

Ⅱ-17 海中における遠隔操作型施工機械のデザインアーキテクチャ

平林 丈嗣

Taketsugu Hirabayashi

吉江 宗生

Muneo Yoshie

内海 真

Makoto Utsumi

山本 恭

Takashi Yamamoto

【抄録】水中工事は潜土工による手作業で施工されている。労働災害統計によると、水中工事は陸上工事と比べて死亡事故に至る割合が高く危険な作業である。また水深が大きくなるほど作業時間が短くなることや海象条件の悪化によって作業できないこと等の制約があり、作業効率が低い。

こういった問題点に応えるために搭乗型水中バックホウが近年導入されつつある。搭乗型水中バックホウは潜水土作業と比較して施工能力が格段に高いが、潜水士が運転操作するため、現場では高い透視度が必要であることと作業時間の制約がある。このため、水中工事における空間的・時間的制約を拡大するために水中施工機械の遠隔操作が求められている。

【キーワード】機械化施工 水中施工機械 遠隔操作 Augmented Reality

1. 緒言

大水深岸壁、廃棄物埋立護岸、海上空港等の海域の利用は、今後ますますその要請が高まる。それに伴い港湾構造物を中心とした大水深構造物の建設・維持管理は、安全にかつ効率的に実施することが求められている。その解決手段の一つとして機械化施工が挙げられるが、海中では工事中に発生する濁水により視界が遮られ操作が困難になる点や、防水対策が必要になるといった理由により限られた海域でしか実用化されていない。

潜水作業は潮流のある海中で自分の手により岩を移動させる重労働であること、しかも視界が悪い劣悪な環境のため小さなミスが重大事故に繋がることが多いことなどから、作業環境の早急な改善が望まれている。

本稿では潜水土事故の事例をまとめ、海中事故の特徴と動向を考察し、海中工事における機械化施工の効果について施工能力及び施工経費の視点から述べる。

2. 水中作業事故からみた機械化の考察

2-1 潜水土事故の事例

港湾工事での潜水土作業は作業船近傍、作業中の海面下、防波堤造成前の海域等における作業が多く、ここでの事故は生命の危険に直接関わるものとなる。事故を防ぐには安全確保に十分すぎるほどの注意を払う必要があるため、労働安全衛生規則により定められる潜水土免許の他に港湾潜水技士資格といった

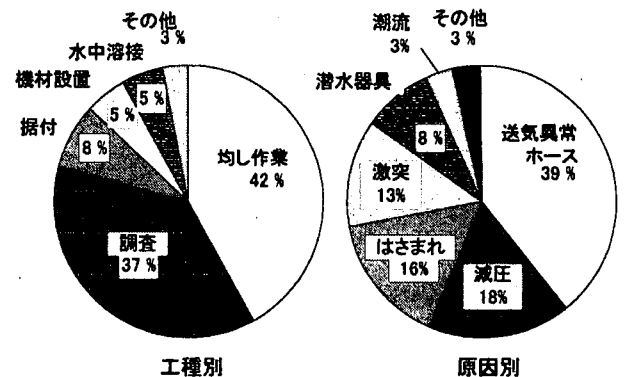


図.2-1 潜水事故発生の割合

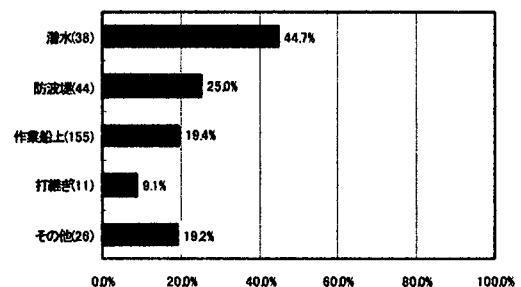


図.2-2 作業別に見た死亡率

潜水作業の安全を目的とした資格が必要であるなどの対応がとられている。

ここでは旧運輸省の直轄工事に限定し事故事例を参照することにより、潜水土事故の傾向を検証する。

旧運輸省のとりまとめた「直轄港湾工事安全データベース」によると、潜水作業中の事故は昭和47年から平成12年までの27年間で38人が事故に遭い、17名が亡くなっている。また死亡事故に至らなくても減圧時の脊椎梗塞や潜水病等、運輸省の直轄工事だけで毎年約1名の潜水士が生命に関わる事故に遭遇している。

事故発生件数を工種別に見ると水中均し作業が最も多い。これは作業量が大きく潜水時間が長いことによると推測される。また原因別で見ても送気ホースに関係する事故の割合が一番高い。具体的には送気ホースの挟まれや巻き込みといった事故である。

このような窒息や潜水病といった陸上作業ではありえない事故が全体の約7割を占めており、水中という条件が事故の大きな要因となっている。また、窒息という事故は死亡に至らないまでも後遺症が残りやすいという事実も問題視すべき点である。

さらに作業別に見た被災者数における死亡者の割合を図2-2に示した。この潜水作業中の被災者数に対する死亡率が44.7%と他の作業と比較して格段に高いという結果は海中での作業の危険度の高さを示していると言える。

2-2 水中作業の機械化の必要性

水中での施工は機械化が進んでいないため未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。

こういった極限作業における安全性の確保や労働の軽減のための機械化は以前より研究開発が行われてきたが、積極的に進められてきたのは火災現場や原子炉内等の人間が立ち入ることが不可能な場所が対象であった。これは主に経済性の観点から実用化が難しいと考えられてきたためであろう。

最近における機械化の事例として水中バックホウがある。佐伯建設工業株式会社では平成6年より水中バックホウを現場に投入しており、現在までに5台の水中バックホウを保有している。安全性について現場代理人にヒアリング調査を行った結果、「基本的に捨石や被覆石に触れる必要が無くなったことから指や足先がはさまれる事故が改善されている」、「運転席はロールケージで保護されておりオペレータの安全性は確保できている」ということであった³⁾。近傍にいる他の潜水士との接触に関しても、作業中に発生する音や投光器により作業機械の存在が明確に認識できているため今のところ問題にはなっていない。さらに事故原因の割合が最も多かった送

気に関する事故に対しても考慮されており運転席に緊急用のボンベが設置されているなど、送気器具の故障やホースの切断など人命に対する安全性も向上している。

現在、水中バックホウは視界条件が制約となり稼働現場が沖縄や日本海の一部など透視度の高い地域に限定されているが、これを広く普及させることが海洋工事全体の機械化へ向けて最初に取り組むべき事項である。

3. 水中バックホウ（遠隔操作型）の可能性検討

3-1 積算によるコスト評価

近年では市販の運輸省港湾請負工事積算基準⁴⁾に水中バックホウによる施工歩掛りが参考資料として掲載されている。たとえ参考資料でも基準ができたということで国の発注した工事だけでなく民間が発注する工事においても積算がしやすくなり、機械化の普及の足がかりになると考えられる。

しかし水中施工機械は市場の構築されている陸上機械と違い、施工機械自体の価格の他に防水対策や動力源の分離、それに伴う油圧系統の改造などが必要で陸上機の6.5倍程度の価格になってしまう。さらに遠隔操作を視野に入ればそのための改造費などが必要となるため、初期投資の金額は決して少なくない。だが潜水士作業における作業効率は潜水深度によって大幅に低下するため、潜水作業を伴わない遠隔操作型のバックホウは施工コスト上メリットを有するのではないかと考えた。

ここでは市販の積算基準に掲載されている歩掛りによって、潜水士・潜水士搭乗型水中バックホウの100㎡あたりの積算金額を算出する。また遠隔操作型水中バックホウにおいても積算を行うことにより今後普及を進めるため必要となる目標値を示し、機械化施工のコスト的な面からみた普及の可能性を考察するものである。

3-2 捨石均し工事におけるケーススタディ

積算は市販されている「運輸省港湾土木請負工事積算基準」、「船舶及び機械器具等の損料算定基準⁵⁾」によって算出する。単価については「建設物価（建設物価調査会監修）」、及び一般に公表されている労務単価通達を参照した。なお今回は常陸那珂港を想定し工事内容は防波堤設置のためのマウンド築造とした。また遠隔操作における一日あたりの標準施工能力は搭乗型

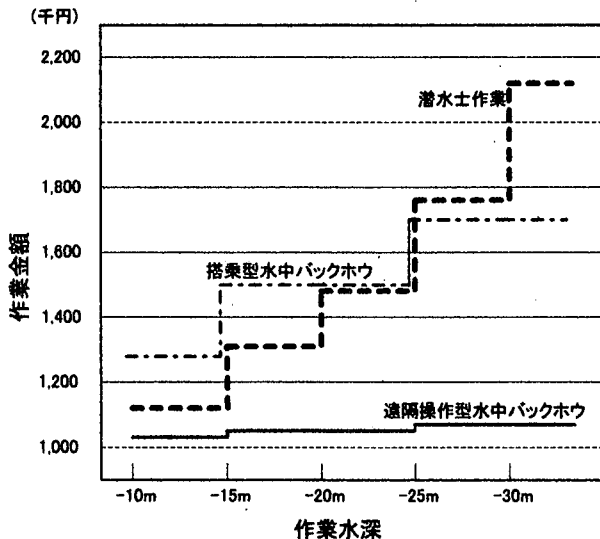


図.3-1 積算金額比較 (常陸那珂港ケーススタディ)

に水中バックホウと同じ値を採用した。

これらの条件のもとに作業水深に対する積算金額を算出したものが図3-1のグラフである。

結果として潜水士による手作業とバックホウによる作業では水深・25m付近で作業金額が逆転している。この二つの工法は潜水士の作業水深が作業金額に影響しており、潜水士の歩掛りの少ない搭乗型水中バックホウが水深が大きい場合に有利となった。遠隔操作の場合では作業水深の影響が無いため潜水士船及び搭乗型バックホウと比べると作業水深が大きくなるにつれて非常に有利である。・20mにおいて約2/3と計算された。

この試算結果からは以下の二点が言える。

- ・ 搭乗型水中バックホウは水深・25m程度までは潜水士船と比べて経済面において有利ではない
- ・ 遠隔操作型水中バックホウの施工能力が搭乗型並であるなら経済面において有利となる

このように現状の搭乗型水中バックホウでは大水深での施工にその効果が期待できる。また遠隔操作等によって海象条件による影響が少なくなれば、通常の水深でもコスト的な評価が期待できる可能性を持っており、透視度2～4mにおける搭乗型水中バックホウの施工能力を確保することが遠隔操作型水中バックホウを開発する上での一つの目標値であるといえる。

4. 水中施工機械の遠隔操作におけるデザインアーキテクチャ

施工の機械化において最初に考慮すべき点は安全・コスト・効率の3つの要素のバランスである。陸上での機械化は主にコストに関して重点がおかれているが、それは作業域が陸上という時点で既にある程度の安全が確保されているためである。現場が水中作業という極限状態の場合、コストと同時に安全性を確保する必要がある。

安全性を考慮した施工システムの主な形態として、完全自動化、遠隔操作化、有人施工システムの改良の三項目をあげる。

完全自動化については定常的な現場需要がある場合や規格の定まった動作に対して有効な手段である。この主な対象として検査業務が考えられる。

遠隔操作化は操作を最終的に人間が行うことによる柔軟性の高さもあり、施工現場への適用性も高い。また完全自動化に比べて経済の面で利点もある。ただし人間が遠隔操作を行うためには現場状況の把握が必要となり、映像に頼ることが難しい水中施工においては遠隔操作の操作性の向上が必要である。

有人施工システムの改良は作業者の補助となる機械の開発によるものが一般的であり、潜水作業を対象とするならば搭乗型水中バックホウもその1つの例である。

搭乗型水中バックホウによる施工は港湾請負工事積算基準に参考資料として記載されたことからわかるように施工方法として限られた海域ではあるが普及が進んできたと言える。しかも作業員の評価も非常に高く、水中での施工の機械化という分野においては非常に成功した事例である。安全性、施工能率ともに潜水士による人力施工よりも格段に高く、コスト的な視点からみても今後十分普及する余地がある。しかし搭乗型水中バックホウが導入されているのはすべて透視度の高い海域である。これは潜水士作業が手の届く範囲が見えれば作業可能であるのに対して、搭乗型水中バックホウはバケットの先端が見えなければ作業が困難になるという理由からである。

港湾空港技術研究所では、施工の効率、安全確保を実現するため水中施工機械の遠隔操作におけるデザインアーキテクチャを提案した。特に濁水による施工状況認識の低下が水中バックホウ普及の妨げになって

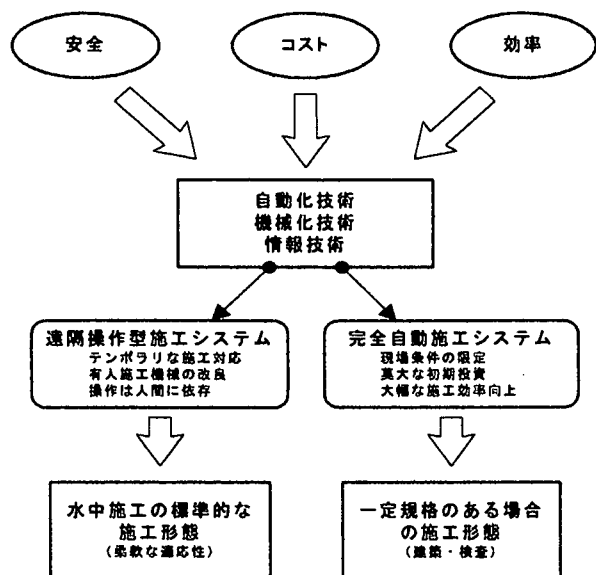


図.4-1 機械化施工の開発フロー

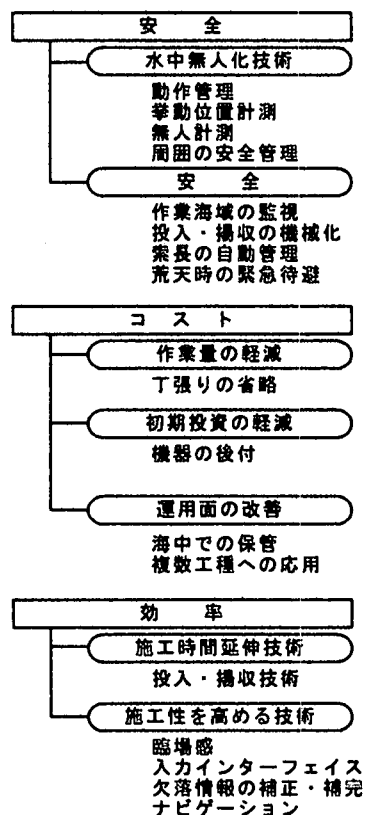


図.4-2 遠隔操作施工のアーキテクチャ

いる点に着目し、水中バックホウの遠隔操作の効率を有人施工程度まで向上すべく、AR (Augmented Reality) 技術⁶⁾を応用した操作性を高める技術の研究を筑波大学と共同で行っている。ARとはバーチャルリアリティの一種で日本語では拡張現実感と訳されており、不完全な情報を互いに補完させ人間の認識力を補助するといった技術である。

また、陸上建設機械では施工の自動化を進めるために、機体の位置や施工高さの目標値といった情報を加えたIT化施工が進みつつあるが、これは施工前の丁張り作業を省略することにより施工全体の省力化を図るものである。水中施工においても陸上と同等以上に丁張り作業に時間がかかるため、水中遠隔操作に特化した情報でナビゲーションするなど、水中での施工を全体的に省力化を進める事も重要である。

5. 結言

陸上での遠隔操作はTVカメラによる視覚情報のみで行われるのが一般的である。しかし水中施工では陸上のようにクリアな視界を取得することが困難であるため、水中施工機械の遠隔操作には陸上遠隔操作で省略されてきた触覚や聴覚といった情報により欠落した視覚情報を補う必要がある。つまりバケットが受けた力をフィードバックさせることによってオペレータが施工状況を実感的に認識する視覚に頼らない操作システム⁷⁾を目標としており、このような海中での遠隔操作技術が構築されると水中バックホウが導入される現場が増加すると考えている。

終わりに、本論文の執筆にあたり多大な御指導を頂いた筑波大学の岩田助教授、矢野講師、佐伯建設工業株式会社の金山部長に謝意を表する。

- 1) 中央労働災害防止協会安全衛生情報センター：
<http://www.jaish.gr.jp/>
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所：
<http://www.ipss.go.jp/>
- 3) 金山裕幸：“水中施工機械「水中バックホウ・ビッグクラブ」による施工コスト削減対策について”，第16回港湾技術報告会概要集
- 4) 社団法人日本港湾協会編：運輸省港湾土木調査工事積算基準。
- 5) 社団法人日本港湾協会編：船舶及び機械器具等の損料算定基準
- 6) 館：“バーチャルリアリティと現実空間”，ロボットから人間を読み解く，pp.166-179, 2000.
- 7) 平林, 吉江, 内海：“水中施工ロボットにおけるARを用いたM-Mインターフェイスの構築”，TECHNO OCEAN2000, pp411-414, 2000.