

9. 水中捨石マウンド締固め能力及び生産性向上に向けた取り組み

五洋建設株式会社

森 雅宏
酒井 優希

1. はじめに

外洋からの波浪の影響を軽減するため、港湾にはケーソンと呼ばれる一般的に鉄筋コンクリート製の中空の函体が防波堤として設置される。ケーソンは、1個当たり数十kgから数百kgの捨石で成形された捨石マウンドの上に設置されるが、最終的な出来形管理基準にあたる設計天端面から±5cm以内の精度（本均し）を満足し、且つケーソン据付後に捨石マウンドが沈下しないよう、精度よく堅固に捨石マウンドを均す必要がある。従来は潜水士によって均し作業は行われていたが、作業の施工性と安全性を確保するため機械化が進められ、近年ではリアルタイムに捨石マウンドの高さや施工の進捗を確認することができるまでとなった。

五洋建設は長年「転圧ローラ」を搭載した水中捨石均し機を運用してきたが、捨石マウンドの堅固な締固めに対応するため、今回、「重錘」による締固め方式を取り入れた新型の水中捨石均し機「SEADOM-7（以下「本機」）」を建造した。

筆者らは、重錘締固め作業による施工精度の確保と生産性向上の両立を図るため、施工方法と各計測装置に連動する施工管理システムと、実験を基に構築したAIによる重錘最適落下高さ算出システムを本機に導入した。本稿では、水中捨石均し機と概要と開発経緯及びAIシステムの開発について報告する。

2. 水中捨石均し機

2.1 水中捨石均し機概要

本機は、8脚歩行式の水中ロボットである。基本的な構成は、均し機本体と遠隔操作室、本体の給電と通信を担うアンビリカルケーブルからなる（図-1 参照）。

本機は、重量があり、捨石マウンド上に着底した状態で作業するため、海象の影響を受けにくい。また、遠隔操作室からワンマンコントロールによる操作が可能のため、厳しい海象条件や大水深海域においても安全に作業することができる。

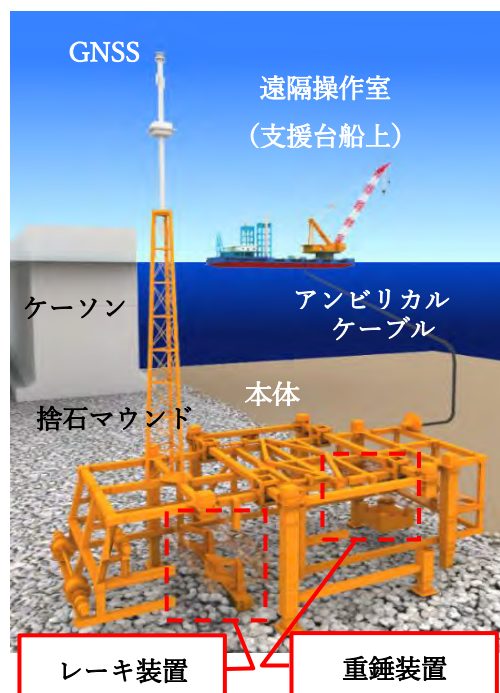


図-1 施工イメージ

2.2 新型捨石均し機の仕様及び搭載機器

本機は捨石を押出すためのレーキ装置と本均し用の重錘装置を搭載している。レーキ装置は台車と昇降装置を搭載し、重錘装置は台車と昇降装置、落下装置を搭載している。本機の仕様を表-1に示す。

表-1 SEADOM-7 本体仕様

機体寸法	長さ 18.5m×幅 10.5m×高さ 7.0m
機体重量	160t(気中)、135t(水中)
最大使用水深	-35m
捨石規格	500kg/個以下
均し精度	±5.0cm 以内
移動方式	水中 8 脚歩行式
主電動機	水中電動機 90kW
レーキ装置	幅×ピッチ 5.0m×0.3m
	敷均し範囲 9.5m×5.0m
	最大牽引力 212kN
重錘装置	重量 20t
	底面 2.0m×2.0m
	締固め範囲 11.5m×4.0m
測位・測深	RTK-GNSS・超音波センサ
操作方法	遠隔操作（一部自動制御可）

2.3 施工フロー

本機は、ガット船によって投入された捨石マウンドの上に支援台船の起重機等で据え置かれ、脚装置で所定の場所に移動した後、図-2 に示すフローに沿って本均し作業を行う。

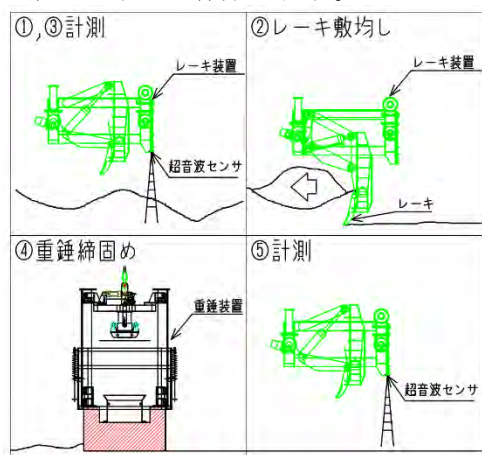


図-2 施工フロー

① 均し作業前捨石マウンド形状計測

レーキ装置後方に捨石マウンド計測用の超音波センサ(写真-1)が取り付けられ、レーキ装置を前後させることで直下の施工エリアの高さを計測する。超音波センサは対象物と距離が短く、レーキ装置も水平に移動するため、精度よく捨石マウンドの高さを計測できる。

② レーキ敷均し

所定の余盛高に捨石を敷き均す。均し作業中も捨石マウンドの高さを計測でき、リアルタイムに状況を確認しながらレーキを操作する。

③ 中間計測

敷均し完了後、施工エリアの高さを計測する。

④ 重錘締固め

重錘装置によって重錘を所定の位置まで移動させ、任意の高さから重錘を落下・回収する。重錘落下後に超音波センサ(写真-1)で重錘天端の高さを確認し、捨石マウンドが所定の高さになるまで繰り返す。

⑤ 均し作業後捨石マウンド形状計測

重錘締固め完了後、捨石マウンドの高さを計測する。捨石マウンドが所定の高さになったことを確認し、次のエリアへ本体を移動させる。



写真-1 超音波センサ

(左：捨石マウンド計測用、右：重錘天端計測用)

2.4 施工管理システム及び ICT 施工の取り組み

オペレータは檣頂部の GNSS と、本体に取り付けられた方位傾斜計によって、本機の現在位置を把握できる。また、超音波センサやエンコーダ等の計測機器から捨石マウンドの高さを計測し、これらの情報をリアルタイムに施工管理装置の画面に表示させ、進捗を確認できる(写真-2)。

各種センサや施工管理装置との相互通信を基にプログラミングされたシーケンス制御に従って油圧機器を制御することによって、自動的に歩行及び敷均し、締固め作業を行うことができる。

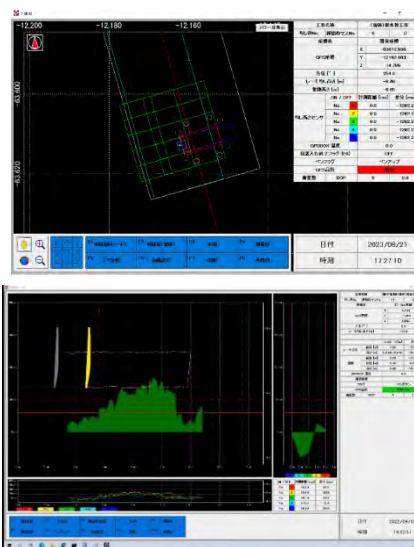


図-3 施工管理ソフト

(上：平面位置表示、下：捨石マウンド形状)

3. 開発経緯

捨石マウンドの堅固な締固めに対応するため、従来のローラ転圧方式に代わる締固め方式を検討した。ローラ以外の締固めに対する知見やノウハウを得るため、その他の締固め装置の性能と捨石マウンドの変位を確認した。

3.1 実規模実験

海中で使用される締固め装置は主にバイブロハンマ・油圧ハンマ・重錘が挙げられる。これらの装置を用いて締固め試験を行い、性能の比較と評価を行った。



写真-2 実験状況

3.2 実規模実験結果

表-2 に示す 3 つの締固め装置を用いて、1 個あたり 200～500kg の捨石で形成した捨石マウンドに対して表-3 に示す通り、同じエネルギーを与え、締固め度（捨石の密度変化）と平坦度（天端高さの標準偏差）を比較・評価した。

表-2 使用機械

装 置	仕 様	備 考
パイプロハンマ	底面 2m×2m 締固め力 24.6kW	SR-45（エンジン出力 250kW）
油圧ハンマ	底面 2m×2m 締固め力 88kW	NH-70（ラム質量 7t）
重錘	20t 底面 2m×2m	

表-3 各機材が捨石マウンドに与えるエネルギー

装置	計算式	試験量	単位面積当たりのエネルギー
パイプロハンマ	$\frac{E \times t}{A}$	t=16.3[sec]	100[kJ/m ²]
油圧ハンマ	$\frac{E \times n}{A}$	n=5[回]	110[kJ/m ²]
重錘	$\frac{mgh \times n}{4}$	h×n=4.0[m・回]	98[kJ/m ²]

まず、締固め度について、図-4 で示す通り密度の減少量はパイプロハンマ及び油圧ハンマの場合は 0.04～0.05t/m³、重錘の場合は 0.10t/m³であったため、重錘が最も締固めの能力があることが分かった。

次に、天端高さの平坦度について、図-4 に示す通りパイプロハンマ及び油圧ハンマの標準偏差が 100～110mm に対し、重錘は 80mm であったため、重錘が最も精度よく捨石マウンドを均せることが分かった。

最後に、試験の状況を観察した結果、パイプロハンマと油圧ハンマは施工中に傾きが発生したため安定した締固めができなかったが、重錘は施工精度を確保しつつ、安定した施工を行うことができた。

以上の結果を踏まえ、施工の安定性と施工精度を確保できる重錘を本機の締固め方式に採用した。

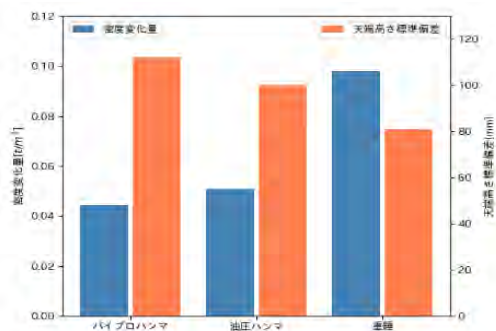


図-4 締固め工法比較

3.3 模型実験

重錘締固めによる捨石マウンドの沈下傾向や周辺への影響を調べるため、現場の状況を想定した模型実験を行った。実験内容としては、実験水槽に小規模の捨石マウンドを形成、没水させることで施工状況を再現した。岸壁等の築造工事において捨石本均し工で求められる施工精度は±5cm であるため、重錘締固めにおいて施工精度を確保できるかを検証した。また、締固めに伴う盛り上がり等周辺の変位についても確認した。

3.4 実験スケール及び使用実験資機材

模型実験では実験スケールを 1/5 に設定した。相似則に従い表-4 に示す資機材を準備し、図-5 に示す構成の装置を使用した。重錘は実規模実験で使用した 20ton と同等のものとし、捨石は基礎捨石によく使用される最大級の大きさになる 500kg 以下と同等のものを準備した。

表-4 実験相似則

		原寸	1/5
重錘	重量[kg]	20,000	160
	底面[mm ²]	2,000×2,000	400×400
	落下高さ[mm]	0～2,000	0～400
捨石	比重[kg/mm ³]	2.65×10 ⁻⁶	2.65×10 ⁻⁶
	重量[kg]	50～500	0.4～4.0
	直径寸法[mm]	330～712	66～142
マウンド	天端[mm]	28,000×24,000	5,600×4,800
	マウンド厚[mm]	+3,000	+600
	施工精度[mm]	±50	±10

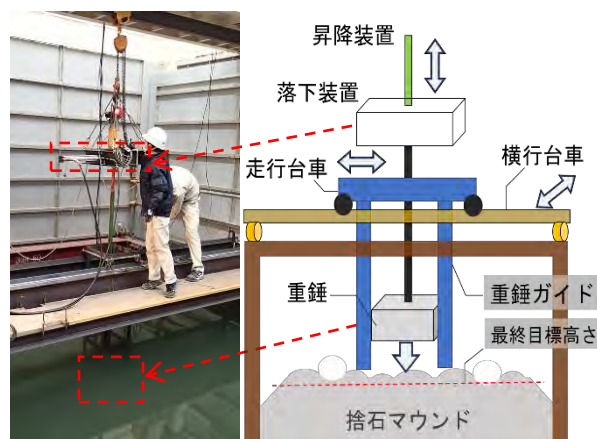


図-5 実験装置

3.4 模型実験結果

(1) 施工精度の確認

まず、締固めにより捨石マウンドを平坦に均せるかを確認するため、重錘の四隅を計測することで、捨石マウンドの形状を確認した。ここでの平坦度は、重錘四隅の平均値と標準偏差を確認した。

計測の結果、表-5 に示す通り、重錘を落とすことによる沈下は確認できたが、平坦にはならなかった。

表-5 沈下の傾向

落下高さ [mm]	回数 [回]	重錘天端					標準偏差 [mm]
		1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	平均 [mm]	
400	0	654	583	655	639	632.75	29.41
400	1	627	574	633	625	614.75	23.71
400	2	607	554	618	603	595.50	24.58
400	3	594	547	606	586	583.25	22.11
400	4	582	539	595	578	573.50	20.89
400	5	579	529	591	570	567.25	23.31

次に、捨石マウンドの最終高さを目標に設定し、その時の捨石マウンドの高さに応じて重錘を落下させ、最終的な捨石マウンドの高さを確認した。

表-6 では施工精度 $\pm 10\text{mm}$ 範囲内に入る件数の割合とそれ以外の件数の割合を一覧にした。結果は、設計高さより $+10\text{mm}$ 以内に収まるよう締め固めることが出来たが、 -10mm より下がる捨石マウンドが約 22%あった。この結果は重錘の四隅を計測した内、一か所でも $+10\text{mm}$ を超える計測値を確認した場合でも締固めを続行したためである。

表-6 締固めの精度

	試験数	割合[%]
全体	188	—
+10mm以上	0	0.0
$\pm 10\text{mm}$ 以内	147	78.2
-10mm以下	41	21.8

以上から、締固めを行う前にある程度捨石マウンドを平らにしなければならず、本機によるレーキ敷均し作業は有効であると考えられる。

(2) 周辺盛り上がり

実規模実験時に重錘の周辺が盛り上がることを確認されたため、重錘落下の前後に超音波センサで捨石マウンドを直接計測することで周辺への影響を確認した。

超音波センサの計測値は石の空隙も含まれるため、頂部の値を抽出してグラフ化した。図-6 に

実機の最大落下高さ 2.0m 相当 (400mm) を 3 回落下させた捨石マウンドの形状を示す。重錘による盛り上がりは落下高さと締め固まり具合によるが概ね 400mm 程度 (重錘 1 つ分) の範囲で盛り上がり確認された。また、隣接部分を続けて締固めを行った場合、締め固めていない箇所でも盛り上がりが起こりやすい傾向が見られた。

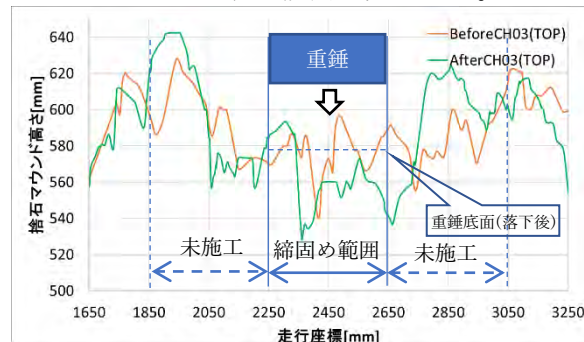


図-6 締固め前後の捨石マウンドの変化(H400×3 回)

(3) 締固め順序

次に、実際の施工では締固め完了後に隣接部を締め固めるが、その反動による盛り上がりは少なくなる締固めの順序について検討した。重複箇所が無いよう捨石マウンドを締め固めるにあたり、図-7 のように締固めの順番を①コの字②ジグザグ③折り返しの 3 パターンを設定した。

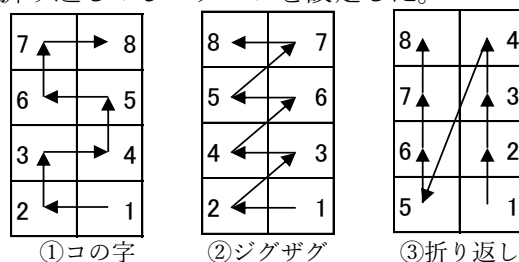


図-7 締固め順序

各締固めパターンにおける施工精度の割合を表-7 に示す。コの字については施工精度について $+10\text{mm}$ を超える盛り上がりの割合が他の施工方法より多く発生している。ジグザグと折り返しについて比較すると箇所 $\pm 10\text{mm}$ 以内に入る割合は同じだが、ジグザグは $+10\text{mm}$ 以上になる割合が高いため、折り返しが最も周辺が盛り上がりない施工方法と言える。

表-7 施工精度比較

	標準偏差	割合 (目標精度 $\pm 10\text{mm}$)		
		+10mm以上	-10mm以下	$\pm 10\text{mm}$ 以内
単位	[mm]	[%]	[%]	[%]
コの字	27.2	46.3	14.6	39
ジグザグ	19.79	32.6	23.3	44.2
折り返し	22.63	23.3	32.6	44.2

4. AI システムの開発

4.1 概要

実際の施工では、施工精度の確保に加え、効率の良い施工が求められる。重錘による締固めの施工効率を向上させるためには、重錘の落下回数を少なくする必要があり、各締固め箇所の高さや状態に合わせた重錘落下高さを導出する必要がある。今回、重錘の落下高さと捨石マウンドの変化を定量的に分析し、重錘落下高さから沈下量を割り出す AI システムを開発した。

4.2 AI 開発に向けた実験

AI システムを構築するためには多くの実験データが必要になるため、先の模型実験装置と捨石マウンドで実験を行った。また、捨石均し機を実施工に導入することを想定し、図-8 に示す捨石マウンドと順序で締固めを行った。

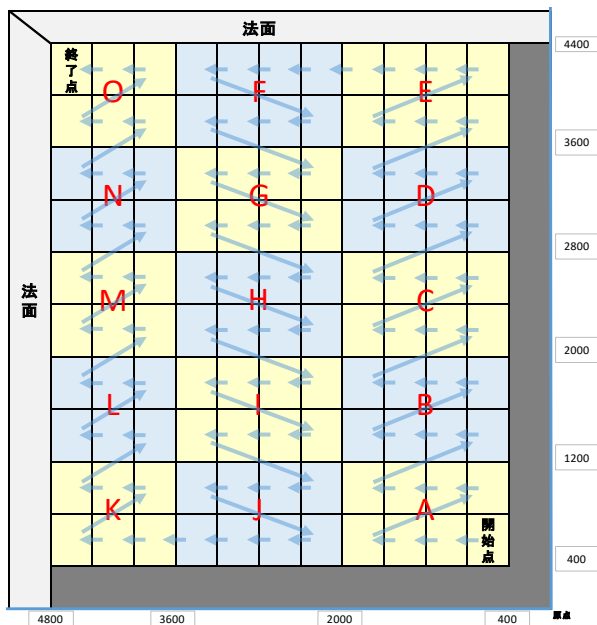


図-8 AI 実験用捨石マウンド

4.3 実験結果とアルゴリズムの構築

4.3.1 基本式の構築

機械学習に用いられるアルゴリズムを構築するため、その基礎となる式を構築した。

水中での重錘締固めの物理法則において、気中の式(1)¹⁾、(2)と同様の傾向を示すもの考えることとした。式(1)、(2)を簡略化し、N 回目と N-1 回目に締固めたときの累積沈下量が式(3)、(4)となる。その差分が N 回目の沈下量として式(5)が得られ、この式を本アルゴリズムの基本式とした。このときの α は地盤の締固めにおける特性として地盤定数と呼称することとする。

沈下量 ΔP は目的変数と呼び、目的変数を求めるために使用する落下回数 N や落下高さ H、地

盤定数 α を説明変数と呼ぶ。

$$P = c \frac{mv_0}{A} \sqrt{N} \quad (1)$$

$$v_0 = \sqrt{2gH} \quad (2)$$

$$P_N = \alpha \sqrt{NH} \quad (3)$$

$$P_{N-1} = \alpha \sqrt{(N-1)H} \quad (4)$$

$$\Delta P_N = \alpha (\sqrt{N} - \sqrt{N-1}) \sqrt{H} \quad (5)$$

4.3.2 モデル構築

地盤定数 α をどのように数値決定するかを検討した。

まず、地盤定数 α を決定するため、隣接部を締固めてない同一マス上に、同一高さからの落下させる実験を行った。重錘の落下高さと累積沈下量の関係は図-9 に示す通り、決定係数 R^2 は 0.925 が得られ、高い直線性を示した。

次に予測値と真値を比較するため、全 110 マスに対して 3 回締固めを実施した全データを使用し、 α 情報の扱いを①～③の 3 パターンで比較・評価した。評価方法は真の値と予測値の差の絶対値の平均を取る MAE (Mean Absolute Error) と、誤差の標準偏差を取る方法とした。

- ① 1 度の締固め結果のみ保持
- ② 1 回前の締固め結果のみ保持
- ③ すべての締固め結果を平均化

以上の評価の結果、表-8 に示す通り、③のパターンが最も精度が良いことが得られた。

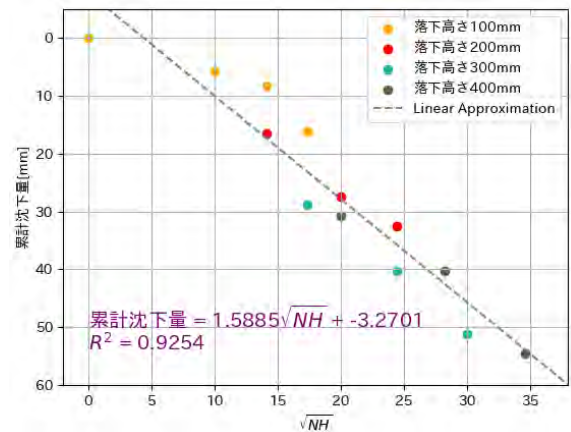


図-9 沈下量の状況

表-8 α_{base} の評価

	MAE	誤差 標準偏差
パターン①	2.24	3.41
パターン②	2.41	4.16
パターン③	2.04	3.32

4.3.3 モデル拡張

前項では同一マス上において検証を行ったが、実施工では周辺状況の影響を考慮する必要があるため、 α 情報の拡張が重要であると考えられる。そこで、捨石均し機の施工における施工範囲を図-10 のように 3 つに分けそれぞれの地盤定数を次の通り定めた。

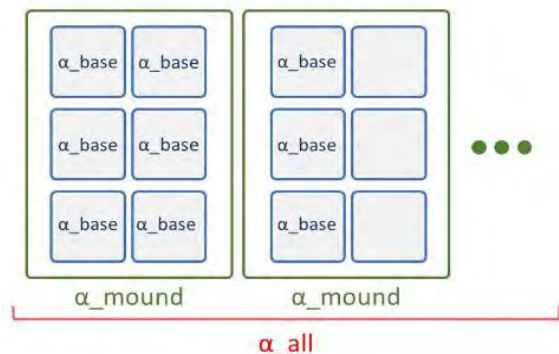


図-10 地盤定数の定義

同一マス上での平均を α_{base} 、同一マウンド上を α_{mound} 、全施工エリアを α_{all} とし、各 α の値が及ぼす影響を AI で学習しモデル化した。

4.3.4 アルゴリズムの評価

今回の AI 設計は本実験のように教師データがあるため、教師あり学習の回帰モデルを使用し、目的変数である ΔP を求めた。この計算過程で使用するアルゴリズムとして線形回帰、決定木、Xgboost を用いてモデルを評価した。

評価の方法は、先の実験で取得したデータ 1094 件のうち、7 割の 765 件をアルゴリズムの学習に使用し、3 割の 329 件を学習データから学習したアルゴリズムを検証データとして交差検証をおこなった。それぞれのアルゴリズムの検証結果を図-11 と表-9 に示す。

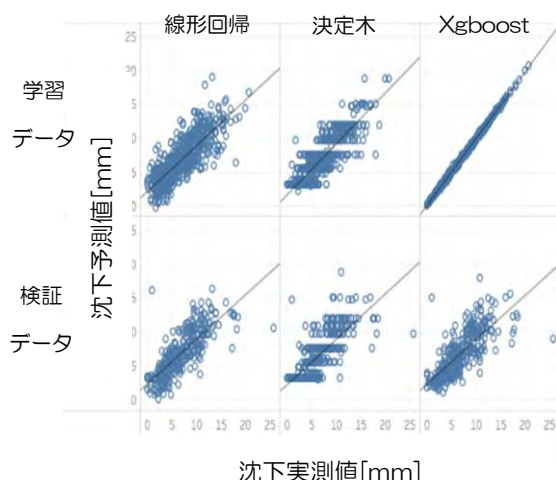


図-11 アルゴリズムの比較結果

表-9 アルゴリズムの比較結果

	学習データ		検証データ	
	MAE	R2 Score	MAE	R2 Score
線形回帰	1.52	0.67	1.67	0.59
決定木	1.33	0.75	1.76	0.54
Xgboost	0.12	0.99	1.70	0.56

学習データを用いた評価においては Xgboost が MAE, R2Score とともに精度が良かったものの、検証データを用いた評価においては MAE, R2Score の値が悪かった。これは過学習と呼ばれ、学習時は良い精度を出すものの、未知のデータに対し同様の精度を出せないモデルが構築されてしまった。従って、Xgboost は運用には適さないと考えられる。検証データを用いた評価において、線形回帰が MAE, R2Score とともに良い値となり、Xgboost を除く 2 つのアルゴリズムの分布をみると線形回帰の方が強く纏りが出ている。

以上、総合的に 3 つのアルゴリズムを評価した結果、今回開発したモデルにおいては線形回帰モデルが最も性能が良いと考えられる。

4.4 取り組みの結果

同一箇所へ締固めを行った時の α モデルの構築を実施し、締固め結果を平均化するパターンが最も精度が高いことが分かった。また、実工事を想定した $\alpha_{\text{mound}}, \alpha_{\text{all}}$ にモデルを拡張し、各モデルをアルゴリズムで評価した結果、線形回帰モデルが最も精度が高いモデル構築となった。

5. まとめ

これまで捨石の締固めに対する知見を深めるため数々の実験を行い、各締固め装置の性能差と、重錘締固めによる捨石マウンド変位の傾向を確認した。また、重錘締固めによる捨石マウンドの沈下傾向から AI による沈下量予測モデルを構築した。今後、新しく開発した水中捨石均し機に導入し、データを蓄積することで知見を深め、生産性の向上に取り組んでいく。

謝辞：SEADOM-7 建造及びシステム開発、実験等にご協力いただきました三菱重工業(株)、アプリケーションテクノロジー(株)、(株)Iroribi、他、関係者の皆様へ、紙面を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大島昭彦・高田直俊：重錘落下締固めにおける地盤への重錘貫入と衝撃力，土木学会論文集，No.487/III-26，pp.61～67，1994