

斜めもぐりジェットによる 粘性土の掘削と濁りの抑制法

DIFFUSION OF TURBIDITY DUE TO SUBMERGED WATER JETS AND ITS CONTROL BY THE GUARD WALLS

秋山 寿一郎¹・和田 智之²・有働 貴行²
Juichiro AKIYAMA, Tomoyuki WADA and Takayuki UDO

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻(同上)

Embedding machines with submerged water jets are commonly used for embedding underwater cables and pipelines into the seabed. However, the diffusion of turbidity induced by the jets often deteriorates water quality of marine environments, although the jet is an effective tool to entrench the seabed. In this study, the diffusion of turbidity induced by the entrenching the soft seabed with the jets was examined and its counter-measure was proposed experimentally. We found that a simple counter-measure, namely, the installation of guard walls in both side of the jets, can significantly suppress the diffusion of turbidity, simultaneously improving the entrenching efficiency.

Key Words : *embedding underwater cable, submerged water jet, cohesive soil, diffusion of turbidity, experiment*

1. はじめに

通信ケーブルやパイプラインを海底に敷設する工法には、非埋設工法と埋設工法がある。前者は、波浪、船錨、漁業等によるケーブル等の損傷のおそれのない水域での工法であり、敷設船によって海底に敷設される。後者は、ケーブル等の損傷のおそれのある浅い海域での工法であり、埋設機により海底を1~3m程度掘削し埋設される。

波浪等の気象条件に大きく左右される埋設工事では、効率よく工事ができる経済性が求められる。埋設機には、鋤式、ウォータージェットを用いたジェット式(以下「ジェット」という)および両方式を組み合わせたタイプがあるが、ジェット式埋設機は掘削工事の作業効率だけではなく、ケーブル等の埋め戻しにも優れることから、これを基本とした埋設機が主流となっている。

しかし、埋設機は牽引船により曳航されながら掘削工事を行うので、敷設時に水質汚濁が広域に発生し、海底生物や漁業等に悪影響を及ぼすことが問題とされている。

もぐりジェットによる洗掘に関する研究は、これまで砂質土を対象として数多く行われている。例えば、水平ジェットを用いた二次元壁面噴流実験により、安定状態にある洗掘形状の算出法や、噴流特性の空間的変動を予

測する新しいスケール則を明らかにしたHogg *et al.*の研究¹⁾、鉛直ジェットによる洗掘の進行に伴う流れの変化を考慮した洗掘孔形状の計算と、洗掘孔内における流れのモデル化を行った赤司・斉藤の研究²⁾、斜めもぐりジェットによる洗掘過程と洗掘孔形状を観測した石川らの研究³⁾などがある。

一方、粘性土を対象とした研究は、水平ジェットによる洗掘孔形状の観測および計算を行ったMazurek *et al.*の研究⁴⁾、鉛直ジェットによる洗掘限界の評価を行った中野・大川の研究⁵⁾などがある程度である。

以上のように、定常ジェットによる砂質土あるいは粘性土の掘削については、洗掘孔形状等についてある程度の知見が得られている。しかしながら、ジェット式埋設機のように、斜めもぐりジェットが移動しながら底質を掘削する場合の掘削特性や、そのときに発生する濁りの拡散特性はほとんどわかっていない。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、強い濁りを引き起こす粘性地盤における埋設工法を対象として、斜めもぐりジェットによる濁りの発生・拡散メカニズムを明らかにするとともに、ジェットにガードを設置したときに得られる濁りの抑制効果とその掘削効率について実験的に検討を加えたものである。

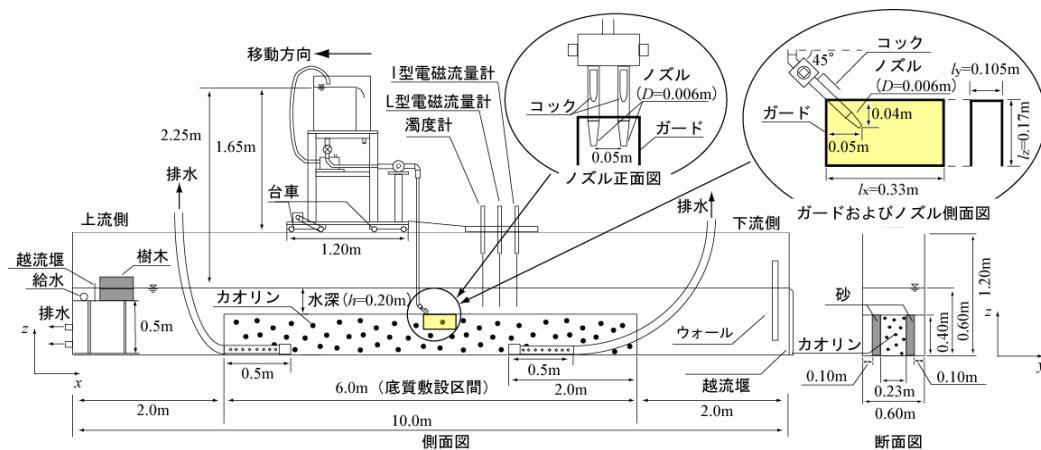


図-1 実験装置（左下：側面図 右下：断面図 中上：ノズル正面図 右上：ガードおよびノズル側面図）

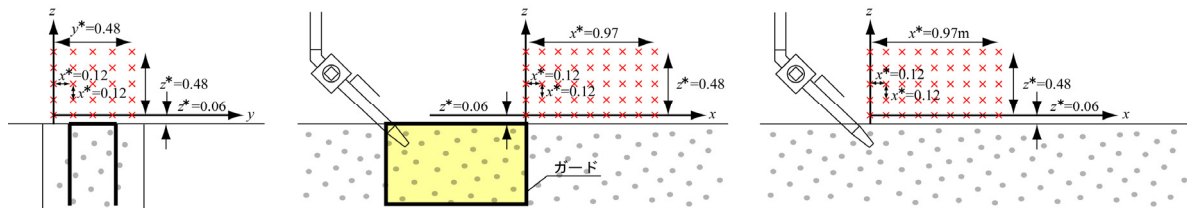


図-2 測定点（左：横断面 中：CASE-A 縦断面 右：CASE-B 縦断面）

2. 実験の概要

(1) 実験装置および実験条件

図-1に実験装置の概略を示す。実験装置は水槽、底質およびジェット(ヘッドタンク、ジェットノズル)より構成されている。底質は、水深 $h=0.20\text{m}$ の一定に保たれた両面ガラス張りの水槽(長さ 10m 、幅 0.60m 、高さ 1.2m)内にカオリン(平均粒径 $6.0\times 10^{-6}\text{m}$ 、含水比 74% 、密度 2.6g/cm^3)を一定区間(長さ 6.0m 、幅 0.23m 、高さ 0.40m)に敷き詰めたものである。なお、底質は、有明粘土の特性(代表的粒径 $8.0\times 10^{-6}\text{m}$ 、含水比 $30\sim 130\%$)を踏まえて設定したものである。

実験では、閉水域(水槽内)の影響が出ないように極力配慮した。具体的には、水槽の下流端付近にはウォールを、両端には側溝を設け、壁面からの濁水流のはね返りを抑制するとともに、実験水槽の水域が有限なために水槽内に蓄積される濁りを排除した。ウォールについては、放流施設を持たない小型のダム貯水池に流入する濁水流を池外に排除する方法として、著者らが提案した設置法⁹⁾を用いた。また、水槽から排除された濁水と同量の清水を周囲水として供給した。その際、測定区間だけではなく、水槽内に優位な流れが生じないように、全流量を複数のディフューザー付の給水装置に分配し清水を供給するとともに、さらに仕切り板で流れを遮断した後に、アニリンブルー粒子で周囲水の状況をモニターした。

ジェットノズルとヘッドタンクは一体化構造となっており、一定速度で自走できる台車に搭載されている。ジェットノズルは、下向き 45° の角度で2本平行(0.05m

間隔)に設定されている。ガード(長さ $l_x=0.33\text{m}$ 、幅 $l_y=0.105\text{m}$ 、高さ $l_z=0.17\text{m}$)もジェットノズルと一体化されている。なお、ガードの諸元およびノズル間距離はA社のジェット式埋設機の実機を $1/12$ にスケールダウンしたものである。

実験は、ガードを設けたジェットの掘削効率と濁りの抑制効果を調べる目的で、ガードを設置した場合(CASE-A)と設置しない場合(CASE-B)の2ケースを行った。CASE-Aにおける最大掘削深は、ガード等と同様に実機の $1/12(0.16\text{m})$ に設定した。また、最大掘削深はノズル内径 D 、ジェット流量 Q_w および台車の移動速度 V で決定されるため、ジェットが一定速度 V で移動したときの最大掘削深が 0.16m となることを目安に予備実験を実施し、 $D=0.006\text{m}$ 、ジェット流量 $Q_w=1.94\times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ および台車の移動速度 $V=1.27\times 10^{-3}\text{m}/\text{s}$ を決定した。

(2) 測定・観測方法および測定点

測定・観測項目は、(1)濁度計と電磁流速計(L型、I型)を用いての縦断・横断断面の濁度分布と流速ベクトルの3次元計測、(2)デジタルビデオカメラを用いての水路側面と上面から濁りの拡散状況と掘削幅の観測、(3)着色した発泡スチロール球(直径 0.005m)を用いた最大掘削深の計測である。

電磁流速計(L型、I型)と濁度計は台車の後方に連結されており、L型流速計により y 軸方向流速 v と z 軸方向流速 w を、I型流速計により x 軸方向流速 u と y 軸方向流速 v をLagrange的に計測できるようになっている。

計測は1回の走行につき5箇所で行い、各ケースにつき横断方向に5回、縦断方向に9回、計45回繰り返した。な

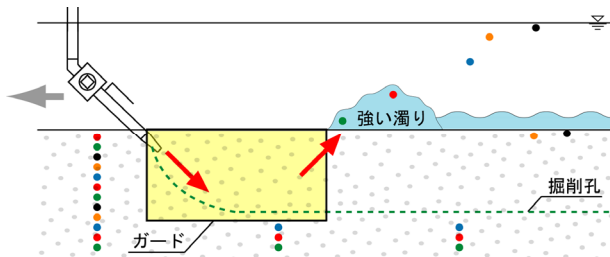


図-3 着色した発泡スチロール球による最大掘削深の測定

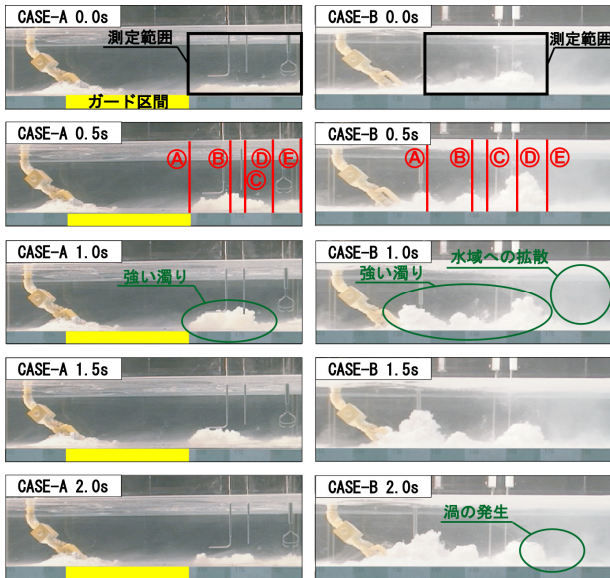


図-4 濁りの拡散状況（左：CASE-A 右：CASE-B）
（上から $t=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ s）

お、各測定点での計測時間は180sである。また、撮影した画像、発泡スチロール球を用いた掘削深などから実験の再現性を確認した。

図-2は、濁度と流速ベクトルの測定点を示したものである。先述したように、ジェットノズルと計測器は、設定された測定点に対して一定距離を保って移動するようになっている。

測定範囲は、CASE-Aではガードの先端から y 軸方向に $y^*=-0.24$ 離れた点および底質上面から鉛直上向きに $z^*=0.06$ 離れた点を原点とする $x^*y^*z^*=0.97 \times 0.48 \times 0.48$ であり、CASE-Bではノズルの先端から y 軸方向に $y^*=-0.24$ 離れた点および底質上面から鉛直上向きに $z^*=0.06$ 離れた点を原点とする $x^*y^*z^*=0.97 \times 0.48 \times 0.48$ である。 x^*, y^* および z^* の測定点の間隔は同一(0.12)である。ここで、 $*$ はガードの長さ l_x で無次元化した距離を示している($x^*=x/l_x, y^*=y/l_x, z^*=z/l_x$)。

掘削孔は、底質の性質上、自然に埋め戻しが起こるため、画像等の観測からその形状や最大掘削深を把握することはできない。そのような理由から、図-3に模式的に示したように、着色した発泡スチロール球を底質の深さ方向に0.01m、縦断方向に0.3m間隔で埋設し、掘削により底質から浮き出てきた発泡スチロール球の色から最大掘削深を推定した。

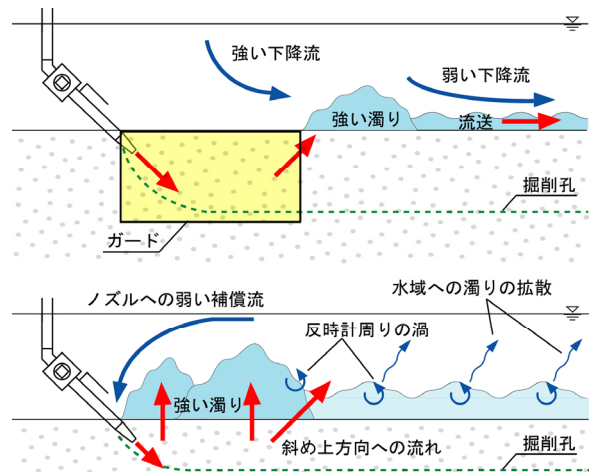


図-5 濁りの拡散メカニズム（上：CASE-A 下：CASE-B）

3. 濁りの発生メカニズムとデータ解析法

(1) データサンプリングの方法

図-4は、掘削と濁りの拡散の状況を0.5秒毎に示したものである。なお、図中の黄線はガードの設置区間を、黒枠は各ケースの測定範囲を、赤色の①、②、③、④および⑤断面は後述する濁度分布および流速ベクトル横断面の測定断面を示している。

このような画像(動画)から、次のことが観察あるいは推察された。(1)いずれのケースについても、掘削孔から強い濁りが鉛直ブルーム状に湧き上がるように発生しており、この強い濁りは上昇と下降を繰り返す間欠的なものである。(2)強い濁りはCASE-Aではガードの設置区間の下流端から、CASE-Bではジェットノズル下流側の2～3箇所から発生する。(3)CASE-Aで見られる強い濁りは、ジェット流が掘削孔下端部に衝突するために発生し、CASE-Bでの複数の強い濁りは、ジェット流が分散され、掘削孔の上端部～中央部および下端部に衝突するために発生すると推察される。(4)CASE-Aでは水域の濁りはほとんど認められないが、CASE-Bでは顕著である。

図-5は、画像(動画)の詳細な観察結果に基づき、掘削孔から発生する強い濁りと水域への濁りの拡散メカニズムとの関連を模式的に示したものである。

CASE-Aでは、(1)ガードの設置区間の下流端から強い濁りが発生するものの、ガードの設置効果により、ジェット流の一部が底質表面に沿ってかなり速い流速で流動する。(2)その結果、掘削孔から流出した強い濁りはほぼその濃度を保ったまま底質表面に沿って下流側に流送されるが、高濃度濁水塊であるため、ほとんど水域へ拡散しない。(3)掘削孔から流出するジェット流は比較的強い流れなので、この付近で生じる周囲水の連行のため、水域ではそこに向かう流れが発生し、これがさらに底質に沿った強い濁りの拡散を抑制する働きをしている。以上がCASE-Aにおいて水域へ濁りがほとんど拡散しない

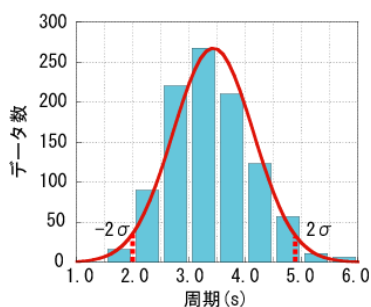


図-6 強い濁りの発生周期

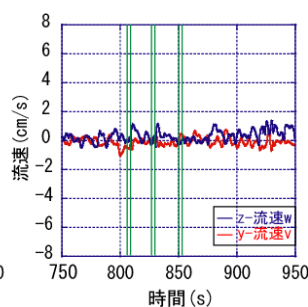
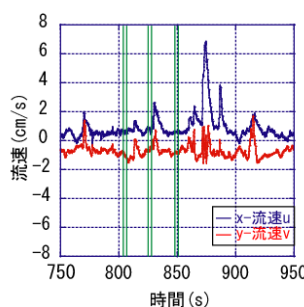
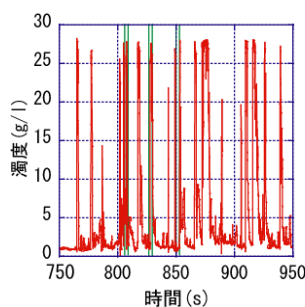


図-7 時系列データ（左：濁度 中：I型流速計 右：L型流速計）

メカニズムと考えられる。

CASE-Bでは、(1)水域への濁りの拡散に対して、掘削孔の上端部と中央部の強い濁りはほとんど寄与しておらず、掘削孔下端部の強い濁りの寄与が支配的である。(2)掘削孔下端部では、ジェット流により強い濁りが巻き込まれ、弱い濁りを伴った反時計回りの渦が掘削孔下端部から間欠的に発生する。(3)掘削孔下端部ではやや斜め上方にジェット流の一部が小さな流速で流出するため、弱い濁りを伴った渦がこの流れに乗って流送されるとともに、渦が破壊され濁りが水域へ拡散していく。(4)水域では、ジェットノズル付近での周囲水の連行のため、ノズルに向かう緩やかな流れが発生しており、これが濁りを停滞させる要因となっている。以上がCASE-Bで水域が汚濁するメカニズムと考えられる。

図-6は、CASE-Bで観測された掘削孔下端部での強い濁りがジェット流によって巻き込まれ消滅するまでの時間の頻度分布を示したものである。

これより、掘削孔下端部での強い濁りの周期を平均値 $\pm 2\sigma$ で定義し、データのサンプリング間隔を反時計回りの渦が発生した時刻から2.8sとした。また、データサンプリング間隔の違いによって生じる濃度場と速度場の変化を定量的に把握する目的で、全計測時間(180s)のデータサンプリングも行った。

(2) データ解析法

サンプリング間隔180sの場合は、全計測時間のデータを平均化し、流速については平均化した値から台車の移動流速 V を差し引いた。

サンプリング間隔2.8sの場合は、次のように解析した。

(a)CASE-Aでは、強い濁りが最大高さに達した時刻(例えば、図-4の1.0s)を、CASE-Bでは掘削孔下端部で反時計回りの渦が発生した時刻(例えば、図-4の2.0s)をサンプリング開始時刻とし、これらの開始時刻から2.8sのデータを抽出し平均化した。

(b)各測定点において、(a)と同様な3つのデータを平均化した。

(c)流速については、濁度と同様にデータをサンプリングし、得られた値から台車の移動流速を差し引いた。

図-7は、時系列データの一例(CASE-A)を示したものである。図中の緑線はサンプリング間隔2.8sの場合の

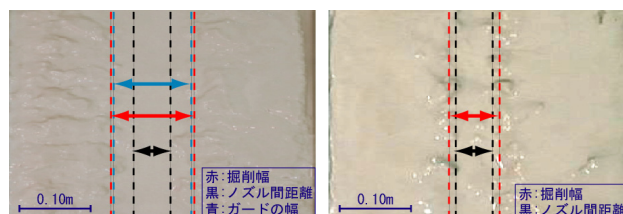


図-8 掘削幅（左：CASE-A 右：CASE-B）

データを抽出した時間を、I型流速計の青線は流速 u 、赤線は流速 v を、L型電磁流速計の青線は流速 w 、赤線は流速 v を示している。

I型電磁流速計の青線のデータサンプリング点を見ると、3点とも同程度の値を示しており、サンプリングが妥当であることが確認できる。また、L型電磁流速計の青線のデータサンプリング点を見ると、3点とも各周期の最小となる時間のすぐ後のデータをサンプリングしていることがわかる。この値は小さいほど鉛直上方向への流速が大きいことを示している。上向きの流速が最も大きくなるのは図-4の0.0s～1.0sの時であるため、そのすぐ後のデータをサンプリングしていることがわかる。

4. 結果と考察

(1) 掘削幅と掘削深

図-8は、上面から撮影した両ケースの掘削幅を示したものである。このように、掘削孔は底質の性質から自然に埋め戻されるが、いずれのケースも縦断方向に一定幅の掘削がなされたことが確認できる。掘削幅については、CASE-Aではガード幅とほぼ一致し、CASE-Bではノズル幅より若干大きい程度であることが見て取れる。また、着色した発泡スチロール球から得られた最大掘削深は、CASE-Aでは実験条件として設定した0.16m、CASE-Bでは0.10mであった。このように、ジェットにガードを設置すると、掘削幅は1.7倍程度、最大掘削深は1.6倍程度となり、高い掘削効率を得ることができる。

(2) 水域の流況と濁りの発生

以下では、簡単のため、データサンプリング間隔2.8sと180sの結果をそれぞれ結果Ⅰと結果Ⅱと呼ぶ。

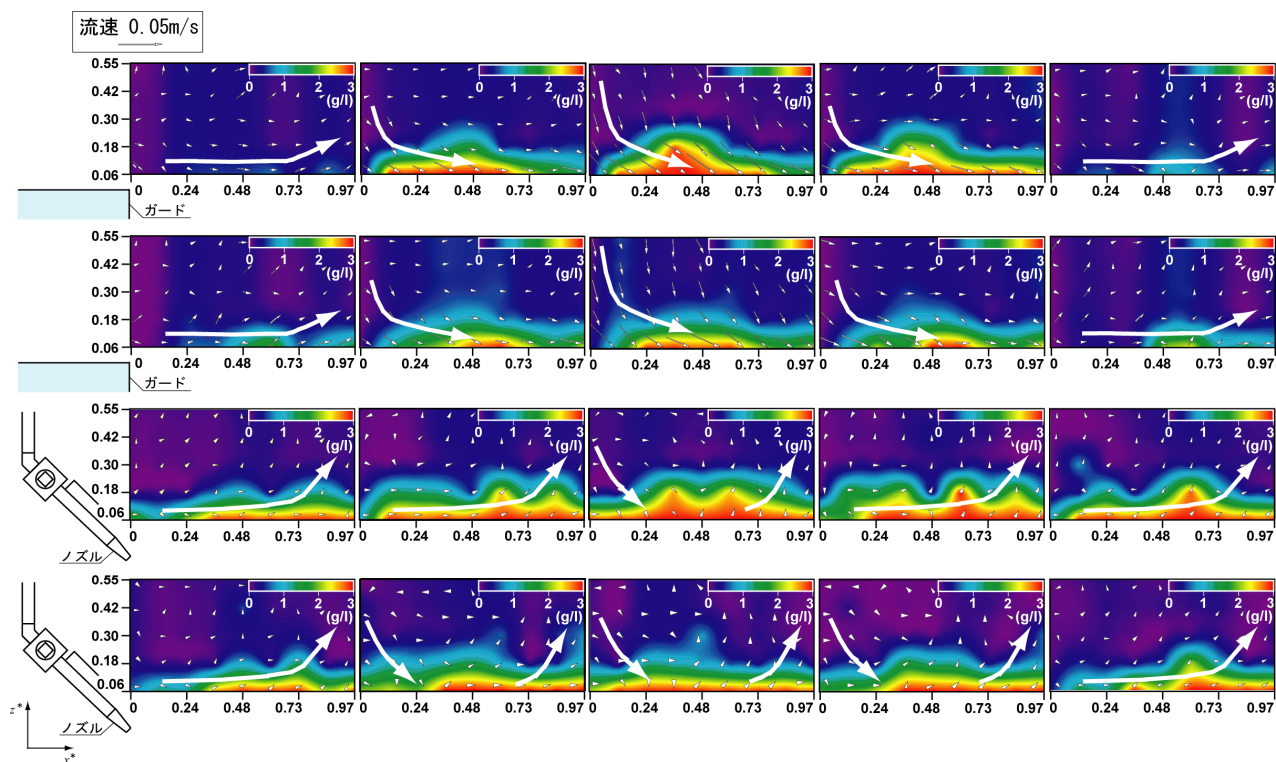


図-9 濁度分布および流速ベクトル（縦断方向）（左から $y^*=0, 0.12, 0.24, 0.36, 0.48$ 断面）
 （1行目：CASE-Aの結果Ⅰ 2行目：CASE-Aの結果Ⅱ 3行目：CASE-Bの結果Ⅰ 4行目：CASE-Bの結果Ⅱ）

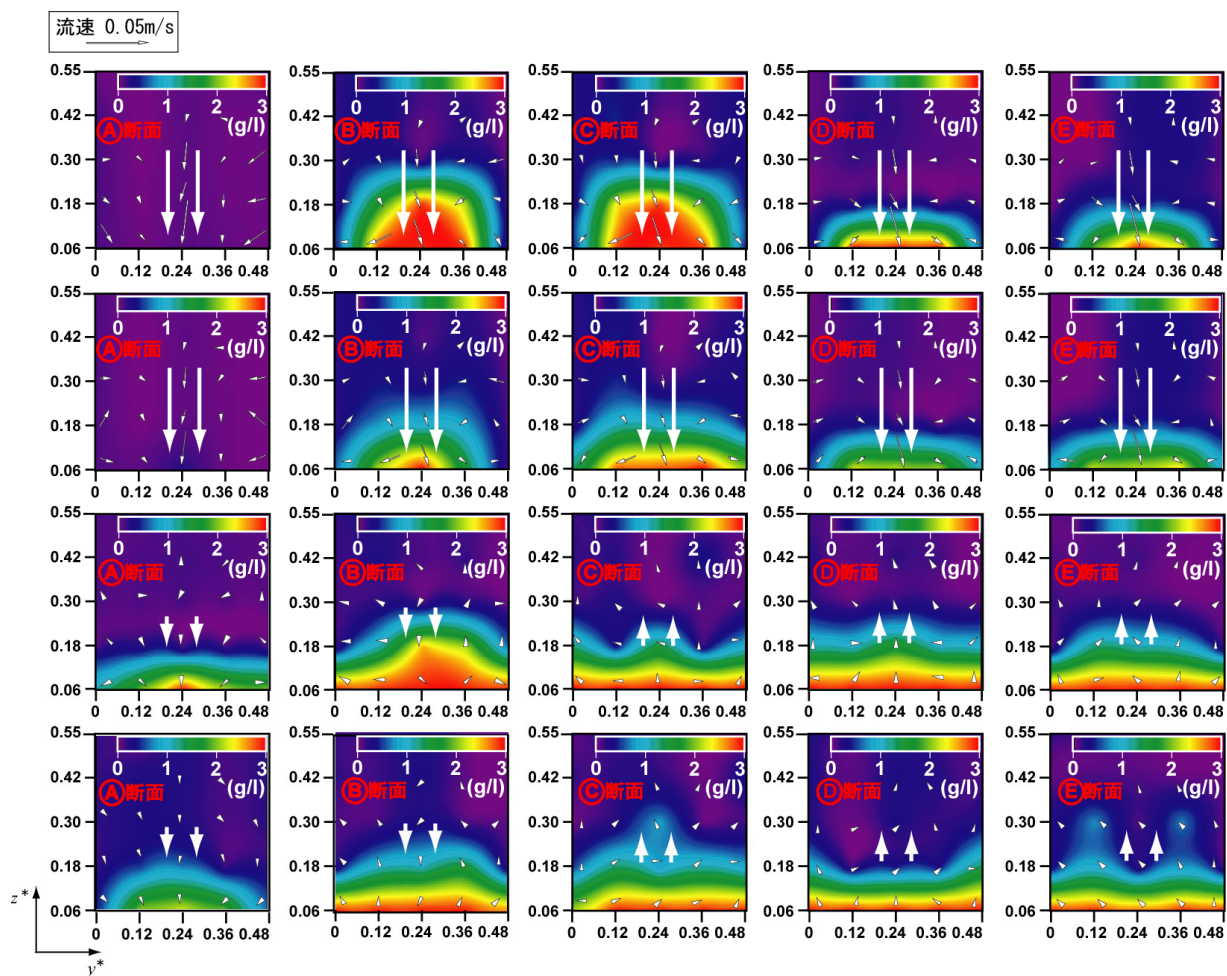


図-10 濁度分布および流速ベクトル（横断方向）（左から $x^*=0, 0.36, 0.48, 0.73, 0.97$ 断面）
 （1行目：CASE-Aの結果Ⅰ 2行目：CASE-Aの結果Ⅱ 3行目：CASE-Bの結果Ⅰ 4行目：CASE-Bの結果Ⅱ）

図-9は、両ケースの縦断方向($y^*=0, 0.12, 0.24, 0.36, 0.48$)の濁度分布と流速ベクトルを示したものである。

CASE-Aでは、結果 I より次のことがわかる。(1)中央付近($y^*=0.12, 0.24, 0.36$)では、ガード下端から強い濁りが発生している。(2) $y^*=0$ および0.48断面まで濁りが達しておらず、横断方向への拡散が抑制されている。(3)中央付近ではガード下端から発生する強い濁りに向かう強い下降流が見られる。

結果IIからは、強い濁りのサイズと濃度がやや小さいものの、速度場は結果 I と同様な傾向が見られる。

CASE-Bでは、結果 I より次のことがわかる。(1)観測結果と同様に、掘削孔から複数の強い濁りが生じている。(2) $y^*=0\sim0.48$ 断面まで強い濁りが達しており横断方向へ濁りが拡散している。(3)水域の流れが複雑に変化しており、水域では掘削孔上端部に向かう弱い下降流と掘削孔下端部では弱い上昇流が見られる。

結果IIからは、強い濁りの発生箇所が明確に特定できず、またその濃度も小さくなっているものの、速度場は結果 I と同様な傾向が見られる。また、弱い上昇流に伴う水域への弱い濁りの拡散が見られる。

図-10は、両ケースの横断方向($x^*=0, 0.36, 0.48, 0.73, 0.97$)の濁度分布と流速ベクトルを示したものである。なお、各横断面は、図-4中の④、⑤、⑥、⑦および⑧断面に対応している。

CASE-Aでは、結果 I より次のことがわかる。(1)ガード下流側で強い濁りが発生しているが、横断方向への拡散が抑制されている。(2)いずれの断面においても掘削孔中央では強い下降流が発生しており、この強い下降流によって強い濁りの上方への拡散が抑制されている。

結果IIからは、強い濁りのサイズと濃度がやや小さくなっているとともに、やや横断方向への拡散が見られるものの、速度場は結果 I と同様な傾向を示している。

CASE-Bでは、(1)濁りが下流側ほど横断方向へ拡散している。(2)掘削孔上流側では弱い下降流が、掘削孔中央部から下端付近では弱い上昇流が見られる。

結果IIからは、強い濁りのサイズがやや小さくなっており、また弱い上昇流に伴う水域への弱い濁りの拡散が見られる。速度場は結果 I と同様な傾向を示している。

結果 I と結果IIを比較すると、次のことが確認される。(1)濁度については、全体的に結果 I は間欠的な強い濁りの発生状況を、結果IIは水域に拡散した定常的な弱い濁りをよく捉えている。(2)速度ベクトルについては、両結果で若干の違いは認められるものの、基本的にほぼ同様な傾向を示している。なお、測定範囲内に拡散しているカオリンの総量は、結果 I ではCASE-AはCASE-Bの約7割、結果IIでは約4割であった。

以上の結果を総合的に考察すると、ガードの有無で次のような違いが生じていると考えられる。

ジェットにガードを設けた場合では、(1)掘削孔がチャンネル化し、ジェット流が下流方向に集中して流動する

ため、掘削効率を高めている。(2)ガードは、そこから流出するジェット流の一部により、掘削孔から発生する強い濁りを底質表面に沿って流送する働きをしているとともに、底質に向う強い下降流を安定的に誘起する働きもあり、この下降流が濁りの拡散を抑制している。これらが、水域への濁りの拡散を抑制するメカニズムである。

一方、ジェット単体の場合では、(1)ジェット流が分散され、掘削効率を低下させている。(2)掘削孔下端部で発生した強い濁りが間欠的にジェット流に巻き込まれるとともに、掘削孔下端部から斜め上方に流出する弱いジェット流によって濁りの拡散が生じている。(3)ノズル近傍での周囲水の連行のため、ノズルに向かう緩やかな流れが誘起されており、これが水域の濁りがノズルの移動に追従する要因となっている。このため、水域の濁りが急速に進行する。(4)実験装置の関係で底質設置幅を超えた横断方向の濁りの拡散は確認できなかったが、図-10で見たように、横断方向への濁りの拡散が顕著であることから平面的に濁りの拡散が進行すると推察される。

5. おわりに

本研究では、ウォータージェットによる濁りの拡散とそれにガードを設置した場合に期待できる濁りの抑制効果について実験的に検討を加えた。その結果、ウォータージェット式埋設機にガードを設けることで、濁りの拡散を抑制できると同時に、掘削効率の向上も図れることが明らかとなった。

謝辞：本研究は沿海開発工業株式会社との共同研究として実施したものである。

参考文献

- 1) Hogg, A.J., Huppert, H.E. and Dade, W.B.: Erosion by planar turbulent wall jet, *J. Fluid Mech.*, Vol.338, pp317-340, 1997.
- 2) 赤司信義, 斉藤 隆: 鉛直もぐり噴流による洗掘深の予測について, 水理講演会論文集, 第28巻, pp.191-196, 1984.
- 3) 石川 誠, 赤司信義, 斉藤 隆: 斜めもぐり噴流による洗掘特性について, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.218-219, 1989.
- 4) Mazurek, K.A., Rajaratnam, N. and Sego, D.C.: Scour of a cohesive soil by submerged plane turbulent wall jets, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.41, No.2, pp195-206, 2003.
- 5) 中野 晋, 大川晃由: 噴流による細砂混合底泥の洗掘限界, 水工学論文集, 第44巻, pp.671-676, 2000.
- 6) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 安藤祐馬, 小野修平: ダム前面に設置したウォールによる流入濁水の排除効果, 水工学論文集, 第51巻, pp.1337-1342, 2007.