

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.49 No.3 September 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 3 号 (Vol. 49, No. 3), 2010年9月 (September 2010)

目 次 (CONTENTS)

| |
|--|
| 微小溶存酸素分布を比較対象とした摩擦速度推定手法の評価 —底面境界層における乱流と溶存酸素の同時観測— ……………井上徹教・Ronnie N. GLUD・Henrik STAHL・Andrew HUME …… 3 (Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - …………… Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME) |
| アマモ分布域の拡大とそれを支える種子散布 ……………細川真也・仲岡雅裕・三好英一・桑江朝比呂 …… 31 (Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. …………… Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE) |
| 網チェーン把持装置によるブロック撤去及びその把持モデルの開発 ……………野口仁志 …… 51 (Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling ……………Hitoshi NOGUCHI) |
| 地震動波形の影響を考慮した液状化の予測・判定に関する提案 ……………山崎浩之・江本翔一 …… 79 (Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions …………… Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO) |
| 波形インバージョンにより推定された最近のわが国における内陸地殻内地震の震源過程 ……………野津厚 ……111 (Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion ……………Atsushi NOZU) |
| 多チャンネル型表面波探査に基づいた干潟土砂堆積構造の評価 ～せん断波速度構造の考察と人工干潟安全管理手法の提案～ ……………渡部要一・佐々真志・桑江朝比呂・梁順普・田中政典 ……157 (Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology — Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats — ……………Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA) |

網チェーン把持装置によるブロック撤去 及びその把持モデルの開発

野口 仁志*

要 旨

港湾および海岸においては、膨大な数の消波ブロックが据え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。

消波ブロック撤去工事において、通常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ーロープを通して玉掛けを行い撤去している。しかし、この作業は、足場が不安定で、波や流れの影響を受ける場所での作業であり危険を伴う。

そのため、無人で消波ブロックを回収できる網チェーン式把持装置を開発し、これまで6件の25t以下のブロック撤去工事に活用された。また港湾工事以外の分野においても、水深約200mの海域に沈んだ船舶の水中翼の回収作業に2回活用され回収に成功している。

しかし、25t以上の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、チェーンに作用する張力等、より慎重な事前の技術検討が要請されることもあり、撤去実績はまだ無い。そこで、これらの要請に対応するため、本装置による把持のモデリングに取り組んだ。

本報告は、これまでのブロック撤去工事の実績について述べるとともに、本装置による4脚ブロックの把持状態を、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されることを示した。そしてこれを解くことにより把持状態とチェーンの張力が求められ、ブロック吊り上げの可否の判定が可能となった。

キーワード：網チェーン、ブロック、把持、撤去、モデル

* 施工・制御技術部 新技術研究官

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
電話：046-844-5063 Fax：046-844-0575

独立行政法人 港湾空港技術研究所
E-mail：noguchi@pari.go.jp

Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling

Hitoshi NOGUCHI*

Synopsis

A large number of wave-dissipating blocks have been installed in harbors and along shorelines. Some must be removed when the harbors and coastal areas need to undergo development. This removal work is conventionally carried out by workers or divers using wire ropes. However, such work is dangerous because waves and tidal currents make the working environment unstable.

A holding device with a chain net was developed for automation and labor reduction in lifting heavy objects. The device has been successfully applied to the removal of wave-dissipating blocks of less than 25t in six works and the recovery of hydrofoils from the seabed with a depth of 200m two times.

However safety checks on lifting must be rigorous particularly for heavy blocks of 25t or more, there are work results for them. Therefore, models of the lifting situation would be highly desirable.

This paper describes the removal of wave-dissipating blocks and a method for modeling the holding of a four-leg block with the device, showing that its geometrical and static constraint conditions are expressed as a set of nonlinear simultaneous equations having the same number of unknowns. From the solution to the simultaneous equations, it is possible to obtain the holding configuration and the chain tensions that are useful in determining whether the device is capable of holding the block.

Key Words: Chain net, block, holding, removal, modeling,

* 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

目 次

| | |
|--------------------------------|----|
| 要 旨 | 51 |
| 1. 序論 | 55 |
| 2. 従来のブロック把持装置及び把持に関する研究..... | 55 |
| 2.1 従来のブロック把持装置 | 55 |
| 2.2 ロボット工学における把持に関する研究 | 56 |
| 3. 網チェーン把持装置の概要と特徴 | 56 |
| 3.1 網チェーン把持装置の概要 | 56 |
| 3.2 装置の特長及び期待される効果 | 57 |
| 4. 既設ブロック撤去工事への活用 | 57 |
| 4.1 2 t 4脚ブロック撤去工事 | 58 |
| 4.2 6 t 4脚ブロック撤去工事 | 58 |
| 4.3 12.5 t 10脚ブロック等撤去工事 | 61 |
| 4.4 25 t 4脚ブロック撤去工事（その1） | 61 |
| 4.5 25 t 4脚ブロック撤去工事（その2） | 62 |
| 4.6 16 t 4脚ブロック撤去工事 | 63 |
| 4.7 作業諸要素別の検討 | 64 |
| 4.8 まとめ | 65 |
| 5. 把持のモデリング | 66 |
| 5.1 消波ブロック把持のモデリング | 66 |
| 5.2 計算結果 | 71 |
| 5.3 摩擦の影響 | 74 |
| 5.4 一般形状物体への適用 | 75 |
| 5.5 まとめ | 76 |
| 6. 結論 | 76 |
| 謝辞 | 77 |
| 参考文献 | 77 |

1. 序論

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。

消波ブロック撤去工事において、通常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ーロープを通して玉掛けを行い撤去している(写真-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。また重量が大きなブロックでは、使用するワイヤーロープは太く剛性も大きくなり人力では取り扱いが困難となる。

そのため、無人で消波ブロックを回収できる網チェーン式把持装置を開発し、これまで6件の25t以下のブロック撤去工事に活用された¹⁾²⁾。また港湾工事以外の分野においても、水深約200mの海域に沈んだ船舶の水中翼の回収作業に2回活用され回収に成功している³⁾。

しかし、25t以上の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、チェーンに作用する張力等、より慎重な事前の技術検討が要請されることもあり、撤去実績はまだ無い。そのため、これらの要請に対応するため、本装置による把持のモデリングに取り組んだ。本報告は、これまでのブロック撤去工事の実績および本装置の把持モデリングについて報告するものである。

2. 従来のブロック把持装置及び把持に関する研究

2.1 従来のブロック把持装置

ブロックを把持する装置としては、装置の自重を利用



写真-1 作業員による玉掛け撤去

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-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)⁴⁾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⁵⁾が開発されている。

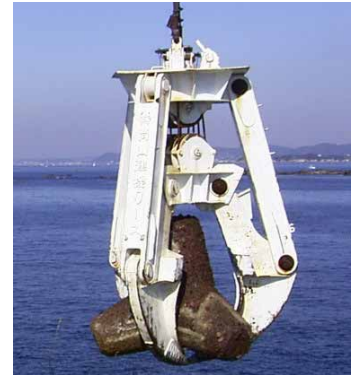


写真-2 3本爪式ブロック把持装置

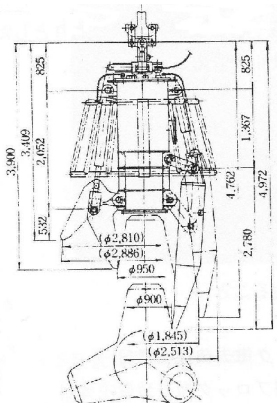


図-1 グラブ式ブロック把持装置

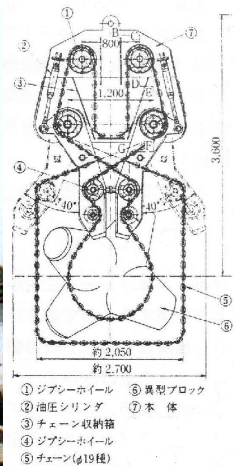
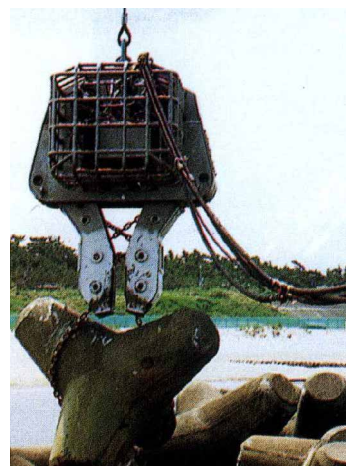


図-2 一本環状チェーン式ブロック把持装置

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-2)⁶⁾。なお、把持は指等で対象物を掴む意味が強いが、本報告では、チェーンで物体を掴むことも把持として記述する。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倍に向上したとしても必要とする起重機船も大型のものが必要となるため、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に示す6本のアームを有するグラブ式把持装置、および図-2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はより大型のものが必要となり、経済性の点ではマイナスの要因となっている。

2.2 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。

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⁷⁾。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⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。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¹¹⁾¹²⁾。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¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾。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。

3. 網チェーン把持装置の概要と特徴

3.1 網チェーン把持装置の概要

2.1節において、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-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-3に示す網チェーン把持装置を開発した。この装置では、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。

表-1 既存ブロック移設装置の概要

| 方式 | グラブ式 | チェーン式 |
|----------------|-------|-----------|
| 把持構造 | 6本爪 | 1本の環状チェーン |
| 駆動方式 | 油圧 | 油圧 |
| 装置重量① | 8.5 t | 3.6 t |
| 対象ブロック 実重量② | 5.75t | 5.75 t |
| ①/② | 1.48 | 0.63 |

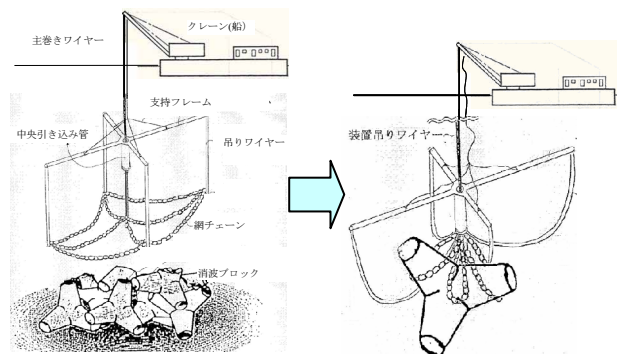


図-3 網チェーン把持装置

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。そのため、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。

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間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。

図-4に、ブロックの把持の過程の詳細を示す。図-4(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。

ブロックの解放は、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-3)。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。

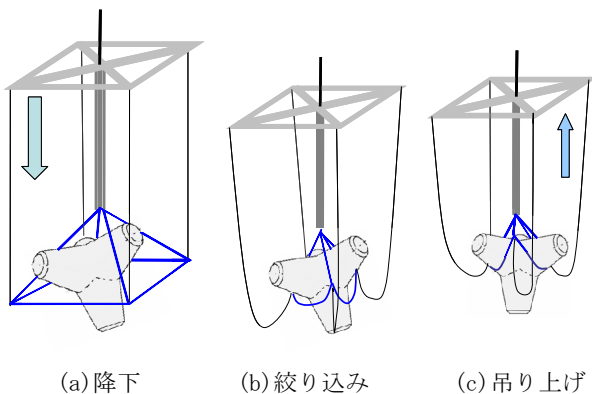


図-4 把持の過程

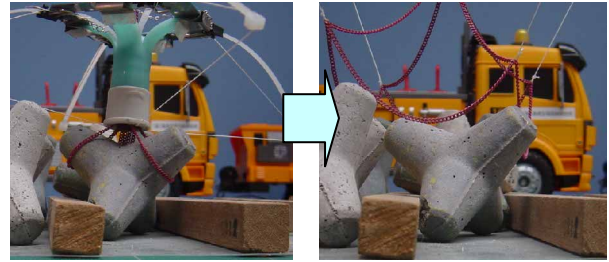


写真-3 ブロックの解放

3.2 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。表-1において既存ブロック移設装置の重量が示されているが、に対する本装置の試算重量は0.5-0.6tとブロック実重量5.75tの0.1程度であり、従来装置と比較してかなり軽量である。

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。³⁾

4. 既設ブロック撤去工事への活用

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下記のように、2009年末までに6件の活用実績がある。

- (1)2003年6月, 神奈川県横須賀港(久里浜)にて, 2 t 4脚ブロック15個を回収.
- (2)2004年4月, 島根県河下港にて, 6.3 t 4脚ブロック155個を回収.
- (3)2008年5月, 青森県鮭ヶ沢漁港にて, 12.5 t 10脚ブロック等15個を回収.
- (4)2008年8月, 北海道留萌港にて, 25 t 4脚ブロック36個を回収.
- (5)2009年7月, 北海道留萌港にて, 25 t 4脚ブロック80個を回収.
- (6)2009年8月, 岩手県久慈港にて, 16 t 4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.

以下, 4.1節から4.6節では各工事での活用状況を述べ, 4.7節では作業諸要素別に検討を行う. また4.2節の工事においては, 同一条件において連続的にブロック撤去がその状況が動画として記録したことから, 時間効率および経済性について詳細に分析を行った.

4.1 2 t 4脚ブロック撤去工事¹⁾

(1) 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の海面上のものを撤去して近傍の海面下へ移設するものである.

(2) 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

(3) 時期

2003年6月

(4) 対象ブロック

2t 4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.

(5) 使用クレーン

10 t 吊りラフタークレーン車

(6) 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



写真-4 2tブロック用網チェーン式把持装置

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1.84 tを上回る2 tの線径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-4).

(7) 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.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, 安全性を確認して慎重にゆっくりと実施した.

(8) 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.

4.2 6 t 4脚ブロック撤去工事²⁾

(1) 工事概要

仮橋架築のため, 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.

(2)場所

島根県河下港護岸前面

(3)時期

2004年4月中～下旬

(4)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)

(5)使用クレーン

100t吊りクローラクレーン

(6)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-5)。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。

(7)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-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-6)。



写真-5 6t用網チェーン式把持装置(左)と作業開始(右)



写真-6 作業開始後10秒(左)及び開始後50秒(右)

海面下の深い位置にあり、岸壁上の指示者からは、その存在位置が視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。

(8)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。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。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

でも作業方法・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と比較して向上した。

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あるいは完全にゴミで埋まっている場合もある。このような場合は沖側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、作業時間効率は、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、作業時間効率は、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-2にまとめる。

(9) 作業時間効率および経済性の検討

この6t4脚ブロック撤去工事において、視認可能な海面下ブロック回収作業にけるデータを基に効率性・経済性について試算を行った。

この条件での平均移設所要時間は5.0分であった。内訳は、標準吊り上げ時間（失敗を含まない吊り上げ所要時間）1.2分/個、損失吊り上げ時間（吊り上げ失敗による損失時間）0.9分/個、吊り上げ後所要時間2.9分/個であった。

この結果を基に、別途実施した模型実験結果²⁾より、②監視カメラを用いてクレーン運転手が状況を視認できる場合には吊り上げ時間の21秒短縮が期待でき、更に③ブロックの解放場所に凹凸設けて作業者の支援なしに解放する場合には吊り上げ後の所要時間74秒の短縮、更に④作業に熟練して吊り上げ失敗が少なくなった場合を想定すると加算吊り上げ時間の30秒短縮が期待できる。これらは図-5において棒グラフ②③及び④として示され、作業条件が整えば作業効率2.9分/個が期待でき、従来の海中潜水士作業の6.1分/個、海面上人力作業の4.3分/個を上回る試算結果となった。

表-2 ブロック撤去作業結果

| 状況 | 本開発装置 | | 従来人力工法 | |
|-------------------|---------------------------|----|--------|-----------|
| | | 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 | 作業員 2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3.5時間) | 無人 | 6.0分/個 | 潜水士 2人 |

1日(8時間作業)当りの標準的な作業費用を、従来人力工法での費用を100として比較した(図-6左)。

図-5, 6(左)に示す各状況における作業時間及び作業経費より、1個当たりのブロック撤去費を、従来の海面上ブロックの人力工法を100として比較したものを図-6(右)に示す。ブロックが視認できる状況では、本装置では34と従来の人力工法の1/3以下までコスト削減が期待される試算となった。

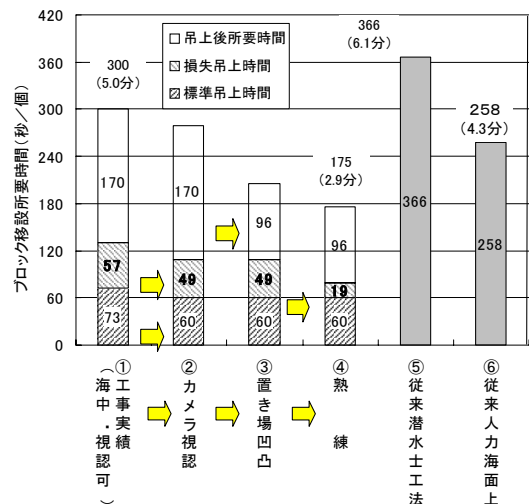


図-5 種々作業条件における作業時間試算

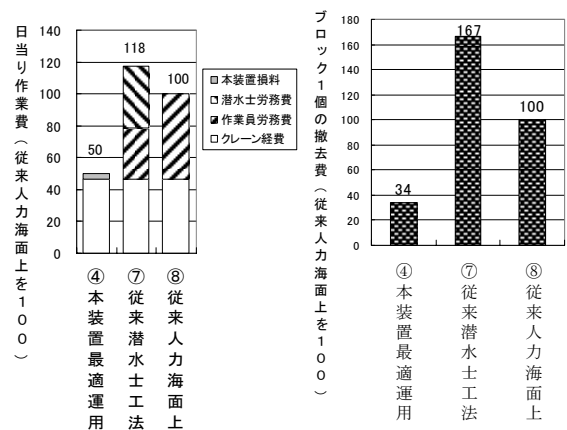


図-6 日当たり経費及び1個当たり撤去費

4.3 12.5t 10脚ブロック等撤去工事

(1) 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。

(2) 場所

青森県鯉ヶ沢漁港離岸堤

(3) 時期

2008年5月

(4) 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)

(5) 使用クレーン

100t吊り起重機台船

(6) 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、それぞれフ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-7)。

(7) 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-8, 9, 10)。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。

(8) 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。



写真-7 フックを挿入した網チェーン



写真-8 脚ブロックの撤去



写真-9 水面下の視認不可10脚ブロックの撤去



写真-10 起重機台船上へのブロック回収と解放

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

4.4 25t 4脚ブロック撤去工事 (その1)

(1) 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、破損した脚先端部が不安定な状態で危険なため本装置を活用した撤去が行われた。

(2) 場所

北海道留萌港防波堤

(3) 時期

2008年8月

(4) 対象ブロック

25t4脚消波ブロック (テトラポッド)

(5) 使用クレーン

125t吊り起重機台船

(6) 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枠が製作された(写真-11)。

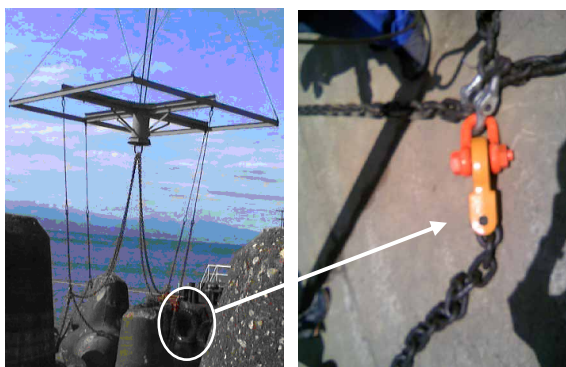


写真-11 25t用網チェーン把持装置

(7) 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-12)。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。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-13)。吊り上げたブロックは起重機台船(写真-14)あるいは台船上へ回収された。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。

(8) 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作業に時間を要した。

4.5 25t4脚ブロック撤去工事(その2)

(1) 工事概要

2008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



写真-12 ブロック撤去場所の状況



写真-13 水面下の破損ブロックの撤去



写真-14 起重機台船上への回収状況

した撤去が行われた。

(2) 場所

北海道留萌港防波堤

(3) 時期

2009年7月

(4) 対象ブロック

25t4脚消波ブロック(テトラポッド)

(5) 使用クレーン

300t吊り起重機台船

(6) 網チェーン把持装置

2008年度使用の網チェーンが引き続き用いられた。支持棒は、台船上でブロックを解放する際に、支持棒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大きさの小さな支持棒が新たに製作された(写真-15)。

(7) 施工方法

基本的には2008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。そのため一度だけの作業で吊り上げず、複数回の網掛けによる吊り上げを行った。



写真-15 小型化された支持枠

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-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。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。

(8) 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、後半の日程では、水面下のブロックが多かったためである。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、その先端部が下層のブロック脚の間に転がり落ちて隙間を塞ぐので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。



写真-16 破損ブロックの撤去

4.6 16 t 4脚ブロック撤去工事

(1) 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。

(2) 場所

岩手県久慈港防波堤

(3) 時期

2009年8月

(4) 対象ブロック

16 t 4脚ブロック (テトラブロック)

(5) 使用クレーン

100t吊り起重機台船

(6) 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-17)。

(7) 施工方法

起重機台船を用いて海側より施工を実施した。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。

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。

(8) 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-18)。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



写真-17 16t用網チェーン式把持装置(左)とブロック撤去場所の状況



写真-18 荒天での作業(左)と海藻で覆われたブロックの撤去(右)

いた(写真-18)。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も回収を行った。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。

4.7 作業諸要素別の検討

(1) 作業諸要素の項目

4.1～4.6節においては、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、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

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、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、4.6節の工事において、このような状況下で実施されたケースがあり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。なお視認状況④における模型実験での所要時間は、2.4分(145秒)/個²⁾であった。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こと等の諸条件の違いがある。

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。

さらに、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。両ケースについて実際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によって、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。

(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実際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およびしておけば、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枠を上げてチェーンを緩め、網チェーンを引き揚げることで解放が可能である。4.6節の工事では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、吊り枠を上方に数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、網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に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、4.7(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網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、特に網チェーンを絞る段階等は、注意を要する。

4.8 まとめ

本章で得られた成果を以下に記す。

- ・ 2-25 t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動揺によるクレーンブームの揺れは、網チェーンのブロックへの接触、あるいは海中では水の抵抗により、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、網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。

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章把持のモデリングとして取り組んだ。

5. 把持のモデリング

4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。そのため、本章においては物体把持のモデリングに取り組む。

5.1 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-7)。

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-8は、把持装置とその把持の過程を示したものである。

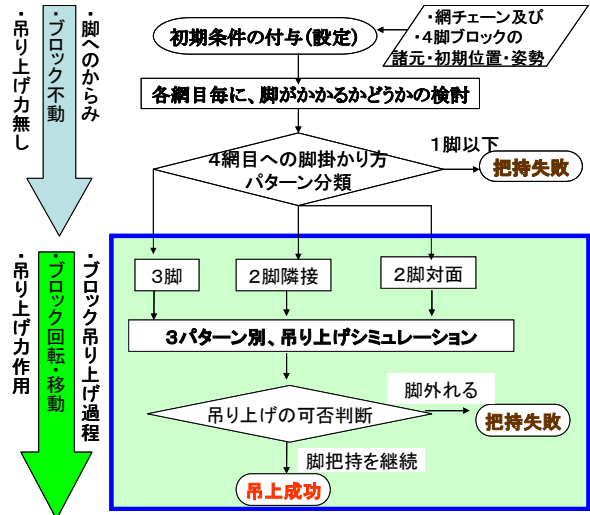


図-7 モデリングにおける二つの段階

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には、実質的には結節点ではないとして扱う。

図-8(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込まれ(図-8(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-8(c))。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-8(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-8(a))。もう一つは、網チェーンを絞込む過程において、脚の最も外側のY座標が最大である十字印点のチェーン P_1-P_2 の上側に位置することである。

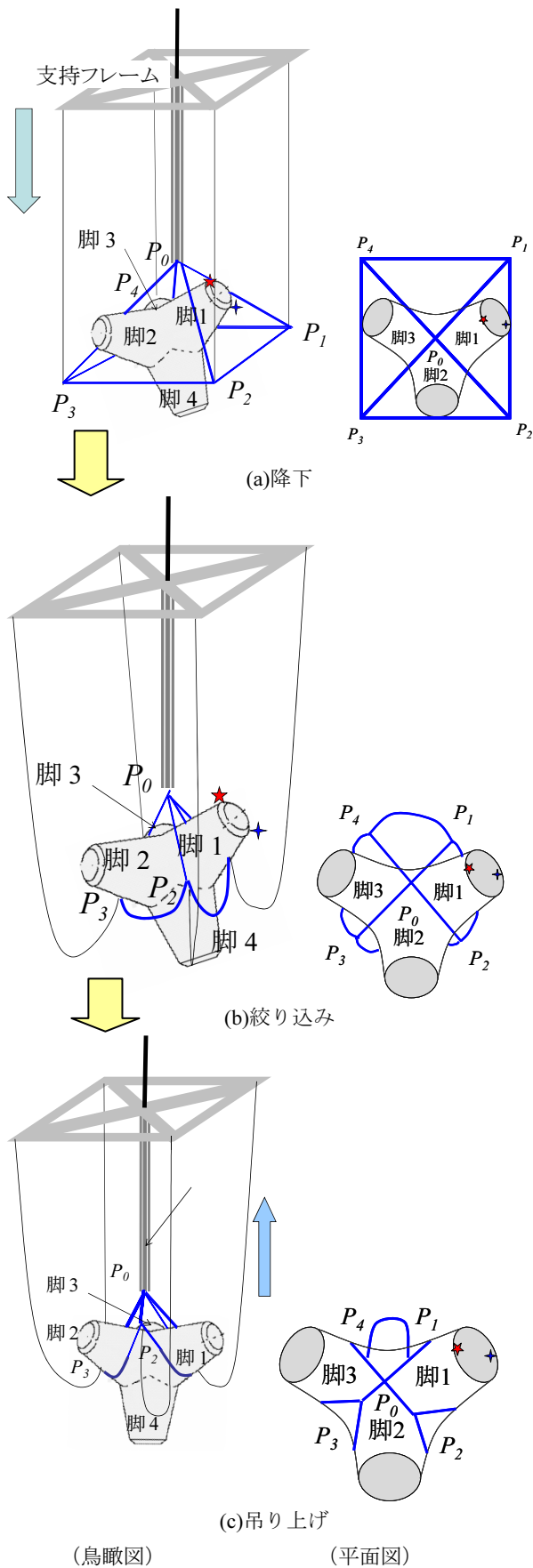


図-8 4脚ブロックにおける把持の過程

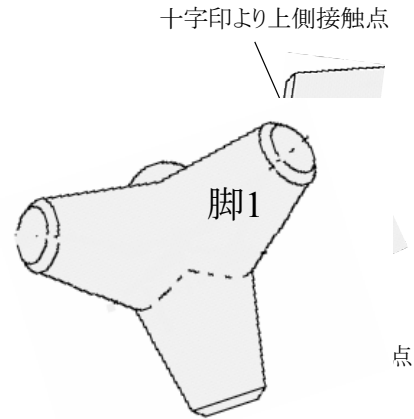
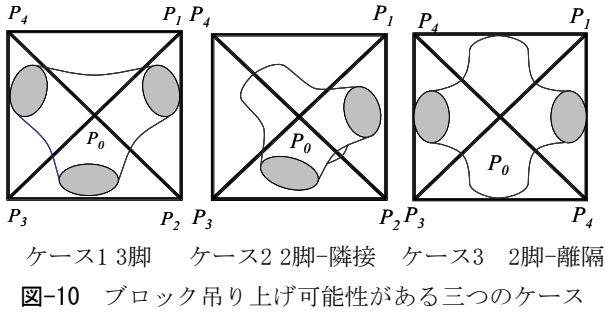


図-9 周囲のブロックとの接触

図-8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-9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うる。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-8(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-10)。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-10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。



(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草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節において検討する。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-8(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。

1) 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5.2(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-11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

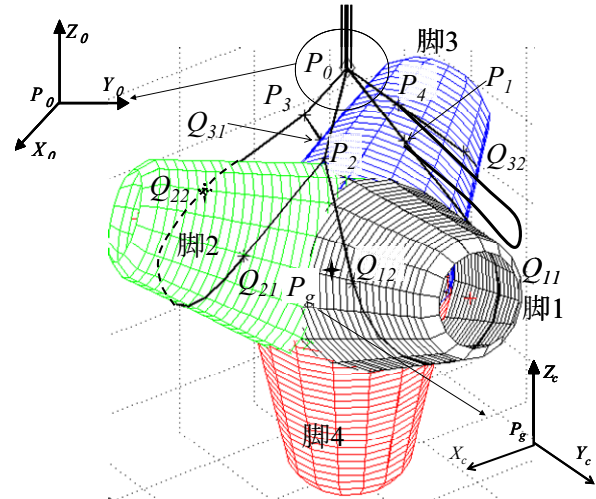


図-11 網チェーン形状に関する未知数

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-12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-13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 ${}^c o_i$ 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。

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

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。

$${}^c q_{ij} = {}^c R_i {}^i q_{ij} + {}^c o_i \quad (5.4)$$

2) 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

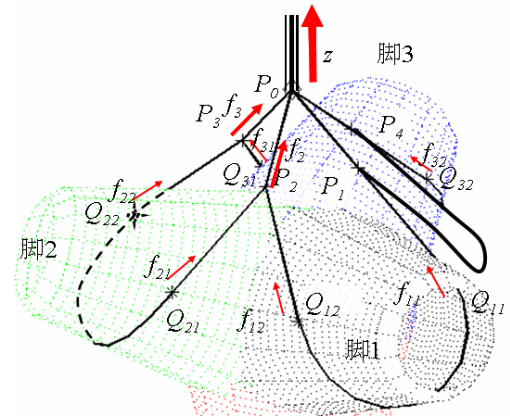
定し、脚4中心軸を、 Z_c 軸負方向、脚1中心軸は $Y_c Z_c$ 平面上に位置して Y_c 軸正領域にあるとする。ブロックは一つの点 P_0 から吊り上げられており静的に均衡状態にあると仮定しているため、点 P_g の X, Y 座標は $(0, 0)$ となる。よって

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

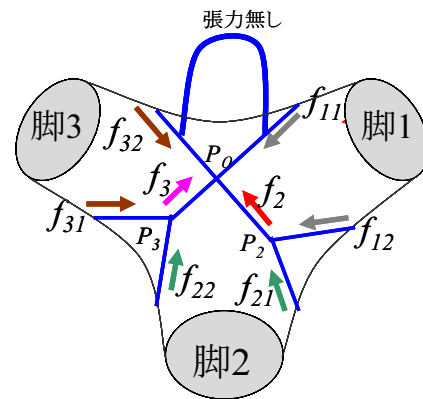
ここで、 z は点 P_g の Z 座標で、 $z < 0$ であり、未知数である。網チェーンによって把持されているブロックの傾きの表現はヨウ角は不要で、ロール角 θ_r およびピッチ角 θ_p だけによって表される。 Z 軸回りの網チェーンとブロックとの相対的な角度は、既に ϕ_2 と ϕ_3 によって表されているからである。

3) 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-14)。脚とチェーンの間には摩擦はないと仮定しているため、 $f_{11} = f_{12}$, $f_{21} = f_{22}$, $f_{31} = f_{32}$ 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-3参照)。



(a)三次元図



(b) 平面図

図-14 チェーンの張力に関する未知数

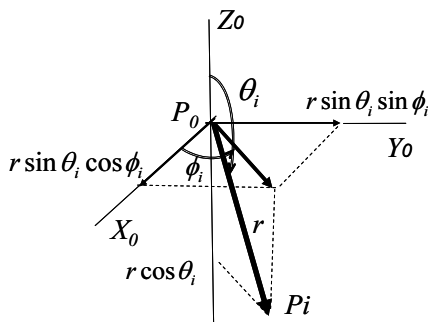


図-12 結節点 P_i に関する未知数

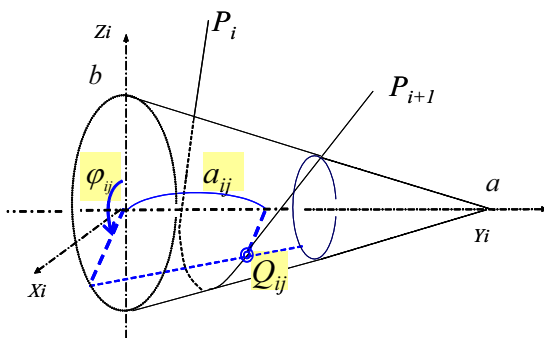


図-13 接点 Q_{ij} に関する未知数

(4) 拘束条件式

次に幾何学的および静的な力の拘束条件について述べる。

1) 接点の条件式

図-15は、ローカル座標系 $X_i Y_i Z_i$ 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。

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

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

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

六つの接点があるので、六つの拘束条件式が得られる。

2) 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-16は、脚1を構成する円錐の展開面である。

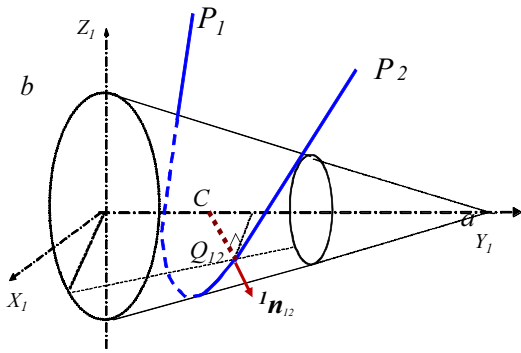


図-15 円錐台形状脚1における座標系

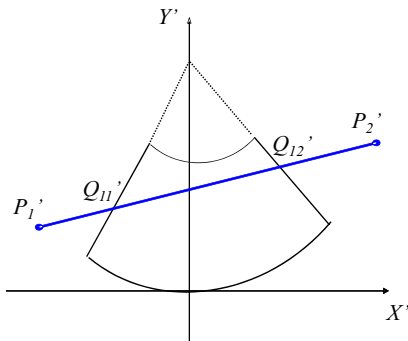


図-16 円錐台形状脚1の展開平面図

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-16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。

3) 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-16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。

4) 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-14)。

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

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-14(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。

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

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-3参照)。拘束条件式を得られる座標系は、 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-17)。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

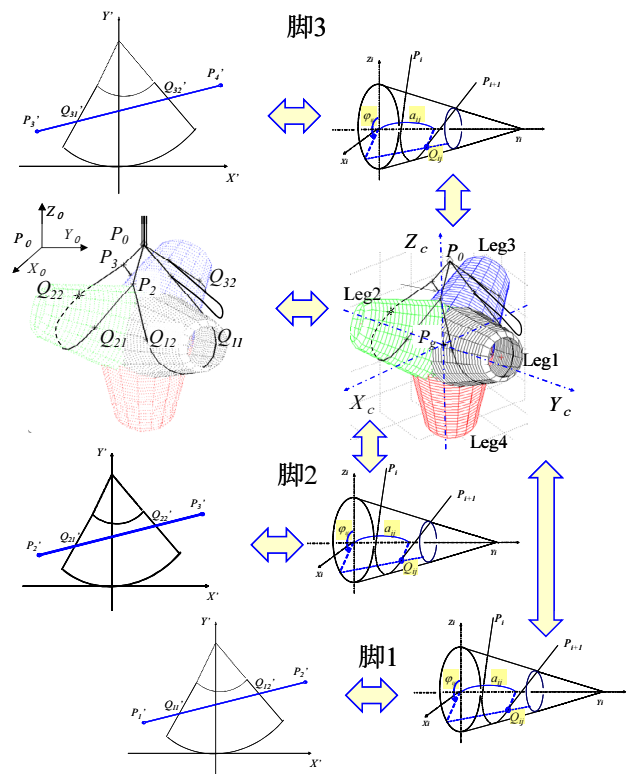


図-17 八つの座標系の関係図

(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が同じであるので、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、5.2(1)で議論する。

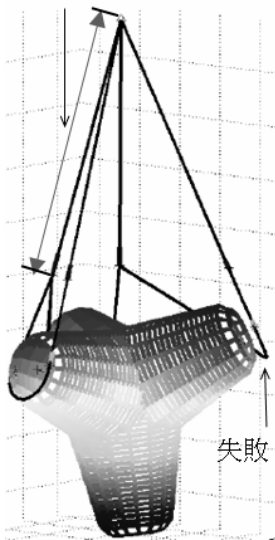
先に述べたように、 r は可変パラメータとして入力される。もし、 r が大きいと、網チェーンの網目は図-18(a)で示されるように脚の先端から外れ、ブロックの吊り上げに失敗する。この場合 r を徐々に小さくすることによって、ブロックを把持する状態を得ることができる。 r が十分小さいと、網チェーンがブロック脚をしっかりと把持して、最終的にブロックを吊り上げる状態を得ることができる(図-18(b))。

(6) 他のケース

図-19(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-19(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-3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。

絞り込み長さ
 r : 長い場合



絞り込み長さ
 r : 短い場合

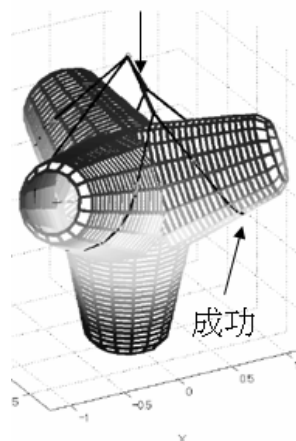


図-18 変数 r による吊り上げ結果の可否

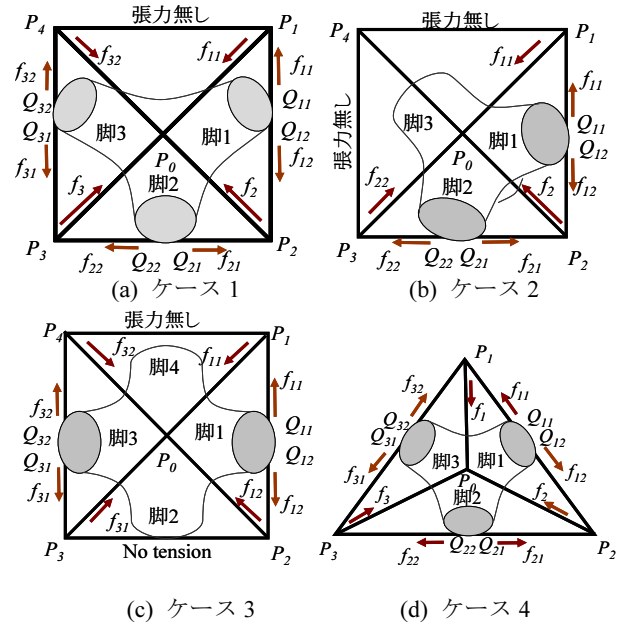


図-19 各ケースにおける力ベクトル

表-3 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($\times 2$) | $2 \times 2 = 4$ | $1 \times 2 = 2$ | $0 \times 2 = 0$ | $3 \times 2 = 6$ |
| | 接点($\times 2$) | $6 \times 2 = 12$ | $4 \times 2 = 8$ | $4 \times 2 = 8$ | $6 \times 2 = 12$ |
| | 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 | $3 \times 3 = 9$ | $2 \times 3 = 6$ | $1 \times 3 = 3$ | $4 \times 3 = 12$ |
| 拘束条件式計 | 24 | 16 | 13 | 27 | |

5.2 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、 $\theta_r = 0, \theta_p = 0$. プロ

ックの高さは2.1m,二つの結節点間の距離 $c = 2.5$ m.である.

図-20は $r = 0.5$ mでの計算結果を示す. 網チェーンはしっかりとブロック脚を保持している. チェーン張力は, w をブロックの重量とすると,

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

図-21, 22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-21では, チェーンの張力は

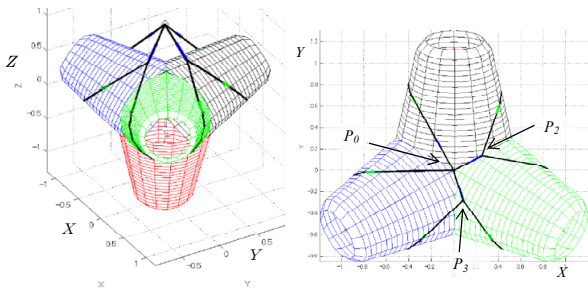
$$f_{11} = f_{12} = f_{21} = f_{22} = 1.16w, f_2 = 1.68w \quad (5.18)$$

図-22では,

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

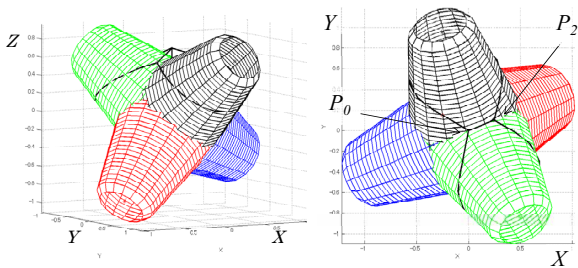
ケース1では網チェーンが三つの網目でブロックを把持しているので, チェーン張力は, 二つの網目で把持しているケース2,3における張力よりもはるかに小さい. ケース2と比較すると, ケース3はチェーンの張力がより小さい.

写真-19, 20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-19, 20における実際のブロックの把持状況は, 図-21, 22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-20 3脚把持(ケース1)の計算結果

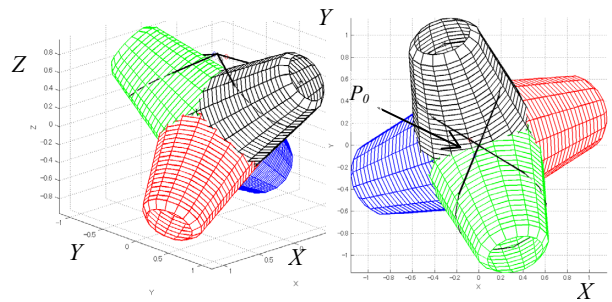


(a) 三次元図 (b) 平面図

図-21 2脚隣接把持(ケース2)の計算結果

これは, 写真-19 (b), 20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-19 (b), 20における把持は, 安全な状態となっている. 図-21, 22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することができることを示している. 摩擦の影響は5.3(1)でより詳しく検討する.

図-23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-22 2脚離隔把持(ケース3)の計算結果



(a) 鳥観 (b) 側面

写真-19 実際のブロックの吊り上げ状況(ケース 2)



写真-20 実際のブロックの吊り上げ状況(ケース 3)

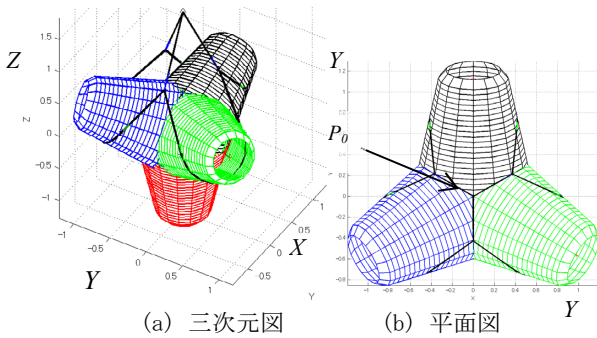


図-23 3網目チェーンによる3脚把持(ケース4)計算結果

図-24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。

写真-21は実際の破損ブロックの吊り上げ状況を示す。写真-19, 20と同様に、網チェーンは脚の付け根部分に近い箇所で脚を把持している。

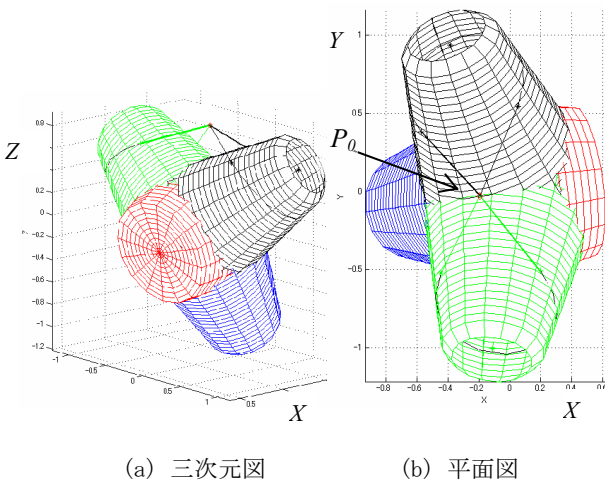


図-24 破損ブロックの計算結果



写真-21 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-24 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-26, 27 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。

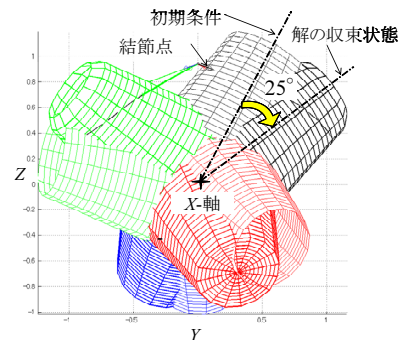


図-25 X軸回りの回転角 25° の初期条件と収束解

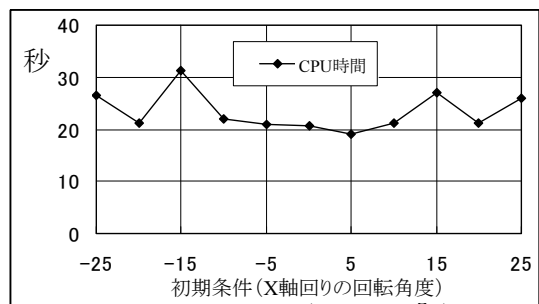


図-26 初期条件(X軸回り回転角)とCPU時間

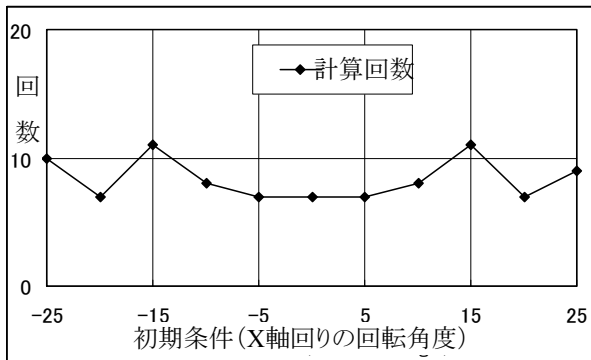


図-27 初期条件 (X軸回りの回転角) と計算回数

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-28)。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。

5.3 摩擦の影響

4.1(5)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-29における破線のような近似を考える。摩擦力 F_I 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。

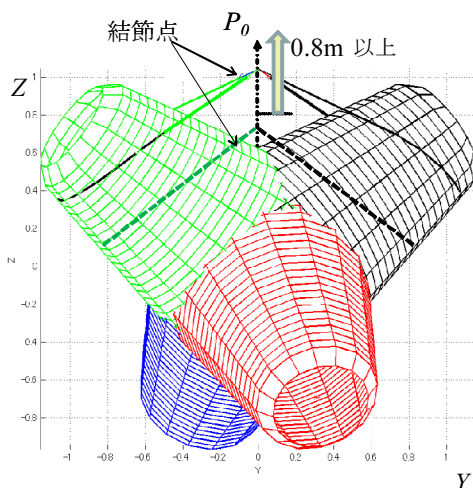
図-28 初期条件 P_0 のZ座標0.7mの状態および0.8m以上の場合の収束状態

図-8(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_I は図-29に示されるように、基部の方向へ作用する。摩擦力が大きい状況では角度 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-19に示すような実際の吊り上げ状況に近づく。図-30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-22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-31に示す。

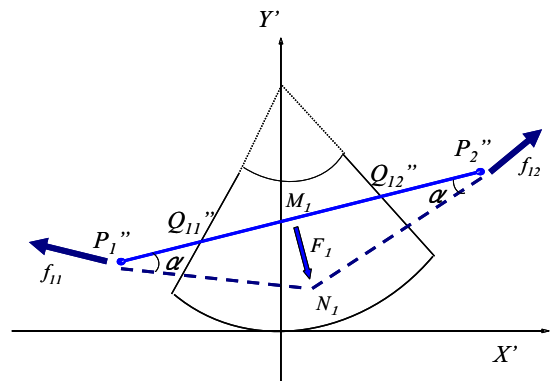


図-29 脚1の展開図上における摩擦力

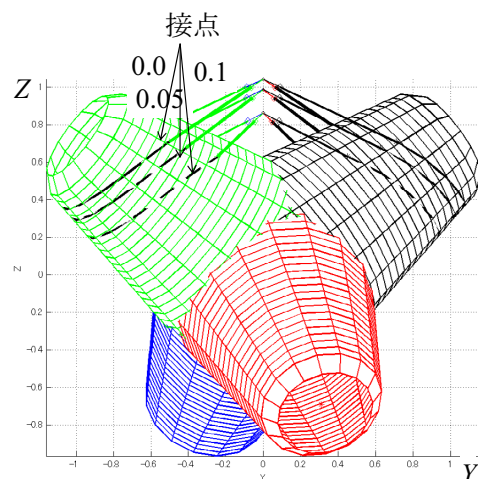


図-30 摩擦力を想定した場合の接点の位置



写真-22 摩擦が無い状況でのブロック模型吊り上げ

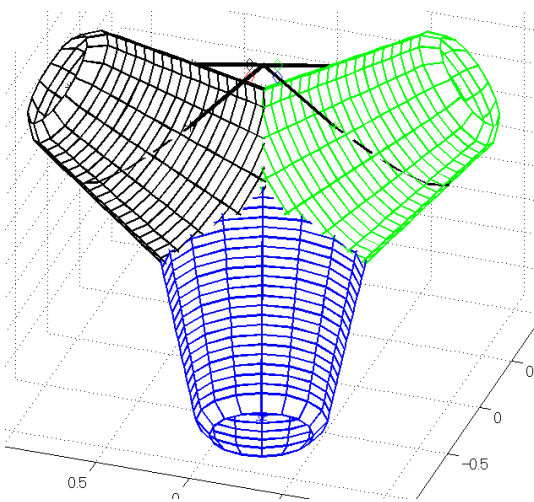


図-31 ケース3における計算結果

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。

5.4 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-3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、5.1(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。

① 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。

② 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)の接点であること条件式は、5.1(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-32)。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。

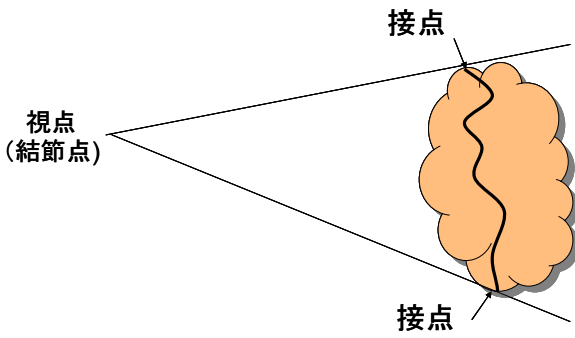


図-32 接点の条件

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-33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面体と六面体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。

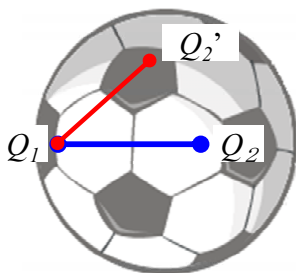


図-33 最短経路の条件

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 まとめ

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、その幾何学的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

網チェーン把持装置は、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。この装置は25 tまでの既設消波ブロックには有効に活用できることを6件のブロック撤去工事に活用されたことで実証した。特に慎重な取り扱いが必要な大重量ブロック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。

(2010年4月26日受付)

謝辞

本稿を執筆するにあたり、把持モデリングの構築において、ご支援・ご指導を頂きました東京工業大学小侯透教授および高山俊男助教に御礼申し上げます。

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、

参考文献

- 1) 野口仁志：軽量型網チェーン式ブロック移設装置の開発，港湾空港技術研究所資料，No.1063，2003年
- 2) 野口仁志：ブロック移設作業の無人化・省力化を目的とした網チェーン式ブロック移設技術の開発，港湾空港技術研究所資料，No.1098，2005年
- 3) 野口仁志：網チェーン式回収装置の開発－水深180mの水中翼回収－，港湾空港技術研究所資料，No.1200，2009年
- 4) H. Kato: "Development of Grab type Device of Block Transfer," Techno Ocean'94 5th international symposium, 1994
- 5) 竹田康雄：第三海堡の「水中構造物撤去装置」，作業船，No260，2002年，pp.16-21，
- 6) 酒井浩：消波ブロック撤去・移設技術，建設の機械化，No.557，1996年，pp.3-8，
- 7) H. Arisumi, T. Kotoku and K. Komoriya: "Swing Motion Control of Casting Manipulation," IEEE Control Systems, Vol.19-4, pp.56-64, 1999
- 8) H. Yamamoto, Y. Ishimatsu, S. Ageishi, N. Ikeda, K. Endo, M. Masuda, M. Uchida and 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
- 9) H. Mashimo and 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
- 10) 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
- 11) R. Heikkilä and 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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

港湾空港技術研究所報告 第49巻第3号

2010.9

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 大 應

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。

CONTENTS

| | |
|---|-----|
| Assessment of shear velocity determinations referring DO microprofiles - Simultaneous field observation of turbulence and DO in the benthic boundary layer - Tetsunori INOUE, Ronnie N. GLUD, Henrik STAHL, Andrew HUME | 3 |
| Seed dispersal supporting areal expansion of meadow in the seagrass, <i>Zostera marina</i> L. Shinya HOSOKAWA, Masahiro NAKAOKA, Eiichi MIYOSHI, Tomohiro KUWAE | 31 |
| Block Removal Using Holding Device with a Chain Net and its Modeling Hitoshi NOGUCHI | 51 |
| Study on Liquefaction Prediction Method Considering Wave Forms of Seismic Motions Hiroyuki YAMAZAKI, Shouichi EMOTO | 79 |
| Rupture Process of Recent Crustal Earthquakes in Japan Estimated by Waveform Inversion Atsushi NOZU | 111 |
| Evaluation of intertidal flat stratigraphy by MASW technology —Interpretation of shear wave velocity structure and safety assessment of artificial intertidal flats— Yoichi WATABE, Shinji SASSA, Tomohiro KUWAE, SoonBo YANG, Masanori TANAKA | 157 |