

軟弱底面上に投入した土砂の堆積形状とその予測

松見吉晴*・荒井 清**・太田正規**
矢内栄二***・増田 稔****

1. はじめに

大規模な埋立工事や護岸基礎部の築造工事には、バージによる土砂投入工法が効率的な施工として一般に多く採用されてきている。一方、施工管理の点から投入工法には、土砂の堆積マウンド形状に関する事前把握や、多点連続投入における直投後の施工層厚を均一化する適正なバージ投入位置、さらには軟弱地盤に対する原地盤のめり込み量の予測等に問題を残していることも事実である。特に関西国際空港第2期工事のような大規模・大水深における埋立工事を円滑に実施するためのバージ投入施工に関する管理計画には、軟弱地盤のめり込みも考慮された投入土砂の堆積マウンド形状に関する予測手法の確立が不可欠であると言えよう。

松見ら (1992) は、捨石の水中落下実験より水深方向に分割した各区間での捨石の散乱に関する確率的性状が同一であることを明らかにし、投入捨石群の堆積形状に関する予測モデルを提案している。この予測モデルは、水深間の捨石の落下散乱過程にマルコフ・チェーンを適用していることから、投入水深の変化に対して汎用性をもっている (松見ら, 1997, 矢内ら, 1997) が、軟弱底面や土砂に対する適合性については明らかにされていない。

本研究は、全開式バージ模型を用いた土砂投入実験より投入水深変化に対する本予測モデルの適合性、並びに軟弱底面上に投入した場合の原地盤のめり込み量を考慮した堆積マウンド形状に対する予測モデルを検証すると共に、土砂堆積形状に及ぼす砂層や軟弱底面の透水性の影響を検討したものである。さらに本研究では、大型バージによる現地土砂投入実験より本予測モデルの実用性、並びに直投土砂層を均一化するためのバージ投入管理計画の検討を行っている。

2. 投入模型実験

本研究では、透水性底面に投入した土砂堆積マウンド

* 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
** 正会員 工修 東亜建設工業(株)大阪支店
*** 正会員 工博 東亜建設工業(株)土木本部設計部
**** 正会員 東亜建設工業(株)土木本部機電部

の形状的特徴の把握と、堆積マウンド形状に関する予測モデル式に含まれる統計量の設定資料を得るために、全開式バージ模型を用いた水理実験を行った。

(1) 実験装置

水槽は、長さ4m×幅3.8m×高さ2mの大きさで、水槽の二側面はガラス張りになっており、投入土砂の落下状況をビデオ撮影により観測した。

バージ模型は、図-1に示す47cm×45cm×21cmのアクリル製の縮尺1/36の全開式バージを使用した。ホップの開閉部分はモータにより制御され、開扉速度は可変式となっている。ホップの最大開扉角度および開扉幅は、それぞれ29°と18.5cmである。ホップの開扉速度は本実験を通じて20秒一定とした。バージの設置高さは、原型の満載時の喫水5.4mを考慮して15cmとした。

水槽底面には、軟弱底面を想定して厚さ100mmの平坦なステラシートを敷き詰め、その上から2mmメッシュの厚さ約1mmのナイロンシートでステラシートを覆った。なお、底面の透水性の影響を調べるためナイロンシートのみを敷いた場合についても実験を行った。

(2) 土砂の物理特性

対象とした土砂は、中世代上部白亜紀の和泉層群に属する均質な頁岩を砕いたものである。この土砂は水分を含むと崩壊し易いことから、実験ではこの土砂と同一の粒径分布を有するコンクリート用採石で代用した。実験に使用した土砂は、50mm以下2mm以上のもので、中央粒径は約14mmである。

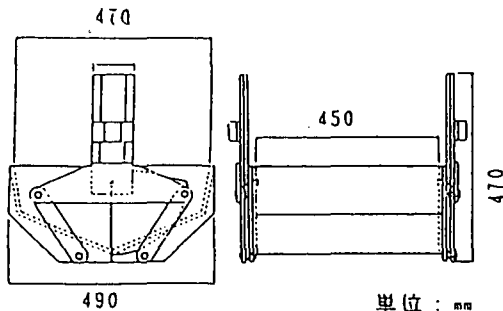


図-1 全開式バージ船模型

(3) 実験条件

一点投入の透水性底面の場合は投入水深が 50 cm, 70 cm, 90 cm, 110 cm および 150 cm の計 5 種類, 不透水性底面の場合は 150 cm の 1 種類について, それぞれ 2 回づつ実験を行った。一投入当たりの土砂量は 0.038 m^3 一定とし, 一点多数回投入実験では同一位置より最大 4 回投入した。多点投入実験では, 2 mm メッシュのナイロンシートのみを敷いた不透水性底面に対して投入水深 50 cm と 70 cm, 投入間隔 50 cm と 70 cm の計 4 ケースについて各投入位置より一回投入で行った。

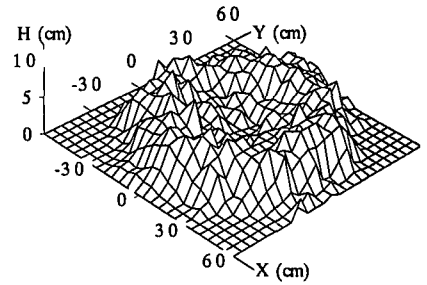
堆積マウンド形状の測定は, ポイントゲージと測量用レベルにより高さを読みとる方式である。堆積形状の計測範囲は, バージ船模型船首尾方向にはバージ中央より $\pm 105 \text{ cm}$, また船幅方向にはバージ中央より堆積している領域を対象にし, その範囲を 5 cm 間隔で計測点を設定した。

(4) 堆積マウンド形状に及ぼす底面の透水性の影響

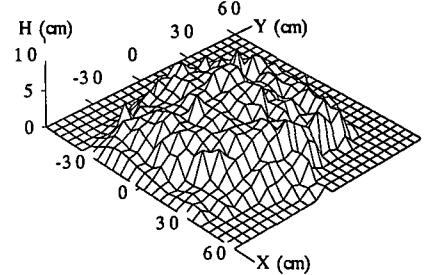
土砂群の落下運動に伴って周辺流体に回転する誘起流れが発生することはよく知られている (小田ら, 1992)。そして底面へ衝突後の土砂群の挙動は, 土砂群の衝突により生じる水平方向への強い流れと循環的な流れによって水平方向へ巻き上がりながら移動させられる。特に底面が不透水性条件の場合には, 底面の近接効果により上述の土砂群の水平方向への移動は, 透水性底面に比べ強く現れると推測できる。図-2 は, 投入水深 $h=150 \text{ cm}$ における一回投入時の土砂群の堆積マウンド形状を示したものである。図 (a) から明らかなように, 不透水性底面の場合の堆積マウンド形状は, 水平流および環状流の誘起流によってクレーター型の堆積形状となっている。一方, 図 (b) の透水性底面での堆積形状は, 誘起流に及ぼす底面効果が弱くなることから, 台形円錐型の形状となっている。以上のことから, 堆積形状に及ぼす底面の透水性の影響は, 底面への土砂衝突によって生じる誘起流の強さを低減し, 堆積形状としてはクレーター型から台形円錐型, さらに透過性が強くなれば山型へ変遷するものと推察されよう。

3. 土砂堆積マウンド形状に関する予測

従来, バージによる投入土砂の堆積形状に関する予測手法には, 小田らの 3 次元拡散理論 (1989) および DEMAC 法 (1993) に基づいたそれぞれの予測モデルがあり, これらの予測式の適合性は実験より確認されている。実験的なアプローチとしては, 奥出ら (1982) の実験における相似性に基づいた堆積形状に関する実験式がある。小田らの拡散理論を適用したモデルや奥出らの実験式は, バージの積載量や施工水深が異なる場合, 土砂粒径が異なる場合, 模型実験を行う必要がありモデルの



(a) 不透水性底面の場合 ($h=150 \text{ cm}$)



(b) 透水性底面の場合 ($h=150 \text{ cm}$)

図-2 堆積形状に及ぼす透水性底面の影響

汎用性に問題を残していると指摘できよう。

ここでは, 予測モデルを海上で使用する堆積マウンド形状計測システムへ取り込むために, PC においても計算量が少なくかつ簡易なものとして, 松見ら (1992) によって提案された予測モデルを投入土砂群に拡張する。

(1) 予測モデル

松見らは, 水深方向に等分割した各区間毎に捨石の散乱分布特性 (平面座標: x, y) を検討した結果, 各区間における捨石の x および y 方向の散乱分布に関する確率的性状として, 平均値ゼロの正規分布で近似できることを確認している。平均値ゼロを適用した場合, 予測される堆積形状は投入水深の増加に伴って山型→台形円錐→二山型→平型への変化パターン (武藤ら, 1974) を評価することができない。そこで, 本研究では各区間における土砂の水平方向への移動距離に関する確率分布に対して次式で示す平均値をもつ正規分布を仮定した。

$$f(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{(x^* \pm \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$f(y^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(y^* \pm \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに, $x^*=x/d, y^*=y/d, d$ は土砂の中央粒径, σ_x と σ_y および μ_x と μ_y はそれぞれ船幅および船首尾方向の標準偏差と平均値である。式中の $\pm$ の符号は, 船幅方向の場合ではプラスが左舷側でマイナスが右舷側, 船首尾方向の場合にはプラスが船首側でマイナスが船尾側を示す。このように平均値を付加する物理的な意味は, 投入された

土砂群の沈降により誘起される周辺流体の循環的な流れによって土砂群が船幅および船首尾方向共に水平方向へ移動させられながら沈降する土砂群の挙動を表現するためのものである。

各区間毎の土砂の平面的な位置に関する確率分布 p_r は、マルコフ・チェーンを適用して次式で与えられる。

$$p_r(x^*, y^*) = \Pi_x \cdot \Pi_y \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Π_x および Π_y は各水深における土砂の x および y 方向の落下位置に関する確率分布で次式により与えられる。

$$\Pi(0) = [\underbrace{0, \dots, 0}_{r \text{ 個}}, \underbrace{1, 0, \dots, 0}_{r \text{ 個}}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Pi(m) = \Pi(m-1) \cdot P \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\Pi(0)$ は投入時の土砂の位置に関する確率ベクトル、 P は推移確率行列で次式のように表される。 r は投入点から最終着底位置までの最長水平距離である。

$$P_r = [p(i, j)] \quad i = -r, \dots, r, \quad j = -r, \dots, r \quad \dots\dots\dots (6)$$

バージより投入された土砂の着底位置に関する確率分布 P_r は、ホップ開口部を土砂の代表長 d で分割した各位置から投入されるものと考え次式で与える。

$$P_r(x^*, y^*) = \left\{ \sum_{i=1}^N P_{ri}(x^*, y^*) \right\} / N \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 P_{ri} はホップ開口部 i 位置より投入された土砂が (x^*, y^*) 位置に着底する確率を表し、 N はホップ開口部の分割総数である。最終的にマウンド高さ H は、バージ積載土砂体積を土砂間の空隙率も含めて V とすると次式で与えられる。

$$H(x^*, y^*) = V \cdot P_r(x^*, y^*) / d^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

(2) 確率パラメータの設定計算結果

ここでは、式 (1) および (2) に含まれる土砂の散乱に関する標準偏差と平均値について、最小投入水深

$h=50 \text{ cm}$ の実験結果より推定し、その結果を用いて他の投入水深に対する本予測モデルの適合性を検証する。なお、計算における水深間隔は 10 cm にしている。

海底の軟弱性および透水性をモデル化したステラシートの堆積土砂荷重による沈下量 δl は、水中での載荷荷重実験より図-3 に示す実験式を得た。

図-4 は軟弱底面に対する一点一回投入時の堆積マウンド中央船幅および船首尾方向の断面形状について、実験結果と予測計算結果を比較したものである。なお、ステラシートの沈下量の予測には図-3 に示す実験式を使用すると沈下量を過大に評価したことから、予測計算では実験式の 9 割で評価している。図より $h=50 \text{ cm}$ の結果より推定された標準偏差および平均値を用いた他の投入水深の計算結果は、実験結果に見られる投入水深の増加に伴ってマウンド形状が山型から台形型への変化特性、並びに堆積高さをよく再現しており、本予測モデルの投入土砂に対する適合性が認められる。

(3) 一点多数回および多点投入に対する適合性

一点多数回投入による土砂堆積マウンドの場合、先に投入された土砂マウンドの空隙率が次の投入土砂の衝突によって堆積土砂が締固められて減少することが予測できる。そこで、本予測モデルではこの土砂マウンドの空隙率変化量 λ を堆積高さの 3 乗に比例すると便宜的に

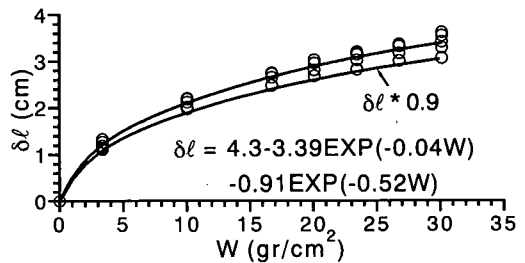


図-3 ステラシートの沈下量

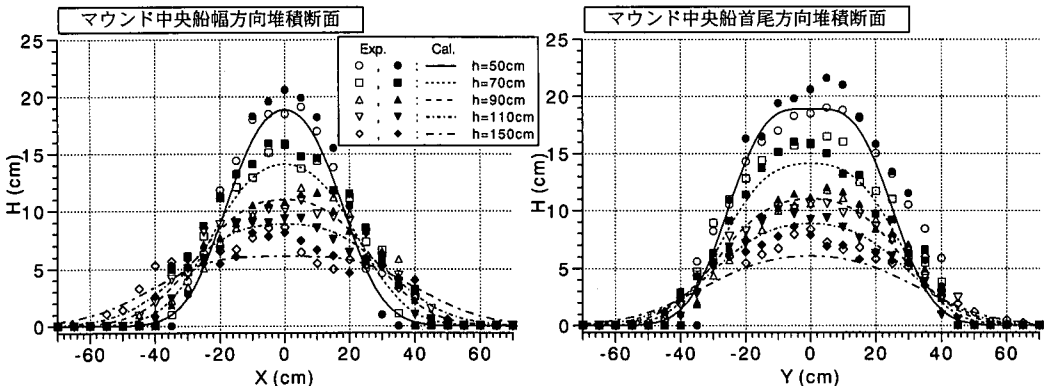


図-4 一点一回投入実験結果と予測結果の比較

仮定し次式で評価した。

$$\lambda = C(H/H_{\max})^3 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $H_{\max}$ は 2 回投入以降のマウンド最大高さ、 C は係数で実験結果と計算結果の比較より推定した。なお、本実験では C の値が 0.12~0.18 の範囲であった。

図-5 は軟弱底面を対象に投入水深 $h=110$ cm と 150 cm のときの同一地点から 4 回投入した各投入回数毎の堆積マウンド中央船幅および船首尾方向の断面形状について、実験結果と計算結果を比較したものである。この計算に用いている標準偏差と平均値は、先に示した投入水深 50 cm の実験結果より推定したものである。計算結果は、各投入水深および各投入回数毎の実験結果をよく再現し、一点多数回投入に対する本予測モデルの適合性が確認できる。また、他の投入水深 ($h=70$ cm, 90 cm) についても同様の結果を得ている。

次に、多点投入時の堆積マウンド中央船幅方向の断面形状について計算結果の一例を示したものが図-6 である。この図は投入水深および投入間隔がそれぞれ $h=50$ cm, $L=50$ cm および $h=70$ cm, $L=70$ cm の結果である。不透水性底面に対する予測モデルの標準偏差および平均値は、 $h=50$ cm における一点一回投入の実験結果より推定して用いている。この図より計算結果は、実験結果とほぼ一致し、本予測モデルの多点投入に対する適合

性についても確認できる。

4. 予測モデルの実用性

バージによる投入土砂の堆積マウンド形状に関する本予測モデルの実用性を検討するため、大阪湾内における投入土砂の堆積形状について予測計算と比較検討した。

投入水域は山砂によって平均厚 1 m の盛砂が施工された海底で、平均水深がほぼ 14 m であった。バージは、積載量 3200 m³ の底開式 (土倉長: 66 m, 開口幅: 1.7 m×2, 開口部仕切幅: 2.6 m) と 3500 m³ 積み込みの全開式 (土倉長: 56 m, 開口幅: 8.5 m) である。投入土砂は 200 mm 以下の山砂である。土砂投入前の地形および投入後の出来形の計測には、東亜建設工業 (株) で開発された GPS とナローマルチビーム測深ソナーおよび動揺補正装置を組み合わせたリアルタイム地形計測システム (ペルーガシステム) を用いた。

計算条件としては、バージ開口部の分割幅を $d=20$ cm, 水深方向の分割間隔を 1 m に設定した。本研究では、予測モデル式に含まれる標準偏差と平均値について相似性が明らかでないことから、これらの値を現地投入結果より推定している。さらに投入土砂堆積後の原地盤の沈下量は、ボーリングおよび鋼製沈下板による調査を行ったが 30 cm~1 m の範囲で大きく変動し、十分な結論を

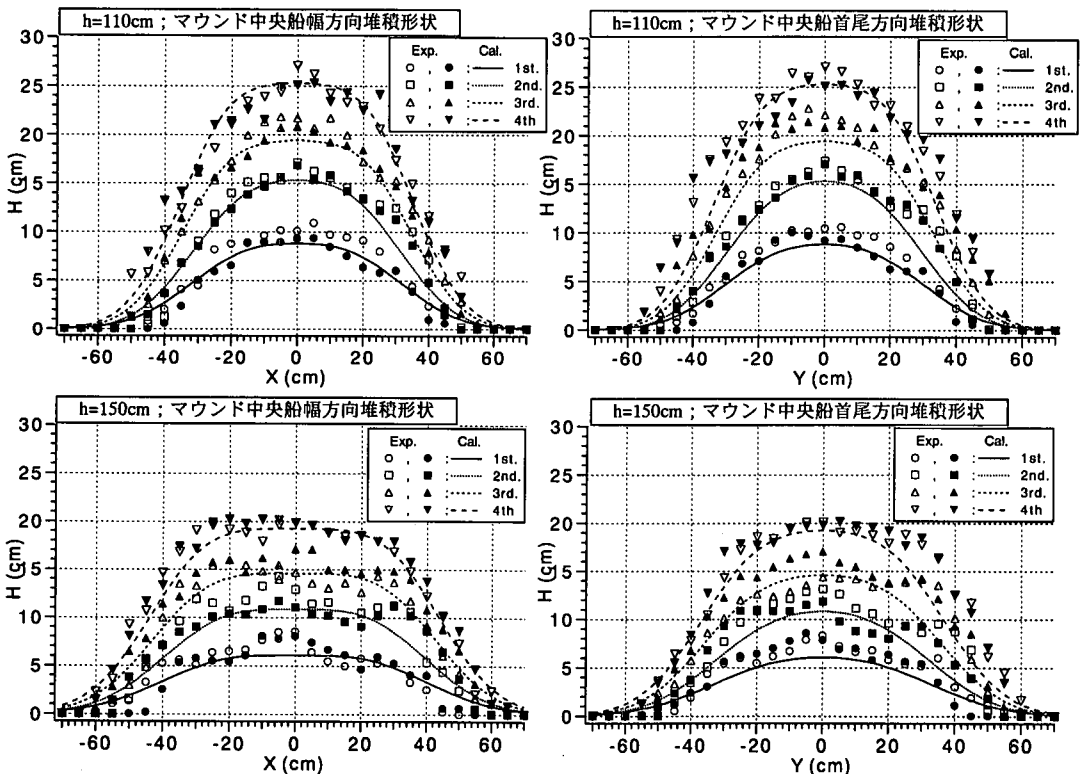


図-5 一点多数回投入実験結果と予測結果の比較

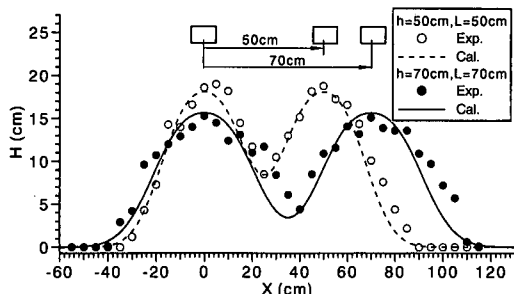


図-6 多点投入実験結果と予測結果の比較

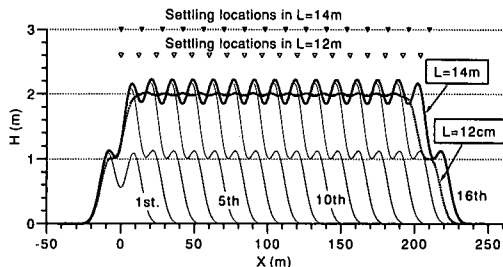


図-8 投入位置に関する管理計画例

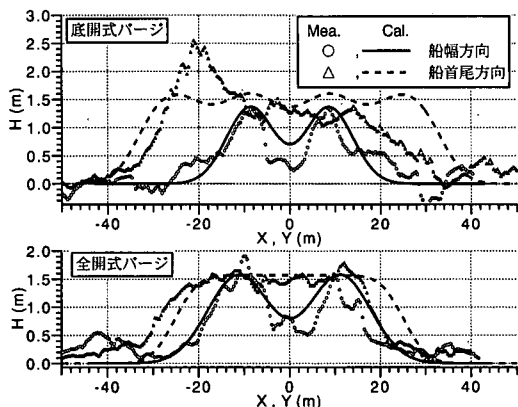


図-7 現地投入結果と計算結果の比較

得るまでに至っていない。そこで予測計算では、原地盤の沈下量を最大 50 cm まで堆積高さに線形比例するものとして計算を行った。

図-7 は、底開式および全開式バージによる土砂堆積マウンドの船幅方向中央断面、船首尾方向については二山の頂部について現地結果と予測計算結果を比較したものである。計算結果は、大水深域における一般的な特徴である二山型の断面形状を再現している。従って、本予測モデルは、現地地盤の堆積土砂による沈下量に関する評価に問題を残すが、投入土砂の堆積高さおよびマウンド斜面勾配の事前把握に対して実用性が認められる。

次に、上記 3200 m³積の底開式バージによる直投土砂層を 2 m に均一化するための投入管理計画の一例を図-8 に示す。この計算結果は、投入間隔 12 m, 14 m について図中三角印で示す各々 18 および 16ヶ所の投入位置より、満載時の 0.67 および 0.8 の土砂を投入した場合

である。

5. まとめ

本研究では、バージ模型による土砂投入実験より軟弱底面上に投入された土砂堆積マウンド形状に関する予測モデルの適合性を明らかにした。また、本予測モデルが現地大水深域で起こる二山型の堆積マウンド形状を再現できることを現地土砂投入実験より確認した。今後は予測モデルの実用性の向上を目的として、直投土砂堆積に伴う原地盤の沈下量、並びに多数回投入時のマウンド空隙率の低減量に関する評価について検討を進める。

参考文献

- 奥出 律・山谷弘幸・松本 茂 (1982): 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験, 港湾技術研究所報告, 21 巻, 4 号, pp. 132-171.
- 小田一紀・樋口俊光・岩田 潔 (1989): 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.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸・井上雅夫 (1992): 改良 DEMAC 法による粒子群の沈降・分散挙動の解析, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 971-975.
- 小田一紀・重松孝昌・大西伸幸 (1993): DEMAC 法による沈降粒子群の分散・堆積挙動のパラメトリック解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 951-955.
- 松見吉晴・泉 一幸 (1992): 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.
- 松見吉晴・矢内栄二・荒井 清・増田 稔 (1997): 底開式バージによる投入土砂の堆積形状に関する予測モデルの検証実験, 第 52 回年次講演会概要集 VI, pp. 46-47.
- 武藤碩夫・吉井総介・石田 勉 (1974): 大規模埋立用底開バージによる土砂投下の研究, 三菱重工技報, Vol. 11, No. 1, pp. 92-104.
- 矢内栄二・横堀浩一・松見吉晴 (1997): トレミー管および全開バージによる投入土砂の堆積形状, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 369-373.