報告　低発熱形セメントを用いた高強度コンクリートの柱構造体強度に関する比較調査

坂野　宏行*1・馬場　武志*2・鈴木　澄江*3・阿部　道彦*4

要旨：低発熱形セメントを用いた高強度コンクリートについて，模擬柱試験体の打設実験を行った。各種の養生を行った供試体の圧縮強度を比較すると，簡易断熱養生供試体の圧縮強度はコア供試体の圧縮強度に最も近い値を示した。コンクリートの発熱を抑制することのできる低熱ポルトランドセメントおよび高ビーライト系セメントを用いたコンクリートはコア供試体の強度発現が良好であった。調合強度の管理材齢を長期にすることにより，過剰設計にならず適切な調合を選定できることが確認された。

キーワード：低熱ポルトランドセメント，高ビーライト系セメント，高強度，強度発現

1.　はじめに

近年，設計基準強度の高い高強度コンクリートに低発熱形セメントの使用が増えているが，強度発現についてはまだ十分な資料がない。本調査では低発熱形セメントを使用し，想定した設計基準強度 42～60N/mm^2 の高強度コンクリートについて季節ごとに模擬柱の打設を行い，各種の養生を行った供試体と構造体コンクリートの強度発現を比較した。

2.　実験概要

2.1　使用材料および調合

使用材料を**表－1** に，コンクリートの調合を**表－2** に示す。

2.2　コンクリートの製造

コンクリートの製造は JIS 表示許可工場であるレディーミクストコンクリート工場（埼玉県三郷市）で行い，練混ぜは容量 6m^3 の強制 2 軸練りミキサを使用し，練混ぜ量を 2～4m^3 として行った。練混ぜ時間はモルタルを 15 秒間練り混ぜ，粗骨材を投入して 90～120 秒間練り混ぜた。

2.3　模擬柱試験体の概要

模擬柱試験体の概要を**図－1** に示す。

表－2　コンクリートの調合

セメントの種類	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m^3)	単位粗骨材かさ容積 (m^3/m^3)	目標スランプフロー〈スランプ〉(cm)	目標空気量 (%)
N	27～36	165	0.58	55	3.0
	40～50		0.61	〈21〉	
HF	27～35	160	0.55	55	
L	25～35		0.58		

表－1　使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（N）密度※3.16g/cm^3，比表面積3,270～3,320cm^2/g 高ビーライト系セメント（HF）密度※3.20g/cm^3，比表面積4,050～4,220cm^2/g，C_3S※33% 低熱ポルトランドセメント（L）密度※3.22g/cm^3，比表面積3,340～3,480cm^2/g，C_2S52～53% ※各期とも同じ数値を示した。
細骨材	茨城県鹿島産陸砂　表乾密度：2.58 g/cm^3，吸水率：1.54%，FM：2.65
粗骨材	栃木県葛生産砕石（石灰岩）　表乾密度：2.73 g/cm^3，吸水率：0.64%，実積率：60.5%
混和剤	高性能AE減水剤　ポリカルボン酸エーテル系化合物と配向ポリマーの複合体（A）， Aの遅延形（AR），ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体（B）

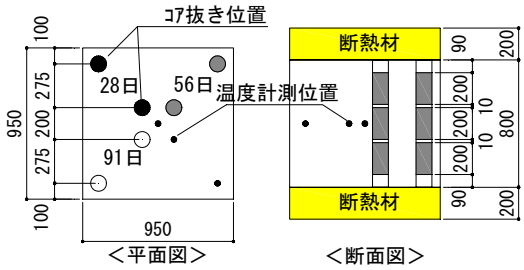
*1　（株）大本組　技術本部技術研究所　（正会員）
*2　（株）大本組　技術本部技術研究所
*3　（財）建材試験センター　中央試験所品質性能部材料グループ　専門職（正会員）
*4　工学院大学教授　工学部建築都市デザイン学科　工博　（正会員）

2.4　試験項目及び方法

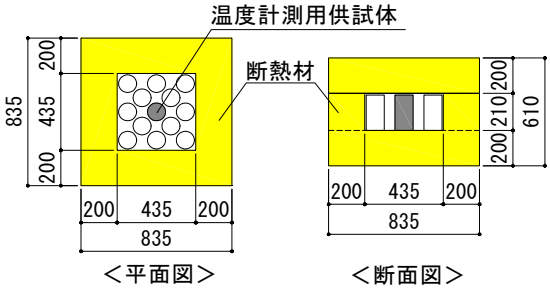
フレッシュコンクリートの試験は，スランプ，スランプフロー，空気量，練上がり温度について，硬化コンクリートの試験は，材齢 28，56，91 日の圧縮強度（標準養生，現場水中養生，現場封かん養生，簡易断熱養生，コア）について JIS に従って行った。簡易断熱養生は，軽量型枠に採取した供試体を**図－2** に示す断熱材（発泡スチロール）を用いて作製した箱に入れた状態で 2 週間養生をした後，現場封かん養生を行った。コア供試体は試験材齢の 3 日前に採取した。

3.　実験結果

模擬柱に打設したコンクリートの試験結果を**表－3** に示す。



図－1　模擬柱試験体



図－2　簡易断熱養生箱

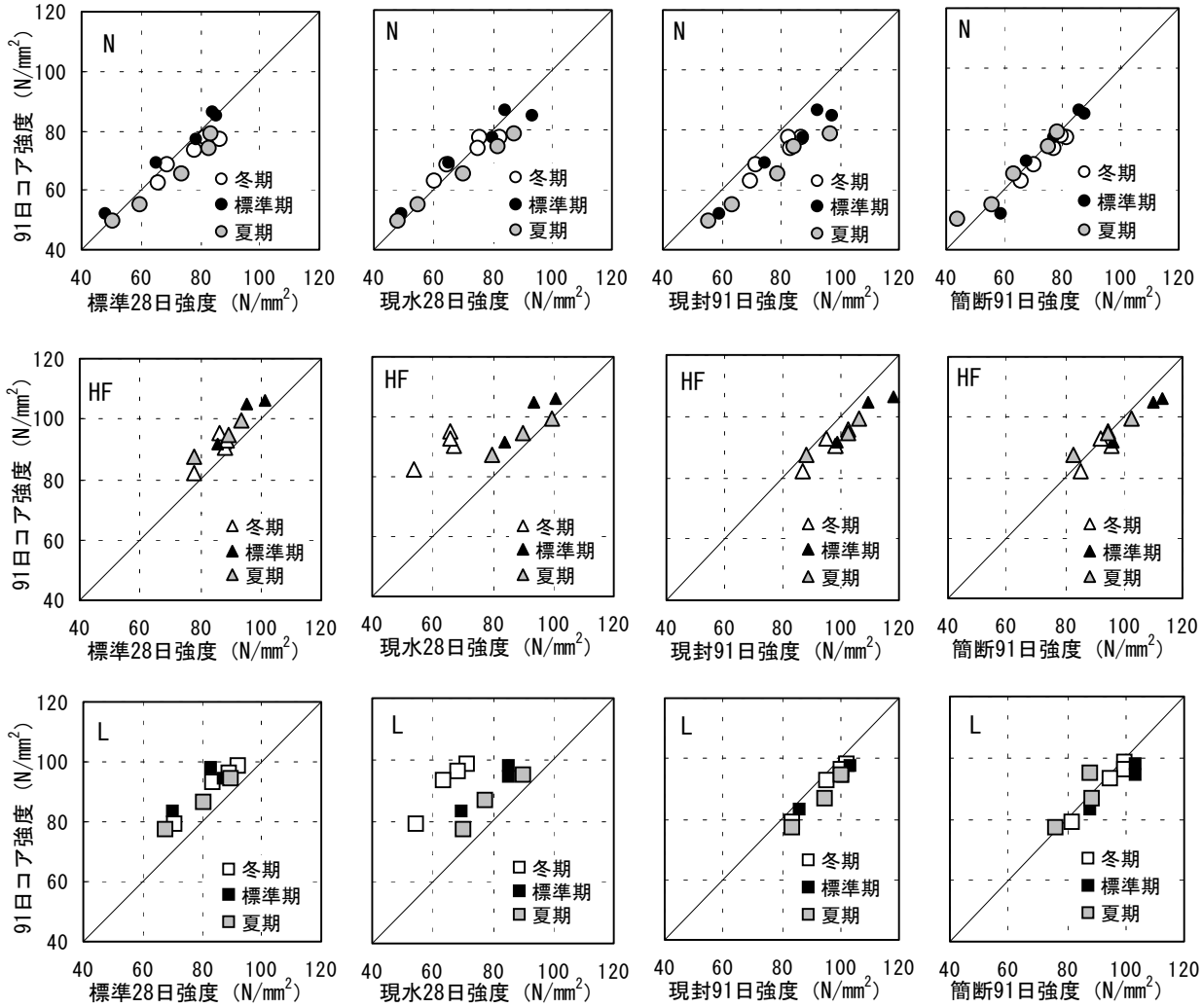
表－3　模擬柱に打設したコンクリートの試験結果

時期	セメントの種類	W/C (%)	混和剤 種類	混和剤 使用量 (Cx%)	スランプフロー※1 (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (℃)	圧縮強度（N/mm²）（空気量1%の増加により4%強度低下するものとし，3%に換算した強度を示す。文献［1］） 標準水中 28日	標準水中 56日	標準水中 91日	現水 28日	現封 91日	簡易断熱 28日	簡易断熱 91日	コア 28日	コア 91日	柱の中心温度 (℃)	簡断温度※2 (℃)
冬期・二月上旬	N	28.0	A	3.00	44.5	2.0	13.0	86.4	88.3	92.3	82.3	86.5	74.6	81.1	71.4	77.5	65.7	55.2
		30.0	A	2.40	50.0	3.5	9.4	81.4	80.5	90.1	75.7	82.4	70.3	79.5	67.3	77.9	60.7	52.1
		33.0	A	2.30	50.0	2.4	11.9	77.9	78.3	80.9	75.0	83.1	70.3	77.0	66.8	73.9	59.9	52.8
		36.0	A	1.80	45.5	5.0	10.1	68.5	64.5	77.7	64.2	71.6	61.8	69.8	61.2	68.5	56.6	45.6
		40.0	A	1.45	<21.0>	3.5	10.5	65.5	64.6	74.1	60.1	69.7	58.6	65.4	56.2	62.9	50.4	41.7
	HF	28.5	B	1.50	64.0	3.0	9.3	86.2	100.3	104.1	65.7	102.5	77.4	94.6	73.3	95.4	41.9	34.1
		30.0	B	1.35	54.5	3.6	7.8	88.0	96.9	102.1	67.4	98.0	79.7	96.0	74.7	90.6	38.8	32.5
		32.5	B	1.35	59.0	2.8	9.8	88.6	97.8	101.9	66.1	95.0	75.0	92.2	72.6	93.0	37.1	33.2
		35.0	B	1.35	53.5	3.8	9.5	77.8	87.2	91.5	53.9	86.8	64.5	85.3	60.9	82.3	33.8	28.6
	L	25.0	A	2.15	66.0	1.2	9.7	92.0	108.0	106.2	71.0	101.9	83.5	99.4	81.6	98.6	36.9	32.3
		27.0	A	1.80	52.5	2.2	8.3	88.9	104.8	107.8	68.6	100.3	80.5	99.7	79.2	96.5	34.5	28.8
		30.0	A	1.65	57.0	2.0	8.2	83.1	99.0	106.2	63.7	95.1	74.7	94.7	73.9	93.2	30.9	27.5
		35.0	A	1.60	63.0	1.4	9.2	70.4	86.6	91.0	54.1	83.2	58.2	81.6	59.2	79.3	27.3	23.5
標準期・四月上旬	N	27.0	A	3.30	50.0	1.5	23.6	85.4	94.2	96.3	92.8	97.1	77.7	87.8	76.0	85.1	81.7	72.1
		30.0	A	2.70	48.5	1.7	21.0	83.9	85.5	91.9	83.8	92.4	76.1	85.5	74.2	86.4	79.6	73.3
		35.0	A	2.50	49.0	1.5	22.2	78.5	83.7	88.3	79.9	87.5	69.6	76.7	68.7	77.3	73.6	65.1
		40.0	A	1.70	<21.0>	1.8	22.2	64.7	72.7	74.7	65.3	74.3	61.7	67.6	59.9	69.4	67.7	63.1
		50.0	A	1.40	<20.5>	4.3	20.9	47.8	56.2	56.8	49.5	59.4	51.6	58.7	46.6	52.2	56.6	52.2
	HF	27.0	B	1.35	57.0	3.8	19.7	101.4	112.9	116.5	101.0	118.1	101.8	113.0	92.8	106.1	53.0	50.2
		30.0	B	1.40	71.5	2.9	18.0	95.4	103.6	108.4	93.7	109.7	96.4	110.1	89.8	104.7	48.4	47.7
		35.0	B	1.10	52.0	1.7	18.3	85.8	94.6	97.9	84.0	98.9	83.5	96.7	76.0	91.5	45.2	43.7
	L	27.0	A	2.10	57.5	2.0	20.2	87.0	98.6	102.9	85.2	101.0	89.7	103.2	82.3	94.3	50.5	46.3
		30.0	A	1.60	43.0	2.5	20.1	82.6	98.3	103.0	84.9	103.1	85.9	103.1	83.6	98.0	46.6	43.6
		35.0	A	1.50	42.0	3.4	19.3	69.8	82.8	86.4	69.2	85.6	71.8	87.9	69.5	83.5	42.0	40.5
夏期・九月上旬	N	27.0	B	2.70	44.0	1.1	29.5	83.5	89.8	93.5	86.8	96.6	72.0	78.3	78.5	78.9	84.9	77.7
		30.0	B	1.75	36.0	5.8	28.2	82.9	86.3	88.8	81.3	84.6	71.6	74.7	72.0	74.5	84.6	73.1
		35.0	B	1.90	62.0	0.9	27.9	73.4	73.2	79.4	70.1	78.8	60.0	63.1	64.7	65.5	80.4	73.7
		40.0	AR	1.60	<21.5>	6.4	27.3	59.8	60.6	62.7	54.4	63.1	51.5	55.5	53.6	55.0	74.5	66.7
		50.0	AR	1.35	<21.0>	3.8	27.8	50.2	48.7	52.6	47.7	55.2	42.3	43.8	48.3	49.9	65.8	61.8
	HF	27.0	B	1.50	67.0	2.8	28.0	93.5	114.3	111.9	99.3	106.0	99.8	102.4	94.7	99.3	68.8	62.1
		30.0	B	1.40	59.0	1.4	29.3	89.1	98.0	109.5	89.8	102.5	86.6	94.6	86.6	94.6	64.3	59.2
		35.0	B	1.20	59.5	1.6	28.4	77.9	88.0	92.0	79.8	88.2	79.8	82.9	80.5	87.5	57.3	54.0
	L	27.0	A	1.90	69.5	1.3	28.6	89.4	102.7	105.7	90.1	100.0	84.8	87.8	86.5	94.8	63.7	60.9
		30.0	A	1.60	58.0	2.2	26.9	80.1	93.9	101.9	77.4	94.4	83.7	88.6	79.2	86.8	59.5	55.5
		35.0	A	1.45	56.5	2.4	28.6	67.6	80.3	85.7	70.0	83.3	69.1	75.7	70.3	77.4	54.6	52.4

※1　表中の〈〉内はスランプ（単位：cm）を示す。　　※2　簡易断熱養生を行った供試体の温度

3.1　各種養生供試体とコア供試体の圧縮強度の関係

建設省告示第 1102 号では，「構造体コンクリートの強度は，コア供試体または現場水中養生あるいは現場封かん養生した供試体の圧縮強度」としているところから，本調査における高強度コンクリートは，各種養生（標準養生 材齢 28 日，現場水中養生 材齢 28 日，現場封かん養生 材齢 91 日，簡易断熱養生 材齢 91 日）を行った供試体の圧縮強度とコア供試体の材齢 91 日圧縮強度の平均値(以下,材齢 91 日コア強度)について比較を行った（図－3)。何れのセメントを用いたコンクリートも簡易断熱養生供試体の材齢 91 日圧縮強度（以下，簡断 91 日強度）が材齢 91 日コア強度に最も近似したが,これは両者類似の温度履歴となったためと考えられる。N セメントを用いたコンクリート（以下，NC）の場合,現場封かん養生供試体の材齢 91 日圧縮強度（以下，現封 91 日強度）および標準養生供試体の 28 日圧縮強度（以下，標準 28 日強度）は,概ね材齢 91 日コア強度よりも大きな値を示している。また，現場水中養生供試体の材齢 28 日圧縮強度（以下，現水 28 日強度）の場合は，70N/mm^2 を超えたあたりから材齢 91 日コア強度より大きな値が現れる。HF セメントを用いたコンクリート（以下，HFC）および L セメントを用いたコンクリート(以下, LC)の場合は，現封 91 日強度は材齢 91 日コア強度よりも大きな値を示しているが,現水 28 日強度および標準 28 日強度は材齢 91 日コア強度よりも小さな値



図－3　各種養生供試体とコア供試体の圧縮強度の関係

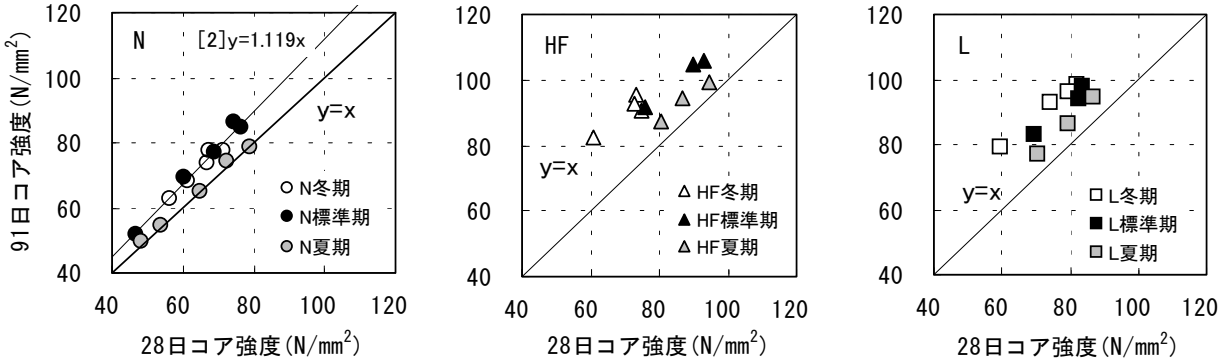
を示しており，特に冬期の現場水中養生供試体で顕著である。材齢 91 日コア強度を構造体コンクリートの強度と考えると，現場水中養生供試体および標準養生供試体を管理用供試体として用いると安全側となるが，冬期に現場水中養生供試体を採用した場合は必要以上に水セメント比が小さくなる場合が考えられる。

3.2　コア供試体の強度発現

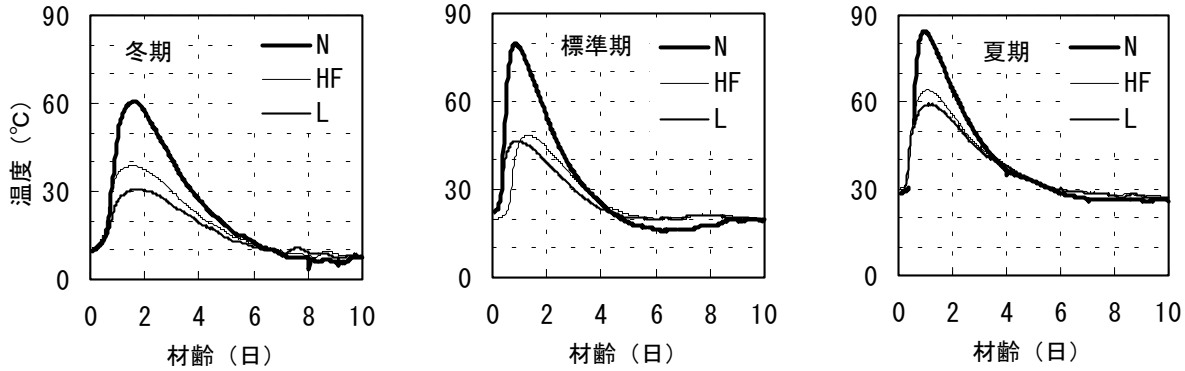
材齢 28 日コア強度と材齢 91 日コア強度の関係を**図－4** に示す。NC のコア強度は文献［2］とほぼ同様に材齢28日から材齢91日にかけて，およそ 1.12 倍となる傾向を示した。HFC および LC は NC に比べ長期材齢におけるコア強度の増進が大きく，コンクリート温度が低い冬期に強度発現が大きいことがわかる。

3.3　コンクリートの最高温度と強度発現

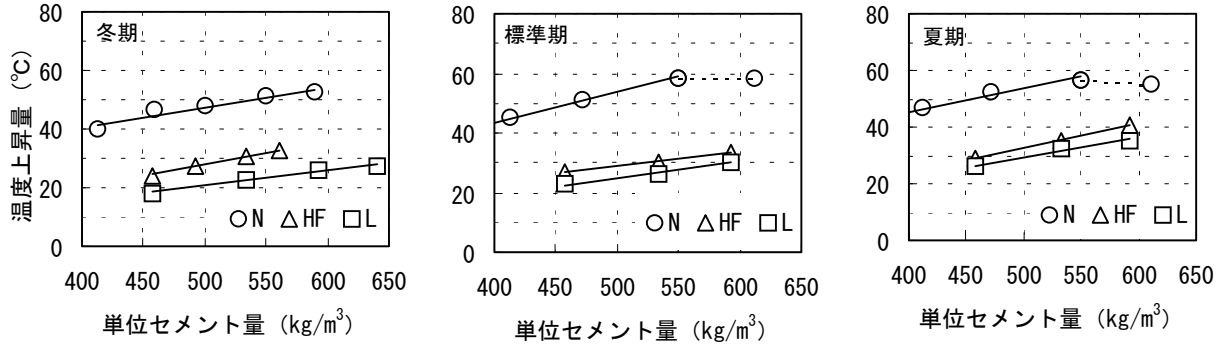
模擬柱試験体（W/C=30%）の温度履歴を**図－5** に示す。各期とも NC は HFC および LC に比べ最高温度が 20～30℃ほど高くなっている。標準期の HFC において，温度上昇の立ち上りに遅れが認められるのは，荷卸し時のスランプフローが目標値を超えていたためと考えられる。単



図－4　材齢 28 日コア強度と材齢 91 日コア強度の関係



図－5　模擬柱試験体（W/C=30%）の温度履歴



図－6　単位セメント量と温度上昇量の関係

位セメント量と温度上昇量の関係を**図－6**, セメント 1kg/m^3 あたりの温度上昇量（**図－6** における関係式の傾き）を**表－4** に示す。セメント 1kg/m^3 あたりの温度上昇量が最も大きいのは，冬期および夏期においては HFC，標準期においては NC であった。NC は，標準期および夏期において単位セメント量が概ね 550kg/m^3 を超えるとセメント 1kg/m^3 あたりの温度上昇量が変わらない傾向がある。次に，模擬柱部材の最高温度と材齢 28 日コア強度に対する材齢 91 日コア強度の比の関係を**図－7** に示す。NC はデータにばらつきが見られるものの文献［2］に近い値を示している。HFC および LC においても，最高温度が高くなるほど材齢 28 日コア強度に対する材齢 91 日コア強度の割合が減少するという傾向が認められたが，最高温度が低かったために材齢 91 日の圧縮強度が増進したものと考えられる。

模擬柱試験体の最高温度と標準 28 日強度に対する 91 日コア強度の比の関係を**図－8** に示す。

図－8 から，NC においては，模擬柱試験体コンクリートの「最高温度が約 60℃を超えるとコア供試体の材齢 91 日圧縮強度は半数の場合に標準養生供試体の材齢 28 日の圧縮強度に達しなくなることが考えられる」という文献［2］の報告とほぼ同じ傾向を示し，その傾向は特に冬期および夏期においてよく見られる。HFC および LC においては，最高温度が NC ほど高くならず材齢 28 日以降の強度増進があるので，強度の比は 1.0 を上回った。

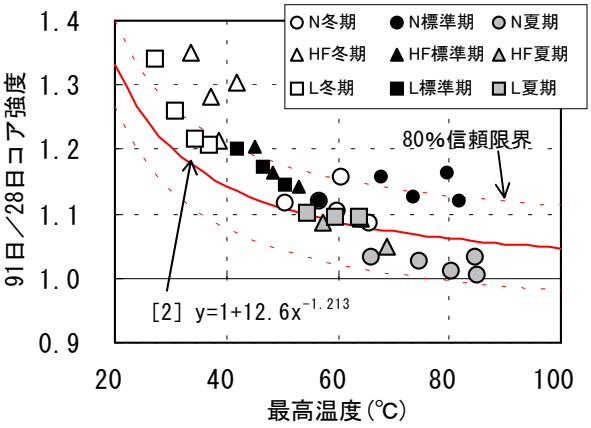
3.4　構造体コンクリートの強度補正値と管理材齢

材齢 91 日コア強度と標準 28 日および 56 日強度と材齢 91 日コア強度の差（S 値）の関係を**図－9** に示す。NC においては，標準養生供試体の材齢が変化しても S 値はほぼ同じであり，文献［3］で示されている推奨値以下となった。HFC と LC では標準養生供試体の圧縮強度に強度の増進があるので，S 値に差が見られる。管理材齢が 28 日の場合は，文献［4］をはじめとする既往の研究とほぼ同等の結果を示し，$_{28}S_{91}$ は負の値となった。JASS5 19 節（1997 年）により

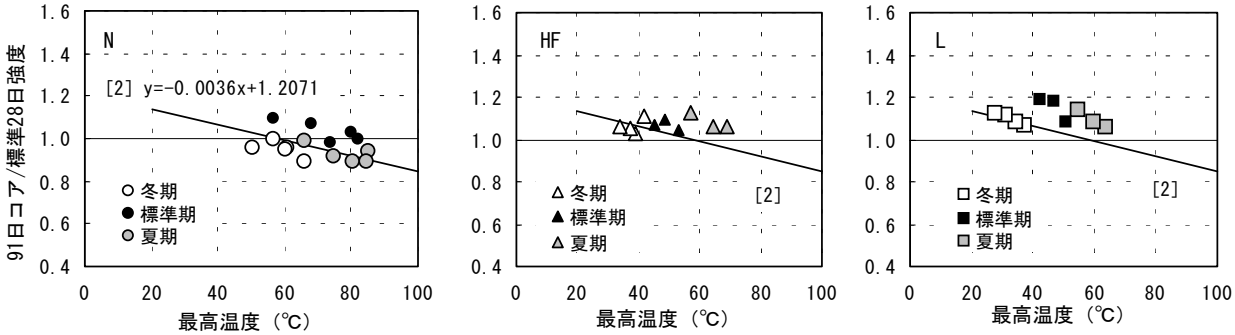
表－4　セメント 1kg/m^3 あたりの温度上昇量

（単位：℃/kg/m^3）

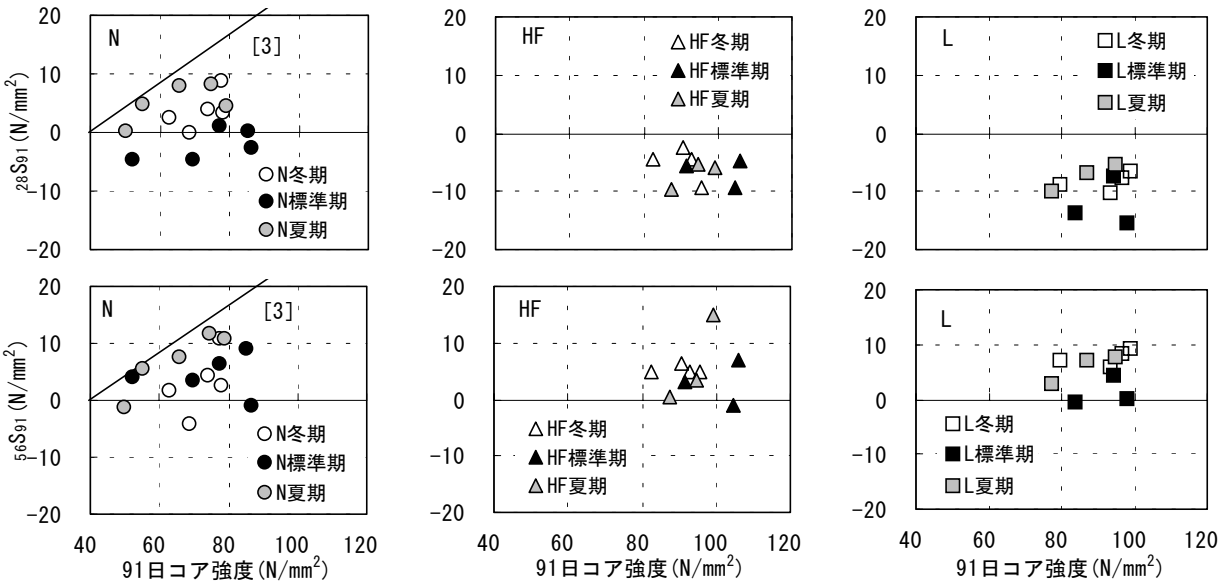
	冬期	標準期	夏期
NC	0.069	0.104	0.084
HFC	0.081	0.047	0.088
LC	0.052	0.056	0.068



図－7　材齢 28 日コア強度に対する材齢 91 日コア強度の割合と最高温度の関係



図－8　模擬柱試験体の最高温度と標準 28 日強度に対する材齢 91 日コア強度の関係



図－9　材齢 91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ および $_{56}S_{91}$ の関係

これを 0 とすると水セメント比を小さくする必要が生じる。これに対し $_{56}S_{91}$ は正の値となるので，管理材齢の延長は過剰設計をせず，適切な調合の選定に寄与することとなる。

4.　まとめ

今回の研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) セメントの種類に関わらず，簡易断熱養生供試体の材齢 91 日圧縮強度は，コア供試体の材齢 91 日圧縮強度の平均値に近似した値を示す。

(2) HF および L を用いたコンクリートでは，現場封かん養生供試体の材齢 91 日圧縮強度はコア供試体の材齢 91 日圧縮強度を上回った。

(3) HF および L を用いたコンクリートは，長期材齢におけるコア強度の強度増進が大きく，特に冬期においてその傾向が顕著である。

(4) セメント 1kg/m^3 あたりの温度上昇量は冬期および夏期においては HF，標準期においては N を用いたコンクリートが最も大きくなった。

(5) コンクリートの最高温度が高くなるほどコア強度の強度増進は小さくなる。

(6) HF および L を用いたコンクリートにおいては，最高温度が N を用いたコンクリートほど高くならず，材齢 28 日以降の強度増進があるので，標準養生材齢 28 日強度に対する材齢 91 日コア強度の比は 1.0 を上回る。

(7) HF セメントおよび L セメントを用いたコンクリートは，調合強度の管理材齢を長期にすることによって過剰設計とならず，適切な調合が選定できる。

［謝辞］

実験協力をいただきました，(株)ポゾリス物産，太平洋セメント（株）およびエバタ（株）三郷工場の関係各位に謝意を表します。

参考文献

［1］NewRC 総プロ委員会：平成 4 年度高強度コンクリート分科会報告書，(財)国土開発技術研究センター，pp.4-18-6，1993.3

［2］桝田佳寛，佐藤幸惠，友澤史紀：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調合強度，日本建築学会構造系論文集，第 537 号，pp.13-20，2000.11

［3］NewRC 総プロ委員会：平成 4 年度工法分科会報告書，(財)国土開発技術研究センター，pp.4-2-55，1993.3

［4］加納嘉，蓮尾孝一：高強度コンクリートの強度発現に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.801-804，1998.9