

各種セメントを用いた高強度コンクリートの調合とS値の検討

Investigation for Mix Proportion and S value of High-Strength Concrete with Various Cement

立松 和彦*

山崎 順二*

要 旨

普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、低熱ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、シリカフェームセメントを用いて高強度コンクリートの実機試験を行い、柱模擬試験体を作製してコンクリート温度やコア強度などを調査した。その結果、使用するセメントの種類によっては材齢28日以後の強度の伸びが3倍も異なること、部材の断面寸法や打設時のコンクリート温度によってコンクリートの最高温度、強度発現およびS値が異なってくることを示した。

キーワード：高強度コンクリート／低熱セメント／調合／S値／コア強度／実大試験／コンクリート温度

1. はじめに

近年、建物の高層化やセメント・混和材料の高性能化により、設計基準強度が36N/mm²を超える高強度コンクリートを、鉄筋コンクリート構造や鋼管コンクリート構造に適用する事例が増えている。一方で、平成12年5月の建築基準法改正によって、JIS A 5308-1997「レディミクストコンクリート」以外のコンクリート（例えば、呼び強度40を超えるもの、高流動コンクリートなど）を使用する場合には、性能評価機関によって材料の性能評価を受け、国土交通大臣の材料認定を得て使用することが求められる。その審査では、個々のコンクリートの材料特性を考慮した調合設計に関する技術的内容も審査の対象となり、JASS5-1997「高強度コンクリート」をベースにして、各社がそれぞれに積み重ねてきた実験結果や施工実績に基づいた合理的な考え方で対応している。ポイントとなるのは、セメントの種類および打設時期に応じたS値の設定方法、実際の強度管理における供試体の管理方法（例えば簡易断熱養生の管理材齢や養生方法）、個々のプラントにおける実機での強度発現性の把握などである。

本報告は、高強度コンクリートの実機試験（実大規模の部材を打設）を行い、その結果から調合・温度・強度特性などについてまとめたものである。

2. 高強度コンクリートのS値

高強度コンクリートの部材はセメントの水和発熱による高温の履歴を受けるので、その強度増進に弊害が生じる場合がある。そのため、高強度コンクリートの調合設

表－1 実験概要（その1）

<工場、セメント、水セメント比>

工場	セメント	水セメント比（%）		
		夏期	標準期	冬期
A工場	N	—	—	32
	L	28, 32	32	32
	SFC	20, 24	—	20
	SFC+N(S7N3)	24	—	24
	SFC+N(S6N4)	28	32	28, 32
B工場	N	—	32	—
	L	—	30	—
	HF	32	32	32
C工場	N	—	32	—
	BB	—	32	—
D工場	N	34	—	—
	L	32	—	—
	BB	38	—	38
E工場	N	36	—	—
	HF	34	—	—
	BB	38	—	38
F工場	N	34	—	—
	L	32	—	—
	BB	38	—	38
G工場	BB	—	34	—
H工場	BB	—	32	—
I工場	N	—	—	34, 41
	SFC	—	—	20
	SFC+N(S7N3)	—	—	23
	SFC+N(S3N7)	—	—	28
	BB	35	—	—
J工場	L	—	36	—
K工場	HF	—	30	—
	HF	—	40	—

備考） SFC+N において、S7N3はSFC70%, N30%の混合を示す。

計においては、要求される強度に対して、セメントの種類の選定、S値の設定を適切に行って定める必要がある。なかでも、使用するセメントの種類、部材の断面寸法、打設時のコンクリート温度が与える影響は大きく、これらの要因によってコンクリートの温度履歴や強度発現が異なり、S値も異なってくる。なお、S値は通常、下記

*建築工法・材料研究室

(1)式のように定義され、 $_{28}S_{91}$ 、 $_{28}S_{56}$ 、 $_{91}S_{91}$ の値が採用されることが多い。なお、マイナスのS値を設定することはない。

$$mSn = \text{材齢}m\text{日の標準養生強度} - \text{材齢}n\text{日のコア強度} \quad (1)$$

ここで、

m：調合強度の管理材齢（日）

n：構造体強度の管理材齢（日）

3. 実験概要

実験は、平成12年～14年に11工場で行ったもので、延べ46種類の調合のコンクリートについて実施した。表－1に実験を行った工場、セメント、水セメント比を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント（以下Nセメント）、高炉セメントB種（以下BBセメント）、低熱ポルトランドセメント（以下Lセメント）および中庸熱ポルトランドセメント（以下HFセメント）、シリカフェームセメント（以下SFCセメント）およびシリカフェームセメントに普通ポルトランドセメントを練混ぜ時に混合使用したもの（以下SFC+Nセメント）を用いた。水セメント比は、NセメントではW/C32%～41%、BBセメントではW/C32%～38%、LセメントおよびHFセメントではW/C32%～40%、SFCセメントSFC+NセメントではW/C20%～32%である。単位水量は175kg/m³以下とし、高性能AE減水剤を使用している。

なお、Nセメント、BBセメント、Lセメント、HFセメントはそれぞれのJIS規格に適合するものを用いている。SFCセメントは、NewRC総プロ「高強度コンクリート用セメントの品質基準（案）」に適合するものであり、ベースセメント（JIS R 5210 に適合する低熱ポルトランドセメント）に、シリカフェーム（JIS A 6207に適合するコンクリート用シリカフェーム）を混合している。

各生コンプラントの実機で練混ぜたコンクリートを、実大の柱模擬試験体に打設し、コンクリート温度の測定および、材齢28, 56, 91日の標準水中養生供試体とコア供試体の圧縮強度試験を行った。柱模擬試験体は、900×900～1000×1300mmであり、上下に150mmの断熱材を配置している。

4. 試験結果および考察

表－2は、試験体それぞれのセメント量、打設時のコンクリート温度、部材断面寸法、コンクリート最高温度を、表－3は強度試験結果を示したものである。なお、

表－2 実験概要（その2）
＜セメント量、コンクリート温度、部材寸法、最高温度＞

セメント	ブランド	W/C (%)	セメント量 (kg/m ³)	コンクリート温度(℃)	部材断面寸法 (mm)	最高温度 (℃)
N	A	32.0	547	10.5	1050×1050	71.3
N	A	32.0	547	33.0	1050×1050	99.1
N	B	32.0	547	21.5	950×950	78.0
N	C	32.0	547	19.0	950×950	72.0
N	D	34.0	515	31.0	1000×1200	89.6
N	E	36.0	486	31.0	1000×1200	88.0
N	F	34.0	515	32.0	1000×1200	88.9
N	I	34.0	515	13.0	1050×1050	63.8
N	I	41.0	427	12.4	1050×1050	53.9
BB	C	32.0	547	20.0	950×950	67.0
BB	D	38.0	461	30.5	1000×1200	81.1
BB	D	38.0	461	15.0	1000×1200	58.2
BB	E	38.0	461	30.0	1000×1200	82.3
BB	E	38.0	461	12.0	1000×1200	53.4
BB	F	38.0	461	30.0	1000×1200	82.3
BB	F	38.0	461	13.0	1000×1200	59.8
BB	G	34.0	515	24.0	1000×1000	71.4
BB	H	32.0	547	23.5	1000×1000	72.4
BB	I	35.0	500	32.8	1050×1050	91.5
L	A	28.0	625	31.0	1050×1050	71.4
L	A	32.0	547	30.0	1050×1050	66.5
L	A	32.0	547	23.5	1050×1050	67.2
L	A	32.0	547	9.0	1050×1050	33.6
L	B	30.0	583	17.0	950×950	49.0
HF	B	32.0	547	20.0	950×950	52.0
HF	B	32.0	547	29.0	950×950	68.4
L	D	32.0	547	29.0	1000×1200	65.4
HF	E	34.0	515	29.0	1000×1200	70.6
L	F	32.0	547	31.0	1000×1200	67.7
L	J	36.0	459	22.5	1000×1300	—
HF	K	30.0	550	16.5	1000×1300	57.1
HF	K	40.0	425	15.0	1000×1300	47.3
SFC	A	20.0	875	32.1	900×900	81.1
SFC	A	24.0	729	31.9	900×900	84.8
SFC	A	20.0	875	15.0	1050×1050	72.4
SFC+N(S7N3)	A	24.0	510+219	31.2	900×900	91.8
SFC+N(S7N3)	A	24.0	729	15.0	1050×1050	70.1
SFC+N(S6N4)	A	28.0	375+250	30.4	1050×1050	92.3
SFC+N(S6N4)	A	32.0	547	25.0	1050×1050	79.6
SFC+N(S6N4)	A	28.0	625	14.0	1050×1050	71.0
SFC+N(S6N4)	A	32.0	547	9.5	1050×1050	52.1
SFC	A	32.0	547	33.0	1050×1050	77.7
SFC+N(S6N4)	A	32.0	328+219	33.0	1050×1050	83.5
SFC	I	20.0	875	13.5	1050×1050	60.6
SFC+N(S7N3)	I	23.0	533+228	15.4	1050×1050	68.4
SFC+N(S3N7)	I	28.0	188+438	15.1	1050×1050	69.3

以下の図では、LセメントおよびHFセメントはともに低発熱形のセメントであるので、区別せずにひとつの区分（L、HFセメント）として表している。

(1) 標準水中養生での圧縮強度

図－1に、セメント水比と材齢28日および91日における標準水中養生供試体の圧縮強度との関係を示す。材齢28日から91日までの強度の平均的な伸びは、Nセメントで約7 N/mm²、BBセメントで約10N/mm²、Lセメント、HFセメントで約20N/mm²、SFCセメント、SFC+Nセメントで10～15N/mm²であった。Lセメント、HFセメントはNセメントの約3倍伸びる結果となり、セメントの種類による差異が顕著である。これより、Lセメント、HFセメント、SFCセメント、SFC+Nセメントを用いる場合に

表－3 強度試験結果

セメント	プラン	W/C (%)	コンクリート温度	標準養生			コア (中央部)		
				28日	56日	91日	28日	56日	91日
N	A	32.0	10.5	90.4	93.6	—	77.5	77.2	82.0
N	A	32.0	33.0	96.0	101.0	109.3	84.1	86.2	90.0
N	B	32.0	21.5	89.5	94.5	98.3	75.1	79.5	83.5
N	C	32.0	19.0	98.7	100.5	99.9	69.2	76.7	80.6
N	D	34.0	31.0	79.6	86.2	89.8	65.8	67.3	67.6
N	E	36.0	31.0	75.0	81.9	87.2	52.8	58.3	58.1
N	F	34.0	32.0	74.0	80.4	79.1	58.9	59.6	59.8
N	I	34.0	13.0	73.5	78.8	80.1	63.2	65.7	69.6
N	I	41.0	12.4	54.1	59.1	60.2	47.3	52.0	56.3
BB	C	32.0	20.0	94.7	101.8	100.4	68.3	76.4	81.6
BB	D	38.0	30.5	67.5	75.6	77.7	59.4	61.8	61.9
BB	D	38.0	15.0	74.4	81.3	85.5	61.2	71.3	71.7
BB	E	38.0	30.0	64.5	74.0	80.9	50.5	54.5	52.9
BB	E	38.0	12.0	63.4	71.6	72.3	58.7	61.7	62.2
BB	F	38.0	30.0	64.9	74.9	74.0	54.4	58.5	59.1
BB	F	38.0	13.0	67.5	73.5	79.0	62.5	62.8	58.9
BB	G	34.0	24.0	85.0	97.3	98.4	66.0	61.3	64.2
BB	H	32.0	23.5	80.2	91.5	94.6	67.1	64.3	63.7
BB	I	35.0	32.8	69.0	—	—	66.5	70.4	—
L	A	28.0	31.0	99.0	111.1	120.8	87.6	93.2	94.1
L	A	32.0	30.0	86.6	101.2	105.1	96.9	96.9	104.1
L	A	32.0	23.5	81.3	93.9	99.7	86.5	91.7	102.0
L	A	32.0	9.0	78.7	92.2	—	62.1	75.5	81.8
L	B	30.0	17.0	79.8	94.1	99.9	73.3	87.0	88.2
HF	B	32.0	20.0	85.2	99.4	104.0	75.9	87.1	87.7
HF	B	32.0	29.0	94.1	107.3	113.3	81.4	90.7	91.3
L	D	32.0	29.0	79.9	102.7	105.0	84.5	83.1	89.6
HF	E	34.0	29.0	83.4	98.5	103.0	79.7	84.5	81.5
L	F	32.0	31.0	86.1	98.5	100.9	82.7	86.8	90.0
L	J	36.0	22.5	66.6	77.0	—	62.8	67.6	—
HF	K	30.0	16.5	101.7	109.3	117.7	96.4	106.3	107.3
HF	K	40.0	15.0	78.3	85.7	90.6	77.0	85.9	88.9
SFC	A	20.0	32.1	129.6	148.4	152.7	123.6	123.4	124.5
SFC	A	24.0	31.9	112.7	124.6	128.1	96.8	96.6	99.2
SFC	A	20.0	15.0	125.9	133.1	—	111.3	125.7	121.0
SFC+N	A	24.0	31.2	112.7	119.6	125.1	94.0	97.1	101.3
SFC+N	A	24.0	15.0	109.4	118.3	—	93.7	99.8	100.6
SFC+N	A	28.0	30.4	104.1	110.9	116.8	92.2	90.0	89.6
SFC+N	A	32.0	25.0	87.5	96.6	101.7	80.9	80.5	84.5
SFC+N	A	28.0	14.0	103.0	107.0	—	80.5	91.1	92.3
SFC+N	A	32.0	9.5	84.0	92.4	—	68.7	75.2	80.2
SFC	A	32.0	33.0	95.6	107.1	115.8	82.2	84.6	87.2
SFC	A	32.0	33.0	91.3	100.5	106.2	73.2	78.8	79.7
SFC	I	20.0	13.5	119.6	120.4	122.9	109.0	111.8	118.3
SFC+N	I	23.0	15.4	108.0	112.8	118.0	95.3	96.7	98.9
SFC+N	I	28.0	15.1	100.5	106.4	105.5	82.2	87.7	87.0

は、材齢28日以降の強度増進を適切に考慮することで、より合理的な調査設計が可能になることがわかる。

(2) 圧縮強度比

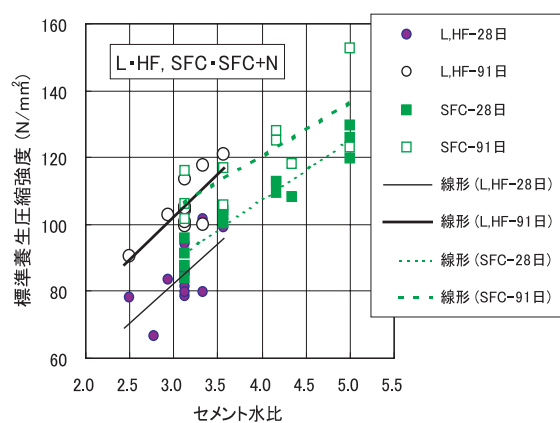
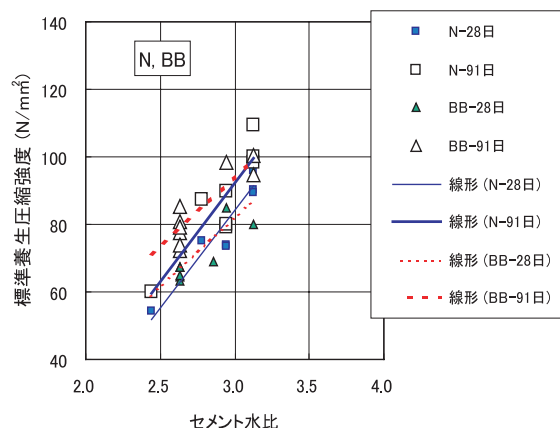
高強度コンクリートの部材はセメントの水和発熱による高温の履歴を受けるので、その強度増進に弊害が生じる場合がある。それらについて広範囲に検討するために、圧縮強度比 mSS_n を(2)式により求め、比較した。

$$\text{圧縮強度比}mSS_n = \frac{\text{材齢}n\text{日のコア強度}}{\text{材齢}m\text{日の標準養生強度}} \quad (2)$$

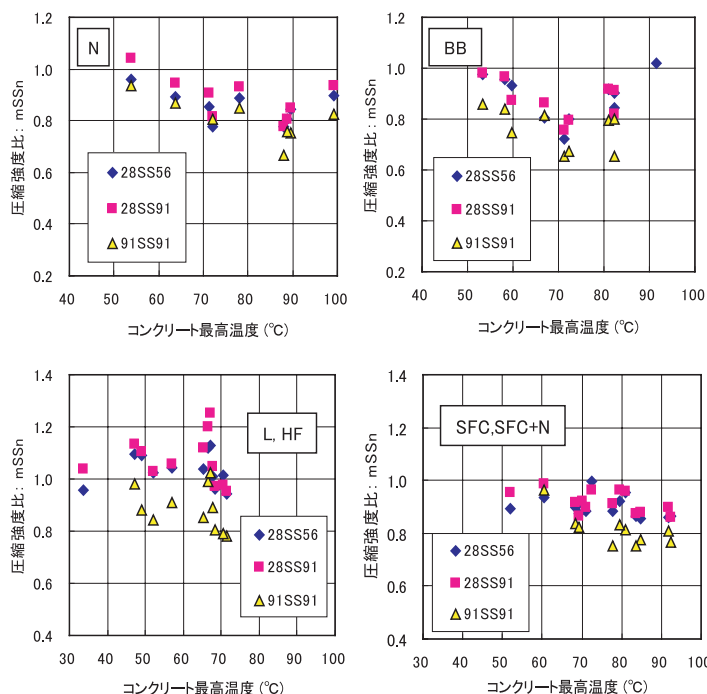
ここで、

m ：調査強度の管理材齢（日）

n ：構造体強度の管理材齢（日）



図－1 セメント水比と圧縮強度



図－2 コンクリート最高温度と圧縮強度比

例えば、 $_{28}SS_{56}$ は、(材齢56日のコア強度／材齢28日の標準養生強度)を示している。図－2に、コンクリート

最高温度と圧縮強度比との関係を示す。コンクリート最高温度と圧縮強度比の関係では、NおよびBBセメントでは、従来から指摘¹⁾されているように、最高温度の上昇に伴って強度比が低下する傾向が認められる。L, HFセメントでは、強度比の低下はほとんど見られない。SFC, SFC+Nセメントでは、やや低下するようであるが、これはNセメントを混合使用していることが原因と考えられる。これらの結果から、調合強度の管理を材齢28日とし、構造体の強度管理を91日コア強度あるいは56日コア強度とする場合、圧縮強度比を0.85以上にするためには、NおよびBBセメントではコンクリートの最高温度を70℃程度以下に抑える必要があると推察される。L, HFセメントでは、コンクリートの最高温度によらず、圧縮強度比を0.90程度以上確保できると考えられる。

SFC, SFC+Nセメントでも同様に、コンクリートの最高温度によらず、圧縮強度比を0.85程度以上確保できると考えられるが、Nセメントの混合比率が大きくなる場合には事前の再確認が必要と思われる。

(3) コンクリートの最高温度

コンクリートの硬化に伴う温度上昇は、使用するセメントの種類、セメント量、部材の断面寸法、打設時のコンクリート温度などに関係していると考えられる。そこで、図-3に、コンクリート最高温度とコンクリートの単位温度上昇率（ $\Delta T_{AC=100}$ ）との関係を示す。なお、 $T_{AC=100}$ は(3)式²⁾より求めた。

$$\Delta T_{AC=100} = (T_{\max} - t) / ((C/100) \times (A)^{0.5}) \quad (3)$$

ここで、

$T_{\max}$ ：コンクリートの最高温度（℃）

t ：打設時のコンクリート温度（℃）

C ：単位セメント量（kg/m³）

A ：柱模擬試験体の断面積（m²）

図より、セメントの種類によって上昇率が異なり、NおよびBBセメントの上昇率は、L, HFセメントおよびSFC, SFC+Nセメントの上昇率よりも大きいこと、打設時のコンクリート温度が高くなると上昇率も大きくなる傾向にあること、などがわかる。データを充実させることで、打設時のコンクリート温度、セメント量および部材寸法からコンクリートの最高温度を推定することができると考えられる。

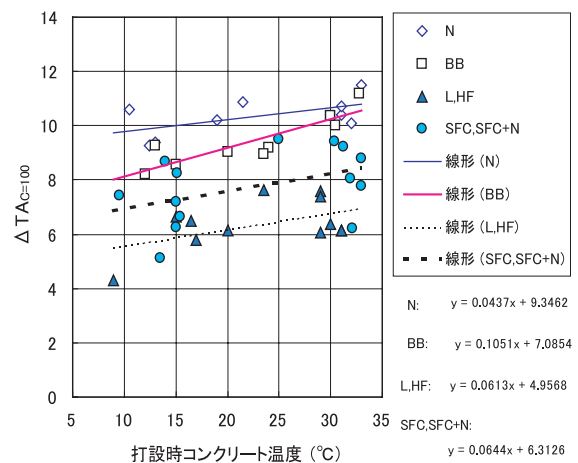


図-3 打設時のコンクリート温度と単位温度上昇率

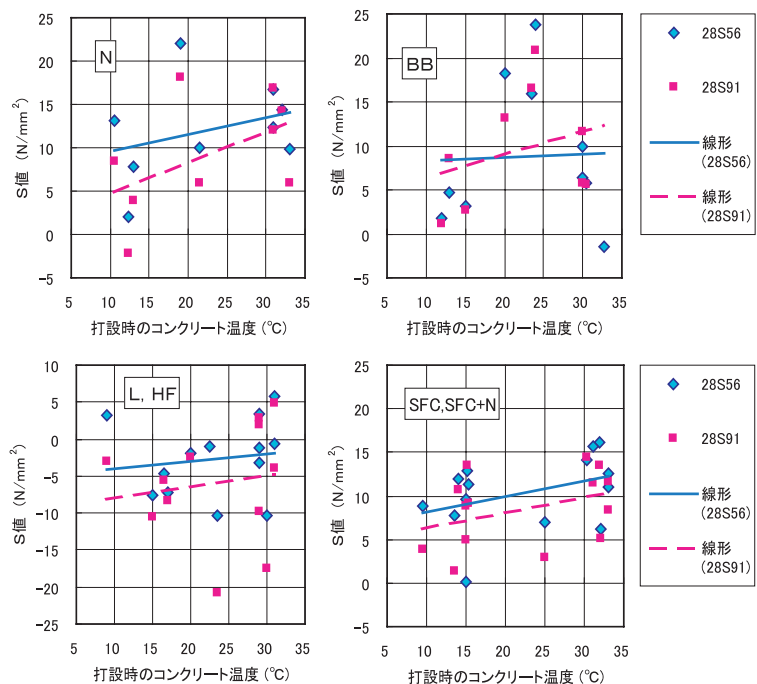


図-4 打設時のコンクリート温度とS値

また、図-4は打設時のコンクリート温度とS値との関係を示したものである。NおよびBBセメントでは同様に、打設時のコンクリート温度が高くなるとS値も大きくなること、L, HFセメントでは打設時のコンクリート温度が高くなる時期でも、S値を5～10N/mm²程度以下にできることがわかる。SFC, SFC+NセメントではNセメントに似た傾向を示しているが、SFCセメントとNセメントとの混合割合やセメント量などを区分して検討する必要があると推察される。

(4) 構造体強度の検討

図-5は標準28日強度とS値の関係を示しており、NおよびBBセメントでは、強度が高くなるにつれてS値も大きくなっている。これは、強度が高くなると単位セメント量もほぼ直線的に大きくなり、水和発熱によりコンクリートの最高温度も必然的に高くなるため、コア強度の増進が阻害されることによると考えられる。L, HFセメントおよびSFC, SFC+Nセメントではデータがややばらついており、明瞭な関係は認められない。

図-6は標準28日強度とコア91日強度の関係を示したもので、直接的に、それらの関係を示している。文献³⁾では、Nセメントの場合、91日コア強度と標準養生4週強度の比は、柱で0.99、梁で0.95としているが、今回の試験結果（柱部材に相当する）では、0.88程度の値である。BBセメントは、Nセメントと同様の傾向である。L, HFセメントでは1.07程度となっており、S値（ここでは $_{28}S_{91}$ ）を小さく（0N/mm²程度に）できる可能性があることがわかる。SFC, SFC+NセメントではNセメントに似た傾向を示しているが、比率は約0.92となり、Nセメントよりもやや大きく、最も相関性が高い結果となった。これより、SFC+NセメントにおいてNセメントの混合割合に幅があっても、標準養生供試体の強度からコア強度を推定することができると考えられる。

5. まとめ

高強度コンクリートの実機試験結果から、以下の知見が得られた。

- ・材齢28日から91日までの強度の伸びはセメントの種類による差異が顕著であり、Lセメント、HFセメント、SFCセメント、SFC+Nセメントを用いる場合には、材齢28日以降の強度増進を適切に考慮することで、より合理的な調査設計が可能になる。
- ・セメントの種類によってコンクリートの単位温度上昇率が異なり、打設時のコンクリート温度が高くなると上昇率も大きくなる傾向にある。
- ・調査強度の管理を材齢28日とし、構造体の強度管理を91日コア強度あるいは56日コア強度とする場合、圧縮強度比を0.85以上にするためには、NおよびBBセメントではコンクリートの最高温度を70℃程度以下に抑える必要があると推察される。

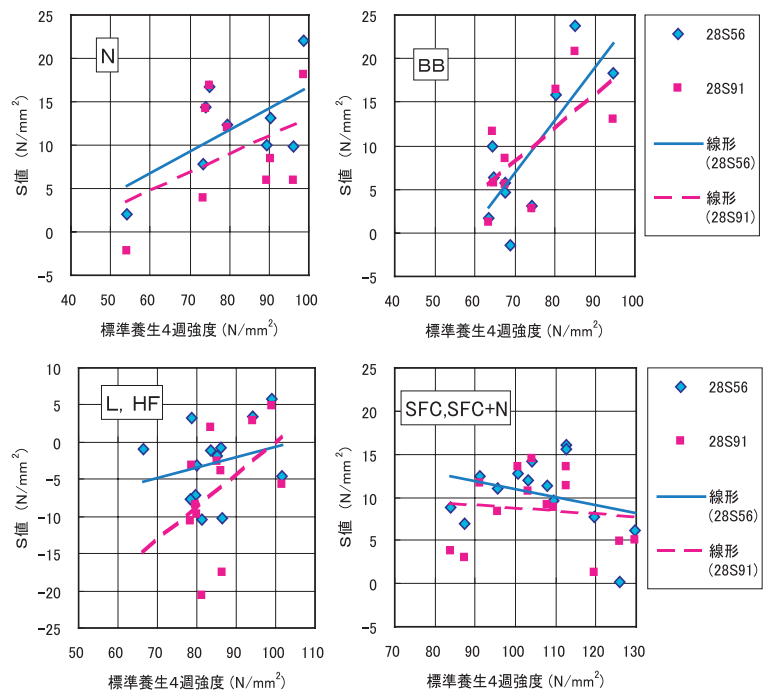


図-5 標準28日強度とS値

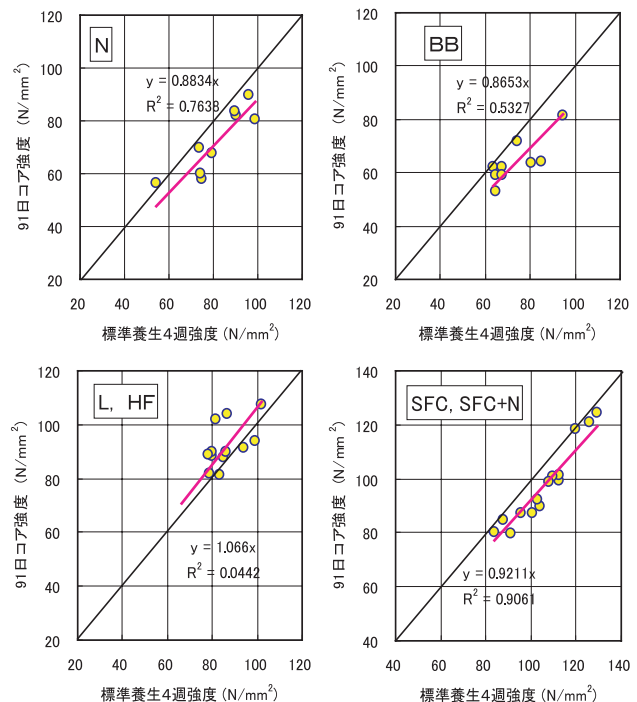


図-6 標準28日強度とコア91日強度

- ・L, HFセメントでは、S値（ここでは $_{28}S_{91}$ ）を小さく（0N/mm²程度に）できる可能性がある。

なお、これらの知見は限られた範囲内の実験により得られたものであり、今後さらにデータを蓄積し、高強度コンクリートの合理的な調査設計に役立てていきたい。

[謝 辞]

本報をまとめるにあたり、実機試験にご協力いただきました伊丹コンクリート工業、海山コンクリート西宮工場、大宮生コン、新関西菱光大阪工場、シンワ生コン吹田工場、シンワ生コン港工場、泉北コンクリート工業、泉北菱光、タイコー枚方工場、秩父生コン浦和工場、阪南アサノコンクリート泉北工場（順不同）の諸氏に改めて深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 榎田佳寛、佐藤幸恵、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
- 2) 蓮尾孝一：高強度コンクリートの調合設計と実施事例、三井建設技術研究報告 第26号、pp.39-44, 2002.3
- 3) 佐藤幸恵、榎田佳寛：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp.1061-1062, 2002.8