

水路トンネル調査のための水中ロボットカメラの開発について

Development of underwater robot camera for inspection of water-channel tunnels

今井田敏宏*, 吉浪康行**, 菊池信夫***, 遠藤茂****

Toshihiro Imaida, Yasuyuki Yoshinami, Nobuo Kikuchi, Shigeru Endo

* 復建調査設計株式会社, 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

** 工博 復建調査設計株式会社, 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

*** 株式会社ジオデザイン, 技術部 (〒108-0023 東京都港区芝浦 3-14-6)

**** 株式会社ゲット (〒300-3261 茨城県つくば市花畑 2-12-4)

Because water-channel tunnels are an important lifeline for stable water supply, they often cannot be run dry for inspection; therefore, it is hoped for to establish a method of inspecting water-channel tunnels rationally and efficiently without drying them up. The authors et al. developed an underwater robot camera jointly to inspect the insides of long-distance water-channel tunnels all along their whole length without drying them up. It was given a trial to find that the definition of images varies depending on the sizes of cross sections of water-channel tunnels and the wet condition of their insides and improved. Besides, the authors et al. developed an underwater robot camera for aerial photographing and measured the extents of deterioration of and damage to water-channel tunnels based on their images to ascertain its applicability to the diagnosis of condition of water-channel tunnels.

Key Words: underwater robot, underwater camera, water-channel tunnel, inspection, survey, maintenance

キーワード: 水中ロボット, 水中カメラ, 水路トンネル, 点検, 調査, 維持管理

1. はじめに

水路トンネルは、確実かつ安定的な水輸送・供給を使命とする重要なライフラインである。そのため、水路トンネルの断水による定期的な点検調査は重要であるが実施困難な事が多く、特に長距離の水路トンネルにおいて定期的な全線調査が実施出来ない場合が多い。平成18年8月に発生した送水トンネル崩落事故¹⁾を契機として、長距離水路トンネルの定期点検の重要性が再認識され、合理的かつ効率的な点検調査法の確立が望まれている。

筆者らは、通水状態にある長距離水路トンネル覆工内面の全線点検調査が可能となる長距離水路トンネル内面調査ロボット(写真-1, 以下, 水中ロボットと略す)を平成18年度に共同開発し、平成19年度から実際の点検調査業務に適用した。その結果、水路トンネル断面の大きさや、壁面の湿潤状態により撮影する画像の鮮明度が低下することが分かり、改良を行った。他方、平成20年度には、気中撮影型水中ロボットを開発し、映像から劣化損傷の規模を計測し、水路トンネル

健全度診断への適用性を検討した。本稿では、これらの内容について説明する。

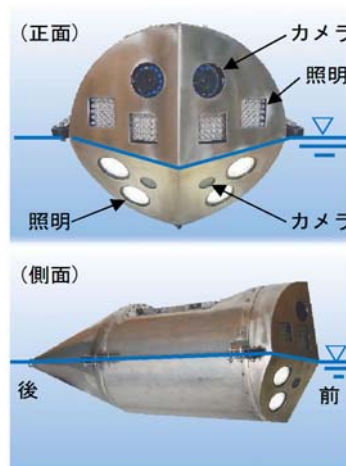


写真-1 水中ロボットの形状

2. 水中ロボットの機能と調査方法

2.1 水中ロボットの機能と特長

水中ロボットの機能と特長を、表-2に示す。

表-1 水中ロボットの概要

項目	機能・特長
主要諸元	<ul style="list-style-type: none"> ・形状 円筒形 容器材質 SUS304 ・主要寸法 外径 50cm (最大径) 長さ 70cm 機材重量 28kg ・主要装備 カメラ 2 台 (水面上 2 台, 水中 2 台), バッテリー, 照明 (白色 LED, 赤外線), データ記録装置, 他 復建調査設計(株)・岡三リビック(株)・(株)ゲット 3社共同開発・特許出願中
主要機能	<ul style="list-style-type: none"> ・通水状態にある比較的長距離 (2.0km 以上) かつ曲線を有する水路トンネルの内面全線点検調査が可能. (実績: 最大 7.9km) ・水路トンネル覆工内面の状況を, 下流向きの安定した連続映像としてビデオ撮影可能. (気中: 左右 2 画面, 水中: 左右 2 画面, 合計 4 画面) ・水中ロボットは小型軽量. (人力調査が可能: 重量 30kg 以下) ・水路トンネル内面を撮影した映像から, 覆工の状態 (クラック・浸入水他) を概略点検調査が可能.
調査範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・水面より上 (気中) の, トンネル天井と側壁を主な撮影対象とする. ・水中の映像は, 水の濁度による影響を受け, 鮮明さに欠ける場合もある.
適用可能な水路トンネル	<ul style="list-style-type: none"> ・内空断面寸法 幅 1m~3m, 高 1m~3m 程度 (水深: 0.5m 以上, 水面から天井までの距離: 0.5m 以上) ・トンネル延長 概ね 7km 程度 (流速 1m/s 程度の場合; 流速により増減あり, 連続撮影時間: 約 2 時間) ・流速 最適流速 0.6m/s から 1.0m/s 程度 (最小 0.3m/s 程度から最大 2.5m/s 程度)

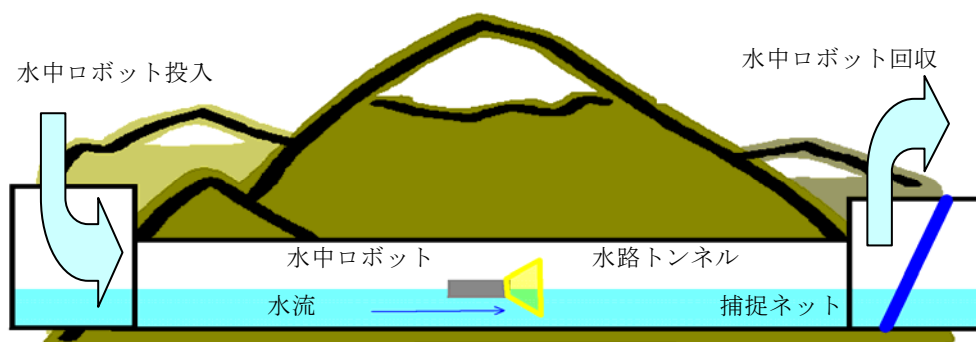


図-1 調査方法の概念図

2.2 水中ロボットの調査方法

水中ロボットを水路トンネル上流側の坑口から投入し、トンネル内を自然流下させて内部映像を撮影した後、トンネル下流側坑口に設置したロボット捕捉ネットにより捕捉回収(図-1)する。回収した水中ロボットから撮影した連続映像を取り出し、水路トンネル内面の劣化・損傷状況を静止画として抽出・報告する。また、トンネル内面の映像とカメラの位置をリンクして閲覧できるように、GISソフトを使用し、編集・報告する。水中ロボットによる定期的な調査実施により、映像に基づくトンネル覆工経年変化の確認も可能となる。

映像は濁度の影響で不鮮明のため省略した。気中照明は、LEDタイプ赤外照明 (DC12V, 波長: 810nm) を 100 個装備している。

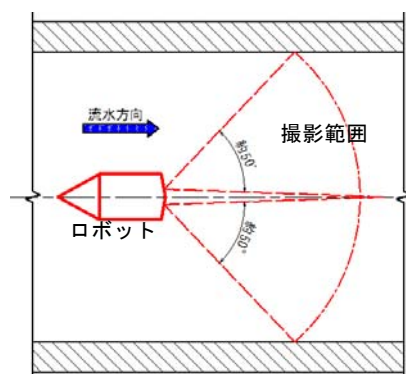


図-2 撮影範囲平面図

3. 水中ロボットの撮影映像の概要

3.1 水中ロボットの撮影範囲

水中ロボット²⁾³⁾の撮影範囲は、下流向き気中(左右 2 画面)、水中(左右 2 画面)である(図-2、図-3)。水中

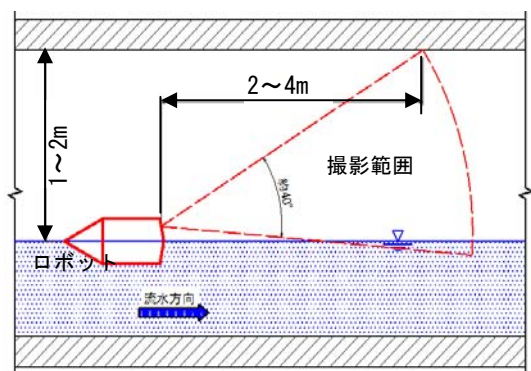


図-3 撮影範囲縦断面図

3.2 水中ロボットの撮影映像

気中撮影用カメラの有効画素は、1画面当り約38万画素(770H×490V)である。記録映像は気中と水中合わせて4画面の映像を、1画面(約30万画素:640H×480V)に記録している。水面から天井までの距離が約1mの場合(写真-2)と約2mの場合(写真-3)を例示する。水面から天井までの距離が1mから2mになると、撮影対象となる天井までの距離が2mから4mとなり、壁面の状態(付着物、湿潤状態、色)にもよるが照明が不足気味となり、画像の鮮明度が低下する。写真-2は、天井コンクリートの打継目や目地、型枠跡が確認出来るが、写真-3では、天井コンクリートの打継目は確認できるが、やや不鮮明となっている。



写真-2 気中映像(水路幅 約2m
水面から天井まで約1m)

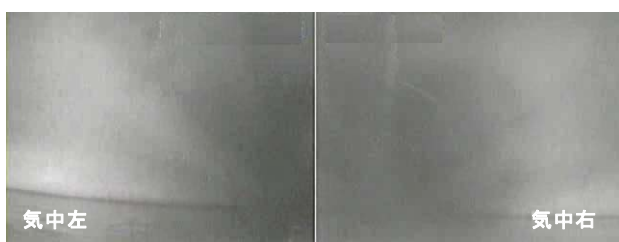


写真-3 気中映像(水路幅 約2m
水面から天井まで約2m)

4. 水中ロボットの改良(撮影画質向上)

4.1 水中ロボット改良の概要

水中ロボットの気中照明を補強(図-4,5)することで、撮影画質の向上を図った。気中照明は、30W 蛍光灯を2基補強した。

水中ロボットの撮影姿勢に影響を与えないよう、球形・半水没タイプ(直径約0.3m)とし、バッテリー電源は内蔵する構造とした。

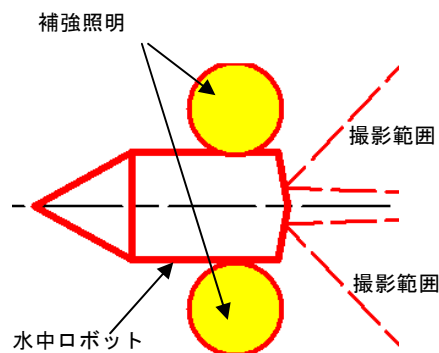


図-4 水中ロボット改良平面図

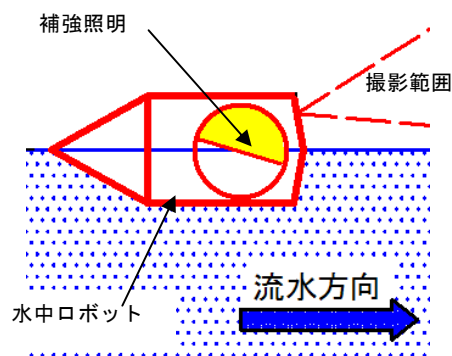


図-5 水中ロボット改良側面図

4.2 水中ロボットの撮影画質の向上

照明補強により、気中撮影画像の鮮明度が格段に向上し(写真-4)、劣化損傷の確認が容易になった。

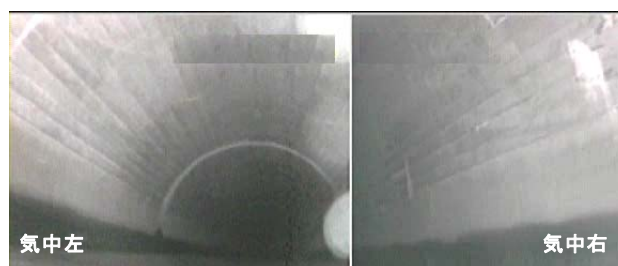


写真-4 気中映像(水路幅 約4m 水面から天井 約2m)

4.3 水中ロボットの適用範囲(照明補強時)

補強照明の追加により、より大断面の水路トンネルにも適用が可能となった。適用可能な水路トンネル断面は、幅・高さともに概ね2~4mである。調査可能な水路トンネル延長は従来と同様である。

5. 気中撮影型水中ロボットカメラの開発と劣化損傷計測事例

5.1 気中撮影型水中ロボットカメラの開発

筆者らは、トンネルの構造安全上で特に重要な気中部を重点的に撮影する水中ロボットを、平成20年度に開発した。カメラの向きは、下流向(1画面)、天井向(1画面)、左右側面向(各1画面)の合計4画面である(図-6~図-8)。気中照明は、蛍光灯照明(36w)を2本装備している。水中ロボット主要諸元は、幅0.4m、長0.7m、高0.3m、重量約25kg、主要材質:SUS304, FRP, アクリル。連続撮影時間は、約2時間で従来型的水中ロボットと同等である。

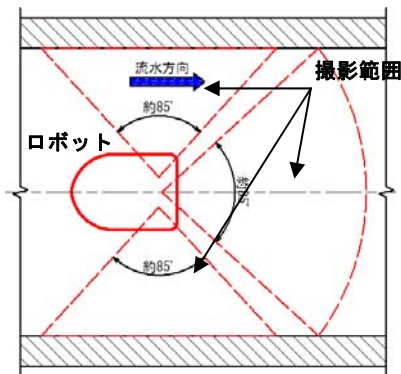


図-6 撮影範囲平面図

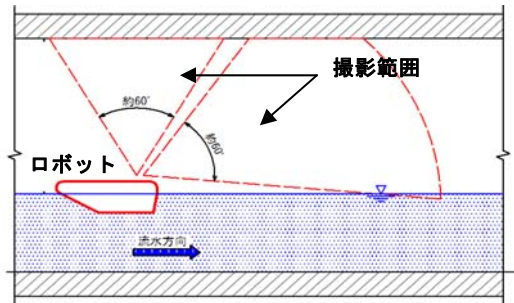


図-7 撮影範囲縦断面図

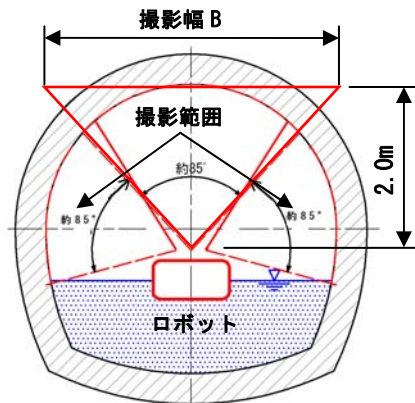


図-8 撮影範囲横断面図

5.2 気中撮影型水中ロボットカメラの撮影映像

カメラの有効画素は、1画面当たり約38万画素(840H×450V)である。記録映像は4画面の映像を、1画面(35万画素, 写真-5)にまとめたものと、そのまま4画面(各35万画素:720H×480V, 写真-6)を記録している。

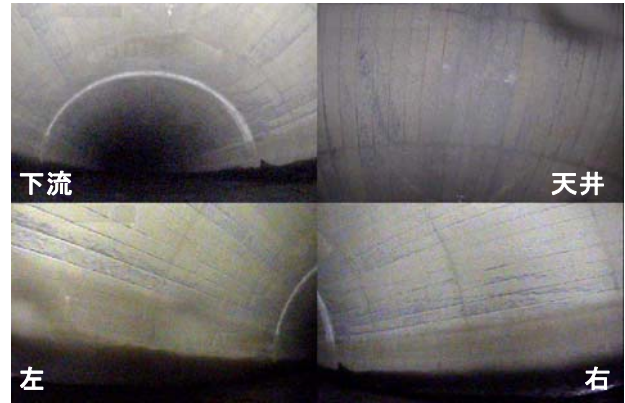


写真-5 気中撮影型水中ロボットカメラ撮影画像

5.3 画像による劣化損傷の計測事例

水路トンネル天井映像(撮影幅 $B=3,660\text{mm}$)を、縮尺1/10(印刷幅 $B_1=366\text{mm}$)で印刷し、ひび割れ幅を計測した結果、 $W_0=0.3\text{mm}$ となった。カメラから天井までの距離約2mの場合では、実際のひび割れ幅(W)は、 $W=W_0 \times B \div B_1=3\text{mm}$ と推測(写真-6)される。画像の状況にもよるが、写真-6のひび割れの画像状況から、 $W=2\text{mm}$ 程度のひび割れであれば検出が可能と考えられる。

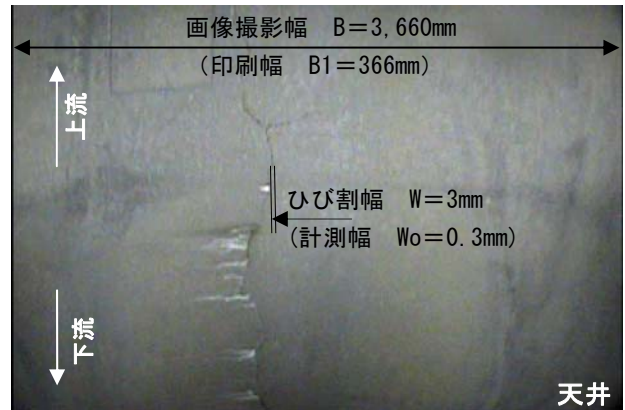


写真-6 画像によるひび割れ計測事例

5.4 解像度とひび割れ幅の検出精度

ひび割れ幅の検出精度は、コンクリート表面の汚れの状況、カメラの流速、浸入水、析出物、照明の状況等によって異なる。本事例の場合、画像撮影幅($B=3,660\text{mm}$)と水平解像度($n=720\text{dot}$)の状況($B/n=5\text{mm/dot}$)で、約3mm程度のひび割れを検出できる事が分かった。これは、1dotの大きさ($b=B/n=5\text{mm}$)の約半分程度のひび割れ幅を検出できる可能性、すなわち検出精度が $b/2$ 程度であること示している。ひび割れの検出精度は、概ね表-2に示す精度と推定される。

表-2 ひび割れ検出精度の推定

カメラから天井までの距離	画像撮影幅 B	水平解像度 N	$b = B/n$	検出精度 $b/2$
1.0m	1,830mm	720dot	2.5mm	1.2mm程度
2.0m	3,660mm	720dot	5.0mm	2.5mm程度

5.5 解像度とひび割れ幅の検出精度の向上

水路トンネル診断マニュアル⁴⁾に準拠した診断を実施する場合、幅2mm程度のひび割れを検出できる精度が求められる。水路トンネルの断面は、幅2m~4m、高2m~4m程度のものである。通水状態における、水面からトンネル天井までの距離は、水位管理の状態にもよるが、概ね2m以下（トンネル高さの1/2以下）となっている。

より高精度の点検を実施するために、高解像度のカメラを搭載することが考えられる。高解像度カメラによる検出精度の向上は、概ね表-3に示す精度と考えられる。

カメラ解像度を4倍にすると、検出精度は1/2となる。

表-3 カメラ解像度とひび割れ検出精度

カメラ画素数	画像撮影幅 B	水平解像度 N	$b = B/n$	検出精度 $b/2$
35万画素	3,660mm	720dot	5.0mm	2.5mm程度
120万画素	3,660mm	1300dot	2.8mm	1.4mm程度

※カメラから天井までの距離が2.0mの場合。

5.6 トンネル内部映像からの静止画像の作成

気中撮影型水中ロボットカメラが撮影した、天井方向映像と左右側壁方向映像(動画)から、それぞれ静止画像(写真-7 天井カメラ画像作成例, 写真-8 左側壁カメラ画像作成例)を作成し、覆工内面の劣化損傷の視認性向上と、健全度診断への適用性の検討を行った。

天井カメラで撮影した映像から作成した画像は、水路トンネル覆工内面の劣化損傷の視認性と検出精度が、動画によるものに比べて格段に向上し、トンネル健全度診断の基礎データとして非常に活用することができる。左側壁カメラで撮影した映像から作成した画像も、天井画像と同様にトンネル健全度診断に対して効果があるが、カメラの撮影方向を斜め前方としていたため、天井画像に比べて解像度がやや低下する傾向となった。

6. まとめと今後の課題

6.1 まとめ

改良・開発した水中ロボットカメラにより、下記的水路トンネル調査が実施可能となった。

- ① 水路トンネルを断水することなく、長距離の水路トンネルの全線調査が可能である。最大7.9kmの実績がある。
- ② 幅・高さともに4m程度で水面から天井までの高さが2m程度の比較的大断面の水路トンネルにも適用が可能である。
- ③ 気中撮影型水中ロボットは、カメラ配置(下流・天井・右・左)と映像記録装置の構成を工夫したことで、死角の少ない鮮明な連続デジタル映像を撮影し、劣化損傷の規模を概略計測することが可能となった。



写真-7 天井カメラ画像作成例



写真-8 左側壁カメラ画像作成例

- ④ 水路トンネルの大きさや、内面の状況によるが、ひび割れの検出精度は1mm～2mm程度で、水路トンネル診断マニュアル⁴⁾に準じた健全度診断の基礎資料を作成することが出来る。
- ⑤ 天井方向映像と左右側壁方向映像(動画)から、それぞれ静止画像を作成することで、覆工内面の劣化損傷の視認性と検出精度が格段に向上し、健全度診断への適用性が確認された。

6.2 今後の課題

水中ロボットカメラの調査精度を、断水状態の目視調査の精度に近づけていくために、次のような検討課題が考えられる。

- ① 劣化損傷の検出精度向上のために、カメラや映像記録装置の高解像度化が必要である。
- ② 死角のないより鮮明な映像撮影のために、カメラや照明の配置等について再検討・調整が必要である。
- ③ 天井方向映像と左右側壁方向映像(動画)から、それ

ぞれ静止画像を作成することは出来るが、それらを1枚の静止画像として接合出来るよう、画像処理の高度化が必要である。

参考文献

- 1) 今井田敏宏, ほか: 送水トンネル崩落事故と今後の点検のあり方について, 土木学会安全問題研究論文集, Vol. 2, pp. 137-142, 2007
- 2) 復建調査設計株式会社ホームページ
<http://www.fukken.co.jp/download/pdf/3-19-01.pdf>
- 3) 今井田敏宏, ほか: 長距離水路トンネル覆工内面調査のための水中ロボットの開発, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, VII-30, 2008
- 4) 水路トンネル診断マニュアル(案), 平成5年4月, 通商産業省資源エネルギー庁
(2009年8月7日受付)