

## 論文 細骨材の粒度がモルタルの流動性・強度に及ぼす影響

Le Quang Nhut<sup>\*1</sup>・取違 剛<sup>\*2</sup>・三宅 淳一<sup>\*3</sup>・松下 博通<sup>\*4</sup>

**要旨**：一部の粒径を除くことにより、粒度を様々に変化させた細骨材を用いてモルタルの流動性試験および強度試験を行った。その結果、強度に対する粒度変化の影響はあまり見られないが、流動性に対しては大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。また、流動性を表す指標として余剰ペースト理論を用いた検討を行った結果、モルタルフローおよびミニスランプは、セメントと細骨材混合の実積率より得られる余剰水膜厚によって一義的に表現可能であることが示された。

**キーワード**：余剰ペースト理論, 余剰水膜厚, モルタルフロー, ミニスランプ, 細骨材粒度

### 1. はじめに

まだ固まらないモルタルおよびコンクリートの流動性に関する研究は以前から数多くなされており、骨材粒度によってコンクリートのフレッシュ性状が大きく異なることは既往の研究により明らかにされている<sup>1)</sup>。その原因の一つとして、細骨材中の微粒分による影響があり、微粒分量によってコンクリートの流動性は大きく変動することが確認されている<sup>2)</sup>。また、骨材の粒度分布および粒子形状によって流動性が大きく変化することもよく知られている<sup>3)</sup>。

また現在、細骨材の粒度に関する土木学会規準として、各粒径ごとに上限値と下限値が設定されているが、各粒径がモルタルやコンクリートのフレッシュ性状や強度に与える影響については明らかになっていない。

以上のことから本研究では、流動性に及ぼす細骨材の各粒径の影響を検討するために、一部の粒径を全量（不連続粒度）ないし半量除いた細骨材を用いてモルタルの流動性試験および強度試験を行った。また、C.T.Kennedyによって提唱された余剰ペースト理論<sup>4)</sup>の適用により求められる余剰ペースト膜厚および余剰水膜厚を用

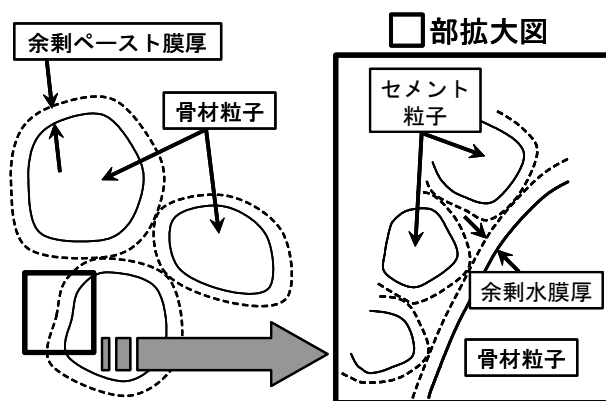


図-1 モルタルの構造モデル

いて、流動性に及ぼす細骨材粒度の影響について考察を行った。

### 2. 余剰ペースト理論による解釈

#### 2.1 余剰水膜の考え方

余剰ペースト理論においては、コンクリートを液相と固相の二相材料と考えており、液相をセメントペースト、固相を骨材と解釈するのが一般的であるとされてきた。しかし、この理論は液相とされているセメントペーストの濃度および粘性を一切考慮していないため、多様な配合のコンクリートの流動性を一義的に表現することはできない。そこで図-1に示すように液

\*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (正会員)

\*3 電源開発(株) 技術開発センター茅ヶ崎研究所所長 工修 (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

相を水、固相をセメントと骨材とする考え方によって余剰水膜厚の計算を試みた。

## 2.2 余剰ペースト膜厚，余剰水膜厚の計算

余剰水量や余剰水膜厚の計算は，余剰ペースト理論による余剰ペースト量および余剰ペースト膜厚の計算<sup>5)</sup>と同様に行った。

$$W_{exc} = 10^4 \cdot (G - G_s) \quad (1)$$

$W_{exc}$  : 余剰水量( $\text{cm}^3/\text{m}^3$ )

$G$  : セメントと細骨材の混合実積率(%)

$G_s$  : モルタル中のセメントおよび細骨材の容積比率(%)

$$\delta_w = 10^4 \cdot W_{exc} / (S_c + S_s) \quad (2)$$

$\delta_w$  : いずれの粒径の粒子に対しても膜厚が一定と仮定した場合の余剰水膜厚( $\mu\text{m}$ )

$S_c$  : セメントの表面積( $\text{cm}^2/\text{m}^3$ )

$S_s$  : 細骨材の表面積( $\text{cm}^2/\text{m}^3$ )

$S_c$  はセメントの比表面積に  $1\text{m}^3$  モルタル中のセメント質量を乗じて求め， $S_s$  は，細骨材粒子を球と見たて，下記により算出される細骨材比表面積に単位細骨材容積を乗じて求めた。

$$S_{su} = 6 \cdot \sum \{(X_i/100) / d_i\} \quad (3)$$

$S_{su}$  : 細骨材比表面積 ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )

$X_i$  : ふるい目  $i$  と  $i+1$  の間の容積百分率(%)

$d_i$  : ふるい目  $i$  と  $i+1$  の間の幾何平均による平均粒径( $\text{cm}$ )

なお，余剰ペースト量，余剰ペースト膜厚は，式(1),(2)において細骨材の  $G$ ， $G_s$  を用い， $S_c$  を省略することにより得られる。

これらの計算は乾燥試料による実積率試験結果に拠ることや表面積の計算に仮定を含むことから， $W_{exc}$  や  $\delta_w$  等の計算値は各々の概略値を示すものである。

## 3. モルタル試験

本研究では細骨材の各粒径が流動性や強度に及ぼす影響を明らかにするために，標準的な粒度分布の細骨材から各粒径を全量（不連続粒度）

表－1 基準細骨材の粒度

呼び名	粒径	容積百分率 (%)	実積率 (%)
S1	2.5~5.0mm	11.7	57.8
S2	1.2~2.5mm	24.8	57.9
S3	0.6~1.2mm	24.2	57.8
S4	0.3~0.6mm	26.5	58.0
S5	0.15~0.3mm	12.9	57.8

表－2 使用した細骨材の粒度構成

粒度	仕様
原粒	原粒度分布のもの (150 $\mu\text{m}$ 以下を除く)
S1f	原粒度分布からS1を全量除いたもの(不連続)
S2f	原粒度分布からS2を全量除いたもの(不連続)
S3f	原粒度分布からS3を全量除いたもの(不連続)
S4f	原粒度分布からS4を全量除いたもの(不連続)
S5f	原粒度分布からS5を全量除いたもの(不連続)
S1h	原粒度分布からS1を半量除いたもの
S2h	原粒度分布からS2を半量除いたもの
S3h	原粒度分布からS3を半量除いたもの
S4h	原粒度分布からS4を半量除いたもの
S5h	原粒度分布からS5を半量除いたもの

ないし半量除いた粒度の細骨材を使用してモルタルフローおよびミニスランプを測定し，流動性の変化について評価を行った。また，各粒度に対して曲げ強度および圧縮強度試験を行った。

### 3.1 使用材料およびモルタル配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度  $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ，ブレン法による比表面積  $3300\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。細骨材には長崎県壱岐沖産海砂（絶乾密度  $2.55\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率  $1.72\%$ ，実積率  $65.6\%$ ）を用い基準細骨材とした。基準細骨材の原粒度分布を表－1に示す。ここに，細骨材中の微粒分が流動性に及ぼす影響を除くために，細骨材中の  $150\mu\text{m}$  以下を除いて使用した。

モルタル試験には表－1の基準細骨材とともに，表－2に示すようにS1～S5の各粒径を全量ないし半量除くことによって，様々に粒度を変化させた細骨材を使用した。

モルタルの配合は  $W/C=50, 60, 70\%$  とした。 $S/C=2.65$ （基準細骨材を用いたときに  $W/C=50\%$  でモルタルフローが  $200\text{mm}$  となる配合）で一定とし，単位水量を変化させることによって  $W/C$  を調整した。また，試験時の温度は  $20^\circ\text{C}$  で一定

表-3  $\delta_p$ ,  $\delta_w$  計算結果および流動性試験結果

W/C (%)	要因	F. M.	余剰ペーストによる整理				余剰水膜による整理				試験結果	
			細骨材実積率 (%)	比表面積 $S_s$ ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )	余剰ペースト量 $P_{exc}$ ( $1/\text{m}^3$ )	余剰ペースト膜厚 $\delta_p$ ( $\mu\text{m}$ )	C+S混合実積率 (%)	比表面積 $S_s$ ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )	余剰水量 $W_{exc}$ ( $1/\text{m}^3$ )	余剰水膜厚 $\delta_w$ ( $\mu\text{m}$ )	モルタルフロー (mm)	ミニスランプ (mm)
50	原粒	2.96	65.61	101.6	96.1	16.88	74.73	1574	16.74	0.146	202.5	35.0
	S1f	2.69	65.06	112.8	90.6	14.34	74.42	1582	13.64	0.118	184.5	24.0
	S2f	2.61	65.16	123.7	91.5	13.21	73.79	1591	7.34	0.063	172.7	11.1
	S3f	2.94	66.49	111.5	104.9	16.80	74.70	1581	16.44	0.142	205.2	45.9
	S4f	3.30	66.71	87.3	107.0	21.89	75.45	1563	23.94	0.210	216.0	52.1
	S5f	3.25	64.43	74.7	84.3	20.14	74.48	1553	14.24	0.126	196.0	38.4
	S1h	2.83	65.96	106.9	99.6	16.64	73.76	1578	7.04	0.061	179.9	22.0
	S2h	2.81	65.53	111.1	95.3	15.31	74.18	1581	11.24	0.097	186.3	29.6
	S3h	2.95	66.16	105.9	101.5	17.13	75.16	1577	21.04	0.183	203.9	45.1
	S4h	3.10	66.45	95.6	104.5	19.53	75.36	1569	23.04	0.201	206.5	56.4
S5h	3.09	65.80	89.1	98.0	19.64	74.79	1564	17.34	0.152	197.3	45.5	
60	原粒	2.96	65.61	101.6	124.7	23.09	74.73	1574	54.10	0.496	266.0	105.9
	S1f	2.69	65.06	112.8	119.2	19.89	74.42	1582	51.00	0.465	258.0	94.4
	S2f	2.61	65.16	123.7	120.2	18.28	73.79	1591	44.70	0.405	251.0	78.0
	S3f	2.94	66.49	111.5	133.5	22.54	74.70	1581	53.80	0.491	267.0	105.3
	S4f	3.30	66.71	87.3	135.7	29.24	75.45	1563	61.30	0.566	274.5	110.5
	S5f	3.25	64.43	74.7	112.9	28.44	74.48	1553	51.60	0.479	264.0	93.8
	S1h	2.83	65.96	106.9	128.2	22.58	73.76	1578	44.40	0.406	258.5	90.4
	S2h	2.81	65.53	111.1	123.9	20.99	74.18	1581	48.60	0.443	258.5	95.2
	S3h	2.95	66.16	105.9	130.2	23.14	75.16	1577	58.40	0.534	270.5	108.1
	S4h	3.10	66.45	95.6	133.1	26.22	75.36	1569	60.40	0.555	271.0	111.5
S5h	3.09	65.80	89.1	126.7	26.75	74.79	1564	54.70	0.504	266.5	100.2	
70	原粒	2.96	65.61	101.6	150.5	29.30	74.73	1574	87.82	0.846	—	129.3
	S1f	2.69	65.06	112.8	145.1	25.44	74.42	1582	84.72	0.812	—	128.0
	S2f	2.61	65.16	123.7	146.0	23.35	73.79	1591	78.42	0.748	—	118.0
	S3f	2.94	66.49	111.5	159.4	28.28	74.70	1581	87.52	0.839	—	130.0
	S4f	3.30	66.71	87.3	161.5	36.60	75.45	1563	95.02	0.922	—	133.0
	S5f	3.25	64.43	74.7	138.8	36.73	74.48	1553	85.32	0.833	—	126.0
	S1h	2.83	65.96	106.9	154.1	28.52	73.76	1578	78.12	0.751	—	117.5
	S2h	2.81	65.53	111.1	149.8	26.66	74.18	1581	82.32	0.789	—	125.5
	S3h	2.95	66.16	105.9	156.0	29.15	75.16	1577	92.12	0.886	—	131.5
	S4h	3.10	66.45	95.6	159.0	32.91	75.36	1569	94.12	0.910	—	132.3
S5h	3.09	65.80	89.1	152.5	33.85	74.79	1564	88.42	0.857	—	129.1	

とし、練混ぜ手順は JIS R 5201 に従った。減水剤は使用せず、各粒度の細骨材は表乾状態の判定に困難があったため絶乾状態で使用することとした。

### 3.2 試験項目および方法

試験項目として、モルタルの流動性の指標としてモルタルフローを JIS R 5201 に従い測定するとともに、ミニスランプを JIS A 1171 に準じて測定した。各細骨材の実積率およびセメントと細骨材の混合実積率は JIS A 1104 に準じて測定した。実積率試験には予備試験によって棒突き法より安定した結果が得られたジグギング法を採用した。セメントと細骨材はモルタルミキサ

ーによって均一になるよう混合し、取り扱いにあたっては材料の偏りの防止につとめた。

さらに、各要因について材齢 7 日, 28 日, 91 日においてモルタルの圧縮強度および曲げ強度試験を JIS R 5201 に従って行った。

### 4. 試験結果および考察

表-3 に細骨材の物性、細骨材実積率、セメントと細骨材の混合実積率試験結果、式(1)~(3)により求めた余剰ペースト膜厚 ( $\delta_p$  と記す)、余剰水膜厚 ( $\delta_w$  と記す) の計算結果および流動性試験結果を記す。以後はこれらの値をもとに考察を行う。

#### 4.1 実積率試験結果

図-2に各粒度における細骨材の実積率試験結果を示す。0.3~0.6mmを除いたS4系で最も実積率が大きくなっている。また、図-3にセメントと各粒度における細骨材の混合実積率試験結果(S/C=2.65で一定)を示す。両者の比較から、細骨材への一定量のセメントの混合により混合実積率は向上することがわかる。

セメント混合の有無に拘わらず、各粒度の実積率はいずれもS3, S4系が大きい値を示している。しかしながら、S1系の半量カットに見られるように、図-2に示す細骨材の実積率が原粒より大きい場合に、必ずしも図-3に示す混合実積率は原粒より大きくはなっていない。さらに、S1系およびS3系のように、半量カットと全量カットの大小関係は、図-2と図-3で必ずしも一致していない。

図-3はS/C=2.65の場合だが、混合実積率はS/Cにも依存するため、混合実積率を最大にするには実積率の大きい細骨材に適当量のセメントを混合することが必要となる。これにより、式(1)で示される余剰水量を最大にすることができ、 $\delta_w$ も大きくすることができる。

#### 4.2 $\delta_p$ および $\delta_w$ と流動性の関係

図-4にW/C=50%において、原粒の場合および各粒径を除いた場合の $\delta_p$ とモルタルフローおよびミニスランプの関係を示す。両者の間にはある程度の相関が見られるものの、同一の $\delta_p$ であっても細骨材の粒度によってモルタルフロー、ミニスランプともに大きく異なっていることがわかる。したがって、細骨材の粒度が異なるモルタルのモルタルフローおよびミニスランプは、 $\delta_p$ では一義的に整理できないこととなる。

そこで、2.に述べた概念に従い、 $\delta_w$ による分析を試みた。 $\delta_w$ の概念を導入することによって、細骨材とともにセメント粒子の影響も含めて評価することができる。

図-5に、W/C=50%のときの $\delta_w$ とモルタルフローおよびミニスランプの関係を示す。ミニ

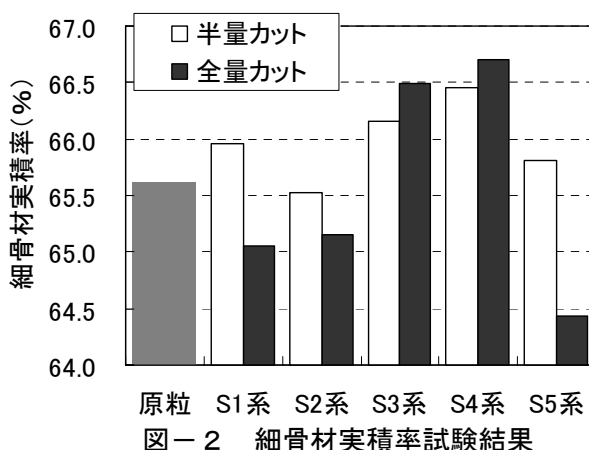


図-2 細骨材実積率試験結果

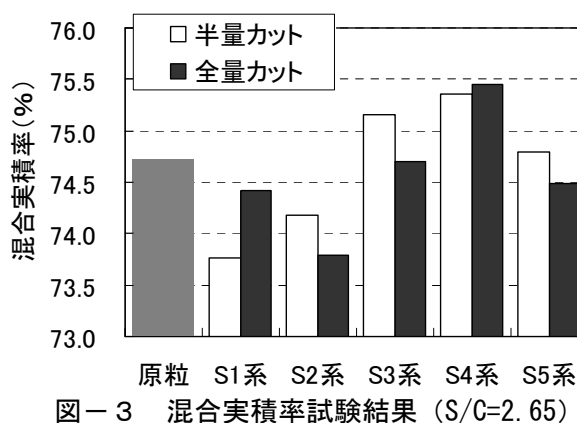


図-3 混合実積率試験結果 (S/C=2.65)

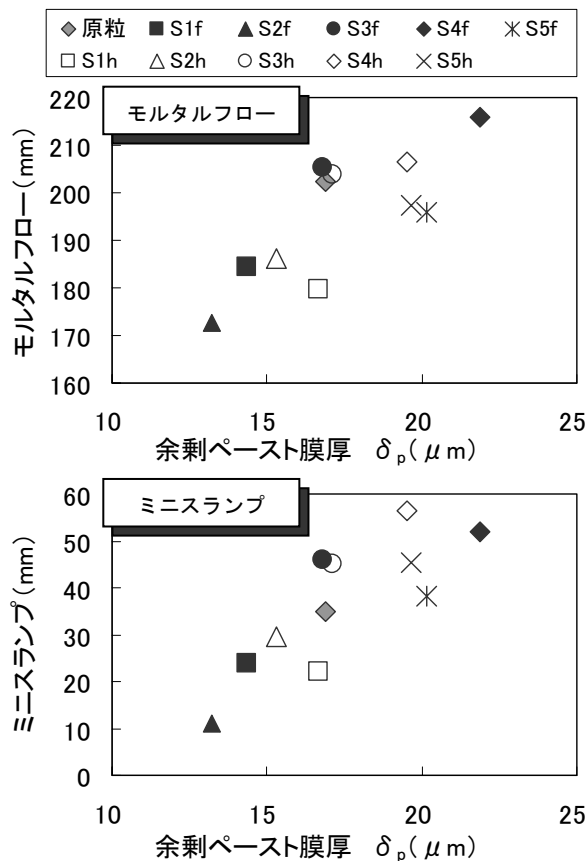


図-4  $\delta_p$ と流動性の関係

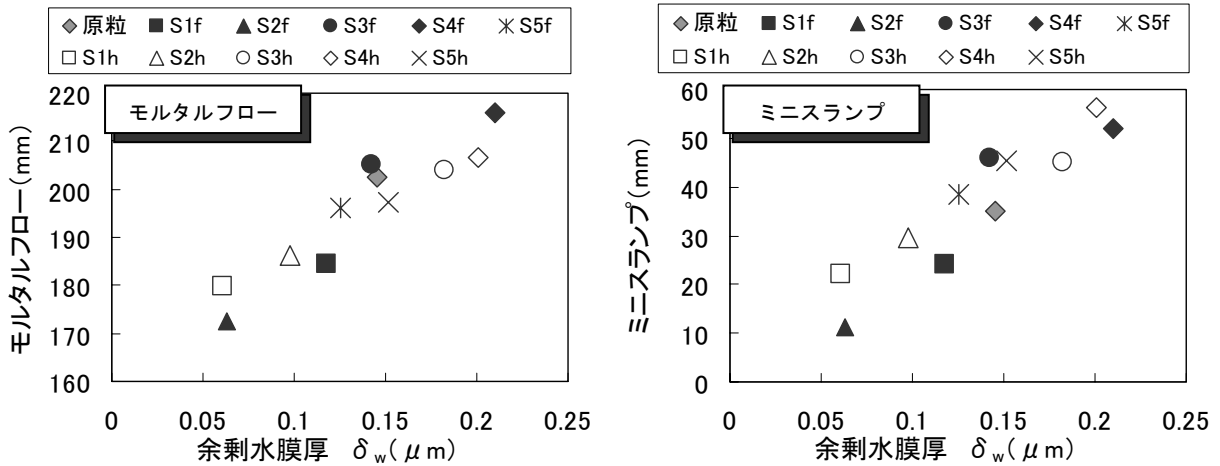


図-5  $\delta_w$ と流動性の関係

スランプについてはややばらつきがあるものの、 $\delta_w$ と両者の間には高い相関が見られ、細骨材粒度の変化に伴うモルタルフローおよびミニスランプの変化は $\delta_w$ によって一義的に取り扱えることを示唆する結果となっている。

#### 4.3 W/Cの変化による流動性の変化

図-6にW/C=50, 60, 70%におけるモルタルの $\delta_p$ および $\delta_w$ とミニスランプの関係を、図-7に $\delta_w$ とモルタルフローの関係を示す。ただし、W/C=70%のモルタルフローは300mm以上となったために表示していない。ここに、小粒径を除いた粒度を用いたモルタルであっても顕著な分離は観察されなかった。

これらの図より、 $\delta_w$ とミニスランプおよびモルタルフローの関係はいずれもW/Cによらず同一の曲線を描いていることがわかる。したがって、S/Cが一定であるなら、単位水量の増減によるモルタルの流動性の変化は、細骨材の粒度に関係なく $\delta_w$ によって一義的に表現できることが明らかとなった。本試験では細骨材を絶乾状態で用いたが、粒度による吸水状態の違いはあまり大きい影響は与えていないものと思われる。

表-3に示す余剰ペースト膜厚の値から、全ての配合において細骨材粒子はセメントペーストによって完全に覆われているものと考えられる。したがって、モルタルの流動性は細骨材の粒度の違いよりも細骨材粒子間に介在するセメントペースト、すなわち $\delta_w$ で覆われたセメント

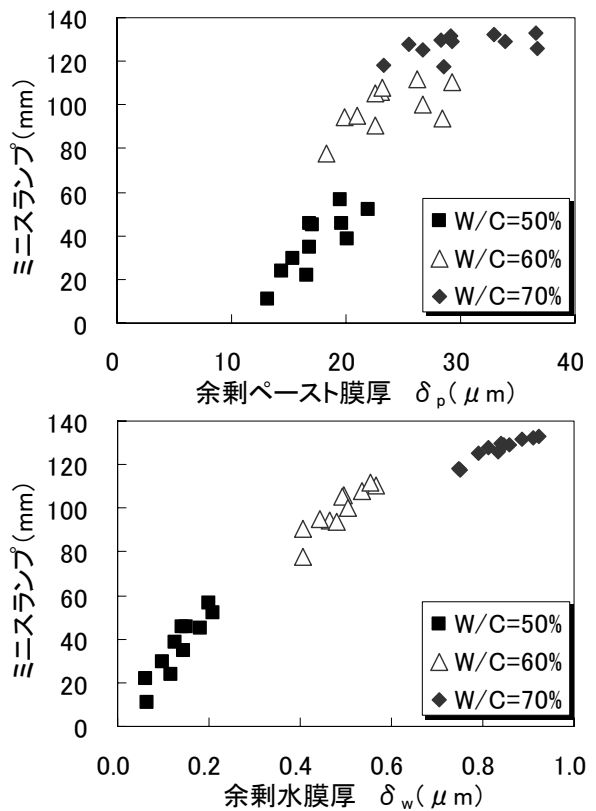


図-6  $\delta_p$ および $\delta_w$ とミニスランプ

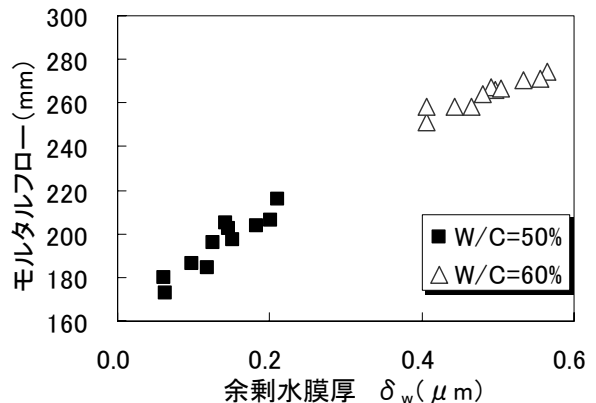


図-7  $\delta_w$ とモルタルフロー

粒子の性状に依存しており，図-1に示したように，モルタルを構成する細骨材粒子，セメント粒子はともに水膜を持ち，その水膜厚によってモルタルの流動性が支配されると考えられる。

$\delta_w$  の計算値は厳密な値を示すものではないが，S/Cを一定とした場合のモルタルのミニスランプやモルタルフローを表現する指標となり得よう。今後，減水剤や細骨材粒子形状の条件を加味した試験を実施することにより  $\delta_w$  やペースト性状がモルタル性状に及ぼす影響をさらに明確化することができるものと思われる。

#### 4.4 細骨材粒度が強度に及ぼす影響

図-8に原粒および各粒度を全量除いた S1f～S5fを用いたときの W/C=50%における材齢7日，28日および91日における圧縮強度および曲げ強度試験結果を示す。

これによると，圧縮強度にはいずれの材齢にあっても細骨材の粒度の違いに伴う大きな差異はないが，曲げ強度については，すべての材齢において図-3に示した混合実積率の高いものほど大きい値を示す傾向が見られる。強度を規定する原因の一つとして，骨材とセメント水和物との界面の付着が挙げられる。曲げ強度の方が圧縮強度に比べて骨材とセメント水和物との界面の付着に依存することによると考えられる。

#### 5. まとめ

細骨材の一部の粒径を全量ないし半量除いたモルタルの流動性および強度試験を行った結果，以下のような結論を得た。

- (1)標準粒度の細骨材の一部の粒径を除くことによって実積率が変化し，0.3mm～0.6mmを除くことによって最も実積率が高くなる。
- (2)各種の粒度の細骨材に一定量のセメントを加えた混合実積率の大小関係は，必ずしも細骨材実積率の大小関係に一致しない。
- (3)S/Cを一定としたモルタルのミニスランプやモルタルフローは，多様な細骨材粒度であっても， $\delta_w$ によって一義的に表現できる。
- (4)細骨材粒度の違いは，圧縮強度および曲げ強

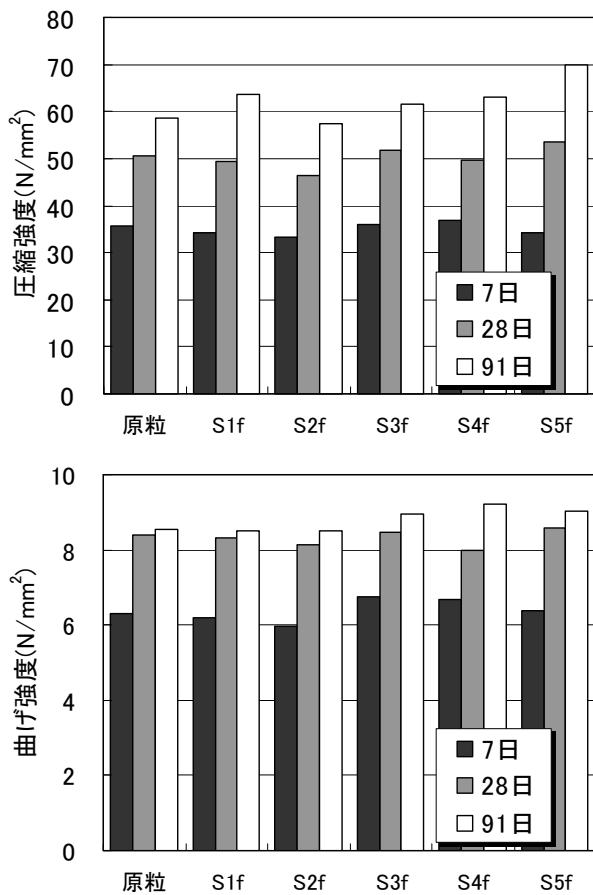


図-8 強度試験結果

度の強度発現に大きな影響を及ぼさない。

#### 参考文献

- 1) 柏木隆男ほか：骨材粒度がコンクリートの諸物性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.865-870，2001
- 2) 松崎安宏：細骨材中の微砂分がコンクリートの性質に及ぼす影響，セメント技術年報，Vol.9，pp.219-222，1955
- 3) 徳光善治：砂の粒度および量とモルタルの諸性質の関係について，土木学会論文報告集，No.96，pp.15-22，1963.8
- 4) C.T.Kennedy：The Design of Concrete Mixtures，Proceedings of the ACI，Vol.36，pp.373-400，Feb.1940
- 5) 松下博通ほか：砕砂コンクリートの細骨材率に関する一考察，セメント技術年報，No.42，pp.88-91，1988