

初期に温度履歴を受けたコンクリートの 若材齢強度の評価手法に関する検討

Evaluation Methods of Concrete Strength Cured under High Temperature in Early Age

松田 拓 TAKU MATSUDA

西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

首都圏住宅建設事業部 蓮尾 孝一 KOICHI HASUO

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

建築躯体施工で採用されるシステム施工では、コンクリートの初期強度発現を適切に評価して品質管理を行い、施工サイクルを確保する必要がある。本報では、コンクリートの種々の養生温度条件下での初期強度発現を室内試験により検討し、その強度発現の評価手法を提案した。また、セメント組成化合物が強度発現に及ぼす影響に関して考察した。

キーワード：品質管理、強度発現、初期強度、積算温度

In modern building works undertaken with systematic construction methods, the evaluation of the initial strength development of concrete is important for securing the construction cycle.

The influence of curing temperature on the initial strength development of concrete was studied in laboratory tests. Following on from these tests, methods for evaluating the initial strength development of concrete cured under several heat conditions have been proposed in this paper. In addition, the influence of the cement composition on strength development is also discussed.

Key Words: Quality Control, Strength Development, Compressive Strength in Early Age, Maturity

1. はじめに

最近の建築躯体の施工は、大型型枠によるシステム化工法や、サイトPCa工法による部材製造等が取り入れられ、品質確保と施工速度の向上が図られている。こうした施工方法では、コンクリートの打設から脱型および部材の取付けまでのサイクルを、躯体の品質が確保される範囲で短縮し、かつ打設温度や気象条件によらず一定とすることが求められる。

初期のコンクリート必要強度を確保するためには、コンクリートの材料や調合および養生方法に関する事前検討が不可欠となる。対策のひとつとして、型枠を断熱しコンクリートの自己発熱による強度増進を期待する方法や加熱養生が採用されることもあり、コンクリートの初期強度発現に及ぼす養生温度条件の影響を適切に評価した品質管理手法が求められる。

様々な養生温度条件下でのコンクリートの初期強度発現の評価手法に関しては、これまでも多くの報告がなされているが¹⁾、初期のコンクリートの水和反応による自己発熱や加熱養生による温度履歴を受けたケースの評価に関する報告は少ない。

既報²⁾では、普通ポルトランドセメントを中心とした室内試験により、初期の温度履歴を模擬した養生温度条件

が、コンクリートの初期強度発現に及ぼす影響を検討し、積算温度方式によるコンクリートの初期強度発現の評価手法を検討した。

本報では、既報の結果に低熱系セメントによるコンクリートでの実験結果を追加し、①種々のコンクリートの一定養生温度条件下での初期強度発現の積算温度方式による評価手法を提案し、さらに、②初期に温度履歴を受けた場合の同手法の適用性を検討した。また、セメント種類ごとの初期強度発現特性に関して、セメントの組成化合物の比率に着目し考察した。

2. 実験方法

表-1～表-4に、実験の要因と水準、使用材料、セメントの組成化合物の比率およびコンクリート調合を示す。調合は普通ポルトランドセメント(以下、Nセメント)でW/C=25, 30, 35, 40, 45, 50%の6種類、中庸熱ポルトランドセメント(以下、Mセメント)および低熱ポルトランドセメント(以下、Lセメント)で30, 40, 50%の3種類の計12調合とした。

コンクリートの練り混ぜは、容量50lのパン型強制練りミキサを用い、各調合、養生条件別にバッチを分け、1バッチの練り混ぜ量は、40～50lとした。練り混ぜ時間は、W/C=45, 50%ではコンクリート練り60秒、その他の調合ではモ

表-1 実験の要因と水準

セメント	W/C (%)	養生温度条件					
		一定温度			#10PCa模擬		
		10℃	20℃	30℃	A	B	C
N	25	○	○		○	○	○
	30	○	○		○	○	○
	35	○	○	○	○	○	○
	40	○	○	○	○	○	○
	45	○	○	○	○	○	○
L	30	○	○		○	○	○
	40	○	○		○	○	○
	50	○	○		○	○	○
M	30	○	○		○	○	○
	40	○	○		○	○	○
	50	○	○		○	○	○

表-3 セメント組成化合物の比率

セメント	(質量比:%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通	55	19	10	9
中庸熱	42	37	3	10
低熱	28	53	2	10

ルタル練り30~60秒+コンクリート練り60~180秒とした。コンクリートの練り混ぜ後フレッシュコンクリートの性状を測定し、圧縮試験用供試体(φ100×200mm)を採取した。

コンクリートの養生温度条件は、表-1に示す6種類である。一定温度条件による養生は10,20,30℃一定温度の3条件とした。初期の温度履歴は、現場でのPCa製造を想定し、以下のようにモデル化した。

- A: 冬期施工時の加熱養生
- B: 冬期施工時の自然養生(自己発熱)
- C: 標準期施工時の普通コンクリートの加熱養生, もしくは高強度コンクリートの自然養生(自己発熱)

図-1に各養生温度条件の養生温度履歴を示す。

すべてのコンクリート供試体は、各養生温度条件に制御された養生槽内にて封かん状態で養生し、材齢72時間以降は、20℃一定温度条件で封かん養生した。コンクリートの温度履歴は、別途作製した圧縮試験用と同一の供試体の中心に設置した熱電対により測定した。圧縮強度の試験材齢は、10℃および30℃一定温度養生条件で18, 24, 48, 72時間の4材齢, 20℃一定温度養生で18, 24, 48, 72時間, 7, 28日の6材齢, 初期温度履歴を受ける養生条件で18, 42, 72時間, 7, 28日の5材齢である。また各バッチ間の相違を確認するために、標準養生供試体による圧縮強度試験(材齢7, 28日)を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 圧縮強度

各コンクリートの標準養生圧縮強度試験結果を表-5に示す。同一調合でバッチ間に若干の差が見られるのは、練り上がりコンクリート温度や空気量等の影響と考えられる。コンクリート種類ごとの、養生温度条件別の材齢と、封かん養生供試体の圧縮強度および標準養生供試体の圧縮強度の関係を図-2に示す。圧縮強度はそれぞれ供試体3体(一部2体)の平均値である。材齢は注水時刻を起点とした。各コンク

表-2 使用材料

材料	記号	種類	品質
セメント	N	普通ポルトランド	密度:3.15g/cm ³ , 比表面積3310cm ² /g
	L	低熱ポルトランド	密度:3.24g/cm ³ , 比表面積3350cm ² /g
	M	中庸熱ポルトランド	密度:3.21g/cm ³ , 比表面積3260cm ² /g
細骨材	S	鬼怒川産 川砂	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:2.09%, FM:2.47
粗骨材	G	葛生町産 碎石	表乾密度:2.67g/cm ³ , 吸水率:0.97%, FM:6.47
混和剤	Ad ₁	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
	Ad _{2,3}	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表-4 コンクリート調合

調合記号	セメント	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 Ad ₁ , Ad ₂ , Ad ₃ * (C×%)
				W	C	S	G	
N25	N	25.0	45.0	170	680	684	858	1.20~1.30
N30	N	30.0	48.2	170	567	777	858	1.45~1.70
N35	N	35.0	49.5	175	500	819	858	1.00~1.85
N40	N	40.0	47.2	175	438	780	897	0.75~1.25
N45	N	45.0	48.4	175	389	820	897	0.65~0.85
N50	N	50.0	43.8	180	360	747	983	0.31~0.50
L30	L	30.0	48.6	170	567	790	858	1.15~1.40
L40	L	40.0	47.5	175	437.5	790	897	0.80
L50	L	50.0	49.0	180	360	839	897	0.19
M30	M	30.0	48.5	170	567	786	858	1.20~1.60
M40	M	40.0	47.4	175	437.5	787	897	0.8
M50	M	50.0	44.0	180	360	753	983	0.25~0.31

*:Ad₁はN50、Ad₃はN25、Ad₂はその他の調合に使用。

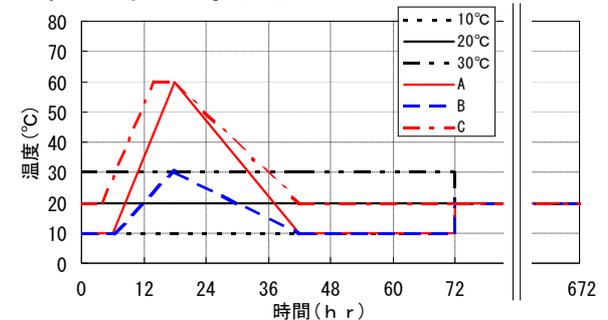


図-1 養生温度履歴

リートとも養生温度条件によって強度発現性状が異なり、特に初期材齢での養生温度条件の影響が顕著である。同一調合でバッチ間の標準養生強度に若干の差が見られるのは、練り上がりコンクリート温度や空気量等の影響と考えられる。N50~30のシリーズで、材齢28日時点における養生温度条件Cの強度が、他の養生温度条件の強度と比較して低くなる傾向にあった。

(2) 一定養生温度条件での圧縮強度発現特性の評価

図-3は、一定養生温度条件の試験シリーズに関して、積算温度(M)と標準養生7日に対する圧縮強度比(σ_{RT})の関係を示している。Mは、式(1)により求めた。Mの起点時刻は、凝結始発時刻とする報告³⁾もあるが、初期に温度履歴を受けるケースの凝結時間の評価の点で、実施工の品質管理での実用性を考慮し、注水時刻とした。また、温度の起点は既報¹⁾と同様に0℃とした。

$$M = \Sigma (\theta \cdot T) \quad (1)$$

ここに、M:積算温度(℃・Hr), T:時間(Hr), θ :コンクリート温度(℃),

σ_{RT} は、レディミクストコンクリート工場で品質管理として一般的に用いられている標準養生材齢7日を基準として式(2)より求めた。

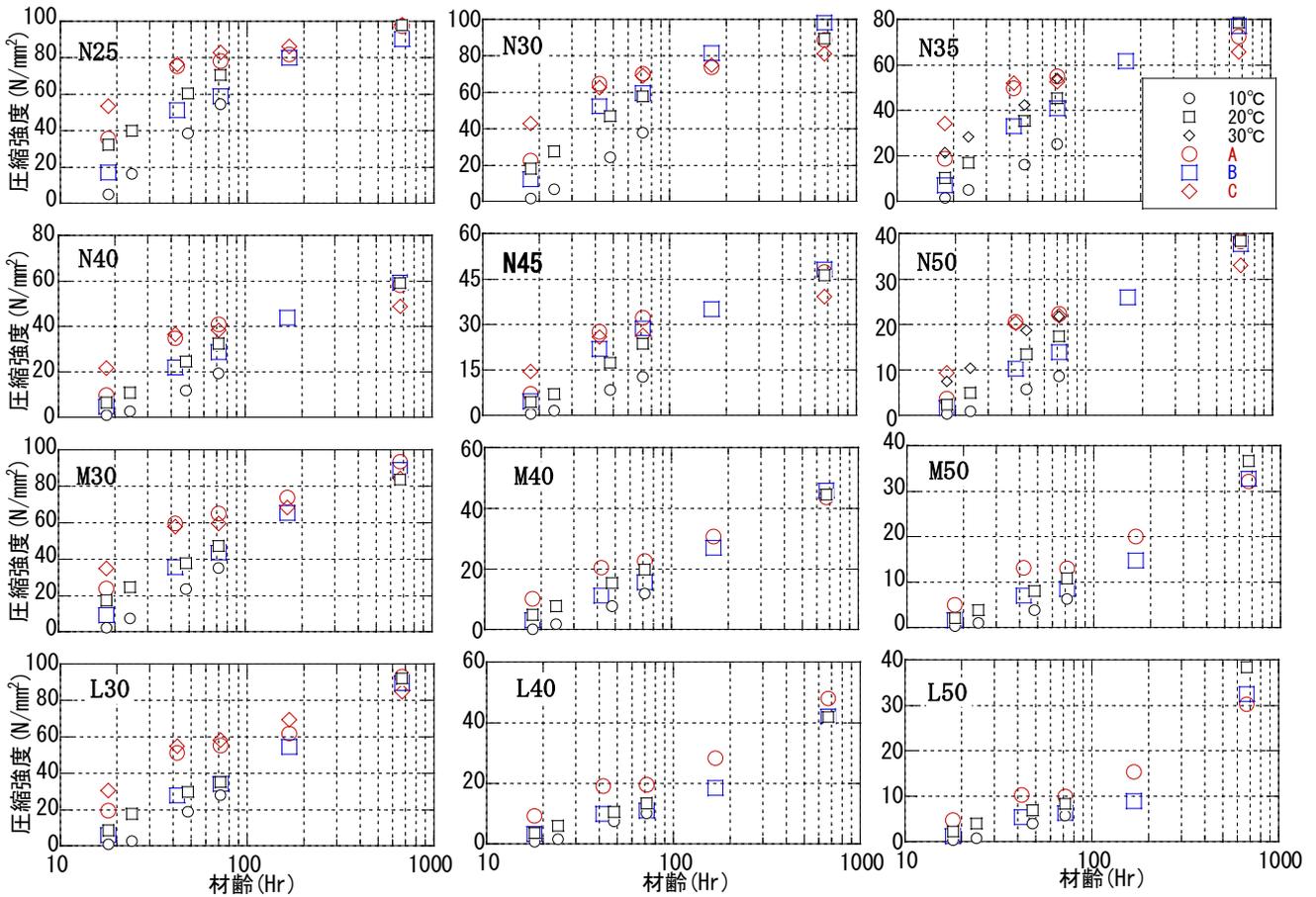


図-2 養生条件, 材齢と封かん養生圧縮強度の関係

$$\sigma_{RT} = (\sigma / \sigma_7) \times 100 \quad (2)$$

ここに、 σ_{RT} :圧縮強度比(%), σ :各材齢で測定した圧縮強度(N/mm²), σ_7 :同バッチの標準養生7日強度(N/mm²)

図中の曲線は、Mと σ_{RT} の関係を式(3)に示すグローバル関数⁹⁾で回帰したものである。ただし係数cについては、後述するように強度発生積算温度に相当するため、各試験ケースの3,360°C・Hr(20°C, 材齢7日)以下の初期材齢のデータを式(3)により回帰して求め、その他の係数については、前述より求めた係数c, および全データより回帰し求めている。

$$\sigma_{RT} = (M-c) / \{a+b \cdot (M-c)\} \quad (3)$$

ここにa, b, c:回帰曲線における係数

それぞれの回帰で求められた曲線式の係数および相関係数を表-6に示す。いずれのコンクリートに関しても、Mと σ_{RT} には高い相関関係が見られた。

式(3)の係数aの逆数は、強度増進速度を表し、係数bの逆数は材齢7日以降の強度増進を表す。係数cは、強度が発生するMに相当する。図-4は、係数a, b, cとW/Cの関係を示したものである。係数aとbに関しては、セメントごとに傾向が異なるものの、W/Cと強い相関があり、それぞれ式(4)~式(9)で表された。

Nセメント:

$$a = 0.30032 \cdot (W/C) - 2.0836 \quad (R=0.982) \quad (4)$$

$$b = -9.7922 \times 10^{-5} \cdot (W/C) + 0.011442 \quad (R=0.966) \quad (5)$$

表-5 標準養生供試体の圧縮強度試験結果

単位: N/mm²

養生温度条件	調査記号	圧縮強度		調査記号	圧縮強度		調査記号	圧縮強度				
		7day	28day		7day	28day		7day	28day			
10°C	N25	89.0	108	N40	49.3	66.5	M30	69.8	97.5	L30	55.6	97.6
		87.7	104		49.4	65.1		65.7	94.9		54.2	99.8
		-	-		44.6	61.7		-	-		-	-
		A	86.0		105	51.0		64.8	72.7		107	58.6
20°C	N30	83.2	98.4	N45	52.1	65.9	M40	71.7	93.8	L40	60.0	89.5
		89.3	97.2		48.4	63.6		63.7	90.0		58.2	95.3
		73.4	90.9		40.5	55.0		27.3	50.2		19.2	47.6
		78.0	97.7		33.4	49.2		28.3	50.5		18.2	45.9
30°C	N50	-	-	M50	36.6	50.8	L50	-	-	-	-	
		A	82.9		101	42.0		57.7	24.7	47.5	18.9	49.9
		B	85.0		97.7	40.9		56.9	27.3	49.9	17.7	43.5
		C	80.9		94.9	35.9		51.6	-	-	-	-
10°C	N35	59.8	78.3	N50	23.2	36.8	M50	14.1	31.4	L50	10.0	31.3
		64.0	85.7		27.9	44.3		15.7	35.7		11.4	36.8
		64.3	83.5		29.8	45.2		-	-		-	-
		A	67.5		82.7	31.1		45.6	12.3		29.8	8.28
20°C	N40	68.6	86.6	M50	29.7	41.4	L50	13.0	28.9	L50	8.56	26.8
		67.4	88.2		30.3	42.5		-	-		-	-

Mセメント:

$$a = 0.24300 \cdot (W/C) + 1.2148 \quad (R=0.998) \quad (6)$$

$$b = -0.00016619 \cdot (W/C) + 0.01178 \quad (R=0.979) \quad (7)$$

Lセメント:

$$a = 0.09701 \cdot (W/C) + 6.7499 \quad (R=0.999) \quad (8)$$

$$b = -0.00018561 \cdot (W/C) + 0.011264 \quad (R=0.992) \quad (9)$$

いずれのセメントを使用したコンクリートも、W/Cが大きくなると強度の増進速度が小さくなり、材齢7日以降の強

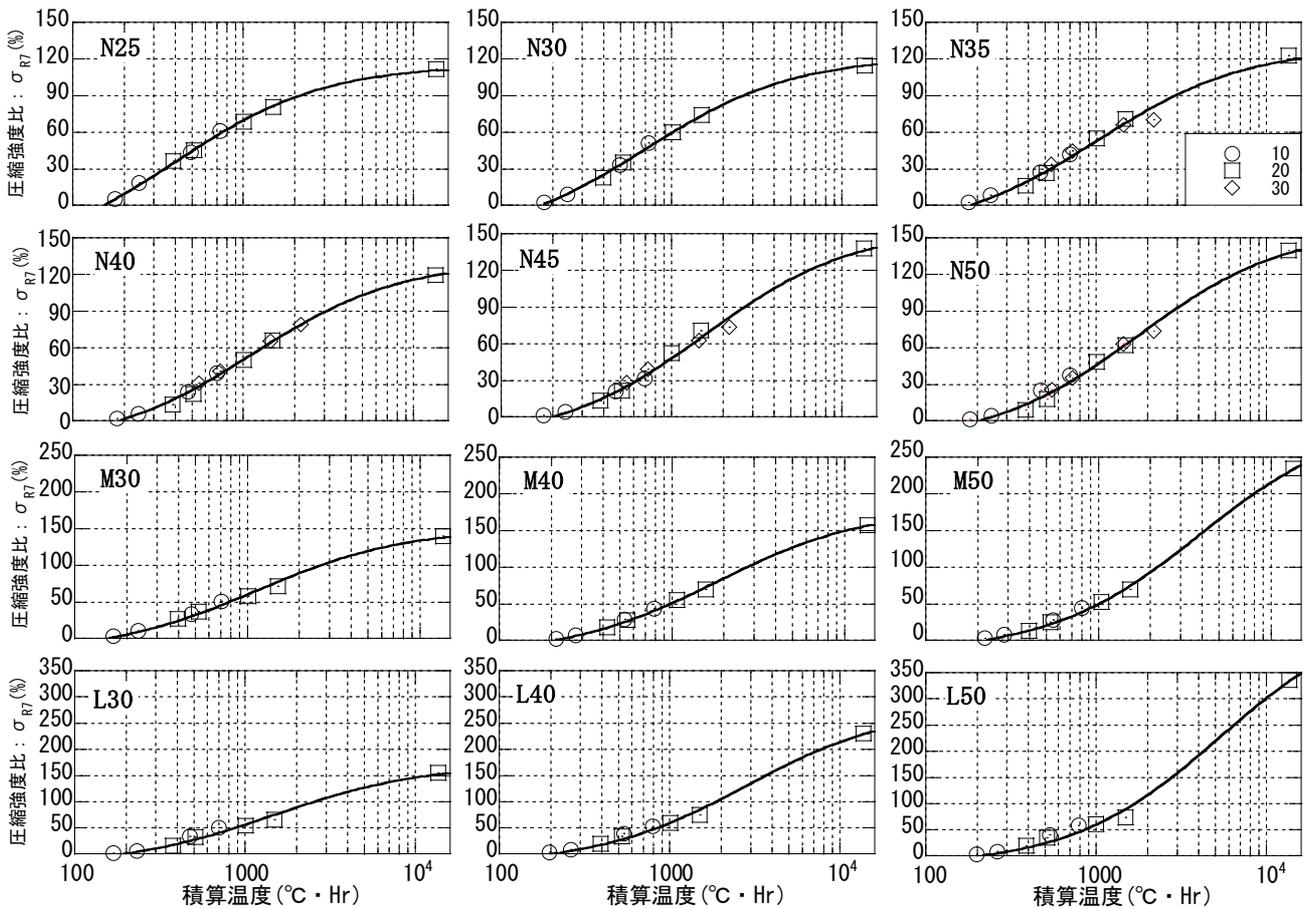


図-3 積算温度と圧縮強度比の関係(養生温度一定条件)

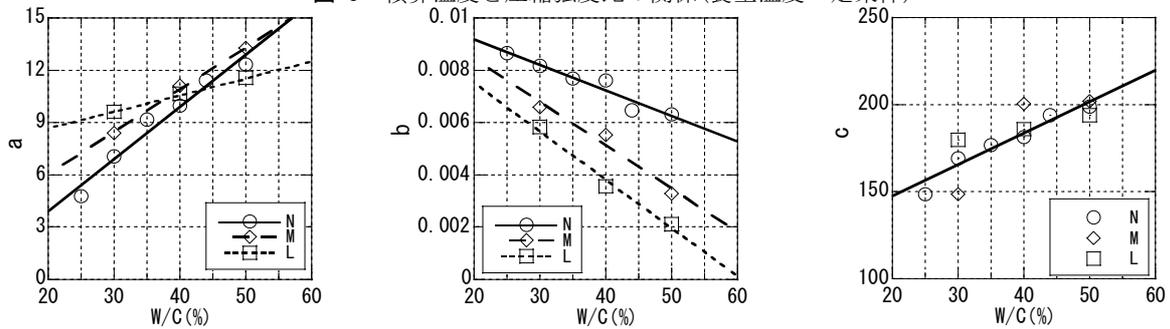


図-4 水セメント比と回帰式係数の関係

度増進は大きくなる傾向にある。また、発熱量の少ないセメントほど、材齢7日以降の強度増進が大きくなった。

係数cに関しては、他の係数と比較してややばらつきが大きい。強度の発生点には練り上がり時の温度や混和剤の種類、添加量による影響が他の係数に比べ大きいためと考えられる。すべてのセメント種類のデータを回帰し、式(10)を得た。

$$c = 1.8222 \cdot (W/C) + 111.15 \quad (R = 0.865) \quad (10)$$

(3) 圧縮強度の評価

コンクリートのセメント種類、W/Cおよび式(4)～式(10)より、式(3)の係数を求め、標準養生材齢7日の圧縮強度を用いることにより、式(2)より、任意の積算温度におけるコンクリートの圧縮強度の評価が可能となる。

表-6 回帰式係数および相関係数

調査記号	a	1/a	b	1/b	c	R
N25	4.779	0.209	8.660E-03	115.5	148.62	0.995
N30	7.053	0.142	8.180E-03	122.3	169.14	0.992
N35	9.177	0.109	7.702E-03	129.8	176.67	0.986
N40	9.986	0.100	7.602E-03	131.5	181.18	0.991
N45	11.426	0.088	6.456E-03	154.9	193.95	0.987
N50	12.348	0.081	6.315E-03	158.3	198.98	0.990
M30	8.421	0.119	6.593E-03	151.7	148.65	0.996
M40	11.103	0.090	5.534E-03	180.7	200.53	0.999
M50	13.281	0.075	3.269E-03	305.9	201.87	0.999
L30	9.643	0.104	5.834E-03	171.4	179.86	0.991
L40	10.665	0.094	3.566E-03	280.5	186.08	0.996
L50	11.583	0.086	2.122E-03	471.4	193.82	0.996

図-5は一定温度条件の試験結果の実測値と推定値を比較したものである。Nシリーズは、N25～35とN40～50に分けて表示した。図中には推定値/実測値±20%の線を破線で示している。推定値と実測には強い相関があり、一定温度条件での圧縮強度の発現を精度良く評価できた。

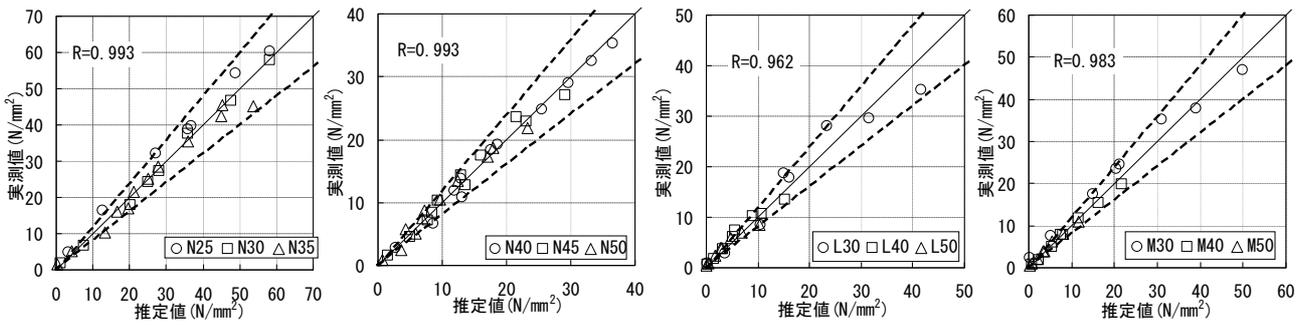


図-5 圧縮強度の実測値と推定値の関係

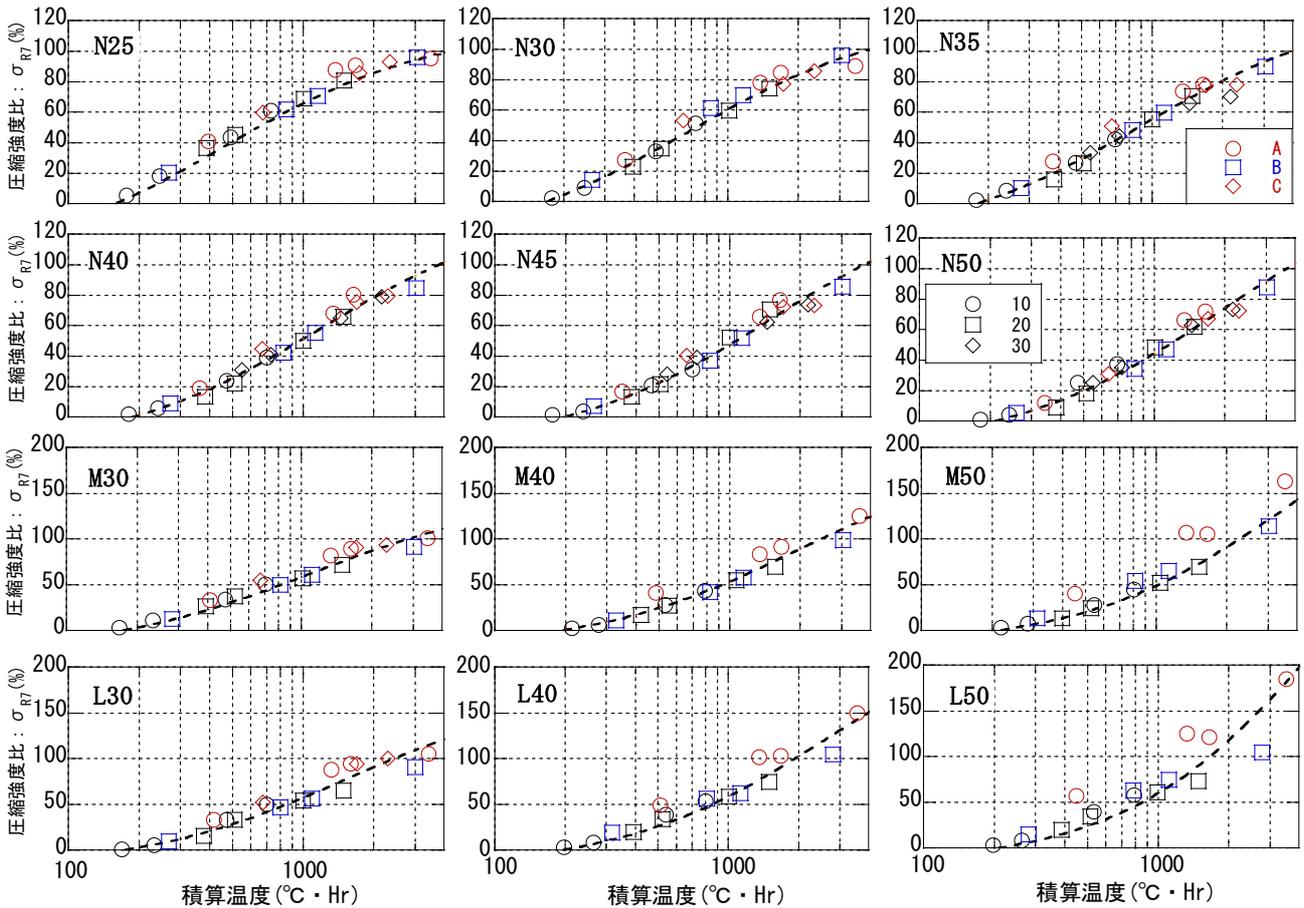


図-6 積算温度と圧縮強度比の関係(初期に温度履歴を受けたケースを追記)

(4) 初期に温度履歴を受けたコンクリートの強度発現

図-6は、(2)で示した σ_{R7} とMの関係(図-3)に、初期に温度履歴を与えた試験ケースの結果を追記したものを、3,360°C・Hr(20°C, 材齢7日)の範囲で図示したものである。図中の破線は、式(3)より求めた σ_{R7} の評価式を表す。M, Lセメントに関して、最高温度60°Cの履歴を受けた養生温度条件A, Cの実測値が推定値よりも大きくなるものがあったが、初期に温度履歴を受けたケースの試験結果と一定温度条件の試験結果はおおむね同等の傾向にあった。

図-7は(3)で示した圧縮強度の推定値-実測値関係(図-5)に、初期温度履歴を与えた試験ケースの結果を追記したものである。M, Lセメントに関して、最高温度60°Cの履歴を受けた養生温度条件A, Cの実測値が推定値よりも大きくなるものがあったが、初期に温度履歴を受けたコンクリート

の初期強度発現に関しても、提案手法を適用することにより、おおむね±20%で評価可能なことを確認した。

(5) セメント種類ごとの強度発現特性

式(3)における係数a, bに関して、セメント種類ごとの組成化合物の比率に着目し、検討した。

図-8は、一定温度条件での試験結果より得られた係数aおよびbについて、エアライト水比(C_3S/W)および水セメント比とピーライト分の積($W/C \cdot C_2S$)との関係を図示したものである。いずれのセメントによる試験結果も、①エアライト成分の増加に伴い、1/aは増大し、1/bは減少すること、②ピーライト成分の増加に伴い、1/aは減少し、1/bは増大すること、が示された。これらの中で、1/aと $W/C \cdot C_2S$ の関係には、セメントごとの傾向が確認されるが、すべてのセメントによる

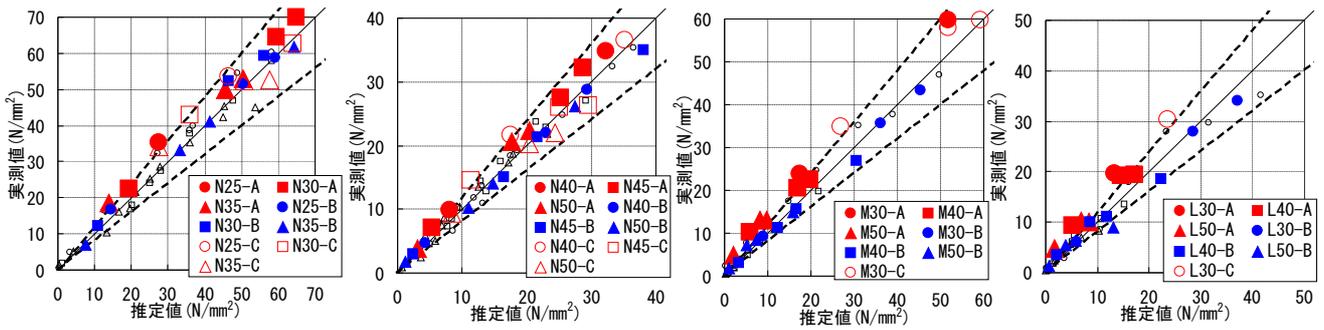


図-7 圧縮強度の実測値と推定値の関係

(初期に温度履歴を受けたケースを追記)

結果をそれぞれ回帰したところ、式(11)～式(14)を得た。

$$1/a = -0.069486 / (C_3S/W - 2.6297) + 0.048408 \quad (R=0.964) \quad (11)$$

$$1/a = -0.10404 \log(W/C \cdot C_2S) + 0.0090523 \quad (R=0.660) \quad (12)$$

$$1/b = 82.921 / (C_3S/W - 0.35602) + 63.156 \quad (R=0.968) \quad (13)$$

$$1/b = 83.329 \times \exp(6.0214 \times W/C \cdot C_2S) \quad (R=0.971) \quad (14)$$

ここに、W/C:水セメント比, C₃S/W:エアライト水比, W:単位水量(kg/m³), C₃S:セメント中のエアライト質量比, C₂S:セメント中のビーライト質量比,

一般的に、セメント組成化合物のうち、エアライト(C₃S)は材齢初期での強度発現に、ビーライト(C₂S)は長期材齢の強度増進への寄与がそれぞれ大きいとされているが、今回の実験の範囲(材齢28日)で評価した場合は、7日以降の強度増進についてはどちらも強い相関があった。

以上より、セメント組成化合物を考慮した指標を適用しセメント種類の影響を一般化することにより、積算温度と強度発現の関係を推定できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本検討により得られた知見をまとめる。

- ①コンクリートの初期強度発現性状は、養生温度条件によって異なり、特に初期材齢段階での影響が大きい。
- ②一定温度で養生された同一のセメントによるコンクリートの初期強度発現は、注水時刻および0℃を基準とした積算温度とゴール関数により±20%の範囲で評価できる。
- ③提案手法は、初期に温度履歴を受けたコンクリートの初期強度発現も同様に評価できる。
- ④提案手法は、レディミクストコンクリート工場の品質管理データを利用することにより、出荷工場別に初期強度の発現を事前に試験することなく評価できる。
- ⑤コンクリートの初期強度発現特性は、セメント種類ご

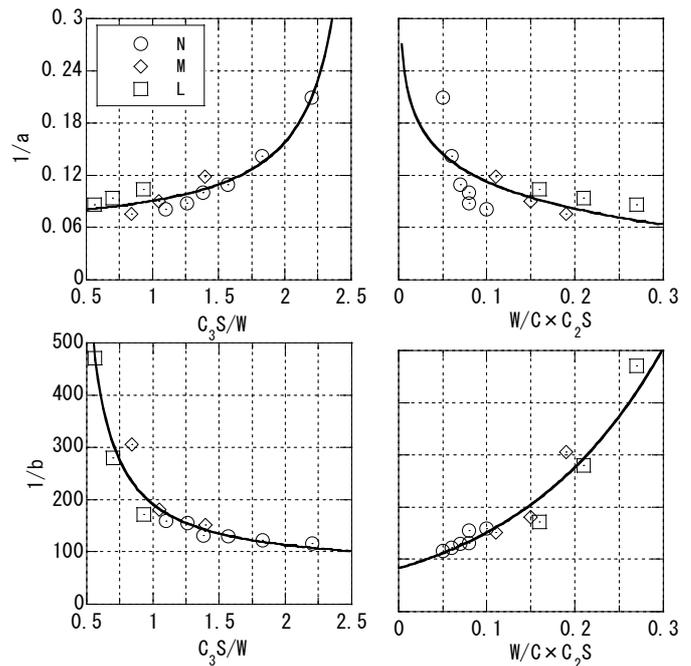


図-8 セメント組成化合物を考慮した指標と回帰式係数の関係

と異なるが、セメント組成化合物を考慮した指標を適用することにより、評価可能となる可能性がある。

参考文献

- 1)笠井芳夫:コンクリートの初期強度に関する研究,セメント技術年報,第16回,pp.255-259,1962
- 2)蓮尾孝一,西本好克,松田拓,河上浩司:積算温度方式による若材齢強度の推定法-主に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの検討-,三井住友建設技術研究所報告, No.2, pp.145-150, 2004.12.
- 3)中川好正,橋爪進,西田朗,木村博:ポルトランドセメントを用いたコンクリートの初期強度予測,コンクリート工学年次論文集,第18回,pp.507-512,1996
- 4)土木学会:コンクリート標準示方書「施工編」,2002.3