

コンクリートの配合設計への 余剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究

松下博通¹・近田孝夫²・前田悦孝³

¹フェロー会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎六丁目10-1)

²正会員 工博 新日鐵化学株式会社 高炉炉内技術センター (〒803 北九州市小倉北区西港町16番地)

³正会員 新日鐵化学株式会社 高炉炉内技術センター (〒803 北九州市小倉北区西港町16番地)

コンクリートの配合設計理論の一つとして提唱されている余剰ペースト理論を具体的にコンクリートの配合設計方法に導入するための基礎的研究として、モルタルの流動性を余剰ペーストの厚みで評価することを試みた。各種細骨材を用いたいくつかの配合のモルタルのフロー値について解析した結果、余剰ペーストの厚み δ と細骨材粒子径 d の比である δ/d を指標とすることにより、細骨材形状、粒度分布、単位細骨材体積の変化がモルタルのフロー値に及ぼす影響を統一的に評価できることが明らかとなった。

Key Words : mix design, excess paste theory, fresh mortar, flow, consistency factor

1. はじめに

コンクリートの配合設計は、所要の強度、耐久性および施工に必要なフレッシュコンクリートの性質の三要素を満足し、かつ経済的な配合を決定することである。そのためには、できるだけ単位水量の少ない配合を選定することが基本とされている。単位水量、単位セメント量、混和剤量を一定としたとき、すなわち、ペースト性状を一定としたとき、フレッシュコンクリートの性質は、骨材の性状で定まると考えられることから、配合設計の目的は、使用する骨材の性状に応じた最小水量の配合を見いだすことに集約される。

この点に関して、現在の我が国におけるコンクリートの配合設計方法には、Lyseの単位水量一定の法則ならびに Talbot, Richart¹⁾ によって提案され、Goldbeck, Gray²⁾ によって系統立てられた粗骨材の粒度範囲と細骨材の粗粒率に応じた粗骨材かさ容積の選定法が考え方の基本として取り入れられており³⁾ その後の内外の研究成果をもとに新材料の実用化や骨材事情の変化に対応しつつ構築されてきたものである。

各規準⁴⁾ では、粗骨材最大寸法と細骨材の粗粒率に応じた単位水量と粗骨材かさ容積または細骨材率を選定するための標準値が示されており、これらをもとに暫定的な配合を定め所要性状或使用材料の相違に対する補正を与えながら試し練りによって示方

配合を決定する。これらに示されている標準値は、所要のワーカビリティを有するように従来からの研究成果や経験上より選定されたものといえる。

近年、コンクリート技術は目覚ましい進歩を遂げており、時代の趨勢に応じて大きく変化する使用材料の種類と性質への対応、多様化する構造物の種類とそれに応じたコンクリート性質の確実な変容を成し遂げていくための重要な研究課題のひとつとして、より理論的な配合設計方法の確立と実用化が考えられる。

コンクリートの理論的な配合設計方法としては、従来より、理想的な骨材の粒度曲線を追求したものや骨材の分散や粒子の干渉に関する理論、各種の所要水量の公式等が多くの研究者によって提案されていることが T. C. Powers⁵⁾ によって報告されている。

これらの理論のひとつに C. T. Kennedy⁶⁾ によって提案された余剰ペースト理論がある。本理論は、コンクリートを骨材およびペーストからなる二相材料と見なし、充填状態の骨材間空隙がペーストで充たされ、さらに余剰のペーストが存在することで骨材が分散され、コンクリートに流動性が付与されるというものである。本理論のコンクリートの配合設計への適用の可能性について、筆者^{7)~13)} らは、余剰ペーストの厚みを指標として最適細骨材率の決定が可能なることを見いだしているが、単位水量については概略値しか求めることができないことを報告しており、モルタルにおける実験で流動性評価への適用

表-1 単一粒度細骨材の性状

記号	範囲 (μm)	粒子径 d_i (μm)	実積率 (%)
G0	0.036-0.075	0.052	62.3
G1	0.15-0.30	0.216	62.8
G2	0.30-0.60	0.433	63.6
G3	0.60-1.18	0.857	62.8
G4	1.18-2.36	1.702	63.6
G5	2.36-4.75	3.416	63.2

表-2 ペースト単味の性状

配合	フロー値	見掛粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
OPC-60%	300	100
OPC-45%	278	230
OPC-35%	233	366
BF10-38%	265	526

を試みてきた。また、阿部、洪¹⁴⁾、長島、星野¹⁵⁾も各種骨材を使用したコンクリートのスランプは、余剰ペーストの厚みだけでは評価できないことを示している。これらの研究では、Kennedy⁶⁾の提案に沿って余剰ペースト体積を骨材表面積で割る方法により余剰ペーストの厚みが算出されているが、骨材の表面積については精度の良い統一された測定方法が確立されていないことも良好な結果が得られない原因のひとつと考えられる。

一方、C. A. G. Weymouth¹⁶⁾、徳光^{17) 18)}、沼田¹⁹⁾の研究では、分散した骨材が余剰ペーストによって覆われた状態は、骨材がその形状を保って膨張し互いに接触した状態と等しいとする骨材分散の概念が示されている。この考え方では、分散した骨材の間隔は、骨材の体積と実積率によって定まる。徳光はこのような考え方を発展させてモルタルの諸性状を検討しているが、モルタルの流動性を統一的に定める指標を見いだすまでには至っていない。

かかる観点より、余剰ペースト理論のコンクリートの配合設計への適用性に関する基礎的な研究として、余剰ペースト量および余剰ペーストの厚みの算出方法についてKennedy⁶⁾の提案した方法と徳光¹⁷⁾らの骨材分散のモデルを適用した場合を比較しながら、細骨材の粒度、形状、単位細骨材体積がモルタルのフロー値に及ぼす影響を統一的に評価できる指標について検討した。

2. 単一粒度のモデル細骨材を用いたモルタルへの適用

(1) 実験の目的

モルタルの流動性に関係する要因のうち細骨材

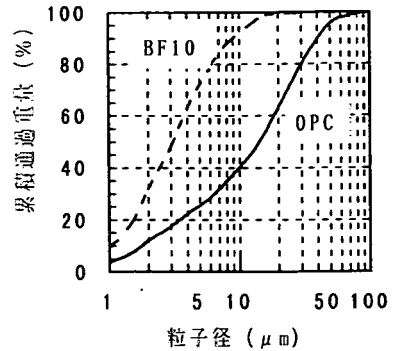


図-1 粉体の粒度分布

の粒度に着目し、モルタルの流動性に及ぼす影響を余剰ペーストの厚みと関連づけて考察した。粒度の影響のみを単純に把握するために、実験では、細骨材としてガラスビーズを使用し、ふるい分け試験に定められている各粒度区分のみで構成される単一粒度に調整して使用した。

(2) 試験方法

a) 使用材料

セメントは、粉末度 $3550\text{cm}^2/\text{g}$ 、比重3.15の普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を使用した。セメントより粒子サイズの小さい粉体として粉末度 $10670\text{cm}^2/\text{g}$ 、比重2.90の高炉スラグ微粉末（以下、BF10）を使用した。レーザー回折型粒度分析計で測定したセメントと高炉スラグ微粉末の粒度分布を図-1に示す。

化学混和剤は、ナフタリンスルホン酸系の高性能減水剤（以下、NSP）を使用した。

細骨材は、表-1に示す各粒度のガラスビーズを使用した。これらは、数種類の市販品ガラスビーズをふるい分けて各粒度区分に入るように調整したものである。比重は、2.47、吸水率は0%である。実積率は、JIS A 1104 骨材の単位容積質量および実積率試験方法に従って測定した。各単一粒度細骨材の粗粒率は、粒子径の小さいものから順に0.1、 \dots 、5となっており、表-1の記号G0、G1、 \dots 、G5は、これに対応したものである。以下、各細骨材の呼称として表-1の記号を用いた。

b) モルタルの配合

モルタル中のペースト部分の配合は、OPCを用いた系では、 $W/C=35, 45, 60\%$ の3水準とした。BF10を用いた系では、水粉体重量比=38%としてNSPを粉体重量に対して0.55%添加した1水準である。水粉体重量比=38%は、 $W/C=35\%$ のペーストと水粉体体積比が等しくなるように選定したものである。

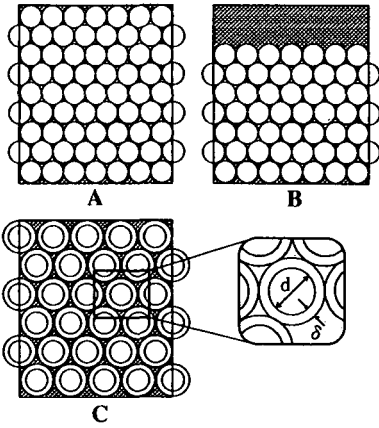


図-2 均一球の詰め込み状態と分散状態

尚, BF10は単味で使用した. ペースト単味の性状を表-2に示す. 見掛け粘度は, 約32Pa/minでずり応力を上昇させたときのずり速度 80 (1/s) における値であり, 振動式粘度計²⁰⁾を用いて測定した.

モルタルの配合は, 上記4水準のセメントペースト毎に表-1の各ガラスビーズをそれぞれ単独で使用した合計24ケースにおいて, 単位細骨材体積を3~8水準変化させた. 以下, 例えば, OPCをW/C=35%で使用したモルタルをOPC-35%系などと総称する.

c) モルタルの練混ぜおよびフロー試験方法

モルタルの練り混ぜおよびフロー試験は, 「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」に従った. 但し, 1バッチ当たりのモルタルの練混ぜ量は1.3リットルとした.

(3) 余剰ペースト体積と骨材表面積を用いた余剰ペーストの厚み δ の算出方法

a) 余剰ペースト体積の算出方法

図-2は, 骨材を均一球と仮定したときの詰め込み状態と分散状態をモデル的に示したものである. A図は, 実積率試験における棒突き詰め込み状態に相当し, B図は, A図における骨材間の空隙をセメントペーストで充たし, 骨材の占める体積の一部をセメントペーストで置き換えた状態に相当する. C図は, モルタル中に細骨材が均一に分散した状態に相当している. B図とC図の骨材体積が等しいとき, B図の骨材間空隙がペーストで充たされ, さらに余剰のペーストが存在することによりC図のように骨材が分散されると考えることができる.

ここで, C. T. Kennedy⁶⁾が示した余剰ペーストの定義は, 「全ペーストから棒突き詰め込み状態の

骨材間空隙を埋めるに等しいペーストを差し引いた残りのペースト」である. その算出方法は, B図の骨材間空隙の体積を全ペーストから差し引いて余剰ペースト体積を求めるものである. このとき, モルタル1リットル当たりの余剰ペースト体積は, 式(1)で算出される.

一方, C図を粒子径 d の骨材と厚み δ のペーストからなる粒子径 $=d+2\delta$ の球を充填した状態と考えると, C図とA図の充填状態は相似であり, 両図のハッチ部分のペースト体積は等しく, 骨材の実積率のみで定まる. 従って, 細骨材をとりまく厚み δ の余剰ペーストの体積は, モルタル体積からC図におけるハッチ部分のペースト体積と細骨材体積を引いた残りの体積として式(2)で算出される.

$$V_{\text{exp}} = 1000 - V_s - \frac{V_s}{\frac{G}{100}} \left(1 - \frac{G}{100} \right) \\ = 1000 \left(1 - \frac{G_s}{G} \right) \quad (1)$$

$$V_{\text{exp}} = 1000 - V_f - V_s \\ = 1000 - 1000 \left(1 - \frac{G}{100} \right) - 10V_s \\ = 10(G - G_s) \quad (2)$$

ここに,

- V_{exp} : 余剰ペースト体積 (cm^3 / l)
- V_s : 単位細骨材体積 (cm^3 / l)
- G : 細骨材の実積率 (%)
- G_s : 細骨材の配合実積率
 $G_s = V_s / 10$ (%)
- V_f : C図のハッチ部分の体積 (cm^3 / l)

ここで, 式(1)は, δ が細骨材粒子径 d に比べて十分小さいければC図のハッチ部分の体積とB図の骨材間空隙体積はほぼ等しいと仮定したものである. しかし, 幾何学的にはC図のハッチ部分の体積の方がB図の骨材間空隙体積より大きいため式(1)で算出される値は, δ が大きくなるほど実際に骨材を分散させている余剰ペースト体積より大きくなる. 式(2)で算出される体積は前述の定義とは一致しないが, 骨材を分散させているペーストの体積を正確に算出できる.

式(1)の適用できる δ の範囲を予め限定することは困難であり, また, 近年, 開発と実用化が進め

られている高流動コンクリートや高強度コンクリートは、従来のコンクリートに比べて富配合であり分散した骨材の間隔が大きくなっている。本研究では、各種コンクリートへの幅広い適用を期待して、式(2)で算出されるペースト体積を余剰ペーストと定義した。

b) 余剰ペーストの厚み δ の算出方法

C. T. Kennedy⁶⁾, T. C. Powers⁵⁾ は、余剰ペースト体積を骨材表面積で割って骨材表面の余剰ペーストの厚みを求めている。本実験でもこれに従って式(3)で算出した。

$$\delta = \frac{V_{\text{exp}}}{V_s \cdot S_s} \times 10000 \quad (3)$$

ここに、

- δ : 余剰ペーストの厚み (μm)
- V_{exp} : 余剰ペースト体積 ($\text{cm}^3/1$)
- V_s : 単位細骨材体積 ($\text{cm}^3/1$)
- S_s : 細骨材の比表面積 (cm^2/cm^3)

骨材の比表面積 S_s は、 $0.075 \sim 0.15\text{mm}$ の範囲にある球の比表面積 $558\text{cm}^2/\text{cm}^3$ に各単一粒度骨材の角張り係数と体積割合を乗じて合計する沼田²⁰⁾の式(4)で算出した。

$$S_s = 558 \sum \left[\frac{1}{\phi_i} \frac{1}{2i} \frac{P_i}{100} \right] \quad (4)$$

ここに、

- i : 各単一粒度細骨材の粗粒率
- $1/\phi_i$: 各単一粒度細骨材の角張り係数
- P_i : 各単一粒度細骨材の割合 (%)

$1/\phi_i$ は、式(5)に示す T. C. Powers⁵⁾ が求めた単一粒度細骨材の水中軽盛時の実積率と角張り係数の関係に沼田²¹⁾の求めた水中軽盛骨材の空隙率 ϵ_i と気中棒突き実積率 G の回帰式(6)を代入して得られる式(7)にて算出した。

$$\frac{1}{\phi_i} = 1 + 4.44 \left[\frac{\epsilon_i}{100} - 0.42 \right] \quad (5)$$

$$0.9G = 100 - \epsilon_i \quad (6)$$

$$\frac{1}{\phi_i} = 1 + 4.0 \left[0.64 - \frac{G}{100} \right] \quad (7)$$

(4) 実験結果

a) モルタルの外観性状

0.6mm以上の細骨材を使用したいくつかの

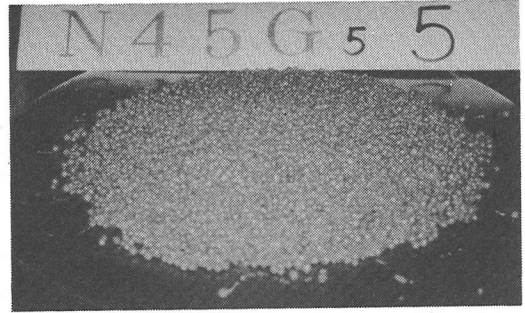


写真-1

配合では、写真-1に示すようにフロー試験の際にモルタルが一体性を保てずに細骨材粒子が崩れ落ちるようにして広がる様子が観察された。以下に示した図-3、図-5、図-8、図-11、図-13の図中では、このような状況が観察されたモルタルに対応するプロットに[↓]を付して示した。

b) 余剰ペーストの厚み δ とフロー値の関係

図-3に余剰ペーストの厚み δ (以下、 δ) とフロー値の関係を示す。いずれの系でも使用する細骨材の粒子径が異なれば、モルタルの δ が等しくてもフロー値も異なった。OPC-35%系 および BF10-38%系では、細骨材粒子径が小さいほどフロー値が大きくなる傾向が認められるが、OPC-60%、OPC-45%では、各細骨材を用いたモルタルの δ とフロー値の関係が複雑に交錯し、細骨材粒子径の影響に関して一定の傾向は認め難い結果となった。

c) 同一フロー値となる δ と細骨材粒子径の関係

細骨材の粒子径が δ とフロー値の関係に及ぼす影響を調べるために、一定のフロー値に対応する δ の値を求めて細骨材の平均粒子径 d_i との関係を検討した。結果を図-4に示す。ここで、 d_i は、単一粒度に調整した際に使用した一組のふるいの目の開き l_1 と l_2 から式(8)で算出される面積体積平均粒径¹⁸⁾を用いた。

$$d_i = 0.4342 \frac{l_1 - l_2}{\log \left(\frac{l_1}{l_2} \right)} \quad (8)$$

フロー値が等しくなるときの δ は細骨材の平均粒子径に比例して増大する傾向が認められる。OPC-35%系とBF10-38%系では、いずれのフロー値においても両者はほぼ比例する結果が得られた。OPC-60%系とOPC-45%系では、 $d_i = 3.45\text{mm}$ の細骨材を使用したモルタルでフロー値が小さい場合に比例関係から離脱したものがあるが、これらはフロー試験の際にモルタルが崩れるようにして広がった

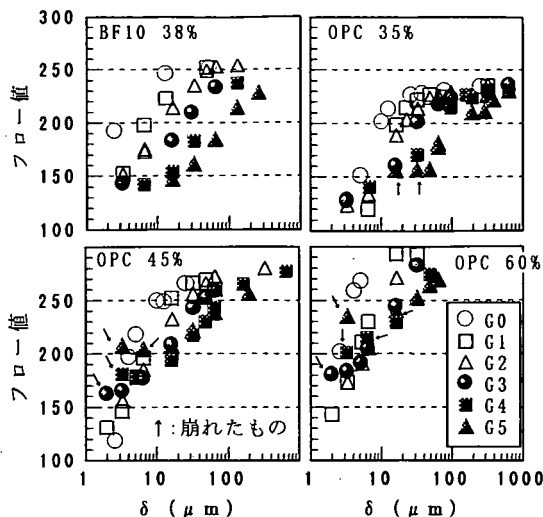


図-3 余剰ペーストの厚み δ とフロー値の関係

領域とその近傍に対応している。モルタルがフロー試験の際に一体性を保ち得る場合には、フロー値は余剰ペーストの厚み δ と細骨材粒子径 d_i の比である δ/d_i によって定まることが推察される。

d) δ/d_i とフロー値の関係

図-5 に δ/d_i とフロー値の関係を示す。

BF10-38%系とOPC-35%系では、粒子径が0.3mm以上のG2, G3, G4, G5を用いたモルタルは、フロー値が150を越える範囲において、 δ/d_i とフロー値の関係がほぼ一本の曲線で近似できる傾向を示した。一方、細骨材の粒子径が0.3mm以下のG0とG1を用いたモルタルは、他の細骨材を用いた場合よりフロー値が小さく、その差は δ/d_i が低下するほど拡大する傾向となった。

OPC-45%系とOPC-60%系では、細骨材の粒子径が大きいモルタルほどフロー値も大きく、その傾向は δ/d_i が低下するほど顕著となった。G5, G4を用いた場合、 δ/d_i が低下するとモルタルが崩れて広がり、 δ/d_i が低下してもフロー値はある一定の値より低下しないことも伺われる。OPC-45%系の $\delta/d_i > 0.06$ では、細骨材粒子径が異なっても δ/d_i とフロー値の関係が一致する傾向があるが、OPC-60%系では各種モルタルの δ/d_i とフロー値の関係が一致する領域は認められない。

このような傾向の相違は、ペーストの性状に起因するものと考えられる。表-2に示すペースト単味の見掛け粘度は、OPC-60%, OPC-45%, OPC-35%, BF10-38%の順に小さく、OPC-45%系とOPC-60%系の試験結果は、ペーストの粘性が小さい場合に比較的粒子径の大きい単一粒度の細骨材を使用

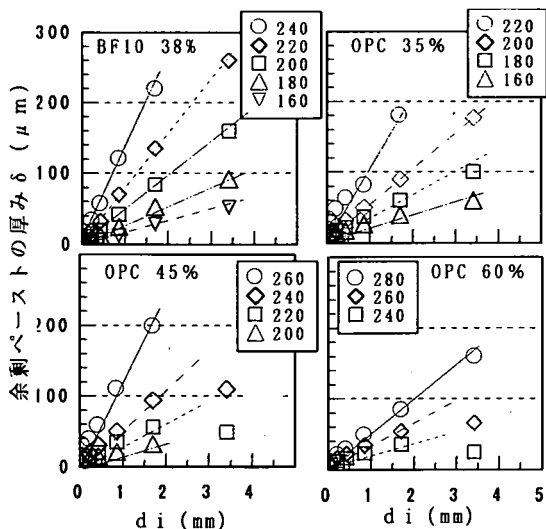


図-4 細骨材の粒子径と一定のフロー値に対応するフロー値の関係

したモルタルが分離しやすいことを示しており、これらの系における δ/d_i とフロー値の傾向は分離の影響も反映したものと考えられる。

これらの結果より、プラスチックで分離のないモルタルでは、使用する細骨材の粒子径が異なっても δ/d_i とフロー値の関係が一致し、 δ/d_i のみでフロー値が定まる範囲が存在するものと考えられる。

尚、ペーストの粘性が低い系における δ/d_i とフロー値の関係については、後述4.にて連続的な粒度構成の細骨材を使用して再検討した。

(e) 同一フロー値に対応する δ/d_i の検討

BF10-38%系とOPC-35%系で0.3mm以下の細骨材でその粒子径 d_i が小さいほど、 δ/d_i の低下に伴って他よりフロー値が小さくなる傾向は、 δ/d_i および細骨材粒子径 d_i の両方が関係する要因の影響と考えられる。そのような要因として、余剰ペーストの厚み δ に着目すると、 δ は d_i に比例して変化するため δ/d_i が等しくても d_i が小さいほど細骨材の粒子間隔 ($= \delta \times 2$) は小さくなる。隣り合う細骨材粒子の間隔 2δ が小さくなると粉体粒子と細骨材粒子の干渉が生じて流動性に影響を及ぼすことが予想される。そこで、BF10-38%系とOPC-35%の実験結果に関して細骨材間隔 2δ と粉体粒子の大きさを比較した。

図-6は、各細骨材を使用したモルタル毎のフロー値=160, 180, 200, 220に対応する δ/d_i の値(以下、 $[\delta/d_i]$)と細骨材粒子径 d_i との関係を示したものである。図-6の縦軸は、モルタル中に分散する細骨材粒子の間隔 ($\delta \times 2$)

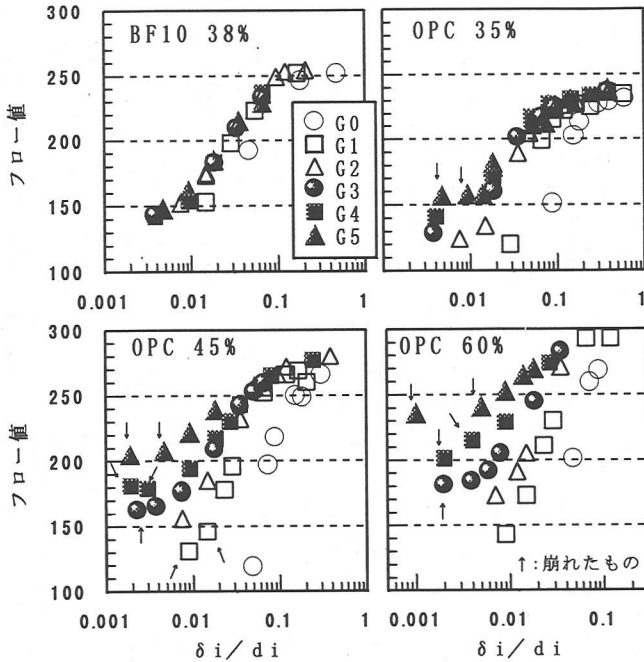


図-5 δ/d_i とフロー値の関係

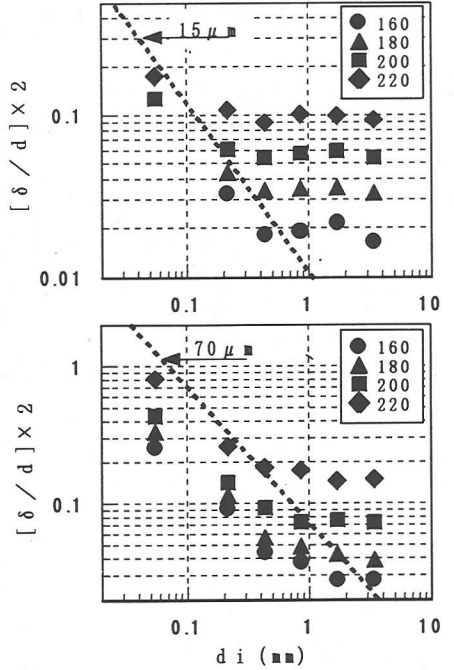


図-6 細骨材粒子径 d_i とフロー値が等しくなるときの δ/d_i の関係

との対応を容易にするために $(\delta/d_i) \times 2$ とした。図中の斜めの線は、図-1に示すOPCおよびBF10のそれぞれの最大粒径 $P_{max} = \text{約} 70 \mu\text{m}$ と $\text{約} 15 \mu\text{m}$ と d_i の比である P_{max}/d_i を示しており、各線より右上は、細骨材間隔 2δ が P_{max} より大きい領域である。

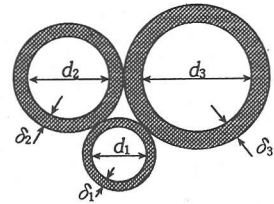
OPC-35%系、BF10-38%系ともに、 P_{max} の線より右上の領域では、細骨材の粒子径 d_i によらず $[\delta/d_i]$ がほぼ一定であり、この領域では δ/d_i が等しければフロー値も等しくなっている。一方、 P_{max} の線より下側では、細骨材粒子径 d_i が小さいほど $[\delta/d_i]$ が増大しており、細骨材間隔がペースト中の粉体の大きさと同程度以下になると粉体と細骨材の干渉が生じ、そのようなモルタルは、 δ/d が等しくても他よりフロー値が小さくなることが推察される。

以上、 δ/d が等しければフロー値も等しくなるモルタルでは、ペースト中の粉体粒子と細骨材粒子の干渉が小さいことが示唆される。

3. 単一粒度細骨材を二～三種類混合した細骨材を使用したモルタルによる実験

(1) 実験の目的

単一粒度以外の細骨材を用いた場合にも粒度および単位細骨材体積がフロー値に及ぼす影響を



$$\frac{\delta_1}{d_1} = \frac{\delta_2}{d_2} = \frac{\delta_3}{d_3}$$

δ_i : 余剰ペーストの厚み
 d_i : 粒子径

図-7 モルタル中に分散した細骨材表面の余剰ペーストの厚み δ と細骨材粒子径 d_i の関係

δ/d_i を指標として統一的に評価できるか否かを確認するため、1～3種類の単一粒度細骨材から構成されるモデル細骨材の粒度構成や平均粒径を変化させてフロー値と δ/d_i の関係を調べた。

(2) δ/d の算出方法

図-7は、モルタル中に分散した大小の細骨材の粒子径 d_i と余剰ペーストの厚み δ_i の関係をモデル的に示したものである。各細骨材表面の余剰ペーストの厚み δ_i は細骨材粒子径 d_i に比例する

表-3 単一粒度細骨材の性状

記号	範囲 (mm)	粒子径d _i (mm)	実積率 (%)
G1	0.15-0.30	0.216	62.5
G2	0.30-0.60	0.433	63.2
G3	0.60-1.18	0.857	62.6
G4	1.18-2.36	1.702	63.5
G5	2.36-4.75	3.416	63.1

表-4 単一粒度細骨材を二三種類混合した細骨材の性状

単一粒度細骨材 記号 範囲(mm)	二粒度										三粒度	
	G15A	G15B	G15C	G25A	G25B	G25C	G25D	G35C	G45E	G135B	G245C	
G1 0.15-0.30	70	20	7	-	-	-	-	-	-	14	-	
G2 0.30-0.60	-	-	-	70	45	15	5	-	-	-	11	
G3 0.60-1.18	-	-	-	-	-	-	-	33	-	30	-	
G4 1.18-2.36	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	30	
G5 2.36-4.75	30	80	93	30	55	85	95	67	60	56	59	
平均粒径 da(mm)	0.3	0.86	1.68	0.59	0.84	1.69	2.56	1.69	2.44	0.85	1.69	
実積率 (%)	70.3	72.1	66.4	69.1	73.4	68.9	64.7	70.2	66.3	74.6	70.1	

と仮定し、比例係数Kをδ/dと称した。

各細骨材表面の厚みδ_iの余剰ペーストの体積を全細骨材について合計した体積は式(9)で算出される。式(10)に示すようにδ_i/d_iは一定であると仮しており、δ_iとd_iの関係は式(11)で示される。式(12)は、式(9)に式(11)の関係代入したものであり、δ/dはV_{exp}に式(2)を代入して得られる式(13)で算出した。

$$V_{exp} = \sum (\delta_i S_i V_i) \quad (9)$$

$$\frac{\delta_1}{d_1} = \frac{\delta_2}{d_2} = \dots = \frac{\delta_i}{d_i} = K \quad (10)$$

$$\delta_1 = K d_1, \delta_2 = K d_2, \dots, \delta_i = K d_i \quad (11)$$

$$V_{exp} = K \cdot V_s \sum (d_i S_i x_i) \quad (12)$$

$$\therefore K = \frac{\delta}{d} = \frac{V_{exp}}{V_s \sum (d_i S_i x_i)} = \frac{1}{\sum (d_i S_i x_i)} \left(\frac{G}{G_s} - 1 \right) \quad (13)$$

ここに、

- d_i: 各単一粒度細骨材の平均粒子径 (cm)
- δ_i: 粒子径d_iの細骨材表面の余剰ペーストの厚み (cm)
- V_i: 粒子径d_iの細骨材の体積 (cm³/l)
- S_i: 粒子径d_iの細骨材の比表面積 (cm²/cm³)
- V_s: 単位細骨材体積 (cm³/l)
- x_i: 全細骨材中に占める粒子径d_iの細骨材の割合 (x_i = V_i/V_s)
- G: 細骨材の実積率 (%)
- G_s: 配合実積率 (%) (G_s = V_s/10)

(3) 試験方法

セメントは、前述の実験で使用したものと同一である。細骨材は、前述の実験と同じ方法で調整した単一粒度のガラスビーズをそれぞれ単独または二種類、三種類混合して使用した。単一粒度細

骨材の性状を表-3に示し、二粒度混合、三粒度混合細骨材の性状を表-4に示した。表-4に示した平均粒径daは、式(14)で算出される面積体積平均径である。

$$d_a = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (14)$$

以下、各細骨材は表-3、表-4の記号で示す。モルタルの配合は、材料分離が生じにくい条件で細骨材粒度の影響を把握するためにW/C=35%とし、δ/dが約0.01~0.3となる範囲で各細骨材の単位細骨材体積を5~10水準変化させた。

練混ぜおよびフロー試験の方法は前述2.と同一である。モルタルの空隙率は、JIS A 6201 フライアッシュ(1991年)の単位水量比試験に定められた方法で測定したモルタルの単位容積質量から算出した。

(4) 試験結果

図-8にδ/dとフローの関係を示した。A図とB図は、それぞれ、G1とG5を混合した場合(以下、1-5系)とG2とG5を混合した場合(以下、2-5系)である。

1-5系では、G15B、G15C、G5を使用した場合は、フロー値がほぼ一致したが、平均粒径daが比較的小さいG1とG15-Aを用いた場合は、δ/dが小さくなるほど他よりフロー値が小さくなった。2-5系においても、フロー値は、δ/d > 約0.04の範囲でほぼ一致したが、それよりδ/dが小さくなると細骨材の平均粒径daが小さい場合ほどフロー値も小さくなる傾向が認められる。

C図とD図は、単一粒度、二粒度、三粒度細骨材で平均粒径daがほぼ等しい場合を比較したものである。C図はda=約0.85mm、D図はda=約1.7mmの場合である。いずれも幅広いδ/dの範囲でフ

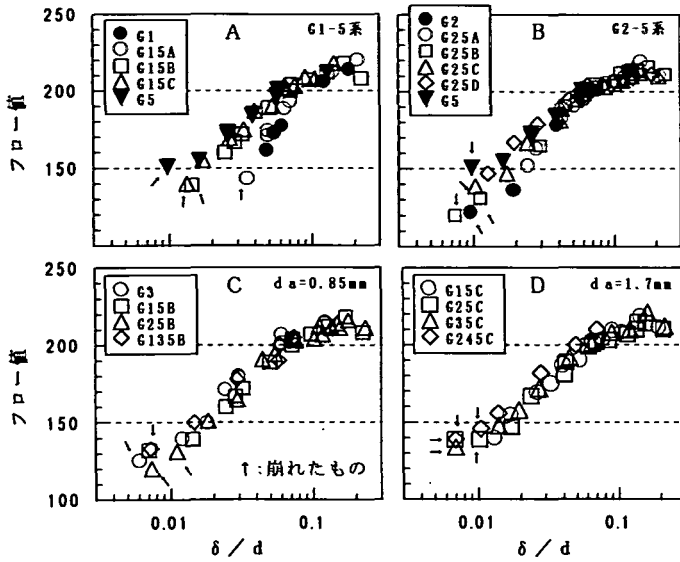


図-8 δ/d とフロー値の関係

ロー値が一致しており、平均粒径が等しければ、粒度構成もしくは実積率の異なる細骨材を用いたモルタルもフロー値は δ/d のみで定まるものと考えられる。

以上、単一粒度細骨材を数種類組合せた細骨材を使用したモルタルにおいても δ/d が等しいければフロー値も等しくなることが確認され、この関係が成り立つ条件を考える上で平均粒径 d_a がひとつの目安となることが示された。

図-9は、フロー値=170, 190, 200に対応する δ/d を求めて細骨材の平均粒径 d_a との関係を示したものである。尚、単一粒度の場合は $d_a = d_i$ である。縦軸は、図-6と同様に $[\delta/d] \times 2$ とした。図中の斜めの線は、粉体粒子の最大粒径 $P_{max} = 70 \mu m$ に対応する P_{max}/d_a の線である。

P_{max}/d_a より右上の領域では、粒度構成によらず $[\delta/d]$ がほぼ一定となる傾向が認められ、この領域では、細骨材の粒度構成や平均粒径 d_a が異なってもモルタルのフロー値を δ/d により統一的に評価できると考えられる。一方、 P_{max}/d_a より下側の領域では、 d_a が小さいほど $[\delta/d]$ は増大した。

ここで、二粒度および三粒度混合細骨材の個々の粒子を覆う余剰ペーストの厚み δ_i に着目すると、 δ_i は粒子径 d_i に比例しており、細骨材の粒子間隔は細骨材の大きさによって異なる。このような場合、細骨材とセメントの粒子干渉の影響が顕在化する骨材間隔は、両者の粒度構成、形状によって変化するため、本実験の範囲ではその条件を理

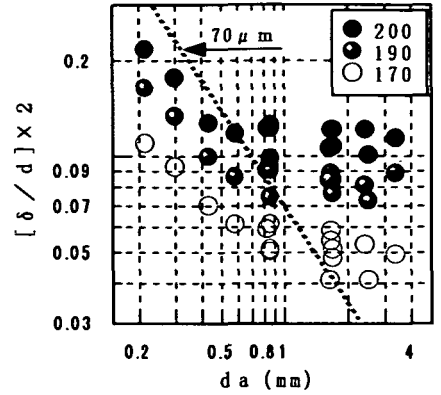


図-9 細骨材平均粒径と一定のフロー値に対応する δ/d の関係

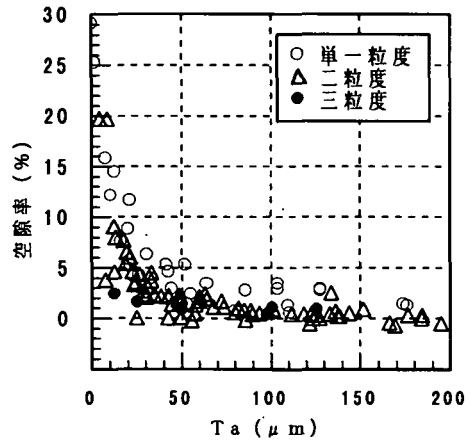


図-10 細骨材平均間隔と空隙率の関係

論的に算出することは困難である。しかし、次式(15)で算出される T_a は、細骨材粒子の平均間隔と考えることができ、 P_{max}/d_a より右上の領域は、細骨材粒子の平均間隔 T_a が粉体粒子の最大粒径 P_{max} より大きい領域に対応する。

$$T_a = d_a \times \frac{\delta}{d} \times 2 \quad (15)$$

細骨材間隔が粉体粒子より小さくなると、隣接する細骨材は、その間隔を押し開かれることなく相互に移動することが困難となる。すなわち、粒子干渉の作用が大きいモルタルの変形はダイラタンシーを伴ったものとなり、モルタルは、ペーストと骨材の二相材料から連続した空気相を含む三相材料に変化していく^{5), 19)}。図-10は、本実験の

全モルタルの T_a と空隙率の関係を示したものである。モルタル中の空隙量は、 $T_a=50\sim 70\mu\text{m}$ 以下の範囲で増大しており、この領域で粒子干渉の作用が強まることが示唆される。これより、**図-9**の $70\mu\text{m}/d_a$ の線より下側の領域にみられる $[\delta/d]$ の増大には細骨材とペースト中の粉体粒子の干渉が影響しているものと考えられる。

4. 分散した骨材を覆う余剰ペーストの形状を考慮して算出される δ 、 δ/d とフロー値の関係

(1) 目的

これまでの実験では、Kennedy⁶⁾、Powers⁵⁾の方法に従って余剰ペーストの体積を細骨材の比表面積で除する方法で余剰ペーストの厚み δ および δ/d を求めた。

ところが、分散した骨材が余剰ペーストによって覆われた状態は、骨材がその形状を保って膨張し互いに接触した状態と等しいと考え、式(16)に示すように、**図-1**のC図に示した粒子径 $=d_i+2\delta$ の球体と粒子径 d_i の細骨材の体積の差を全細骨材について合計すると余剰ペースト体積 V_{exp} と等しくなる。これより、得られる式(17)に式(2)を代入した式(18)によっても余剰ペーストの厚み δ_i を算出できる。

δ/d についても、**図-1**、**図-7**の両モデルともに各細骨材粒子を覆う余剰ペーストの体積を合計した体積は式(19)で表され、これに式(11)を代

$$V_{\text{exp}} = \frac{\pi}{6} \left\{ (d_i + 2\delta_i)^3 - d_i^3 \right\} \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_i^3} \quad (16)$$

$$\therefore \delta_i = \frac{d_i}{2} \left\{ \left[\frac{V_{\text{exp}}}{V_s} + 1 \right]^{1/3} - 1 \right\} \quad (17)$$

$$= \frac{d_i}{2} \left\{ \left[\frac{G}{G_s} \right]^{1/3} - 1 \right\} \quad (18)$$

$$V_{\text{exp}} = \sum \frac{\pi}{6} \left\{ (d_i + 2\delta_i)^3 - d_i^3 \right\} \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_i^3} \quad (19)$$

$$= \sum \left[\{ (1+2K)^3 - 1 \} V_i \right] \\ = \{ (1+2K)^3 - 1 \} V_s \quad (20)$$

$$K = \frac{\delta}{d} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{G}{G_s} \right]^{1/3} - 1 \right\} \quad (21)$$

入すると余剰ペースト量 V_{exp} と $K (= \delta/d)$ の関係は式(20)となり、 V_{exp} に式(2)を代入して求まる算出式(21)で δ/d を算出できる。

式(18)は、コンクリート中に分散する骨材粒子間隔の算出式としてC. A. G. Weymouth¹⁶⁾、沼田¹⁹⁾も採用している。

Kennedy⁶⁾、Powers⁵⁾の方法(式(13))で算出される細骨材の粒子間隔 $\delta \times 2$ は、細骨材の粒子径が小さいほど、細骨材の分散距離が大きくなるほど、実際の粒子間隔より大きくなるが、式(18)は、細骨材の詰め込み状態と分散状態の幾何学的関係から算出するため細骨材間隔を正確に算出できる。

ここでは、前述した2つの実験結果に後者の算出方法を適用してこれまでに得られた知見を検証した。

以下、式(3)および式(13)で算出される値をそれぞれ δ' 、 δ'/d と称し、式(18)、式(21)で算出した値をそれぞれ δ'' 、 δ''/d と称して区別した。

(2) δ'' 、 δ''/d とフロー値の関係および δ' 、 δ'/d との比較

単一粒度系のOPC-35%系とBF10-38%系における δ'' とフロー値の関係を**図-11**に示す。**図-3**の結果と比較して大差なく、 δ' および δ'' だけでは、細骨材粒度および単位細骨材体積がフロー値に及ぼす影響の評価指標とはなり得ないことが確認された。

図-12に δ''/d と δ'/d の関係を示す。 δ''/d が大きくなるほど、 δ'/d は δ''/d より大きくなる傾向があるが、両者の関係はほぼ一本の曲線で近似できる高い相関があり、両式で算出される値の差に粒度構成や平均粒径の違いによる差異は認められない。

図-13は、前述3.の1-5系および単一粒度、二粒度混合、三粒度混合で平均粒径 d_a が約0.85mmに等しい細骨材を用いた場合の δ''/d とフロー値の関係を示したものである。 δ''/d と δ'/d には**図-12**に示した関係があるため、 δ''/d とフロー値の関係は、 δ'/d を横軸とした場合(**図-8**)に比較すると多少小さい側にずれるが粒度構成や平均粒径の影響については全く同様の傾向となっている。

図-14は、のフロー値=170, 190, 200に対応する $[\delta'/d] \times 2$ と平均粒径 d_a との関係を $[\delta''/d] \times 2$ との関係にプロットし直したものである。**図-14**は、**図-9**と比較して $[\delta''/d]$ がやや小さくなるが、その差は僅かであり、フロー値が δ''/d のみで定まる範囲は、 P_{max}/d の線より上側の粒子干渉の小さい領域であることに変わり

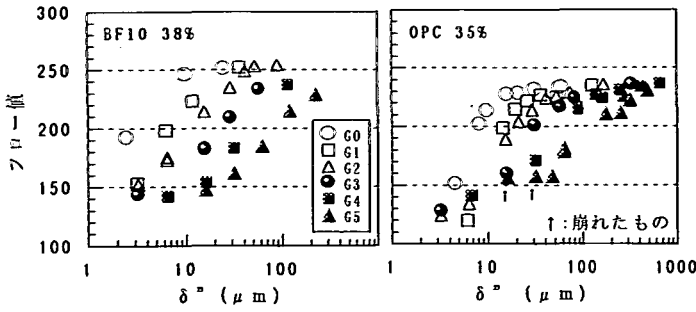


図-11 δ'' とフロー値の関係

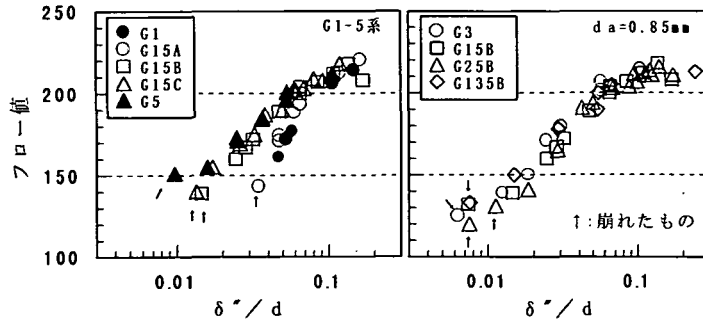
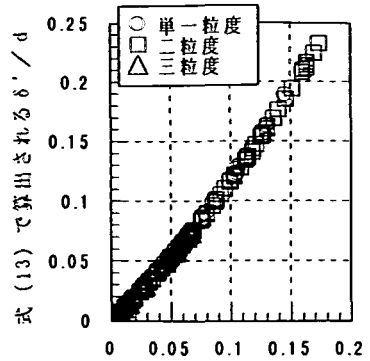


図-13 δ'' / d とフロー値の関係



式 (21) で算出される δ'' / d
図-12 δ'' / d と δ' / d の関係

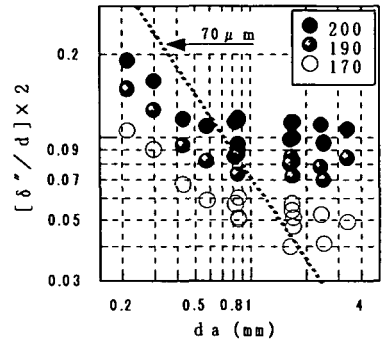


図-14 細骨材平均粒径と一定のフロー値に対応する δ'' / d の関係

ない。

以上、細骨材の表面積で余剰ペースト体積を割る方法と細骨材の充填状態と分散状態の幾何学的関係より算出する方法では、算出される余剰ペーストの厚み δ に差異が生じる。しかし、どちらの算出方法を用いても「余剰ペーストの厚み δ / 細骨材粒子径 d 」を指標として細骨材粒度と単位細骨材体積がフロー値に及ぼす影響を同時に評価できること、およびその適用条件は細骨材と粉体粒子の干渉の小さい領域と考えられることが確認された。

5. 各種細骨材を使用したモルタルへの適用

(1) 目的

一般に用いられるコンクリート中のモルタルを対象として、 δ / d によるフロー値評価の適用性を検討するため、比較的セメントペーストの粘性の低い系にて細骨材の形状、粒度を変化させたモルタルのフロー値を測定し、 δ / d との関係性を調査した。

本実験では、細骨材として海砂や砕砂を使用した。ここで、細骨材形状が球でない場合には、 δ' / d と δ'' / d では、余剰ペーストの厚みに対する考え方が異なる。前者は、骨材表面の何処におい

ても余剰ペーストの厚みは一定と仮定している。後者は、骨材粒子が余剰ペーストで覆われた状態は、各骨材がその形状を保持して膨張したものと相似と考えており、細骨材粒子表面の余剰ペーストの厚みは粒子各部の寸法に比例して変化すると仮定している。

本実験では、 δ' / d と δ'' / d のいずれが細骨材の形状、粒度、単位体積の影響をより統一的に評価できるかを比較検討した。

(2) 試験方法

a) 使用材料

セメントは、粉末度 $3320 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、比重 3.15 の普通ポルトランドセメントを使用した。化学混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤（以下、SP）を使用した。ガラスビーズ、海砂、砕砂は、それぞれ表-5 に示す各単一粒度に調整し、表-6 に示す 3 水準の粒度で使用した。各粒度に調整した細骨材の実積率と比表面積を表-7 示した。尚、比表面積は式 (4) ~ (7) で算出した。ガラスビーズ

表-5 各種単一粒度細骨材の実績率

範囲 (mm)	記号	G	S	C
	種類	ガラス ビーズ	海砂	砕砂
0.15 - 0.30		62.3	55.6	48.3
0.30 - 0.60		63.6	56.0	49.6
0.60 - 1.18		63.6	57.2	50.7
1.18 - 2.36		63.4	57.9	52.7
2.36 - 4.75		63.4	58.3	53.2

表-6 細骨材の粒度構成

範囲 (mm)	粒度構成 (%)		
	連続	135B	245C
0.15 - 0.30	18.6	14	-
0.30 - 0.60	24.8	-	11
0.60 - 1.18	26.8	30	-
1.18 - 2.36	19.9	-	30
2.36 - 4.75	9.9	56	59
平均粒径 d_a (mm)	0.53	0.85	1.69

表-7 各細骨材の実績率および比表面積

種類	実績率 (%)			比表面積 (cm^2/cm^3)		
	連続	135B	245C	連続	135B	245C
G	72.4	75.8	70.1	118.0	72.9	36.9
S	61.7	65.0	61.2	149.0	90.7	46.0
C	55.1	57.9	55.9	179.6	109.5	54.2

の調整方法は前述2. と同じである。海砂および砕砂は、一分間にふるいを通過する量がふるい上の試料重量の0.5%以下になるまでふるい分けた。海砂は、各単一粒度にふるい分けた後に細骨材の塩酸溶解物試験方法²²⁾に準じて貝殻を溶解させ、流水で水洗して塩酸分と細骨材表面の微粉を除去した。塩酸分の除去は、メチルレッド溶液が変色しなくなるまで水洗を繰り返した。砕砂も微粉を取り除くために流水にて水洗した。以下、ガラスビーズ、海砂、砕砂をそれぞれ記号G, S, Cで示し、表-6の各粒度の呼称と組み合わせて、例えば、ガラスビーズを使用した粒度135Bの細骨材をG135Bと称した。

各細骨材は、絶乾状態で使用した。ガラスビーズ海砂、砕砂の絶乾比重は、それぞれ2.47, 2.59, 2.94であった。その他の試験条件は前述の2つの実験と同一とした。

b) モルタルの配合

ペースト部分の配合は、W/C=55%でプレーンの場合(以下、W/C=55%系)、W/C=35%でSPをセメント重量の1%添加した場合(以下、W/C=35%-SP系)の2種類とした。モルタルの配合は、 δ'/d が約0.01~0.3となる範囲で単位細骨材体積を変化させた。

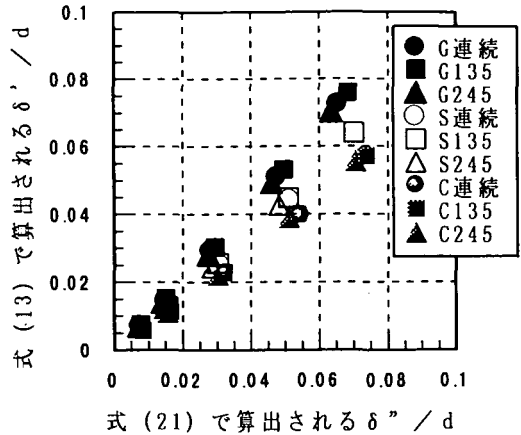


図-15 δ''/d と δ'/d の関係

c) 練混ぜおよびフロー試験

「JIS A 5201 セメントの物理試験」に従った。但し、1バッチの練混ぜ量は1リットルとした。

また、W/C=55%系では、フローテーブルの落下回数0打、15打、35打のフロー値を測定した。W/C=35%-SP系では0打のフロー値を測定した。

(3) 試験結果

a) δ''/d と δ'/d の関係

図-15に δ''/d と δ'/d の関係を示す。細骨材の種類が同じであれば両者の関係は一本の曲線で近似できる。すなわち、使用する細骨材の種類を一定として粒度の違いを比較する場合、 δ''/d と δ'/d のいずれを用いて評価してもフロー値との関係は同じ傾向になる。一方、細骨材の種類が異なると δ''/d と δ'/d の関係に差異があり、 δ''/d が大きくなるほど拡大するため、同一の粒度であっても細骨材の種類が異なれば、フロー値との関係は、 δ''/d と δ'/d では傾向が異なる。

従って、以下、細骨材の種類を一定として粒度を変化させた場合については、 δ''/d とフロー値の関係のみ検討し、細骨材の種類が異なる場合には、 δ'/d と δ''/d を比較した。

b) 粒度が異なる場合への適用性

図-16に δ''/d とフロー値の関係を示す。W/C=35%-SP系で連続粒度のガラスビーズを使用した場合は $\delta''/d \approx 0.05$ のときに、その他は全て $\delta''/d \geq 0.03$ の範囲で δ''/d が等しければ粒度によらずフロー値も等しくなった。一方、 δ''/d が約0.02以下では、フロー値は一致しなくなり、連続粒度、粒度135Bの順に平均粒径 d_a が小さいほどフロー値が小さくなった。この傾向は、W/C=55%系よりW/C=35%-SP系の方が顕著になった。

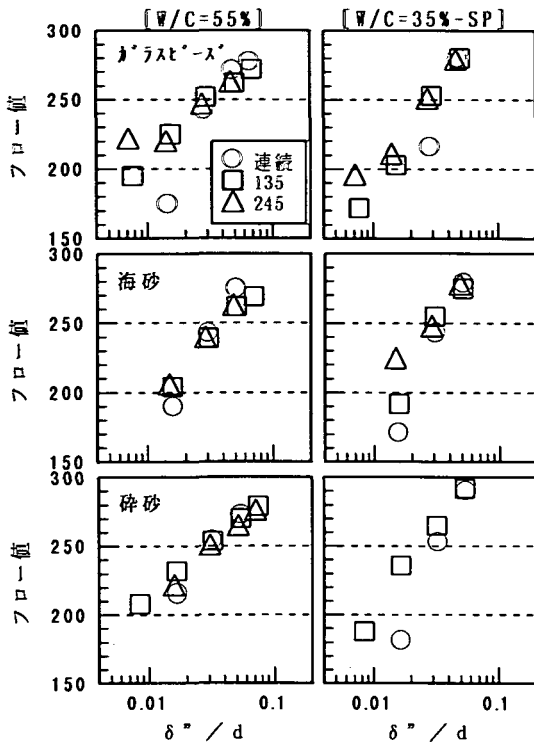


図-16 δ''/d とフロー値の関係
(粒度が異なる場合への適用性)

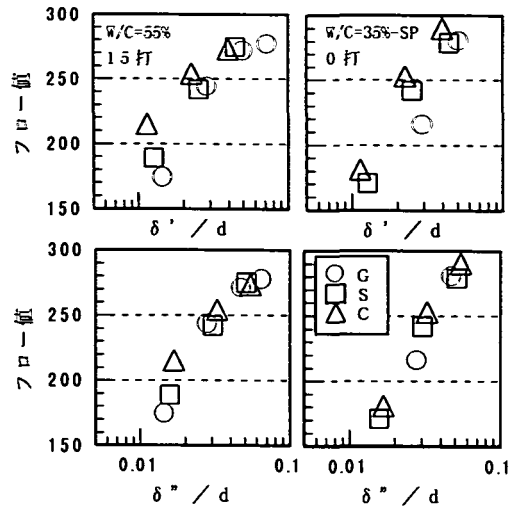


図-17 δ''/d とフロー値の関係
(細骨材の種類が異なる場合への適用性)

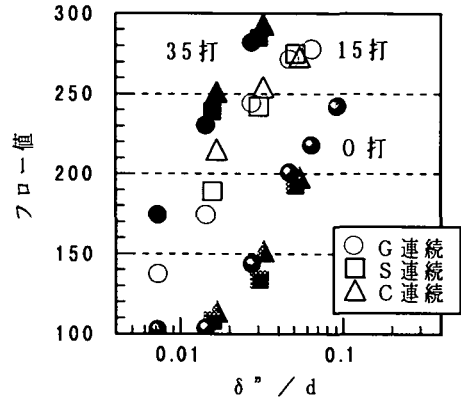


図-18 フローテーブルの落下回数が増えた場合の
 δ''/d とフロー値の関係
(W/C=55%)

ここで、フロー値が一致した範囲で細骨材平均間隔 T_a を求めると $\delta''/d = 0.03$ のとき連続粒度は $32\mu\text{m}$ 、粒度 135 は $51\mu\text{m}$ であり、 $\delta''/d = 0.05$ のとき連続粒度が $51\mu\text{m}$ である。前述の 2. 3. の W/C=35%系 (混和剤無添加) の実験結果では、 δ''/d が等しければフロー値も等しくなる細骨材の平均間隔は、 $T_a > \text{約} 70\mu\text{m}$ であったが、本実験ではこれより小さい範囲でもフロー値が一致している。これは、W/Cの増大に伴ってペースト中の粉体濃度が低下したこと、高性能 A E 減水剤の添加によってペースト中のセメント粒子の分散性が向上したことにより粒子干渉が顕著になる細骨材粒子間隔が小さくなったものと考えられる。

以上、前述 2. および 3. の W/C=35%系 (混和剤無添加) のように粘性の高いセメントペーストだけでなく、ペーストの配合を通常コンクリートや高流動コンクリート中のペーストと同程度とし、細骨材として海砂や砕砂を用いたモルタルにおいても、細骨材の形状が一定であれば、 δ''/d もしくは δ''/d だけで粒度と単位細骨材体積がフロー値に及ぼす影響を同時に評価できることが確かめられた。また、その適用範囲は、ペーストの配合によって異なり、

W/C=35%系 (混和剤無添加) より T_a の小さい範囲でもフロー値が一致した。

c) 細骨材形状が異なる場合への適用性

連続粒度のガラスビーズ、海砂、砕砂を用いたモルタルの δ''/d とフロー値の関係および δ''/d とフロー値の関係を 図-17 に示した。

W/C=55%系、W/C=35%-SP系ともに δ''/d とフロー値の関係は 3 種類の細骨材でほぼ一致し、 図-16 の同一細骨材で粒度を変化させた場合より、同一粒度で細骨材の形状が異なる方がフロー値の一致する範囲は広がった。 δ''/d を指標とすることで細骨材形状の違いと単位細骨材体積の変化がフロー値に及ぼす影響を同時に評価できると考え

られる。しかし、 δ' / d を横軸とした場合は、細骨材の種類によってフロー値が異なった。

d) 形状および粒度の異なる各種細骨材を使用したモルタルへの適用性

上記の結果より、細骨材と粉体が干渉を起こさない程度に細骨材が分散したモルタルでは、式(21)で算出される δ'' / d を指標とすることで、細骨材形状、細骨材粒度、単位細骨材体積の変化がフロー値に及ぼす影響を統一的に評価できるものと考えられる。ここで、 δ'' / d は、式(21)に示されるように細骨材の固有実積率と単位細骨材体積のみで定まる指標である。本実験の結果より、細骨材の形状および粒度がフロー値に及ぼす影響は、固有実積率によって同時に評価されたものと考えられる。

一方、式(13)より算出される δ' / d は、粒度および単位細骨材体積の影響を同時に評価できるが、細骨材の形状が異なる場合には、 δ' / d が等しくてもフロー値は一致しない結果となった。 δ' / d では、骨材形状の評価に単一粒度実積率と角ばり係数の関係から推定した比表面積を用いているが、この過程にはいくつかの間接的な方法による推定が含まれており、さらに検討の余地があるものと考えられる。

e) フローテーブルの落下回数が変化した場合への適用性

図-18は、 $W/C=55\%$ 系で連続粒度の細骨材を用いたモルタルのフローテーブル落下回数 0 打、15 打、35 打のときのフロー値と δ'' / d の関係を比較したものである。これより、15 打のときだけでなく、0 打、35 打においても δ'' / d とフローの関係に細骨材の種類による差異は認められず、モルタルの受ける外力がある程度変化した場合にも、 δ'' / d を指標としてモルタルの流動性を評価できるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、細骨材の粒度、形状、単位細骨材体積がモルタルのフロー値に及ぼす影響を余剰ペーストの厚みと関連づけて検討し、以下の結果を得た。

- (1) 細骨材として単一粒度のガラスビーズを用いた実験では、 $W/C=35\%$ のプレーンモルタルなど粘性が比較的大きくて分離が生じにくい場合には、余剰ペーストの厚み δ と細骨材粒子径 d_i の比である δ / d_i が等しければフロー値もほぼ等しくなる領域があり、その領域は、細骨材間隔がペースト中の粉体粒子の最大径

より大きい範囲であった。

- (2) 細骨材として単一粒度のガラスビーズを二、三種類使用した実験においても δ / d が等しければ細骨材の粒度構成や平均粒径によらずフロー値も等しくなる領域があり、 δ / d を指標として粒度および単位細骨材体積がフロー値に及ぼす影響を統一的に評価できる範囲は、空隙率の測定結果において細骨材と粉体粒子の干渉が小さいと推察される範囲であった。
- (3) 上述の(1)(2)の結果は、余剰ペーストの厚み δ の算出において余剰ペースト体積を細骨材表面積で割る算出方法によって得られたものである。一方、骨材が余剰ペーストで覆われた状態は、骨材が形状を保って膨張した状態と相似であると仮定して余剰ペーストの厚み δ'' および余剰ペーストの厚み細骨材粒子径との比 δ'' / d を算出する方法を用いてもほぼ同じ結果が得られた。

- (4) $W/C=55\%$ および $W/C=35\%$ で高性能AE減水剤を添加した系で粒度および形状が異なる細骨材を用いた場合にも上述(3)の後者の方法で算出される δ'' / d が等しければフロー値も等しくなり、 $W/C=35\%$ のプレーンモルタルの場合と比べて細骨材間隔がより小さい範囲でもフロー値が一致した。しかし、前者の方法で算出される δ' / d を指標とした場合には、細骨材の形状が異なるとフロー値に差異が生じた。

これらの結果をまとめると次の通りである。

各細骨材を覆う余剰ペーストの厚み δ_i と各細骨材粒子径 d_i の比である δ / d を指標として細骨材形状、細骨材粒度、単位細骨材体積の変化がフロー値に及ぼす影響を統一的に評価できる。ここで、 δ / d は、 δ の算出方法として骨材が余剰ペーストで覆われた状態から骨材体積を差し引く方法で求めたものであり、余剰ペースト体積を骨材表面積で割る方法では、細骨材形状が異なる場合の適合性が不十分であり、骨材形状評価の方法に検討の余地が残されていると考えられる。

また、 δ / d を指標として適用できる条件は、分離しない範囲で細骨材がペースト中の粉体と干渉を起こさない程度の間隔を保って分散していることであり、そのような骨材間隔はペーストの性状によって異なると考えられる。

参考文献

- 1) Talbot, A. N. and Richart, F. E. : The Strength of Concrete, Its Relation to the Cement Aggregate and Water, *Bulletin* No. 137, Engineering Experimental Station, University of Illinois, Urbana, 1923.
- 2) Goldbeck, A. T. and Gray, J. E. : A Method of Proportioning Concrete for Strength, Workability and Durability, *Bulletin* No. 11, National Crushed Stone Association, Washington, D. C., 1949.
- 3) (社)日本コンクリート工学協会編:コンクリート便覧[第二編], pp. 142-143, 1995.
- 4) 例えば土木学会編:コンクリート標準示方書[施工編], 1996. 3.
- 5) Powers, T. C. : *Properties of fresh concrete*, John Wiley & Sons, Inc., 1968.
- 6) Kennedy, C. T. : The Design of Concrete Mixtures, *Proceeding of ACI*, 36, pp. 373-400, 1940.
- 7) 松下博通, 田中邦博, 近田孝夫: 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, Vol. 42, pp. 88-91, 1988.
- 8) 松下博通, 近田孝夫: 余剰ペースト理論の配合設計への適用に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp. 84-89, 1989.
- 9) 前田悦孝, 近田孝夫, 松下博通: 細骨材の粒度および形状がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 387-392, 1992.
- 10) 前田悦孝, 近田孝夫, 松下博通: 細骨材の粒度および形状がフレッシュモルタルのコンシステンシーに及ぼす影響, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 580-581, 1992.
- 11) 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝: モルタルのフローに及ぼす細骨材粒径と余剰ペースト膜厚の影響, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 582-583, 1992.
- 12) 前田悦孝, 近田孝夫, 松下博通: 単一粒度細骨材を用いたモルタルのコンシステンシーに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 467-472, 1994.
- 13) 近田孝夫, 前田悦孝, 松下博通: モデル骨材を用いたモルタルのコンシステンシーに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 582-592, 1995.
- 14) 阿部道彦, 洪悦郎: 砕砂コンクリートの調合設計の一試案, 第一回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 165-168, 1979.
- 15) 長島弘, 星野政幸: 広範な骨材に適用する配合設計法, 第三回生コン技術大会研究発表論文集, pp. 93-98, 1985.
- 16) Weymouth, C. A. G. : Effect of Particle Interference in Mortar and Concrete, *Rock Products*. Vol. 36, No. 2, pp. 26-36, 1933.
- 17) 徳光善治: 砂の粒度および量とモルタルの諸物性の関係について, 土木学会論文集, 第96号, pp. 12-22, 1963.
- 18) 徳光善治: 粒体の詰め込みについて, 粉体工学, pp. 29-34, 1965. 9.
- 19) 沼田晋一: コンクリート中の骨材の幾何学的関係と粗骨材等各材料の配合割合の構成則, 西日本工業大学紀要理工学編, 第24巻, 1994.
- 20) 浅賀喜与志, 鄭然植, 鶴見敬章, 大門正機: 振動式粘度計による微粉末スラグペーストのレオロジー特性の測定, *Gypsum & Lime*. pp. 3-8, No. 224, 1990.
- 21) 沼田晋一: 水砕スラグのコンクリート細骨材への実用化に関する研究, 九州大学学位論文, 1982.
- 22) (社)セメント協会: 細骨材の品質がコンクリートの諸性状に及ぼす影響, 専門委員会報告, F32, pp. 2, 1981.

(1996.12.16 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE APPLICATION OF EXCESS PASTE THEORY FOR MIX DESIGN OF CONCRETE

Hiromichi MATSUSHITA, Takao CHIKADA and Yoshitaka MAEDA

It was investigated in this paper that the excess paste theory, which is one of the conventional theories for mix design of concrete, was able to apply the evaluation of fluidity of mortar in order to establish the theoretical mix design method of concrete. It was experimentally verified that flow value of mortar was uniformly evaluated by excess paste ratio δ/d , in which δ was the average thickness of excess paste, and d was the diameter of fine aggregate particle, on condition that shape, particle size distribution and unit volume of fine aggregate were varied.