

鉛直管内水の脈動現象を利用した 土砂の混合投入

A NEW DUMPING METHOD FOR COMBINING SOILS BY WATER OSCILLATION IN A VERTICAL TUBE

五明美智男¹・清水雄平²・吉田雅夫³・辻井正人⁴・篠崎晴彦⁵

Michio GOMYO, Yuhei SHIMIZU, Masao YOSHIDA,
Masato TSUJII and Haruhiko SHINOZAKI

¹正会員 博(工) 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)

²正会員 工修 東亜建設工業(株)技術研究開発センター(同上)

³東亜建設工業(株)土木本部機電部(〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁴正会員 Ph.D 新日本製鐵(株)技術開発本部(〒293-8511 富津市新富20-1)

⁵正会員 工修 新日本製鐵(株)技術開発本部(同上)

A new method for sediment dumping was developed to mix two types of soils and to accumulate them uniformly on the sea bottom. Its function is derived from unique flow pattern and water oscillation in the vertical tube. Two important indicators to evaluate the occurrence of both unique flow and mixing are proposed, "Oscillation potential, P_1 and Binding potential, P_2 ". Three series of hydraulic experiments were executed, and assumptions for theory and validity of two indicators are confirmed. Finally, large-scale experiment provided the appropriate results on accumulation..

Key Words : Soil dumping, vertical tube, soil combining, water surface oscillation

1. はじめに

土砂を扱う港湾工事においては周辺環境への配慮が強く求められており、汚濁の発生位置を底層に限定できる鉛直管が用いられることが少なくない。鉛直管を用いたときの特徴的な物理現象としては、土砂の落下エネルギーと管内の密度増加によって自励される管内水の振動と水位低下をあげることができる。こうした特性によって、拘束のない場で投入された土砂が群効果によって大きな落下速度を持つ場合があるのに対し、鉛直管内に生じる振動の影響を受けた土砂は管下端から徐々に流出していく。例えば、粒子群の落下特性を調べた玉井ら¹⁾の実験によれば、乱流サーマル的挙動を示す条件において、単粒子沈降速度の4~5倍程度の落下速度が計測されている。一方、鉛直管内の落下土塊については、五明²⁾により自由沈降の1/3~1/6倍の落下速度が報告されている。

これらのことから、条件によっては、土砂粒子および粒子群としての沈降特性が、鉛直管の管壁による拘束と管内水の振動の結果として生じる脈動によって弱められ、

土砂は鉛直管の特性に依存した落下特性を示すようになるものと推測される。また、こうした特性を利用することにより、沈降特性の異なる土砂を混合しながら堆積させることも可能と考えられる。

近年、港湾工事においては、種々のリサイクル材料の有効利用が推進されている³⁾⁴⁾。その中で高炉水砕スラグ(以下、水砕スラグ)は、軽量で内部摩擦角が高いことと潜在水硬性により時間の経過とともに固結する特性がある。そのため、岸壁裏込め材としての液状化防止・土圧軽減の他に汚染底質の覆砂材料として高い封じ込め効果が期待できるものである。しかしながら、水砕スラグ単体では固結に数か月の長時間を要するため、早期に固結促進を図る場合には、セメント、消石灰、製鋼スラグ等のアルカリ刺激材を混合することが考えられ、既に種々の工法が陸上分野を中心に実用化されている⁵⁾。水域において、こうした材料の混合を促進しながら投入する方法としても、上述の原理の利用が考えられる。

そこで、本研究では、こうした鉛直管内水の脈動を利用し、沈降特性の異なる2種類の材料を管内で混合させ

ながら所定の配合比率で海底に堆積させる方法について、その理論、妥当性について、室内実験、大規模実験により検討する。

2. 鉛直管内の土砂混合理論

(1)管内水の脈動理論

鉛直管内水の脈動について、五明ら⁶⁾は二重式鉛直管の内管内の圧力水頭により考察している。投入した土砂が管内で分散する場合、管内の圧力水頭変動は、静水面を基準として、

$$p/\rho g = \bar{p}/\rho g + p'/\rho g \quad (1)$$

で表すことができる。ここに、 ρ ：管内水密度、 g ：重力加速度である。右辺第1項は、管内に投入された土砂による密度増加に対応して生じる平均水面低下量に相当する。投入直後の土砂は内管内のみに滞留し、管の下端での圧力水頭が外部の静水圧に等しいと仮定すれば、水位低下量は容易に導くことができる。一方、右辺第2項は、土砂投入時に誘起された管内水圧の変動分を示すものであり、減衰振動となっている。その周期は、U字管の振動周期として推定可能である。

(2)脈動の支配要因

脈動の要因は、管内の密度増加による平均水面の低下と落下土砂の運動量による振動と考えられる。ここでは、この両者を規定する指標として、鉛直管の水量に対する土砂の供給速度を表す次式のような脈動ポテンシャル P_1 を定義することとする。

$$P_1 = \rho V / (\rho_d V_s / t) / T \quad (2)$$

ここに、 V ：水面下の鉛直管内体積、 ρ_d ：投入土砂密度、 V_s ：投入土砂量、 t ： V_s の投入に要する時間、 T ：管内の固有周期である。投入土砂量に対して管内体積が相対的に小さい場合には管内での閉塞が生じ、逆の場合には水位低下が減少する。したがって、脈動を発生させる P_1 値には上限 $(P_1)_U$ 、下限 $(P_1)_L$ が存在することになる。

一方、脈動によって土砂が拘束されるかどうかは、管内水面の変動速度と管内に投入した土砂の沈降速度に依存する。水面の振動の振幅 a とすれば、土砂が脈動に拘束されるかどうかの指標として、次式のような拘束ポテンシャル P_2 を定義することができる。

$$P_2 = \beta \cdot v_s / (a/T) \quad (3)$$

ここに、 β ：干渉沈降による沈降速度補正係数、 v_s ：土砂の沈降速度である。 P_1 の傾向とは異なり、 P_2 の増加すなわち沈降速度の増大、水位変動の減少に伴って、土砂は拘束されにくくなる。

(3)土砂混合への拡張

鉛直管を用いた土砂投入においては、用いる管径と投入する土砂の粒度組成、土量によって、管内の現象が変化する。ここでは、前述の(1)、(2)の考察を2種類の土砂を用いた混合投入に拡張する。その理論構築にあたり、以下に示すような2つの仮定を設ける。

①管内現象の線形的な重ね合わせが成立する。

②各材料の管下端における流出速度は堆積速度と概ね一致し、これにより堆積物の配合割合が決定される。

特に、①については、脈動あるいは管からの流出後の堆積速度を線形的に重ね合わせることができ、それらが混合土砂の脈動、堆積速度に一致することを意味する。

鉛直管内での混合を促進するには、(1)式の水位低下と振動を土砂特性に合わせて検討する必要があるが、そのためには、土砂混合投入時の2つのポテンシャル値を最適化すればよいものと考えられる。すなわち、2種類の土砂をそれぞれ添字A,Bで表せば、両者の密度の違いと重ねあわせを考慮して脈動ポテンシャル、拘束ポテンシャルは、それぞれ次式で表すことができる。

$$(P_1)_A = \rho V / (\rho_d V_s / t)_A / T \quad (4)$$

$$(P_1)_B = \rho V / (\rho_d V_s / t)_B / T \quad (5)$$

$$(P_2)_A = (\beta \cdot v_s)_A / (a_{A+B} / T) \quad (6)$$

$$(P_2)_B = (\beta \cdot v_s)_B / (a_{A+B} / T) \quad (7)$$

ここに、 a_{A+B} ：2種類の土砂による水面振動の振幅の和である。異なる材料で類似の脈動を生じさせるためには、(4)、(5)式の脈動ポテンシャルを一致させれば良いものと考えられる。また、生じた脈動によって、土砂を効率よく混合するためには、(6)、(7)式の拘束ポテンシャルを一致させればよいことによる。以上より、次に示す条件を満足させるように混合方法を設計する必要がある。

$$(P_1)_L < (P_1)_A + (P_1)_B < (P_1)_U \quad (8)$$

$$(P_2)_A + (P_2)_B < (P_2)_U \quad (9)$$

$$(P_1)_A / (P_1)_B \Rightarrow 1 \quad (10)$$

$$(P_2)_A / (P_2)_B \Rightarrow 1 \quad (11)$$

さらに、(10)式は(12)式のように変形され、質量換算の土砂供給速度比として表現される。また、土砂の沈降速度として例えばストークス式である(13)式を用い、 β が2種類の土砂でほぼ等しいものとするれば、(11)式は(14)式のように変形され、土粒子特性によって決定されることとなる。

$$(\rho_s V_s / t)_A / (\rho_s V_s / t)_B \Rightarrow 1 \quad (12)$$

$$v_s = \Delta \rho g d^2 / 18 \mu \quad (13)$$

$$(\Delta\rho d^2)_A/(\Delta\rho d^2)_B \Rightarrow 1 \quad (14)$$

ここに、 $\Delta\rho=\rho_s-\rho$ 、 ρ_s :土粒子密度、 d :粒径である。また、 $d>0.1\text{cm}$ の場合には(15)式に示すRubeyの式を用いることで、粒径一致の条件が導かれる。

$$v_s = 32.8d^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$d_A/d_B \Rightarrow 1 \quad (16)$$

3. 室内水理実験

(1)実験内容

本報では、現地水深8mを想定し、縮尺の影響を考慮して模型縮尺1/10の条件で実験を行った。図-1は、実験模型を示したものであり、2基のホッパー下部に設置したバルブで投入量を制御し、あわせて振動装置により閉塞を防止している。管径（10、12.5、15cm）、投入土砂（表-1）、土砂の供給速度、投入量をパラメータとして、管内水位変動の計測および土砂落下状況のビデオ撮影を行った。具体的には、鉛直管内に別系統で同時投入された2種類の材料について、まず単体で投入した場合の管内供給速度と管外へ流出した後の堆積速度を求めた。次に、2種類の材料を同時に投入した場合における混合材料の水中堆積速度、管内水面変動を計測した。さらに混合材料堆積物のサンプリングを行い、炉乾燥後ふるい分けしてサンプル内の各材料重量割合を求めた。

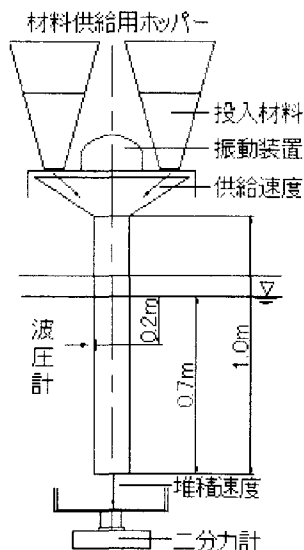


図-1 1/10実験装置

(2)供給条件、堆積速度のキャリブレーション

1/10実験にあたっては、定量供給が可能となる振動装置の振動数とバルブの開閉率を事前に測定した。

図-2は、各材料について定量供給が可能な範囲での気中供給速度と堆積速度の関係を示したものである。均一かつ沈降速度の小さい標準砂において他の材料と傾きが

異なるものの、供給速度と堆積速度の間には直線関係が見られる。また、ビーズ、水晶においては、粒径が一樣で沈降速度も大きいため、水面低下や脈動現象は見られなかったことから、以後の実験では対象外とした。

表-1 土砂材料一覧

No	種類	密度	粒径 (mm)	$\Delta\rho d^2$ (g/cm)
1	ビーズ	2.53	3.58	0.20
2	水晶	2.52	4.97	0.38
3	標準砂	2.60	0.20	6.4×10^{-4}
4	水砕スラグ	2.70	2 Under	$<6.8 \times 10^{-2}$
5	製鋼スラグ	3.30	5 Under	<0.58
6	カラーサンド赤	2.64	0.85 Over	$>1.2 \times 10^{-3}$
7	カラーサンド白	2.64	0.075~0.60	$9.2 \times 10^{-5} \sim 5.9 \times 10^{-3}$

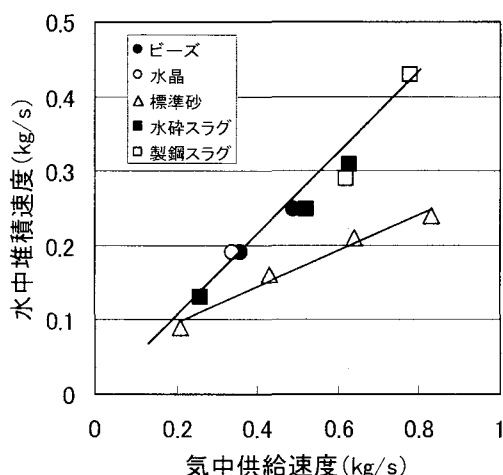


図-2 供給速度と堆積速度の関係

4. 管内現象の線形重ね合わせ

(1) 堆積速度の重ね合わせ

表-1に示した材料のうち、脈動が見られた標準砂と水砕スラグを用い、2つの材料を同時に投入することによって堆積速度の線形的な重ね合わせが成立するかどうかの確認を行った。実験条件は、表-2に示すとおりであり、気中における単体での供給速度が一致する場合と異なる場合とに分けて2ケース実施した。

表-2 Case1の供給速度条件

Case	標準砂	水砕スラグ
1-1	0.24 kg/s	0.25 kg/s
1-2	0.09 kg/s	0.32 kg/s

図-3は、水中堆積量の時間変化を示したものである。どちらのケースにおいても、土砂供給が続いている約15秒後までは一定速度での堆積が進行し、特に供給速

度の小さいCase1-2の標準砂では約40秒後まで一定の堆積速度を示した。また、単体の堆積量時間変化の線形和は混合投入の実験と一致し、脈動が見られる他の材料の組み合わせにおいても同様の傾向となった。以上のことから、2. で述べた管内現象に関する仮定のうち、堆積量すなわち堆積速度の重ねあわせが成立していることがわかる。

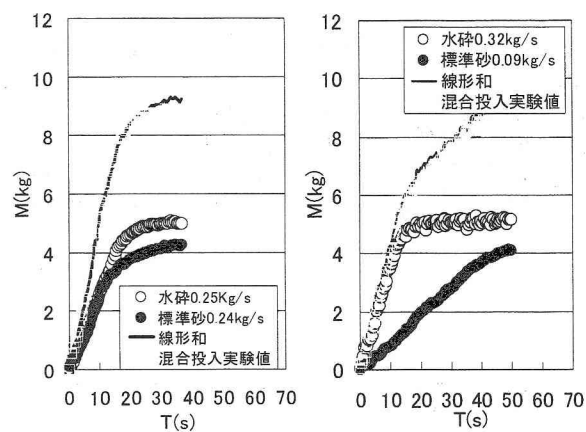


図-3 堆積量の時間変化

(2)脈動現象の重ね合わせ

次に、管内の水位変動の重ねあわせについて検討するために、表-1のうち粒径分布の重複しない2種類のカラーサンド（相馬硅砂を着色）を用いて投入実験を行った。単体投入および混合投入時について管内の水圧変動を計測し、その時間変化を比較した。

図-4は、2つのケースにおける水圧変動の時間変化を示したものである。脈動が見られかつ供給速度が一致するCase2-1の場合、混合投入の水圧変動は、線形和にほぼ等しくなる。一方、管内投入速度が異なるCase2-2では、混合投入した際に脈動は見られるものの白サンド単体による脈動が非常に小さい。そのため、混合投入時の水圧変動と線形和が一致しない状況が約8秒継続している。このように、水圧変動の重ねあわせは、脈動が生じている条件下において成立する。

表-3 Case2の供給速度条件

Case	エボカラー サンド赤	エボカラー サンド白
2-1	0.33 kg/s	0.33 kg/s
2-2	0.33 kg/s	0.08 kg/s

(3)堆積速度比と混合比率

実験に先立ち設けた仮説のうちの1つが成立したことから、次に2番目の仮説について検証する。Case2の実験時に、図-5に示すような円筒サンプラーによって管直下の堆積物を採取し、0.85mmのふるいによって分類計量し、2種類の砂の混合状況を調べた（写真-1）。管内供給速度が一致しているCase2-1では、前述のように2種類の材料で類似した脈動となっており、混合状態も良

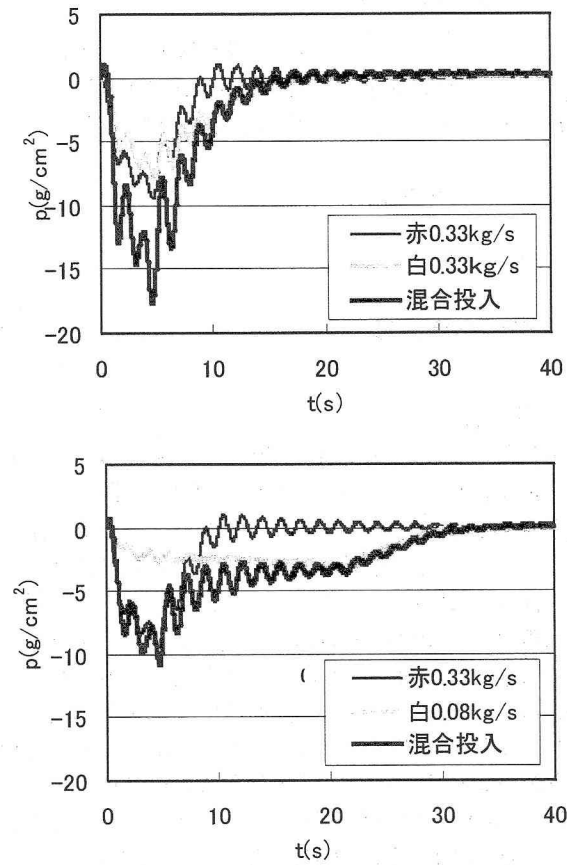


図-4 管内水圧変動の時間変化
（上段：Case2-1，下段：Case2-2）

好であった。質量換算の堆積比率としては、鉛直管直下で赤：白＝6：4、側方の法尻部で赤：白＝1：1が得られている。一方、Case2-2の場合の混合状況は不良で、堆積比率として赤：白＝9：1となっている。

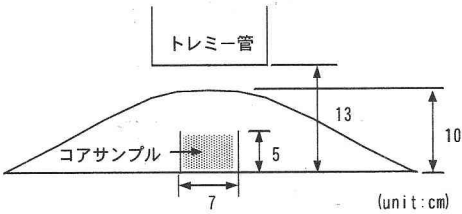


図-5 堆積物のコア採取状況

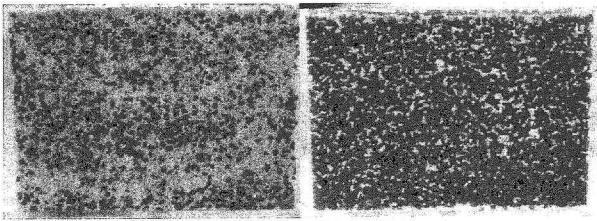


写真-1 堆積物の断面写真
（左：Case2-1，右：Case2-2）

また、Case2-1の場合、(14)式で示したポテンシャル比は $P_2/P_1 > 128 \sim 2$ となっている。すなわち、白サンドに対して赤サンドが拘束されにくい状況となっており、下層の比率が1:1よりずれた原因と考えられる。しかしながら、堆積物の上層では、下層と逆に白サンドの比率が増加する傾向が認められた。以上のことから、堆積速度を同一とすれば、堆積層における混合比率は1:1を中心としたものとなり、ポテンシャル P_2 の比の大小によって鉛直方向に堆積比率の分布ができるものと考えられる。これより、堆積速度により堆積比率が決定されたとする仮定が成立することが明らかとなった。

5. 脈動限界

4. において、2.で述べた2つの仮定の妥当性と拘束ポテンシャル P_2 の有効性が示された。次に、残された脈動ポテンシャル P_1 の指標性について検討する。

鉛直管の上端に同一径の円筒を取り付け、その間には引き抜き板を設置する。この円筒内に一定量の土砂を入れた後に、約1秒で板を引き抜いて瞬時に土砂を投入し、このときの管内の脈動を水压変動によって計測する。実験条件は、管内径10、12.5、15cm、投入量10～3000cm³の8種類、投入土砂は水砕スラグ、製鋼スラグの2種類である。

図-6は、両者をそれぞれ単体で投入した際の脈動ポテンシャル、管長 l で無次元化した最大水位低下量 Δh および管内現象の関係を示したものである。脈動発生条件は概ね $2 \sim 4 < P_1 < 40$ 程度であり、そのときの最大水位低下量は管没水長 l の3～20%程度である。また、 $P_1 \leq 2 \sim 4$ では鉛直管の規模と比較して投入土砂量が多すぎるため閉塞が発生し、一方、 $40 \leq P_1$ では土砂が少なすぎるために水面が波打つだけとなる。

なお、ここで得られた結果は、鉛直管内の断面に一樣に土砂が落下したときのものである。土砂供給方法によっては、土砂の落下断面積が鉛直管の断面積より小さくなる可能性がある。このとき、ポテンシャル P_1 は面積比 A/A_s (A :鉛直管断面積、 A_s :土砂断面積)で補正され、脈動ポテンシャル値が大きくなることによって、管内水位の低下量も小さくなるものと考えられる。

6. 1/4実験による検証

以上の室内実験による検討においては、縮尺効果の影響も考えられることから、理論の妥当性の検証を目的として1/4スケールの実験を行った。実施した条件は、表-4に示すとおりであり、単体および混合土砂いずれにおいても脈動条件を満足している。水压測定は静水面下60cmの深度で行い、供給量はベルトコンベヤ上部に設けたカットゲートにて調節した。

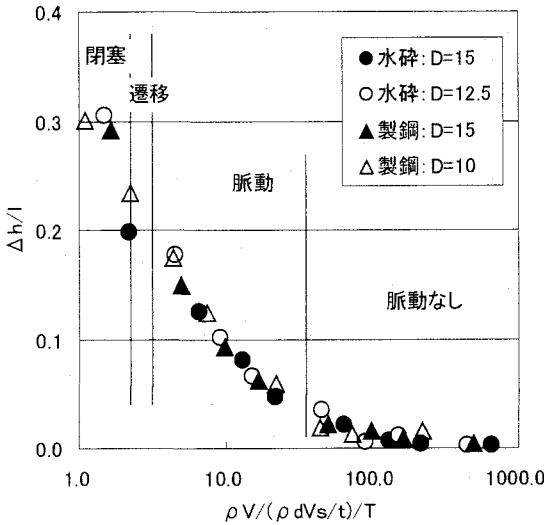


図-6 脈動ポテンシャルと水位低下量、管内現象の関係

表-4 1/4実験条件

鉛直管諸元	内径35.5cm 没水長 $l=2.0$ m	
	水砕スラグ	製鋼スラグ
供給速度(1:1)	6.24kg/s	6.87kg/s
投入量	206.0kg	185.4kg
投入時間	33s	27s
脈動ポテンシャル (混合土砂)	11.2	10.1
	(5.3)	

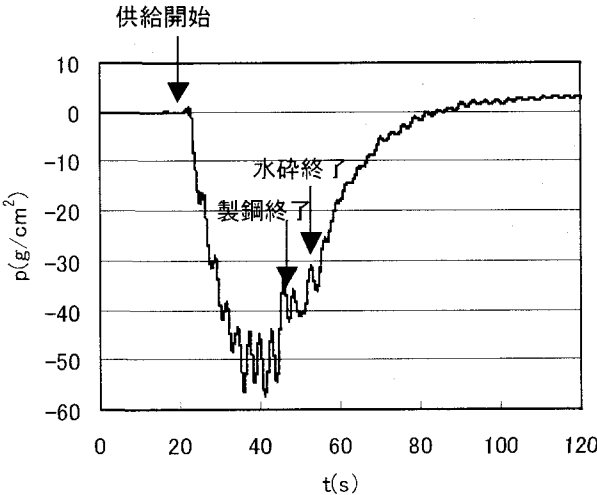


図-7 管内水压変動の経時変化

(1)脈動状況

図-7は、混合投入時の水压変動の変化を示したものであり、管内固有周期は2.6sで計算固有周期2.8sとほぼ一致している。図からわかるように、土砂の投入と同時に管内水位が低下し、 $t=35 \sim 45$ sにおいては最大低下となって定常状態が継続している。このとき、管内では2種類のスラグ材が十分に混合されているものと考えられ

る。投入終了後の $t=45\text{s}$ 以降は、管下端からのスラグ材の流出に伴い、管内水位は徐々に静水位付近に回復していくことがわかる。

(2)目標とする混合状況

投入試験に用いる水砕スラグと製鋼スラグの固結特性を確認するために、水砕スラグと5mm以下の製鋼スラグ混合材について、水中落下法で作成した供試体の一軸圧縮強度試験を事前に行った。その結果、28日後において水砕スラグ単体では固結の確認ができなかったのに対して、製鋼スラグを混合することにより、固結が促進されることが確認された。用いた質量比は、水砕スラグ：製鋼スラグ=4：6～7：3の範囲であり、得られた強度値としては $40\text{kN/m}^2\sim100\text{kN/m}^2$ であった。本知見は室内で均等に混合された供試体での試験結果であるが、今回の試験による混合比を調べることによって、混合堆積した土砂の固結特性についても言及することが可能と考えられる。

(3)堆積状況

2種類のスラグの混合状況を把握するために水槽での投入後に形成された堆積物からコア(径100mm、高さ200mm)を採取し、安定した脈動状態で堆積したと考えられる採取コア高の中央部において、断面の拡大顕微鏡観察および化学成分分析を行った。なお、化学成分分析による混合状況の確認にあたっては、主要化学成分である Fe_2O_3 、 SiO_2 、 CaO の3成分について、2種類のスラグおよび混合スラグの分析値から混合比率を求めて定量的に評価した。

写真-2は、堆積物の拡大反射顕微鏡観察結果を示すが、写真の白く明るい部分が水砕スラグ、黒い部分あるいは黒で囲まれた部分が製鋼スラグ、残りのねずみ色の部分は空隙部分である。写真より、2種類のスラグの混合状態として際立った偏析はなく均等に混合しているものと推察される。



写真-2 堆積物の拡大反射顕微鏡写真

また、表-5は、混合前の2種類のスラグおよび混合スラグの化学成分分析結果を示したものである。なお、表中には、化学成分毎に計算された混合比率を示す。表より、 $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ から求めた重量比率に差が見られるが、他の化学成分からの計算値はほぼ1：1で均等に混合されているものと考えられる。

これより、本研究で提案した土砂の混合投入方法が妥当なものと評価でき、さらにはスラグ材の確実な固結促進を実現できる混合投入方法として適切であることが確認された。

表-5 スラグの化学成分分析値と混合比率の計算値

材料	化学成分(mass%)		
	SiO_2	$\text{T-Fe}_2\text{O}_3$	CaO
水砕スラグ	35.9	0.31	43.3
製鋼スラグ	19.1	18.4	35.9
混合スラグ	27.2	12.3	39.9
水砕スラグ：製鋼スラグ比 (混合スラグ中計算値)	52:48	34:66	53:47

7. おわりに

環境に配慮した土砂投入装置として実績のある鉛直管の脈動を利用した土砂の混合投入方法を提案し、その理論を導いた。また、水理実験によって、理論構築に用いた仮定を確認した上で、脈動限界を提示するとともにカラーサンドの混合実験およびスラグ材による実規模実験を行った。その結果、良好な混合状態が確認され、投入方法の妥当性が明らかとなった。

参考文献

- 1) 玉井昌宏、村岡浩爾、室田明：固体粒子群の落下挙動と誘起流動に関する研究，土木学会論文集，No.509/Ⅱ-30，pp143-154，1995.
- 2) 五明美智男：二重式鉛直管を用いた土砂投入時における管内水循環機構について，海岸工学論文集，第47巻，pp.981-985，2000.
- 3) 港湾・空港等リサイクル推進協議会；港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針，2004.3
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター；港湾工事用水砕スラグ利用手引書，1989.8.
- 5) 例えば，鉄鋼スラグ協会；水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」，1983.11.
- 6) 五明美智男・栗原明夫・三村信男：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.