

# 論文 高強度鋼管充てんコンクリートの使用材料に関する実験的検討

依田 和久\*1・今西 信晶\*2・浅岡 茂\*3

**要旨:** 本論文は、設計基準強度 (Fc) 80~100N/mm<sup>2</sup> 程度の高強度鋼管充てんコンクリートを対象として主にセメント種類について実験的に検討したものである。セメント種類は中庸熱, 低熱, シリカフェームをプレミックスしたセメント2種類のほかに、施工性や経済性を考慮して中庸熱セメントに、シリカフェームをプレミックスしたセメントを1:1に混合したセメントを対象とした。実験の結果、Fc80 N/mm<sup>2</sup>には中庸熱セメントを、Fc100 N/mm<sup>2</sup>には中庸熱セメントにシリカフェームをプレミックスしたセメントを選定するとともに、Fc90 N/mm<sup>2</sup>程度の中間領域では強度性状と施工性から混合したセメントの有用性を明らかにした。

**キーワード:** 高強度コンクリート, 鋼管充てんコンクリート, セメント, 粗骨材

## 1. はじめに

近年、高強度コンクリート用のセメントについて各種検討が行われている。例えば、設計基準強度 (Fc) 80N/mm<sup>2</sup>では中庸熱セメント(記号 M)や低熱セメント (同 L)が、Fc100N/mm<sup>2</sup>では、これらのセメントにシリカフェームをプレミックスしたセメント〔以下、中庸熱シリカフェームセメント(同 MSF), 又は低熱シリカフェームセメント(同 LSF)という〕が利用されつつある<sup>1, 2)</sup>。これらセメントを用いたコンクリートの一般的な用途は超高層の鉄筋コンクリート造であり、施工時においてバケット打ちによるなど、必ずしもポンプ圧送のような施工性は求められない。一方で、**図-1**に示すような鋼管充てんコンクリート造に適用しようとする場合、施工方法はポンプ圧送による圧入が主流であり<sup>3)</sup>、目標とするスランブフローは60~65cm程度の流動性や自己充てん性に優れたコンクリートが必要となる。さらに、ダイアフラム下面に空隙を形成しないように沈降量やブリーディング量についても目標品質が定められている<sup>4)</sup>。高強度鋼管充てんコンクリートへの適用の観点から Fc80~100N/mm<sup>2</sup>程度のコンクリートを対象にセメントや粗骨材種類を網羅的に検討した研究は少ない。特に施工性や経済性を考慮して中庸熱セメントに、中庸熱シリカフェームセメント又は低熱シリカフェームセメントを1:1で混合したものを検討した例は見られない。ここでは、セメントの種類を中心に Fc80~100N/mm<sup>2</sup>程度の高強度鋼管充てんコンクリートの使用材料について実験的に検討した結果について述べるものである。

## 2. 実験概要

実験は以下に示すとおり、I~IIIに分けて行った。

実験 I : フレッシュ性状と強度性状からセメントおよび粗骨材種類について検討した。

実験 II : 実験 I の結果から選定した材料によるコンクリートについて、沈降、ブリーディング、自己収縮ひずみによる体積変化について検討した。

実験 III : セメントを3種類に絞込み、それぞれ水セメント比を3水準設定し、沈降、ブリーディング、施工性や強度性状について検討した。

実験に用いた使用材料を**表-1**に、コンクリートの種類と調合を**表-2**に、試験項目および方法を**表-3**に示す。セメント種類において Fc90 N/mm<sup>2</sup>程度を M や L で実現しようとする水セメント比は25%程度以下となり施工性が懸念される。一方、MSF や LSF を用いるとコスト高となる。そこで、これらのセメントの中間領域となるように、**表-1**に示すもののほかに、M に MSF 又は LSF を1:1で混合したものについても検討した。また、粗骨材種類では、既往の研究成果<sup>5)</sup>を踏まえ、安山岩碎石と硬質砂岩碎石について比較を行った。

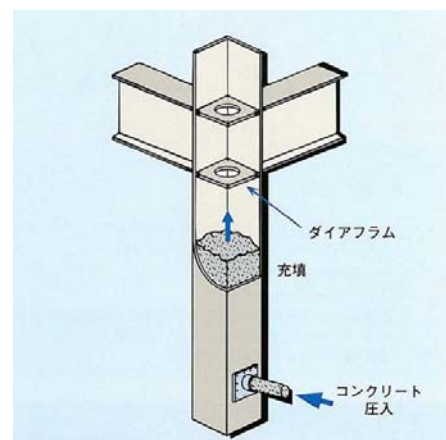


図-1 内部補強形式の鋼管充てんコンクリート構造<sup>3)</sup>

\*1 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ 主任研究員

\*3 鹿島 建築管理本部 建築技術部技術コンサルグループ 次長

コンクリートの水セメント比および単位水量は、ワーカビリティと強度発現を勘案して既往の資料を参考に試し練りにより定めた。目標値は練上り時点で、スランプフロー $65\pm 10\text{cm}$ 、空気量 $2\pm 1.5\%$ とした。スランプフローは施工性、材料分離抵抗性から最大 $75\text{cm}$ とした。

これは本実験ではセメント量が多く、水セメント比が20%程度以下のコンクリートが多いことから判断した。簡易断熱養生の概要を図-2に示す<sup>5)</sup>。熱電対を中心部に設置した供試体で打設後1週間程度温度履歴を測定した。

表-1 使用材料

区分	種類(記号)	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	吸水率 (%)
セメント	中庸熱(記号M)	3.21	—
	低熱(同L)	3.22	—
	中庸熱セメントにシリカフュームをブレックスしたもの(同MSF)	3.07	—
	低熱セメントにシリカフュームをブレックスしたもの(同LSF)	3.08	—
細骨材 <sup>*1</sup>	硬質砂岩砕砂	$2.66^{*2}$	1.26
	山砂	$2.57^{*2}$	2.40
粗骨材	安山岩砕石	$2.63^{*2}$	2.41
	硬質砂岩砕石	$2.66^{*2}$	0.39
水	上水道水	1.00	—
化学混和剤	高性能AE減水剤・ホリカルボン酸系	1.05	—

\*1.硬質砂岩砕砂と山砂を質量比7:3で混合(F.M.2.67)した。\*2.表乾密度

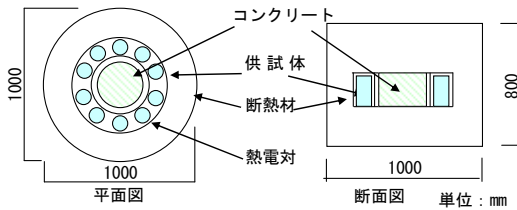


図-2 簡易断熱養生の概要<sup>5)</sup>

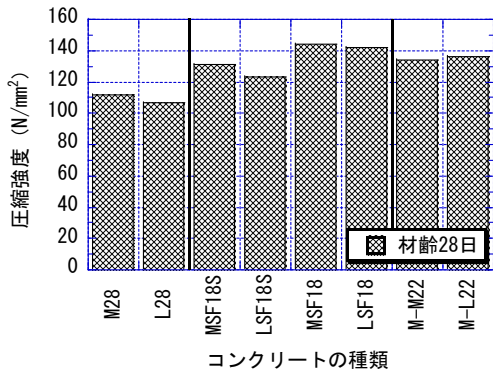


図-3 コンクリートの圧縮強度(標準水中養生)

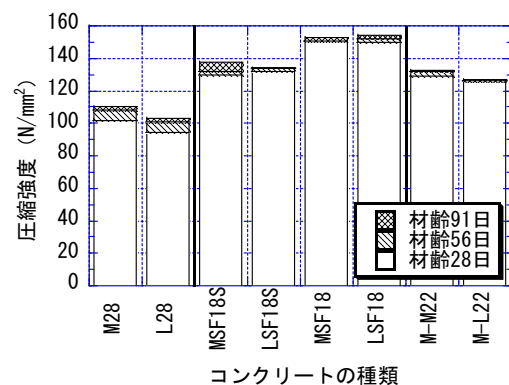


図-4 コンクリートの圧縮強度(簡易断熱養生)

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 実験 I セメントおよび粗骨材種類の検討

コンクリートは全て目標値であるスランプフロー $65\pm 10\text{cm}$ 、空気量 $2\pm 1.5\%$ を満足した。セメント種類および設定した水セメント比によりワーカビリティに多少違いはあるものの、実用上問題ないものであった。

材齢28日標準水中養生強度を図-3に、材齢28, 56, 91日の簡易断熱養生強度を図-4に示す。M28とL28,

表-2 コンクリートの種類と調査

実験	記号	セメントの種類	砕石岩種	W/C (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 (%)
I	M28	M	安山岩	28	170	47.8
	L28	L		28	170	47.8
	MSF18S	MSF	硬質砂岩	18	160	38.9
	LSF18S	LSF		18	160	39.0
	MSF18	MSF	安山岩	18	160	38.9
	LSF18	LSF		18	160	39.0
	M-M22	MとMSFを1:1で混合		22	165	43.8
	M-L22	MとLSFを1:1で混合		22	165	43.8
II	M28	M	安山岩	28	170	47.8
	L28	L		28	170	47.8
	M-M18	MとMSFを1:1で混合		18	165	37.9
	MSF18	MSF		18	160	38.9
III	M33	M	安山岩	33	170	50.1
	M28			28	170	47.8
	M23			23	170	44.1
	M-M30	MとMSFを1:1で混合		30	165	49.5
	M-M25			25	165	46.5
	M-M20			20	165	41.4
	MSF22	MSF		22	160	44.5
	MSF18			18	160	38.9
	MSF14			14	160	27.7

表-3 試験項目及び方法

区分	試験項目	試験方法	実験			供試体 形状・寸法
			I	II	III	
フレッシュ	スランプフロー <sup>*1</sup>	JIS A 1150	○	○	○	—
	空気量	JIS A 1128	○	○	○	—
	練上り温度	JIS A 1156	○	○	○	—
	ワーカビリティ	目視	○	○	○	—
硬化過程	沈降	JASS 5T-503	—	○	○	$\phi 150 \times h300\text{mm}$
	ブリーディング	JIS A 1123	—	○	○	$\phi 250 \times h285\text{mm}$
	自己収縮ひずみ	JCI-SQA4	—	○	—	$100 \times 100 \times 400\text{mm}$
	凝結	JIS A 1147	—	○	—	$\phi 150 \times h150\text{mm}$
強度 <sup>*2</sup>	簡易断熱養生 <sup>5)</sup> の温度履歴	JASS 5T-606	○	—	○	$\phi 100 \times h200\text{mm}$
	圧縮強度	JIS A 1108	○	—	○	$\phi 100 \times h200\text{mm}$
	静弾性係数	JIS A 1149	○	—	○	

\*1.50cmフロー到達時間も合わせて測定した

\*2.実験 I では標準水中養生は材齢28日, 簡易断熱養生は材齢28・56・91日で試験した  
実験 III では標準水中養生は材齢7・28・91日, 簡易断熱養生は材齢28・91日で試験した

MSF18S と LSF18S, MSF18 と LSF18, M-M22 と M-L22 において同一水セメント比におけるセメント種類が圧縮強度に及ぼす影響は 5%程度以下であったが、中庸熱セメント>低熱セメントの傾向が見られた。これに対し、MSF18S と MSF18, LSF18S と LSF18 において粗骨材種類の影響は、安山岩砕石を用いたものは、硬質砂岩砕石を用いたものに比べ圧縮強度は 7~17%大きくなった。本実験の範囲では、高強度を得るには、硬質砂岩砕石よりも安山岩砕石が有利であるといえる。

標準水中養生強度(材齢 28 日)と簡易断熱養生強度(材齢 91 日)の養生別圧縮強度の関係を図-5 に示す。標準水中養生強度に対する簡易断熱養生強度の比は、M-L22 が 0.94 と最も小さく、次いで L28 の 0.96, M28 の 0.98, M-M22 の 0.99 の順であり、28 日標準水中養生強度 $\geq$ 材齢 91 日簡易断熱養生強度の関係にあった。その他のセメント即ちシリカフェームをブレミックスしたセメントは全て 1.0 以上であり、材齢 28 日標準水中養生強度<材齢 91 日簡易断熱養生強度の関係にあった。

### 3.2 実験Ⅱ コンクリートの体積変化の検討

実験Ⅰの強度発現性の結果からセメントは、中庸熱セメントを中心とし、M, MSF, M-M を基本とし、比較用に L を加え 4 種類とし、粗骨材は安山岩砕石を選定して実験を行った。

コンクリートは全て目標値であるスランブフロー  $65\pm 10\text{cm}$ 、空気量  $2\pm 1.5\%$  を満足した。ブリーディング量は M28 のみ  $0.023\text{cm}^3/\text{cm}^2$  であり、その他は全て 0 であった。これらはいずれも新都市ハウジング協会の技術基準に示されている目標値  $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$  以下を十分満足した。

コンクリートの沈降量を図-6 に示す。全ての沈降は、供試体作製後測長を開始してから約 2 時間程度で収束している。最終的な沈降量は、L28 および M28 が 0.74mm, MSF18 が 0.81mm, M-M18 が 1.06mm であった。いずれも新都市ハウジング協会の技術基準に示されている目標値 2mm 以下を満足した。

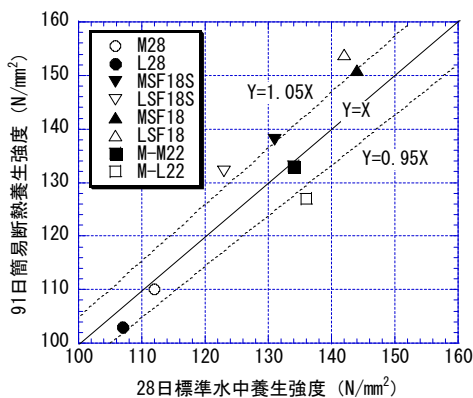


図-5 養生別圧強度の関係 (実験Ⅰ)

コンクリートの自己収縮ひずみを図-7 および図-8 に示す。自己収縮ひずみは、コンクリートの線膨張係数を  $10\mu/\text{C}$  と仮定して熱膨張ひずみを取り除き、初期値はコンクリートの凝結の始発時間とした。自己収縮ひずみは測長 7 日程度でほぼ収束しており、2 本の供試体の平均値は、L28 は  $92\mu\text{m}$ , M28 は  $160\mu\text{m}$ , M-M18 は  $396\mu\text{m}$ , MSF18 は  $208\mu\text{m}$  であった。同一水セメント比で比べると、M28 は L28 に対し 1.7 倍程度、M-M18 は MSF18 に対し 1.9 倍程度となった。

これらのコンクリートは沈降量の点から鋼管充てんコンクリートとして実用上利用可能である。ただし、自己収縮ひずみが比較的大きかった M-M は施工前に模擬試験体等で空隙形成の有無を確認することが望ましい。

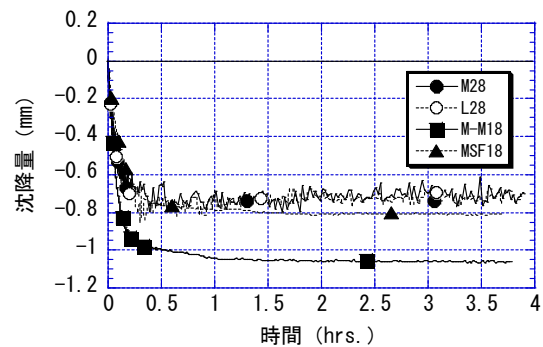


図-6 コンクリートの沈降量

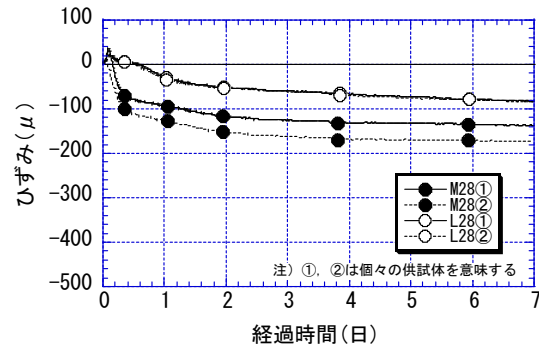


図-7 コンクリートの自己収縮ひずみ (L28, M28)

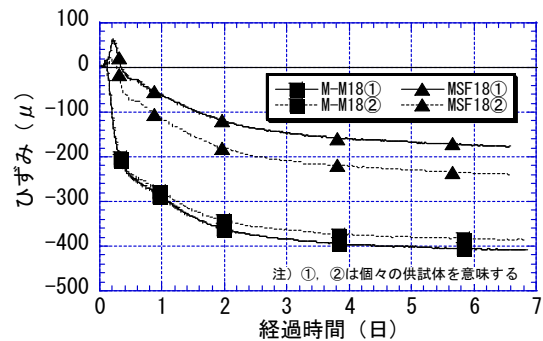


図-8 コンクリートの自己収縮ひずみ (M-M18, MSF18)

### 3.3 実験Ⅲ コンクリートの各種性状の検討

セメント種類をM, MSF, M-Mの3種類とし、粗骨材は安山岩砕石を選定して実験を行った。

コンクリートは全て目標値であるスランプフロー65±10cm, 空気量2±1.5%を満足した。

水セメント比と50cmフロー到達時間を図-9に示す。セメント種類に関わらず、水セメント比が小さくなるに従い、50cmフロー到達時間も大きくなる傾向が見られる。特に、MSF14やM23は50cmフロー到達時間が12秒以上と長く、粘性は大きかった。スランプフロー60~70cm程度の高流動コンクリートにおいて50cmフロー時間は建築用で3~8秒であることが示されている<sup>6)</sup>。これは鉄筋等の障害物がある場合であり、鋼管充てんコンクリートでは水平方向にそのような障害物はないことから、ここでは50cmフロー到達時間10秒を施工性の良否の上限とした。すなわち、この値を超えるようなコンクリートを圧入するのは難しいものと判断した。

単位セメント量と沈降量の関係を図-10に示す。M28を除き単位セメント量が大きくなると、すなわちセメント種類ごとに単位水量は一定なので、水セメント比が小さくなると沈降量は大きくなる傾向がみられる。

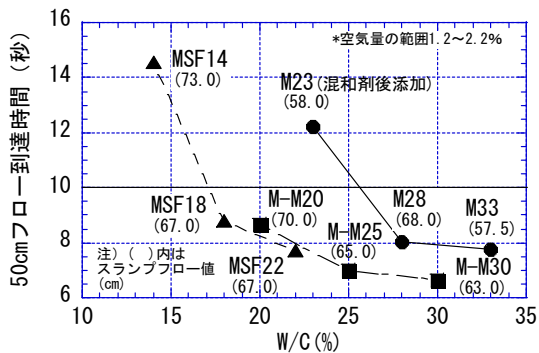


図-9 水セメント比と50cmフロー到達時間の関係

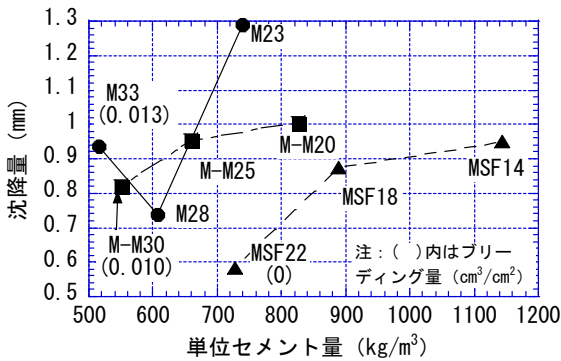


図-10 単位セメント量と沈降量の関係

セメント種類別でみると、沈降量は、M28を除き、大きい順にM, M-M, MSFとなった。

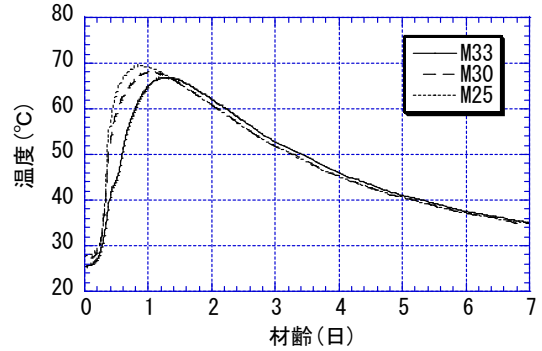


図-11 Mの硬化過程の温度履歴

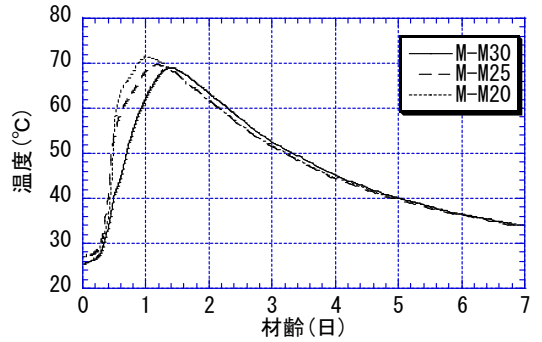


図-12 M-Mの硬化過程の温度履歴

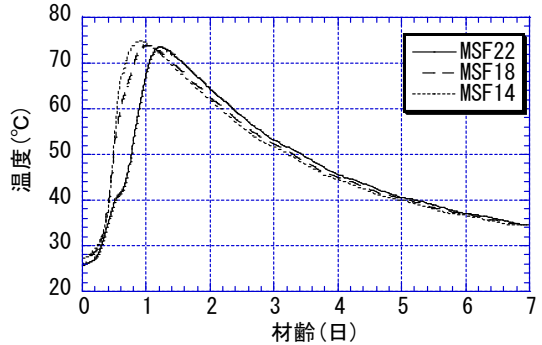


図-13 MSFの硬化過程の温度履歴

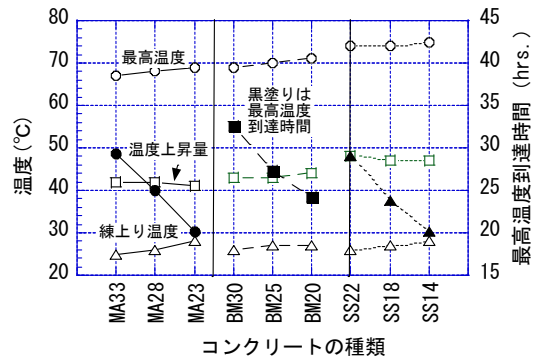


図-14 コンクリートの種類別温度の実測値



最高温度到達時間は、セメント種類や割合によらず 20～32 時間程度であった。コンクリートの練上り温度、最高温度、温度上昇量は、セメント種類別では M、M-M、MSF の順に、水セメント比別では小さいものほど増加する傾向がみられた。これに対し、最高温度到達時間は全てのセメントにおいて水セメント比が小さいものほど早くなる傾向がみられた。

標準水中養生における圧縮強度を図-15 に、簡易断熱養生における圧縮強度を図-16 に示す。いずれのコンクリートにおいても水セメント比が小さいほど高い圧縮強度が得られている。また、標準養生強度に比べ、簡易断熱養生強度の材齢による増進は小さかった。

標準水中養生 28 日強度と簡易断熱養生強度 91 日のセメント水比と圧縮強度の関係式を図-17 に示す。M、MSF、M-M についていずれも回帰式を直線式とした場合相関係数 R は 0.96～1.00 と高く、相関度が高いものとなった。これらの式を用いて調合設計を行うことができる。

標準水中養生強度（材齢 28・91 日）と簡易断熱養生強度（材齢 91 日）の養生別圧縮強度の関係を図-18 に示す。圧縮強度比は、材齢 28 日標準水中養生の場合、M28 が 0.99 と最も小さく、その他は 1.0 以上となった。つまり、材齢 91 日簡易断熱養生強度  $\geq$  材齢 28 日標準養生強度の関係にあると言える。また、材齢 91 日標準水中養生の場合 MSF14 が 1.02 と 1.0 を上廻った以外全て 1.0 以下となり、材齢 91 日簡易断熱養生強度  $\leq$  材齢 91 日標準養生強度の関係にあると言える。建築工事において高強度コンクリートを用いる場合 mSn や mKn の強度補正值を用いて、標準水中養生強度（例えば材齢 28 日又は 91 日）から構造体コンクリート強度（ここでは 91 日簡易断熱養生強度とする）を推定して調合設計を行っている<sup>7)</sup>。材齢 28 日の標準養生で強度管理をしようとする場合、mSn=0 や mKn=1.0 として概ね調合設計が可能であると言える。ただし、材齢 91 日標準水中養生で管理しようとする場合、補正值による割り増しが必要となる。鋼管充てんコンクリートの場合ダイアフラム近傍の強度変動を考慮した構造体強度補正值 Sd も勘案する必要がある。これは、模擬試験体実験で検討する予定である。

M の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-19 に、M-M と MSF の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-20 に示す。両図中の式は、鉄筋コンクリート構造計算規準<sup>8)</sup>に示されている式であり、シリカフェームの混入の有無により係数 k2 の値が異なる。また、気乾単位容積質量の値を M は 2.4 kN/m<sup>3</sup>、M-M および MSF は 2.45 kN/m<sup>3</sup> と実測値から仮定したため別個に示した。実験により得られた静弾性係数は提案式の実線上にプロットされており、対象としたコンクリートにおいてもこれらの式を用いて圧縮強度から静弾性係数が推定可能であるといえる。

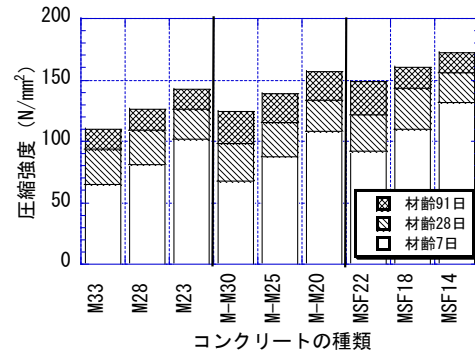


図-15 コンクリートの圧縮強度（標準水中養生）

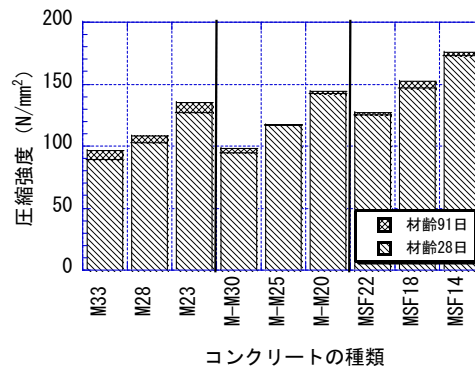


図-16 コンクリートの圧縮強度（簡易断熱養生）

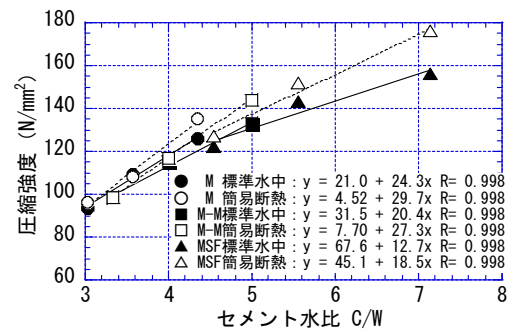


図-17 セメント水比と圧縮強度の関係式

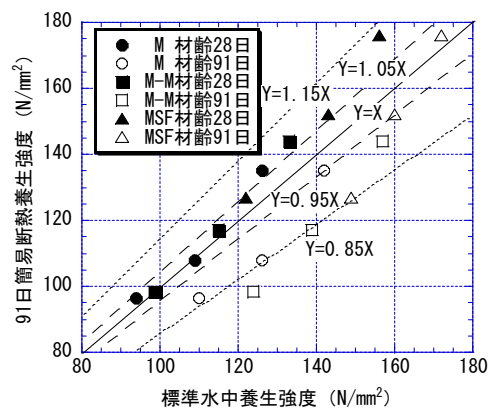


図-18 養生別圧縮強度の関係（実験Ⅲ）

設計基準強度別水セメント比と実用性の評価を表-4に示す。評価は、実験Ⅲの結果において沈降量は全て目標値を満足したことから施工性と強度性状から行った。評価方法のうち、施工性は50cmフロー到達時間8秒以下を○、同8~10秒を△、同10秒を超えるものを×とし、強度は実験Ⅲで調査強度(材齢28日)が得られたものを○、得られなかったものを×とした。その結果、MがFc80程度を、MSFがFc100程度のコンクリートに適當と判断され、M-Mはこれらの中間の強度域での利用が見込まれる。

表-4 設計基準強度別水セメント比と実用性の評価

Fc	調査強度 <sub>28F*</sub>	項目	M	M-M	MSF
80	108	水セメント比(%)	27.9	26.7	31.4
		施工性	○	○	○
		強度	○	○	○
90	120	水セメント比(%)	24.5	23.1	24.2
		施工性	△	○	○
		強度	△	○	○
100	132	水セメント比(%)	21.9	20.2	19.7
		施工性	×	△	○
		強度	×	○	○

\*<sub>28F</sub>は、 $F_c+mSn+Sd+2\sigma$ として試算  
セメント種類に関わらず仮に $mSn+Sd=10N/mm^2$ 、 $\sigma=0.1(F_c+mSn+Sd)$ とした(凡例)  
施工性:50cmフロー到達時間8秒以下が○、同8~10秒が△、同10秒を超えるもの×  
強度:実験Ⅲで調査強度(材齢28日)が得られたもの○、得られなかったもの×

#### 4. まとめ

本実験の結果から得られた知見をもとにまとめを以下に示す。

- (1) 中庸熱セメント(記号 M)、中庸熱セメントにシリカフュームをプレミックスしたもの(同 MSF)、M と MSF を 1:1 で混合したもの(同 M-M)をそれぞれ用いたコンクリートについてセメント水比と圧縮強度の間に直線関係が見られ、その相関係数は 0.96~1.00 と高いものであった。
- (2) 3種類のセメント M、MSF、M-M を用いたコンクリートについて材齢28日標準養生強度に対する材齢91日の簡易断熱養生強度の比は概ね 1.0 以上であり、この結果を元に調査設計に必要な補正值 (mSn または mKn) を決めることができる。
- (3) 強度性状、施工性から M が Fc80 程度を、MSF が Fc100 程度のコンクリートに適當と判断され、M-M はこれらの中間の強度域での利用が見込まれる。
- (4) 安山岩砕石を用いたコンクリートは、硬質砂岩砕石のものに比べ圧縮強度の発現性が優れていた。

#### 謝辞

本研究の実施に際し、宍戸コンクリート工業(株)、東京エスオーシー(株)、BASF ポジリス(株)の各位に、実験協力やご助言を頂きました。紙面を借りて謝意を表します。

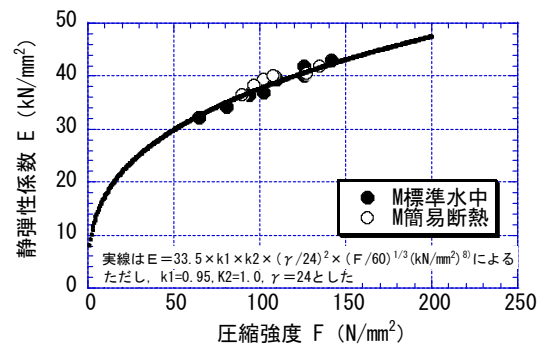


図-19 圧縮強度と静弾性係数の関係 (M)

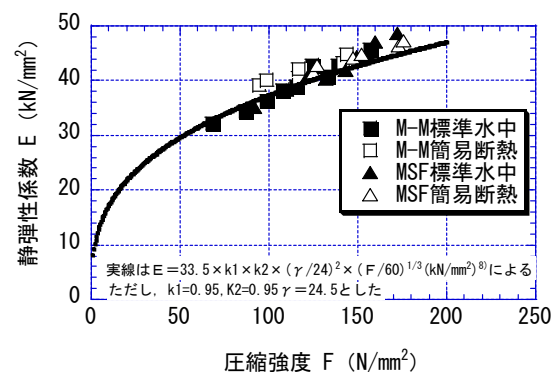


図-20 圧縮強度と静弾性係数の関係 (M-M, MSF)

#### 参考文献

- 1) 一瀬賢一: 各種セメントを使用した高強度コンクリートの構造体強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1063-1068, 2005.6
- 2) 一瀬賢一ほか: 100N/mm² を超えるコンクリートの構造体コンクリート強度に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1483-1488, 2009.7
- 3) 鹿島技術研究所編: KaTRI リーフレット 96-19・高強度鋼管充填コンクリート, 1996
- 4) (社)新都市ハウジング協会編: コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説の運用及び計算例等 p.2-36, 2008.6
- 5) 桜本文敏ほか: Fc150 の超高強度コンクリートの強度性状に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工(北陸), pp.805-808, 2002.8
- 6) 日本建築学会編: 高流動コンクリートの材料・調査・製造・施工指針(案)・同解説, p.25, 1997
- 7) 日本建築学会編: 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, p.92, 2005
- 8) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, p.39, 1999