

人工湧昇流マウンド基材の投入方法の最適化に関する研究

OPTIMIZATION ON DUMPING METHOD OF CUBIC BLOCKS FOR CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL MOUND

五明美智男¹・志村豊彦²・大野嘉典²・松見吉晴³

Michio GOMYO, Toyohiko SHIMURA, Yoshinori OONO and Yoshiharu Matsumi

¹正会員 博(工) 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター
(〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1丁目3)

²正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター(同上)

³正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科
(〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

The dumping method of cubic blocks is investigated to optimize the construction works for artificial mound for occurrence of upwelling. In this method, four units of blocks are placed in a hopper and split barge, and two diagonal units are dumped in rotation. This paper presents the influence of number of block in a unit on deposition configuration of blocks and refers an acceptable dumping method in actual works.

Key Words : *Dumping method, artificial mound, number of block, deposition configuration*

1. はじめに

我が国周辺には、利用の拡大や今後の開発が期待される海洋資源が少なくない。深層水もその1つであり、例えば海底地形の効果によって局地的な湧昇が生じる伊豆諸島近海において、自然の湧昇流漁場形成の源となる深層水の取水が事業化されている。こうした深層水の取水による多面的な利用は、すでに室戸、富山などで進められてきている。一方、取水ではなく、栄養源の豊富な深層水を人工的に湧昇させて海域の肥沃化を図る試みも取り組み始められている。

著者らは、昨年の本シンポジウムにおいて、大水深域における人工湧昇流の発生を目的としたマウンド築造工事のブロック投入管理システムと長崎県宇久沖(水深85m)での適用結果について報告した(以下、前報¹⁾)。

このうち、ブロックの投入方法については、写真-1、図-1に示すように方形ブロック8個を全開式バージ船倉の両舷にワイヤーを用いて2列4段を1ユニットとして固定し、向かい合った4ユニット合計32個を2回に分けて投入する対角投入を繰り返すも

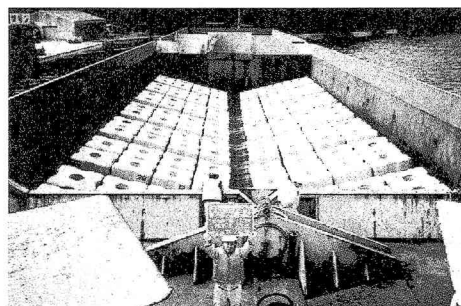


写真-1 ブロック積載状況

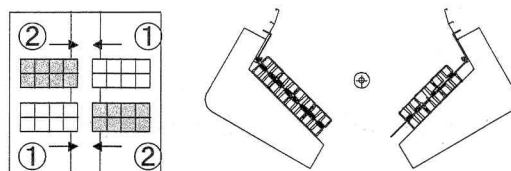


図-1 ブロックの4つのユニットと対角投入方法

のであった。こうした投入方法の採用とともに総合的な施工管理システムの構築によって、図-2に示すように2つの円錐を尾根で結ぶ完成形状のうち円錐の一部を効率よくかつ高い精度で施工することができた。しかしながら、今後は既設のマウンド部分を基準として円錐マウンドの頂部や尾根部分を施工するために、さらなる工夫と改善が要求される。特に、投入方法については、堆積形状との関連性など詳細な検討を必要とする。

こうした背景から、本研究は、対角投入方法における堆積形状決定のメカニズムと1ユニットあたりの投入個数が堆積形状に与える影響を実験的に検討し、対角投入方法の最適化を図ることを目的として実施した。

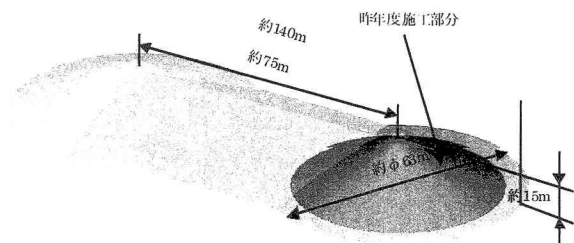


図-2 平成16年度の施工状況

2. 研究方法

水理模型実験は、実工事の縮尺1/40の条件で3シリーズ実施した。

シリーズ1では前報で採用した対角投入方法による堆積形状決定のメカニズム把握を目的として、大型環境水槽（3.5m×3.5m×2.5m）を使用しバージ模型から1辺4cm、比重1.8のブロックを投入した際の堆積形状を計測した。投入条件としては、前報と比較するために、図-1に示す対角4ユニットのうち対角成分の2ユニットを繰り返し16回投入し、その堆積特性を把握することとした。

次にシリーズ2では、1ユニットを構成するブロック段数がブロックの沈降、散らばりに与える影響を調べるために、投入直後から水深40m程度までのブロックの挙動を追跡する投入実験を行った。実験は、幅1m、高さ1.2mの水路の一部を利用して、投入列数を1列と単純化し、投入段数を1段から4段まで順次変化させそれぞれ10回の繰り返し投入を試みた。

シリーズ3では、シリーズ2での考察を助けるために、1ユニットを構成するブロック4段のそれぞれの位置からブロック1個を単体で投入して、その挙動を追跡した。

3. 対角投入時のブロック堆積特性

前報においては、対角投入4ユニットを繰り返し投入した時の堆積形状を計測し、図-3に示すようなブロック堆積中心からの距離とブロックの堆積ポテ

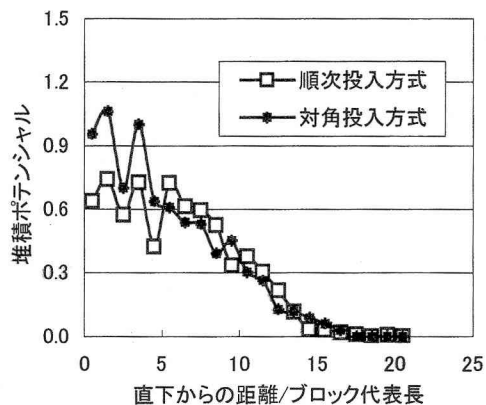


図-3 土砂投入方法と堆積ポテンシャル分布

ンシャルとの関係を求めた。順次投入方式との比較から対角投入方法を選定したが、対角投入方法においては投入点付近でのポテンシャルが高いものの大きな変動が見られ、特に無次元距離2.5付近では極小値が存在していた。ここでは、その原因について実験結果より考察を加えることとする。

図-4は、バージ上の対角成分となる一对の2ユニットを繰り返し投入した際の堆積位置の座標をユニットごとに示したものである。バージの開扉幅12.5cmを考慮すれば、各ユニットはそれぞれ(-5.0, -6.3), (5.0, 6.3)の地点から投入され、(-4.1, 12.4), (5.2, -10.7)を中心に堆積していた。堆積地点と投入地点の座標を比較した場合、x座標がほとんど変化していないのに対して、バージ船底を滑り落ちる際の水平運動量を有することによって、y座標については有意な変化を示していることがわかる。

以上のことから、4つのユニットによる対角投入によって形成される堆積形状は、(x,y)=(±4.7cm, ±11.6cm)の4点を中心とする半径約72cm（図-3より推定）の堆積形状の重ね合わせとして与えられる。したがって、図-3に見られた投入中心付近の堆積形状のばらつきは、重ね合わせの影響によるものと考えられる。また、正規分布の標準偏差と平均値を用いる堆積形状予測^{2), 3)}においては、平均値をゼロとして扱う妥当性が確認されたことになる。標準偏差については各ユニットから投入されたブロックの散らばり状況などと関連するため、後述することとする。

4. ブロックユニットの落下・堆積特性とブロック段数の関連性

上述のように、対角投入時における個々のユニットの堆積形状に注目した場合、その堆積中心は投入中心からずれることが明らかとなった。そこで、シリーズ2の実験結果から、投入後の落下過程におけるブロックの散らばり特性とその支配要因について、ブロック段数の相違に注目して検討する。

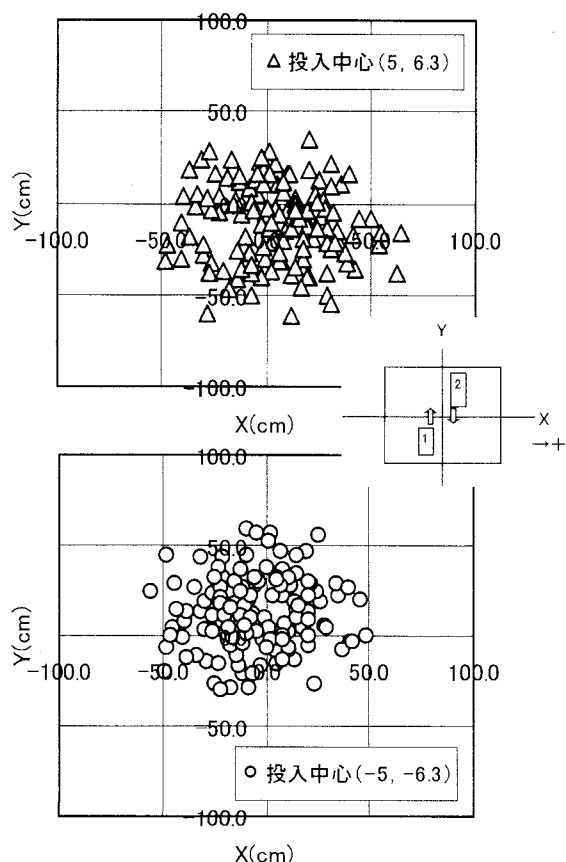


図-4 対角ユニットの各ブロックの堆積座標

(1) 落下軌跡とブロックの沈降速度

図-5は、1列のブロックで構成されるユニットを繰り返し投入した際のブロックの落下軌跡と沈降速度の変化を段数別に示したものである。沈降速度については、実験により求めたブロックの終端速度 $V_0=69.5\text{cm}$ で、また水平距離 X 、深度 Z については、立方体のブロック1辺の長さ D で無次元化して示している。

投入段数が1段の場合、ブロックは鉛直初速度ゼロで水面に突入し、その後徐々に加速しながらやがて等速運動に到達する。その軌跡は、わずかに左右に揺れ動くものの、投入地点の近傍にまとまって堆積する。一方、投入段数が2、3、4段と増加するにつれ、ブロックの堆積中心が投入方向前方に移動するとともに、その散らばりも大きくなっている。段数が増加した場合、1段目のブロックは水の抵抗を最初に受けることから、落下初期には後続のブロックと一体となって運動するものと考えられる。そのため、投入前の全ブロックの位置エネルギーに相当する初速度を群体として持つことになり、ブロックの段数が多いほどバージ底面の角度である 45° の入射角方向への水中落下が持続する。

初期に一体となって水面に突入したブロックは、水面に衝突したときの抵抗力および後続のブロックの作用力によって急激に加速、減速される。そのため、先行するブロックにはBasset項⁴⁾による瞬間的な流体抵抗が働くようになり、段数が多いほど複雑な挙動を示すようになるものと考えられる。Basset項の影響を受けたブロックは、それぞれある角速度

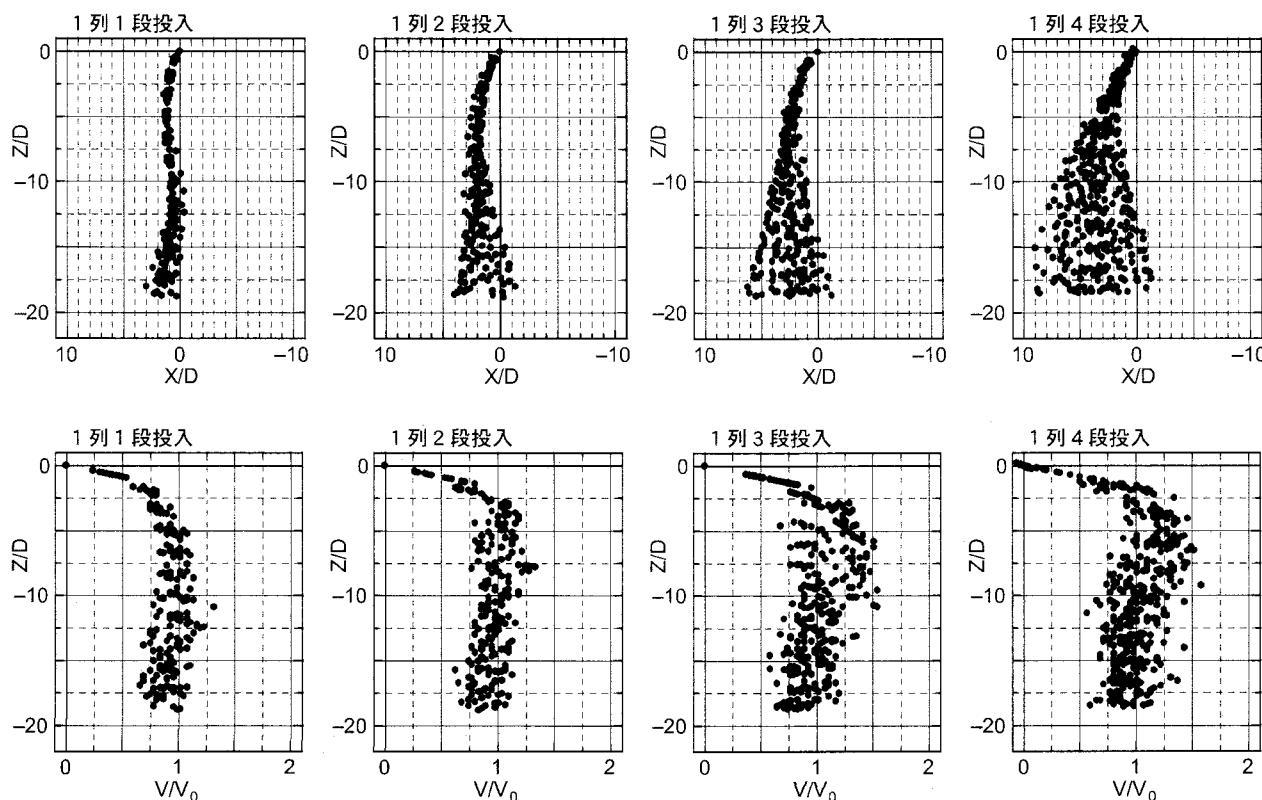


図-5 ブロックの落下軌跡と沈降速度変化

と運動量を持ち、それを初期状態として回転、水平移動をしながら沈降するものと考えられる。

(2)沈降領域の分類

ブロックの投入段数によって生じる沈降速度の鉛直分布比較から、水中のブロック挙動は、①投入段数の違いによってある深度まで群体として突入する沈降する領域（初期沈降領域）、②初期沈降領域で作用したなBasset項の効果によって流体抵抗を受け、ブロックが得た運動量と角速度を初期条件として、それぞれ加速度運動をする領域（加速・減速領域）、そして③分散して単一固体としてほぼ等速で沈降する領域（最終沈降領域）の3つに分類することができる（図-6）。投入段数が大きいほど①から②、②から③への遷移深度が大きくなる傾向がある。

(3)落下時のブロックの散らばり特性

図-5に示したブロックの落下軌跡から、ブロックの散らばり領域として、堆積形状予測に用いる平均値 μ を用いて、① $\mu = \mu_0$ 領域、② $\mu = 0$ 領域に分類することができる（図-6）。その境界は、概ね加速・減速領域内に存在し、Basset項の効果の減少とともに平均値ゼロの領域へ移行するものと考えられる。すなわち、対角投入方法のブロックユニットに見られる堆積中心のずれは、初期沈降領域から加速・減速領域内へ移行する際に発生するもので、ブロック段数と密接に関係している。また、各ユニットで生じる堆積中心のずれは、最終的に堆積形状に生じる分散を規定することとなる。

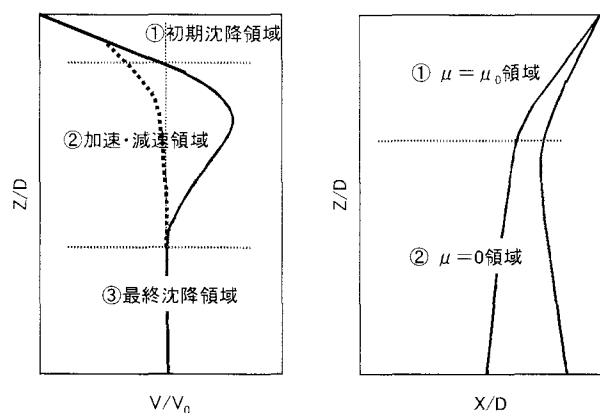


図-6 ブロックの沈降領域、散らばり領域の模式図

5. 初期散らばり領域におけるブロックの落下特性

(1) 初期散らばりと段数、段位置

上述したように、1つのブロックユニットの初期散らばりに対し、ブロックの段数の影響があることがわかった。しかしながら、ブロックの段数がどのようなメカニズムによって影響を与えるのかは不明である。そこで、ユニット内の段位置（1段目～4段目）および段数別にブロックの軌跡を比較してみ

ることにする。

図-7の(d)欄に示した軌跡は、ユニットの各段に1個のブロックを設置し、単体で落下させたときの軌跡を示したものである。初期の影響としては、ブロックの初期位置に規定される位置エネルギーだけである。そのため、初期沈降領域の深さは小さく、この領域内での水平移動も少ない。その結果、深度 $Z/D=20$ 付近での散らばりを見ても、初期の段位置による差は小さい。

一方、同じ図の(a)～(c)欄に示した2段から4段の条件で投入した際の各段ブロックの落下軌跡を見た場合、1段目、2段目の軌跡には段数による大きな違いは見られない。しかしながら、4段投入の際の3段目、4段目のブロックは、他の条件と大きく異なった傾向を示している。特に、4段投入時における3段目のブロックの水平変位と散らばりが大きくなっている。

(2) ブロックの挙動追跡

そこで、同一条件で投入したブロックの挙動を連続写真により分析した。写真-2は、投入直後から $\Delta t=1/15s$ で撮影したブロックの落下状況を示したものである。1段目、2段目のブロックは一体となって水中に突入しているが、後続の3段目のブロックが水中に入る時点から分離し始める。このとき、2段目のブロックの斜め上方からは、3段目と4段目のブロックが一塊になって2段目のブロック上に落下している。上述のように、1段目のブロックは水面への突入後に斜め上方から2段目および3,4段目のブロックによる力を受けている。そのため、急激な加速に伴う水の抵抗力の増加によって、鉛直下方から後方斜め下方へと運動の向きを急激に変えている。2段目のブロックも1段目と同様の挙動を示す。この後、先行するブロックが進行方向からなくなった3,4段目のブロックは、保持している運動量によって前方斜め下方へと落下していく。こうした一連のブロックの挙動によって、4段投入時の3段目のブロックの顕著な散らばりが発生している。しかしながら、3段投入における3段目のブロックについては、上方からの後続するブロックがないため、4段投入時の3段目ブロックほどの散らばりは発生していない。

6. 投入方法の最適化

前報でも述べたように、今回の施工は土運船を使用している。そのため、船槽の大きさなどの制約がない場合には、1航海あたりの効率をあげるために1ユニットの個数を極力多くしたいところである。しかしながら、上述したように、投入段数によってブロックの初期散らばりに差がでることから、要求される施工精度を考慮して段数を決める必要がある。例えば、昨年度施工したような円錐形の山の下部を施工するような場合には、投入面積も大きくなるこ

とから、実績のある4段での投入が可能である。しかしながら、図-2に示したような円錐型の山の峰やその間の尾根を施工しようとする場合には、散らばりの少ない3段投入を用いることが推奨される。

また、図-5でも示したように、段数を小さくすればよりブロックの散らばりを小さくすることが期待できるが、投入回数の増大によって、コストや工程に直接的な影響を与える。そのため、土運船を用いた投入においては、1ユニット3段ないし4段の対角投入を選択することが望ましい。このとき、いずれにおいても堆積予測計算における平均値はゼロを用い、標準偏差については段数の減少によって小さくなる。その数値については、実績値を基本に測量結果をもとに適宜補正して使用することとなる。

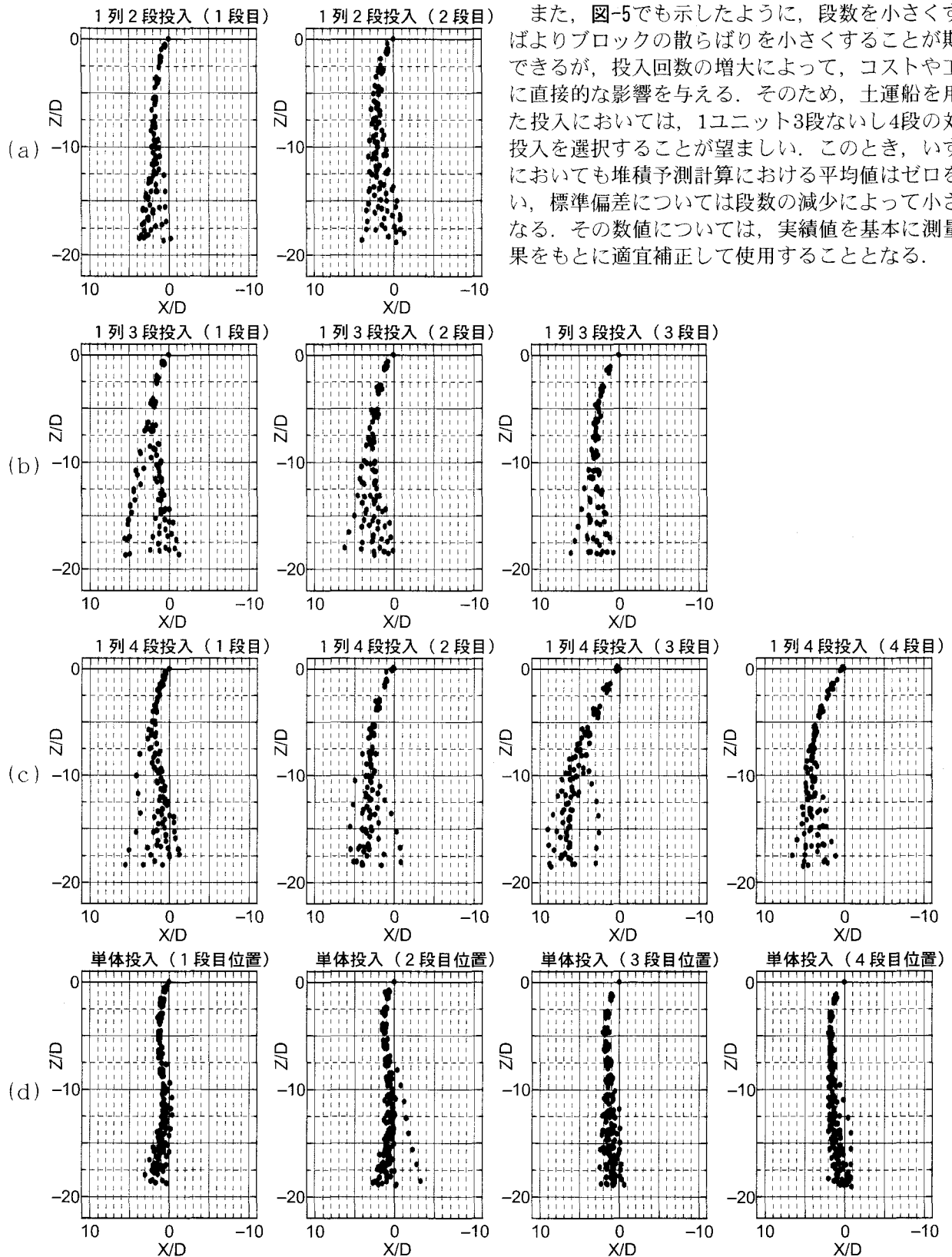


図-7 ユニット各段のブロックの落下軌跡比較

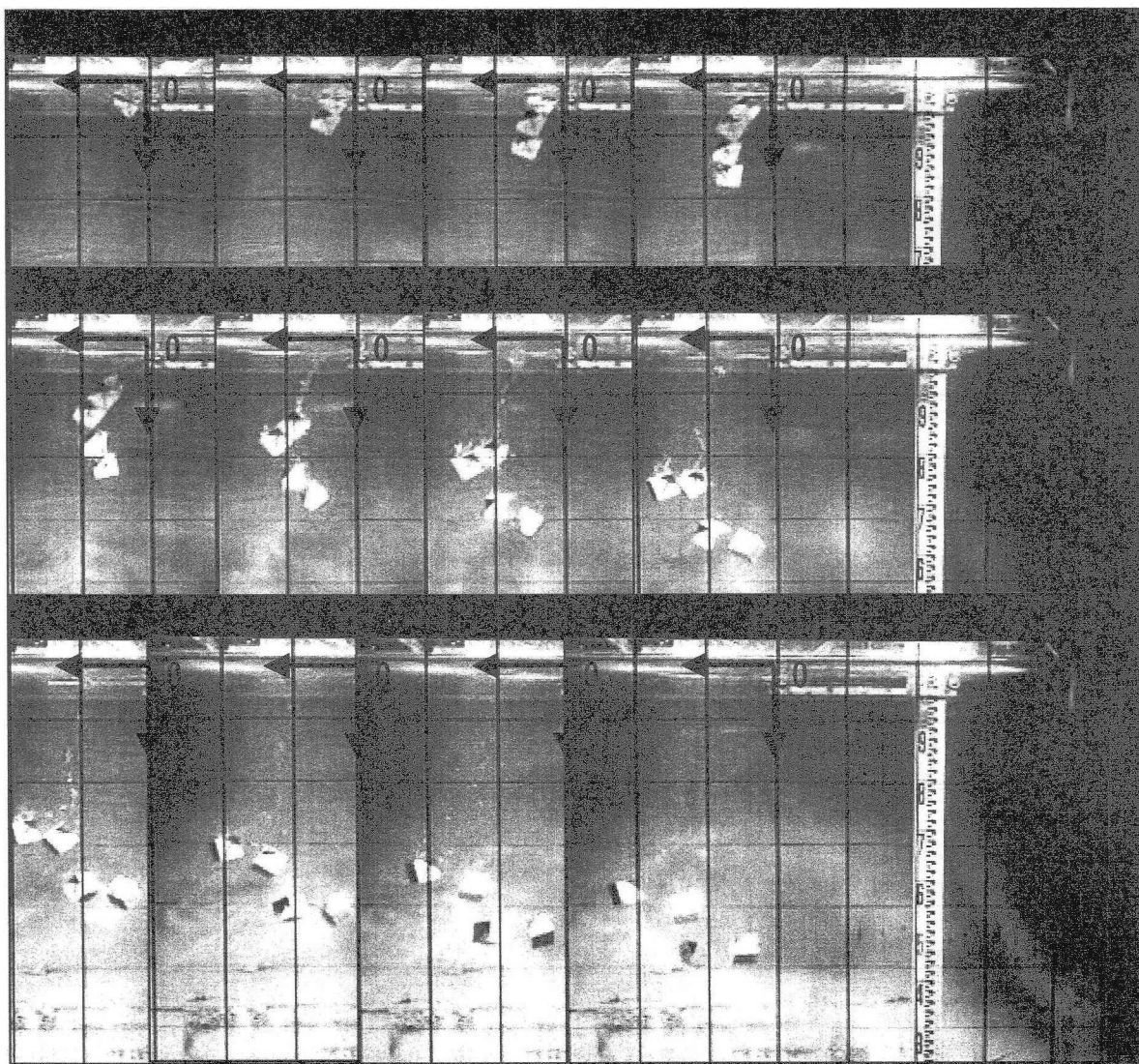


写真-2 1列4段投入時のブロック挙動の連続写真

7. おわりに

昨年度の工事の実績をふまえ、今後要求される施工精度などを考慮して、投入方法特に対角投入時のブロック段数について水理実験により考察した。堆積形状に与える投入段数の影響として、初期沈降領域における散らばりによって堆積形状予測における標準偏差が変わることを明らかにした。さらに、得られた成果から適切な投入段数について言及した。

謝辞

研究の実施にあたり、施工機会をいただいた長崎県水産部漁港漁場整備課ならびに技術的なご助言をいただいた(社)水産土木建設技術センターに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大野嘉典・五明美智男・浅沼丈夫・川口毅・平田賢治：人工湧昇流マウンド造成のためのブロック投入管理，海洋開発論文集，pp.935-940，2004.
- 2) 矢内栄二，太田正規，松見吉晴：確率モデルを用いた土砂堆積形状予測計算におけるパラメータ設定法，土木学会年次学術講演会講演概要集，第2部，第53巻，pp168-169，1997.
- 3) 松見吉晴，岸口孝文：捨石マウンド築造時のバージ船の配置位置について，海岸工学論文集，第37巻，pp769-773，1990.
- 4) Hinze, J.O.: Turbulence, McGraw-Hill, pp.353-361, 1959.