論文　構真柱に用いるコンクリートの初期材齢圧縮強度に関する実験的研究

右田　周平[*1]・梅本　宗宏[*1]

要旨：構真柱に用いるコンクリートの初期材齢における圧縮強度を把握するために，製造者が異なるセメントを使用した，5 つの生コン工場における Fc42N/mm^2 のコンクリートを対象として，材齢 12 時間から 24 時間までの圧縮強度試験を実施した。その結果を積算温度（T^{O}T）で整理したところ，初期材齢圧縮強度と積算温度は，セメントメーカーや養生温度に関わらず，一様な関係にあることが分かった。また，積算温度（T^{O}T）と笠井の式を用いて，初期材齢圧縮強度の推定を試み，実験定数を変更することで，強度管理において十分な精度で初期材齢圧縮強度を推定し，コンクリートの強度管理方法を提案した。

キーワード：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での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。コンクリート強度の推定については，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，直接コンクリートを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いるが，積算温度を用いることで概ね推定できるとされている[例えば 1~4)]。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^2 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。

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，コンクリートの練り混ぜおよび養生を，10℃および 20℃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^2 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

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^3	普通ポルトランドセメント B 密度：3.16 g/cm^3	普通ポルトランドセメント C 密度：3.16 g/cm^3	普通ポルトランドセメント D 密度：3.16 g/cm^3	普通ポルトランドセメント E 密度：3.16 g/cm^3
水	W	つくば市上水道水				
細骨材	S1	君津産陸砂 表乾密度：2.61g/cm^3	富津産陸砂 表乾密度：2.60g/cm^3	君津産陸砂 表乾密度：2.60g/cm^3	混合砂 表乾密度：2.64g/cm^3 富津産陸砂（55%） 津久見産砕砂（45%）	君津産陸砂 表乾密度：2.60g/cm^3
	S2	佐野産砕砂 表乾密度：2.63 g/ cm^3	八戸産砕砂 表乾密度：2.69 g/ cm^3	吾川産砕砂 表乾密度：2.66 g/ cm^3		佐野産砕砂 表乾密度：2.67 g/ cm^3
粗骨材	G	津久見産砕石 表乾密度：2.71 g/ cm^3	八戸産砕石 表乾密度：2.69 g/ cm^3	吾川産砕石 表乾密度：2.70 g/ cm^3	美称産砕石 表乾密度：2.70 g/ cm^3	峩朗産砕石 表乾密度：2.70 g/ cm^3
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（株）　技術開発センター　工修　(正会員)

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^3）					
	呼び強度 (N/mm^2)	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℃のみ

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，ともに目標値を満足する結果となった。また，練上がりのコンクリート温度は，環境温度 20℃では 21℃，環境温度 10℃では 12℃程度となった。なお，環境温度 10℃において，A 工場，B 工場のコンクリート温度が若干高

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	JIS A 1101
スランプフロー	JIS A 1150
フロー時間（50cm/停止）	
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156

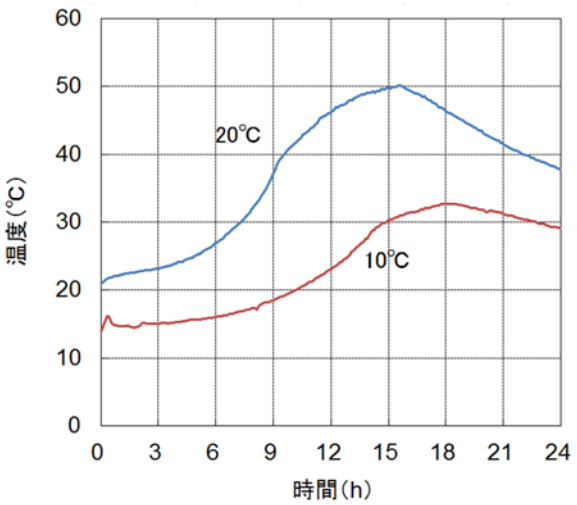

図-1　簡易断熱養生の中心部温度履歴

くなっている。これは，実験を 20℃から 10℃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℃での実験を開始したためと考えられる。簡易

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	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm^2)	
						7 日	28 日
20℃	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℃	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

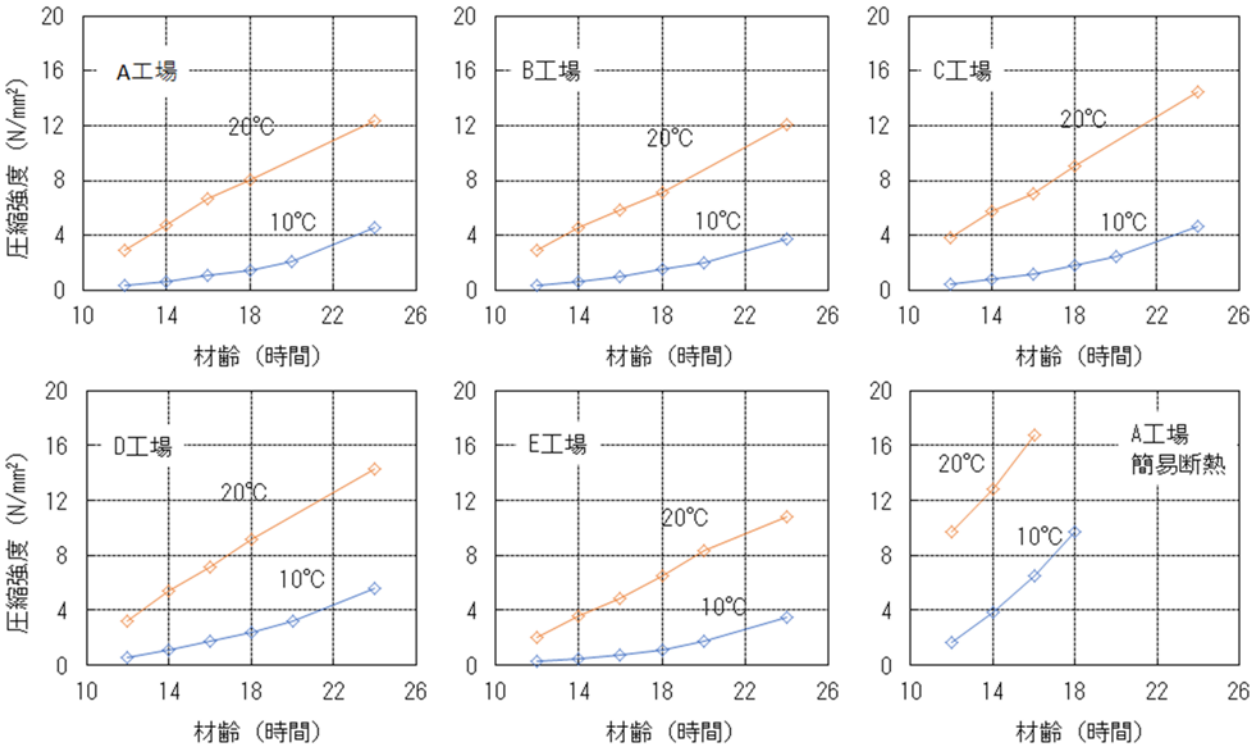

図-2　初期材齢圧縮強度試験結果

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℃では，材齢 15 時間 30 分で最高温度 50.1℃に達した。また，環境温度 10℃では，材齢 18 時間で最高温度 32.7℃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℃では，材齢 12 時間で 2～3N/mm^2 程度，材齢 24 時間で 10～14N/mm^2 程度となった。環境温度 10℃では，材齢 12 時間で 0.2～0.5N/mm^2 程度，材齢 24 時間で 3～5N/mm^2 程度となった。環境温度 20℃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℃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^2 程度，材齢 28 日で 60N/mm^2 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°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°T）を用いることで推定できるとしている [1]。そこで，算温度（T°T）と圧縮強度の関係について検討を行った。積算温度（T°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。

$$T^{o}T = T \cdot (t + \alpha) \qquad (1)$$

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（℃）

α：養生温度の仮想原点で，以下の式（2）による。

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

m：養生温度によって定まる定数で，以下による。

0℃＜t＜20℃の場合，m=5

20℃≦t≦40℃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^2 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°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°T）を用いた推定式

積算温度（T°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）[1]を提案している。

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

ここに，

F_C：コンクリートの初期圧縮強度（N/mm^2）

F_{1440}：1440T°T（20℃養生，材齢 3 日に相当）における圧縮強度（N/mm^2）

f_C：初期圧縮強度百分率（%）であり，以下の式（4）による。

$$f_C = a[T^{o}T]^n \qquad (4)$$

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°T≦265 の場合，a=2.439×10^{-6}，n=2.729

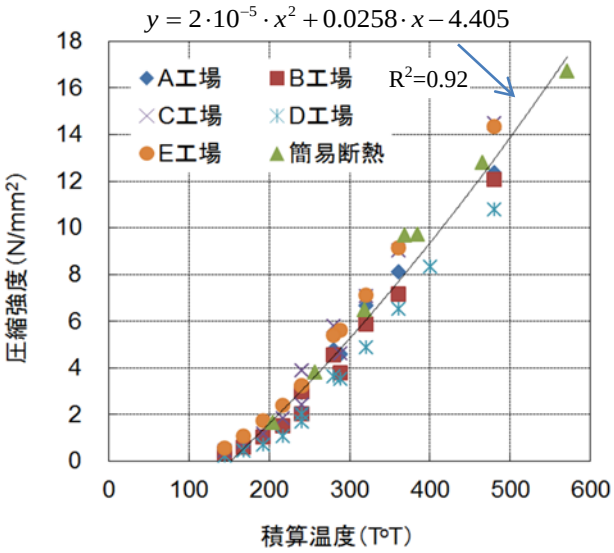

図-3　圧縮強度と積算温度（T°T）の関係

265＜T°T≦720 の場合，a=1.254×10^{-3}，n=1.611

720＜T°T≦1440 の場合，a=6.960×10^{-2}，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 [5]を参考に，養生温度 20℃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℃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^2 から，F_{1440}＝32.2N/mm^2 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°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°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°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°T≦265 の場合，a=3.105×10^{-9}，n=3.842

265＜T°T≦720 の場合，a=6.210×10^{-5}，n=2.149

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

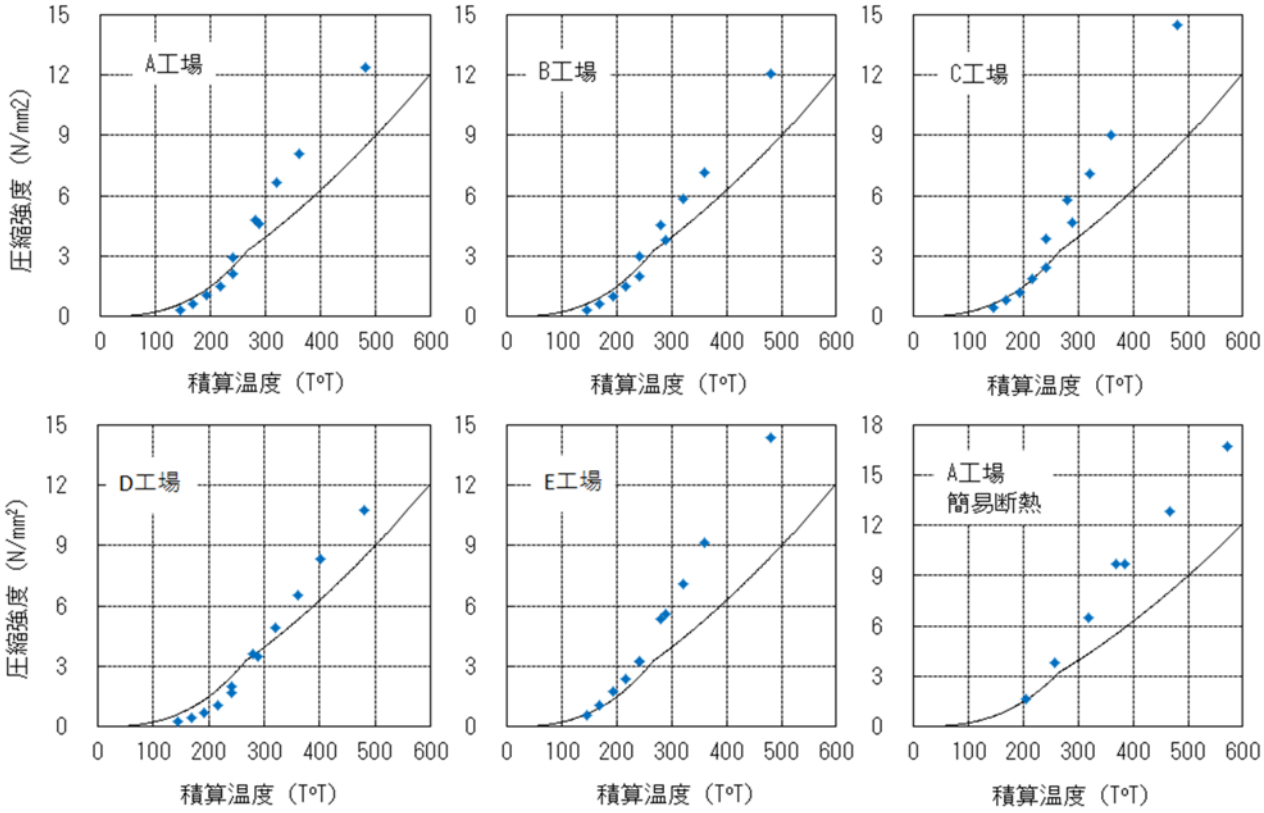

図-4　若材齢圧縮強度試験結果と推定式の比較

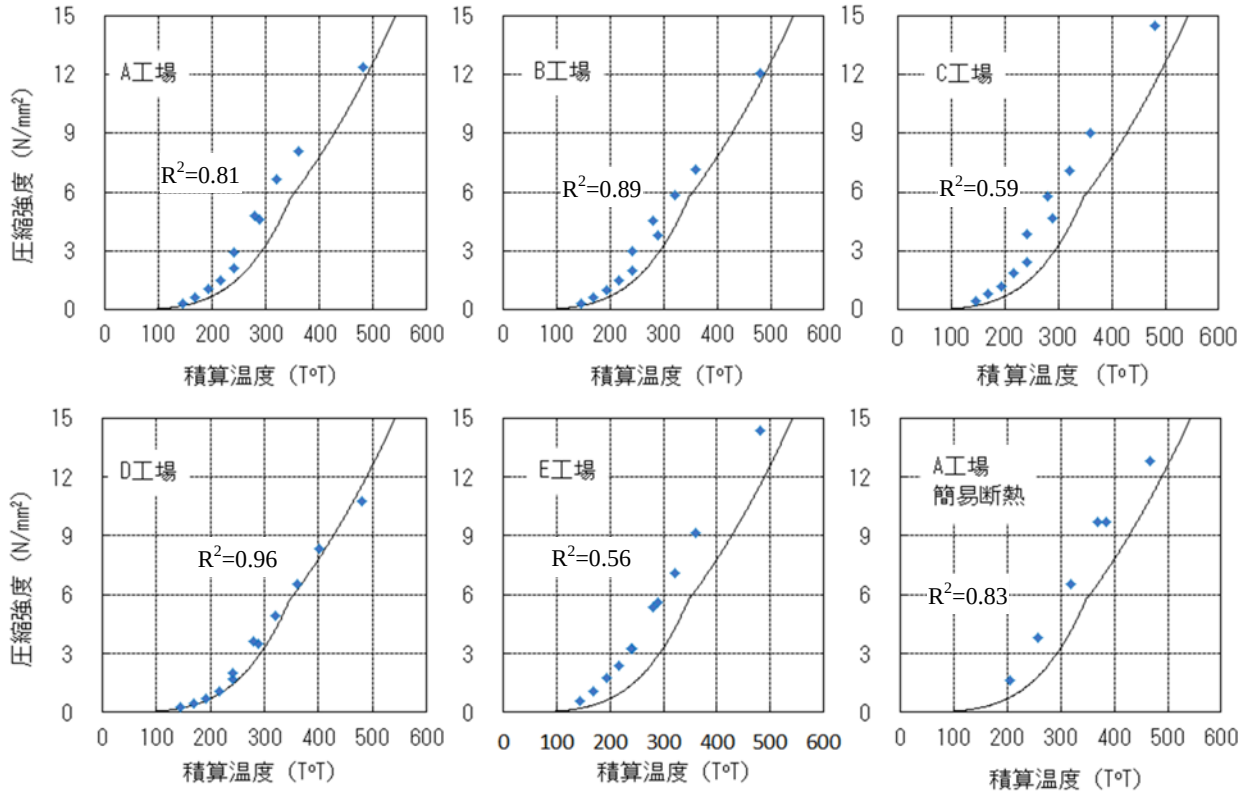

図-5　若材齢圧縮強度試験結果と修正推定式の比較

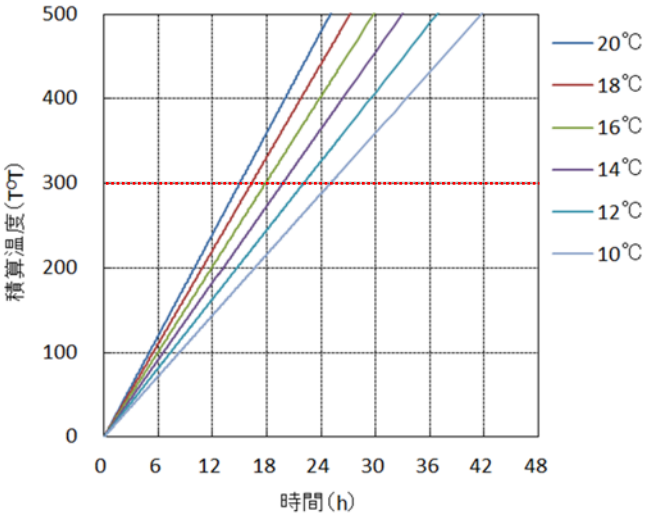

図-6　積算温度（T°T）と時間の関係

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^2 程度，標準偏差は 0.5～2.2N/mm^2 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. 初期材齢でのコンクリート強度管理方法の提案

これまでの実験から，積算温度（T°T）を用いることで，初期材齢でのコンクリート圧縮強度を安全側で推定できることが分かった。つまり，コンクリートの養生温度を管理することで，コンクリートの強度管理ができる。例えば，コンクリートの養生温度から，**図-6** に示すように，養生温度毎の積算温度（T°T）と時間の関係が得られる。仮に，工事で必要なコンクリート強度が 3N/mm^2 だったとすると，**図-5** の推定式を見ると，積算温度が約 300T°T 必要であることが分かる。そこで，**図-6** から，養生温度毎の，コンクリート強度が 3N/mm^2 に達するまの時間についてまとめた表（例えば**表-6**）をすぐに作成ることができる。このように，工事現場でコンクリートの強度管理を行なおうとする場合，必要な強度に達するまでの時間を，積算温度を用いることで，図やグラフ等から簡単に決めることができる。

5. まとめ

構真柱に用いる Fc42N/mm^2 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。

表-6　3N/mm^2 に達するまでの時間

養生温度（℃）	時間*
10	25 時間 10 分
12	22 時間 10 分
14	19 時間 50 分
16	18 時間 00 分
18	16 時間 20 分
20	15 時間 00 分

*：10 分単位で繰り上げ

(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^2 程度，材齢 24 時間で 10～14N/mm^2 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^2 程度，材齢 24 時間で 3～5N/mm^2 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°T）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°T 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°T）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°T）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

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