

論文 高強度コンクリートの初期発熱と強度発現性に関する研究

河上 浩司^{*1}・西本 好克^{*2}・谷口 秀明^{*3}

要旨: 普通ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートの簡易断熱試験を行い、発熱性状と強度発現とを確認した。実験の結果より、普通ポルトランドセメントに比べ低熱ポルトランドセメントは温度の影響を受けにくく、安定して強度が増加することを確認した。また、両セメントとも28Sn値は、強度または部材最高温度の増加に伴い増加するとは限らず、強度では80N/mm²、最高温度では80℃で最大値となることを確認し、最高温度による強度補正值算出法の提案を行った。

キーワード: 高強度コンクリート、内部温度、構造体コンクリート強度補正值(S値)

1. はじめに

近年、超高層RC建築物などの増加に伴い、高強度コンクリートの施工事例が増加している。高強度コンクリートは、単位セメント量が多いため水和熱が大きく、また、部材寸法の大型化により、コンクリートは更に高温履歴を受けやすくなり、強度発現性への影響が懸念される。

日本建築学会 建築工事標準仕様書コンクリート工事(以下JASS5)では、構造体コンクリート強度補正值(S値)にて強度補正を行うこととしているが、JASS5推奨値では高強度であるほどS値が大きく、W/Cが過小となり、更に高温履歴を受けやすくするほか、経済性にも影響を及ぼす恐れがある。そこで、高強度コンクリートの初期

発熱性状と強度発現性状の関係を明らかにすることにより、部材最高温度による強度補正值算定式を検討した。

2. 実験概要

本実験では時期(3時期)、セメント種類(2種類)、水セメント比(W/C, 4水準)、そして練り上がり温度(10~30℃)をパラメーターとし、その中でW/C=29%、練り上がり温度20℃を基本試験体とした。

2.1 コンクリート

使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。使用した粉体組合わせは、普通ポルトランドセメント(NC)、低熱ポルトランドセメント(LC)、そ

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(NC) 低熱ポルトランドセメント(LC)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (g/cm ²)	3370 3300 C2S量(%) 55	C	P
混和材	石灰石微粉末	2.70	4000		LF	
細骨材	鬼怒川産川砂	表乾密度 2.60	吸水率 2.29	粗粒率 2.60		S
粗骨材	栃木産砕石2005	(g/cm ³) 2.63	(%) 0.33	6.53 実績率(%) 59.2		G
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系				SP

表-2 配合

配合記号	W/C	W/P	P/W	単位量(kg/m ³)				
				W	C	LF	S	G
NL 25	25%	25%	4.0	170	680		732	815
NL 29	29%	29%	3.5	170	595		800	815
NL 33	33%	33%	3.0	170	510		869	815
NL 40	40%	40%	2.5	170	425		937	815
NF 29	40%	29%	3.5	170	425	170	763	815
NF 33	40%	33%	3.0	170	425	85	845	815

*1 住友建設(株)技術研究所建築材料チーム 工修(正会員)

*2 住友建設(株)技術研究所建築材料チームチームリーダー (正会員)

*3 住友建設(株)技術研究所土木構造チーム 工修(正会員)

して普通ポルトランドセメントの一部を石灰石微粉末で置換した(NF)である。以下、各粉体を使用したコンクリートの配合は記号で表現する。

実験に供したコンクリートNC, LCは、単位かさ容積を0.525m³/m³, 単位水量を170kg/m³に固定し、セメント水比(C/W)を2.5, 3.0, 3.5, 4.0とした。NFはC/W=2.0とし、石灰石微粉末の置換率を変え粉体水比(P/W)を3.0と3.5とした。

試験は冬期, 標準期(春期), そして夏期を行った。作成した試験体を表-3に示す。冬期と春期では練り上がり温度を20℃に統一し、夏期ではブレーキングを模擬して小氷塊を使用し、また温水を使用して練り上がり温度に幅をもたせた。

コンクリートは、練り上がり15分でフレッシュ性状を確認した後に型枠へ打設し、バイブレータにより締め固め、簡易断熱状態とした。

2.2 簡易断熱試験体

型枠は図-1に示す通り、100mm厚の発泡スチロールを2枚重ねとした。試験体温度は、試験体中心部に熱電対を配置し、30分間隔で測定した。

2.3 温度測定

コンクリート温度の測定期間は、試験体中心温度がほぼ外気温に近くなるまでの2週間を目安とした。コンクリート温度測定中の外気温は、試験体付近で同時に測定した。また、年間外気温は試験場所付近の百葉箱で測定した。

2.4 圧縮強度試験

材齢28, 56, 91日で標準養生とコア供試体の圧縮強度を確認した。供試体作成方法と圧縮試験方法はJIS A1107, JIS A1108による。

3. コンクリートの発熱性状

3.1 簡易断熱試験体中心部の温度履歴

春期試験と夏期試験のW/C=29%の試験体温度履歴を図-2示す。試験体の最高温度と打設時コンクリート温度、ならびに打ち込みから最高温度到達までの日数を表-4に示す。最高温度は、NCで70~100℃超, LCでは40~80℃の範囲に分布している。同一配合の試験体の温度上昇量は、試験時期によらずほぼ一致する。しかし、温度降下速度は外気温(冬期平均3.1℃, 春期14.5℃, 夏期23.8℃)の影響を受ける結果となった。

表-3 作成試験体一覧

試験時期	コンクリート温度(℃)	NC				NF		LC			
		25	29	33	40	29	33	25	29	33	40
冬期(W)	20	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○
春期(Sp)	20	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○
夏期(Su)	30	○	○	—	—	—	—	○	○	—	—
	20	—	○	—	—	—	—	○	○	—	—
	10	—	○	○	—	—	—	○	○	—	—

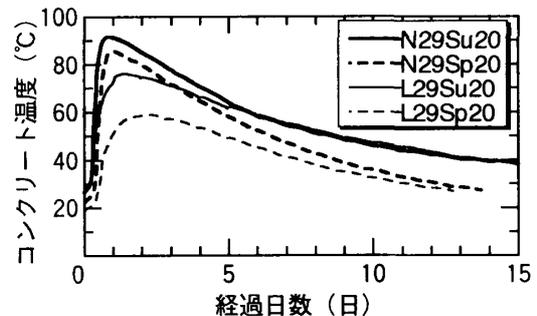
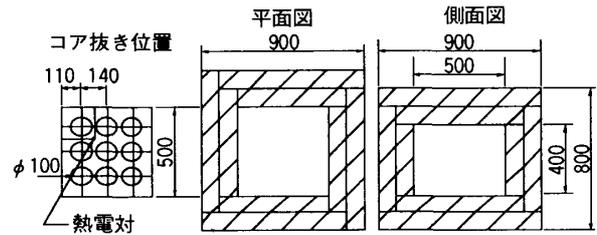


図-2 試験体温度履歴

表-4 最高温度・打設温度・最高温度到達日数

試験時期	コンクリート温度	NC												NF					
		25			29			33			40			29		33			
冬期	20	86.0	18.5	0.94	82.7	18.6	1.06	76.5	18.4	1.27	69.7	18.7	1.50	69.6	18.0	1.42	67.9	17.4	1.50
春期	20	89.4	22.9	0.94	85.5	22.4	0.98	79.4	21.6	1.08	72.2	21.1	1.46	—	—	—	—	—	—
夏期	30	102.7	35.3	0.70	96.5	34.5	0.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	—	—	—	91.6	26.5	0.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	83.2	19.7	1.01	75.7	15.6	1.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—
試験時期	コンクリート温度	LC																	
		25			29			33			40								
冬期	20	63.8	18.3	1.40	60.6	18.6	1.40	55.7	18.9	1.42	47.9	18.8	1.44						
春期	20	65.9	20.8	1.50	59.0	19.3	2.21	53.6	19.1	2.35	43.5	16.7	2.35						
夏期	30	80.1	32.5	1.32	76.4	29.1	1.65	—	—	—	—	—	—						
	20	—	—	—	76.0	27.3	1.40	—	—	—	—	—	—						
	10	—	—	—	63	12.6	2.40	54.4	12.9	2.77	—	—	—						

左: 最高温度
 中: 打設温度
 右: 最高温度到達日数

3.2 初期発熱性状

コンクリート打設温度と最高温度到達日数との関係を図-3に示す。最高温度到達までの日数は、粉体の種類に関わらず打設温度が高いほど短くなる。また、コンクリート打設温度が最高温度到達日数に与える影響は、NCよりもLCの方が大きいことがわかる。

単位セメント量と温度上昇量の関係を図-4に示す。温度上昇量はセメント種類によらず単位量に比例して大きくなる。本実験の範囲では、温度上昇量はNCで50~70℃、LCで30~50℃程度となった。NFの温度上昇量は微粉末の混入量に関わらず、単位セメント量の等しいN40と同値となる。ここで、石灰石微粉末が発熱に寄与しないことが確認できた。100kgあたりの上昇量をとると、NCは単位セメント量の増加につれ発熱量は減少し、LCはほぼ一定値となった。

4. コンクリートの強度発現性状

4.1 標準養生

標準養生供試体の圧縮試験結果を表-5に示す。NFの圧縮強度は、単位セメント量の等しいN40とほぼ同値となる。ここで、石灰石微粉末は強度発現にも寄与しないことを確認できた。練り上がり温度が20℃の標準養生供試体における、C/Wと圧縮強度との関係を、その回帰直線とともに図-5に示す。回帰直線において、C/Wと圧縮強度の比例関係が成立している。LCはNCよりも回帰式の傾きが大きく長期強度発現も大きい。

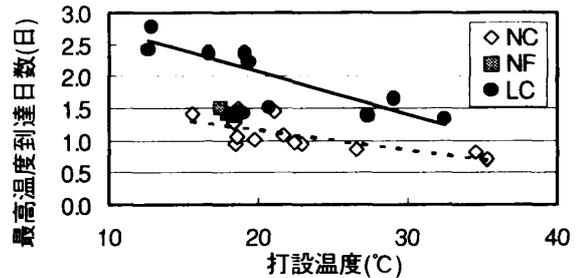


図-3 打設温度-最高温度到達日数

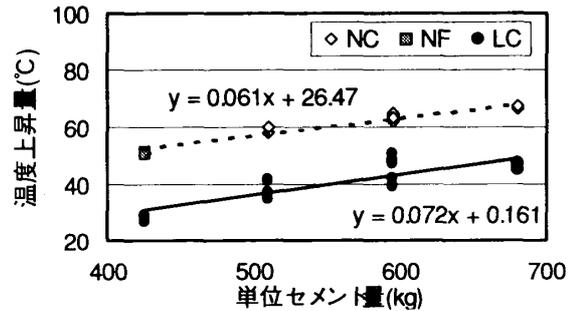


図-4 単位セメント量-温度上昇量

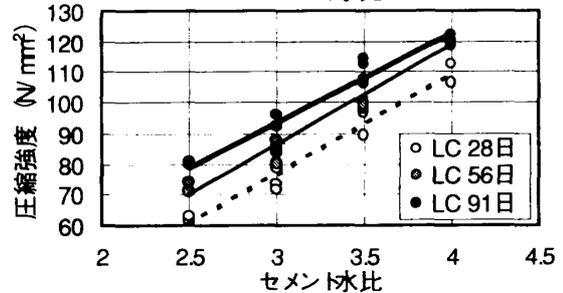
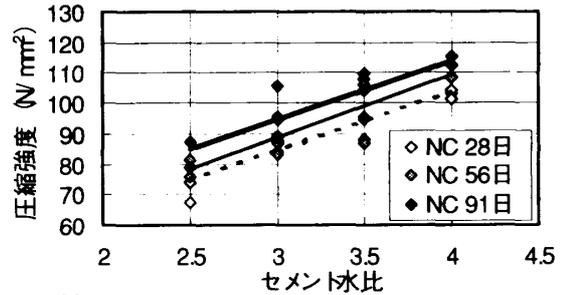


図-5 20℃標準養生圧縮強度

表-5 標準養生供試体圧縮強度

試験時期	コンクリート温度 (°C)	NC												NF					
		25			29			33			40			29		33			
		28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日			
冬期	20	103.1	108.8	115.2	95.5	107.9	104.1	87.5	86.8	95.4	67.6	75.8	78.8	77.0	77.4	84.4	66.4	74.6	78.4
	30	104.0	108.3	112.3	94.6	106.1	109.8	94.8	95.6	105.8	73.7	81.1	87.2	—	—	—	—	—	—
夏期	20	—	—	—	91.2	94.0	96.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	30	—	—	—	87.9	100.0	103.9	80.1	92.0	96.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
試験時期	コンクリート温度 (°C)	LC																	
		25			29			33			40								
		28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日						
冬期	20	106.4	122.1	120.3	96.9	100.5	112.7	78.8	87.5	95.7	61.6	71.3	79.6						
	30	92.0	104.1	108.2	97.6	107.5	114.2	73.2	85.5	92.4	62.8	74.0	80.6						
夏期	20	—	—	—	106.1	111.5	120.0	—	—	—	—	—	—						
	30	—	—	—	88.1	97.8	102.7	70.7	77.5	89.8	—	—	—						
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—						

次に、W/C=29%の試験体について、練り上がり温度と標準養生供試体の圧縮強度との関係を、図-6に示す。材齢28日の圧縮強度は、セメント種類や練り上がり温度に関わらず、ほぼ90~100N/mm²となった。NCでは材齢91日の圧縮強度は、練り上がり温度が高いとやや低下している。また、強度増加量は全温度域で10N/mm²程度で、練り上がり温度が高いほど増加量は小さい。一方、本実験では、LCの強度回帰式は右上がりとなった。また、材齢28日から91日までの強度増加量は高温域でも比較的安定している。

4.2 コア供試体

コア供試体の圧縮強度を表-6に示す。NFのコア強度発現は、標準養生と同様に同一セメント量のN40とはほぼ一致している。練り上がり温度が20℃のコア供試体におけるC/Wと圧縮強度との関係を図-7に示す。NCのコア強度回帰直線は、標準養生に比べ傾きが大きい。圧縮強度は、C/Wが大きいほど標準養生に近いが、長期増加量は小さい。LCのコア強度はC/Wに関わらず、各材齢で標準養生に比べ10N/mm²程度小さいが、強度増加はNCに比べ大きい。

W/C=29%の試験体について、試験体最高温度と材齢28日と91日でのコア強度の関係を 図-8に示す。NCでは材齢28日圧縮強度は、最高温度が高いほど大きい。しかし、強度増加量は最高温度が高いほど小さい。一方、LCの圧縮強度は、最高温度によらずほぼ一定値で、増加量も10N/mm²程度と安定している。今回の実験において、強度

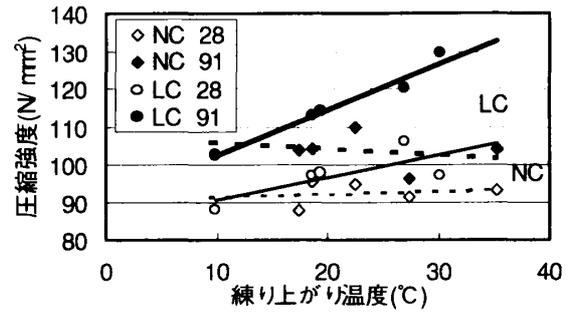


図-6 練り上がり温度-標準養生圧縮強度

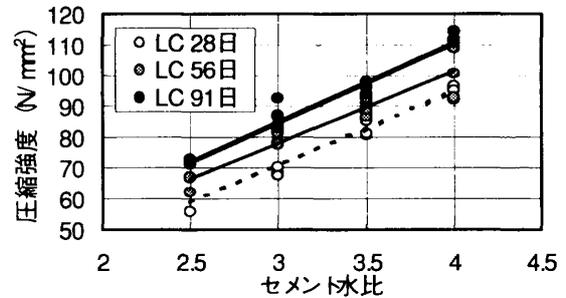
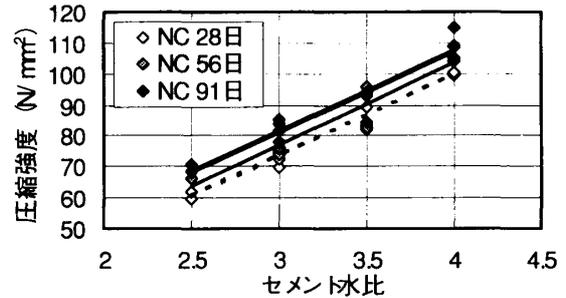


図-7 コア供試体20℃圧縮強度

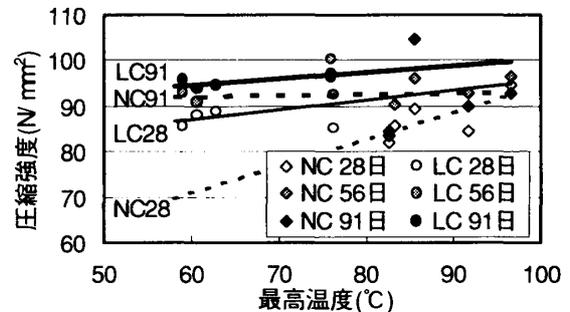


図-8 最高温度-圧縮強度

表-6 コア供試体圧縮強度

試験時期	コンクリート温度(°C)	NC												NF					
		25			29			33			40			29			33		
		28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日
冬期	20	99.3	93.7	103.8	81.9	83.6	84.3	69.8	75.8	78.1	59.5	60.7	68.1	62.4	67.7	71.3	59.0	63.8	67.8
	30	104.8	109.0	114.9	89.3	96.0	104.7	81.4	83.9	94.3	61.8	66.2	70.4	—	—	—	—	—	—
夏期	20	—	—	—	84.4	92.8	89.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	30	—	—	—	85.6	90.2	80.2	68.5	75.9	75.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
試験時期	コンクリート温度(°C)	LC												NF					
		25			29			33			40			29			33		
		28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日	28日	56日	91日
冬期	20	91.7	100.4	111.7	87.7	91.0	93.5	78.3	82.8	92.3	61.6	61.9	70.8	—	—	—	—	—	—
	30	96.5	92.9	114.2	85.4	92.6	95.9	68.1	77.2	82.6	55.5	66.7	72.7	—	—	—	—	—	—
夏期	20	—	—	—	84.9	92.5	104.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	30	87.4	101.0	105.2	84.9	92.5	104.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	88.6	81.8	94.5	70.7	73.0	78.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—

特異値と判断し
考慮しない

発現に対する初期高温履歴の影響は、NCでは顕著に現れているが、LCではほとんど見られなかった。

試験結果のばらつきの目安として、C/W-圧縮強度回帰式の相関係数 γ を表一七に示す。20±3℃については、NCの γ は材齢28日から91日までに大きく低下するのに対し、LCの γ は概ね一定で、各試験体の強度は安定しているといえる。全試験体を考慮しても、NCの γ は低下しばらつきが増加するが、LCの γ は増加している。LCの初期強度は養生温度の影響を受けやすいが、長期材齢では強度が均一化されていくといえる。

5. 構造体コンクリート強度補正值(S値)

JASS 5に従い、標準養生供試体と構造体コンクリートとの間の強度補正值、mSn値の検討を行う。JASS 5では、圧縮強度80N/mm²程度までの実験値を基に、91日構造体強度とmS91推奨値の関係が示されている。以下では、80N/mm²を超える強度域まで、28S91値の他、28S28値や28S56値についても検討を行う。

5.1 材齢n日構造体強度と28Sn値

材齢n日コア強度と28Sn値を図一九に示す。図中には筆者らが別途に行った試験結果¹⁾とJASS5推奨値を併せて示す。NCの試験結果は、材齢56日以降では概ねJASS 5推奨値以下となり安全側に評価できている。しかし、JASS 5推奨値を90N/mm²以上まで延長すると、実験値との間に大きな差を生じる。これは90N/mm²を超える高強度コンクリートは、水和熱が大きいためコアの初期強度発現が大きく、若材齢でのコア強度が標準養生強度に近くなることによる。このような強度域では、28Sn値は増加させる必要はなく、小さくできる可能性が示された。また、LCの実験値は28S28値を除き、JASS 5推奨値に比べ非常に小さく、JASS 5推奨値では過剰補正となる。

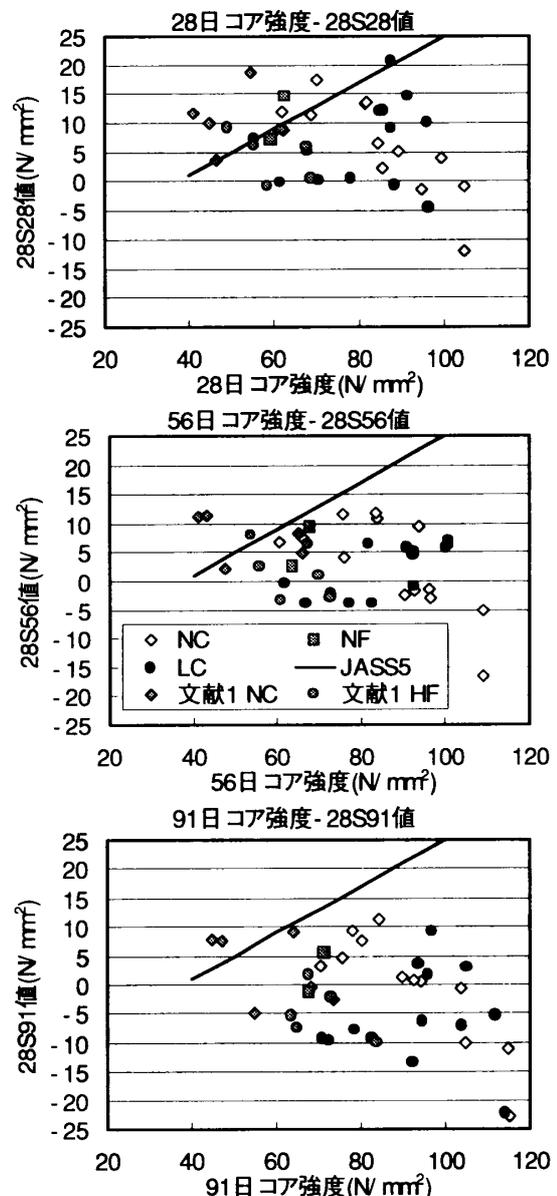
以上の結果より判断すると、必ずしも28Sn値はコア強度に比例して増加するとは限らず、mSn値は最大値があることが明らかになった。また、セメントの種類毎にmSn値を設定する必要がある。

5.2 部材最高温度と28Sn値

部材最高温度と28Sn値との関係を図一十に示す。NCでは最高温度は50~100℃超に分布している。28Sn値は最高温度に比例し徐々に増加し80℃で最大値をとり、80℃以上の温度域では初期高温履歴により、コアの初期強度が大きく28Sn値は小さくなる。一方、LCの最高温度は80℃以

表一七 回帰式相関係数

	20±3℃		全数	
	コアNC	コアLC	コアNC	コアLC
28日	0.965	0.963	0.948	0.896
56日	0.890	0.948	0.889	0.897
91日	0.907	0.974	0.859	0.924



図一九 n日コア強度-28Sn値

(JASS5推奨値 80N/mm²以上については延長)

下に分布し28Sn値は温度に比例して増加する。

この傾向を、図-10に示すように、部材最高温度が80℃で最大値となる二次曲線によって表現する。すなわち、

$$28Sn = An(T_{max} - 80)^2 + Bn \quad (1)$$

ただし、 T_{max} = 部材最高温度とし28Sn値は ΔF を含むと考え $28Sn \geq 3.0N/mm^2$ とする。本実験の範囲内では、 $A_{28, 56, 91} = -1/90$, $B_{28} = 18$, $B_{56} = 12$, $B_{91} = 9$ とすることで、実験結果を適切に表現することができた。

以上の検討より、28Sn値はセメント種類によらず部材最高温度を評価することで、1つの式で精度良く算出することが可能であると考えられる。

6. まとめ

本論において以下の知見が得られた。

- ・石灰石微粉末はその混入量によらず発熱・強度発現に影響を及ぼさない。
- ・NCに比べLCは練り上がり温度、部材温度の影響を受けることなく安定して強度が増加する。
- ・部材温度履歴から構造体コンクリート強度補正値を予測できる可能性が示された。
- ・データの蓄積により、強度補正式の精度向上を図ることが今後の課題である。

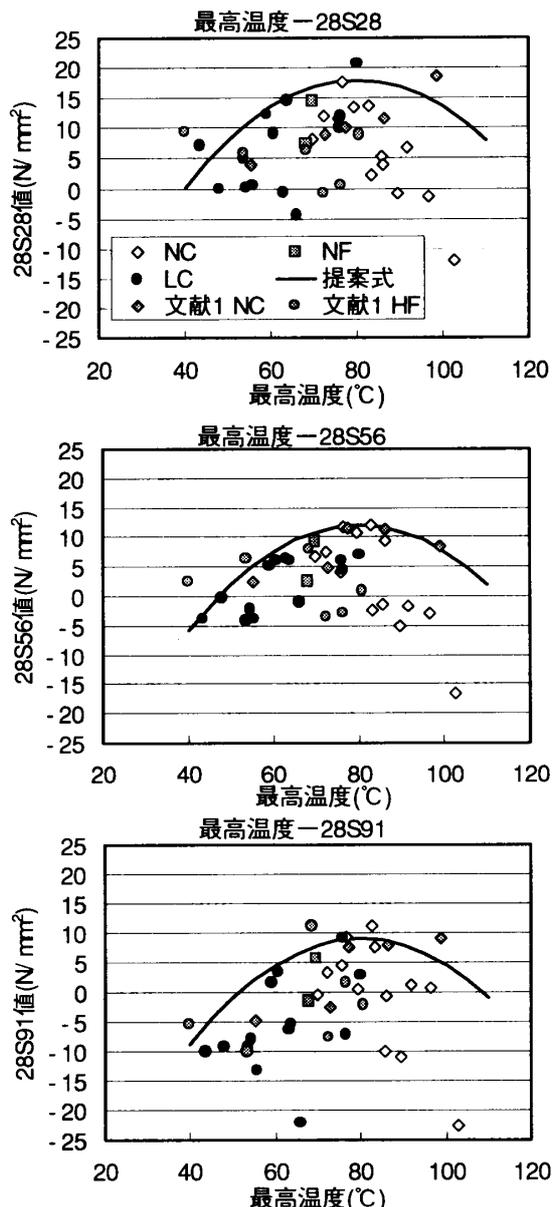


図-10 部材最高温度-28Sn値補正式

謝辞 本研究の遂行にあたり御協力を頂いた住友大阪セメント(株),(株)ポゾリス物産 諸氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 菅谷, 西本ほか: 構造体コンクリート強度補正値(S値)に対する検討, (その1) 試験概要・試験結果, (その2) 部材最高温度による28S56の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 909-912, 2000. 9
- 2) 河上, 谷口ほか: 高強度コンクリートの構造体強度に関する研究, その1 実験概要及び発熱性状, その2 強度発現性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 905-908, 2000. 9

- 3) 梅本ほか: 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートのmSn値に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol. 22, No. 2, pp. 1021-1026, 2000. 9
- 4) 西田ほか: 高強度コンクリートの強度補正値に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 9-10, 1999. 9
- 5) 小澤ほか: 石灰石微粉末がセメントの強度発現に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No. 53, pp. 178-183, 1999
- 6) 日本建築学会 建築工事標準仕様書 コンクリート工事, JASS5, 1997