

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1221

December 2010

網チェーン把持装置による海中物体回収とそのモデリングに関する研究

野口 仁志

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	4
1. 結論	5
1.1 背景	5
1.2 従来のブロック把持装置の研究	5
1.3 ロボット工学における把持に関する研究	6
1.4 論文構成	6
2. 網チェーン把持装置の提案および把持模型実験	7
2.1 緒論	7
2.2 網チェーン把持装置の提案	7
2.3 装置の特長及び期待される効果	8
2.4 ブロック撤去時間効率模型実験	8
2.5 ブロック水槽模型実験	13
2.6 種々の形状物把持模型実験	14
2.7 実作業を想定した時間効率及び経済性の検討	15
2.8 結論	17
3. 既設ブロック撤去工事への活用	17
3.1 緒論	17
3.2 ブロック撤去工事	17
3.3 作業諸要素別の検討	25
3.4 結論と課題	27
4. 海底落下物回収作業への活用	27
4.1 緒論	27
4.2 従来技術における海底落下物回収作業	28
4.3 大水深海域での適用を想定した模型実験	28
4.4 水中翼回収作業その1	29
4.5 水中翼回収作業その2	31
4.6 今後の課題	32
4.7 結論	32
5. 把持のモデリング	32
5.1 緒論	32
5.2 消波ブロック把持のモデリング	33
5.3 計算結果	38
5.4 今後の課題	40
5.5 結論	43
6. 結論と今後の課題	43

6.1 結論	43
6.2 今後の課題	44
謝辞	45
参考文献	45

Study for Removal of Objects to Sea bed Using a Holding Device with a Chain and Its Modeling

Hitoshi Noguchi*

Synopsis

A holding device with a chain net was developed for automation and labor reduction in lifting a heavy object. The device was a simple structure composed of a chain net which hangs from the support frame and forms four meshes. It is lightweight without a power unit and can be applied to object with various shapes. The device has been successfully applied to the removal of wave-dissipating blocks up to 25t. Four-leg blocks, six-ten leg blocks, and broken blocks were removed.

This device can adjust to deep sea only by extending the length of the hanging wire. The device applied to recovery of a Hydrofoil sank to the seabed. The horizontal position control seemed to be difficult due to the swing of device in water. However, it became to control the device position by a simple operation method of putting a part of the net chain on the sea bottom.

Although its operation is simple, safety checks on lifting must be rigorous, particularly when the object to be lifted is heavy. Therefore, models of the lifting situation would be highly desirable.

The holding of a four-leg block with the device was modeled, showing that its geometrical and static constraint conditions are expressed as a set of nonlinear simultaneous equations having the same number of unknowns. By solving the simultaneous equations, the holding configuration of the block and the chain net, and the tensions acting on the chains are obtained for various ensnaring cases. This is useful for determining whether the device is capable of holding this type of block. The proposed modeling method can also be applied to a broken four-leg block missing a leg.

The generalization of the proposed modeling method for application to general objects and the effect of friction between the chains and the object to be lifted was discussed.

Key Words: chain net, holding device, modeling, removal, wave-dissipating block

* Research Coordinator for Advanced Technology, Construction and Control Systems Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5063 Fax : +81-46-844-0575 E-mail : noguchi@pari.go.jp

網チェーン把持装置による海中物体回収と そのモデリングに関する研究

野口 仁志*

要 旨

専用の駆動装置を有さず4目の網状チェーンで構成した簡易な構造である網チェーン把持装置を開発した。この装置は25tまでの既設消波ブロック及び海底に落下した水中翼の回収には有効に活用できることを実証した。特に慎重な取り扱いが必要な大重量ブロック及び海底落下物等への適用範囲を広げるために把持モデルの構築に取り組んだ。4脚消波ブロック把持をモデル化し、幾何学的な条件と力学的な条件より多次元非線形連立方程式で表されることを示し、これを解くことにより把持状態が求められることを示した。このモデルを用いて、4脚ブロックの吊り上げ可否の判断が可能となった。また他の形状の物体にもこのモデルが応用できる条件を示した。

キーワード：網チェーン，把持装置，モデリング，撤去，消波ブロック

* 施工・制御技術部新技術研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5063 Fax：046-844-0575 e-mail:noguchi@pari.go.jp

1. 結論

1.1 背景

港湾および海岸においては膨大な数の消波ブロックが、防波堤、護岸の前面あるいは海底に据え付けられている。これらの消波ブロックは港湾および海岸の整備の進捗等に伴い移設が必要となる場合がある。

防波堤の築造は数年以上の長期間を要する場合が一般的で、典型的な築造方法では、毎年防波堤の本体となるコンクリート矩体のケーソンを所要の函数を製作し防波堤の先端部に延長した形で据え付けていく方法がある。防波堤前面には波により防波堤本体であるケーソンが転倒、破壊されないように消波ブロックを設置するが、防波堤端部も翌年に次のケーソンが設置されるまでその周囲に消波ブロックを設置して保護する。そのため防波堤の端部に設置された消波ブロックは防波堤の整備延伸に伴い撤去して周辺の海域等に仮置きし、新しいケーソンを設置後、延伸された防波堤端部に設置される。このように防波堤の整備に伴い、毎年消波ブロック移設工事が発生する。

防波堤の延伸工事以外にも港湾計画の変更等に伴いブロック撤去作業が生じるケースは多い。社会情勢の変化に伴い工場の跡地に親水性の緑地等の整備する、あるいは、船舶の大型化に伴い既存の岸壁では水深が浅くて対応できず、沖合に新たに大水深の岸壁を整備する等、土地利用の変更に伴い港湾の形状も変化しそれに伴い既存の消波ブロック撤去の必要性が生じる。海岸においては景観上の配慮から沖合の離岸堤を消波ブロックが海面上に現れない潜堤として改良するケースも多い。空港では、沿岸沿いあるいは関西国際空港のように人工島に整備されている場合、航空機の大型化に伴う滑走路の延長あるいは拡張工事に伴い、海域に面する護岸前面に設置された消波ブロックの移設が必要となる。

国土交通省港湾局が所管している工事において消波ブロックの移設工事を含むものは年 10 件程度と言われている。消波ブロックは港湾以外に河川、漁港にも多数設置されており、これらの整備に伴い移設工事が発生する。また港湾においても、地方自治体が実施する工事があり、それらの工事においても消波ブロック移設工事はある。

これらの諸情勢により必要となる消波ブロック撤去工事において、従来は、作業員あるいは潜水士が、消波ブロックの隙間にワイヤロープを通して玉掛けを行い撤去している(写真-1.1)。しかし、この作業は、足場が不安定で、ブロックに海藻が着生していたりすると危険である。また、消波ブロックは、機能上、背後の防波堤、護

岸等に強大な波力が直接及ばないようにそれらの前面に据え付けられており、強大な波の力を直接受ける場所での作業である点でも危険である。そのため、無人で消波ブロックを把持できる装置の開発に取り組むこととした。

以下、本章では、従来のブロック把持装置に関してまとめ、ロボット工学における把持に関する研究について記述した。



写真-1.1 作業員によるブロックへの玉掛け作業

1.2 従来のブロック把持装置の研究

ブロックを把持する装置としては、装置の自重を利用してワイヤー操作により 3 本の爪を開閉して掴む装置がある(写真-1.2)^{1,2)}。油圧シリンダーにより長いアーム 3 本、短いアーム 3 本の計 6 本のアームを開閉して掴む装置(図-1.1)³⁾や 4 本の抱えるアームと 2 本の挟み込むアームによる把持装置⁴⁾が開発されている。

また、一本のチェーンが装置本体より吊り下げられ、このチェーン環がブロックの脚の間に滑り込むように装置の位置を前後左右に調整し、滑り込んだ後にチェーン環の幅を狭め、チェーンを巻き込んでブロックを捕捉する機構となった把持装置も開発されている(図-1.2)⁵⁾。なお、把持は指等で対象物を掴む意味が強いが、本論文では、チェーンで物体を掴むことも把持として記述する。



写真-1.2 自重開閉によるグラブ式把持装置²⁾

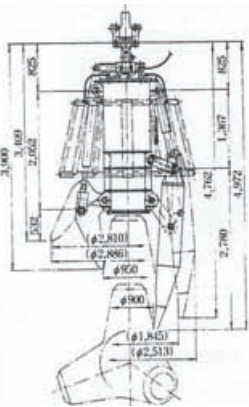


図-1.1 油圧開閉によるグラブ式把持装置⁴⁾

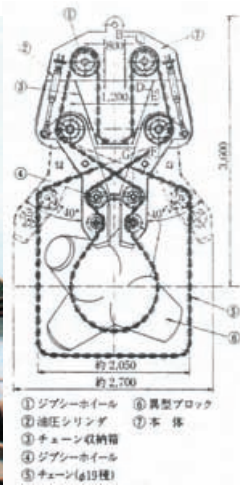


図-1.2 1本環状チェーン式把持装置⁶⁾

しかし、これらの装置は、自重で爪を開閉するため、あるいは、アームやチェーンを操作するための動力部等を有しているため重量が重くなり、吊り上げる対象のブロックと同程度かそれ以上の重さとなっている。そのため、時間的な作業効率は、従来の人力作業と比較して2倍に向上しても必要とする起重機船も大型のものが必要となり、装置の損料も含め全体として、ブロック1個当たりの撤去移設コストに関しては、あまり変化がないものとなっている。

図-1.3に示す6本のアームを有するグラブ式把持装置および、および図-1.4に示す1本の環状チェーン式把持装置におけるそれぞれの装置重量と対象ブロック重量を表-1.1に示す。

この表に示すように、既存の把持装置では、対象ブロック実重量に対する装置重量は同等レベルとなり、使用する起重機船等が1ランク大きいものとなり、経済性の点ではマイナスの要因となっている。

表-1.1 既存ブロック把持装置の重量

型	グラブ	チェーン
構造	6本のアーム (図-1.3)	1本環状チェーン (図-1.4)
駆動方法	油圧方式	油圧方式
①装置重量	8.5 t	3.6 t
②対象ブロック重量	5.75t	5.75 t
①/②	1.48	0.63

1.3 ロボット工学における把持に関する研究

ロボット工学の分野では、把持に関する様々な研究が行われている。しかし、それらのほとんどは、人間の手のような複数の指関節機構を開閉することにより物体を把持するものである^{7,8)}。

チェーンや紐のような柔軟な素材を用いた投げかけ式の把持装置も提案されている⁹⁾。しかし、その装置はリンク機構に紐を用いているもので、紐の端には一般の開閉式の把持機構を取り付けている。

次にロボット工学の分野における土木・建設関連の研究については、計測、維持管理、塗装等の軽作業を自動化、ロボット化する研究は見受けられる^{10~12)}。重作業の分野ではバックホウ等の建設機械を遠隔操作する研究はなされている^{13,14)}。ホイールローダーのような建設機械を用いて土砂あるいは岩を自動で搭載する研究もなされている^{15~17)}。しかしこれらの研究で用いられている建設機械は、一般に使用されている汎用の建設機械である。ロボット工学の分野においても、本論文で提案するような網チェーンを用いた把持装置は研究されていない。

1.4 論文構成

本章では、研究の背景について述べた後、これまで開発されてきたブロック把持装置に関してまとめ、ロボット工学における把持に関する研究について述べた。

2章以降では、まず2章で網チェーン把持装置を提案し、その構成および装置の特長、期待される効果について述べる。模型実験により網チェーン把持装置がブロック把持に有効であったことを示し、種々の視認条件における作業時間効率の分析結果を示す。つぎに種々の形状物の把持にも網チェーン把持装置が有効であったことを示す。

3章では、6件の既設ブロック撤去工事に本装置が使用された内容を、工事ごとに記述し、作業諸要素別に検討を行う。

4章では、海底落下物回収作業への活用として、大水深を想定した位置制御の模型実験を行いその結果を踏まえ、水深約200mに落下した船舶の水中翼回収作業に活用された2件の事例について記述する。

また、3,4章においては、実際のブロック撤去工事および大水深の海底落下物への回収作業に本装置が活用された事例から、課題として大重量のブロック、および油漏れが懸念され沈船の回収等への本装置の適用には、より慎重な対応が必要とされることを述べる。

5章においては、3,4章での課題としているより慎重な対応が要求される大重量のブロック等へ本装置の適用への範囲を広げるために、把持のモデリングの構築に取り組んだことについて述べる。

そして最後に、6章では、本論文の結論及び今後の課題について記述する。

2. 網チェーン把持装置の提案および把持模型実験

2.1 緒論

本章においては、網チェーン把持装置の提案を行い、その模型を用いて、種々の視認状況における模型実験を実施し、実際の撤去作業を想定した作業時間効率、コストについて検討する。2.2では、網チェーン把持装置について提案しその構造について説明した。2.3においては本装置の特長と期待される成果について述べた。2.4では、4脚ブロックを対象として種々の視認状況等において模型実験を行い、各ケースにおける所要時間を計測して分析し、各ケースを比較する。2.5では水槽模型実験を実施し、濁水中あるいは埋没したブロックの回収を想定した実験を試みた。2.6では、ブロック以外の種々の形状物の回収の模型実験を実施し、その把持可能性を検討した。2.7では、2.4のブロック模型実験結果を基に、実際のブロック撤去作業を想定した作業時間効率、コスト試算を行い、従来の作業員によるワイヤー掛けの方法との比較を試みた。

2.2 網チェーン把持装置の提案

1.2において、グラブ式およびチェーン式把持装置の比較をしたが、グラブ式は爪を操作するための油圧シリンダー等の駆動装置が不可欠で軽量化は困難と考えられる。一方チェーン式は、その柔軟性から種々の形状のブロックに適用できる可能性があり、チェーンの巻き取り巻き戻しはクレーンの吊りワイヤーの操作によって対応できると思われるため、チェーン方式での把持装置の開発に取り組むこととした。

チェーンの巻き込み巻き伸ばしの操作は、クレーンのワイヤーの制御により操作が可能である。よって、チェーンにより脚を捕捉すれば、駆動装置を必要としない把持装置が開発できると考えられる。これにより装置の大

幅な軽量化を図れると考えた。

図-1.2に示した1本の環状チェーン把持装置では、装置全体を前後左右に操作してチェーンが脚を捕捉していたが、捕捉するまでに時間を要していた。そこで、新たに図-2.1に示す網チェーン把持装置を開発することにした。この新装置では、水平面方向に広がりを持たせ、また、チェーン環一つでは、脚を捕捉するのに時間を要するため、環を複数もつような構造として、網の目のような形状にチェーンを構成することとした。

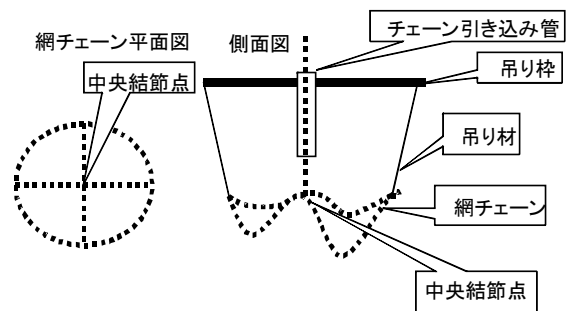


図-2.1 網チェーンの構造

各網の目を絞り込むのに個々に操作する方法では操作が複雑になるので、一つの操作で共通して網の目の大きさを絞り込む構造が望ましいと考えた。そこで、網の目の絞り込みは中央部の結節点を細い管の中に引き込むことにより行うものとした。この網チェーンを広げた状態で、対象とするブロックの上に覆いかぶせ、網の目がブロック脚を捕捉する状態になったところで、中央の結節点を管の中に引き込んで網の目の大きさを絞り込む。

図-2.2にクレーンを含む全体構成を示す。網チェーンは吊り下げ用支持フレームから吊り下げられる。この吊り下げられた網チェーンを把持しようとする消波ブロックの上に覆いかぶせるように支持フレームの位置を調整する。網チェーンの周囲部は自重により周囲の消波ブロックとの僅かな隙間にも滑り込み、把持しようとする消波ブロックの脚を網目が捕捉する。主ワイヤーを引き上げると、網チェーンはチェーン引き込み管より引き込まれ、それに伴い網の目が絞り込まれブロックの脚をしっかりと把持してブロックを吊り上げることができる。また、砂に埋没したブロックの周囲の土砂、ゴミを除去するための高圧水噴出機能も必要に応じ設けることを想定している。

図-2.3に、ブロックの把持の過程の詳細を示す。図-2.3(a)では、網チェーンの形状をチェーンの自重による懸垂状況を考慮しない簡易な四角錐状に近似して表現している。網チェーンの絞り込みにより、四角錐状の底辺

の四つの頂点に位置する結節点は、四角錐の頂点に位置する中央のチェーン引き込み管の入り口の方へ引き込まれ、4つの網目が絞り込まれる。ブロック脚を捕捉している網目はブロック脚をしっかりと把持した状態となりブロックの吊り上げが可能となる。

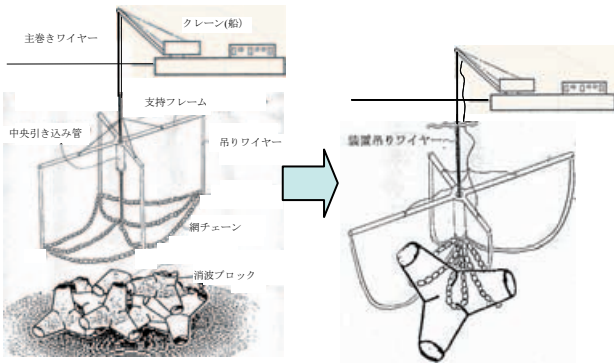


図-2.2 網チェーン把持装置

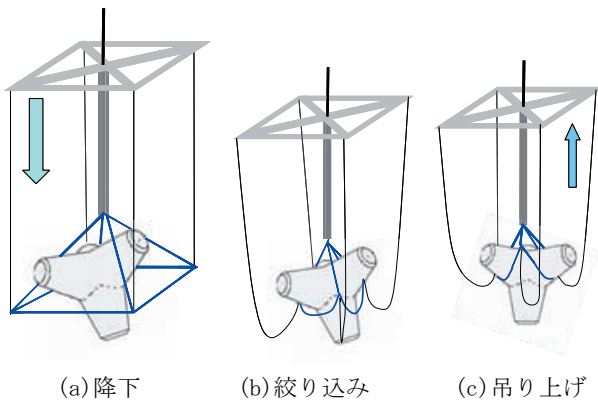


図-2.3 ブロック把持の過程

ブロックの開放は、ブロックの仮置き場所に角材等により凹凸を設けておき、凹部に下側の網チェーンが掛かっている脚を降ろす(写真-2.1)。その後、クレーンの主巻きワイヤーを緩めるだけで無人で簡単にブロックを解放できる構造となっている。

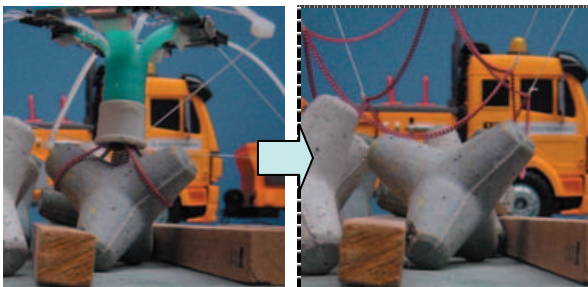


写真-2.1 ブロックの解放

2.3 装置の特長及び期待される効果

本把持装置の特徴および期待される効果として下記の事項が挙げられる。

①無人化施工が可能

ブロックの吊り上げ及び開放作業に、人力作業の支援は不要である。

②構造が簡易で軽量

基本構造は網チェーンとそれを吊り下げる支持フレームのみであり、軽量である。

③動力部を有しない

クレーンに吊し、吊りワイヤーの巻き上げ下げにて作動させるので、モータ等の動力装置は不要である。

④操作が簡単

基本的に吊り下げているクレーンの操作のみである。

⑤安全性・効率性の向上

従来のような、潜水士がワイヤー掛けする作業が不要となるので、作業の安全性および作業効率の向上が図れる。

⑥種々の形状の物体回収への活用

ブロックだけでなく、種々の形状の海面浮遊物あるいは海底落下物等の回収作業への活用が期待出来る。

水深が深い場合、電動あるいは油圧駆動等による回収装置では耐圧構造が大きな課題となるが、本装置は、水深、水圧に影響されない構造となっているので、大水深においても吊り上げるワイヤー長を伸ばすだけで対応可能となる。

2.4 ブロック撤去時間効率模型実験

(1)4脚ブロック把持模型実験

a)実験目的

2.2 で提案した網チェーン把持装置をブロック回収作業に適用することを想定して種々の視認状況等の作業条件を設定し、作業時間等を測定・分析することにより、実作業における効率性等の検討に資することを目的とする。

b)実験方法

6.3t型4脚ブロックの1/31.4模型(高さ6.6cm重さ184g)に対応する把持装置模型を製作し、ラジコンのトラッククレーン車模型に取り付けた(写真-2.2)。把持装置模型の支持フレームはクレーン先端より吊り下げ、クレーンのブームの仰角の操作により把持装置模型全体の上下をコントロールした。クレーンの操縦は、ブームの上げ下げ、伸縮、左右旋回、及びワイヤーの巻き上げ巻き下げの4操作である。

乱積みした消波ブロック群の山を、トラッククレーン

のラジコン操縦のみにより移設した(写真-2.3, 2.4). ブロックの移設先はクレーンのブームを約 90° 旋回した位置とした. 移設先は, 18mm×18mm×300mm の角材を 7cm 間隔に配置し, 角材の間にブロックを 1 列に 3 個ずつ設置するようにした(写真-2.5). 角材を設けたのは, 地面とブロックと脚の隙間にチェーンが挟まれないようにして, ブロックをチェーンから外す作業を円滑に行えるようにするためである.

ラジコン操縦者は, 状況を直接目視しながら操作を行った. ラジコンの操縦は, 本装置の特性を熟知した同一人が行った. そして 30 個の消波ブロックを連続して撤去・移設を行い, その状況をデジタルビデオカメラにより記録し, 移設作業状況及び所要時間等を分析した.

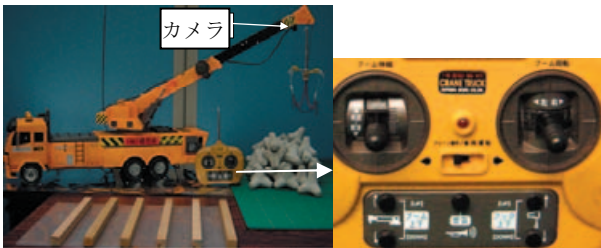


写真-2.2 ブロック把持模型実験装置

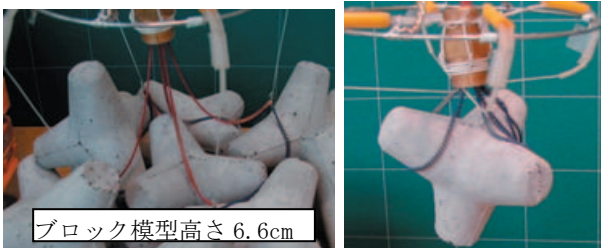


写真-2.3 ブロック模型の把持



写真-2.4 吊り上げ



写真-2.5 解放されたブロック模型

c) 実験結果及び考察

移設に要した時間の総括表を表-2.1に, 各ブロックの移設時間におけるブロック吊り上げまでの所要時間と吊り上げ後の所要時間を図-2.4に示す. 表-2.1に示すように, 1 個当たりの移設平均時間は, 75 秒であり, 最小値は 39 秒, 最大値は 155 秒であった. 所要時間の内訳としては, ブロックを捕捉して吊り上げるまでの平均所要時間は, 35 秒, 吊り上げ後の所要時間は, 40 秒であった.

吊り上げ後の所要時間は, 24~69 秒と 45 秒以内の幅に収まっているのに対し, 吊り上げまでの所要時間は, 13~115 秒と幅が広がっている. これは, 1 回の操作でブロックを吊り上げられれば短時間で済むが, 吊り上げられず, 2~3 回操作を繰り返す場合は, 時間を要するためであった.

表-2.1 4脚ブロック模型の移設時間総括表

項目	所要時間	吊り上げまでの所要時間	吊り上げ後の所要時間	備考
(合計)	37分44秒	17分36秒	20分8秒	30 個計
平均値	75 秒	35 秒	40 秒	
最小値	39 秒	13 秒	24 秒	
最大値	155 秒	115 秒	69 秒	

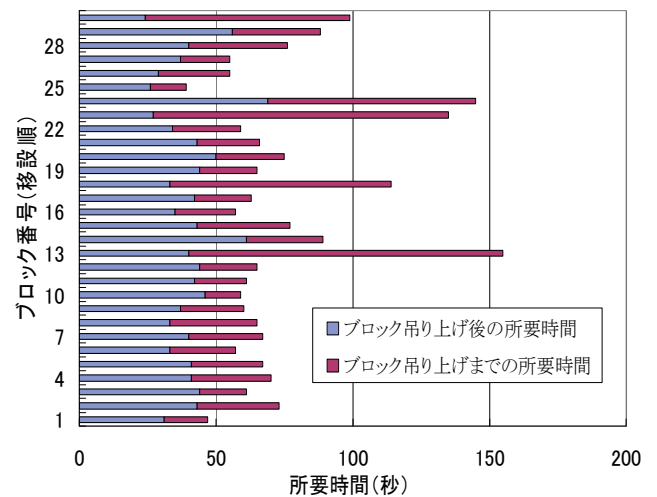


図-2.4 4脚ブロック模型の移設時間

(2) 6脚ブロック模型実験

a) 実験目的

6 脚ブロックを対象として, 4 脚ブロックと同様な模型実験を行い, その作業時間効率を比較することを目的とする.

b) 実験方法

2.4(1)の4脚ブロック把持実験と同様な方法で, 対象

とするブロックを乱積み6脚ブロック(図-2.5)として、把持実験を行った。移設場所については、特に角材は設けず、平面上にブロックを設置した。なお6脚ブロックは図-2.5(a), (b)に示されるように面取りがなされているが、本実験で用いた模型では、図-2.5(c)に示されるように面取りがなされていないものであった。

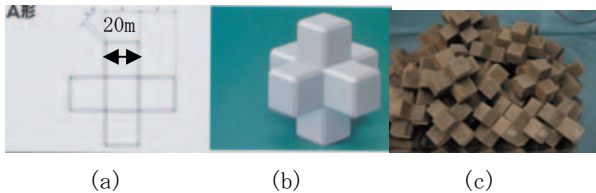


図-2.5 6脚ブロック模型

c) 実験結果及び考察

図-2.6 に各ブロックの移設時間分布を、表-2.2 に移設所要時間の結果を示す。また表-2.3 に4脚ブロックの所要時間と比較したものを示す。

4脚ブロックと比較すると1個当たりの平均移設時間は、62秒で、4脚ブロックより13秒短かった。その内訳をみると、吊り上げ後の所要時間はどちらのブロックも約40秒であったが、吊り上げまでの時間が、6脚ブロックの方が約12秒短かった。

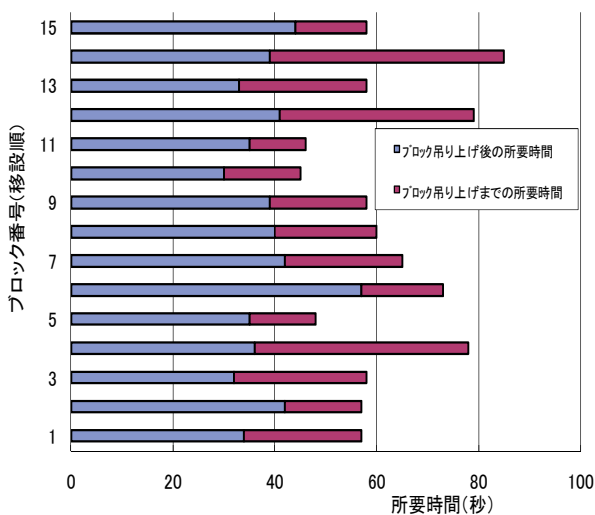


図-2.6 6脚ブロック模型の移設時間

表-2.2 6脚ブロック模型の移設時間総括表

項目	所要時間	吊り上げ所要時間	吊り上げ後所要時間	備考
(合計)	15分25秒	5分46秒	9分39秒	15個計
平均値	6.2秒	2.3秒	3.9秒	
最小値	4.5秒	1.1秒	3.0秒	
最大値	8.5秒	4.6秒	5.7秒	

表-2.3 4脚ブロックと6脚ブロックの1個当たりの移設時間の比較

項目	所要時間	吊り上げ所要時間	吊り上げ後所要時間	備考
6脚ブロック	6.2秒	2.3秒	3.9秒	15個平均
4脚ブロック	7.5秒	3.5秒	4.0秒	30個平均
差	-1.3秒	-1.2秒	-1秒	

ブロックを吊り上げるための条件は、4脚及び6脚ブロックともに、二つの(以上)脚を一つあるいはそれ以上のチェーンの網の目で捕捉することが必要となる。

4脚ブロックでは4本の脚のうち2本の脚を捕捉する必要があるのに対し、6脚ブロックは、6本の脚のうち2本を捕捉するだけで良いので、確率的には6脚ブロックの方が1回の操作で吊り上げられる可能性が高くなり、吊り上げ時間も短縮されると考えられる。6本の脚があれば、一般的には3本の脚は下方を向いて他のブロック脚と接し、それらをチェーンの網の目に入れるのは困難であるが、残りの3本の脚は上方を向いており、そのうちの2本の脚が網の目に入れば良いので、作業の点では容易である。

(3) 映像による操作実験

a) 実験目的

カメラ映像による操作での作業時間効率を求め、直接視認の場合と比較することを目的として実施する。

b) 実験方法

2.4(1)の4脚ブロック把持実験において、ラジコン操縦者は、クレーンの先端に据付けた小型カメラ(写真-2.5)の映像のみを見ながらトラッククレーン模型を操作する状況下で、ブロックの移設実験を行った。

c) 実験結果及び考察

表-2.4に、カメラの映像のみによるブロック移設作業時間と2.4(1)で行った目視による作業時間を示す。カメラ映像によるブロック1個当たりの撤去時間平均値は73秒で、目視による平均値75秒とほぼ同様の作業時間効率となった。

カメラの映像は、ブロック群の真上からの映像であり遠近感が把握しづらく、ブロックの上下関係が判断しにくい点があるが、その一方で、チェーンがブロックの脚にかかっているかどうかは真上からの映像、チェーンの一部が脚の影に隠れているかどうかで判断ができる利点があった。チェーンの目全体が視認出来るときは、チェーンの目を絞り込んだときに、脚はチェーンの目に捕捉されずすり抜けるが、チェーンの目の一部が脚の影に隠れていると、チェーンの目を縛り込んだときにはチェーンの目に捕捉されることが予測できる。そのため、チ

チェーンを巻き上げる前にブロックを吊り上げられるかが判断できるため、確実性が向上する。

目視による状況判断では、斜め上方からの視点であるため、ブロック群の影になりチェーンの脚捕捉状況が十分に把握し難い点もあった。状況によっては、目視と真上からの映像を併用して活用することにより、作業時間効率が向上することも期待できる。

表-2.4 直接視認とカメラ映像の1個当たりの移設時間の比較

項目	目視による操作 (30個移設)	カメラ映像による操作 (13個移設)
平均値	75秒	73秒
最小値	39秒	44秒
最大値	155秒	166秒

(4) 音声指示による操作実験

a) 実験目的

音声指示による操作での作業時間効率を求め、直接視認の場合と比較することを目的として実施する。

b) 実験方法

2.4(1)の実験において、操縦者は状況を視認せず、別の指示者が状況をみながら操縦者にクレーンの操作を音声だけの指示で行いブロックを移設させる実験を行った。

c) 実験結果及び考察

1個の移設時間は、2.4(1)の目視による操作実験より平均時間で19秒多くの時間を要した(表-2.5)。クレーンの操縦は、ブームの上げ下げ、伸縮、左右旋回、及びワイヤーの上げ下げの4操作のみなので、音声だけの指示でも十分作業は可能であることが確認できた。

表-2.5 直接視認と音声指示時間の1個当たりの移設時間比較

	目視による操作 (30個移設)	指示者合図による操作 (15個移設)
平均値	75秒	94秒
最小値	39秒	60秒
最大値	155秒	185秒

(5) 不視認状況における模型実験

a) 実験の背景と目的

実際の工事では、対象となるブロックが視認できるかどうかにより作業効率は大きく異なる。海水中のブロックであっても水中カメラを吊り枠に設置して状況が視認できれば作業効率にはあまり影響はない。しかし、現場の海水の透視度が低く、水中カメラでは、ブロックの状

況が視認できない状況も十分想定される。また海面上のブロックにおいても、作業現場における制約条件からクレーンの操作席からはブロックの状況が視認できない状況も多い。このような背景から、不視認状況におけるブロック回収模型実験に取り組むこととした。

近年、超音波映像装置の性能が向上し、海底に設置されているブロック群の個々のブロック脚輪郭まで明確に把握できる装置も開発されており、このような装置を用いることにより状況を把握することは技術的に十分可能と考えられる。しかし、このような超音波映像装置は现阶段では高価な装置であることから、一般的に普及している安価な水中カメラの利用を想定し、水中カメラでも視認困難な濁水中では、撤去装置の運用方法を工夫したり、装置の構造を改造することによる対応を試みることとした。

b) 実験装置

乱積みした消波ブロック模型(高さ6.6cm 重さ184g: 6.3t型ブロックの1/31.4)群の山を、トラッククレーン車模型に吊り下げた網チェーン把持装置模型を用いて、クレーンの操作のみにより移設した(写真-2.6)。

ブロックの解放場所は角材を配して凹凸を設け、チェーンを緩めるだけでブロックが外れるようにした。濁水中を想定したケースでは、衝立を設け、操縦者にはブロックが見えないようにして実験を行った。

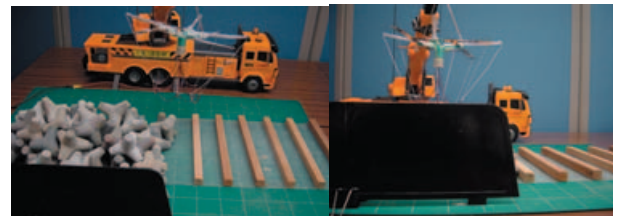


写真-2.6 不視認状況における模型実験と操縦者の視界

c) 実験方法及びケース

海面上あるいは、透視度が高い海域においては、クレーンの操作者が撤去するブロックをどの程度認識できるか等によって効率に影響する。

そのため、①直接視認できる場合、②クレーンブーム先端に設置したカメラ映像による場合、③視認可能な場所にいる指示者からの音声指示による操作の場合、を設定した。

さらに、完全な濁水中(透視度0m)を想定し、水面上の状況だけからブロックを撤去する方法を二つ試みた。第一の方法は、④撤去装置の操作方法を工夫してブロックの位置を探索する方法である。網チェーンを広げた状

態で装置を濁水中に降ろす(写真-2.7)。チェーンの下端がブロック群に接触した位置(海面上のチェーンの動きで把握)で降下を止め、装置全体を水平方向に移動する。少し移動させると、チェーンの下端がブロック脚に引っかかり装置の動きが引き留められる(写真-2.8)。その位置付近まで撤去装置の位置を戻して、装置全体を降下させる(写真-2.9)。網チェーンを引き絞り(写真-2.10)、ブロック脚を捕捉して引き上げるといものである(写真-2.11)。



写真-2.7 網チェーンの降下 写真-2.8 水平方向への移動



写真-2.9 水平方向の戻りと降下 写真-2.10 引き絞り



写真-2.11 ブロック模型の吊り上げ

第2の方法は、⑤網チェーンの大きさを従来の4倍程度の広さにし、網目の数も8目に増やすことで(写真-2.12)、任意の位置に降ろしても一つのブロック全体は網チェーンの下に位置するようにする(写真-2.13)。なお、隣接するブロックの脚にも網目が掛かり吊り上げの支障となる場合も生じるので、網チェーンの絞り緩めを繰り返す(写真-2.14)、一つのブロックだけを捕捉する状況にして(写真-2.15)吊り上げる(写真-2.16)。なお、一つのブロックだけを捕捉する状況の判断は、吊り荷重等より行う。

各実験ケースの状況を整理したものを表-2.6に示す。

実験回数は、ケース①④及び⑤については1回の作業で連続して10~15個撤去する作業を数回、ケース②③では1回繰り返し、各所要時間を計測した。

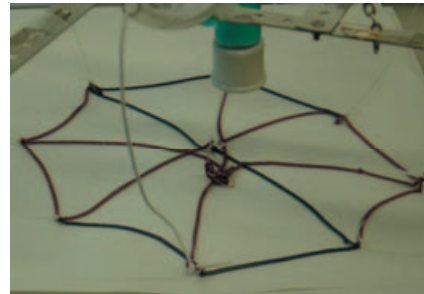


写真-2.12 8網目網チェーンモデル(従来の4倍の広さ)

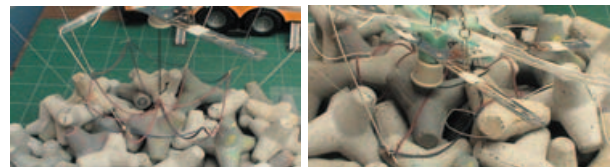


写真-2.13 降下

写真-2.14 絞りと緩め



写真-2.15 引き絞り

写真-2.16 吊り上げ

表-2.6 ブロック模型移設実験ケース一覧表

想定現場状況	実験状況	装置形式	ケース
海面上及び透視度良の海中ブロック	直接視認	4網目	①
	カメラ映像		②
	指示者の音声指示		③
完全な濁水中ブロック	衝立により遮蔽	4網目	④
		8網目大	⑤

d) 実験結果

各実験ケースにおいて、1個ブロックを吊り上げて移設する平均所要サイクルタイム時間を図-2.7の各棒グラフ全体の高さとして示す。

この値は、総作業時間を移設したブロックの総数で除した値である。ブロックを視認できる条件下の実験では、①直接視認75秒/個と②カメラ視認73秒/個とほぼ同等の結果となった。③指示者音声では94秒/個と①直接視認より約20秒時間がかかる結果となった。



図-2.7 各実験ケースにおけるブロック模型移設時間

不視認状態において操作方法で対応した実験④は 145 秒/個、網目数及び広さを増加した装置での実験⑤は 93 秒/個で、直接視認実験①75 秒/個と比べて 70 秒/個及び 23 秒/個、時間を要する結果となった。

各グラフの内訳であるが、先ず各平均時間において、ブロック群の上方において網チェーンを開いている状態を作業開始時点として、それからブロックを掴み引き上げるまでを「吊り上げ所要時間」とした。そして巡回して所定の仮置き場所にブロックを置き、網チェーンを緩めてブロックを解放し、再び作業開始位置のブロック群上方の位置まで巡回して戻るまでの時間を「吊り上げ後所要時間」として分類した。

ブロックの吊り上げ作業は各ケースの条件によって異なるが、ブロックを吊り上げた後の作業については全てのケースがほぼ同様の作業であり、時間効率も同等と考えられる。ケース①について、ビデオ画像を基に吊り上げ作業後の所要時間を分析したが、あまりばらつきはなく平均 40 秒/個であった。ケース①③④は網チェーンの形式が同様で、ブロック吊り上げ後は操縦者が状況を視認しながらクレーン巡回、ブロック解放、再度巡回と作業内容も全く同等である。ケース⑤は網チェーンの網目数が異なるが、解放作業は網チェーンを緩めるだけで他のケースと作業は同じである。ケース②はカメラ映像による作業であるが、ほとんど操作作業に影響なく、また全体の所要平均時間もケース①とほとんど同等であった。また各ケースにおいて吊り上げ後の所要時間が分析できる記録・データがある場合において分析したが、特に有意な差は認められなかった。そのため、全てのケースにおいて吊り上げ作業後の平均所要時間をケース①と同じ

40 秒/とした。そして各実験ケースにおいて、平均所要時間から吊り上げ後の所要時間を差し引いたものを吊り上げ所要時間とした。

個々の吊り上げ所要時間は、1回で吊り上げられれば短い失敗を繰り返すと長くなりばらつきが大きい。そのため、各ケースについて失敗なく1回で吊り上げられたケースの所要時間を平均して実質吊り上げ時間とした。吊り上げ所要時間から実質吊り上げ時間を差し引いた残りの時間を損失吊り上げ時間とした。損失吊り上げ時間は1回当たりの平均的な吊り上げ失敗に要した時間を示す値である。そして、各ケースにおけるこれらの内訳を図-2.7に合わせて示した。

「②カメラ映像」では、直上から網チェーンがブロック脚に掛かる状況が視認できるため吊り上げ失敗が少なく、損失吊り上げ時間も最小となっている。一方、「④不視認・探査」では、不視認の状況でブロックを吊り上げようとするため失敗も多く、損失吊り上げ時間も多い結果となっている。

2.5 ブロック水槽模型実験

(1) 難視認状況での水中カメラ映像による実験

a) 実験目的

前節では、海水の透明度が低くブロックが全く視認できない状況を想定した模型実験を実施したが、実際の海域では透明度が低くても距離が短ければ不鮮明でもある程度の視認は可能である。ここでは、吊り枠に水中カメラを装着した場合を想定し、そのような状況下の水中映像がどの程度作業の支援に役立つかを水槽実験により検討することにした。

b) 実験方法

海水にブロックの高さ程度の透視度がある場合を想定し、撤去装置のチェーン引き込み口付近に水中カメラを設置し、①透視度 6cm (実海域では 2m 相当) の濁水中の実験を行った。また、②透視度 0cm の完全な濁水中における実験も実施した。さらに、③海底の砂に埋没したブロックを想定し、水槽に砂を敷きブロック模型を埋没させた状態にして、網チェーンの四隅から水を噴出して砂を流動化させて網チェーンがブロックを捕捉して吊り上げる実験を行った。

c) 実験結果

透視度 6cm の濁水水槽実験における状況を写真-2.17に示す。ブロックの一部は認識できるため、その画像よりそのブロックの中心位置等は容易に推定可能と考えられる。そのため、濁水中であっても水中カメラを設置すれば、近傍の状況は把握できるため有効と考えられる。

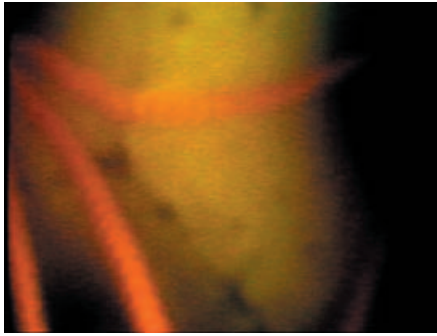


写真-2.17 透視度 6cm 濁水中映像

なお、本実験では水中カメラはブロック重量と同程度の重量のため、ブロックを網チェーンで拘束してもクレーン模型の吊り能力が小さいため水面上へは吊り上げることができず、その作業時間効率等の把握は困難であった。

透視度 0cm の完全な濁水中においても、2.4(5)に示した方法(写真-2.18) および 8 目網チェーンを用いた方法により、やや長い時間を要するがブロック撤去は可能であった。

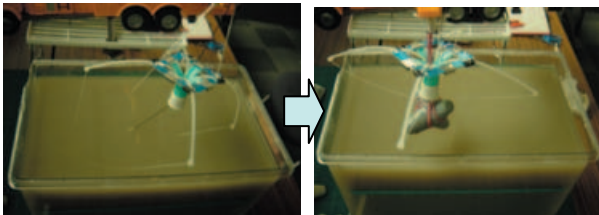


写真-2.18 透視度 0cm 濁水中実験

(2) 水底埋没ブロックの回収実験

a) 実験の目的

港湾・海岸に長期間設置されていた消波ブロックの最下段は、ある程度海底に埋没して網チェーンがブロック脚を捕捉するのが困難な状況であると想定される。そのため、一つの方法として網チェーンの 4 隅の吊りワイヤーに給水ホースを沿わせて網チェーンの角端より水底に水を噴出させて土砂を除去・移動させる方法が考えられる。水槽実験によりこの方法を試行した。

b) 実験方法

水槽の底に砂(細砂:粒径 0.2mm)を約 5cm の層厚で敷き、その上に 4 脚ブロック模型(高さ 6cm)の下方向の 3 脚は概ね半分以上砂の中に埋もれる状況(概ね 1~2cm 程度埋没)に設置した(写真-2.19)。網チェーン装置模型の 4 隅の吊りワイヤーに給水ホース(径 5mm)を沿わせて網チェーンの角端より水底に水を噴出させて土砂を除去し

て、網チェーンがブロック脚下端に掛かる状況にして吊り上げるものである。

c) 実験結果

小さい模型実験のため、給水ホースの曲げ剛性が、網チェーンの重量等と比較して大きく、給水ホースの動きで給水口の位置が不安定に動く場合や、給水開始時における水噴出の反動等で、目標とする箇所に噴出水が当たらずにチェーンが掛からないケースもあった。また水噴出により砂が舞い上がって水が濁って状況が全く視認できなくなった。給水は停止した状態で給水口のある網チェーン隅を埋没しているブロック脚先端に位置させて給水を開始させると、砂が流動化して、脚下端に網チェーンが掛かる状況となった。

なお、給水を停止すると直ちに水噴出でできた水底の窪みには周囲の砂が流れ込み埋没した、そのため、水を噴出中の砂が流動化している状況の間にチェーンが脚下端に滑り込むようにすることが効果的な運用と考えられる。

また今回の実験は水噴出の効果を定性的に確認しただけであった。必要な水圧水量等の定量的な事項に関しては、ブロックの埋没状況、土砂の硬さ(N値)、粒径等により異なるので、現場の状況に合わせて設定する必要がある。

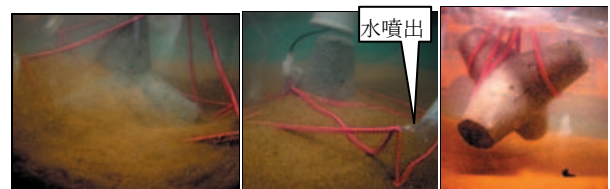


写真-2.19 埋没ブロック模型の回収

2.6 種々の形状物把持模型実験

本装置はブロックだけでなく、種々の形状の漂流物、浮遊物あるいは海底落下物等への回収作業への活用が期待出来る。その一例として乗用車の模型を回収する状況を写真-2.20 に示す。

海面浮遊物としてはゴミ等が想定される。また海が荒れている場合や水温が低くダイバーが回収対象物にクレーンのフックを掛けることが困難な状況を想定すると、本装置を活用することにより回収が可能となる場合も考えられる(写真-2.21)。本装置は、くびれを有する形状の物体であればそのくびれに網チェーンのチェーンが掛ければ外れることなく確実に吊り上げることが可能である。またくびれをもたない樽のような形状でも確実ではないが十分に吊り上げが可能である(写真-2.22)。吊り上げ

がもっとも困難な表面が滑らかな球体でも、バランスがとれば、吊り上げは不可能ではない（写真-2.23）。

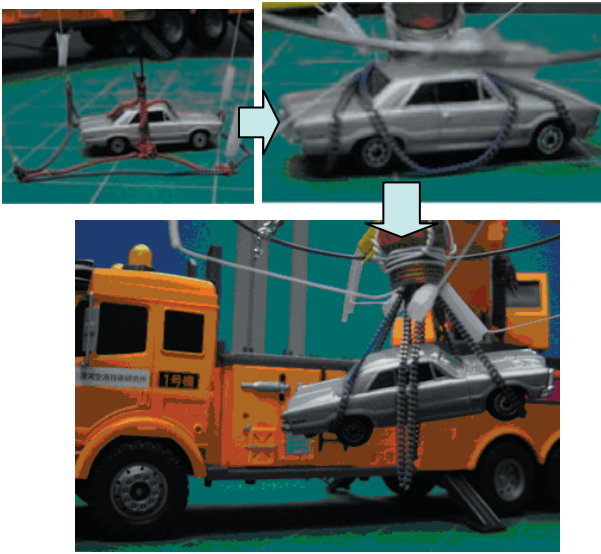


写真-2.20 車模型の回収

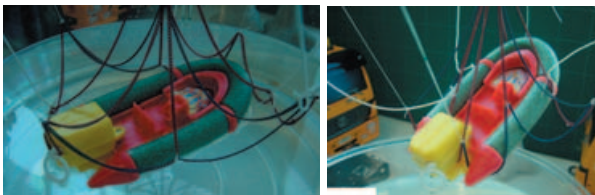


写真-2.21 ボート模型の回収

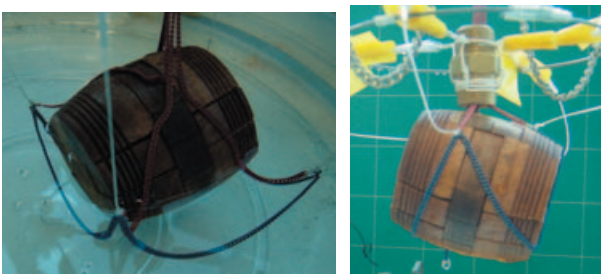


写真-2.22 樽模型の回収

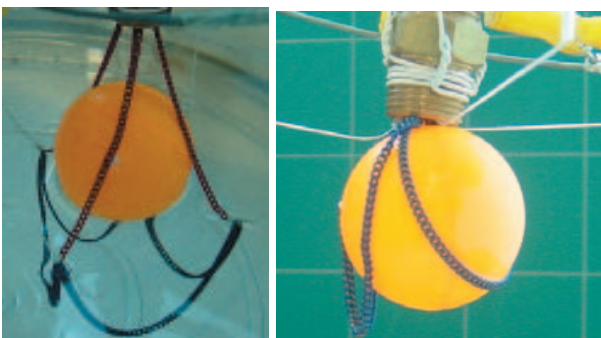


写真-2.23 ピンポン玉の回収

海底の落下物に対しても、水深が深い場合は電動あるいは油圧駆動等による回収装置では耐圧構造が大きな課題となるが、本装置は水深水圧に影響されない構造である。対象物及びチェーンの捕捉状況等がカメラ等を用いて把握できれば、基本的には、吊り上げるワイヤー長を確保することで対応が可能と考えられる。海底の落下物の一例として、水底に埋没した状態の乗用車模型の回収実験の状況を写真-2.24 に示す。給水ホースを設け網チェーンの四隅から水を噴出して砂を排除・流動化させることにより網チェーンが車を捕捉して撤去することができた。

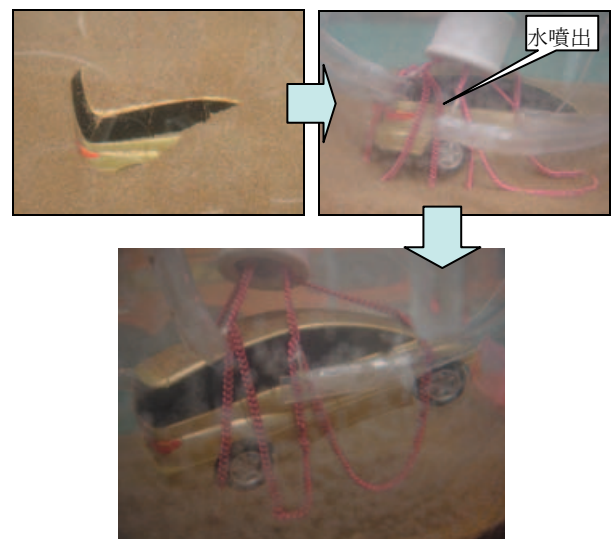


写真-2.24 埋没した車模型の回収

2.7 実作業を想定した時間効率及び経済性の検討

(1) 時間効率の検討

ブロック模型把持実験結果等を基に本装置を実際のブロック移設作業に用いた場合を想定した効率性について検討する。まず 6.3 t 型消波ブロックを陸上で撤去・仮置きする場合を想定して検討する。

従来の標準的な工法では、6.3 t ブロックにおいては 25 t 吊りホイールクレーンを用いて 1 個当たり約 6 分を要するものとされていた⁶⁾。表-2.7 に、トラッククレーン模型のクレーン機能の諸速度と 25 t 吊りホイールクレーンのクレーン機能の諸速度を示す。184 g ブロック模型は、6.3 t ブロックの 1/31.4 の縮尺に相当する。この縮尺を用いて、ラジコン式トラッククレーンの諸速度は 6.3 t ブロックに対する場合の相当速度を縮尺補正 (1/31.4) として示した。この値を実際の 25 t クレーンの速度と比較した比率を算出した。

表-2.7 模型実験の時間スケールの検討

ブロック及びクレーンの規模	184g 消波ブロック模型	6.3t 消波ブロック		
	パソコン式トラッククレーン模型	縮尺補正 (1/31.4)	25 t ホイールクレーン	比率
主巻き速度 (m/min)	1.7m/min	53.4m/min	30m/min (12.5 t-4本掛け)	1.8
補巻き速度	(4.0m/min相当)	125.6m/min	120m/min	1.0
ブーム伸縮速度	0.025m/s	0.79m/s	0.23m/s	3.4
ブーム起伏速度	7.6度/s	7.6度/s	1.8度/s	4.2
ブーム長	0.5m	15.7m	23.5m	0.67
旋回速度	2.3rpm	2.3rpm	2.6rpm	0.89

184g 4脚ブロック把持実験において、ある一つのブロックの移設時間におけるクレーンの操作時間内訳を図-2.8に示す。この図に示した例の所要時間は49秒（吊り上げまで16秒、吊り上げ後33秒）であり、平均所要時間75秒（吊り上げまで35秒、吊り上げ後40秒）に対して少ないものである。そのため、吊り上げまで及び吊り上げ後の所要時間を割り増しして、平均時間と同様の75秒になるように補正を行った。

実測時間49秒のケース及び平均時間補正した75秒のケースについて、それぞれの時間の内訳において、ブームの旋回、伸縮、上下及びワイヤーの巻き上げ下げに要する各時間について、表-2.7の比率を用いて6.3tブロックの場合に対応した時間換算値を表-2.8に示す。

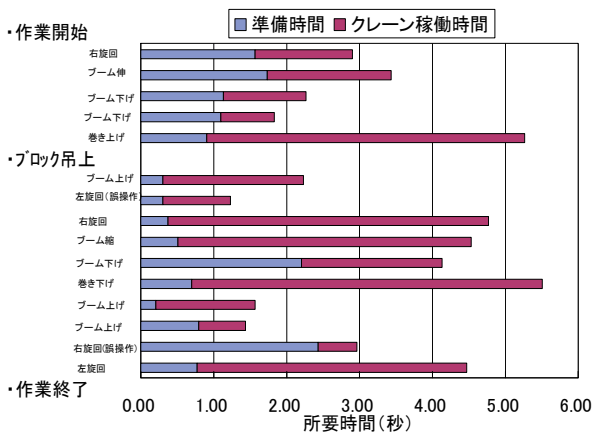


図-2.8 ブロック模型の回収時間の分析

表-2.8 実作業時間への変換

	184gブロック模型		6.3tブロック換算	
	実測時間分析	平均時間補正	実測時間の換算	平均時間の換算
準備時間計	15秒	25秒	15秒	25秒
クレーン稼働時間計	34秒	50秒	67秒	102秒
撤去時間/個	49秒	75秒	82秒	127秒
従来工法				356秒
従来工法との比率				1/2.8

184g ブロック模型では、平均 75 秒を要していた 1 個当たりの撤去時間は、6.3t ブロックでは、127 秒に相当する試算結果となった。従来の工法においては、6.3t ブロックの陸上における標準的な移設作業時間は 5.94 分 (356 秒)とされているが、それと比較すると、作業の時間効率は 2.8 倍に値することとなる。

(2) 経済性の検討

ブロック 1 個当たりの移設コストに影響する要因として、2.7(1)の作業時間効率の他に、労務費及び起重機船あるいはクレーン車の損料等が挙げられる。これらの要素について従来工法と比較検討する。

a) 労務費

従来の玉掛けによる工法では、表-2.9に示す作業員や潜水士船等が必要とされている¹⁸⁾。

表-2.9 従来工法における作業員構成

名称	玉掛け・玉外しとも陸(水上)の場合	玉掛け・玉外しのどちらかが水中の場合	玉掛け・玉外しとも水中の場合
とび工	1人	1人	—
普通作業員	3人	2人	—
潜水士船	—	1隻	2隻

本把持装置では、消波ブロックが視認できれば、玉掛けは無人で行うことを想定している。玉外しは無人でも可能だが、正確な位置決めや向き調整等の細かな制御が必要とされる場合には無人では対応が困難なことから、従来と同様の人手が必要となろう。そのため、概ねの労務費としては、従来の半分程度となることが期待できる。

b) 起重機船等損料

6.3t ブロックを対象とした本装置実機の全体重量は、数百 kg 程度と試算、想定している。ブロック重量と比較すると 1/10 程度の軽量で、起重機船あるいはクレーン車の吊り上げ能力を設定する際にはほとんど影響しないと思われる。そのため、本装置を用いることにより必要となる起重機船等の吊り上げ能力の増加による損料の増大は避けられ、従来の工法と同程度の能力の起重機船等に対応可能と想定される。

また、本装置は動力部を有せず基本的な構成はチェーンとそれを吊り下げる部材だけである。そして、大きな力が加わるのはチェーン部材のみで吊り下げ部材はチェーンの自重のみを支える程度の強度しか必要としない。そのため、本装置の価格・損料は、起重機船等の損料と比較すると極めて小さなものとなろう。

c) 総合コスト

6.3t ブロックを陸上で撤去・仮置きする場合を想定し、1個当たりの撤去コストの試算を試みた^{18,19)}。その結果を表-2.10に示す。

1日当たりの総作業コストは、従来工法を100とした場合、本装置では80程度とあまり変わらないが、時間効率は従来工法の2.8倍であることを考慮すると、1個当たりの移設コストは、従来工法の約30%に低減することが期待出来る試算結果となった。

表-2.10 コスト比較

項目	従来工法	本装置	備考
時間効率	356秒	127秒	6.3tブロック 陸上仮置きを想定
玉掛け労務費用	2人	-	
玉外し労務費用	2人	2人	
起重機船等損料	25tホイールクレーン損料	25tホイールクレーン損	
開発装置損料	-	かなり小	
日当たり作業コス	(100*)	75	
1個あたり撤去コス	(100*)	27	

*従来工法を100と設定。

2.8 結論

本章で得られた結論を下記に記す。

- ・4つの網目から構成される網チェーン把持装置を考案した。
- ・本装置の特長および期待される効果として、①無人化施工が可能、②構造が簡易で軽量、③動力部を有しない、④操作が簡単、⑤安全性・効率性の向上、⑥種々の形状の物体回収への活用が挙げられる。
- ・模型による把持実験を行い、効率性等を試算した。その結果、6.3t 消波ブロック移設を想定した試算では、時間効率は従来方法の2.8倍、経済性は3倍以上が期待できる結果となった。
- ・ブロック不視認下の模型実験においては、視認可能な場合の時間効率が75秒/個に対し、装置の運用方法を工夫した方法では145秒/個、装置の形状等を工夫した方法では、93秒/個であった。
- ・模型実験において、本装置はブロック移設以外にも種々の形状の物体の回収に適用することが期待できることが確認された。

3. 既設ブロック撤去工事への活用

3.1 緒論

本章においては、既設消波ブロック撤去工事に活用された実績について述べる。網チェーン把持装置について、

浅海域の作業である既設消波ブロック撤去工事ではこれまで、下記に示すように、2009年末までに6件の活用実績がある。

- 2003年6月、神奈川県横須賀港(久里浜)にて、2t4脚ブロック15個を回収。
- 2004年4月、島根県河下港にて、6.3t4脚ブロック138個を回収。
- 2008年5月、青森県鯉ヶ沢漁港にて、12.5t10脚ブロック等15個を回収。
- 2008年8月、北海道留萌港にて、25t4脚ブロック36個を回収。
- 2009年7月、北海道留萌港にて、25t4脚ブロック80個を回収。
- 2009年8月、岩手県久慈港にて、16t4脚ブロック113個を回収。

ブロック重量は2~25t、ブロック形状は4脚ブロック、5m長10脚ブロック、破損ブロック等である。解放場所は海底、陸上及び台船上の各ケースがあった。

3.2では各工事での活用状況を述べ、3.3では作業諸要素別に検討を行う。

3.2 ブロック撤去工事

(1)2t4脚ブロック撤去工事

a) 工事の概要

実物の消波ブロックにおいて本装置(プロトタイプ機)により撤去・移設ができることを確認することを目的として、網チェーン把持装置のプロトタイプ機を製作し、護岸の前面に設置されている消波ブロックの移設作業に活用した。護岸前面に設置されている消波ブロックにおいて海面上にあるものを撤去して近傍の海面下へ移設するものである。

b) 場所

神奈川県横須賀港(久里浜) 国土技術政策総合研究所横須賀庁舎の護岸前面

c) 時期

2003年6月

d) 対象ブロック

ブロック形状：2t4脚(テトラポッド)ブロック
設置後、相当年月が経過していると見られるかなり古いものである。ブロックは波の作用により密接に噛み合っている。ブロックの隙間は、ロープ、海藻、等のゴミが詰まっている。上部のブロックにおいては、脚が破損しているブロックも多く見受けられた。

e) 使用クレーン

10t吊りラフタークレーン車

f) 網チェーン把持装置

チェーンの選定に当たっては、一つの網の目だけでブロックを吊り上げる状態を想定し、吊り角度（チェーン引き込み管端部においてブロックを吊り下げている2本のチェーンのなす角度）を90度として、角を有する物体を吊り上げる場合の使用荷重条件が1.84tを上回る2tである線径8mmのチェーン（破断荷重は100kN）を選定した。そして一辺2.5mの正方形に対角線4mの長さの網状に構成した。なお、結節点は、使用荷重5tである線径12.5mmのチェーンを用いてクレーンのフックと連結した。吊り枠は、長さ2mの足場パイプ（φ48.6mm）4本を井形にクランプを用いて組み合わせ、網チェーンの重量程度には耐える最小限の構造とした（写真-3.1）。

g) 施工方法

プロトタイプブロック把持装置を吊り下げた。吊り枠及びチェーン網の中心部を、主巻きワイヤー及び補巻きワイヤーと連結させた。ラフタークレーンを護岸上に配置し、護岸前面の海面上の消波ブロックを、順次吊り上げ、クレーンブームのリーチの範囲内の水深の深い位置に移設した。

ブロック群はクレーン運転席からは見えない状況にあった。そのため、指示者が状況を見ながらクレーン操作者に指示を出しながら実施した（写真-3.2）。また、クレーン操作者は本装置を初めて操作するものであり、作業は一つ一つの動作、安全性を確認しながら慎重にゆっくりと実施した（写真-3.3）。



写真-3.1 網チェーン把持装置 写真-3.2 ブロック把持



写真-3.3 ブロックの吊り上げ

h) 施工結果

準備・打ち合わせも含め1日の作業で約15個のブロックを移設した。そのうち脚が折れたブロックも1個移設した。作業時間は待機時間も多く、1サイクルの所要時間の最小値は122秒で、内訳は吊り上げまでが48秒、吊り上げ後が74秒であった。

(2) 6t4脚ブロック撤去工事

a) 工事概要

仮栈橋築造のため、岸壁の前面に設置されている既設消波ブロックの撤去に本装置が活用された。撤去対象のブロックは海面上及び海面下に位置している。各状況における撤去作業を、従来の作業員及び潜水士によるワイヤーを用いた玉掛け作業と対比しつつ記述する。

b) 場所

島根県河下港護岸前面

c) 時期

2004年4月中～下旬

d) 対象ブロック

4脚ブロック（6.3t テトラポッド及び6t シェイクブロックがほとんどである）

e) 使用クレーン

100t 吊りクローラクレーン

f) 網チェーン把持装置

最大ブロック重量が6.3tあることから、チェーンは使用荷重6.4tのチェーンを用いて、ブロック撤去装置が製作された（写真-3.4）。吊り枠は、大きさ一辺3.8m四方で、H形鋼により構成されている。



写真-3.4 網チェーン把持装置

g) 施工方法

ブロック撤去装置は100t吊りクローラクレーンから吊り下げた。吊り枠は補巻きワイヤーに、網チェーンの中心部は主巻きワイヤーにそれぞれ連結されている。クローラクレーンが岸壁上に配置され、岸壁前面の海面上及び海面下の4脚消波ブロックを順次吊り上げ、クレーンブームのリーチの範囲内の地面に仮置きされる。

消波ブロックは、護岸壁によって遮蔽されクレーン運

転席からは見えない状況にあった。そのため、指示者が状況を見ながらクレーン運転手に無線で指示を出しながら撤去作業が行われた（写真-3.5）。

海中のブロックは、全体が海面下に没していても岸壁上の指示者が概ねの位置を視認出来る場合は、指示者からの指示により撤去が行われた（写真-3.6-8）。



写真-3.5 作業開始



写真-3.6 降下(10秒後)



写真-3.7 吊り上げ



写真-3.8 吊り上げ完了

海面下の深い位置にあり、岸壁上の指示者からは、その存在位置が確認出来ないブロックについては、本装置には、水中カメラ等を設置していないことから、潜水士が海中より状況を確認して連絡しながら作業が行われた。

吊り上げたブロックを地面に仮置きするときの網チェーンの解放については、今回の現場では、作業員が解放作業の支援を行った。解放作業は、吊り上げ作業と比較すると、陸上の平坦な場所で行われるので足場の状態も良く、作業も簡易で危険性も少ないものである。

h) 施工結果

全体を通じ網チェーンは破損することはなく同じ網チェーンが用いられた。また、網チェーンがブロック間に挟まれ抜けなくなるようなトラブルも特に生じなかった。三つの状況、つまり①海面上のブロック、②海中のブロックにおいて陸上の岸壁上の指示者から視認が可能なブロック及び③陸上から視認不可能な海中のブロック、について各々、従来の作業員及び潜水士によるワイヤーを用いた玉掛け工法による作業状況と対比しつつ記述する。

なお、本装置を用いた撤去作業に際し、事前に数時間の試験施工として16個のブロックを撤去した。

①海面上ブロック撤去

97個のブロックを2日間、延べ作業時間11.5時間（1

日目4時間で30個、2日目7.5時間で67個）で撤去した。作業時間効率としては、撤去ブロック1個当りの平均所要時間は1日目8.0分/個、2日目6.7分/個となる。まだ、本装置に十分慣れていないため、慎重に作業を行っていたことや、映像カメラを装着せず、指示者がクレーン運転手に操作指示を行うための時間等もあり、作業時間効率としては、十分向上の余地があると思われる。一方、従来の作業員による2本のワイヤーを用いた玉掛け方式では、作業時間効率は、撤去ブロック1個当たり4.3分/個であった。足場の状態も良く、クレーンが旋回をして吊り上げたブロックを仮置き作業中にブロック上の作業員が次のブロックの脚にワイヤーを掛けており、吊り上げ作業においてはクレーンの待ち時間がほとんどなく、この方式としての時間的作業効率としては、ほぼ最高に近い値と考えられる。

②海中視認可能ブロック撤去

12個のブロックを作業時間1時間で撤去した。なお、この中には、脚が破損したブロック1個が含まれている（写真-3.9）。

ブロック全体が完全に海面下に没しているブロックにおいても、その存在位置を岸壁上の指示者が概ね把握出来れば、撤去が可能であった。作業効率は、12個/時、1個当たり5.0分に向上した。



写真-3.9 破損ブロックの回収

本装置は、ブロックが視認可能であれば、海面下に没していても作業方法・手順に変化はない。そのため、作業に慣れ、時間効率は、海面上ブロック撤去作業と比較して向上した結果となった。

海中のブロックには、海藻が表面全体を覆っているものもあったが、特に支障も無く撤去可能であった。ブロック表面が滑りやすい状態でも、2本の脚に網チェーンがきっちり掛かれば落下することなく撤去可能である。

なお、既設ブロックでは、長年の設置によりブロックの隙間にゴミが溜まっている場合もあり、ブロックの隙間が完全にゴミで埋まっている場合もある。この場合は

沖側の位置のブロックから撤去することで、波が作用することによりゴミが散逸する。なお、ロープ等が多数、ブロック間に渡って挟まっている場合には、事前に取り除く必要がある。

一方、従来の潜水士による2本のワイヤーを用いた玉掛け方式では、作業時間効率、9.9個/時、1個当たり6.1分/個であった。

③海中視認不可ブロック撤去

30個のブロックを半日間、作業時間3.5時間で撤去した。なお、撤去ブロック数30個には、脚が破損したブロック5個が含まれている。作業時間効率としては、8.6個/時、1個当たり7.0分/個であった。

一方、従来の潜水士による2本のワイヤーを用いた玉掛け方式では、作業時間効率、9.9個/時、1個当たり6.0分/個であった。

④施工結果まとめ

①から③に述べた施工結果を表-3.1にまとめる。本開発装置では、海面上ブロックと海面下ブロックの作業効率を比較すると、海面上の方が低い結果となっている。これは、海面上ブロックでは、事前の試験施工として16個のブロック撤去を試行しただけであり、クレーンのオペレーター及び作業員は、本装置の基本的な作動方法を把握できたが、ブロックを効率的に掴むコツ等を十分把握するまでには慣熟していなかったことが挙げられる。

そのため、海面上ブロック撤去1日目は、8.0分/個、2日目6.7分/個、そして、海面下ブロック（視認可能）では、5.0分/個と施工を重ねる毎に作業効率は向上している。

表-3.1 ブロック撤去施工結果まとめ

状況	工法	本開発装置		従来人力工法		共通事項
		玉掛	玉掛	玉掛	玉掛	
海面上ブロック		1日目 8.0分/個 (30個を4.0時間)	無人	4.3分/個	2人	○クレーンへの指示 岸壁上作業員が無線で指示 ○玉外し作業平地にて、作業員3人
		2日目 6.7分/個 (67個を7.5時間)	無人			
海面下ブロック (視認可)	5.0分/個 (12個を1時間)	無人	6.1分/個	潜水士 2人		
海面下ブロック (視認不可)	7.0分/個 (30個を3.5時間)	無人	6.0分/個	潜水士 2人	○クレーンへは潜水士が指示	

⑤吊り上げ所要時間の分析

表-3.1において、本装置を用いた視認可能な海面下ブロックの吊り上げ作業においては、その状況をほぼデジタルビデオ映像及びデジタルカメラ写真110枚（撮影時刻が分単位で記録）に記録しており、デジタルビデオ映像の未撮影時間帯、及び、録画停止状態の時間ロスで

デジタルカメラ写真撮影時刻で補いながら、その内容を分析した。

作業開始（海面上で網チェーンを広げた状態）からブロックを海面上まで吊り上げるまでを吊り上げ時間として分析した（図-3.1）。12個のブロックの総吊り上げ時間は、26分1秒（平均吊り上げ所要時間：2分10秒/個）であった。12個のうち失敗なく1回の作業で吊り上げられたものは7個で、残りの5個は1～3回の作業失敗の後、吊り上げられたものである。総吊り上げ時間のなかには、この失敗の時間、つまり吊り上げを試みたが、チェーンが脚から外れたり、周囲のブロックが邪魔になり吊り上げられなかった時間等も含まれておりそれらの時間は、11分25秒を要していた。その時間を除くと、14分36秒、平均1分13秒/個となり、これは、模型実験で定義した実質吊り上げ所要時間に該当するものである。

以上をまとめて分単位で表示すると、12個の平均移設所要時間は、5.0分で、その内訳は、実質吊り上げ時間1.2分/個、損失吊り上げ時間0.9分/個、そして吊り上げ後所要時間2.9分/個となる。

i) 作業時間効率の検討

今回の工事では、ブロック解放作業は平坦地で作業員の補助を得る方法で、クレーンの操作は、状況が視認できる指示者からの無線指示で行われた。また、本装置に十分慣熟していない状況での作業も見受けられる。

そのため、ある程度作業にも慣れて、吊り上げ作業状況がビデオ映像に記録されている、視認可能な海面下ブロック撤去作業の施工実績データを基に、模型実験における作業効率データを用いて、種々の作業条件・形態下での、作業時間効率の試算を行った。

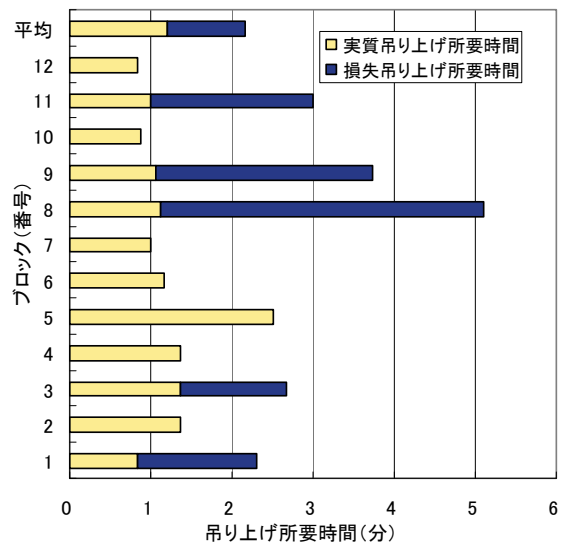


図-3.1 海面下ブロックの吊り上げ作業時間分析

本開発装置による視認可能な海面下ブロック撤去作業の作業効率実績を基本として、状況①とする。

本撤去工事では、クレーンの運転席からは、ブロックの状況が視認できないため、岸壁上からの作業員の無線指示によりクレーン操作が行われ、視認用カメラは使用されなかった。クレーンのブーム先端あるいは、吊り枠に視認用カメラを取り付け、この映像を見ながらクレーン操作者が操作する状況を想定したものを状況②とする。

模型実験では、カメラ映像を用いることにより、他の指示者からの音声指示の場合と比較して、吊り上げ作業が21秒（実質吊り上げ作業が13秒、損失吊り上げ時間が8秒）短縮されている。音声で指示を受けて、クレーンの操作に至るまでのタイムロス、模型実験及び実工事でも同等と考えられることから、実工事でも、21秒の吊り上げ作業時間短縮は可能と想定した。

次に、状況②において、ブロックを解放する場所の状況は、平坦ではなく、土囊あるいは架台等により凹凸が設けられ、作業員の補助なくブロックを解放する方法を状況③とする。

模型実験では全てのケースで、凹凸のある場所で無人でブロック模型を解放しているが、その作業時間効率は、吊り上げ後所要時間でみると、カメラ映像による実験ケースでは実質吊り上げ時間の1.6倍（40秒/25秒）の時間しか要していない。クレーンの旋回性能は、模型は、2.3rpmで、実際のクレーンの旋回性能約2.3~2.6rpmと同等であり旋回性能による所要時間の差異は無いと考えられる。そのため、本工事でも吊り上げ後の所要時間は同程度の効率で行えると想定すると、吊り上げ後の所要時間は、170秒が96秒に短縮される。

さらに、状況③において、本装置の操作に慣れた状況を状況④とする。カメラ映像による実験ケースでは、失敗等による損失吊り上げ時間は、実質吊り上げ時間の32%であったが、同程度に操作技術が向上すると想定すると、損失吊り上げ時間は、30秒の短縮が期待できる。

本装置では、無人でブロックを吊り上げる構造のため、対象ブロックが海面上か海中であるかによって、作業方法に差は無く、基本的には、所要時間も同じである。作業時間に大きく影響するのは、対象ブロックが、水中カメラ映像で視認できるかどうかである。海水中でも水中カメラで視認できれば効率は劣らない。水中カメラを吊り枠に設置するとして、ブロックの高さの3倍程度の透視度（6tブロックの高さ約2mなので約6m）があれば、海面上と同等な効率で作業が可能であろう。それ以下の透視度、例えば1m程度のかかなり濁った海域でも、吊り枠の隅の4箇所に水中カメラを設置して、吊り枠を下げ

てブロックに接近させ、ブロック脚にチェーンが掛かっているかどうかを確認できるだけでも、作業効率上、有意義なものである。

ここでは、水中カメラによる映像が全く期待できない透視度1m以下の海域を想定し、模型実験で行った不視認状況での探査による方法、および8目網チェーン装置を用いた場合を、それぞれ、状況⑤、⑥とする。状況⑤に関して、模型実験において、不視認・探査ケースでの実質吊り上げ時間は、カメラ視認のケースの1.4倍（35秒/25秒）要しており、損失吊り上げ時間は、実質吊り上げ時間の2倍（70秒/35秒）要している。この比率を適用すると実質吊り上げ時間は84秒、損失吊り上げ時間は、168秒と試算される。同様に状況⑥では、実質吊り上げ時間は91秒、損失吊り上げ時間は、36秒と試算される。

これらの試算結果を、従来の人力による海面上及び海面下ブロック移設時間効率を状況⑦、⑧として、合わせて図-3.2に示す。

海面上のブロック移設作業では、従来の人力作業では、258秒/個（4.3分/個）を要していたが、約180秒（3.0分/個）程度まで短縮が期待できる。海面下のブロック移設作業では、従来の人力作業では、366秒/個（6.1分/個）を要していたが、水中カメラで視認できる透明度の場合には、約180秒（3分/個）程度、透明度が1m以下と低く、水中カメラが役に立たない場合でも、4~6分/個程度の作業効率が期待できうる試算結果となった。

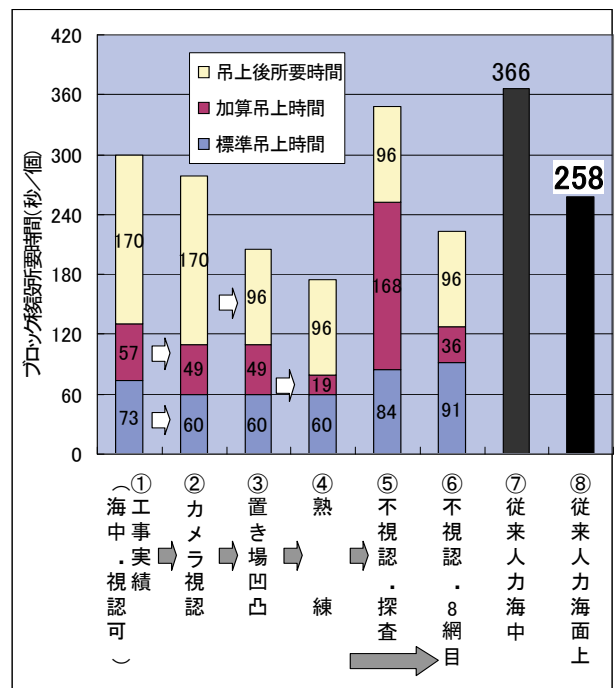


図-3.2 種々の状況における移設時間計算

j) 作業コストの検討

前節の状況④⑥⑦⑧における，1日（8時間作業）当りの作業コストを，従来の人力工法によるコストを100として比較したものを内訳も含め図-3.2に示す。吊り上げるホイールクレーンの損料及びその燃料費は全状況で同様とした。なお，当工事では他の工事との関係から100t吊りクレーンが用いられていたが，ここではブロック重量6tに相応の25t吊りクレーンとして算定した。

労務費としては，従来人力工法では海面上ブロックの場合，指示者1人，ブロック吊り上げ作業員2人，ブロック解放作業員2人の計5人を要している。海面下ブロックの場合は，その内，ブロック吊り上げ作業員2人が潜水士2人に置き換わる。状況①-⑥では，本装置（水中カメラ等を含む）の損料が付加されるが，作業員，潜水士の労務費は，大きく減少する。

図-3.2, 3.3に示す各状況におけるブロック移設作業時間及び作業経費より，1個当りのブロック移設コストを比較したものを図-3.4に示す。従来の海面上ブロックの人力工法を100として各状況を比較したものであるが，ブロックが視認できる状況では，本装置を活用することによって1/3程度までコストが削減できることが期待できる試算結果となった。

従来の海面下ブロックの人力工法は167のコストを要しているが，ブロックを視認できない状況であっても本装置を活用することによって同様に1/3程度までコストが削減できることが期待できる試算結果となった。

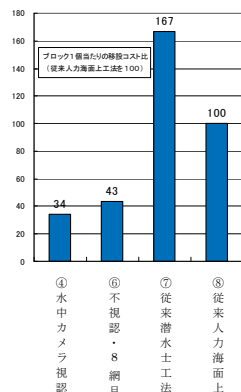
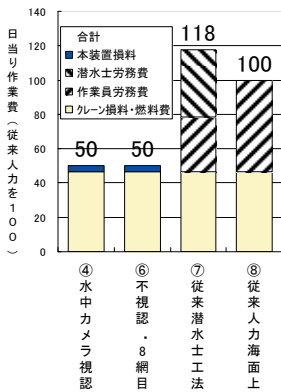


図-3.3 日当たり作業費用 図-3.4 1個当たり移設費用

(3) 12.5t10脚ブロック等撤去工事

a) 工事概要

漁港の離岸堤改良工事において，既設消波ブロックの撤去作業に網チェーン把持装置が試行的に活用された。

b) 場所

青森県鯉ヶ沢漁港離岸堤

c) 時期

2008年5月

d) 対象ブロック

7.5-12.5t, 6-10脚ブロック (3-5単位コーケンブロック)

e) 使用クレーン

100t吊り起重機台船

f) 網チェーン把持装置

網チェーンは，3.2(2)で使用された網チェーンを使用した。台船上での網チェーンの解放を考慮して，四つの網目の角に，それぞれブックを挿入して解放可能とした。吊り枠は，新たに製作した。吊り枠はブロック形状を考慮して長方形 (2.5m×5m) とした(写真-3.10)。



写真-3.10 フックを挿入した網チェーン

g) 施工方法

離岸堤の沖側に，離岸堤の法線方向と垂直に起重機台船が配置され，起重機台船のクレーンを使用して消波ブロックを撤去し，起重機台船上に回収した(写真-3.11-13)。起重機台船のクレーン操作室からは，ブロックの設置場所は直接視認可能な状況であった。なお，上層の6脚ブロックは，上半分は海面上に出ており視認可能であった。しかし，中層の8脚ブロック，下層の10脚ブロックは海面下で視認不可の状況であった。

h) 施工結果

約半日の施工において，消波ブロック7個を回収した。内訳を下記に示す。なお午後からは高波浪のため作業中止となった。

- ・ 3単位 (6脚) 7.5t : 3m長 : 1個回収
- ・ 4単位 (8脚) 10t : 4m長 : 3個回収
- ・ 5単位 (10脚) 12.5t : 5m長 : 3個回収



写真-3.11 ブロックの回収



写真-3.12 水面下の視認不可ブロックの回収



写真-3.13 台船上での解放

(4) 25t4 脚ブロック撤去工事(その1)

a) 工事概要

北海道留萌港防波堤改良工事における既設消波ブロック撤去工事においては、消波ブロックの破損が著しく潜水士、作業員による作業では作業時に破損した脚先端部が不安定な状態で危険なため本装置が活用された。

b) 場所

北海道留萌港防波堤

c) 時期

2008年8月

d) 対象ブロック

25t4 脚消波ブロック (テトラポッド)

e) 使用クレーン

125t 吊り起重機台船

f) 網チェーン把持装置

使用荷重 12.5t のチェーンを用いて網チェーンおよび支持棒が製作された(写真-3.14)。

g) 施工方法

ブロックの設置場所は、起重機船の操縦室から直接視認できる状況であった(写真-3.15)。海面上あるいは海面下でも概ねその位置が視認できるブロックを対象に撤去が行われた。ブロックは、脚折れ等の破損ブロックが半分以上で、脚先端も丸く摩耗した状態である。

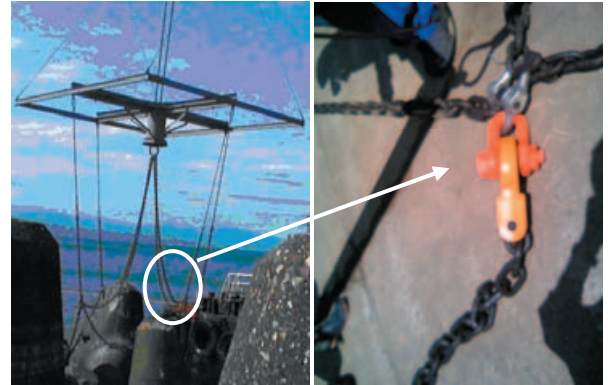


写真-3.14 25t ブロック用網チェーン把持装置

また、折れた脚先端部がブロック脚の隙間に入り、網チェーンが非常に掛かりづらい状況となっていた。そのため一度で吊り上げず、少しでもブロックが動けば隙間ができるので、複数回の網掛けによる吊り上げを行った。

また、不安定な状態でブロックを掴んだ場合、一度着地させ網チェーンを少し緩め、十分に脚を捕捉して再度吊り上げる方法で行った(写真-3.16)。吊り上げたブロックは起重機台船あるいは台船上へ回収された(写真-3.17)。ブロックの解放は、網チェーンの各網目の角に挿したシャックルの解放により対応した。回収したブロックは、近くの海域に仮置きする場合と、約 1km 離れた陸上の仮置き場まで起重機船が移動して仮置きする場合があった。

h) 施工結果

8月20日午前中 10 個を回収。25日には、台船及び起重機台船が満杯となる約 20 個のブロックを午後 2 時頃まで回収(仮置きは約 1km 離れた場所なのでその日の回収作業は終了)。26日午前中 6 個を回収し、3 日間にて計 36 個を撤去。

8月20日の作業では、クレーンの操作方法に関しては、脚が折れたブロックを吊り上げるための操作方法のコツ等は未だ十分伝授・習得されていない状況もあり、慎重に作業がなされた。25日には、作業にもやや慣れた状況であった。26日は、破損したブロックが多い場所であり、また海面下のブロックも多く、撤去作業に時間を要した。



写真-3.15 ブロック撤去場所



写真-3.16 破損ブロックの吊り上げ



写真-3.17 回収されたブロック

(5) 25t4 脚ブロック撤去工事 (その2)

a) 工事概要

2007 年度に引き続き北海道留萌港防波堤改良工事における既設消波ブロック撤去工事において、本装置を活用した撤去が行われた。

b) 場所

北海道留萌港防波堤

c) 時期

2009 年 7 月

d) 対象ブロック

25t4 脚消波ブロック (テトラポッド)

e) 使用クレーン

300t 吊り起重機台船

f) 網チェーン把持装置

2007 年度使用の網チェーンが用いられた。支持枠は、台船上でブロックを解放する際に、支持枠が大きいと起重機台船上の建造物、構造物等に接触を避けるため、ブロックの搭載個数が少なくなることから、ブロックと同程度の小さい支持枠が新たに製作された(写真-3.18)。



写真-3.18 支持枠小型化

g) 施工方法

基本的には 2007 年度と同様に、脚折れ等の破損ブロックが半分以上で、脚先端も丸く摩耗した状態であった。また、折れた脚先端部がブロック脚の隙間に入り、網チェーンが非常に掛かりづらい状況となっていた。そのため、一度で吊り上げず、少しでもブロックが動けば隙間ができるので、複数回の網掛けによる吊り上げを行った。また、施工場所は前年度に隣接した沖側の場所でありより波が強くなる場所であり、ブロックの破損が多い状況であった(写真-3.19)。

吊り上げたブロックは起重機台船あるいは台船上へ回収された。ブロックの解放は、台船上に、高さ 20cm 幅 20cm 長さ 1m 程度の角材を準備し、ブロック脚が台船上に完全に着地する直前の段階でクレーンのワイヤーの降下を停止して、角材を着地直前のブロック脚の下側に差し入れて解放した、なお破損ブロック等でこのような解放方法が危険な状況のブロックについては、網チェーンのシャックルを解放する方法で行われた。



写真-3.19 破損ブロックの回収

h) 施工結果

7 月 21 日に 31 個、22 日 28 個、23 日 11 個、24 日 10 個、計 4 日間で 80 個を撤去した。日程が後になるほど撤去個数が減少しているのは、最初の段階では海面上の比較的回収が容易なブロックが多いのに対し、後半はブロックも水面下のものが多く、また破損したブロック先端部は撤去せずその場所に残されるため、その先端部は下層のブロック脚の間に転がり落ちて隙間を塞ぐため網チェーンがブロック脚に掛かりにくい状況となっていた。

(6) 16t4 脚ブロック撤去工事

a) 工事概要

防波堤の延伸工事のため、防波堤先端部の周囲に設置している消波ブロックを撤去する工事に本装置が使用された。

b) 場所

岩手県久慈港防波堤

c) 時期

2009年8月

d) 対象ブロック

16t4脚ブロック (テトラブロック)

e) 使用クレーン

100t 吊り起重機台船

f) 網チェーン把持装置

使用荷重9.2tのチェーンを用いた網チェーンおよびH型鋼等により支持枠を製作した(写真-3.20).

g) 施工方法

起重機台船を用いて海側より施工を実施。起重機台船の操作室からは、ブロック設置場所の状況は視認可能であった(写真-3.21).



写真-3.20 網チェーン把持装置 写真-3.21 撤去場所

ブロックの位置は、海面上および状況が全く視認できない水深約10mの海中のブロックまでであった。

回収したブロックの解放場所は、台船上の場合と、ブロックを海面上に吊り上げたまま起重機船がウインチ操作によって移動して海底の所定の仮置き場所まで移動して、そのまま海底に解放する場合があった。

h) 施工結果

8日間で計113個のブロックを撤去した。その内訳を下記に記す。

- ・8月3日, 9個回収 (水中仮置き 1個, 台船上回収 8個)
- ・8月4日, 36個回収 (水中仮置き 35個, 台船上回収 1個)
- ・8月5日, 17個回収 (水中仮置き 17個)
- ・8月22日, 8個回収 (台船上回収 8個)
- ・8月24日, 10個回収 (台船上回収 10個)
- ・8月25日, 10個回収 (台船上回収 10個)
- ・8月26日, 12個回収 (水中仮置き 1個, 台船上回収 11個)
- ・8月27日, 11個回収 (水中仮置き 1個, 台船上回収 10個)

うねりが1-3mもあり、従来の潜水士作業は全くできないような状況でも、船体の大きな起重機台船が稼働で

きる状況であれば支障なくブロック回収作業は、可能であった(写真-3.22)。この久慈港では海象条件が悪く、港湾工事が可能な日は3日に1日もない状況となっている。このような状況の現場においては、海象条件が悪くても施工可能な本装置は作業工程上、大きなメリットである。海面下の水深の浅いブロックは全体が海藻で覆われていた(写真-3.23)。

海面上および状況が全く視認できない水深約10mの海中のブロックに対して、「2.4(5)不視認状況における模型実験」の探査方法で回収を行った。約3m程度の大きなうねりがある海象条件で、クレーンが揺れにより上下動していた状況であり、支持枠全体も海面下にあり視認不可の状況であった。そのため、1個の回収に5分から長い場合には30分程度も要する場合もあった。



写真-3.22 荒天での作業 写真-3.23 海藻付着ブロック

3.3 作業諸要素別の検討

(1) 作業諸要素の項目

3.2においては、各工事毎に、その内容を述べた。本節では、撤去工事においてブロック撤去作業の施工方法、作業効率等に影響を及ぼす項目毎に検討する。以下、下記の項目毎に、次節よりその影響等について述べる。

- ・ブロックの種類・重量
- ・ブロック視認状況等
- ・クレーンの位置
- ・解放場所
- ・海象条件

(2) ブロックの種類・重量

ブロックの種類は数多くあるが、その形状等により使用される場所等も様々であり、港湾等に設置されている個数もかなりばらつきがある、また重量もカタログ上では、大小様々である。

本装置での撤去実績としては、前節で述べたように2から25tまでの実績がある。これまで50t, 80tの消波ブロック撤去への照会もあったが実施にはいたっていない。80tのブロック撤去では、潜水士がワイヤーを掛けて撤去する方法では、使用するワイヤーも太く重くなり、人力では取り扱うことにも困難である。このような大重量

のブロックに本装置の活用を要望する意見もあるが、大重量のブロック撤去の際に、防波堤のケーソンに接触してケーソンを破損させる危険性を指摘する意見もあり、吊り上げ時のブロックの姿勢等を事前に検討することが求められる。また、ブロック重量が50tクラス以上となると使用するチェーンの標準規格外となり、チェーンの調達に時間・コストを要する状況となる。そのため、チェーンも最小必要限の強度に抑えるため、吊り上げ時の種々のケースを想定して、その状況でのチェーンに作用する張力を求める等の技術的検討も新たに必要となる。

(3) ブロック視認状況等

「2.2(5) 不視認状況における模型実験」で述べたように、実際の工事では、対象となるブロックが視認できるかどうかにより作業効率は大きく異なる。

想定される視認条件として

- ① クレーン操作者が直接ブロックを視認できる状況での操作
- ② クレーン操作者が直接ブロックを視認できず、カメラ映像による操作
- ③ クレーン操作者が直接ブロックを視認できず、指示者からの音声指示による操作
- ④ 完全に水面下のブロック等で、クレーン操作者が手探りの状況での操作がある。

視認条件①③は、3.7 の実際の工事においても、その条件で作業が行われ、特に問題なく円滑に作業が実施できたと認識している。

視認状況④のブロックが全く視認できずクレーン操作者が手探りの状況で操作するケースについては、模型実験での所要時間は、2.4分(145秒)/個(図-2.7)であった。3.2(6)の工事において、この状況で実施し5,6個を回収した。台船の移動時間、あるいはブロックの台船上の解放時間等は除いた吊り上げまでに要した所要時間は、約5-30分であった。模型と実際のクレーンの諸速度の差、および実際の作業では、安全上の諸確認、うねりが2-3mの海象条件の悪い条件下の作業であった。船体の動揺の影響については、前後左右の揺れは、完全に水面下のブロックに関しては、水の抵抗による動揺抑制効果により影響は感じられなかったが、船体の動揺によるクレーンの上下動の揺れはワイヤーの上下動となり、網チェーン装置に伝達する。そのため、網チェーンを引き絞る段階における上下動は、十分支持枠を下げた状態にしておかないと、支持枠が想定以上に上がった状態で引き絞ると脚から網チェーンが外れやすい状況となる。また模型実験では問題がない粗雑な操作も、実際の作業では少し

でも危険性があると操作できないため、模型実験よりも時間効率が低下する要因となる。そのような要素を勘案すると、船体の動揺も考慮した熟練した理想的な状況で、実際の工事では5分/個程度に相当すると思われる。また、あまり吊上失敗が続くと操作者および船上の作業員の意欲低下にもつながることから、平均10分/個程度の作業効率が確保できるように、施工方法、装置の改良等の必要性を感じる。

②クレーン操作者が直接ブロックを視認できずカメラ映像による操作、に関しては、まだ実際の工事作業には適用していない。幾つかの現場では水中カメラも準備していたのであるが、海水の透明度の低さ、あるいは日々透明度は大きく変化するため、カメラ映像によりどの程度の視認性が得られ作業効率の向上にどの程度寄与するかは不明であること、および、カメラ搭載による電源ケーブル等が、クレーンの旋回、あるいは吊りワイヤーの上下時に作業の支障となりうる可能性や、カメラおよび諸ケーブル設置のための準備作業によるブロック撤去作業時間の制約による課題があった。

またブロック視認状況ではないが、海底に埋没したブロックの撤去についてもまだ工事では実施していない、

(4) 施工場所

陸上に設置されたクレーンからの施工と、海面上からの起重機船のクレーンによる施工がある。両ケースについて、3.2の工事において実施された。

陸上のクレーンからでは、波の動揺等の影響は受けない。ただし、陸上からのクレーンの場合、岸壁の構造、あるいはクレーンの設置場所の関係よりクレーンの操縦席からは、ブロックの設置場所の状況が視認できないケースがあるケースも十分生じうる。

海面上からの起重機船のクレーンによる施工では、船体の動揺の影響がクレーンのブームの揺れとなり、クレーンブームから吊り上げられている本装置への揺れにつながる。海面上のブロックを撤去する場合は、クレーンは空中にあるので、その揺れはそのまま本装置の揺れにつながり、本装置の位置制御を困難にする。しかし、本装置の網チェーン部分をブロックに接触させると抵抗となり、水平方向の動揺は抑制される。

水面下のブロックを撤去する場合は、本装置の一部あるいは全てが水中にあるため、水の抵抗により水平方向の動揺は抑制される。ただし水面近くで波浪が高い場合にはその影響を受けることとなる。また船体の動揺によるクレーンの上下動の揺れはワイヤーの上下動となり、網チェーン装置に伝達する。そのため、網チェーンを引き絞る段階における上下動は、十分支持枠を下げた状態

にしておかないと、支持棒が想定以上に上がった状態で引き絞ると脚から綱チェーンが外れやすい状況となる。

(5)解放場所

ブロックの解放場所は、陸上、台船上、海底、の3ケースがある。三つのケース全てにおいて3.2の工事において実施された。陸上の場合、地面が舗装されておらず掘削可能であれば掘削、あるいは土嚢等により凹凸のある面とすることができれば作業員の支援が不要で解放が可能である。台船上では、チェーンの各網目にフックあるいはシャックルによりチェーンの着脱が可能ないようにしておけば、台船上の平面でも作業員の支援によりブロックの解放が円滑に実施できる。実際の作業に要する時間は、概ね0.5から1分程度と短時間で対応可能である。

海底にそのまま仮置きする場合は、ブロックが海底に着底したら支持棒を上げてチェーンを緩め、綱チェーンを引き揚げることで解放が可能である。3.2(6)の工事では38個の海底仮置きを実施したが、この手順で行うと円滑に解放できた。またこの方法で海底解放を行うことによる作業時間は、吊り棒を上方に数m上げるだけの時間だけで10秒程度のものである。仮置き作業全体の時間としてはクレーンでブロックを海面上から海底に吊り降ろす所要時間がほとんどであり、綱チェーンの解放のための所要時間は全く問題とならなかった。

(6)海象条件

海象条件は、陸上クレーンを用いて施工する場合は、ほとんど制約条件とはならない。海上にて起重機船によって施工する場合は、船の動揺がクレーンのブーム先端では大きく影響して、クレーンに吊り下げられた本装置に影響する。しかし、3.3(4)で述べたように、船の動揺による本装置の水平方向の揺れは綱チェーン部分をブロックに接触させる、あるいは海中の場合は水の抵抗により動揺は収まり、施工に余り影響を及ぼさない。なお、ワイヤーの上下方向の動揺は伝達されるので、特に綱チェーンを絞る段階等は、注意を要する。

3.4 結論と課題

(1)結論

本章で得られた結論を以下に記す。

- ・2-25tまでの6件の消波ブロック撤去工事に本装置が活用された。ブロックの種類は、4脚ブロックの他、6-10脚の縦長ブロック、脚が折れた破損ブロック等も回収した。

- ・ブロックが視認できる状況では、概ね模型実験で試算した結果と同様に、円滑にブロックを回収できた。海面上の十分視認可能なブロックの他、海中のブロックにお

いても、概ねのブロック中心位置が把握できるような状況においては、海面上の十分視認可能なブロックと同様に、ほとんど支障なく回収が可能であった。

- ・海象条件が悪い状況においても、起重機船が稼働できる状況では、ブロック回収が可能であった。波浪・うねり等による船の同様によるクレーンブームの揺れは、綱チェーンをブロックに接触させる、あるいは、海中においては、水の抵抗により動揺が抑制され作業の支障とはならなかった。クレーンブームの上下方向の動揺は吊りワイヤーを通して伝達されるので、綱チェーンを引き絞る過程等では注意を要する。

- ・ブロックの解放は、凹凸を設けにくい台船上では、フック挿入、あるいは角材使用により円滑に解放が可能であった。海底解放も円滑に実施できた。

(2)課題

本章において課題とされた点を以下にまとめる。

- ・視認が困難な海面下のブロックに対して、水中カメラを用いた施工による検証、全く視認が不可能な状況での作業時間効率の改善が挙げられる。

- ・大重量のブロックに対しては、吊り上げ時のブロックの姿勢および各チェーンに作用する張力を求める技術的検討が必要となる。本課題に関しては、5.把持のモデリングとして取り組んだ。

4. 海底落下物回収作業への活用

4.1 緒論

本装置の特徴および期待される効果として、ブロックだけでなく、種々の形状の海面浮遊物あるいは海底落下物等の回収作業への活用が期待できる。水深が深い場合電動あるいは油圧駆動等による把持装置では耐圧構造が大きな課題となるが、本装置は水深、水圧に影響されない構造となっているので、大水深においても吊り上げるワイヤー長を伸ばすだけで対応可能である。また、2.6において種々の形状物模型の把持実験を行い、海底落下物の回収作業への活用が期待できることを述べた。

これらを踏まえ、本章では、本装置による海底落下物回収作業について論じる。4.2では、潜水土等による従来の回収作業方法の問題点について述べる。本装置を大水深海域にて使用する場合の課題として、水平位置の制御が懸念されていたので、その対処方策を考案した。4.3はその模型実験を示す。4.4および4.5では、実際に水深約200mの海域に沈んだ船舶の水中翼の回収作業2件について述べる。

4.2 従来技術における海底落下物回収作業

(1) 潜水士による作業

海底落下物の回収作業は、潜水士が落下物にワイヤー等を掛けて海面上のクレーンを用いて引き揚げる方法が一般的である。潜水士が潜るのが困難な深い海域等では大気圧潜水器を使用したり、特殊な場合にはマニピュレータを搭載した ROV（遠隔操作の水中ビークル）による回収方法がある。

対象海域が浅い海域であれば、潜水士が対象物にワイヤーを掛けて、海面上の作業船クレーンを用いて引き揚げる方法が一般的である。潜水士による作業は、通常水深 100m 程度までとされている。水圧の変化に身体を徐々に対応させるための減圧時間が必要となるため、海底での作業時間は限定され、効率は非常に低下するとともに、危険性も増す。また強潮流域においても、作業能率は低下するとともに、危険が伴う。

(2) 大気圧潜水器による作業

潜水艇は固い金属に被われているので当然水圧の影響を受けないが、これをロボットのような形にして人間が着込み、大気圧とほぼ同じ環境で深海潜水を可能にしたのが大気圧潜水器(写真-4.1)である。減圧症や圧外傷、空気塞栓症等の潜水に伴う疾患がなく安全だが、大気圧潜水器は水圧から人体を保護するために金属で出来ているので身体の行動が著しく低下するという課題を有している。



写真-4.1 大気圧潜水器

(3) マニピュレータ付き ROV による作業

マニピュレータ(ロボットハンド)付き ROV (前後・左右・上下方向への推進スクリュウを有し船上より電源をコードで供給して操縦する無人潜水艇)を用いて、吊り上げ用ワイヤーを対象物に取り付け吊り上げる方法がある。

引き揚げ対象物がコンテナ等のように吊り上げ用の金具が取り付けられているものであれば、マニピュレータを用いて吊り上げワイヤーを吊り上げ金具に取り付け引き揚げが可能である。しかし、引き揚げ対象物に吊り上げることを想定した金具が取り付けられていない場合は、ワイヤーの取り付けが困難となる。吊りワイヤーを対象物と海底のわずかな隙間に通すことが必要となることもあり、そのような細かな技巧を要する作業は不可能である。また潮流等が大きい場合には、ROV の位置制御も困難となり作業不能となる状況も多い。さらにこのような ROV は、耐圧構造が必要となり大水深において作業可能なものは極めて限られている。

海外において、大水深において重作業が可能な耐圧構造を有するロボットアームを搭載した ROV による引き揚げ事例がある²⁰⁾。2001 年(平成 13 年)2 月、アメリカハワイ州のオアフ島沖で、アメリカ海軍原子力潜水艦に衝突された愛媛県水産高校練習船えひめ丸が水深 600m の海底に沈んだ。その船体引き揚げに、米国海軍のロボットハンドを搭載した ROV が用いられた(写真-4.2)。吊り上げ用のワイヤーを船体に取り付けて引き揚げ、ダイバーが潜行して調査できる水深 35m の位置まで移動した。引き揚げ作業は困難を極め、約 8 ヶ月、約 60 億円(6,000 万ドル)の月日・手間・費用を要したとされている。

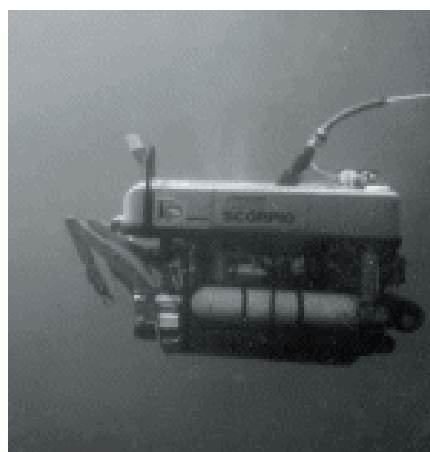


写真-4.2 米国海軍のロボットアーム付き ROV

4.3 大水深海域での適用を想定した模型実験

(1) 模型実験の目的

網チェーン把持装置は、対象物の凸部に網チェーンの網目を掛けて対象物を拘束して吊り上げるものである。そのため網目が対象物の凸部に掛かるように装置の水平位置を制御する必要がある。必要となる水平方向の位置制御精度は、対象物の形状等にもよるが概ね対象物の大きさ(幅、長さ等)の数分の 1 程度である。高さ約 2m

の 6.3t 型 4 脚ブロックでは、0.5m 程度の精度が必要となる。

大水深海域での活用を想定すると、本装置は船からワイヤーで吊り下げた状態で運用するため、特に強潮流域では網チェーン把持装置の水平方向の位置を制御して対象物の上に覆い被せることが課題となる。

その対応策として、網チェーン部の一部を海底に接触させることで動揺を抑制して静止させ、静止した位置から対象物の方向へ母船を移動させることにより対象物に接近させる。海底との摩擦力は、吊りワイヤーを上下させ海底に接する網チェーン部の長さを制御することで調整可能である。対象物に遭遇せず通り過ぎた場合には、母船を停止して、その位置から再び対象物の方向へ母船を移動させて対象物に網チェーンを被せることとする。このような運用方法による水平方向の正確な位置制御の有効性を確認するために模型実験を行った。

(2) 模型実験の方法

高さ 6cm 縮尺 1/32 の消波ブロック模型を高さ 10m の高さに位置するクレーン模型を操作して回収する模型実験を実施してその有効性を確認する。高さ 10m は、模型縮尺からは 300m に相当する高さである。実験棟の室内の諸機材昇降用エレベータシャフトを利用して、3 階フロアにトラッククレーン模型を設置した (図-4.1(a))。1 階フロアの床面に、高さ 6.6cm、重量約 184g、6.3t4 脚消波ブロックの縮尺 1/31.4 模型を乱積み状態に設置した (図-4.1(b))。1 階フロアより、無線により 3 階のトラッククレーンのクレーンブームの延伸、旋回、上下げ及び吊りロープの巻き上げ下げを操作した。

(3) 模型実験の結果および考察

通常の 0.2m 高さにおけるブロック回収時間効率 1.3 分/個に対し 2.9 分/個と時間はやや要するが、チェーン下部を床面に接触させることで揺れを抑制して水平方向に 1-2cm 程度の精度での位置制御ができ、ブロック模型回収は十分可能であった (図-4.1(c))。この結果より、網チェーン部の一部を海底に接触させることで動揺を抑制して静止させる方法が有効であることが確認された。

縮尺を考慮して実海域での有効性について検討する。模型実験により、装置の水平方向の動揺の起振力は、網チェーン装置の重量 M と装置を吊すワイヤーの鉛直方向との傾き θ との積 $M\theta$ に近似的に比例することがわかった (図-4.2)。動揺を抑制する網チェーンと床との摩擦力は、チェーンの単位長さ当たりの重量を m 、チェーンと海底接触部の総延長を l 、チェーンとブロックとの摩擦係数を μ とすると、摩擦力は、 $ml\mu$ で表され、

$$M\theta = ml\mu \quad (4.1)$$

が成り立つ。なお、ここでは潮流等による網チェーン装置への抵抗については考慮していない。もし、潮流等によりその力が装置に作用する場合には、その力のベクトルと $M\theta$ の力のベクトルの合力と海底との摩擦力が釣り合うようなチェーンと海底との接触部長さの状況で、網チェーン装置の動揺は抑制される。潮流力が一定の場合には動揺の大きさには影響しないが、時間的に大きく変動する場合には影響することになる。

模型の縮尺を $1/n$ とする。実際の海底での諸元を「 $'$ 」を付けて表現する。実海域での動揺起振力は、

$$M'\theta' = n^3 M\theta \quad (4.2)$$

一方、海底との摩擦力 $m' l' \mu'$ は、

$$m' l' \mu' = n^3 ml\mu \quad (4.3)$$

となり、動揺起振力及び海底摩擦力とも n^3 倍となり釣り合うこととなる。

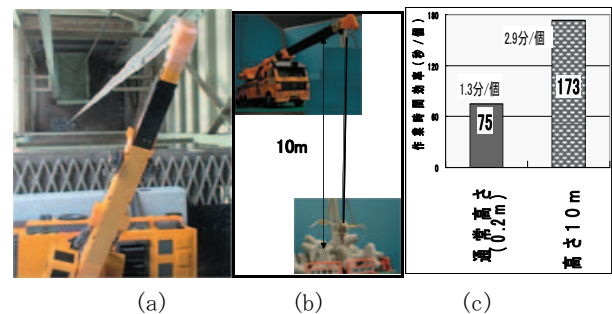


図-4.1 10m の高さからのブロック模型の回収実験

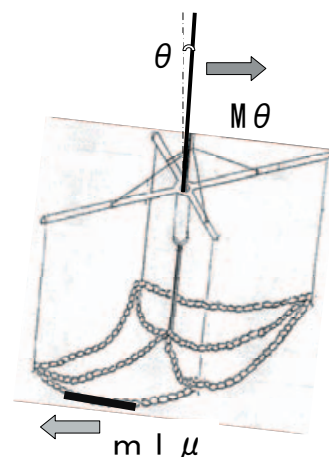


図-4.2 網チェーンの海底接触による揺れの制御

4.4 水中翼回収作業その 1

(1) 潜水士作業の限界と活用の経緯

高速船の水中翼が事故により船体から離れ海底に落下した。対象海域は水深 180m と深く潮流も大きいため潜水士による回収は困難な状況であった。一般に潜水士に

よる圧縮空気を呼吸ガスとする水中作業は、通常水深 60 m 程度までとされている。それより深い水深では、呼吸ガスとしてヘリウム酸素混合ガスを使用する潜水（飽和潜水）か大気圧潜水器の使用が考えられるが、潮流 0.5kt 以下でなければ作業は困難である。そのため、引き揚げ作業を行うサルヴェージ会社より、網チェーン把持装置の活用の要請があった。

(2) 水中翼回収作業

2007 年 7 月 22 日、日本海の南海域にて回収作業が行われた。把持装置の吊り枠に水中カメラ及び水中位置計測装置が搭載され、作業台船(写真-4.3)から把持装置を海底に吊り降ろす形で行われた(写真-4.4, 4.5)。作業台船は、長さ 80m、幅 26m、深さ 5m で、DPS（自動船位維持装置）を装備している。網チェーンは、水中翼の重量が 6t 未満のため 3.2(2)のブロック撤去工事に用いたものが使用された。吊り枠は新たに製作された。

海底に到達後、把持装置の水平位置の制御は、作業台船の位置を制御することにより行われた(図-4.3)。水中翼の位置座標は、事前に水中位置計測装置及び水中カメラを搭載した ROV による調査において、GPS（汎地球測位システム）による作業台船の位置座標及び作業台船と ROV の相対位置座標から求められていた。その位置座標を目標として、把持装置を作業台船が引きずるような形態で移動させた(図-4.4)。

潮流のある状態では、単に吊り下げただけでは水深 180m にある把持装置は約 20m 程度流され、長い振り子のように振れるため水平位置を正確に制御するのは困難であった。



写真-4.3 作業台船 写真-4.4 ROV 搭載吊り枠



写真-4.5 海中での降下状況

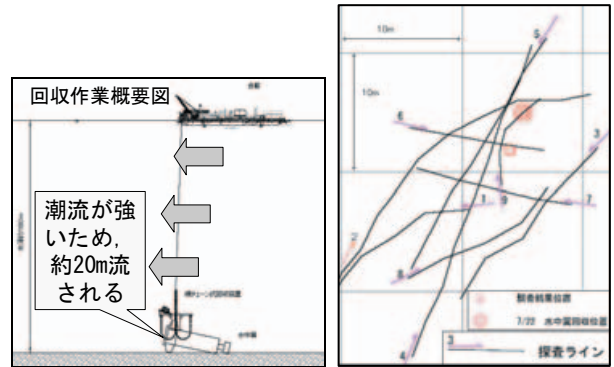


図-4.3 水中翼回収作業概要 図-4.4 海底上の移動軌跡

しかし、把持装置の網チェーンの部分海底に接触させることで、揺れの抑制が可能となる。把持装置の海底での位置座標を船上の位置座標表示モニター画面で確認し、その位置から目標とする水中翼の方向へ作業台船を移動させることで、把持装置も網チェーンの一部を海底へ接触させながら引きずられるような状態で移動する。海底と接触する網チェーン部の長さが長すぎると摩擦抵抗が大きすぎて把持装置は動かず、短すぎると抵抗が小さくて揺れが止まらずに位置制御が困難となるが、繰り出す吊りワイヤーの長さを操作することで、網チェーンが海底に接する長さを調整することが可能である。

図-4.4の把持装置の海底の移動航跡図において、○印が事前調査結果による水中翼の位置座標である。この○印を目標に、海底上の把持装置を移動させて探索した。探索した順番に、ラインに番号と探索方向を示す矢印を記す。探索作業に慣れるに従って把持装置の位置制御精度も向上し、約 1m 程度の精度での制御が可能であった。探索ライン 6 では、○印の目標位置の直上を通過しているにもかかわらず、水中翼を確認できなかった。その後探索を続け、探索ライン 9 の◎印において、水中翼を把持装置に搭載した水中カメラで確認することができた(写真-4.6)。

水中翼を水中カメラの画像で確認してから約 20 分後に水中翼を網チェーンによりしっかり掴んだ(写真-4.7)。そしてその 25 分後に作業台船上に引き揚げられた(写真-4.8-10)。回収された水中翼は重量 4t 長さ 6.3m であった(写真-4.11)。



写真-4.6 水中翼との遭遇 写真-4.7 水中翼の拘束

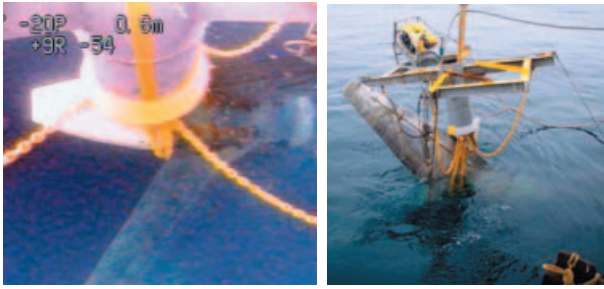


写真-4.8 海中の吊り上げ 写真-4.9 海面上へ引き揚げ



写真-4.10 水中翼全景 写真-4.11 台船上への回収

以下に主な作業の時間経緯を記す。

- ・ 9 : 0 0 網チェーン把持装置を海中へ降下。
- ・ 9 : 3 0 頃 水中翼の搜索開始。
(昼休み約 1 時間を含む)
- ・ 1 2 : 4 5 水中翼を発見。
- ・ 1 3 : 0 5 水中翼を網チェーンで拘束。
引き続き、引き揚げ作業開始。
- ・ 1 3 : 3 0 水中翼を作業台船上に回収。
(3)海底での網チェーン把持装置の移動

網チェーン把持装置が海底に着底した位置は、海中に降ろした位置から約 20m 流されていた。水深は約 180m であったことから、潮流等により網チェーンに作用していた力は、網チェーン装置の水中での重量 (約 0.5t) の $1/9 (=20/180)$ の力が作用していたと考えられる。

海底着底後、作業台船が目標物の水中翼の方向へ向けて移動する際の網チェーン把持装置の状況は、進行方向に対して左右の方向には、全く揺れることなく安定していた。進行方向に関しては、約 1m 前進しては、約 0.5m 後進するような揺れを約 7~8 秒の周期で繰り返しながら移動していた(写真-4.12)。

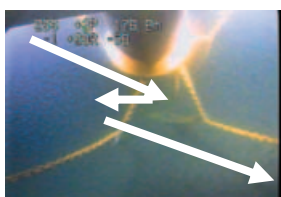


写真-4.12 海底面上での動き

これは、海面上の作業台船が波によるヒービング（上下動）及びピッチング（前後方向の回転振動）による吊りワイヤーのワイヤー方向の縦揺れによるものと考えられる。

4.5 水中翼回収作業その 2

再度、海底に落下した水中翼の回収作業に、網チェーン把持装置活用の要請がサルヴェージ会社からあった。2008 年 6 月 5 日、場所も前回とほぼ同様の日本海の南西海域で、回収作業が行われた。

使用機材、作業形態は基本的には前回と同様であるが、今回は海底で水中翼を探すのに水中ソナーが網チェーン把持装置の吊り枠の上に搭載された(写真-4.13)。水中ソナーは半径 50m 以内に水中翼があればリアルタイムにその方位と距離を確認する事ができる。ただし、水中ソナーは海底から約 2.5m の高さ位置しているため、足元近くの距離 10m 以内になると探査ビームの走査角度幅の外となり、確認ができなくなる問題点があった(写真-4.14)。

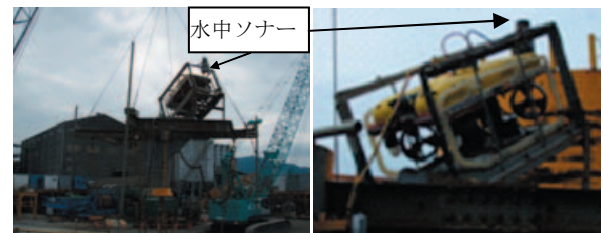


写真-4.13 水中ソナーの搭載

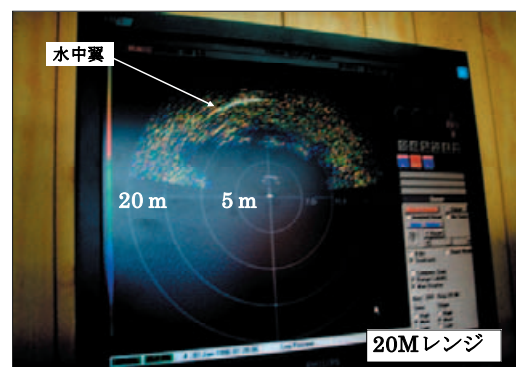


写真-4.14 水中ソナーの表示画面

潮流が強く網チェーン把持装置は、作業台船から後方へ約 60m 流されていた。また今回は視界が悪く水中カメラから 1m 程度の範囲しか視認できない状況であり、水中ソナーも 10m の範囲内では探査ビーム範囲外のため、手探りの状況での探査であった。

そのため探査には時間を要したが、着底の 50 分後には、水中翼に網チェーンを掛けることができ、吊り上げを開

始することができた(写真-4.15).回収された水中翼は重量約7t,長さ約5mであった(写真-4.16).

1回目の回収作業と比較すると,水深は同程度の180mであったが,潮流が強くと1回目では潮流により把持装置が流された距離が20mに対し,2回目は60mと3倍であった.また,濁りのため水中カメラの視界も悪く4.4の1回目の回収作業時の透明度約2-3mに対し2回目の今回は,1m程度と悪くほとんど状況を視認できない状況であった.しかし,このような悪条件にも関わらず,新たに水中ソナーを搭載した効果により水中翼を回収できたといえよう.

以下に主な作業の時間経緯を記す.

- ・ 19:00 網チェーン把持装置の海中降下開始.
- ・ 20:00 着底.水中ソナーを用いて水中翼の搜索を開始.
- ・ 20:23 水中ソナーにより水中翼を確認.水中翼の方向へ移動.水中翼から10mの範囲内に入ると水中ソナーには反応しなくなり,手探り状況で探査.
- ・ 20:46 網チェーンに張力反応あり.水中カメラで辛うじて水中翼の一部を視認.水中翼を網チェーンで拘束.
- ・ 22:00 水中翼を作業台船上に回収.



写真-4.15 水中翼の回収 写真-4.16 回収された水中翼

4.6 今後の課題

本章で述べた水中翼の回収作業においては,特に制約条件もなく海底から水中翼を回収すればよいものであった.1回の作業で水中翼を把持できなかったとしても,網チェーンを緩めて再び開いた状態にして,再度把持を試みることが許される条件であった.また水中翼の吊り上げ時の姿勢,あるいは網チェーンを掛ける箇所に関しても特に制約はなかった.

しかし,回収すべき海中落下物としては,種々の物が想定される.例えば,沈船を例にとれば,船体に燃料タ

ンク等を有し,回収時に油流出を生じないような配慮が求められる,吊り上げ時の姿勢に条件が課される場合もある.また引き揚げる際の吊り上げ力によって船体を損傷させないように作業前に事前に,網チェーンが沈船にどのように掛かり,どのような姿勢で引き揚げることになるか,またその際の沈船の船体の各部位に及ぼす力やモーメントを事前にシミュレーションをして検討すべきケースも生じることが想定される.そのため第5章において,この網チェーン把持装置による把持モデルの構築に取り組むこととした.

4.7 結論

本章での結論を下記にまとめる.

- ・ 網チェーン把持装置は,耐圧構造が必要となる駆動装置等はないため,大水深海域への適用においては,基本的には,水深に応じてクレーンのワイヤーを延長するだけで対応可能である.
- ・ 課題とされた水平方向の位置制御は,網チェーンの一部を海底に接触させて動揺を抑えるという簡易な運用方法によって対応可能であった.
- ・ 上記のことは,強潮流域下の水深約200mの海域において,2回の水中翼の回収に成功したことで実証された.
- ・ より慎重な取り扱いが求められる海底落下物に対しても本装置を有効に活用できるように,第5章において把持のモデリングに取り組むこととした.

5. 把持のモデリング

5.1 緒論

3章既設ブロック撤去工事への活用において,課題として大型ブロックは吊り上げの失敗が周囲の構造物の損傷等を招く可能性が高いことから慎重な対応が求められることを挙げた.また4章海底落下物回収作業への活用においても,課題として油漏れが懸念される沈船等の慎重な取り扱いが要求される物に対しては,吊り上げ時の傾き,対象物に作用する荷重の検討等,事前の詳細な技術検討が必要とされることを挙げた.

このような背景から,本章においては物体把持のモデリングに取り組む.5.2では4目の網チェーン把持装置による4脚消波ブロック把持をモデル化し,幾何学的条件と力学的条件を非線形連立方程式で表し,これを解くことにより把持状態を求める.5.3において,種々のケースの計算結果を示す.5.4では,今後の課題として,摩擦の影響および,他の形状の物体への適用について述べる.

5.2 消波ブロック把持のモデリング

(1) 物体把持の過程と前段階における脚の捕捉

把持モデリングには、網チェーンに張力は作用せず、よってブロックは動かない状態で網チェーンが脚を捕捉する第一段階と、網チェーンに張力が作用して物体の姿勢を変化させながら吊り上げる第二段階に分けられる(図-5.1)。第一段階においては、各網目がブロック脚を捕捉するかどうかを判定する。

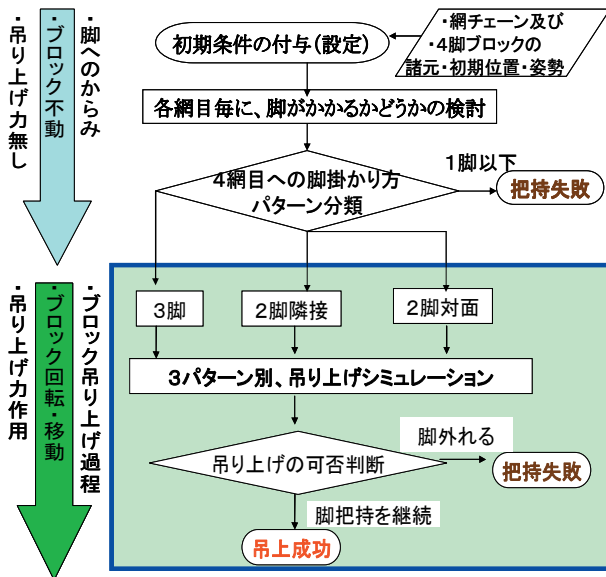


図-5.1 モデリングにおける二つの段階

図-5.2は、把持装置とその把持の過程を示したものである。

P_0 は中央のチェーン引き込み管の入り口である。網チェーンは、支持枠から吊り下げられており、八つのチェーン部材、 $P_0-P_1, P_0-P_2, P_0-P_3, P_0-P_4, P_1-P_2, P_2-P_3, P_3-P_4, P_4-P_1$ から構成されており、四つの網目 $P_0-P_1-P_2, P_0-P_2-P_3, P_0-P_3-P_4, P_0-P_4-P_1$ を形成している。X-Y平面は、水平面であり、Z軸は、鉛直軸である。 P_1, P_2, P_3 , および P_4 は、三つのチェーン部材が結合している結節点である。なおこのモデルでは三つのチェーン部材のいずれかに張力が発生していない場合は、実質的には結節点でないとして扱う。

図-5.2(a)において、網チェーンはZ軸に平行に真っ直ぐに降下する。主巻きワイヤーを引き上げると、網チェーンは中央引き込み管に引き込まれ絞り込まれ(図-5.2(b))、チェーンはブロック脚に接触して張力を発生する。そして最後にブロックをしっかりと把持して吊り上げる状態となる(図-5.2(c))。

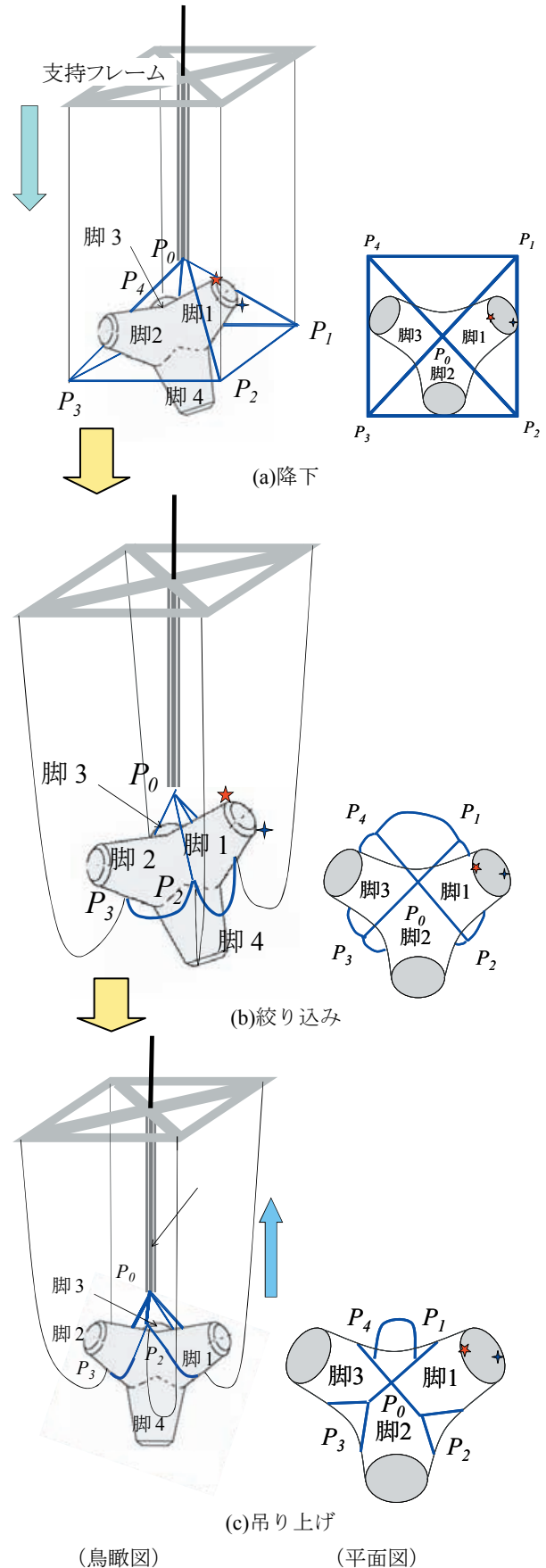


図-5.2 4脚ブロックにおける把持の過程

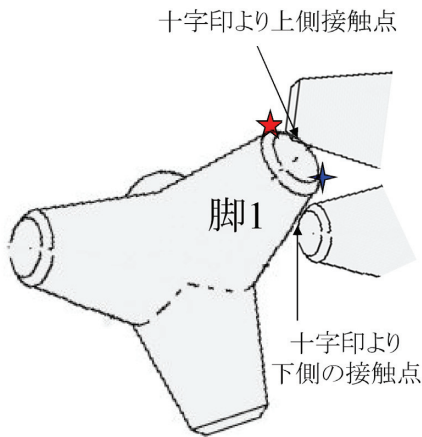


図-5.3 周囲のブロックとの接触

網チェーンを吊り下げているワイヤーは、網チェーンがブロックを把持しているときはその張力は小さいことからこのモデルでは考慮していない。網チェーンは、図-5.2(a)の脚1のように上方向を向いている脚を捕捉しやすい。

網目 P_0 - P_1 - P_2 が脚1を捕捉する場合を例にとると、次の二つの条件を満足することが必要となる。一つは、網チェーンが降下する過程において、脚上端の星印点のXY座標が水平面に投影した三角形 P_0 - P_1 - P_2 の内部に位置することである(図-5.2(a))。もう一つは、網チェーンを絞り込む過程において、脚の最も外側のY座標が最大である十字印点がチェーン P_1 - P_2 の上側に位置することである。

図-5.2には周囲のブロック群との接触状況を示していないが、脚の捕捉には、周囲のブロック群との接触あるいは接近によりチェーンがその隙間あるいは接触点(以降、接触点等と記す)を通過できない状況も生じる。図-5.3は、脚1の周囲のブロックとの接触点等を示したものである。接触点等が十字印点の上側等にある場合には、チェーン絞り込みの過程ではチェーン P_1 - P_2 が十字印点の下側を通過できないため脚がかからないと判定する。また、上側の接触点等において、その隙間がチェーンの太さより広く接触点等に該当しない場合においても、他のブロック脚の存在が支障となり、網チェーンを真下方向に単純に降下させるだけでは、脚1に網目がかからない状態も生じる。このような場合には、真上から吊り上げようとするブロックを見ると、図-5.2(a)右の平面図に示すようには脚1全体が視認できず、その一部が隠れた状

態となって見える。このような場合には、網チェーンを真っ直ぐに降下させず、覆っている他のブロック脚を避けるように網チェーン支持フレームを水平方向に移動させて降下させる必要がある。

4脚ブロックを回収する場合、前段階の過程において、四つの網目のうち三つあるいは二つの網目がブロック脚を拘束した場合に吊り上げられる可能性がある(図-5.4)。なお一つの網目で二つの脚を拘束する場合も吊り上げ可能であるが、単純に網目の大きさから物体が抜けるかどうかの問題であることからここでは検討の対象外とした。図-5.4において、ケース1は、三つの網目が三つの脚を捕捉する場合、ケース2は隣接する二つの網目が二つの脚を捕捉する場合、ケース3は離れた二つの網目が二つの脚を捕捉する場合である。

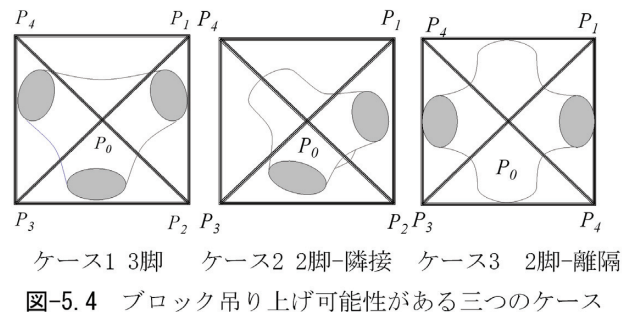


図-5.4 ブロック吊り上げ可能性がある三つのケース

(2) 把持モデリングにおける前提条件

本研究においては、静的な均衡な状況における把持のメカニズムのモデルについて検討するものとして、以下の前提条件を仮定した。

- ①ブロックは剛体である。
- ②ブロックの幾何学形状は既知とする。ブロックの脚の形状は円錐台とする。
- ③チェーンと脚との接触における摩擦力は考慮しないものとする。

海面に近い海中のブロック表面は海藻等が付着して滑りやすくなっている場合が多い。摩擦力は、ブロックを吊り上げる過程においては、一般には脚がチェーンから滑り外れることを防ぐように作用する。

このモデル分析の主な目的の一つは、ブロック表面が滑りやすい状態においても本装置がブロックをしっかりと把持できることを確認することであることから摩擦力は考慮しないものとした。仮定3に関する摩擦力の影響及び、仮定2に関する他の形状物への適用に関しては、後の5.4において検討する。以降、ケース1を例として説明をする。

(3) 未知数

このモデルでは、図-5.2(c)に示すブロック吊り上げの最終状態を求めるものとする。そのためには、網チェーンがどのようにブロック脚を保持しているかという網チェーンの形状、ブロックの位置及び姿勢、網チェーンの各チェーンの張力を把握する必要がある。以下、これらの各項目に関する未知数について検討する。

a) 網チェーンの形状

ケース1では、網チェーンの3個の網目が3本の脚を捕捉している。座標系 $X_0Y_0Z_0$ は中央引き込み管の入り口 P_0 を原点として設定する。その傾きは、全体座標系と同じである。 r は、 P_0 と各結節点との距離とする。 r は5.3(4)で説明するが、把持の最終状態を計算する際に設定する変数である。

図-5.5で示されるように、ケース1には二つの結節点 P_2 と P_3 がある。チェーン P_2-P_1 には張力はないので、 P_1 と P_4 は実質的には結節点ではない。

P_4 はチェーン P_0-Q_{32} の線上に、そして P_1 はチェーン P_0-Q_{11} の線上にある。 Q_{i1} と Q_{i2} ($i=1,2,3$) は、脚 i とチェーン P_i-P_{i+1} との接触部の両端の点とする。以降、 Q_{ij} を接点と記す。

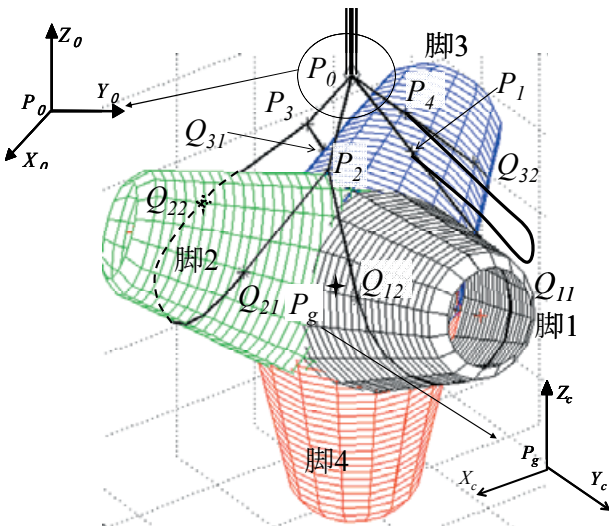


図-5.5 網チェーン形状に関する未知数

図-5.6で示されるように、 P_i ($i=2,3$) の Z 軸からの傾きを θ_i 、 X 軸からの傾きを ϕ_i とする。結節点 P_2 と P_3 は、次式のように表現される。

$$P_2 = (r \sin \theta_2 \cos \phi_2 \quad r \sin \theta_2 \sin \phi_2 \quad r \cos \theta_2)^T \quad (5.1)$$

$$P_3 = (r \sin \theta_3 \cos \phi_3 \quad r \sin \theta_3 \sin \phi_3 \quad r \cos \theta_3)^T \quad (5.2)$$

二つの結節点には合計四つの未知数 θ_2 、 θ_3 、 ϕ_2 、 ϕ_3 が存在する。

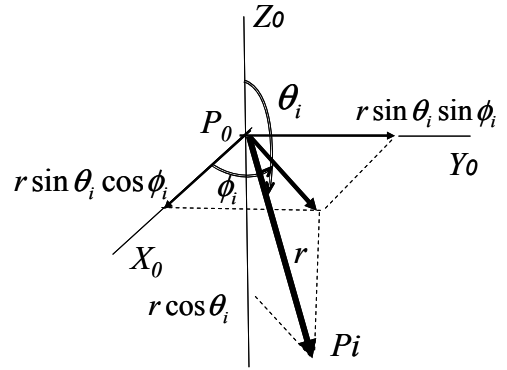


図-5.6 結節点 P_i に関する未知数

図-5.7は、脚 i ($i=1,2,3$) を円錐台としてモデル化したものである。ローカル座標系 $X_iY_iZ_i$ を Y_i 軸を中心線とした円錐台に設定した。その回転行列 cR_i と原点 cO_i はブロックの幾何学形状は与えられていることから既知である。左上添字 c は、これらが座標系 $X_iY_iZ_i$ で定義されていることを示す。接点 Q_{ij} は円錐台の表面上にあるので、座標系 $X_iY_iZ_i$ における位置は、二つの未知数 a_{ij} と ϕ_{ij} によって次式で表現される。

$${}^i q_{ij} = (b(1-a_{ij}/a) \sin \phi_{ij} \quad a_{ij} \quad b(1-a_{ij}/a) \cos \phi_{ij})^T \quad (5.3)$$

ここで a と b は、それぞれ円錐台の高さと半径で既知の値である。接点数は6なので、合計12の未知数がある。接点 Q_{ij} を物体座標系 $X_cY_cZ_c$ で表現すると次式となる。

$${}^c q_{ij} = {}^cR_i {}^i q_{ij} + {}^c O_i \quad (5.4)$$

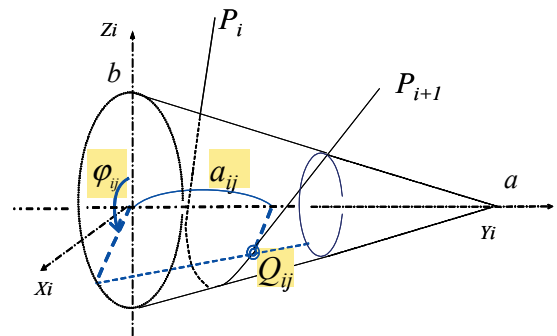


図-5.7 接点 Q_{ij} に関する未知数

b) ブロックの位置および姿勢

対象物の座標系 $X_cY_cZ_c$ はブロックの重心 P_g を原点に設定し、脚4中心軸を Z_c 軸負方向、脚1中心軸は Y_cZ_c 平面上に位置して Y_c 軸正領域にあるとする。ブロックは一つの点 P_0 から吊り上げられており静的に均衡状態にあると仮定しているので、点 P_g の X,Y 座標は $(0,0)$ となる。

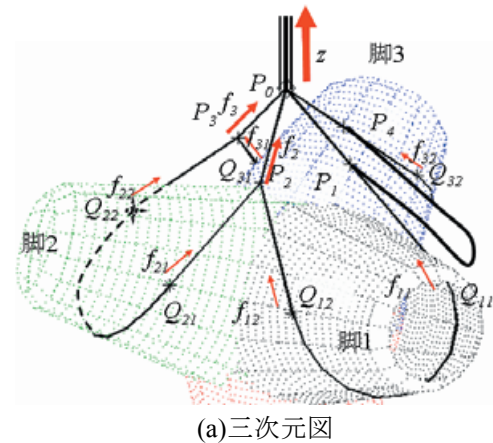
よって

$$p_g = (0 \quad 0 \quad z)^T \quad (5.5)$$

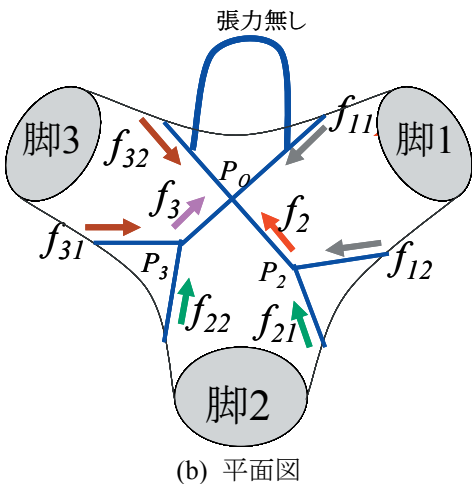
ここで、 z は点 P_g の Z 座標で、 $z < 0$ であり、未知数である。網チェーンによって把持されているブロックの傾きの表現はヨウ角は不要で、ロール角 θ_r およびピッチ角 θ_p だけによって表される。 Z 軸回りの網チェーンとブロックとの相対的な角度は、既に ϕ_2 と ϕ_3 によって表されているからである。

c) チェーン張力

f_{ij} を接点 Q_{ij} におけるチェーン張力とする(図-5.8)。脚とチェーンの間には摩擦はないと仮定しているので、 $f_{11} = f_{12}$ 、 $f_{21} = f_{22}$ 、 $f_{31} = f_{32}$ となる。結節点 P_2 および P_3 において f_2 、 f_3 をそれぞれチェーン P_0-P_2 、 P_0-P_3 の張力とする。するとチェーンの張力については、五つの未知数 f_{11} 、 f_{21} 、 f_{31} 、 f_2 、 f_3 がある。したがって、未知数の総数は $24 = 1$ (ブロック重心位置) + 4 (結節点) + 12 (接点) + 2 (ブロック姿勢) + 5 (張力)、となる(表-5.1参照)。



(a) 三次元図



(b) 平面図

図-5.8 チェーンの張力に関する未知数

(4) 拘束条件式

次に幾何学および静的な力の拘束条件について述べる。

a) 接点の条件式

図-5.9は、ローカル座標系 $X_1Y_1Z_1$ における脚1の円錐台形状を示したものである。接点 Q_{ij} において外側方向の垂直単位ベクトルは、次式によって与えられる。

$${}^l n_{12} = \left(\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} \sin \phi_{12}, \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}}, \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} \cos \phi_{12} \right)^T \quad (5.6)$$

チェーンは円錐台表面上の点において接しているはずである。よって

$${}^l n_{12}^T ({}^l p_2 - {}^l q_{12}) = 0 \quad (5.7)$$

六つの接点があるので、六つの拘束条件式が得られる。

b) チェーン経路は最短距離であること条件式

脚を捕捉しているチェーン経路は張力が生じていると最短距離となる。図-5.10は、脚1を構成する円錐台の展開面である。二つの接点 P_1 と P_2 はそれぞれ P_1' と P_2' に投影される。この図-5.10において投影されたチェーン $P_1' - P_2'$ は最短距離となることから投影された接点 Q_{11}' 、 Q_{22}' は、直線 $P_1' - P_2'$ 上に位置する。このことは全ての接点について同様であり拘束条件式6式が得られる。

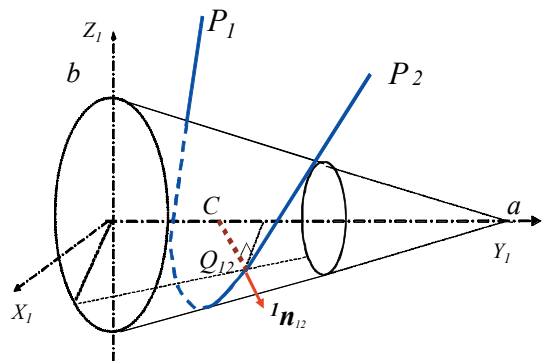


図-5.9 円錐台形状脚1における座標系

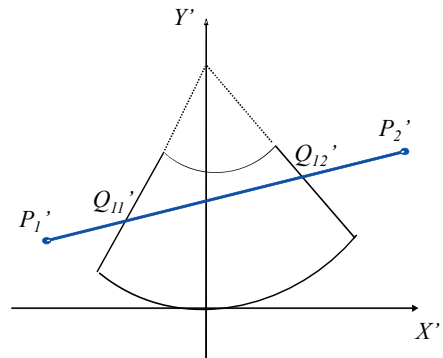


図-5.10 円錐台形状脚1の展開平面図

c) 結節点間のチェーン長さ一定

結節点間のチェーンの長さは一定の値である．よって
 図-5.10において、

$$\|P_1' - P_2'\| = c : \text{一定値} \quad (5.8)$$

脚を捕捉する網目は3目であるから、長さ一定の拘束条件式3式が得られる．

d) 力の釣り合い条件式

e_2, e_{12} , および e_{21} は、それぞれチェーン線分 P_0-P_2 , P_2-Q_{12} , および P_2-Q_{21} に沿った単位ベクトルとする． $f_{11} = f_{12}$ であったことから、結節点 P_2 においては力の釣り合いより次式が得られる(図-5.8)．

$$f_2 e_2 = f_{11} e_{12} + f_{21} e_{21} \quad (5.9)$$

この式から、三つのチェーン線分 P_0-P_2, P_2-Q_{12} , および P_2-Q_{21} は、同一平面上に存在する．同様に、結節点 P_3 に関しても $f_{21} = f_{22}$ であったことから次式を得る．

$$f_3 e_3 = f_{21} e_{22} + f_{31} e_{31} \quad (5.10)$$

ここで e_3, e_{22} , および e_{31} は、それぞれチェーン線分 P_0-P_3, P_3-Q_{22} , および P_3-Q_{31} に沿った単位ベクトルとすると、これらは同一の平面上に存在する．図-5.8(a)において、ブロック重量に対するチェーン張力の釣り合いから次式を得る．

$$wz = f_2 e_2 + f_3 e_3 + f_{31} e_{31} + f_{11} e_1 \quad (5.11)$$

ここで、 w はブロック重量であり、 e_1 と e_4 はそれぞれチェーン $P_0-P_1-Q_{11}$ と $P_0-P_4-Q_{32}$ に沿った単位ベクトルである．

式(5.9)(5.10)および(5.11)から、ベクトルは3成分を有することより合計九つの拘束条件式が得られる．したがって、拘束条件式の総数は24となる(表-5.1参照)．拘束条件式が得られる座標系は、 P_0 を原点とする座標系 $X_0 Y_0 Z_0$ 、対象物の座標系 $X_c Y_c Z_c$ 、網チェーンが捕捉する3つの脚毎にローカル座標系 $X_i Y_i Z_i$ 、及び展開平面座標系 $X_i' Y_i'$ があり、計八つの座標系に渡っている(図-5.11)．八つの座標系間において各座標系間の座標変換を行い、24の拘束条件式を関連づけることにより次式のように表すことができる．

$$F(x) = 0 \quad (5.12)$$

x : 未知数24のベクトル

$F(x)$: ベクトル値(24式)を与える関数

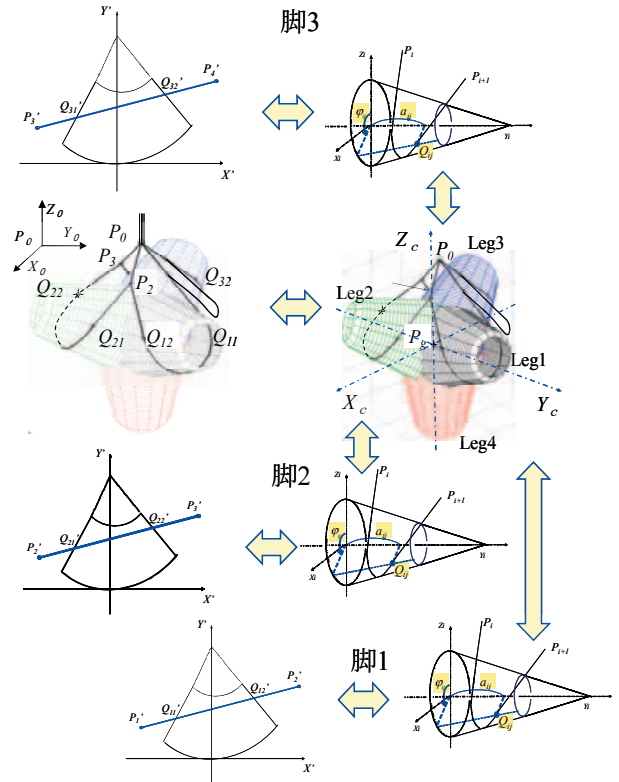


図-5.11 八つの座標系の関係図

(5) 把持形状とチェーン張力の計算

未知数の数と拘束条件式の数と同じであるので、一般に式(5.12)の解を得ることができる．

MATLAB関数におけるtrust-region法を用いて、初期ベクトル x_0 を与えることにより解析した．初期ベクトル x_0 の選定については、5.3(1)で議論する．

先に述べたように、 r は可変パラメータとして入力される．もし、 r が大きいと、網チェーンの網目は図-5.12(a)で示されるように脚の先端から外れ、ブロックの吊り上げに失敗する．この場合 r を徐々に小さくすることによって、ブロックを把持する状態を得ることができる． r が十分小さいと、網チェーンがブロック脚をしっかりと把持して、最終的にブロックを吊り上げる状態を得ることができる(図-5.12(b))．

(6) 他のケース

図-5.13(a), (b) および (c) は、ケース1、ケース2およびケース3における各チェーン部材における張力の有無および接点、張力の記号の定義を示したものである．また参考として3網目の装置で三つの脚を捕捉する場合をケース4として図-5.13(d)に示した．

ケース1と同様にして、ケース2, 3および4における未知数と拘束条件式の数を示したものを表-5.1に示す．四つ

のケース全てにおいて、未知数と拘束条件式の数は同数となった。よって、これらの非線形連立方程式の解を得ることができる。

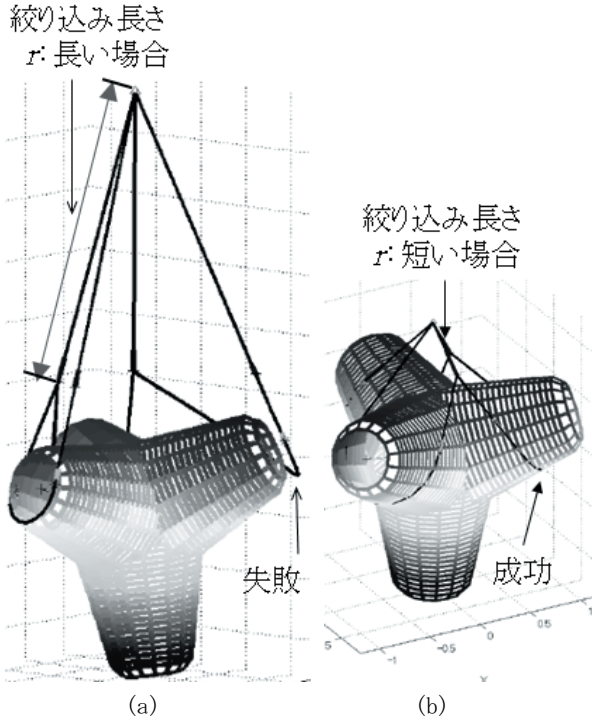


図-5.12 変数 r による吊り上げ結果の可否

表-5.1 各ケースにおける未知数と拘束条件式の数

ケース	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	
未知数	結節点(×2)	2×2=4	1×2=2	0×2=0	3×2=6
	接点(×2)	6×2=12	4×2=8	4×2=8	6×2=12
	チェーン張力	5	3	2	6
	ブロック位置(Z)	1	1	1	1
	ブロック傾き(X, Y)	2	2	2	2
	未知数計	24	16	13	27
拘束条件式	接点条件	6	4	4	6
	最短経路	6	4	4	6
	チェーン長さ	3	2	2	3
	力の釣り合い	3×3=9	2×3=6	1×3=3	4×3=12
	拘束条件式計	24	16	13	27

5.3 計算結果

(1) 把持の結果

未知数の初期値は以下の通り与えた。結節点 P_2 と P_3 は、式(5.2) (5.3)において、

$$\theta_2 = 3\pi/4, \theta_3 = 3\pi/4, \varphi_2 = \pi/4, \varphi_3 = -\pi/4 \quad (5.13)$$

接点 $Q_{11}, Q_{12}, Q_{21}, Q_{22}, Q_{31}$, および Q_{32} については、式(5.4)において、

$$a_{11} = a_{12} = a_{21} = a_{22} = a_{31} = a_{32} = 1.2 \text{ m} \quad (5.14)$$

$$\varphi_{11} = \varphi_{21} = \varphi_{31} = \pi/4 \quad (5.15)$$

$$\varphi_{12} = \varphi_{22} = \varphi_{32} = -\pi/4 \quad (5.16)$$

ロール角 θ_r およびピッチ角 θ_p の初期値は、ケース1では $\theta_r = \pi/8, \theta_p = \pi/8$, ケース2,3では $\theta_r = 0, \theta_p = 0$. ブロックの高さは2.1m, 二つの結節点間の距離 $c = 2.5 \text{ m}$ である。

図-5.14は $r = 0.5\text{m}$ での計算結果を示す。網チェーンはしっかりブロック脚を保持している。チェーン張力をwをブロックの重量とすると、

$$\left. \begin{aligned} f_{11} = f_{12} = f_{31} = f_{32} &= 0.22w \\ f_{21} = f_{22} &= 0.26w \\ f_2 = f_3 &= 0.42w \end{aligned} \right\} (5.17)$$

図-5.15, 5.16は、それぞれケース2, 3, すなわち2個の隣接している網目と離れた網目で脚を捕捉しているケースの計算結果である。図-5.15では、チェーンの張力は

$$f_{11} = f_{12} = f_{21} = f_{22} = 1.16w, f_2 = 1.68w \quad (5.18)$$

図-5.16では、

$$f_{11} = f_{12} = f_{31} = f_{32} = 0.71w \quad (5.19)$$

ケース1では網チェーンが三つの網目でブロックを把持しているので、チェーン張力は、二つの網目で把持しているケース2,3の張力よりもはるかに小さい。ケース2と3を比較すると、ケース3の方が小さい。

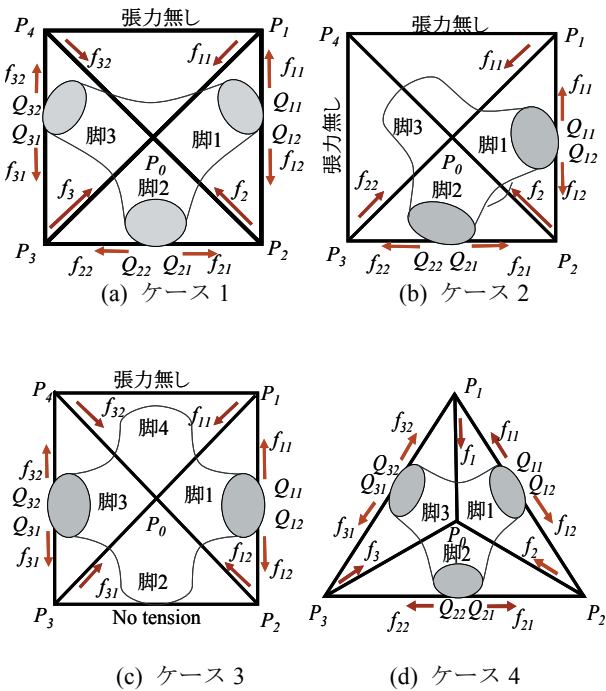
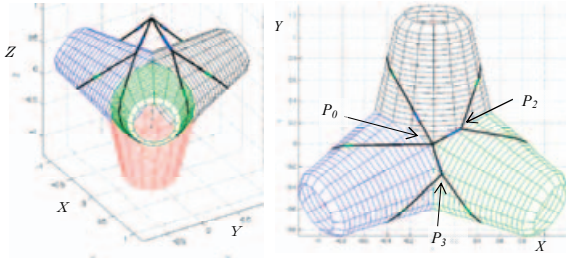
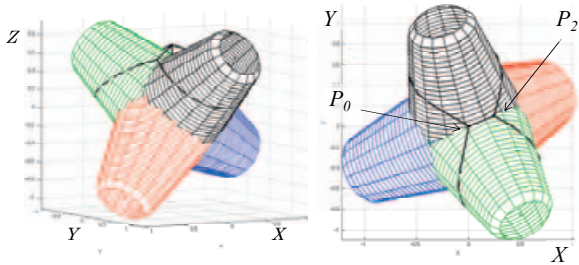


図-5.13 各ケースにおける力ベクトル

写真-5.1, 5.2は、それぞれケース2, 3に対応した実際のブロックの吊り上げ状況を示す。写真-5.1, 5.2における実際のブロックの把持状況は、図-5.15, 5.16のモデル計算と比べると、網チェーンはブロック脚の基部に近い部分で把持している。



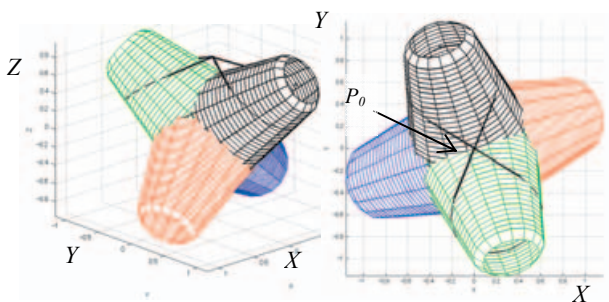
(a) 三次元図 (b) 平面図
図-5.14 3脚把持(ケース1)の計算結果



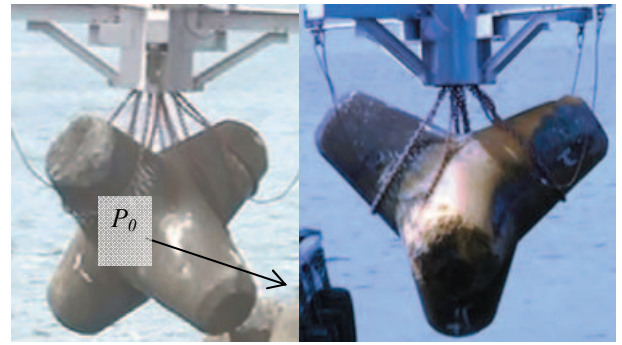
(a) 三次元図 (b) 平面図
図-5.15 2脚隣接把持(ケース2)の計算結果

これは、写真-5.1(b), 5.2においては、摩擦力がチェーンが脚の先端部分に向かって滑るのを防いでいるためと考えられる。その結果、写真-5.1(b), 5.2における把持は、安全な状態となっている。図-5.15, 5.16における摩擦力が無い状況での計算結果は、摩擦力が期待されない場合でも網チェーンはブロックを保持できることを示している。摩擦の影響は5.4(1)でより詳しく検討する。

図-5.17は3網目の網チェーンが3本の脚を把持しているケースを示している。その状況は対称的である。



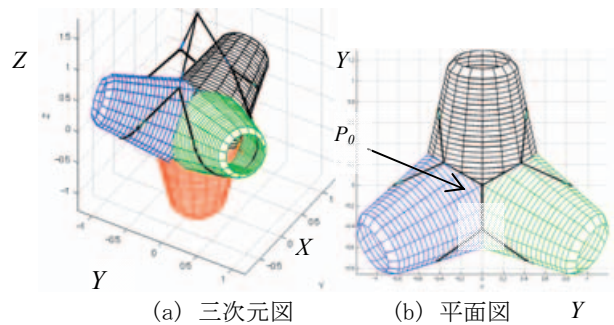
(a) 三次元図 (b) 平面図
図-5.16 2脚離隔把持(ケース3)の計算結果



(a) 鳥観 (b) 側面
写真-5.1 実際のブロックの吊り上げ状況(ケース 2)

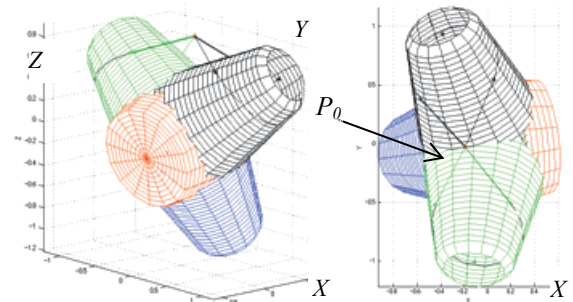


写真-5.2 実際のブロックの吊り上げ状況(ケース 3)



(a) 三次元図 (b) 平面図
図-5.17 3網目チェーンによる3脚把持(ケース4)計算結果

図-5.18は一つの脚を欠いている破損ブロックの計算結果である。この計算結果は、中央引き込み管の入り口 P_0 の真下に破損ブロックの重心が位置する条件のもとで計算したものである。



(a) 三次元図 (b) 平面図
図-5.18 破損ブロックの計算結果

写真-5.3は実際の破損ブロックの吊り上げ状況を示す。写真-5.1, 5.2と同様に、網チェーンは脚の付け根部分に近い箇所まで脚を把持している。



写真-5.3 実際の破損ブロックの吊り上げ

(2) 解の収束とCPU時間

式(5.12)を解く場合、初期ベクトル x_0 が必要となる。 x_0 が最終的な解から離れていると解は収束しない場合もあった。様々な初期ベクトルについて計算した結果、解は十分広い範囲において収束することを示した。例として、ケース3について解の収束範囲を検討する。

最初に、ある適当な初期のベクトルから最終的な解を計算した。そして、その最終的な解からブロックをX軸に関して少しずつ回転させた状態を初期ベクトル x_0 として、解の収束する範囲について調べた。その結果、X軸に関して±25度の回転範囲内であるときに解が収束することが確認された。

図-5.19は解が収束する最終状況でのブロック状態およびその状態からX軸回りに+25度回転させた状態を初期状態としたブロック状態を示す。回転角度が+25度の範囲を超える状況では、結節点(ケース3では実際の結節点ではないが)の一つが、脚を表す円錐台の内部に位置するため、このような特異な状況では解が収束しなくなる。

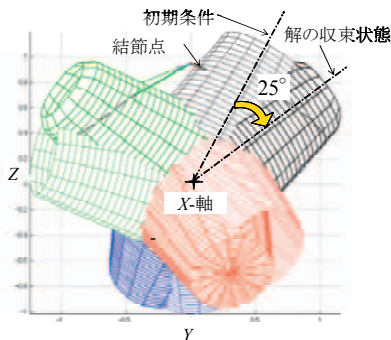


図-5.19 X軸回りの回転角25°の初期条件と収束解

図-5.20, 5.21は、初期条件の回転角度を-25度から+25度の範囲で5度毎に変化させて計算した場合の計算に要したCPU時間と計算繰り返し回数を示したものである。この計算には、DELL Latitude D410(CPU Intel Pentium-M1.73GHz)を使用した。CPU時間および計算繰り返し回数は、回転角度が±15度の場合にわずかに高いが、概ね一定である。

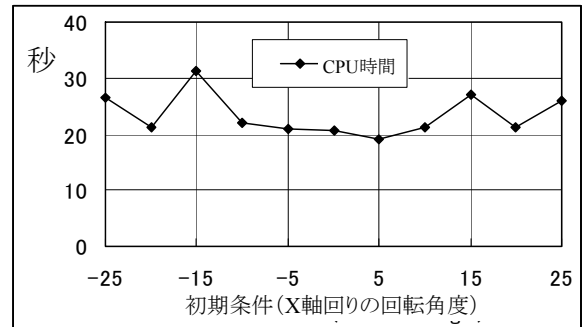


図-5.20 初期条件(X軸回りの回転角)とCPU時間

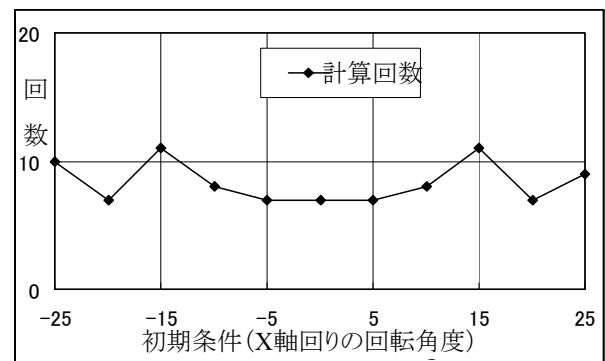


図-5.21 初期条件(X軸回りの回転角)と計算回数

次に、初期条件として、中央引き込み管入口 P_0 のブロック重心からの高さを、0.1m毎に0.6mから1.6mまで変化させた(図-5.22)。その結果、高さが0.7m以下の場合では解は収束しなかった。この場合、結節点が脚の円錐台の内部に位置している状況となっていた。高さが0.8m以上の場合には、解は収束して、同じ最終的なブロック姿勢となることが確認された。

5.4 今後の課題

(1) 摩擦の影響

5.2(2)で述べたように、ブロックとチェーンとの接触は摩擦がないと仮定した。そこで述べたように、脚の表面の海藻の存在は摩擦を減少させる。しかし、実際のチェーンと脚の接触は複雑であり、その程度は別にして摩擦は生じる。脚の表面上のチェーンの

正確な経路を見積もるのは困難である．そのため、最も簡単な近似として、**図-5.23**における破線のような近似を考える．摩擦力 F_1 のために、チェーンの経路は $P_1''-N_1-P_2''$ となっているとする．

図-5.2(b), (c)で示されるように、チェーンは脚の基部に近い部分で脚に接触する．そして、網チェーンが絞り込まれるにつれてその先端方向へ滑っていく．したがって、摩擦力 F_1 は**図-5.23**に示されるように、基部の方向へ作用する．摩擦力が大きいと角度 α も大きくなる．

さらに、チェーンに沿った方向の摩擦力は無視できるほど小さいならば、 $f_{12} = f_{11}$, $f_{22} = f_{21}$, $f_{32} = f_{31}$ となる．これらの仮定により把持状態は**写真-5.1**に示すような実際の吊り上げ状況に近づく．**図-5.24**に $\sin \alpha$ が 0.0, 0.05, 0.1の場合の計算結果における接点の位置を示す．なお脚表面上のチェーン経路は $\sin \alpha$ が0.0のケースの経路を平行移動した形で示している．

写真-5.4は、摩擦力が生じないように球状チェーンを用い、さらに球状チェーンおよびブロック模型表面に潤滑剤を塗布し、離れた2つの網目で吊り上げるケース3に相当する吊り上げ状況を示すものである．この写真と概ね同様の視点からのケース3の計算結果を**図-5.25**に示す．

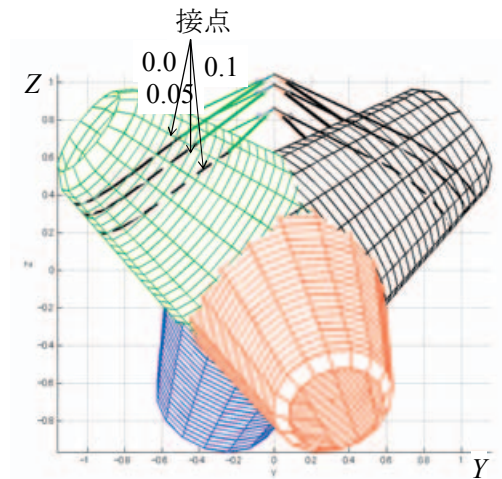


図-5.24 摩擦力を想定した場合の接点の位置



写真-5.4 摩擦が無い状況でのブロック模型吊り上げ

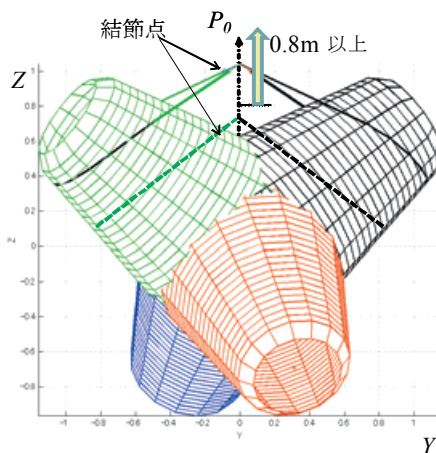


図-5.22 初期条件 P_0 のZ座標の変化と収束状態

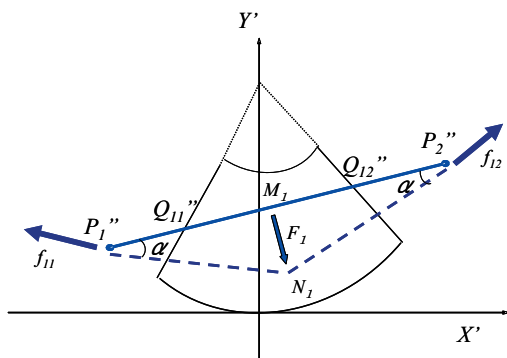


図-5.23 脚1の展開図上における摩擦力

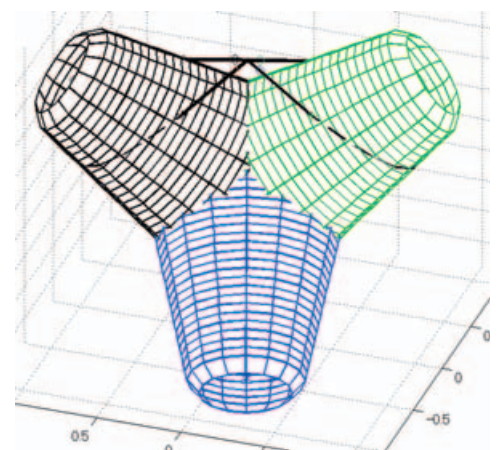


図-5.25 ケース3における計算結果

ブロックの姿勢および網チェーンの掛かり方の状況等は概ね一致していることから、摩擦の無い状況では本モデルは実際の把持状況を概ね正確に表していることが期待される．

(2) 一般形状物体への適用

このモデリング手法を一般の形状の物体へ適用することについて論ずる。対象物は、網チェーンが捕捉して把持できるために二つ以上の凸部分があるものとする。これらのどの凸部分を網チェーンが捕捉するかは既知とする。また一般形状物の形状は、空間上の座標値が与えられた点を頂点とする多面体として表現されるものとする。表-5.1は、4脚ブロックの把持についての未知数を示したものである。一般形状物が対象の場合について、5.2(3)における4脚ブロックと同様に未知数を考える。

① 網チェーンの形状に関する未知数

4脚ブロックと全く同様に、結節点および接点に関する未知数について検討する。

・ 結節点に関する未知数

対象物の形状に影響されず、結節点1点当たり2つの未知数がある。結節点数は対象物の形状に関わらず、4脚ブロックと同様である。

・ 接点に関する未知数

4脚ブロックの場合、脚の形状である円錐台を表現する数式において、1つの接点について2つの未知数を用いて表現した。一般の形状物の場合その形状は数式では表現されない場合もあるが、接点はその対象物の表面上に位置することは同様である。特定の面上に位置することから、二つの未知数で表現できることになる。そのため一つの接点に関して二つの未知数で表現できることは4脚ブロックと同様である。接点数は、対象物の形状に関わらず一つの網目毎に2点あることは同様である。

② 物体の位置および姿勢に関する未知数

物体は剛体であれば物体の形状に関わらず、その重心は1点に特定され、その姿勢は空間上の直交する3軸からの傾斜角によって表現され、その物体が1点 P_0 から吊り下げられている状態であれば、Z軸回りの傾斜角は配慮せず固定する点は、4脚ブロックと全く同様であり、物体の位置および傾きに関する未知数は三つとなる。

③ チェーン張力に関する未知数

チェーンの張力に関しても、対象物の形状により未知数の数が変わることなく、4脚ブロックの場合と同様である。

以上①から③まで述べたことをまとめると、未知数の数に関しては、その検討過程において対象物の形状に影響される事項は無く、4脚ブロックの場合と同数の未知数が必要である。

次に拘束条件式について検討する。

① 接点の条件式

式(5.7)の接点であることの条件式は、5.2(4)において

は、円錐台との接点であることから表面上の任意の点にチェーンにおける法線ベクトルは数式等によって表現して拘束条件式としたが、一般形状物では数式によっては表現ができない。しかし、接触の条件を別の表現で述べると、結節点から対象物体への接線（チェーン）端の物体表面上の接点は、結節点を視点として対象物体を見た場合の物体の輪郭線上に位置することといえる(図-5.26)。形状物の輪郭は、空間座標が既知の点を頂点とした多面体で与えられていることから、この輪郭線を求めることは比較的容易に求めることができる。このようにして、各接点において、この輪郭線上に位置する条件としての拘束条件式が一つ得られることとなる。

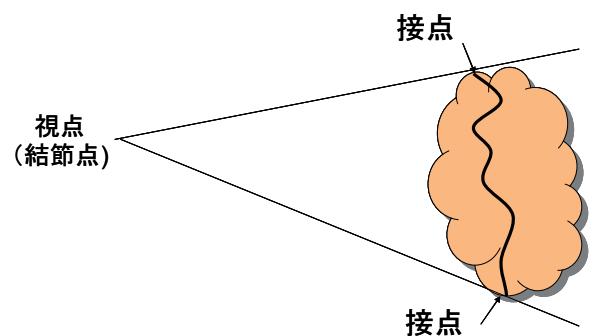


図-5.26 接点の条件

② チェーン経路は最短距離であることの条件式

最短経路に関する拘束条件式に関しては、対象物体が多面体として表現されているのであれば平面図に展開が可能であり、チェーンの最短経路は展開された平面上で直線となる。多面体を平面に展開する際には、各面を囲む辺において、最短経路の直線が横切る辺以外の辺を切り離して展開することになる。しかし、最短経路は求める解であって予め与えられてはいないので、多面体の展開平面としては、各面の辺の数毎にケース数があるので、それらを全て乗じた数の展開平面が存在することになる。それらの中から、二つの結節点を投影された2点を直線で結んだ場合、その直線が多面体の展開部分から外れることのない展開図上の経路が最短経路となる。

図-5.27はサッカーボールを示しているが、このような球体でも五角形と六角形を組み合わせた多面体として近似される例である。この球面を近似する多面体において、仮想接点 Q_1 と仮想接点 Q_2 の最短距離は、 Q_1 が存在する六角形と、 Q_2 が存在する六角形を展開した平面図上において両点を結んだ線分の長さとなる。接点が Q_1 と Q_2 の場合には、 Q_1 が存在する六角形と Q_2 が存在する五角形を展開した平面図上において両点を結んだ線分の長さとなる。

③結節点間のチェーン長さ一定条件

結節点間のチェーン長さ一定条件は、この展開平面図上における二つの結節点に相当する点間の距離となることは、4脚ブロックの場合と同様である。

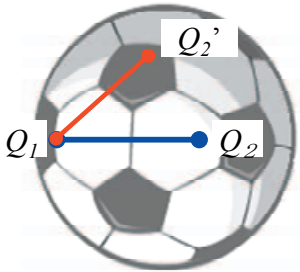


図-5.27 最短経路の条件

④力の釣り合い条件式

4脚ブロックにおける式(5.9), (5.10), および(5.11)の力の釣り合い条件に関しては、対象物の形状にかかわらず同じである。

以上、一般の形状物について、4脚ブロックのモデリングと同様の手法により、その最終状態を表すための未知数および拘束条件式について検討した結果、一部表現方法は異なる点があるが、4脚ブロックと同様に、未知数と拘束条件式の数は同数となる。

よって一般の形状物もその形状が頂点の位置が与えられた多面体として表現されれば、幾何学的な計算手法を用いることによってこの把持モデルを適用することが可能と考えられる。今後の課題として、実際に種々の形状の物体に対して実際にこのモデルを適用して実証していくことが挙げられる。

5.5 結論

本章では、網チェーン装置による4脚ブロックの把持をモデル化する方法を提案した。そして、その幾何学および静的な拘束条件式が、同じ数の未知数を用いて、1セットの非線形連立方程式で表現できることを示した。

様々な捕捉のケースにおいてこの連立方程式を解くことによって、ブロックおよび網チェーンの把持形状、チェーンに作用する張力を求めることができた。このことは、本装置がこのタイプのブロックを把持できるかどうかを判定することに役立つものである。また、提案されたモデリング手法は、脚がかけた破損ブロックにも適用することができる。

摩擦力の影響について検討し、摩擦力が作用する場合の網チェーン経路等について検討を行った。さらに、一

般形状の物体への適用に関して検討を行い、物体の形状が頂点の位置が与えられた多面体として表現されれば、この把持モデルを適用することが可能であることを示した。

6. 結論と今後の課題

6.1 結論

専用の駆動装置を有さず4目の網状チェーンで構成した簡易な構造である網チェーン把持装置を開発した。この装置は25tまでの既設消波ブロック及び海底に落下した水中翼の回収には有効に活用できることを実証した。特に慎重な取り扱いが必要な大重量ブロック及び海底落下物等への適用範囲を広げるためには、把持状態を予測する必要がある。そこで把持モデルの構築に取り組んだ。4脚消波ブロック把持をモデル化し、幾何学的な条件と力学的な条件より多次元非線形連立方程式で表されることを示し、これを解くことにより把持状態が求められることを示した。このモデルを用いて、4脚ブロックの吊り上げ可否の判断が可能となった。また他の形状の物体にもこのモデルが応用できる条件を示した。

第1章「緒論」では、網チェーン把持装置開発の背景を述べる。既設消波ブロックの移設作業は、従来作業員あるいは潜水士がブロックの隙間にワイヤロープを通して玉掛けを行っており危険な作業であった。複数の爪で挟むように掴むグラブ型装置も開発されているが、装置自体の重量が大きいと、撤去できるブロックの重量、形状が限定される等の問題があった。

第2章「網チェーン把持装置の提案および把持模型実験」では、装置の軽量化を目指し、網チェーンを用いた把持装置を開発した。本装置は4目の網状チェーンを支持棒から吊り下げた簡易な構造であるため、専用の駆動装置を必要とせずクレーンのワイヤ上げ下げで操作が可能であるという特長を有している。本装置の模型を用いて4脚ブロックを対象に種々の視認状況における模型実験を実施し、実際の撤去作業を想定した作業時間効率、コストを検討した。その結果、従来の方法と比較して作業時間効率は2.8倍、コストは1/3以下が期待できる結果となった。また、4脚ブロック以外の種々の形状の物体についても模型実験を実施し、本装置が適用可能であることを確認した。

第3章「既設ブロック撤去作業への活用」では、模型実験の成果を踏まえ、本装置が25tまでの既設消波ブロック撤去作業工事に活用されたことを述べ、その有効性を明らかにした。活用された工事件数は6件であり、4

脚ブロックの他、6-10脚の縦長ブロック、脚が折れた破損ブロック等を回収することが可能であった。海面上の十分視認可能な状況の他、海中のブロックにおいても概ねのブロック中心位置が推測できる状況では支障なく回収できた。海象条件が悪い状況においても、起重機船が稼働できる状況ではブロック回収が可能であった。ブロックの解放は、凹凸が設けにくく自動開放が困難な台船上では、フック挿あるいは角材使用により円滑に解放が可能であった。また撤去したブロックを直接近くの海底に解放する場合も円滑に解放可能であった。

第4章「海底落下物回収作業への活用」では、本装置は専用の駆動装置を有さないことから大水深においても吊りワイヤの長さを延長するだけで対応でき、また種々の形状の物体把持が可能である特長を活かして、潜水士では回収困難な強潮流域の大水深に落下した船舶の水中翼の回収作業に活用された事例について述べた。強潮流下で本装置を対象物に覆い被せるように位置を制御できるかが課題として想定されていたが、網チェーンの一部を海底に接触させて動揺を抑えるという運用方法によって回収可能であった。同様の2件の水中翼回収に活用され回収に成功したことにより、本装置の大水深における有用性を実証することができた。

第5章「把持のモデリング」では、本装置による物体把持の把持状態を計算により求めることを目的として、把持の幾何学的、力学的なモデリング手法を開発した。大型ブロックや油漏れ等が想定される海底落下物の吊り上げへ本装置の適用を拡大するためには、慎重な対応が求められる。すなわち吊り上げ時の傾き、対象物に作用する荷重の検討が事前に必要となる。本章では4目の網チェーン把持装置による4脚ブロック把持を対象として、最終的な把持状態を求めるため、幾何学的パラメータとして網チェーン形状およびブロックの位置姿勢を未知数として設定し、力学的パラメータとして網チェーンの各チェーン張力を未知数として設定した。一方拘束条件としては、幾何学的な条件としてチェーンとブロックが接するための条件、チェーン経路が最短経路であるための条件、チェーン長が既知であることを与え、力学的な条件として網チェーンの各結節点で力が釣り合っていることを与えた。

ブロックを吊り上げ可能なケースは、網チェーンがブロック脚を3脚、あるいは隣接する網目により2脚、離れた網目により2脚を捕捉する三つのケースがある。各ケースの未知数は13~24と異なるがいずれのケースも未知数と拘束条件式は同数となり、13~24元の非線形連立方程式で表されること、これを解くことにより最終的

な把持状態が求められることを明らかにした。このモデルを用いて4脚ブロックの吊り上げ可否の判断が可能となった。またこのモデルはブロックの一部に欠損がある場合にも適用可能であることも示した。今後の課題として、摩擦力の影響について検討し、摩擦力が作用する場合の網チェーン経路等について検討を行った。また一般形状の物体への適用に関して検討を行い、物体の形状が頂点の位置が与えられた多面体として表現されれば、この把持モデルを適用することが可能と考えられることを示した。

6.2 今後の課題

5.4における把持モデルの課題の一つとして摩擦力の影響を挙げた。実際の現場においてチェーンとブロック脚との間に作用している摩擦力を直接計測することは困難と思われる。そのため摩擦が生じているブロックの吊り上げ状況と把持モデルによる摩擦がない吊り上げ状況の計算結果を比較することにより、チェーンとブロック脚との間の摩擦係数を推定するような手法を検討する必要がある。

その際、海草付着の有無、乾燥しているか濡れているか等ブロック脚の表面状態により摩擦力の大きさに影響することが想定される。またチェーンに関しても、新しいチェーンで表面が油膜で覆われているか、古く錆びている状況かによっても影響される。このように摩擦の影響はブロック脚およびチェーンの表面の状況により異なることが想定されるが、それぞれの状況において、どの程度の摩擦が働いているかを推定することにより、摩擦力の影響を把持モデルにおいて考慮できるように改良し、実際のブロック吊り上げ状況を再現できるようにすることが今後の課題である。

5.4におけるもう一つの課題として、一般形状の物体への適用を挙げた。本論文では、物体の形状が頂点の位置が与えられた多面体として表現されれば、この把持モデルを適用することが可能と考えられることを示したが、今後は、実際に種々の形状物を対象としたモデルを構築してそのことを検証していくことが必要である。

本論文では、25tまでのブロック撤去工事への活用について記述したが、日本においてブロックの最大は90t級である。また、近年台風等も勢力も増大する傾向にあるため、台風が頻繁に来襲する港湾では100tを超えるブロックの設置が計画されている。一方、80tを超える大重量のブロックでは、それを吊り上げるワイヤーも太く強固となり潜水士では扱うことは困難な状況である。そのため100tを超えるブロックの撤去・移設に網チェー

ン把持装置が期待されている。そのような要請に対応できるように検討する予定である。

また深海のサンプル採取に本装置を活用することも期待されており、そのような用途に対応できるようにすることも今後の課題である。

今後、本論文で構築した把持モデルを改良・発展させて、対象物を確実かつ安全に回収できる装置の仕様、及び運用方法の提案を行い、本装置の性能向上を図り、海中、海底での諸物体の回収作業の無人化を推進することで作業の安全性および効率の向上に寄与するよう努めていきたい。

(2010年8月6日受付)

謝辞

ブロック撤去工事への活用については、本装置を二度活用いただいた堀松建設工業(株)堀雅人氏をはじめとする同社の方々、および他の工事において活用いただいた工事関係者の方々に御礼申し上げます、また本装置を海底落下物の回収作業に二度活用いただいた日本サルヴェージ(株)高瀬隆雄氏をはじめとする同社の方々に感謝いたします。

この論文は著者の学位論文の書式を変更したものである。学位論文の作成にあたって、多大なご支援・ご指導を頂きました東京工業大学大学院小俣透教授、及び、ご指導、ご討論頂きました小杉幸夫教授、香川利春教授、吉田和弘准教授、川嶋健嗣准教授に心より感謝いたします。また本研究に対するご指導、ご助言を頂きました高山俊男助教に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：港湾工事の施工実務，pp.1-31, 2001
- 2) Withdraw Bucket, <http://www.koeironworks.co.jp/bucket4/etc/etc.html#block>
- 3) H. Kato: "Development of Grab type Device of Block Transfer," Techno Ocean'94 5th international symposium, 1994
- 4) 竹田康雄，第三海堡の「水中構造物撤去装置」，作業船，No.260, pp.16-21, 2002
- 5) 酒井浩：消波ブロック撤去・移設技術，建設の機械化，No.557, pp.3-8, 1996
- 6) 北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所，<http://www.gicho.pa.hrr.mlit.go.jp>
- 7) N. Imamura, Y. Nakamura, S. Yamaoka, H. Shirasawa, and H. Nakamoto: "Development of an Articulated Mechanical Hand with Enveloping Grasp Capability," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.3, pp.308-314, 2007
- 8) T. Omata, K. Nagata: "Rigid Body Analysis of the Indeterminate Grasp Force in Power Grasps," IEEE Trans. on Robotic and Automation, Vol.16, No.1, pp.46-54, 2000
- 9) H. Arisumi, T. Kotoku, K. Komoriya: "Swing Motion Control of Casting Manipulation," IEEE Control Systems, vol.19-4, pp.56-64, 1999
- 10) H. Yamamoto, Y. Ishimatsu, S. Ageishi, N. Ikeda, K. Endo, M. Masuda, M. Uchida, H. Yamaguchi, Example of Experimental Use of 3D Measurement System for Construction Robot Based on Component Design Concept, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.252-257, 2006
- 11) H. Mashimo, T. Ishimura, State of the Art and Future Prospect of Maintenance and Operation of Road Tunnel, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.299-302, 2006
- 12) B. Naticchia, A. Giretti, and A. Carbonari, Set Up of a Robotized System for Interior Wall Painting, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.194-199, 2006
- 13) R. Heikkilä, M. Jaakkola, Automation of Road Construction- The State of the Art in Europe, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.7-10, 2006
- 14) H. Yamamoto, Y. Ishimatsu, T. Yamaguchi, K. Uesaka, K. Aritomi, and Y. Tanaka, Introduction to the General Technology Development Project: Research and Development of Advanced Execution Technology by Remote Control Robot and Information Technology, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.24-29, 2006
- 15) S. Sarata, N. Koyachi, T. Tubouchi, H. Osumi, M. Kurisu, and K. Sugawara, Development of Autonomous System for Loading Operation by Wheel Loader, Proceedings of 23rd International Symposium on

- Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.466-471, 2006
- 16) O. Kanai, H. Osumi, S. Sarata, and M. Kurisu, Autonomous Scooping of a Rock Pile by a Wheel Loader Using Disturbance Observer, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.472-475, 2006
- 17) Y. Takahashi, R. Yasuhara, O. Kanai, H. Osumi, and S. Sarata, ,Development of Bucket Scooping Mechanism for Analysis of Reaction Force Against Rock Piles, Proceedings of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC), pp.476-481, 2006
- 18) 国土交通省港湾局監修：港湾土木請負工事積算基準, (社)日本港湾協会, 2003
- 19) 国土交通省総合政策局建設施工企画課監修：建設機械等損料算定表（平成13年度版）, (社)日本建設機械化協会, 2001
- 20) 「えひめ丸」衝突事故の概要, 外務省ホームページ <http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/usa/hawaii01/ugoki.html>, 2002

港湾空港技術研究所資料 No.1221

2010.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人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/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2010) by PARI

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

この資料は、港湾空港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、複写は港湾空港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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています