

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1396 December 2021

水中バックホウによる捨石マウンド本均し作業の遠隔操作化に向けた本均しアタッチメントの提案と性能試験

喜多 司, 平林 丈嗣, 高尾 俊輔, 上山 淳, 金城 寛, 大城 尚紀

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 現状のマウンド均し作業	4
2.1 現在行われているマウンド均し	4
2.2 水中バックホウによる均し作業の遠隔操作化に向けた検討と課題	6
3. 均しアタッチメントの提案	7
3.1 選定要件検討のための水槽での要素試験	7
3.2 要素試験機の数値計算	8
3.3 機構の検討	10
3.4 油圧ブレーカをベースとした装置の採用	11
4. 提案した均しアタッチメントの陸上試験	12
4.1 試験装置の製作	12
4.2 実験での計測項目の検討	12
4.3 実験内容	13
4.4 まとめ	19
5. 提案した均しアタッチメントの実海域での試験	20
5.1 試験の概要	20
5.2 試験の実施	20
5.3 まとめ	25
6. 割石の移動を目的とした均しアタッチメントの機能拡張検討と陸上試験	25
6.1 均しアタッチメントに関する課題整理	25
6.2 陸上試験の概要	25
6.3 陸上試験の結果	27
6.4 まとめ	35
7. まとめ	35
8. あとがき	36
参考文献	36

Proposal and Performance Test of Attachment for Realization of Remote Operation of Rubble Mound Leveling Work with Underwater Backhoe

Tsukasa KITA*
Taketsugu HIRABAYASHI**
Shunsuke TAKAO***
Hiroshi KINJO****
Naoki OSHIRO*****
Atsushi UEYAMA*****

Synopsis

Leveling work of rubble mound is one of the typical work of port construction. At present, this work is mainly carried out by hand by divers. However, it is hard-duty work for divers. Therefore, there are cases where machines are used for the work. One of them is underwater backhoe. In this method, a diver operates the underwater backhoe in the water. There is room to reduce the burden on the diver. To reduce the work load, we studied the possibility of remotely operating the leveling work and identified the problems to be solved. One of the problems is the decrease in work efficiency.

In this study, we propose a new attachment to improve the efficiency of remote control with simple operation. The proposed attachment is based on a commercially available hydraulic hammer. The attachment is installed a pressure plate on the tip of the hammer.

The test device was developed and performance tests were carried out on a full-scale mound model made of rubble on land. The test showed that the machine was capable of leveling the mound surface with a maximum height difference of 400 mm to within that of 200 mm. However, it was confirmed that the system was not capable of leveling areas lower than the target height.

After that, an underwater test in an actual construction field was conducted using an underwater backhoe operated by a diver. As a result, the ability to settle and level the mound in water was confirmed. The performance to push down the mound was about 11 cm in 5 seconds and about 25 cm in 30 seconds. In addition, when the machine guidance system developed by the authors was used in combination, the unevenness mound with a maximum of 150 mm could be leveled within the target unevenness.

In order to solve the problems in the land-based test, a small bucket for moving stones was attached to the test equipment, and a test was conducted on land. As a result, it was confirmed that the proposed attachment can level a mound with a maximum height difference of 600 mm to a target unevenness which has height difference of 400 mm. These results indicate that the proposed attachment is useful for leveling work.

Key Words: port construction, underwater excavator, leveling attachment, sea experiment

* Researcher, Meta-Robotics Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
** Head of Group, Cyber Construction Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
*** Researcher, Cyber Construction Group, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department
**** Professor, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus
***** Associate Professor, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus
***** Kyokuto Construction Co., LTD
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 e-mail:kita-t@p.mpat.go.jp

水中バックホウによる捨石マウンド均し作業の 遠隔操作化に向けたアタッチメントの提案と性能試験

喜多 司*, 平林 丈嗣**, 高尾 俊輔***, 金城 寛****, 大城 尚紀*****,
上山 淳*****

要 旨

捨石マウンドの天端の均し作業は代表的な港湾工事の作業の一つである。この作業は、現在、主に潜水士の手作業で行われているが、潜水士の負担が大きい。そのため、機械を用いた施工も行われている。その1つに水中バックホウによる均し作業がある。この工法は、現在、潜水士が水中で水中バックホウを操縦し作業を行っており、潜水士の負担をさらに軽減する余地がある。そのために、水中バックホウの均し作業の遠隔操作化の実現に向けた課題抽出を行ったところ、作業効率の低下が挙げられた。

そこで本検討では、遠隔操作化を実施した場合の効率向上のため、簡単な操作入力で作業できるアタッチメントの提案する。提案するアタッチメントは、完全に水没した状態で使用することなどから、市販の油圧ブレーカをベースとした。その先端に転圧板を取り付け、叩き均しを行う装置とした。

試験装置を製作し、陸上の実物大の捨石で製作したマウンド模型を対象に性能試験を行った。その結果、最大の高低差 400mm 程度があるマウンド面を目標とした高低差 200mm 以内に均す能力を有していると考えられる結果が示された。なお、課題点として、目標高さよりも低い部分を均す能力がないことも確認された。別種の装置である程度まで均したのちに本機構を使用することが考えられる。

その後、実海域でも、捨石マウンドを対象とした試験を実施した。なお、本試験は潜水士による搭乗操作で実施した。その結果、水中でもマウンドを沈下させ均す能力が確認された。その沈下させる性能は、5秒で 11cm 程度、30秒で 25cm 程度であった。また、著者らが開発したマシンガイダンスシステムと組み合わせ搭乗操作で使用したところ、最大 150mm の不陸を目標不陸以内に収めることができた。

さらに、陸上試験での課題点の解決のため、試験装置に割石を移動させるための小型バケットを取り付け、陸上で性能試験を行った。その結果、最大の高低差 400mm 程度のあるマウンドを叩き均しで目標まで均すことができる程度の不陸に均すことができることを確認した。以上から、提案したアタッチメントが均し作業に有用であることが示された。

キーワード：港湾工事，水中バックホウ，均しアタッチメント，実海域試験

* インフラDX研究領域 メタロボティクス研究グループ 研究官
** インフラDX研究領域 サイバー施工研究グループ長
*** インフラDX研究領域 サイバー施工研究グループ 研究官
**** 客員研究官（琉球大学工学部教授）
***** 琉球大学工学部准教授
***** 極東建設株式会社
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail:kita-t@p.mpat.go.jp

1. まえがき

水中における施工は機械化が進んでいないため、いまだ人力施工が主流であり潜水士への負担が大きい。また視界の悪さや潮流などの海象条件は作業能率を大幅に低下させるだけでなく、危険の察知や回避といった安全性も低下させる。さらに長時間の作業は水圧による肉体への負担が大きいなど、その労働条件は陸上に比べて劣悪である。

潜水士の身体的負担を軽減する点においても海洋工事の機械化を推進すべきであり、同時に安全性の確保に関しても大幅な改善が期待できる。そのため水中建設機械が開発されており、その事例として潜水士が搭乗して操作する水中バックホウの実用化が挙げられる。水中バックホウは、港湾構造物の施工において活用され、主に海水の透明度が高く、周囲の状況確認が可能な沖縄総合事務局管内のマウンドの捨石均し作業で活用されている。搭乗操作での水中バックホウの利用によって、潜水士の手作業による割石の移動が必要なくなり、作業負担が軽減されている。

本研究では、更なる潜水士の負担軽減を目的とした、水中バックホウによる捨石マウンド均し作業の遠隔操作化に向けた要素技術の検討を行った。

2. 現状のマウンド均し作業

2.1 現在行われているマウンド均し

国内の港湾構造物の施設には、混成堤やケーソン式岸壁といった重力式構造物が多く採用されている。この構造形式は、捨石マウンドの上にケーソンやブロックを設置する形式である。この捨石マウンドには、上部構造物の荷重を支持し、また、それを海底地盤に分散させて載荷する役割がある。上部構造物の荷重を面で分散して支持するために、捨石マウンドの天端面は、平たんであることが望ましい。

マウンド造成時には、捨石はガット船や底開式バージ船等により水面付近から投入するが、この際、捨石マウンド天端には不陸が生じる。投入位置の管理によって、不陸を小さくする技術が開発されており、初期不陸を抑えることによる均し作業の効率化がなされているものの、不陸を十分になくすまでには至っていない。また、港湾工事共通仕様書（国土交通省 港湾局 令和3年3月）に定められるように、「捨石マウンドをゆるみのないよう堅固に施工」する必要があるが、船舶からの投入だけではその仕様を満たさないと判断される可能性もある。以上の理

由から、投入後に天端面等を均す作業が行われている。

この均し作業は現在、次のような方法で実施されている。

(1) 潜水士による手作業

主にフーカー潜水の潜水士が、自らの手で捨石を持ち上げる、転がすなどして移動させたり、捨石に玉掛けを行い台船のクレーンで移動させたりする方法である。その状況を図-2.1、2.2に示す。作業中のマウンド高さの管理は、水糸を張って潜水士が確認するなどしている。

その標準均し能力は港湾請負工事積算基準（国土交通省 令和3年3月）によれば、水深などの現場条件によるが、潜水士船1隻当たり11.48m²である。なお、現場条件は仮に、均し区分は本均し、割石質量200kg/個未満、透明度普通、施工規模800m²以上、潮待ち部以外、水深10m未満として計算した。

この工法は、人手による重作業であり負担が大きく、労働環境の改善が望まれている。また、潜水作業であるため、作業水深が深いほど、減圧症防止をはじめとした安全衛生管理のために作業効率が大幅に低下する。積算基準においては、潜水時間中の作業時間の割合に相当する水深区分能力係数は表-2.1のようになっている。



図-2.1 マウンド荒均し作業（±300mm）



図-2.2 マウンド石材の移設

表-2.1 水深ごとの潜水士による作業能力の補正係数

水深区分	補正係数	適用明細
10m未満	0.87	単独潜水方式
10～15m 未満	0.7	
15～20m 未満	0.78	2人潜水方式(交互)
20～25m 未満	0.72	
25～30m 未満	0.57	

※平均干潮面 (M.L.W.L.) からの水深とする。

(2) 重錘式

重錘式では、はじめに、マウンドの設置場所に目標より高めに捨石を投入する。次に、起重機線で重錘を吊上げ、マウンドの均し面の上に落下させる。これを繰り返すことでマウンドを転圧しながら均す工法である (図-2.3)。

作業管理については、近年では、重錘上のシャフトの海上部に、プリズムや GNSS を設置することで、均しを実施した水平位置を確認するとともに、その高さから作業中のマウンド面の高さも高精度に計算することが可能で、均し精度±5cm に対応した施工が可能である。

施工能力については、詳細な条件が不明であるが均し精度±5cm を目標とした均し作業の施工能力が 15.6m²/時で、面積当たりの施工単価は潜水士による手作業と同程度であるという報告がある³⁾。

この工法の利点は、潜水作業が不要であることが挙げられる。そのため、作業者の負担を減らすことができ、また、現場の深度による作業効率の低下が少ない。加えて、機械構成が単純であることから、故障の危険性も他の機械式工法に比べて故障の危険性は小さいと考えられる。

一方、一般に数十 t 以上の質量がある重錘を吊り上げることができる起重機船の確保が難しい場合がある。また、施工規模の小さい現場や遠隔地では、起重機船の回航費等の経費の割合が大きくなり、施工単価が増加することが懸念される。



図-2.3 重錘均しの状況 (文献³⁾ より引用)

(3) タンパ式

タンパ式では、マウンドの均し面にタンパの転圧面を押し当てて、振動による転圧を行い、マウンド面を押し下げることで、均し作業を行う。

この方法を用いた装置に着座型タンパ式装置がある (図-2.4)。この方法の施工では、均し装置及びその架台を、起重機船から吊り下ろし、捨石マウンド上に架台を着座させる。その後、均し装置本体をマウンド均し面に押し付け、タンパを起動することで転圧と均し作業を行う。装置の操作は船上から行われる。

高さ管理については水圧計などを用いて実施しており、均し精度±5cm が達成されている⁴⁾。

施工能力は標準均し面積が約 200m²/日である。

この工法の利点は、急速施工が可能であることが挙げられる。また、潜水作業が不要である。

一方、この工法は、機械質量が 138t と大きく、それを吊り上げられる起重機船の確保が必要となる重錘式と同様の課題がある。

また、バックホウ浚渫船のバックホウのロングアームの先端に水中振動タンパを取り付けた事例もある。このケースでは運転質量が 200t クラスのバックホウが用いられている。



図-2.4 着座型タンパ式捨石均し機 (文献⁴⁾ より引用)

(4) 水中バックホウ式

水中バックホウ式では、手先に取り付けたバケットの背面でマウンド均し面を叩くことで均し作業を行う。現状は、操縦は潜水士が水中の操縦席で行う。この水中バックホウは作業台船からクレーンで投入される。動力源は、台船からキャブタイヤケーブルを介して供給される電源である。機体に設置された水中モータによって油圧ポンプを回転させて、フロント部などの油圧機構を動作させる。この方式は水中電動式油圧駆動方式と呼ばれる。

マウンドの高さ管理については、操縦する潜水士とは別の潜水士が水糸を張って確認するなどしている。作業に伴い発生する濁りにより、搭乗席からはマウンドを叩

いている部分の高さ等の把握が困難となる。そこで、別の潜水士が叩いている部分に近づき、マウンドの状況の確認や操縦の潜水士へ作業指示を行っている(図-2.5)。

この工法の利点は、潜水士の負担軽減である。また、一般的に使われる機械は運転質量が20t程度で、小型のクレーン付き台船での運用が可能である。そのため、小規模な工事でも活用される技術である。また、水中バックホウがマウンド上を自走できることから、既設防波堤の延伸といった周辺に構造物がある作業場所にも導入できる。加えて、水中バックホウは、手先のアタッチメントを交換することで、砕岩や浚渫といった他の工種でも使用できることから、機械自体の稼働率も確保できる。以上のように利点が多く、普及が期待される。

一方、この工法の課題は、潜水士による水中作業が必要となる点である。また、バケットの背面を水平にマウンドに押し付けなければ、均し面が斜めになってしまう均しの許容範囲内に収まらなくなる危険性がある。

本検討ではこれら課題を解決すべく、船上からの遠隔操作による水中バックホウで捨石マウンドの均し作業を実施するための課題の抽出を行った。



図-2.5 水中バックホウによるマウンド均しの状況

2.2 水中バックホウによる均し作業の遠隔操作化に向けた検討と課題

(1) 作業の遠隔操作化の実現のための検討

現状、図-2.5のように2名の潜水士がそれぞれ、マウンドの状況把握と、水中でのバックホウ操縦の作業を行っている。遠隔操作化に向けては、これらの作業を代替する必要がある。

1つ目の作業として挙げたマウンドの状況把握は、著者らが以前に開発した水中マシンガイダンスシステムを用いることで解決が可能である(図-2.6)。水中マシンガイダンスシステムとは、水中バックホウのバケットの水平位置、マウンドの高さをセンサによってリアルタイム

に取得し、設計図面データとの高さの差分を表示することでバケットを誘導するシステムである。このシステムにより、プロファイルソナーを用いた機体周辺のマウンド形状の計測と、バケットの接触している部分のマウンドの高さの計測が可能となる。

2つ目の作業として挙げた水中での操縦作業については、船上からの遠隔操作を行うことで対処する。

ここで、他の工種の水中バックホウの遠隔操作の事例として、放水口のつまりを防止するための堆積土砂の浚渫に遠隔操作で使用される水中バックホウ「イエローマジック」について調査した(図-2.7)。イエローマジックは0.28m³級の水中バックホウで、上部旋回体上に設置されたサンドポンプで浚渫を行う⁵⁾。操縦者は、支援船上などにある操縦席から操縦を行う。周囲の状況は音響カメラで計測し、操縦席のモニタに表示される。また、機体の姿勢や振動などは体感装置によって、機体と同様の状態が操縦席に再現される。操作入力は、ケーブルを介して、操縦席から機体まで電気信号によって伝達される。その信号が、油圧系統に取り付けられた電磁比例弁を操作し、パイロット油圧を調整する。それによって、メイン操作バルブユニットを開閉している。この方法は他の遠隔操作型バックホウにも用いられている。本件でも、この事例と同様の方法で遠隔で操縦作業を実現できる。

以上の検討から、船上からの遠隔操作による水中バックホウで捨石マウンドの均し作業の実現自体は可能であると考えられる。

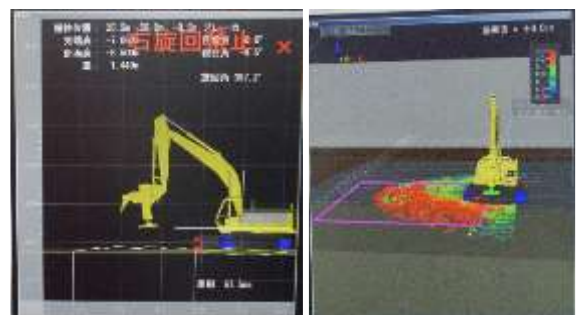


図-2.6 水中マシンガイダンスシステム表示画面



図-2.7 水中バックホウ「イエローマジック」
(文献⁵⁾より画像を引用)

(2) 作業の遠隔操作化の課題

鮮明な光学映像を利用できる陸上遠隔操作においても作業効率が60%程度に低下するといわれており、実験などでそれを支持する研究結果も示されている⁷⁾。この原因の1つとして「テレビモニタによる視認性等によるものが考えられる」と指摘されている。対象地形の目視情報が得られず、比較的不鮮明なプロファイルソナーによる計測結果で代替する水中では、その作業効率がさらに低下することが懸念される。

この課題を解決しなければ、遠隔操作による水中バックホウで捨石マウンドの均し作業の普及は見込めない。そこで、操作入力と状況判断を単純化することで、遠隔操作化による効率の低下を抑制することとした。そのために、単純な入力でも均し作業を可能とするアタッチメントについて検討を行うこととした。

3. 均しアタッチメントの提案

本検討では、前章に挙げたタンバ式の均し装置のように、起震機構等を押す付けることで均し作業を行うアタッチメントを提案することとした。この方式を採用する利点に、操作入力が簡略化されることが挙げられる。従来の水中バックホウによる均し操作では、マウンドを叩くたびに、その背面を水平にする必要があった。そのため、オペレータは、常時、ブーム、アーム、バケットの各油圧シリンダをコントロールレバーで微調整する必要があった。一方、提案する方式では、起震機構等を最初に押し付ける際には従来と同様の操作が必要であるが、その後はペダルを踏んで機構を動作させる操作入力でも均し作業が行えるため、操作が簡略化される。

3.1 選定要件検討のための水槽での要素試験

提案する方式のアタッチメントに起震機構を採用する場合、振動による水中での挙動を検討する必要がある。この場合、アタッチメントのマウンドに接する部分である転圧板が振動する。水中では、気中に比べ、周囲の流体による流体抵抗の影響が大きく性能低下が懸念される。機構の選定要件を検討するためには、この特性を把握する必要がある。そこで、陸上の工事で幅広く使われるランマをベースとした均し作用の要素試験装置を作成し、鋼製水槽内で要素試験を実施した。改造は、ランマの下部に鉄製の平板を取り付けて、転圧板とするものであった。なお、転圧板の大きさは0.283m×0.424m、厚さは20mm、質量は18.8kgとした、図-3.1に概略寸法を、図-3.2に状況を示す。

なお、水槽内は、振動を水槽鋼材に直接作用させないように、図-3.3のように砕石等を設置した。

要素試験では、起震機構は気中にある状態で起震装置を動作させ、転圧板が水中、気中にある場合それぞれについて、転圧板、機構本体の振幅・周期を計測するものとした。

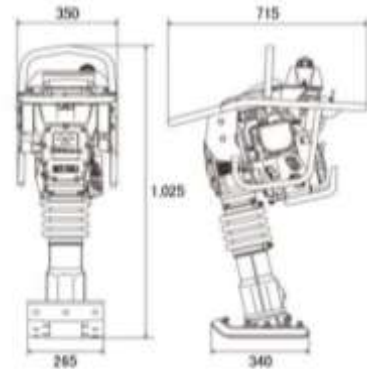


図-3.1 実験に使用したランマの外形寸法



図-3.2 ランマの設置状況

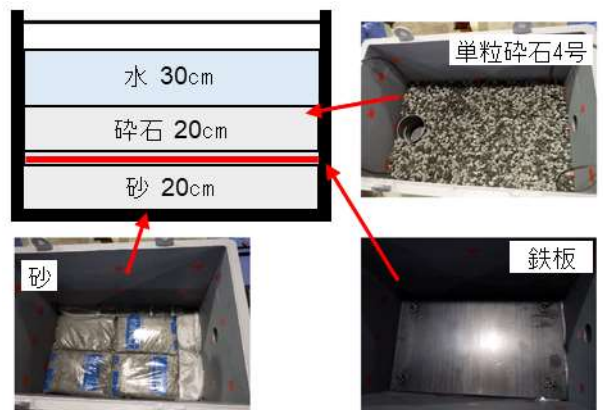


図-3.3 鋼製水槽内の配置

ここで、転圧板を取り付けたランマを試験運転した結果、転圧板だけでなくランマ本体とランマを固定するフレーム部は防振ゴムにより縁が切れていることから、各々が独立して振動した。そのため計測点は、フレーム部、ランマ本体部、起震板部の3点の上下動の計時変化を計測するものとした。

計測方法は、計測ポイントに定規を取り付け、HD画質のハイスピードカメラ(239.76fps:秒間約240コマ撮影)で動作状況を撮影し、水糸と交差する目盛りを読み取ることで上下動の振幅を計測するものとした。

実験結果を表-3.1に示す。水中の方が、転圧板は振幅が小さく、機構側は振幅が大きくなることが確認された。この結果から、以下のことが示された。

- ・ 気中に比べて水中では起震機構を動作させた際の転圧板の振幅が減少することが示された。
- ・ マウンドに伝達される力が減少し、叩き均しの能力が低下する可能性が示された。
- ・ 起震機構部の振幅が増加することが確認された。
- ・ 起震機構に接続させる水中バックホウのアームにも大きな振動が増加することで、反力の増加や、機構への悪影響の危険性がある。

表-3.1 ランマ試験機の振幅の変化

条件	周波数[Hz]		振幅[mm]	
	本体	転圧板	本体	転圧板
水中	11.43	11.32	13.65	7.30
気中	11.43	11.48	12.82	10.23

3.2 要素試験機の数値計算

起震機構による締固め装置についての数値計算として、ランマ式の締固め装置の数値モデルを作成し、気中と水中での性能の違いを検証した。

(1) 要素試験装置の数値計算モデル

図-3.4にランマの構造モデル図を示す。 m_1 はランマの転圧板質量、 m_2 はランマ本体の質量であり、 k はランマのばね定数、 x_k はばねの自然長である。 k' は地盤反力係数で、 c' は地盤粘性減衰係数である。なお、締固まることで地盤の係数が変化することがある。しかし、気中と水中での装置性能を比較するうえでは、沈下量の大小を逆転させるものでないと考えられるため、定数として扱う。また、 c_1 、 c_2 は流体の抗力係数、 m_{a1} 、 m_{a2} はそれぞれ転圧板と本体の付加質量である。転圧板、機体本体および地面の座標をそれぞれ x_1 、 x_2 、 x_0 とする。地面 x_0 と転

圧板 x_1 の初期位置はともに0mである。ここで図-3.4中aは空気中でのモデル、bは水中でのモデルである。

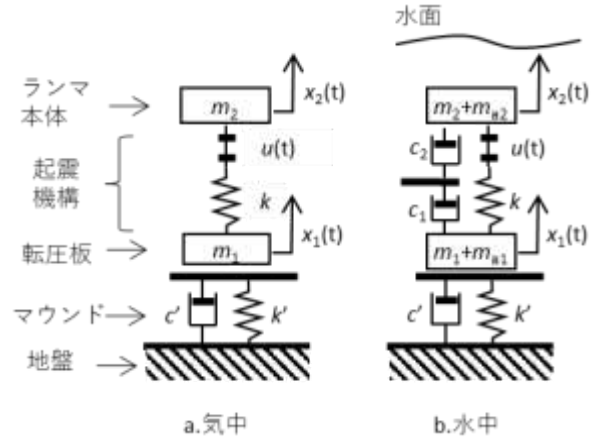


図-3.4 要素試験装置のモデル図

次に本研究で扱う数学モデルを示す。空気中での力学的な関係は次式のようにになる。

$$m_1 \ddot{x}_1(t) = k\{(x_2(t) + u(t)) - x_1(t)\} - kx_k - k'x_1(t) - c'\dot{x}_1(t) - m_1g - m_2g \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) = -k\{(x_2(t) + u(t)) - x_1(t)\} + kx_k - m_1g - m_2g \quad (2)$$

ここで、 $u(t)$ は、ランマを駆動するエンジンの入力変位であり、一般に $u(t) = p_0 \sin \omega t$ である。また、先行研究を参考にし、地盤反力係数 $k' = 10000 \text{ kN/m}$ 、地盤粘性減衰係数を $c' = 2D\sqrt{m k'}$ とした⁸⁾。ここで、 $D = 0.4$ 、 $m = (m_1 + m_2)$ である。水中での力学的な関係は次式のようにになる。

$$(m_1 + m_{a1}) \ddot{x}_1(t) = k\{(x_2(t) + u(t)) - x_1(t)\} - kx_k - c_1|\dot{x}_1(t)|\dot{x}_1(t) - k'x_1(t) - c'\dot{x}_1(t) - mg \quad (3)$$

$$(m_2 + m_{a2}) \ddot{x}_2(t) = -k\{(x_2(t) + u(t)) - x_1(t)\} + kx_k - c_2|\dot{x}_2(t)|\dot{x}_2(t) - mg \quad (4)$$

このときの転圧板とランマ本体の抗力係数 c_1 、 c_2 を、 $c_1 = 1/2 CD_1 \rho S$ 、 $c_2 = 1/2 CD_2 \rho S$ とする。また、それぞれの抗力係数は $CD_1 = 1.12$ 、 $CD_2 = 1.05$ である。転圧板およびランマ本体の単位長さ当たりの付加質量は、流体の粘性と圧縮性を無視しポテンシャル流と仮定すると $m_{a1} = \pi \rho (l_1/2)^2$ 、 $m_{a2} = \pi K \rho (l_2/2)^2$ で表される。ここで、 $K = 1.6$ 、 l_1 、 l_2 は転圧板およびランマ本体の水平面の一辺の長さ、 ρ は水の密度、 π は円周率である。また、転圧板が地面から離れる際には地面からの反力(転圧板に働く x 方向正の力)は働かないので、数値計算の際に式(1)、(3)の k' および c' を0とした。

(2) 数値計算結果

表-3.2 に数値計算に使用したランマのパラメータを示す。また、図-3.5, 6 に空気中および水中でのランマの振動波形を示す。縦軸は本体、転圧板の位置を表しており、横軸は振動開始からの時間を示している。計測時間は、すべて 20 秒間とした。また、初期位置 0m の地面が沈み込んだ深さにより締固め度の評価を行った。

図-3.5, 6 より、水中では流体抵抗により振幅が小さくなっていることがわかる。また、地面の沈下量は空気中で 0.0457m, 水中で 0.0233mとなっていた。

表-3.2 数値計算のパラメータ

項目	記号	単位	値
転圧板質量	m_1	[kg]	8
ランマ本体質量	m_2	[kg]	52
ランマばね定数	k	[N/m]	11,000
転圧板の一辺長さ	l_1	[m]	0.3
ランマ本体の一辺長さ	l_2	[m]	0.2
入力値(振動周波数)	ω	[rad/s]	12

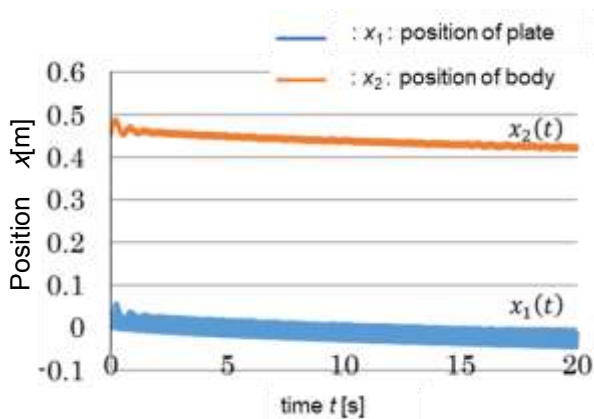


図-3.5 空気中での振動波形

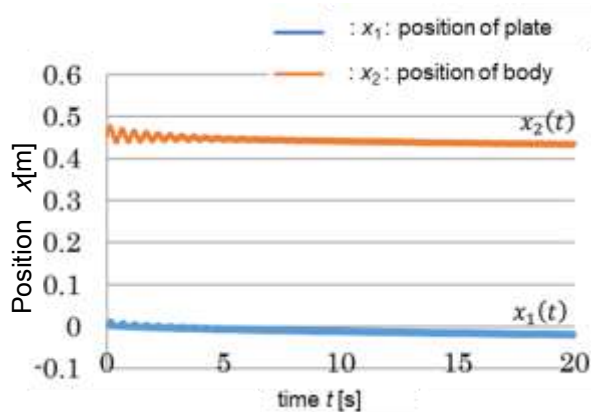


図-3.6 水中での振動波形

水中においては、地面の沈下量が空気中の 51%程度であった。さらに、表 1 のパラメータを基準として、角周波数、転圧板の面積をそれぞれ変更(変更するパラメータ以外はすべて固定)していき、地面の沈下量との関係を検証した。それぞれの結果を表-3.3, 4 に示す。

表-3.3 角周波数と地面沈下量

角周波数 ω [rad/s]	12	15	19
気中 [cm]	4.57	3.87	3.46
水中 [cm]	2.33	2.05	1.87

表-3.4 転圧板の大きさと地面沈下量

一片の長さ[cm]	10	30	50
沈下高さ [cm]	4.21	2.33	1.27
沈下体積[cm ³]	421	2097	3175

表-3.3 より、水中の方が沈下量が小さくなっていた。また、空気中および水中どちらにおいても、角周波数を大きくしていくと振幅および地面の沈下量は小さくなる傾向がみられる。

さらに、表-3.4 より、転圧板の面積が大きいほど流体の抵抗を受け、地面の沈下量は小さくなった。ただし、作業効率で考えれば、作業効率は、時間当たりに沈下させた高さだけでなく、作業一回当たりの面積も考慮する必要があることから、マウンドが沈下した高さに転圧板の面積をかけた、沈下体積で評価すると、試験で設定した条件の中では、転圧板の面積が大きい板程、作業効率が大きくなる傾向であった。

(3) まとめ

今回ランマの叩き均し性能について、空気中と水中を数値計算で比較し検討を行った。その結果、以下の特性が示された。

- 要素試験と同様に、気中に比べて水中では起震機構を動作させた際の転圧板の振幅が減少することが示された。
- 気中に比べ水中での叩き均しの性能は低下することが示された。
- 振動の周波数が高いほど、叩き均し性能が低下することが示された。
- 転圧板の大きさが大きいほど、マウンド高さの沈下は小さくなることが確認された。
- 転圧板の大きさが大きいほど、作業効率が高くなる可能性が示された。

3.3 機構の検討

ここまでの検討で、機構周りの水の流体抵抗により、叩き均し性能が低下することが示された。加えて、振動周波数が大きいほど、その影響が大きいことも示された。

その他の機構の条件としては、完全に水没した状態で使用が可能であることが挙げられる。また、実工事で使用することを想定し、メンテナンス性がよく、故障した場合にも迅速に代替品を入手できる必要があることなどを考慮して市販品（または市販品をベースとした簡易な改造）であることも必要となる。そこで一般的に使用されている起震装置について調査を行い、均しアタッチメントの機構への転用について考察を行った。

(1) 油圧ブレーカ式

油圧ブレーカは図-3.7 に示すように、ブレーカ内部のピストンを油圧により上下させるとことで、ロッドを打撃し、その衝撃力を対象物に伝達する。水中で使用する際にはロッドとピストンの間には、エア・コンプレッサにより、高圧の空気が供給されており、唯一の駆動部となるピストンは水による流体抵抗を受けない。また、対象物へは応力波として力が伝達される。そのため、水中でも高効率で運用が可能であると想定される。

なお、油圧ブレーカについては、水中バックホウに取り付けて使用した実績があるほか、ダム岩盤掘削にも使用されており、適応性は高いと言える（図-3.8）。

(2) バイプロ式

バイプロの起振機内部で 2 つの偏心重錘を高速回転することで、上下方向に振動力を発生させる方式である（図-3.9, 10）。水中で使用する際には起振機内部には、エア・コンプレッサにより高圧の空気が供給されている。本方式では、起振機も上下に振動するため、水の流体抵抗による影響を比較的受けやすいと考えられる。なお、水中用のものやバックホウに取り付け可能な陸上用のものが製品としてある。

(3) 油圧式パイルハンマ式

重錘を油圧により押し上げた後、落下させて衝突させることで、対象物に力を伝達させる方式である。こちらもピストンの可動室内に吸気することで、油圧ブレーカ式と同様に水中利用できることが想定される。ただし、対象物への力の伝達は重錘の運動量によるため、重錘は流体抵抗を受け、水中では気中に比べ施工能力の低下が発生すると考えられる。また、バックホウ用のアタッチメント、機構部を水中に沈めての使用は確認されなかった。

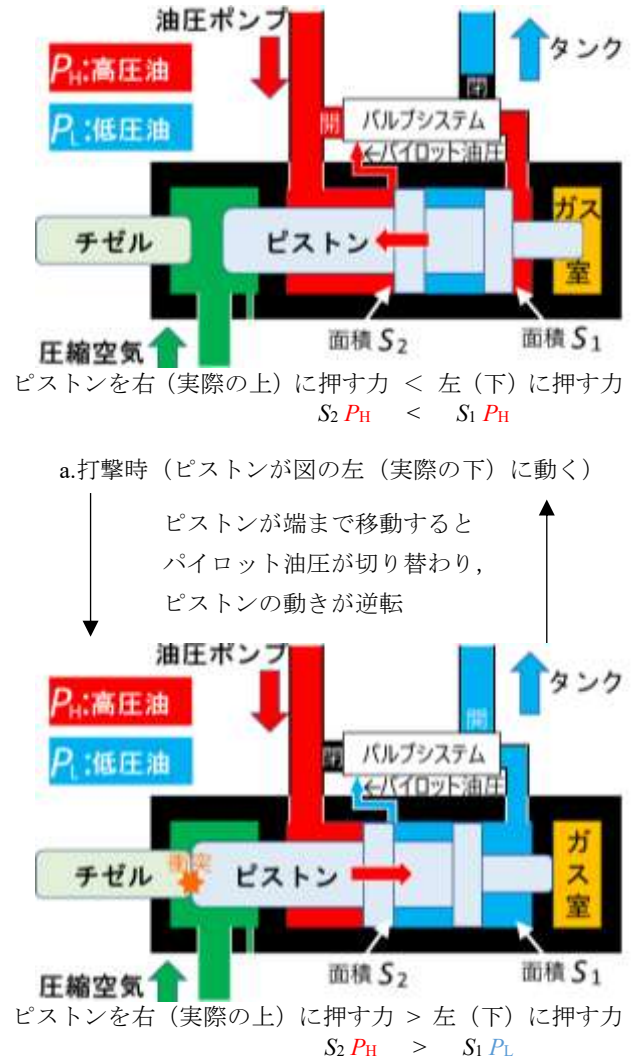


図-3.7 油圧ブレーカの作動原理のイメージ図



図-3.8 水中バックホウに装着された油圧ブレーカ
 （あおみ建設株式会社 HP より画像を引用）
 （引用元：<https://www.aomi.co.jp/tech/civil/biggrab.html>）



図-3.9 水中用パイプロハンマー
(調和工業株式会社 HP より画像を引用)
(引用元：<http://www.chowa.co.jp/methods/ss60ws.html>)

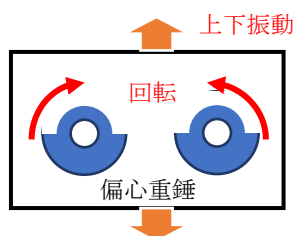


図-3.10 パイプロハンマーの作動原理のイメージ

3.4 油圧ブレーカをベースとした装置の採用

本章ではこれまで次の要件で均しアタッチメントの検討を行った。

- ・少ない入力操作で均し作業を行えるように、起震機構等を活用する均しアタッチメントを製作することとした。
- ・機構は、水中で使用可能なものを用いる必要がある。
- ・実工事での使用を想定し、メンテナンス性・入手性の高いアタッチメントとする必要がある。
- ・市販品をベースもしくはそれを改造したものが望ましい。
- ・捨石の叩き均し作業は、振動回数が少ない機械が向いていると考えられる。
- ・気中と比べ水中では、水の抵抗の影響で転圧板の振幅が小さく、また、本体側の振動が大きくなることに留意する必要がある。

そこで、本検討では、前項で挙げた機構のうち、市販品が水中工事でも使用されている油圧ブレーカをベースとした均し機構を開発することとした。

極東建設が過去に試験的に使用した叩きならし機構を

参考に、油圧ブレーカのロッドの先端に転圧板を設置し、ロッドの衝撃力を分散してマウンドに伝えることで、マウンドの叩き均しを行う装置とする。

なお、ベースとした油圧ブレーカの特長上、この叩きならし装置は、次のような手順で使用する必要がある(図-3.11 参照)。

- ①均し作業を行う対象地盤に転圧板を水平に押し当てる。
- ②さらにブームを下げ、バックホウのクローラ前端を浮き上がらせる。(フロントリフト)
- ③油圧ブレーカを作動させ、地盤を打撃する。
- ④フロントリフト量が減少し、転圧板角度に変化があった場合は、転圧板を水平にする。

②でフロントリフトさせる理由は、油圧ブレーカ作動中は常に対象物と転圧板を接触させるためである。押し付けることをしなかった場合、転圧板と対象物との間に空隙ができ、衝撃力がブレーカ本体やチゼルロッドの抜け止めピンに作用し損傷する危険性がある。それを“空打ち”といい、油圧ブレーカには一般に“空打ち防止機構”が搭載されている。

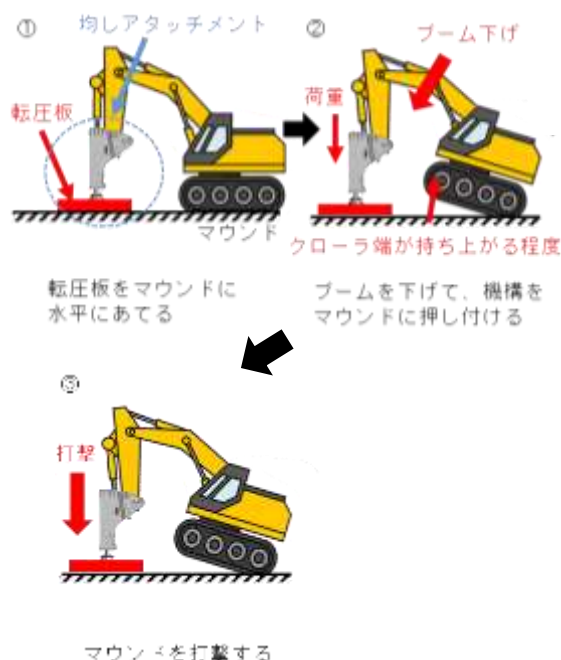


図-3.11 均しアタッチメントの使用手順

4. 提案した均しアタッチメントの陸上試験

提案した均しアタッチメントの性能を確認するため、陸上で捨石マウンドなどを対象に模擬作業を行うなどして、性能を検証した。

4.1 試験装置の製作

実験に使用する資機材は、油圧ブレーカの打撃力や、石の空隙率や割石固体の強度を考慮した縮尺模型の製作が困難であるため、実物大の模型での試験が望ましい。そのため、水中バックホウ実機 (TKM200-9 号機) に設置可能な油圧ブレーカ (古河ロックドリル社製 Fxj275) をベースにした試験装置を製作した。その写真を図-4.1 に示す。また、概略寸法を図-4.2 に示す。

転圧板については、入手性と経験から厚さ 32mm の鉄製の平板を用いることとした。



図-4.1 油圧ブレーカをベースとした均し試験装置

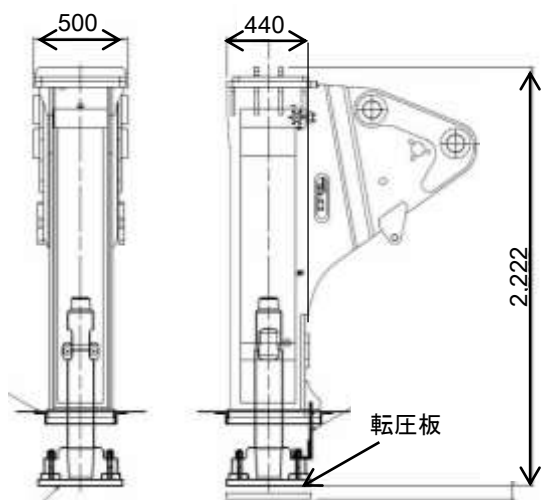


図-4.2 試験装置の概略寸法図 (単位: mm)

4.2 実験での計測項目の検討

基礎マウンド均しを想定した際、重要な点は単位時間当たりの作業面積 (作業効率) と単位時間当たりのマウンド沈下量 (機構の性能) と考える。これらはマウンド築造に用いられる割石のサイズや形状に大きく影響されることから、実マウンドを模擬した試験を実施する必要がある。

ただし、水中での模擬マウンド築造は作業負担が大きく、また沈下量計測についても困難であるものと予想されるため、これらの実験は気中で実施し、試験装置の打撃力について気中と水中で比較することとする。

以上をふまえ、本実験では下記の三種類について計測試験を行う。

- ・打撃経過時間に対する沈下量計測
- ・単位時間当たりの均し面積
- ・気中と水中での打撃力・打撃回数の比較

次に具体的な計測方法の検討を行った。

(1) 沈下量計測

マウンドの沈下量を計測する方法として、転圧板の高さを計測し、推定する方法を採用した。マウンドに転圧板を押し付けた状態で装置の動作を止めて、転圧板の天端高さをオートレベルとスタッフなどを用いて計測することで、マウンドの沈下量を計測することとした。

(2) 時間あたりの打撃の回数

時間当たりの打撃の回数を計測する方法として、実験のビデオ映像の解析を行うこととした。試験装置の打撃回数は、ベースマシンの最大の打撃数が 550 回/分であることから、一般的な速度で撮影したビデオ映像から、打撃回数の確認が可能である。

(3) 試験装置の打撃による衝撃力の計測方法

試験装置の打撃によりマウンドに作用する衝撃力を計測する方法として、以下の3つの方法を検討した。なお、実験では、下に示す被打撃部にセンサを設置する方法を採用し、被打撃部に設置した油圧ジャッキの油圧変化の大きさから、陸上と水中での本機構の打撃力の比較を行うものとした。

- a) ロッド部分にひずみゲージを貼り、ひずみ量から応力を算定する方法

ひずみは応力波として伝達される。その波長は衝突する物体 (ピストン) の長さとなるため、計測には、ロッド

の長さが1m程度必要となる。それより短いと、ロッド先端からの反射波と応力波が重なり正しく計測できない。本装置はロッドが短く、この方法では計測出来ない。

b) 被衝撃部にセンサを設置する方法

実験での計測ではマウンド模型に、計測装置を設置することが可能である。打撃力については、被衝撃部を油圧ジャッキで支持し、打撃したときの油圧ジャッキの油圧変化から打撃力を推測することができる。ただし油圧ジャッキのホースが膨らむなどで、計測の応答性が悪化することが想定される。

そこで、陸上で油圧の計測を行うとともに、水中でも油圧の測定を行い、衝撃力の大きさを推定、比較することが考えられる。

4.3 実験内容

実験は、沖縄県名護市安和鉱山で実施した。実験は陸上で行われるため、水中バックホウ実機と同クラスである運転質量 20 t クラスの通常のバックホウ住友建機 SH200 に製作した試験装置を搭載し実験を実施した。バックホウに取り付けた試験装置の状況を図-4.3 に示す。

(1) 転圧板の面積と打撃時間に対する沈下量の計測

a) 実験の実施

陸上でマウンドを、面積の違う転圧板を設置した試験装置で叩き、沈下量の時系列変化を計測した。

実験の目的は転圧板の面積の違いによるマウンドの沈下量、作業効率の変化を関係づける。また、その結果から最適な面積の転圧板を選定する。

実験の方法は、陸上で、5秒間、試験装置でマウンドを叩き、停止・計測を行った。それらの作業を同じ場所に繰り返し行う。計測では、転圧板の高さの変化を計測した。沈み込み量が一定になるまでの計測を1回として、面積の異なる三種類の転圧板(450mm角, 600mm角, 900mm角)についてそれぞれ3回ずつ、計9回の計測を行った。

なお、転圧板の大きさについて最小の450mm角板は油圧ブレーカ本体の大きさ程度とした。最大の900mm角板は作業時に転圧板を水平にする場合にも、実際には微小な傾きは残る。例えば1度傾きが残れば、この大きさの板では前後端で約2cmの高さの差が生じる。水中バックホウの操作経験者との協議で900mm角板が限界と判断した。

転圧板の大きさは、使用した転圧板を図-4.4に、実験のイメージ図を図-4.5に、実験の状況を図-4.6に示す



図-4.3 バックホウに取り付けた試験装置



図-4.4 実験で使用した転圧板(左から450mm角, 600mm角, 900mm角)



図-4.5 沈み込み量計測実験のイメージ図



図-4.6 沈み込み量計測実験の状況

なお、模型のマウンドは、沖縄本島での港湾工事で用いられるものと同じ材質、大きさの質量 5~200kg/個の捨石で作成した。高さは 1.5m とし、天端面はおおよそ 5m×10m で転圧板に対して十分大きくした。具体的には、実施した 9 回の計測で、転圧板の接地箇所が重ならず。かつ、作業の振動で、マウンドの肩部や、既に転圧板で均した箇所が振動で崩れないように、それらから距離をとって試験を行えるような広さであった。また、実験前の天端面の不陸を±20cm に設定した。

計測項目は次の通りとした。

- ・マウンドの沈み込み量(計測の様子を 図-4.7 に示す)
- ・ビデオ映像の撮影

また、実験条件は次の通りとした。

- ・板ごとに 3 回 (計 9 回)、計測を実施
- ・作動油圧流量 $Q = 142 \text{ L/min}$,
- ・作動油圧 $P_o = 18 \text{ MPa}$
- ・ガス圧 $P_g = 1.23 \text{ MPa}$
- ・初期姿勢はブレーカ、アームがマウンドに垂直
- ・装置の推力を一定にするため履帯前部を浮かせる。

b) 実験の結果

実験結果として、実験での沈下の様子として、450mm 角板でマウンドを打撃したときの沈下状況を 図-4.8 に示す。また、沈み込み量の計測結果を 図-4.9 に、作業効率の評価結果を 図-4.10 に示す。

なお、作業効率とは、沈下の速度に転圧板の面積をかけた、時間あたりにマウンドを沈下体積で評価した。

試験装置で今回設置した 450mm 角~900mm 角のすべての転圧板で、沈み込みが収束せず、最終的に一定のペースで沈み込んでいく傾向を確認した。これは、本試験における沈下が、割石どうしのかみ合わせの変化、締固めが継続的に変化しているものを考えられる。

450mm、900mm 角の転圧板で打撃を続けたところ、それぞれ、15 秒より後の沈下量が一定となっていた。なお、計測データが 3 回、10mm の範囲の中におさまった時点で定常となったものと判断した。実験では、15 秒以降は初期状態の影響が少なくなるものとし、計測については、20 秒までとした。沈下量については、同じ面積の転圧板を用いた実験においても、最初の 5 秒の沈下量が最大 55% のばらつきがあった。捨石マウンドの初期状態による影響が大きいと考えられる。その後、叩き時間が 15 秒を超えた後の沈み込み量のバラツキは最大 37% となった。



図-4.7 沈下量計測実験の計測の様子

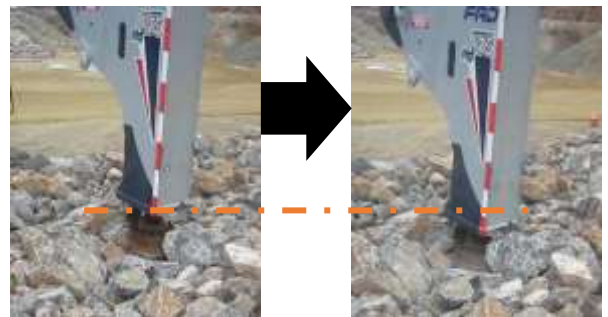


図-4.8 打撃による沈下の状況(左開始時,右:5秒後)

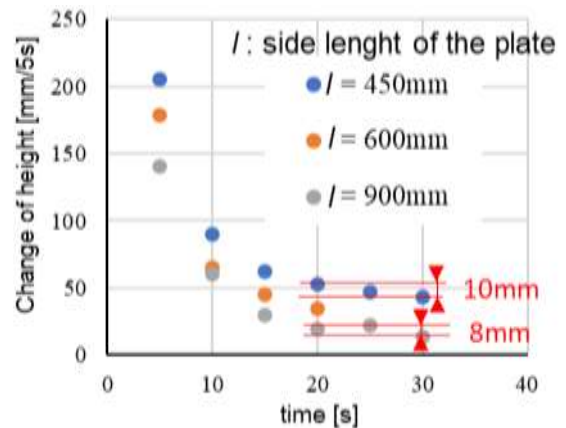


図-4.9 打撃による沈下の計測結果

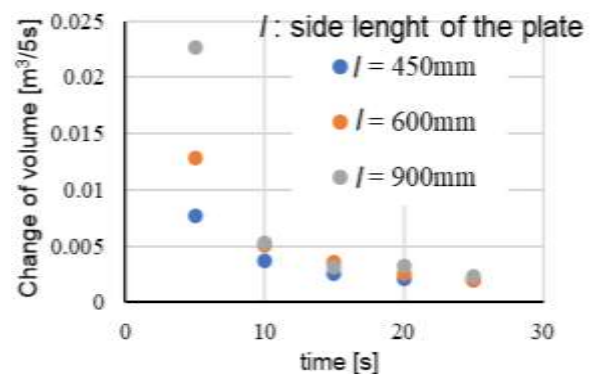


図-4.10 作業効率の評価結果

作業効率の最も高い面積として、900mm 角の転圧板を選定した。なお、転圧板の評価については、初期状態の影響を無視するため、沈下量が一定となつてからの沈下量と、転圧板の面積をかけた作業効率とした。作業効率はおおよそどの転圧板も $0.002\text{m}^3/\text{s}$ 程度であったが 900mm 角板が $0.0023\text{m}^3/\text{s}$ と最も高かった。加えた、転圧板の面積が広く、捨石に作用する圧力が最も小さくなり、捨石の破砕が少なくなることが期待された。

なお、今回用いた転圧板は、厚さ 32mm の鋼板であった。600mm 角の転圧板では実験後、転圧板に反りが生じた(図 4-11)。ただし、現段階では、施工に大きな影響が生じる反りではなかった。この反りが水中での使用で大きくなるのであれば、上面にリブを設ける補強などの対策が必要となる。

また、900mm 角板では装置本体と転圧板をつなぐボルトが、作業中に破断した(図-4.12)。岩の凹凸により荷重が不均等に転圧板に作用したことによるモーメントや、横滑りの際のせん断力が生じたため破断したものと考えられる。今後の設計において注意が必要となる。今回は、破断しなかったボルト締めに加え、溶接を行い、強度を高めた(図-4.13)。

(2) 単位時間当りの均し面積

a) 実験の実施

陸上のマウンドを対象に、実作業を模して、面的に連続して均し作業を行い、作業時間を計測した。

この実験の目的は、作業面積と作業時間から、均し装置を垂直に押し付ける作業、移動なども考慮した均しアタッチメントの作業時間を計測することである。

実験方法は陸上で、 $2.4\text{m} \times 8.8\text{m}$ の作業範囲中すべてで均し作業を終えるまで、連続して均し作業を行った。均し作業については、不陸を $-20\text{cm} \sim +20\text{cm}$ の状態から、高さの高い場所を 20cm 下げることによって $-20\text{cm} \sim 0\text{cm}$ の範囲にすることで不陸 $\pm 10\text{cm}$ と同程度のばらつきとすることを目標に。前項の結果から一か所 10 秒で全面を均すものとした。バックホウはいわゆるカニ歩きで横行しながら、均し作業を行った。バックホウの位置については、マシンガイダンスシステムの代わりに作業指示者が指示を行うものとした。実験方法のイメージ図を図-4.14 に、実験実施の状況を図-4.15 に示す。

模型のマウンドは、沖縄本島での港湾工事で用いられるものと同じ材質、大きさの質量 5~200kg/個の捨石で作成した。高さは 1.5m とし、天端面はおおよそ $5\text{m} \times 10\text{m}$ で、作業範囲内を均しても、法肩が崩れることはなかった。



図-4.11 転圧板に生じた反りの様子



図-4.12 ボルトの破断状況



図-4.13 溶接後の転圧板



図-4.14 作業時間計測実験のイメージ図

計測項目（計測方法）は次の通りとした。

- ・作業前後の不陸（オートレベルを用い0.8m間隔のメッシュ上に高さを計測。）
- ・ビデオ撮影（全体、映像から作業時間を読みだす）

また、条件は次の通りとした。

- ・実験回数は1回とした
- ・作動油圧流量 $Q = 142\text{L/min}$,
- ・圧力 $P_o = 18\text{M Pa}$,
- ・ガス圧 $P_g = 1.23\text{M Pa}$.
- ・転圧板は900mm 角板

b) 実験の結果（作業時間）

実験の結果として、実験前後のマウンド天端の状況の変化を図-4.16, 17 に、捨て石の変化の状況を図-4.18, 19 に示した。陸上の試験では、打撃によって、砕石が砕けることが確認された、水中では、ランマの検討結果と同様に、打撃力が低下することが想定されることから、捨て石が砕けない可能性があるが、十分に留意する必要がある。

今回、実験を行った結果作業に要した時間は16.8分であった。陸上での作業効率は $1.25\text{m}^2/\text{分}$ であった。そのうち、バックホウの位置合わせ（移動）にかかった時間が7.0分、試験装置をマウンドへ押し当てるのに必要な時間が5.6分、均し作業自体が4.8分であった。

水中での作業時間を推定する場合には、位置合わせの時間は、マシンガイダンスシステムを用いて水中の任意の位置にバックホウを移動させるのに必要な時間を計測し、陸上で作業指示者による指示で同様の移動を行った場合と比較することで補正を行うことが可能であると考えられる。



図-4.15 作業時間計測実験実施の状況



図-4.16 作業前のマウンドの天端の状況



図-4.17 作業後のマウンドの天端の状況



図-4.18 作業前の捨て石の状況



図-4.19 作業後の捨て石の状況

また、試験装置をマウンドへ押し当てる時間については、作業としては、試験装置の向きを調整しマウンドへ押し当て、バックホウの履帯全部を持ち上げて試験装置の推力を確保するために必要な時間であった。試験装置を押し当てた際に、捨石が推力で移動するなどして、試験装置が横滑りすることが多く見受けられた。

均し作業の時間については、マウンドの状態によって作業時間が異なる。実際の水中の捨石マウンドと、今回陸上で模擬的に行ったモデルの捨石マウンドモデルでは、製作方法が違うため、マウンドの不陸の分布具合の再現はできていない。マウンドの状態による補正については、今後、実現場での実証試験で集められたマウンドの形状データと、(1)の実験結果から均しに必要な時間を算出し、補正を行う必要がある。気中と水中の補正については、(3)の実験で計測を行った気中と水中での衝撃力の大きさの違いから推定が可能であると考えられる。

c) 実験の結果 (マウンドの高さの変化)

本作業によるマウンドの高さ変化の様子を図-4.20、図-4.21に示す。なお、図-4.20は、縦軸がバックホウ側の作業範囲の端を0mとした前後方向距離、横軸はバックホウ左右方向で作業範囲の左端を0mとした距離である。図-4.21は左右方向断面の高さ分布の変化である。

均しの精度については、作業前の最大の高低差が40cm程度であったのに対し、作業後は20cm程度になった。

なお、作業後の不陸計測については、作業範囲の端の計測点では、均し作業後、作業範囲外の高いところにある石

が転がり込んできて計測できなかったため除外した。

また、高さの変化については、作業前の平均値を基準に、最高点が+172mm から-46mm になり、機構の効果があつた。一方、最低点は-230mm から-229mm に変化したのみであった。本機構の特性として、目標高さよりも低い部分を高くする施工能力はほとんど確認できなかった。

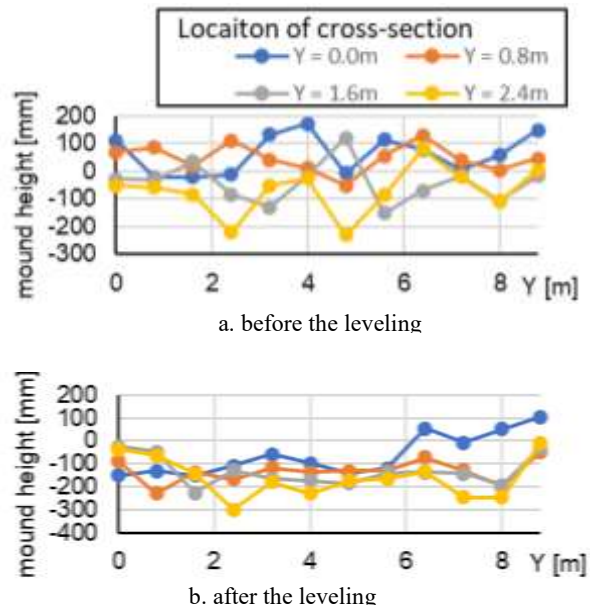


図-4.21 実験前後のマウンド断面の状況の変化

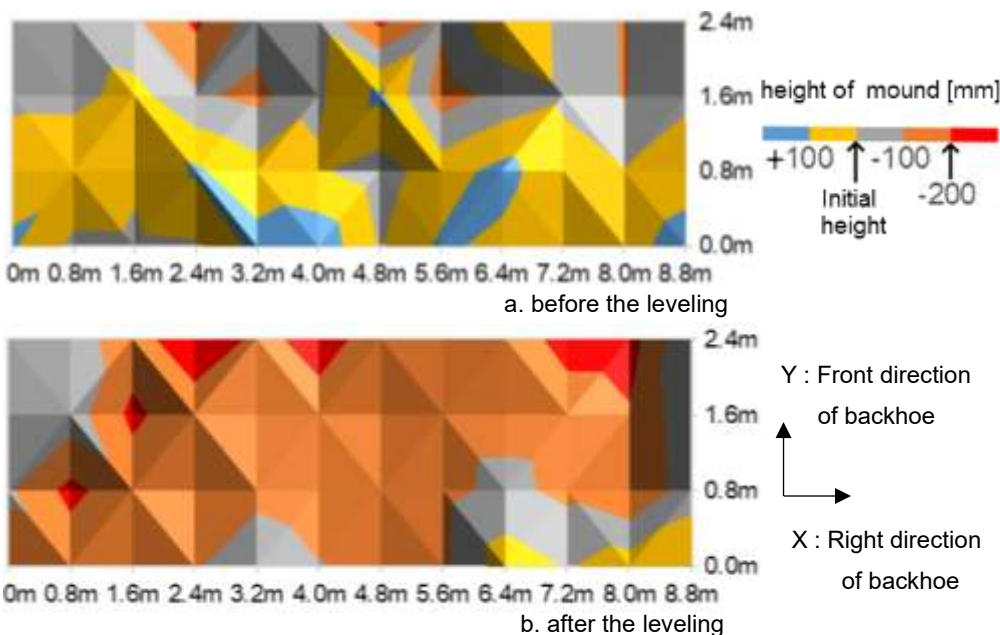


図-4.20 実験前後のマウンド高さの分布の変化

(Unit : mm)

Average height	0
the heightest	172
the lowest	-230
deviation	78
maximum gap	402

(Unit : mm)

Average height	-148
the heightest	-46
the lowest	-229
deviation	44
maximum gap	183

d) 実験の結果（水中での操作性）

実験後にオペレータから、試験装置を垂直に調整することは、陸上での直接目視であるため可能だが、水中の見えない状態で作業するには、マシンガイダンスシステムの手先の角度と、捨石マウンドの形状計測の精度が求められるだけでなく、オペレータの高い熟練が求められるだろうという意見を聴取した。

そこで、マシンガイダンスシステムを改良し、転圧板の角度を表示することとした（図-4.22）。

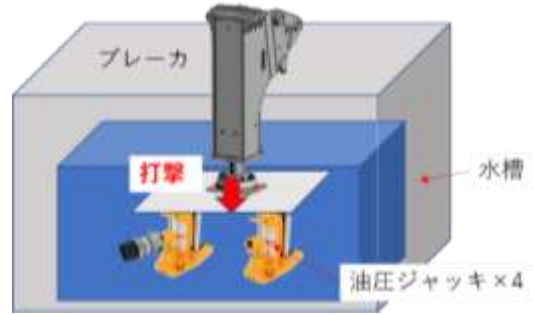


図-4.23 打撃力比較実験のイメージ図（水中）
（気中については水槽内で水を抜いて実施）



図-4.22 転圧板の角度表示（赤丸内）



図-4.24 水中での実験の状況

(3) 気中と水中での打撃力比較

a) 実験の実施

気中・水中で、試験装置で油圧ジャッキを叩き、油圧ジャッキの油圧変化を計測した（図-4.23, 4）。

この実験の目的は、ジャッキの油圧変化の違いから、気中と水中での施工性能の違いを推定することと、制振板の効果について検証することである。

実験方法は、圧力計を油圧配管に取り付けた油圧ジャッキを4つ用意し、その上に転圧板を押し付け、ジャッキを打撃した。その間の油圧変化を計測した。実験は気中と水中で行う。気中では制振板なしの1ケース、水中では制振板なしと制振板2種類の水中3ケースを行った。制振板の設置状況を図-4.25 に示す。また、実験ケースを表-4.1 に示す。それぞれで打撃したときの油圧ジャッキの作動油の油圧変化の大きさを比較することで、気中と水中での試験装置の施工性能の違いを推定した。

計測項目（計測方法）は次の通りとした。

- ・打撃力（圧力計(KM16)の計測値から推定、オシロスコープで記録、計測機の状況を図-4.26 に示す。）
- ・転圧板の振幅（けがき板）（図-4.27 に示す。）

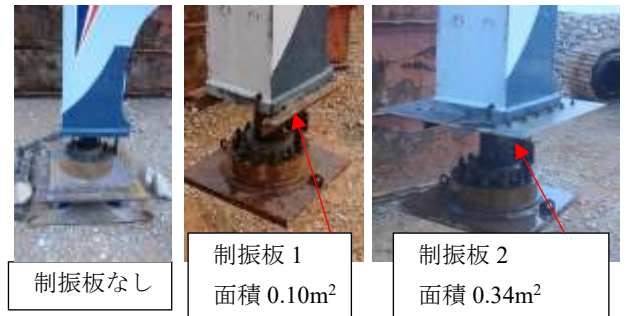


図-4.25 制振板設置の様子



図-4.26 打撃力の計測装置の状況

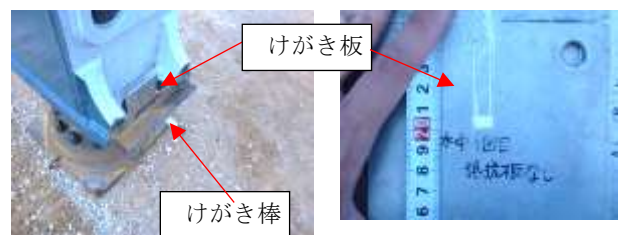


図-4.27 けがき板の設置（左）とけがき跡（右）の状況

また、条件は次の通りとした。

- ・ 作動油圧流量 $Q = 142 \text{ L/min}$
- ・ 圧力 $P_o = 16 \text{ MPa}$
- ・ ガス圧 $P_g = 1.23 \text{ MPa}$
- ・ 転圧板は 600mm 角板

b) 実験結果

実験結果として、試験装置を油圧ジャッキに押し当て、油圧ジャッキの作動油圧の変化から試験装置の衝撃力の相対的な大きさの比較を行った。油圧ブレーカの場合、打撃周期は油圧流量により変化する。条件を同一にするため、機体側で最大流量をあらかじめ設定しておき、運転操作（ペダル）の入力量は最大とすることで水中と気中との条件を同一とした。

実験より、打撃の周期は気中・水中とも、平均 0.23 秒であり、打撃周期は周囲流体にかかわらず一定であった。なお、打撃周期は油圧流量、ガス圧を変化させることで調整可能である。

気中と水中の打撃力の差については、打撃毎のジャッキ油圧の最大値（計測ピーク電圧）により評価する。打撃によるジャッキ油圧の最大値は、気中に比べ水中は半分程度となった。また、ウェルチの t 検定で比較を行った結果、有意確率は $1.8 \times 10^{-20} \%$ であった。t 検定では、一般的に有意確率が 5% 未満の場合、比較した 2 つのグループに有意差があると判断される。気中と水中の打撃力には有意差があると判断された（図-4.28）。

表-4.1 実験ケース

Case	1	2	3	4
Condition	in the air	in the water		
Stabilizing plate	none	none	1	2
Maximum[V]	1.962	1.267	1.243	1.286
Deviation[V]	0.108	0.051	0.049	0.037

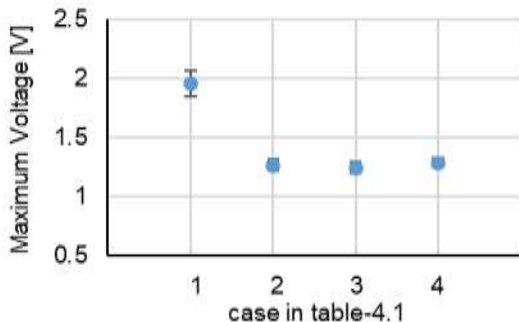


図-4.28 打撃の衝撃力相当値（各打撃で計測された油圧ジャッキ圧力の最大値）

ここで図-4.9 における 600mm と 900mm について考えると、900mm は 600mm と比較して面積比が 2.25 倍であるため、単位面積当りの圧力は 44% となる。しかし打撃による沈下速度は 22% の低下にとどまっている。このことから圧力が半分の場合の沈下速度は 2 割程度の低下と想定される。

また、水中で取り付けられた二種類の制振板による打撃の衝撃力への効果について、制振板大で約 2.5% の衝撃力向上があった。しかし、ウェルチの t 検定で水中の制振板なしの結果と比較を行ったところ、制振板 1 の有意確率 12%、抵抗版 2 の有意確率 15% で、5% よりも大きかったため、有意差があるとは認められない。

ケガキ板を用いた転圧板の振幅測定については、気中、水中とも 1cm 程度で、差はなかった。

4.4 まとめ

- ・ 本機構を用いて、長時間同じ場所を打撃すると、捨石を破砕してしまい、捨石の要求仕様である、5 ~ 200kg よりも小さくしてしまう可能性が示された。別種の装置であらかじめ、ある程度均したのちに本機構を使用することが考えられる。
- ・ 「単位時間当りの均し面積」実験結果では高低差 402mm (±201mm) から 183mm となり、偏差も収束したことから、本機構はマウンドを平面に均す能力を有していると考えられる。
- ・ 本機構では、マウンド割石を平面方向に移動する能力は有しない。実施工ではサイズの大きな割石があった場合に、その周辺を掘り移動させるといった動作を行っており、本機構の側面や、上面に爪を設けるなどして、上記操作にも対応させることが望ましい。
- ・ 本実験では、気中に比べ水中での打撃力が半分程度となっており、割石を対象とした場合、水中での打撃による沈み込み速度は 2 割程度低下すると予想する。
- ・ 実施工と作業手順が異なり、視覚情報などの作業環境も異なるため、正確な作業効率については実工事を模擬した水中作業試験を行う必要がある。

5. 提案した均しアタッチメントの実海域での試験

水中における均しアタッチメントの稼働状況の確認のため、実海域の基礎捨石マウンドを対象とした動作試験を実施し、その性能を検証することとした。なお、本試験では試験装置単体での性能評価を目的としており、他の影響を少なくするため、操作については潜水士による水中バックホウ搭乗操作で実施した。

5.1 試験の目的

基礎マウンド均しを想定した際、均し機構の評価は単位時間当りのマウンド沈み込み量（機構の性能）と単位時間当りの作業面積（作業効率）と考える。これらはマウンド築造に用いられる割石のサイズやマウンド厚さに大きく影響されることから、実マウンドでの試験を実施する必要がある。加えて、遠隔操作での使用を想定した場合、マシンガイダンスのモニタ表示情報を用いた作業が想定されるため、作業効率の計測はマシンガイダンスシステムを用いて作業を行うことが必要となる。

そこで、本試験では下記の3種類の計測を実施した。

- (1) 水中での打撃経過時間に対する沈下量計測
目的：水中での性能低下についての検討。
方法：打撃による沈下速度と変位を陸上と水中で比較。
- (2) 水中での装置単独での時間当りの均し面積の計測
目的：水中での試験装置が持つ時間当りの作業能力の検討。
方法：装置の作業能力、施工精度の計測。
- (3) 遠隔操作を想定した単位時間当りの均し面積の計測
目的：マシンガイダンスシステムと試験装置による単位時間当りの作業能力を検討。
方法：遠隔操作時の装置の作業能力、施工精度の推定。

5.2 試験の実施

本試験は、「平成31年度 平良港（漲水地区）臨港道路（防波堤外）築造工事」（発注者：沖縄総合事務局）の2-2工区の港内側の、5～200kg/個の基礎捨石マウンドの荒均し部で実施した。なお、本試験の実施により沈み込んだ箇所については、潜水士手作業による原状復帰を行っている。試験は令和元年10月16、17日に実施された。現場は既設の防波堤の基礎捨石マウンドが新たに拡張された状態で、その上に設置される予定のコンクリートブロックや、被覆石は未施工であった（図-5.1）。

均しアタッチメントの試験装置は、図-5.2に示すように、極東建設株式会社が所有する水中バックホウ（TKM200-9）に搭載した。なおバックホウには水中マシンガイダンスシステムも併せて搭載している。ただし、外界計測装置（音響プロファイラ）は搭載していない。



図-5.1 実験実施場所の平面図とその標準断面図



図-5.2 水中バックホウ TKM-200-9 に搭載された均しアタッチメント

操作は潜水士による搭乗操作で行った。また、別の潜水士1名が作業状況の確認を行い、操縦者に作業指示を行った。なお、潜水作業は水中バックホウによる均し作業の操作経験者が行った。

(1) 捨石マウンドの高さの変化の計測

試験装置による叩き動作を行い、マウンドの沈下量の時系列変化を計測する。結果を陸上試験結果と比較し、水中環境での性能低下について確認する。

本試験では試験装置で捨石マウンドの同一個所を合計30秒間打撃しマウンドの高さの変化を計測した。なお、高さの変化の計測のため、試験装置は5秒ごとに停止し、計測を行い、同じ場所で打撃を再開するという手順で実験を行った。

高さの計測は、マウンドに転圧板を押し付けた状態で、水中水準測量器を用い転圧板上面の高さを計測し、計測値から転圧板の厚さを除くことでマウンドの高さとした。計測点は転圧板の対角付近を2か所とし、その平均値とすることで転圧板の傾斜による影響をなくした。図-5.3に高さ計測時の状況を示す。

実験ケースは「制振板あり」と「制振板なし」の2ケースとした。制振板は、試験装置本体の振動を抑制するためのもので図-5.4のように本体に溶接した。なお、制振板の大きさは815mm×840mmとした。また、締固めによる結果の差がでないよう、ケースごとに打撃する場所を変更した。

実験結果として、打撃の経過時間とマウンドの高さの変化の関係を図-5.5に示した。制振板なしの場合、マウンド面を5秒で11cm、30秒で25cm以上沈下させる能力があることが示された。全体の傾向については、水中の制振板あり・なしで同様であった。機構の稼働時間が長くなるにつれ捨石マウンドの沈下量の変化割合が小さくなっていくことが示された。なお、参考として、陸上で試験を行った際の結果も示した。これも同様の傾向を示していた。ただし、本試験も母数が少なく、陸上実験とはマウンド厚さの違いや石の噛み合わせによる影響も考えられるため、結果の単純比較はできず参考値とする。

また、制振板の有無で結果に差が生じた。このことから、制振板を設置することで、装置の性能を向上する可能性が示された。ただし、制振板については、図-5.6のように実験途中に脱落したため、他の試験では使用していない。制振板はアタッチメントに溶接していたが、油圧ブレーカの振動により溶接部が破断し脱落したと考えられる。今後、実用するには取り付け方法についても検討する必要がある。



図-5.3 水中水準器によるマウンド高さの計測



図-5.4 制振板なし(左)とあり(右)

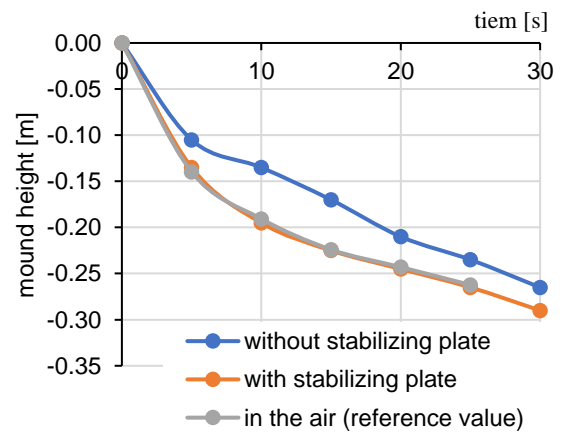


図-5.5 打撃時間とマウンド高さ変化の関係



図-5.6 制振板の脱落の様子

(2) 試験装置単独での時間当りの均し面積の計測

水中での実作業を想定し、荒均し状態のマウンド (2m × 5m) に対して試験装置による作業を行い、水中での本機構が持つ単位時間当りの作業能力を検討した。なお、本試験は潜水士による搭乗操作、及び、補助潜水士による作業指示により実施した。ただし、目標とする水糸を張っておらず高さの認識ができないため、打撃時間は 5 秒固定とした。

作業手順は、未施工部に転圧板を押し当て 5 秒間打撃を行ったのち、転圧板を持ち上げて上部回転体を回転させ (横方向位置合わせ)、フロント部を調整し装置を地盤に垂直に押し当て (フロント方向位置合わせ)、5 秒間打撃 (打撃) するという作業を繰り返した。打撃する位置・フロント部の姿勢の確認と誘導は補助潜水士の指示で行うものとした。図-5.7 に作業手順イメージを示す。

操作時間については、作業中の音声を録音し、動作ごとの時間に分解することとした。なお、後述する不具合から作業中断が多く、また不具合への対処のための業務連絡と作業が混在したため、有為な作業効率を算定することが困難であり、総作業時間による作業効率の算出は行わなかった。

そのため、業務連絡と作業の混在した回を無視して、叩き終わったときから、次に叩き終わるまでの 1 か所あたりの時間を図-5.8 の①に示した。なお、比較のため陸上で実施した実験の結果を示している。ただし、横位置合わせについては、陸上試験のときは、横方向への走行操作で位置合わせを行っていたため、作業時間の単純な比較は不適切である。また、打撃時間についても、設定時間が陸上試験では 10 秒としていたため、比較はしない。なお、作業分解の結果で打撃時間が 3.6 秒となっているのは、音

声による作業分解のため、最初の打撃の音から最後の打撃の音までの時間としたためである。オペレータには機構を稼働させるペダルを踏む時間を 5 秒と指示しており、ペダルを踏んでから打撃までに 1 秒程度時間がかかった可能性がある。サンプル数については陸上 29 回、水中 9 回であった。

フロント方向位置合わせに要する時間については陸上、水中とも同程度であった。双方とも指示者の目視情報による指示に従い操作するという同様の条件であったため、作業時間が変わらなかったものと推察される。均しアタッチメントを取り付けたことによる水中での操作性は低下しないものと考えられる。

図-5.9 は試験後のマウンド高さ計測の様子である。実験前後でマウンド面の高さを 1m 間隔のメッシュ状に計測した。作業によるマウンド高さの変化について図-5.10 に示した。平均で 114mm マウンド高さが降下しており、標準偏差は±22mm であった。これは「打撃時間とマウンド高さ変化の関係 (図-4.9)」の結果である 5 秒の打撃で 110mm の降下した結果と同程度と言える。

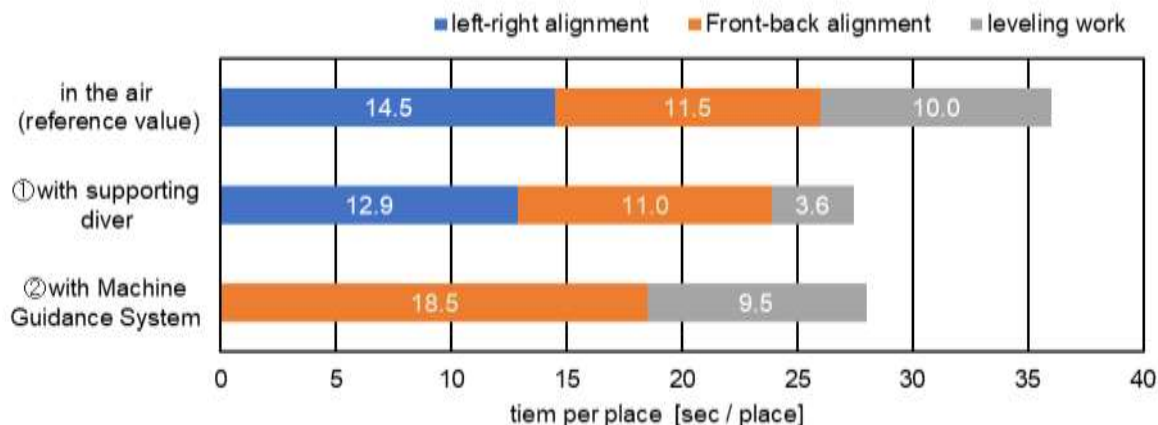
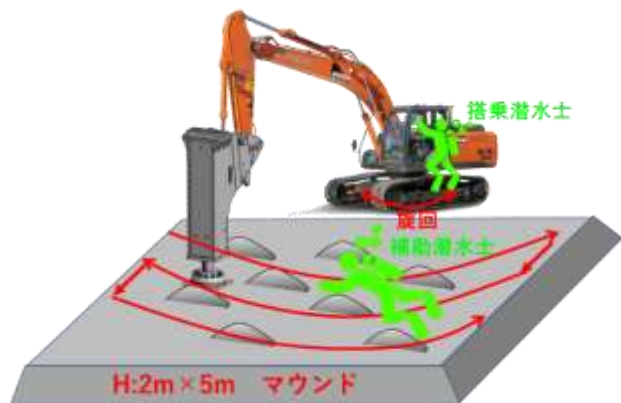


図-5.8 1 か所の打撃に要する時間の作業分解

図-5.7 作業手順のイメージ図

(3) 遠隔操作を想定した時間当りの均し面積の計測

水中バックホウマウンド均し作業の遠隔操作化を見据え、マシンガイダンスシステムと均しアタッチメント機構を組み合わせ使用した時の単位時間当りの作業能力、作業精度を検討する。

本試験は水中遠隔操作を模擬するため補助潜水士による作業指示は行わず、運転席に設置されたマシンガイダンスシステムのモニタ(図-5.11)でマウンド高さを確認しながら、目標高さ±10cmで施工することができるか確認するものである。

作業範囲は、バックホウのフロント方向に3mの直線とし、旋回動作、走行動作は行わない。また作業前のマウンド高さを参考に、目標線をマイナス150mmに設定しガイダンス画面に表示した。

なお、突出する割石が転圧板の端部にかかり、アタッチメントやチゼルに大きな負荷がかかる場合のみ、補助潜水士による位置修正の指示を行うこととした。ただし、指示は転圧板の位置角度についてのみとし、マウンド高さに関する指示は行っていない。

本試験でも作業の音声を録音し、動作ごとの時間に分解した。また、補助潜水士の指示による転圧板位置の修正と運転操作とが混在しており、有為な作業効率を算定することが困難であったため作業効率の算出は行わなかった。そこで、前項と同様に1回あたりの作業時間の算出を行った。結果を図-5.8の②に示す。なお、この実験では横方向の位置合わせは必要としないため、その動作についての比較はしない。また、打撃時間についても沈み込ませる量が異なるため比較せず、フロント位置合わせのみでの評価とする。

フロント方向の位置合わせにかかる時間については18.5秒となり、①補助潜水士の誘導による作業に比べ1.7倍程度の時間となった。本試験は運転席からの操作であり被験者も同一であるため、操作入力系や習熟度は同条件である。ガイダンス表示情報による操作は、補助潜水士による誘導より作業効率が低下すると言える。

実験前後にマウンド面の高さを0.5m間隔に水中水準器で計測した。作業精度について、作業前後のマウンドの高さを図-5.12に示す。作業前は不陸が+15cm~-3cmであったが、作業後は+8cm~-7cmとなり、目標値である±10cmの範囲内に収まっていた。この結果から、マシンガイダンスと均しアタッチメントを組み合わせ遠隔操作施工を実施することは可能であると言える。

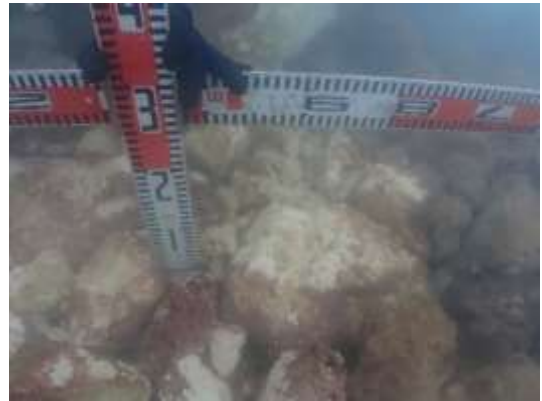


図-5.9 水中でのマウンド高さ計測の様子

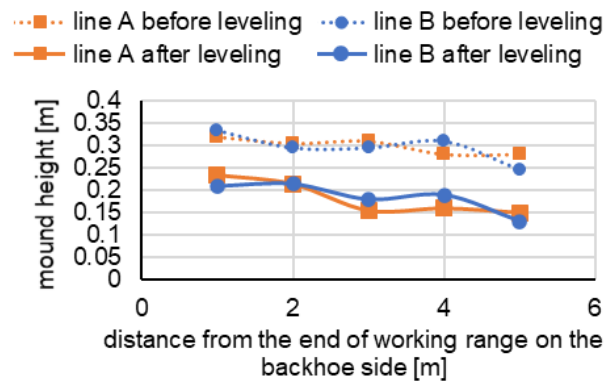


図-5.10 作業前後のマウンド高さの変化

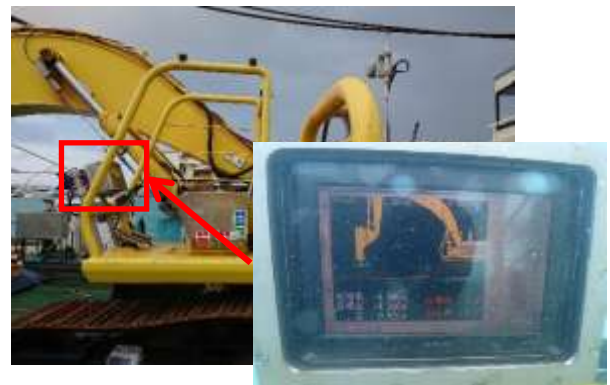


図-5.11 操縦席に搭載されたマシンガイダンスモニタ

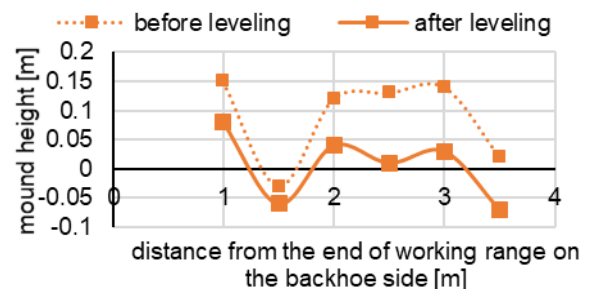


図-5.12 実験前後のマウンドの高さの変化

(4) 均しアタッチメントの使用による周囲への影響

装置の使用前後の装置周辺の海中の濁りの変化状況を図-5.13に示す。これは、8秒間の打撃を行った際の濁りの状況の変化である。装置の稼働によって濁りが発生したことは確認された。なお、本実験に参加した潜水士に濁りの状況について聴取したところ、通常的水中バックホウでの均し作業（グラブバケット背面で叩く）と同程度の濁りという評価であった。

また、アタッチメントの打撃による割石の破碎状況について、水中写真を図-5.14に示す。陸上実験に比べ割石の破碎は少なかった。水中で打撃力が低下したことと、割石自体の材質によるものと考えられる。また、潜水士から意見聴取したところ、細かい石は隙間に入り込んでおり、規格内（5～200kg）の石が残っているため、石が破碎しているという印象は受けなかったという回答であった。

(5) 均しアタッチメントに関する課題点調査

搭乗潜水士から遠隔操作を想定した際の課題点についてヒアリング調査を行い、次の結果を得た。

- ・マシンガイダンスのモニタ上では作業済みの箇所がわかりにくい。
- ・アタッチメント稼働時にブームが動いたという誤った表示になる。これはストローク計が振動したためと考えられる。

それらの意見に対し、マシンガイダンスシステムについて、以下の改良を行った

- ・画面表示に目盛を表示する。
- ・時間平均フィルタを設けて、振動による誤表示を防ぐ。

その他の課題として、試験中にアタッチメントを作動させるペダルを踏んでも動かないという不具合が発生した。特にフロント部を伸ばした状態での作業の際に不具合が多く発生したことから、水中浮力により押付け力が不足し油圧ブレーカの空打ち防止機構が作動したためと考えられる。今後は空打ち防止の機能を無効化することとした。なお、アタッチメントは、油圧ブレーカで通常行う石を割る作業中に生じる、空打ちの状態にはならないため、機能を無効化することに安全性に問題はない。機構の作動は、設計想定外の使用方法であったためと推測される。

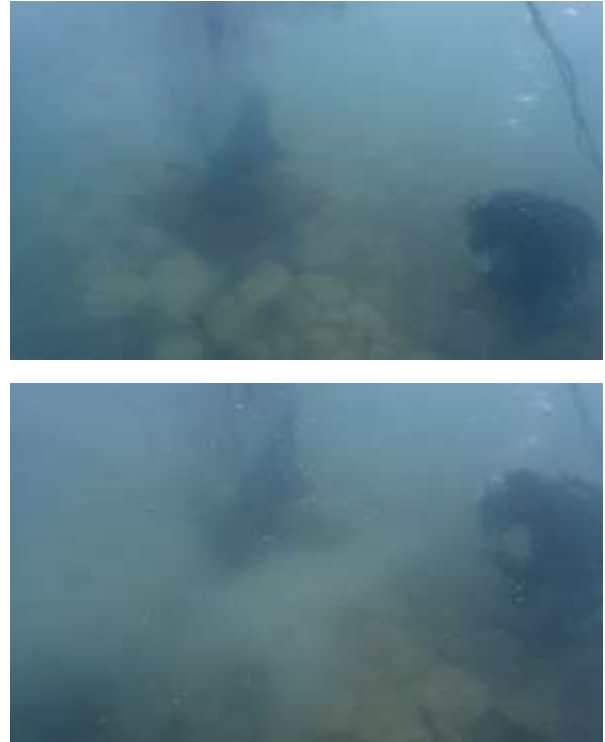


図-5.13 機構使用前（上）後（下）の海中の濁りの様子



図-5.14 機構による打撃後の割石の破碎の様子

5.3 まとめ

油圧ブレーカをベースとした均しアタッチメントについて、実海域の実工事現場の荒均し部で単独の性能試験を実施した。その結果、次のことが明らかとなった。

- ・本機構には、水中でも捨石マウンドを沈み込ませる能力がある。その性能は、5秒で11cm程度、30秒で25cm程度であった。
- ・濁りの発生は、通常的水中バックホウのグラブバケットによる作業と変わらない。
- ・割石の欠けは発生するが、碎石程度の大きさや砂状になることはなかった。
- ・補助潜水士の誘導があれば陸上試験と同等の作業時間であり、均しアタッチメントを取り付けたことによる水中での操作性の低下は認められない。
- ・水中では本機構の油圧ブレーカの空打ち防止機構が作動し、打撃できなくなる場合があるため、空打ち防止機能を無効化する必要がある。
- ・マシンガイダンスシステムと組み合わせて搭乗操作で使用した場合、マウンドの不陸を±10cm以内に収めることができた。

6. 割石の移動を目的とした均しアタッチメントの機能拡張検討と陸上試験

6.1 均しアタッチメントに関する課題整理

ここまで検討した装置は、打撃による沈下を想定した機構であり、初期不陸が目標高より下回っていた場合や叩きすぎた面の復旧に対応できなかった。また、試験では+40cm以上の点において長時間(約30秒程度)叩いても目標高さにならなかった部分が存在した。つまり、マウンド面形状が荒均し状態であっても、石を移動させる場合を想定する必要がある。そのような場合に対応するため、石を移動するための小型バケットなどの機構をブレーカボディに設置することが考えられる。そこで、既存の小型バケットの形状を参考に図-6.1に示すような小型バケットを製作し試験装置に取り付けた。その後、陸上試験を実施し、その有効性、及び、遠隔操作時の注意点について検討を行うものとする。

6.2 陸上試験の概要

小型バケット付アタッチメントの運転操作に対する割石の挙動の確認、目視による機体姿勢の確認、今後予定する実海域遠隔操作試験における運転操作者への事前習熟訓練を目的として、陸上において模擬作業試験を実施することとした。製作した小型バケットについて概略寸法図を図-6.2に、写真を図-6.3に示す。

また、実験に使用した割石は、沖縄総合事務局管内の港湾での捨石マウンド築造工事で一般に利用される質量5~200kg/個の規格とし、図-6.4に示すように高さ1m、幅3m、奥行き6m程度の量である。

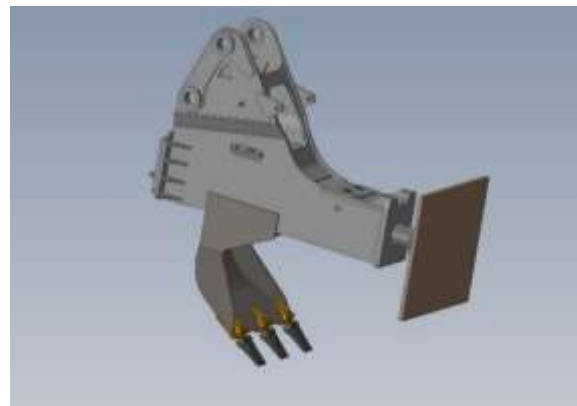


図-6.1 小型バケット付きアタッチメント

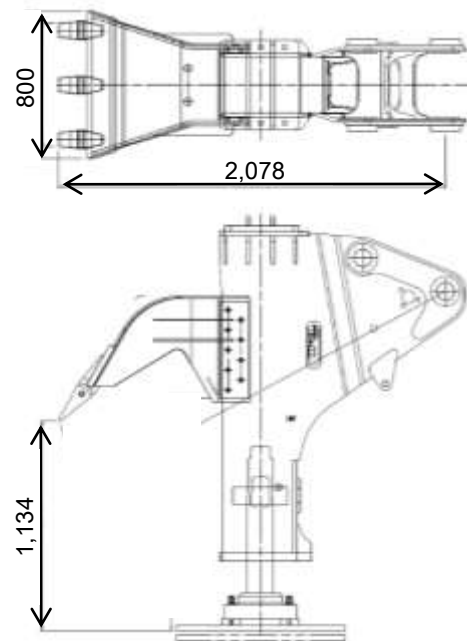


図-6.2 小型バケット設計図 単位[mm]



図-6.3 小型バケット付きアタッチメント



図-6.4 試験に使用した割石（上図：前面／下図：側面）

陸上試運転では以下に示す4項目について確認を行う。

(1) 製作したバケットの強度の確認

今回新たに製作した小型バケットを試験装置に取り付け、実際の中水作業に耐えるかを検証するため、製作したバケットの強度の確認実験を陸上にて実施する。割石に対して、試験装置を装着したバックホウで実際に割石を持ち上げることによってバケットの強度検証を行う。強度検証では実際の中水作業を想定し、以下の試験を実施する。

- ・ 割石を持ち上げ、割石を持ち上げたまま旋回
- ・ 割石を持ち上げた状態でバケットの振り回し
- ・ 一般的な掘削動作
- ・ 一般的な払い動作
- ・ バケットの押しつけ動作
- ・ バケットを押し付けた状態での旋回動作

これらの動作を各5分（×6項目＝30分）実施し、製作した小型バケットの故障の有無、並びに建設機械に異常なく作業を行えることを確認する。

(2) 転圧版が接地しないバケット角度の確認

均しアタッチメントに付属する転圧版が地面に接地しない範囲で、小型バケットをどの程度曲げうるかの角度の確認を行う。理由を以下に記載する。

バケットで割石を掬い取り、落とすことで割石の移動を行う際、バケットの角度の変更を伴う。バケットの角度を変更する際、取り付けられた転圧版が地面と接触する角度の定量値が未知である場合、バケット角度を曲げすぎることによって地面に接触し事故を引き起こす危険がある。事故を未然に防ぐため、バケットが接地せずに曲げることができる可動域の評価を事前に行う必要がある。

実験では、掬い取りなどの動作を対象に、動作が始まる時の角度と、動作が終わるときの角度を測定する。実験では、以下の計測を行うものとする。

- ・ 割石掬い取り時のアタッチメント角度の計測
- ・ 割石放出時のアタッチメント角度の計測
- ・ 掬い取りに必要な旋回中心からの距離の計測
- ・ 払い動作時に転圧版が割石に接触しない安全角度

(3) 製作したバケットの実証試験

製作した小型バケットの性能を確認するため、陸上における模擬作業試験を実施する。また、平良港での実験時

に操作する遠隔操作オペレータへの習熟訓練を行うことを目的とする。

マウンド形状は 0cm から最大+80cm 程度の形状を初期値とし、試験前に形状計測を行った。

平良港における遠隔操作試験では、小型バケットによって+30cm 以上の箇所をなくすために石を移動することを目的としている。今回の実証試験では、平良港での作業を想定しつつ、オペレータは搭乗目視により建機を操作し、今回製作した小型バケットを用いて割石の移動を行う。均し作業では、クローラ下面の高さを基準高とし、その高さから+30cm を目標高として設定した。また基準高から+20~+60cm を許容範囲として設定した。

操作中の記録はビデオカメラにより行い、割石の移動方法について解析を行う。映像解析では、「掬い取り」、「転がし」などによる岩の移動の様子と、岩の移動に効果的な動作について検討を行う。

不陸が 30cm 以内になったかどうかの判断は、オペレータの目視に依存する。作業後にマウンド形状の計測を行い、作業前と作業後の出来形を比較する。

6.3 陸上試験の結果

今回の陸上試験では、新たに製作した小型バケットを取り付けた試験装置で実際の均し作業を想定した試験を行い、小型バケットの実用性について検討する。試験で行った作業内容と試験結果を以下に記載する。

(1) 製作したバケットの強度の確認

実際的水中工事に支障のない強度であることを確認するために、製作したバケットの強度のテストを陸上にて実施した。

バケットの強度の確認では、「一般的な掘削」、「払い」、「岩の持ち上げ」、「旋回」、「岩の押し付け」といった作業を行い、作業可能であることと損傷の有無を判定する。試験の結果、製作したバケットは通常通り作業が可能であること、強度的に問題が無いことを確認した。図-6.5、6 に強度確認試験の状況を示す。図-6.5 は小型バケットによる掘削動作を行い、石を持ち上げる動作である。図-6.6 は小型バケットを岩山に押し付けるフロントリフトである。図-6.7 は試験終了後のバケット状況写真を示す。

(2) 転圧版が接地しないバケット角度の確認

製作した小型バケットの挙動の把握と安全確認のため、均しアタッチメントに付属する転圧版が地面に接地しない範囲で、小型バケットを曲げることができる角度について測定を行った。加えて、小型バケットの挙動の把握の

ため掬い取ることが可能な距離の判定も追加で実施した。



図-6.5 掘削／持上げ動作



図-6.6 押付け動作（フロントリフト）



図-6.7 試験後のバケット写真（側面）

角度計測では、以下の図-6.8のように油圧ブレーカ側面が地面に水平で転圧板がバックホウ側を向いた状態を基準の0度として、掬い取り方向（図-6.8の場合反時計回り方向）を正に、払い方向（図-6.8の場合時計回り方向）を負に値を設定した。また、計測対象とするアームとバケットでは角度計を以下の位置に設置した。

a) 地面に対する計測

地面に対して「掬い取り」と「払い」の動作が始まる角度と終わる角度の計測を行った。参考のため図-6.9, 10に状況写真を示す。図-6.9が掬い取り始めを示しており、図-6.10が掬い取り終わりをそれぞれ示す。払いに関しては掬い取りと逆方向に曲げる動作を指す。

測定結果を表-6.1以下に示す。地面に対するバケットの許容範囲は52度から-40度となった。遠隔操作時には、基本的にこの範囲で操作することとした。

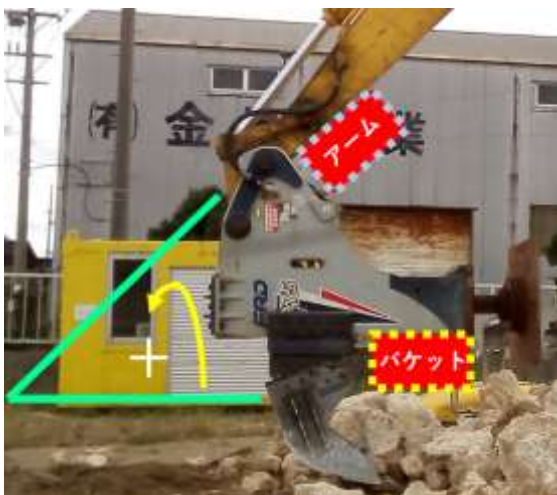


図-6.8 計測角度の基準



図-6.9 掬い取り始め



図-6.10 掬い取り終わり

表-6.1 地面に対する角度計測結果（単位：度）

水平面に対する角度	バケット
掬い取り 始め	17
掬い取り 終わり	52
払い 始め	17
払い 終わり	-40

b) 岩山に対する計測

作業対象となる岩山に対して掬い取りと払いの角度を計測した。測定結果を以下の表-6.2に示す。図-6.11は岩山に対する角度計測の様子を示している。掬い取り時の角度については、前項の水平面に比べて浅くなっている。本試験は搭乗目視で行っており、石を掬い終わった瞬間に操作を止めて計測をおこなったため、限界まで角度を使う必要が無かったことが原因と考えられる。

払いに関しては3回の計測で開始角度が-33度程度、終了角度が-48度程度でほぼ一定の値となった。バケットの払い終わり角度に関して地面に対する計測結果と比較すると、水平面での限界角度は-40度であったが、岩山では-48.7度となった。払い動作の終盤にブームを上げ転圧板を逃がすような動作をしており、それにより水平面の計測より広がったものと考えられる。

表-6.2 岩山に対する角度計測結果（単位：度）

バケット角度	1回目	2回目	3回目	平均
掬い取り 始め	5.5	2.0	0.0	2.5
掬い取り 終わり	11.2	13.5	12.4	12.4
払い 始め	-35.0	-29.9	-34.9	-33.3
払い 終わり	-49.4	-47.3	-49.5	-48.7



図-6.11 岩山に対する角度計測の様子
 (左上図：掘り取り始め/右上図：掘り取り終わり/
 左下図：払い始め/右下図：払い終わり)

表-6.3 岩が落ち始める角度と全て落ちきる角度の計測
 結果 (単位：度)

バケット角度	1回目	2回目	3回目	平均
割石落ち始め	-3.6	-13.3	-1.1	-6.0
割石全落下	-22.5	-16.7	-34.6	-24.6



図-6.12 岩が落ち始める角度計測

c) 掘り取りの際岩が落ち始める角度と全て落ちきる角度の計測

掘り取りを行ったとき岩が落ち始める角度と全て落ちきった時の角度を計測した。計測結果を表-6.3 に、計測の様子を図-6.12, 13 にそれぞれ示す。結果は以下のように掘り取る岩の量によって多少ばらつく結果となった。

d) 掘り取ることが可能な距離の判定

岩を掘り取ることができる距離について検討を行った。図-6.14 は計測の様子を示している。距離は旋回中心を基準としている。計測の結果、4m~7m では掘ることができたものの、3m より近く、或いは 8m より遠い場合で掘ることができない結果となった。



図-6.13 岩が落ち切った角度計測

(3) 製作したバケットの実証試験

陸上における模擬作業試験を行い、製作した小型バケットの性能を確認する。マウンド形状は G.L.0mm から最大 G.L.+800mm 程度の形状を初期値とし、荒均し作業を想定した運転操作により割石を移動させる。

均し作業では、クローラ下面の高さを基準高 G.L.とし、基準高 G.L.から+300mm を目標高として設定した。また基準高 G.L.から+200mm~+600mm を許容範囲として設定した。

具体的な作業手順を次に記載する。



図-6.14 掘り取ることが可能な距離の判定の様子

(手順)

1. マウンド造成. 高さを 0mm～800mm, 幅 2m 程度, 奥行き 3m 程度とする.
2. 50cm 間隔でマウンド模型をカラーズプレーでマーキングする.
3. マウンド形状測定. レベルを用いて縦横それぞれ 50cm 間隔で計測する.
4. 均し作業で平らにする. 目標高から+300mm 以上の部分の岩の移動を行う. オペレータの目視によって完了判断を行う.

今回の実験では合計二回の実証実験を行い, 製作したバケットの有効性について検討を行った. それぞれの実証実験の結果を以下に記載する.

a) 一回目の実証実験

実験で使用するマウンド模型を造成した後, マウンド面を 50cm 間隔でスプレーによるマーキングを行い, レベルを用いて均し前の形状計測を行った. 以下の図-6.15, 16 はそれぞれ一回目の実証実験におけるマウンド造成と, レベルによる計測の様子を示している.



図-6.15 一回目マウンド造成の様子



図-6.16 均し前形状計測の様子

まず, 造成したマウンド模型の写真を図-6.17 に, プロット結果を図-6.18 に示す. 形状は縦横約 4m であり評価範囲は 2m×2.5m を 50cm ピッチで区切った 30 点とした. 写真からわかる通り, 中央付近がややくぼんだ形状となっている. 測量の結果, 高さは最大 800mm 程度, 最低 100mm 程度となった. プロットでは, 均し作業で移動対象となる高い領域(600mm 以上)を赤色, 低い領域(200mm 未満)を紫色で示している.

造成したマウンド模型に対して均し作業を行った後, 形状計測を行った. 写真を図-6.19 に, プロット結果を図-6.20 にそれぞれ以下に示す. 図-6.19, 20 が示す通り, マウンド模型がほぼ平に均されていることが分かる. レベルを用いた計測を行ったところ, 均し後のマウンド高は, 最大+500mm, 最低+300mm 程度の結果となり, 本試験の目標範囲である+200mm から+600mm の範囲に収まっていることが確認された.



図-6.17 一回目均し前 マウンド写真

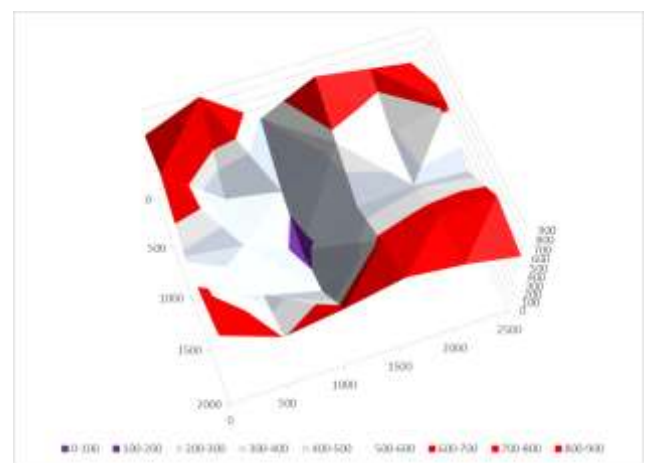


図-6.18 一回目均し前 マウンド高さ分布イメージ



図-6.19 一回目均し後 マウンド写真



図-6.21 追加した突起（前方）

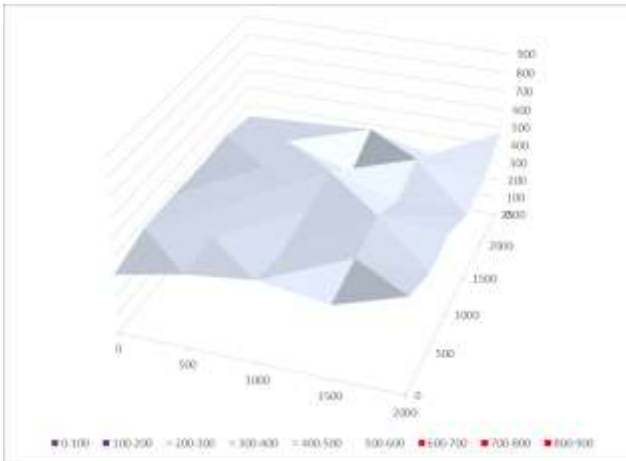


図-6.20 一回目均し後 マウンド高さ分布イメージ



図-6.22 追加した突起（側方）

次に、撮影した作業動画の解析を行った。結果、箒作業（機体の旋回入力により、岩に対してバケットを側面から押し当て移動させる動作）によって相対的に高い部分の岩を低い部分に向かって払うことによって岩を移動し、水平にしていることが多く、箒作業が均し作業に有効であることが分かった。これは、旋回運動ではバケット背面の高さや角度が変化せず、かつ、レバー操作が容易であるためであると考えられる。

しかし実際に使用する海中だと、複雑な地形等によって割石を大きく移動させることも想定でき、その場合、掬い取りなどの動作が必要となる可能性がある。そこで、二回目の実証実験では「掬い取り」や「払い」動作による均し作業を行い、製作したバケットの有効性を再度検討する。

b) 二回目の実証実験

一回目の実証実験によって均し作業に箒作業が有効であることが分かった。箒作業以外に有用となる動作、特に「掬い取り」と「払い」の有効性について検討を行うため、二回目の実証実験では箒作業無しで均し作業を行うものとした。

特に、「払い」動作の際岩を引っかけるための突起をバケットの背面に新たに追加し（図-6.21、図-6.22 参照）、移動の一助となり得るかどうかを検討する。

新たに造成したマウンドの写真とプロット結果を図-6.23、図-6.24 に示す。縦6m横5mのマウンド面のうち、評価範囲を法肩を除いた4.5m×3.5mの80点とした。ここで、利用できる岩の量を加味して範囲の拡張を行っている。プロットでは、一回目の実験と同様に、高い領域（今回600mm以上）を赤色、低い領域（今回200mm未満）を紫色で示している。



図-6.23 二回目均し前 マウンド写真



図-6.25 二回目均し後 マウンド写真

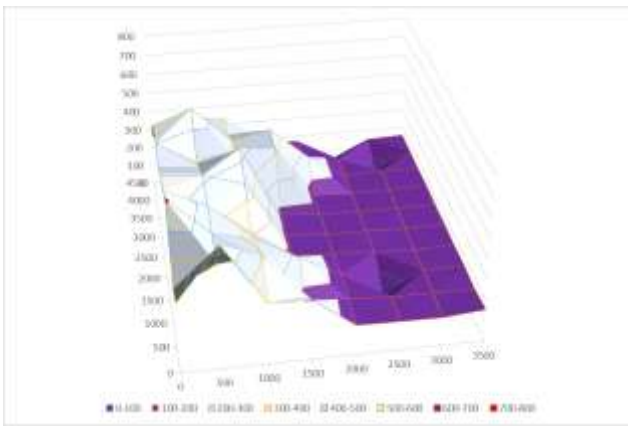


図-6.24 二回目均し前 マウンド高さイメージ

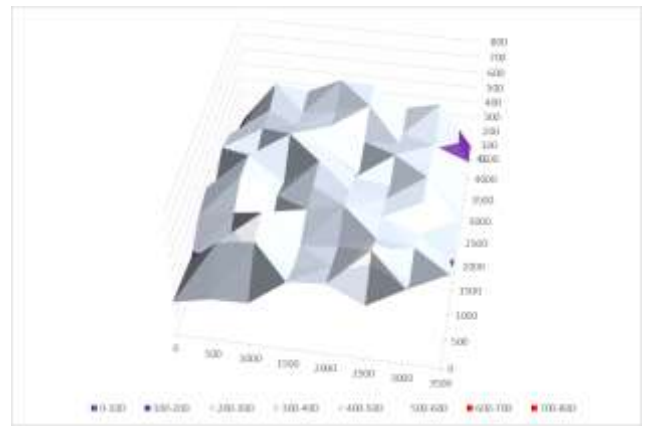


図-6.26 二回目均し後 マウンド高さ分布イメージ

一回目の実証実験と同様に造成したマウンド模型の測量を行い、均し作業を行った。均し作業後のマウンドの写真とプロット結果をそれぞれ図-6.25、図-6.26に示す。二回目の実証実験では一回目の実証実験で有効性が確認された箒作業無しで均しを行ったものの、均し後のマウンド高は、最大 500mm、最低 100mm 程度の結果となり、問題なくマウンド面を均すことができた。

録画した作業動画の解析を行った結果、バケット背面に新たに取り付けられた突起は岩を払う際に引っかかることが確認され（図-6.27 参照）、岩の移動に有用であることが分かったものの、作業途中で破損した（図-6.28 参照）。これは試験用の仮付けであり強度が不十分であったことに起因するもので、本付けを行えば問題ないものである。本実験では破損したものの、新たにバケットに取り付けた突起の有効性は視覚的に確認することができた。



図-6.27 背面の突起が岩に引っかかる様子



図-6.28 破損した背面の突起

c) 均し結果の定量解析

前目では均し結果を視覚的な面から定性的に評価を行った。今目ではレベル測定器を用いて得られた定量的な地形高について検討を行う。一回目と二回目の実証実験について均し前と均し後の測定結果をもとに、地形の最大値、最小値、最大高低差、平均値、標準偏差の計算と評価を行った。図-6.29 に実証実験の均し結果のプロットを、表-6.4 に均し結果の定量値のまとめをそれぞれ示す。プロットは基準にとったバックホウクローラを中心に定めた高低を表しており、値の単位は全て mm で統一している。荒均しで必要な精度を想定し、+300mm を中心に、-100~300mm の範囲外の箇所を基準越え(バックホウクローラ下面から+200~+600mm を基準内)として扱う。また、範囲外領域を赤点線で囲っている。

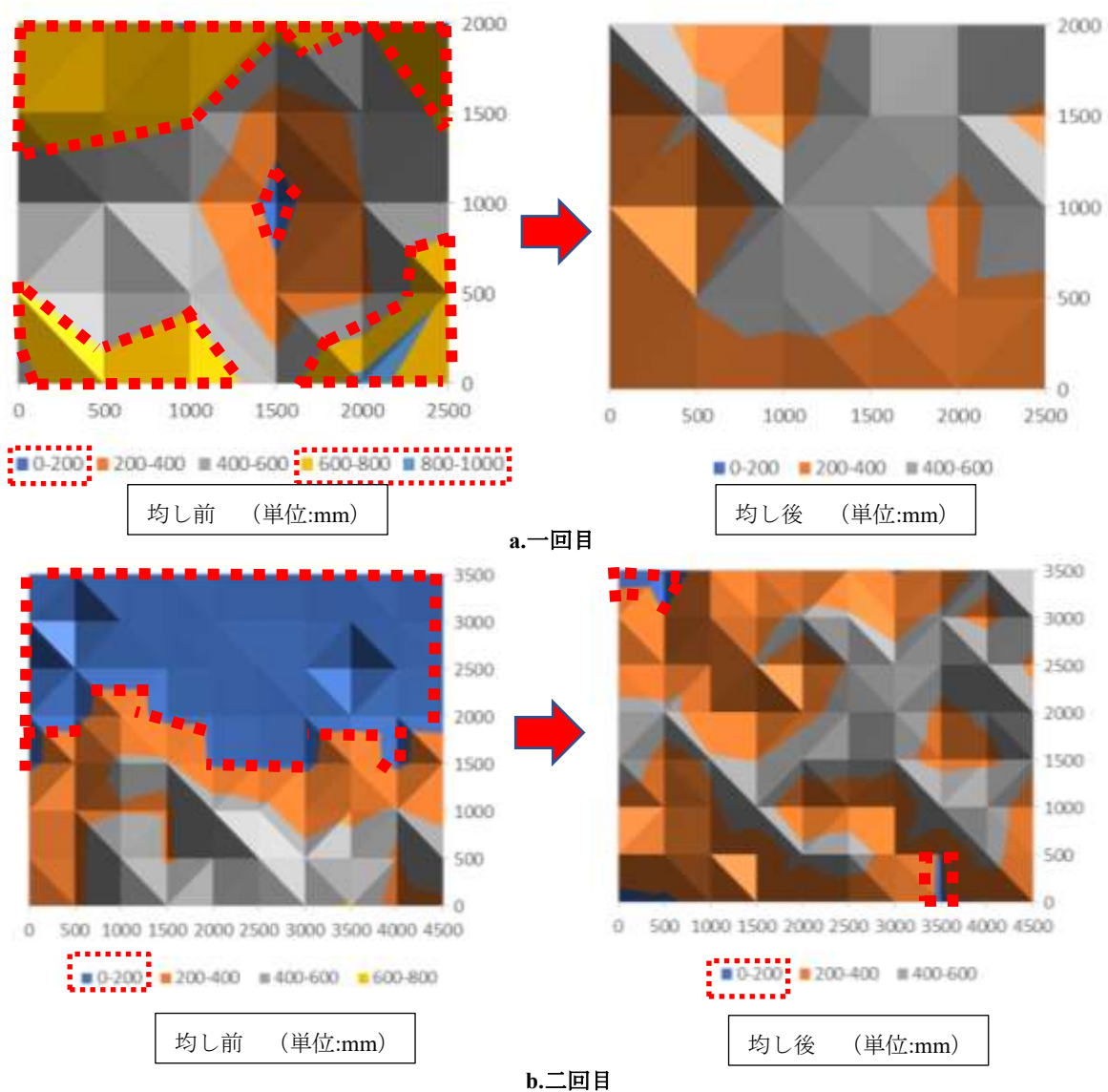


図-6.29 実証実験の均し結果を示すマウンドの高さ分布図 (範囲外を赤点線で記入)

一回目の実証実験では、一部の+800 mm以上の領域に対して400±200 mmの範囲内に均せていることが分かる。また、局所的に高低差が大きく凹凸が大きかった地形（黄色と灰色の面が局在している）が全体的に滑らかとなっている（オレンジ色と灰色の面が偏在している）ことが分かる。また、以下の図に示す通り、均し前に最大728の高低差があった地形が、最大230にまで平坦となっている。基準を超えた測定点数についても、均し前に16個あったものが0個となった。以上から、一回目の実証実験ではマウンド模型を問題なく均せているといえる。所要時間は4.5分であった。

二回目の実証実験では、高低が明瞭に分かれた地形に対して均し作業を行っている。均し前に存在した400 mm以上の領域を、200 mm以下の領域に移動させ全体を平坦な地形としている（灰色の面を青色に移動させオレンジ色としている）ことが分かる。均し前は最大高低差541、基準点越えが45個あったが、均し作業によって最大高低差451、基準点越え7個にまで平坦となった結果を得ることができた。以上より、二回目の実証実験でも問題なくマウンドを均せていることが分かる。所要時間は10.5分であった。

表-6.4 実証実験の均し結果 定量値（単位：mm）

一回目均し前		二回目均し前	
最大値	868	最大値	612
最小値	140	最小値	51
最大高低差	728	最大高低差	541
平均値	568	平均値	265
標準偏差	179	標準偏差	147
基準超え	16個	基準超え	45個

一回目均し後		二回目均し後	
最大値	502	最大値	546
最小値	272	最小値	95
最大高低差	230	最大高低差	451
平均値	391	平均値	351
標準偏差	52	標準偏差	100
基準超え	0個	基準超え	7個
所要時間	4.5分	所要時間	10.5分
作業能力	0.28分/m ²	作業能力	0.35分/m ²

次に、一回目と二回目の均し作業結果について比較を行う。均す前の初期地形が異なるため単純に比較することはできないものの、一回目の均し結果では、標準偏差が±52mm、基準超え個数が0個、単位面積当たり作業時間

が0.28分/m²という結果となった。二回目の均し結果では、標準偏差が±100mm、基準超え個数が7個、単位面積当たり作業時間が0.35分/m²という結果となった。

すなわち、一回目の均し結果の方が、標準偏差が小さい、基準超え個数が少ない、単位面積当たりの作業時間が短いということが分かる。以上から、箒作業を含んだ一回目の方がより効果的に平坦に均すことができていると考えられ、箒作業の有効性について示唆されたといえる。

(4) 運転操作に関する注意点の抽出

実験を終えた後、バックホウオペレータに対し以下の点についてヒアリングを行った。質問内容と返答内容を以下に記載する。

Q-1. 操作性について。

普段とは形状の異なるバケットだが、思うように操作することは可能か？

A-1. 問題ない。

構造が通常と異なるため作業当初は違和感を覚えたものの、数分仮動作を練習することで違和感なく作業を行うことができた。

Q-2. 強度について

新たに取り付けたバケットは強度の面で作業に耐えうる程度であるといえるか？

A-2. 問題ない。

基本的な動作、実証実験を通じて仮付けの状態にもかかわらず壊れることはなかった。本付けをすれば全く問題ないと考えられる。

Q-3. 箒作業を想定したバケットの改良について。

箒作業（バケットを横方向に払う動作）が均しに有効であることが今回の実験で分かったが、箒作業に適したようにバケットをさらに改良することはどうか？

A-3. 今回テストしたバケットで大丈夫だと考えられる。逆にこれ以上いじると、旋回に支障をきたす恐れがある。

Q-4. アタッチメントの背面に取り付けた突起物の有用性について

（仮付けのため実験中破損したものの）払い動作時に岩に対して引っ掛ることが視認できた。岩を運搬する際有用であると考えられるがオペレータとしての考えはどうか？

A-4. 有用であると考えられる。

ヒアリングでは、新たに取り付けたアタッチメントを中心に質問を行った。新たに開発したアタッチメントは問題なく動作し、実験を通じて大きなトラブルもなく順調に進めることができたこともあり、オペレータ側としても問題ないという考えを確認することができた。

陸上試運転を終え、試験前に設計したアタッチメントの背面に新たに突起を装着した状態で本付けを行い、アタッチメントの製作、仕上げを行った。改良後のアタッチメントの写真を図-6.30 に示す。



図-6.30 改良後のバケット写真

(5) まとめ

一回目の実証実験によって「箒作業」が均しに有用であることが分かった。今後水中で箒作業を行う場合、バケットの先端で周辺地形の均しを行うと同時に均している箇所の高さが分かると、目標高との差が明確になり、結果再計測の回数が減ることで作業効率が向上すると考えられる。そのため、実海域遠隔操作試験の実施にあたり小型バケットの刃先高さや小型バケットの形状を正確に表示することが重要であると考えられる。

二回の実証実験を通じて、掬い取りや払いなどの箒作

業以外の動作でも問題なく均すことが可能であることが示された。ただし、箒作業を含んだ方が効率的であることも同時に示唆されている。また、新たにバケットに取り付けた突起の有効性を視覚的に確認することができた。実験中では破損してしまっていたが、これは試験実施中の発想に対する仮付けであったためであり、実海域遠隔操作試験時には十分な強度を持たせることとした。

6.4 まとめ

叩き均しアタッチメントでは目標高さまで低くできない部分が存在し、石を移動させる必要性が生じた。そこで、石を移動するための小型バケットを製作し、その有効性や遠隔操作時の注意点等を検討するために陸上試験を行った。陸上試運転では以下の項目について確認を行った。

- ・製作したバケットの強度の確認
- ・転圧版が接地しないバケット角度の確認
- ・製作したバケットの実証試験
- ・運転操作に関する注意点の抽出

陸上試験により得られた結果を以下に示す。

- ・製作した小型バケットは強度的に十分実用的であった。
- ・箒動作（旋回により横方向に払う動作）は荒均し作業に有効であった。
- ・払い動作のための背面突起は有効であった。
- ・最大値 865mm、最小値 140mm のマウンド面を目標とする 200mm から 400mm に均すことができた。
- ・最大値 612mm、最小値 51mm のマウンド面を、評価 80 箇所中 73 か所で均すことができた。
- ・提案する小型バケットによりマウンド割石を移動することができた。

均し作業を行う際、バケットの背面角度など正確なバケット形状を表示することで、箒動作作業における作業効率が向上する可能性がある。海上試験の結果を踏まえたうえで、検討していく必要がある。

7. まとめ

本検討では、遠隔操作での水中バックホウによる均し作業の効率の向上のため、簡単な操作入力で捨石マウンドの均し作業を実施できるアタッチメントの開発を実施した。

アタッチメントのベースは次の理由からは、油圧ブレーカを選定した。

- ・完全に水没した状態で使用可能である。
- ・故障した場合にも迅速に代替品を入手できる市販品である。
- ・機構の動作部分が水に接しておらず、流体抵抗による能力低下が小さいと推定される。

なお、アタッチメントは、油圧ブレーカの先端に転圧板を取り付ける形状とした。使用方法は、転圧板をマウンドに押し当てたのち、油圧ブレーカの機構を動作させることで、叩きならしを行う。

運転質量 20t のバックホウへの取り付けを想定し、古川ロックドリル製 Fxj275 をベースに試験装置を製作した。

その後、試験装置について、陸上の実物大の捨石マウンド模型を対象に性能試験を行った。その結果を以下に示す。

- ・「単位時間当りの均し面積」実験結果では高低差 402mm (±201mm) から 183mm となり、偏差も収束したことから、本機構はマウンドを平面に均す能力を有していると考えられる。
- ・試験装置は、マウンド割石を平面方向に移動する能力は有しない。実施工ではサイズの大きな割石があった場合に、その周辺を掘り移動させるといった動作を行っており、本機構の側面や、上面に爪を設けるなどして、上記操作にも対応させることが望ましい。
- ・試験装置を用いて、長時間同じ場所を打撃すると、捨石を破砕してしまい、捨石の要求仕様である、5～200kg よりも小さくしてしまう可能性が示された。別種の装置であらかじめ、ある程度均したのちに本機構を使用することが考えられる。

その後、試験装置を水中バックホウに取り付け、実海域の基礎捨石マウンドを対象とした動作試験を実施し、その性能を検証した。なお、本試験では操作については潜水士による搭乗操作で実施した。その結果を以下に示す。

- ・試験装置には、水中でも捨石マウンドを沈み込ませる能力がある。その性能は、5秒で 11cm 程度、30秒で 25cm 程度であった。
- ・濁りの発生は、通常的水中バックホウのグラブバケットによる作業と変わらない。

- ・割石の欠けは発生するが、砕石程度の大きさや砂状になることはなかった。
- ・水中での作業時間は、補助潜水士の誘導があれば陸上試験と同等であり、均しアタッチメントを取り付けたことによる水中での操作性の低下は認められない。
- ・水中では試験装置の機構として採用した油圧ブレーカの空打ち防止機構が作動し、打撃できなくなる場合があるため、今後は空打ち防止機能を無効化する。
- ・マシンガイダンスシステムと組み合わせて搭乗操作で使用した場合、マウンドの不陸を±10cm 以内に収めることができた。

さらに、陸上試験で示された課題点の解決のため、試験装置前面に割石を移動させるための小型バケットを取り付けた。その後、再び、陸上の実物大の捨石マウンド模型を対象に性能試験を行った。その結果、小型バケットによって、捨石投入直後の状態を模擬したマウンドを荒均し程度まで均すことができることを確認した。

- ・製作した小型バケットは強度的に十分実用的であった。
- ・箒動作（旋回により横方向に払う動作）は荒均し作業に有効であった。
- ・払い動作のための背面突起は有効であった。
- ・最大値 865mm、最小値 140mm のマウンド面を目標とする 200mm から 400mm に均すことができた。
- ・最大値 612mm、最小値 51mm のマウンド面を、評価 80 箇所中 73 か所で均すことができた。
- ・提案する小型バケットによりマウンド割石を移動することができた。

8. あとがき

今後、製作した試験装置を用い、海中において、水中バックホウの遠隔操作によるマウンド均し作業の精度確認試験を実施する予定である。

参考文献

- 1) 口田登, 辻垣武彦, 森田博史: 捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.10, pp.347-382.
- 2) 国土交通省港湾局監修: 港湾土木請負工事積算基準 (令和 3 年度改訂版), 日本港湾協会, 2021.

- 3) 飛島建設株式会社：”RLM 工法”，
https://www.tobishima.co.jp/technology/civil_marine/marine_rlm.html , 2021/09/21.
- 4) 牧野栄一，皿沢薫，久保滋：着座型タンパ式捨石均し機の開発について，埋立としゅんせつ，156号，1990，pp.57-62.
- 5) 喜寿司，平林丈嗣，高尾俊輔，吉江宗生：水中バックホウを対象としたマシンガイダンスシステムの構築と精度検証，港湾空港技術研究所資料，No1390，2021.
- 6) 熊谷崇信：遠隔操縦対応型水中バックホウの施工事例と有効性，建設の施工企画 2011年3月号(第733号)，2011，pp.41-45.
- 7) 茂木正晴，西山章彦，藤野健一，油田信一：無人化施工における油圧ショベルの作業時間計測 ～モデルタスクによる搭乗・遠隔操作での作業時間比較～，土木技術資料，vol.57，No.4，pp.16-19，2015.
- 8) 建山和由・中島聡・藤山哲雄：振動式締固め機械の振動特性を利用した地盤の締固め度の評価手法について，土木学会論文集，No.487/Ⅲ-26，pp.237-245，1994.

港湾空港技術研究所資料 No.1396

2021. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。