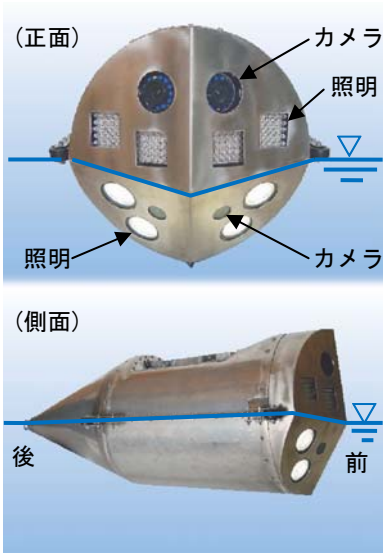
長距離水路トンネル内面調査ロボットの適用性に関する検討

復建調査設計株式会社　正会員　○今井田　敏宏，フェロー　吉浪　康行
松石　成生，　石村　寿夫
株式会社ジオデザイン　菊池　信夫　株式会社ゲット　遠藤　茂

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ていない場合が多い．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

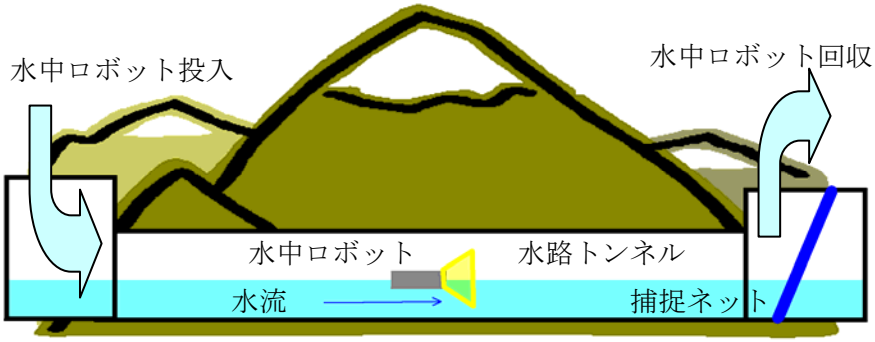
（１）水中ロボットの機能と特長

表－1　水中ロボットの概要

項　　目	機能　・　特長
主 要 諸 元	・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	・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	・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	・内空断面寸法　幅 1.0m～3.0m，高 1.0m～3.0m 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 7.0km 程度（流速 1.0m/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）

（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，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．

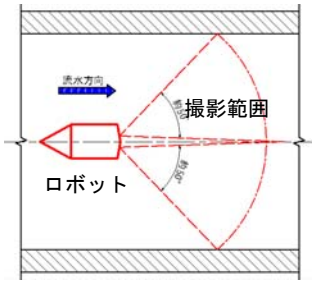


図－１　調査方法の概念図

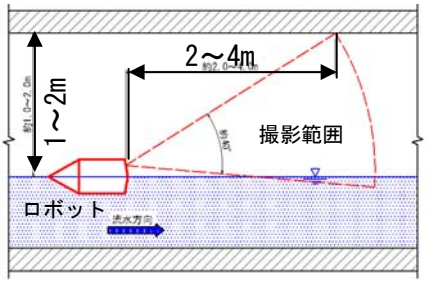
３．水中ロボットの撮影映像の概要

（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



図－3　撮影範囲縦断面図

（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．

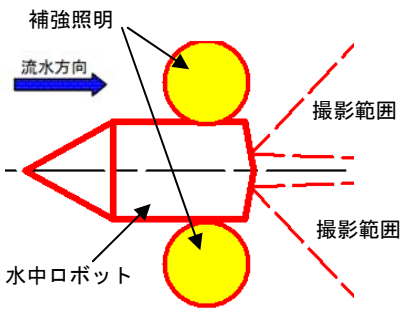
写真－2　気中映像（水路幅　約 2m　水面から天井まで約 1m）

写真－3　気中映像（水路幅　約 2m　水面から天井まで約 2m）

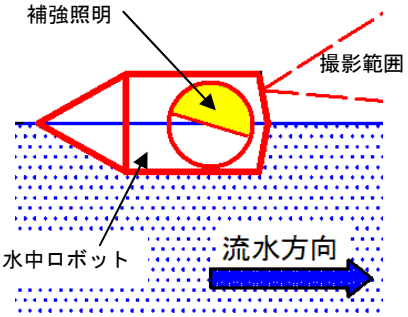
４．水中ロボットの改良（撮影画質向上）

（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



図－4 水中ロボット改良平面図

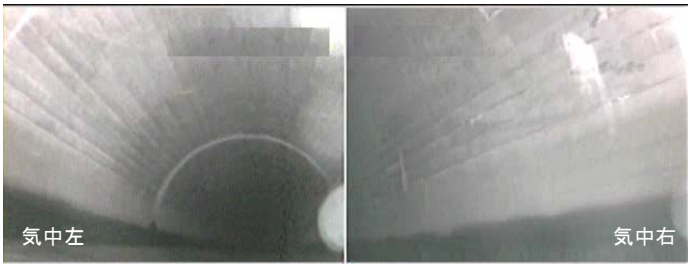


図－5 水中ロボット改良側面図

約 0.3m）とし，バッテリー電源は内蔵する構造とした．

（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）

（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 2.0～4.0m 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．

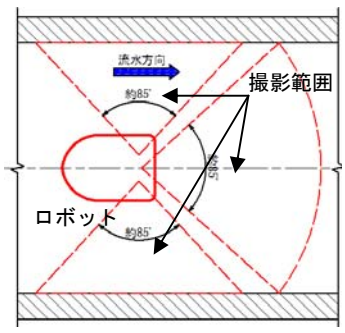
５．気中撮影型水中ロボットの開発と劣化損傷計測事例

（１）気中撮影型水中ロボットの開発

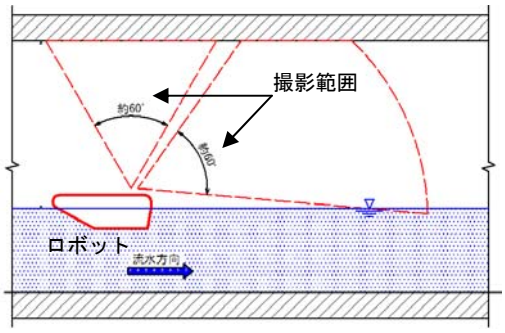
筆者らは，トンネルの構造安全上で特に重要な気中部を重点的に撮影する水中ロボットを，平成 20 年度に開発した．カメラの向きは，下流向(1 画面)，天井向(1 画面)，左右側面向(各 1 画面)の合計 4 画面である(**図－6～図－8**)．気中照明は，蛍光灯照明（36w）を 2 本装備している．水中ロボット主要諸元は，幅 0.4m，長 0.7m，高 0.3m，重量約 25kg，主要材質：SUS304，FRP，アクリル．連続撮影時間は，約 2 時間で従来型の水中ロボットと同等である．

（２）気中撮影型水中ロボットの撮影映像

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



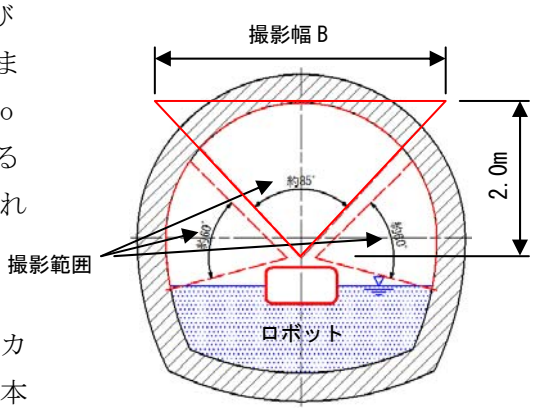
図－6　撮影範囲平面図



図－7　撮影範囲縦断図

（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＝3,660mm）を，縮尺 1/10（印刷幅 B1＝366mm）で印刷し，ひび割れ幅を計測した結果，Wo＝0.3mm となった．カメラから天井までの距離約 2.0m の場合では，実際のひび割れ幅（W）は，W＝Wo×B÷B1＝3.0mm と推測（**写真－5**）される．画像の状況にもよるが，**写真－5** のひび割れの画像状況から，W＝2mm 程度のひび割れであれば検出が可能と考えられる．



図－8　撮影範囲横断図

（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=3,660mm)と水平解像度(n=720dot)の状況(B／n＝5.0mm/dot)で、約 3mm 程度のひび割れを検出できる可能性がある事が分かった．これは、1dot の大きさ(b＝B/n＝5mm)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

６．まとめ

改良・開発した水中ロボットは，下記の性能を有する．

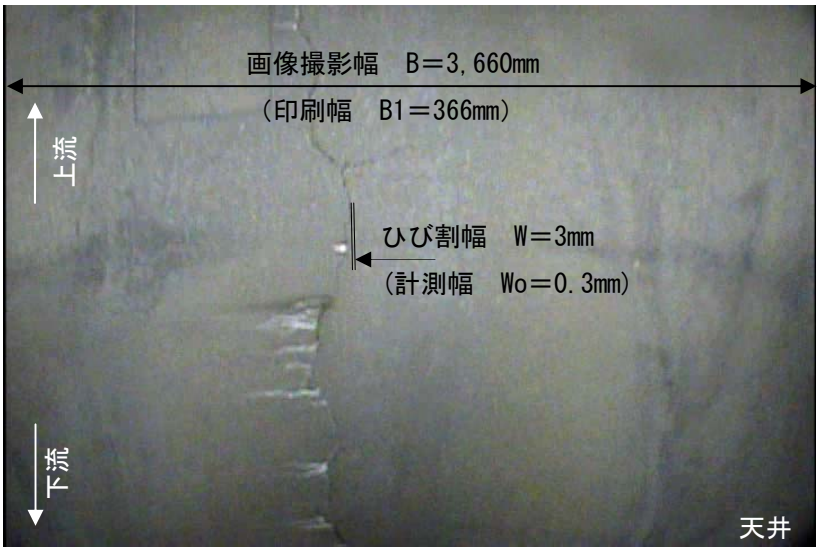
① 水路トンネルを断水することなく，長距離の水路トンネルの全線調査が可能である．最大 7.9km の実績がある．

② 幅・高さともに 4.0m 程度で水面から天井までの高さが 2.0m 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．

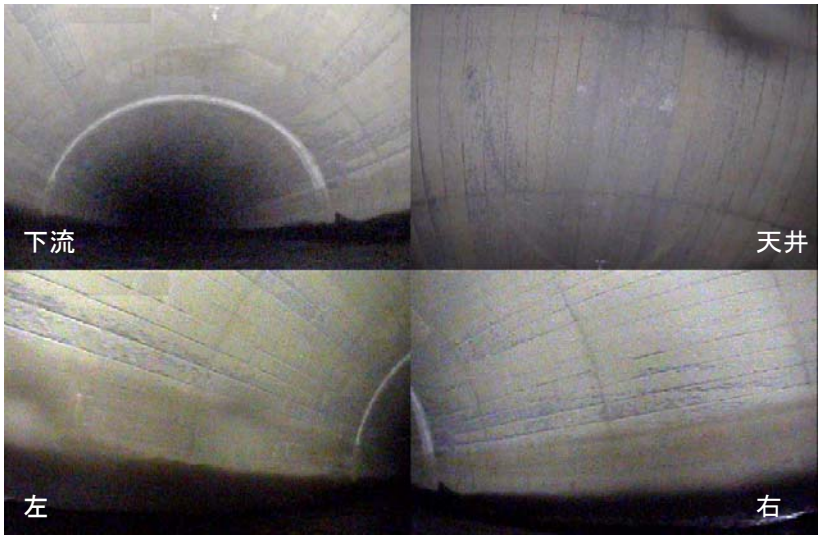
③ 気中撮影型水中ロボットは，カメラ配置（下流・天井・右・左）と映像記録装置の構成を工夫したことで，死角の少ない鮮明な連続デジタル映像を撮影し，劣化損傷の規模を概略計測することが可能となった．

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．

今後も，カメラや映像記録装置の高解像度化や撮影画像のシームレス化等，精度向上と画像処理の高度化，適用範囲の拡大を目指しながら，実用に供したい．



写真－5　画像によるひび割れ計測事例



写真－6　気中撮影型水中ロボット撮影画像(4 画面)

参考文献

1)平成 19 年度安全問題研究論文集，(社)土木学会安全問題研究委員会，Vol.2，2007 年 11 月，pp.137-142

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)平成 20 年度第 60 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，(社) 土木学会中国四国支部，2008 年 5 月，Ⅶ－30，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

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