

# 混合材料の鉛直管内落下特性 — 粘性土と転炉系製鋼スラグを例として —

## THE FALL CHARACTERISTIC OF THE MIXTURE MATERIALS, MADE BY CLAY AND CONVERTER STEEL-MAKING SLAG, IN VERTICAL TUBE

武田将英<sup>1</sup>・五明美智男<sup>2</sup>・永留健<sup>3</sup>・辻井正人<sup>4</sup>・木曾英滋<sup>5</sup>・中川雅夫<sup>6</sup>  
Masahide TAKEDA, Michio GOMYO, Takeshi NAGATOME,  
Masato TSUJII, Eiji KISO and Masao NAKAGAWA

- <sup>1</sup>正会員 東亜建設工業(株)技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)  
<sup>2</sup>フェロー 博(工) 東亜建設工業(株)エンジニアリング事業部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)  
<sup>3</sup>正会員 工修 東亜建設工業(株)技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)  
<sup>4</sup>正会員 ph. D. 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)  
<sup>5</sup>正会員 工修 新日本製鐵(株)環境・プロセス研究開発センター (〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)  
<sup>6</sup>正会員 工修 新日本製鐵(株)スラグ・セメント事業推進部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

This paper describes the fall characteristic of the mixture materials in vertical tube. In this paper, the mixture materials were made by clay and converter steel-making slag. As time passed, the cohesion of the mixture materials was growing up, and we measured it by the cylinder flow test. We experimented about the dumping the mixture materials into the vertical tube.

As the result, we found that the mixture materials had three fall conditions which depended on its flow value, and became three accumulated shapes, and that the turbidity from clay and pH from converter steel-making slag were influenced by their fall condition and accumulated shape.

**Key Words :** *Vertical tube, mixture materials, clay, converter steel-making slag, cylinder flow test, pH, turbidity*

### 1. はじめに

海域における土砂投入工事では、周辺環境への配慮から濁りの発生位置を底層に限定できる鉛直管がよく用いられる。拘束された管内では管内水や土砂塊の脈動現象が生じる<sup>1)</sup>ことから、水理学的な応用による工法開発などの研究例がある。五明ほか<sup>2)</sup>は、工法開発の1つとして、脈動現象を利用して沈降特性の異なる2種類の材料を混合しながら所定の割合で水底に堆積させる方法について報告している。しかし、この研究は、砂や製鋼スラグ、水砕スラグなどの非粘性材料に限定したものであり、粘性材料を対象としたものでなかった。仮に、2種類の材料の1つを浚渫土などの粘性材料とする場合には、投入前または管内落下中に、粘性材料を分離・分散させかつ落下速度を合わせる必要があり、その適用範囲は非常に限定的なものとなるものと考えられる。

そこで、本研究では、粘性材料、非粘性材料の2つを所定の割合で事前に混合した材料（以下、混合

材料）を鉛直管により投入・堆積させる方法に着目する。具体的には、粘性材料として浚渫土などの粘性土、非粘性材料として粘性土の強度増大などの改質効果が期待できる転炉系製鋼スラグ<sup>3)</sup>（以下、転炉系スラグ）を用い、①混合材料のフロー特性、②鉛直管投入時の混合材料のフロー値と鉛直管内の落下形態と堆積形状の関連性について、室内実験により検討を行ったものである。

### 2. 実験材料

#### (1) 製鋼スラグ

製鋼スラグの主な特徴<sup>4)</sup>は、以下のとおりである。

- ・形状は一般に稜角に富み、表面は粗である
- ・スラグ粒子の密度は、天然砂利より大きい。
- ・内部摩擦角が大きい。
- ・溶出水はアルカリ性を示す
- ・わずかに膨張する性質がある。

・弱い水硬性がある。

その他の特徴として、海水中で多量の白濁を生じることが知られている。

今回の実験では、海水中での白濁や pH の上昇を抑制するために安定化処理を行った転炉系スラグ（スラグ A）と安定化処理を行っていない転炉系スラグの生材（スラグ B、スラグ C）を使用した。スラグ C は、スラグ B を 0-5mm の粒径にしたものである。表-1 に転炉系スラグの成分分析結果を、表-2 に物性を示す。安定化処理を施すことで、遊離石灰 (f-CaO) の量が、スラグ A はスラグ B に比べて低い値となっていることが特徴である。また、気乾状態の含水比はスラグ A : 6.6%, スラグ B : 8.0%, スラグ C : 7.0%であった。

表-1 転炉系スラグの成分分析結果

成分	スラグA	スラグB	備考
CaO	52.8%	35.1%	
(f-CaO)	(0.6%)	(4.2%)	CaOの内数
SiO <sub>2</sub>	16.3%	13.0%	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1%	4.3%	
MgO	2.1%	1.6%	
MnO	3.1%	1.4%	
FeO	8.1%	7.5%	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8%	10.1%	
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.3%	2.1%	
T-S	0.3%	0.4%	

## (2) 粘性土

今回の実験で使用した粘性土の物性を表-2 に示す。

### a) カオリン

カオリン鉱物（カオリナイト、ハロイサイト）を主成分とする白色の粘土材料で、カオリナイトの水素結合の影響が強く、非常に安定的な粘土材料である。

### b) 笠岡粘土

モンモリロナイト及びカオリナイト系の混合鉱物で、適度の粘性と膨潤性を有する粘土材料である。

### c) ベントナイト

ベントナイトは、海底や湖底に堆積した火山灰や溶岩が変質することで出来上がった粘土鉱物の一種であり、モンモリロナイトを主成分とする。2:1 型単位層で構成され、層間の陽イオン交換が活発に行われ、膨潤性・懸濁安定性に富む性質を有する。

### d) 浚渫土 A

東京湾で採取された高液性限界粘土 (CH) で、有機分を多く含み、液性限界が 157%と非常に高い。黒褐色を呈しており、硫化水素臭がする。

### e) 浚渫土 B

大阪湾で採取された粘土（低液性限界）砂 (CLS) で、灰色を呈している。

### f) 浚渫土 C

大阪湾で採取された砂質粘土（高液性限界）(CHS)。灰褐色を呈しており、わずかに硫化水素臭がする。

## 3. 混合材料のフロー特性実験

### (1) 実験内容

今回の実験では、混合材料は、混合直後から時間の経過とともに粘性が高まり、比較的短時間に強度が発現している様子が観察された。ただし、一軸圧縮強度を測定できる程度の硬さではない。

そのため、鉛直管を用いて、混合材料を水中に投入する場合には、時間の経過とともに変化する混合材料の強度特性について把握する必要がある。

従来、軟らかい粘性土の強度の測定には、ベーン試験が用いられているが、転炉系スラグが礫分を含むため、混合材料ではベーン試験を用いることができない。ここでは、混合材料の軟らかい状態での強度特性を把握するため、エアモルタル及びエアミルクの試験方法 (JHS-A313) のうち、シリンダー法（内径8cm×高さ8cm、以下、フロー試験）を用いて、フロー値の測定を行った。フロー値の測定に当たっては、試料を十分に攪拌した直後に実施し、シキソトロピーの影響を排除した。

表-2 実験で使用した転炉系スラグと粘性土の物性

使用材料	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	塑性限界 $w_P$	液性限界 $w_L$	塑性指数 $I_p$	粒度組成				分類記号	強熱減量	pH	備考
					礫分	砂分	シルト	粘土				
スラグ A	3.237	NP	---	---	39.3%	59.7%	1.0%		SG	---	11.4	粒径 0-5mm
スラグ B	3.549	NP	---	---	79.5%	20.5%	0.0%		SG	---	11.4	粒径 0-25mm
スラグ C	3.406	NP	---	---	81.7%	17.2%	1.1%		SG	---	11.4	粒径 0-5mm
カオリン	2.690	26.1%	50.2%	24.1%	0.0%	0.0%	22.4%	77.6%	CH	0.0%	3.2	
笠岡粘土	2.690	19.3%	65.2%	45.9%	0.0%	0.4%	43.9%	55.7%	CH	6.6%	7.2	
ベントナイト	2.733	---	268.0%	---	0.0%	0.0%	63.4%	36.6%	CH	3.6%	9.7	
浚渫土 A	2.628	53.8%	157.5%	103.7%	0.0%	0.0%	37.0%	63.0%	CH	11.3%	7.8	東京湾
浚渫土 B	2.673	16.3%	35.5%	19.2%	0.0%	42.6%	37.1%	20.3%	CLS	3.1%	8.0	大阪湾
浚渫土 C	2.698	20.6%	61.3%	40.7%	0.6%	28.1%	26.9%	44.4%	CHS	6.0%	---	大阪湾

フロー試験を採用した理由は、上記理由に加え、①ポリマーセメントモルタルの試験方法 (JIS A 1171) では、ミニスランプコン内部に混合材料が付着し、正確な値が計測できなかったこと、②フレッシュコンクリートの受入れ検査で用いられるスランプ試験 (JIS A 1101) では1試験当たり多くの材料を必要とし、かつ①のように正確に測定できない可能性があったことによる。

## (2) 粘性土のフロー特性

はじめに、一般的な粘土材料であるカオリン、笠岡粘土、ベントナイトと大阪湾で採取された浚渫土 B のフロー特性について検討した。

カオリン、笠岡粘土、ベントナイトには水道水を用いて、浚渫土 B には人工海水 (30PSU) を用いて、任意の含水比の状態を作成し、ベーン試験と含水比試験、フロー試験を行った。その結果を図-1、図-2 に示す。

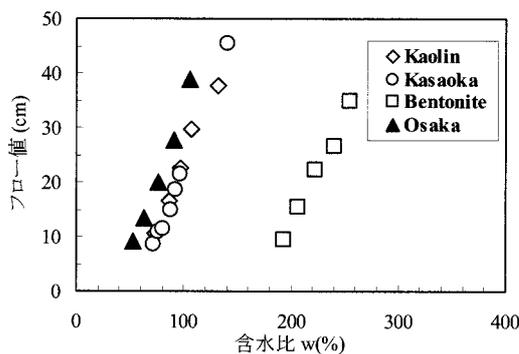


図-1 含水比とフロー値の関係

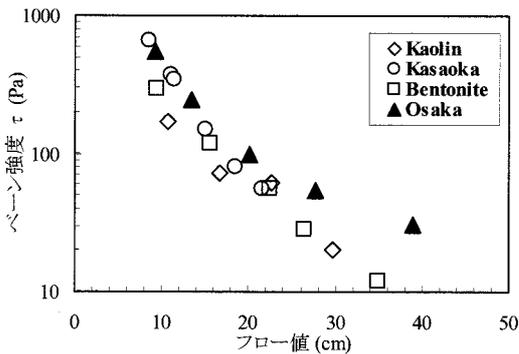


図-2 フロー値とベーン強度の関係

この結果から、一般的に言われるように、粘性土の含水比とフロー値は線形関係があることと、ベーン強度は、含水比やフロー値とべき乗則の関係になることを確認し、ベーン試験を行うことができない混合材料の軟らかい状態の強度の指標として、フロー試験の妥当性について検証した。

## (3) 混合材料のフロー特性

### a) 混合材料のフロー特性

水道水を用いてフロー値を41cm (含水比106%) に

調整した笠岡粘土と気乾状態のスラグAを表-3に示す割合となるようにそれぞれ混合した。混合はハンドミキサーを用いて5分間練混ぜ、練混ぜ終了時からの経過時間におけるフロー値を測定した。

図-3に示す結果から、混合材料のフロー値は時間の経過とともに減少し、強度が発現する様子が確認された。また、転炉系スラグの添加量を変化させることで、練混ぜ直後のフロー値やその時間変化の傾向は異なることがわかった。

その結果、鉛直管を用いて、混合材料を水中に投入する場合には、こうした初期の強度変化の特性を十分に考慮する必要があることを確認した。また、この特性をうまく利用することで、任意の時間における混合材料のフロー値をある範囲内で作り出しながら水中に投入できると考えられる。

表-3 実験ケース

ケース	重量比 (粘性土 : スラグ)	体積比 (粘性土 : スラグ)
1-1	2.00 : 1	4.50 : 1
1-2	1.33 : 1	3.00 : 1
1-3	1.00 : 1	2.25 : 1
1-4	0.67 : 1	1.50 : 1

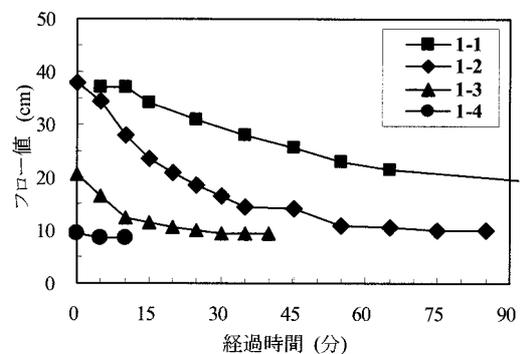


図-3 混合材料のフロー変化

### b) 粘性土の種類による混合材料のフロー変化

粘性土の種類が混合材料のフロー値にどのような影響を与えるかを確認するため、フロー値を41cmに調整した表-4に示す粘性土と、気乾状態のスラグAを重量比1:1の割合となるようにそれぞれ混合した。なお、混合方法、フロー値の測定方法は、a)と同様とした。

表-4 実験ケース

ケース	粘性土	含水比	調泥水
2-1	カオリン	132%	水道水
2-2	笠岡粘土	106%	水道水
2-3	ベントナイト	316%	水道水
2-4	浚渫土A	307%	人工海水
2-5	浚渫土B	114%	人工海水

図-4 に示す結果から、同じ流動性を有する粘性

土であっても、その種類や含水比によって、練混ぜ直後のフロー値やその時間変化は大きく異なることがわかった。そのため、混合材料の施工においては、事前に配合試験を行うことが望ましく、その際、練混ぜ直後のフロー特性についても検討を行う必要があることが示唆される。

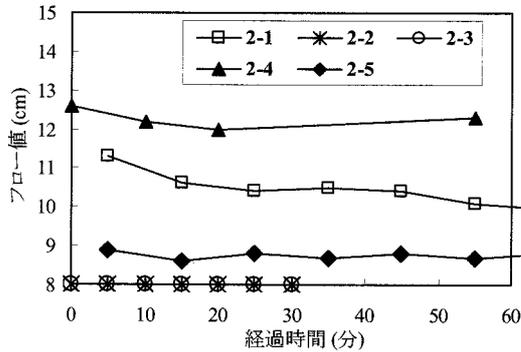


図-4 粘性土の違いによる混合材料のフロー変化

#### c) 転炉系スラグの含水状態によるフロー変化

転炉系スラグの含水状態により、混合材料のフロー値がどのように変化するかを確認するため、a) で用いた粘性土と、含水状態を変化させたスラグA（絶乾状態、気乾状態、湿潤状態）を重量比1:1の割合となるようにそれぞれ混合した。なお、混合方法、フロー値の測定方法は、a) と同様とした。

図-5に示す結果から、転炉系スラグの含水状況により、混合材料の練混ぜ直後のフロー値やその時間変化の傾向は異なることがわかった。そのため、混合材料の配合設計や屋外施工での保管状況などを検討する際には、転炉系スラグの含水状態について留意する必要があると考えられる。

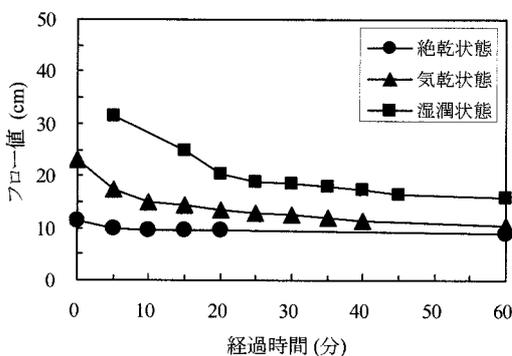


図-5 転炉系スラグの含水状態による混合材料のフロー変化

## 4. 混合材料の水中投入実験

前章では、軟弱な粘性土と転炉系スラグとの混合材料は、時間の経過とともに強度が増加する特性を有することがわかった。この特性を利用することで、

混合材料の鉛直管投入時における濁りの発生を抑制しながら、水底に堆積させることが可能になると考えられる。

そこで、混合材料の鉛直管投入時の落下形態と堆積形状について、室内水理実験により確認した。

### (1) 混合材料の連続式水中投入実験

#### a) 実験方法

水道水を水深80cmに満たした水槽（□50cm×H100cm）と鉛直管（内径10.2cm×100cm）の投入装置を用いて、混合材料の連続式水中投入実験を行った。投入装置を図-6に示す。

実験に用いた粘性土は、水道水で調泥した笠岡粘土を、転炉系スラグは気乾状態のスラグAを使用した。混合材料はハンドミキサーを用いて5分間攪拌したものを、材料供給ホッパに8kg入れた。材料供給ホッパの吐出口は直径約6cmの円形であり、弁により開閉する構造になっている。棒状パイププレートにより混合材料を振動させながら、鉛直管内に連続的に投入した。投入は、実験上の制約から練混ぜ開始から30分後に行った。実験条件を表-5に示す。

混合材料の落下形態と堆積形状をビデオカメラ等の撮影により確認し、水質チェッカ（東亜ディーケーケー製）を用いて投入後の鉛直管近傍の濁度とpHを測定した。

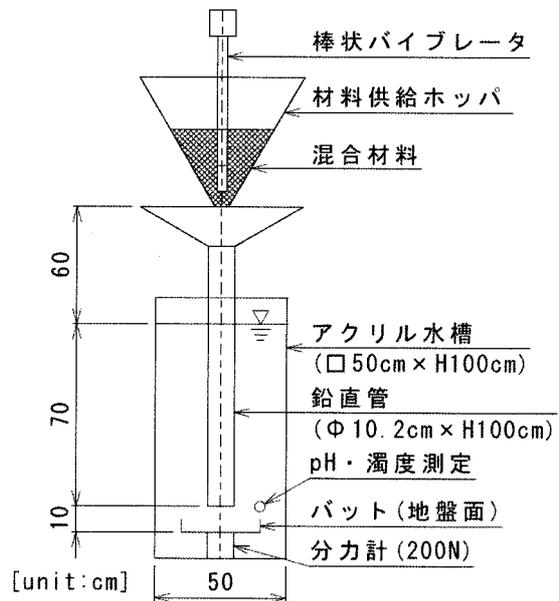
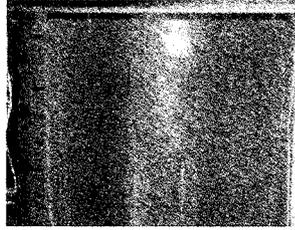
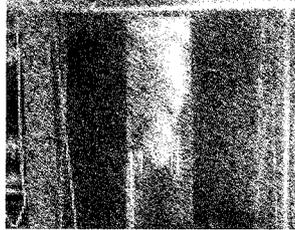
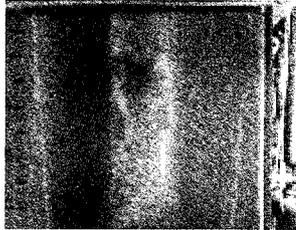
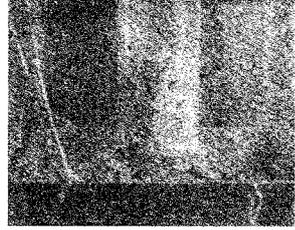
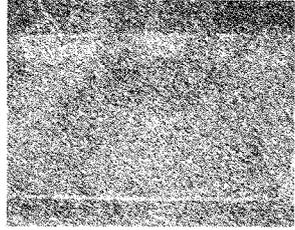
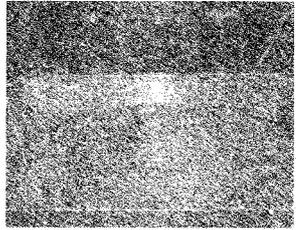


図-6 投入装置（連続式投入）

#### b) 実験結果

表-5に示す実験結果から、混合材料の投入時のフロー値により、鉛直管内の土砂の落下形態<sup>1)</sup>である土砂塊型・多塊分離型・土砂分散型のいずれかの落下形態になること、またそれぞれの落下形態に応じて、土砂塊自立型・円錐堆積型・分離堆積型の堆積形状になることがわかった。なお、3-1のケースでは投入量に比べて、鉛直管吐出口から水底面の距離

表-5 混合材料の連続式水中投入実験結果

ケース		3-1	3-2	3-3
粘性土	種類	笠岡粘土	笠岡粘土	笠岡粘土
	フロー値	15.0cm (w=85%)	20.5cm (w=95%)	30.0cm (w=110%)
転炉系スラグ	種類	スラグA	スラグA	スラグA
配合比 (土:スラグ)	体積比	3.95 :1	4.28 :1	4.76 :1
	重量比	1.85 :1	1.95 :1	2.10 :1
混合材料	投入時の フロー値	8.5cm (w=44%)	13.5cm (w=52%)	15.5cm (w=61%)
	湿潤密度	1.85 g/cm <sup>3</sup>	1.77 g/cm <sup>3</sup>	1.70 g/cm <sup>3</sup>
	投入量	8 kg	8 kg	8 kg
落下形態		土砂塊型 	多塊分離型 	土砂分散型 
	堆積形状	土砂塊自立型 	円錐堆積型 	分離堆積型 
pH	投入前	7.6	7.0	7.5
	投入後	7.6-7.7	7.0-7.1	9.5-9.6
濁度(カリン度)	mg/L	2-3	20-30	1200-1400

が短かったため、閉塞してしまっている。

こうした管内の落下形態および堆積形状は、粘性土由来の濁りの発生や転炉系スラグ由来のpH上昇に影響を及ぼすことも定性的ではあるが確認された。

## (2) 混合材料のバッチ式水中投入実験

### a) 実験方法

水道水を水深80cmに満たした水槽（□50cm×H100cm）内に鉛直管（内径10.2cm×H80cm）、鉛直管上部に引抜板、引抜板上にフロー容器を設置する。混合材料をフロー容器に充填した後、引抜板を瞬時に引抜いて混合材料を投入した。投入装置を図-7に示す。

今回の実験では、粘性土として浚渫土C（含水比81.7%）を、転炉系スラグとして、スラグB、スラグCの絶乾状態のものを使用した。表-6に示す割合で混合材料を作成後、フロー試験を順次実施し、フロー値が安定した段階のものを投入材料とした。また、それぞれの投入材料に対して、人工海水を加水してフロー値を調整した混合材料についても投入を行った。

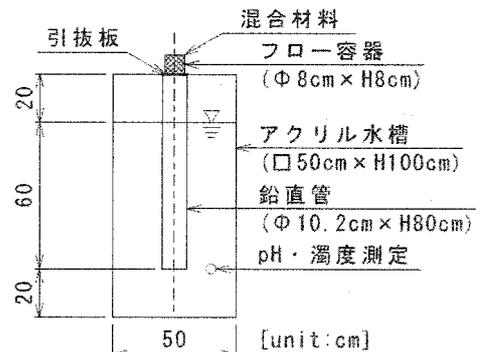


図-7 投入装置 (バッチ式投入)

表-6 実験条件

ケース	製鋼スラグ	重量比 (土:スラグ)	投入前の フロー値
slag B (1:1)	スラグB	1 :1	8.0cm
slag B (2:1)	スラグB	2 :1	8.4cm
slag C (2:1)	スラグC	2 :1	8.5cm

混合材料の落下形態と堆積形状をビデオカメラ等の撮影により確認し、画像解析により混合材料の堆積後の広がり幅と水中落下時間を求めた。また、水質チェッカ（東亜ディーケーケー製）を用いて投入

後の濁度とpHを測定した。

## b) 実験結果

今回の実験では、すべて土砂塊型の落下形態となり、管内水の振動とともに混合材料が脈動しながら管内を落下し、鉛直管から流出する際に一旦停止してから水底に自由落下する状況が観察された。実験結果を表-7、図-8、図-9に示す。

表-7 実験結果

ケース	試料 No	投入前のフロー値 (cm)	pH	濁度 (カオリン度) mg/L	脈動回数 (回)
slag B (1:1)	1	8.0	7.16	0	3.5
	2	8.7	7.22	1	6.0
	3	9.7	7.19	2	5.0
slag B (2:1)	1	8.5	7.15	0	5.5
	2	9.5	7.15	2	6.0
	3	10.7	7.15	4	3.0
slag C (2:1)	1	8.4	6.93	0	7.5
	2	8.7	7.15	2	10.5

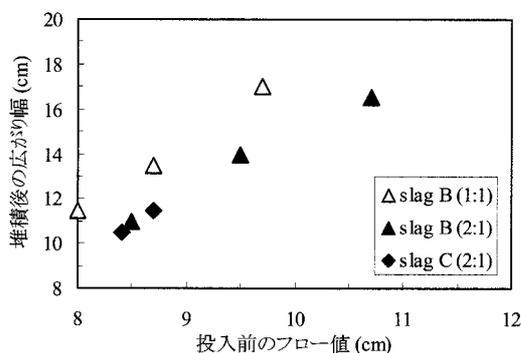


図-8 混合材料の堆積後の広がり幅

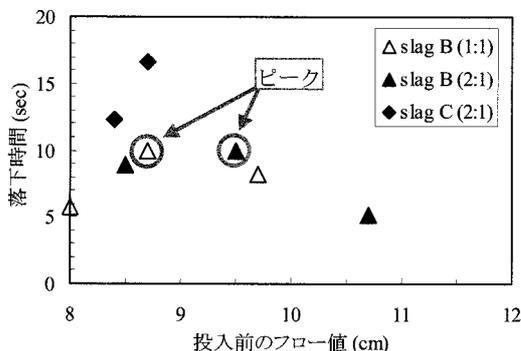


図-9 混合材料の落下時間

図-8より混合材料堆積後の広がり幅は、投入前のフロー値と線形関係があり、転炉系スラグの添加量が多い方がよく広がる様子が観察された。また、図-9では、混合材料の落下時間にピークが見られると同時にフロー値によって大きな時間差が見られた。これは水面衝突時の衝撃により混合材料が変形し、

閉塞率が変化したものと考えられる。これは、表-7に示す脈動回数からも理解できる。

その結果、山口ほか<sup>9)</sup>が指摘するように、脈動現象を伴うバッチ式投入においては、着底までの自由落下距離を小さくでき、着底時の衝撃力を小さくすることができるという利点を有する一方、時間当りの投入量が少なくなる。そのため、求められる施工条件から、バッチ式投入と大量施工が可能な連続式投入とを使い分けることが肝要である。

なお、今回の実験では、1回あたりの投入量が少ないため、pHと濁度は明瞭な差は見られなかった。

## 5. おわりに

本研究では、粘性・非粘性の異なる2種類の材料を事前に混合した材料として、粘性土と転炉系スラグを原料とする混合材料を例に、そのフロー特性と鉛直管内の落下特性、堆積形状の関連性について室内実験を実施した。

本研究の結果、以下のことが確認された。

- ①混合材料は、時間の経過とともにフロー値が減少し、強度が発現する様子が観察された。
- ②混合材料のフロー特性は、粘性土の種類や含水比、転炉系スラグの含水状態などにより変化する。
- ③混合材料の投入時のフロー値に応じて、鉛直管内の落下形態は変化し、その落下形態に応じて、堆積形状も変化する。
- ④鉛直管内の落下形態および堆積形状は、粘性土由来の濁りの発生や転炉系スラグ由来のpH上昇に影響を及ぼす。

**謝辞：**本報に関する調査研究は、経済産業省補助事業「スラグ利用に係わる研究開発」として補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 五明美智男, 栗原明夫, 三村信夫; 鉛直管に投入された土砂の水中落下挙動と管内水振動, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 896-900, 2002.
- 2) 五明美智男, 清水雄平, 吉田雅夫, 辻井正人, 篠崎晴彦; 鉛直管内水の脈動現象を利用した土砂の混合投入, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 891-896, 2005.
- 3) 木曾英滋, 辻井正人, 伊藤公夫, 中川雅夫, 五明美智男, 永留健; 転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土の固化改良技術, 海洋開発論文集, 第24巻, 2008 (投稿中).
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター, 鐵鋼スラグ協会; 港湾工事に用製鋼スラグ利用手引書, 2000.
- 5) 山口知之, 武田将英, 五明美智男; 鉛直管工法による粘性土砂の落下時間と堆積形状に関する基礎実験, 第62回年次学術講演会, pp. 461-462, 2007.