

大水深強潮流下における薄層捨石基礎の 高精度施工

HIGH-ACCURACY CONSTRUCTION OF THE RUBBLE FOUNDATION UNDER LARGE DEPTH AND STRONG CURRENT

本田隆英¹・織田幸伸²・上野成三¹・八重田義博³・伊藤一教⁴
Takahide HONDA, Yukinobu ODA, Seizo UENO, Yoshihiro YAEDA and Kazunori ITO

¹正会員 博(工) 大成建設(株)技術センター(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 工修 大成建設(株)技術センター

³フェロー 工博 大成建設(株)土木本部(〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1)

⁴正会員 博(工) 大成建設(株)ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事

The rubble foundation for the immersed tunnel under construction in the Bosphorus strait is build by using the tremie pipe and the grader equipment due to the large depth and strong currents in the strait. The rubble-dumping simulator to predict the height distribution of dumped rubble was developed in order to obtain the optimum rubble volume and positions for dumping. In the simulator, the dumped rubble distribution is estimated by two parameters, the dispersion coefficient and the angle of repose of the rubble.

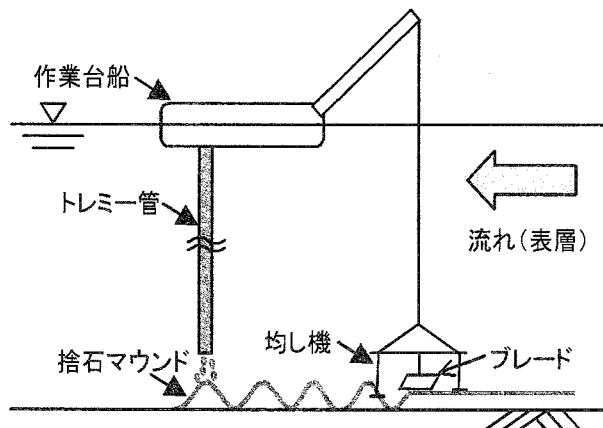
The field test for building the rubble foundation was performed at the construction site. The two parameters of the rubble were examined from the test. Then it was confirmed that the dumped rubble distribution was simulated well by the simulator. And it's succeeded to build the accurate rubble foundation under the sever sea state by the construction technique using the tremie pipe and the grader equipment.

Key Words : Bosphorus Strait, immersed tunnel, foundation, rubble, dispersion, angle of repose

1. はじめに

現在, トルコのボスポラス海峡において沈埋トンネルを施工中であり, トンネルは捨石基礎により支持される. ボスポラス海峡は長さ約 30km の海峡で, 淡水系の表層流と塩水系の底層流による二層流になっており, しかも流況が非常に変わりやすい. 安全かつ確実な施工を行うため, 流況観測や流況予報

システムの構築が進められてきた^{1), 2), 3), 4)}. 本工事では, 最大 60m の大水深, 表層流速が 4kt を超える強流の下で, 平均厚 80cm の薄層捨石基礎を平坦に精度良く築造することが求められる. そこで, トレミー管を用いて海底面に捨石を投入した後ブレード型捨石均し機(以下, 均し機)により捨石マウンドの均し作業を行い, 大水深強流下においても薄層捨石基礎を確実に高精度で築造する施工方法を考案



施工手順

- ①初期地形の計測
- ②投入シミュレーションより最適投入条件(投入位置, 投入間隔, 投入量)を決定
- ③作業台船からトレミー管を用いて捨石を投入
- ④均し機を沈設し, 捨石マウンドを目標高に均す
- ⑤出来高の計測・確認

図-1 薄層捨石基礎の高精度施工方法

した(図-1)。

一般に、水中捨石基礎は底開バージ船を用いて築造されることが多く、底開バージ船から投入された捨石の堆積形状を予測して効率的に投入管理を行う手法がこれまでに報告されている^{5), 6), 7)}。捨石堆積形状の予測には、松見・岸口⁸⁾の正規分布確率モデルや小田ら⁹⁾の3次元拡散理論などが提案されている。

本工事においては、トレミー管により投入された捨石マウンドの高低差は均し機ブレードの設置範囲内である必要があることから、筆者ら¹⁰⁾はトレミー管に対しても捨石投入管理が可能な捨石投入シミュレーションシステム(以下、投入シミュレーション)をこれまでに開発した。このとき、捨石の分散係数や水中安息角は一意に与えていたが、これらが実規模の現地条件に適合するかどうかは不明確である。そこで、図-1に示した施工方法で捨石基礎築造の現地試験施工を実施し、実規模レベルで捨石の分散係数および水中安息角を計測した後、試験施工結果を利用して投入シミュレーションの再現性および適用性を検討する。同時に、試験施工による薄層捨石基礎の築造精度を確認し、同施工が本工事に有効であるかどうかを検討する。

2. 投入シミュレーション

(1) 投入シミュレーションの概要

トレミー管から投入された捨石は、ある分散 σ をもって海底面に着底し、その堆積分布は松見・岸口⁸⁾の正規分布に従うとした。捨石の堆積形状が急峻となり水中安息角 θ_c を超えると、捨石は転がり落ち、さらに広範囲に広がる。本シミュレーションでは、上記の捨石落下時の分散による拡がりと着底後の転石による拡がりを、捨石の分散係数 σ および水中安息角 θ_c の2つのパラメータを用いて各々モデル化されている(図-2)。

(2) 投入時の分散モデル

断面分布に対する捨石落下時の分散の確率密度関数は、投入点からの水平距離を x 、捨石の分散係数を σ として、次式で表される。

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

x - y 平面において、分散係数 σ が x 、 y 方向に同じとすると、平面分布に対する確率密度関数は $f(x)$ 、 $f(y)$ の結合確率として以下のように示される。

$$f(R) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{R}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (2)$$

ここで、 R : 投入点からの水平距離 ($= (x^2 + y^2)^{0.5}$)、である。

トレミー管口での投入捨石分布は断面一様分布と

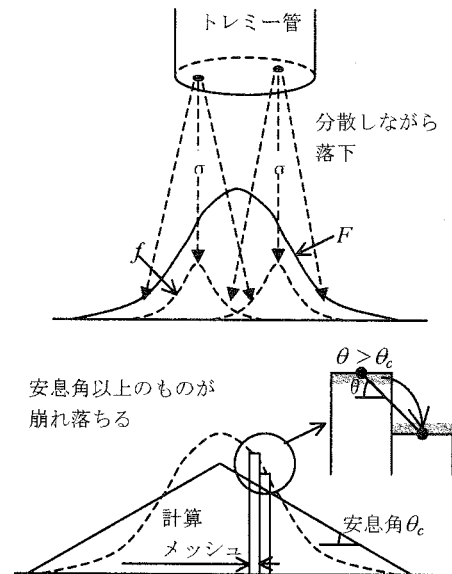


図-2 捨石投入シミュレーションにおける捨石の分散と転石による拡がりのモデル化

仮定した。トレミー管断面を極座標メッシュに分割し、メッシュごとに式(2)から算出した確率密度を海底面で重ね合わせることで、トレミー管断面全体から投入された捨石の堆積形状を得ることができる。トレミー管中心からある海底面位置 (x, y) までの水平距離を R とし、トレミー管断面積を A 、捨石投入量を V とすると、同位置 (x, y) における確率密度関数 $F(x, y)$ 、捨石堆積厚 Δz は最終的に次のように表される。

$$F(x, y) = \sum_{\theta} \sum_{r} \frac{\Delta r \Delta \theta}{A} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta}{\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

$$\Delta z(x, y) = V \cdot F(x, y) \quad (4)$$

(3) 分散係数の推定

松見・岸口⁸⁾は、室内実験にて水中を落下する捨石の水平移動距離を計測し、捨石の分散係数 σ を求めた。ただし、同計測では捨石の落下距離が一定であったことから、任意の落下距離 l に対する分散係数 σ を以下のように算出した。

今、 x 軸方向の捨石分散について、捨石の落下を図-3に示すように2段階に分け、それぞれの落下に対する分散係数を σ と仮定する。第1段階の落下で捨石が x_1 だけ水平移動する確率密度関数は式(1)を参考に $f(x_1)$ となる。第2段階の落下で捨石が x_2 だけ水平移動し、最終的に捨石の水平移動距離が X となる確率密度関数 $f(X)$ は、 $f(x_1)$ と $f(x_2)$ の結合確率となる。 $f(X)$ を X について $(-\infty, \infty)$ で積分すると、次式が得られる。

$$f(X) = \frac{1}{2\pi(\sqrt{2}\sigma)^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right\} \quad (5)$$

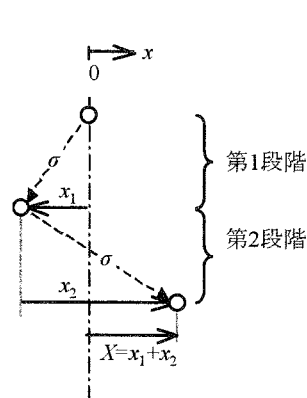


図-3 分散をとまなう捨石の落下

式(1)と比較すると、分散係数 σ は落下距離の1/2乗に比例することが分かり、以下の関係式が得られる。

$$\sigma/d = \alpha\sqrt{l/d} \quad (6)$$

ここで、 d : 捨石粒径、 α : 係数である。松見・岸口⁸⁾の実験結果として、 $l/d=7.1$ 、 $\sigma/d=1.38$ を上式に代入すると $\alpha=0.518$ を得る。

(4) 安息角による転石モデル

正規分布確率モデルにより算出した捨石堆積形状は、急峻で非現実的な形状となることがあるため、捨石の水中安息角 θ_0 を用いて転石処理を行った。具体的には、捨石堆積高について、あるメッシュと8方向の隣接するメッシュの局所勾配 θ を考え、これが安息角を超えた場合に、粒径程度の厚さの捨石量を局所勾配がもっとも大きな方向のメッシュに移動させた(図-2 参照)。この操作を、すべてのメッシュの局所勾配が安息角以下になるまで繰り返した。

3. 現地試験施工の概要

(1) 施工条件

捨石基礎築造の現地試験施工は函体の沈設が予定されているトレンチ(幅 87.3m、深さ 14.2m、トレンチ内水深 43m)の中で実施し、試験施工区は長さ 27m、幅 21mで、捨石投入間隔は 3mとした(図-4)。ここで、 x 軸をトレンチ縦断方向、 y 軸をトレンチ横断方向にとる。各投入点における捨石投入量は、投入シミュレーションを用いて、初期地形と目標仕上げ高および投入間隔から算出した。本試験施工では、1 点あたりの平均捨石投入量は 7m^3 であった。トレミー管下端から海底面までの距離(管口高)は、試験施工区を中央で二分し、一方を 5m、他方を 8m とした。捨石の中央粒径は 70mm で、施工時の流速は底層(トレンチ外)で 1.2kt であった。

(2) 施工手順

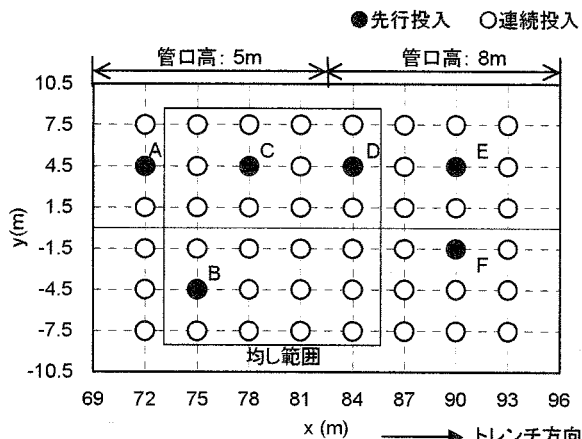


図-4 試験施工領域と捨石投入位置

表-1 先行投入条件

位置	投入量	管口高
A	7m^3	5m
B	8m^3	
C	7m^3	
D	8m^3	8m
E	7m^3	
F	8m^3	

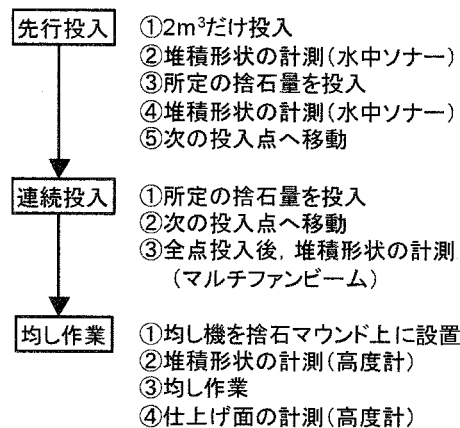


図-5 試験施工手順

試験施工手順を図-5 に示す。まず、図-4 の●で示す 6 点で捨石を先行投入し、投入シミュレーションの入力パラメータである捨石の分散係数 σ および水中安息角 θ_0 を同定した。先行投入位置は、初期地形がなるべく平坦で、各点で投入した捨石が重なり合うことのないように選定した。捨石堆積形状は、投入量は少ない場合は分散係数に、投入量が多い場合は水中安息角に大きく依存する。そこで、先行投入では、捨石を 2m^3 投入した時点の堆積形状も計測した。先行投入条件を表-1 に示す。

先行投入後、残りの投入点で連続投入を行った。全点で投入が終了した後、試験施工区全域の堆積形状を計測し、同結果から投入シミュレーションの再現性を確認した。

最後に均し機による均し作業を行い、施工精度の確認を行った。

(3) 投入方法

捨石の投入は、作業台船に設置したトレミー管(外径: 1.5m、長さ: 36~53m)を用いて行った。トレミー管は内管と外管の 2 管で構成され、外管を上下に可動させて管口高を調節した。トレミー管の平面位置は、トレミー管上端に設置した GPS により

把握した。捨石投入は、目標投入点を中心とする半径 0.5m 円内にトレミー管が位置するよう管理した。

(4) 地形計測

捨石投入前の初期地形は、作業台船に設置したマルチファンビームを用いて計測した。先行投入時の捨石マウンドの堆積形状は、トレミー管先端に設置した水中ソナーにより計測した。連続投入後の堆積形状はマルチファンビームにより計測した。均し機に高度計が設置されており、均し範囲については高度計による地形計測も行った。

4. 先行投入による捨石堆積分布

(1) 水中安息角

先行投入で管口高を 5m としたケースの堆積形状から、捨石の水中安息角を計測した。結果の一例として、B 点の堆積形状を図-6 に示す。投入量 8m^3 に対して、高さ 1.4m、拡がり幅 4m 程度の捨石マウンドがほぼ左右対称に形成されている。マウンド上部は幅 1m 程度で平坦になっており、斜面勾配は前面・背面ともに 37.4° であった。他点においてもほぼ同じ堆積形状が得られたことから、この斜面勾配を捨石の水中安息角とした。水中安息角の一覧を表-2 に示す。いずれの捨石マウンドにおいても水中安息角は $36^\circ \sim 38^\circ$ とほぼ安定しており、平均水中安息角は 37.2° であった。

(2) 分散係数

先行投入で 2m^3 投入時の堆積形状を、投入シミュレーション結果とともに図-7 に示す。捨石マウンドは、トレミー管中心から管口高 5m で 0.5m 程度、管口高 8m で 1.5m 程度、流下方向にシフトしていたが、各点の堆積形状を同時に比較するため、ここではマウンド中央を $x'=0\text{m}$ に合わせて図示した。いずれの投入点においても、 2m^3 の捨石投入で高さ 0.6m $\sim$ 0.8m の左右ほぼ対称な捨石マウンドが形成されており、管口高が大きいと分散がやや大きくなる傾向が確認できる。式(6)から分散を推定した計算結果は堆積形状を過大評価しており、実測結果に最も近い分散係数は管口高にかかわらず $\sigma = 0.5 \sim 0.6\text{m}$ であることが分かった。

(3) 一点投入での投入シミュレーションの再現性

分散係数に $\sigma = 0.5, 0.6, 0.8\text{m}$ 、水中安息角に $\theta_c = 37.2^\circ$ を使用して、投入シミュレーションにより投入量が 7m^3 であるときの捨石堆積形状を算出した。実測結果とあわせて図-8 に示す。同図より、 2m^3 投入したケースに比べて計算結果に分散係数による違いはほとんど見られず、堆積形状は水中安息角に大きく依存していることが分かる。なお、 2m^3 の投入結果から得られた分散係数 $\sigma = 0.5 \sim 0.6\text{m}$ はマウンド上部を過大評価しており、 $\sigma = 0.8\text{m}$ とし

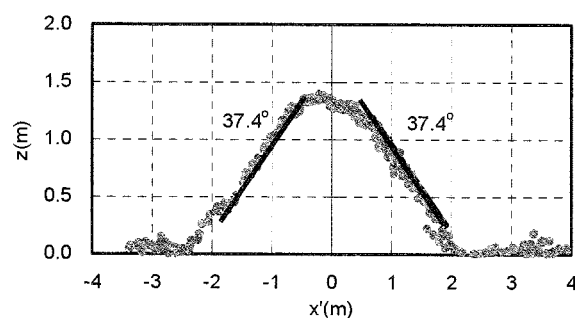


図-6 B点の堆積斜面勾配（水中安息角）

表-2 水中安息角の計測結果

投入点	水中安息角 ($^\circ$)	
	前面	背面
A	36.6	37.0
B	37.4	37.4
C	40.4 ¹⁾	37.6
平均水中安息角	37.2	

1) 平均操作から除外

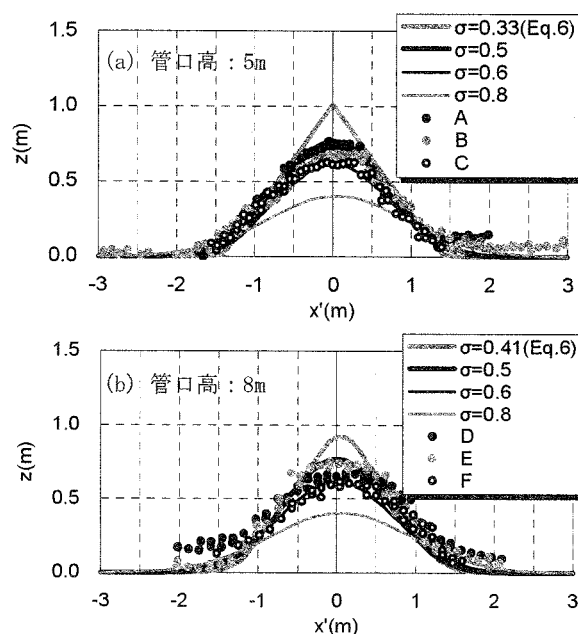


図-7 捨石マウンドの堆積形状比較（投入量 2m^3 ）

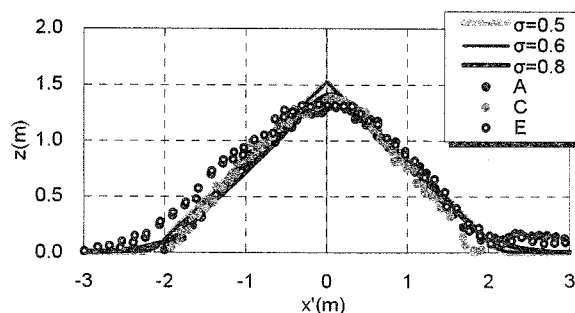


図-8 捨石マウンドの堆積形状比較（投入量 7m^3 ）

たケースではうまく再現できている。 $\sigma = 0.8\text{m}$ は 2m^3 投入では過小評価しているが、平均捨石投入量は 7m^3 であることから、今回は分散係数を $\sigma = 0.8\text{m}$ に、水中安息角を $\theta_c = 37.2^\circ$ に決定した。これより、投入シミュレーションから一点投入に対する捨石堆積形状を精度良く再現できることを確認した。

5. 連続投入による捨石堆積分布

(1) 実測結果

連続投入後の堆積形状を、マルチファンビームおよび高度計により計測し、その結果を図-9に示す。同図コンターの値は、目標仕上げ高を基準とした捨石堆積高である。今回の水深条件では、マルチビームは $1\text{m} \times 1\text{m}$ の範囲で地盤が最も高い箇所の水深を計測するため、直径 4m 程度の捨石マウンドの堆積形状をマルチビームで計測するには、精度が不十分である。そこで、マルチビームによる計測結果は全体の堆積傾向を把握するにとどめ、正確な堆積形状は均し機に設置した高度計による計測結果により把握した。ただし、高度計を用いた計測は図-4に示した均し領域のみに限定される。

図-9(a)のマルチビームによる計測結果から、捨石投入範囲に捨石の堆積が確認された。管口高 8m の堆積は、管口高 5m の領域に比べてなだらかに分布しており、投入位置からのずれがやや大きいことが分かる。

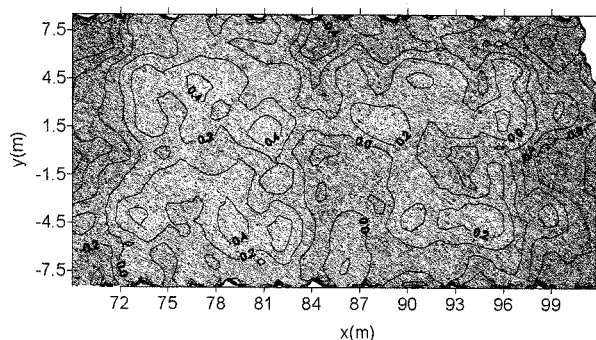
図-9(b)の高度計による計測結果から、投入点付近に捨石の堆積が見られ、捨石が目標位置付近に適切に投入されたことが確認できた。 $x = 85\text{m}$ 断面にくぼみが見られるが、これは同断面で管口高を 5m から 8m に変更したことで、捨石が流下方向に流されたためと考えられる。また、マルチファンビームによる堆積傾向と同様に、管口高 8m の領域では堆積はなだらかになっていることが再確認された。

(2) 投入シミュレーション結果との比較

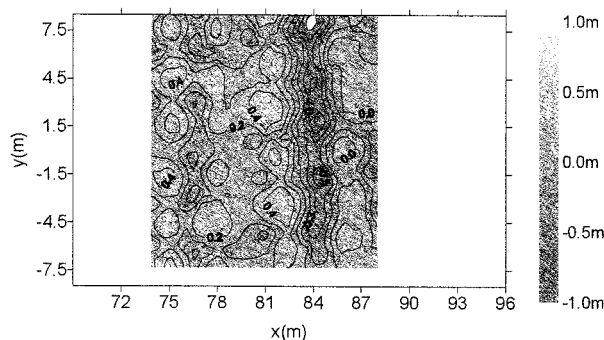
先行投入で同定した分散係数 $\sigma = 0.8\text{m}$ および水中安息角 $\theta_c = 37.2^\circ$ を用いて、連続投入に対する投入シミュレーションを実施した。管口高 8m の領域では信頼性の高い高度計による測深結果が得られていないため、投入シミュレーションは管口高 5m の領域のみについて行った。

計算結果を図-10に示す。投入シミュレーションでは、全ての投入点は直交グリッドの交点に設定したため、捨石マウンドの山と谷が規則的に形成されている。一方、試験施工においては、トレーマ管中心の水平位置が目標投入位置から最大で 0.5m ずれることがあるため、計算結果に比べると全体的になだらかな堆積形状となっているが、計算結果は最高高さ、最低高さ、堆積パターンを良好に再現している。

$x = 75\text{m}$ の横断面について、高度計による計測結



(a) マルチファンビームによる計測結果



(b) 高度計による計測結果

図-9 連続投入後の堆積形状

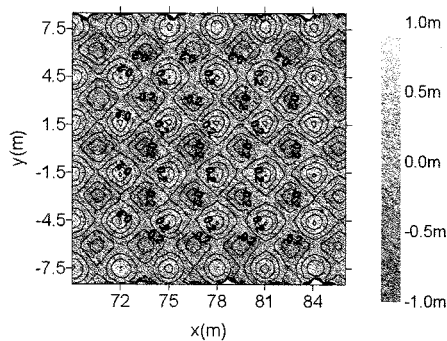


図-10 堆積形状の投入シミュレーション結果

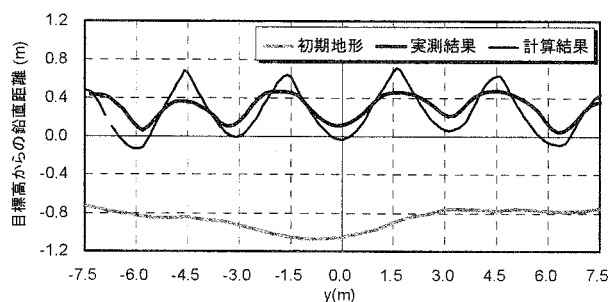


図-11 堆積形状比較 ($x = 75\text{m}$)

果と計算結果の堆積分布比較を図-11に示す。実測結果は計算結果と比較してなだらかな形状となっている。これは、実測結果において高度計の計測ラインがかならずしも捨石マウンドの頂点を捉えていな

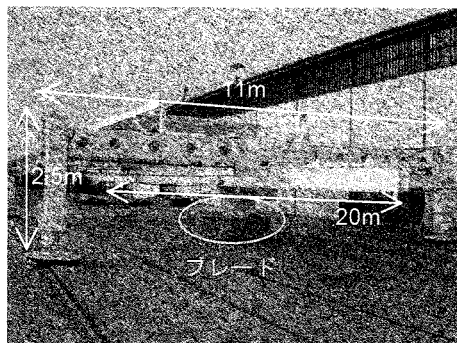


写真-1 ブレード型捨石均し機

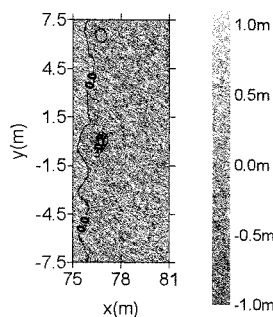


図-12 均し後地形

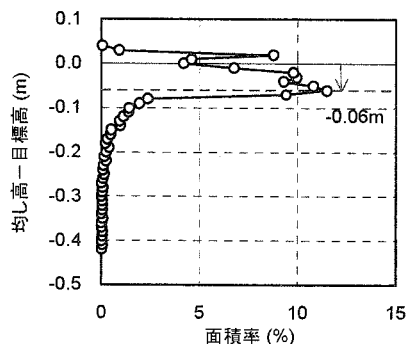


図-13 均し精度

いことに起因する。これを考慮しても、各マウンドの山と谷において、両堆積高の違いは 20cm 以内であることから、投入シミュレーションにより投入後の堆積形状を高い精度で予測できることが確認された。

6. 均し作業

(1) ブレード型捨石均し機

均し機の全景を写真-1 に示す。矩形フレームの四隅に伸縮式の脚が取り付けられ、フレームの下部に移動桁が、移動桁の下部に捨石均しブレードが設置されている。移動桁はフレームの下をトレンチ縦断方向に、ブレードは移動桁の下をトレンチ横断方向に移動することにより、捨石マウンド表面の均し作業を行う。

すべての捨石を投入した後、均し機を捨石マウンド上に水平に設置し、ブレード下面を目標高に設定して捨石マウンドの均し作業を行った。

(2) 均し精度

均し後の捨石地形を図-12 に示す。均し範囲全域にわたって、マウンド表面がほぼ水平に均されていることが確認できた。均し精度を図-13 に示す。同図は、縦軸に目標仕上げ高からの捨石高を、横軸に面積率を示す。同図より、仕上げ面の起伏は 10cm 以下であり、仕上げ高は目標高に対してわずか-6cm と粒径程度の誤差で造成されたことが確認できた。

7. 結論

本研究の主要な成果を以下に取りまとめる。

- 1) 捨石基礎築造の現地試験施工を実施し、実規模スケールで捨石の分散・堆積を計測して、堆積予測計算に使用する捨石分散係数および水中安息角を取得した。
- 2) これらを用いて、捨石投入シミュレーションから、捨石の堆積形状を良好に予測できることを確認した。
- 3) 大水深・強流条件の下、捨石投入シミュレー

ション、トレミー管、ブレード型捨石均し機を用いて薄層捨石基礎を確実に築造し、その仕上げ精度は粒径程度であることを確認した。

謝辞：ブレード型均し機の製作、操作にあたってはアジア海洋株式会社の多大なるご協力を賜った、ここに記し、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 織田幸伸, 伊藤一教, 上野成三, 勝井秀博, 東江隆夫, 小山文男, 栄枝秀樹: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況観測と流況解析, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1421-1425, 2005.
- 2) 織田幸伸, 伊藤一教, 高山百合子, 上野成三, 栄枝秀樹: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事の施工支援ツールとしての 3 次元流動シミュレーション, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp.903-908, 2005.
- 3) 織田幸伸, 伊藤一教: 二層流場の動的変動を考慮した流況予測手法の開発, 沿岸域学会誌, Vol.19, No.4, pp.13-24, 2007.
- 4) 織田幸伸, 伊藤一教, 上野成三, 小山文男, 栄枝秀樹: ポスボラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況予測モデルのシステム化と精度検証, 海洋開発論文集, Vol. 23, 2007.
- 5) 松見吉晴, 泉 一幸: 底開式バージによる投入捨石群の堆積形状に関する予測モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.966-970, 1992.
- 6) 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, Vol. 20, pp.935-940, 2004.
- 7) 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: 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, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.801-805, 2004.
- 8) 松見吉晴, 岸口孝文: 捨石マウンド築造時のバージ船の配船位置について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.769-773, 1990.
- 9) 小田一紀, 樋口俊光, 岩田 潔: 捨石粒子群の多点投入時および流れの中の堆積形状に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.814-818, 1989.
- 10) 本田隆英, 織田幸伸, 八重田義博, 伊藤一教: 捨石施工シミュレーションシステムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, pp.225-226, 2006.