

# 論文 余剰ペースト膜厚理論における骨材の形状評価とモルタルの流動性に関する研究

近田孝夫\*<sup>1</sup>・前田悦孝\*<sup>2</sup>・松下博通\*<sup>3</sup>

**要旨**：モルタル中に隣り合って分散している細骨材の表面間隔の半分に相当する余剰ペーストの厚みを $\delta$ とし、細骨材粒子径 $d$ との比である $\delta/d$ によってモルタルのフロー値が定まるとする考え方を示し、海砂や砕砂など形状の異なる細骨材を用いたモルタルにおいて適用性を検討した。細骨材の形状評価の手法として水透過法による細骨材表面積の測定方法を考案し、 $\delta/d$ の算出にこの方法で求めた比表面積を用いることにより、形状の異なる細骨材を使用したモルタルにおいても $\delta/d$ が等しければモルタルのフロー値が一致するという考え方を適用できることを報告した。

**キーワード**：余剰ペースト理論、細骨材形状、粒度、透水試験、フロー値

## 1. はじめに

フレッシュコンクリートの配合理論の一つにKennedyらによって提案された余剰ペースト理論がある。余剰ペーストとは、フレッシュコンクリートをセメントペーストと骨材からなる2相材料と考え、コンクリート中の骨材を最密充填状態にしたときの骨材間空隙を満たすのに必要なペースト量を全ペーストから差し引いた残りペースト量のことである。余剰ペースト理論は、骨材が余剰ペーストによって分散し、隣り合う骨材表面間の距離とセメントペーストの性状によってコンクリートの流動性が定まるとする考え方である[1]。

筆者らは、本理論の配合設計への適用化を進めるなかで、分散した骨材表面間距離の半分に相当する厚さを余剰ペースト膜厚（以下、記号 $\delta$ ）と称し、モデル細骨材として粒度構成の異なる各種ガラスビーズを用いたモルタルのフロー値は、 $\delta$ のみでなく骨材粒子径 $d$ （以下、記号 $d$ ）との比である $\delta/d$ によって定まると報告した[2]。

この考え方の適用性を一般の骨材を使用した場合において検討するためには、形状の異なる各種細骨材の表面積を精度良く求めることが大切である。

本研究では、水透過法による細骨材の表面積測定方法を考案し、形状の異なる3種類の細骨材を用いたモルタルについて、この方法で求めた表面積を用いて算出した $\delta/d$ とフロー値の関係を考察した。

## 2. 余剰ペースト膜厚理論の適用モデル

図-1に骨材粒子径と膜厚に関する考え方をモデル的に示す。各細骨材の表面に形成される余剰ペースト膜厚 $\delta_i$ は細骨材粒子径 $d_i$ に比例し、大きな細骨材粒子には大きな膜厚が形成され、小さな細骨材粒子には小さな膜厚が形成されると仮定し、その比例係数を $\delta/d$ と称する。

本研究で用いた粒子径は面積体積平均粒径 $d_{sv}$ であり[3]、本報告では、単一粒度細骨材の粒

\* 1 新日鐵化学(株)技術研究所高炉セメント技術センター所長、工修（正会員）

\* 2 新日鐵化学(株)技術研究所高炉セメント技術センター研究員、（正会員）

\* 3 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

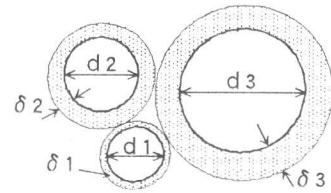
子径を $d_i$ 、単一粒度細骨材を数種類混合した細骨材の平均粒子径を $d_{ave}$ と称した。

余剰ペースト量 $P_{e,x}$ は、式(1)によって算出した。 $G_c$ は細骨材の配合実積率(=単位細骨材容積/1000×100%)、 $G_i$ は細骨材の固有実積率である。余剰ペースト量 $P_{e,x}$ は、各細骨材粒子の表面に形成される余剰ペースト膜の容積の合計に等しいので式(2)が成り立つ。これより $\delta/d$ は、(3)式によって算出した。ただし、 $\delta_i$ は粒子径 $d_i$ の細骨材粒子の表面に形成される余剰ペースト膜厚(= $\delta/d \cdot d_i$ )、 $V_i$ は粒子径 $d_i$ の細骨材粒子の容積、 $S_i$ は粒子径 $d_i$ の比表面積であり後述する水透過法により測定した値を用いた。

$$P_{e,x} = 1000 (1 - G_c / G_i) \quad (1)$$

$$P_{e,x} = \sum (\delta_i \cdot V_i \cdot S_i) = (\delta/d) \sum (d_i \cdot V_i \cdot S_i) \quad (2)$$

$$\therefore \delta/d = P_{e,x} / \sum (d_i \cdot V_i \cdot S_i) \quad (3)$$



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

$\delta_i$ : 余剰ペースト膜厚  
 $d_i$ : 粒子径

図-1  $\delta$ と $d$ の関係

### 3. 細骨材の表面積測定方法

#### 3.1 測定装置および試験方法

水透過法による比表面積測定装置の概要を図-2に示す。比表面積は、式(4)のKozeny-Carmanの式によって算出した[4]。

$$S_i = 14 \left[ \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \times \frac{h}{(\mu u L)} \right]^{(1/2)} \quad (4)$$

$S_i$ は細骨材の比表面積( $cm^2/cm^3$ )、 $\epsilon$ は細骨材充填層の空隙率(%）、 $h$ は図-2に示すマンノメーターの水位差(cm)、 $\mu$ は水の粘性係数(poise)、 $L$ はマンノメーター取付け位置の高低差(cm)、 $u$ は水の平均流速( $cm/秒$ )である。試験は、20℃の恒温室内にて実施した。

本装置による適正な測定条件を検討するため、海砂、川砂、4種類の砕砂をそれぞれ0.60mm～

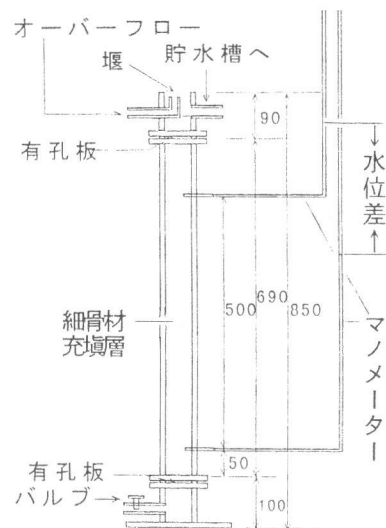


図-2 比表面積測定装置

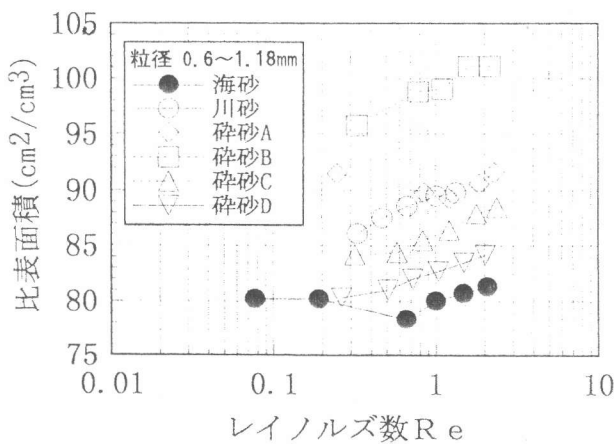


図-3 レイノルズ数と比表面積の関係

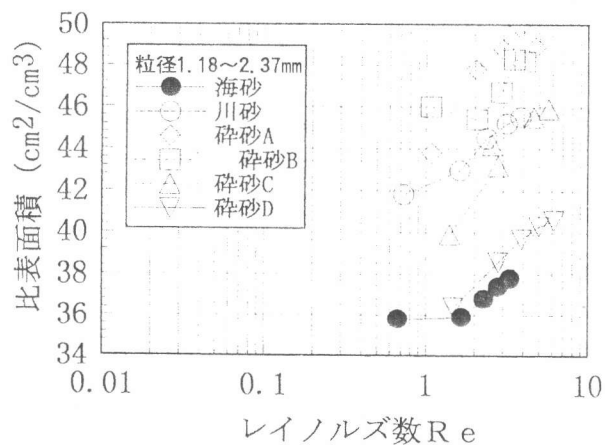


図-4 レイノルズ数と比表面積の関係

1.18mm、1.18mm～2.37mmの単一粒度にふるい分けた合計12種類の細骨材について、平均流速を試行的に数点変化させて比表面積を測定した。

本試験は、細骨材層内の水の流れが層流であることを前提としているため、測定された比表面積とそのときの測定条件から求めたレイノルズ数の関係を検討した。両者の関係を図-3、図-4に示す。0.6～1.18mmの細骨材の場合は、測定データのほとんどがレイノルズ数=0.3～2.0の範囲にあり、細骨材の種類によって比表面積に明確な差異が認められる。また、レイノルズ数の変化に伴う細骨材の比表面積の変動は約5 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>以下であった。1.18mm～2.37mmの場合は、レイノルズ数が約1.0～6.0の範囲にあり、レイノルズ数の変化に伴う細骨材の比表面積の変動は4～6 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>であるが、レイノルズ数が2.0を越えると細骨材種別による比表面積の差異が不明瞭となる場合がある。充填層を流れる水が層流になるレイノルズ数の限界は1前後といわれており[5]、これらの結果より、本測定法においてはレイノルズ数が2.0以下となる条件で測定することが望ましいと考えられる。

図-5は、レイノルズ数と水位差hの関係を示したものであり、本装置の場合、1.18～2.37mmの細骨材を測定する際には、レイノルズ数を2.0以下にするために水位差を2.0cm以下の小さい範囲で制御する必要があり、試験操作上誤差を生じやすい。一方、0.6～1.18mmの細骨材であれば、レイノルズ数が2.0以下となる範囲で水位差を精度良く調整できる。従って、本研究では、0.6～1.18mmの細骨材を用いてレイノルズ数が0.7～1.9となる範囲で水位差を数点変化させて測定し、レイノルズ数=1.0となるときの比表面積を求めて、 $\delta/d$ の算出に用いることとした。

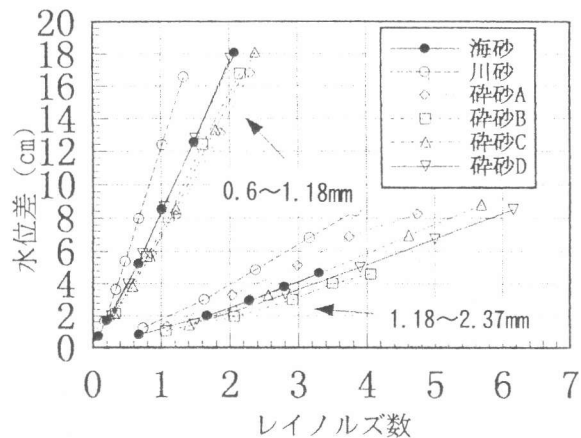


図-5 レイノルズ数と水位差の関係

#### 4. モルタル試験

##### 4.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。比重は3.15、レーザー回折型粒度分析による測定結果から求めた累積通過重量90%相当径は40.7μmであった。

細骨材は、ガラスビーズ、海砂、砕砂を使用し、それぞれ0.15mm～0.30mm、0.30mm～0.60mm、0.60mm～1.18mm、1.18mm～2.37mm、2.37mm～4.75mmの単一粒度に調整した。

ガラスビーズは、数種類の市販品を使用し、過大粒と過小粒をふるい分けたものを混合して単一粒度の細骨材とした。海砂は、各単一粒度にふるい分けたものを細骨材の塩酸溶解物試験方法に準じて貝殻を溶解させ、流水にて十分水洗して塩酸分と細骨材表面の微粉を除去した。砕砂も微粉を除去するため流水にて水洗した。各単一粒度細骨材は、表-1に示す3種類の割合で使用した。以下、本報告では、ガラスビーズ、海砂、砕砂をそれぞれ記号G, S, Cで示し、表1の粒度構成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構成135の細骨材をG135などと称した。各細骨材は、絶乾状態で使用した。ガラスビーズ、海砂、砕砂の絶乾比重および比表面積を表-2に示す。比表面積

表-1 細骨材の粒度構成

No.	篩い目の開き (mm)	粒度構成 (%)		
		連続	135	245
1	0.15～0.3	18.6	14	—
2	0.3～0.6	24.8	—	11
3	0.6～1.18	26.8	30	30
4	1.18～2.37	19.9	—	—
5	2.36～4.75	9.9	56	59
dave (mm)		0.53	0.85	1.69

は、0.60mm～1.18mmの単一粒度細骨材の測定結果であり、0.15mm～0.30mm、0.30mm～0.60mm、1.18mm～2.37mm、2.37mm～4.75mmの各単一粒度の比表面積は、0.60mm～1.18mmの細骨材の比表面積を $S_3$ として、それぞれ $S_3 \times 4$ 、 $S_3 \times 2$ 、 $S_3 \times (1/2)$ 、 $S_3 \times (1/4)$ とした。

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%系と称す。）とW/C=35%でポリカルボン酸系高性能AE減水剤をC×1%添加した場合（以下、W/C=35%-SP系と称す。）の2種類とした。モルタルの配合は、単位細骨材容積を変化させて $\delta/d$ を約0.01～0.20の範囲とした。

モルタルの練混ぜ方法、フロー試験の方法は「JIS R 5201」に準じた。但し、練混ぜ量は1.0 ℓであり、W/C=55%系では、フローテーブルの落下回数 0打、15打、35打のとき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。

表-2 細骨材の比重および比表面積

種類	絶乾比重	比表面積* ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )
ガラスビーズ	2.47	54.2
海砂	2.59	77.1
砕砂	2.94	93.7

\* 0.06～1.18mmの単粒度細骨材についての測定値

#### 4. 2 試験結果

図-6は、W/C=55%系における試験結果の一例として、粒度構成を同一として形状の異なる細骨材を使用したモルタルの $\delta/d$ とフロー値の関係を比較したもので、フローテーブルの落下回数15打の場合である。いずれの場合にも $\delta/d > 0.04$ のときには $\delta/d$ が同一であればフロー値はほぼ一致する傾向が認められる。

図-7は、それぞれ $\delta/d = 0.03, 0.05, 0.07$ の場合で細骨材の平均粒子径 $d_{ave}$ と0打、15打、35打のフロー値の関係を比較したものである。 $\delta/d = 0.07$ では、0打と15打の場合には細骨材の種類、粒度によらずモルタルのフロー値はほぼ一定の値となっている。しかし、35打では $d_{ave}$ が小さいほどフロー値がやや大きくなる傾向がある。尚、 $d_{ave} = 0.53\text{mm}$ の細骨材を使用した場合は、モルタルの一部がフローテーブルからこぼれたためフロー値を測定できなかった。

$\delta/d = 0.05$ の場合、 $d_{ave} = 0.53\text{mm}$ の細骨材では他よりフロー値がやや小さくなる傾向が認められるが、 $d_{ave} = 0.85\text{mm}$ と $1.69\text{mm}$ では、0打、15打、35打のいずれにおいても粒子径および骨材の種類による差異は認められない。

一方、 $\delta/d = 0.03$ の場合、 $d_{ave} = 1.69\text{mm}$ の細骨材では0打、15打、35打ともに細骨材の種類による差異は小さい。しかし、 $d_{ave}$ が小さいほど、細骨材の種類の違いによる差異が顕著となった。また、細骨材の種類が同一の場合で比較しても $d_{ave}$ によってフロー値は異なった。

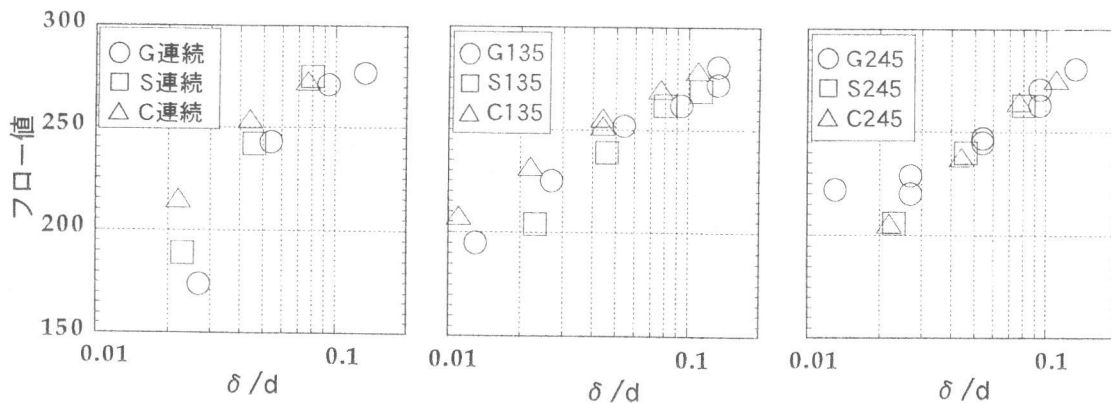


図-6  $\delta/d$ とフロー値の関係 (W/C=55%系)

次に、 $W/C=35\%$ -SP系における試験結果として、  
 図-8に粒度構成が同一で使用する細骨材の種類  
 が異なる場合の $\delta/d$ とフロー値の関係（右側）  
 および同一形状の細骨材で細骨材の粒度が異なる  
 場合を比較（左側）した。単一粒度の砕砂を組み  
 合わせたC 2 4 5を使用した場合は、モルタルフ  
 ローの中心部に細骨材が残り、周辺部にはペース  
 トだけが広がってしまう激しい分離状況を呈した  
 ため実験の水準から除外した。海砂とガラスビ  
 ーズでは、C 2 4 5の場合のような分離状況は起  
 こらず、細骨材はモルタルフローの全面にほぼ均  
 一に分布していた。

右図より、粒度構成が2 4 5および1 3 5の細  
 骨材を使用したモルタルは $\delta/d > 0.04$ の範囲で  
 連続粒度細骨材を使用したモルタルは $\delta/d =$   
 $0.08 \sim 0.09$ で細骨材の種類によらずフロー値が同  
 程度となった。連続粒度の場合、ガラスビーズを  
 用いたモルタルは、 $\delta/d = 0.04 \sim 0.05$ で海砂や  
 砕砂を用いたモルタルより明らかにフロー値が小  
 さく、粒度構成1 3 5の場合も $\delta/d = 0.02 \sim 0.$   
 $03$ では細骨材の種類による差異が明確になった。

左図より、いずれの細骨材を使用した場合も $\delta$   
 $/d = 0.08 \sim 0.09$ の場合には粒度構成による差異  
 は認められないが、 $\delta/d = 0.05 \sim 0.03$ では、  
 $d_{ave}$  が小さい場合ほどフロー値の低下が大き  
 くなる傾向となった。

以上のように、 $W/C=55\%$ 系、 $W/C=35\%$ -SP系ともに、使用する細骨材の $d_{ave}$  が大きいほど、  
 $\delta/d$  が大きい場合ほどフロー値が一致する傾向があり、 $\delta/d$ の算出において前述の水透過法  
 によって測定した細骨材比表面積を用いることにより細骨材の形状が異なる場合にもモルタルの  
 フロー値が $\delta/d$ によって定まるとする考え方を適用できることがわかる。また、この考え方は、  
 モルタルの受ける外力がある程度変化しても適用できるものと考えられる。

一方、 $W/C=55\%$ 系、 $W/C=35\%$ -SP系ともに $\delta/d$ が小さい場合ほど骨材形状の違いによる差異  
 が生じ、平均粒子径の小さい細骨材ほどフロー値が低下する傾向がある。

このような傾向があることは、 $W/C=35\%$ のプレーンモルタルの試験結果でも確認され、筆者ら  
 は、この理由を次のように考えている。 $\delta/d$ が同一でも粒子径の小さい細骨材ほどその表面に  
 形成される膜厚 $\delta$ は小さくなる。平均粒子径の小さい細骨材はこのように粒子が多く含まれ、 $\delta$   
 $/d$ が低下したときに膜厚 $\delta$ が小さくなりすぎて骨材粒子とセメント粒子の干渉が生じやすく、  
 フロー値が小さくなる。また、粒子干渉が顕著になるときの一つの目安は、平均余剰ペースト膜  
 厚 $\delta a = (\delta/d) \times d_{ave}$  がセメント粒子径の分布範囲に達する場合と考えている。[2]

本試験にてフロー値に差異が生じた $\delta/d$ に対応する $\delta a$ を $d_{ave} = 0.53\text{mm}$ の細骨材について

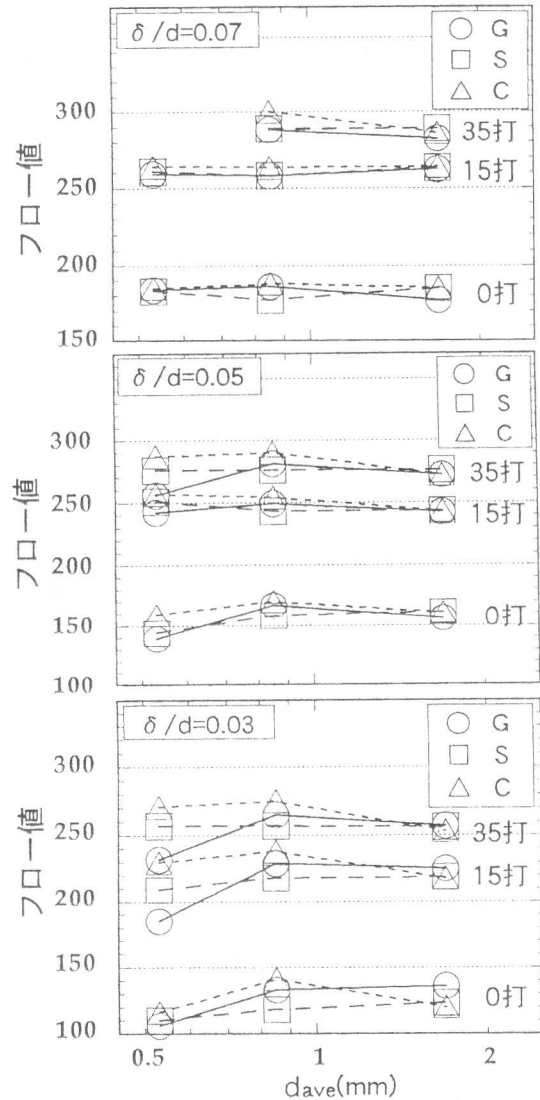


図-7  $d_{ave}$  とフロー値の関係

概算すると、 $W/C=55\%$ 系、 $W/C=35\%$ 系-SP系ともにG連続は $23\sim 27\mu\text{m}$ 、S連続とC連続は $16\mu\text{m}$ である。

一方、フロー値がほぼ一致する範囲の最も小さい $\delta/d$ に対応する $\delta a$ は、G連続は $48\mu\text{m}$ 、S連続とC連続は $38\mu\text{m}$ である。

これらの値を本試験で使用したセメントの累積通過重量90%に相当する粒子径 $40.7\mu\text{m}$ と比較するとフロー値がばらつくときは、 $\delta a$ がセメント粒子径と同程度の大きさであり、フロー値が一致する領域では、 $\delta a$ はセメント粒子径の大部分が分布する範囲を越える大きさにあたる。これより、細骨材粒子とペースト中のセメント粒子の干渉が小さい場合には細骨材の粒度や形状に影響されことなくモルタルのフロー値は $\delta/d$ によって定まるものと推察される。

なお、本試験の結果だけでは、粒子干渉が生じる限界の $\delta a$ を見積もることは困難であり、粒子干渉の定量的判断基準については、高性能AE減水剤の添加率や $W/C$ の違いによるセメント粒子の分散性の違いなどペーストの性質を考慮した検討が必要である。

### 5. まとめ

$\delta/d$ が等しいときのモルタルのフロー値は、セメントペーストの配合を $W/C=55\%$ のプレーンとした場合、 $W/C=35\%$ で高性能AE減水剤を添加した場合のいずれにおいても、 $\delta/d$ が大きいほど、細骨材の平均粒子径が大きいほど、細骨材の粒度や種類によらず一致する傾向となった。これより、 $\delta/d$ の算出に水透過法によって測定される細骨材比表面積を用いることで「 $\delta/d$ が等しければモルタルのフロー値が等しくなる。」という考え方を使用する細骨材の形状が異なる場合にも適用できることがわかった。また、この考え方を適用できる条件の一つは、細骨材粒子とペースト中のセメント粒子の干渉が小さい場合であることが推察された。

#### 「参考文献」

- 1) Powers, T.C. : The Properties of Fresh Concrete, Jhon Wiley and Sons, Inc., 1968
- 2) 近田, 前田, 松下 : 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基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 17、No.1、pp. 587-592、1995
- 3) 徳光善治 : 粉体のつめこみについて、粉体工学、pp. 29-34、1965.9
- 4) Carman, P.C. : The determination of the specific surface of powders, Journal of Soc. of Chem. Ind., Vol. 57, No. 7, pp225-234, 1938
- 5) 土質工学会編 : 土質工学ハンドブック第二編、技法堂、pp. 79、1966.11

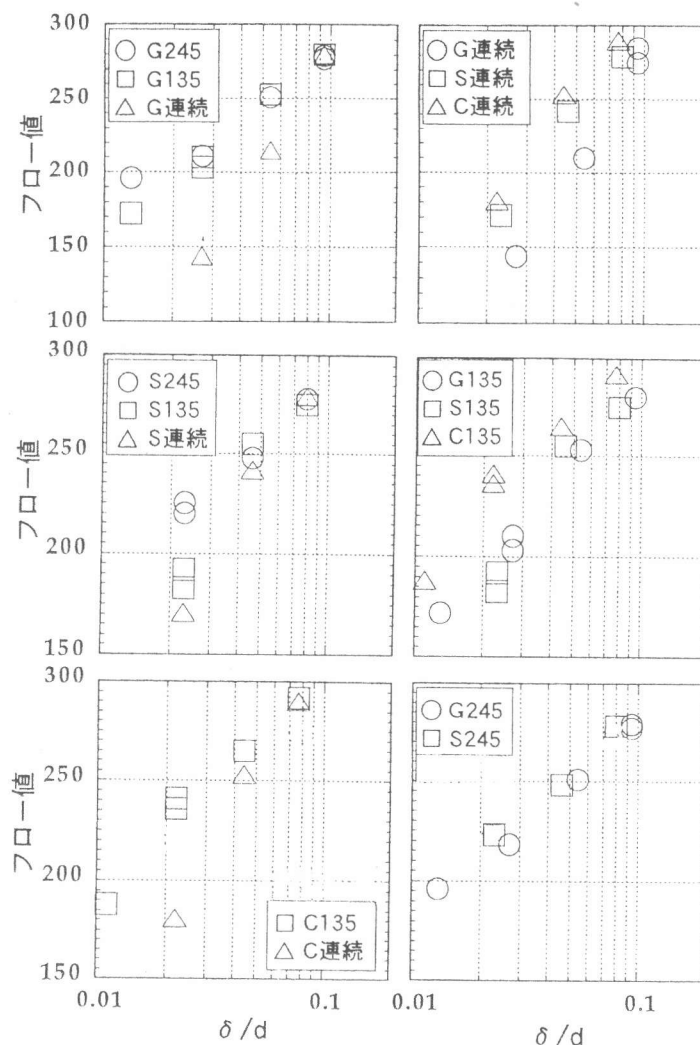


図-8  $\delta/d$ とフロー値の関係 ( $W/C=35\%$ -SP系)