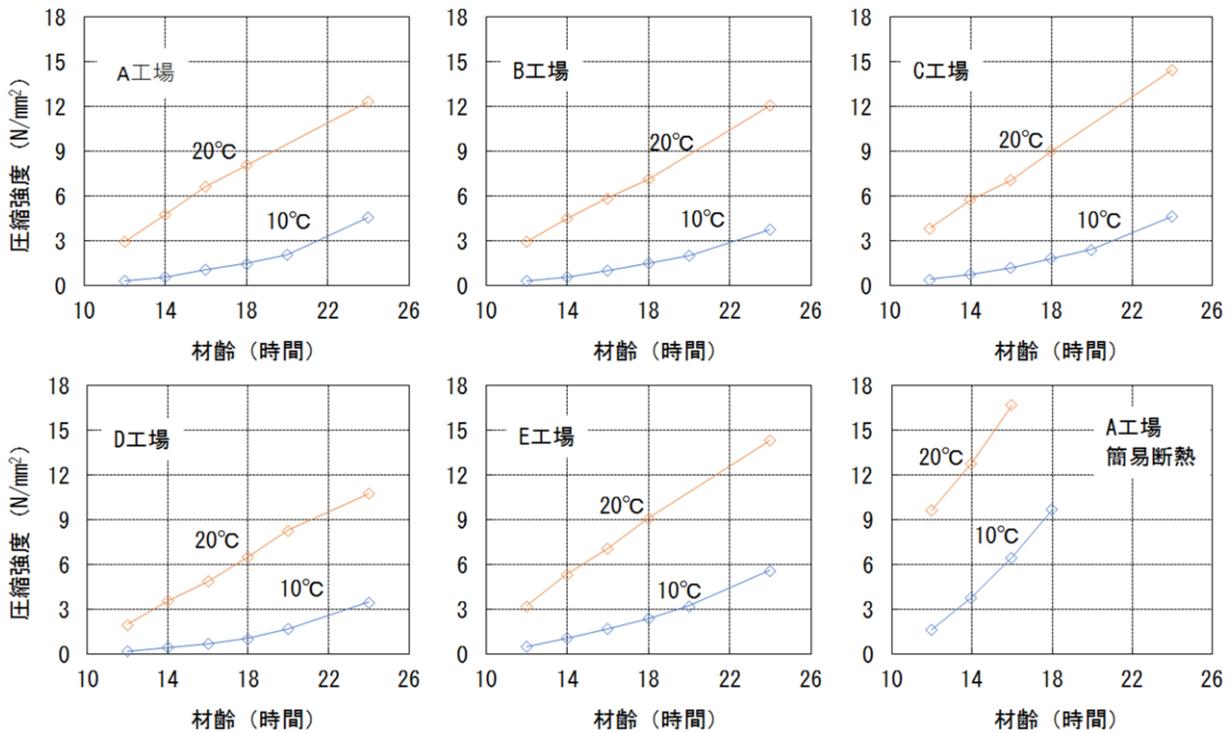


図2 初期材齢圧縮強度試験結果

もに目標値を満足する結果となった。また、練上りのコンクリート温度は、環境温度 20°C では 21°C、環境温度 10°C では 12°C 程度となった。なお、環境温度 10°C において、A 工場、B 工場のコンクリート温度が若干高くなっている。これは、実験を 20°C から 10°C という順番で行なったが、コンクリートミキサの温度が十分に冷える前に 10°C での実験を開始したためと考えられる。簡易断熱養生時の中心部コンクリート温度履歴について、環境温度 20°C では、材齢 15 時間 30 分で最高温度 50.1°C に達した。また、環境温度 10°C では、材齢 18 時間で最高温度 32.7°C であった。

各工場の初期材齢での圧縮強度について、環境温度 20°C では、材齢 12 時間で 2~3N/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 24 時間で 10~14N/mm<sup>2</sup> 程

度となった。環境温度 10°C では、材齢 12 時間で 0.2~0.5N/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 24 時間で 3~5N/mm<sup>2</sup> 程度となった。環境温度 20°C では、材齢 12 時間から 24 時間まで、ほぼ直線的に強度が増加しているのに対し、環境温度 10°C では、材齢 20 時間までは強度の増加が小さく、材齢 20 時間以降に強度の増加が大きくなる傾向となった。また、いずれの温度でも C、E 工場は比較的強度が高く、D 工場は強度が低くなる傾向となった。材齢 7 日、28 日の圧縮強度については、いずれの工場でも、材齢 7 日で 50N/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 28 日で 60N/mm<sup>2</sup> 程度であり、呼び強度と比較して十分な強度が発現していることが確認できた。また、初期材齢での結果と異

なり、環境温度 10℃の方が、環境温度 20℃よりも圧縮強度が高くなる傾向となった。

### 3. 初期材齢圧縮強度の推定

#### 3.1 積算温度 (T<sup>o</sup>T) の検討

コンクリートの圧縮強度について、積算温度から概ね推定できることが知られているが、特に笠井は、材齢 3~5 時間での極初期における圧縮強度も含め、積算温度 (T<sup>o</sup>T) を用いることで推定できるとしている<sup>1)</sup>。そこで、算温度 (T<sup>o</sup>T) と圧縮強度の関係について検討を行った。積算温度 (T<sup>o</sup>T) は、注水からの経過時間 (T) と仮想養生温度 (°T) の積であり、以下の式 (1) により表される。

$$T^oT = T \cdot (t + \alpha) \quad (1)$$

ここに、

T: 注水からの経過時間 (h)

t: コンクリートの平均養生温度 (°C)

α: 養生温度の仮想原点で、以下の式 (2) による。

$$\alpha = |t - 20| / m \quad (2)$$

m: 養生温度によって定まる定数で、以下による。

0°C < t < 20°C の場合、m=5

20°C ≤ t ≤ 40°C の場合、m=2

各工場の材齢 24 時間までの初期材齢における圧縮強度と積算温度の関係を図 3 に示す。なお、養生温度については、環境温度または簡易断熱養生での中心部コンクリート温度とした。各工場の圧縮強度と近似式を比較すると、寄与率は 0.92 と高い相関がある。また、工場毎の標準偏差は 0.5~1.0N/mm<sup>2</sup> 程度であり、セメントのばらつきや養生温度に関わらず、初期材齢圧縮強度と積算温度 (T<sup>o</sup>T) には一様な関係にあることが確認できた。

#### 3.2 積算温度 (T<sup>o</sup>T) を用いた推定式

積算温度 (T<sup>o</sup>T) を用いた初期材齢での圧縮強度推定式について、笠井は材齢 3 日での圧縮強度を基準として、以下の式 (3) を提案している。

$$F_C = 0.01 \cdot f_C \cdot F_{1440} \quad (3)$$

ここに、

F<sub>C</sub>: コンクリートの初期圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

F<sub>1440</sub>: 1440T<sup>o</sup>T (20°C 養生、材齢 3 日に相当) における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

f<sub>C</sub>: 初期圧縮強度百分率 (%) であり、以下の式 (4) による。

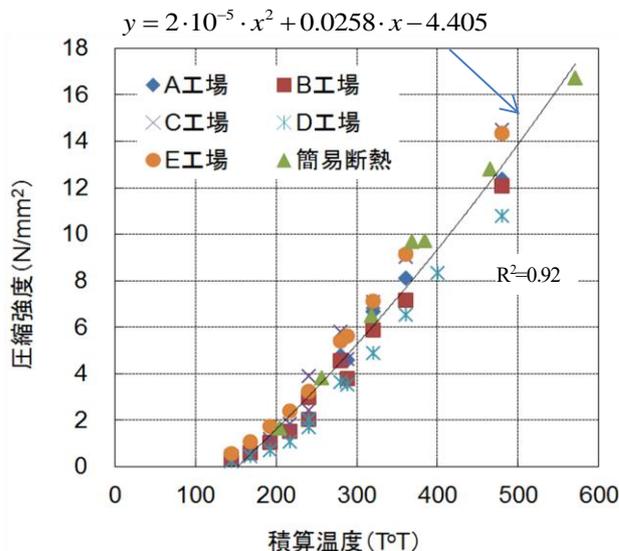


図 3 圧縮強度と積算温度 (T<sup>o</sup>T) の関係

$$f_C = a [T^oT]^n \quad (4)$$

a, n: 使用材料毎に異なる実験定数であり、普通ポルトランドセメントを使用した場合、笠井は以下のように定めている。

T<sup>o</sup>T ≤ 265 の場合、a=2.439 × 10<sup>-6</sup>, n=2.729

265 < T<sup>o</sup>T ≤ 720 の場合、a=1.254 × 10<sup>-3</sup>, n=1.611

720 < T<sup>o</sup>T ≤ 1440 の場合、a=6.960 × 10<sup>-2</sup>, n=1.000

式 (3) において、材齢 3 日での圧縮強度試験結果が必要であるが、本実験では実施していない。そこで、既往の実験結果<sup>5)</sup>を参考に、養生温度 20°C における材齢 7 日に対する材齢 3 日の圧縮強度の割合を 0.66 と仮定し、環境温度 20°C における各工場の材齢 7 日での圧縮強度の平均値 48.8N/mm<sup>2</sup> から、F<sub>1440</sub>=32.2N/mm<sup>2</sup> と定めて初期圧縮強度の推定を行なった。

各工場での初期圧縮強度試験結果と推定式の比較を図 4 に示す。本実験結果において、いずれの工場でも、250T<sup>o</sup>T 程度までは、推定式の方が若干強度が高くなる傾向にあるものの、試験結果と良く合っている。しかしながら、250T<sup>o</sup>T を超えてからは、試験結果と推定式に乖離が生じ始め、試験結果と比較して、推定式は強度が低くなる傾向となった。これは、昭和 40 年代の実験結果から定めた推定式を使用しているが、本実験では、当時使用していた AE 減水剤ではなく、高性能 AE 減水剤を使用したことや、その添加量が異なることが原因と考えられる。そこで、T<sup>o</sup>T ≤ 720 の範囲における実験定数 a, n について、現場での管理のため、圧縮強度試験結果と、出来るだけ安全側で合うように、以下のように修正し、再度比較を行った。

T<sup>o</sup>T ≤ 265 の場合、a=3.105 × 10<sup>-9</sup>, n=3.842

265 < T<sup>o</sup>T ≤ 720 の場合、a=6.210 × 10<sup>-5</sup>, n=2.149

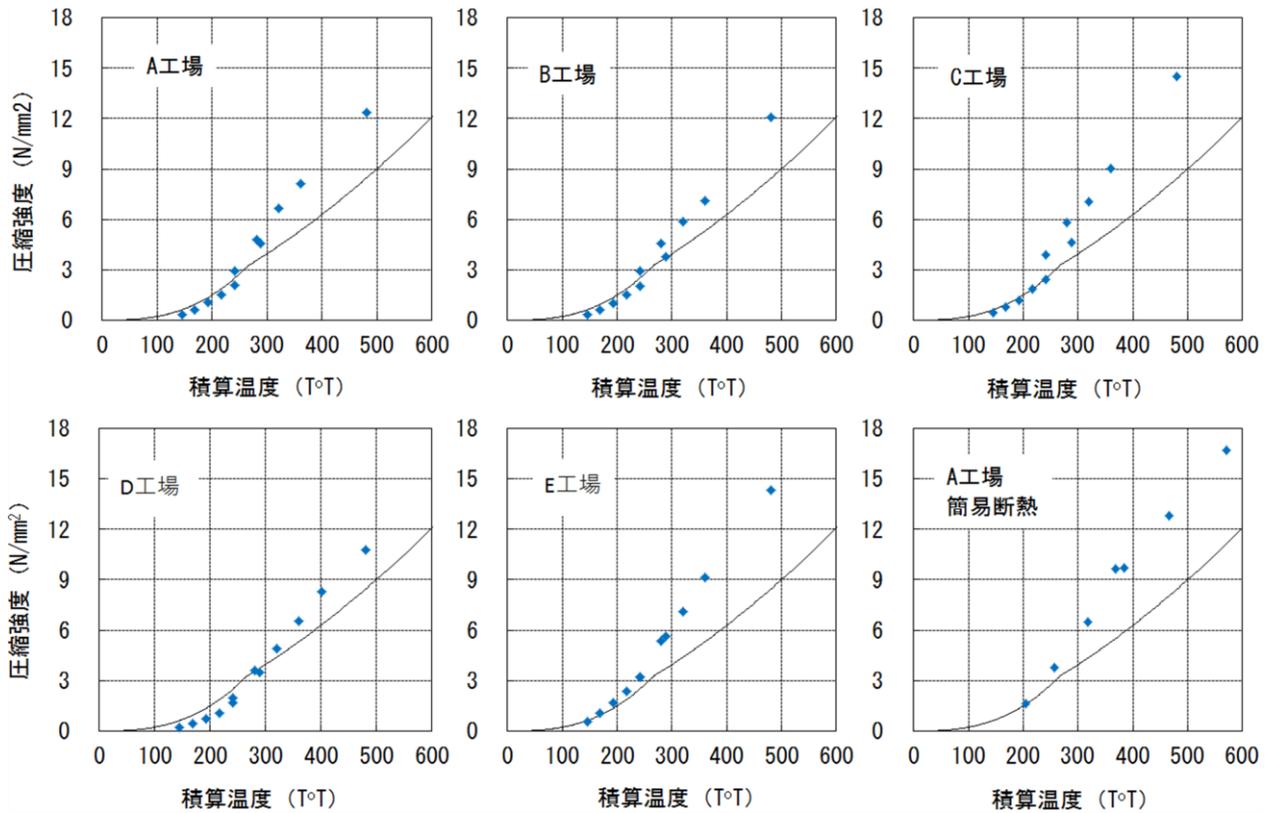


図4 若材齢圧縮強度試験結果と推定式の比較

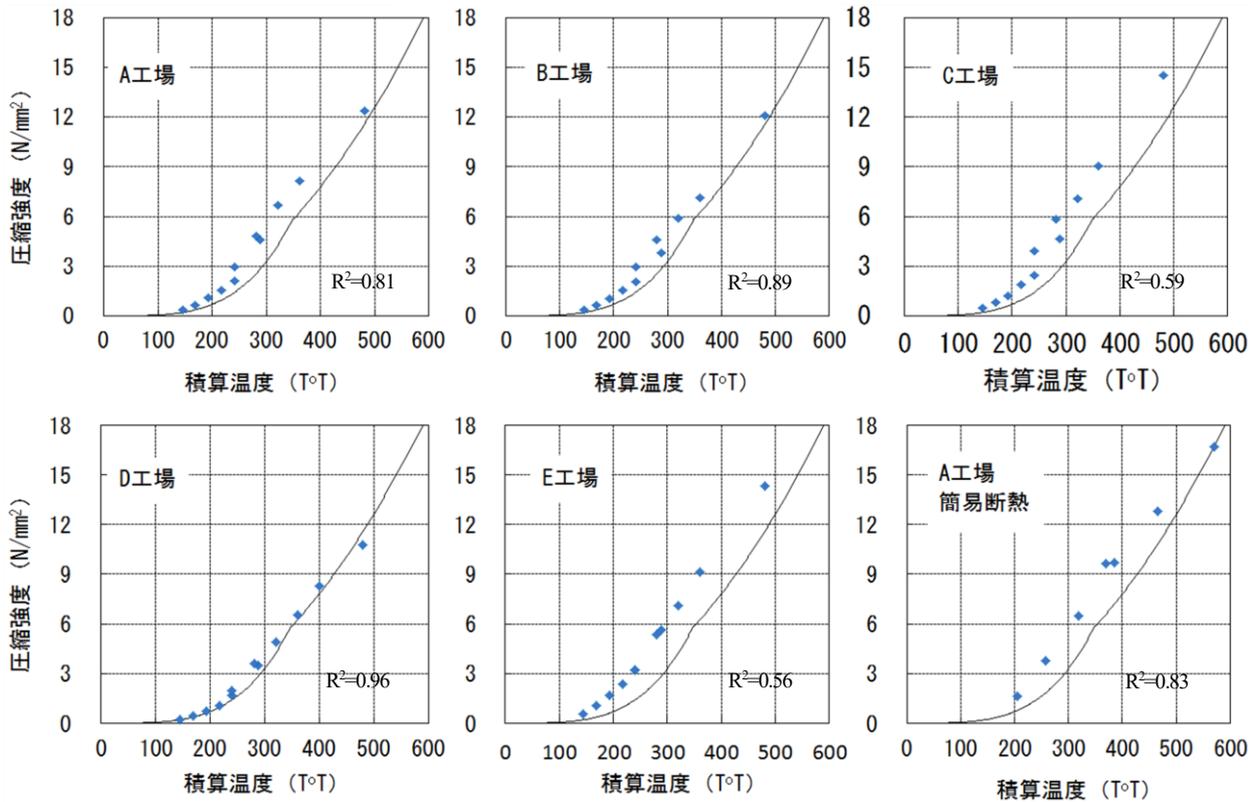


図5 若材齢圧縮強度試験結果と修正推定式の比較

若材齢圧縮強度試験結果と、実験定数を修正した修正推定式との比較を図5に示す。推定式が安全側となるように実験定数を修正しているため、比較的強度が高いC・E工場は、寄与率が0.6

以下と低いが、他工場は0.8以上となった。また、各工場の圧縮強度と推定式の差は最大でも3N/mm<sup>2</sup>程度、標準偏差は0.5~2.2N/mm<sup>2</sup>程度で、概ね試験結果と合っている。以上のことから、

現場管理において、同様の材料、調合であれば、一つの推定式で初期材齢圧縮強度を概ね評価できると考えられる。

#### 4. 強度管理方法の提案および管理結果

当社施工の建築工事現場にて、構真柱用コンクリートの強度について、積算温度 (T<sup>OT</sup>) による管理を行なった。本工事において、コンクリートに建込んだ構真柱の架台の取外すには、コンクリートの圧縮強度が 5N/mm<sup>2</sup>、積算温度で 357T<sup>OT</sup> が必要であった。そこで、構真柱先端に熱電対を取付け、コンクリート断面中心部の温度を測定し、積算温度から架台取外し時間を決めることとした。図 7 にコンクリート断面中心部の温度履歴および積算温度の一例を示す。また、表 7 に、その時に採取したコンクリート供試体 (20℃封かん養生) の初期材齢圧縮強度試験結果、積算温度、圧縮強度の推定値を示す。杭断面中心部の積算温度は、コンクリート打込み翌日の午前 9 時の時点 (材齢約 16 時間) で 540T<sup>OT</sup> を超えており、架台を取り外しても問題無いことが確認された。また、コンクリート供試体の圧縮強度は、材齢 16 時間 (320T<sup>OT</sup>) で 5.6N/mm<sup>2</sup>、材齢 20 時間 (400T<sup>OT</sup>) で 8.0N/mm<sup>2</sup> と、推定値と同等の強度が発現しており、コンクリートの初期材齢圧縮強度について、積算温度を用いることで十分管理できることが確認できた。

#### 5. まとめ

構真柱に用いる Fc42N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを対象とした、若材齢圧縮強度に関する本実験により得られた知見を以下に示す。

- (1) 簡易断熱養生した際の中心部コンクリート温度について、環境温度 20℃では、材齢 15 時間 30 分で、最高温度 50.1℃に、環境温度 10℃では、材齢 18 時間で、最高温度 32.7℃であった。
- (2) 若材齢での圧縮強度について、環境温度 20℃では、材齢 12 時間で 2~3N/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 24 時間で 10~14N/mm<sup>2</sup> 程度となった。また、環境温度 10℃では、材齢 12 時間で 0.2~0.5N/mm<sup>2</sup> 程度、材齢 24 時間で 3~5N/mm<sup>2</sup> 程度となった。
- (3) 若材齢での圧縮強度について、セメントのばらつきや養生温度に関わらず、積算温度 (T<sup>OT</sup>) と一様の関係を示すことが確認できた。
- (4) 笠井が提案した推定式について、250T<sup>OT</sup> 以降は実験結果と合っていないが、これは化学混和剤の種類やその添加量が異なるためと考えられる。
- (5) 実験定数を修正することによって、積算温度 (T<sup>OT</sup>) を用いることで、養生温度等に依らず、若材齢圧縮強度を評価できる。
- (6) 積算温度 (T<sup>OT</sup>) を用いて、養生温度からコンクリートの圧縮強度を管理する手法を提案した。

#### 参考文献

- 1) 笠井芳夫：コンクリートの初期圧縮強度推定方法，日本建築学会論文報告集，p1-10，141 号，1967.11

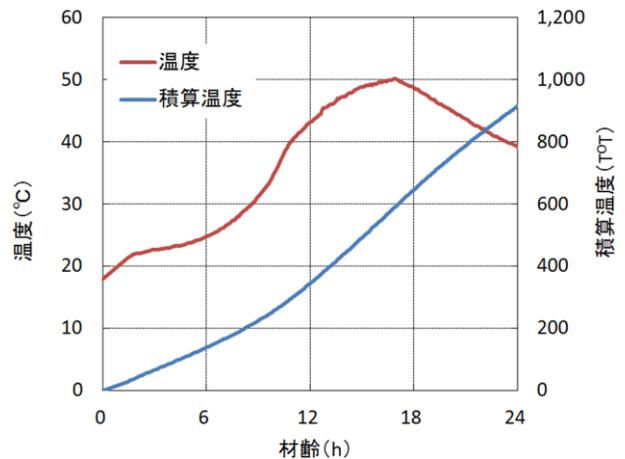


図 7 コンクリート中心部温度履歴および積算温度

表 7 初期材齢コンクリート圧縮強度

材齢 (h)	積算温度 (T <sup>OT</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		推定値	試験結果
16	320	4.2	5.6
20	400	7.8	8.0
23	460	10.5	10.2

- 2) 金武漢他：モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度発現に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，p1-6，355 号，1985.9
- 3) 洪悦郎他：ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案：日本建築学会構造系論文集，p1-7，367 号，1986.9
- 4) 鎌田英治他：各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状，セメントコンクリート論文集，p360-365，No.44，1990
- 5) 長井智哉他：コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究 (その 4 膨張剤と収縮低減剤を併用したコンクリートの膨張特性に及ぼす環境温度の影響)，日本建築学会学術講演梗概集 p839-840，2018.9