

# 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

復建調査設計株式会社 正会員 今井田 敏宏  
復建調査設計株式会社 フェロー 吉浪 康行  
復建調査設計株式会社 松石 成生

## 1. はじめに

水路トンネルは、国民の生活や産業を支える重要な基盤施設の一つであるものの、その存在は、一般にあまり知られていない。水路トンネルは、上水・工業用水、農業用水、発電用水等の、導・送・配水を目的として、高度経済成長期と重なる昭和 30 年代から 40 年代にかけて築造されたものが多い。そのため、施設の老朽化が徐々に進行しており、段階的な施設の補修・改築・更新が計画されている施設もある。一方で、代替の送水ルートが無く断水が許容されないといった社会的制約のほか、水路トンネルの構造的（小断面・長距離）制約など、施設状態の点検調査が困難な施設も多く、施設維持管理上の課題となっている。平成 18 年 8 月に発生した広島県の送水トンネル崩落事故を契機に、これら施設の定期点検の重要性が改めて確認され、合理的かつ効率的な点検調査法の確立が望まれている。そのような中、水路トンネルを断水して詳細な点検調査を実施する前段階として、通水状態にある長距離の水路トンネルでも、比較的簡単に点検調査が実施可能な機材を開発したので、その概要を発表する。

## 2. 水路トンネル点検調査法の概要

### 2.1 点検調査の概要

水路トンネルを断水状態として点検するためには、ユーザーの理解を得ることはもとより、様々な調整を必要とするため、非常に困難を伴う場合が多い。そのため、通水状態で実施可能な点検調査法により、トンネル内部の劣化・損傷の状況を点検調査しようとする事が多い。(図 - 1 参照)

### 2.2 通水状態のトンネル点検調査法

通水状態にある水路トンネルの点検調査法として、水中カメラによる方法とダイバーによる方法の 2 種類がある。ダイバーによる方法は、水路トンネル断面の大きさや流速等、制約条件が多く、危険を伴うため、調査範囲が限定されることが多い。このため、通水状態での点検調査は、一般に水中カメラによることが多い。水中カメラによる調査は、水中カメラへの電力供給や映像情報伝達等のためのケーブルを必要とするため、その長さによって調査可能範囲（最長 1.5km）に制約を受ける。また、曲線を有する水路トンネルでは、ケーブルが曲線部内側壁に強く接触（摩擦）するため、ケーブル損傷もしくは側壁損傷の懸念から、トンネル曲線部より下流側は調査不可能となることが多い。(表 - 1 参照)

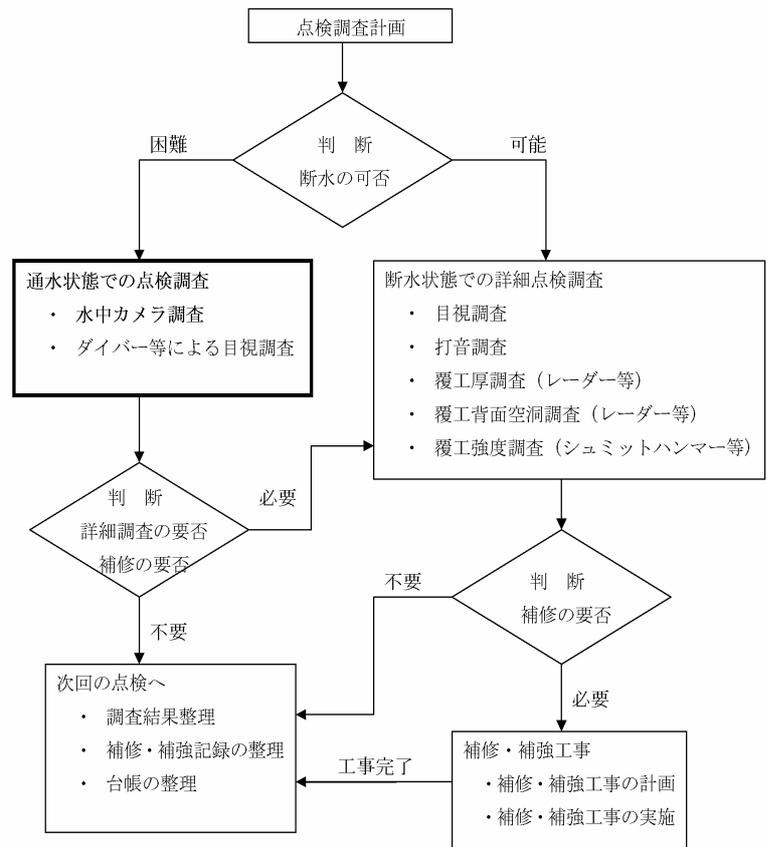


図 - 1 水路トンネルの点検管理フロー

表 - 1 水中カメラ適用一覧表

機材名	機材写真	調査概要	特徴	主な仕様, 能率等	適用範囲
水中調査ロボット (DELTA-150)		上流側から下流に向かってケーブルで曳航しながらDELTA-150を流し、テレビカメラで撮影, 記録する。	水中部(水路底面, 水路側壁)の撮影が可能 水中の上下水平方向への移動が可能	W:0.6m,L:0.9m H:0.6m	適用トンネル断面: 幅1.0m以上 高さ1.0m以上 焦点距離:25cm 流速 2m以下 水圧 15MPa以下 調査延長 250m以下 直線部のみ
水中調査ロボット (ビーバーシステム)		上流側から下流に向かってケーブルで曳航しながらロボットを流し、テレビカメラで撮影, 記録する。	気中部(水路天井, 側壁)の撮影が可能	W:0.5m,L:0.7m H:0.5m	適用トンネル断面: 幅1.0m以上 高さ0.5m以上(水面上) 焦点距離:25cm 流速 1m以下 調査延長 1000m以下 直線部のみ
水中調査ロボット (RTV-KAM)		上流側から下流に向かってケーブルで曳航しながらロボットを流し、テレビカメラで撮影, 記録する。	水中部(水路底面, 水路側壁)の撮影が可能 水中の上下水平方向への移動が可能	W:0.7m,L:1.85m H:0.55m	適用トンネル断面: 幅直径1.0m以上 焦点距離: 流速 2.5m/s以下 調査延長 1500m以下

### 3. 水中ロボット開発の概要

#### 3.1 開発目標

- 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も点検調査が可能なこと。
- 水路トンネル覆工内面の劣化・損傷状況が, 安定した連続映像としてビデオ撮影可能であること。
- 水中ロボットは小型軽量であること。(人力調査が可能)点検調査費が安価であること。
- 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)を概略診断できること。



写真 - 1 水中ロボットのイメージ

#### 3.2 開発した水中ロボットの概要

項目	概要・特徴
水中ロボット 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 4台 (水面上 2台, 水中 2台), バッテリー 照明 (白色 LED・他), 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
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。
対象とする トンネル諸元	内空断面寸法 幅 1.0m~3.0m, 高 1.0m~3.0m 程度 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)

#### 3.3 調査技術の概要

調査は、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する。(図-2)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

トを使用し、編集・報告する。  
 (写真 - 5) 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。

### 3.4 調査技術の適用事例

#### 3.4.1 調査対象トンネル

- ・トンネル断面 幅 2.00m  
高 2.05m
- ・トンネル延長 約 230m
- ・曲線 R = 30m (2箇所)
- ・水深 約 1.35m  
(水面から天井まで約 0.70m)
- ・流速 約 1.05m/s  
(調査時間 3分40秒)

#### 3.4.2 水中ロボット投入

水路トンネルの上流側坑口から水中ロボットを投入(写真 - 2)する。水中ロボットの投入は、ロープ等で吊り下げ、水面に浮かせた状態から撮影調査を開始する。

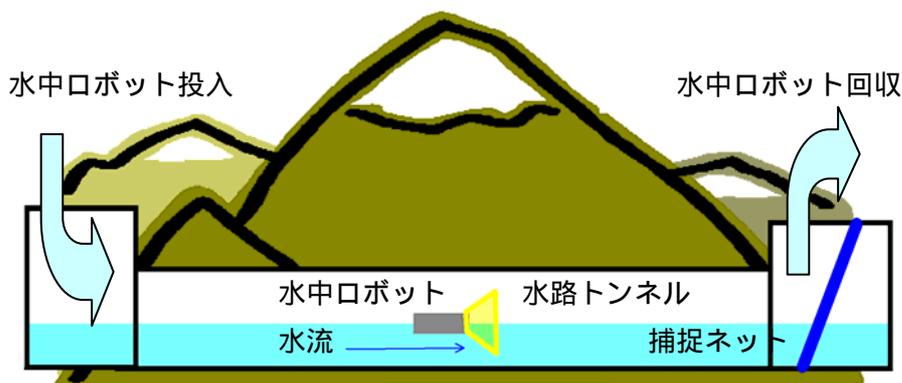


図 - 1 調査概要図



写真 - 2 水中カメラ投入

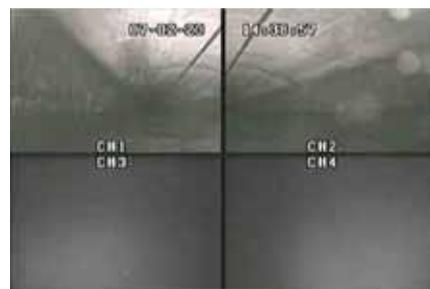


写真 - 3 撮影した映像  
(上段: 気中 下段: 水中)

#### 3.4.3 水中ロボット流下・トンネル内面映像撮影

水中ロボットは、水路トンネル内の水の流れに乗って流下しながら、トンネル覆工内面(気中部・水中部)の状態を、ビデオカメラにより連続映像(写真 - 3)として撮影する。撮影する映像は、下流向きの映像で、気中部が左右2画面、水中部も左右2画面としている。カメラ・照明・データ記録装置への電力供給は、水中カメラ容器内に格納したバッテリーから行なう。撮影した映像は、水中カメラ容器内に格納したデータ記録装置に記憶させる。トンネルの曲線箇所においても、水中カメラの姿勢が安定し、良好な映像を撮影できるよう、水中カメラ容器の形状・構造を決定している。



写真 - 4 下流側捕捉ネット

#### 3.4.4 水中ロボット回収

トンネル下流側の坑口部分に、水中ロボット捕捉用のネットを設置(写真 - 4)し、流下してくる水中ロボットを捕捉・回収する。そして、回収した水中ロボットから撮影した映像データを取り出す。

#### 3.4.5 調査結果報告

撮影した映像から、トンネル覆工内面の劣化損傷の状況を確認した。トンネル覆工の劣化損傷状態は、クラック・浸入水等を、一覧表の形式でまとめるとともに、GIS上でトンネル内の位置情報とリンクさせ、画像写真(写真 - 5)の状態を報告した。映像による劣化損傷の状況から、トンネル覆工の健全度診断もあわせて実施することが可能となった。

## 4. おわりに

開発した水中ロボットにより、以下の調査が可能となった。

水路トンネルを断水することなく、2.0kmを超える長距離の水路トンネルも全線調査が可能。

平面的な曲線のある水路トンネルも調査が可能。

水中ロボットの形状を工夫したことで、下流向きの安定した映像を撮影することが可能。安全かつ容易（素早く）に点検調査が実施可能。（大きな地震の後など、臨時点検にも活用が可能）

水中ロボットによる定期的な点検調査を実施することで、

覆工内面の経年劣化の進行をいち早く発見し、早期の対応が可能。

開発した水中ロボットを使用して、通水中の長距離水路トンネルの点検調査を3事例（延長：2.8km、4.6km、7.8km）実施し、所定の調査結果を得ることができた。

今後も、水中カメラの性能向上や適用範囲の拡大を目指した技術開発を継続したい。

#### 参考文献

・2007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 pp137-142



写真 - 5 劣化損傷の報告映像（静止画抽出）  
（左下：平面位置 右：気中拡大映像）