

～港湾施設の無人点検に挑む～ ROV現場実証実験

高須貴子¹ ・ 吉村藤謙¹

¹名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3）

大規模地震災害発生後、港湾には被災地への緊急物資の輸送拠点機能確保、重要な物流機能の早期回復等が求められる。そのため、発災後早期に施設を目視調査することが重要であるが、作業員の安全性の確保にも留意しなければならない。そこで、初動体制支援を充実させるため、新技術を活用した施設点検診断技術の導入を検討している。これらの技術は平常時の維持管理にも有効であり、建設現場の生産性向上に寄与するものである。

本論文は、このような施設点検診断技術のひとつとして、ROVによる栈橋コンクリート下面点検の現場実証実験に取り組み、導入に向けた評価と課題を報告するものである。

キーワード：栈橋式岸壁，i-Construction，維持管理，ROV，現場実証実験

1. はじめに

大規模地震・津波災害発生時において、港湾には被災地への緊急物資の輸送拠点機能の確保、重要な物流機能の早期回復等が求められている。大規模地震発生後は、できる限り早期に施設を目視調査することが重要であるが、作業員の安全性の確保にも留意しなければならない。そこで、名古屋港湾空港技術調査事務所では、大規模地震発生時の初動体制支援をより充実させるため、無人航空機(ドローン)やROV(Remotely Operated Vehicle)等を活用した効率的・効果的な施設点検診断技術の検討を行っている。

これらの技術は災害時のみならず、平常時の維持管理においても有効な活用が見込め、建設現場の生産性向上に大きく寄与すると考えられる。

港湾施設のなかでも栈橋コンクリートの点検作業は、地上からではコンクリート下面の劣化・損傷(図-1)が目視点検できないため、波浪や潮汐の影響を受けながら、潜水士や船外機船などで直接栈橋下に入って点検を実施している(図-2)。

なかでも清水港は、大規模地震が発生した場合震度6強以上が想定される地域であり、潮位が高い時期には点検に必要な栈橋下のクリアランスが確保できない。また、岸壁利用率も高く、船舶が着岸しているときは点検することができないなど、点検を実施する際の課題がある。



図-1 栈橋コンクリート下面の劣化状況



図-2 栈橋下への進入状況

そこで、当事務所では、ROVが栈橋コンクリート下面の点検に効率的に活用できるか清水港富士見地区3号岸壁において現場実証実験を行った。

本論では、ROV型点検装置を用いて実際に栈橋コンクリート下面の点検診断を行い、作業の確実性、効率性、安全性について検証するとともに、この装置が新たな点検手法として確立する為の課題を報告するものである。

2. ROV型点検装置

水中部において無人で栈橋コンクリート下面の変状を撮影し、その劣化度判定に資する画像データを収集するROV型点検装置の研究開発がされている。今回の実証実験では、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所が研究開発中であり、内閣府のSIP (Strategic Innovation Promotion Program=戦略的イノベーション創造プログラム) により改良に取り組んだROV(図-3)を使用した。

本機は海面航行型のROVで、機体の大部分が水面下に位置する半没水型である。この半没水型構造により波浪等による動揺を低減することが可能となる。

また、上側が遮蔽された栈橋下においては、GPSによる位置特定が難しい。このためROVにレーザー測域センサを搭載し、周囲の走査結果と事前に登録した施設情報を照合することにより、自機の位置を逐次推定・測位する機能を持ち、さらに、自機と周囲の杭や障害物との位置関係を評価し、障害物からの回避方向を指示する機能を有している。レーザー測位機センサによる周囲走査結果と施設情報の照合による自機位置推定技術を図-4に示す。なお、点検能力となる撮影装置については表-1にその仕様を示す。



図-3 実証実験で使用したROV

表-1 撮影装置の主な仕様

(1)	操作モニター用カメラ
(2)	劣化度調査撮影用一眼レフカメラ 解像度6016×4016(約2400万画素) 計算上0.62mmのひび割れまで抽出可能
(3)	LED照明
(4)	上方レーザー距離計
(5)	上方レーザーマーカ
(6)	レーザー測域センサ
その他	寸法L600×W580×H385, 質量約20kg

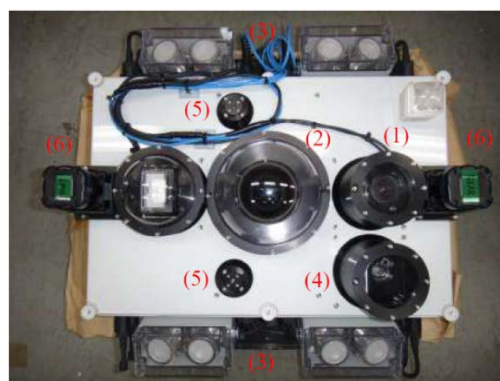


図-4 レーザー測域センサによる周囲走査結果と施設情報の照合による自機位置推定技術



図-5 航空写真(清水港富士見地区3号岸壁)

3. 現場実証実験

(1) 現場条件

現場実証実験は2017年1月30日から2月2日の間に、静岡県清水港富士見地区3号岸壁の第3ブロック(図-5)にて行った。図-6に栈橋の断面図を示すと共に今回撮影を試みた栈橋コンクリート下面の位置を示す。

当現場は潮位が高い時間帯においては、ROVを栈橋コンクリートの下に進入させる空間がなくなることから、そのクリアランスを確保するため、今回の実験においては、潮位が下がる深夜帯(主に1月31日深夜～2月1日未明、2月1日未明～2月2日未明)に実施した。

なお、調査期間中の流速、波高位は全作業期間にわたり、流速は概ね10cm/sec以下、波高は0.1m以下と静穏な好条件下での実験となった。

(2) 栈橋コンクリート下面の撮影

栈橋コンクリート下面の撮影点検経路は、くし状に設定した(図-7)。ROVの操作状況及びコンクリート下面の撮影状況を示す(図-8)。LEDの連続光照明を用い、撮影は2秒間隔のインターバル撮影により実施した。

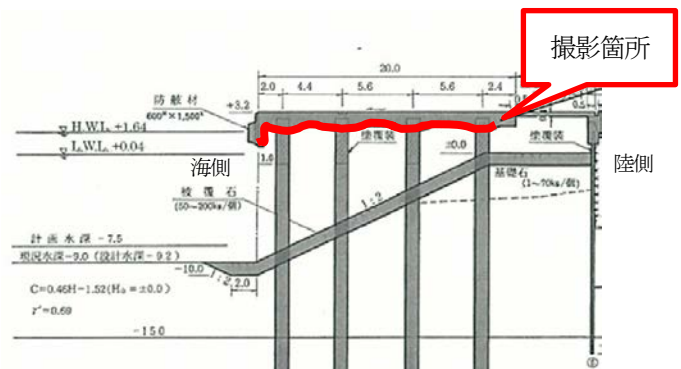


図-6 断面図及び撮影箇所

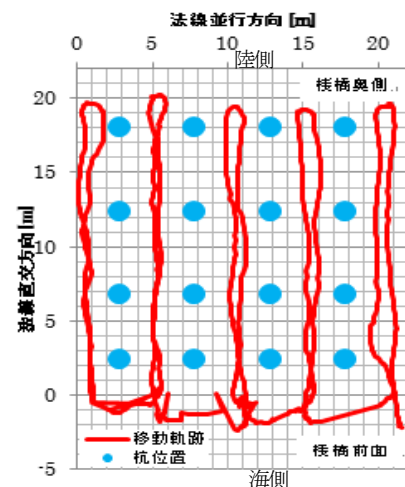


図-7 点検経路に沿ったROVの移動軌跡

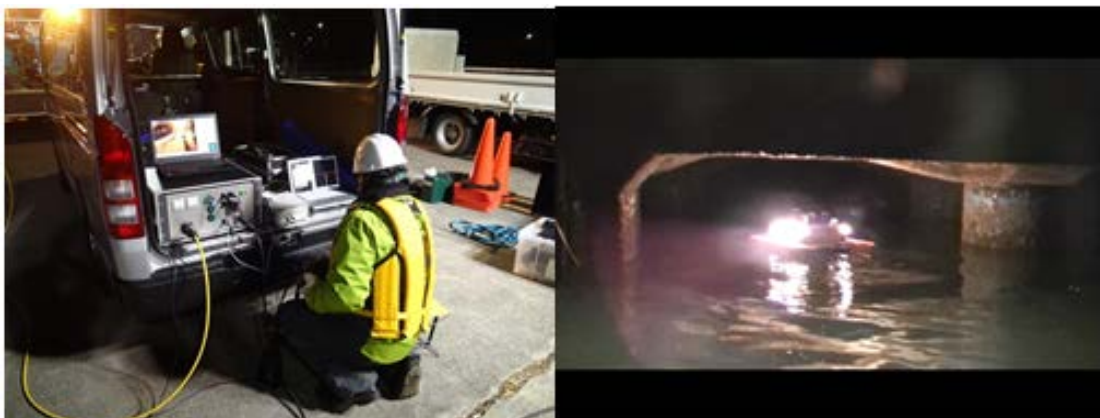


図-8 ROV操作状況及び撮影状況

(3) 実験結果

遠隔操作により点検経路に沿ってROVが航行した移動軌跡は図-7の通りであり、撮影中の測位の欠測はほとんど見受けられず、測位結果は非常に良好であった。

撮影した写真は、地図連動写真ビューアーにより管理し、図-9に示す展開図を作成した。列によって状況は異なるが、未撮影領域は概ね全体の1/4から1/3程度であった。今回、潮位が高く構造物との離隔距離が非常に近い条件となったため、被写体までの離隔距離の近さが影響したものと考えられる。

ROVにより撮影した写真を用い劣化度評価を行った。点検方法及び内容の詳細については「港湾施設の維持管理技術マニュアル」の一般及び詳細点検診断によるものとし表-2に判定基準を示す。

今回の実証実験で行ったROV撮影によるデータを元に作成した評価一覧（図-10左（ROV写真））と、潜水土による点検、計測および記録をもとに作成した評価一覧（図-10右（潜水土目視））を比較した。

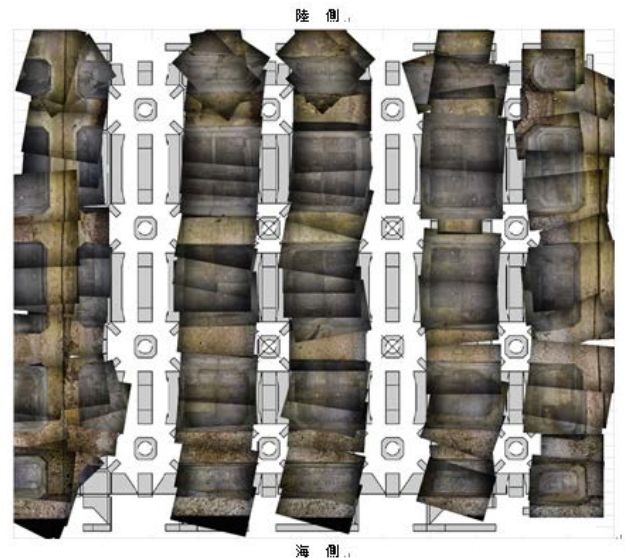


図-9 第3ブロックの展開図

表-2 点検項目及び判定基準¹⁾

分類	点 検 項 目			点 検 方 法	判 定 基 準
Ⅱ 類	一般定期点検診断	上部工（下面部）	コンクリートの劣化、損傷（RCの場合）	目視 ・ひび割れの発生方向 ・ひび割れの本数、長さ、幅 ・かぶりの剥落状況 ・錆汁の発生状況 ・鉄筋の腐食状況	a スラブ： □ 網目状のひび割れが部材表面の50%以上ある。 □ かぶりの剥落がある。 □ 錆汁が広範囲に発生している。 はり・ハンチ： □ 幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 □ かぶりの剥落がある。 □ 錆汁が広範囲に発生している。
					b スラブ： □ 網目状のひび割れが部材表面の50%未満である。 □ 錆汁が部分的に発生している。 はり・ハンチ： □ 幅3mm未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。 □ 錆汁が部分的に発生している。
					c スラブ： □ 一方向のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル吐出析出物がある。 □ 錆汁が点状に発生している。 はり・ハンチ： □ 軸と直角な方向のひび割れのみがある。 □ 錆汁が点状に発生している。
					d □ 変状なし。

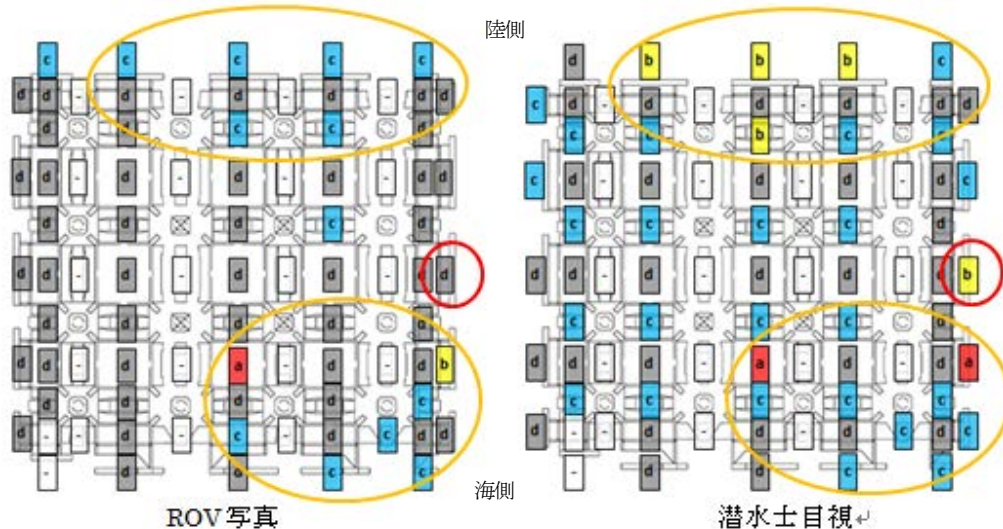


図-10 第3ブロックの評価一覧

図-10 において黄色の円で囲った部分のように評価の分布傾向は似通ったものとなったが、写真の未撮影により梁側面の錆汁やひび割れが確認できなかった部材については劣化度の評価が1段階程度異なっているものが多かった。

また、2段階以上の評価差がある部材は赤色の円で囲った1ヶ所であった。潜水士目視ではb判定でありながら、ROV写真でd判定の部材は、側面の剥離が撮影できなかったことが原因であることを評価者へのヒアリングにより確認している。

4. 現場適用性の検証結果

(1) 作業の確実性

使用したROVはGPS等が利用できない栈橋下であつても自機位置をリアルタイムに把握可能な新しい測位技術を具備している。栈橋下で自機位置の測位を行い、モニター上でその位置や方位をリアルタイムで確認できた。

取得写真については、測位機能と連動させることで写真の撮影位置を正確に管理することができた。また、搭載する撮影機材及び照明設備により、現地実証実験においても高精度な画像撮影が可能であることが確認された。

(2) 作業の効率性

従来手法の潜水士や船外機船などによる日作業量は約1600m²/日程度(表-3)であったが、変状が多く存在した場合はこれよりも日作業量は少なくなるものと考えられる。これに対しROVを用いた作業は、主にセンサによる杭の認識作業(事前準備)、ROVによる撮影、撮影データのバックアップの3つの作業で構成されており、1セットで約1時間の作業となる場合が多かった。表-4のタイムスケジュールから1セット当りで概ね400m²程度の範囲を撮影することができると推定できる。この結果、使用したROVの日作業量は少なくとも1800~2000m²/日程度が期待できる。また、1セットごとの作業時間において、バックアップ作業の占める時間が大きいことも分かった。

撮影した画像を用いて劣化度判定を行う為に要した時間(1スパンあたり)を表-5に示す。ROVを用いた場合は、画像データからの読みとり作業が必要となるため、従来作業に対して2倍の人工が必要となった。

(3) 作業の安全性

実際の栈橋を使った実証実験においても、点検作業時に作業員が栈橋コンクリート下に入ることなく、目視と同程度の精度で点検が可能であることが確認できた。

表-3 従来手法を用いた場合の1日のタイムスケジュール

従来手法の1日のタイムスケジュール ※船外機・潜水作業共通				
作業内容	実施数量	単位	開始終了時刻	時間
作業準備 資機材準備、KY活動	1	式	8:30~9:30	1:00
水上作業 調査 第1ブロック	400	m ²	9:30~11:00	1:30
水上作業 調査 第2ブロック	400	m ²	11:00~12:30	1:30
昼休憩			12:30~13:30	
水上作業 調査 第3ブロック	400	m ²	13:30~15:00	1:30
水上作業 調査 第4ブロック	400	m ²	15:00~16:30	1:30
撤収 作業器具片付け	1	式	16:30~17:00	0:30
計(1600m ² あたり)				7:30

表-4 ROVを用いた場合のタイムスケジュール

1/31 清水港

作業内容	実施数量	単位	開始終了時刻	時間
作業準備 資機材準備	1	式	22:00~23:00	1:00
待機				
ROV作業 試験撮影			24:00~2:00	2:00
ROV作業 1スパン連続撮影	400	m ²	2:10~2:20	0:20
データのバックアップ			2:20~2:40	0:20
ROV作業 1スパン連続撮影	400	m ²	2:50~3:00	0:10
データのバックアップ			3:00~3:15	0:15
撤収 資機材片付け	1	式	3:15~3:40	0:35

2/1 清水港

作業内容	実施数量	単位	開始終了時刻	時間
作業準備 資機材準備	1	式	23:00~23:30	0:30
待機				
ROV作業 1スパン連続撮影(途中中断)	320	m ²	0:30~1:00	0:30
データのバックアップ			1:00~1:20	0:20
ROV作業 1スパン連続撮影(途中中断あり)	400	m ²	1:20~2:30	1:10
データのバックアップ			2:30~3:00	0:30
ROV作業 1スパン連続撮影	320	m ²	3:00~3:10	0:10
データのバックアップ			3:10~3:40	0:30
撤収 資機材片付け	1	式	3:10~4:00	0:50

表-5 劣化度判定に要する時間

従来手法

作業内容	実施数量	単位	担当	時間
変状図(損傷位置図)作成	400	m ²	測量技師補	1:00
劣化判定	400	m ²	測量技師	1:00

ROV

作業内容	実施数量	単位	開始終了時刻	時間
写真展開図作成	400	m ²	測量技師補	2:00
変状図(損傷位置図)作成	400	m ²	測量技師補	1:00
劣化判定	400	m ²	測量技師	1:00

5. 結論

(1) 現場実証実験のまとめ

静岡県清水港富士見地区3号岸壁において行ったROVによる栈橋コンクリート下面点検の現場実証実験のまとめを示す。

- 実験時の最大波高は0.2m程度であった。この程度の波浪等の動揺がROV点検作業に大きな影響を及ぼすことは無かった。
- ROVは夜間でも点検が可能であることが実証された。
- 点検位置の把握機能が実際の栈橋コンクリート下でも正確に機能することが確認できた。
- ROVを使用することで、栈橋コンクリート下に作業員が入る必要がなく点検できることを確認した。
- 今回の実験において、外業の日作業量は少なくとも1800～2000m²/日程度であることが推計された。従来手法である目視調査(海上からの踏査)の、積算基準における日作業量1240m²/日²⁾と比較しても、ROVの使用により効率的に外業を行えることが分かった。
- 実験時の潮位が高く、構造物との離隔距離が非常に近かったことで、未撮影領域が発生した。
- 撮影写真によっては、コンクリート表面のひび割れ・剥離・付着物を区別しづらい場合があった。
- 現地作業後に撮影写真から分析に要する時間は、約2倍(本実験では手作業にて撮影写真の結合を行った)であった。

(2) 今後の取り組み

今回の実験においては、未撮影領域があったことにより劣化度評価に差異が生じた。このような状況を回避するためには、一定値以上の離隔距離を確保することはもちろん、オペレータに対して未撮影領域、あるいは撮影済領域を明示できれば未撮影への対策となりうる。また、劣化度状況を精度よく判断する上でも、未撮影領域の無い多角的な撮影をするため、カメラの撮影方向を変更するなどして、積極的に梁側面の撮影を行うことも対策の一つとなり改善の余地がある。

撮影写真の大量取得によって作業量の増加が見込まれる内業については、撮影位置情報により自動で展開図を作成するなど、その支援技術の充実が今後検討されている。

直接、栈橋コンクリートの下に作業員が入らずに点検ができることは、災害後の被災調査や岸壁の供用可否の判断を安全に行うことにもつながる。さらに、名古屋港湾空港技術調査事務所では、地震発生後に港湾施設の供用可否判定を自動で推定する「港湾施設診断システム」を平成28年度より運用開始しており、ROVとの連携により施設診断の迅速化及び確実性が高まると考えられる。今回の実証実験を踏まえ、栈橋コンクリートの点検診断の効率化に向けたさらなる技術開発を進めていく予定である。

謝辞：今回の現場実証実験にあたっては、使用したROVの開発を手がける国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 新技術研究開発領域ロボティクス研究グループ田中敏成主任研究官にご指導をいただきました。また、現場実証実験に際しましては、静岡県清水港管理局にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 港湾の施設の維持管理技術マニュアル【付録A一般定期点検診断の標準様式】(一財)沿岸技術研究センター、P182, 2007.
- 2) 維持管理計画書策定のための現地調査積算基準 2015.4