

ブロック直投方式を用いた人工海底山脈築造に関する ブロックの落下挙動および拡散特性に関する研究

熊谷隆宏* ・山本省吾** ・平山達也***
真鍋 匠*** ・清水英久*** ・川口 毅****
平田賢治***** ・小宮一成*** ・小林一美***

バージからの直投方式で人工海底山脈を築造する工事において、投入したブロックは、投入直後から着底までの落下の過程で海中の流れの影響を受けるため、流れによるブロックの移動を考慮したバージの位置決定が必要である。ブロックの落下挙動解析モデルと、堆積形状解析モデルを投入位置管理システムに導入することにより、大水深条件下における微速航行しながらの高精度投入を可能にした。施工管理の中で実施された深浅測量結果を用いて、解析モデルの妥当性の検証を行った。また、現地適用性を検証した解析モデルを用いて、潮流作用下におけるブロックの移動特性と、投入段階と投入方法に着目した堆積・拡散特性を明らかにした。

1. はじめに

近年、沿岸海域の基礎生産力を増大させることを目的として、人工湧昇流発生構造物や人工海中林等の設置による漁場造成事業が積極的に推進されている。

捨石またはブロックを海底に積み上げて築造する「人工海底山脈」は、大水深域における代表的な人工湧昇流発生構造物の1つである。人工海底山脈を築造する場合、一般に、起重機船による据付方式や土運船からの直投方式による施工方法が考えられる。このとき、海象・気象条件および施工条件等により、後者の直投方式がコスト面で有利となる場合がある。ただし、直投方式を採用する場合には、投入した材料の潮流による移動、および落下過程における拡散特性を予測および把握しながら施工を進めることが重要であると考えられる。

本研究では、土運船からのブロック直投方式を用いた人工海底山脈築造工事に、潮流作用時におけるブロックの落下挙動を解析する数値モデルと、松見・岸口 (1990) の手法に基づく海底面における堆積形状を解析するモデルを導入し、ブロックの投入位置管理を実施した。

投入後の測深結果と、ブロック落下時の水中撮影結果を用いて、解析モデルの妥当性を検証するとともに、潮流作用時におけるブロックの落下・移動特性、および落下過程における拡散特性を明らかにした。

2. 人工山脈築造工事およびブロック投入位置管理手法概要

2003年11月から翌年1月にかけて、長崎県対馬東沖約11km、水深約90m地点の海域 (図-1) において、人工海底山脈築造工事を行った。本工事は、海底山脈の一部となる高さ12.5m、底面直径63.2mの円錐上の山

を1.6m角 (6ton) の立方体形状に近い石灰灰硬化体ブロック (アッシュクリートブロック) 1,954個で築造するものである。本工事では、全開式土運船 (800m³) を用いた直投方式を施工法として採用するとともに、使用する船舶の積載容量を考慮し、1回あたりのブロック投入個数を70個に設定し、28回に分けて投入した。また、施工における制約条件を考慮し、1.5~3.5knotで微速航行しながらのブロック投入方式を採用した。

投入したブロックは、投入直後から着底までの落下の過程で海中の流れの影響を受けるため、流れによるブロックの移動を考慮したバージ位置決定が必要であることが指摘されている。(黒台ら, 1998; 斉藤ら, 2000)。

本施工では、①潮流等の影響下におけるブロックの落下挙動を解析するモデルと、②ブロック群の着底時の積み上がり形状を解析するモデルを投入位置管理システムに導入した。これにより、底面円外に着底するロス率を極力小さくさせると同時に、自由落下によってブロック群が積上がる高さを極力高くすることを目標とした施工管理を行った。

以下に、落下挙動解析および積み上がり (堆積) 形状解析手法の概要をそれぞれ示す。

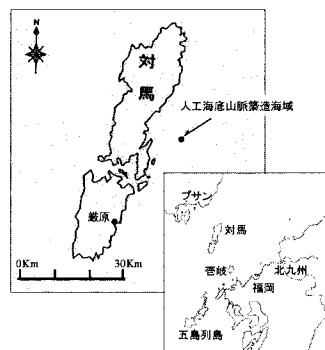


図-1 人工海底山脈築造地点

* 正会員 Ph.D. 五洋建設(株)
** 正会員 工修 五洋建設(株)
*** 五洋建設(株)
**** 正会員 工修 (社)水産土木建設技術センター
***** 長崎県庁

(1) 落下挙動解析

式(1)に、流体内を運動する物体の運動方程式を示す。この方程式に基づいて、ブロックの運動を解析することにより、投入後のブロックの着底までに生じる水平移動距離を予測することができる。

$$(M + \rho_w k_m V) d\vec{v}_b/dt = \frac{1}{2} \rho_w C_D A (\vec{v}_w - \vec{v}_b) |\vec{v}_w - \vec{v}_b| + (M - \rho_w V) \vec{g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M :ブロック質量、 ρ_w :流体密度、 k_m :付加質量係数、 V :ブロックの体積、 A :ブロックの投影面積、 $\vec{v}_w$:流速ベクトル、 $\vec{v}_b$:ブロック移動速度ベクトル、 $\vec{g}$:重力ベクトル、 C_D :抗力係数である。

また、ブロックの投入位置管理を実施するための落下挙動解析の解析フローを図-2に示す。すなわち、以下の手順で、ブロックの投入位置を決定することができる。

- ① 基本条件の設定として、気象・海象条件の影響を受けないデータを事前に入力する。
- ② ブロックの投入に際して、投入の直前に、超音波ドップラー流速プロファイラー (ADCP) を用いて、山脈築造海域の鉛直各層の流向・流速を観測する。
- ③ 計測された潮流データ、来襲波浪の波向、風向を考慮して、投入船の進入角度を決定する。
- ④ 計測された深度別の流向・流速データ、船の航行

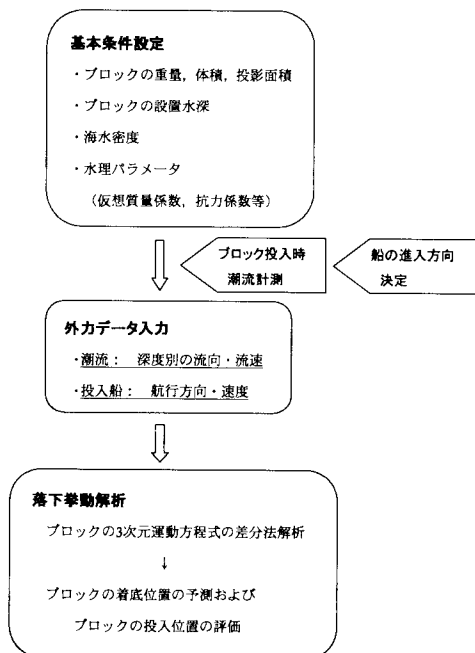


図-2 落下挙動解析フロー

方向・速度を入力し、式(1)に基づく数値解析により、ブロックの移動距離を解析するとともに、目標位置に着底させるための投入位置を決定する。

図-3に、実際の投入に際して行われた流速の計測結果例を示す。計測は、2003年11月29日9:30の上げ潮時に行われた。このときの表層部の流速は、0.45 m/s、流向はSWであり、また、全層の平均では、流速は、0.40 m/s、流向はSSWであった。得られた表層流データ、および風向、波向を考慮し、投入船の進行方向をNNE、進行速度を1.5 knotに設定した。これらのデータに基づき、実施したブロック落下挙動解析結果を図-4に示す。このとき、ブロック投入位置と目標着底位置の水平距離は、4 mである。なお、投入は、流速測定の前30分後に実施された。

(2) 堆積形状解析

本研究では、松見・岸口(1990)の手法に基づく海底面における堆積形状を解析するモデルを導入した。本手法は、投入したブロックの深度方向の解析対象区間における水平方向の移動距離に関する分布に対して、式(2)、(3)で示す正規確率分布を仮定するものである。

$$f(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma^*)} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x^*/\sigma^*)^2\right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$f(y^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma^*)} \exp\left\{-\frac{1}{2}(y^*/\sigma^*)^2\right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 f :確率密度関数、 σ^* は、 $\sigma^* = (\sigma x_m + \sigma y_m)/2$ で示す無次元標準偏差、 $x^* = x/d$ 、 $y^* = y/d$ 、 d :代表径(ブロックの辺長)である。

また、ブロックの投入位置管理を実施するための堆積形状解析の解析フローを図-5に示す。つまり、以下の手順で、ブロックの目標着底位置を決定することができる。

- ① 基本条件の設定として、気象・海象条件の影響を受けないデータを事前に入力する。

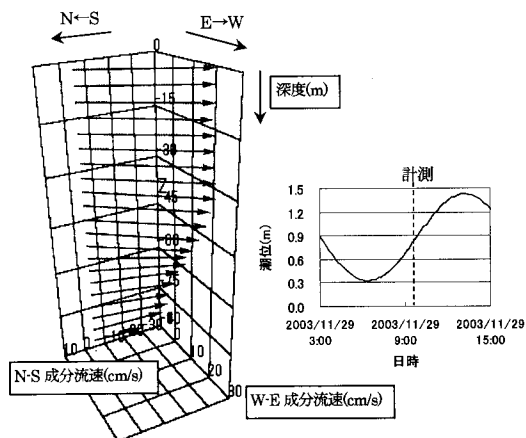


図-3 流速計測結果例 (2003/11/29 9:30)

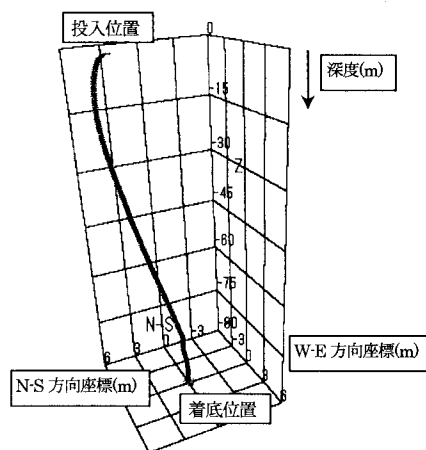


図-4 ブロック落下挙動解析結果例

- ② 新たに投入するブロックの着底位置（ブロック群の中心点）を仮設定する．ブロック投入前の測深データに対し，新たにブロックを投入した時の積み上がり形状を解析する．
- ③ 最適な積み上がり形状が得られると予測される着底位置を新たな投入のための目標着底位置に設定する．

以上の手順によって得られる目標着底位置に，精度良く着底できるよう落下挙動解析を行い，投入位置管理を実施した．

3. ブロック投入位置解析モデルの検証および適用

本章では，実測値を用いて，前述した2つの解析モデル，落下挙動解析モデルと堆積形状解析モデルの妥当性

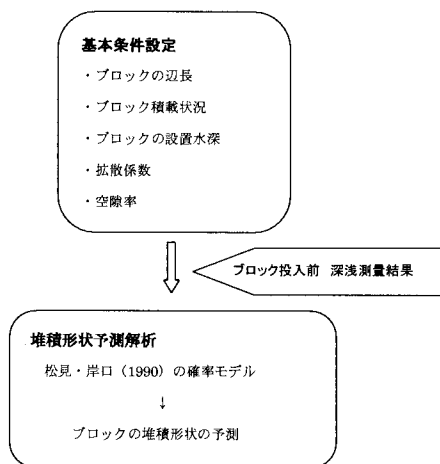
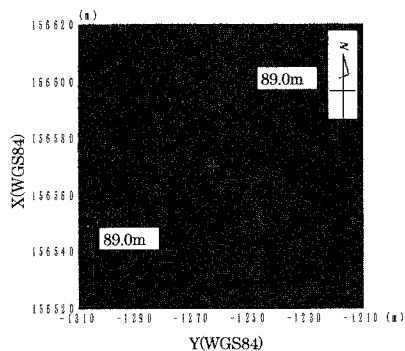


図-5 堆積形状解析フロー

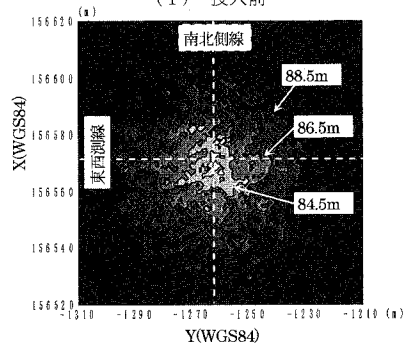
の検証を行う．

前述したように，本工事では，28回に分けて，ブロックの投入を行った．投入前，投入中間段階（第14回投入後），投入完了時（第28回投入後）の各段階におけるナローマルチビームソナー（SEABAT 8125）を用いた深浅測量結果を図-6に示す．また，計画中心点を通る南北，東西の各側線における積み上がり形状を図-7～8に示す．

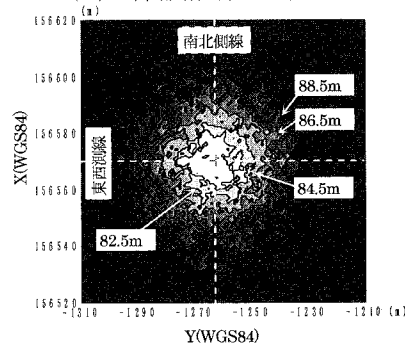
中間段階，完了時とともに，ほぼ計画中心点を頂とした山が築造されていることを確認することができると同時に，ブロックの落下挙動解析モデルを用いて投入位置を決定する手法が妥当であることがわかる．船の航行と潮



(1) 投入前



(2) 中間段階（第14回投入後）



(3) 投入完了時（第28回投入後）

図-6 深浅測量結果

流の影響を同時に考慮に入れたブロックの落下挙動解析モデルの精度が検証された。

また、鉛直断面で様な水平流速が発生している場において、流速とブロックの水平移動距離の関係を解析した結果を図-9に示す。ここでは、船速をゼロ、水深を90mに設定した。この結果より、流速が有意となる条件では、流速と水平移動距離の関係は、次式に示す線形の関係で表されることが分かった。

$$L = 16.4v - 0.24 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 L : 水平移動距離 (m), v : 流速 (m/s) である。

次に、堆積形状解析モデルの検証を行う。堆積形状解析モデルを適用するにあたり、空隙率および標準偏差(拡散係数)を入力値として設定する必要がある。空隙率については、深浅測量結果と投入したブロックの個数の関係より求められる値(中間段階: $n=0.39$, 投入完了段階: $n=0.48$)を用いた。また、投入したブロックの拡散

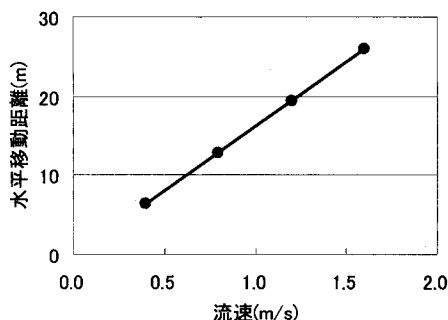
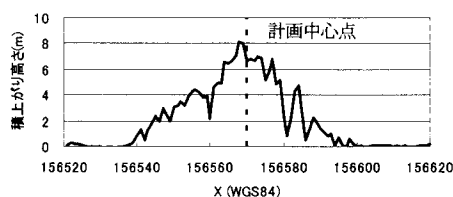


図-9 流速とブロックの水平移動距離の関係

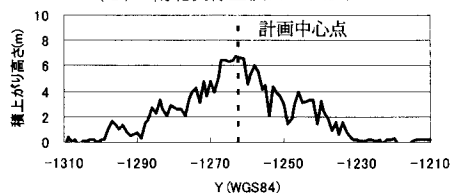
性を表す指標となる標準偏差については、中間段階では、 $\sigma^*=2.5$, 投入完了段階では、 $\sigma^*=3.0$ を与えて、堆積形状の解析を行った。計画中心点からの距離を用いてブロックの積み上がり高さを整理し、図-10に、実測値と解析結果の比較を示す。ここで、実測値は、南北、東西の各測線における積み上がり形状を平均したものを用いた。

この結果より、堆積形状解析モデルを用いて、実際の堆積状況を精度良く再現することができることが分かる。また、標準偏差の値に着目すると、中間段階に比べて、投入完了時の方が大きく、ブロックの拡散性が高いことが評価されている。これは、山の頂部の高さが高くなるにしたがって、新たに投入されるブロックは、斜面の影響を受け、頂部に積み上がりにくくなるためと考えられる。なお、投入した立方体形状のブロックは、投入の初期段階では、層積み状態となって密に堆積する傾向にあると考えられ、早い投入段階では、その影響を受けて、空隙率が小さくなる傾向になると考えられる。

また、堆積形状解析モデルを用いて、各ブロック存在

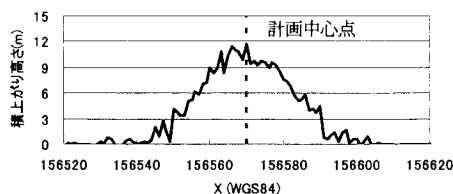


(1) 南北測線上積み上がり形状



(2) 東西測線上積み上がり形状

図-7 ブロック積み上がり形状 (中間段階)

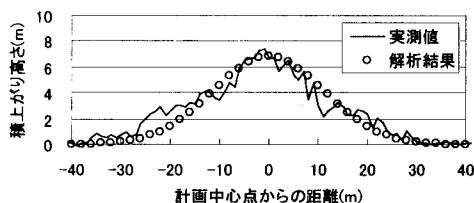


(1) 南北測線上積み上がり形状

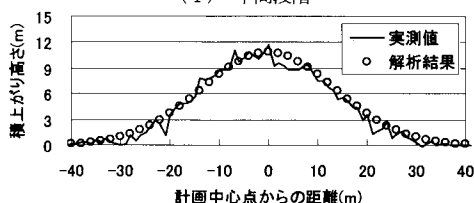


(2) 東西測線上積み上がり形状

図-8 ブロック積み上がり形状 (投入完了時)



(1) 中間段階



(2) 投入完了時

図-10 堆積形状解析モデルの適用性の検証

表-1 有効径および斜面勾配の評価

ブロック存在率	中間段階		投入完了時	
	有効径	斜面勾配	有効径	斜面勾配
30%	6.7 m	1/6.7	8.5 m	1/3.6
50%	13.3 m	1/3.3	16.3 m	1/2.4
70%	21.5 m	1/2.7	26.2 m	1/2.1
90%	35.3 m	1/3.4	42.7 m	1/2.7
99%	56.2 m	1/16.7	67.7 m	1/10.0

率に対応する有効径および斜面勾配を評価した(表-1)。ここで、ブロック存在率は、(有効径内に着底したブロック個数)/(投入した全ブロック個数)で定義し、斜面勾配は、その位置の接線の勾配で定義した。この結果、途中段階に比べて、投入完了時では、有効径が大きくなる(水平拡散性が強くなる)傾向となることがわかる。ただし、有効径が増大する傾向(拡散性)に比べ、山が積み上がる傾向(堆積性)の方が強いいため、投入完了時の方が、斜面勾配が大きくなっていると考えられる。

形成された山を円錐形状とみなし、山頂部の高さを一致させた条件で体積が等価となるように、勾配および底面幅を評価した結果を表-2に示す。投入完了時では、等価勾配が大幅に増加している一方、等価底面幅については、顕著な変化にはなっていない。また、解析によって、等価勾配および拡散幅を評価できることが確認された。

また、投入中間段階において、水中音響映像装置(エコスコープ1600B)による落下ブロック群の挙動調査を行った結果、落下途中の35 m水深地点において、ブロックの存在率が90%程度の有効径は24 mであった。一方、堆積形状解析モデルを用いて、対応する地点の拡散幅を解析した結果(図-11)、ブロックの存在率90%に対応する有効径は、26 mと算定された。観測値と解析結果はほぼ一致し、解析モデルによって、着底後の堆積形状だけでなく、落下途中段階の拡散性についても精度良く評価できることがわかった。

さらに、この解析モデルを用いて、ブロックの積載・投入条件の違いによる堆積特性の違いを評価する。解析条件を表-3に示す。図-12の解析結果に示すように、船倉を小区画に分割し、区画毎に分割投入することにより、積み上がり高さが高くなる傾向になることが分かる。

4. 結 語

本施工では、①潮流等の影響下におけるブロックの落下挙動を解析するモデルと、②ブロック群の着底時の積み上がり形状を解析するモデルをブロック投入位置管理システムに導入した。その結果、大水深条件下における微速航行しながらの高精度投入を可能にした。

表-2 等価勾配および等価底面幅算定結果

	中間段階		投入完了時	
	勾配	底面幅	勾配	底面幅
実測	1/4.5	61.7 m	1/2.9	62.0 m
解析	1/4.1	55.5 m	1/3.1	66.6 m

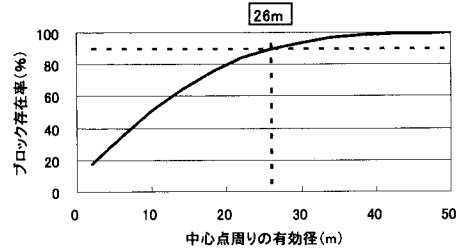


図-11 深さ35 m地点におけるブロック拡散解析結果

表-3 ブロック堆積特性解析における解析条件

土運船	800 m ³ (全開式)
投入条件	船倉を4区画に分け、分割投入 (CASE 1)
	船倉を区画分けせずに、全開投入 (CASE 2)
投入ブロック数	1,954 個

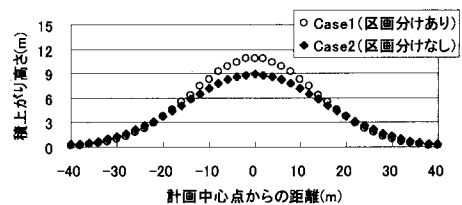


図-12 積載・投入条件の違いによる堆積特性の違い

現地測量結果を用いて、各解析モデルの妥当性を検証することができたと同時に、解析モデルを適用することにより、ブロックの潮流作用時における移動特性、および投入段階や投入方法の違いに着目した堆積・拡散特性を明らかにした。

参 考 文 献

- 松見吉晴・岸口孝文 (1990): 捨石マウンド築造時のバージ船の配線位置について, 海岸工学論文集, 37 巻, pp. 769-773.
- 黒台昌弘・沖 政和・鈴木達雄, 木下正生 (1998): GPS を用いた人工海底山脈建設工事の施工管理について, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第6部, 53 巻, pp. 672-673.
- 斉藤栄一・鈴木達雄・高橋正征・熊谷幸典・友田啓二郎 (2000): マウンド漁場造成工事の例とその効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集第6部, 55 巻, pp. 470-471.