

## 加振下におけるコンクリートの充填性に及ぼす余剰ペースト膜厚の影響

高橋 直希 井手 一雄

### 概 要

余剰ペースト膜厚を変化させたモルタルおよびコンクリートを用いて加振ボックス充填試験を行い、コンクリートの加振下における充填性に及ぼす余剰ペースト膜厚の影響を検討した。その結果、同程度のスランプであっても水セメント比によって間隙通過速度が異なり、スランプだけでは加振下のコンクリートの充填性を評価することは困難であったが、余剰ペースト膜厚で整理すれば水セメント比に関わらず間隙通過速度を一義的に評価することができた。このことから、単位水量を固定した条件下で加振下のコンクリートの充填性を最大にするには、余剰ペースト膜厚を最大にする細骨材率、すなわち、細骨材と粗骨材の混合物の実積率が最大になる細骨材率を選定すればよいことが分かった。

### Study of the influence of excess paste film thickness on the filling ability of concrete with vibration

#### Abstract

This paper shows the results of an investigation into the influence of excess paste film thickness on the filling ability of concrete through obstacles in box-shaped containers with vibration.

The test results revealed that it is difficult to determine the filling ability of concrete only by a slump, because gap passage time differs depending on water-cement ratios, even if the slump is the same degree. However, gap passage time is uniquely determined by the excess paste film thickness independently of water-cement ratios.

The overall test results indicate that the fine-total aggregate ratio to maximize the excess paste film thickness, in other words the fine-total aggregate ratio to maximize the percentage of solid volume of the mixture of fine and coarse aggregates, should be selected to maximize the filling ability of concrete with vibration under the condition of the same unit water content.

キーワード: 加振、充填性、スランプ、間隙通過  
速度、余剰ペースト膜厚

## §1. はじめに

良質な骨材が使用されていた時代には、コンクリートのコンシステンシーはおおよそ単位水量に支配されており、コンクリートの施工性をスランプの値で評価することも比較的容易であった。しかし、現在のように様々な骨材や混和剤が使われる状況下では、同じスランプでも施工性が等しいとは限らず、スランプの値だけで施工性を評価することは困難になりつつある。

コンクリートの配合設計では、ワーカビリティ、強度、耐久性、鋼材を保護する性能、経済性などを考慮し、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。一般には、スランプを變形性の指標とし、細骨材率を変化させたスランプ試験において、スランプが極大となるような細骨材率を選定する。スランプが極大をとらない場合には、分離しない範囲でスランプが最大となる細骨材率を選定する。一方、三宅ら<sup>1)</sup>は、スランプが最大になる細骨材率が水セメント比により異なるのは、骨材に付着して骨材とともに挙動し、骨材粒子間の潤滑に寄与しないペースト膜(以下、付着ペースト膜)の膜厚が水セメント比の大小により変化するためであると考え、水セメント比 0.65 を起点とした最適細骨材率の推定方法を考案した。さらに、振動締固めを行う場合、付着ペースト膜の影響は小さく、水セメント比 $\geq 0.50$  の領域では、細骨材・粗骨材混合物の実積率を最大にする細骨材率、すなわち余剰ペースト膜厚が最大になる細骨材率において振動締固めが最も容易になるとしている<sup>2)</sup>。また、水セメント比が小さい場合、ペーストの粘性が増すため、付着ペーストの影響を考慮する必要があること、その場合、付着ペースト量を減じて骨材粒子間の潤滑に寄与するペースト量を確保するため、細骨材率を減じることが有効であることを指摘している<sup>3)</sup>。

そこで本研究では、水セメント比および細骨材率を変化させることで余剰ペースト膜厚を変化させたモルタルおよびコンクリートを用いて加振ボックス充填試験を行い、コンクリートの加振下における充填性に及ぼす余剰ペースト膜厚の影響について検討した。

## §2. 余剰ペースト理論と余剰ペースト膜厚

C.T.Kennedy<sup>3)</sup>によって提唱された余剰ペースト理論は、フレッシュコンクリートをペーストと骨材の混合物と捉え、各骨材粒子はペースト膜で覆われているとするフレッシュコンクリートの構造モデルである。

C.T.Kennedyは、骨材粒子を覆う膜を形成するペーストの体積を骨材の全表面積で除した値の整数倍をワ

ーカビリティ数とし、膜の厚さを評価する指標とした。そして、ペーストの水セメント比が同一であればスランプとワーカビリティ数は単一の関係にあり、ワーカビリティ数が大きいとスランプの値も大きくなることなどを明らかにした<sup>3)</sup>。

現在では、一般に、骨材粒子を覆う膜を形成するペーストは余剰ペーストと呼ばれており、その体積を余剰ペースト体積、余剰ペースト体積を骨材の全表面積で除した値を平均余剰ペースト膜厚と呼んでいる。

C.T.Kennedyによる余剰ペースト膜厚の概念図を、図1に示す。C.T.Kennedyは乾燥骨材試料を棒突きで締め固めた場合に骨材粒子間に形成される空隙が、余剰ペースト膜で覆われた粒子間の体積に等しいとして余剰ペースト体積を算出した。

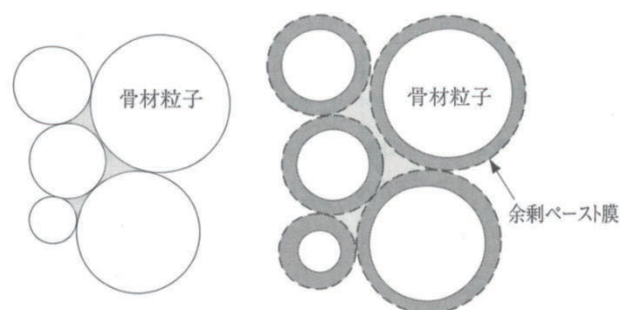


図1 C.T.Kennedyによる余剰ペースト膜厚の概念<sup>2)</sup>

本研究では、松下ら<sup>2)</sup>に倣い、余剰ペースト体積および平均余剰ペースト膜厚を、それぞれ式(1)および式(2)で求めた。ここで、骨材として扱う下限の粒径については議論の分かれるところである<sup>3)~6)</sup>が、本研究では、全ての骨材を骨材として扱った。

$$V_e = 10^6 - \frac{100 \times V_a}{G} \quad \text{式(1)}$$

$$\delta_p = \frac{V_e}{S} \quad \text{式(2)}$$

ここに、

$V_e$ : 余剰ペースト体積( $\text{cm}^3$ )

$V_a$ : 骨材絶対体積( $\text{cm}^3$ )

$G$ : 骨材の実積率(%)

$\delta_p$ : 平均余剰ペースト膜厚( $\text{cm}$ )

$S$ : 骨材の表面積( $\text{cm}^2$ )

### §3. 実験概要

#### 3.1 モルタル実験

##### 3.1.1 使用材料および配合

使用材料を、表1および表2に示す。また、モルタルの配合を、表3に示す。細骨材には、物理的性質の異なる高炉スラグ細骨材(以下、BFS)と陸砂を、質量比でBFS陸砂比が0から1まで0.25刻みとなるように混合して使用した。混合砂の実積率は、あらかじめ所定の混合比で混合した試料を、JIS A 1104に準じた棒突きによる方法で容器に詰めて求めた。

配合は、砂セメント比を3とし、水セメント比を0.4、0.5、0.6とした。また、水セメント比0.5の場合のみ、細骨材の全量をBFSおよび陸砂に置き換えたケースを実施した。AE減水剤の添加量は標準使用量であるセメント質量の1%とし、AE剤あるいは消泡剤を用いて空気量を $6.1 \pm 1.5\%$ に調整した。なお、本実験では、細骨材混合比を質量比としたため、同一水セメント比においても、混合比によって単位セメント量と単位水量が異なる。

表1 モルタルの使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	高炉スラグ細骨材(BFS) (表乾密度:2.74g/cm <sup>3</sup> )
	陸砂(NS) (表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> )

表2 混合砂の実積率

BFS陸砂比	実積率(%)
0.00	66.6
0.25	65.7
0.50	62.9
0.75	60.5
1.00	58.3

##### 3.1.2 試験項目および試験方法

###### (1) フレッシュ性状試験

フレッシュ性状の試験として、ミニスランプ試験(JIS A 1171)および空気量試験(JIS A 1128)を行った。

###### (2) 加振ボックス充填試験<sup>7)</sup>

加振ボックス充填試験装置を、図2に示す。試験装置の大きさは、JSCE-F-701-2016「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)」で使

用されるボックス形容器の1/2とした。流動障害は、25mm間隔で設置した3本のD6とした。

試験装置をセメントの強さ試験に用いるテーブルバイブレータに固定し、図1のA室に3層に分けて突き棒でモルタルを詰め、1分間静置した後、仕切りゲートを引き上げ、同時に振動数40Hzで加振した。本試験では、B室への充填高さが95mmから150mmまでの充填速度を、間隙通過速度とした。

表3 モルタルの配合表

W/C	S/C	BFS陸砂比	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	BFS	陸砂
0.4	3	1	207	518	1555	0
		0.75	205	514	1156	385
		0.5	204	509	763	763
		0.25	202	504	378	1134
		0	200	500	0	1499
0.5	3	1	246	491	1474	0
		0.75	243	487	1096	365
		0.5	241	483	724	724
		0.25	239	479	359	1077
		0	237	474	0	1423
	3	1	243	487	1483	0
		1	241	483	1493	0
		1	239	479	1502	0
		1	237	474	1511	0
		0	246	491	0	1388
0.6	3	0	243	487	0	1397
		0	241	483	0	1406
		0	239	479	0	1415
		1	280	467	1401	0
		0.75	278	463	1042	347
0.5	3	0.5	275	459	689	689
		0.25	273	455	341	1024
		0	271	452	0	1355

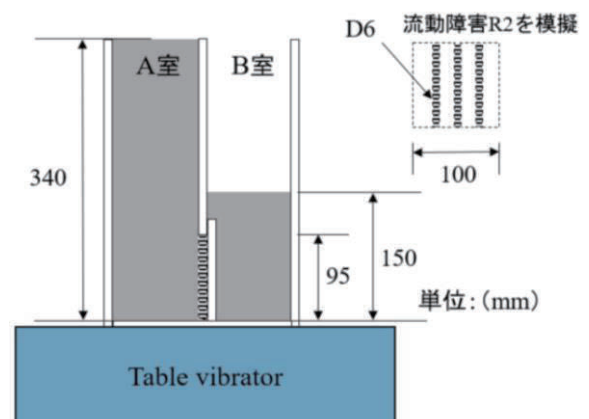


図2 モルタルの加振ボックス充填試験装置<sup>7)</sup>

#### 3.2 コンクリート実験

##### 3.2.1 使用材料および配合

使用材料を、表4および表5に示す。また、コンクリート

の配合を、表6に示す。

配合は、単位水量を165kg/m<sup>3</sup>の一定とし、水セメント比を0.4、0.5、0.6、細骨材率を0.45から0.70まで0.05刻みとした。細骨材と粗骨材の混合物の実積率は、あらかじめ所定の細骨材率で混合した試料を、JIS A 1104に準じた棒突きによる方法で容器に詰めて求めた。AE減水剤の添加量は、標準使用量であるセメント質量の1%とした。なお、本試験で使用したコンクリートはnon-AEコンクリートであり、空気量は事前の配合試験で2.0±0.5%となることを確認した。

### 3.2.2 試験項目および試験方法

#### (1) フレッシュ性状試験

フレッシュ性状の試験として、スランプ試験(JIS A 1171)を行った。

#### (2) 加振ボックス充填試験

加振ボックス充填試験は、JSCE-F-701-2016「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)」に準じて行った。本試験では、B室への充填高さが190mmから300mmまでの充填速度を、間隙通過速度とした。

表4 コンクリートの使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	陸砂 (表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	硬質砂岩碎石(Gmax:20mm) (表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup> )

表5 細骨材と粗骨材の混合物の実積率

細骨材率	実積率(%)
0.45	74.7
0.50	75.6
0.55	76.3
0.60	76.1
0.65	75.8
0.70	74.7

## §4. 実験結果および考察

### 4.1 モルタル実験

図3に、単位水量とミニスランプの関係を示す。細骨材の全

表6 コンクリートの配合表

W/C	細骨材率	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	細骨材	粗骨材
0.4	0.45	165	414	795	1004
	0.50	165	414	882	913
	0.55	165	414	970	822
	0.60	165	414	1058	732
	0.65	165	414	1148	638
	0.70	165	414	1236	547
0.5	0.45	165	329	826	1044
	0.50	165	329	916	951
	0.55	165	329	1009	854
	0.60	165	329	1099	761
	0.65	165	329	1192	665
	0.70	165	329	1282	571
0.6	0.45	165	275	846	1068
	0.50	165	275	939	972
	0.55	165	275	1032	876
	0.60	165	275	1127	777
	0.65	165	275	1220	681
	0.70	165	275	1316	582

量をBFSとしたケース(W/C0.5B)と陸砂としたケース(W/C0.5N)を比較すると、細骨材の全量をBFSとしたケースのミニスランプは陸砂より60mm程度小さく、BFSを用いることで流動性が低下することが分かる。そのため、いずれの水セメント比においても、BFSの混合割合が増すほど単位水量が多くなるにも関わらず、ミニスランプは小さくなる。図4に、余剰ペースト膜厚とミニスランプの関係を示す。ミニスランプは、細骨材の種類が異なる場合や混合使用した場合においても、三宅ら<sup>1)</sup>が示すように、余剰ペースト膜厚が大きいほど大きく、余剰ペースト膜厚が同じであっても、水セメント比によって異なることが確認できる。

ミニスランプと間隙通過速度の関係を、図5に示す。間隙通過速度は、ミニスランプが大きいほど大きい、同程度のスランプであっても水セメント比によって異なる。つまり、加振下のモルタルの充填性をスランプだけで評価することは困難であることが分かる。一方、図6に示すように、間隙通過速度は、細骨材の種類が異なる場合や混合使用した場合においても、余剰ペースト膜厚で整理すれば、水セメント比に関わらず一義的に評価できる。すなわち、異なる配合条件下においても、加振下のモルタルの充填性は余剰ペースト膜厚で一義的に評価できるものと考えられる。なお、W/C0.6におけるBFS陸砂比0のミニスランプは、測定限界値の150mmを超えたため、測定不能であった。また、同じくW/C0.6のBFS陸砂比0.5、0.25、0では、間隙通過速度が速すぎ、測定不能であった。

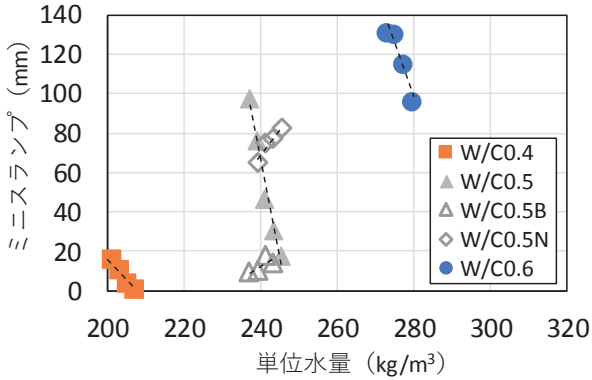


図3 単位水量とミニスランプの関係

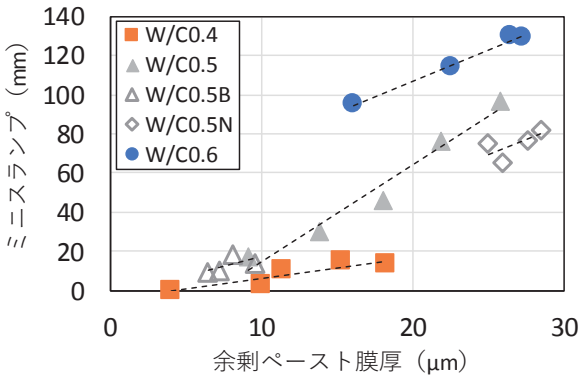


図4 余剰ペースト膜厚とミニスランプの関係

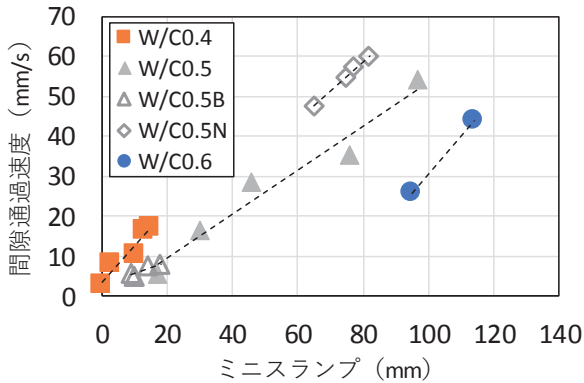


図5 ミニスランプと間隙通過速度の関係

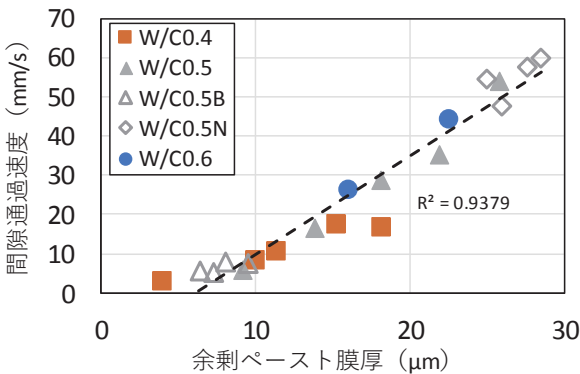


図6 余剰ペーストと間隙通過速度の関係

#### 4.2 コンクリート実験

実験結果を、表7にまとめる。また、余剰ペースト膜厚とスランプの関係、図7に示す。ここで、スランプの形状から明らかに材料分離したと判断できるものは白抜きで示した。

単位水量を固定し細骨材率で余剰ペースト膜厚を変化させた本実験の場合、コンクリートのスランプは、いずれの水セメント比においても余剰ペースト膜厚が最大を示す細骨材率よりも若干小さい細骨材率で最大となる。スランプの極値が得られない場合は分離が見られない範囲で最も大きいスランプとなる細骨材率を最適細骨材率とする一般的な配合手法に則れば、いずれの水セメント比においても、最適細骨材率は45～50%の範囲にある。なお、W/C0.6における細骨材率0.70は、細骨材過多により十分な練り混ぜができなかった。

スランプと間隙通過速度の関係を、図8に示す。間隙通過速度は、スランプが大きいほど大きいが、モルタルと同様に同程度のスランプであっても水セメント比によって異なる。つまり、加振下のコンクリートの充填性をスランプだけで評価することは困難である。一方、図9に示すように、間隙通過速度は余剰ペースト膜厚で整理すれば水セメント比に関わらず一義的に評価できる。すなわち、単位水量を固定した条件下で加振下のコンクリートの充填性を最大にするには、余剰ペースト膜厚を最大にする細骨材率を選定すれば良いと言える。表7に示すように、余剰ペースト膜厚が最大になる細骨材率は、細骨材と粗骨材の混合物の実積率が最大になる細骨材率に一致するので、細骨材と粗骨材の混合物の実積率が最大になる細骨材率を選定すれば、加振下のコンクリートの充填性を最大にすることができる。ここで、間隙通過速度が最大になる細骨材率は、スランプを最大にする最適細骨材率よりも若干大きい。これは、三宅ら<sup>2)</sup>が示すように、静置下では流動性に寄与しない付着ペーストが加振により液状化することで、間隙通過性の向上に寄与するためであると思われる。

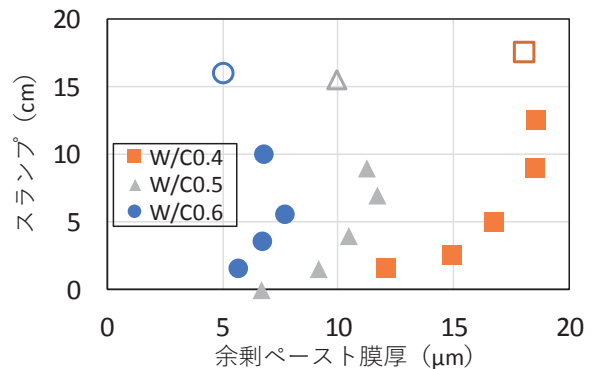


図7 余剰ペースト膜厚とスランプの関係

表7 コンクリート実験のまとめ

W/C	細骨材率	実積率 (%)	スランプ (cm)	間隙通過速度 (mm/s)	分離の有無
0.4	0.45	74.7	17.5	7.94	分離
	0.50	75.6	12.5	9.09	無
	0.55	76.3	9.0	13.68	無
	0.60	76.1	5.0	12.69	無
	0.65	75.8	2.5	10.14	無
0.5	0.45	74.7	15.5	7.24	分離
	0.50	75.6	9.0	6.86	無
	0.55	76.3	7.0	7.38	無
	0.60	76.1	4.0	4.75	無
	0.65	75.8	1.5	4.66	無
0.6	0.45	74.7	16.0	4.81	分離
	0.50	75.6	10.0	2.99	無
	0.55	76.3	5.5	3.78	無
	0.60	76.1	3.5	2.57	無
	0.65	75.8	1.5	2.40	無
0.70	74.7	—	—	—	無

§5. まとめ

余剰ペースト膜厚を変化させたモルタルおよびコンクリートを用いて加振ボックス充填試験を行い、コンクリートの加振下における充填性に及ぼす余剰ペースト膜厚の影響を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 間隙通過速度は、スランプが大きいほど大きいのが、同程度のスランプであっても水セメント比によって異なり、加振下のコンクリートの充填性をスランプだけで評価することは困難である。
- (2) 間隙通過速度は、余剰ペースト膜厚で整理すれば水セメント比に関わらず一義的に評価できる。
- (3) 単位水量を固定した条件下で加振下のコンクリートの充填性を最大にするには、余剰ペースト膜厚を最大にする細骨材率、すなわち、細骨材と粗骨材の混合物の実積率が最大になる細骨材率を選定すればよい。

参考文献

- 1) 三宅淳一、松下博道:フレッシュコンクリートの変形性を最大にする細骨材率に関する研究、土木学会論文集E、Vol.64、No.2、pp361-370、2008.6
- 2) 松下博道、三宅淳一:コンクリートの配合設計と品質管理、コンクリート新聞社、2013
- 3) C.T.Kennedy: The Design of Concrete Mixtures, Proceedings of the ACI, Vol.36, pp-373-400、1940
- 4) 枝松良展、下川浩児、岡村甫:フロー値に及ぼす粉体特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp77-82、1994
- 5) 山口昇三、枝松良展、岡村甫:フロー値に及ぼす細骨材特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp83-88、1994
- 6) 三宅淳一:粉体性状と配合がコンクリートの変形性に及ぼす影響に関する研究、九州大学学位論文、pp109-110、2006
- 7) 竹久大貴、高橋直希、橋本紳一郎、伊達重之:モルタルのフレッシュ性状に及ぼす高炉スラグ細骨材置換率の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp83-88、1994

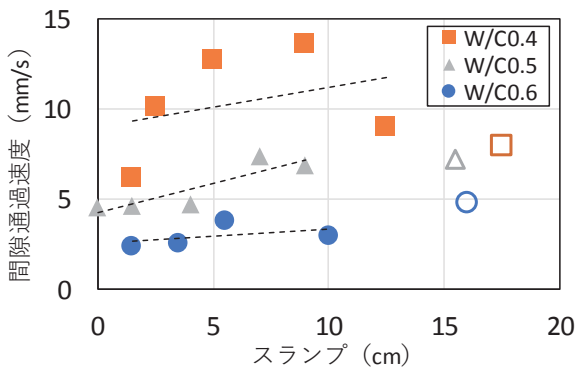


図8 スランプと間隙通過速度の関係

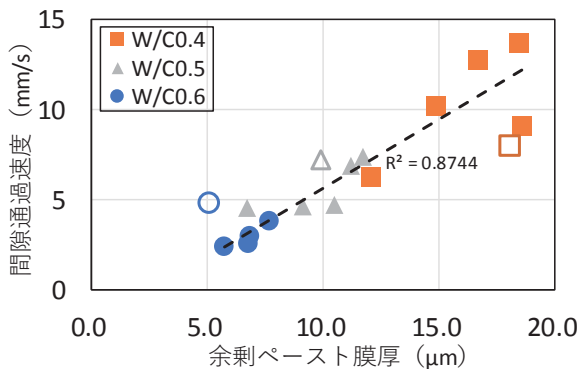


図9 余剰ペースト膜厚と間隙通過速度の関係

ひとつ

従来、コンクリートの施工性は、スランプの値から評価することが比較的容易であったが、混和剤などの多様化により困難になりつつある。そのため、加振条件下におけるコンクリートの充填性を適切に評価することが重要となる。



高橋 直希