

論文 ペースト濃度および粉体種別の異なるモルタルのフレッシュ時性状に関する考察

三宅淳一^{*1}・松下博通^{*2}・取違剛^{*3}

要旨：水セメント比やセメントと細骨材の配合比が多様なモルタルのミニスランプ，モルタルフローは，セメントと細骨材混合物の実積率およびそれらがモルタル中に占める容積比率を用いて算定できる余剰水膜厚と平均粒径の比を指標とすることによって評価できることを示す。また，セメントに換えてフライアッシュ，高炉スラグ微粉末等を用いた各モルタル性状の差異により，モルタルのフレッシュ性状は粉体種別に依存することが明らかとなった。

キーワード：モルタル，余剰ペースト理論，余剰水膜，面積体積平均粒径，粉体

1. はじめに

配合理論に関する研究は古くからなされているものの，既往の理論には W/C あるいは空隙容積と強度や耐久性との関係といった，硬化性状と配合の関係についてのものが多く，フレッシュ時性状に関する理論としては C.T.Kennedy による余剰ペースト理論¹⁾や T.C.Powers の研究成果²⁾が代表的であるものの，配合決定の実務においては経験則をベースとした Lyse の一定単位水量の法則等が使われているにすぎない。

本研究はモルタルを対象とし，その構成を液相である水と固相であるセメントおよび細骨材の二相系と捉え，固相の実積率とモルタル中の固相の容積比率によって計算できる余剰水膜厚と固相の平均粒径の比を指標とすることにより，多様な配合のモルタルにあってもミニスランプ（コンクリートスランプの 1/2 サイズのスランプ試験），モルタルフローといったフレッシュ性状が評価できることを示す。

また，セメントに替えて各種粉体を用いたモルタル試験により，粉体種別がフレッシュ性状に及ぼす影響について調べるとともに，フレッシュモルタルの挙動機構について考察するものである。

2. モルタルの構造モデル

2.1 セメントと細骨材を固相とするモデル

モルタルやコンクリートの構成は，余剰ペースト理論に見られるように，ペーストを均一な液相，骨材を固相と考え，ペーストと骨材の二相系構造と捉えることが一般的になされてきた。

しかし，ペーストの濃度（=W/C）が違えばペーストの性状は異なるため，余剰ペースト膜厚によってペースト濃度の異なる配合の挙動を同時に扱うことは適当とはいえない。

それに対処するために，水を液相，セメントおよび細骨材粒子を固相と捉え，モルタルのフレッシュ性状は各粒子を取り巻く余剰水膜厚等によって規定されるとの見方により考察をすすめることとした。この場合のモルタルの構造モデルを図-1に示す。

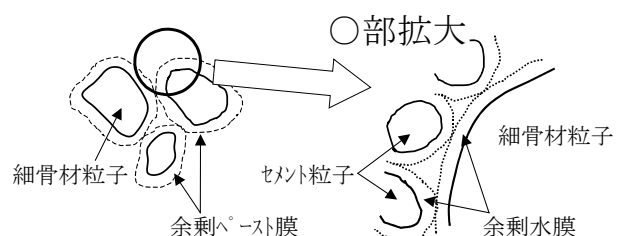


図-1 モルタルの構造モデル

*1 電源開発（株） 茅ヶ崎研究所長 工修（正会員）

*2 九州大学大学院教授 工学研究院 建設デザイン部門 工博（正会員）

*3 九州大学大学院生 工学府 建設デザイン部門（正会員）

2.2 余剰水膜厚，平均粒径， δ/d の計算

余剰水量や余剰水膜厚は，余剰ペースト理論の余剰ペースト量や余剰ペースト膜厚の計算式にあつて固相をセメントと細骨材とすることにより得られる。余剰水量の計算には松下らの提案する式を用いる³⁾。

$$Wexc = 10^{-2} \cdot (G - G_s) \quad (1)$$

$Wexc$: 余剰水量 ($\text{m}^3/\text{モルタル } \text{m}^3$)

G : セメントおよび細骨材混合物の実積率(%)

G_s : モルタル中のセメントおよび細骨材の容積比率(%)

$$\delta = 10^6 \cdot \frac{Wexc}{Sc + Ss} = 10^4 \cdot \frac{G - G_s}{Sc + Ss} \quad (2)$$

δ : 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(μm)

Sc : セメントの表面積($\text{m}^2/\text{モルタル } \text{m}^3$)

Ss : 細骨材の表面積($\text{m}^2/\text{モルタル } \text{m}^3$)

余剰水膜厚の計算には表面積が関係するため，セメントおよび細骨材の平均粒径には，体積あたり表面積に等しい比表面積を有する面積体積平均粒径を用いる。平均粒径は以下の式となる。

$$\frac{Sc + Ss}{10^{-2} \cdot G_s} = \frac{6 \cdot \pi \cdot (10^{-6} \cdot d)^2}{\pi \cdot (10^{-6} \cdot d)^3}$$

$$\therefore d = 10^4 \cdot \frac{6 \cdot G_s}{Sc + Ss} \quad (3)$$

d : セメント・細骨材の面積体積平均粒径(μm)

また，式(2),(3)より，余剰水膜厚と平均粒径の比 δ/d は表面積 Sc ， Ss を用いることなく， G ， G_s により以下の式で示される。

$$\frac{\delta}{d} = \frac{G - G_s}{6 \cdot G_s} \quad (4)$$

3. モルタル試験

3.1 使用材料，配合および試験方法

普通ポルトランドセメント（比重＝3.16，比表面積＝3280 cm^2/g ）および細骨材には八王子産砕砂を用いた。AE 剤は使用せずリグニンスルホン酸塩系減水剤をセメント重量の 0.25%使用した。細骨材の各試験値，粒度を表－1，2に示す。

表－1 使用細骨材仕様

表乾比重	吸水率 (%)	粒形判定実積率(%)	実積率 (%)	比表面積 (mm^2/mm^3)
2.63	1.48	54.89	66.43	15.85

表－2 使用細骨材粒度

ふるい目 (mm)	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5.0
通過容積百分率(%)	8.9	22.0	37.3	60.3	91.7	100.0

細骨材の比表面積は粒子を球と仮定して以下の式により計算した。ここに，0.15mm 以下の平均粒径は，レーザー式粒度測定による 50%通過粒径であった 0.075mm とした。

$$Ssu = 6 \cdot \sum \frac{X_i}{100 \cdot a_i} \quad (5)$$

Ssu : 細骨材比表面積 (mm^2/mm^3)

X_i : ふるい目 l_i と l_{i+1} の間の容積百分率(%)

a_i : ふるい目 l_i と l_{i+1} 区間の幾何平均による平均粒径(mm) $= (l_i \cdot l_{i+1})^{0.5}$

セメントと細骨材混合物の実積率は，粉体の嵩密度測定用のタッピング試験機（ストローク 1.8cm，試料容積 100 cm^3 ，容器径 5cm ϕ ）により測定した。予備試験により試験値が収束する回数を求め，180 回とした。

配合は，一般的なコンクリート中のモルタル分の配合を包含できる領域であるセメント：細骨材重量配合比＝1.5:7，2:7，2.5:7，3:7，4:7，5:7，W/C＝0.4，0.5，0.6，0.7 とした。配合を表－3に示す。

表－３ モルタル試験配合および試験結果

W ／ C	C:S 重量 比	C	W	S	余剰 ペー スト 膜厚	C+S の 実積率 G	C+S の 容積比 率 Gs	余剰 水膜 厚 δ	C+S の平 均粒 径 d	δ/d	ミニ スラ ンプ	モル タル フロ ー
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	μm	%	%	μm	μm	—	cm	mm
0.4	1.5:7	401.5	160.6	1873.5	-4.3	75.96	83.94	-0.56	35.2	-0.0158	0.0	100
	2:7	488.5	195.4	1709.6	1.4	76.66	80.46	-0.22	28.3	-0.0079	0.0	100
	2.5:7	561.5	224.6	1572.1	7.0	76.91	77.54	-0.03	24.0	-0.0014	0.6	145
	3:7	623.6	249.4	1455.0	12.7	76.14	75.06	0.05	21.1	0.0024	4.5	148
	4:7	723.7	289.5	1266.4	23.9	74.51	71.05	0.14	17.4	0.0081	10.1	235
	5:7	800.8	320.3	1121.1	35.2	72.57	67.97	0.17	15.1	0.0113	12.0	256
0.5	1.5:7	386.0	193.0	1801.2	-1.9	75.96	80.70	-0.34	35.2	-0.0098	0.0	100
	2:7	465.7	232.9	1630.0	4.5	76.66	76.71	0.00	28.3	-0.0001	0.6	159
	2.5:7	531.6	265.8	1488.5	11.0	76.91	73.42	0.19	24.0	0.0079	10.0	231
	3:7	587.0	293.5	1369.6	17.4	76.14	70.65	0.27	21.1	0.0129	12.0	260
	4:7	674.8	337.4	1181.0	30.2	74.51	66.26	0.36	17.4	0.0207	13.5	291
	5:7	741.4	370.7	1038.0	43.1	72.57	62.93	0.39	15.1	0.0255	13.9	>300
0.6	1.5:7	371.6	223.0	1734.3	0.5	75.96	77.70	-0.13	35.2	-0.0037	0.1	136
	2:7	445.0	267.0	1557.5	7.7	76.66	73.30	0.22	28.3	0.0076	7.5	218
	2.5:7	504.8	302.9	1413.4	14.9	76.91	69.71	0.41	24.0	0.0172	12.3	275
	3:7	554.4	332.7	1293.7	22.1	76.14	66.73	0.50	21.1	0.0235	13.9	>300
	4:7	632.2	379.3	1106.3	36.5	74.51	62.07	0.58	17.4	0.0334	14.3	>300
	5:7	690.2	414.1	966.3	51.0	72.57	58.59	0.60	15.1	0.0398	14.4	>300
0.7	1.5:7	358.3	250.8	1672.1	2.8	75.96	74.92	0.08	35.2	0.0023	3.0	173
	2:7	426.0	298.2	1491.1	10.8	76.66	70.18	0.44	28.3	0.0154	11.1	267
	2.5:7	480.5	336.4	1345.4	18.8	76.91	66.36	0.64	24.0	0.0265	13.4	>300
	3:7	525.3	367.7	1225.7	26.8	76.14	63.23	0.72	21.1	0.0340	14.1	>300
	4:7	594.6	416.2	1040.5	42.8	74.51	58.38	0.80	17.4	0.0460	14.5	>300
	5:7	645.7	452.0	903.9	58.8	72.57	54.80	0.82	15.1	0.0540	14.5	>300

3.2 試験結果および考察

試験結果を表－３に併記する。各配合の余剰ペースト膜厚，余剰水膜厚とミニスランプ，モルタルフローの関係を図－２～５に示す。

表－３の各材料の単位量は空気量を考慮せず，各材料の合計容積が 1m³ になるように設定している。ここに， $G < G_s$ の場合はセメントと細骨材混合物の嵩容積が 1m³ 以上となり，水量はセメントと細骨材粒子が形成する空隙容積以下となるため余剰水膜は存在しない。その際，式(1)より余剰水量はマイナスに計算されるため，表－３では δ ， δ/d がマイナスの値となっている。

(1) 余剰ペースト膜厚との関係

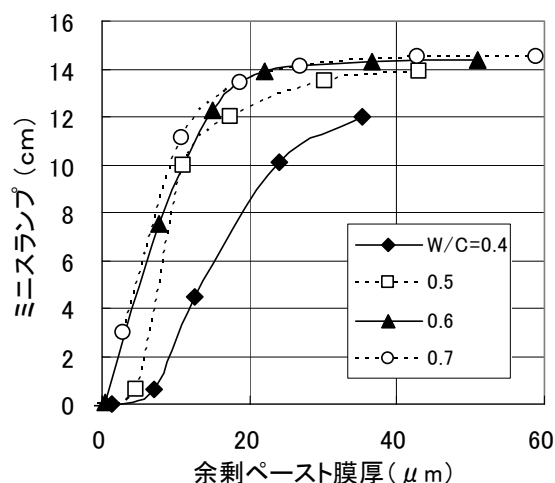
図－２，３に見られるように，ミニスランプ，モルタルフローと余剰ペースト膜厚の関係は W/C ごとに異なるグラフとなっている。同じ膜厚では W/C が大きいほどミニスランプ，モルタル

フローが大きい値を示しているため，骨材粒子間に介在するペーストの潤滑剤としての機能は W/C の違いによって異なることがわかる。よって，W/C の異なるモルタルのフレッシュ性状を余剰ペースト膜厚により同時に評価することはできないこととなる。

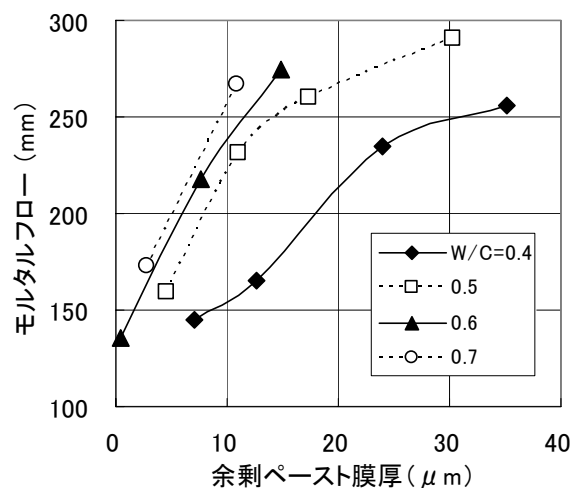
(2) 余剰水膜厚との関係

多様な配合のモルタルを同時に評価するための手法として，前掲の図－１に示すように，モルタルの構成をセメントと細骨材からなる固相と水の二相系と捉え，セメントや細骨材粒子間に存在する余剰水膜に着目する検討を行った。

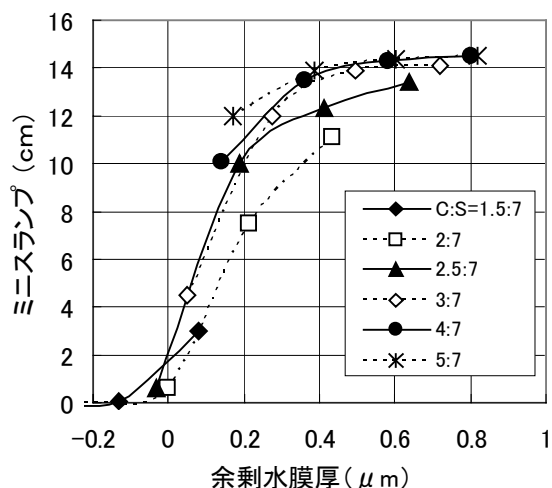
図－４，５は式(1),(2)によって計算できる余剰水膜厚とミニスランプ，モルタルフローとの関係を，セメント：細骨材の重量配合比ごとに整理したものである。これらの図より，余剰水膜厚によってミニスランプやモルタルフローとの



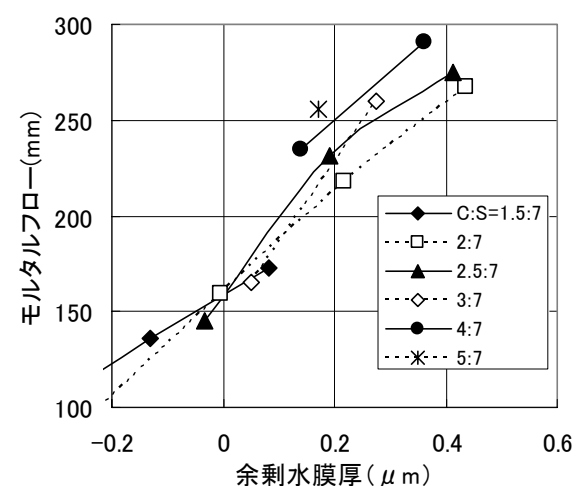
図－２ 余剰ペースト膜厚とミニスランプの関係



図－３ 余剰ペースト膜厚とモルタルフローの関係



図－４ 余剰水膜厚とミニスランプの関係



図－５ 余剰水膜厚とモルタルフローの関係

関係が整理し得るものの、配合比ごとに異なるグラフとなるため、配合比すなわち粒度構成の異なる配合は同時に取り扱いえないことがわかる。ここに、同じ水膜厚であっても細骨材に対してセメントを多く含む配合の方がより大きいミニスランプやモルタルフローを示している。これはセメントが多いほど、細骨材粒子まわりの余剰ペースト膜厚が大きくなるからである。

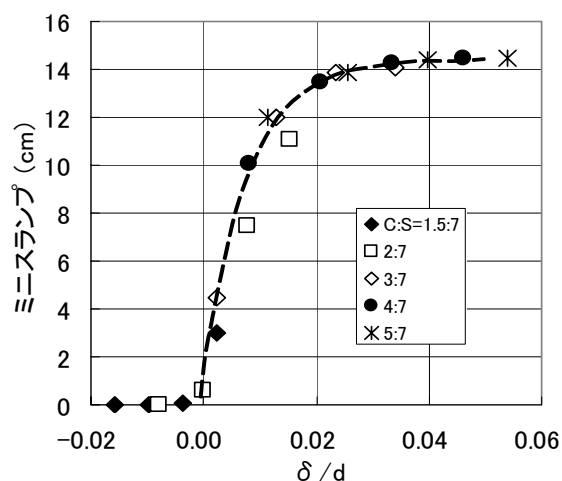
(3) δ/d による分析

粒度構成の影響を排除するために、余剰水膜厚 δ を固相の面積体積平均粒径 d で除して無次元化した δ/d による整理を試みた。 δ/d は式(4)で得られ、計算結果は表－２に併記している。

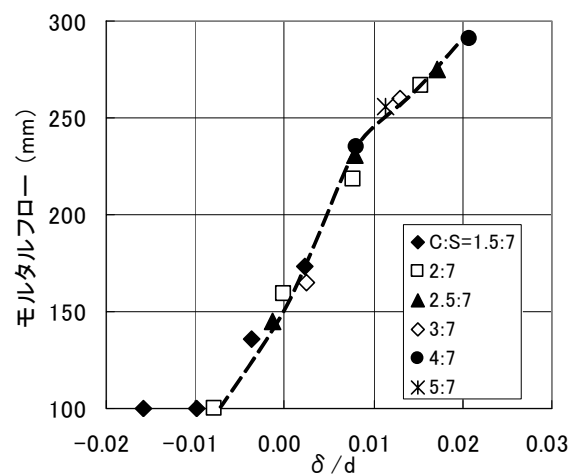
δ/d とミニスランプ、モルタルフローとの関係を図－６，７に示す。ここに、 δ/d との関係はミニスランプ、モルタルフローともにほぼ同一の曲線で示されていることから、 δ/d は多様な配合のモルタルのフレッシュ性状を同時に評価できる指標であるといえる。

よって、多様な配合のモルタルどうしであっても、それらのフレッシュ性状の良否は δ/d の大小により判定でき、同一の単位水量では δ/d を最大にするセメント：細骨材の配合比がフレッシュ性状を最も良好にする配合となる。

図－６に見られるように、 δ/d の増大とともにミニスランプは急増し、 $\delta/d > 0.02$ では δ/d



図－６ δ/d とミニスランプの関係



図－７ δ/d とモルタルフローの関係

の変化に対するミニスランプの変動が小さい領域となっている。 δ/d の増大に伴い、セメント粒子どうしやセメント粒子を介在した細骨材粒子どうしのかみあい緩和されていく過程をミニスランプの挙動は示していると解釈されよう。

モルタルフローの場合は δ/d とはほぼ直線的な関係を示し、ミニスランプの場合とは様相を異にする。モルタルフローは衝撃による強制変形であることによるためであろう。

4. 異種粉体によるモルタル試験

4.1 配合および試験方法

3.2(2)で述べたように、モルタルのフレッシュ時性状が固相の粒度構成に影響されるということは、粉体の量や性質に依存しているとも解釈できる。そのため、セメントに替えてフライアッシュⅡ種、Ⅳ種（以下FAⅡ種、Ⅳ種と記す）、高炉スラグ微粉末（以下スラグ）、フライアッシュセメントB種（置換率20重量％、以下FAセメント）、高炉スラグセメントB種（同50重量％、以下スラグセメント）を用いたモルタル試験を行い、粉体種別と量がモルタル性状に与える影響を調べた。

基準となるセメントのモルタルのW/Cを0.5とし、他の粉体における水粉体比は、各々のペースト部分のフローコーンによる0打フロー値が、セメントの場合のフロー値303mmに等しく

なる値とした。配合はセメント：細骨材重量配合比＝2:7、2.5:7、3:7、4:7、5:7とし、他の粉体でのペースト量はセメントの場合と同体積とした。各粉体の物性とペースト部分の水粉体比を表－4に示す。

表－4 各種粉体の物性、ペースト水粉体比

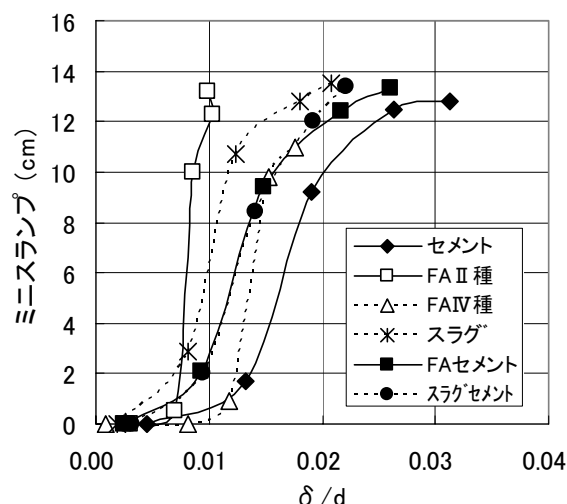
種 別	比重	ブレン値 (cm^2/g)	水粉体比 (重量比)
セメント	3.16	3280	0.500
FAⅡ種	2.24	3520	0.376
FAⅣ種	2.20	2020	0.480
スラグ	2.90	4100	0.479
FAセメント	2.92	3328	0.481
スラグセメント	3.02	3690	0.477

また、粉体単味の性状を見るために、単位水量を変化させたペーストにより、モルタル試験と同様にミニスランプを測定した。なお、異種粉体による試験にはAE剤や減水剤は使用せず、実積率はタッピング180回によって求めた。

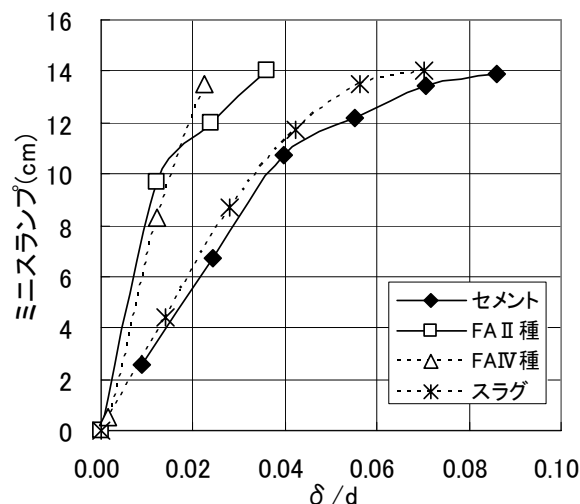
4.2 試験結果および考察

各粉体によるモルタルの δ/d とミニスランプの関係を図－8に、ペーストの δ/d とミニスランプの関係を図－9に示す。

図－8に示すモルタルのミニスランプは粉体種別によって異なる挙動を示している。図－9のペーストのミニスランプのグラフの勾配が急な粉体であるほど、図－8のグラフの勾配も急になって



図ー 8 各種粉体によるモルタルのミニスランプ



図ー 9 各種粉体ペーストのミニスランプ

いることから、モルタルの挙動は粉体の性状に依存しているといえる。図ー 8, 9 とともに球形粒子を多く含む FAⅡ種の場合が最も大きい勾配を示し、球形粒子ではないセメントの場合の勾配が小さいことから、粒子形状の良否が影響しているものと推定されるが、詳細な説明は今後の課題である。

5. まとめ

多様な W/C, セメント：細骨材の配合比, また各種粉体を用いたモルタル試験等によりモルタルのフレッシュ性状について検討を加え、以下の結論を得た。

- (1)フレッシュなモルタルのミニスランプ, モルタルフローは, 同一の細骨材であるならば, セメントおよび細骨材の粒子を覆う余剰水膜厚とセメント：細骨材の配合比に規定される。
- (2)余剰水膜厚や余剰ペースト膜厚が大きいほどセメントや細骨材粒子のかみ合いの緩和がすすむため, ミニスランプやモルタルフローは大きくなる。
- (3)粉体にセメントを用いたモルタルにおいては, 余剰水膜厚とセメントおよび細骨材粒子の面積体積平均粒径の比である δ/d は, W/C や配合比が多様なモルタルのミニスランプとモルタルフローを評価する指標となる。

(4)セメントを用いたモルタルの場合, $\delta/d < 0.02$ の領域では δ/d の増大によりミニスランプは急増する。 $\delta/d > 0.02$ では δ/d の変化に伴うミニスランプの変動は小さい。また, モルタルフローも δ/d が大きくなるに従い増大するが, 両者の関係はほぼ直線的である。

(5) δ/d は粉体と細骨材混合物の実積率およびモルタル容積中に占める粉体と細骨材の容積比率を用いた簡便な式により計算できる。

(6)セメントとは異なる性質であるフライアッシュ, 高炉スラグ微粉末等の粉体を用いたモルタルのミニスランプの挙動は粉体種別によって異なり, モルタルのフレッシュ性状は粉体性状に依存する。

参考文献

- 1) Kennedy, C.T.:The Design of Concrete Mixes, J.of ACI, Vol.36, No.2, pp.373-400, Feb.1940
- 2) Powers, T.C.:The Properties of Fresh Concrete, John Wiley and Sons, Inc., 1968
- 3) 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝: 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, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.57-70, 1997.11